

(2016年版)

# 注册电气工程师 执业资格考试专业考试 复习指导书

**(供配电专业)**

注册电气工程师执业资格考试复习指导教材编委会 编

**下册**



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是注册电气工程师执业资格考试系列教材之一。全书共 15 章，章、节的编排与《注册电气工程师（供配电）执业资格考试专业考试大纲》相对应，按照 2016 年新规程规范清单对教材内容进行了更新，为原书的修订版。教材包含了供配电、建筑电气、电气传动等专业的相关内容，是一本较完整的复习资料。教材中的重要内容增加了出处，以便于考生对照复习。修订后的教材内容更加丰富、全面、实用、贴近考试，得到了命题专家组的认可。

本书可供参加注册电气工程师（供配电）执业资格考试的专业技术人员复习参考使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

注册电气工程师执业资格考试专业考试复习指导书：  
2016 年版·供配电专业：全 2 册/注册电气工程师执业资格考试复习指导教材编委会编. —北京：中国电力出版社，  
2016.6（2016.7 重印）

ISBN 978-7-5123-9194-9

I. ①注… II. ①注… III. ①电气工程—资格考试—自学参考资料 ②供电系统—资格考试—自学参考资料 ③配电系统—资格考试—自学参考资料 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 073582 号

中国电力出版社出版、发行  
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016 年 6 月第一版 2016 年 7 月北京第二次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 66.5 印张 1635 千字  
印数 3001—5000 册 定价 260.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 注册电气工程师执业资格考试复习指导教材

## 编 委 会

主 任 李爱民  
副 主 任 郝士杰  
委 员 浦文宗 张玉军 杨月红 张蜂蜜 宋志昂  
任元会 姚家祎 黄纯懿 邵晓钢 张文才  
杨德才 赵登福 陶 勤 张 农 叶四新  
孙成群  
顾 问 弋东方

主 编 济钢集团国际工程技术有限公司 黄纯懿  
副 主 编 中国航空工业规划设计研究院 任元会  
核工业第二研究设计院 姚家祎  
中国航天建筑设计研究院 卞锐生

章 名	编写人	校审人
1 安全	任元会	黄纯懿
2 环境保护与节能	黄纯懿	任元会
3 负荷计算及负荷分级	卞铠生	任元会
4 110kV 及以下供配电系统	濮松夫	姚家祎
5 110kV 及以下变配电站站址选择及 电气设备布置	濮松夫	姚家祎
6 短路电流计算	姚家祎	濮松夫
7 110kV 及以下电气设备选择	姚家祎 任元会	濮松夫 姚家祎
8 导体选择、电缆线路和架空线路	卞铠生	任元会
9 变配电站控制、测量仪表、继电 保护及自动装置	姚家祎	黄纯懿
10 变配电站操作电源	姚家祎	黄纯懿
11 过电压保护及防雷	李鸿路 孙成群	卞铠生
12 接地装置	李鸿路	卞铠生
13 照明	任元会	姚家祎
14 电气传动	黄纯懿	濮松夫
15 建筑智能化	张路明	朱立彤

# 前 言

为加强对勘察设计行业的管理,保证工程质量,维护社会公共利益和人民生命财产安全,规范设计市场,人事部、建设部先后印发了《勘察设计注册工程师制度总体框架及实施规划》(人发〔2001〕5号)和《注册电气工程师执业资格考试实施办法》(人发〔2003〕25号)等文件,启动了勘测设计执业资格注册管理制度。自2005年起,开始组织进行注册电气工程师执业资格考试。

为了便于考生系统地复习,全面掌握注册电气工程师执业资格考试大纲所涉及的内容,提高复习效率,我们组织有关方面的专家成立了注册电气工程师执业资格考试复习指导教材编委会,按照考试大纲的要求,编写了注册电气工程师系列复习指导教材。

近几年来,我国的工程建设规模和技术水平有了很大提高,许多工程建设标准和规程规范都进行了修订,教材中的有些内容已不能与现行的规程规范相适应,为此我们组织专家对教材进行了重新修编,以满足考生应考复习的需要。

此次修编,仍根据《注册电气工程师(供配电)执业资格考试专业考试大纲》所列考试范围,按照2016年报名通知中新规程规范清单,对教材进行更新。同时吸收了培训教师、考生在使用教材时提出的意见和建议,对本书教材内容进行了补充完善,对教材中的重要内容增加了出处,文中摘录规范处,条文编号及图、表编号,直接采用规范本身的编号,文中直接引用规程规范的部分,字体均为楷体,以便于考生对文中内容的区分和对照复习。

教材包含了供配电、建筑电气、电气传动等专业的相关内容,是一本较完整的复习资料。修订后的教材内容更加丰富、全面、实用、贴近考试,得到了命题专家组的认可。可供参加注册电气工程师(供配电)执业资格考试的专业技术人员复习参考。

全书共15章,章、节的编排与《注册电气工程师(供配电)执业资格考试专业考试大纲》相对应,为原书的修订版。本次修订由黄纯懿担任主编,任元会、姚家祎、卞铠生担任副主编。在本书的编审过程中,得到了不少单位和专家的大力支持,并提出了很多宝贵意见和建议,对此我们表示衷心的感谢。

由于考试内容涉及范围广,且修编时间很紧,书中难免存在疏漏之处,真诚希望读者提出宝贵意见,以便本书再版时改进。意见和建议请发至 cceen2@163.com 邮箱中。

注册电气工程师执业资格考试复习指导教材编委会

二〇一六年五月



## 目 录

前言

## 上 册

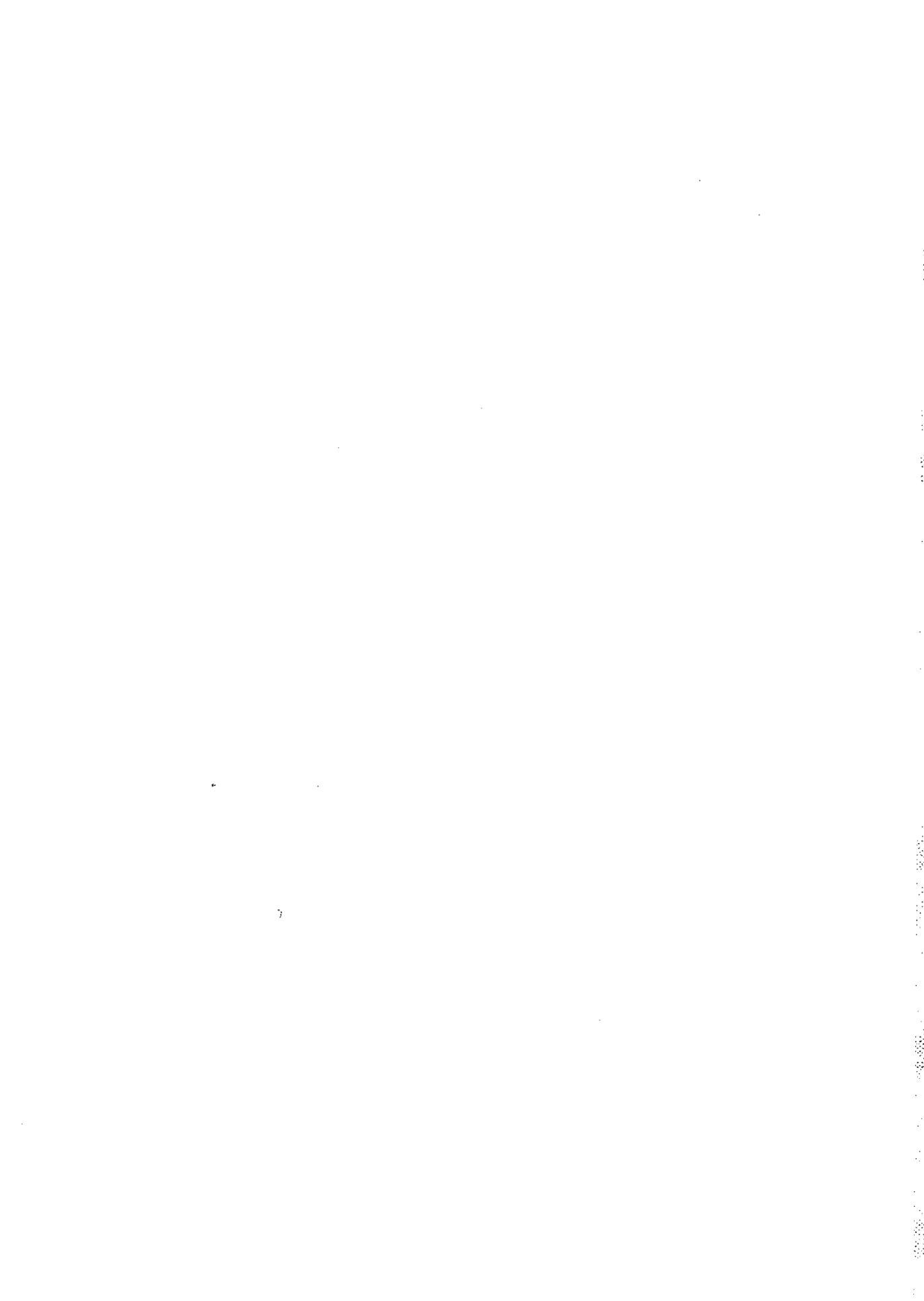
<b>1 安全</b> .....	1
1.1 工程建设标准(电气专业)强制性条文 .....	1
1.2 电流对人体的效应(根据 GB/T 13870.1—2008《电流对人和家畜的效应 第1部分:通用部分》) .....	1
1.3 安全电压及电击防护的基本要求 .....	15
1.4 低压配电系统接地故障保护和等电位联结 .....	21
1.5 危险环境电力装置的特殊设计要求 .....	32
1.6 电气设备防误操作的要求及措施 .....	59
1.7 电气工程设计的防火要求及措施 .....	60
1.8 电力设施抗震设计和措施 .....	67
<b>2 环境保护与节能</b> .....	71
2.1 电气设备对环境的影响及防治措施 .....	71
2.2 供配电系统设计的节能措施 .....	78
2.3 提高电能质量的措施 .....	114
2.4 节能型电气产品的选用方法 .....	127
<b>3 负荷计算及负荷分级</b> .....	141
3.1 负荷计算 .....	141
3.2 负荷分级 .....	174
<b>4 110kV 及以下供配电系统</b> .....	181
4.1 供配电系统 .....	181
4.2 电能质量 .....	199
4.3 无功补偿 .....	217
<b>5 110kV 及以下变配电站站址选择及电气设备布置</b> .....	226
5.1 变配电站站址选择 .....	226
5.2 变配电站型式 .....	228
5.3 变配电站的布置设计 .....	230
5.4 特殊环境配电装置设计 .....	242
5.5 各级电压配电装置的安全净距 .....	246
<b>6 短路电流计算</b> .....	250
6.1 短路电流计算方法 .....	250
6.2 短路电流计算结果的应用 .....	281

6.3	影响短路电流的因素及限制短路电流的措施	281
6.4	短路电流在导体和电器中引用的热效应	282
<b>7</b>	<b>110kV 及以下电气设备选择</b>	<b>284</b>
7.1	常用电气设备选择的技术条件和环境条件	284
7.2	高压变压器配电设备的选择	289
7.3	低压配电设备及电器元件的选择	313
<b>8</b>	<b>导体选择、电缆线路和架空线路</b>	<b>342</b>
8.1	导体选择	342
8.2	电缆线路	358
8.3	架空线路	378
<b>9</b>	<b>变配电站控制、测量仪表、继电保护及自动装置</b>	<b>404</b>
9.1	变配电站控制、测量和信号设计要求	404
9.2	电气设备和线路继电保护配置、整定计算及选型的原则	420
9.3	变配电站自动装置及综合自动化的设计要求	442
<b>10</b>	<b>变配电站操作电源</b>	<b>448</b>
10.1	系统设计	448
10.2	直流负荷	450
10.3	保护与监控	453
10.4	设备选择	460
10.5	设备布置	480
10.6	专用蓄电池室对相关专业的要求	481
10.7	交流操作电源的设计要求	482

## 下 册

<b>11</b>	<b>过电压保护及防雷</b>	<b>487</b>
11.1	电气装置的过电压保护	487
11.2	电气装置的绝缘配合	509
11.3	建筑物防雷的分类及措施	517
11.4	建筑物防雷装置和防雷电磁脉冲设计的要求和计算方法	540
<b>12</b>	<b>接地装置</b>	<b>566</b>
12.1	高压电气装置接地	566
12.2	发电厂和变电站的接地网	567
12.3	高压架空线路的接地	583
12.4	6kV ~ 220kV 电缆线路的接地	585
12.5	高压配电电气装置的接地	587
12.6	低压系统的接地和保护总等电位连接系统	588
12.7	接地电阻的计算	605
12.8	发电厂和变电站的人地故障电流及地电位升高的计算	610

<b>13 照明</b> .....	613
13.1 照明方式和照明种类.....	613
13.2 照度标准和照明质量.....	615
13.3 光源、电器附件及灯具的选择.....	636
13.4 照明配电及控制.....	647
13.5 照度计算.....	651
13.6 照明工程节能标准与措施.....	657
<b>14 电气传动</b> .....	668
14.1 电气传动系统的组成及分类.....	668
14.2 电动机的选择.....	678
14.3 交、直流电动机的起动方式及起动校验.....	698
14.4 交、直流电动机调速技术.....	720
14.5 交、直流电动机电气制动方式及计算方法.....	789
14.6 电动机保护配置及计算方法.....	794
14.7 低压交流电动机控制电器的选择.....	802
14.8 电动机调速系统性能指标.....	816
14.9 PLC 的应用.....	820
<b>15 建筑智能化</b> .....	846
15.1 火灾自动报警系统.....	846
15.2 建筑设备监控系统.....	885
15.3 安全防范系统.....	911
15.4 通信网络系统.....	930
15.5 综合布线系统.....	947
15.6 有线电视系统.....	959
15.7 公共广播、厅堂扩声及会议系统.....	969
15.8 公共显示装置与呼叫信号系统.....	993
15.9 智能化集成系统.....	1004
15.10 弱电机房工程设计与环境要求.....	1007
15.11 室内弱电线路敷设.....	1017
15.12 室外弱电线路敷设.....	1021
附录一 关于印发《注册电气工程师执业资格制度暂行规定》 《注册电气工程师执业资格考试实施办法》和 《注册电气工程师执业资格考核认定办法》的通知.....	1025
附录二 关于公布注册电气工程师执业资格考试专业考试大纲的通知.....	1029
附录三 专业考试注意事项.....	1042



## 过电压保护及防雷

### 11.1 电气装置的过电压保护

#### 11.1.1 电气装置过电压种类

##### 11.1.1.1 电气装置绝缘上作用的电压

根据 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中的规定,交流电气装置绝缘上作用的电压有:

- 1 持续运行电压,其值不超过系统最高电压,持续时间等于设备设计寿命。
- 2 暂时过电压,包括工频过电压和谐振过电压。
- 3 操作过电压。
- 4 雷电过电压。
- 5 特快速瞬态过电压 (VFTO)。

##### 11.1.1.2 相对地暂时过电压和操作过电压标么值的基准电压

根据 GB/T 50064—2014 中的规定,相对地暂时过电压和操作过电压标么值的基准电压应符合下列规定:

- 1 当系统最高电压有效值为  $U_m$  时,工频过电压的基准电压 (标么值 1.0) 应为  $U_m/\sqrt{3}$ 。
- 2 谐振过电压、操作过电压和 VFTO 的基准电压 (标么值 1.0) 应为  $\sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$ 。

##### 11.1.1.3 系统最高电压的范围

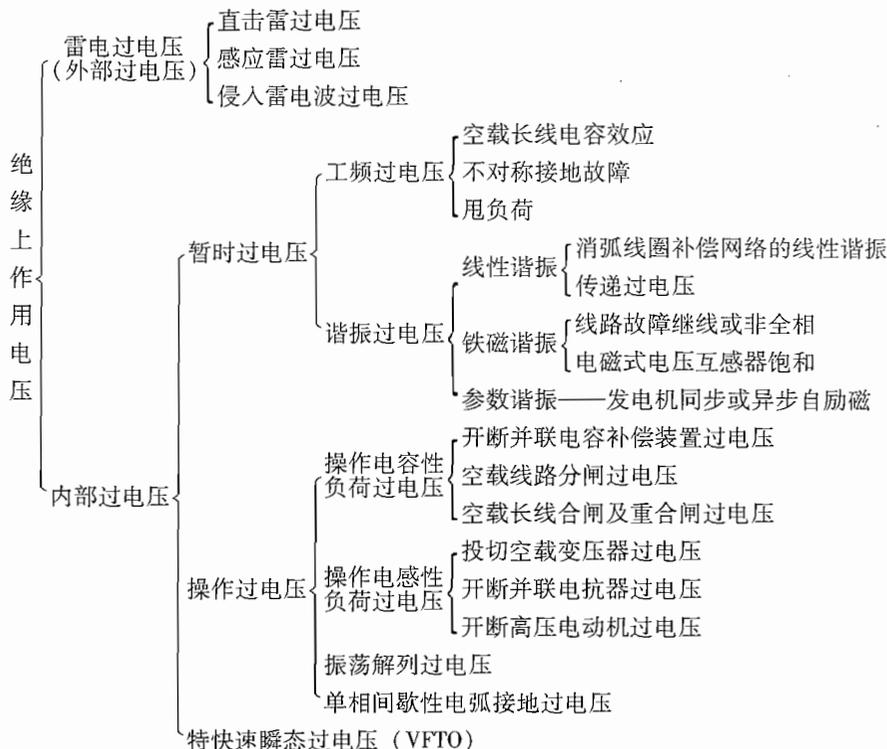
根据 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中的规定,系统最高电压的范围分为:

- 1 范围 I,  $7.2\text{kV} \leq U_m \leq 252\text{kV}$ 。
- 2 范围 II,  $252\text{kV} \leq U_m \leq 800\text{kV}$ 。

注:本考试内容仅限于 110kV 及以下电压等级。

##### 11.1.1.4 过电压的分类及其产生原因

交流电气装置的过电压,按其起因、幅值、波形及持续时间,归纳如下:



### 11.1.2 暂时过电压及其限制

暂时过电压包括工频过电压和谐振过电压。

#### 11.1.2.1 工频过电压及限制

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定，工频过电压及其对保护设计的要求：

4.1.1 工频过电压幅值应符合下列要求：

(1) 范围 I 中的不接地系统工频过电压不应大于  $1.1\sqrt{3}$  (标么值)。

(2) 中性点谐振接地、低电阻接地和高电阻接地系统工频过电压不应大于  $\sqrt{3}$  (标么值)。

(3) 110kV 系统，工频过电压不应大于 1.3 (标么值)。

(4) 变电站内中性点不接地的 35kV 和 66kV 并联电容补偿装置系统工频过电压不应超过  $\sqrt{3}$  (标么值)。

4.1.4 设计时应避免 110kV 有效接地系统中偶然形成局部不接地系统产生较高的工频过电压，其措施应符合下列要求：

1 当形成局部不接地系统，且继电保护装置不能在一定时间内切除 110kV 变压器的低、中压电源时，不接地的变压器中性点应装设间隙。当因接地故障形成局部不接地系统时，该间隙应动作；系统以有效接地系统运行发生单相接地故障时，间隙不应动作。间隙距离还应兼顾雷电过电压下保护变压器中性点标准分级绝缘的要求。

2 当形成局部不接地系统，且继电保护装置设有失地保护可在一定时间内切除 110kV 变压器的三次、二次绕组电源时，不接地的中性点可装设无间隙金属氧化物接闪

器 (MOA), 应验算其吸收能量。该接闪器还应符合雷电过电压下保护变压器中性点标准分级绝缘的要求。

### 11.1.2.2 谐振过电压及其限制

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定, 谐振过电压及其对保护设计的要求:

4.1.5 对于线性谐振和非线性铁磁谐振过电压, 应采取防止措施避免其产生, 或用保护装置限制其幅值和持续时间。

4.1.6 对于发电机自励磁过电压, 可采用高压并联电抗器或过电压保护装置加以限制。当同步发电机容量小于自励磁的判据时, 应避免单机带空载长线运行。不发生自励磁的判据可按式确定

$$W_N > Q_c X_d^* \quad (4.1.6)$$

式中:  $W_N$ ——不发生自励磁的发电机额定容量 (MV·A);

$Q_c$ ——计及高压并联电抗器和低压并联电抗器的影响后的线路充电功率 (Mvar);

$X_d^*$ ——发电机及升压变压器等值同步电抗标么值, 以发电机容量为基准。

4.1.7 装有高压并联电抗器线路的非全相谐振过电压的限制应符合下列要求:

1 在高压并联电抗器的中性点接入接地电抗器, 接地电抗器电抗值宜按接近完全补偿线路的相间电容来选择, 应符合限制潜供电流的要求和对并联电抗器中性点绝缘水平的要求。对于同塔双回线路, 宜计算回路之间的耦合对电抗值选择的影响。

2 在计算非全相谐振过电压时, 宜计算线路参数设计值和实际值的差异、高压并联电抗器和接地电抗器的阻抗设计值与实测值的偏差、故障状态下的电网频率变化对过电压的影响。

4.1.9 系统采用带有均压电容的断路器开断连接有电磁式电压互感器的空载母线, 经验算可产生铁磁谐振过电压时, 宜选用电容式电压互感器。当已装有电磁式电压互感器时, 运行中应避免引起谐振的操作方式, 可装设专门抑制此类铁磁谐振的装置。

4.1.10 变压器铁磁谐振过电压限制措施应符合下列要求:

1 经验算断路器非全相操作时产生的铁磁谐振过电压, 危及 110kV 中性点不接地变压器的中性点绝缘时, 变压器中性点宜装设间隙, 间隙应符合本规范第 4.1.4 条第 1 款的要求。

2 当继电保护装置设有缺相保护时, 110kV 变压器不接地的中性点可装设无间隙 MOA, 应验算其吸收能量。该接闪器还应符合雷电过电压下保护变压器中性点标准分级绝缘的要求。

4.1.11 6~66kV 不接地系统或偶然脱离谐振接地系统的部分, 产生的谐振过电压有:

- 1 中性点接地的电磁式电压互感器过饱和;
- 2 配电变压器高压绕组对地短路;
- 3 输电线路单相继线且一端接地或不接地;

4 限制电磁式电压互感器铁磁谐振过电压宜选取下列措施：

- 1) 选用励磁特性饱和点较高的电磁式电压互感器；
- 2) 减少同一系统中电压互感器中性点接地的数量，除电源侧电压互感器高压绕组中性点接地外，其他电压互感器中性点不宜接地；
- 3) 当  $X_{C_0}$  是系统每相对地分布容抗， $X_m$  为电压互感器在线电压作用下单相绕组的励磁电抗时，可在 10kV 及以下的母线上装设中性点接地的星形接线电容器组或用一段电缆代替架空线路以减少  $X_{C_0}$ ，使  $X_{C_0}$  小于  $0.01X_m$ ；
- 4) 当  $K_{13}$  是互感器一次绕组与开口三角形绕组的变比时，可在电压互感器的开口三角形绕组装设阻值不大于  $(X_m/K_{13}^2)$  的电阻或装设其他专门消除此类铁磁谐振的装置；
- 5) 电压互感器高压绕组中性点可接入单相电压互感器或消谐装置。

4.1.12 谐振接地的较低电压系统，运行时应避免谐振状态；非谐振接地的较低电压系统，应采取增大对地电容的措施防止高幅值的转移过电压。

### 11.1.3 操作过电压及其限制

#### 11.1.3.1 操作过电压及其对保护设计的要求

GB/T 50064—2014《交流电气装置过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定，操作过电压及其对保护设计的要求：

4.2.1 对线路操作过电压绝缘设计起控制作用的空载线路合闸及单相重合闸过电压设计时，应符合下列要求：

6 当范围 I 的线路要求深度降低合闸或重合闸过电压时，可采取限制措施。

4.2.2 故障清除过电压及限制应符合下列要求：

1 工程的设计条件宜选用线路单相故障接地故障清除后，在故障线路或相邻线路上产生的过电压；

2 对于两相短路、两相或三相接地故障，可根据预测结果采取相应限制措施；

3 对于线路上较高的故障清除过电压，可在线路中部装设 MOA 或在断路器上安装分闸电阻予以限制。

4.2.3 无故障甩负荷过电压可采用 MOA 限制。

4.2.4 对振荡解列操作下的过电压应进行预测。预测振荡解列过电压时，线路送受端电势功角差宜按系统严重工况选取。

4.2.5 投切空载变压器产生的操作过电压可采用 MOA 限制。

4.2.6 空载线路开断时，断路器发生重击穿产生的空载线路分闸过电压的限制措施应符合下列要求：

1 对 110kV 系统，开断空载架空线路宜采用重击穿概率极低的断路器，开断电缆线路应采用重击穿概率极低的断路器，过电压不宜大于标幺值为 3.0。

2 对 66kV 及以下不接地系统或谐振接地系统，开断空载线路应采用重击穿概率极低的断路器。6kV~35kV 的低电阻接地系统，开断空载线路应采用重击穿概率极低的断路器。

4.2.7 6kV~66kV 系统中，开断并联电容补偿装置应采用重击穿概率极低的断路器。

限制单相重击穿过电压宜将并联电容补偿装置的 MOA 保护 (图 4.2.7) 作为后备保护。断路器发生两相重击穿不作为设计的工况。

4.2.8 开断并联电抗器时, 宜采用截流数值较低的断路器, 并宜采用 MOA 或能耗极低的 R-C 阻容吸收装置作为限制断路器强制熄弧截流产生过电压的后备保护。对范围 II 的并联电抗器开断时, 也可使用选相分闸装置。

4.2.9 当采用真空断路器或采用截流值较高的少油断路器开断高压感应电动机时, 宜在断路器与电动机之间装设旋转电动机用 MOA 或能耗极低的 R-C 阻容吸收装置。

4.2.10 对 66kV 及以下不接地系统发生单相间歇性电弧接地故障时产生的过电压, 可根据负荷性质和工程的重要程度进行必要的预测。

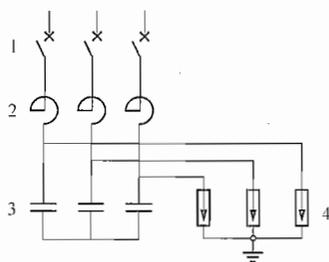


图 4.2.7 并联电容补偿装置的 MOA 保护  
1—断路器; 2—串联电抗器;  
3—电容器组; 4—MOA

### 11.1.3.2 限制操作过电压用 MOA 的基本要求

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定, 限制操作过电压用 MOA 的基本要求:

4.4.1 电气装置保护用相对地 MOA 的持续运行电压不应低于系统的最高相电压。变压器、并联电抗器中性点 MOA 的持续运行电压应按额定电压和适当的荷电率确定。

4.4.2 电气装置保护用 MOA 的额定电压可按式 (4.4.2-1) 或式 (4.4.2-2) 选取, 确定参数时应依据系统暂时过电压的幅值、持续时间和 MOA 的工频电压耐受时间特性。有效接地和低电阻接地系统, 接地故障清除时间不大于 10s 时, MOA 的额定电压可按式 (4.4.2-1) 选取; 非有效接地系统, 接地故障清除时间大于 10s 时, MOA 的额定电压可按式 (4.4.2-2) 选取。

$$U_R \geq U_T \quad (4.4.2-1)$$

$$U_R \geq 1.25U_T \quad (4.4.2-2)$$

式中:  $U_R$ ——MOA 的额定电压 (kV);

$U_T$ ——系统的暂时过电压 (kV)。

4.4.3 当系统工频过电压符合本规范第 4.1.1 条和第 4.4.3 条的规定时, 各种系统 MOA 的持续运行电压和额定电压可按表 4.4.3 选择。

表 4.4.3 MOA 持续运行电压和额定电压

系统中性点 接地方式		持续运行电压 (kV)		额定电压 (kV)	
		相地	中性点	相地	中性点
有效 接地	110kV	$U_m/\sqrt{3}$	$0.27U_m/0.46U_m$	$0.75U_m$	$0.35U_m/0.58U_m$

续表

系统中性点 接地方式		持续运行电压 (kV)		额定电压 (kV)	
		相地	中性点	相地	中性点
非有效 接地	不接地	$1.10U_m$	$0.64U_m$	$1.38U_m$	$0.80U_m$
	谐振接地	$U_m$	$U_m/\sqrt{3}$	$1.25U_m$	$0.72U_m$
	低电阻接地	$0.80U_m$	$0.46U_m$	$U_m$	$U_m/\sqrt{3}$
	高电阻接地	$U_m$	$U_m/\sqrt{3}$	$1.25U_m$	$U_m/\sqrt{3}$

注 1. 110kV 中性点斜线的上、下方数据分别对应系统无和有失地的条件；

4 本表不适用于 110、220kV 变压器中性点不接地且绝缘水平低于本规范表 6.4.6-3 所列数值的系统。

4.4.4 具有发电机和旋转电动机的系统，相对地 MOA 的额定电压，对应接地故障清除时间不大于 10s 时，不应低于旋转电动机额定电压的 1.05 倍；接地故障清除时间大于 10s 时，不应低于旋转电动机额定电压的 1.3 倍。旋转电动机用 MOA 的持续运行电压不宜低于 MOA 额定电压的 80%。旋转电动机中性点用 MOA 的额定电压，不应低于相应相对地 MOA 额定电压的  $1/\sqrt{3}$ 。

4.4.5 采用 MOA 限制各种操作过电压时应通过仿真计算进行校核，其吸收能量应按工程要求确定。

#### 11.1.4 特快速瞬态过电压 (VFTO)

VFTO 及限制。GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定，特快速瞬态过电压 (VFTO) 及其对保护设计的要求如下：

##### 2.0.4 特快速瞬态过电压 very fast transient overvoltage (VFTO)

气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS) 和复合电器 (HGIS, 即 Hybrid GIS) 的隔离开关在某些操作方式下，产生频率为数十万赫兹至数兆赫兹的高频振荡过电压，称为特快速瞬态过电压。

##### 4.3 VFTO 及限制。

范围 II GIS 和 HGIS 变电站应预测隔离开关开合管线产生的 VFTO。当 VFTO 会损坏绝缘时，应避免引起危险的操作方式或在隔离开关加装阻尼电阻。

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中对 VFTO 及限制措施的说明：

4.3.1 依据目前工程研究的实际情况新增了本条。GIS 和 HGIS 变电站中隔离开关开合管线，可产生 VFTO。VFTO 的特点是波前时间很短（小于  $0.1\mu\text{s}$ ）；波前之后的振荡频率很高（大于 1MHz）；幅值也较高（最大值可达 2.5 标么值）。高幅值 VFTO 会损害 GIS、HGIS、变压器和电磁式电压互感器绝缘，或损害二次设备或对二次电路产生电磁骚扰。

变压器与 GIS 经过架空线路或电缆相连时，在变压器上的 VFTO 幅值不高，波前时

间也有所变缓。变压器与 GIS 之间通过油气套管相连时,在变压器上的 VFTO 较严重,可损害变压器匝间绝缘。

“隔离开关加装阻尼电阻”的条件,参见本规范第 6.4.3 条第 2 款。

### 11.1.5 雷电过电压及其保护

#### 11.1.5.1 雷电过电压及其保护的一般规定

根据 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定,雷电过电压及保护的一般规定如下:

5.1.1 雷电过电压保护设计应包括线路雷电绕击、反击或感应过电压以及变电站直击、雷电侵入波过电压保护的设计。

5.1.2 输电线和变电站的防雷设计,应结合当地已有线路和变电站的运行经验、地区雷电活动强度、地闪密度、地形地貌及土壤电阻率,通过计算分析和经济比较,按差异化原则进行设计。

#### 11.1.5.2 接闪杆和接闪线的保护范围

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定的接闪杆和接闪线的保护范围及计算方式:

5.2.1 单支接闪杆的保护范围(图 5.2.1),应按下列公式计算:

1 接闪杆在地面上的保护半径,应按下列公式计算:

$$r = 1.5hP \quad (5.2.1-1)$$

式中:  $r$ ——保护半径 (m);

$h$ ——接闪杆或接闪线的高度 (m) 当  $h > 120\text{m}$  时,可取其等于 120m;

$P$ ——高度影响系数,  $h \leq 30\text{m}$ ,  $P = 1$ ;  $30\text{m} < h \leq 120\text{m}$ ,  $P = 5.5/\sqrt{h}$ ;  $h > 120\text{m}$ ,

$$P = 0.5$$

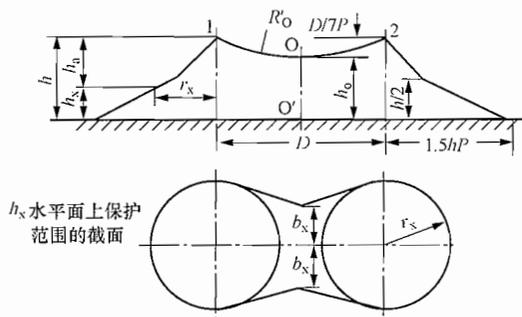


图 5.2.2-1 高度为  $h$  的两等高接闪杆的保护范围

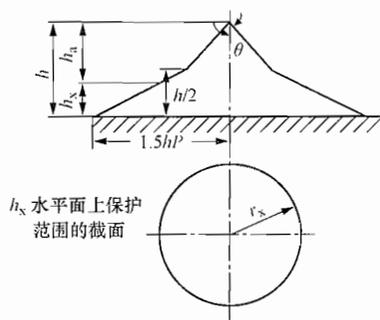


图 5.2.1 单支接闪杆的保护范围  
 $\theta$ —保护角 ( $^\circ$ )

2 在被保护物高度  $h_x$  水平面上的保护半径应按下列方法确定:

1) 当  $h_x \geq 0.5h$  时,保护半径应按下列公式确定:

$$r_x = (h - h_x)P = h_a P \quad (5.2.1-2)$$

式中:  $r_x$ ——接闪杆或接闪线在  $h_x$  水平面上的保护范围 (m);

$h_x$ ——被保护物的高度 (m);

$h_a$ ——接闪杆的有效高度 (m)。

2) 当  $h_x < 0.5h$  时, 保护半径应按下式确定:

$$r_x = (1.5h - 2h_x)P \quad (5.2.1-3)$$

5.2.2 两支等高接闪杆的保护范围 (图 5.2.2-1), 应按下列方法确定:

1 两杆外侧的保护范围应按单支接闪杆的计算方法确定。

2 两杆间的保护范围应按通过两杆顶点及保护范围上部边缘最低点 O 的圆弧确定, 圆弧的半径为  $R'_0$ 。O 点为假想接闪杆的顶点, 其高度应按下式计算:

$$h_0 = h - D/(7P) \quad (11-2-4)$$

式中:  $h_0$ ——两杆间保护范围上部边缘最低点高度 (m);

$D$ ——两接闪杆间的距离 (m)。

3 两杆间  $h_x$  水平面上保护范围的一侧最小宽度  $b_x$  应按图 5.2.2-2 确定。当  $b_x$  大于  $r_x$  时, 应取  $b_x$  等于  $r_x$ 。

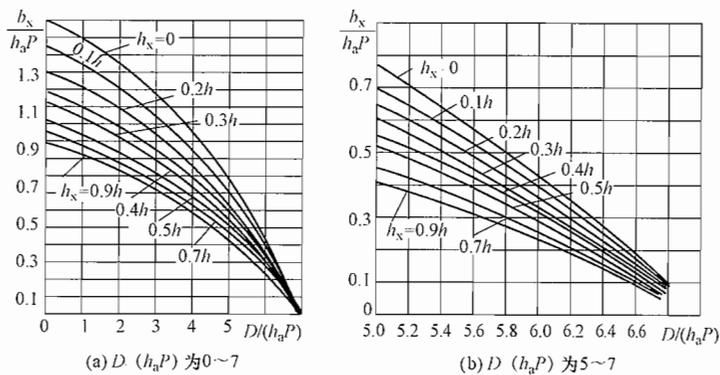


图 5.2.2-2 两等高接闪杆间保护范围的一侧最小宽度 ( $b_x$ ) 与  $D/(h_a P)$  的关系

4 两杆间距离与杆高之比  $D/h$  不宜大于 5。

5.2.3 多支等高接闪杆的保护范围 (图 5.2.3), 应按下列方法确定:

11

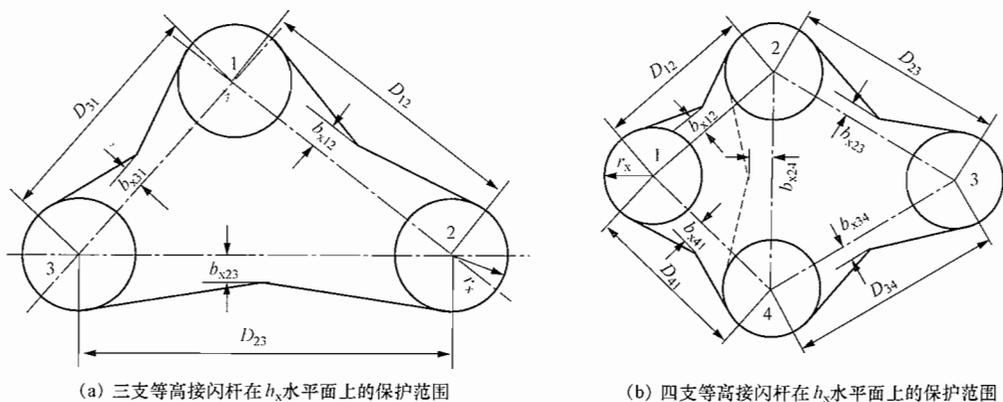


图 5.2.3 三支、四支等高接闪杆在  $h_x$  水平面上的保护范围

1 三支等高接闪杆所形成的三角形的外侧保护范围应分别按两支等高接闪杆的计

算方法确定。在三角形内被保护物最大高度  $h_x$  水平面上，各相邻接闪杆间保护范围的一侧最小宽度  $b_x \geq 0$  时，全部面积可受到保护。

2 四支及以上等高接闪杆所形成的四角形或多角形，可先将其分成两个或数个三角形，然后分别按三支等高接闪杆的方法计算。

5.2.4 单根接闪线在  $h_x$  水平面上每侧保护范围的宽度（图 5.2.4）应按下列方法确定：

1 当  $h_x \geq h/2$  时，每侧保护范围的宽度应按下式计算：

$$r_x = 0.47(h - h_x)P \quad (5.2.4-1)$$

2 当  $h_x < h/2$  时，每侧保护范围的宽度应按下式计算：

$$r_x = (h - 1.53h_x)P \quad (5.2.4-2)$$

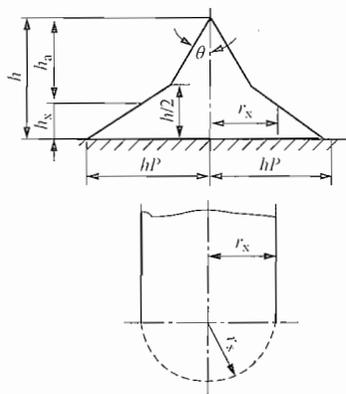


图 5.2.4 单根接闪线的保护范围

注：当  $h$  不大于 30m 时， $\theta$  为  $25^\circ$ 。

5.2.5 两根等高平行接闪线的保护范围（图 5.2.5），应按下列方法确定：

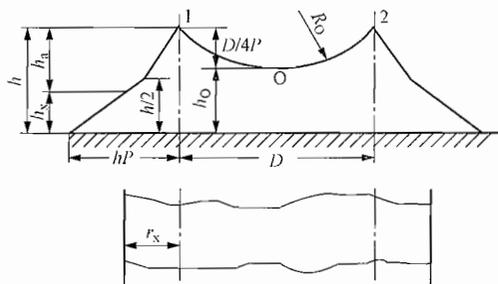


图 5.2.5 两根等高平行接闪线的保护范围

$h_x$ —水平面上保护范围的截面

1 两接闪线外侧的保护范围应按单根接闪线的计算方法确定。

2 两接闪线间各横截面的保护范围应由通过两接闪线及保护范围边缘最低点 O 的圆弧确定。O 点的高度应按下列式计算：

$$h_0 = h - D/(4P) \quad (5.2.5-1)$$

式中： $h_0$ ——两接闪线间保护范围上部边缘最低点的高度（m）；

$D$ ——两接闪线间的距离（m）。

3 两接闪线端部的外侧保护范围按单根接闪线保护范围计算。两线间端部保护最小宽度  $b_x$  应按下列方法确定：

1) 当  $h_x \geq h/2$  时， $b_x$  应按下列式计算：

$$b_x = 0.47(h_0 - h_x)P \quad (5.2.5-2)$$

2) 当  $h_x < h/2$  时， $b_x$  应按下列式计算：

$$b_x = (h_0 - 1.53h_x)P \quad (5.2.5-3)$$

5.2.6 不等高接闪杆、接闪线的保护范围（图 5.2.6），应按下列方法确定：

1 两支不等高接闪杆外侧的保护范围应分别按单支接闪杆的计算方法确定。

2 两支不等高接闪杆间的保护范围应按单支接闪杆的计算方法，先确定较高接闪杆 1 的保护范围，然后由较低接闪杆 2 的顶点，做水平线与接闪杆 1 的保护范围相交于点 3，取点 3 接闪杆的计算方法确定接闪杆 2 和 3 间的保护范围。通过接闪杆 2、3 顶点及保护范围上部边缘最低点的圆弧，其弓高应按下列式计算：

$$f = D'/(7P) \quad (5.2.6)$$

式中： $f$ ——圆弧的弓高（m）；

$D'$ ——接闪杆2和等效接闪杆3间的距离（m）。

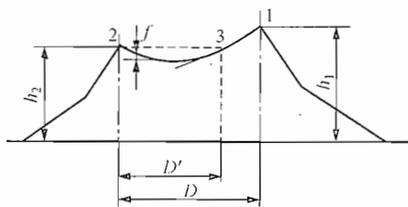


图 5.2.6 两支不等高接闪杆的保护范围

3 对多支不等高接闪杆所形成的多角形，各相邻两接闪杆的外侧保护范围应按两支不等高接闪杆的计算方法确定；三支不等高接闪杆，在三角形内被保护物最大高度  $h_x$  水平面上，各相邻接闪杆间保护范围一侧最小宽度  $b_x \geq 0$  时，全部面积可受到保护；四支及以上不等高接闪杆所形成的多角形，其内侧保护范围可仿照等高接闪杆的方法确定。

4 两支不等高接闪线各横截面的保护范围，应仿照两支不等高接闪杆的方法，按式（5.2.6）计算。

5.2.7 山地和坡地上接闪杆的保护范围应有所减小，应按下列方法确定：

1 接闪杆的保护范围可按本规范式（5.2.1-1）~式（5.2.1-3）计算。

2 两等高接闪杆保护范围  $b_x$  按本规范图 5.2.2-2 确定的  $b_x$  乘以 0.75 求得，上部边缘最低点高度可按下列式计算：

$$h_0 = h - D/(5P) \quad (5.2.7-1)$$

3 两支不等高接闪杆保护范围的弓高可按下列式计算：

$$f = D'/(5P) \quad (5.2.7-2)$$

4 利用山势设立的远离被保护物的接闪杆不得作为主要保护装置。

5.2.8 相互靠近的接闪杆和接闪线的联合保护范围可按下列方法确定：

1 接闪杆、接闪线外侧保护范围可分别按单杆、线的保护范围确定。

2 内侧保护范围可将不等高杆、线划为等高杆、线，再将等高杆、线视为等高接闪线计算。

### 11.1.5.3 高压架空输电线路的雷电过电压保护

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定的高压架空输电线路的雷电过电压及保护：

5.3.1 线路的雷电过电压保护应符合下列要求：

1 输电线路防雷保护设计时，应根据线路在电网中的重要性、运行方式、当地原有线路的运行经验、线路路径的雷电活动情况、地闪密度、地形地貌和土壤电阻率，通过经济技术比较制订出差异化的设计方案。

2 110kV 线路可沿全线架设地线，在山区和强雷区，宜架设双地线。在少雷区可不沿全线架设地线，但应装设自动重合闸装置。35kV 及以下线路，不宜全线架设地线。

3 除少雷区外，6kV 和 110kV 钢筋混凝土杆配电线路，宜采用瓷或其他绝缘材料的横担，并应以较短的时间切除故障，以减少雷击跳闸和断线事故。

4 杆塔处地线对边导线的保护角，应符合下列要求：

1) 对于单回路，110kV 及以下线路的保护角不宜大于  $15^\circ$ 。

2) 对于同塔双回或多回路，110kV 线路的保护角不宜大于  $10^\circ$ 。

- 3) 单地线线路保护角不宜大于  $25^\circ$ ;
- 4) 重覆冰线路的保护角可适当加大;
- 5) 多雷区和强雷区的线路可采用负保护角。
- 5 双地线线路, 杆塔处两根地线间的距离不应大于导线与地线间垂直距离的 5 倍。
- 6 有地线线路的反击耐雷水平不宜低于表 5.3.1-1 所列数值。

表 5.3.1-1 有地线线路的反击耐雷水平 (kA)

系统标称电压 (kV)	35	66	110
单回线路	24~36	31~47	56~68
同塔双回线路	—	—	50~61

- 注: 1 反击耐雷水平的较高和较低值分别对应线路杆塔冲击接地电阻  $7\Omega$  和  $15\Omega$ ;  
 2 雷击时刻工作电压为峰值且与雷击电流反极性;  
 3 发电厂、变电站进线保护段杆塔耐雷水平不宜低于表中的较高数值。

7 雷季干燥时, 有地线线路在杆塔不连地线时测量的线路杆塔的工频接地电阻, 不宜超过表 5.3.1-2 所列数值。

表 5.3.1-2 线路杆塔的工频接地电阻

土壤电阻率 $\rho(\Omega \cdot \text{m})$	$\rho \leq 100$	$100 < \rho \leq 500$	$500 < \rho \leq 1000$	$1000 < \rho \leq 2000$	$\rho > 2000$
接地电阻 ( $\Omega$ )	10	15	20	25	30

- 注: 1 土壤电阻率超过  $2000\Omega \cdot \text{m}$ , 接地电阻很难降低到  $30\Omega$  时, 可采用 6 根~8 根总长不超过 500m 的放射形接地体, 或采用连续伸长接地体, 接地电阻不受限制;  
 2 变电站进线段杆塔上频接地电阻不宜高于  $10\Omega$ 。

8 有地线的线路应防止雷击档距中央地线反击导线, 档距中央导地线间距应符合下列要求:

1) 范围 I 的输电线路,  $15^\circ\text{C}$  无风时档距中央导线与地线间的最小距离宜按下式计算:

$$S_1 = 0.012l + 1 \quad (5.3.1-1)$$

式中:  $S_1$ ——导线与地线间的距离 (m);

$l$ ——档距长度 (m)。

9 钢筋混凝土杆铁横担和钢筋混凝土横担线路的地线支架、导线横担与绝缘子固定部分或瓷横担固定部分之间, 宜有可靠的电气连接并与接地引下线相连。主杆非预应力钢筋已用绑扎或焊接连成电气通路时, 可兼作接地引下线。利用钢筋兼作接地引下线的钢筋混凝土电杆, 其钢筋与接地螺母、铁横担间应有可靠的电气连接。

10 中雷区及以上地区 35kV 及 66kV 无地线线路宜采取措施, 减少雷击引起的多相短路和两相异点接地引起的断线事故, 钢筋混凝土杆和铁塔宜接地。在多雷区接地电阻不宜超过  $30\Omega$ , 其余地区接地电阻可不受限制。钢筋混凝土杆和铁塔应充分利用其自然接地作用, 在土壤电阻率不超过  $100\Omega \cdot \text{m}$  或有运行经验的地区, 可不另设人工接地装置。

11 两端与架空线路相连接的长度超过 50m 的电缆，应在其两端装设 MOA；长度不超过 50m 的电缆，可只在任一端装设 MOA。

12 绝缘地线放电间隙的型式和间隙距离，应根据线路正常运行时地线上的感应电压、间隙动作后续流熄弧和继电保护的動作条件确定。

### 5.3.2 线路交叉部分的保护应符合下列要求：

1 当导线运行温度为 40℃ 或当设计允许温度 80℃ 的导线运行温度为 50℃ 时，同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时的两交叉线路导线间或上方线路导线与下方线路地线间的垂直距离，不得小于表 5.3.2 所列数值。对按允许载流量计算导线截面的线路，还应校验当导线为最高允许温度时的交叉距离，此距离应大于操作过电压要求的空气间隙距离，且不得小于 0.8m。

表 5.3.2 同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时的两交叉线路导线间或上方线路导线与下方线路地线间的垂直距离

系统标称电压 (kV)	6、10	20~110
交叉距离 (m)	2	3

注：括号内为至输电线路杆顶或至通信线路之交叉距离。

2 6kV 及以上的同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时，交叉档应采取下列保护措施：

- 1) 交叉档两端的钢筋混凝土杆或铁塔，不论有无地线，均应接地。
- 2) 交叉距离比表 5.3.2 所列数值大于 2m 及以上时，交叉档可不采取保护措施。

3 交叉点至最近杆塔的距离不超过 40m，可不在此线路交叉档的另一杆塔上装设交叉保护用的接地装置。

### 5.3.3 大跨越档的雷电过电压保护应符合下列要求：

1 范围 I 架空线路大跨越档的雷电过电压保护应符合下列要求：

1) 全高超过 40m 有地线的杆塔，每增高 10m，应增加一个绝缘子，地线对边导线的保护角应符合本规范第 5.3.1 条第 4 款的规定。接地电阻不应超过本规范 5.3.1-2 所列数值的 50%，当土壤电阻率大于  $2000\Omega \cdot \text{m}$  时，不宜超过  $20\Omega$ 。全高超过 100m 的杆塔，绝缘子数量应结合运行经验，通过雷电过电压的计算确定。

2) 未沿全线架设地线的 35kV 新建线路中的大跨越段，宜架设地线或安装线路防雷用接闪器，并应比一般线路增加一个绝缘子。

3) 根据雷击档距中央地线时防止反击的条件，防止反击要求的大跨越档导线与地线间的距离不得小于表 5.3.3 的要求。

表 5.3.3 防止反击要求的大跨越档导线与地线间的距离

系统标称电压 (kV)	35	66	110	220
距离 (m)	3.0	6.0	7.5	11.0

5.3.4 同塔双回 110kV 线路，可采取下列形成不平衡绝缘的措施以减少雷击引起双回线路同时闪络跳闸的概率：

- 1 在一回线路上适当增加绝缘；

2 在一回线路上安装绝缘子并联间隙。

5.3.5 多雷区、强雷区或地闪密度较高的地段，除改善接地装置、加强绝缘和选择适当的地线保护角外，可采取安装线路防雷用接闪器的措施来降低线路雷击跳闸率，并应符合下列要求：

1 安装线路接闪器宜根据技术经济原则因地制宜的制订实施方案。

2 线路接闪器宜在下列地点安装：多雷地区发电厂、变电站进线段且接地电阻较大的杆塔；山区线路易击段杆塔和易击杆；山区线路杆塔接地电阻过大、易发生闪络且改善接地电阻困难也不经济的杆塔；大跨越的高杆塔；多雷区同塔双回路线路易击段的杆塔。

3 线路接闪器在杆塔上的安装方式应符合下列要求：

1) 110kV 单回线路宜在 3 相绝缘子串旁安装；

3) 同塔双回线路宜在一回路线路绝缘子串旁安装。

5.3.6 中雷区及以上地区或地闪密度较高的地区，可采取安装绝缘子并联间隙的措施保护绝缘子，并应符合下列要求：

1 绝缘子并联间隙与被保护的绝缘子的雷电放电电压之间的配合应做到雷电过电压作用时并联间隙可靠动作，同时不宜过分降低线路绕击或反击耐雷电水平。

2 绝缘子并联间隙应在冲击放电后有效地导引工频短路电流电弧离开绝缘子本体，以免其灼伤。

3 绝缘子并联间隙的安装应牢固，并联间隙本体应有一定的耐电弧和防腐蚀能力。

#### 11.1.5.4 发电厂和变电站的雷电过电压保护

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定，发电厂和变电站的雷电过电压及保护内容如下：

5.4.1 发电厂和变电站的直击雷过电压保护可采用接闪杆或接闪线，其保护范围可按本规范第 5.2 节确定。下列设施应设直击雷保护装置：

1 屋外配电装置，包括组合导线和母线廊道；

2 火力发电厂的烟囱、冷却塔和输煤系统的高建筑物（地面转运站、输煤栈桥和输煤筒仓）；

3 油处理室、燃油泵房、露天油罐及其架空管道、装卸油台、易燃材料仓库；

4 乙炔发生站、制氢站、露天氢气罐、氢气罐储存室、天然气调压站、天然气架空管道及其露天贮罐；

5 多雷区的牵引进站。

5.4.2 发电厂的主厂房、主控制室、变电站控制室和配电装置室的直击雷过电压保护应符合下列要求：

1 发电厂的主厂房、主控制室和配电装置室可不装设直击雷保护装置。为保护其他设备而装设的接闪杆，不宜装在独立的主控制室和 35kV 及以下变电站的屋顶上。采用钢结构或钢筋混凝土结构有屏蔽作用的建筑物的车间变电站可装设直击雷保护装置。

2 强雷区的主厂房、主控制室、变电站控制室和配电装置室宜有直击雷保护。

3 主厂房装设避直击雷保护装置或为保护其他设备而在主厂房上装设接闪杆时，

应采取加强分流、设备的接地点远离接闪杆接地引下线的入地点、接闪杆接地引下线远离电气设备的防止反击措施，并宜在靠近接闪杆的发电机出口处装设一组旋转电机用 MOA。

4 主控制室、配电装置室和 35kV 及以下变电站的屋顶上装设直击雷保护装置时，应将屋顶金属部分接地；钢筋混凝土结构屋顶，应将其焊接成网接地；非导电结构的屋顶，应采用接闪带保护，该接闪带的网格应为 8m~10m，每隔 10m~20m 应设接地引下线，该接地引下线应与主接地网连接，并应在连接处加装集中接地装置。

5 峡谷地区的发电厂和变电站宜用接闪线保护。

6 已在相邻建筑物保护范围内的建筑物或设备，可不装设直击雷保护装置。

7 屋顶上的设备金属外壳、电缆金属外皮和建筑物金属构件均应接地。

5.4.3 露天布置的 GIS 的外壳可不装设直击雷保护装置，外壳应接地。

5.4.4 发电厂和变电站有爆炸危险且爆炸后会波及发电厂和变电站内主设备或严重影响发供电的建（构）筑物，应用独立接闪杆保护，采取防止雷电感应的措施，并应符合下列要求：

1 接闪杆与易燃油贮罐和氢气天然气罐体及其呼吸阀之间的空气中距离，接闪杆及其接地装置与罐体、罐体的接地装置和地下管道的地中距离应符合本规范第 5.4.11 条第 1 款及第 2 款的要求。接闪杆与呼吸阀的水平距离不应小于 3m，接闪杆尖高出呼吸阀不应小于 3m。接闪杆的保护范围边缘高出呼吸阀顶部不应小于 2m。接闪杆的接地电阻不宜超过 10Ω。在高土壤电阻率地区，接地电阻难以降到 10Ω，且空气中距离和地中距离符合本规范第 5.4.11 条第 1 款的要求时，可采用较高的电阻值。接闪杆与 5000m<sup>3</sup> 以上贮罐呼吸阀的水平距离不应小于 5m，接闪杆尖高出呼吸阀不应小于 5m。

2 露天贮罐周围应设闭合环形接地体，接地电阻不应超过 30Ω，无独立接闪杆保护的露天贮罐不应超过 10Ω，接地点不应少于 2 处，接地点间距不应大于 30m。架空管道每隔 20m~25m 应接地 1 次，接地电阻不应超过 30Ω。易燃油贮罐的呼吸阀、易燃油和天然气贮罐的热工测量装置应与贮罐的接地体用金属线相连的方式进行重复接地。不能保持良好电气接触的阀门、法兰、弯头的管道连接处应跨越。

5.4.5 发电厂和变电站的直击雷保护装置包括兼作接闪器的设备金属外壳、电缆金属外皮、建筑物金属构件，其接地可利用发电厂或变电站的主接地网，应在直击雷保护装置附近装设集中接地装置。

5.4.6 独立接闪杆的接地装置应符合下列要求：

1 独立接闪杆宜设独立的接地装置。

2 在非高土壤电阻率地区，接地电阻不宜超过 10Ω。

3 该接地装置可与主接地网连接，接闪杆与主接地网的地下连接点至 35kV 及以下设备与主接地网的地下连接点之间，沿接地极的长度不得小于 15m。

4 独立接闪杆不应设在人经常通行的地方，接闪杆及其接地装置与道路或出入口的距离不宜小于 3m，否则应采取均压措施或铺设砾石或沥青地面。

5.4.7 架构或房顶上安装接闪杆应符合下列要求：

1 110kV 的配电装置，可将接闪杆装在配电装置的架构或房顶上，在土壤电阻率大于 1000Ω·m 的地区，宜装设独立接闪杆。装设非独立接闪杆时，应通过验算，采取

降低接地电阻或加强绝缘的措施。

2 66kV 的配电装置，可将接闪杆装在配电装置的架构或房顶上，在土壤电阻率大于  $500\Omega \cdot \text{m}$  的地区，宜装设独立接闪杆。

3 35kV 及以下高压配电装置架构或房顶不宜装接闪杆。

4 装在架构上的接闪杆应与接地网连接，并应在其附近装设集中接地装置。装有接闪杆的架构上，接地部分与带电部分间的空气中距离不得小于绝缘子串的长度中非污秽区标准绝缘子串的长度。

5 除大坝与厂房紧邻的水力发电厂外，装设在除变压器门型架构外的架构上的接闪杆与主接地网的地下连接点至变压器外壳接地线与主接地网的地下连接点之间，埋入地中的接地极的长度不得小于 15m。

5.4.8 变压器门型架构上安装接闪杆或接闪线应符合下列要求：

1 除大坝与厂房紧邻的水力发电厂外，当土壤电阻率大于  $350\Omega \cdot \text{m}$  时，在变压器门型架构上和离变压器主接地线小于 15m 的配电装置的架构上，不得装设接闪杆、接闪线；

2 当土壤电阻率不大于  $350\Omega \cdot \text{m}$  时，应根据方案比较确有经济效益，经过计算采取相应的防止反击措施后，可在变压器门型架构上装设接闪杆、接闪线；

3 装在变压器门型架构上的接闪杆应与接地网连接，并应沿不同方向引出 3 根到 4 根放射形水平接地体，在每根水平接地体上离接闪杆架构 3m~5m 处应装设 1 根垂直接地体；

4 6kV~35kV 变压器应在所有绕组出线上或在离变压器电气距离不大于 5m 条件下装设 MOA；

5 高压侧电压 35kV 变电站，在变压器门型架构上装设接闪杆时，变电站接地电阻不应超过  $4\Omega$ 。

5.4.9 线路的接闪线引接到发电厂或变电站应符合下列要求：

1 110kV 及以上配电装置，可将线路的接闪线引接到出线门型架构上，在土壤电阻率大于  $1000\Omega \cdot \text{m}$  的地区，还应装设集中接地装置；

2 35kV 和 66kV 配电装置，在土壤电阻率不大于  $500\Omega \cdot \text{m}$  的地区，可将线路的接闪线引接到出线门型架构上，应装设集中接地装置；

3 35kV 和 66kV 配电装置，在土壤电阻率大于  $500\Omega \cdot \text{m}$  的地区，接闪线应架设到线路终端杆塔为止。从线路终端杆塔到配电装置的一档线路的保护，可采用独立接闪杆，也可在线路终端杆塔上装设接闪杆。

5.4.10 烟囱和装有接闪杆和接闪线架构附近的电源线应符合下列要求：

1 火力发电厂烟囱附近的引风机及其电动机的机壳应与主接地网连接，并应装设集中接地装置，该接地装置宜与烟囱的接地装置分开。当不能分开时，引风机的电源线应采用带金属外皮的电缆，电缆的金属外皮应与接地装置连接。

2 机械通风冷却塔上电动机的电源线、装有接闪杆和接闪线的架构上的照明灯电源线，均应采用直接埋入地下的带金属外皮的电缆或穿入金属管的导线。电缆外皮或金属管埋地长度在 10m 以上，可与 35kV 及以下配电装置的接地网及低压配电装置相连接。

3 不得在装有接闪杆、接闪线的构筑物上架设未采取保护措施通信线、广播线和低压线。

5.4.11 独立接闪杆、接闪线与配电装置带电部分间的空气中距离以及独立接闪杆、接闪线的接地装置与接地网间的地中距离应符合下列要求：

1 独立接闪杆与配电装置带电部分、发电厂和变电站电气设备接地部分、架构接地部分之间的空气中距离，应符合下式的要求：

$$S_a \geq 0.2R_i + 0.1h_j \quad (5.4.11-1)$$

式中： $S_a$ ——空气中距离（m）；

$R_i$ ——接闪杆的冲击接地电阻（ $\Omega$ ）；

$h_j$ ——接闪杆校验点的高度（m）。

2 独立接闪杆的接地装置与发电厂或变电站接地网间的地中距离，应符合下式的要求：

$$S_e \geq 0.3R_i \quad (5.4.11-2)$$

式中： $S_e$ ——地中距离（m）；

3 接闪线与配电装置带电部分、发电厂和变电站电气设备接地部分以及架构接地部分间的空气中距离，应符合下式的要求：

1) 对一端绝缘、另一端接地的接闪线：

$$S_a \geq 0.2R_i + 0.1(h + \Delta l) \quad (5.4.11-3)$$

式中： $\Delta l$ ——接闪线上校验的雷击点与最近接地支柱的距离（m）。

2) 对两端接地的接闪线：

$$S_a \geq \beta' [0.2R_i + 0.1(h + \Delta l)] \quad (5.4.11-4)$$

式中： $\beta'$ ——接闪线分流系数。

3) 接闪线分流系数可按下列式计算：

$$\beta' = \frac{1 + \frac{\tau_1 R_i}{12.4(l_2 + h)}}{1 + \frac{\Delta l + h}{l_2 + h} + \frac{\tau_1 R_i}{6.2(l_2 + h)}} \approx \frac{l_2 + h}{l_2 + \Delta h + 2h} = \frac{l' - \Delta l + h}{l' + 2h} \quad (5.4.11-5)$$

式中： $l_2$ ——接闪线上校验的雷击点与另一端支柱间的距离（m）；

$l'$ ——接闪线两支柱间的距离（m）；

$\tau_1$ ——雷电流的波头长度，可取 $2.6\mu\text{s}$ 。

4 接闪线的接地装置与发电厂或变电站接地网间的地中距离，对一端绝缘另一端接地的接闪线，应按本规范式（5.4.11-3）校验；对两端接地的接闪线应符合下列要求：

$$S_e \geq 0.3\beta'R_i \quad (5.4.11-6)$$

5  $S_a$ 不宜小于5m， $S_e$ 不宜小于3m。对66kV及以下配电装置，包括组合导线、母线廊道，应降低感应过电压，当条件许可时，应增大 $S_a$ 。

5.4.13 范围I发电厂和变电站高压配电装置的雷电侵入波过电压保护应符合下列要求：

1 发电厂和变电站应采取措施防止或减少近区雷击闪络。未沿全线架设地线的

35kV~110kV 架空输电线路，应在变电站 1km~2km 的进线段架设地线。220kV 架空输电线路 2km 进线保护段范围内以及 35kV~110kV 线路 1km~2km 进线保护段范围内的杆塔耐雷水平，应符合本规范表 5.3.1-1 的要求。

2 未沿全线架设地线的 35kV~110kV 线路，其变电站的进线段应采用图 5.4.13-1 所示的保护接线。在雷季，变电站 35kV~110kV 进线的隔离开关或断路器经常断路运行，同时线路侧又带电时，应在靠近隔离开关或断路器处装设一组 MOA。

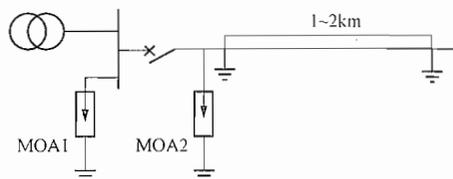


图 5.4.13-1 35kV~110kV 变电站的进线保护接线

3 全线架设地线的 66kV~110kV 变电站，当进线的隔离开关或断路器经常断路运行，同时线路侧又带电时，宜在靠近隔离开关或断路器处装设一组 MOA。

4 为防止雷击线路断路器跳闸后待重合时间内重复雷击引起变电站电气设备的损坏，多雷区及运行中已出现过此类事故的地区的 66kV~110kV 敞开式变电站和电压范围 II 变电站的 66kV~110kV 侧，线路断路器的线路侧宜安装一组 MOA。

5 发电厂、变电站的 35kV 及以上电缆进线段，电缆与架空线的连接处应装设 MOA，其接地端应与电缆金属外皮连接。对三芯电缆，末端的金属外皮应直接接地 [图 5.4.13-2 (a)]；对单芯电缆，应经金属氧化物电缆护层保护器 (CP) 接地 [图 5.4.13-2 (b)]。电缆长度不超过 50m 或虽超过 50m，但经校验装一组 MOA 即能符合保护要求时，图 5.4.13-2 中可只装 MOA1 或 MOA2。电缆长度超过 50m，且断路器在雷季经常断路运行时，应在电缆末端装设 MOA。连接电缆段的 1km 架空线路应架设地线。全线电缆—变压器组接线的变电站内是否装设 MOA，应根据电缆另一端有无雷电过电压波侵入的可能，经校验确定。

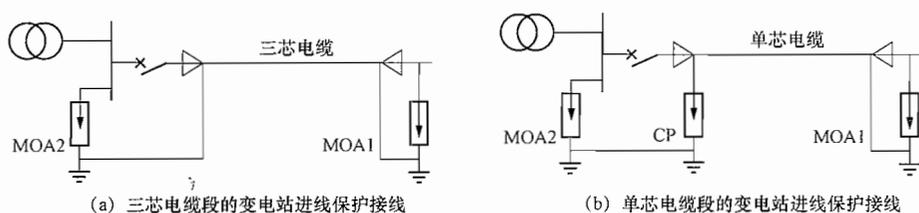


图 5.4.13-2 具有 35kV 及以上电缆段的变电站进线保护接线

6 具有架空进线的 35kV 及以上发电厂和变电站敞开式高压配电装置中 MOA 的配置应符合下列要求：

1) 35kV 及以上装有标准绝缘水平的设备和标准特性 MOA 且高压配电装置采用单母线、双母线或分段的电气主接线时，MOA 可仅安装在母线上。MOA 至主变压器间的最大电气距离可按表 5.4.13-1 确定。对其他设备的最大距离可相应增加 35%。MOA 与主被保护设备的最大电气距离超过规定值时，可在主变压器附近增设一组 MOA。变电站内所有 MOA 应以最短的接地线与配电装置的主接地网连接，同时应在其附近装设集中接地装置。

2) 在本条第4款的情况下, 线路入口 MOA 与被保护设备的电气距离不超过规定值时, 可不在母线上安装 MOA。

3) 架空进线采用同塔双回路杆塔, 确定 MOA 与变压器最大电气距离时, 进线路数应计为一路, 且在雷季中宜避免将其中一路断开。

表 5.4.13-1 MOA 至主变压器间的最大电气距离 (m)

系统标称电压 (kV)	进线长度 (km)	进线路数			
		1	2	3	≥4
35	1.0	25	40	50	55
	1.5	40	55	65	75
	2.0	50	75	90	105
66	1.0	45	65	80	90
	1.5	60	85	105	115
	2.0	80	105	130	145
110	1.0	55	85	105	115
	1.5	90	120	145	165
	2.0	125	170	205	230

注: 1 全线有地线进线长度取2km, 进线长度在1km~2km时的距离可按插补法确定;

2 标准绝缘水平指35、66、110kV变压器、电压互感器标准雷电冲击全波耐受电压分别为200、325、480kV。

7 对于35kV及以上具有架空或电缆进线、主接线特殊的敞开式或GIS电站, 应通过仿真计算确定保护方式。

8 有效接地系统中的中性点不接地的变压器, 中性点采用分级绝缘且未装设保护间隙时, 应在中性点装设中性点 MOA。中性点采用全绝缘, 变电站为单进线且为单台变压器运行时, 也应在中性点装设 MOA。不接地、谐振接地和高电阻接地系统中的变压器中性点, 可不装设保护装置, 多雷区单进线变电站且变压器中性点引出时, 宜装设 MOA。

9 自耦变压器应在其两个自耦合的绕组出线上装设 MOA, 该 MOA 应装在自耦变压器和断路器之间, 并采用图 5.4.13-3 的 MOA 保护接线。

10 35kV~110kV 开关站, 应根据其重要性和进线路数, 在进线上装设 MOA。

11 应在与架空线路连接的三绕组变压器的第三开路绕组或第三平衡绕组以及发电厂双绕组升压变压器当发电机断开由高压侧倒送厂用电时的二次绕组的3相上各安装一支 MOA, 以防止由变压器高压绕组雷电波电磁感应传递的过电压对其他各相应绕组的损坏。

12 变电站的6kV和10kV配电装置的雷电侵入波过电压的保护应符合下列要求:

1) 变电站的6kV和10kV配电装置, 应在每组母线和架空进线上分别装设电站型和配电型 MOA, 并应采用图 5.4.13-4 所示的保护接线。MOA 至6kV~10kV主变压器的最大电气距离应符合表 5.4.13-2 所列数值。

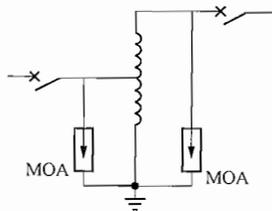


图 5.3.13-3 自耦变压器的 MOA 保护接线

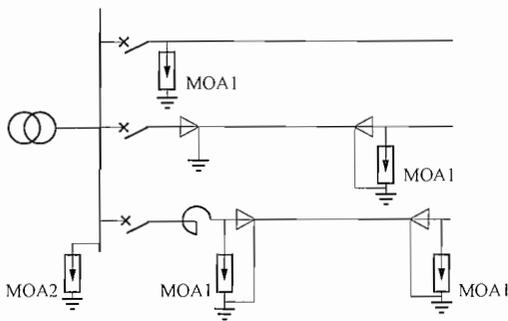


图 5.4.13-4 6kV 和 10kV 配电装置雷电侵入波过电压的保护接线

2) 架空进线全部在厂区内,且受到其他建筑物屏蔽时,可只在母线上装设 MOA。

3) 有电缆段的架空线路,MOA 应装设在电缆头附近,其接地端应与电缆金属外皮相连。各架空进线均有电缆段时,MOA 与主变压器的最大电气距离可不受限制。

表 5.4.13-2 MOA 至 6kV~10kV 主变压器的最大电气距离

雷季中经常运行的进线回路数	1	2	3	≥4
最大电气距离 (m)	15	20	25	30

4) MOA 应以最短的接地线与变电站、配电站的主接地网连接,可通过电缆金属外皮连接。MOA 附近应装设集中接地装置。

5) 6kV 和 10kV 配电站,当无站用变压器时,可仅在每路架空进线上装设 MOA。

5.4.14 GIS 变电站的雷电侵入波过电压保护应符合下列要求:

1) 66kV 及以上无电缆段进线的 GIS 变电站保护(图 5.4.14-1)应符合下列要求:

1) 变电站应在 GIS 管道与架空线路的连接处装设 MOA,其接地端应与管道金属外壳连接;

2) 变压器或 GIS 一次回路的任何电气部分至 MOA1 间的最大电气距离对 66kV 系统不超过 50m 时,对 110kV 及 220kV 系统不超过 130m 时,或当经校验装一组 MOA 即能符合保护要求时,可只装设 MOA1;

3) 连接 GIS 管道的架空线路进线保护段的长度不应小于 2km,且应符合本规范第 5.3.1 条第 4 款的要求。

2) 66kV 及以上进线有电缆段的 GIS 变电站的雷电侵入波过电压保护应符合下列要求:

1) 在电缆段与架空线路的连接处应装设 MOA,其接地端应与电缆的金属外皮连接;

2) 三芯电缆段进 GIS 变电站的保护接线[图 5.4.14-2(a)],末端的金属外皮应与 GIS 管道金属外壳连接接地;

3) 对单芯电缆段进 GIS 变电站的保护接线,应经金属氧化物电缆护层保护器(CP)接地[图 5.4.14-2(b)]。

4) 电缆末端至变压器或 GIS 一次回路的任何电气部分间的最大电气距离不超过本条第 1 款中的规定值可不装设 MOA2。当超过时,经校验装一组 MOA 能符合保护要求,图 5.4.14-1 中可不装设 MOA2。

5) 对连接电缆段的 2km 架空线路应架设地线。

3 进线全长为电缆的 GIS 变电站内是否装设 MOA,应根据电缆另一端有无雷电过

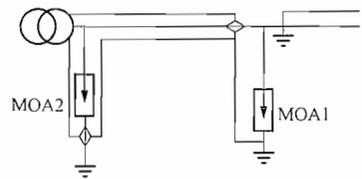


图 5.4.14-1 无电缆进线的 GIS 变电站保护

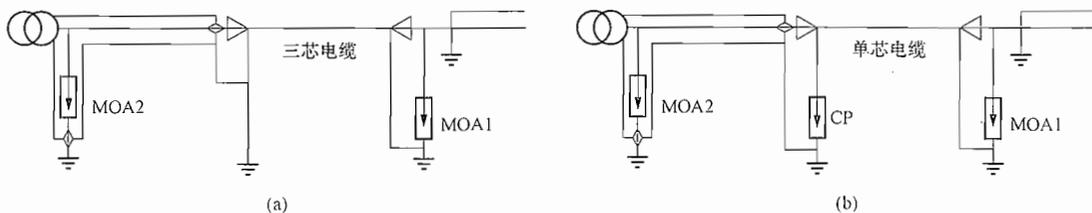


图 5.4.14-2 有电缆段进线的 GIS 变电站保护接线

(a) 三芯电缆进 GIS 变电站的保护接线；(b) 单芯电缆进 GIS 变电站的保护接线

电压波侵入，经校验确定。

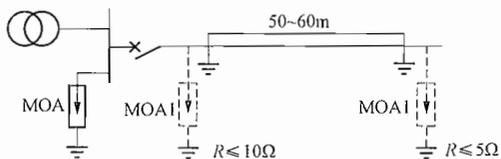
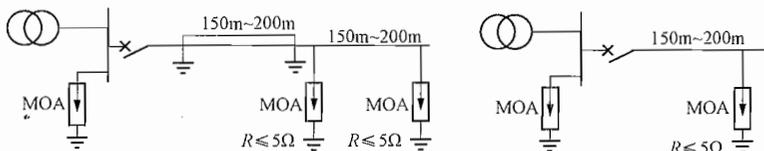


图 5.4.15-1 3150kV·A ~ 5000kV·A 的 35kV 变电站的简易保护接线

5.4.15 小容量变电站雷电侵入波过电压应按照下列要求进行简易保护：

1 3150kV·A ~ 5000kV·A 的变电站 35kV 侧，可根据负荷的重要性及雷电活动的强弱的条件简易保护接线（图 5.4.15-1），变电站进线段的的地线长度可减少到 500m ~ 600m，但其 MOA 的接地电阻不应超过 5Ω。

2 小于 3150kV·A 供非重要负荷的变电站 35kV 侧，根据雷电活动的强弱，可采用图 5.4.15-2 (a) 的保护接线；容量为 1000kV·A 及以下的变电站，可采用图 5.4.15-2 (b) 的保护接线。

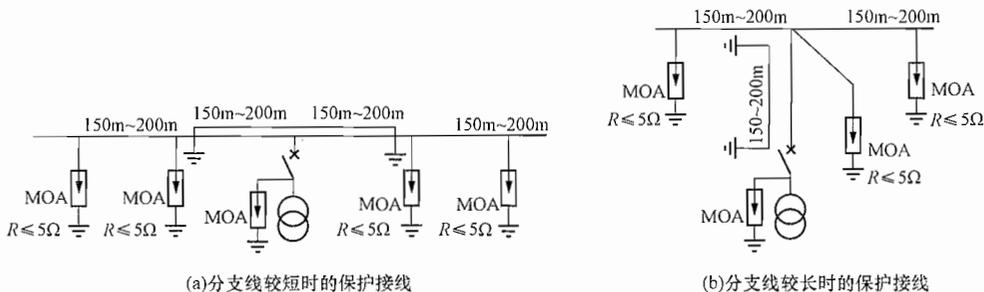


(a) 采用地线保护的接线

(b) 不采用地线保护的接线

图 5.4.15-2 小于 3150kV·A 变电站的简易保护

3 小于 3150kV·A 供非重要负荷的 35kV 分支变电站，根据雷电活动的强弱，可采用图 5.4.15-3 的保护接线。



(a) 分支线较短时的保护接线

(b) 分支线较长时的保护接线

图 5.4.15.3 小于 3150kV·A 分支变电站的简易保护

4 简易保护接线的变电站 35kV 侧, MOA 与主变压器或电压互感器间的最大电气距离不宜超过 10m。

DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》中规定, 采用无间隙金属氧化物避雷器作为雷电过电压保护装置时的要求:

- 1 接闪器的持续运行电压和额定电压不低于表 20.1.7 所列数值。
- 2 接闪器能承受所在系统作用的暂时过电压和操作过电压能量。

表 20.1.7 无间隙金属氧化物避雷器持续运行电压和额定电压

系统接地方式		持续运行电压 kV		额定电压 kV	
		相地	中性点	相地	中性点
有效 接地	110kV	$U_m/\sqrt{3}$	$0.45U_m$	$0.75U_m$	$0.57U_m$
不 接 地	(3~20) kV	$1.1U_m; U_{mg}$	$0.64U_m; U_{mg}/\sqrt{3}$	$1.38U_m; 1.25U_{mg}$	$0.8U_m; 0.72U_{mg}$
	35、66kV	$U_m$	$U_m/\sqrt{3}$	$1.25U_m$	$0.72U_{mg}$
消弧线圈		$U_m; U_{mg}$	$U_m/\sqrt{3}; U_{mg}/\sqrt{3}$	$1.25U_m; 1.25U_{mg}$	$0.72U_m; 0.72U_{mg}$
低电阻		$0.8U_m$		$U_m$	
高电阻		$1.1U_m; U_{mg}$	$1.1U_m/\sqrt{3}; U_{mg}/\sqrt{3}$	$1.38U_m; 1.25U_{mg}$	$0.8U_m; 0.72U_{mg}$
注4 110kV 变压器中性点不接地且绝缘水平低于标准时, 接闪器的参数需另行确定。					
注5 $U_m$ 为系统最高电压, $U_{mg}$ 为发电机最高运行电压。					

### 11.1.5.5 配电系统的雷电过电压保护

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定, 配电系统的过电压及保护要求:

- 5.5.1 10kV~35kV 配电系统中配电变压器的高压侧应靠近变压器装设 MOA。该 MOA 接地线应与变压器金属外壳连在一起接地。
- 5.5.2 10kV~35kV 配电变压器的低压侧宜装设一组 MOA, 以防止反变换波和低压侧雷电侵入波击穿绝缘。该 MOA 接地线应与变压器金属外壳连在一起接地。
- 5.5.3 10kV~35kV 柱上断路器和负荷开关应装设 MOA 保护。经常断路运行而又带电的柱上断路器、负荷开关或隔离开关, 应在带电侧设 MOA, 其接地线应与柱上断路器的金属外壳连接, 接地电阻不宜超过  $10\Omega$ 。
- 5.5.4 装设在架空线路上的电容器宜装设 MOA 保护。MOA 应靠近电容器安装, 其接地线应与电容器金属外壳连在一起接地, 接地电阻不宜超过  $10\Omega$ 。
- 5.5.5 架空配电线路使用绝缘导线时, 应根据雷电活动情况和已有运行经验采取防止雷击导线断线的防护措施。

### 11.1.5.6 旋转电机的雷电过电压保护

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定，旋转电机的雷电过电压及保护内容如下：

5.6.1 与架空线路直接连接的旋转电机的保护方式，应根据电机容量、雷电活动的强弱和对运行可靠性的要求确定。旋转电机雷电过电压保护用 MOA 可按本规范第 4.4.4 条确定。

5.6.2 单机容量不小于 25000kW 且不大于 60000kW 的旋转电机，宜采用图 5.6.2 所示的保护接线。60000kW 以上的旋转电机，不应与架空线路直接连接。进线电缆段宜直接埋设在土壤中，以充分利用其金属外皮的分流作用；当进线电缆段未直接埋设时，可将电缆金属外皮多点接地。进线段上的 MOA 的接地端，应与电缆的金属外皮和地线连在一起接地，接地电阻不应大于  $3\Omega$ 。

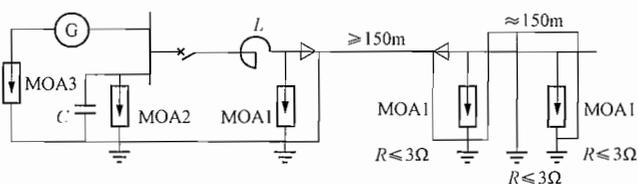


图 5.6.2 25000kW ~ 60000kW 旋转电机的保护接线

MOA1—配电 MOA；MOA2—旋转电机 MOA；MOA3—旋转电机中性点；MOA；G—发电机；  
L—限制短路电流用电抗器；C—电容器；R—接地电阻

5.6.3 单机容量不小于 6000kW 且小于 25000kW 的旋转电机，宜采用图 5.6.3 所示的保护接线。在多雷区，可采用本规范图 5.6.2 所示的保护接线。

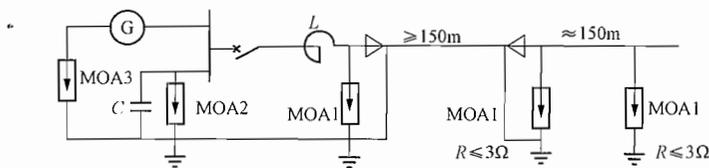


图 5.6.3 6000kW ~ 25000kW（不含 25000kW）旋转电机的保护接线

5.6.4 单机容量不小于 6000kW 且不大于 12000kW 的旋转电机，出线回路中无限流电抗器时，宜采用有电抗线图的图 5.6.4 所示的保护接线。

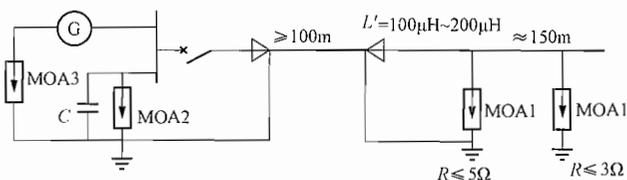


图 5.6.4 6000kW ~ 12000kW 旋转电机的保护接线

5.6.5 单机容量不小于 1500kW 且小于 6000kW 或少雷区 60000kW 及以下的旋转电机，可采用图 5.6.5 所示的保护接线。在进线保护段长度内，应装设接闪杆或地线。

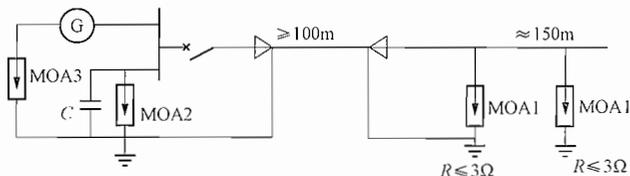


图 5.6.5 1500kW ~ 6000kW (不含 6000kW) 旋转电机和少雷区  
60000kW 及以下旋转电机的保护接线

5.6.6 单机容量为 6000kW 及以下的旋转电机或牵引站的旋转电机可采用图 5.6.6 有电抗线圈或限流电抗器的保护接线。

5.6.7 容量为 25000kW 及以上的旋转电机，应在每台电机出线处装设一组旋转电机 MOA。25000kW 以下的旋转电机，MOA 应靠近电机装设，MOA 可装在电机出线处；当接在每一组母线上的电机不超过两台时，MOA 可装在每组母线上。

5.6.8 当旋转电机的中性点能引出且未直接接地时，应在中性点上装设旋转电机中性点 MOA。

5.6.9 保护旋转电机用的地线，对边导线的保护角不应大于  $20^\circ$ 。

5.6.10 为保护旋转电机匝间绝缘和防止感应过电压，装在每相母线上的电容器，包括电缆段电容在内应为  $0.25\mu\text{F} \sim 0.5\mu\text{F}$ ；对于中性点不能引出或双排非并绕绕组的电动机，应为  $1.5\mu\text{F} \sim 2\mu\text{F}$ 。电容器宜有短路保护。

5.6.11 无架空直配线的发电机，当发电机与升压变压器之间的母线或组合导线无金属屏蔽部分的长度大于 50m 时，应采取防止感应过电压的措施。可在发电机回路或母线的每相导线上装设不小于  $0.15\mu\text{F}$  的电容器或旋转电机用 MOA；或可按本规范第 5.4.13 条第 8 款要求装设 MOA，该 MOA 应选用旋转电机用 MOA。

5.6.12 在多雷区，经变压器与架空线路连接的非旋转电机，当变压器高压侧的系统标称电压为 66kV 及以下时，为防止雷电过电压经变压器绕组的电磁传递而危及电机的绝缘，宜在电机出线上装设一组旋转电机用 MOA。变压器高压侧的系统标称电压为 110kV 及以上时，电机出线上是否装设 MOA 可经校验确定。

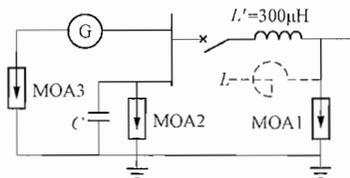


图 5.6.6 6000kW 及以下旋转电机或  
牵引站旋转电动机的保护接线

## 11.2 电气装置的绝缘配合

### 11.2.1 绝缘配合原则

根据 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中的规定，绝缘配合原则如下：

6.1.1 进行绝缘配合时应全面考虑造价、维修费用以及故障损失三个方面。

6.1.2 持续运行电压和暂时过电压下的绝缘配合应符合下列要求：

1 电气装置外绝缘应符合现场污秽度等级下的耐受持续运行电压要求。电气设备应在设计寿命期间内承受持续运行电压。

2 线路、变电站的空气间隙和电气设备应能承受一定幅值和时间的暂时过电压。

### 6.1.3 操作过电压下的绝缘配合应符合下列要求：

1 范围 I 系统中操作过电压要求的架空线路和变电站的绝缘子串和空气间隙的绝缘强度，宜以最大操作过电压为基础，将绝缘强度作为随机变量加以确定。范围 I 系统计算用相对地最大操作过电压的标幺值应按表 6.1.3 的规定选取。

表 6.1.3 范围 I 系统计算用相对地最大操作过电压的标幺值

系 统	操作过电压的标幺值
35kV 及以下低电阻接地系统	3.0
66kV 及以下非有效接地系统（不含低电阻接地系统）	4.0
110kV 系统	3.0

2 6kV~110kV 系统，相间操作过电压可取相对地过电压的 1.3~1.4 倍。

5 电气设备内、外绝缘操作冲击绝缘水平，宜以接闪器操作冲击保护水平为基础，采用确定性法确定。外绝缘也可采用统计法。

### 6.1.4 雷电过电压下的绝缘配合应符合下列要求：

1 变电站中绝缘子串、空气间隙的雷电冲击强度，宜以接闪器雷电冲击保护水平为基础，将绝缘强度作为随机变量加以确定。

2 电气设备内、外绝缘雷电冲击绝缘水平，宜以接闪器雷电冲击保护水平为基础，采用确定性法确定。

### 6.1.5 用于操作和雷电过电压绝缘配合的波形应符合下列要求：

1 操作冲击电压的波形应符合下列要求：

1) 对范围 I 系统，操作冲击电压的波形应取波前时间 250 $\mu$ s，波尾时间为 2500 $\mu$ s。

2 雷电冲击电压的波形应取波前时间 1.2 $\mu$ s，波尾时间 50 $\mu$ s。

6.1.7 本规范中输电线路和变电站的绝缘子串、空气间隙以及电气设备的外绝缘的绝缘配合公式，适用于海拔 0m 地区。当输电线路、变电站所在地区海拔高于 0m 时，应按本规范附录 A 校正。

## 11.2.2 外绝缘放电电压的海拔校正

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定的外绝缘放电电压的海拔校正：

### 附录 A 外绝缘放电电压的海拔校正

A.0.1 外绝缘放电电压试验数据应以海拔 0m 的标准气象条件下给出。

A.0.2 外绝缘所在地区海拔高于 0m 时，应校正放电电压。所在地区海拔 2000m 及以下地区时，各种作用电压下外绝缘空气间隙的放电电压  $U(P_H)$  可按下列公式校正：

$$U(P_H) = k_a U(P_0) \quad (\text{A.0.2-1})$$

$$k_a = e^{m(H/8150)} \quad (\text{A.0.2-2})$$

式中:  $U(P_0)$  ——海拔 0m 时空气间隙的放电电压, kV;

$k_u$  ——海拔校正因数;

$m$  ——系数;

$H$  ——海拔, m。

A. 0.3 系数  $m$  的取值应符合下列要求:

1 对于雷电冲击电压、空气间隙和清洁的绝缘子的短时工频电压,  $m$  应取 1.0。

2 对于操作冲击电压,  $m$  应按图 A. 0.3 选取。

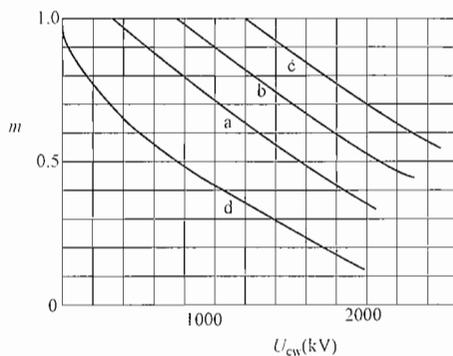


图 A. 0.3 各种作用电压下的  $m$  值

a—相对地绝缘; b—纵绝缘; c—相间绝缘;

d—棒-板间隙(标准间隙)

注: 对于由两个分量组成的电压, 电压值是各分量之和。

### 11.2.3 架空输电线路的绝缘配合

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定, 架空输电线路的绝缘配合要求如下:

6.2.1 线路绝缘子串的绝缘配合应符合下列要求:

1 每串绝缘子片数应符合相应现场污秽等级下耐受持续运行电压的要求。

2 操作过电压要求的线路绝缘子串正极性操作冲击电压 50% 放电电压  $u_{1.i.s}$  应符合下式的要求:

$$u_{1.i.s} \geq k_1 U_s \quad (6.2.1)$$

式中:  $U_s$  ——线路相对地统计操作过电压 (kV);

$k_1$  ——线路绝缘子串操作过电压统计配合系数, 取 1.27。

6.2.2 线路采用悬垂绝缘子受风偏影响的导线对杆塔的空气间隙应符合下列要求:

1 绝缘子串风偏后, 导线对杆塔的空气间隙应分别符合持续运行电压要求、操作过电压要求及雷电过电压要求。悬垂绝缘子串风偏角计算用风压不均匀系数可按本规范附录 B 确定。

2 持续运行电压下风偏后线路导线对杆塔空气间隙的工频 50% 放电电压  $u_{1.}$  应符合式 (6.2.2-1) 的要求。风偏计算用的风速应取线路设计采用的基本风速折算到导线平均高度处的风速。

$$u_{1.} \geq k_2 \sqrt{2} U_m / \sqrt{3} \quad (6.2.2-1)$$

式中:  $k_2$  ——线路空气间隙持续运行电压统计配合系数, 取 1.13。

3 风偏后操作过电压下线路导线对杆塔空气间隙的正极性操作冲击电压 50% 放电电压  $u_{1.s.s}$  应符合式 (6.2.2-2) 的要求。风偏计算用风速可取基本风速折算到导线平均高度处风速的 0.5 倍, 但不宜低于 15m/s。

$$u_{1.s.s} \geq k_3 U_s \quad (6.2.2-2)$$

式中:  $k_3$  ——线路空气间隙操作过电压统计配合系数。对单回线路  $k_3$  可取 1.1; 对同塔双回线路, 无风时上、中导线对中、下横担空气间隙正极性操作冲击 50% 放电电压的统计配合系数可取 1.27; 风偏后, 三相导线对塔身或横担空气间隙的统计配合系数可取 1.1。

4 风偏后导线对杆塔空气间隙的极性雷电冲击电压50%放电电压，110kV以下等级可选为现场污秽度等级a级下绝缘子串相应电压0.85倍，其他现场污秽度等级间隙也可按此配合。同塔双回线路采用悬垂绝缘子无风时，导线对横担空气间隙的极性雷电冲击电压50%放电电压宜与现场污秽度等级a级下绝缘子串相当。雷电过电压下风偏计算用的风速，对于基本风速折算到导线平均高度处风速不于35m/s时宜取15m/s，否则宜取10m/s。

### 附录B 架空线路悬垂绝缘子串风偏角计算用风压不均匀系数

悬垂绝缘子串风偏角计算用风压不均匀系数可按式（B.0.1）计算，风向与线路方向的夹角为90°时几种风速下的风压不均匀系数可按表（B.0.1）所列数值确定。

$$\alpha = 5.543(v\sin\theta)^{-0.737} \quad (\text{B.0.1})$$

式中： $\alpha$ ——风压不均匀系数；

$v$ ——设计采用的10min平均风速（m/s）；当风速大于20m/s时采用20m/s；

$\theta$ ——风向与线路方向的夹角（°）。

表B.0.1 风压不均匀系数

设计风速（m/s）	≤10	15	20	>20
$\alpha$	1.0	0.75	0.61	0.61

6.2.3 输电线路采用V型绝缘子串时，V型串每一分支的绝缘子片数应符合相应环境污秽分级条件下耐受持续运行电压的要求。导线对杆塔的空气间隙应符合下列要求：

1 持续运行电压下V型绝缘子串风偏后线路导线对杆塔空气间隙的工频50%放电电压 $u_{1-}$ 应符合本规范式（6.2.2-1）的要求。风偏计算用的风速应取线路设计采用的基本风速折算到导线平均高度处的风速。

2 操作过电压间隙的极性操作冲击电压波50%放电电压应按本规范式（6.2.2-2）确定， $k_3$ 可取1.27。

3 变电站进线段的反击耐雷水平应符合本规范表5.3.1-1的要求。

6.2.4 海拔1000m~3000m地区范围I架空输电线路的空气间隙不应小于表6.2.4-1所列数值。在进行绝缘配合时，空气间隙应留有一定裕度。

表6.2.4-1 海拔1000m~3000m地区范围I架空输电线路的空气间隙（mm）

系统标称电压（kV）	海拔（m）	持续运行电压	操作过电压	雷电过电压
20	1000	50	120	350
	3000	50	120	350
35	1000	100	250	450
	2000	110	275	495
	3000	120	300	540
66	1000	200	500	650
	3000	200	500	650
110	1000	250	700	1000
	2000	275	770	1100
	3000	300	840	1200

### 11.2.4 变电站绝缘子串及空气间隙的绝缘配合

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定,变电站绝缘子串及空气间隙的绝缘配合如下:

6.3.1 变电站绝缘子串的绝缘配合应同时符合下列要求:

1 变电站每串绝缘子片数应符合相应现场污秽度等级下耐受持续运行电压的要求。

2 变电站操作过电压要求的变电站绝缘子串正极性操作冲击电压 50% 放电电压  $u_{s,i,s}$  应符合下式的要求:

$$u_{s,i,s} \geq k_4 U_{s,p} \quad (6.3.1-1)$$

式中:  $U_{s,p}$ ——接闪器操作冲击保护水平 (kV);

$k_4$ ——变电站绝缘子串操作过电压配合系数,取 1.27。

3 雷电过电压要求的变电站绝缘子串正极性雷电冲击电压波 50% 放电电压  $u_{s,i,l}$  应符合下式的要求:

$$u_{s,i,l} \geq k_5 U_{l,p} \quad (6.3.1-2)$$

式中:  $U_{l,p}$ ——接闪器雷电冲击保护水平 (kV);

$k_5$ ——变电站绝缘子串雷电过电压配合系数,取 1.4。

6.3.2 变电站导线对构架受风偏影响的空气间隙,各种电压下用于绝缘配合的风偏角计算风速的选用原则应与输电线路相同。变电站导线对构架空气间隙应符合下列要求:

1 持续运行电压下风偏后导线对杆塔空气间隙的工频 50% 放电电压  $u_{s,-}$  应符合本规范式 (6.2.2-1) 的要求。

2 相对地工频过电压下无风偏变电站导线对构架空气间隙的工频 50% 放电电压  $u_{s,-,v}$  应符合下式的要求:

$$u_{s,-,v} \geq k_6 U_{p,g} \quad (6.3.2-1)$$

式中:  $U_{p,g}$ ——相对地最大工频过电压 (kV),取 1.4 (标么值);

$k_6$ ——变电站导线对构架无风偏空气间隙的工频过电压配合系数,取 1.15。

3 变电站相对地空气间隙的正极性操作冲击电压波 50% 放电电压  $u_{s,s,s}$  应符合下式的要求:

$$u_{s,s,s} \geq k_7 U_{s,p} \quad (6.3.2-2)$$

式中:  $k_7$ ——变电站相对地空气间隙操作过电压配合系数,对有风偏间隙应取 1.1,对无风偏间隙应取 1.27。

4 变电站相对地空气间隙的正极性雷电冲击电压 50% 放电电压  $u_{s,l}$  应符合下式的要求:

$$u_{s,l} \geq k_8 U_{l,p} \quad (6.3.2-3)$$

式中:  $k_8$ ——变电站相对地空气间隙雷电过电压配合系数,取 1.4。

6.3.3 变电站相间空气间隙应符合下列要求:

1 相间工频过电压下变电站相间空气间隙的工频 50% 放电电压  $u_{s,-,p,p}$  应符合下式的要求:

$$u_{s,-,p,p} \geq k_9 U_{p,p} \quad (6.3.3-1)$$

式中:  $U_{p,p}$ ——母线处相间最大工频过电压 (kV),取  $1.3\sqrt{3}$  (标么值);

$k_9$ ——相间空气间隙工频过电压配合系数,取 1.15。

2 变电站相间空气间隙的50%操作冲击电压波放电电压 $u_{s.s.p.}$ 应按下式计算：

$$u_{s.s.p.} \geq k_{10} U_{s.p} \quad (6.3.3-2)$$

式中： $k_{10}$ ——相间空气间隙操作过电压配合系数，取2.0。

3 变电站雷电过电压要求的相间空气间隙距离可取雷电过电压要求的相对地空气间隙的1.1倍。

6.3.4 变电站的最小空气间隙应符合下列要求：

1 海拔1000m及以下地区范围I各种电压要求的变电站最小空气间隙应符合表6.3.4-1的规定。

表6.3.4-1 海拔1000m及以下地区范围I各种电压要求的变电站最小空气间隙（mm）

系统标称电压（kV）	持续运行电压		工频过电压		操作过电压		雷电过电压	
	相对地	相对地	相间	相对地	相间	相对地	相间	
35	100	150	150	400	400	400	400	
66	200	300	300	650	650	650	650	
110	250	300	500	900	1000	900	1000	

注：持续运行电压的空气间隙适用于悬垂绝缘子串有风偏间隙。

2 海拔1000m及以下地区，6kV~20kV高压配电装置最小相对地或相间空气间隙应符合表6.3.4-2的规定。

表6.3.4-2 海拔1000m及以下地区6kV~20kV高压配电装置的最小相对地或相间空气间隙（mm）

系统标称电压（kV）	户 外	户 内
6	200	100
10	200	125
15	300	150
20	300	180

### 11.2.5 变电站电气设备的绝缘配合

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定，变电站电气设备的绝缘配合如下：

6.4.1 变电站电气设备绝缘与持续运行电压、暂时过电压的绝缘配合应符合下列要求：

1 变电站电气设备外绝缘应符合相应现场污秽度等级下耐受持续运行电压的要求。

2 变电站电气设备应能承受持续运行电压及一定幅值暂时过电压，并应符合下列要求：

1) 内绝缘短时工频耐受电压 $u_{e.-i}$ 的有效值应符合下式的要求：

$$u_{e.-i} \geq k_{11} U_{p.g} \quad (6.4.1-1)$$

式中： $k_{11}$ ——设备内绝缘短时工频耐压配合系数，取1.15。

2) 外绝缘短时工频耐受电压 $u_{e.-o}$ 的有效值应符合下式的要求：

$$u_{e.-o} \geq k_{12} U_{p.g} \quad (6.4.1-2)$$

式中： $k_{12}$ ——设备外绝缘短时工频耐压配合系数，取1.15。

3 断路器同极断口间内绝缘的短时工频耐受电压  $u_{e..c.i}$  的有效值应计算反极性持续运行电压的影响, 并应符合下式的要求:

$$u_{e..c.i} \geq u_{e..i} + k_m \sqrt{2} U_m / \sqrt{3} \quad (6.4.1-3)$$

式中:  $k_m$ ——断口耐受电压折扣系数。

4 断路器同极断口间外绝缘的短时工频耐受电压  $u_{e..c.o}$  的有效值应计算反极性持续运行电压的影响, 并应符合下式的要求:

$$u_{e..c.o} \geq u_{e..o} + k_m \sqrt{2} U_m / \sqrt{3} \quad (6.4.1-4)$$

6.4.2 变电站电气设备承受暂时过电压幅值和时间的要求应符合本规范附录 E 的规定。

### 附录 E 电气设备承受一定幅值和时间暂时过电压的要求

E.0.1 电气设备承受一定幅值和时间暂时过电压标么值的要求应符合表 E.0.1-1 ~ 表 E.0.1-5 的规定, 变压器上过电压的基准电压应取相应分接头下的额定电压, 其余设备上过电压的基准电压应取最高相电压。

表 E.0.1-1 110kV 电气设备承受暂时过电压的要求 (标么值)

时 间 (s)	1200	20	1	0.1
电力变压器和自耦变压器	1.10/1.10	1.25/1.25	1.90/1.50	2.00/1.58
分流电抗器和电磁式电压互感器	1.15/1.15	1.35/1.35	2.00/1.50	2.10/1.58
开关设备、电容式电压互感器、电流互感器、耦合电容器和汇流排支柱	1.15/1.15	1.60/1.60	2.20/1.70	2.40/1.80

注: 分子的数值代表相对地绝缘; 分母的数值代表相对相绝缘。

6.4.3 变电站电气设备与操作过电压的绝缘配合应符合下列要求:

1 电气设备内绝缘应符合下列要求:

1) 电气设备内绝缘相对地操作冲击耐压要求值  $u_{e.s.i}$  应符合下式的要求:

$$u_{e.s.i} \geq k_{13} U_{s.p} \quad (6.4.3-1)$$

式中:  $k_{13}$ ——设备内绝缘相对地操作冲击耐压配合系数, 取 1.15。

2) 断路器同极断口间内绝缘操作冲击耐压  $u_{e.s.c.i}$  应符合下式的要求:

$$u_{e.s.c.i} \geq (u_{e.s.i} + k_m \sqrt{2} U_m / \sqrt{3}) \quad (6.4.3-2)$$

2 GIS 相对地绝缘与 VFTO 的绝缘配合应符合下式的要求:

$$u_{GIS.l.i} \geq k_{14} U_{tw.p} \quad (6.4.3-3)$$

式中:  $u_{GIS.l.i}$ ——GIS 雷电冲击耐压要求值;

$U_{tw.p}$ ——接闪器陡波冲击保护水平 (kV);

$k_{14}$ ——GIS 相对地绝缘 VFTO 配合系数, 取 1.15。

3 电气设备外绝缘应符合下列要求:

1) 电气设备外绝缘相对地操作冲击耐压  $u_{e.s.o}$  应符合下式的要求:

$$u_{e.s.o} \geq k_{15} U_{s.p} \quad (6.4.3-4)$$

式中:  $k_{15}$ ——设备外绝缘相对地操作冲击耐压配合系数, 取 1.05。

2) 断路器、隔离开关同极断口间外绝缘操作冲击耐压  $u_{e.s.c.o}$  应符合下式的要求:

$$u_{e.s.c.o} \geq (u_{e.s.o} + k_m \sqrt{2}U_m / \sqrt{3}) \quad (6.4.3-5)$$

6.4.4 变电站电气设备与雷电过电压的绝缘配合应符合下列要求:

1 电气设备内绝缘应符合下列要求:

1) 电气设备内绝缘的雷电冲击耐压  $u_{e.l.i}$  应符合下式的要求:

$$u_{e.l.i} \geq k_{16}U_{l.p} \quad (6.4.4-1)$$

式中:  $k_{16}$ ——设备内绝缘的雷电冲击耐压配合系数, MOA 紧靠设备时可取 1.25, 其他情况可取 1.40。

2) 变压器、并联电抗器及电流互感器载波雷电冲击耐压可取相应设备全波雷电冲击耐压的 1.1 倍。

3) 断路器同极断口间内绝缘的相对地雷电冲击耐压  $u_{e.l.c.i}$  应符合下式的要求:

$$u_{e.l.c.i} \geq u_{e.l.i} + k_m \sqrt{2}U_m / \sqrt{3} \quad (6.4.4-2)$$

2 电气设备外绝缘应符合下列要求:

1) 电气设备外绝缘的雷电冲击耐压  $u_{e.l.o}$  应符合下式的要求:

$$u_{e.l.o} \geq k_{17}U_{l.p} \quad (6.4.4-3)$$

式中:  $k_{17}$ ——设备外绝缘的雷电冲击耐压配合系数, 取 1.40。

2) 断路器同极断口间外绝缘以及隔离开关同极断口间绝缘的雷电冲击耐压  $u_{e.l.c.o}$  应符合下式的要求:

$$u_{e.l.c.o} \geq u_{e.l.o} + k_m \sqrt{2}U_m / \sqrt{3} \quad (6.4.4-4)$$

6.4.5 电气设备耐压值应按现行国家标准《绝缘配合 第 1 部分: 定义、原则和规则》GB 311.1 中额定耐受电压系列值中的相应值来选择。

6.4.6 海拔 1000m 及以下地区一般条件下电气设备的额定耐受电压应符合下列规定:

1 范围 I 电气设备的额定耐受电压应按表 6.4.6-1 的规定确定。

表 6.4.6-1 范围 I 电气设备的额定耐受电压

系统标称电压 (kV)	设备最高电压 (kV)	设备类别	额定雷电冲击耐受电压 (kV)				额定短时(1min)工频耐受电压(有效值)(kV)			
			相对地	相间	断口		相对地	相间	断口	
					断路器	隔离开关			断路器	隔离开关
6	7.2	变压器	60 (40)	60 (40)	—	—	25 (20)	25 (20)	—	—
		开关	60 (40)	60 (40)	60	70	30 (20)	30 (20)	30	34
10	12	变压器	75 (60)	75 (60)	—	—	35 (28)	35 (28)	—	—
		开关	75 (60)	75 (60)	75 (60)	85 (60)	42 (28)	42 (28)	42 (28)	49 (35)
15	18	变压器	105	105	—	—	45	45	—	—
		开关	105	105	115	—	46	46	56	—
20	24	变压器	125 (95)	125 (95)	—	—	55 (50)	55 (50)	—	—
		开关	125	125	125	145	65	65	65	79
35	40.5	变压器	185/200	185/200	—	—	80/85	80/85	—	—
		开关	185	185	185	215	95	95	95	118

续表

系统标称电压 (kV)	设备最高电压 (kV)	设备类别	额定雷电冲击耐受电压 (kV)				额定短时(1min)工频耐受电压(有效值)(kV)			
			相对地	相间	断口		相对地	相间	断口	
					断路器	隔离开关			断路器	隔离开关
66	72.5	变压器	350	350	—	—	150	150	—	—
		开关	325	325	325	375	155	155	155	197
110	126	变压器	450/480	450/480	—	—	185/200	185/200	—	—
		开关	450、550	450、550	450、550	520、630	200、230	200、230	200、230	225、265

- 注：1 分子、分母数据分别对应外绝缘和内绝缘；  
 2 括号内、外数据分别对应低电阻和非低电阻接地系统；  
 3 开关类设备将设备最高电压称作“额定电压”；  
 4 110kV 开关和变压器存在两种额定耐受电压的，表中用“、”分开。

3 电力变压器、高压并联电抗器中性点及其接地电抗器的额定耐受电压应按表 6.4.6-3 的规定确定。

表 6.4.6-3 电力变压器、高压并联电抗器中性点及其接地电抗器的额定耐受电压

系统标称电压 (kV)	系统最高电压 (kV)	中性点接地方式	雷电全波和截波 (kV)	短时(1min)工频(有效值)(kV)
110	126	不接地	250	95

## 11.3 建筑物防雷的分类及措施<sup>①</sup>

### 11.3.1 建筑物防雷的分类

建筑物应根据建筑物的重要性、使用性质、发生雷电事故的可能性和后果，按防雷要求分为三类。

11.3.1.1 在可能发生对地闪击的地区，遇下列情况之一时，应划为第一类防雷建筑物：

- (1) 凡制造、使用或贮存火、炸药及其制品的危险建筑物，因电火花而引起爆炸、爆轰，会造成巨大破坏和人身伤亡者。
- (2) 具有 0 区或 20 区爆炸危险场所的建筑物。
- (3) 具有 1 区或 21 区爆炸危险场所的建筑物，因电火花而引起爆炸，会造成巨大破坏和人身伤亡者。

11.3.1.2 在可能发生对地闪击的地区，遇下列情况之一时，应划为第二类防雷建筑物：

- (1) 国家级重点文物保护的建筑物。
- (2) 国家级的会堂、办公建筑物、大型展览和博览建筑物、大型火车站和飞机场、国宾馆、国家级档案馆、大型城市的重要给水泵房等特别重要的建筑物。

注：飞机场不含停放飞机的露天场所和跑道。

- (3) 国家级计算中心、国际通信枢纽等对国民经济有重要意义的建筑物。
- (4) 国家特级和甲级大型体育馆。

① 11.3 节和 11.4 节主要内容摘自 GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》。

(5) 制造、使用或贮存火、炸药及其制品的危险建筑物，且电火花不易引起爆炸或不致造成巨大破坏和人身伤亡者。

(6) 具有1区或21区爆炸危险场所的建筑物，且电火花不易引起爆炸或不致造成巨大破坏和人身伤亡者。

(7) 具有2区或22区爆炸危险场所的建筑物。

(8) 有爆炸危险的露天钢质封闭气罐。

(9) 预计雷击次数大于0.05次/年的部、省级办公建筑物和其他重要或人员密集的公共建筑物以及火灾危险场所。

(10) 预计雷击次数大于0.25次/年的住宅、办公楼等一般性民用建筑物或一般性工业建筑物。

**11.3.1.3** 在可能发生对地闪击的地区，遇下列情况之一时，应划为第三类防雷建筑物：

(1) 省级重点文物保护的建筑物及省级档案馆。

(2) 预计雷击次数大于或等于0.01次/年，且小于或等于0.05次/年的部、省级办公建筑物和其他重要或人员密集的公共建筑物，以及火灾危险场所。

(3) 预计雷击次数大于或等于0.05次/年，且小于或等于0.25次/年的住宅、办公楼等一般性民用建筑物或一般性工业建筑物。

(4) 在平均雷暴日大于15天/年的地区，高度在15m及以上上的烟囱、水塔等孤立的高耸建筑物；在平均雷暴日小于或等于15天/年的地区，高度在20m及以上上的烟囱、水塔等孤立的高耸建筑物。

注：建筑物年预计雷击次数计算。

GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》规定的我国建筑物年预计雷击次数计算式为

$$N = k \times N_g \times A_c \quad (11-3-1)$$

式中  $N$ ——建筑物年预计雷击次数，次/年；

$k$ ——校正系数，在一般情况下取1；位于河边、湖边、山坡下或山地中土壤电阻率较小处、地下水露头处、土山顶部、山谷风口等处的建筑物，以及特别潮湿的建筑物取1.5；金属屋面没有接地的砖木结构建筑物取1.7；位于山顶上或旷野的孤立建筑物取2；

$N_g$ ——建筑物所处地区雷击大地的年平均密度，次/km<sup>2</sup>/年；

$A_c$ ——与建筑物截收相同雷击次数的等效面积，km<sup>2</sup>。

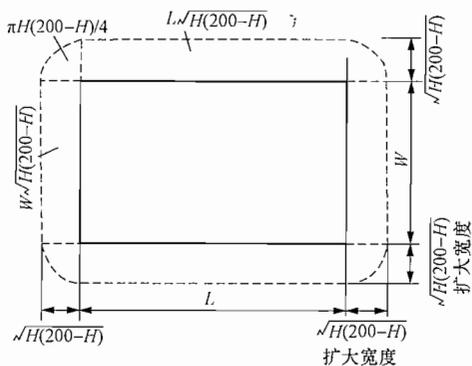


图 11-3-1 建筑物的等效面积

注：建筑物平面面积扩大后的等效面积如

图 11-3-1 中周边虚线所包围的面积。

雷击大地的年平均密度，首先应按当地气象台、站资料确定；若无此资料，可按式(11-3-2)计算

$$N_g = 0.1 \times T_d \quad (11-3-2)$$

式中： $T_d$ ——年平均雷暴日，根据当地气象台、站资料确定，天/年。

与建筑物截收相同雷击次数的等效面积应为其实际平面面积向外扩大后的面积。其计算方法应符合下列规定：

(1) 建筑物的等效面积如图 11-3-1 所示，当建筑物的高度小于 100m 时，其每边的扩大宽度和等效面积计算式为

$$D = \sqrt{H(200-H)} \quad (11-3-3)$$

$$A_e = [LW + 2(L + W) \sqrt{H(200 - H)} + \pi H(200 - H)] \times 10^{-6} \quad (11-3-4)$$

式中  $D$ ——建筑物每边的扩大宽度, m;

$L$ 、 $W$ 、 $H$ ——分别为建筑物的长、宽、高, m。

(2) 当建筑物的高度小于 100m, 同时其周边在  $2D$  范围内有等高或比它低的其他建筑物, 这些建筑物不在所考虑建筑物以  $h_t = 100\text{m}$  的保护范围内时按式 (11-3-4) 算出的等效面积  $A_e$  可减去  $(D/2) \times$  (这些建筑物与所考虑建筑物边长平行以米计的长度总和)  $\times 10^{-6}$  ( $\text{km}^2$ )。

当四周在  $2D$  范围内都有等高或比它低的其他建筑物时, 其等效面积计算式为

$$A_e = \left[ LW + (L + W) \sqrt{H(200 - H)} + \frac{\pi H(200 - H)}{4} \right] \times 10^{-6} \quad (11-3-5)$$

(3) 当建筑物的高度小于 100m, 同时其周边在  $2D$  范围内有比它高的其他建筑物时, 按式 (11-3-4) 算出的等效面积  $A_e$  可减去  $D \times$  (这些建筑物与所考虑建筑物边长平行以米计的长度总和)  $\times 10^{-6}$  ( $\text{km}^2$ )。

当四周在  $2D$  范围内都有比它高的其他建筑物时, 其等效面积计算式为

$$A_e = LW \times 10^{-6} \quad (11-3-6)$$

(4) 当建筑物的高度等于或大于 100m 时, 其每边的扩大宽度应按等于建筑物的高度计算; 建筑物的等效面积应计算式为

$$A_e = [LW + 2H(L + W) + \pi H^2] \times 10^{-6} \quad (11-3-7)$$

(5) 当建筑物的高度等于或大于 100m, 同时其周边在  $2H$  范围内有等高或比它低的其他建筑物, 且不在所确定建筑物以滚球半径等于建筑物高度 (m) 的保护范围内时, 按式 (11-3-7) 算出的等效面积  $A_e$  可减去  $(H/2) \times$  (这些建筑物与所确定建筑物边长平行以米计的长度总和)  $\times 10^{-6}$  ( $\text{km}^2$ )。

当四周在  $2H$  范围内都有等高或比它低的其他建筑物时, 其等效面积计算式为

$$A_e = \left[ LW + H(L + W) + \frac{\pi H^2}{4} \right] \times 10^{-6} \quad (11-3-8)$$

(6) 当建筑物的高度等于或大于 100m, 同时其周边在  $2H$  范围内有比它高的其他建筑物时, 按式 (11-3-7) 算出的等效面积  $A_e$  可减去  $H \times$  (这些其他建筑物与所确定建筑物边长平行以米计的长度总和)  $\times 10^{-6}$  ( $\text{km}^2$ )。当四周在  $2H$  范围内都有比它高的其他建筑物时, 其等效面积  $A_e$  可按式 (11-3-6) 计算。

(7) 当建筑物部位的高不同时, 应沿建筑物周边逐点算出最大扩大宽度, 其等效面积  $A_e$  应按每点最大扩大宽度外端的连接线所包围的面积计算。

### 11.3.2 建筑物防雷的措施

#### 11.3.2.1 基本规定

(1) 各类防雷建筑物应设防直击雷的外部防雷装置, 并应采取防闪电电涌侵入的措施。第一类防雷建筑物和本章 11.3.1.2 (5)、(6)、(7) 所规定的第二类防雷建筑物, 还应采取防闪电感应的措施。

(2) 各类防雷建筑物应设内部防雷装置, 在建筑物的地下室或地面层处, 建筑物金属体、金属装置、建筑物内系统和进出建筑物的金属管线应与防雷装置做防雷等电位连接, 除上述的措施外, 外部防雷装置与建筑物金属体、金属装置、建筑物内系统之间, 尚应满足间隔距离的要求。

(3) 本章 11.3.1.2 (2)、(3)、(4) 所规定的第二类防雷建筑物尚应采取防雷击电磁脉冲的措施。其他各类防雷建筑物, 当其建筑物内系统所接设备的重要性高, 以及所处雷击磁场环境和加于设备的闪电电涌无法满足要求时, 也应采取防雷击电磁脉冲的措施。防雷击

电磁脉冲的措施应符合本章 11.4.2 规定。

### 11.3.2.2 第一类防雷建筑物的防雷措施

(1) 第一类防雷建筑物防直击雷的措施应符合下列规定：

1) 应装设独立接闪杆或架空接闪线或网。架空接闪网的网格尺寸不应大于  $5\text{m} \times 5\text{m}$  或  $6\text{m} \times 4\text{m}$ 。

2) 排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等的管口外的以下空间应处于接闪器的保护范围内。当有管帽时，应按表 11-3-1 的规定确定；当无管帽时，应为管口上方半径  $5\text{m}$  的半球体。接闪器与雷电的接触点应设在上述规定的空间之外。

表 11-3-1 有管帽的管口外处于接闪器的保护范围内的空间

装置内的压力与周围空气压力的压力差 (kPa)	排放物对比于空气	管帽以上的垂直距离 (m)	距管口处的水平距离 (m)
<5	重于空气	1	2
5~25	重于空气	2.5	5
≤25	轻于空气	2.5	5
>25	重或轻于空气	5	5

注 相对密度小于或等于 0.75 的爆炸性气体规定为轻于空气的气体；相对密度大于 0.75 的爆炸性气体规定为重空气的气体。

3) 排放爆炸危险气体、蒸汽或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等，当其排放物达不到爆炸浓度、长期点火燃烧、一排放就点火燃烧，以及发生事故时排放物才达到爆炸浓度的通风管、安全阀，接闪器的保护范围应保护到管帽，无管帽时应保护到管口。

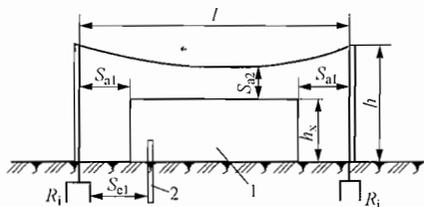


图 11-3-2 防雷装置至被保护建筑物的间隔距离

1—被保护建筑物；2—金属管道

4) 独立接闪杆的杆塔、架空接闪线的端部和架空接闪网的每根支柱处应至少设一根引下线。对用金属制成或有焊接、绑扎连接钢筋网的杆塔、支柱，宜利用金属杆塔或钢筋网作为引下线。

5) 独立接闪杆和架空接闪线或网的支柱及其接地装置与被保护建筑物及其有联系的管道、电缆等金属物之间的间隔距离如图 11-3-2 所示，其不得小于  $3\text{m}$ ，计算式为

a. 地上部分：

$$\text{当 } h_x < 5R_i \text{ 时,} \quad S_{ai} \geq 0.4(R_i + 0.1h_x) \quad (11-3-9)$$

$$\text{当 } h_x \geq 5R_i \text{ 时,} \quad S_{ai} \geq 0.1(R_i + h_x) \quad (11-3-10)$$

b. 地下部分：

$$S_{ei} \geq 0.4R_i \quad (11-3-11)$$

式中  $S_{ai}$ ——空气中的间隔距离，m；

$S_{ei}$ ——地中的间隔距离，m；

$R_i$ ——独立接闪杆、架空接闪线或网支柱处接地装置的冲击接地电阻， $\Omega$ ；

$h_x$ ——被保护建筑物或计算点的高度，m。

6) 架空接闪线至屋面和各种突出屋面的风帽、放散管等物体之间的间隔距离如图 11-3-1 所示, 其不应小于 3m, 计算式为

a. 当  $\left(h + \frac{l}{2}\right) < 5R_i$  时,

$$S_{a2} \geq 0.2R_i + 0.03\left(h + \frac{l}{2}\right) \quad (11-3-12)$$

b. 当  $\left(h + \frac{l}{2}\right) \geq 5R_i$  时,

$$S_{a2} \geq 0.05R_i + 0.06\left(h + \frac{l}{2}\right) \quad (11-3-13)$$

式中  $S_{a2}$ ——接闪线至被保护物在空气中的间隔距离, m;

$h$ ——接闪线的支柱高度, m;

$l$ ——接闪线的水平长度, m。

7) 架空接闪网至屋面和各种突出屋面的风帽、放散管等物体之间的间隔距离, 其不应小于 3m, 计算式为

a. 当  $(h + l_1) < 5R_i$  时,

$$S_{a2} \geq \frac{1}{n}[0.4R_i + 0.06(h + l_1)] \quad (11-3-14)$$

b. 当  $(h + l_1) \geq 5R_i$  时,

$$S_{a2} \geq \frac{1}{n}[0.1R_i + 0.12(h + l_1)] \quad (11-3-15)$$

式中  $S_{a2}$ ——接闪网至被保护物在空气中的间隔距离, m;

$l_1$ ——从接闪网中间最低点沿导体至最近支柱的距离, m;

$n$ ——从接闪网中间最低点沿导体至最近不同支柱并有同一距离  $l_1$  的个数。

8) 独立接闪杆、架空接闪线或架空接闪网应设独立的接地装置, 每一引下线的冲击接地电阻不宜大于  $10\Omega$ 。在土壤电阻率高的地区, 可适当增大冲击接地电阻, 但在  $3000\Omega \cdot m$  以下的地区, 冲击接地电阻不应大于  $30\Omega$ 。

(2) 第一类防雷建筑物防闪电感应符合下列规定:

1) 建筑物内的设备、管道、构架、电缆金属外皮、钢屋架、钢窗等较大金属物和突出屋面的放散管、风管等金属物, 均应接到防闪电感应的接地装置上。金属屋面周边每隔 18 ~ 24m 应采用引下线接地一次。现场浇灌或用预制构件组成的钢筋混凝土屋面, 其钢筋网的交叉点应绑扎或焊接, 并应每隔 18 ~ 24m 采用引下线接地一次。

2) 平行敷设的管道、构架和电缆金属外皮等长金属物, 其净距小于 100mm 时, 应采用金属线跨接, 跨接点的间距不应大于 30m; 交叉净距小于 100mm 时, 其交叉处也应跨接。当长金属物的弯头、阀门、法兰盘等连接处的过渡电阻大于  $0.03\Omega$  时, 连接处应用金属线跨接。对有不少于 5 根螺栓连接的法兰盘, 在非腐蚀环境下, 可不跨接。

3) 防闪电感应的接地装置应与电气和电子系统的接地装置共用, 其工频接地电阻不宜大于  $10\Omega$ 。防闪电感应的接地装置与独立接闪杆、架空接闪线或架空接闪网的接地装置之间的间隔距离, 应符合本章第 11.3.2.2 (1) 5) 的规定。当屋内设有等电位连接的接地干线时, 其与防闪电感应接地装置的连接不应少于 2 处。

(3) 第一类防雷建筑物防闪电电涌侵入的措施应符合下列规定：

1) 室外低压配电线路应全线采用电缆直接埋地敷设，在入户处应将电缆的金属外皮、钢管接到等电位连接带或防闪电感应的接地装置上。

2) 当全线采用电缆有困难时，应采用钢筋混凝土杆和铁横担的架空线，并应使用一段金属铠装电缆或护套电缆穿钢管直接埋地引入。架空线与建筑物的距离不应小于15m。在电缆与架空线连接处，尚应装设户外型电涌保护器。电涌保护器、电缆金属外皮、钢管和绝缘子铁脚、金具等应连在一起接地，其冲击接地电阻不应大于 $30\Omega$ 。所装设的电涌保护器应选用 I 级试验产品，其电压保护水平应小于或等于2.5kV，其每一保护模式应选冲击电流等于或大于10kA；若无户外型电涌保护器，应选用户内型电涌保护器，使用温度应满足安装处的环境温度，并应安装在防护等级 IP54 的箱内。当电涌保护器的接线形式为表 11-4-11 中的接线形式 2 时，接在中性线和 PE 线间电涌保护器的冲击电流，当为三相系统时不应小于40kA，当为单相系统时不应小于20kA。

3) 当架空线转换成一段金属铠装电缆或护套电缆穿钢管直接埋地引入时，其埋地长度计算式为

$$l \geq 2\sqrt{\rho} \quad (11-3-16)$$

式中  $l$ ——电缆铠装或穿电缆的钢管埋地直接与土壤接触的长度，m；

$\rho$ ——埋电缆处的土壤电阻率， $\Omega \cdot m$ 。

4) 在入户的总配电箱内是否装设电涌保护器应按 11.4.2 的规定确定。当需要安装电涌保护器时，电涌保护器的最大持续运行电压值和接线形式应按 11.4.2.5 规定确定；连接电涌保护器的导体截面积应按表 11-4-2 的规定取值。

5) 电子系统的室外金属导体线路宜全线采用有屏蔽层的电缆埋地或架空敷设，其两端的屏蔽层、加强钢线、钢管等应等电位连接到入户处的终端箱体上，在终端箱内是否装设电涌保护器应按 11.4.2 的规定确定。

6) 当通信线路采用钢筋混凝土杆的架空线时，应使用一段护套电缆穿钢管直接埋地引入，其埋地长度可按本章式 11-3-16 计算，且不应小于15m。在电缆与架空线连接处，尚应装设户外型电涌保护器。电涌保护器、电缆金属外皮、钢管和绝缘子铁脚、金具等应连在一起接地，其冲击接地电阻不应大于 $30\Omega$ 。所装设的电涌保护器应选用 D1 类高能量试验的产品，其电压保护水平和最大持续运行电压值应按 11.4.2.5 规定确定，连接电涌保护器的导体截面积应按表 11-4-2 的规定取值，每台电涌保护器的短路电流应等于或大于2kA；若无户外型电涌保护器，可选用户内型电涌保护器，但其使用温度应满足安装处的环境温度，并应安装在防护等级 IP54 的箱内。在入户处的终端箱内是否装设电涌保护器应按 11.4.2 的规定确定。

7) 架空金属管道，在进出建筑物处，应与防闪电感应的接地装置相连。距离建筑物100m内的管道，宜每隔25m接地一次，其冲击接地电阻不应大于 $30\Omega$ ，并应利用金属支架或钢筋混凝土支架的焊接、绑扎钢筋网作为引下线，其钢筋混凝土基础宜作为接地装置。埋地或地沟内的金属管道，在进出建筑物处应等电位连接到等电位连接带或防闪电感应的接地装置上。

(4) 当难以装设独立的外部防雷装置时，可将接闪杆或网格不大于 $5m \times 5m$ 或 $6m \times 4m$ 的接闪网或由其混合组成的接闪器直接装在建筑物上，接闪网应按图 11-3-3 的规定建筑

物易受雷击的部位,沿屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击的部位敷设;当建筑物高度超过30m时,首先应沿屋顶周边敷设接闪带,接闪带应设在外墙外表面或屋檐边垂直面上,也可设在外墙外表面或屋檐边垂直面外,并应符合下列规定:

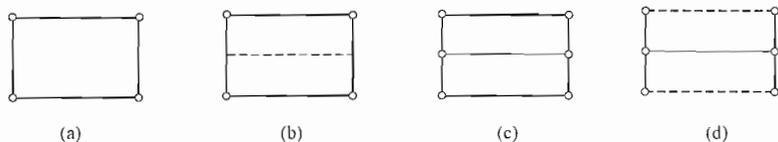


图 11-3-3 不同屋面坡度建筑物的易受雷击部位

(a) 平屋面; (b) 坡度不大于 $\frac{1}{10}$ 的屋面; (c) 坡度大于 $\frac{1}{10}$ 小于 $\frac{1}{2}$ 的屋面; (d) 坡度等于或大于 $\frac{1}{2}$ 的屋面

○—雷击率最高部位; —易受雷击部位; - - - - -不易受雷击的屋脊或屋檐

- 注 1. 平屋面或坡度不大于 $1/10$ 的屋面为檐角、女儿墙、屋檐,见图 11-3-3 (a)、(b);  
2. 坡度大于 $1/10$ , 小于 $1/2$ 的屋面为屋角、屋脊、檐角、屋檐,见图 11-3-3 (c);  
3. 坡度等于或大于 $1/2$ 的屋面为屋角、屋脊、檐角,见图 11-3-3 (d);  
4. 图 11-3-2 (c)、(d), 在屋脊有接闪带的情况下, 当屋檐处于屋脊接闪带的保护范围内时, 屋檐上可不装设接闪带。

1) 接闪器之间应互相连接。

2) 引下线不应少于 2 根, 并应沿建筑物四周和内庭院四周均匀或对称布置, 其间距沿周长计算不宜大于 12m。

3) 排放爆炸危险气体、蒸汽或粉尘的管道应符合本章 11.3.2.2 (1) 的 2)、3) 的规定。

4) 建筑物应装设等电位连接环, 环间垂直距离不应大于 12m, 所有引下线、建筑物的金属结构和金属设备均应连到环上。等电位连接环可利用电气设备的等电位连接干线环路。

5) 外部防雷的接地装置应围绕建筑物敷设成环形接地体, 每根引下线的冲击接地电阻不应大于 $10\Omega$ , 并应和电气、电子系统等接地装置及所有进入建筑物的金属管道相连, 此接地装置可兼作防雷电感应接地之用。

6) 当每根引下线的冲击接地电阻大于 $10\Omega$ 时, 外部防雷的环形接地体宜按下列方法敷设:

a. 当土壤电阻率小于或等于 $500\Omega \cdot m$ 时, 对环形接地体所包围面积的等效圆半径小于 5m 的情况, 每一引下线处应补加水平接地体或垂直接地体。

b. 在 11.3.2.2 (4) 6) a. 补加水平接地体时, 其最小长度计算式为

$$l_r = 5 - \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (11-3-17)$$

式中  $\sqrt{\frac{A}{\pi}}$ ——环形接地体所包围面积的等效圆半径, m;

$l_r$ ——补加水平接地体的最小长度, m;

$A$ ——环形接地体所包围的面积,  $m^2$ 。

c. 在 11.3.2.2 (4) 6) a. 补加垂直接地体时, 其最小长度计算式为

$$l_v = \frac{5 - \sqrt{\frac{A}{\pi}}}{2} \quad (11-3-18)$$

式中  $l_v$ ——补加垂直接地体的最小长度，m。

d. 当土壤电阻率大于  $500\Omega \cdot \text{m}$ 、小于或等于  $3000\Omega \cdot \text{m}$ ，且对环形接地体所包围面积的等效圆半径符合下式的计算时，每一引下线处应补加水平接地体或垂直接地体

$$\sqrt{\frac{A}{\pi}} < \frac{11\rho - 3600}{380} \quad (11-3-19)$$

e. 在 11.3.2.2 (4) 6) d) 补加水平接地体时，其最小总长度应按式计算

$$l_r = \left( \frac{11\rho - 3600}{380} \right) - \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (11-3-20)$$

f. 在 11.3.2.2 (4) 6) d) 补加垂直接地体时，其最小总长度应按式计算

$$l_v = \frac{\left( \frac{11\rho - 3600}{380} \right) - \sqrt{\frac{A}{\pi}}}{2} \quad (11-3-21)$$

注：按本款方法敷设接地体以及环形接地体所包围的面积等效圆半径等于或大于所规定的值时，每根引下线的冲击接地电阻可不作规定。共用接地装置的接地电阻按 50Hz 电气装置的接地电阻确定，应为不大于按人身安全所确定的接地电阻值。

7) 当建筑物高于 30m 时，还应采取下列防侧击的措施：

a. 应从 30m 起每隔不大于 6m 沿建筑物四周设水平接闪带并应与引下线相连。

b. 30m 及以上外墙上的栏杆、门窗等较大的金属物应与防雷装置连接。

8) 在电源引入的总配电箱处应装设 I 级试验的电涌保护器。电涌保护器的电压保护水平值应小于或等于 2.5kV。每一保护模式的冲击电流值，当无法确定时，冲击电流应取等于或大于 12.5kA。

9) 电源总配电箱处所装设的电涌保护器，其每一保护模式的冲击电流值，当电源线路无屏蔽层时宜按式 11-3-22 计算，当有屏蔽层时宜按式 (11-3-23) 计算

$$I_{\text{imp}} = \frac{0.5I}{nm} \quad (11-3-22)$$

$$I_{\text{imp}} = \frac{0.5IR_s}{n(mR_s + R_c)} \quad (11-3-23)$$

式中  $I$ ——雷电流 (kA)，取 200kA；

$n$ ——地下和架空引入的外来金属管道和线路的总数；

$m$ ——每一线路内导体芯线的总根数；

$R_s$ ——屏蔽层每公里的电阻， $\Omega/\text{km}$ ；

$R_c$ ——芯线每公里的电阻， $\Omega/\text{km}$ 。

10) 电源总配电箱处所装设的电涌保护器，其连接的导体截面积应按表 11-4-2 的规定取值，其最大持续运行电压值和接线形式应按本章 11.4.2.5 的规定确定。

注：当电涌保护器的接线形式为表 11-4-10 中的接线形式 2 时，接在中性线和 PE 线间电涌保护器的冲击电流，在三相系统时不应小于 11.3.2.2 (4) 9) 规定值的 4 倍，在单相系统时不应小于 2 倍。

11) 当电子系统的室外线路采用金属线时, 在其引入的终端箱处应安装 D1 类高能量试验类型的电涌保护器, 其短路电流当无屏蔽层时, 宜按式 (11-3-22) 计算, 当有屏蔽层时宜按式 (11-3-23) 计算; 当无法确定时应选用 2kA。选取电涌保护器的其他参数应符合本章 11.4.2.5 (2) 的规定, 连接电涌保护器的导体截面应按表 11-4-2 的规定取值。

12) 当电子系统的室外线路采用光缆时, 在其引入的终端箱处的电气线路侧时, 当无金属线路引出本建筑物至其他有自己接地装置的设备时, 可安装 B2 类慢上升率试验类型的电涌保护器, 其短路电流应按表 11-4-11 的规定确定, 宜选用 100A。

13) 输送火灾爆炸危险物质的埋地金属管道, 当其从室外进入户内处设有绝缘段时, 应在绝缘段处跨接符合下列要求的电压开关型电涌保护器或隔离放电间隙:

- a. 选用 I 级试验的密封型电涌保护器。
- b. 电涌保护器能承受的冲击电流按式 (11-3-22) 计算, 取  $m=1$ 。
- c. 电涌保护器的电压保护水平应小于绝缘段的耐冲击电压水平, 无法确定时, 应取其等于或大于 1.5kV 和等于或小于 2.5kV。
- d. 输送火灾爆炸危险物质的埋地金属管道在进入建筑物处的防雷等电位连接, 应在绝缘段之后管道进入室内处进行, 可将电涌保护器的上端头接到等电位连接带。

14) 具有阴极保护的埋地金属管道, 在其从室外进入户内处宜设绝缘段, 应在绝缘段处跨接符合下列要求的电压开关型电涌保护器或隔离放电间隙。

- a. 选用 I 级试验的密封型电涌保护器。
- b. 电涌保护器能承受的冲击电流按式 (11-3-22) 计算, 取  $m=1$ 。
- c. 电涌保护器的电压保护水平应小于绝缘段的耐冲击电压水平, 并应大于阴极保护电源的最大端电压。
- d. 具有阴极保护的埋地金属管道在进入建筑物处的防雷等电位连接, 应在绝缘段之后管道进入室内处进行, 可将电涌保护器的上端头接到等电位连接带。

(5) 当树木邻近建筑物且不在接闪器保护范围之内时, 树木与建筑物之间的净距不应小于 5m。

### 11.3.2.3 第二类防雷建筑物的防雷措施

(1) 第二类防雷建筑物外部防雷的措施, 宜采用装设在建筑物上的接闪网、接闪带或接闪杆, 也可采用由接闪网、接闪带或接闪杆混合组成的接闪器。接闪网、接闪带应按图 11-3-3 的规定建筑物易受雷击的部位, 沿屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击的部位敷设, 并应在整个屋面组成不大于  $10\text{m} \times 10\text{m}$  或  $12\text{m} \times 8\text{m}$  的网格; 当建筑物高度超过 45m 时, 首先应沿屋顶周边敷设接闪带, 接闪带应设在外墙外表面或屋檐边垂直面上, 也可设在外墙外表面或屋檐边垂直面外。接闪器之间应互相连接。

(2) 突出屋面的放散管、风管、烟囱等物体, 应按下列方式保护:

1) 排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等管道应满足本章 11.3.2.2 (1) 2) 的规定。

2) 排放无爆炸危险气体、蒸气或粉尘的放散管、烟囱, 1、21、2 区和 22 区爆炸危险场所的自然通风管, 0 区和 20 区爆炸危险场所的装有阻火器的放散管、呼吸阀、排风管, 以及本章 11.3.2.2 (1) 3) 所规定的管、阀及煤气和天然气放散管等, 其防雷保护应综合下列规定:

a. 金属物体可不装接闪器，但应和屋面防雷装置相连。

b. 除符合本章 11.3.2.5 (7) 规定情况外，在屋面接闪器保护范围之外的非金属物体应装接闪器，并应和屋面防雷装置相连。

(3) 专设引下线不应少于 2 根，并应沿建筑物四周和内庭院四周均匀对称布置，其间距沿周长计算不应大于 18m。当建筑物的跨度较大，无法在跨距中间设引下线时，应在跨距端设引下线并减小其他引下线的间距，专设引下线的平均间距不应大于 18m。

(4) 外部防雷装置的接地应和防闪电感应、内部防雷装置、电气和电子系统等接地共用接地装置，并应与引入的金属管线做等电位连接。外部防雷装置的专设接地装置宜围绕建筑物敷设成环形接地体。

(5) 利用建筑物的钢筋作为防雷装置时，应符合下列规定：

1) 建筑物宜利用钢筋混凝土屋顶、梁、柱、基础内的钢筋作为引下线。本章 11.3.1.2 (2)、(3)、(4)、(9)、(10) 的建筑物，当其女儿墙以内的屋顶钢筋网以上的防水和混凝土层允许不保护时，宜利用屋顶钢筋网作为接闪器；本章 11.3.1.2 (2)、(3)、(4)、(9)、(10) 的建筑物为多层建筑，且周围很少有人停留时，宜利用女儿墙压顶板内或檐口内的钢筋作为接闪器。

2) 当基础采用硅酸盐水泥和周围土壤的含水量不低于 4% 及基础的外表面无防腐层或有沥青质防腐层时，宜利用基础内的钢筋作为接地装置。当基础的外表面有其他类的防腐层且无桩基可利用时，宜在基础防腐层下面的混凝土垫层内敷设人工环形基础接地体。

3) 敷设在混凝土中作为防雷装置的钢筋或圆钢，当仅为一根时，其直径不应小于 10mm。被利用作为防雷装置的混凝土构件内有箍筋连接的钢筋时，其截面积总和不应小于一根直径 10mm 钢筋的截面积。

4) 利用基础内钢筋网作为接地体时，在周围地面以下距地面不应小 0.5m，每根引下线所连接的钢筋表面积总和计算式为

$$S \geq 4.24k_c^2 \quad (11-3-24)$$

式中：S 为钢筋表面积总和， $m^2$ ； $k_c$  为分流系数，按本章 11.4.3 规定取值。

5) 当建筑物周边的无钢筋的闭合条形混凝土基础内敷设人工基础接地体时，接地体的规格尺寸应按表 11-3-2 的规定确定。

表 11-3-2 第二类防雷建筑物环形人工基础接地体的最小规格尺寸

闭合条形基础的周长	扁钢 (mm)	圆钢，根数 × 直径 (mm)
≥60	4 × 25	2 × φ10
40 ~ 60	4 × 50	4 × φ10 或 3 × φ12
<40	钢材表面积总和 ≥ 4.24m <sup>2</sup>	

注 1. 当长度相同，截面积相同时，宜选用扁钢；

2. 采用多根圆钢时，其敷设净距不小于直径的 2 倍；

3. 利用闭合条形基础内的钢筋作接地体时可按本表校验，除主筋外，可计入箍筋的表面积。

6) 构件内有箍筋连接的钢筋或成网状的钢筋，其箍筋与钢筋、钢筋与钢筋应采用土建施工的绑扎法、螺丝、对焊或搭焊连接。单根钢筋、圆钢或外引预埋连接板、线与构件内钢

筋应焊接或采用螺栓紧固的卡夹器连接。构件之间必须连接成电气通路。

(6) 共用接地装置的接地电阻应按 50Hz 电气装置的接地电阻确定, 不应大于按人身安全所确定的接地电阻值。在土壤电阻率小于或等于  $3000\Omega \cdot \text{m}$  时, 外部防雷装置的接地体符合下列规定之一以及环形接地体所包围面积的等效圆半径等于或大于所规定的值时, 可不计及冲击接地电阻; 但当每根专设引下线的冲击接地电阻不大于  $10\Omega$  时, 可不按 11.3.2.3 (6) 1)、2) 敷设接地体。

1) 当土壤电阻率小于或等于  $800\Omega \cdot \text{m}$  时, 对环形接地体所包围面积的等效圆半径小于 5m 的情况, 每一引下线处应补加水平接地体或垂直接地体。当补加水平接地体时, 其最小长度应按式 (11-3-17) 计算; 当补加垂直接地体时, 其最小长度应按式 (11-3-18) 计算。

2) 当土壤电阻率大于  $800\Omega \cdot \text{m}$ 、小于或等于  $3000\Omega \cdot \text{m}$ , 且对环形接地体所包围的面积等效圆半径小于按式 (11-3-25) 计算的值时, 每一引下线处应补加水平接地体或垂直接地体。

$$\sqrt{\frac{A}{\pi}} < \frac{\rho - 550}{50} \quad (11-3-25)$$

3) 如 11.3.2.3 (6) 2) 补加水平接地体时, 其最小总长度计算式为

$$l_r = \left( \frac{\rho - 550}{50} \right) - \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (11-3-26)$$

4) 如 11.3.2.3 (6) 2) 补加垂直接地体时, 其最小总长度计算式为

$$l_v = \frac{\left( \frac{\rho - 550}{50} \right) - \sqrt{\frac{A}{\pi}}}{2} \quad (11-3-27)$$

5) 在符合本章 11.3.2.3 (5) 规定的条件下, 利用槽形、板形或条形基础的钢筋作为接地体或在基础下面混凝土垫层内敷设人工环形基础接地体, 当槽形、板形基础钢筋网在水平面的投影面积或成环的条形基础钢筋或人工环形基础接地体所包围的面积符合下列规定时, 可不补加接地体。

a. 当土壤电阻率小于或等于  $800\Omega \cdot \text{m}$  时, 所包围的面积应大于或等于  $79\text{m}^2$ 。

b. 当土壤电阻率大于  $800\Omega \cdot \text{m}$  且小于或等于  $3000\Omega \cdot \text{m}$  时, 所包围的面积应大于或等于按式 (11-3-28) 计算的值。

$$A \geq \pi \left( \frac{\rho - 550}{50} \right)^2 \quad (11-3-28)$$

6) 在符合本章 11.3.2.3 (5) 条规定的条件下, 对 6m 柱距或大多数柱距为 6m 的单层工业建筑物, 当利用柱子基础的钢筋作为外部防雷装置的接地体并同时符合下列规定时, 可不另加接地体:

a. 利用全部或绝大多数柱子基础的钢筋作为接地体。

b. 柱子基础的钢筋网通过钢柱, 钢屋架, 钢筋混凝土柱子、屋架、屋面板、吊车梁等构件的钢筋或防雷装置互相连成整体。

c. 在周围地面以下距地面不小于 0.5m, 每一柱子基础内所连接的钢筋表面积总和大于或等于  $0.82\text{m}^2$ 。

(7) 本章 11.3.1.2 (5) ~ (7) 款所规定的建筑物，其防闪电感应的措施应符合下列规定。

1) 建筑物内的设备、管道、构架等主要金属物，应就近接到防雷装置或共用接地装置上。

2) 除本章 11.3.1.2 (7) 所规定的建筑物外，平行敷设的管道、构架和电缆金属外皮等长金属物应符合本章 11.3.2.2 (2) 2) 的规定，但长金属物连接处可不跨接。

3) 建筑物内防闪电感应的接地干线与接地装置的连接不应少于 2 处。

(8) 防止雷电流流经引下线和接地装置时产生的高电位对附近金属物或电气、电子系统线路的反击，应符合下列规定：

1) 在金属框架的建筑物中，或在钢筋连接在一起、电气贯通的钢筋混凝土框架的建筑物中，金属物或线路与引下线之间的间隔距离可无要求；在其他情况下，金属物或线路与引下线之间的间隔距离计算式为

$$S_{a3} \geq 0.06k_c l_x \quad (11-3-29)$$

式中  $S_{a3}$ ——空气中的间隔距离，m；

$l_x$ ——引下线计算点到连接点的长度，m，连接点即金属物或电气、电子系统线路与防雷装置之间直接或通过电涌保护器相连的点。

2) 当金属物或线路与引下线之间有自然或人工接地的钢筋混凝土构件、金属板、金属网等静电屏蔽物隔开时，金属物或线路与引下线之间的间隔距离可无要求。

3) 当金属物或线路与引下线之间有混凝土墙、砖墙隔开时，其击穿强度应为空气击穿强度的 1/2。当间隔距离不能满足 11.3.2.3 (8) 1) 的规定时，金属物应与引下线直接相连，带电线路应通过电涌保护器与引下线相连。

4) 在电气接地装置与防雷接地装置共用或相连的情况下，应在低压电源线路引入的总配电箱、配电柜处装设 I 级试验的电涌保护器。电涌保护器的电压保护水平值应小于或等于 2.5kV。每一保护模式的冲击电流值，当无法确定时应取等于或大于 12.5kA。

5) 当 Yyn0 型或 Dyn11 型接线的配电变压器设在本建筑物内或附设于外墙处时，应在变压器高压侧装设接闪器；在低压侧的配电屏上，当有线路引出本建筑物至其他有独自敷接地装置的配电装置时，应在母线上装设 I 级试验的电涌保护器，电涌保护器每一保护模式的冲击电流值，当无法确定时冲击电流应取等于或大于 12.5kA；当无线路引出本建筑物时，应在母线上装设 II 级试验的电涌保护器，电涌保护器每一保护模式的标称放电电流值应等于或大于 5kA。电涌保护器的电压保护水平值应小于或等于 2.5kV。

6) 低压电源线路引入的总配电箱、配电柜处装设 I 级试验的电涌保护器，以及配电变压器设在本建筑物内或附设于外墙处，并在低压侧配电屏的母线上装设 I 级试验的电涌保护器时，电涌保护器每一保护模式的冲击电流值，当电源线路无屏蔽层时可按式 (11-3-22) 计算，当有屏蔽层时可按式 (11-3-23) 计算，式中的雷电流应取等于 150kA。

7) 在电子系统的室外线路采用金属线时，其引入的终端箱处应安装 D1 类高能量试验类型的电涌保护器，其短路电流当无屏蔽层时可按式 (11-3-22) 计算，当有屏蔽层时可按式 (11-3-23) 计算，式中的雷电流应取等于 150kA；当无法确定时应选用 1.5kA。

8) 在电子系统的室外线路采用光缆时，其引入的终端箱处的电气线路侧，当无金属线路引出本建筑物至其他有自己接地装置设备时可安装 B2 类慢上升率试验类型的电涌保护

器,其短路电流宜选用75A。

9) 输送火灾爆炸危险物质和具有阴极保护的埋地金属管道,当其从室外进入户内处设有绝缘段时应符合本章11.3.2.2(4)、13)、14)的规定,在按式(11-3-22)计算时,式中的雷电流应取等于150kA。

(9) 高度超过45m的建筑物,除屋顶的外部防雷装置应符合本章11.3.2.3(1)的规定外,还应符合下列规定:

1) 对水平突出外墙的物体,当滚球半径45m球体从屋顶周边接闪带外向地面垂直下降接触到突出外墙的物体时,应采取相应的防雷措施。

2) 高于60m的建筑物,其上部占高度20%并超过60m的部位应防侧击,防侧击应符合下列规定。

a. 在建筑物上部占高度20%并超过60m的部位,各表面上的尖物、墙角、边缘、设备以及显著突出的物体,应按屋顶上的保护措施处理。

b. 在建筑物上部占高度20%并超过60m的部位,布置接闪器应符合对本类防雷建筑物的要求,接闪器应重点布置在墙角、边缘和显著突出的物体上。

c. 外部金属物,当其最小尺寸符合本章11.4.1.2(7)2)的规定时,可利用其作为接闪器,还可利用布置在建筑物垂直边缘处的外部引下线作为接闪器。

d. 符合本章11.3.2.3(5)规定的钢筋混凝土内钢筋和符合本章11.4.1.3(5)规定的建筑物金属框架,当作为引下线或与引下线连接时,均可利用其作为接闪器。

3) 外墙内、外竖直敷设的金属管道及金属物的顶端和底端,应与防雷装置等电位连接。

(10) 有爆炸危险的露天钢质封闭气罐,当其高度小于或等于60m、罐顶壁厚不小于4mm时,或当其高度大于60m、罐项壁厚和侧壁壁厚均不小于4mm时,可不装设接闪器,但应接地,且接地点不应少于2处,两接地点间距离不宜大于30m,每处接地点的冲击接地电阻不应大于 $30\Omega$ 。当防雷的接地装置符合本章11.3.2.3(6)的规定时,可不计及其接地电阻值,但本章11.3.2.3(6)所规定的 $10\Omega$ 可改为 $30\Omega$ 。放散管和呼吸阀的保护应符合本章11.3.2.3(2)的规定。

#### 11.3.2.4 第三类防雷建筑物的防雷措施

(1) 第三类防雷建筑物外部防雷的措施宜采用装设在建筑物上的接闪网、接闪带或接闪杆,也可采用由接闪网、接闪带和接闪杆混合组成的接闪器。接闪网、接闪带应按图11-3-3规定建筑物易受雷击的部位沿屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击的部位敷设,并应在整个屋面组成不大于 $20\text{m}\times 20\text{m}$ 或 $24\text{m}\times 16\text{m}$ 的网格;当建筑物高度超过60m时,首先应沿屋顶周边敷设接闪带,接闪带应设在外墙外表面或屋檐边垂直面上,也可设在外墙外表面或屋檐边垂直面外。接闪器之间应互相连接。

(2) 突出屋面物体的保护措施应符合本章11.3.2.3(2)的规定。

(3) 专设引下线不应少于2根,并应沿建筑物四周和内庭院四周均匀对称布置,其间距沿周长计算不应大于25m。当建筑物的跨度较大,无法在跨距中间设引下线时,应在跨距两端设引下线并减小其他引下线的间距,专设引下线的平均间距不应大于25m。

(4) 防雷装置的接地应与电气和电子系统等接地共用接地装置,并应与引入的金属管线做等电位连接。外部防雷装置的专设接地装置宜围绕建筑物敷设成环形接地体。

(5) 建筑物宜利用钢筋混凝土屋面、梁、柱、基础内的钢筋作为引下线和接地装置，当其女儿墙以内的屋顶钢筋网以上的防水和混凝土层允许不保护时，宜利用屋顶钢筋网作为接闪器，以及当建筑物为多层建筑，其女儿墙压顶板内或檐口内有钢筋且周围除保安人员巡逻外通常无人停留时，宜利用女儿墙压顶板内或檐口内的钢筋作为接闪器，并应符合本章 11.3.2.3 (5) 2)、3)、6) 规定，同时应符合下列规定：

1) 利用基础内钢筋网作为接地体时，在周围地面以下距地面不小于 0.5m 深，每根引下线所连接的钢筋表面积总和计算式为

$$S \geq 1.89k_c^2 \quad (11-3-30)$$

2) 当在建筑物周边的无钢筋的闭合条形混凝土基础内敷设人工基础接地体时，接地体的规格尺寸应按表 11-3-3 的规定确定。

表 11-3-3 第三类防雷建筑物环形人工基础接地体的最小规格尺寸

闭合条形基础的周长 (m)	扁钢 (mm)	圆钢, 根数 × 直径 (mm)
≥60	—	1 × φ10
40 ~ 60	4 × 20	2 × φ8
<40	钢材表面积总和 ≥ 1.89m <sup>2</sup>	

- 注 1. 当长度相同，截面相同时，宜选用扁钢；  
2. 采用多根圆钢时，其敷设净距不小于直径的 2 倍；  
3. 利用闭合条形基础内的钢筋作接地体时可按本表校验，除主筋外，可计入箍筋的表面积。

(6) 共用接地装置的接地电阻应按 50Hz 电气装置的接地电阻确定，不应大于按人身安全所确定的接地电阻值。在土壤电阻率小于或等于 3000Ω·m，外部防雷装置的接地体应符合下列规定之一以及环形接地体所包围面积的等效圆半径等于或大于所规定的值时可不计及冲击接地电阻；当每根专设引下线的冲击接地电阻不大于 30Ω，但对本章 11.3.1.3 (2) 所规定的建筑物则不大于 10Ω 时，可不按 11.3.2.4 (6) 1) 敷设接地体。

1) 对环形接地体所包围面积的等效圆半径小于 5m 时，每一引下线处应补加水平接地体或垂直接地体。当补加水平接地体时，其最小长度应按式 (11-3-17) 计算；当补加垂直接地体时，其最小长度应按本章式 (11-3-18) 计算。

2) 在符合本章 11.3.2.4 (5) 条规定的条件下，利用槽形、板形或条形基础的钢筋作为接地体或在基础下面混凝土垫层内敷设人工环形基础接地体，当槽形、板形基础钢筋网在水平面的投影面积或成环的条形基础钢筋或人工环形基础接地体所包围的面积大于或等于 79m<sup>2</sup> 时，可不补加接地体。

3) 在符合本章 11.3.2.4 (5) 规定的条件下，对 6m 柱距或大多数柱距为 6m 的单层工业建筑物当利用柱子基础的钢筋作为外部防雷装置的接地体并同时符合下列规定时，可不另加接地体：

a. 利用全部或绝大多数柱子基础的钢筋作为接地体。  
b. 柱子基础的钢筋网通过钢柱，钢屋架，钢筋混凝土柱子、屋架、屋面板、吊车梁等构件的钢筋或防雷装置互相连成整体。

c. 在周围地面以下距地面不小于 0.5m 深，每一柱子基础内所连接的钢筋表面积总和大于或等于 0.37m<sup>2</sup>。

(7) 防止雷电流流经引下线和接地装置时产生的高电位对附近金属物或电气和电子系统线路的反击,应符合下列规定:

1) 应符合本章 11.3.2.3 (8) 1) ~5) 的规定,并应按式 (11-3-31) 计算

$$S_{a3} \geq 0.04k_c l_x \quad (11-3-31)$$

2) 低压电源线路引入的总配电箱、配电柜处装设 I 级试验的电涌保护器,以及配电变压器设在本建筑物内或附设于外墙处,并在低压侧配电屏的母线上装设 I 级试验的电涌保护器时,电涌保护器每一保护模式的冲击电流值,当电源线路无屏蔽层时可按式 (11-3-22) 计算,当有屏蔽层时可按本章式 (11-3-23) 计算,式中的雷电流应取等于 100kA。

3) 在电子系统的室外线路采用金属线时,在其引入的终端箱处应安装 D1 类高能量试验类型的电涌保护器,其短路电流当无屏蔽层时可按本章式 (11-3-22) 计算,当有屏蔽层时可按式 (11-3-23) 计算,式中的雷电流应取等于 100kA;当无法确定时应选用 1.0kA。

4) 在电子系统的室外线路采用光缆时,其引入的终端箱处的电气线路侧,当无金属线路引出本建筑物至其他有自己接地装置的设备时,可安装 B2 类慢上升率试验类型的电涌保护器,其短路电流宜选用 50A。

5) 输送火灾爆炸危险物质和具有阴极保护的埋地金属管道,当其从室外进入户内处设有绝缘段时,应符合本章 11.3.2.2 (4) 13) 和 14) 的规定,当按式 (11-3-22) 计算时,雷电流应取等于 100kA。

(8) 高度超过 60m 的建筑物,除屋顶的外部防雷装置应符合本章 11.3.2.4 (1) 的规定外,还应符合下列规定:

1) 对水平突出外墙的物体,当滚球半径 60m 球体从屋顶周边接闪带外向地面垂直下降接触到突出外墙的物体时,应采取相应的防雷措施。

2) 高于 60m 的建筑物,其上部占高度 20% 并超过 60m 的部位应防侧击,防侧击应符合下列规定。

a. 在建筑物上部占高度 20% 并超过 60m 的部位,各表面上的尖物、墙角、边缘、设备以及显著突出的物体,应按屋顶的保护措施处理。

b. 在建筑物上部占高度 20% 并超过 60m 的部位,布置接闪器应符合对本类防雷建筑物的要求,接闪器应重点布置在墙角、边缘和显著突出的物体上。

c. 外部金属物,当其最小尺寸符合本章 11.4.1.2 (7) 2) 的规定时,可利用其作为接闪器,还可利用布置在建筑物垂直边缘处的外部引下线作为接闪器。

d. 符合本章 11.3.2.4 (5) 规定的钢筋混凝土内钢筋和符合本章 11.4.1.3 (5) 规定的建筑物金属框架,当其作为引下线或与引下线连接时均可利用作为接闪器。

3) 外墙内、外竖直敷设的金属管道及金属物的顶端和底端,应与防雷装置等电位连接。

(9) 砖烟囱、钢筋混凝土烟囱,宜在烟囱上装设接闪杆或接闪环保护。多支接闪杆应连接在闭合环上。当非金属烟囱无法采用单支或双支接闪杆保护时,应在烟囱口装设环形接闪带,并应对称布置三支高出烟囱口不低于 0.5m 的接闪杆。钢筋混凝土烟囱的钢筋应在其顶部和底部与引下线和贯通连接的金属爬梯相连。当符合本章 11.3.2.4 (5) 的规定时,宜利用钢筋作为引下线和接地装置,可不另设专用引下线。高度不超过 40m 的烟囱,可只设

一根引下线，超过40m时应设两根引下线。可利用螺栓或焊接连接的一座金属爬梯作为两根引下线用。金属烟囱应作为接闪器和引下线。

### 11.3.2.5 其他防雷措施

(1) 当一座防雷建筑物中兼有第一、第二、第三类防雷建筑物时，其防雷分类和防雷措施宜符合下列规定：

1) 当第一类防雷建筑物部分的面积占建筑物总面积的30%及以上时，该建筑物宜确定为第一类防雷建筑物。

2) 当第一类防雷建筑物部分的面积占建筑物总面积的30%以下，且第二类防雷建筑物部分的面积占建筑物总面积的30%及以上时，或当这两部分防雷建筑物的面积均小于建筑物总面积的30%，但其面积之和又大于30%时，该建筑物宜确定为第二类防雷建筑物。但对第一类防雷建筑物部分的防闪电感应和防闪电电涌侵入，应采取第一类防雷建筑物的保护措施。

3) 当第一、二类防雷建筑物部分的面积之和小于建筑物总面积的30%，且不可能遭直接雷击时，该建筑物可确定为第三类防雷建筑物；但对第一、二类防雷建筑物部分的防闪电感应和防闪电电涌侵入，应采取各自类别的保护措施；当可能遭直接雷击时，宜按各自类别采取防雷措施。

(2) 当一座建筑物中仅有一部分为第一、二、三类防雷建筑物时，其防雷措施宜符合下列规定：

1) 当防雷建筑物部分可能遭直接雷击时，宜按各自类别采取防雷措施。

2) 当防雷建筑物部分不可能遭直接雷击时，可不采取防直击雷措施，可仅按各自类别采取防闪电感应和防闪电电涌侵入的措施。

3) 当防雷建筑物部分的面积占建筑物总面积的50%以上时，该建筑物宜按本章11.3.2.5(1)的规定采取防雷措施。

(3) 当采用接闪器保护建筑物、封闭气罐时，其外表面外的2区爆炸危险场所可不在滚球法确定的保护范围内。

(4) 固定在建筑物上的节日彩灯、航空障碍信号灯及其他用电设备和线路应根据建筑物的防雷类别采取相应的防止闪电电涌侵入的措施，并应符合下列规定：

1) 无金属外壳或保护网罩的用电设备应处在接闪器的保护范围内。

2) 从配电箱引出的配电线路应穿钢管。钢管的一端应与配电箱和PE线相连；另一端应与用电设备外壳、保护罩相连，并应就近与屋顶防雷装置相连。当钢管因连接设备而中间断开时应设跨接线。

3) 在配电箱内应在开关的电源侧装设Ⅱ级试验的电涌保护器，其电压保护水平不应大于2.5kV，标称放电电流值应根据具体情况确定。

(5) 粮、棉及易燃物大量集中的露天堆场，当其年预计雷击次数大于或等于0.05时，应采用独立接闪杆或架空接闪线防直击雷。独立接闪杆和架空接闪线保护范围的滚球半径可取100m。在计算雷击次数时，建筑物的高度可按可能堆放的高度计算，其长度和宽度可按可能堆放面积的长度和宽度计算。

(6) 在建筑物引下线附近保护人身安全需采取的防接触电压和跨步电压的措施，应符合下列规定：

1) 防接触电压应符合下列规定之一:

a. 利用建筑物金属构架和建筑物互相连接的钢筋在电气上是贯通且不少于 10 根柱子组成的自然引下线, 作为自然引下线的柱子包括位于建筑物四周和建筑物内的。

b. 引下线 3m 范围内地表层的电阻率不小于  $50\text{k}\Omega \cdot \text{m}$ , 或敷设 5cm 厚沥青层或 15cm 厚砾石层。

c. 外露引下线, 其距地面 2.7m 以下的导体用耐  $1.2/50\mu\text{s}$  冲击电压 100kV 的绝缘层隔离, 或用至少 3mm 厚的交联聚乙烯层隔离。

d. 用护栏、警告牌使接触引下线的可能性降至最低限度。

2) 防跨步电压应符合下列规定之一:

a. 利用建筑物金属构架和建筑物互相连接的钢筋在电气上是贯通且不少于 10 根柱子组成的自然引下线, 作为自然引下线的柱子包括位于建筑物四周和建筑物内的。

b. 引下线 3m 范围内地表层的电阻率不小于  $50\text{k}\Omega \cdot \text{m}$ , 或敷设 5cm 厚沥青层或 15cm 厚砾石层。

c. 用网状接地装置对地面做均衡电位处理。

d. 用护栏、警告牌使进入距引下线 3m 范围内地面的可能性减小到最低限度。

(7) 对第二类和第三类防雷建筑物, 应符合下列规定:

1) 没有得到接闪器保护的屋顶孤立金属物的尺寸不超过下列数值时, 可不要求附加的保护措施。

a. 高出屋顶平面不超过 0.3m。

b. 上层表面总面积不超过  $1.0\text{m}^2$ 。

c. 上层表面的长度不超过 2.0m。

2) 不处在接闪器保护范围内的非导电性屋顶物体, 当它没有突出由接闪器形成的平面 0.5m 以上时, 可不要求附加增设接闪器的保护措施。

(8) 在独立接闪杆、架空接闪线、架空接闪网的支柱上, 严禁悬挂电话线、广播线、电视接收天线及低压架空线等。

### 11.3.2.6 高层民用建筑物的防雷补充措施及建筑物防雷的其他补充要求<sup>①</sup>

(1) 因高层建筑物均为钢筋混凝土结构或钢结构, 应充分利用其建筑物结构金属体作防雷装置。其防侧击和等电位的保护措施中除应将外墙上距地等于滚球半径及以上的栏杆、门窗等较大的金属物与防雷装置连接外还应将外墙装饰幕墙等金属体与防雷装置相连接。

(2) 关于高层建筑的防直击雷接闪器, 宜利用明设的金属栏杆等代替接闪带, 但不宜利用外墙周边的屋顶结构钢筋代替接闪带以防雷击点破碎混凝土坠落造成意外伤害。

(3) 当基础的防水层采用塑料、橡胶等非沥青质的防水材料时, 基础内的钢筋不能用作防雷接地装置, 但可作为引下线和等电位连接导体使用, 此时宜在基础防水层外周边的素混凝土垫层内另敷人工接地体并按引下线的连接要求与基础内钢筋体焊接连通。另外, 基础周围开挖所设的护坡桩宜利用其作为自然接地体。

(4) 建筑物构件内钢筋的电气连接要求。按照 IEC - TC 81 的相关标准规定, 当垂直钢筋与水平钢筋的交叉点大部分是采用焊接或可靠绑扎连接以及长度方向主钢筋之间的连接是

① 11.3.2.6 小节中部分内容摘自《工业与民用配电设计手册(第三版)》(新版手册即将删去此部分内容)。

焊接或搭接长度至少为其直径 20 倍的可靠绑扎，则应视为电气上是贯通的。按国家防雷规范及标准设计图集的规定：当利用钢筋混凝土构件内的钢筋网作为电气装置的接地线时，从供接地用的预埋连接板起沿钢筋直到与接地体连接止的连线上的所有连接点应采用焊接及单根钢筋或圆钢或外引预埋连接板、线与构件内钢筋的连接应采用焊接或螺栓卡夹器连接外，其余钢筋采用通常土建施工的绑扎法连接即可满足防雷装置电气连续性的要求。当钢筋之间采用焊接连接时，搭接长度不宜小于其直径的 6 倍。当钢筋之间跨接连接或引出导体时，跨（搭）接线应采用  $\geq \phi 10\text{mm}$  圆钢，焊缝长度不小于 60mm；当跨接线应用于电气装置时，应采用  $\phi 12\text{mm}$  圆钢，焊缝长度为 80mm；或采用  $25\text{mm} \times 4\text{mm}$  扁钢，其搭接长度为扁钢宽度的 2 倍（三面焊）。

(5) 对年预计雷击次数小于 0.05 的一般工业或永久性民用建筑物，如建筑物本身的结构钢筋符合可利用其作为防雷装置的条件且只需少量费用及施工工作就能满足防雷要求时，为安全起见，可扩大按第三类防雷建筑物做防雷设计。

(6) 对装设或预计会装设大量敏感电子设备（如计算机、通信设备、控制系统等）的建筑物按照本章 11.4.3 防闪电电磁脉冲的屏蔽和等电位连接的要求，宜扩大防侧击和等电位连接措施，将地面以上建筑物外墙上的所有结构钢筋体、金属门窗、栏杆、幕墙等金属体与防雷装置相连接以构成笼式屏蔽体。此种做法也可起到有效防止“球雷”的作用。防直击雷接闪器宜采用防雷网。

### 11.3.2.7 特殊建、构筑物的防雷<sup>①</sup>

(1) 有爆炸危险的露天封闭钢罐的防雷。露天装设有爆炸危险的封闭钢罐和工艺装置（石油、化工类钢罐除外），当其壁厚不小于 4mm 时，一般可不装接闪器，但应接地（对湿式氢气储罐钟罩顶应有可靠接地），且接地点不应少于 2 处，两接地点间距离不宜大于 30m；当采用接闪器保护时，其外表面的 2 区爆炸危险环境可不在保护范围内。对浮顶金属罐应用两根截面积不小于  $25\text{mm}^2$  的软铜绞线将浮顶与罐体进行良好的电气连接。冲击接地电阻不应大于  $30\Omega$ （氢气储罐不大于  $10\Omega$ ）；当其接地装置符合 11.3.2.3 (6) 要求时，也可不计及接地电阻值。其放散管和呼吸阀的保护应符合 11.3.2.3 (2) 的要求。引出/入罐体的金属管道应在法兰等接头处做好电气连接。

(2) 户外架空管道的防雷。

1) 户外架空金属管道，应设防雷电波侵入建筑物的接地（参见各类防雷建筑物的防雷电波侵入措施）。其中输送易燃易爆气体或液体的管道在进出建筑物处，不同爆炸危险环境的边界、管道分支处及直线段管道 50 ~ 80m 处应设防静电接地，每处接地电阻不大于  $30\Omega$ （氧气和乙炔气体管道为  $10\Omega$ ）。

2) 户外架空氢气管道除符合 11.3.2.7 (1) 要求外，还应每隔 20 ~ 25m 设防雷电感应接地，每处接地电阻不大于  $10\Omega$ 。

3) 上述管道架空平行敷设，当两管间净距小于 100mm 时，每隔 20 ~ 30m 应用金属线跨接，净距小于 100mm 的交叉管道也应用金属线跨接。

4) 输送易燃易爆气体或液体管道的连接处（如阀门、法兰盘等）应用金属线跨接；跨接线可采用直径不小于 8mm 的圆钢。

5) 防雷电感应接地和防静电接地宜共用接地装置，接地电阻应符合两种接地中较小值

<sup>①</sup> 11.3.2.7 小节中主要内容摘自《工业与民用配电设计手册（第三版）》（新版手册将有重大改变）。

的要求，并可与防雷及电气设备接地装置相连通。

(3) 水塔的防雷。水塔按第三类构筑物设计防雷。利用水塔顶上周围铁栅栏作为接闪器，或装设环形接闪带保护水塔边缘，并在塔顶中心装一根接闪杆，其高度根据它与塔顶边缘接闪器得出的保护范围能保护到塔顶各物体确定之。冲击接地电阻不大于  $30\Omega$ ，引下线一般不少于 2 根，间距不大于 30m。若水塔周长和高度均不超过 40m 可只设一根引下线，另一根可利用铁爬梯作引下线。钢筋混凝土结构的水塔，可利用结构钢筋作引下线，基础钢筋作接地体，专门敷设的接地体宜敷设成环形。

(4) 烟囱的防雷。烟囱属于第三类防雷构筑物。砖烟囱、钢筋混凝土烟囱，宜在烟囱上装设接闪杆或接闪环保护。多支接闪杆应连接在闭合环上。

当非金属烟囱无法采用单支或双支接闪杆保护时，应在烟囱口装设环形接闪带，并应对称布置三支高出烟囱口不低于 0.5m 的接闪杆。

钢筋混凝土烟囱的钢筋应在其顶部和底部与引下线和贯通连接的金属爬梯相连。当符合 11.3.2.4 (5) 的要求时，宜利用钢筋作为引下线和接地装置，可不另设专用引下线。

高度不超过 40m 的烟囱，可只设一根引下线，超过 40m 时应设两根引下线，螺栓连接或焊接的金属爬梯可作为两根引下线用。

对于金属烟囱，烟囱金属体应兼作接闪器和引下线。

(5) 微波站、电视差转台的防雷。

1) 天线防雷。天线应在接闪杆保护范围内，接闪杆可固定在天线铁塔上，并采用  $40\text{mm} \times 4\text{mm}$  镀锌扁钢作为引下线，塔身金属结构也可兼作接闪器和引下线。当天线塔位于机房旁边时，应在塔基四脚 1.5m 以外范围内敷设铁塔地网。接闪杆引下线在地网上连接点与微波站信号电路接地和保护接地在地网上的连接点间距离不宜小于 10m。铁塔地网、机房地网均应利用塔基及机房地基内 2 根以上主钢筋组成尺寸不大于  $3\text{m} \times 3\text{m}$  的环型地网；当铁塔地网、机房地网与变电站地网分别设置时，相互之间应每隔 3 ~ 5 m 焊接连通一次，并至少有两处连通。微波站应采用联合（共用）接地系统，其工频接地电阻值对枢纽站应不大于  $5\Omega$ ，中继站不大于  $10\Omega$ ，无源中继站不大于 20 ~  $30\Omega$ 。

天线馈线波导管或同轴传输线的金属外皮及敷线金属管应在塔的上下两端以及超过 60m 时还应在其中间部位与塔身金属结构可靠连接，并在机房入口处的外侧与地网连通，同轴电缆在机房入口处应安装标称放电电流不小于 5kA 的同轴电涌保护器（SPD，其选择要求参见 11.4.2）；经走线架上塔的天线馈线，应在其转弯处上方 0.5 ~ 1m 范围内良好接地。室外走线架亦应在始末两端作接地连接。塔上的天线安装框架、支持杆、灯具外壳等金属件应与塔身金属结构用螺栓可靠连接或焊接连通。塔顶航空障碍灯及塔上的照明灯电源线应采用带金属外皮的电缆或将导线穿金属管，电缆金属外皮或金属管道至少应在上下两端与塔身相连，并水平埋地 10m 以上才允许进入机房或变配电房配电装置；在入口处还应加装氧化锌无间隙接闪器（或在机房配电箱内加装标称放电电流不小于 20kA 的电涌保护器）。

2) 机房防雷。机房屋顶应设防雷网以防直击雷及感应雷，其网格尺寸不大于  $3\text{m} \times 3\text{m}$ ，且与屋顶四周敷设的闭合环形接闪带一一焊接连通。机房四角应设雷电流引下线，引下线可利用机房建筑结构柱内的 2 根以上主钢筋，并应与钢筋混凝土屋面板、梁及基础（包括桩基）内的钢筋相互连通。当天线塔直接位于机房屋顶上时，其四脚应在屋顶与雷电流引下线分别就近连通。机房外应围绕机房敷设闭合环形水平接地体并在四角与机房地网连通。

在机房及电力室内应在墙面、地槽或走线架上敷设环形或排形接地汇集线（或称接地母线）。机房和电力室接地汇集线之间应采用截面积不小于 $40\text{mm} \times 4\text{mm}$ 镀锌扁钢连接线相互妥善连通，并对称地各引出2根接地引入线与机房地网就近焊接连通。其接地引入线可为 $40\text{mm} \times 4\text{mm}$ 镀锌扁钢或不小于 $95\text{mm}^2$ 的多股铜线；室内环形或排形接地母线应采用截面积不小于 $120\text{mm}^2$ 的铜排或与其电阻值相当的镀锌扁钢。

机房设备的工作接地、保护接地应采用共用接地系统，并做等电位连接。其信号电路接地线应满足最大负荷要求，一般采用 $35 \sim 95\text{mm}^2$ 的多股铜线从接地母线上就近引接。进出机房的电力线、通信线及其他缆线应采用具有金属外护套的电缆或穿金属管敷地敷设；微波站站区严禁布设架空缆线。电缆在进站房处应将金属护套或穿线钢管接地，电缆芯线应加装电涌保护器；电缆内的空线对应接地。通信设备及供电设备的保护接地线和电涌保护器接地线应采用截面积不小于 $35\text{mm}^2$ 的多股铜线。机房内的金属走线架应每隔5m做一次接地；走线架、吊挂铁件、机架、设备外壳、管线、门窗等金属体应做等电位连接并接地。

从机房屋顶进入机房的缆线和太阳能电池馈电线，应采用具有金属护层的电缆或穿金属管，其金属护层或金属管在入户处应就近与屋顶接闪带焊接连通，其芯线应加装电涌保护器。太阳能电池馈电线对地可加装标称放电电流不小于 $10\text{kA}$ 的氧化锌无间隙接闪器（SPD），而射频电缆及其他高频传输线则应选用响应速度快且极间电容及信号损耗小的电涌保护器件（参见11.4.2）。机房屋顶上的其他金属设施应分别就近与接闪带焊接连通。

3) 电源系统防雷。微波站供电电源线宜采用具有金属铠装外护层的电力电缆或其他护套电缆穿钢管引入。微波站的电力变压器不宜设于微波机房建筑物内；若其安装于机房内时，高压电力电缆应采用铠装电缆且长度不宜小于 $200\text{m}$ ，电缆铠装层应在两端做接地；并在与架空线的连接处加装标称放电电流不小于 $20\text{kA}$ 的交流无间隙氧化锌接闪器；电缆端部金属外皮与接闪器的接地端一起接地，其接地电阻不应大于 $10\Omega$ 。如当地年雷暴日数超过20天，且电缆敷设于土壤电阻率大于 $100\Omega \cdot \text{m}$ 的地段时，应在电缆上方 $30\text{cm}$ 左右埋设防雷线，防雷线宜采用截面积不小于 $50\text{mm}^2$ 的镀锌圆钢，且不应与电缆接地线连通。

直接引入微波站的低压电力电缆宜全程埋地引入，且埋地长度不应小于 $15\text{m}$ ，其相线及中性线在进入交流配电屏之前应分别对地加装氧化锌无间隙接闪器（电涌保护器参见11.4.2），屏内交流中性母线不做重复接地。低压电缆的入户端应将电缆金属外皮或穿线钢管与防雷接地装置相连；在电缆与架空线的连接处还应装设接闪器，并将电缆金属外皮或穿线钢管与绝缘子铁脚、金具等连在一起接地，其接地电阻不应大于 $10\Omega$ 。

当微波站变配电房单独设置于机房外时，其高压进线可采用架空线路，但在其进站前 $300 \sim 500\text{m}$ 长度内宜设架空接闪线。接闪线的保护角应不大于 $25^\circ$ ；除终端杆外，接闪线宜每杆做一次接地，并宜在接闪线终端杆的前一杆上增装一组氧化锌接闪器。若已建站的架空高压电力线路防雷改造采用接闪线有困难时，可在架空线路终端杆、终端杆前第一、三或第二、四杆上各增设一组接闪器，同时在第三杆或第四杆上增设一组高压熔断器。架空接闪线及接闪器的接地电阻值，其进站端应不大于 $10\Omega$ ，中间和另一端应不大于 $30\Omega$ ；接地体宜为辐射形或环形。

电力变压器的高、低压侧各相线均应对地装设过电压保护器，其低压侧系统的接地型式应采用TN-S系统；变压器金属外壳、低压侧中性点以及与变压器相连的电力电缆金属护套均应就近接地。

站内交、直流配电设备及电源自动切换装置等应满足相关标准、规范中关于耐雷电冲击

指标的规定并应具有分级防雷保护装置：即在稳压设备输入端、自动稳压稳流的控制电路以及交流屏的输入、输出端等处应分级设置电涌保护器（SPD），在直流屏的输出端或通信设备的入口处负极对地也应设置直流系统用电涌保护器。

4) 电视差转台及电视发射台天线、机房及电源系统的防雷原则上可参照上述微波站的防雷接地措施办理。微波站防雷接地示意图如图 11-3-4 所示。

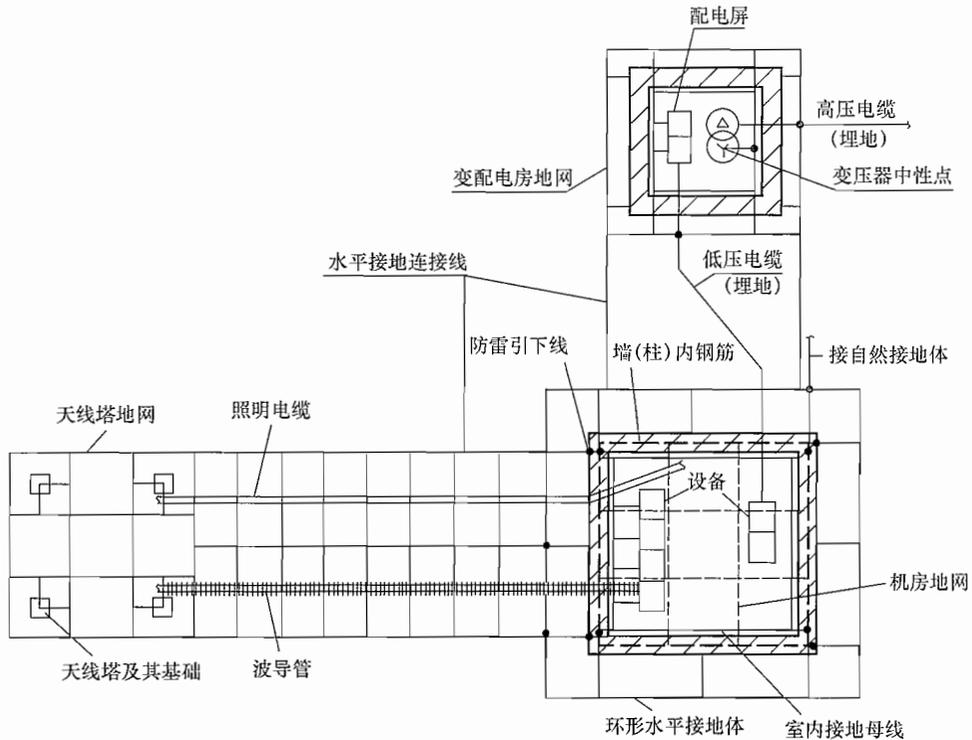


图 11-3-4 微波站防雷接地示意图

(6) 卫星通信地球站的防雷。卫星通信地球站天线的防雷，可用独立接闪针或在天线口面上沿及副面调整器顶端预留的安装接闪针处分别安装接闪针。当天线安装于地面上时，其引下线直接引至天线基础周围的闭合环形接地体。天线支架与围绕天线基础的闭合接地环路应有良好的电气连接，天线基础的闭合接地环与围绕机房四周敷设的闭合接地环至少应有两处以上可靠地连接在一起。当天线位于机房屋顶时，可利用建筑物钢筋混凝土构件内的钢筋作为引下线。地球站机房的防雷接地与通信及电源设备工作接地和保护接地应采用共用接地系统，其工频接地电阻不应大于  $5\Omega$ 。对于年雷暴日小于 20 天的地区，接地电阻值可不大于  $10\Omega$ 。机房及电源系统的防雷措施与微波站机房及电源系统的防雷措施基本类同。卫星地面站防雷及接地示意图如图 11-3-5 所示。

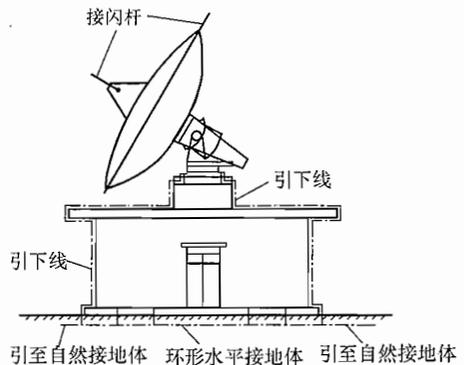


图 11-3-5 卫星地面站防雷及接地示意图

(7) 广播发射台的防雷，其示意图如图 11-3-6 所示。中波无线电广播台的 antenna 塔对地是绝缘的，一般在塔基设有绝缘子，桅杆天线底部与大地之间应安装球形放电间隙，放电电压应为底部工作电压（100% 调幅峰值时）的 1.2 倍，底座绝缘子出厂时应做 40kV 以上的泄漏试验。桅杆天线必须敷设地网。地网自桅杆中心向外辐射状敷设，相邻导线间夹角相等；地网导线根数一般为 120 根，每根导线长度与发射机输出功率及波长有关；地网埋设深度一般为 300mm，在耕地上可加深到 500~600mm，但自桅杆中心向外  $0.1\lambda$ （波长）以内仍应埋深 300mm，地网导线采用  $\phi 3.0\text{mm}$  的硬铜线。中波发射塔防雷接地示意图如图 11-3-6 (a) 所示。

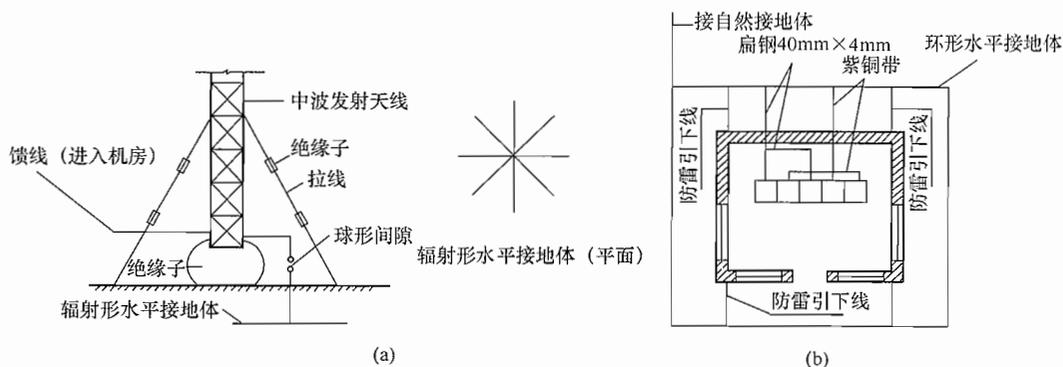


图 11-3-6 广播发射台的防雷

(a) 中波发射塔防雷接地示意图；(b) 中波发射机房防雷接地示意图

发射机房采用接闪杆或防雷网防直击雷，接地装置采用水平接地体围绕建筑物敷设成闭合环形，接地电阻不大于  $10\Omega$ ，保护接地和防雷接地无法分开时，总接地电阻要求不大于  $1\Omega$ 。发射机房内高频接地母线采用 0.5mm 厚的紫铜带，其宽度为：当单机功率小于 200kW 时为 200mm，当单机功率为 200kW 及以上时为 300mm 以上。高频接地极采用  $2000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 2\text{mm}$  的紫铜板，垂直埋入地下，顶部距地面不小于 800mm，接地电阻不大于  $4\Omega$ ；机架与电气设备接地采用  $40\text{mm} \times 4\text{mm}$  的镀锌扁钢接到环形接地体上，中波发射机房防雷接地示意图如图 11-3-6 (b) 所示。

进出机房的电话线电力线均用铠装电缆或穿钢管埋地敷设。

短波广播发射台在天线塔上装设接闪杆并将塔体接地，接地电阻不大于  $10\Omega$ ；机房防雷同中波机房。

(8) 雷达站的防雷。雷达站的天线本身可作为接闪器，也可另设接闪杆或接闪线作为接闪器以保护雷达天线，但应避免其对雷达工作的影响；天线与支撑架应直接接地，并可与雷达主机工作接地、电气设备保护接地以及防静电接地等共用接地体；接地装置宜利用建筑物基础钢筋作自然接地体，室外加敷的人工接地体宜敷设成闭合环形，其接地电阻一般要求不大于  $1\Omega$ （当土壤电阻率较高时，可适当增加接地电阻要求值，但应采取等电位连接措施）。引入雷达主机的电源线、伺服机构电源线、天线的馈线、控制线及雷达数据线以及通信缆线等均需穿金属管（槽）或采用屏蔽电缆埋地敷设并在进入主机房或机柜入口处装设电涌保护器（SPD，参见 11.4.2），电源系统宜在穿过不同的雷电防护区处装设 SPD 进行多级保护。雷达站电源系统的防雷措施基本与微波站相同，见 11.3.2.7 (5)。雷达站机房应利用建筑物钢筋构成网孔不大于  $200\text{mm} \times 200\text{mm}$  的屏蔽接地。机房内各设备的外露可导电

部分还应与进入机房的各种金属管线、PE 线、线缆金属屏蔽层、建筑物结构金属体等进行等电位连接。雷达站防雷接地示意图如图 11-3-7 所示。

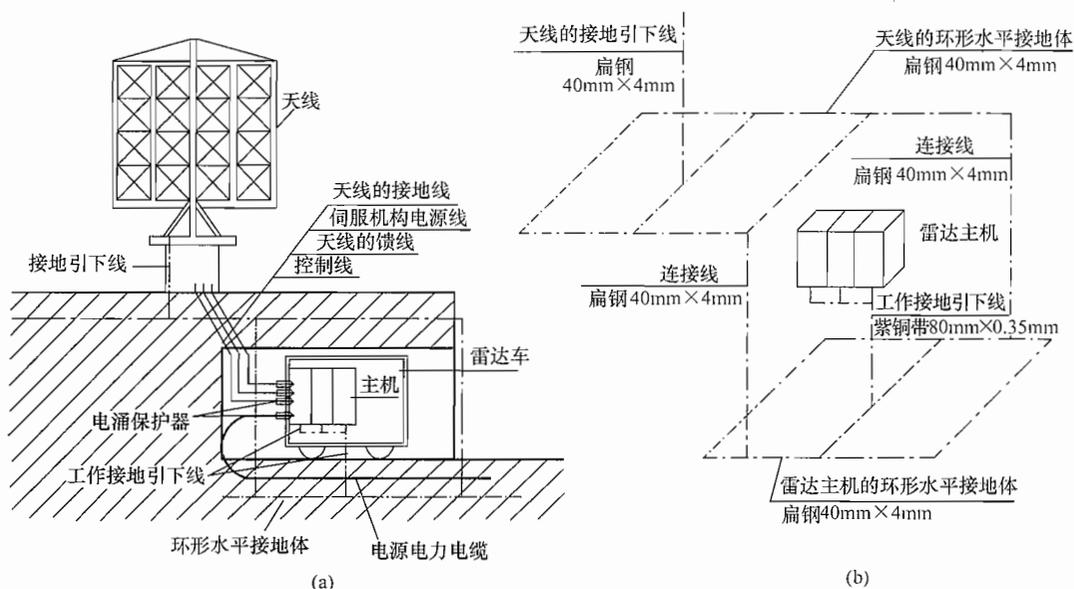


图 11-3-7 雷达站防雷接地示意图

(a) 天线及机房防雷接地剖面；(b) 接地系统透视

(9) 测试调试场的防雷。在雷达试验场中埋设环形水平接地体，接地电阻不大于  $4\Omega$ ，在地面上应留出接地端子。各种专用车辆的工作接地、保护接地、电源电缆的外皮及馈线屏蔽层外皮，均用接地线以最短的路径与接地端子相连，如图 11-3-8 所示。

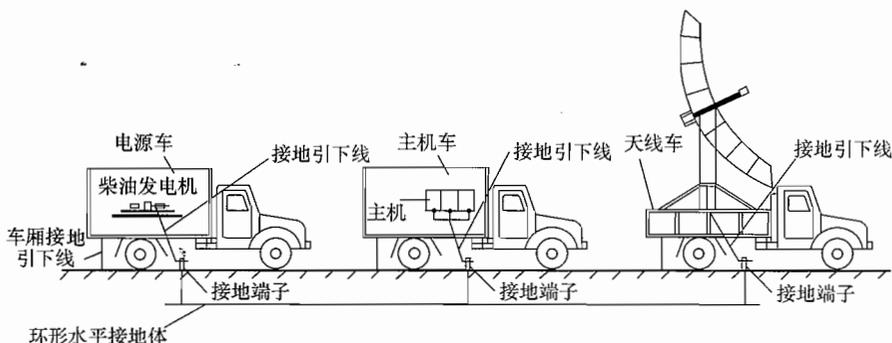


图 11-3-8 测试调试场防雷接地示意图

(10) 移动通信基站的防雷。移动通信基站的天线及铁塔的防雷做法与微波站相同。天馈线同轴电缆的金属护套应在天线塔的上、下部（当塔高  $\geq 60\text{m}$  时还应在其中部）及机房入口处就近接地。为防止从天馈线引入的雷电涌流对通信设备的损害，天馈线同轴电缆进入机房后应在与通信设备的连接处安装天馈线电涌保护器（SPD），天馈线 SPD 的特性阻抗、工作频段、衰耗等参数应与通信设备相适应。

出入基站的信号线路，应采用有金属护套的电缆埋地敷设；在年雷暴日大于 20 天、土

壤电阻率大于  $100\Omega \cdot m$  的地段应布放防雷排流线，也可采用光缆以防雷击。

对利用现有建筑作机房的移动通信基站，应尽量利用原有建筑物的防雷接地网及其他专用地网，并因地制宜地就近加设一组基站地网，将基站地网与原有地网相互焊接连通至少两点以上。机房的工作接地、保护接地、建筑的防雷接地应共用接地装置。但工作接地与防雷接地在地网上的引接点相互距离不应小于  $5m$ 。移动通信基站地网的接地电阻值应不大于  $5\Omega$ ，对于年雷暴日小于 20 天的地区，其接地电阻值可不大于  $10\Omega$ 。

当机房设有防静电地板时，应在地板下围绕机房敷设闭合环形接地母线作为地板金属支架的接地引线排，其材料为铜导线，截面积应不小于  $50mm^2$ ；并从引线排的相对两侧对称地引出不少于两根截面积为  $50 \sim 75mm^2$  的铜质接地线与机房内的接地汇集线连通。

机房和电源系统的其余的防雷措施与微波站类同。

## 11.4 建筑物防雷装置和防雷击电磁脉冲设计的要求和计算方法

### 11.4.1 建筑物防雷装置的设计要求

#### 11.4.1.1 防雷装置使用的材料的要求

(1) 防雷装置使用的材料及其使用条件，应符合表 11-4-1 的规定。

表 11-4-1 防雷装置的材料及使用条件

材料	使用于大气中	适用于地中	使用于混凝土中	耐腐蚀情况		
				在下列环境中能耐腐蚀	在下列环境中增加腐蚀	与下列材料接触形成直流电耦合可能受到严重腐蚀
铜	单根导体，绞线	单根导体，有镀层的绞线，铜管	单根导体，有镀层的绞线	在许多环境中良好	硫化物有机材料	—
热镀锌钢	单根导体，绞线	单根导体，钢管	单根导体，绞线	敷设于大气，混凝土和无腐蚀性的一般土壤中受到的腐蚀是可接受的	高氯化物含量	铜
电镀铜钢	单根导体	单根导体	单根导体	在许多环境中良好	硫化物	—
不锈钢	单根导体，绞线	单根导体，绞线	单根导体，绞线	在许多环境中良好	高氯化物含量	—
铝	单根导体，绞线	不适合	不适合	在含有低浓度硫和氯化物的大气中良好	碱性溶液	铜
铅	有镀铅层的单根导体	禁止	不适合	在含有高浓度硫酸化合物的大气中良好	—	铜不锈钢

- 注 1. 敷设于黏土或潮湿土壤中的镀锌钢可能受到腐蚀；  
2. 在沿海地区，敷设于混凝土中的镀锌钢不宜延伸进入土壤中；  
3. 不得在地中采用铅。

(2) 防雷等电位连接各连接部件的最小截面积，应符合表 11-4-2 的规定。连接单台或多台 I 级分类试验或 D1 类电涌保护器的单根导体的最小截面积的计算式为

$$S_{\min} \geq I_{\text{imp}}/8 \quad (11-4-1)$$

式中  $S_{\min}$  ——单根导体的最小截面积， $mm^2$ ；

$I_{imp}$  ——流入该导体的雷电流, kA。

表 11-4-2 防雷装置各连接部件的最小截面积

等电位连接部件		材料	截面积 (mm <sup>2</sup> )
等电位连接带 (铜, 外表面镀铜的钢或热镀锌钢)		Cu (铜)、 Fe (铁)	50
从等电位连接带至接地装置或各等电位连接带之间的连接导体		Cu (铜)	16
		Al (铝)	25
		Fe (铁)	50
从屋内金属装置至等电位连接带的连接导体		Cu (铜)	6
		Al (铝)	10
		Fe (铁)	16
连接电涌 保护器的导体	电气 系统	I 级试验的电涌保护器	6
		II 级试验的电涌保护器	2.5
		III 级试验的电涌保护器	1.5
	电子 系统	DI 类电涌保护器	1.2
		其他类的电涌保护器 (连接导体的截面积可 小于 1.2mm <sup>2</sup> )	根据具体情况确定

#### 11.4.1.2 接闪器的要求

(1) 接闪器的材料、结构和最小截面积应符合表 11-4-3 的规定。

表 11-4-3 接闪线 (带), 接闪杆和引下线的材料、结构与最小截面积

材料	结构	最小截面积 (mm <sup>2</sup> )	备注 <sup>①</sup>
铜、镀锡铜 <sup>①</sup>	单根扁铜	50	厚度 2mm
	单根圆铜 <sup>②</sup>	50	直径 8mm
	铜绞线	50	每股线直径 1.7mm
	单根圆铜 <sup>②④</sup>	176	直径 15mm
铝	单根扁铝	70	厚度 3mm
	单根圆铝	50	直径 8mm
	铝绞线	50	每股线直径 1.7mm
铝合金	单根扁形导体	50	厚度 2.5mm
	单根圆形导体	50	直径 8mm
	绞线	50	每股线直径 1.7mm
	单根圆形导体 <sup>③</sup>	176	直径 15mm
	外表面镀铜的单根 圆形导体	50	直径 8mm, 径向镀铜 厚度至少 70 μm, 铜纯度 99.9%

续表

材料	结构	最小截面积 (mm <sup>2</sup> )	备注 <sup>⑩</sup>
热浸镀锌钢 <sup>②</sup>	单根扁钢	50	厚度 2.5mm
	单根圆钢 <sup>④</sup>	50	直径 8mm
	绞线	50	每股线直径 1.7mm
	单根圆钢 <sup>③④</sup>	176	直径 15mm
不锈钢 <sup>⑤</sup>	单根扁钢 <sup>⑥</sup>	50 <sup>⑦</sup>	厚度 2mm
	单根圆钢 <sup>⑥</sup>	50 <sup>⑦</sup>	直径 8mm
	绞线	70	每股线直径 1.7mm
	单根圆钢 <sup>③④</sup>	176	直径 15mm
外表面镀铜的钢	单根圆钢 (直径 8mm)	50	镀铜厚度至少 70μm, 铜纯度 99.9%
	单根扁钢 (厚 2.5mm)		

① 热浸或电镀锡的锡层最小厚度为 1μm；

② 镀锌层宜光滑连贯，无焊剂斑点，镀锌层圆钢至少 22.7g/m<sup>2</sup>/扁钢至少 32.4g/m<sup>2</sup>；

③ 仅应用于接闪杆。当应用于机械应力没达到临界值之处，可采用直径 10mm、最长 1m 的接闪杆，并增加固定；

④ 仅应用于入地之处；

⑤ 不锈钢中，铬的含量等于或大于 16%，镍的含量等于或大于 8%，碳的含量等于或小于 0.08%；

⑥ 对埋于混凝土中以及可与可燃材料直接接触的不锈钢，其最小尺寸宜增大至直径 10mm 的 78mm<sup>2</sup>（单根圆钢）和最小厚度 3mm 的 75mm<sup>2</sup>（单根扁钢）；

⑦ 在机械强度没有重要要求之处，50mm<sup>2</sup>（直径 8mm）可减为 28mm<sup>2</sup>（直径 6mm）。并应减小固定支架间的间距；

⑧ 当升温 and 机械受力是重点考虑之处，50mm<sup>2</sup>加大至 75mm<sup>2</sup>；

⑨ 避免在单位能量 10MJ/Ω 下熔化的最小截面积铜为 16mm<sup>2</sup>、铝为 25mm<sup>2</sup>、钢为 50mm<sup>2</sup>、不锈钢为 50mm<sup>2</sup>；

⑩ 截面积允许误差为 -3%。

(2) 接闪杆采用热镀锌圆钢或钢管制成时，其直径应符合下列规定：

1) 杆长 1m 以下时，圆钢不应小于 12mm，钢管不应小于 20mm。

2) 杆长 1m ~ 2m 时，圆钢不应小于 16mm，钢管不应小于 25mm。

3) 独立烟囱顶上的杆，圆钢不应小于 20mm，钢管不应小于 40mm。

(3) 接闪杆的接闪端宜做成半球状，其最小弯曲半径宜为 4.8mm，最大宜为 12.7mm。

(4) 当独立烟囱上采用热镀锌接闪环时，其圆钢直径不应小于 12mm；扁钢截面积不应小于 100mm<sup>2</sup>，其厚度不应小于 4mm。

(5) 架空接闪线和接闪网宜采用截面积不小于 50mm<sup>2</sup>热镀锌钢绞线或铜绞线。

(6) 明敷接闪导体和引下线固定支架的间距不宜大于表 11-4-4 的规定。固定支架的高度不宜小于 150mm。

表 11-4-4 明敷接闪导体和引下线固定支架的间距

布置方式	扁形导体和绞线 固定支架的间距 (mm)	单根圆形导体固定 支架的间距 (mm)
安装于水平面上的水平导体	500	1000
安装于垂直面上的水平导体	500	1000
安装于从地面至高 20m 垂直面上的垂直导体	1000	1000
安装在高于 20m 垂直面上的垂直导体	500	1000

(7) 除第一类防雷建筑物外, 金属屋面的建筑物宜利用其屋面作为接闪器, 并应符合下列规定:

1) 板间的连接应是持久的电气贯通, 可采用铜锌合金焊、熔焊、卷边压接、缝接、螺钉或螺栓连接。

2) 金属板下面无易燃物品时, 铅板的厚度不应小于 2mm, 不锈钢、热镀锌钢、钛和铜板的厚度不应小于 0.5mm, 铝板的厚度不应小于 0.65mm, 锌板的厚度不应小于 0.7mm。

3) 金属板下面有易燃物品时, 不锈钢、热镀锌钢和钛板的厚度不应小于 4mm, 铜板的厚度不应小于 5mm, 铝板的厚度不应小于 7mm。

4) 金属板应无绝缘被覆层。

注: 薄的油漆保护层或 1mm 厚沥青层 0.5mm 厚聚氯乙烯层均不应属于绝缘被覆层。

(8) 除第一类防雷建筑物和本章 11.3.2.3 (2) 1) 的规定外, 屋顶上永久性金属物宜作为接闪器, 但其各部件之间均应连成电气贯通, 并应符合下列规定:

1) 旗杆、栏杆、装饰物、女儿墙上的盖板等, 其截面积应符合本章表 11-4-3 的规定, 其壁厚应符合本章 11.4.1.2 (7) 的规定。

2) 输送和储存物体的钢管和钢罐的壁厚不应小于 2.5mm; 当钢管、钢罐一旦被雷击穿, 其内的介质对周围环境造成危险时, 其壁厚不应小于 4mm。

3) 利用屋顶建筑构件内钢筋作接闪器应符合本章 11.3.2.3 (5) 和 11.3.2.4 (5) 的规定。

(9) 除利用混凝土构件钢筋或在混凝土内专设钢材作接闪器外, 钢质接闪器应热镀锌。在腐蚀性较强的场所, 还应采取加大截面积或其他防腐措施。

(10) 不得利用安装在接收无线电视广播天线杆顶上的接闪器保护建筑物。

(11) 专门敷设的接闪器应由下列的一种或多种方式组成。

1) 独立接闪杆。

2) 架空接闪线或架空接闪网。

3) 直接装设在建筑物上的接闪杆、接闪带或接闪网。

(12) 专门敷设的接闪器, 其布置应符合表 11-4-5 的规定。布置接闪器时, 可单独或任意组合采用接闪杆、接闪带、接闪网。

表 11-4-5 接闪器布置

建筑物防雷类别	滚球半径 $h_r$ (m)	接闪网网格尺寸 (m)
第一类防雷建筑物	30	$\leq 5 \times 5$ 或 $\leq 6 \times 4$
第二类防雷建筑物	45	$\leq 10 \times 10$ 或 $\leq 12 \times 8$
第三类防雷建筑物	60	$\leq 20 \times 20$ 或 $\leq 24 \times 16$

#### 11.4.1.3 引下线的要求

(1) 引下线的材料、结构和最小截面积应按本章表 11-4-3 的规定取值。

(2) 明敷引下线固定支架的间距不宜大于本章表 11-4-4 的规定。

(3) 引下线宜采用热镀锌圆钢或扁钢, 宜优先采用圆钢。当独立烟囱上的引下线采用圆钢时, 其直径不应小于 12mm; 采用扁钢时, 其截面积不应小于  $100\text{mm}^2$ , 厚度不应小于 4mm。防腐措施应符合本章 11.4.1.2 (9) 的规定。利用建筑构件内钢筋作引下线应符合本

章 11.3.2.3 (5) 和 11.3.2.4 (5) 的规定。

(4) 专设引下线应沿建筑物外墙外表面明敷，并应经最短路径接地；建筑外观要求较高时可暗敷，但其圆钢直径不应小于 10mm，扁钢截面积不应小于 80mm<sup>2</sup>。

(5) 建筑物的钢梁、钢柱、消防梯等金属构件，以及幕墙的金属立柱宜作为引下线，但其各部件之间均应连成电气贯通，可采用铜锌合金焊、熔焊、卷边压接、缝接、螺钉或螺栓连接；其截面积应按本章表 11-4-3 的规定取值；各金属构件可覆有绝缘材料。

(6) 采用多根专设引下线时，应在各引下线上距地面 0.3~1.8m 处装设断接卡。当利用混凝土内钢筋、钢柱作为自然引下线并同时采用基础接地体时，可不设断接卡，但利用钢筋作引下线时应在室内外的适当地点设若干连接板。当仅利用钢筋作引下线并采用埋于土壤中的人工接地体时，应在每根引下线上距地面不低于 0.3m 处设接地体连接板。采用埋于土壤中的人工接地体时应设断接卡，其上端应与连接板或钢柱焊接。连接板处宜有明显标志。

(7) 在易受机械损伤之处，地面上 1.7m 至地面下 0.3m 的一段接地线，应采用暗敷或采用镀锌角钢、改性塑料管或橡胶管等加以保护。

(8) 第二类防雷建筑物或第三类防雷建筑物为钢结构或钢筋混凝土建筑物时，在其钢构件或钢筋之间的连接满足本章规定并利用其作为引下线的条件下，当其垂直支柱均起到引下线的作用时，可不要求满足专设引下线之间的间距。

#### 11.4.1.4 接地装置的要求

(1) 接地体的材料、结构和最小尺寸应符合表 11-4-6 的规定。利用建筑构件内钢筋作接地装置应符合本章 11.3.2.3 (5) 和 11.3.2.4 (5) 的规定。

表 11-4-6 接地体的材料、结构和最小尺寸

材料	结构	最小尺寸			备注
		垂直接地体直径 (mm)	水平接地体 (mm <sup>2</sup> )	接地板 (mm)	
铜、镀锡铜	铜绞线	—	50	—	每股直径 1.7mm
	单根圆钢	15	50	—	—
	单根扁钢	—	50	—	厚度 2mm
	铜管	20	—	—	壁厚 2mm
	整块铜板	—	—	500×500	厚度 2mm
	网格铜板	—	—	600×600	各网格边截面积 25mm×2mm， 网格网边总长度 不少于 4.8m
热镀锌钢	圆钢	14	78	—	—
	钢管	20	—	—	壁厚 2mm
	扁钢	—	90	—	厚度 3mm
	钢板	—	—	500×500	厚度 3mm
	网格钢板	—	—	600×600	各网格边截面 30mm×3mm， 网格网边总长度 不少于 4.8m
	型钢	注 3	—	—	—

续表

材料	结构	最小尺寸			备注
		垂直接地体直径 (mm)	水平接地体 (mm <sup>2</sup> )	接地板 (mm)	
裸钢	钢绞线	—	70	—	每股直径 1.7mm
	圆钢	—	78	—	—
	扁钢	—	75	—	厚度 3mm
外表面镀铜的钢	圆钢	14	50	—	镀铜厚度 至少 250μm, 铜纯度 99.9%
	扁钢	—	90 (厚 3mm)	—	
不锈钢	圆形导体	15	78	—	—
	扁形导体	—	100	—	厚度 2mm

- 注 1. 热镀锌钢的镀锌层应光滑连贯、无焊剂斑点, 镀锌层圆钢至少 22.7g/m<sup>2</sup>、扁钢至少 32.4g/m<sup>2</sup>;  
 2. 热镀锌之前螺纹应先加工好;  
 3. 不同截面的型钢, 其截面积不小于 290mm<sup>2</sup>, 最小厚度 3mm, 可采用 50mm×50mm×3mm 角钢;  
 4. 当完全埋在混凝土中时才可采用裸钢;  
 5. 外表面镀铜的钢, 铜应与钢结合良好;  
 6. 不锈钢中, 铬的含量等于或大于 16%, 镍的含量等于或大于 5%, 铝的含量等于或大于 2%, 碳的含量等于或小于 0.08%;  
 7. 截面积允许误差为 -3%。

(2) 在符合本章表 11-4-1 规定的条件下, 埋于土壤中的人工垂直接地体宜采用热镀锌角钢、钢管或圆钢; 埋于土壤中的人工水平接地体宜采用热镀锌扁钢或圆钢。接地线应与水平接地体的截面积相同。

(3) 人工钢质垂直接地体的长度宜为 2.5m。其间距以及人工水平接地体的间距均宜为 5m, 当受地方限制时可适当减小。

(4) 人工接地体在土壤中的埋设深度不应小于 0.5m, 并宜敷设在当地冻土层以下, 其距墙或基础不宜小于 1m。接地体宜远离由于烧窑、烟道等高温影响使土壤电阻率升高的地方。

(5) 在敷设于土壤中的接地体连接到混凝土基础内起基础接地体作用的钢筋或钢材的情况下, 土壤中的接地体宜采用铜质或镀铜或不锈钢导体。

(6) 在高土壤电阻率的场地, 降低防直击雷冲击接地电阻宜采用下列方法:

1) 采用多支线外引接地装置, 外引长度不应大于有效长度, 有效长度应符合本章 11.4.1.4 (9) 的规定。

2) 接地体埋于较深的低电阻率土壤中。

3) 换土。

4) 采用降阻剂。

(7) 防直击雷的专设引下线距出入口或人行道边沿不宜小于 3m。

(8) 接地装置埋在土壤中的部分, 其连接宜采用放热焊接; 当采用通常的焊接方法时, 应在焊接处做防腐处理。

(9) 接地装置工频接地电阻的计算应符合 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》的有关规定, 其与冲击接地电阻的换算应符合以下的规定。

1) 接地装置冲击接地电阻与工频接地电阻的换算式为

$$R_{\Sigma} = A \times R_i \quad (11-4-2)$$

式中  $R_{\Sigma}$ ——接地装置各支线的长度取值小于或等于接地体的有效长度  $l_e$ ，或者有支线大于  $l_e$  而取其等于  $l_e$  时的工频接地电阻， $\Omega$ ；

$A$ ——换算系数，其值宜按图 11-4-1 确定；

$R_i$ ——所要求的接地装置冲击接地电阻， $\Omega$ 。

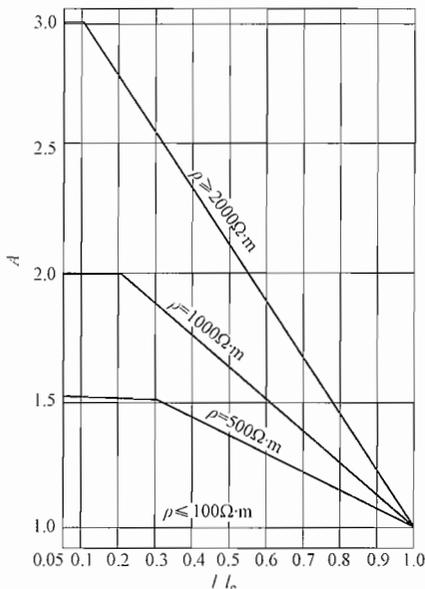


图 11-4-1 换算系数  $A$

注： $l$  为接地体最长支线的实际长度，其计量与  $l_e$  类同；当  $l$  大于  $l_e$  时，取其等于  $l_e$ 。

2) 接地体的有效长度计算式为

$$l_e = 2\sqrt{\rho} \quad (11-4-3)$$

式中  $l_e$ ——接地体的有效长度，应按图 11-4-2 计量， $m$ ；

$\rho$ ——敷设接地体处的土壤电阻率， $\Omega \cdot m$ 。

3) 环绕建筑物的环形接地体应按下列方法确定冲击接地电阻。

a. 当环形接地体周长的一半大于或等于接地体的有效长度时，引下线的冲击接地电阻应为从与引下线的连接点起沿两侧接地体各取有效长度的长度算出的工频接地电阻，换算系数应等于 1。

b. 当环形接地体周长的一半小于有效长度时，引下线的冲击接地电阻应为以接地体的实际长度算出的工频接地电阻再除以换算系数。

4) 与引下线连接的基础接地体，当其钢筋从与引下线的连接点量起大于 20m 时，其冲击接地电阻应为以换算系数等于 1 和以该连接点为圆心、20m 为半径的半球体范围内的钢筋体的工频接地电阻。

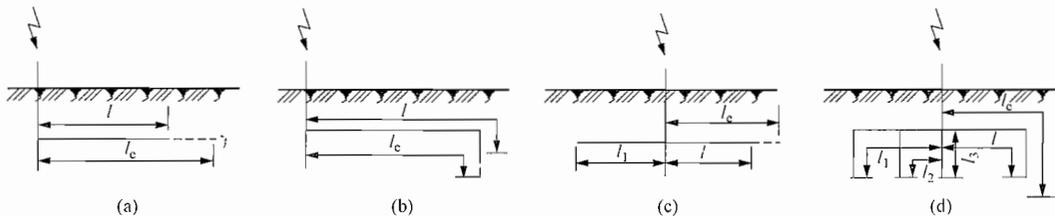


图 11-4-2 接地体有效长度的计量

(a) 单根水平接地体；(b) 末端接垂直接地体的单根水平接地体；(c) 多根水平接地体， $l_1 \leq l_2$ ；

(d) 接多根垂直接地体的多根水平接地体， $l_1 \leq l_2 \leq l_3 \leq l$

## 11.4.2 防雷击电磁脉冲的设计要求

### 11.4.2.1 基本规定

(1) 在工程的设计阶段不知道电子系统的规模和具体位置的情况下，若预计将来会有需要防雷击电磁脉冲的电气和电子系统，应在设计时将建筑物的金属支撑物、金属框架或钢筋混凝土的钢筋等自然构件、金属管道、配电的保护接地系统等与防雷装置组成一个接地系统，并应在需要之处预埋等电位连接板。

(2) 当电源采用 TN 系统时, 从建筑物总配电箱起供电给本建筑物内的配电线路和分支线路必须采用 TN-S 系统。

#### 11.4.2.2 防雷区和防雷击电磁脉冲

(1) 防雷区的划分应符合下列规定:

1) 本区内的各物体都可能遭到直接雷击并导走全部雷电流, 以及本区内的雷击电磁场强度没有衰减时, 应划分为 LPZ0<sub>A</sub> 区。

2) 本区内的各物体不可能遭到大于所选滚球半径对应的雷电流直接雷击, 以及本区内的雷击电磁场强度仍没有衰减时, 应划分为 LPZ0<sub>B</sub> 区。

3) 本区内的各物体不可能遭到直接雷击, 且由于在界面处的分流, 流经各导体的电涌电流比 LPZ0<sub>B</sub> 区内的更小, 以及本区内的雷击电磁场强度可能衰减, 衰减程度取决于屏蔽措施时, 应划分为 LPZ1 区。

4) 需要进一步减小流入的电涌电流和雷击电磁场强度时, 增设的后续防雷区应划分为 LPZ2……n 后续防雷区。

(2) 安装磁场屏蔽后续防雷区、安装协调配合好的多组电涌保护器, 宜按需要保护的设备的数量、类型和耐压水平及其所要求的磁场环境选择, 其情况分类如图 11-4-3 所示。

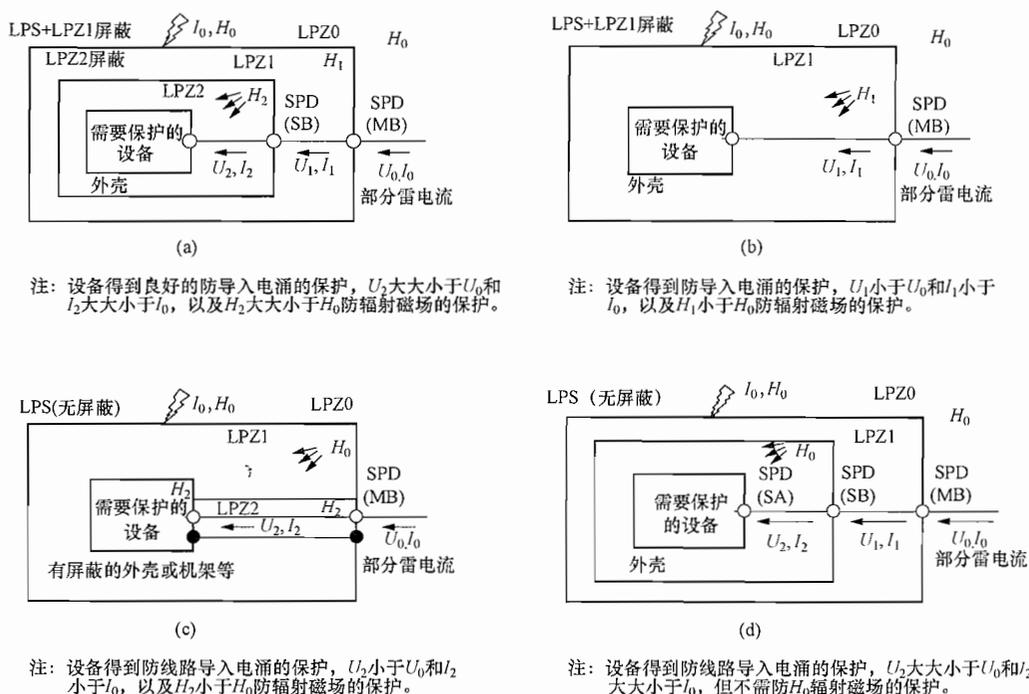


图 11-4-3 防雷击电磁脉冲

MB—总配电箱; SB—分配电箱; SA—插座

- (a) 采用大空间屏蔽和协调配合好的电涌保护器保护; (b) 采用 LPZ1 的大空间屏蔽和进户处安装电涌保护器的保护; (c) 采用内部线路屏蔽和在进入 LPZ1 处安装电涌保护器的保护; (d) 仅采用协调配合好的电涌保护器保护

(3) 在两个防雷区的界面上宜将所有通过界面的金属物做等电位连接。当线路能承受所发生的电涌电压时，电涌保护器可安装在被保护设备处，而线路的金属保护层或屏蔽层宜首先于界面处做一次等电位连接。

注：LPZ<sub>A</sub>与LPZ<sub>B</sub>区之间无实物界面。

### 11.4.2.3 屏蔽、接地和等电位连接的要求

(1) 屏蔽、接地和等电位连接的要求宜联合采取下列措施：

1) 所有与建筑物组合在一起的大尺寸金属件都应等电位连接在一起，并与与防雷装置相连。但第一类防雷建筑物的独立接闪器及其接地装置应除外。

2) 在需要保护的空間内，采用屏蔽电缆时其屏蔽层应至少在两端，并宜在防雷区交界处做等电位连接，系统要求只在一端做等电位连接时，应采用两层屏蔽或穿钢管敷设，外层屏蔽或钢管应至少在两端，并宜在防雷区交界处做等电位连接。

3) 分开的建筑物之间的连接线路，若无屏蔽层，线路应敷设在金属管、金属格栅或钢筋成格栅形的混凝土管道内。金属管、金属格栅或钢筋格栅从一端到另一端应是导电贯通，并应在两端分别连到建筑物的等电位连接带上；若有屏蔽层，屏蔽层的两端应连到建筑物的等电位连接带上。

4) 对由金属物、金属框架或钢筋混凝土钢筋等自然构件构成建筑物或房间的格栅形大空间屏蔽，应将穿入大空间屏蔽的导电金属物就近与其做等电位连接。

(2) 对屏蔽效率未做试验和理论研究时，磁场强度的衰减应按下列方法计算。

1) 闪电击于建筑物以外附近时，磁场强度应按下列方法计算：

a. 当建筑物和房间无屏蔽时所产生的无衰减磁场强度，相当于处于LPZ<sub>A</sub>和LPZ<sub>B</sub>区内的磁场强度，其计算式为

$$H_0 = i_0 / (2\pi s_a) \quad (11-4-4)$$

式中  $H_0$ ——无屏蔽时产生的无衰减磁场强度，A/m；

$i_0$ ——最大雷电流，A，按本章表11-4-13、表11-4-14和表11-4-15的规定取值；

$s_a$ ——雷击点与屏蔽空间之间的平均距离，m，如图11-4-4所示，按式(11-4-8)或式(11-4-9)计算。

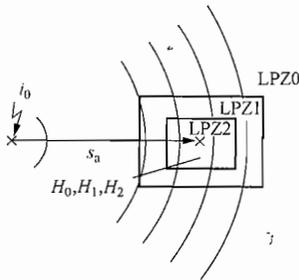


图 11-4-4 附近雷击时的环境情况

b. 当建筑物或房间有屏蔽时，在格栅形大空间屏蔽内，即在LPZ1区内的磁场强度，其计算式为

$$H_1 = H_0 / 10^{SF/20} \quad (11-4-5)$$

式中  $H_1$ ——格栅形大空间屏蔽内的磁场强度，A/m；

$SF$ ——屏蔽系数，dB，按表11-4-7的公式计算。

表 11-4-7

格栅形大空间屏蔽的屏蔽系数

材料	SF (dB)	
	25kHz <sup>①</sup>	1MHz <sup>②</sup> 或250kHz
铜/铝	$20 \times \log(8.5/\omega)$	$20 \times \log(8.5/\omega)$

续表

材料	SF (dB)	
	25kHz <sup>①</sup>	1MHz <sup>②</sup> 或250kHz
钢 <sup>③</sup>	$20 \times \log [(8.5/\omega) / \sqrt{1 + 18 \times 10^{-6}/r^2}]$	$20 \times \log(8.5/\omega)$

① 适用于首次雷击磁场;

② 1MHz 适合于后续雷击的磁场, 250kHz 适用于首次负极性雷击的磁场;

③ 相对磁导系数  $\mu_r \approx 200$ ;注 1.  $\omega$  为格栅形屏蔽的网格宽, m;  $r$  为格栅形屏蔽网格导体的半径, m;2. 当计算式得出的值为负数时取  $SF=0$ ; 若建筑物具有格栅形等电位连接网络,  $SF$  可增加 6dB。

2) 表 11-4-7 的计算值应仅对在各 LPZ 区内距屏蔽层有一安全距离的安全空间内才有效如图 11-4-5 所示, 安全距离计算公式为

当  $SF \geq 10$  时:

$$d_{s/1} = w^{SF/10} \quad (11-4-6)$$

当  $SF < 10$  时:

$$d_{s/1} = w \quad (11-4-7)$$

式中  $d_{s/1}$  ——安全距离, m; $w$  ——格栅形屏蔽的网格宽, m; $SF$  ——按表 11-4-7 计算的屏蔽系数, dB。

3) 在闪电击在建筑物附近磁场强度最大的最坏情况下, 按建筑物的防雷类别、高度、宽度或长度可确定可能的雷击点与屏蔽空间之间平均距离的最小值, 如图 11-4-6 所示, 可按下列方法确定:

a. 对应三类防雷建筑物最大雷电流的滚球半径应符合表 11-4-8 的规定。滚球半径计算式为

$$R = 10(i_0)^{0.65} \quad (11-4-8)$$

式中  $R$  ——滚球半径, m;

$i_0$  ——最大雷电流, kA, 按本章表 11-4-13、表 11-4-14 或表 11-4-15 的规定取值。

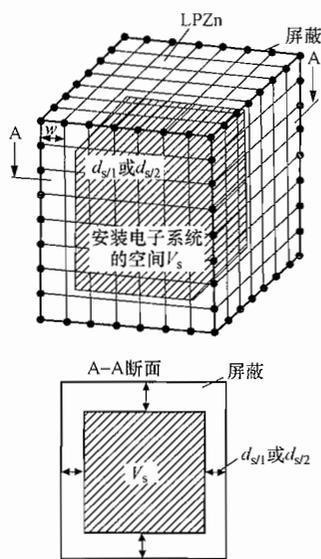


图 11-4-5 在 LPZn 区内供安放电气和电子系数的空间

注: 空间  $V_s$  为安全空间。

表 11-4-8 与最大雷电流对应的滚球半径

防雷建筑物类别	最大雷电流 $i_0$ (kA)			对应的滚球半径 $R$ (m)		
	正极性首次雷击	负极性首次雷击	负极性后续雷击	正极性首次雷击	负极性首次雷击	负极性后续雷击
第一类	200	100	50	313	200	127
第二类	150	75	37.5	260	165	105
第三类	100	50	25	200	127	81

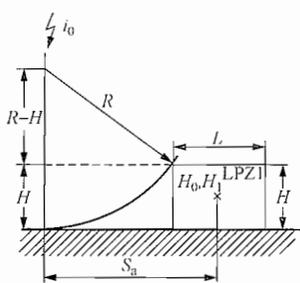


图 11-4-6 取决于滚球半径和建筑物尺寸的最小平均距离

b. 雷击点与屏蔽空间之间的最小平均距离，计算公式为当  $H < R$  时：

$$S_a = \sqrt{H(2R - H)} + L/2 \quad (11-4-9)$$

当  $H \geq R$  时：

$$S_a = R + L/2 \quad (11-4-10)$$

式中  $H$ ——建筑物高度，m；  
 $L$ ——建筑物长度，m。

根据具体情况建筑物长度可用宽度代入。对所取最小平均距离小于式 (11-4-9) 或式 (11-4-7) 计算值的情况，闪电将直接击在建筑物上。

4) 在闪电直接击在位于  $LPZ_0$  区的格栅形大空间屏蔽或与其连接的接闪器上的情况下，其内部  $LPZ_1$  区内安全空间内某点的磁场强度，如图 11-4-7 所示，计算式为

$$H_1 = k_H \cdot i_0 \cdot w / (d_w \cdot \sqrt{d_r}) \quad (11-4-11)$$

式中  $H_1$ ——安全空间内某点的磁场强度，A/m；

$d_r$ ——所确定的点距  $LPZ_1$  区屏蔽顶的最短距离，m；

$d_w$ ——所确定的点距  $LPZ_1$  区屏蔽壁的最短距离，m；

$k_H$ ——形状系数 ( $1/\sqrt{m}$ )，取  $k_H = 0.01 (1/\sqrt{m})$ ；

$w$ —— $LPZ_1$  区格栅形屏蔽的网格宽，m。

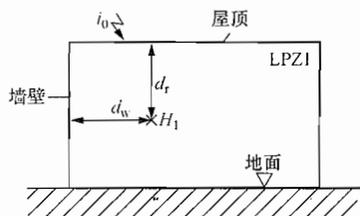


图 11-4-7 闪电直接击于屋顶接闪器时  $LPZ_1$  区内的磁场强度

5) 式 (11-4-11) 的计算值仅对距屏蔽格栅有一安全距离的安全空间内有效，电子系统应仅安装在安全空间内，安全距离计算公式为

当  $SF \geq 10$  时：

$$d_{s/2} = w \cdot SF/10 \quad (11-4-12)$$

当  $SF < 10$

$$d_{s/2} = w \quad (11-4-13)$$

式中  $d_{s/2}$ ——安全距离，m。

6)  $LPZ_{n+1}$  区内的磁场强度计算式为

$$H_{n+1} = H_n / 10^{SF/20} \quad (11-4-14)$$

式中  $H_n$ —— $LPZ_n$  区内的磁场强度，A/m；

$H_{n+1}$ —— $LPZ_{n+1}$  区内的磁场强度 A/m；

$SF$ —— $LPZ_{n+1}$  区屏蔽的屏蔽系数。

安全距离应按式 (11-4-6) 或式 (11-4-7) 计算。

7) 当式 (11-4-14) 中的  $LPZ_n$  区内的磁场强度为  $LPZ_1$  区内的磁场强度时， $LPZ_1$  区内的磁场强度应按以下方法确定：

a. 闪电击在  $LPZ_1$  区附近的情况，应按式 (11-4-4) 和式 (11-4-5) 确定。

b. 闪电直接击在  $LPZ_1$  区大空间屏蔽上的情况，应按式 (11-4-11) 确定，但式中所确定的点距  $LPZ_1$  区屏蔽顶的最短距离和距  $LPZ_1$  区屏蔽壁的最短距离应按图 11-4-8 确定。

(3) 接地和等电位连接应符合本章的有关规定外,还应符合下列规定:

1) 每幢建筑物本身应采用一个接地系统,其构成如图 11-4-9 所示。

2) 当互相邻近的建筑物之间有电气和电子系统的线路连通时,宜将其接地装置互相连接,可通过接地线、PE 线、屏蔽层、穿线钢管、电缆沟的钢筋、金属管道等连接。

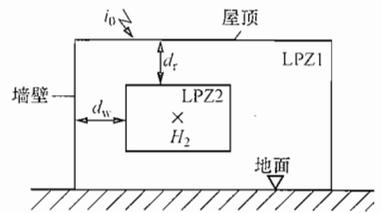


图 11-4-8 LPZ2 区内的磁场强度

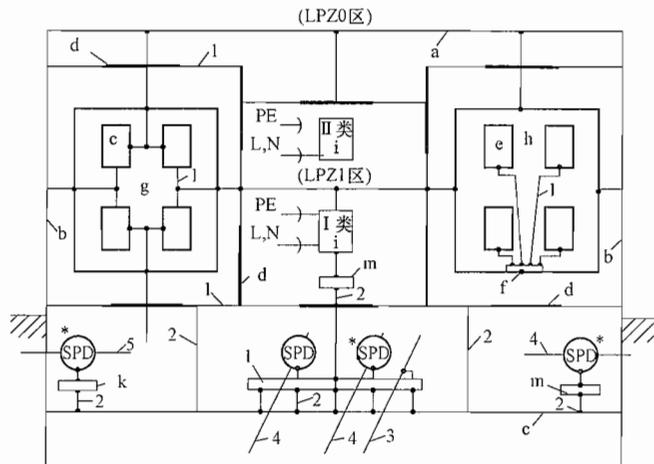


图 11-4-9 接地、等电位连接和接地系统的构成

- a—防雷装置的接闪器及可能是建筑物空间屏蔽的一部分;
- b—防雷装置的引下线及可能是建筑物空间屏蔽的一部分;
- c—防雷装置的接地装置(接地体网格、共用接地体网格)以及可能是建筑物空间屏蔽的一部分,如基础内钢筋和基础接地体;
- d—内部导电物体,在建筑物内及其上不包括电气装置的金属装置,如电梯轨道,起重机,金属地面,金属门框架,各种服务性设施的金属管道,金属电缆桥架,地面、墙和天花板的钢筋;
- e—局部电子系统的金属组件;
- f—代表局部等电位连接带单点连接的接地基准点(ERP);
- g—局部电子系统的网形等电位连接结构;
- h—局部电子系统的星形等电位连接结构;
- i—固定安装有 PE 线的 I 类设备和无 PE 线的 II 类设备;
- k—主要供电气系统等电位连接用的总接地带、总接地母线、总等电位连接带。也可用作共用等电位连接带;
- l—主要供电子系统等电位连接用的环形等电位连接带、水平等电位连接导体,在特定情况下采用金属板。也可用作共用等电位连接带。用接地线多次接到接地系统上做等电位连接,宜每隔 5m 连一次;
- n—局部等电位连接带;
- l—等电位连接导体; 2—接地线; 3—服务性设施的金属管制; 4—电子系统的线路或电缆; 5—电气系统的线路或电缆;
- \*—进入 LPZ1 区处,用于管道、电气和电子系统的线路或电缆等外来服务性设施的等电位连接。

(4) 穿过各防雷区界面的金属物和建筑物内系统，以及在一个防雷区内部的金属物和建筑物内系统，均应在界面处附近做符合下列要求的等电位连接：

1) 所有进入建筑物的外来导电物均应在  $LPZO_A$  或  $LPZO_B$  与  $LPZ1$  区的界面处做等电位连接。当外来导电物、电气和电子系统的线路在不同地点进入建筑物时，宜设若干等电位连接带，并应将其就近连到环形接地体、内部环形导体或在电气上贯通并连通到接地体或基础接地体的钢筋上。环形接地体和内部环形导体应连到钢筋或金属立面等其他屏蔽构件上，宜每隔 5m 连接一次。对各类防雷建筑物，各种连接导体和等电位连接带的截面积不应小于表 11-4-2 的规定。当建筑物内有电子系统时，在已确定雷击电磁脉冲影响最小之处，等电位连接带宜采用金属板，并应与钢筋或其他屏蔽构件做多点连接。

2) 在  $LPZO_A$  与  $LPZ1$  区的界面处做等电位连接用的接线夹和电涌保护器，应采用表 11-4-13 的雷电流参量估算通过的分流值。当无法估算时，可按本章式 (11-3-22) 或式 (11-3-23) 计算，计算中的雷电流应采用表 11-4-13 的雷电流。还应确定沿各种设施引入建筑物的雷电流。应采用向外分流或向内引入的雷电流的较大者。在靠近地面于  $LPZO_B$  与  $LPZ1$  区的界面处做等电位连接用的接线夹和电涌保护器，仅应确定闪电击中建筑物防雷装置时通过的雷电流；可不计及沿全长处在  $LPZO_B$  区的各种设施引入建筑物的雷电流，其值应仅为感应电流和小部分雷电流。

3) 各后续防雷区界面处的等电位连接也应采用 11.4.2.3 (4) 1) 的规定。穿过防雷区界面的所有导电物、电气和电子系统的线路均应在界面处做等电位连接。宜采用一局部等电位连接带做等电位连接，各种屏蔽结构或设备外壳等其他局部金属物也连到局部等电位连接带。用于等电位连接的接线夹和电涌保护器应分别估算通过的雷电流。

4) 所有电梯轨道、起重机、金属地板、金属门框架、设施管道、电缆桥架等大尺寸的内部导电物，其等电位连接应以最短路径连到最近的等电位连接带或其他已做了等电位连接的金属物或等电位连接网络，各导电物之间宜附加多次互相连接。

5) 电子系统的所有外露导电物应与建筑物的等电位连接网络做功能性等电位连接。电子系统不应设独立的接地装置。向电子系统供电的配电箱的保护地线 (PE 线) 应就近与建筑物的等电位连接网络做等电位连接。

一个电子系统的各种箱体、壳体、机架等金属组件与建筑物接地系统的等电位连接网络做功能性等电位连接，应采用 S 型星形结构或 M 型网形结构，如图 11-4-10 所示。

当采用 S 型等电位连接时，电子系统的所有金属组件应与接地系统的各组件绝缘。

6) 当电子系统为 300kHz 以下的模拟线路时，可采用 S 型等电位连接，且所有设施管线和电缆宜从 ERP 处附近进入该电子系统。

S 型等电位连接应仅通过唯一的 ERP 点，形成 S<sub>1</sub> 型连接方式，如图 11-4-10 所示。设备之间的所有线路和电缆当无屏蔽时，宜与成星形连接的等电位连接线平行敷设。用于限制从线路传导来的过电压的电涌保护器，其引线的连接点应使加到被保护设备上的电涌电压最小。

7) 当电子系统为兆赫兹级数字线路时，应采用 M 型等电位连接，系统的各金属组件不应与接地系统各组件绝缘。M 型等电位连接应通过多点连接组合到等电位连接网络中去，形成 M<sub>m</sub> 型连接方式。每台设备的等电位连接线的长度不宜大于 0.5m，并宜设两根等电位连

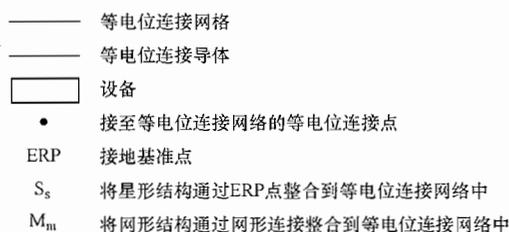
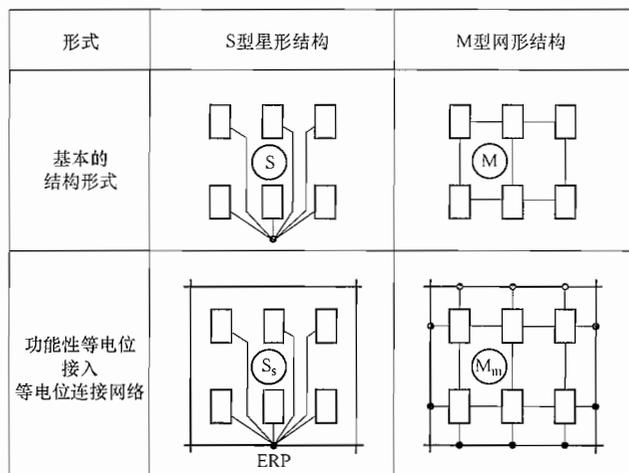


图 11-4-10 电子系统功能性等电位连接整合到等电位连接网络中

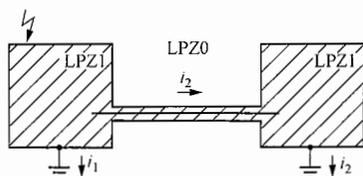
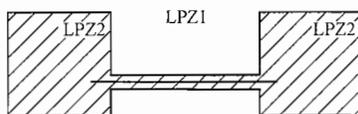
接线安装于设备的对角处，其长度相差宜为 20%。

#### 11.4.2.4 安装和选择电涌保护器的要求

(1) 复杂的电气和电子系统中，除在户外线路进入建筑物处， $LPZ0_A$  或  $LPZ0_B$  进入  $LPZ1$  区，按本章 11.3.2 要求安装电涌保护器外，在其后的配电和信号线路上应按本章 11.4.2.4 (4) ~ (8) 确定是否选择和安装与其协调配合好的电涌保护器。

(2) 两栋定为  $LPZ1$  区的独立建筑物用电气线路或信号线路的屏蔽电缆或穿钢管的无屏蔽线路连接时，屏蔽层流过的分雷电流在其上所产生的电压降不应对线路和所接设备引起绝缘击穿，同时屏蔽层的截面积应满足通流能力。其连接示意图如图 11-4-11 所示。计算方法应符合本章 11.4.6 的规定。

(3)  $LPZ1$  区内两个  $LPZ2$  区之间用电气线路或信号线路的屏蔽电缆或屏蔽的电缆沟或穿钢管屏蔽的线路连接在一起，当有屏蔽的线路没有引出  $LPZ2$  区时，线路的两端可不安装电涌保护器，其连接示意图如图 11-4-12 所示。

图 11-4-11 用屏蔽电缆或穿钢管线路将两栋独立的  $LPZ1$  区连接在一起图 11-4-12 用屏蔽的线路将两个  $LPZ2$  区连接在一起

(4) 需要保护的线路和设备的耐冲击电压, 220/380V 三相配; 电线路可按表 11-4-9 的规定取值; 其他线路和设备, 包括电压和电流的抗扰度, 宜按制造商提供的材料确定。

表 11-4-9 建筑物内 220/380V 配电系统中设备绝缘耐冲击电压额定值

设备位置	电源处的设备	配电线路和最后分支线路的设备	用电设备	特殊需要保护的设备
耐冲击电压类别	Ⅳ类	Ⅲ类	Ⅱ类	Ⅰ类
耐冲击电压额定值 $U_w$ (kV)	6	4	2.5	1.5

- 注 1. Ⅰ类——含有电子电路的设备, 如计算机、有电子程序控制的设备。  
 2. Ⅱ类——如家用电器和类似负荷。  
 3. Ⅲ类——如配电盘、断路器, 包括线路、母线、分线盒、开关、插座等固定装置的布线系统, 以及应用于工业的设备和永久接至固定装置的固定安装的电动机等的一些其他设备。  
 4. Ⅳ类——如电气计量仪表、一次线过流保护设备、滤波器。

(5) 电涌保护器安装位置和放电电流的选择, 应符合下列规定:

1) 户外线路进入建筑物处, 即 LPZ0<sub>A</sub> 或 LPZ0<sub>B</sub> 进入 LPZ1 区, 所安装的电涌保护器应按本章 11.3.2 的规定确定。

2) 靠近需要保护的设备处, 即 LPZ2 区和更高区的界面处, 当需要安装电涌保护器时, 对电气系统宜选用Ⅱ级或Ⅲ级试验的电涌保护器, 对电子系统宜按具体情况确定, 并应符合本章 11.4.2.5 的规定, 技术参数应按制造商提供的、在能量上与上述所确定的配合好的电涌保护器选用, 并应包含多组电涌保护器之间的最小距离要求。

3) 电涌保护器应与同一线路上游的电涌保护器在能量上配合, 电涌保护器在能量上配合的资料应由制造商提供。若无此资料, Ⅱ级试验的电涌保护器, 其标称放电电流不应小于 5kA; Ⅲ级试验的电涌保护器, 其标称放电电流不应小于 3kA。

(6) 电涌保护器的有效电压保护水平, 应符合下列规定。

1) 对限压型电涌保护器。

$$U_{p/F} = U_p + \Delta U \quad (11-4-15)$$

2) 对电压开关型电涌保护器, 应取式 (11-4-15) 中的较大值

$$U_{p/F} = U_p \text{ 或 } U_{p/F} = \Delta U \quad (11-4-16)$$

式中  $U_{p/F}$ ——电涌保护器的有效电压保护水平, kV;

$U_p$ ——电涌保护器的电压保护水平, kV;

$\Delta U$ ——电涌保护器两端引线的感应电压降, 即  $L \times (di/dt)$ , 户外线路进入建筑物处可按 1kV/m 计算, 在其后的可按  $\Delta U = 0.2U_p$  计算, 仅是感应电涌时可略去不计。

3) 为取得较小的电涌保护器有效电压保护水平, 应选用有较小电压保护水平值的电涌保护器, 并应采用合理的接线, 同时应缩短连接电涌保护器的导体长度。

(7) 确定从户外沿线路引入雷击电涌时, 电涌保护器的有效电压保护水平值的选取应符合下列规定:

1) 当被保护设备距电涌保护器的距离沿线路的长度小于或等于 5m 时, 或在线路有屏蔽并两端等电位连接下沿线路的长度小于或等于 10m 时, 计算式为

$$U_{p/r} \leq U_w \quad (11-4-17)$$

2) 当被保护设备距电涌保护器的距离沿线路的长度大于 10m 时, 计算式为

$$U_{p/r} \leq \frac{U_w - U_i}{2} \quad (11-4-18)$$

式中,  $U_i$  为雷击建筑物附近, 电涌保护器与被保护设备之间电路环路的感应过电压, kV, 按本章 11.4.2.3 (2) 和 11.4.5 计算。

3) 对 11.4.2.4 (7) 2), 当建筑物或房间有空间屏蔽和线路有屏蔽或仅线路有屏蔽并两端等电位连接时, 可不计及电涌保护器, 与被保护设备之间电路环路的感应过电压, 但应按式 (11-4-19) 计算:

$$U_{p/r} \leq \frac{U_w}{2} \quad (11-4-19)$$

4) 当被保护的电子设备或系统要求按现行国家标准 GB/T 17626.5—2008 《电磁兼容 试验和测量技术 浪涌 (冲击) 抗扰度试验》确定的冲击电涌电压小于  $U_w$  时, 式 (11-4-17) ~ 式 (11-4-19) 中  $U_w$  应用前者代入。

(8) 用电气系统的电涌保护器的最大持续运行电压值和接线形式, 以及用于电子系统的电涌保护器的最大持续运行电压值, 应按本章 11.4.2.5 的规定采用。连接电涌保护器的导体截面积应按表 11-4-2 的规定取值。

#### 11.4.2.5 电涌保护器

(1) 用于电气系统的电涌保护器。

1) 电涌保护器的最大持续运行电压不应小于表 11-4-10 所规定的最小值; 在电涌保护器安装处的供电电压偏差超过所规定的 10% 以及谐波使电压幅值加大的情况下, 应根据具体情况对限压型电涌保护器提高表 11-4-10 所规定的最大持续运行电压最小值。

表 11-4-10 电涌保护器取决于系统特征所要求的最大持续运行电压最小值

电涌保护器接于	配电网的系统特征				
	TT 系统	TN-C 系统	TN-S 系统	引出中性线的 IT 系统	无中性线引出的 IT 系统
每一相线与中性线间	$1.15U_0$	不适用	$1.15U_0$	$1.15U_0$	不适用
每一相线与 PE 线间	$1.15U_0$	不适用	$1.15U_0$	$\sqrt{3}U_0$ ①	相间电压 ①
中性线与 PE 线间	$U_0$ ①	不适用	$U_0$ ①	$U_0$ ①	不适用
每一相线与 PEN 线间	不适用	$1.15U_0$	不适用	不适用	不适用

注 1. 标有 ① 的值是故障下最坏的情况, 所以不需计及 15% 的允许误差。

2.  $U_0$  是低压系统相线对中性线的标称电压, 即相电压 220V。

3. 此表基于按现行国家标准 GB 18802—2011 《低压电涌保护器 (SPD) 第 1 部分: 低压配电系统的电涌保护器性能要求和试验方法》做过相关试验的电涌保护器产品。

2) 电涌保护器的接线形式应符合表 11-4-11 的规定。具体接线图如图 11-4-13 ~ 图 11-4-17 所示。

表 11-4-11 根据系统特征安装电涌保护器

电涌保护器接于	电涌保护器安装处的系统特征							
	TT 系统		TN-C 系统	TN-S 系统		引出中性线的 IT 系统		不引出中性线的 IT 系统
	按以下形式连接			按以下形式连接		按以下形式连接		
	接线形式 1	接线形式 2		接线形式 1	接线形式 2	接线形式 1	接线形式 2	
每根相线与中性线间	+	○	不适用	+	○	+	○	
每根相线与 PE 线间	○	不适用	不适用	○	不适用	○	不适用	○
中性线与 PE 线间	○	○	不适用	○	○	○	○	不适用
每根相线与 PEN 线间	不适用	不适用	○	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用
各相线之间	+	+	+	+	+	+	+	+

注 ○表示必须；+表示非强制性的，可附加选用。

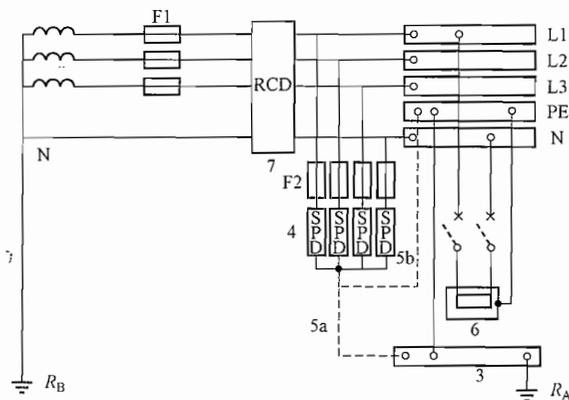


图 11-4-13 TT 系统电涌保护器安装在进户处剩余电流保护器的负荷侧

3—总接地端或总接地连接带；4— $U_p$ 应小于或等于 2.5kV 的电涌保护器；5—电涌保护器的接地连接线，5a 或 5b；

6—需要被电涌保护器保护的设；7—剩余电流保护器（RCD），应考虑通雷电流的能力；

F1—安装在电气装置电源进户处的保护电器；F2—电涌保护器制造厂要求装设的过电流保护电器； $R_A$ —本电气装置的接地电阻； $R_B$ —电源系统的接地电阻；L1、L2、L3—相线 1、2、3

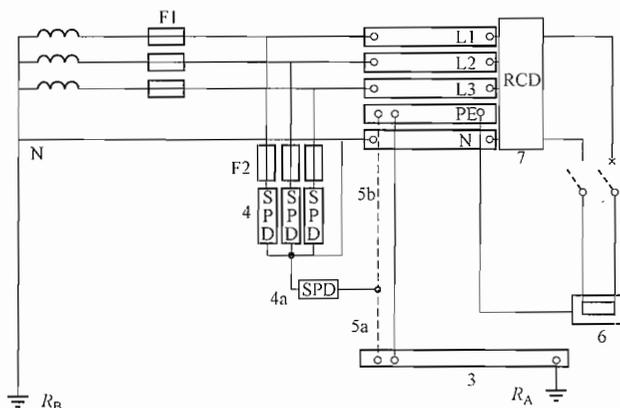


图 11-4-14 TT 系统电涌保护器安装在进户处剩余电流保护器的电源侧

3—总接地端或总接地连接带；

4, 4a—电涌保护器，它们串联后构成的  $U_p$  应小于或等于 2.5kV；

5—电涌保护器的接地连接线，5a 或 5b；

6—需要被电涌保护器保护的设备；

7—安装于母线的电源侧或负荷侧的剩余电流保护器（RCD）；

F1—安装在电气装置电源进户处的保护电器；

F2—电涌保护器制造厂要求装设的过电流保护电器；

$R_A$ —本电气装置的接地电阻；

$R_B$ —电源系统的接地电阻；

L1、L2、L3—相线 1、2、3

注：在高压系统为低电阻接地的前提下，当电源变压器高压侧碰外壳短路产生的过电压加于 4a 电涌保护器时该电涌保护器应按现行国家标准 GB 18802.1—2011（低压电涌保护器（SPD）第 1 部分：低压配电系统的电涌保护器 性能要求和试验方法》做 200ms 或按厂家要求做更长时间耐 1200V 暂态过电压试验。

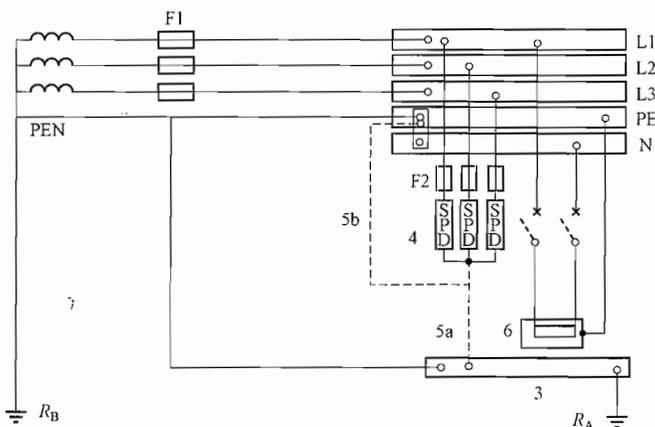


图 11-4-15 TN 系统安装在进户处的电涌保护器

3—总接地端或总接地连接带；4— $U_p$  应小于或等于 2.5kV 的电涌保护器；

5—电涌保护器的接地连接线，5a 或 5b；

6—需要被电涌保护器保护的设备；

F1—安装在电气装置电源进户处的保护电器；

F2—电涌保护器制造厂要求装设的过电流保护电器；

$R_A$ —本电气装置的接地电阻；

$R_B$ —电源系统的接地电阻；

L1、L2、L3—相线 1、2、3

注：当采用 TN-C-S 或 TN-S 系统时，在 N 与 PE 线连接处电涌保护器用三个，在其以后 N 与 PE 线分开 10m 以后安装电涌保护器时用 4 个，即在 N 与 PE 线间增加一个，见图 11-4-17 及其注。

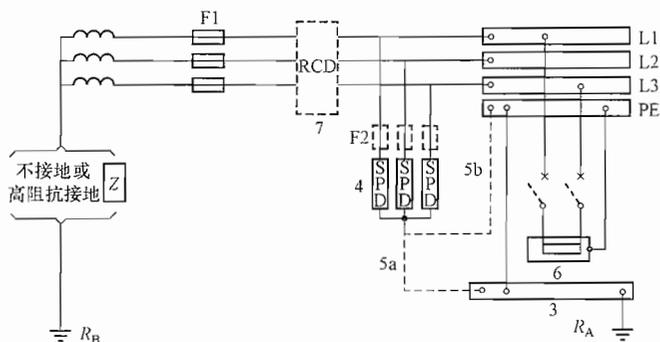


图 11-4-16 IT 系统电涌保护器安装在进户处剩余电流保护器的负荷侧

- 3—总接地端或总接地连接带；
- 4— $U_p$ 应小于或等于 2.5kV 的电涌保护器；
- 5—电涌保护器的接地连接线，5a 或 5b；
- 6—需要被电涌保护器保护的装置；
- 7—剩余电流保护器（RCD）；
- F1—安装在电气装置电源进户处的保护电器；
- F2—电涌保护器制造厂要求装设的过电流保护电器；
- $R_A$ —本电气装置的接地电阻； $R_B$ —电源系统的接地电阻；
- L1、L2、L3—相线 1、2、3

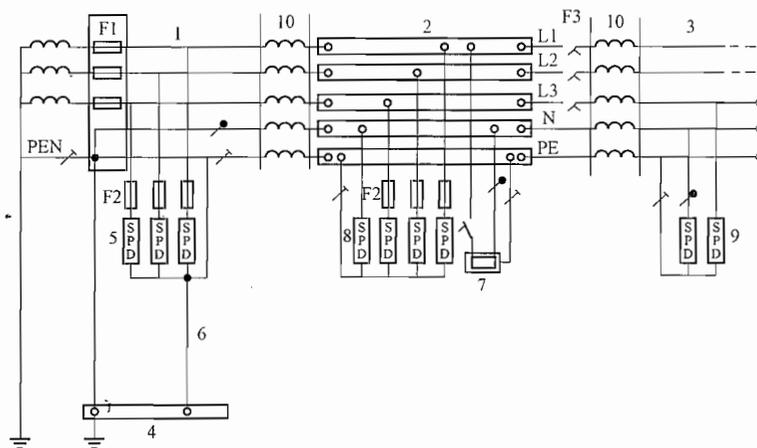


图 11-4-17 I 级、II 级和 III 级试验的电涌保护器的安装（以 TN-C-S 系统为例）

- 1—电气装置的电源进户处；2—配电箱；3—送出的配电路；4—总接地端或总接地连接带；5—I 级试验的电涌保护器；6—电涌保护器的接地连接线；7—需要被电涌保护器保护的固定安装的设备；8—II 级试验的电涌保护器；9—II 级或 III 级试验的电涌保护器；10—去耦器件或配电路长度；
- F1、F2、F3—过电流保护电器；L1、L2、L3—相线 1、2、3

注：1 当电涌保护器 5 和 8 不是安装在同一处时，电涌保护器 5 的  $U_p$  应小于或等于 2.5kV；电涌保护器 5 和 8 可以组合为一台电涌保护器，其  $U_p$  应小于或等于 2.5kV。

2 当电涌保护器 5 和 8 之间的距离小于 10m 时，在 8 处 N 与 PE 之间的电涌保护器可不装。

(2) 用于电子系统的电涌保护器。

1) 电信和信号线路上所接入的电涌保护器的类别及其冲击限制电压试验用的电压波形和电流波形应符合表 11-4-12 的规定。

表 11-4-12 电涌保护器的类别及其冲击限制电压试验用的电压波形和电流波形

类别	试验类型	开路电压	短路电流
A1	很慢的上升率	$\geq 1\text{kV}$ $0.1\text{kV}/\mu\text{s} \sim 100\text{kV}/\text{s}$	$10\text{A}$ , $0.1\text{A}/\mu\text{s} \sim 2\text{A}/\mu\text{s}$ $\geq 1000\mu\text{s}$ (持续时间)
A2	AC		
B1	慢上升率	$1\text{kV}$ , $10/1000\mu\text{s}$	$100\text{A}$ , $10/1000\mu\text{s}$
B2		$1 \sim 4\text{kV}$ , $10/700\mu\text{s}$	$25 \sim 100\text{A}$ , $5/300\mu\text{s}$
B3		$\geq 1\text{kV}$ , $100\text{V}/\mu\text{s}$	$10 \sim 100\text{A}$ , $10/1000\mu\text{s}$
C1	快上升率	$0.5 \sim 1\text{kV}$ , $1.2/50\mu\text{s}$	$0.25 \sim 1\text{kA}$ , $8/20\mu\text{s}$
C2		$2 \sim 10\text{kV}$ , $1.2/50\mu\text{s}$	$1 \sim 5\text{kA}$ , $8/20\mu\text{s}$
C3		$\geq 1\text{kV}$ , $1\text{kV}/\mu\text{s}$	$10 \sim 100\text{A}$ , $10/1000\mu\text{s}$
D1	高能量	$\geq 1\text{kV}$	$0.5 \sim 2.5\text{kA}$ , $10/350\mu\text{s}$
D2		$\geq 1\text{kV}$	$0.6 \sim 2.0\text{kA}$ , $10/250\mu\text{s}$

2) 电信和信号线路上所接入的电涌保护器, 其最大持续运行电压最小值应大于接到线路处可能产生的最大运行电压。用于电子系统的电涌保护器, 其标记的直流电压  $U_{\text{DC}}$  也可用于交流电压  $U_{\text{AC}}$  的有效值, 反之亦然,  $U_{\text{DC}} = \sqrt{2}U_{\text{AC}}$ 。

3) 合理接线应符合下列规定:

a. 应保证电涌保护器的差模和共模限制电压的规格与需要保护系统的要求相一致, 如图 11-4-18 所示。

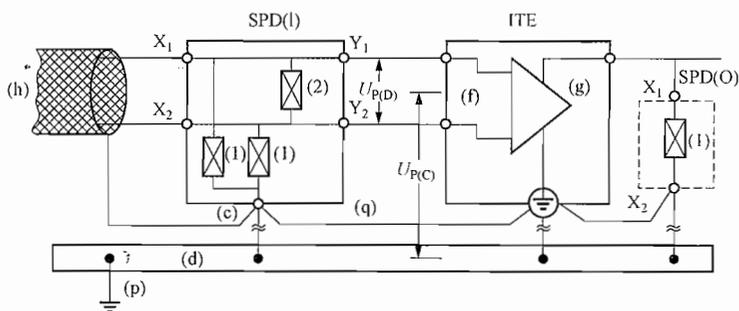


图 11-4-18 防需要保护的电子设备 (ITE) 的供电电压输入端及其信号端的差模和共模电压的保护措施的例子

- (c) 一电涌保护器的一个连接点, 通常, 电涌保护器内的所有限制共模电涌电压元件都以此为基准点;
- (d) 一等电位连接带; (f) 一电子设备的信号端口; (g) 一电子设备的电源端口;
- (h) 一电子系统线路或网络; (1) 一符合本章表 11-4-11 所选用的电涌保护器;
- (o) 一用于直流电源线路的电涌保护器; (p) 一接地导体;
- $U_{\text{P(C)}}$  一将共模电压限制至电压保护水平;  $U_{\text{P(D)}}$  一将差模电压限制至电压保护水平;
- $X_1$ 、 $X_2$  一电涌保护器非保护侧的接线端子, 在它们之间接入 (1) 和 (2) 限压元件;
- $Y_1$ 、 $Y_2$  一电涌保护器保护侧的接线端子;
- (1) 一用于限制共模电压的防电涌电压元件;
- (2) 一用于限制差模电压的防电涌电压元件

b. 接至电子设备的多接线端子电涌保护器，为将其有效电压保护水平减至最小所必需的安装条件，如图 11-4-19 所示。

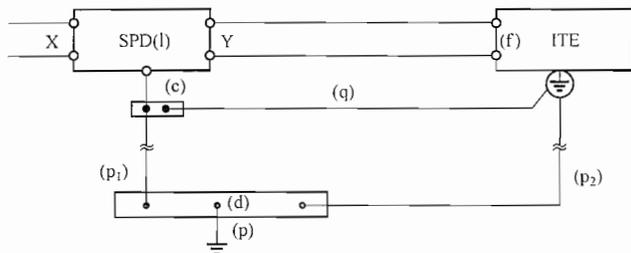


图 11-4-19 将多接线端子电涌保护器的有效电压保护水平减至最小所必需的安装条件的例子

- (c) 一电涌保护器的一个连接点，通常，电涌保护器内的所有限制共模电涌电压元件都以此为基准点；
- (d) 一等电位连接带；(f) 一电子设备的信号端口；
- (l) 一符合本章表 11-4-11 所选用的电涌保护器；(p) 一接地导体；
- (p<sub>1</sub>、p<sub>2</sub>) 一应尽可能短的接地导体，当电子设备 (ITE) 在远处时可能无 (p<sub>2</sub>)；
- (q) 一必需的连接线（应尽可能短）；
- X、Y—电涌保护的接线端子，X 为其非保护的输入端，Y 为其保护侧的输出端

c. 附加措施应符合下列规定：

- (a) 接至电涌保护器保护端口的线路不要与接至非保护端口的线路敷设在一起。
- (b) 接至电涌保护器保护端口的线路不要与接地导体 (p) 敷设在一起。
- (c) 从电涌保护器保护侧接至需要保护的电子设备 (ITE) 的线路宜短或加以屏蔽。
- (d) 雷击时在环路中的感应电压和电流的计算应符合本章 11.4.5 的规定。

### 11.4.3 分流系统 $k_c$

11.4.3.1 单根引下线时，分流系数应彩 1；两根引下线及接闪器不成闭合环的多根引下线时，分流系数可为 0.66，也可按图 11-4-20 计算确定；图 11-4-20 (c) 适用于引下线根数  $n$  不少于 3 根，当接闪器成闭合环或网状的多根引下线时，分流系数可为 0.44。

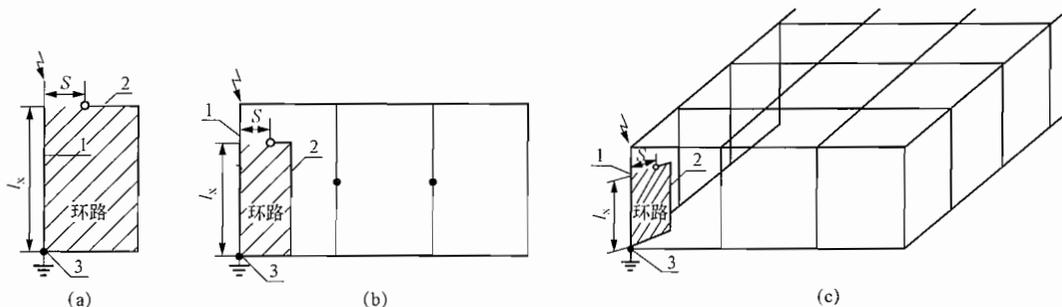


图 11-4-20 分流系数  $k_c$  (1)

(a) 单根引下线；(b) 两根引下线及接闪器不成闭合环的多根引下线；(c) 接闪器成闭合环或网状的多根引下线

1—引下线；2—金属装置或线路；3—直接连接或通过电涌保护器连接

注 1. S 为空气中间距离，x 为引下线从计算点到等电位连接点的长度。

2. 本图适用于环形接地体。也适用于各引下线设独立的接地体且各独自接地体的冲击接地电阻与邻近的差别不大于 2 倍；若差别大于 2 倍时， $k_c = 1$ 。

3. 本图适用于单层和多层建筑物。

**11.4.3.2** 当采用网格型接闪器、引下线用多根环形导体互相连接、接地体采用环形接地体，或利用建筑物钢筋或钢构架作为防雷装置时，分流系数宜按图 11-4-21 确定。

**11.4.3.3** 在接地装置相同的情况下，即采用环形接地体或各引下线设独立自接地体且其冲击接地电阻相近，按图 11-4-20 和图 11-4-21 确定的分流系数不同时，可取较小者。

**11.4.3.4** 单根导体接闪器按两根引下线确定时，当各引下线设各自的接地体且各各自接地体的冲击接地电阻与邻近的差别不大于 2 倍时，可按图 11-4-22 计算分流系数；若差别不大于 2 倍时，分流系数应为 1。

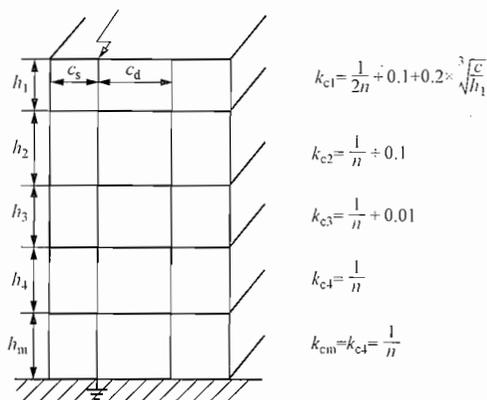


图 11-4-21 分流系数  $k_c$  (2)

注：1.  $h_1 \sim h_m$  为连接引下线各环形导体或各层地面金属体之间的距离， $c, c_d$  为某引下线顶雷击点至两侧最近引下线之间的距离，计算式中的  $c$  取二者较小值， $n$  为建筑物周边和内部引下线的根数且不小于 4 根。 $c$  和  $h_1$  取值范围在 3 ~ 20m。

2. 本图适用于单层至高层建筑物。

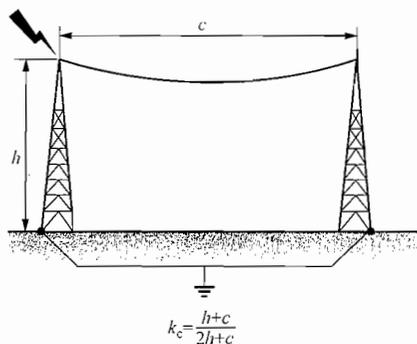


图 11-4-22 分流系数  $k_c$  (3)

#### 11.4.4 雷电流

闪电中可能出现的三种雷击如图 11-4-23 所示其参量应按表 11-4-13 ~ 表 11-4-16 的规定取值。雷击参数的定义应符合图 11-4-24 的规定。

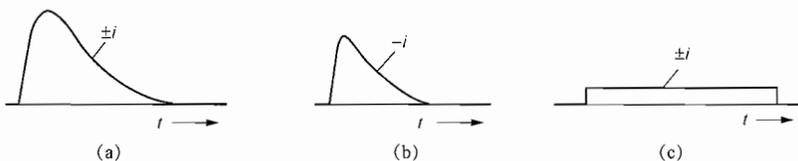


图 11-4-23 闪电中可能出现的三种雷击

(a) 短时首次雷击；(b) 首次以后的短时后续雷击；(c) 长时间雷击

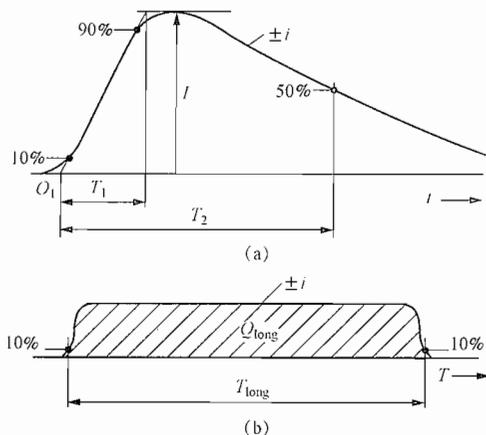


图 11-4-24 雷击参数定义

(a) 短时雷击（典型值  $T_2 < 2\text{ms}$ ）； $I$ —峰值电流（幅值）； $T_1$ —波头时间； $T_2$ —半值时间；(b) 长时间雷击（典型值  $2\text{ms} < T_{\text{long}} < 1\text{s}$ ）； $T_{\text{long}}$ —波头及波尾幅值为峰值 10% 两点之间的时间间隔； $Q_{\text{long}}$ —长时间雷击的电荷量

注：1. 短时雷击电流波头的平均陡度（average steepness of the front of short stroke current）是在时间间隔  $(t_2 - t_1)$  内电流的平均变化率，即用该时间间隔的起点电流与末尾电流之差  $[i(t_2) - i(t_1)]$  除以  $(t_2 - t_1)$  [见图 11-4-24 (a)]。

2. 短时雷击电流的波头时间  $T_1$ （front time of short stroke current  $T_1$ ）是一规定参数，定义为电流达到 10% 和 90% 幅值电流之间的时间间隔乘以 1.25，见图 11-4-24 (a)。

3. 短时雷击电流的规定原点  $O_1$ （virtual origin of short stroke current  $O_1$ ）是连接雷击电流波头 10% 和 90% 参考点的延长直线与时间横坐标相交的点，它位于电流到达 10% 幅值电流时之前  $0.1T_1$  处，见图 11-4-24 (a)。

4. 短时雷击电流的半值时间  $T_2$ （time to half value of short stroke current  $T_2$ ）是一规定参数，定义为规定原点  $O_1$  与电流降至幅值一半之间的时间间隔，见图 11-4-24 (a)。

表 11-4-13 首次正极性雷击的雷电流参量

雷电流参数	防雷建筑物类别		
	一类	二类	三类
幅值 $I$ (kA)	200	150	100
波头时间 $T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	10	10	10
半值时间 $T_2$ ( $\mu\text{s}$ )	350	350	350
电荷量 $Q_s$ (C)	100	75	50
单位能量 $W/R$ (MJ/ $\Omega$ )	10	5.6	2.5

表 11-4-14 首次负极性雷击的雷电流参量

雷电流参数	防雷建筑物类别		
	一类	二类	三类
幅值 $I$ (kA)	100	75	50
波头时间 $T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	1	1	1
半值时间 $T_2$ ( $\mu\text{s}$ )	200	200	200
平均限度 $I/T_1$ (kA/ $\mu\text{s}$ )	100	75	50

注 本波形仅供计算用，不供做试验用。

表 11-4-15 首次负极性以后雷击的雷电流参量

雷电流参数	防雷建筑物类别		
	一类	二类	三类
幅值 $I$ (kA)	50	37.5	25
波头时间 $T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	0.25	0.25	0.25
平均时间 $T_3$ ( $\mu\text{s}$ )	100	100	100
平均限度 $I/T_1$ (kA/ $\mu\text{s}$ )	200	150	100

表 11-4-16 长时间雷击的雷电流参量

雷电流参数	防雷建筑物类别		
	一类	二类	三类
电荷量 $Q_1$ (C)	200	150	100
时间 $T$ (s)	0.5	0.5	0.5

注 平均电流  $I \approx Q_1/T_0$ 。

### 11.4.5 环路中感应电压和电流的计算

11.4.5.1 格栅形屏蔽建筑物附近遭雷击时, 在 LPZ1 区内环路的感应电压和电流如图 11-4-25 所示, 在 LPZ1 区, 其开路最大感应电压计算式为

$$U_{oc/\max} = \mu_0 \cdot b \cdot l \cdot H_{1/\max} / T_1 \quad (11-4-20)$$

式中  $U_{oc/\max}$ ——环路开路最大感应电压, V;

$\mu_0$ ——真空的磁导系数, 其值等于  $4\pi \times 10^{-7}$  (V·s) / (A·m);

$b$ ——环路的宽, m;

$l$ ——环路的长, m;

$H_{1/\max}$ ——LPZ1 区内最大的磁场强度, A/m, 按本章式 (11-4-5) 计算;

$T_1$ ——雷电流的波头时间, s。

若略去导线的电阻 (最坏情况), 环路最大短路电流计算式为

$$i_{sc/\max} = \mu_0 \cdot b \cdot l \cdot H_{1/\max} / L \quad (11-4-21)$$

式中  $i_{sc/\max}$ ——最大短路电流, A;

$L$ ——环路的自电感, H, 矩形环路的自电感可按公式 (11-4-22) 计算。

矩形环路的自电感计算式为

$$L = \{0.8 \sqrt{l^2 + b^2} - 0.8(l + b) + 0.4 \cdot l \cdot \ln\{(2b/r) / [1 + \sqrt{1 + (b/l)^2}]\} + 0.4 \cdot b \cdot \ln\{(2l/r) / (1 + \sqrt{1 + (l/b)^2})\}\} \times 10^{-6} \quad (11-4-22)$$

式中,  $r$  为环路导体的半径, m。

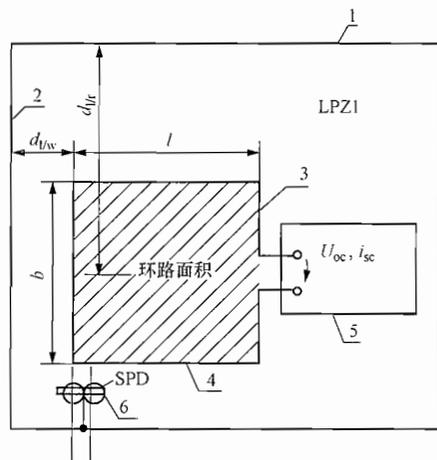


图 11-4-25 环路中的感应电压和电流

1—屋顶; 2—墙; 3—电力线路; 4—信号线路; 5—信号设备; 6—等电位连接带

注: 1. 当环路不是矩形时, 应转换为相同环路面积的矩形环路;

2. 图中的电力线路或信号线路也可能是邻近的两端做了等电位连接的金属物。

**11.4.5.2** 格栅形屏蔽建筑物遭直接雷击时，在LPZ1区内环路的感应电压和电流如图11-4-25所示，在LPZ1区 $V_s$ 空间内的磁场强度 $H_1$ 应按式(11-4-11)计算。根据图11-4-25所示无屏蔽线路构成的环路，其开路最大感应电压计算式为

$$U_{oc/\max} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{1/w}) \cdot k_H \cdot (w/\sqrt{d_{1/r}}) \cdot i_{0/\max}/T_1 \quad (11-4-23)$$

式中  $d_{1/w}$ ——环路至屏蔽墙的距离，m，根据本章式(11-4-10)或式(11-4-11)计算， $d_{1/w}$ 等于或大于 $d_{s/2}$ ；

$d_{1/r}$ ——环路至屏蔽屋顶的平均距离，m；

$i_{0/\max}$ ——LPZ0<sub>A</sub>区内的雷电流最大值，A；

$k_H$ ——形状系数( $1/\sqrt{m}$ )，取 $k_H=0.01(1/\sqrt{m})$ ；

$w$ ——格栅形屏蔽的网格宽，m。

若略去导线的电阻（最坏情况），最大短路电流计算式为

$$U_{sc/\max} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{1/w}) \cdot k_H \cdot (w/\sqrt{d_{1/r}}) \cdot i_{0/\max}/L \quad (11-4-24)$$

**11.4.5.3** 在LPZ $n$ 区( $n$ 等于或大于2)内环路的感应电压和电流在LPZ $n$ 区 $V_s$ 空间内的磁场强度 $H_n$ 看成是均匀的情况下（见本章图11-4-6），图11-4-25所示无屏蔽线路构成的环路，其最大感应电压和电流可按式(11-4-20)和式(11-4-21)计算，该两式中的 $H_{1/\max}$ 应根据本章式(11-4-5)或式(11-4-14)计算出的 $H_{n/\max}$ 代入。式(11-4-5)中的 $H_1$ 用 $H_{n/\max}$ 代入， $H_0$ 用 $H_{(n-1)/\max}$ 代入。

**11.4.6** 电缆从户外进入户内的屏蔽层截面积

**11.4.6.1** 在屏蔽线路从室外LPZ0<sub>A</sub>或LPZ0<sub>B</sub>区进入LPZ1区的情况下，线路屏蔽层的截面积计算式为

$$S_c \geq \frac{I_f \times \rho_c \times L_c \times 10^4}{U_w} \quad (11-4-25)$$

式中  $S_c$ ——线路屏蔽层的截面积，mm<sup>2</sup>；

$I_f$ ——流入屏蔽层的雷电流，kA，按本章式(11-3-23)计算，计算中的雷电流按本章表11-4-13的规定取值；

$\rho_c$ ——屏蔽层的电阻率， $\Omega \cdot m$ ，20℃时铁为 $138 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ ，铜为 $17.24 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ ，铝为 $28.264 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ ；

$L_c$ ——线路长度，m，按本章表11-4-17的规定取值；

$U_w$ ——电缆所接的电气或电子系统的耐冲击电压额定值，kV，设备按本章表11-4-18的规定取值，线路按本章表11-4-19的规定取值。

表 11-4-17 按屏蔽层敷设条件确定的线路长度

屏蔽层敷设条件	$L_c$ (m)
屏蔽层与电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ ) 的土壤直接接触	当实际长度 $\geq 8\sqrt{\rho}$ 时，取 $L_p = 8\sqrt{\rho}$ ； 当实际长度 $< 8\sqrt{\rho}$ 时，取 $L_p =$ 线路实际长度
屏蔽层与土壤隔离或敷设在大气中	$L_c =$ 建筑物与屏蔽层最近地点之间的距离

表 11-4-18 设备的耐冲击电压额定值

设备类型	耐冲击电压额定值 $U_w$ (kV)
电子设备	1.5
用户的电气设备 ( $U_n < 1\text{kV}$ )	2.5
电网设备 ( $U_n < 1\text{kV}$ )	6

表 11-4-19 电缆绝缘的耐冲击电压额定值

电缆种类及其额定电压 $U_n$ (kV)	耐冲击电压额定值 $U_w$ (kV)
纸绝缘通信电缆	1.5
塑料绝缘通信电缆	5
电力电缆 $U_n \leq 1$	15
电力电缆 $U_n = 3$	45
电力电缆 $U_n = 6$	60
电力电缆 $U_n = 10$	75
电力电缆 $U_n = 15$	95
电力电缆 $U_n = 20$	125

**11.4.6.2** 当流入线路的雷电流大于按下列公式计算的数值时, 绝缘可能产生不可接受的温升:

对屏蔽线路:

$$I_f = 8 \times S_c \quad (11-4-26)$$

对无屏蔽的线路:

$$I'_f = 8 \times n' \times S'_c \quad (11-4-27)$$

式中  $I'_f$ ——流入无屏蔽线路的总雷电流, kA;

$n'$ ——线路导线的根数;

$S'_c$ ——每根导线的截面积,  $\text{mm}^2$ 。

**11.4.6.3** 上述也适用于用钢管屏蔽的线路, 对此, 式 (11-4-25) 和式 (11-4-26) 中的  $S_c$  为钢管壁厚的截面积。

## 接 地 装 置

## 12.1 高压电气装置接地

## 12.1.1 高压电气装置接地的一般规定

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》第3章规定:

## 3.1 一般规定

3.1.1 电力系统、装置或设备应按规定接地。接地装置应充分利用自然接地极接地,但应校验自然接地极的热稳定性。接地按功能可分为系统接地、保护接地、雷电保护接地和防静电接地。

3.1.2 发电厂和变电站内,不同用途和不同额定电压的电气装置或设备,除另有规定外应使用一个总的接地网。接地网的接地电阻应符合其中最小值的要求。

3.1.3 设计接地装置时,应计及土壤干燥或降雨和冻结等季节变化的影响,接地电阻、接触电位差和跨步电位差在四季中均应符合本规范的要求。但雷电保护接地的接地电阻,可只采用在雷季中土壤干燥状态下的最大值。

## 12.1.2 高压电气装置保护接地的范围

12.1.2.1 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的电力系统、装置或设备应接地的范围:

3.2.1 电力系统、装置或设备的下列部分(给定点)应接地:

1 有效接地系统中部分变压器的中性点和有效接地系统中部分变压器、谐振接地、低电阻接地以及高电阻接地系统的中性点所接设备的接地端子。

2 高压并联电抗器中性点接地电抗器的接地端子。

3 电机、变压器和高压电器等的底座和外壳。

4 发电机中性点柜的外壳、发电机出线柜、封闭母线的外壳和变压器、开关柜等(配套)的金属母线槽等。

5 气体绝缘金属封闭开关设备的接地端子。

6 配电、控制和保护用的屏(柜、箱)等的金属框架。

7 箱式变电站和环网柜的金属箱体等。

8 发电厂、变电站电缆沟和电缆隧道内,以及地上各种电缆金属支架等。

9 屋内外配电装置的金屬架构和钢筋混凝土架构,以及靠近带电部分的金属围栏和金属门。

10 电力电缆接线盒、终端盒的外壳,电力电缆的金属护套或屏蔽层,穿线的钢管和电缆桥架等。

- 11 装有地线（架空地线，又称避雷线）的架空线路杆塔。
- 12 除沥青地面的居民区外，其他居民区内，不接地、谐振接地和高电阻接地系统中无地线架空线路的金属杆塔。
- 13 装在配电线路杆塔上的开关设备、电容器等电气装置。
- 14 高压电气装置传动装置。
- 15 附属于高压电气装置的互感器的二次绕组和铠装控制电缆的外皮。

### 12.1.2.2 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的可不接地的范围

3.2.2 附属于高压电气装置和电力生产设施的二次设备等的下列金属部分可不接地：

- 1 在木质、沥青等不良导电地面的干燥房间内，交流标称电压380V及以下、直流标称电压220V及以下的电气装置外壳，但当维护人员可能同时触及电气装置外壳和接地物件时除外。
- 2 安装在配电屏、控制屏和配电装置上的电测量仪表、继电器和其他低压电器等的外壳，以及当发生绝缘损坏时在支持物上不会引起危险电压的绝缘子金属底座等。
- 3 安装在已接地的金属架构上，且保证电气接触良好的设备。
- 4 标称电压220V及以下的蓄电池室内的支架。
- 5 除本规范第4.3.3条所列的场所外，由发电厂和变电站区域内引出的铁路轨道。

## 12.2 发电厂和变电站的接地网

### 12.2.1 一般要求

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》第4章规定：

- 4.1 110kV及以上发电厂和变电站接地网设计的一般要求
  - 4.1.1 设计人员应掌握工程地点的地形地貌、土壤的种类和分层状况，并应实测或搜集站址土壤及江、河、湖泊等的水的电阻率、地质电测部门提供的地层土壤电阻率分布资料和关于土壤腐蚀性能的数据，应充分了解站址处较大范围土壤的不均匀程度。
  - 4.1.2 设计人员应根据有关建筑物的布置、结构、钢筋配置情况，确定可利用作为接地网的自然接地极。
  - 4.1.3 设计人员应根据当前和远景的最大运行方式下一次系统电气接线、母线连接的送电线路状况、故障时系统的电抗与电阻比值等，确定设计水平年的最大接地故障不对称电流有效值。
  - 4.1.4 设计人员应计算确定流过设备外壳接地导体（线）和经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值。
  - 4.1.5 接地网的尺寸及结构应根据站址土壤结构和其他电阻率，以及要求的接地网的接地电阻值初步拟订，并宜通过数值计算获得接地网的接地电阻值和地电位升高，且将其与要求的限制比较，并通过修正接地网设计使其满足要求。
  - 4.1.6 设计人员应通过计算获得地表面的接触电位差和跨步电位差分布，并应将最大接触电位差和最大跨步电位差与允许值加以比较。不满足要求时，应采取降低措施或采取提高允许值的措施。

- 4.1.7 接地导体（线）和接地极的材质和相应的截面，应计及设计使用年限内土壤对其的腐蚀，通过热稳定校验确定。
- 4.1.8 设计人员应根据实测结果校验设计。当不满足要求时，应补充与完善或增加防护措施。

## 12.2.2 接地电阻与均压要求

### 12.2.2.1 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的接地电阻要求：

4.2.1 保护接地要求的发电厂和变电站接地网的接地电阻，应符合下列要求：

1 有效接地系统和低电阻接地系统，应符合下列要求：

1) 接地网的接地电阻宜符合下列公式的要求，且保护接地接至变电站接地网的站用变压器的低压侧应采用 TN 系统，低压电气装置应采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位联结系统：

$$R \leq 2000/I_G \quad (4.2.1-1)$$

式中： $R$ ——采用季节变化的最大接地电阻（ $\Omega$ ）；

$I_G$ ——计算用经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值（A），应按本规范附录 B 确定。

$I_G$ 应采用设计水平年系统最大运行方式下在接地网内、外发生接地故障时，经接地网流入地中并计及直流分量的最大接地故障电流有效值。对其计算时，还应计算系统中各接地中性点间的故障电流分配，以及避雷线中分走的接地故障电流。

2) 当接地网的接地电阻不符合本规范式（4.2.1-1）的要求时，可通过技术经济比较适当增大接地电阻。在符合本规范第 4.3.3 条的规定时，接地网地电位升高可提高至 5kV。必要时，经专门计算，且采取的措施可确保人身和设备安全可靠时，接地网地电位升高还可进一步提高。

2 不接地、谐振接地和高电阻接地系统，应符合下列要求：

1) 接地网的接地电阻应符合下列公式的要求，但不应大于 4  $\Omega$ ，且保护接地接至变电站接地网的站用变压器的低压侧电气装置，应采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位联结系统：

$$R \leq \frac{120}{I_g} \quad (4.2.1-2)$$

式中： $R$ ——采用季节变化的最大接地电阻（ $\Omega$ ）；

$I_g$ ——计算用的接地网入地对称电流（A）。

2) 谐振接地系统中，计算发电厂和变电站接地网的入地对称电流时，对于装有自动跟踪补偿消弧装置（含非自动调节的消弧线圈）的发电厂和变电站电气装置的接地网，计算电流等于接在同一接地网中同一系统各自动跟踪补偿消弧装置额定电流总和的 1.25 倍；对于不装自动跟踪补偿消弧装置的发电厂和变电站电气装置的接地网，计算电流等于系统中断开最大一套自动跟踪补偿消弧装置或系统中最长线路被切除时的最大可能残余电流值。

### 12.2.2.2 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的接触电位差和跨步

电位差允许值计算方法:

4.2.2 确定发电厂和变电站接地网的型式和布置时,应符合下列要求:

1 110kV 及以上有效接地系统和 6kV ~ 35kV 低电阻接地系统发生单相接地或同点两相接地时,发电厂和变电站接地网的接触电位差和跨步电位差不应超过由下列公式计算所得的数值:

$$U_t = \frac{174 + 0.17\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (4.2.2-1)$$

$$U_s = \frac{174 + 0.7\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (4.2.2-2)$$

式中:  $U_t$ ——接触电位差允许值 (V);

$U_s$ ——跨步电位差允许值 (V);

$\rho_s$ ——地表的电阻率 ( $\Omega \cdot m$ );

$C_s$ ——表层衰减系数,按本规范附录 C 的规定确定;

$t_s$ ——接地故障电流持续时间,与接地装置热稳定校验的接地故障等效持续时间  $t_e$  取相同值 (s)。

2 6kV ~ 66kV 不接地、谐振接地和高电阻接地的系统,发生单相接地故障后,当不迅速切除故障时,发电厂和变电站接地装置的接触电位差和跨步电位差不应超过下列公式计算所得的数值:

$$U_t = 50 + 0.05\rho_s C_s \quad (4.2.2-3)$$

$$U_s = 50 + 0.2\rho_s C_s \quad (4.2.2-4)$$

12.2.2.3 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的表层衰减系数的计算方法:

### 附录 C 表层衰减系数

C.0.1 接触电压差和跨步电位差允许值可按下列公式计算:

$$U_t = \frac{174 + 0.17\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (C.0.1-1)$$

$$U_s = \frac{174 + 0.7\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (C.0.1-2)$$

$$C_s = 1 + \frac{16b}{\rho_s} \sum_{n=1}^{\infty} [K^n \cdot R_{m(2nh)}] \quad (C.0.1-3)$$

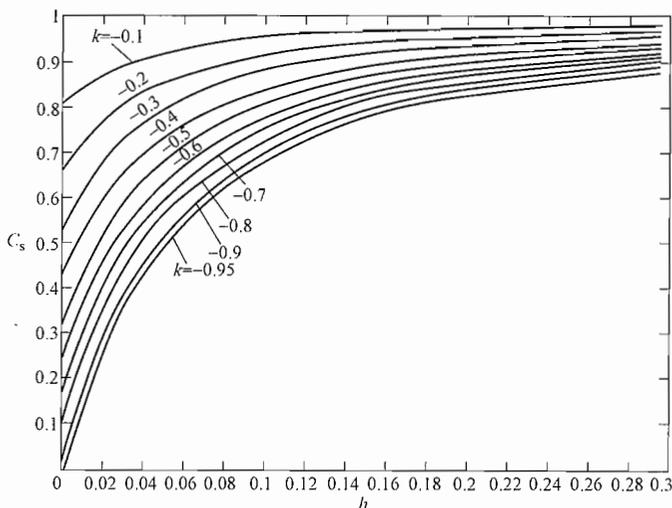
$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (C.0.1-4)$$

$$R_{m(2nh)} = \frac{1}{\pi b^2} \int_0^b (2\pi x \cdot R_{r,z}) dx \quad (C.0.1-5)$$

$$R_{m(2nh_s)} = \frac{\rho_s}{4\pi b} \sin^{-1} \left[ \frac{2b}{\sqrt{(r-b)^2 + z^2} + \sqrt{(r+b)^2 + z^2}} \right] \quad (C.0.1-6)$$

式中:  $\rho_s$ ——表层土壤电阻率;

- $C_s$ ——表层衰减系数，通过镜像法进行计算，也可通过图 C.0.1 中  $C_s$  与  $h$  和  $K$  的关系曲线查取，其中  $b$  取 0.08m；
- $b$ ——人脚的金属圆盘的半径；
- $K$ ——不同电阻率土壤的反射系数，可按公式 (C.0.1-4) 计算；
- $h_s$ ——表层土壤厚度；
- $R_{m(2nh_s)}$ ——两个相似、平行、相距  $2nh_s$  且置于土壤电阻率为  $\rho$  的无限大土壤中的两个圆盘之间的互阻 ( $\Omega$ )；
- $\rho$ ——下层土壤电阻率；
- $r, z$ ——以圆盘 1 的中心为坐标原点时，圆盘 2 上某点的极坐标。

图 C.0.1  $C_s$  与  $h$  和  $K$  的关系曲线

C.0.2 工程中对地网上方跨步电位差和接触电位差允许值的计算精度要求不高（误差在 5% 以内）时，也可采用下式计算：

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (\text{C.0.2})$$

12.2.2.4 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的接触电位差和跨步电位差计算方法：

#### 附录 D 均匀土壤中接地网接触电位差和跨步电位差的计算

D.0.1 本附录只适用于均匀土壤中接地网接触电位差和跨步电位差的计算。均匀土壤中不规则、复杂结构的等间距布置和不等间距布置的接地网，以及分层土壤中的接地网其接触电位差和跨步电位差的计算，宜采用专门的计算机程序进行。

D.0.2 接地网接地极的布置可分为等间距布置和不等间距布置。等间距布置时，接地网的水平接地极采用 10m~20m 的间距布置。接地极间距的大小应根据地面电气装置接地布置的需要确定。不等间距布置的接地网接地极从中间到边缘应按一定的规律由稀到

密布置。

D.0.3 等间距布置接地线网的接触电位差和跨步电位差的计算。

1 接地网初始设计时的网孔电压计算：

1) 接地网初始设计时的网孔电压可按下列公式计算：

$$U_m = \frac{\rho I_c K_m K_i}{L_m} \quad (\text{D.0.3-1})$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (\text{D.0.3-2})$$

$$K_h = \sqrt{1 + h/h_0} \quad (\text{D.0.3-3})$$

式中： $\rho$ ——土壤电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )；

$K_m$ ——网孔电压几何校正系数；

$K_i$ ——接地网不规则校正系数，用来计及推导  $K_m$  时的假设条件引入的误差；

$I_c$ ——接地网的最大入地电流；

$D$ ——接地网平行导体间距；

$d$ ——接地网导体直径。扁导体的等效直径  $d$  为扁导体宽度  $b$  的  $1/2$ ；等边角钢的等效直径  $d$  为  $0.84b$  ( $b$  为角钢边宽度)；不等边角钢的等效直径  $d$  为

$$0.71 \sqrt[4]{b_1 b_2 (b_1^2 + b_2^2)} \quad (b_1 \text{ 和 } b_2 \text{ 为角钢两边宽度})；$$

$h$ ——接地网埋深；

$K_h$ ——接地网埋深系数；

$h_0$ ——参考深度，取  $1\text{m}$ ；

$K_{ii}$ ——因内部导体对角网孔电压影响的校正加权系数。

2) 式 (D.0.3-1) ~ 式 (D.0.3-3) 对埋深在  $0.25\text{m} \sim 2.50\text{m}$  范围的接地网有效。当接地网具有沿接地网周围布置的垂直接地极、在接地网四角布置的垂直地极或沿接地网四周和其内部布置的垂直接地极时， $K_{ii} = 1$ 。

3) 对无垂直接地极或只有少数垂直接地极，且垂直接地极不是沿外围或四角布置时， $K_{ii}$  可按下列公式计算：

$$K_{ii} = 1 / (2n)^{2/n} \quad (\text{D.0.3-4})$$

式中： $n$ ——矩形或等效矩形接地网一个方向的平行导体数。

4) 对于矩形和不规则形状的接地网的计算， $n$  可按下列公式计算：

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad (\text{D.0.3-5})$$

5) 式 (D.0.3-5) 中，对于方形接地网， $n_b = 1$ ；对于方形和矩形接地网， $n_c = 1$ ；对于方形、矩形和  $L$  形接地网， $n_d = 1$ 。对于其他情况，可按下列公式计算：

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad (\text{D.0.3-6})$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (\text{D.0.3-7})$$

$$n_c = \left( \frac{L_x L_y}{A} \right)^{\frac{0.71}{L_x L_y}} \quad (\text{D.0.3-8})$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (\text{D. 0.3-9})$$

式中： $L_c$ ——水平接地网导体的总长度（m）；

$L_p$ ——接地网的周边长度（m）；

$A$ ——接地网面积（ $\text{m}^2$ ）；

$L_x$ ——接地网  $x$  方向的最大长度（m）；

$L_y$ ——接地网  $y$  方向的最大长度（m）；

$D_m$ ——接地网上任意两点间最大的距离（m）。

6) 如果进行简单的估计，在计算  $K_m$  和  $K_i$  以确定网孔电压时可采用  $n = \sqrt{n_1 n_2}$ ， $n_1$  和  $n_2$  为  $x$  和  $y$  方向的导体数。

7) 接地网不规则校正系数  $K$ ，可按下式计算：

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (\text{D. 0.3-10})$$

8) 对于无垂直接地极的接地网，或只有少数分散在整个接地网的垂直接地极，这些垂直接地极没有分散在接地网四角或接地网的周边上，有效埋设长度  $L_M$  按下式计算：

$$L_M = L_c + L_R \quad (\text{D. 0.3-11})$$

式中： $L_R$ ——所有垂直接地极的总长度。

9) 对于在边角有垂直接地极的接地网，或沿接地网四周和其内部布置垂直接地极时，有效埋设长度  $L_M$  可按下列公式计算：

$$L_M = L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_t}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (\text{D. 0.3-12})$$

式中： $L_t$ ——每个垂直接地棒的长度（m）。

## 2 最大跨步电位差的计算：

1) 跨步电位差  $U_s$  与几何校正系数  $K_S$ 、校正系数  $K_i$ 、土壤电阻率  $\rho$ 、接地系统单位导体长度的平均流散电流有关，可按下列公式计算：

$$U_s = \frac{\rho I_G K_S K_i}{L_s} \quad (\text{D. 0.3-13})$$

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R \quad (\text{D. 0.3-14})$$

式中： $I_G$ ——接地网入地故障电流；

$L_s$ ——埋入地中的接地系统导体有效长度。

2) 发电厂和变电站接地系统的最大跨步电位差出现在平分接地网边角直线上，从边角点开始向外 1m 远的地方。对于一般埋深  $h$  在 0.25m ~ 2.5m 的范围的接地网， $K_S$  可按下列计算：

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1-0.5^{n-2}}{D} \right) \quad (\text{D. 0.3-15})$$

## D.0.4 不等间距布置接地网的接触电位差和跨步电位差的计算。

1 不等间距布置接地网的布置规则应符合下列要求：

1) 不等间距布置的长方形接地网（图 D.0.4），长或宽方向的第  $i$  段导体长度  $L_{ik}$  占边长  $L$  的百分数  $S_{ik}$  可按下列公式计算：

$$S_{ik} = \frac{L_{ik}}{L} \times 100\% \quad (\text{D. 0. 4-1})$$

式中:  $L$ ——接地网的边长, 在长方向,  $L = L_1$ ,  
在宽方向,  $L = L_2$ 。

2) 接地网长方向的导体根数为  $n_1$ , 宽方向的导体根数为  $n_2$ 。长方向上导体分段数为  $k_1 = n_1 - 1$ , 宽方向上的导体分段数为  $k_2 = n_2 - 1$ 。

3)  $S_{ik}$  与导体分段数  $k$  和从周边导体数起的导体段的序号  $i$  的关系如表 D. 0. 4 所示。因接地网的对称性, 如某方向的导体分段为奇数, 则列出  $(k+1)/2$  个数据, 当  $k$  为偶数, 则列出  $k/2$  个数据, 其余数据可以根据对称性赋值。 $k \geq 7$ , 对表中结果进行拟合, 则  $S_{ik}$  可按下列计算:

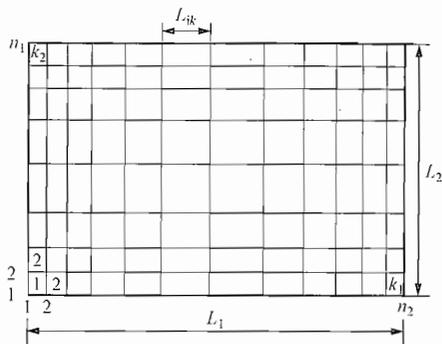


图 D. 0. 4 不等间距布置的长方形接地网

$$S_{ik} = b_1 \exp(-ib_2) + b_3 \quad (\text{D. 0. 4-2})$$

当  $7 \leq k \leq 14$  时:

$$b_1 = -1.8066 + 2.6681 \lg k - 1.0719 \lg^2 k \quad (\text{D. 0. 4-3})$$

$$b_2 = -0.7649 + 2.6992 \lg k - 1.6188 \lg^2 k \quad (\text{D. 0. 4-4})$$

$$b_3 = 1.8520 - 2.8568 \lg k + 1.1948 \lg^2 k \quad (\text{D. 0. 4-5})$$

当  $14 < k \leq 25$  时:

$$b_1 = -0.00064 - 2.50923 / (k+1) \quad (\text{D. 0. 4-6})$$

$$b_2 = -0.03083 + 3.17003 / (k+1) \quad (\text{D. 0. 4-7})$$

$$b_3 = 0.00967 + 2.21653 / (k+1) \quad (\text{D. 0. 4-8})$$

当  $25 < k \leq 40$  时:

$$b_1 = -0.0006 - 2.50923 / (k+1) \quad (\text{D. 0. 4-9})$$

$$b_2 = -0.03083 + 3.17003 / (k+1) \quad (\text{D. 0. 4-10})$$

$$b_3 = -0.00969 + 2.2105 / (k+1) \quad (\text{D. 0. 4-11})$$

式中:  $b_1$ 、 $b_2$  和  $b_3$ ——与  $k$  有关的常数。

表 D. 0. 4  $S_{ik}$  与导体分段数  $k$  和从周边导体数起的导体段的序号  $i$  的关系

$k \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	27.50	45.00								
4	17.50	32.50								
5	12.50	23.50	28.33							
6	8.75	17.50	23.75							
7	71.4	13.57	18.57	21.43						
8	5.50	10.83	15.67	18.00						
9	4.50	8.94	12.83	15.33	16.73					
10	3.75	7.50	11.08	13.08	14.58					

续表

$k \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	3.18	6.36	9.54	11.36	12.73	13.46				
12	2.75	5.42	8.17	10.00	11.33	12.33				
13	2.38	4.69	6.77	8.92	10.23	11.15	11.69			
14	2.00	3.86	6.00	7.86	9.28	10.24	10.76			
15	1.56	3.62	5.35	6.82	8.07	9.12	10.01	10.77		
16	1.46	3.27	4.82	6.14	7.28	8.24	9.07	9.77		
17	1.38	2.97	4.35	5.54	6.57	7.47	8.24	8.90	9.47	
18	1.14	2.58	3.86	4.95	5.91	6.67	8.15	8.15	8.71	
19	1.05	2.32	3.47	4.53	5.47	6.26	7.53	7.53	8.11	8.36
20	0.95	2.15	3.20	4.15	5.00	5.75	7.00	7.00	7.50	7.90

2 不等间距布置接地网时接地电阻可按下列公式计算：

$$R = k_{Rh}k_{RL}k_{Rm}k_{RN}k_{Rd}(1.068 \times 10^{-4} + 0.445/\sqrt{S})\rho \quad (\text{D.0.4-12})$$

$$k_{Rh} = 1.061 - 0.070 \sqrt[5]{h} \quad (\text{D.0.4-13})$$

$$k_{RL} = 1.144 - 0.13 \sqrt{L_1/L_2} \quad (\text{D.0.4-14})$$

$$k_{RN} = 1.256 - 0.367 \sqrt{N_1/N_2} + 0.126N_1/N_2 \quad (\text{D.0.4-15})$$

$$k_{Rm} = (1.168 - 0.079 \sqrt[5]{m})k_{RN} \quad (\text{D.0.4-16})$$

$$k_{Rd} = 0.931 + 0.0174/\sqrt[3]{d} \quad (\text{D.0.4-17})$$

$$m = (N_1 - 1)(N_2 - 1) \quad (\text{D.0.4-18})$$

式中： $\rho$ ——土壤电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）；

$k_{Rh}$ 、 $k_{RL}$ 、 $k_{Rm}$ 、 $k_{RN}$ 、 $k_{Rd}$ ——接地电阻的埋深、形状、网孔数目、导体根数和导体直径对接地电阻的影响系数；

$L_1$ 、 $L_2$ ——接地网的长度和宽度（m）；

$N_1$ 、 $N_2$ ——长宽方向布置的导体根数；

$m$ ——接地网的网孔数目。

3 最大接触电位差  $U_T$  可按下列公式计算：

$$U_T = k_{TL}k_{Th}k_{Td}k_{TS}k_{TN}k_{Tm}V \quad (\text{D.0.4-19})$$

$$k_{TL} = 1.215 - 0.269 \sqrt[3]{L_2/L_1} \quad (\text{D.0.4-20})$$

$$k_{Th} = 1.612 - 0.654 \sqrt[5]{h} \quad (\text{D.0.4-21})$$

$$k_{Td} = 1.527 - 1.494 \sqrt[5]{d} \quad (\text{D.0.4-22})$$

$$k_{TN} = 64.301 - 232.65 \sqrt[6]{N} + 279.65 \sqrt[3]{N} - 110.32 \sqrt{N} \quad (\text{D.0.4-23})$$

$$k_{TS} = -0.118 + 0.445 \sqrt[12]{S} \quad (\text{D.0.4-24})$$

$$k_{Tm} = 9.727 \times 10^{-3} + 1.356/\sqrt{m} \quad (\text{D.0.4-25})$$

$$N = N_2/N_1 \quad (\text{D.0.4-26})$$

式中:  $V = I_G R$ ——接地网的最大接地电位升高;

$I_G$ ——流入接地网的最大接地故障电流;

$R$ ——接地网接地电阻;

$k_{Tl}$ 、 $k_{Th}$ 、 $k_{Td}$ 、 $k_{TS}$ 、 $k_{TN}$ 、 $k_{Tm}$ ——最大接触电位差的形状、埋深、接地导体直径、接地网面积、接地体导体根数及接地网网孔数目影响系数。

4 最大跨步电位差  $U_S$  可按下列公式计算:

$$U_S = k_{Sl} k_{Sh} k_{Sd} K_{SS} k_{SN} k_{Sm} V \quad (\text{D. 0. 4-27})$$

$$k_{Sl} = 29.081 - 1.862\sqrt{l} + 435.18l + 425.68l^{1.5} + 148.59l^2 \quad (\text{D. 0. 4-28})$$

$$k_{Sh} = 0.454 \exp(-2.294 \sqrt[3]{h}) \quad (\text{D. 0. 4-29})$$

$$k_{Sd} = -2780 + 9623 \sqrt[36]{d} - 11099 \sqrt[18]{d} + 4265 \sqrt[12]{d} \quad (\text{D. 0. 4-30})$$

$$k_{SN} = 1.0 + 1.416 \times 10^6 \exp(-202.7N) - 0.306 \exp[29.264(N-1)] \quad (\text{D. 0. 4-31})$$

$$k_{SS} = 0.911 + 19.104 \sqrt{S} \quad (\text{D. 0. 4-32})$$

$$k_{Sm} = k_{SN} (34.474 - 11.541 \sqrt{m} + 1.43m - 0.076m^{1.5} + 1.455 \times 10^{-3} m^2) \quad (\text{D. 0. 4-33})$$

$$N = N_2 / N_1 \quad (\text{D. 0. 4-34})$$

$$l = L_1 / L_2 \quad (\text{D. 0. 4-35})$$

式中:  $k_{Sl}$ 、 $k_{Sh}$ 、 $k_{Sd}$ 、 $k_{SS}$ 、 $k_{SN}$ 和 $k_{Sm}$ ——最大跨步电位差的形状、埋深、接地导体直径、接地网面积、接地体导体根数及接地网网孔数目影响系数。

### 12.2.3 水平接地网的设计

12.2.3.1 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的接地网设计要求:

4.3.1 发电厂和变电站水平接地网应符合下列要求:

1 水平接地网应利用直接埋入地中或水中的自然接地极,发电厂和变电站接地网除应利用自然接地极外,还应敷设人工接地极。

2 当利用自然接地极和引外接地装置时,应采用不少于2根导线在不同地点与水平接地网相连接。

3 发电厂(不含水力发电厂)和变电站的接地网,应与110kV及以上架空线路的地线直接相连,并应有便于分开的连接点。6kV~66kV架空线路的地线不得直接和发电厂和变电站配电装置架构相连。发电厂和变电站接地网应在地下与架空线路地线的接地装置相连接,连接线埋在地中的长度不应小于15m。

4 在高土壤电阻率地区,可采取下列降低接地电阻的措施:

1) 在发电厂和变电站2000m以内有较低电阻率的土壤时,敷设引外接地极;当地下较深处的土壤电阻率较低时,可采用井式、深钻式接地极或采用爆破式接地技术。

2) 填充电阻率较低的物质或降阻剂,但应确保填充材料不会加速接地极的腐蚀和其自身的热稳定。

3) 敷设水下接地网。水力发电厂可在水库、上游围堰、施工导流隧洞、尾水渠、

下游河道或附近的水源中的最低水位以下区域敷设人工接地极。

5 在永冻土地区可采用下列措施：

- 1) 将接地网敷设在融化地带或溶化地带的水池或水坑中。
- 2) 可敷设深钻式接地极，或充分利用井管或其他深埋在地下的金属构件作接地极，还应敷设深垂直接地极，其深度应保证深入冻土层下面的土壤至少5m。

3) 在房屋溶化盘内敷设接地网。

4) 在接地极周围人工处理土壤，降低冻结温度和土壤电阻率。

6 在季节冻土或季节干旱地区可采用下列措施：

1) 季节冻土层或季节干旱形成的高电阻率层的厚度较浅时，可将接地网埋在高电阻率层下0.2m。

2) 已采用多根深钻式接地极降低接地电阻时，可将水平接地网正常埋设。

3) 季节性的高电阻率层厚度较深时，可将水平接地网正常埋设，在接地网周围及内部接地极交叉节点布置短垂直接地极，其长度宜深入季节高电阻率层下面2m。

#### 12.2.3.2 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的人工接地网的设计要求：

4.3.2 发电厂和变电站接地网除应利用自然接地极外，应敷设以水平接地极为主的人工接地网，并应符合下列要求：

1 人工接地网的外缘应闭合，外缘各角应做成圆弧形，圆弧的半径不宜小于均压带间距的1/2，接地网内应敷设水平均压带，接地网的埋设深度不宜小于0.8m。

2 接地网均压带可采用等间距或不等间距布置。

3 35kV及以上变电站接地网边缘经常有人出入的走道处，应铺设沥青路面或在地面下装设2条与接地网相连的均压带。在现场有操作需要的设备处，应铺设沥青、绝缘水泥或鹅卵石。

4 6kV和10kV变电站和配电站，当采用建筑物的基础作接地极，且接地电阻满足规定值时，可不另设人工接地。

#### 12.2.3.3 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的接地网电位升高超过2000V时的设计要求：

4.3.3 有效接地和低电阻接地系统中发电厂和变电站接地网在发生接地故障后地电位升高超过2000V时，接地网及有关电气装置应符合下列要求：

1 保护接地接至变电站接地网的站用变压器的低压侧，应采用TN系统，且低压电气装置应采用（含建筑物钢筋的）保护等电位联结接地系统。

2 应采用扁铜（或铜绞线）与二次电缆屏蔽并联敷设。扁铜应至少在两端就近与接地网连接。当接地网为钢材时，尚应防止铜、钢连接产生腐蚀。扁铜较长时，应多点与接地网连接。二次电缆屏蔽层两端应就近与扁铜连接。扁铜的截面应满足热稳定的要求。

3 应评估计入短路电流非周期分量的接地网电位升高条件下，发电厂、变电站内6kV或10kV金属氧化物避雷器吸收能量的安全性。

4 可能将接地网的高电位引向厂、站外或将低电位引向厂、站内的设备，应采取下列防止转移电位引起危害的隔离措施：

1) 站用变压器向厂、站外低压电气装置供电时,其0.4kV绕组的短时(1min)交流耐受电压应比厂、站接地网地电位升高40%。向厂、站外供电用低压线路采用架空线,其电源中性点不在厂、站内接地,改在厂、站外适当的地方接地。

2) 对外的非光纤通信设备加隔离变压器。

3) 通向厂、站外的管道采用绝缘段。

4) 铁路轨道分别在两处加绝缘鱼尾板等。

5) 设计接地网时,应验算接触电位差和跨步电位差,并应通过实测加以验证。

#### 12.2.3.4 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的人工接地极的材质和规格:

4.3.4 人工接地极,水平敷设时可采用圆钢、扁钢;垂直敷设时可采用角钢或钢管。腐蚀较重地区采用铜或铜覆钢材时,水平敷设的人工接地极可采用圆铜、扁铜、铜绞线、铜覆钢绞线、铜覆圆钢或铜覆扁钢;垂直敷设的人工接地极可采用圆铜或铜覆圆钢等。

接地网采用钢材时,按机械强度要求的钢接地材料的最小尺寸,应符合表4.3.4-1的要求。接地网采用铜或铜覆钢材时,按机械强度要求的铜或铜覆钢材料的最小尺寸,应符合表4.3.4-2的要求。

表4.3.4-1 钢接地材料的最小尺寸

种类	规格及单位	地上	地下
圆钢	直径(mm)	8	8/10
扁钢	截面(mm <sup>2</sup> )	48	48
	厚度(mm)	4	4
角钢	厚度(mm)	2.5	4
钢管	管壁厚(mm)	2.5	3.5/2.5

注:1 地下部分圆钢的直径,其分子、分母数据分别对应于架空线路和发电厂、变电站的接地网。

2 地下部分钢管的壁厚,其分子、分母数据分别对应于埋于土壤和埋于室内混凝土地坪中。

3 架空线路杆塔的接地极引出线,其截面不应小于50mm<sup>2</sup>,并应热镀锌。

表4.3.4-2 铜或铜覆钢接地材料的最小尺寸

种类	规格及单位	地上	地下
铜棒	直径(mm)	8	水平接地极为8
			垂直接地极为15
扁铜	截面(mm <sup>2</sup> )	50	50
	厚度(mm)	2	2
铜绞线	截面(mm <sup>2</sup> )	50	50
铜覆圆钢	直径(mm)	8	10
铜覆钢绞线	直径(mm)	8	10
铜覆扁钢	截面(mm <sup>2</sup> )	48	48
	厚度(mm)	4	4

注:1 铜绞线单股直径不小于1.7mm。

2 各类铜覆钢材的尺寸为钢材的尺寸,铜层厚度不应小于0.25mm。

### 12.2.3.5 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的接地装置热稳定校验要求：

4.3.5 发电厂和变电站接地装置的热稳定校验，应符合下列要求：

1 在有效接地系统及低电阻接地系统中，发电厂和变电站电气装置中电气装置接地导体（线）的截面，应按接地故障（短路）电流进行热稳定校验。接地导体（线）的最大允许温度和接地导体（线）截面的热稳定校验，应符合本规范附录E的规定。

2 校验不接地、谐振接地和高电阻接地系统中，电气装置接地导体（线）在单相接地故障时的热稳定，敷设在地上的接地导体（线）长时间温度不应高于150℃，敷设在地下的接地导体（线）长时间温度不应高于100℃。

3 接地装置接地极的截面，不宜小于连接至该接地装置的接地导体（线）截面的75%。

### 12.2.3.6 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的接地导体（线）的热稳定校验计算方法：

#### 附录E 高压电气装置接地导体（线）的热稳定校验

E.0.1 接地导体（线）的最小截面应符合下式的要求：

$$S_g \geq \frac{I_G}{C} \sqrt{t_e} \quad (\text{E.0.1})$$

式中： $S_g$ ——接地导体（线）的最小截面（ $\text{mm}^2$ ）

$I_G$ ——流过接地导体（线）的最大接地故障不对称电流有效值（A），按工程设计水平年系统最大运行方式确定；

$t_e$ ——接地故障的等效持续时间，与 $t_g$ 相同（s）；

$C$ ——接地导体（线）材料的热稳定系数，根据材料的种类、性能及最大允许温度和接地故障前接地导体（线）的初始温度确定。

E.0.2 在校验接地导体（线）的热稳定时， $I_G$ 及 $t_e$ 应采用表E.0.2-1所列数值。接地导体（线）的初始温度，取40℃。

对钢和铝材的最大允许温度分别取400℃和300℃。钢和铝材的热稳定系数 $C$ 值分别取70或120。

钢和铜覆钢材采用放热焊接方式时的最大允许温度，应根据土壤腐蚀的严重程度经验算分别取900℃、800℃或700℃。爆炸危险场所，应按专用规定选取。铜和铜镀钢材的热稳定系数 $C$ 值可采用表E.0.2-2给出的数值。

表E.0.2-1 校验接地导体（线）热稳定用的 $I_G$ 和 $t_e$ 值

系统接地方式	$I_G$	$t_e$
有效接地	三相整体设备：单相接地故障电流 三相分体设备：单相接地或三相接地流过接地线的最大接地故障电流	本规范第E.0.3条
低电阻接地	单相接地故障电流	本规范第E.0.3条

表 E.0.2-2 校验铜和铜镀钢材接地导体(线)热稳定用的 C 值

最大允许温度℃	铜	电导率 40% 铜镀钢绞线	电导率 30% 铜镀钢绞线	电导率 20% 铜镀钢棒
700	249	167	144	119
800	259	173	150	124
900	268	179	155	128

E.0.3 热稳定校验用的时间可按下列要求计算:

1 发电厂和变电站的继电保护装置配置有两套速动主保护、近接地后备保护、断路器失灵保护和自动重合闸时,  $t_e$  应按下列式取值:

$$t_e \geq t_m + t_r + t_o \quad (\text{E.0.3-1})$$

式中  $t_m$ ——主保护动作时间 (s);

$t_r$ ——断路器失灵保护动作时间 (s);

$t_o$ ——断路器开断时间 (s)。

2 配有一套速动主保护、近或远(或远近结合的)后备保护和自动重合闸,有或无断路器失灵保护时,  $t_e$  应按下列式取值:

$$t_e \geq t_o + t_r \quad (\text{E.0.3-2})$$

式中  $t_r$ ——第一级后备保护的動作时间 (s)。

12.2.3.7 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的接地网防腐蚀设计要求:

4.3.6 接地网的防腐蚀设计,应符合下列要求:

1 计及腐蚀影响后,接地装置的设计使用年限,应与地面工程的设计使用年限一致。

2 接地装置的防腐蚀设计,宜按当地的腐蚀数据进行。

3 接地网可采用钢材,但应采用热镀锌。镀锌层应有一定的厚度。接地导体(线)与接地极或接地极之间的焊接点,应涂防腐材料。

4 腐蚀较重地区的 330kV 及以上发电厂和变电站、全户内变电站、220kV 及以上枢纽变电站、66kV 及以上城市变电站、紧凑型变电站,以及腐蚀严重地区的 110kV 发电厂和变电站,通过技术经济比较后,接地网可采用铜材、铜覆钢材或其他防腐蚀措施。

12.2.3.8 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的电气装置接地导体(线)的设计要求:

4.3.7 发电厂和变电站电气装置的接地导体(线),应符合下列要求:

1 发电厂和变电站电气装置中,下列部位应采用专门敷设的接地导体(线)接地:

1) 发电机机座或外壳,出线柜、中性点柜的金属底座和外壳,封闭母线的外壳。

2) 110kV 及以上钢筋混凝土构件支座上电气装置的金屬外壳。

3) 箱式变电站和环网柜的金属箱体。

4) 直接接地的变压器中性点。

5) 变压器、发电机和高压并联电抗器中性点所接自动跟踪补偿消弧装置提供感性电流的部分、接地电抗器、电阻器或变压器等的接地端子。

6) 气体绝缘金属封闭开关设备的接地母线、接地端子。

7) 避雷器、避雷针和地线等的接地端子。

2 当不要求采用专门敷设的接地导体（线）接地时，应符合下列要求：

1) 电气装置的接地导体（线）宜利用金属构件、普通钢筋混凝土构件的钢筋、穿线的钢管和电缆的铅、铝外皮等，但不得使用蛇皮管、保温管的金属网或外皮，以及低压照明网络的导线铅皮作接地导体（线）。

2) 操作、测量和信号用低压电气装置的接地导体（线）可利用永久性金属管道，但可燃液体、可燃或爆炸性气体的金属管道除外。

3) 用本款第1)项和第2)项所列材料作接地导体（线）时，应保证其全长为完好的电气通路，当利用串联的金属构件作为接地导体（线）时，金属构件之间应以截面不小于 $100\text{mm}^2$ 的钢材焊接。

3 接地导体（线）应便于检查，但暗敷的穿线钢管和地下的金属构件除外。潮湿的或有腐蚀性蒸汽的房间内，接地导体（线）离墙不应下于 $10\text{mm}$ 。

4 接地导体（线）应采取防止发生机械损伤和化学腐蚀的措施。

5 在接地导体（线）引进建筑物的入口处应设置标志。明敷的接地导体（线）表面应涂 $15\text{mm} \sim 100\text{mm}$ 宽度相等的绿色和黄色相间的条纹。

6 发电厂和变电站电气装置中电气装置接地导体（线）的连接，应符合下列要求：

1) 采用铜或铜覆钢材的接地导体（线）应采用放热焊接方式连接。铜接地导体（线）使用搭接焊接方式时，其搭接长度应为扁钢宽度的2倍或圆钢直径的6倍。

2) 当利用钢管作接地导体（线）时，钢管连接处应保证有可靠的电气连接。当利用穿线的钢管作接地导体（线）时，引向电气装置的钢管与电气装置之间，应有可靠的电气连接。

3) 接地导体（线）与管道等伸长接地极的连接处宜焊接。连接地点应选在近处，在管道因检修而可能断开时，接地装置的接地电阻应符合本规范的要求。管道上表和阀门等处，均应装设跨接线。

4) 采用铜或铜覆钢材的接地导体（线）与接地极的连接，应采用放热焊接；接地导体（线）与电气装置的连接，可采用螺栓连接或焊接。螺栓连接时的允许温度为 $250^\circ\text{C}$ ，连接处接地导体（线）应适当加大截面，且应设置防松螺帽或防松垫片。

5) 电气装置每个接地部分应以单独的接地导体（线）与接地母线相连接，严禁在一个接地导体（线）中串接几个需要接地的部分。

6) 接地导体（线）与接地极的连接，接地导体（线）与接地极均与铜（包含铜覆钢材）或其中一个为铜时，应采用放热焊接工艺，被连接的导体应完全包在接头里，连接部位的金属应完全熔化，并应连接牢固。放热焊接接头的表面应平滑，应无贯穿性的气孔。

## 12.2.4 具有气体绝缘金属封闭开关设备变电站的接地

12.2.4.1 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的气体绝缘金属封闭开关设备专用接地网的功能和要求：

4.4.2 气体绝缘金属封闭开关设备区域应设置专用接地网，并成为变电站总接地网的一个组成部分。该设备区域专用接地网，应由该设备制造厂设计，并应具有下列功能：

- 1 应能防止故障时人触摸该设备的金属外壳遭到电击。
- 2 释放分相式设备外壳的感应电流。
- 3 快速流散开关设备操作引起的快速瞬态电流。

4.4.3 气体绝缘金属封闭开关设备外部近区故障人触摸其金属外壳时，区域专用接地网应保证触及者手—脚间的接触电位差符合下列公式的要求：

$$\sqrt{U_{\text{Imax}}^2 + (U'_{\text{Iomax}})^2} < U_{\text{I}} \quad (4.4.3)$$

式中： $U_{\text{Imax}}^2$ ——设备区域专用接地网最大接触电位差，由人脚下的点决定；

$U'_{\text{Iomax}}$ ——设备外壳上、外壳之间或外壳与任何水平/垂直支架之间金属到金属因感应产生的最大电压差；

$U_{\text{I}}$ ——接触电位差容许值。

12.2.4.2 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的气体绝缘金属封闭开关设备接地极、接地导体（线）及其连接的要求：

4.4.4 位于居民区的全室内或地下气体绝缘金属封闭开关设备变电站，应校核接地网边缘、围墙或公共道路处的跨步电位差。变电站所在地区土壤电阻率较高时，紧靠围墙外的人行道路宜采用沥青路面。

4.4.5 气体绝缘金属封闭开关设备区域专用接地网与变电站总接地网的连接线，不应少于4根。连接线截面的热稳定校验应符合本规范第4.3.5条的要求。4根连接线截面的热稳定校验电流，应按单相接地故障时最大不对称电流有效值的35%取值。

4.4.6 气体绝缘金属封闭开关设备的接地导体（线）及其连接，应符合下列要求：

- 1 三相共箱式或分相式设备的金属外壳与其基座上接地母线的连接方式，应按制造厂要求执行。其采用的连接方式，应确保无故障时所有金属外壳运行在地电位水平。当在指定点接地时，应确保母线各段外壳之间电压差在允许范围内。

- 2 设备基座上的接地母线应按制造厂要求与该区域专用接地网连接。

- 3 本条第1款和第2款连接线的截面，应满足设备接地故障（短路）时热稳定的要求。

4.4.7 当气体绝缘金属封闭开关设备置于建筑物内时，建筑物地基内的钢筋应与人工敷设的接地网相连接。建筑物立柱、钢筋混凝土地板内的钢筋等与建筑物地基内的钢筋，应相互连接，并应良好焊接。室内还应设置环形接地母线，室内各种需接地的设备（包括前述各种钢筋）均应连接至环形接地母线。环形接地母线还应与气体绝缘金属封闭开关设备区域专用接地网相连接。

4.4.8 气体绝缘金属封闭开关设备与电力电缆或与变压器/电抗器直接相连时，电力电

缆护层或气体绝缘金属封闭开关设备与变压器/电抗器之间套管的变压器/电抗器侧，应通过接地导体（线）以最短路径接到接地母线或气体绝缘金属封闭开关设备区域专用接地网。气体绝缘金属封闭开关设备外壳和电缆护套之间，以及其外壳和变压器/电抗器套管之间的隔离（绝缘）元件，应安装相应的隔离保护器。

4.4.9 气体绝缘金属封闭开关设备置于建筑物内时，设备区域专用接地网可采用钢导体。置于户外时，设备区域专用接地网宜采用铜导体。主接地网也宜采用铜或铜覆钢材。

## 12.2.5 雷电保护和防静电的接地

12.2.5.1 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的发电厂和变电站雷电保护接地的要求：

4.5.1 发电厂和变电站雷电保护的接地，应符合下列要求：

1 发电厂和变电站配电装置构架上避雷针（含悬挂避雷线的架构）的接地引下线应与接地网连接，并应在连接处加装集中接地装置。引下线与接地网的连接点至变压器接地导体（线）与接地网连接点之间沿接地极的长度，不应小于15m。

2 主厂房装设直击雷保护装置或为保护其他设备而在主厂房装设避雷针时，应采取加强分流、设备的接地点远离避雷针接地引下线的入地点、避雷针接地引下线远离电气装置等防止反击的措施。避雷针的接地引下线应与主接地网连接，并应在连接处加装集中接地装置。

主控制室、配电装置室和35kV及以下变电站的屋顶上如装设直击雷保护设置，若为金属屋顶或屋顶上有金属结构时，则应将金属部分接地；屋顶为钢筋混凝土结构时，则应将其焊接成网接地；结构为非导电的屋顶时，则应采用避雷带保护，该避雷带的网格应为8m~10m，并应每隔10m~20m设接地引下线。该接地引下线应与主接地网连接，并应在连接处加装集中接地装置。

3 发电厂和变电站有爆炸危险且爆炸后可能波及发电厂和变电内主设备或严重影响发供电的建（构）筑物，应采用独立避雷针保护，并应采取防止雷电磁应的措施。露天贮罐周围应设置闭合环形接地装置，接地电阻不应超过 $30\Omega$ ，无独立避雷针保护的露天贮罐不应超过 $10\Omega$ ，接地点不应少于2处，接地点间距不应大于30m。架空管道每隔20m~25m应接地1次，接地电阻不应超过 $30\Omega$ 。易燃油贮罐的呼吸阀、易燃油和天然气贮罐的热工测量装置，应用金属导体与相应贮罐的接地装置连接。不能保持良好电气接触的阀门、法兰、弯头等管道连接处应跨接。

4 发电厂和变电站避雷器的接地导体（线）应与接地网连接，且应在连接处设置集中接地装置。

12.2.5.2 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的发电厂防静电接地的要求：

4.5.2 发电厂易燃油、可燃油、天然气和氢气等贮罐、装卸油台、铁路轨道、管道、鹤管、套筒及油槽车等防静电接地的接地位置，接地导体（线）、接地极布置方式等，应符合下列要求：

1 铁路轨道、管道及金属桥台，应在其始端、末端、分支处，以及每隔 50m 处设防静电接地，鹤管应在两端接地。

2 厂区内的铁路轨道应在两处用绝缘装置与外部轨道隔离。两处绝缘装置间的距离应大于一列火车的长度。

3 净距小于 100mm 的平行或交叉管道，应每隔 20m 用金属线跨接。

4 不能保持良好电气接触的阀门、法兰、弯头等管道连接处，也应跨接。跨接线可采用直径不小于 8mm 的圆钢。

5 由槽车应设置防静电临时接地卡。

6 易燃油、可燃油和天然气浮动式贮罐顶，应用可挠的跨接线与罐体相连，且不应少于 2 处。跨接线可用截面不小于  $25\text{mm}^2$  的钢绞线、扁铜、钢绞线或覆铜扁钢、覆铜钢绞线。

7 浮动式电气测量的铠装电缆应埋入地中，长度不宜小于 50m。

8 金属罐罐体钢板的接缝、罐顶与罐体之间，以及所有管、阀与罐体之间，应保证可靠的电气连接。

## 12.3 高压架空线路的接地

### 12.3.1 高压架空线路的接地范围和接地电阻

12.3.1.1 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的高压架空线路接地范围和连接：

5.1.1 6kV 及以上无地线线路钢筋混凝土杆宜接地，金属杆塔应接地，接地电阻不宜超过  $30\ \Omega$ 。

5.1.2 除多雷区外，沥青路面上的架空线路的钢筋混凝土杆塔和金属杆塔，以及有运行经验的地区，可不另设人工接地装置。

5.1.4 66kV 及以上钢筋混凝土杆铁横担和钢筋混凝土横担线路的地线支架、导线横担与绝缘子固定部分或瓷横担固定部分之间，宜有可靠的电气连接，并应与接地引下线相连。主杆非预应力钢筋上下已用绑扎或焊接连成电气通路时，可兼作接地引下线。

利用钢筋兼作接地引下线的钢筋混凝土电杆时，其钢筋与接地螺母、铁横担间应有可靠的电气连接。

12.3.1.2 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的高压架空线路杆塔的接地电阻：

5.1.3 有地线的线路杆塔的工频接地电阻，不宜超过表 5.1.3 的规定。

表 5.1.3 有地线的线路杆塔的工频接地电阻

土壤电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$\rho \leq 100$	$100 < \rho \leq 500$	$500 < \rho \leq 1000$	$1000 < \rho \leq 2000$	$\rho > 2000$
接地电阻 ( $\Omega$ )	10	15	20	25	30

12.3.2 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的高压架空线路杆塔的接地装置型式：

### 5.1.5 高压架空线路杆塔的接地装置，可采用下列形式：

1 在土壤电阻率  $\rho \leq 100 \Omega \cdot \text{m}$  的潮湿地区，可利用铁塔和钢筋混凝土杆自然接地。发电厂和变电站的进线段，应另设雷电保护接地装置。在居民区，当自然接地电阻符合要求时，可不设人工接地装置。

2 在土壤电阻率  $100 \Omega \cdot \text{m} < \rho \leq 300 \Omega \cdot \text{m}$  的地区，除应利用铁塔和钢筋混凝土杆的自然接地外，并应增设人工接地装置，接地极埋设深度不宜小于 0.6m。

3 在土壤电阻率  $300 \Omega \cdot \text{m} < \rho \leq 2000 \Omega \cdot \text{m}$  的地区，可采用水平敷设的接地装置，接地极埋设深度不宜小于 0.5m。

4 在土壤电阻率  $\rho > 2000 \Omega \cdot \text{m}$  的地区，接地电阻很难降到  $30 \Omega$  以下时，可采用 6 根~8 根总长度不超过 500m 的放射形接地极或采用连续伸长接地极。放射形接地极可采用长短结合的方式。接地极埋设深度不宜小于 0.3m。接地电阻可不受限制。

5 居民区和水田中的接地装置，宜围绕杆塔基础敷设成闭合环形。

6 放射形接地极每根的最大长度应符合表 5.1.5 的规定：

表 5.1.5 放射形接地极每根的最大长度

土壤电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$\rho \leq 500$	$500 < \rho \leq 1000$	$1000 < \rho \leq 2000$	$2000 < \rho \leq 5000$
最大长度 (m)	40	60	80	100

7 在高土壤电阻率地区应采用放射形接地装置，且在杆塔基础的放射形接地极每根长度的 1.5 倍范围内有土壤电阻率较低的地带时，可部分采用引外接地或其他措施。

## 12.3.3 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的计算雷电保护接地装置所用土壤电阻率的季节系数：

5.1.6 计算雷电保护接地装置所采用的土壤电阻率时，应取雷季中最大值，并按下式计算：

$$\rho = \rho_0 \varphi \quad (5.1.6)$$

式中： $\rho$ ——土壤电阻率，土壤和水的电阻率可参考本规范附录 J 的规定取值 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )；

$\rho_0$ ——雷季中无雨水时所得的土壤电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )；

$\varphi$ ——土壤干燥时的季节系数，应按表 5.1.6 的规定取值。

表 5.1.6 土壤干燥时的季节系数

埋深 (m)	$\varphi$ 值	
	水平接地极	2m~3m 的垂直接地极
0.5	1.4~1.8	1.2~1.4
0.18~1.0	1.25~1.45	1.15~1.3
2.5~3.0	1.0~1.1	1.0~1.1

## 12.3.4 冲击接地电阻计算

12.3.4.1 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的单独接地极或杆塔接地装置的冲击接地电阻计算：

5.1.7 单独接地极或杆塔接地装置的冲击接地电阻,可按下式计算:

$$R_i = \alpha R \quad (5.1.7)$$

式中:  $R_i$ ——单独接地极或杆塔接地装置的冲击接地电阻 ( $\Omega$ );

$R$ ——单独接地极或杆塔接地装置的工频接地电阻 ( $\Omega$ );

$\alpha$ ——单独接地极或杆塔接地装置的冲击系数,可按本规范附录 F 的规定取值。

**12.3.4.2** GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的复合接地装置的冲击接地电阻计算:

5.1.8 当接地装置由较多水平接地极或垂直接地极组成时,垂直接地极的间距不应小于其长度的 2 倍;水平接地极的间距不宜小于 5m。

由  $n$  根等长水平放射形接地极组成的接地装置,其冲击接地电阻可按下式计算:

$$R_i = \frac{R_{hi}}{n} \times \frac{1}{\eta_i} \quad (5.1.8)$$

式中:  $R_{hi}$ ——每根水平放射形接地极的冲击接地电阻 ( $\Omega$ );

$\eta_i$ ——计及各接地极间相互影响的冲击利用系数,可按本规范附录 F 的规定选取。

5.1.9 由水平接地极连接的  $n$  根垂直接地极组成的接地装置,其冲击接地电阻可按下式计算:

$$R_i = \frac{\frac{R_{vi}}{n} \times R'_{hi}}{\frac{R_{vi}}{n} + R'_{hi}} \times \frac{1}{\eta_i} \quad (5.1.9)$$

式中:  $R_{vi}$ ——每根垂直接地极的冲击接地电阻 ( $\Omega$ );

$R'_{hi}$ ——水平接地极的冲击接地电阻 ( $\Omega$ )。

## 12.4 6kV ~ 220kV 电缆线路的接地

**12.4.1** GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的电力电缆金属护层或屏蔽层的接地要求:

5.2.1 电力电缆金属护套或屏蔽层,应按下列规定接地:

1 三芯电缆应在线路两终端直接接地。线路中有中接头时,接头处也应直接接地。

2 单芯电缆在线路上应至少有一点直接接地,且任一非接地处金属护套或屏蔽层上的正常感应电压,不应超过下列数值:

1) 在正常满负载情况下,未采取防止人员任意接触金属护套或屏蔽层的安全措施时, 50V。

2) 在正常满负荷情况下,采取防止人员任意接触金属护套或屏蔽层的安全措施时, 100V。

3 长距离单芯水底电缆线路应在两岸的接头处直接接地。

### 12.4.2 交流单芯电缆金属护层的接地方式

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的交流单芯电缆金属护层的接地方式：

5.2.2 交流单芯电缆金属护套的接地方式，应按图 5.2.2 所示部位接地和设置金属护套或屏蔽层的电压限制器，并应符合下列规定：

1 线路不长，且能满足本规范第 5.2.1 条的规定时，可采用线路一端直接接地方式。在系统发生单相接地故障对临近弱电线路有干扰时，还应沿电缆线路平行敷设一根回流线，回流线的选择与设置应符合下列要求：

- 1) 回流线的截面选择应按系统发生单相接地故障电流和持续时间验算其稳定性。
- 2) 回路线的排列布置方式，应使电缆正常工作时在回流线上产生的损耗最小。

2 线路稍长，一端接地不能满足本规范第 5.2.1 条的规定，且无法分成 3 段组成交叉互联时，可采用线路中间一点接地方式，并按本规范第 5.2.2 条第 1 款的规定加设回流线。

3 线路较长，中间一点接地方式不能满足本规范第 5.2.1 条的规定时，宜使用绝缘接头将电缆的金属护套和绝缘屏蔽均匀分割成 3 段或 3 的倍数段，并按图 5.2.2 所示采用交叉互联接地方式。

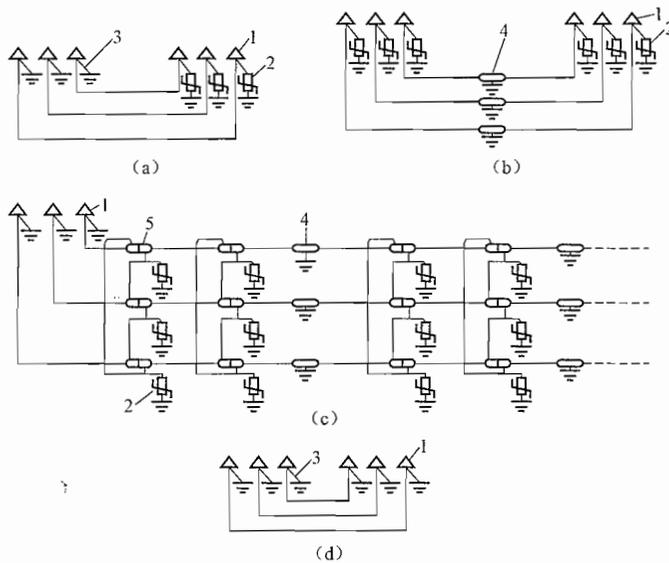


图 5.2.2 采用金属屏蔽层电压限制器时的接地方式

1—电缆终端头；2—金属屏蔽层电压限制器；3—直接接地；4—中间接头；5—绝缘接头

(a) 一端接地方式；(b) 线路中间一点接地方式；(c) 交叉互联接地方式；(d) 两端直接接地方式

### 12.4.3 电力电缆金属护套或屏蔽层电压限制器与电缆金属护套的连接线要求

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的电力电缆金属护套或屏蔽层电压限制器与电缆金属护套的连接线要求：

5.2.3 金属护套或屏蔽层电压限制器与电缆金属护套的连接线，应符合下列要求：

- 1 连接线应最短，3m 之内可采用单芯塑料绝缘线，3m 以上宜采用同轴电缆。

- 2 连接线的绝缘水平不得小于电缆外护套的绝缘水平。
- 3 连接线截面应满足系统单相接地故障电流通过时的热稳定要求。

## 12.5 高压配电电气装置的接地

### 12.5.1 高压配电电气装置的接地电阻

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定：

#### 6.1 高压配电电气装置的接地电阻

6.1.1 工作于不接地、谐振接地和高电阻接地系统、向1kV及以下低压电气装置供电的高压配电电气装置，其保护接地的接地电阻应符合下式的要求，且不应大于4Ω：

$$R \leq 50/I \quad (6.1.1)$$

式中：R——因季节变化的最大接地电阻（Ω）；

I——计算用的单相接地故障电流；谐振接地系统为保障点残余电流。

6.1.2 低电阻接地系统的高压配电电气装置，其保护接地的接地电阻应符合本规范公式（4.2.1-1）的要求，且不应大于4Ω。

6.1.3 保护配电变压器的避雷器其接地应与变压器保护接地共用接地装置。

6.1.4 保护配电柱上断路器、负荷开关和电容器组等的避雷器的接地导体（线），应与设备外壳相连，接地装置的接地电阻不应大于10Ω。

#### 【编者按】

（1）6.1.1条中的“向1kV及以下低压电气装置供电的高压配电电气装置”，该条款仅指向1kV及以下低压电气装置供电的“配电变电站”中的高压配电装置，不包括上级变、配电站的高压配电装置。降低接地电阻只是防电击的措施之一。当采用其他措施（如高、低压接地装置分开，实施总等电位连接等）能保证人身安全时，不必要求接地装置的电位升高不超过50V。

（2）6.1.2条中的计算用经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值，是根据上级变电站电源侧（如110kV直接接地系统）的接地故障电流计算的，与“配电电气装置”无关。上式的分母应为上级变电站中压侧（如10kV低电阻接地系统）的接地故障电流，由设计在100A~1000A范围选取。接地装置的电位升高不超过2000V这一规定，不符合低压电气设备绝缘配合要求。根据GB/T 16935.1—2008《低压系统内设备的绝缘配合 第1部分：原理、要求和试验》和GB/T 16895.10—2010《低压电气装置 第4-44部分：安全防护电压骚扰和电磁骚扰防护》，基本固体绝缘应能承受持续时间不超过5s的暂时过电压为 $U_0 + 1200$ 。

### 12.5.2 高压配电电气装置的接地装置

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定：

#### 6.2 高压配电电气装置的接地装置

6.2.1 户外箱式变压器、环网柜和柱上配电变压器等电气装置，宜敷设围绕户外箱式变压器、环网柜和柱上配电变压器的闭合环形的接地装置。居民区附近人行道路宜采用沥青路面。

6.2.2 与户外箱式变压器和环网柜内所有电气装置的外露导电部分连接的接地母线，应与闭合环形接地装置相连接。

6.2.3 配电变压器等电气装置安装在由其供电的建筑物内的配电装置室时，其所设接

地装置应与建筑物基础钢筋等相连。配电变压器室内所有电气装置的外露导电部分应连接至该室内的接地母线，该接地母线应再连接至配电装置室的接地装置。

6.2.4 引入配电装置室的每条架空线路安装的金属氧化物避雷器的接地导体（线），应与配电装置室的接地装置连接，但在入地处应敷设集中接地装置。

## 12.6 低压系统的接地和保护总等电位连接系统

### 12.6.1 低压系统接地的型式

低压系统接地的型式可分为 TN、TT 和 IT 系统 3 种。

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定：

7.1.2 TN 系统可分为单电源系统和多电源系统，并应分别符合下列要求：

1 对于单电源系统，TN 电源系统在电源处应有一点直接接地，装置的外露可导电部分应经 PE 接到接地点。TN 系统可按 N 和 PE 的配置，可分为下列类型：

1) TN-S 系统，整个系统应全部采用单独的 PE，装置的 PE 也可另外增设接地（图 7.1.2-1 ~ 图 7.1.2-3）。

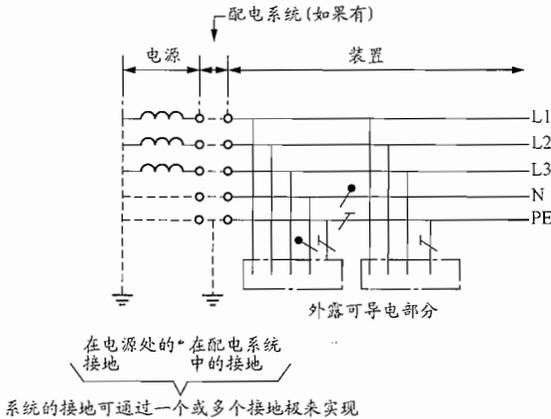


图 7.1.2-1 全系统将 N 与 PE 分开的 TN-S 系统

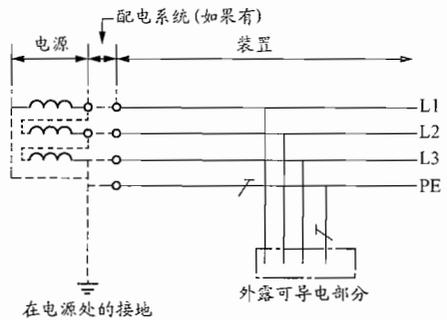


图 7.1.2-2 全系统将被接地的相导体与 PE 分开的 TN-S 系统

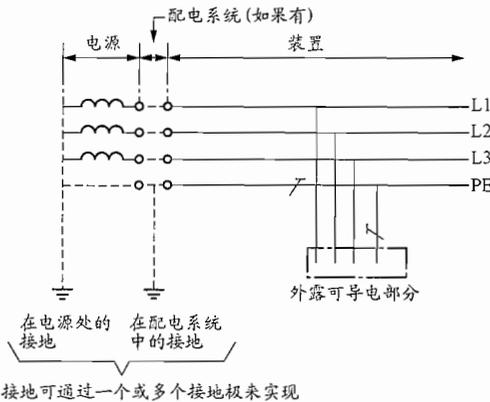
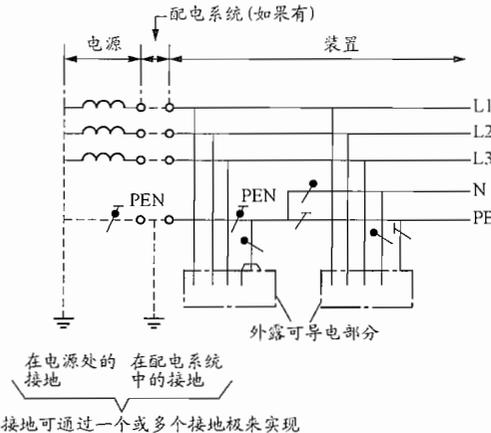


图 7.1.2-3 全系统采用接地的 PE 和未配出 N 的 TN-S 系统

2) TN-C-S 系统, 系统中的一部分, N 的功能和 PE 的功能合并在一根导体中 (图 7.1.2-4 ~ 图 7.1.2-6)。图 7.1.2-4 中装置的 PEN 或 PE 导体可另外增设接地。图 7.1.2-5 和图 7.1.2-6 中对配电系统的 PEN 和装置的 PE 导体也可另外增设接地。

3) TN-C 系统, 在全系统中, N 的功能和 PE 的功能合并在一根导体中 (图 7.1.2-7)。装置的 PEN 也可另外增设接地。



系统的接地可通过一个或多个接地极来实现

图 7.1.2-4 在装置非受电点的某处将 PEN 分离成 PE 和 N 的三相四线制的 TN-C-S 系统

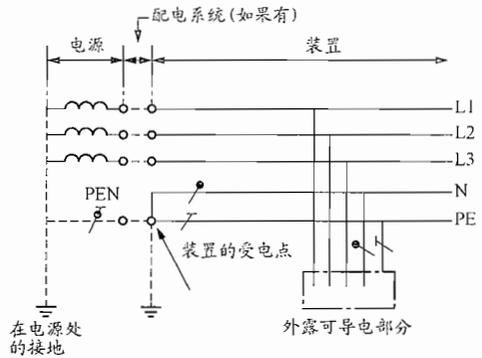


图 7.1.2-5 在装置的受电点将 PEN 分离成 PE 和 N 的三相四线制的 TN-C-S 系统

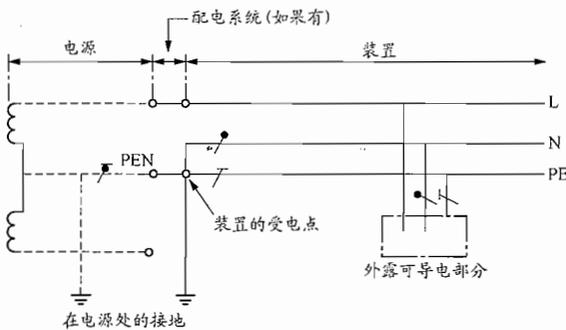


图 7.1.2-6 在装置的受电点将 PEN 分离成 PE 和 N 的单相两线制的 TN-C-S 系统

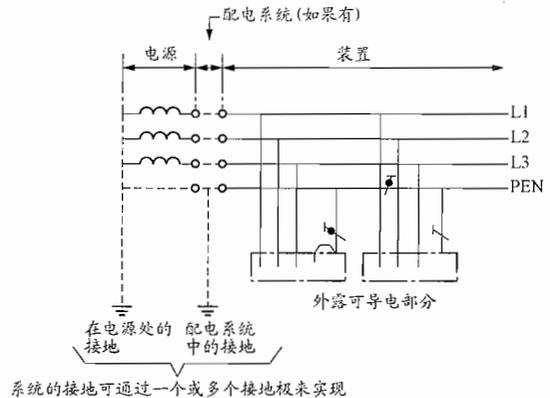


图 7.1.2-7 全系统采用将 N 的功能和 PE 的功能合并于一根导体的 TN-C 系统

2 对于具有多电源的 TN 系统, 应避免工作电流流过不期望的路径。

对用电设备采用单独的 PE 和 N 的多电源 TN-C-S 系统 (图 7.1.2-8), 仅有两相负荷和三相负荷的情况下, 无需配出 N, PE 宜多处接地。

对用电设备采用单独的 PE 和 N 的多电源 TN-C-S 系统 (图 7.1.2-8) 和对于具有多电源的 TN 系统 (图 7.1.2-9), 应符合下列要求:

- 1) 不应在变压器的中性点或发电机的星形点直接对地连接。
- 2) 变压器的中性点或发电机的星形点之间相互连接的导体应绝缘, 且不得将其与用电设备连接。

- 3) 电源中性点间相互连接的导体与 PE 之间, 应只一点连接, 并应设置在总配电箱内。
- 4) 对装置的 PE 可另外增设接地。
- 5) PE 的标志, 应符合现行国家标准《人机界面标志标识的基本和安全规则 导体的颜色或数字标识》GB 7947 的有关规定。
- 6) 系统的任何扩展, 应确保保护措施的正常功能不受影响。

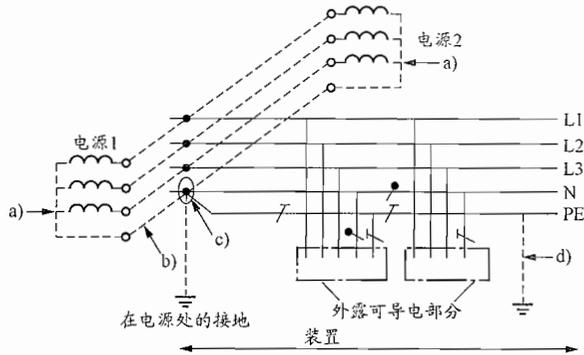


图 7.1.2-8 对用电设备采用单独的 PE 和 N 的多电源 TN-C-S 系统

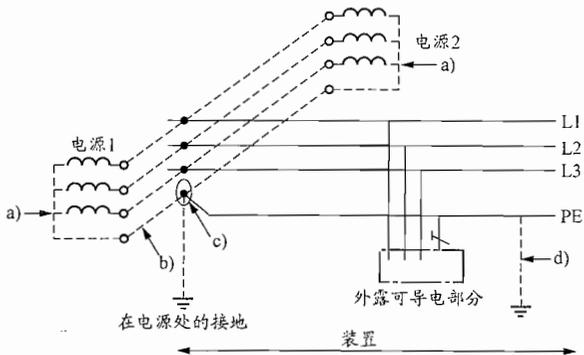


图 7.1.2-9 给两相或三相负荷供电的全系统内只有 PE 没有 N 的多电源 TN 系统

7.1.3 TT 系统应只有一点直接接地, 装置的外露可导电部分应接在电气上独立于电源系统接地的接地极上 (图 7.1.3-1 和图 7.1.3-2)。对装置的 PE 可另外增设接地。

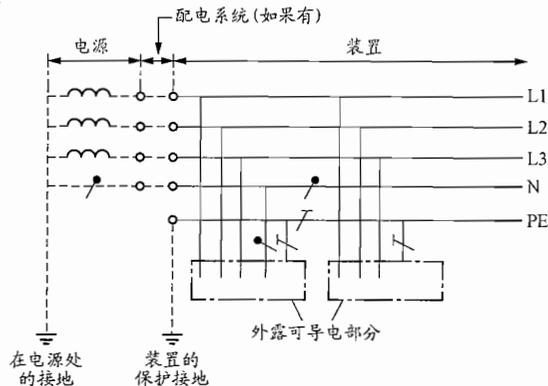


图 7.1.3-1 全部装置都采用分开的中性导体和保护导体的 TT 系统

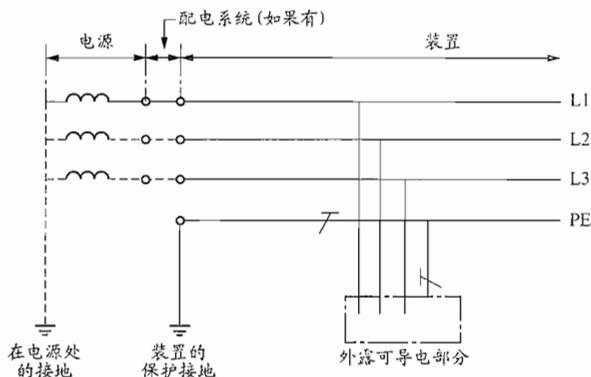


图 7.1.3-2 全部装置都具有接地的保护导体，但不配出中性导体的 TT 系统

7.1.4 IT 电源系统的所有带电部分应与地隔离，或某一点通过阻抗接地。电气装置的外露可导电部分，应被单独地或集中地接地，也可按现行国家标准《建筑物电气装置 第 4-41 部分：安全防护—电击防护》GB 16895.21—2004 的第 413.1.5 条的规定，接到系统的接地上（图 7.1.4-1 和图 7.1.4-2）。对装置的 PE 可另外增设接地，并应符合下列要求：

- 1 该系统可经足够高的阻抗接地。
- 2 可配出 N，也可不配出 N。

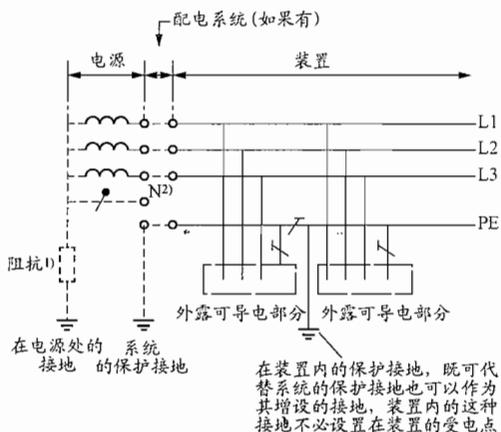


图 7.1.4-1 将所有的外露可导电部分采用 PE 相连后集中接地的 IT 系统

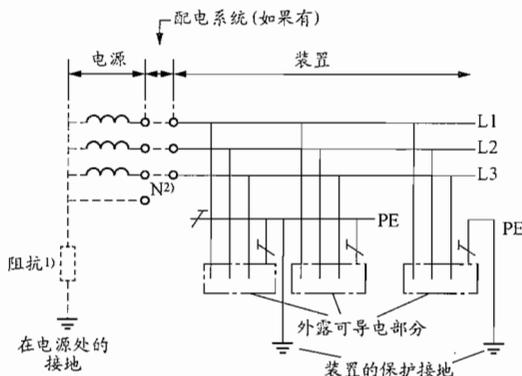


图 7.1.4-2 将外露可导电部分分组接地或独立接地的 IT 系统

【编者按】GB 16895.21—2004《建筑物电气装置 第 4-41 部分：安全防护—电击防护》中设有 IT 系统的“外露可导电部分……接到系统的接地上”这种条文；图 7.1.4-1 中，“在配电系统中接地”也不是“接到系统的接地上”。

## 12.6.2 低压架空线路的接地、电气装置的接地电阻和保护总等电位连接系统

### 12.6.2.1 低压架空线路的接地

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定：

7.2.1 单独电源 TN 系统的低压线路和高、低压线路共杆线路的钢筋混凝土杆塔，其铁横担以及金属杆塔本体应与低压线路 PE 或 PEN 相连接，钢筋混凝土杆塔的钢筋宜与低压线路的相应导体相连接。与低压线路 PE 或 PEN 相连接的杆塔可不另做接地。

7.2.2 配电变压器设置在建筑物外其低压采作 TN 系统时，低压线路在引入建筑物处，PE 或 PEN 应重复接地，接地电阻不宜超过  $10\Omega$ 。

7.2.3 中性点不接地 IT 系统的低压线路钢筋混凝土杆塔宜接地，金属杆塔应接地，接地电阻不宜超  $30\Omega$ 。

7.2.4 架空低压线路入户处的绝缘子铁脚宜接地，接地电阻不宜超过  $30\Omega$ 。土壤电阻率在  $200\Omega \cdot \text{m}$  及以下地区的铁横担钢筋混凝土杆线路，可不另设人工接地装置。当绝缘子铁脚与建筑物内电气装置的接地装置相连时，可不另设接地装置。人员密集的公共场所的入户线，当钢筋混凝土杆的自然接地电阻大于  $30\Omega$  时，入户处的绝缘子铁脚应接地，并应设专用的接地装置。

#### 12.6.2.2 配电变电站保护接地与低压系统接地的关系

(1) 高压配电电气装置的接地的特殊性在于配电变压器两侧接地的关系，其实质是高压侧接地故障可导致低压电气装置过电压。

(2) 为避免同一变电站的外露可导电部分出现不同电位危及人身安全，站内高低压设备应共用保护接地装置（故称之为变电站的保护接地）。高低压共用接地装置是指配电变电站的保护接地与低压系统接地的关系——二者可以相互连接或分隔。

(3) 关于配电变电站保护接地与低压系统的关系，有关国家标准（GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》和 GB/T 16895.10—2010《低压电气装置 第4-44部分：安全防护电压骚扰和电磁骚扰防护》）有不同规定。

##### 12.6.2.2.1 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》的有关规定

7.2.5 向低压电气装置供电的配电变压器的高压侧工作于不接地、谐振接地和高电阻接地系统。且变压器的保护接地装置的接地电阻符合本规范第 6.1.1 条的要求，建筑物内低压电气装置采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位连接系统时，低压系统电源中性点可与该变压器保护接地共用接地装置。

7.2.6 向低压电气装置供电的配电变压器的高压侧工作于低电阻接地系统，变压器的保护接地装置的接地电阻符合本规范第 4.2.1 条的要求，建筑物内低压采用 TN 系统且低压电气装置采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位联结系统时，低压系统电源中性点可与该变压器保护接地共用接地装置。

当建筑物内低压电气装置虽采用 TN 系统，但未采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位联结系统，以及建筑物内低压电气装置采用 TT 或 IT 系统时，低压系统电源中性点严禁与该变压器保护接地共用接地装置，低压电源系统的接地应按工程条件研究确定。

【编者按】

1) GB/T 16895 和 IEC 60364 系列标准以及 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》本身的 7.2.10 条均明确规定：当采用自动切断电源法作为防电击防护时，

建筑物电气装置应实施总等电位连接。因此，未采用（含建筑物钢筋的）保护总等电位连接系统是严重错误。

- 2) 高压电气装置保护接地与低压系统接地分开，只是变电站高压系统接地故障在低压系统内引起的暂时过电压的防护的措施之一。当采用其他措施（如实施总等电位连接、适当选取接地电阻与中压接地故障电流）能保证人身和设备绝缘安全时，不应“严禁”共用接地装置。

### 12.6.2.2.2 GB/T 16895.10—2010《低压电气装置 第4-44部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》的有关规定

(1) 正确提出了变电站高压系统接地故障在低压系统内引起的暂时过电压这一命题，准确给出了各类接地型式的低压系统内出现的工频应力电压和故障电压的计算数值，见图 12-6-1 和表 12-6-1。

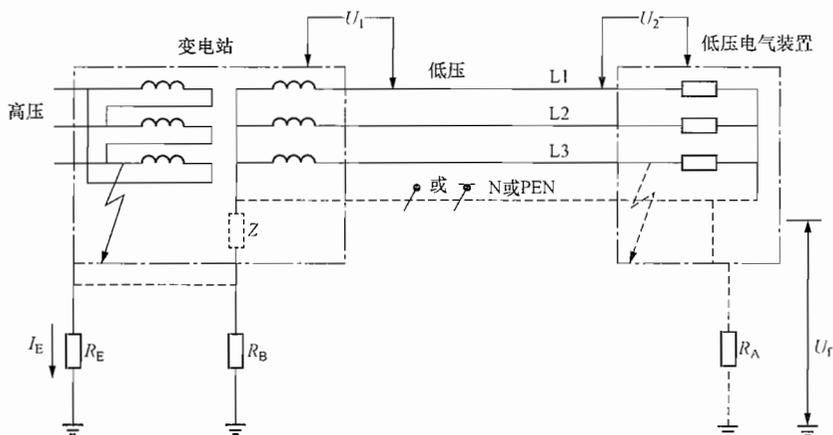


图 12-6-1 变电站和低压装置可能对地的连接及故障时出现过电压的典型示意图

图中， $I_E$ ——变电站高压系统接地故障电流；

$R_E$ ——变电站保护接地装置的接地电阻（当  $R_E$  与  $R_B$  连接时，是指其共用接地装置的接地电阻）；

$R_B$ ——变电站低压系统中性点接地装置的接地电阻；

$R_A$ ——低压电气设备外露可导电部分单独接地时的接地装置接地电阻；

$Z$ ——低压系统中性点人工接地阻抗（例如 IT 系统的高接地阻抗）；

$U_f$ ——低压系统在故障持续期间内外露可导电部分与地之间的故障电压；

$U_0$ ——低压系统相线对中性点的标称电压；

$U_1$ ——故障持续期间导体与变电站低压装置外露可导电部分之间的工频应力电压。

表 12-6-1 变电站高压接地故障时低压系统内的工频应力电压和故障电压

系统接地类型	对地连接类型	$U_1$	$U_2$	$U_f$
TT	$R_E$ 与 $R_B$ 连接	$U_0^*$	$R_E \times I_E + U_0$	$0^*$
	$R_E$ 与 $R_B$ 分隔	$R_E \times I_E + U_0$	$U_0^*$	$0^*$
TN	$R_E$ 与 $R_B$ 连接	$U_0^*$	$U_0^*$	$R_E \times I_E^{**}$
	$R_E$ 与 $R_B$ 分隔	$R_E \times I_E + U_0$	$U_0^*$	$0^*$

续表

系统接地类型	对地连接类型	$U_1$	$U_2$	$U_f$
IT	$R_E$ 与Z连接	$U_0^*$	$R_E \times I_E + U_0$	$0^*$
	$R_E$ 与 $R_A$ 分隔	$U_0 \times \sqrt{3}$	$R_E \times I_E + U_0 \times \sqrt{3}$	$R_A \times I_d$
	$R_E$ 与Z连接	$U_0^*$	$U_0^*$	$R_E \times I_E$
	$R_E$ 与 $R_A$ 互连	$U_0 \times \sqrt{3}$	$U_0 \times \sqrt{3}$	$R_E \times I_{E1}$
	$R_E$ 与Z分隔	$R_E \times I_E + U_0$	$U_0^*$	$0^*$
	$R_E$ 与 $R_A$ 分隔	$R_E \times I_E + U_0 \times \sqrt{3}$	$U_0 \times \sqrt{3}$	$R_A \times I_d$

\* 不需考虑此故障电压及应力电压的影响。

\*\* 低压系统的PEN导体为多点接地时，考虑总并联接地电阻的降低，故障电压可为

$$U_f = 0.5 R_E \times I_E。$$

☐ 阴影栏表示IT系统在变电站高压侧接地故障期间又发生低压用电设备第一次故障的情况。表中IT系统只列出了常用的几种形式。

注： $I_d$ ——IT系统内低压用电设备外露可导电部分单独接地时，流过其接地装置的第一次接地故障电流。

(2) 明确规定了允许的接触电压曲线和允许的工频应力电压值：

1) 由高压系统的接地故障所引起的低压装置外露可导电部分允许接触电压 $U_{TP}$ ，其幅值和持续时间不应超过图12-6-2中曲线所给出的值。

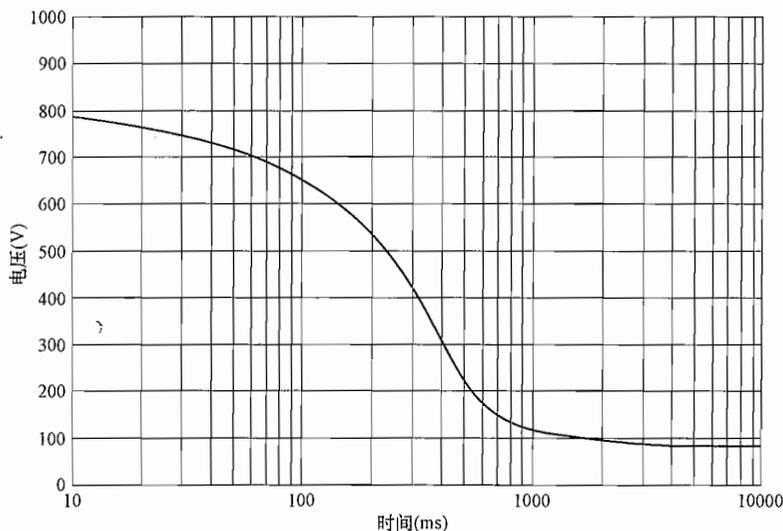


图 12-6-2 允许接触电压  $U_{TP}$  曲线（摘自 IEC 61936-1：2014）

2) 由高压系统的接地故障所引起的低压装置中作用于设备的相对地绝缘上的工频应力电压 ( $U_1$ 和 $U_2$ )，其幅值和持续时间不应超过表 12-6-2 中规定的值。

表 12-6-2 允许的工频应力电压

高压系统接地故障持续时间 (s)	低压装置中的设备允许的工频应力电压 (V)
>5	$U_0 + 250$
$\leq 5$	$U_0 + 1200$

对于无中性导体的系统,  $U_0$  应是相对相的电压

注 (1) 表中第 1 行数值适用于接地故障切断时间较长的高压系统, 例如中性点绝缘和谐振接地的高压系统; 表中第 2 行数值适用于接地故障切断时间较短的高压系统, 例如中性点低阻抗接地的高压系统。两行数值是低压设备对于暂时工频过电压绝缘的相关设计准则, (见 GB/T 16935.1—2008 《低压系统内设备的绝缘配合 第 1 部分: 原理、要求和试验》)。

(2) 对于中性点与变电站接地装置连接的系统, 此暂时工频过电压也出现在处于建筑物外的设备外壳不接地的绝缘上。

(3) “为满足电压限值要求, 高压系统与低压系统之间的协调是必要的。符合电压限值要求, 主要是变电所建设者/业主/运行者的责任。”

“满足电压限值要求的可能措施是, 例如: 将高压接地配置和低压接地配置之间分开; 改变电压系统的系统接地; 降低接地电阻。”

这些措施不是详尽的, 本书据此原则给出了适用于各种高低压系统组合情况的防护措施, 详见表 12-6-3。

表 12-6-3 变电站高压系统接地故障在低压系统内引起的暂时过电压的防护

高压系统中性点接地方式	低压系统接地型式	防护措施	
		故障电压 (接触电压)	应力电压
不接地、谐振接地和高电阻接地	TN 系统	a) 实施总等电位连接 (等电位连接区域内 $U_f = 0$ )。 b) 总等电位连接区域外 (如户外), 改用局部 TT 系统	不存在应力电压问题
	TT 系统	不存在接触电压问题	$R_{E/E} \leq 250V$ , 无需另外采取措施
	IT 系统	a) $R_E$ 与 $Z$ 和 $R_A$ 分隔, $U_f = R_A I_d \leq 50V$ , 无需另外采取措施。 b) $R_E$ 与 $Z$ 和 $R_A$ 互连, $U_f = R_E I_E$ , 防护措施同 TN 系统	$U_2 \leq \sqrt{3} U_0$ , 无需另外采取措施
低电阻接地	TN 系统	a) 实施总等电位连接 (等电位连接区域内 $U_f = 0$ )。 b) 总等电位连接区域外 (如户外), 改用局部 TT 系统	不存在应力电压问题
	TT 系统	不存在接触电压问题	a) 正确选取 $I_E$ 并适当降低 $R_E$ , 令 $R_E \cdot I_E \leq 1200V^{(1)}$ ; 或 b) $R_E$ 与 $R_B$ 分隔 ( $U_2 = U_0$ )
	IT 系统	a) $R_E$ 与 $Z$ 和 $R_A$ 分隔, $U_f = R_A I_d \leq 50V$ , 无需另外采取措施。 b) $R_E$ 与 $Z$ 和 $R_A$ 互连, $U_f = R_E I_E$ , 防护措施同 TN 系统	$U_2 \leq \sqrt{3} U_0$ , 无需另外采取措施

<sup>(1)</sup> 例如,  $I_E = 600A$ ,  $R_E \leq 2\Omega$ ;  $I_E \leq 1000A$ ,  $R_E \leq 1.2\Omega$

(4) “若高、低压系统接地相互靠近，高压接地系统和低压接地系统可以相互连接或分隔。相互连接是常采用方式。若低压系统完全处在高压系统接地所包围的区域内，高、低压系统接地应相互连接。”

当高压设备完全被低压装置接地所包围时，同样适用这一规定。

### 12.6.2.2.3 配电变电站保护接地与低压系统接地的实施

(1) 处理配电变电站保护接地与低压系统接地关系的实际条件：

1) 按防电击均压要求，变电站保护接地与所在建筑物的钢筋等外部可导电部分不可分隔。

2) 按防电击总等电位连接和防雷击电磁脉冲等电位连接要求，低压电气装置外露可导电部分的接地与所在建筑物的钢筋等外部可导电部分不可分隔。

3) 因此，同一建筑物内的变电站保护接地与低压电气装置外露可导电部分接地不可分隔。

(2) 配电变电站保护接地与低压系统接地相互连接或分隔的可行性条件：

1) 变电站保护接地与低压系统接地分设接地极仅适用于独立变电站。

2) 对于工业和民用项目中最常见的附设变电站，变电站保护接地与低压系统接地应相互连接。

3) 与配电变电站同处一个建筑物的低压电气装置，可采用 TN 系统或 IT 系统，而采用 TT 系统是不可行的（无法另设外露可导电部分的接地极）。

4) 与配电变电站分开的建筑物的低压电气装置，可采用 TN 系统或 TT 系统，而采用 IT 系统的情况可不予考虑（分布于多个建筑物的 IT 系统难以满足供电连续性要求）。

12.6.2.3 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的低压电气装置的接地电阻：

7.2.7 TT 系统中电气装置外露可导电部分应设保护接地的接地装置，其接地电阻与外露可导电部分的保护导体电阻之和，应符合下式的要求：

$$R_A \leq 50/I_a \quad (7.2.7)$$

式中： $R_A$ ——季节变化时接地装置的最大接地电阻与外露可导电部分的保护导体电阻之和（ $\Omega$ ）；

$I_a$ ——保护电器自动动作的动作电流，当保护电器为剩余电流保护时， $I_a$ 为额定剩余电流动作电流  $I_{\Delta n}$ ，（A）。

7.2.8 TT 系统配电线路内由同一接地故障保护电器保护的外露可导电部分，应用 PE 连接至共用的接地极上。当有多级保护时，各级宜有各自的接地极。

7.2.9 IT 系统各电气装置的外露可导电部分其保护接地可共用同一接地装置，亦可个别地或成组地用单独的接地装置接地。每个接地装置的接地电阻应符合下式的要求：

$$R \leq 50/I_d \quad (7.2.9)$$

式中： $R$ ——外露可导电部分的接地装置因季节变化的最大接地电阻（ $\Omega$ ）；

$I_d$ ——相导体（线）和外露可导电部分间第一次出现阻抗可不计的故障时的故障电流（A）。

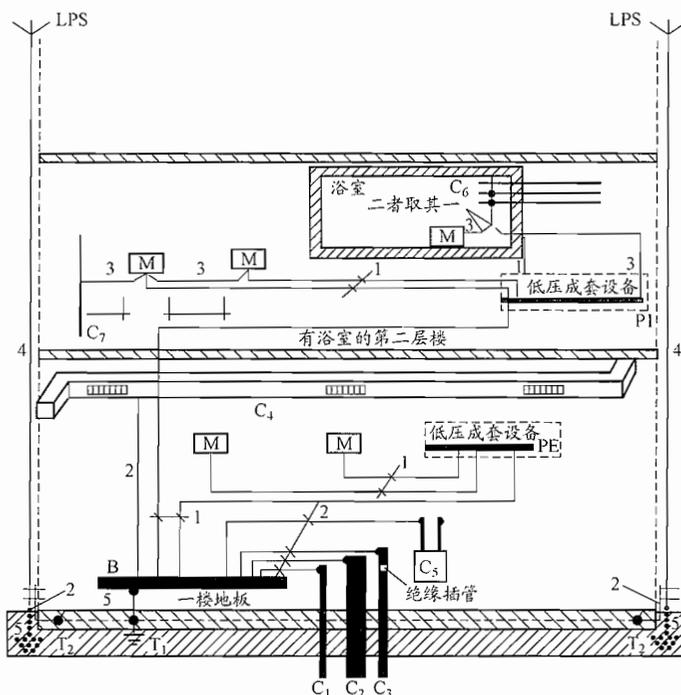
7.2.11 建筑物处的低压系统电源中性点、电气装置外露导电部分的保护接地、保护等

电位联结的接地极等，可与建筑物的雷电保护接地共用同一接地装置。共用接地装置的接地电阻，不应大于各要求值中的最小值。

**12.6.2.4** GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的建筑物内电气装置的保护总等电位连接系统的要求：

7.2.10 低压电气装置采用接地故障保护时，建筑物内电气装置应采用保护总等电位连接系统，并应符合本规范附录H的有关规定。

#### 附录H 低压接地配置、保护导体和保护连接导体



图H 接地配置、保护导体和保护连接导体

M—外露可导电部分；C—外界可导电部分；C<sub>1</sub>—外部进来的金属水管；C<sub>2</sub>—外部进来的金属排弃废物、排水管道；C<sub>3</sub>—外部进来的带绝缘插管的金属可燃气体管道；C<sub>4</sub>—空调；C<sub>5</sub>—供热系统；C<sub>6</sub>—金属水管，比如浴池里的金属水管；C<sub>7</sub>—在外露可导电部分的伸臂范围内的外界可导电部分；B—总接地端子（总接地母线）；T—接地极；T<sub>1</sub>—基础接地；T<sub>2</sub>—LPS（防雷装置）的接地极（若需要的话）；1—保护导体；2—保护连接导体；3—用作辅助连接用的保护连接导体；4—LPS（防雷装置）的引线；5—接地导体

### 12.6.3 低压电气装置的接地装置

**12.6.3.1** GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的低压电气装置的接地装置要求：

8.1.1 低压电气装置的接地装置，应符合下列要求：

- 1 接地配置可兼有或分别承担防护性和功能性的作用，但首先应满足防护的要求。
- 2 低压电气装置本身有接地极时，应将该接地极用一接地导体（线）连接到总接

地端子上。

3 对接地配置要求中的对地连接，应符合下列要求：

- 1) 对装置的防护要求应可靠、适用。
- 2) 能将对地故障电流和 PE 电流传导入地。
- 3) 接地配置除保护要求外还有功能性的需要时，也符合功能性的相应要求。

**12.6.3.2** GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的低压电气装置的接地极的材料、尺寸、数量、类型等要求：

8.1.2 接地极应符合下列要求：

1 对接地极的材料和尺寸的选择，应使其耐腐蚀又具有适当的机械强度。耐腐蚀和机械强度要求的埋入土壤中常用材料接地极的最小尺寸，应符合表 8.1.2 的规定。有防雷装置时，应符合现行国家标准《建筑物防雷设计规范》GB 50057 的有关规定。

表 8.1.2 耐腐蚀和机械强度要求的埋入土壤中常用材料接地极的最小尺寸

材料	表面	形状	最小尺寸				
			直径 (mm)	截面积 (mm <sup>2</sup> )	厚度 (mm)	镀层/护套的厚度 (μm)	
						单个值	平均值
钢	热镀锌或 不锈钢	带状	—	90	3	63	70
		型材	—	90	3	63	70
		深埋接地极用的 圆棒	16	—	—	63	70
	热镀锌或 不锈钢	浅埋接地极用的 圆棒	10	—	—	—	50
		管状	25	—	2	47	55
	铜护套	深埋接地极用的 圆棒	15	—	—	2000	—
	电镀铜护层	深埋水平接地极	—	90	3	70	—
深埋接地极用的 圆棒		14	—	—	254	—	
铜	裸露	带状	—	50	2	—	—
		浅埋接地极用的 圆线	—	25	—	—	—
	—	绞线	每根 1.8	25	—	—	—
		管状	20	—	2	—	—
	镀锡	绞线	每根 1.8	25	—	1	5
	镀锌	带状	—	50	2	20	40

- 注：1 热镀锌或不锈钢可用作埋在混凝土中的电极；  
 2 不锈钢不加镀层；  
 3 钢带为带圆边的轧制的带状或切割的带状；  
 4 铜镀锌带为带圆边的带状；  
 5 在腐蚀性和机械损伤极低的场所，铜圆线可采用 16mm<sup>2</sup> 的截面；  
 6 浅埋指埋设深度不超过 0.5m。

2 接地极应根据土壤条件和所要求的接地电阻值,选择1个或多个。

3 接地极可采用下列设施:

- 1) 嵌入地基的地下金属结构网(基础接地)。
- 2) 金属板。
- 3) 埋在地下混凝土(预应力混凝土除外)中的钢筋。
- 4) 金属棒或管子。
- 5) 金属带或线。
- 6) 根据当地条件或要求所设电缆的金属护套和其他金属护层。
- 7) 根据当地条件或要求设置的其他适用的地下金属网。

4 在选择接地极类型和确定其埋地深度时,应符合现行国家标准《建筑物电气装置 第4-41部分:安全防护—电击防护》GB 16895.21的有关规定,并结合当地的条件,防止在土壤干燥和冻结的情况下,接地极的接地电阻增加到有损电击防护措施的程度。

5 应注意在接地配置中采用不同材料时的电解腐蚀问题。

6 用于输送可燃液体或气体的金属管道,不应用作接地极。

**12.6.3.3** GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的低压电气装置的接地导体(线)要求:

8.1.3 接地导体(线)应符合下列要求:

1 接地导体(线)应符合本规范第8.2.1条的规定;埋入土壤中的接地导体(线)的最小截面积应符合表8.1.3的要求。

表8.1.3 埋入土壤中的接地导体(线)的最小截面积

防腐蚀保护	有防机械损伤保护	无防机械损伤保护
有	铜: 2.5mm <sup>2</sup>	铜: 16mm <sup>2</sup>
	钢: 10mm <sup>2</sup>	钢: 16mm <sup>2</sup>
无	铜: 25mm <sup>2</sup>	钢: 50mm <sup>2</sup>

2 接地导体(线)与接地极的连接应牢固,且应有良好的导电性能,并应采用放热焊接、压接器、夹具或其他机械连接器连接。机械接头应按厂家的说明书安装。采用夹具时,不得损伤接地极或接地导体(线)。

**12.6.3.4** GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的低压电气装置的总接地端子要求:

8.1.4 总接地端子应符合下列要求:

1 在采用保护连接的每个装置中都应配置总接地端子,并应将下列导线与其连接:

- 1) 保护连接导体(线);
- 2) 接地导体(线);
- 3) PE(当PE已通过其他PE与总接地端子连接时,则不应把每根PE直接接到总

接地端子上)；

4) 功能接地导体(线)。

2 接到总接地端子上的每根导体，连接应牢固可靠，应能被单独地拆开。

## 12.6.4 低压电气装置的保护导体

12.6.4.1 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的 PE 线的最小截面积要求：

8.2.1 PE 的最小截面积应符合下列要求：

1 每根 PE 的截面积均应符合现行国家标准《建筑物电气装置 第 4-41 部分：安全防护—电击防护》GB 16895.21—2004 的第 411.1 条的规定，并应能承受预期的故障电流。

PE 的最小截面积可按式 (8.2.1) 计算，也可按表 8.2.1 确定：

表 8.2.1 PE 的最小截面积

相线截面积 $S_a$ ( $\text{mm}^2$ )	相应 PE 的最小截面积 ( $\text{mm}^2$ )	
	PE 与相线使用相同材料	PE 与相线使用不同材料
$S_a \leq 16$	$S_a$	$\frac{k_1}{k_2} \times S_a$
$16 < S_a \leq 35$	16	$\frac{k_1}{k_2} \times 16$
$S_a > 35$	$\frac{S_a}{2}$	$\frac{k_1}{k_2} \times \frac{S_a}{2}$

注：1  $k_1$  为相导体的  $k$  值，按线和绝缘的材料由本规范表 G.0.1 或现行国家标准《建筑物电气装置 第 4 部分：安全防护 第 43 章：过电流保护》GB 16895.5 的有关规定选取；

2  $k_2$  为 PE 的  $k$  值，按本规范表 G.0.2-1 ~ 表 G.0.2-5 的规定选取；

3 对于 PEN，其截面积应符合现行国家标准《建筑物电气装置 第 5 部分：电气设备的选择和安装 第 52 章：布线系统》GB 16895.6 规定的 N 尺寸后，再减少。

2 切断时间不超过 5s 时，PE 的截面积不应小于下式的要求：

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k} \quad (8.2.1)$$

式中  $S$ ——截面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$I$ ——通过保护电器的阻抗可忽略的故障产生的预期故障电流有效值 (A)；

$t$ ——保护电器自动切断时的动作时间 (s)；

$k$ ——由 PE、绝缘和其他部分的材料以及初始和最终温度决定的系数，按本规范附录 G 的规定取值。

3 不属于电缆的一部分或不与相线共处于同一外护物之内的每根 PE，其截面积不应小于下列数值：

1) 有防机械损伤保护，铜为  $2.5\text{mm}^2$ ，铝为  $16\text{mm}^2$ ；

2) 没有防机械损伤保护，铜为  $4\text{mm}^2$ ，铝为  $16\text{mm}^2$ ；

4 当两个或更多个回路共用一个时,其截面应按下列要求确定:

- 1) 按回路中遭受最严重的预期故障电流和动作时间,其截面按本条第1款计算;
- 2) 对应于回路中的最大相线截面积,其截面按本规范表8.2.1选定。

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的系数 $k$ 的求取方法:

### 附录 G 系数 $k$ 的求取方法

G.0.1 本规范第8.2.1条第2款式(8.2.1)中 $k$ 值可由下式计算:

$$k = \sqrt{\frac{Q_c(\beta + 20^\circ\text{C})}{\rho_{20}} \ln\left(1 + \frac{\theta_1 - \theta_i}{\beta + \theta_i}\right)} \quad (\text{G.0.1})$$

式中  $Q_c$ ——导线材料在 $20^\circ\text{C}$ 的体积热容量 [ $\text{J}/(\text{C} \cdot \text{mm}^3)$ ];

$\beta$ ——导线在 $0^\circ\text{C}$ 时的电阻率温度系数的倒数,可按表G.0.1取值( $^\circ\text{C}$ );

$\rho_{20}$ ——导线材料在 $20^\circ\text{C}$ 时的电阻率,可按表G.0.1取值( $\Omega \cdot \text{mm}$ );

$\theta_i$ ——导线的初始温度( $^\circ\text{C}$ );

$\theta_f$ ——导线的最终温度( $^\circ\text{C}$ )。

表 G.0.1 式(G.0.1)中的参数取值

材料	$\beta$ ( $^\circ\text{C}$ )	$Q_c$ [ $\text{J}/(\text{C} \cdot \text{mm}^3)$ ]	$\rho_{20}$ ( $\Omega \cdot \text{mm}$ )	$\sqrt{\frac{Q_c(\beta + 20)}{\rho_{20}}} (\text{A}\sqrt{\text{s}/\text{mm}^2})$
铜	234.5	$3.45 \times 10^{-3}$	$17.241 \times 10^{-6}$	226
铝	228	$2.5 \times 10^{-3}$	$28.264 \times 10^{-6}$	148
铅	230	$1.45 \times 10^{-3}$	$214 \times 10^{-6}$	41
钢	202	$3.8 \times 10^{-3}$	$138 \times 10^{-6}$	78

G.0.2 用法不同或运行情况不同的保护导体的 $k$ 值,可按表G.0.2-1~表G.0.2-5选取。

表 G.0.2-1 非电缆芯线且不与其他电缆成束敷设的绝缘保护导体的 $k$

导体绝缘	温度 ( $^\circ\text{C}$ )		$k$		
			导体材料		
	初始	最终	铜	铝	钢
70 $^\circ\text{C}$ PVC	30	160/140	143/133	95/88	52/49
90 $^\circ\text{C}$ PVC	30	160/140	143/133	95/88	52/49
90 $^\circ\text{C}$ 热固性材料	30	250	176	116	64
60 $^\circ\text{C}$ 橡胶	30	200	159	105	58
85 $^\circ\text{C}$ 橡胶	30	220	166	110	60
硅橡胶	30	350	201	133	73

注:温度中的较小数值适用于截面积小于 $300\text{mm}^2$ 的PVC绝缘导体。

表 G.0.2-2 与电缆护层接触但不与其他电缆成束敷设的裸保护导体的  $k$ 

导体绝缘	温度 (°C)		$k$		
			导体材料		
	初始	最终	铜	铝	钢
PVC	30	200	159	105	58
聚乙烯	30	150	138	91	50
氯磺化聚乙烯	30	220	166	110	60

表 G.0.2-3 电缆芯线或与其他电缆或绝缘导体成束敷设的保护导体的  $k$ 

导体绝缘	温度 (°C)		$k$		
			导体材料		
	初始	最终	铜	铝	钢
70°C PVC	70	160/140	115/103	76/68	42/37
90°C PVC	90	160/140	100/86	66/57	36/31
90°C 热固性材料	90	250	143	94	52
60°C 橡胶	60	200	141	93	51
85°C 橡胶	85	220	134	89	48
硅橡胶	180	350	132	87	47

注：温度中较小数值适用于截面积大于  $300\text{mm}^2$  的 PVC 绝缘导体。

表 G.0.2-4 同电缆的金属护层、铠装、金属护套、同心导体等作保护导体的  $k$ 

导体绝缘	温度 (°C)		$k$			
			导体材料			
	初始	最终	铜	铝	铅	钢
70°C PVC	60	200	141	93	26	51
90°C PVC	80	200	128	85	23	46
90°C 热固性材料	80	200	128	85	23	46
60°C 橡胶	55	200	144	95	26	52
85°C 橡胶	75	220	140	93	26	51
硅橡胶	70	200	135	—	—	—
裸露的矿物护套	105	250	135	—	—	—

注：温度的数值也应适用于外露可触及的或与可燃性材料接触的裸导体。

表 G.0.2-5 所示温度不损伤相邻材料时的裸导体的  $k$ 

条件	初始温度 (°C)	导体材料					
		铜		铝		钢	
		$k$	最高温度 (°C)	$k$	最高温度 (°C)	$k$	最高温度 (°C)
可见的和狭窄的区域内	30	228	500	125	300	82	500
正常条件	30	159	200	105	200	58	200
有火灾危险	30	138	159	91	150	50	150

#### 12.6.4.2 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的 PE 线类型的要求:

8.2.2 PE 类型应符合下列要求:

- 1 PE 应由下列一种或多种导体组成。
  - 1) 多芯电缆中的芯线。
  - 2) 与带电线路共用的外护物(绝缘的或裸露的线)。
  - 3) 固定安装的裸露的或绝缘的导体。
  - 4) 符合本规范第 8.2.2 条第 2 款第 1) 项和第 2) 项规定条件的金属电缆护套、电缆屏蔽层、电缆铠装、金属编织物、同心线、金属导管。
  - 5) PE 的配置,还应符合本规范第 8.2.6 条的规定。
- 2 装置中包括带金属外护物的设备,其金属外护物或框架同时满足下列要求时,可用作保护导体:
  - 1) 能利用结构或适当的连接,使对机械、化学或电化学损伤的防护性能得到保护,并保持电气连续性。
  - 2) 符合本规范第 8.2.1 条的规定。
  - 3) 在每个预留的分接点上,允许与其他保护导体连接。
  - 3 下列金属部分不应作为 PE 或保护连接导体:
    - 1) 金属水管。
    - 2) 含有可燃性气体或液体的金属管道。
    - 3) 正常使用中承受机械应力的结构部分。
    - 4) 柔性或可弯曲金属导管(用于保护接地或保护连接目的而特别设计的除外)。
    - 5) 柔性金属部件。
    - 6) 支撑线。

#### 12.6.4.3 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的 PE 线的电气连续性要求:

8.2.3 PE 的电气连续性应符合下列要求:

- 1 PE 对机械伤害、化学或电化学损伤、电动力和热动力等,应具有适当的防护性能。
- 2 除下列各项外,PE 接头的位置应是可接近的:
  - 1) 填充复合填充物的接头。
  - 2) 封闭的接头。
  - 3) 在金属导管内和槽盒内接头。
  - 4) 在设备标准中已成为设备的一部分的接头。
- 3 在 PE 中,不应串入开关器件,可设置能用工具拆开的接头。
- 4 在采用接地电气监测时,不应将专用器件串接在 PE 中。
- 5 除本规范第 8.2.2 条第 2 款外,器具的外露可导电部分不应用于构成其他设备保护导体的一部分。

#### 12.6.4.4 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的 PEN 线的设计要求:

#### 8.2.4 PEN 应符合下列要求：

1 PEN 应只在固定的电气装置中采用，铜的截面积不应小于  $10\text{mm}^2$  或铝的的截面积不应小于  $16\text{mm}^2$ 。

2 PEN 应按可能遭受的最高电压加以绝缘。

3 从装置的任一点起，N 和 PE 分别采用单独的导体时，不允许该 N 再连接到装置的任何其他的接地部分，允许由 PEN 分接出的 PE 和 PE 超过一根以上。PE 和 N，可分别设置单独的端子或母线，PEN 应接到为 PE 预设的端子或母线上。

### 12.6.4.5 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的 PE 线的其他要求：

#### 8.2.5 保护和功能共用接地应符合下列要求：

1 保护和功能共用接地用途的导体，应满足有关 PE 的要求，并应符合现行国家标准《建筑物电气装置 第 4-41 部分：安全防护—电击防护》GB 16895.21 的有关规定。信息技术电源的直流回路的 PEL 或 PEM，也可用作功能接地和保护接地两种共用功能的导体。

2 外界可导电部分不应用作 PEL 和 PEM。

8.2.6 当过电流保护器用作电击防护时，PE 应合并到与带电导体同一布线系统中，或设置在靠过电流保护器最近的地方。

8.2.7 预期用作永久性连接，且所用的 PE 电流又超过 10mA 的用电设备，应按下列要求设置加强型 PE：

1 PE 的全长应采用截面积至少为  $10\text{mm}^2$  的铜线或  $16\text{mm}^2$  的铝线。

2 也可再用一根截面积至少与用作间接接触防护所要求的 PE 相同，且一直敷设到 PE 的截面积不小于铜  $10\text{mm}^2$  或铝  $16\text{mm}^2$  处，用电器具对第二根 PE 应设置单独的接线端子。

### 12.6.5 总等电位连接的保护连接导体

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的作为总等电位连接的保护连接导体的要求：

#### 8.3 保护连接导体

8.3.1 作为总等电位连接的保护连接导体和按本规范第 8.1.4 条的规定接到总接地端子的保护连接导体，其截面积不应小于下列数值：

1 铜为  $6\text{mm}^2$ 。

2 镀铜钢为  $25\text{mm}^2$ 。

3 铝为  $16\text{mm}^2$ 。

4 钢为  $50\text{mm}^2$ 。

8.3.2 作辅助连接用的保护连接导体应符合下列要求：

1 连接两个外露可导电部分的保护连接导体，其电导不应小于接到外露可导电部分的较小的 PE 的电导。

2 连接外露可导电部分和外界可导电部分的保护连接导体的电阻，不应大于相应 PE1/2 截面积导体所具有的电阻。

3 应符合本规范第 8.2.1 条第 3 款的规定。

## 12.7 接地电阻的计算

### 12.7.1 人工接地极工频率接地电阻的计算

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的人工接地极工频接地电阻的计算方法：

#### 附录 A 土壤中人工接地极工频率接地电阻的计算

A.0.1 均匀土壤中垂直接地极的接地电阻可按下列公式计算：

1 当  $l \geq d$  时，接地电阻可按下列公式计算（图 A.0.1-1）：

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (\text{A.0.1-1})$$

式中： $R_v$ ——垂直接地极的接地电阻（ $\Omega$ ）；

$\rho$ ——土壤电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）；

$l$ ——垂直接地极的长度（m）；

$d$ ——接地极用圆导体时，圆导体的直径（m）。

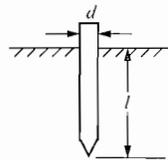


图 A.0.1-1 垂直接地极的示意

2 当接地极用其他型式导体时，其等效直径可按下列公式计算（图 A.0.1-2）：

管状导体，  $d = d_1$  (A.0.1-2)

扁导体，  $d = \frac{b}{2}$  (A.0.1-3)

等边角钢，  $d = 0.84b$  (A.0.1-4)

不等边角钢，  $d = 0.71 [b_1 b_2 (b_1^2 + b_2^2)]^{0.25}$  (A.0.1-5)

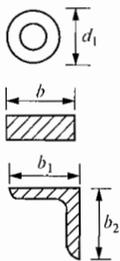


图 A.0.1-2 几种型式导体的计算用尺寸

A.0.2 均匀土壤中不同形状水平接地极的接地电阻，可按下列公式计算：

$$R_h = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{hd} + A \right) \quad (\text{A.0.2})$$

式中： $R_h$ ——水平接地极的接地电阻（ $\Omega$ ）；

$L$ ——水平接地极的总长度（m）；

$h$ ——水平接地极的埋设深度（m）；

$d$ ——水平接地极的直径或等效直径（m）；

$A$ ——水平接地极的形状系数，可按表 A.0.2 的规定采用。

表 A.0.2 水平接地极的形状系数

水平接地极形状	—	L	Y	○	+	□	✱	✱	✱	✱
形状系数 A	-0.6	-0.18	0	0.48	0.89	1	2.19	3.03	4.71	5.65

A.0.3 均匀土壤中水平接地极为主边缘闭合的复合接地极（接地网）的接地电阻，可按下列公式计算：

$$R_n = \alpha_1 R_e \quad (\text{A. 0. 3-1})$$

$$\alpha_1 = \left( 3 \ln \frac{L_0}{\sqrt{S}} - 0.2 \right) \frac{\sqrt{S}}{L_0} \quad (\text{A. 0. 3-2})$$

$$R_e = 0.213 \frac{\rho}{\sqrt{S}} (1 + B) + \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{S}{9hd} - 5B \right) \quad (\text{A. 0. 3-3})$$

$$B = \frac{1}{1 + 4.6 \frac{h}{\sqrt{S}}} \quad (\text{A. 0. 3-4})$$

式中： $R_n$ ——任意形状边缘闭合接地网的接地电阻（ $\Omega$ ）；

$R_e$ ——等值（即等面积、等水平接地极总长度）方形接地网的接地电阻（ $\Omega$ ）；

$S$ ——接地网的总面积（ $\text{m}^2$ ）；

$d$ ——水平接地极的直径或等效直径（ $\text{m}$ ）；

$h$ ——水平接地极的埋设深度（ $\text{m}$ ）；

$L_0$ ——接地网的外缘边线总长度（ $\text{m}$ ）；

$L$ ——水平接地极的总长度（ $\text{m}$ ）。

A. 0. 4 均匀土壤中人工接地极工频接地电阻的简易计算，可相应采用下列公式：

垂直式：

$$R \approx 0.3\rho \quad (\text{A. 0. 4-1})$$

单根水平式：

$$R \approx 0.03\rho \quad (\text{A. 0. 4-2})$$

复合式（接地网）：

$$R \approx 0.5 \frac{\rho}{\sqrt{S}} = 0.28 \frac{\rho}{r} \quad (\text{A. 0. 4-3})$$

或

$$R \approx \frac{\sqrt{\pi}}{4} \times \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L} = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad (\text{A. 0. 4-4})$$

式中： $S$ ——大于  $100\text{m}^2$  的闭合接地网的面积；

$r$ ——与接地网面积  $S$  等值的圆的半径，即等效半径（ $\text{m}$ ）。

A. 0. 5 典型双层土壤中几种接地装置的接地参数，可按下列公式计算：

1 深埋垂直接地极的接地电阻（图 A. 0. 5-1）：

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{d} + C \right) \quad (\text{A. 0. 5-1})$$

$l < H$  时：

$$\rho_a = \rho_1 \quad (\text{A. 0. 5-2})$$

$l > H$  时：

$$\rho_a = \frac{\rho_1 \rho_2}{\frac{H}{l} (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1} \quad (\text{A. 0. 5-3})$$

$$C = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \right)^n \ln \frac{2nH + l}{2(n-1)H + l} \quad (\text{A. 0. 5-4})$$

2 土壤具有图 A. 0. 5-2 所示的两个剖面结构时，水平接地网的接地电阻  $R$ ：

$$R = \frac{0.5\rho_1\rho_2\sqrt{S}}{\rho_1S_2 + \rho_2S_1} \quad (\text{A.0.5-5})$$

式中： $S_1$ 、 $S_2$ ——覆盖在 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 土壤电阻率上的接地网面积（ $\text{m}^2$ ）；  
 $S$ ——接地网总面积（ $\text{m}^2$ ）。

### 12.7.2 架空线路杆塔工频和冲击接地电阻的计算

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的单独接地极或杆塔接地装置的工频接地电阻、冲击系数、冲击接地电阻的计算：

#### 附录 F 架空线路杆塔接地电阻的计算

F.0.1 杆塔水平接地装置的工频接地电阻可按式计算：

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{hd} + A_1 \right) \quad (\text{F.0.1})$$

式中： $A_1$ ——按表 F.0.1 取值；  
 $L$ ——按表 F.0.1 取值。

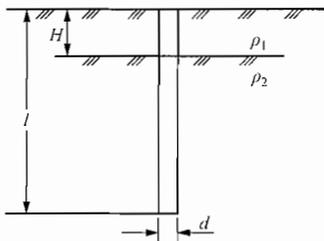


图 A.0.5-1 深埋接地体示意

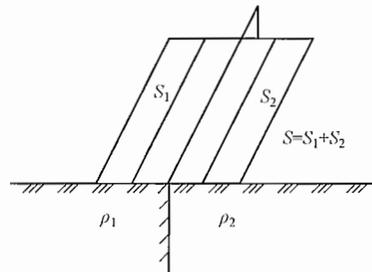


图 A.0.5-2 两种土壤电阻率的接地网

表 F.0.1  $A_1$  和  $L$  的意义与取值

接地装置种类	形状	参数
铁塔接地装置		$A_1 = 1.76$ $L = 4(l_1 + l_2)$
钢筋混凝土杆放射型接地装置		$A_1 = 2.0$ $L = 4l_1 + l_2$
钢筋混凝土杆环型接地装置		$A_1 = 1.0$ $L = 8l_2$ (当 $l_1 = 0$ 时) $L = 4l_1$ (当 $l_1 \neq 0$ 时)

F.0.2 杆塔接地装置接地电阻的冲击系数，可按以下公式计算：

1 铁塔接地装置

$$\alpha = 0.74\rho^{-0.4}(7.0 + \sqrt{L})[1.56 - \exp(-3.0I_i^{-0.4})] \quad (\text{F.0.2-1})$$

式中  $I_i$ ——流过杆塔接地装置或单独接地极的冲击电流（kA）；

$\rho$ ——以  $\Omega \cdot \text{m}$  表示的土壤电阻率。

2 钢筋混凝土杆放射型接地装置：

$$\alpha = 1.36\rho^{-0.4}(1.3 + \sqrt{L})[1.55 - \exp(-4.0I_i^{-0.4})] \quad (\text{F.0.2-2})$$

3 钢筋混凝土杆环型接地装置：

$$\alpha = 2.94\rho^{-0.5}(6.0 + \sqrt{L})[1.23 - \exp(-2.0I_i^{-0.3})] \quad (\text{F.0.2-3})$$

4 单独接地极接地电阻的冲击系数的计算：

1) 垂直接地极：

$$\alpha = 2.75\rho^{-0.4}(1.8 + \sqrt{L})[0.75 - \exp(-1.50I_i^{-0.2})] \quad (\text{F.0.2-4})$$

2) 单端流入冲击电流的水平接地极：

$$\alpha = 1.62\rho^{-0.4}(5.0 + \sqrt{L})[0.79 - \exp(-2.3I_i^{-0.2})] \quad (\text{F.0.2-5})$$

3) 中部流入冲击电流的水平接地极：

$$\alpha = 1.16\rho^{-0.4}(7.1 + \sqrt{L})[0.78 - \exp(-2.30I_i^{-0.2})] \quad (\text{F.0.2-6})$$

F.0.3  $\rho \leq 300\Omega \cdot \text{m}$  时，可计及杆塔自然接地极的作用。其冲击系数可利用下式计算：

$$\alpha = \frac{1}{1.35 + \alpha_1 I_i^{1.5}} \quad (\text{F.0.3})$$

式中  $\alpha_1$ ——对钢筋混凝土杆、钢筋混凝土桩和铁塔的基础（一个塔脚），为 0.053；

对装配式钢筋混凝土基础（一个塔脚）和拉线盘（带拉线棒），为 0.038。

F.0.4 各种型式接地极的冲击利用系数  $\eta_i$  可采用表 F.0.4 的数值。工频利用系数可取 0.9。自然接地极，工频利用系数可取 0.7。

表 F.0.4 接地极的冲击利用系数  $\eta_i$

接地极型式	接地导体（线）的根数	冲击利用系数	备注
$n$ 根水平射线 (每根长 10m~80m)	2	0.83~1.00	较小值用于较短的射线
	3	0.75~0.90	
	4~6	0.65~0.80	
以水平接地极连接的 垂直接地极	2	0.80~0.85	$\frac{D(\text{垂直接地极间距})}{l(\text{垂直接地极长度})} = 2 \sim 3$ 较小值用于 $\frac{D}{l} = 2$ 时
	3	0.70~0.80	
	4	0.70~0.75	
	6	0.65~0.70	
自然接地极	拉线棒与拉线盘间铁塔的	0.6	—
	各基础间门型、各种	0.4~0.5	
	拉线杆塔的各基础间	0.7	

F.0.5 各种型式接地装置工频接地电阻的计算，可采用表 F.0.5 的简易计算式。

表 F.0.5 各种型式接地装置的工频接地电阻简易计算式

接地装置型式	杆塔型式	接地电阻简易计算式
$n$ 根水平射线 ( $n \leq 12$ , 每根长约 60m)	各型杆塔	$R \approx \frac{0.062\rho}{n+1.2}$
沿装配式基础周围敷设的深埋式接地板	铁塔 门型杆塔 V 形拉线的门型杆塔	$R \approx 0.07\rho$ $R \approx 0.04\rho$ $R \approx 0.45\rho$
装配式基础的自然接地板	铁塔 门型杆塔 V 形拉线的门型杆塔	$R \approx 0.1\rho$ $R \approx 0.06\rho$ $R \approx 0.09\rho$
钢筋混凝土杆的自然接地板	单杆 双杆 拉线单、双杆一个拉线盘	$R \approx 0.3\rho$ $R \approx 0.2\rho$ $R \approx 0.1\rho$ $R \approx 0.28\rho$
深埋式接地与装配式基础自然接地的综合	铁塔 门型杆塔 V 形拉线的门型杆塔	$R \approx 0.05\rho$ $R \approx 0.03\rho$ $R \approx 0.04\rho$

注：表中  $R$  为接地电阻 ( $\Omega$ )； $\rho$  为土壤电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )。

### 12.7.3 土壤和水的电阻率参考值

计算接地电阻用的电阻率应为实测值，若没有实测值时，估算接地电阻可利用参考值。GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的土壤和水的电阻率参考值：

#### 附录 J 土壤和水的电阻率参考值

表 J 土壤和水的电阻率参考值

类别	名称	电阻率近似值 ( $\Omega \cdot m$ )	不同情况下电阻率的变化范围		
			较湿时 (一般地区、多雨区)	较干时 (少雨区、沙漠区)	地下水含盐碱时
土	陶黏土	10	5~20	10~100	3~10
	泥炭、泥灰岩、沼泽地	20	10~30	50~300	3~30
	捣碎的木炭	40	—	—	—
	黑土、园田土、陶土	50	3~100	50~300	10~30
	白垩土、黏土	60			
	砂质黏土	100	30~100	50~300	10~30
	黄土	200	100~200	250	30
	含砂黏土、砂土	300	100~1000	1000 以上	30~100
	河滩中的砂	—	300	—	—
	煤	—	350	—	—
	多石土壤	400	—	—	—
	上层红色风化黏土、 下层红色页岩	500 (30% 湿度)	—	—	—
表土层夹石、下层砾石	600 (15% 湿度)	—	—	—	

续表

类别	名称	电阻率近似值 ( $\Omega \cdot m$ )	不同情况下电阻率的变化范围		
			较湿时（一般地区、多雨区）	较干时（少雨区、沙漠区）	地下水含盐碱时
砂	砂、砂砾	1000	25 ~ 1000	1000 ~ 2500	—
	砂层深度大于10m	1000	—	—	—
	地下水较深的草原				
	地面黏土深度不大于1.5m 底层多岩石				
岩石	砾石、碎石	5000	—	—	—
	多岩山地	5000	—	—	—
	花岗岩	200000	—	—	—
混凝土	在水中	40 ~ 55	—	—	—
	在湿土中	100 ~ 200	—	—	—
	在干土中	500 ~ 1300	—	—	—
	在干燥的大气中	12000 ~ 18000	—	—	—
矿	金属矿石	0.01 ~ 1	—	—	—

## 12.8 发电厂和变电站的人地故障电流及地电位升高的计算

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定的人地故障电流的计算：

### 附录 B 经发电厂和变电站接地网的人地故障电流及地电位升高的计算

B.0.1 经发电厂和变电站接地网的人地接地故障电流，应计及故障电流直流分量的影响，设计接地网时应按接地网最大入地电流  $I_C$  进行设计。 $I_C$  可按下列步骤确定：

1 确定接地故障对称电流  $I_f$ 。

2 根据系统及线路设计采用的参数确定故障电流分流系数  $S_f$ ，进而计算接地网入地对称电流  $I_g$ 。

3 计算衰减系数  $D_f$ ，将其乘以入地对称电流，得到计及直流偏移的经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值  $I_C$ 。

4 发电厂和变电站内、外发生接地短路时，经接地网入地的故障对称电流可分别按下列公式计算：

$$I_g = (I_{\max} - I_n) S_{f1} \quad (\text{B.0.1-1})$$

$$I_g = I_n S_{f2} \quad (\text{B.0.1-2})$$

式中  $I_{\max}$ ——发电厂和变电站内发生接地故障时的最大接地故障对称电流有效值 (A)；

$I_n$ ——发电厂和变电站内发生接地故障时流经其设备中性点的电流 (A)；

$S_{f1}$ 、 $S_{f2}$ ——厂站内、外发生接地故障时的分流系数。

【编者按】计算用入地接地故障电流应取变电站内、外发生接地短路时两计算式中较大的  $I_C$  值。

B.0.2 故障电流分流系数  $S_f$  的计算可分为站内短路故障和站外短路故障。

1 站内接地故障时分流系数  $S_{\Pi}$  的计算:

1) 对于站内单相接地故障, 假设每个档距内的导线参数和杆塔接地电阻均相同 (图 B.0.2-1)。不同位置的架空线路地线上流过的零序电流可按下列公式计算:

$$I_{B(n)} = \left[ \frac{e^{\beta(s+1-n)} - e^{-\beta(s+1-n)}}{e^{\beta(s+1)} - e^{-\beta(s+1)}} \left( 1 - \frac{Z_m}{Z_s} \right) + \frac{Z_m}{Z_s} \right] \cdot I_b \quad (\text{B.0.2-1})$$

$$e^{-\beta} = \frac{1 - \sqrt{\frac{Z_s \cdot D}{12 \cdot R_{st} + Z_s \cdot D}}}{1 + \sqrt{\frac{Z_s \cdot D}{12 \cdot R_{st} + Z_s \cdot D}}} \quad (\text{B.0.2-2})$$

$$Z_s = \frac{3r_s}{k} + 0.15 + j0.189 \ln \frac{D_g}{\sqrt{k} a_s D_s^{k-1}} \quad (\text{B.0.2-3})$$

钢芯铝绞线:  $a_s = 0.95 a_0$  (B.0.2-4)

有色金属线:  $a_s = (0.724 \sim 0.771) a_0$  (B.0.2-5)

钢绞线:  $a_s = a_0 \times 10^{-6.9X_{ne}}$  (B.0.2-6)

$$Z_m = 0.15 + j0.189 \ln \frac{D_g}{D_m} \quad (\text{B.0.2-7})$$

单地线时:  $D_m = \sqrt[3]{D_{1A} D_{1B} D_{1C}}$  (B.0.2-8)

双地线时:  $D_m = \sqrt[6]{D_{1A} D_{1B} D_{1C} D_{2A} D_{2B} D_{2C}}$  (B.0.2-9)

式中  $Z_s$ ——单位长度的地线阻抗 ( $\Omega/\text{km}$ );

$Z_m$ ——单位长度的相线与地线之间的互阻抗 ( $\Omega/\text{km}$ );

$D$ ——档距的平均长度 (km);

$r_s$ ——单位长度地线的电阻 ( $\Omega/\text{km}$ );

$a_s$ ——地线的将电流化为表面分布后的等值半径 (m);

$X_{ne}$ ——单位长度的内感抗 ( $\Omega/\text{km}$ );

$k$ ——地线的根数;

$D_s$ ——地线之间的距离 (m);

$D_m$ ——地线之间的几何均距 (m);

$D_g$ ——地线对地的等价镜像距离,  $D_g = 80\sqrt{\rho}$  (m),  $\rho$  为大地等值电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )。

2) 当  $n=1$  时, 分流系数  $S_{\Pi}$  可按下列公式计算:

$$S_{\Pi} = 1 - \frac{I_{B(1)}}{I_b} = 1 - \left[ \frac{e^{\beta \cdot s} - e^{-\beta \cdot s}}{e^{\beta(s+1)} - e^{-\beta(s+1)}} \left( 1 - \frac{Z_m}{Z_s} \right) + \frac{Z_m}{Z_s} \right] \quad (\text{B.0.2-10})$$

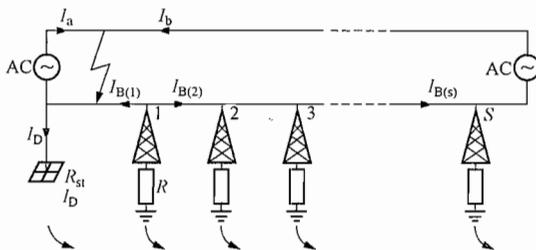


图 B.0.2-1 站内接地故障示意

3) 当  $S > 10$  时,  $S_n$  简化为下式:

$$S_n = 1 - \left[ e^{-\beta} \cdot \left( 1 - \frac{Z_m}{Z_s} \right) + \frac{Z_m}{Z_s} \right] \quad (\text{B. 0. 2-11})$$

2 站外接地故障时分流系数  $S_{D2}$  的计算:

1) 对于站外单相接地故障 (B. 0. 2-2), 不同位置的地线上流过的零序电流可按下式计算:

$$I_{B(n)} = \left[ \frac{e^{\beta(s+1-n)} - e^{-\beta(s+1-n)}}{e^{\beta(s+1)} - e^{-\beta(s+1)}} \left( 1 - \frac{Z_m}{Z_s} \right) + \frac{Z_m}{Z_s} \right] \cdot I_a \quad (\text{F. 0. 2-12})$$

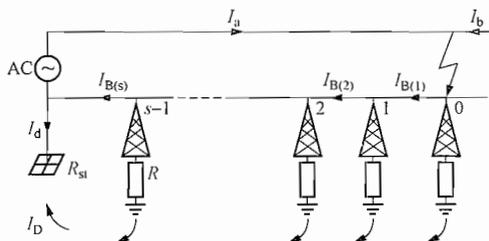


图 B. 0. 2-2 站外接地故障示意

2) 当  $n = S$  时,  $e^{-\beta}$  计算表达式中的  $R_{s1}$  应更换为杆塔接地电阻  $R$ , 分流系数  $S_{D2}$  可按下式计算:

$$S_{D2} = 1 - \frac{I_{B(a)}}{I_a} = 1 - \left[ \frac{e^{\beta} - e^{-\beta}}{e^{\beta(s+1)} - e^{-\beta(s+1)}} \left( 1 - \frac{Z_m}{Z_s} \right) + \frac{Z_m}{Z_s} \right] \quad (\text{B. 0. 2-13})$$

3) 当  $S > 10$  时,  $S_{D2}$  可简化为下式:

$$S_{D2} = 1 - \frac{Z_m}{Z_s} \quad (\text{B. 0. 2-14})$$

B. 0. 3 典型的衰减系数  $D_f$  值可按表 B. 0. 3 中  $t_f$  和  $X/R$  的关系确定。

表 B. 0. 3 典型的衰减系数  $D_f$  值

故障时延 $t_f$ (s)	50Hz 对 应的周期	衰减系数 $D_f$			
		$X/R = 10$	$X \times R = 20$	$X/R = 30$	$X/R = 40$
0.05	2.5	1.2685	1.4172	1.4965	1.5445
0.10	5	1.1479	1.2685	1.3555	1.4172
0.20	10	1.0766	1.1479	1.2125	1.2685
0.30	15	1.0517	1.1010	1.1479	1.1919
0.40	20	1.0390	1.0766	1.1130	1.1479
0.50	25	1.0313	1.0618	1.0913	1.1201
0.75	37.5	1.0210	1.0416	1.0618	1.0816
1.00	50	1.0158	1.0313	1.0467	1.0618

B. 0. 4 在系统单相接地故障电流入地时, 地电位的升高可按下式计算:

$$V = I_G R \quad (\text{B. 0. 4})$$

式中:  $V$ ——接地网地电位升高 (V);

$I_G$ ——经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值 (A);

$R$ ——接地网的工频接地电阻 ( $\Omega$ )。

## 照 明

本章主要依据 GB 50034—2013《建筑照明设计标准》编写。适当编入 CJJ 45—2006《城市道路照明设计标准》有关规定。

### 13.1 照明方式和照明种类

#### 13.1.1 照明方式

照明方式是根据使用场所特点和建筑条件,在满足使用要求条件下降低电能消耗而采取的基本制式。照明方式有以下几种:

(1) 一般照明:为照亮整个场所而设置的照明。工作场所都应设置一般照明。

(2) 分区一般照明:同一场所内的不同区域有不同照度要求时,应采用分区一般照明。

(3) 局部照明:为某些特定的作业部位(如机床操作面、工作台面)较高视觉条件需要而设置的照明。在一个工作场所内不应只采用局部照明。

(4) 混合照明:由一般照明和局部照明组成的照明。对于照度要求高的作业面的密度不大,单靠一般照明来达到其照度要求在经济和节能方面不合理时,应采用混合照明。应用混合照明典型的场所有机械冷加工车间、钳工作业区、机械零件抛光区、仪表加工区等。

(5) 当需要提高特定区域或目标的照度时,宜采用重点照明。

#### 13.1.2 照明种类

建筑物应按需要设置以下种类的照明:

(1) 正常照明:正常情况下使用的照明,工作场所均应设置。

(2) 应急照明:正常照明失效而启用的照明。应急照明包括疏散照明、安全照明、备用照明。

1) 各类应急照明的作用和设置要求。

a. 疏散照明:用于确保疏散通道被有效地辨认和使用的照明。在发生故障或灾害,特别是火灾等时,导致正常照明熄灭,疏散照明能保证人员迅速疏散到安全地带,为此,疏散照明设置应包含以下两方面的内容:

(a) 设置疏散标志灯:指示人们疏散的方向,这种疏散标志灯又包括出口标志灯和指向标志灯两种。

(b) 设置疏散通道照明灯:装在疏散通道(包含疏散楼梯)上的灯,方便人们行走。

b. 安全照明:用于确保处于潜在危险之中的人员安全的照明。安全照明仅在有特别需要的作业部位装设,如圆盘锯作业等场所。

c. 备用照明:用于确保正常活动继续进行的照明。对于正常照明因故障熄灭后,可能造成爆炸、火灾或人身伤亡等严重后果的场所,或停止工作将造成很大影响或经济损失的场所,应设继续工作作用的备用照明。

2) 疏散照明设置的场所和部位。

a. 民用公共建筑、高度大于等于27m的住宅建筑、工业厂房和丙类仓库的下列部位应设置疏散照明：

(a) 封闭楼梯间、防烟楼梯间及其前室、消防电梯间的前室或合用前室、避难走道、避难层（间）；

(b) 公共建筑内的疏散走道；

(c) 观众厅、展览厅、多功能厅和建筑面积大于200m<sup>2</sup>的营业厅、餐厅、演播室等人员密集的场所；

(d) 建筑面积大于100m<sup>2</sup>的地下或半地下公共活动场所；

(e) 人员密集的厂房内的生产场所及疏散走道。

b. 公共建筑、建筑高度大于54m的住宅建筑、高层厂房（库房）和甲、乙、丙类单、多层厂房，应设置灯光疏散指示标志。

c. 下列建筑或场所应在疏散走道和主要疏散路径的地面上增设能保持视觉连续的灯光疏散指示标志或蓄光疏散指示标志：

(a) 总建筑面积大于8000m<sup>2</sup>的建筑；

(b) 总建筑面积大于5000m<sup>2</sup>的地上商店；

(c) 总建筑面积大于500m<sup>2</sup>的地下或半地下商店；

(d) 歌舞娱乐、放映、游艺场所；

(e) 座位数超过1500个的电影院、剧场，座位数超过3000个的体育馆、会堂或礼堂。

3) 备用照明设置的场所。

a. 发生火灾时仍需进行消防作业的消防控制室、消防水泵房、应急发电机房、配电室、防排烟机房等。

b. 交通枢纽，如机场、火车站等。

c. 电视、广播中心、通信中心。

d. 供电、供水、供气中心站。

e. 国家、省市级重要的会议中心、大会堂、礼堂等。

f. 医院的手术室、抢救室等。

g. 国际和国家级比赛的体育场馆、大剧院等。

h. 高等级宾馆、重要的展览馆、美术馆、博物馆等公共场所。

i. 重要的工业厂房，生产停顿可能造成很大的经济损失或设备、财产损失的场所。

(3) 值班照明：非工作时间，为值班而设置的照明。在大面积生产场所以及商场营业厅、体育场馆、剧场、展厅等公共场所，应设值班照明，以作清扫、巡视等用。通常利用正常照明可单独控制的一部分灯作为值班照明。

(4) 警卫照明：用于警戒而安装的照明。在重要的工厂区、库区及其他场所，根据警戒防范的需要，设置警卫照明。

(5) 障碍照明：在可能危及航行安全的建筑物、构筑物上装设的安全标志灯。

1) 在飞机场及航道附近的高耸建筑物以及塔、烟囱等构筑物，对飞机起降可能构成威胁的，应按航空部门的标准或规定装设障碍照明。

2) 在江河湖海等水域中间或侧边伸到水面的建筑物、构筑物，水中的岛礁等障碍物，

对船舶航行容易造成危害的，应按交通部门的标准和规定装设障碍照明。

## 13.2 照度标准和照明质量

### 13.2.1 照度标准

(1) 建筑照明标准规定的照度，除标明者外，均为作业面或参考平面上的维持平均照度。

(2) 照度标准值应按 0.5、1、2、3、5、10、15、20、30、50、75、100、150、200、300、500、750、1000、1500、2000、3000、5000lx 分级。

(3) 符合下列一项或多项条件，作业面或参考平面的照度标准值可按上述 (2) 项的分级提高一级：

- 1) 视觉要求高的精细作业场所，眼睛至识别对象的距离大于 500mm；
- 2) 连续长时间紧张的视觉作业，对视觉器官有不良影响；
- 3) 识别移动对象，要求识别时间短促而辨认困难；
- 4) 视觉作业对操作安全有重要影响；
- 5) 识别对象与背景辨认困难；
- 6) 作业精度要求高，且产生差错会造成很大损失；
- 7) 视觉能力显著低于正常能力；
- 8) 建筑等级和功能要求高。

(4) 符合下列一项或多项条件，作业面或参考平面的照度标准值可按上述 (2) 项的分级降低一级：

- 1) 进行很短时间的作业；
- 2) 作用精度或速度无关紧要；
- 3) 建筑等级和功能要求较低。

(5) 作业面邻近周围照度可低于作业面照度，但不宜低于表 13-2-1 规定的数值。

表 13-2-1 作业面邻近周围照度

作业面照度 (lx)	作业面邻近周围照度 (lx)	作业面照度 (lx)	作业面邻近周围照度 (lx)
$\geq 750$	500	300	200
500	300	$\leq 200$	与作业面照度相同

注 作业面邻近周围指作业面外宽度不小于 0.5m 的区域。

(6) 作业面背景区域一般照明的照度不宜低于作业面邻近周围照度的 1/3。

作业面区域、作业面邻近周围区域和背景区域如图 13-2-1 所示。

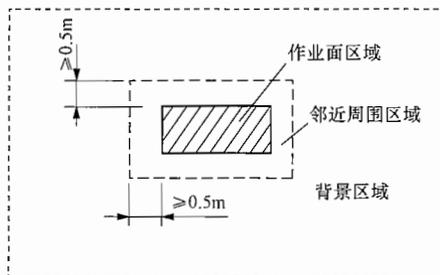


图 13-2-1 作业面区域、作业邻近周围区域和背景区域图

(7) 建筑照明设计的维护系数应按表 13-2-2 选用。

表 13-2-2 建筑照明维护系数

环境污染特征		房间或场所举例	灯具最少擦拭次数 (次/年)	维护系数值
室内	清洁	卧室、办公室、影院、剧场、餐厅、阅览室、教室、病房、客房、仪器仪表装配间、电子元器件装配间、检验室、商店营业厅、体育馆、体育场等	2	0.80
	一般	机场候机厅、候车室、机械加工车间、机械装配车间、农贸市场等	2	0.70
	污染严重	公用厨房、锻工车间、铸工车间、水泥车间等	3	0.60
开敞空间		雨篷、站台	2	0.65

(8) 城市道路照明的维持系数应按表 13-2-3 选取。

表 13-2-3 道路照明的维护系数

灯具防护等级	维护系数	灯具防护等级	维护系数
IP54	0.65	高于 IP54 (如 IP65、IP66)	0.70

(9) 设计照度值与规定的照度标准值的偏差不应超过  $\pm 10\%$ 。对于较小的房间或场所，当装设的灯具数量等于或小于 10 个时，允许适当超过此偏差。

### 13.2.2 照明质量

#### 13.2.2.1 照度均匀度

(1) 建筑照明场所的照度均匀度 ( $U_0$ ) 定义为规定表面上的最小照度 ( $E_{\min}$ ) 与平均照度 ( $E_{av}$ ) 之比

$$U_0 = \frac{E_{\min}}{E_{av}} \quad (13-2-1)$$

公共建筑和工业建筑房间或场所的一般照明的  $U_0$  值不应小于 0.7、0.6 或 0.4，具体数值列于本节照明标准值表内。

(2) 道路照明路面亮度的总均匀度  $U_0$  定义为最小亮度 ( $L_{\min}$ ) 与平均亮度 ( $L_{av}$ ) 之比

$$U_0 = \frac{L_{\min}}{L_{av}} \quad (13-2-2)$$

道路照明路面亮度纵向均匀度 ( $U_L$ ) 定义为同一条车道中心线上最小亮度 ( $L_{\min}$ ) 与最大亮度 ( $L_{\max}$ ) 之比

$$U_L = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \quad (13-2-3)$$

各种级别道路的  $U_0$ 、 $U_L$  值不应小于表 13-2-28 所列的数值。

(3) 体育场馆的照度均匀度。

1) 有电视转播要求的，其比赛时场地照明应符合下列规定：

- 比赛场地水平照度最小值与最大值之比不应小于 0.5；
- 比赛场地水平照度最小值与平均值之比不应小于 0.7；
- 比赛场地主摄像机方向的垂直照度最小值与最大值之比不应小于 0.4；

d. 比赛场地主摄像机方向的垂直照度最小值与平均值之比不应小于 0.6;

e. 比赛场地平均水平照度宜为平均垂直照度的 0.75 ~ 2.0;

f. 观众席前排的垂直照度值不宜小于场地垂直照度的 0.25。

2) 在无电视转播要求的体育场馆, 其比赛时场地的照度均匀度应符合下列规定:

a. 业余比赛时, 场地水平照度最小值与最大值之比不应小于 0.4, 最小值与平均值之比不应小于 0.6;

b. 专业比赛时, 场地水平照度最小值与最大值之比不应小于 0.5, 最小值与平均值之比不应小于 0.7。

### 13.2.2.2 眩光限制

光源、灯具在人们的视野中产生的亮度分布或亮度范围不适宜, 或存在极端的对比, 从而引起人们的不舒适感, 甚至降低观察目标或细部的能力, 就是不舒适眩光和失能眩光。限制眩光的程度是保证照明质量的重要因素之一。

(1) 直接眩光限制。直接眩光是光源、灯具在视野中, 特别是在视线方向所产生的过高亮度或对比而引起的眩光。对于直接型灯具应限定其最小遮光角以限制直接眩光。

1) 灯具遮光角是灯具出光口和灯具内光源最边缘的连线与水平线的夹角, 如图 13-2-2 所示。

2) 长期工作或停留的房间或场所, 选用的直接型灯具的遮光角不应小于表 13-2-4 的规定。

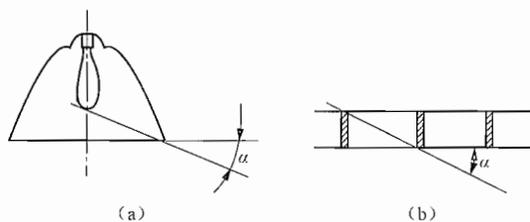


图 13-2-2 灯具遮光角示意图  
(a) 开敞式直接型灯具; (b) 格栅灯具

表 13-2-4 直接型灯具的遮光角

光源平均亮度 ( $\text{kcd}/\text{m}^2$ )	遮光角 ( $^\circ$ )	光源平均亮度 ( $\text{kcd}/\text{m}^2$ )	遮光角 ( $^\circ$ )
1 ~ 20	10	50 ~ 500	20
20 ~ 50	15	$\geq 500$	30

(2) 不舒适眩光评价。

1) 公共建筑和工业建筑的房间应采用统一眩光值 (UGR) 评价; 体育场、馆应采用眩光值 (GR) 评价。

2) UGR 值对应的不舒适眩光的主观感受列于表 13-2-5。

表 13-2-5 UGR 值对应的不舒适眩光的主观感受

UGR 值	不舒适眩光的主观感受	UGR 值	不舒适眩光的主观感受
28	严重眩光, 不能忍受	16	轻微眩光, 可忽略
25	有眩光, 有不舒适感	13	极轻微眩光, 无不舒适感
22	有眩光, 刚好有不舒适感	10	无眩光
19	轻微眩光, 可忍受		

3) UGR 的应用条件。

- a. UGR 适用于立方体房间的一般照明，不适用于间接照明和发光天棚的房间；
  - b. 灯具应为双对称配光；
  - c. 观测位置应在房间纵向和横向两面墙的中点，视线应水平朝前观测，观测者眼睛高度取 1.2m（坐姿）或 1.5m（站姿）。
- 4) 室内照明场所的统一眩光值（UGR）计算。
- a. 当灯具发光部分面积为  $0.005\text{m}^2 < S < 1.5\text{m}^2$  时，统一眩光值（UGR）应按下式计算

$$UGR = 81\lg \frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L_\alpha^2 \cdot \omega}{P^2} \quad (13-2-4)$$

- 式中  $L_b$ ——背景亮度， $\text{cd}/\text{m}^2$ ；  
 $\omega$ ——每个灯具发光部分对观察者眼睛所形成的立体角 [见图 13-2-3 (a)]，sr；  
 $L_\alpha$ ——灯具在观察者眼睛方向的亮度 [见图 13-2-3 (b)]， $\text{cd}/\text{m}^2$ ；  
 $P$ ——每个单独灯具的位置指数。

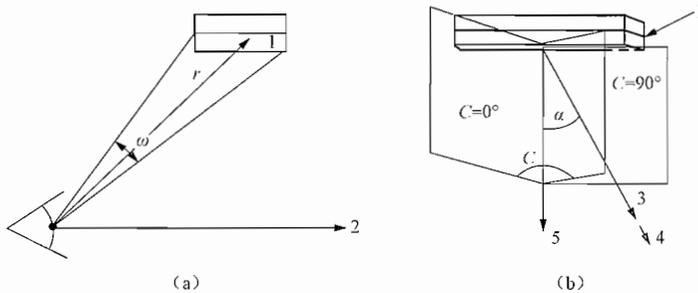


图 13-2-3 统一眩光值计算参数示意图

(a) 灯具与观察者关系示意图；(b) 灯具发光中心与观察者眼睛连线方向示意图

1—灯具发光部分；2—观察者眼睛方向；3—灯具发光中心与观察者眼睛连线；4—观察者；5—灯具发光表面法线

- b. 发光部分面积小于  $0.005\text{m}^2$  的筒灯，UGR 按下列公式计算

$$UGR = 81\lg \frac{0.25}{L_b} \sum \frac{200I_\alpha^2}{r^2 P^2} \quad (13-2-5)$$

$$L_b = \frac{E_i}{\pi} \quad (13-2-6)$$

$$L_\alpha = \frac{I_\alpha}{A \cos \alpha} \quad (13-2-7)$$

$$\omega = \frac{A_p}{r^2} \quad (13-2-8)$$

- 式中  $L_b$ ——背景亮度， $\text{cd}/\text{m}^2$ ；  
 $I_\alpha$ ——灯具发光中心与观察者眼睛连线方向的灯具发光强度，cd；  
 $P$ ——每个单独灯具的位置指数，位置指数应按  $H/R$  和  $T/R$  坐标系（见图 13-2-4）确定；  
 $E_i$ ——观察者眼睛方向的间接照度，lx；  
 $A \cos \alpha$ ——灯具在观察者眼睛方向的投影面积， $\text{m}^2$ ；  
 $\alpha$ ——灯具表面法线与其中心和观察者眼睛连线所夹的角度，(°)；

$A_p$ ——灯具发光部分在观察者眼睛方向的表  
观面积,  $m^2$ ;

$r$ ——灯具发光部分中心到观察者眼睛之间的  
距离,  $m$ 。

5) 体育场馆的  $GR$  计算。体育场馆的眩光值  
( $GR$ ) 应按下列公式计算

$$GR = 27 + 24 \lg \left( \frac{L_{v1}}{L_{ve}^{0.9}} \right) \quad (13-2-9)$$

$$L_{v1} = 10 \sum_{i=1}^n \frac{E_{eyei}}{\theta_i^2} \quad (13-2-10)$$

$$L_{ve} = 0.035 L_{av} \quad (13-2-11)$$

$$L_{av} = E_{horav} \cdot \frac{\rho}{\pi \Omega_0} \quad (13-2-12)$$

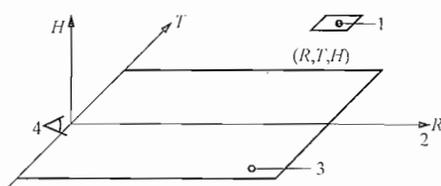


图 13-2-4 以观察者位置为原点的  
位置指数坐标系 ( $R, T, H$ )  
1—灯具中心; 2—视线; 3—水平面; 4—观测者

式中  $L_{v1}$ ——由灯具发出的光直接射向眼睛所产生的光幕亮度,  $cd/m^2$ ;

$L_{ve}$ ——由环境引起直接入射到眼睛的光所产生的光幕亮度,  $cd/m^2$ ;

$E_{eyei}$ ——观察者眼睛上的照度, 该照度是在视线的垂直面上, 由第  $i$  个光源所产生的照  
度,  $lx$ ;

$\theta_i$ ——观察者视线与第  $i$  个光源入射在眼上方所形成的角度, ( $^\circ$ );

$n$ ——光源总数;

$L_{av}$ ——可看到的水平照射场地的平均亮度,  $cd/m^2$ ;

$E_{horav}$ ——照射场地的平均水平照度,  $lx$ ;

$\rho$ ——漫反射时区域的反射比;

$\Omega_0$ ——1 个单位立体角,  $sr$ 。

(3) 防止或减少光幕反射和反射眩光应采用下列措施:

- 1) 应将灯具安装在不易形成眩光的区域内;
- 2) 可采用低光泽度的表面装饰材料;
- 3) 应限制灯具出光口表面发光亮度;
- 4) 墙面的平均照度不宜低于  $50lx$ , 顶棚的平均照度不宜低于  $30lx$ 。

(4) 有视觉显示终端的工作场所, 在与灯具中垂线成  $65^\circ \sim 90^\circ$  范围内的灯具平均亮度  
限值应符合表 13-2-6 的规定。

表 13-2-6 灯具平均亮度限值 ( $cd/m^2$ )

屏幕分类	灯具平均亮度限值	
	屏幕亮度大于 $200cd/m^2$	屏幕亮度小于等于 $200cd/m^2$
亮背景暗字体或图像	3000	1500
暗背景亮字体或图像	1500	1000

### 13.2.2.3 光源颜色

(1) 光源颜色含光源色表和显色性。

1) 光源色表的选择取决于照度水平, 也和室内表面及家具的颜色、气候环境和应用场

所条件等因素有关。通常在低照度场所宜用暖色表，中等照度场所用中间色表，高照度场所用冷色表；另外也可参考在炎热气候条件下宜用冷色表，在寒冷条件下用暖色表，一般情况下用中间色表。

2) 显色性是光源对物体色表的影响，将它与参比光源下的色表相比较而产生。显色性的优劣用显色指数度量。被测光源的显色指数是用它照明某个色样的心理物理色与参比光源照明同一色样的心理物理色符合程度。而取 8 个一组色样的特殊显色指数的平均值，则称作“一般显色指数”，通常称为“显色指数”，符号为  $R_a$ 。

除一般显色指数 ( $R_a$ ) 外，还有 7 个特殊显色指数，标识为  $R_9$  到  $R_{15}$ 。如  $R_9$  为饱和红色， $R_{10}$  为饱和黄色等。

(2) 室内照明光源色表特征及适用场所宜符合表 13-2-7 的规定。

表 13-2-7 光源色表特征及适用场所

相关色温 (K)	色表特征	适用场所
<3300	暖	客房、卧室、病房、酒吧
3300 ~ 5300	中间	办公室、教室、阅览室、商场、诊室、检验室、实验室、控制室、机加工车间、仪表装配
>5300	冷	热加工车间、高照度场所

(3) 长期工作或停留的房间或场所，照明光源的显色指数 ( $R_a$ ) 不应小于 80。在灯具安装高度大于 8m 的工业建筑场所， $R_a$  可低于 80，但必须能够辨别安全色。

(4) 选用同类光源的色容差不应大于 5 SDCM。

(5) 当选用发光二极管光源时，其色度应满足下列要求：

- 1) 长期工作或停留的房间或场所，色温不宜高于 4000K；
- 2) 特殊显色指数  $R_9$  应大于零；
- 3) 在寿命期内发光二极管灯的色品坐标与初始值的偏差在 GB/T 7921—2008《均匀色空间和色差公式》规定的 CIE 1976 均匀色度标尺图中，不应超过 0.007；
- 4) 发光二极管灯具在不同方向上的色品坐标与其加权平均值偏差在 GB/T 7921—2008《均匀色空间和色差公式》规定的 CIE 1976 均匀色度标尺图中，不应超过 0.004。

#### 13.2.2.4 房间各表面反射比和亮度分布

人眼睛观察物体的明暗感觉取决于物体的亮度，而房间内各表面的反射比又关系到视野内空间亮度分布。应该合理选取房间各表面反射比，以使得视野内亮度分布在眼睛能适应的水平上。良好、平衡的适应亮度可以提高视觉敏锐度、对比灵敏度和眼睛的视功能效率；另外，视野内不同亮度分布也影响视觉舒适度，应当避免由于眼睛反复适应调节引起视觉疲劳的过高或过低的亮度对比。

长时间工作的房间各表面反射比宜按表 13-2-8 选取。

表 13-2-8 工作房间表面反射比

表面名称	反射比	表面名称	反射比
顶棚	0.6 ~ 0.9	地面	0.1 ~ 0.5
墙面	0.3 ~ 0.8	作业面	0.2 ~ 0.6

### 13.2.3 照明标准值

(1) 居住建筑、公共建筑、工业建筑的照明标准值列于表 13-2-9~表 13-2-28。各表中的照度标准值应符合本章 13.2.1 节的规定； $UGR$  和  $GR$  值为最高限值； $U_0$  值为最低值； $R_a$  值为最低限值。

表 13-2-9 住宅建筑照明标准值

房间或场所		参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	$R_a$
起居室	一般活动	0.75m 水平面	100	80
	书写、阅读		300*	
卧室	一般活动	0.75m 水平面	75	80
	床头、阅读		150*	
餐厅		0.75m 餐桌面	150	80
厨房	一般活动	0.75m 水平面	100	80
	操作台	台面	150*	
卫生间		0.75m 水平面	100	80
电梯前厅		地面	75	60
走道、楼梯间		地面	50	60
车库		地面	30	60

\* 指混合照明照度。

表 13-2-10 其他居住建筑照明标准值

房间或场所		参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	$R_a$
职工宿舍		地面	100	80
老年人卧室	一般活动	0.75m 水平面	150	80
	床头、阅读		300*	80
老年人起居室	一般活动	0.75m 水平面	200	80
	书写、阅读		500*	80
酒店式公寓		地面	150	80

\* 指混合照明照度。

表 13-2-11 图书馆建筑照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	$UGR$	$U_0$	$R_a$
一般阅览室、开放式阅览室	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
多媒体阅览室	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
老年阅览室	0.75m 水平面	500	19	0.70	80
珍善本、舆图阅览室	0.75m 水平面	500	19	0.60	80
陈列室、目录厅(室)、出纳厅	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
档案库	0.75m 水平面	200	19	0.60	80
书库、书架	0.25m 垂直面	50	—	0.40	80
工作间	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
采编、修复工作间	0.75m 水平面	500	19	0.60	80

表 13-2-12

办公建筑照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$
普通办公室	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
高档办公室	0.75m 水平面	500	19	0.60	80
会议室	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
视频会议室	0.75m 水平面	750	19	0.60	80
接待室、前台	0.75m 水平面	200	—	0.40	80
服务大厅、营业厅	0.75m 水平面	300	22	0.40	80
设计室	实际工作面	500	19	0.60	80
文件整理、复印、发行室	0.75m 水平面	300	—	0.40	80
资料、档案存放室	0.75m 水平面	200	—	0.40	80

注 此表适用于所有类型建筑的办公室和类似用途场所的照明。

表 13-2-13

商店建筑照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$
一般商店营业厅	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
一般室内商业街	地面	200	22	0.60	80
高档商店营业厅	0.75m 水平面	500	22	0.60	80
高档室内商业街	地面	300	22	0.60	80
一般超市营业厅	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
高档超市营业厅	0.75m 水平面	500	22	0.60	80
仓储式超市	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
专卖店营业厅	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
农贸市场	0.75m 水平面	200	25	0.40	80
收款台	台面	500*	—	0.60	80

\* 指混合照明照度。

表 13-2-14

观演建筑照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	
门厅	地面	200	22	0.40	80	
观众厅	影院	0.75m 水平面	100	22	0.40	80
	剧场、音乐厅	0.75m 水平面	150	22	0.40	80
观众休息厅	影院	地面	150	22	0.40	80
	剧场、音乐厅	地面	200	22	0.40	80
排演厅	地面	300	22	0.60	80	
化妆室	一般活动区	0.75m 水平面	150	22	0.60	80
	化妆台	1.1m 高处垂直面	500*	—	—	90

\* 指混合照明照度。

表 13-2-15 旅馆建筑照明标准值

房间或场所		参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$U_s$
客房	一般活动区	0.75m 水平面	75	—	—	80
	床头	0.75m 水平面	150	—	—	80
	写字台	台面	300*	—	—	80
	卫生间	0.75m 水平面	150	—	—	80
中餐厅		0.75m 水平面	200	22	0.60	80
西餐厅		0.75m 水平面	150	—	0.60	80
酒吧间、咖啡厅		0.75m 水平面	75	—	0.40	80
多功能厅、宴会厅		0.75m 水平面	300	22	0.60	80
会议室		0.75m 水平面	300	19	0.60	80
大堂		地面	200	—	0.40	80
总服务台		台面	300*	—	—	80
休息厅		地面	200	22	0.40	80
客房层走廊		地面	50	—	0.40	80
厨房		台面	500*	—	0.70	80
游泳池		水面	200	22	0.60	80
健身房		0.75m 水平面	200	22	0.60	80
洗衣房		0.75m 水平面	200	—	0.40	80

\* 指混合照明照度。

表 13-2-16 医疗建筑照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$
治疗室、检查室	0.75m 水平面	300	19	0.70	80
化验室	0.75m 水平面	500	19	0.70	80
手术室	0.75m 水平面	750	19	0.70	90
诊室	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
候诊室、挂号厅	0.75m 水平面	200	22	0.40	80
病房	地面	100	19	0.60	80
走道	地面	100	19	0.60	80
护士站	0.75m 水平面	300	—	0.60	80
药房	0.75m 水平面	500	19	0.60	80
重症监护室	0.75m 水平面	300	19	0.60	90

表 13-2-17 教育建筑照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$
教室、阅览室	课桌面	300	19	0.60	80
实验室	实验桌面	300	19	0.60	80
美术教室	桌面	500	19	0.60	90

续表

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$
多媒体教室	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
电子信息机房	0.75m 水平面	500	19	0.60	80
计算机教室、电子阅览室	0.75m 水平面	500	19	0.60	80
楼梯间	地面	100	22	0.40	80
教室黑板	黑板面	500*	—	0.70	80
学生宿舍	地面	150	22	0.40	80

\* 指混合照明照度。

表 13-2-18 美术馆建筑照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$
会议报告厅	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
休息厅	0.75m 水平面	150	22	0.40	80
美术品售卖	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
公共大厅	地面	200	22	0.40	80
绘画展厅	地面	100	19	0.60	80
雕塑展厅	地面	150	19	0.60	80
藏画库	地面	150	22	0.60	80
藏画修理	0.75m 水平面	500	19	0.70	90

注 1. 绘画、雕塑展厅的照明标准值中不含展品陈列照明。

2. 当展览对光敏感要求的展品时应满足表 13-2-19 的要求。

表 13-2-19 科技馆建筑照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$
科普教室、实验区	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
会议报告厅	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
纪念品售卖区	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
儿童乐园	地面	300	22	0.60	80
公共大厅	地面	200	22	0.40	80
球幕、巨幕、3D、4D 影院	地面	100	19	0.40	80
常设展厅	地面	200	22	0.60	80
临时展厅	地面	200	22	0.60	80

注 常设展厅和临时展厅的照明标准值中不含展品陈列照明。

表 13-2-20 博物馆建筑陈列室展品照度标准值及年曝光量限值

类别	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	年曝光量 (lx·h/a)
对光特别敏感的展品：纺织品、织绣品、绘画、纸质物品、彩绘、陶（石）器、染色皮革、动物标本等	展品面	≤50	≤50000

续表

类别	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	年曝光量 (lx·h/a)
对光敏感的展品: 油画、蛋清画、不染色皮革、角制品、骨制品、象牙制品、竹木制品和漆器等	展品面	≤150	≤360 000
对光不敏感的展品: 金属制品、石质器物、陶瓷器、宝玉石器、岩矿标本、玻璃制品、搪瓷制品、珐琅器等	展品面	≤300	不限制

- 注 1. 陈列室一般照明应按展品照度值的 20% ~ 30% 选取;  
 2. 陈列室一般照明 UGR 不宜大于 19。  
 3. 一般场所  $R_a$  不应低于 80, 辨色要求高的场所,  $R_a$  不应低于 90。

表 13-2-21 博物馆建筑其他场所照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$
门厅	地面	200	22	0.40	80
序厅	地面	100	22	0.40	80
会议报告厅	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
美术制作室	0.75m 水平面	500	22	0.60	90
编目室	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
摄影室	0.75m 水平面	100	22	0.60	80
熏蒸室	实际工作面	150	22	0.60	80
实验室	实际工作面	300	22	0.60	80
保护修复室	实际工作面	750 *	19	0.70	90
文物复制室	实际工作面	750 *	19	0.70	90
标本制作室	实际工作面	750 *	19	0.70	90
周转库房	地面	50	22	0.40	80
藏品库房	地面	75	22	0.40	80
藏品提看室	0.75m 水平面	150	22	0.60	80

\* 指混合照明的照度标准值。其一般照明的照度值应按混合照明照度的 20% ~ 30% 选取。

表 13-2-22 会展建筑照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$
会议室、洽谈室	0.75m 水平面	300	19	0.60	80
宴会厅	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
多功能厅	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
公共大厅	地面	200	22	0.40	80
一般展厅	地面	200	22	0.60	80
高档展厅	地面	300	22	0.60	80

表 13-2-23 交通建筑照明标准值

房间或会所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$
售票台	台面	500 *	—	—	80

续表

房间或会所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	
问讯处	0.75m 水平面	200	—	0.60	80	
候车（机、船）室	普通	地面	150	22	0.40	80
	高档	地面	200	22	0.60	80
贵宾室休息室	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	
中央大厅、售票大厅	地面	200	22	0.40	80	
海关、护照检查	工作面	500	—	0.70	80	
安全检查	地面	300	—	0.60	80	
换票、行李托运	0.75m 水平面	300	19	0.60	80	
行李认领、到达大厅、出发大厅	地面	200	22	0.40	80	
通道、连接区、扶梯、换乘厅	地面	150	—	0.40	80	
有棚站台	地面	75	—	0.60	60	
无棚站台	地面	50	—	0.40	20	
走廊、楼梯、平台、流动区域	普通	地面	75	25	0.40	60
	高档	地面	150	25	0.60	80
地铁站厅	普通	地面	100	25	0.60	80
	高档	地面	200	22	0.60	80
地铁进站厅	普通	地面	150	25	0.60	80
	高档	地面	200	22	0.60	80

\* 指混合照明照度。

表 13-2-24

金融建筑照明标准值

房间及场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	
营业大厅	地面	200	22	0.60	80	
营业柜台	台面	500	—	0.60	80	
客户服务中心	普通	0.75m 水平面	200	22	0.60	80
	贵宾室	0.75m 水平面	300	22	0.60	80
交易大厅	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	
数据中心主机房	0.75m 水平面	500	19	0.60	80	
保管库	地面	200	22	0.40	80	
信用卡作业区	0.75m 水平面	300	19	0.60	80	
自助银行	地面	200	19	0.60	80	

注 本表适用于银行、证券、期货、保险、电信、邮政等行业，也适用于类似用途（如供电、供水、供气）的营业厅、柜台和客服中心。

表 13-2-25 无电视转播的体育建筑照明标准值

运动项目	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)			$R_a$		眩光指数 (GR)		
		训练和娱乐	业余比赛	专业比赛	训练	比赛	训练	比赛	
篮球、排球、手球、室内足球	地面	300	500	750	65	65	35	30	
体操、艺术体操、技巧、蹦床、举重	台面								
速度滑冰	冰面								
羽毛球	地面	300	750/500	1000/500	65	65	35	30	
乒乓球、柔道、摔跤、跆拳道、武术	台面	300	500	1000	65	65	35	30	
冰球、花样滑冰、冰上舞蹈、短道速滑	冰面								
拳击	台面	500	1000	2000	65	65	35	30	
游泳、跳水、水球、花样游泳	水面	200	300	500	65	65	—	—	
马术	地面								
射击、射箭	射击区、弹(箭)道区	地面	200	200	300	65	65	—	—
	靶心	靶心垂直面	1000	1000	1000				
击剑	地面	300	500	750	65	65	—	—	
	垂直面	200	300	500					
网球	室外	地面	300	500/300	750/500	65	65	55	50
	室内							35	30
场地自行车	室外	地面	200	500	750	65	65	55	50
	室内							35	30
足球、田径	地面	200	300	500	20	65	55	50	
曲棍球	地面	300	500	750	20	65	55	50	
棒球、垒球	地面	300/200	500/300	750/500	20	65	55	50	

注 1. 当表中同一格有两个值时，“/”前为内场的值，“/”后为外场的值。  
2. 表中规定的照度应为比赛场地参考平面上的使用照度。

表 13-2-26

有电视转播的体育建筑照明标准值

运动项目	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)			$R_a$		$T_{cp}$ (K)		眩光指数 (GR)	
		国家、国际比赛	重大国际比赛	HDTV	国家、国际比赛, 重大国际比赛	HDTV	国家、国际比赛, 重大国际比赛	HDTV		
篮球、排球、手球、室内足球、乒乓球	地面 1.5m	1000	1400	2000	$\geq 80$	$\geq 80$	$\geq 4000$	$\geq 5500$	30	
体操、艺术体操、技术、蹦床、柔道、摔跤、跆拳道、武术、举重	台面 1.5m									
击剑	台面 1.5m									
游泳、跳水、水球、花样游泳	水面 0.2m									
冰球、花样滑冰、冰上舞蹈、短道速滑、速度滑冰	冰面 1.5m									
羽毛球	地面 1.5m	1000/750	1400/1000	2000/1400					30	
拳击	台面 1.5m	1000	2000	2500					30	
射箭	射击区、箭道区	地面 1.0m	500	500	500					—
	靶心	靶心垂直面	1500	1500	2000					—
场地自行车	室内	1000	1400	2000						30
	室外									50
足球、田径、曲棍球	地面 1.5m									50
马术	地面 1.5m									—
网球	室内	1000/750	1400/1000	2000/1400	$\geq 80$	$> 80$	$\geq 4000$	$\geq 5500$		30
	室外									50
棒球、垒球	地面 1.5m									50
射击	射击区、弹道区	地面 1.0m	500	500	500	$\geq 80$	$\geq 3000$	$\geq 4000$		—
	靶心	靶心垂直面	1500	1500	2000					

- 注 1. HDTV 指高清晰度电视; 其特殊显色指数  $R_a$  应大于零。  
 2. 表中同一格有两个值时, “/” 前为内场的值, “/” 后为外场的值。  
 3. 除射击、射箭外, 均为比赛场地主摄像机方向的使用照度值。

13

表 13-2-27

工业建筑一般照明标准值

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	备注	
1 机、电工业							
机械加工	粗加工	0.75m 水平面	200	22	0.40	60	可另加局部照明
	一般加工公差 $\geq 0.1\text{mm}$	0.75m 水平面	300	22	0.60	60	应另加局部照明
	精密加工公差 $< 0.1\text{mm}$	0.75m 水平面	500	19	0.70	60	应另加局部照明

续表

房间或场所		参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	备注
机电仪表装配	大件	0.75m 水平面	200	25	0.60	80	可另加局部照明
	一般件	0.75m 水平面	300	25	0.60	80	可另加局部照明
机电仪表装配	精密	0.75m 水平面	500	22	0.70	80	应另加局部照明
	特精密	0.75m 水平面	750	19	0.70	80	应另加局部照明
电线、电缆制造		0.75m 水平面	300	25	0.60	60	—
线圈绕制	大线圈	0.75m 水平面	300	25	0.60	80	—
	中等线圈	0.75m 水平面	500	22	0.70	80	可另加局部照明
	精细线圈	0.75m 水平面	750	19	0.70	80	应另加局部照明
线圈浇注		0.75m 水平面	300	25	0.60	80	—
焊接	一般	0.75m 水平面	200	—	0.60	60	—
	精密	0.75m 水平面	300	—	0.70	60	—
钣金		0.75 水平面	300	—	0.60	60	—
冲压、剪切		0.75m 水平面	300	—	0.60	60	—
热处理		地面至 0.5m 水平面	200	—	0.60	20	—
铸造	熔化、浇铸	地面至 0.5m 水平面	200	—	0.60	20	—
	造型	地面至 0.5m 水平面	300	25	0.60	60	—
精密铸造的制模、脱壳		地面至 0.5m 水平面	500	25	0.60	60	—
锻工		地至 0.5m 水平面	200	—	0.60	20	—
电镀		0.75m 水平面	300	—	0.60	80	—
喷漆	一般	0.75m 水平面	300	—	0.60	80	—
	精细	0.75m 水平面	500	22	0.70	80	—
酸洗、腐蚀、清洗		0.75m 水平面	300	—	0.60	80	—
抛光	一般装饰性	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	应防频闪
	精细	0.75m 水平面	500	22	0.70	80	应防频闪
复合材料加工、铺叠、装饰		0.75m 水平面	500	22	0.60	80	—
机电修理	一般	0.75m 水平面	200	—	0.60	60	可另加局部照明
	精密	0.75m 水平面	300	22	0.70	60	可另加局部照明

## 2 电子工业

整机类	整机厂	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
	装配厂房	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	应另加局部照明
元器件类	微电子产品及集成电路	0.75m 水平面	500	19	0.70	80	—
	显示器件	0.75m 水平面	500	19	0.70	80	可根据工艺要求降低照度值
	印制线路板	0.75m 水平面	500	19	0.70	80	—
	光伏组件	0.75m 水平面	300	19	0.60	80	—
	电真空器件、机电组件等	0.75m 水平面	500	19	0.60	80	—

续表

房间或场所		参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	备注
电子材料类	半导体材料	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
	光纤、光缆	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
酸、碱、药液及粉配制		0.75m 水平面	300	—	0.60	80	—
3 纺织、化纤工业							
纺织	选毛	0.75m 水平面	300	22	0.70	80	可另加局部照明
	清棉、和毛、梳毛	0.75m 水平面	150	22	0.60	80	—
	前纺：梳棉、并条、粗纺	0.75m 水平面	200	22	0.60	80	—
	纺纱	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
	织布	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
织袜	穿综筘、缝绉、量呢、检验	0.75m 水平面	300	22	0.70	80	可另加局部照明
	修补、剪毛、染色、印花、裁剪、熨烫	0.75m 水平面	300	22	0.70	80	可另加局部照明
化纤	投料	0.75m 水平面	100	—	0.60	80	—
	纺丝	0.75m 水平面	150	22	0.60	80	—
	卷绕	0.75m 水平面	200	22	0.60	80	—
	平衡间、中间贮存、干燥间、废丝间、油剂高位槽间	0.75m 水平面	75	—	0.60	60	—
	集束间、后加工间、打包间、油剂调配间	0.75m 水平面	100	25	0.60	60	—
	组件清洗间	0.75m 水平面	150	25	0.60	60	—
	拉伸、变形、分级包装	0.75m 水平面	150	25	0.70	80	操作面可另加局部照明
	化验、检验	0.75m 水平面	200	22	0.70	80	可另加局部照明
	聚合车间、原液车间	0.75m 水平面	100	22	0.60	60	—
4 制药工业							
制药生产：配制、清洗灭菌、超滤、制粒、压片、混匀、烘干、灌装、轧盖等		0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
制药生产流转通道		地面	200	—	0.40	80	—
更衣室		地面	200	—	0.40	80	—
技术夹层		地面	100	—	0.40	40	—
5 橡胶工业							
炼胶车间		0.75m 水平面	300	—	0.60	80	—
压延压出工段		0.75m 水平面	300	—	0.60	80	—
成型裁断工段		0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
硫化工段		0.75m 水平面	300	—	0.60	80	—

续表

房间或场所		参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	备注
6 电力工业							
火电厂锅炉房		地面	100	—	0.60	60	—
发电机房		地面	200	—	0.60	60	—
主控室		0.75m 水平面	500	19	0.60	80	—
7 钢铁工业							
炼铁	高炉炉顶平台、各层平台	平台面	30	—	0.60	60	—
	出铁场、出铁机室	地面	100	—	0.60	60	—
	卷扬机室、碾泥机室、煤气清洗配水室	地面	50	—	0.60	60	—
炼钢及连铸	炼钢主厂房和平台	地面、平台面	150	—	0.60	60	需另加局部照明
	连铸浇注平台、切割区、出坯区	地面	150	—	0.60	60	需另加局部照明
	精整清理线	地面	200	25	0.60	60	—
轧钢	棒线材主厂房	地面	150	—	0.60	60	—
	钢管主厂房	地面	150	—	0.60	60	—
	冷轧主厂房	地面	150	—	0.60	60	需另加局部照明
	热轧主厂房、钢坯台	地面	150	—	0.60	60	—
	加热炉周围	地面	50	—	0.60	20	—
	垂绕、横剪及纵剪机组	0.75m 水平面	150	25	0.60	80	—
	打印、检查、精密分类、验收	0.75m 水平面	200	22	0.70	80	—
8 制浆造纸工业							
备料		0.75m 水平面	150	—	0.60	60	—
蒸煮、选洗、漂白		0.75m 水平面	200	—	0.60	60	—
打浆、纸机底部		0.75m 水平面	200	—	0.60	60	—
纸机网部、压榨部、烘缸、压光、卷取、涂布		0.75m 水平面	300	—	0.60	60	—
复卷、切纸		0.75m 水平面	300	25	0.60	60	—
选纸		0.75m 水平面	500	22	0.60	60	—
碱回收		0.75m 水平面	200	—	0.60	60	—
9 食品及饮料工业							
食品	糕点、糖果	0.75m 水平面	200	22	0.60	80	—
	肉制品、乳制品	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
	饮料	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
啤酒	糖化	0.75m 水平面	200	—	0.60	80	—
	发酵	0.75m 水平面	150	—	0.60	80	—
	包装	0.75m 水平面	150	25	0.60	80	—

13

续表

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	备注	
10 玻璃工业							
备料、退火、熔制	0.75m 水平面	150	—	0.60	60	—	
窑炉	地面	100	—	0.60	20	—	
11 水泥工业							
主要生产车间（破碎、原料粉磨、烧成、水泥粉磨、包装）	地面	100	—	0.60	20	—	
储存	地面	75	—	0.60	60	—	
输送走廊	地面	30	—	0.40	20	—	
粗坯成型	0.75m 水平面	300	—	0.60	60	—	
12 皮革工业							
原皮、水浴	0.75m 水平面	200	—	0.60	60	—	
转鼓、整理、成品	0.75m 水平面	200	22	0.60	60	可另加局部照明	
干燥	地面	100	—	0.60	20	—	
13 卷烟工业							
制丝车间	一般	0.75m 水平面	200	—	0.60	80	—
	较高	0.75m 水平面	300	—	0.70	80	—
卷烟、接过滤嘴、包装、滤棒成型车间	一般	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
	较高	0.75m 水平面	500	22	0.70	80	—
膨胀烟丝车间	0.75m 水平面	200	—	0.60	60	—	
贮叶间	1.0m 水平面	100	—	0.60	60	—	
贮丝间	1.0m 水平面	100	—	0.60	60	—	
14 化学、石油工业							
厂区内经常操作的区域，如泵、压缩机、阀门、电操作柱等	操作位高度	100	—	0.60	20	—	
装置区现场控制和检测点，如指示仪表、液位计等	测控点高度	75	—	0.70	60	—	
人行通道、平台、设备顶部	地面或台面	30	—	0.60	20	—	
装卸站	装卸设备顶部和底部操作位	操作位高度	75	—	0.60	20	—
	平台	平台	30	—	0.60	20	—
电缆夹层	0.75m 水平面	100	—	0.40	60	—	
避难间	0.75m 水平面	150	—	0.40	60	—	
压缩机厂房	0.75m 水平面	150	—	0.60	60	—	
15 木业和家具制造							
一般机器加工	0.75m 水平面	200	22	0.60	60	应防频闪	
精细机器加工	0.75m 水平面	500	19	0.70	80	应防频闪	

续表

房间或场所		参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	备注
锯木区		0.75m 水平面	300	25	0.60	60	应防频闪
模型区	一般	0.75m 水平面	300	22	0.60	60	—
	精细	0.75m 水平面	750	22	0.70	60	—
胶合、组装		0.75m 水平面	300	25	0.60	60	—
磨光、异形细木工		0.75m 水平面	750	22	0.70	80	—

注 需增加局部照明的作业面,增加的局部照明照度值宜按该场所一般照明照度值的1.0~3.0倍选取。

表 13-2-28 公共和工业建筑通用房间或场所照明标准值

房间或场所		参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	备注
门厅	普通	地面	100	—	0.40	60	—
	高档	地面	200	—	0.60	80	—
走廊、流动区域、楼梯间	普通	地面	50	25	0.40	60	—
	高档	地面	100	25	0.60	80	—
自动扶梯		地面	150	—	0.60	60	—
厕所、盥洗室、浴室	普通	地面	75	—	0.40	60	—
	高档	地面	150	—	0.60	80	—
电梯前厅	普通	地面	100	—	0.40	60	—
	高档	地面	150	—	0.60	80	—
休息室		地面	100	22	0.40	80	—
更衣室		地面	150	22	0.40	80	—
储藏室		地面	100	—	0.40	60	—
餐厅		地面	200	22	0.60	80	—
公共车库		地面	50	—	0.60	60	—
公共车库检修间		地面	200	25	0.60	80	可另加局部照明
试验室	一般	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	可另加局部照明
	精细	0.75m 水平面	500	19	0.60	80	可另加局部照明
检验	一般	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	可另加局部照明
	精细,有颜色要求	0.75m 水平面	750	19	0.60	80	可另加局部照明
计量室,测量室		0.75m 水平面	500	19	0.70	80	可另加局部照明
电话站、网络中心		0.75m 水平面	500	19	0.60	80	—
计算机站		0.75m 水平面	500	19	0.60	80	防光幕反射
变、配电站	配电装置室	0.75m 水平面	200	—	0.60	80	—
	变压器室	地面	100	—	0.60	80	—
电源设备室、发电机室		地面	200	25	0.60	80	—

续表

房间或场所		参考平面及其高度	照度标准值 (lx)	UGR	$U_0$	$R_a$	备注
电梯机房		地面	200	25	0.60	80	—
控制室	一般控制室	0.75m 水平面	300	22	0.60	80	—
	主控制室	0.75m 水平面	500	19	0.60	80	—
动力站	风机房、空调机房	地面	100	—	0.60	60	—
	泵房	地面	100	—	0.60	60	—
	冷冻站	地面	150	—	0.60	60	—
	压缩空气站	地面	150	—	0.60	60	—
	锅炉房、煤气站的操作层	地面	100	—	0.60	60	锅炉水位表照度不小于 50lx
仓库	大件库	1.0m 水平面	50	—	0.40	20	—
	一般件库	1.0m 水平面	100	—	0.60	60	—
	半成品库	1.0m 水平面	150	—	0.60	80	—
	精细件库	1.0m 水平面	200	—	0.60	80	货架垂直照度不小于 50lx
车辆加油站		地面	100	—	0.60	60	油表表面照度不小于 50lx

(2) 机动车交通道路、人行道路照明标准值列于表 13-2-29 ~ 表 13-2-31。

表 13-2-29

机动车交通道路照明标准值

级别	道路类型	路面亮度			路面照度		眩光限制 阈值增量 $TI$ (%) 最大 初始值	环境比 $SR$ 最小值
		平均亮度 $L_{av}$ ( $cd/m^2$ ) 维持值	总均匀度 $U_0$ 最小值	纵向均匀度 $U_L$ 最小值	平均照度 $E_{av}$ (lx) 维持值	均匀度 $U_E$ 最小值		
I	快速路、主干路（含迎宾路、通向政府机关和大型公共建筑的主要道路，位于市中心或商业中心的道路）	1.5/2.0	0.4	0.7	20/30	0.4	10	0.5
II	次干路	0.75/1.0	0.4	0.5	10/15	0.35	10	0.5
III	支路	0.5/0.75	0.4	—	8/10	0.3	15	—

注 1. 表中所列的平均照度仅适用于沥青路面。若为水泥混凝土路面，其平均照度值可相应降低约 30%。根据平均亮度系数可求出沥青路面和水泥混凝土路面分别需要的平均照度。

2. 表中各项数值仅适用于干燥路面。

3. 表中对每一级道路的平均亮度和平均照度给出了两档标准值，“/”的左侧为低档值，右侧为高档值。中小城市可取低档值；交通控制系统和道路分隔设施完善的道路宜取低档值，反之取高档值。

表 13-2-30 道路交会区照明标准值

交会区类型	路面平均照度 $E_{av}$ (lx), 维持值	照度均匀度 $U_E$	眩光限制
主干路与主干路交会	30/50	0.4	在驾驶员观看灯具的方位角上, 灯具在 80° 和 90° 高度角方向上的光强分别不得超过 30cd/1000lm 和 10cd/1000lm
主干路与次干路交会			
主干路与支路交会			
次干路与次干路交会	20/30		
次干路与支路交会			
支路与支路交会	15/20		

注 1. 灯具的高度角是在现场安装使用姿态下度量。

2. 表中对每一类道路交会区的路面平均照度给出了两档标准值, “/” 的左侧为低档照度值, 右侧为高档照度值。按表 13-2-29 的注 3 选取高档或低档值。

表 13-2-31 人行道路照明标准值

夜间行人流量	区域	路面平均照度 $E_{av}$ (lx), 维持值	路面最小照度 $E_{min}$ (lx), 维持值	最小垂直照度 $E_{vmin}$ (lx), 维持值
流量大的道路	商业区	20	7.5	4
	居住区	10	3	2
流量中的道路	商业区	15	5	3
	居住区	7.5	1.5	1.5
流量小的道路	商业区	10	3	2
	居住区	5	1	1

注 最小垂直照度为道路中心线上距路面 1.5m 高度处、垂直于路轴的平面的两个方向上的最小照度。

(3) 应急照明的照度标准值应符合下列规定:

1) 备用照明的照度标准值应符合下列规定:

a. 发生火灾时需进行消防作业、救援的场所, 如消防控制室、消防水泵房、应急发电房、配电室、防排烟机房等, 不应低于正常照明的照度。

b. 医院手术室、急诊抢救室、重症监护室、应维持正常照明的照度。

c. 其他场所, 除另有规定外, 不应低于其一般照明照度标准值的 10%。

2) 安全照明的照度标准值应符合下列规定:

a. 医院手术室应维持正常照明的 30% 照度。

b. 其他场所不应低于该场所一般照明照度标准值的 10%, 且不低于 15lx。

3) 疏散照明的地面最低水平照度值应符合下列规定:

a. 疏散走道不应低于 1lx。

b. 人员密集场所、避难层(间) 不应低于 3lx。

c. 医院病房楼、手术部的避难间不应低于 10lx。

d. 楼梯间、前室或合用前室、避难走道不应低于 5lx。

e. 寄宿制幼儿园和小学的寝室、老年公寓、医院等需要救援人员协助疏散的场所不应低于 5lx (平均水平照度)。

f. 疏散通道中心线的照度最大值与最小值之比不应大于 40:1。

注：疏散照明照度的规定中 a. ~d. 项是按 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》编写，而 e.、f. 项是按 GB 50034—2013 编写；两份国标的规定不统一，应予特别注意。如疏散照明照度，按 GB 50016—2014 规定为最低水平照度值，而 GB 50034—2013 则规定为平均水平照度值。

### 13.3 光源、电器附件及灯具的选择

本节主要依据 GB 50034—2013，和相关的电源、镇流器、灯具的产品标准，如 GB 7000.1—2015《灯具 第1部分：一般要求试验》等，以及《照明设计手册》而编写。

#### 13.3.1 光源的选择

(1) 光源选择原则。

- 1) 产品应符合现行的国家和行业标准；
- 2) 光源的发光效能高；
- 3) 显色性满足使用要求，色温相宜；
- 4) 光源使用寿命长；
- 5) 启点性能好，符合使用要求，调光性能好；
- 6) 技术经济综合性能优，性价比高。

(2) 电光源的分类。

1) 按电光源的发光机理的分类见表 13-3-1。

2) 固态光源的分类和型号列于表 13-3-2。

表 13-3-1 电光源分类

电光源	固体发光光源	热辐射光源	白炽灯	
			卤钨灯	
		电致发光光源	场致发光灯 (EL)	
			半导体发光二极管 (LED)	
	气体放电发光光源	辉光放电灯	氖灯	
			霓虹灯	
		弧光放电灯	低压气体放电灯	荧光灯
				低压钠灯
高压气体放电灯 (HID)			荧光高压汞灯	
			高压钠灯	
		金属卤化物灯		
		氙灯		

表 13-3-2 固态光源的分类和型号

固态光源分类		型号的组成			相关标准
		第1部分	第2部分：额定电压	第3部分：额定功率	
普通照明用 LED 模块		SSL			GB/T 24823
普通照明用 自镇流 LED 灯	非定向	BPZ			GB/T 24908
	反射型	BPZ			GB/T 29296

续表

固态光源分类	型号的组成			相关标准
	第1部分	第2部分: 额定电压	第3部分: 额定功率	
普通照明用单端 LED 灯	BD			—
装饰照明用 LED 灯	BZ			GB/T 24909
道路照明用 LED 灯	BDZ			GB/T 24907
普通照明用双端 LED 灯	BS			—
普通照明用自镇流双端 LED 灯	BZS			—
普通照明用低压自镇流 LED 灯	BZA			—
普通照明用低压非自镇流 LED 灯	BA			—
普通照明用电压 50V 以下 OLED 平板灯	BYA			—

### (3) 各类光源的主要参数和比较。

#### 1) 各类光源主要特性及优缺点。

a. 普通照明用白炽灯: 优点是显色性高, 点亮快、可靠, 调光方便; 缺点是光效很低, 寿命短。2007 年开始, 世界各国从节能环保出发, 提出淘汰白炽灯, 2012~2014 年欧美地区国家、澳大利亚等先后决定将普通照明用白炽灯退出照明领域, 我国将于 2016 年年底最终退出。

b. 卤素灯: 是白炽灯的改进型光源, 保持了白炽灯的优点, 提高了光效和寿命, 但仍然是低效光源。

c. 荧光灯: 按形状不同分为直管形(双端)荧光灯、紧凑型荧光灯(CFL)和环形荧光灯。直管荧光灯按管径不同, 又分为 T12( $\phi 38\text{mm}$ )、T8( $\phi 26\text{mm}$ )和 T5( $\phi 16\text{mm}$ )等; CFL 灯也有管径粗细的区别, 如 T2、T3 等; 环形荧光灯也有粗细管之别。按使用荧光粉种类可分为卤磷酸钙荧光灯和新型优质的稀土三基色荧光粉两种。

从技术发展看, 要求优质、高效是主要目标, 所以越来越多地使用三基色荧光粉(其显色指数  $R_a$  达 80 以上、光效更高)取代卤磷酸钙粉, 用细管径(如 T8、T5)取代粗管(T12), 因前者光效高, 用材少, 有明显的节能环保的优势。

荧光灯光效高、显色性好、使用寿命长、点亮较快、性价比高, 是广泛应用的优质高效光源。特别是细管径三基色直管荧光灯, 有更好的节能效果。

d. 金属卤化物灯(简称金卤灯): 由于金属卤化物的不同, 有很多品种, 应用最广的是铟钠灯和钠铊铟灯, 光效高、显色性较好, 单灯功率大, 但起点慢, 不适合调光。近年来发展的陶瓷金卤灯, 比普通金卤灯光效更高, 显色指数可达 80~85, 是一种优质的光源。

e. 荧光高压汞灯(简称汞灯): 光效中, 寿命较长, 显色性不佳, 点亮慢, 不适合调光。

f. 高压钠灯: 光效高、寿命长, 显色性差, 点亮慢, 不适合调光。

g. 电磁感应灯: 是一种高频无极灯, 频率达 2.65MHz。有一种低频无极灯, 频率为 250kHz。另有一种更高频的微波硫灯, 频率达 2450MHz。其特点是无电极, 使用寿命长, 点亮快, 光效较高, 显色性好。

h. 半导体发光二极管(LED 灯): 白光 LED 作为照明光源是从 1996 年开始, 近 20 年来由于其突出优点, 发展极快。LED 灯光效高, 寿命长, 点亮快捷, 可靠, 调光性能优异。

由于还在发展之中，存在不少问题，如颜色质量不佳（色温偏高，色偏大）、表面亮度高、眩光比较大，部分产品谐波大、功率因数低、光衰大等问题有待解决。还有一种有机发光二极管（OLED）正在研制中，具有面发光特点。

2) 各类光源的主要技术参数的比较列于表 13-3-3。

表 13-3-3 各类光源的主要技术参数比较

光源类别		光效 (lm/W)	$R_a$	平均寿命 ( $\times 10^3$ h)	点亮性能及 调光性能	性价比
普通照明用白炽灯		8~11	~99	1	好	低
卤素灯		13~20	~99	2	好	低
三基色荧光灯	直管 (T8、T5)	65~105	80~85	12~20	起点较快，可调光	高
	CFL	40~70	80	8~10	起点较快，可调光	中
金卤灯		60~95	65	8~10	起点慢，不可调	中
陶瓷金卤灯		65~110	80~85	10~15	—	较高
高压钠灯		80~140	23~25	24~32		高
荧光高压汞灯		25~55	35~40	8~10		低
电磁感应灯		60~80	70~80	50~60	点亮快	中
微波硫灯		90~110	70~80	50~60	点亮快	中
LED 灯		70~120	60~90	25~50	点亮快，调光好	中

注 1. 表中参数仅供参考，作比较用。

2. LED 灯的光效是整灯光效，即含灯具效率在内。

(4) 照明设计应按下列条件选择光源：

- 1) 灯具安装高度较低的房间宜采用细管直管形三基色荧光灯。
- 2) 商店营业厅的一般照明宜采用细管直管形三基色荧光灯、小功率陶瓷金属卤化物灯；重点照明宜采用小功率陶瓷金属卤化物灯、发光二极管灯。
- 3) 灯具安装高度较高的场所，应按使用要求，采用金属卤化物灯、高压钠灯或高频大功率细管直管荧光灯。
- 4) 旅馆建筑的客房宜采用发光二极管灯或紧凑型荧光灯。
- 5) 照明设计不应采用普通照明白炽灯，对电磁干扰有严格要求且其他光源无法满足的特殊场所除外。

6) 应急照明应选用能快速点亮的光源。

### 13.3.2 电器附件选择

#### 13.3.2.1 镇流器的选择

(1) 镇流器的类别。气体放电灯的镇流器可分为两大类，即电感镇流器和电子镇流器，电感镇流器又包括普通型和节能型。

(2) 节能电感镇流器和电子镇流器的比较。

1) 节能电感镇流器的特点：

a. 节能：通过优化铁心材料和改进工艺等措施降低自身功耗，比普通电感镇流器功耗降低 20%~50%，使灯的总输入功率（灯管和镇流器功率和）下降 5%~10%。

- b. 运行可靠, 使用寿命长。
- c. 用工频点灯, 存在频闪效应的缺点。
- d. 自然功率因数低, 大多为 0.35 ~ 0.55。
- e. 消耗铜、钢等金属材料多, 质量大。

#### 2) 电子镇流器的特点:

a. 节能效果更好: 电子镇流器除自身功耗更低以外, 它多使用 20 ~ 60kHz 频率的电流供给灯管, 使灯管的光效比工频点灯时提高近 10% (有些金卤灯电子镇流器使用几百赫兹频率除外), 因此, 灯的总输入功率有较大降低。以 T8 型 36W 荧光灯为例, 使用高额电子镇流器时, 灯管输入功率降为 32W, 加之自身功耗低, 综合能耗比用普通电感镇流器降低约 20%, 比节能电感镇流器降低 12% ~ 14%。

b. 无频闪, 发光较稳定。

c. 功率因数高: 功率因数与谐波有直接关系, 高次谐波会使功率因数下降。按谐波限值的国家标准 GB 17625.1—2012《电磁兼容 限值 谐波电流发射限值》的规定, 功率在 25W 以上的气体放电灯, 其谐波限制比较严, 功率因数可达 0.9 以上; 但对于 25W 及以下的放电灯, 谐波限制很宽, 其功率因数可能很低, 甚至低于 0.6。

d. 其他优点: 噪声低, 节省铜、钢材料, 可以实现调光。

e. 有的电子镇流器谐波含量高, 特别是功率不大于 25W 的放电灯, GB 17625.1—2012 规定的最大限值很大, 三次谐波达 86%, 设计选用时必须要有相应措施。

f. 产品水平和质量参差不齐, 有些产品谐波含量高, 流明系数低, 使用寿命短。

#### (3) 荧光灯镇流器的选用。

1) 不应选用功耗大的普通电感镇流器。

2) 自镇流荧光灯应配用电子镇流器。

3) 直管荧光灯应配用电子式或节能电感型镇流器, 前者更适用于连续紧张的视觉作业、青少年作业以及要求无频闪的作业场所、要求特别安静的场所。应注意, 在同一建筑内不应大量采用单灯功率不大于 25W 的电子镇流器, 如果必须采用时, 配电线路及其中性线截面应做专门设计, 其设计要求见 13.4.6 (2)。

#### (4) HID 灯镇流器的选用。

1) 应选用节能电感镇流器; 功率较小的 HID 灯, 可选用电子镇流器。

2) 金属卤化物灯品种很多, 其镇流器应与灯配套, 如钨钠灯应配用 CWA 型漏磁升压式镇流器。

3) 在电压偏差较大的场所宜配用恒功率型镇流器, 有利于节能和灯的使用寿命, 也有利于照度的稳定。

4) 对于城市道路照明 (每杆只装一只光源时) 和类似要求降低照度的场所, 宜配用双功率镇流器, 在需要降低照度的时段, 可降一半左右照度。

### 13.3.2.2 其他电器附件

(1) 触发器和起动器。HID 灯的起动应配套触发器, 触发器有内触发和外触发两种, 触发器应和光源配套, 其安装位置离光源的距离应符合产品的要求。

(2) 电容器。各种气体放电灯配用电感镇流器时, 其功率因数很低, 通常需要增加补偿电容器, 应按设计的功率因数要求, 选取合适容量的电容器。

### 13.3.3 灯具的选择和布置

#### (1) 灯具选择原则。

- 1) 灯具产品应符合现行国家标准的规定；
- 2) 控制眩光好，符合使用场所要求；
- 3) 灯具效率高；
- 4) 配光合理，和房间高度及尺寸相适应；
- 5) 灯具防护等级符合场所环境条件；
- 6) 经济性良好，考虑初建投资及长期运行费用合理；
- 7) 外形美观，与建筑物和环境相协调。

#### (2) 灯具分类。

1) 按防固体异物和防水等级分类。GB 7000.1—2015《灯具一般安全要求与试验》（等同采用 IEC 60598—1:2014）关于灯具防护等级分类由“IP”和两个特征数字组成：第一位数是指对固体异物的防护等级，见表13-3-4；第二位数是指对水的防护等级，见表13-3-5。

表 13-3-4 对固体异物的防护等级

第一位特征数字	防 护 等 级	
	简短说明	含 义
0	无防护	没有专门的防护
1	防大于 50mm 的固体异物	人体某一大面积部分，如手（但不能防止故意的接近），直径大于 50mm 的固体
2	防大于 12mm 的固体异物	手指或长度不超过 80mm 的类似固体。直径大于 12mm 的固体异物
3	防大于 2.5mm 的固体异物	直径或厚度大于 2.5mm 的工具、金属丝等，直径大于 2.5mm 的固体异物
4	防大于 1mm 的固体异物	厚度大于 1mm 的金属丝或细带，直径大于 1mm 的固体异物
5	防尘	不能完全防止尘埃进入，但进入量不能达到妨碍设备正常工作的程度
6	尘密	无尘埃进入

注 按照 GB/T 14048.1—2008《低压开关设备和控制设备 总则》附录，第一位特征数字为“2”的说明为防大于 12.5mm 的固体异物。

表 13-3-5 对水的防护等级

第二位特征数字	防 护 等 级	
	简短说明	含 义
0	无防护	没有专门防护
1	防滴水	滴水（垂直滴水）应无有害影响
2	向上倾斜 15°防滴水	当外壳从正常位置向上倾斜 15°时，垂直滴水应无有害影响
3	防淋水	与垂直面成 60°范围以内的淋水应无有害影响
4	防溅水	从任何方向向外壳溅水应无有害影响

续表

第二位特征数字	防护等级	
	简短说明	含义
5	防喷水	用喷嘴以任何方向朝外壳喷水应无有害影响
6	防猛烈海浪	猛烈海浪或强烈喷水时, 进入外壳水不应达到有害的量
7	防浸水	以规定压力和时间将外壳浸入水中时, 进入的水不应达到有害的量
8	防潜水	设备应适于按制造厂规定的条件长期潜水

2) 按照防触电保护型式分类。为了保证电气安全和灯具的正常工作, 灯具的所有带电部件(包括导线、接头、灯座等)必须用绝缘物或外加遮蔽的方法将它们保护起来, 保护的方法与程度影响到灯具的使用方法和使用环境。这种保护人身安全的措施称为防触电保护。

GB 7000.1—2002《灯具一般安全要求与试验》规定灯具防触电保护的类型分为0、I、II、III等4类, 见表13-3-6。

表13-3-6 灯具防触电保护分类

灯具防触电保护类型	灯具主要性能	应用说明
0类	易触及外壳和带电体之间依靠基本绝缘	适用于干燥、尘埃少的场所, 安装在维护方便位置上的灯具, 如吊灯、吸顶灯等通用固定式灯具
I类	除基本绝缘外, 在易触及的外壳上有接地措施, 使之在基本绝缘失效时不致有危险	用于安装在高处, 维护不方便位置上的金属外壳灯具, 如投光灯、路灯、工厂灯等
II类	不仅依靠基本绝缘, 而且具有附加安全措施, 例如双重绝缘或加强绝缘, 但没有保护接地的措施或依赖安装条件	人体经常接触, 需要经常移动、容易跌倒或要求安全程度特别高的灯具
III类	防触电保护依靠电源电压为安全特低电压, 并且不会产生高于SELV的电压(交流不大于50V)	接于安全超低压电源的可移动式灯、手提灯等

注 额定电压超过250V的或在恶劣条件下使用的或轨道安装的灯具均不应划分为0类。

IEC 60598-1:2003《灯具 第1部分 安全要求与试验》已经取消了0类灯具, 等同于该标准的国家标准GB 7000.1—2007(同名称)也取消了0类灯具, 并已于2009年1月1日实施。考虑到旧的设施的某种需要, GB 7000.1—2007中仍保留了0类灯具的试验要求。最新修订的GB 7000.1—2015未作变化。

为了落实取消0类灯具的规定, 在GB 50034—2013《建筑照明设计标准》中又明确规定: 各类场所严禁采用触电防护的类别为0类的灯具。

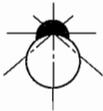
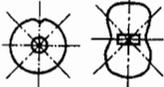
由于II类和III类灯具应用较少, 实际上绝大多数灯具为I类, 包括工业建筑、公共建筑, 以至居住建筑场所, 都是这样。

3) 按灯具的安装表面材料分类。一般灯具不适宜于直接安装在易燃材料表面。按GB

7000.1—2015（等同采用 IEC 60598-1:2014）的规定：如灯具不适宜直接安装在可燃材料表面的，应有专门的符号标记（由制造厂标出）；如无此标记的，可直接安装在可燃材料表面。

4) 室内灯具按上下空间的光通分布比划分为 5 种类型，其名称和上下半球光通比列于表 13-3-7。

表 13-3-7 室内灯具类型划分

型号	名称	光通比 (%)		光强分布
		上半球	下半球	
A	直接型	0 ~ 10	100 ~ 90	
B	半直接型	10 ~ 40	90 ~ 60	
C	直接—间接型 (均匀扩散)	40 ~ 60	60 ~ 40	
D	半间接型	60 ~ 90	40 ~ 10	
E	间接型	90 ~ 100	10 ~ 0	

5) 按直接型灯具的光强在下半球的分布，可以有多种光强分布曲线。英国的 BZ 分类分为 10 种类型，并可用数学式表示灯具向下中垂线方向 ( $0^\circ$ ) 的光强  $I_0$  与其他方向 (与中垂线成  $\theta$  角) 的光强  $I_\theta$  的关系，10 种光强分布的函数表达式如下，其对应的光强分布曲线 (即配光曲线) 如图 13-3-1 所示。

$$\text{BZ1: } I_\theta = I_0 \cos^4 \theta$$

$$\text{BZ6: } I_\theta = I_0 (1 + 2 \cos \theta)$$

$$\text{BZ2: } I_\theta = I_0 \cos^3 \theta$$

$$\text{BZ7: } I_\theta = I_0 (2 + \cos \theta)$$

$$\text{BZ3: } I_\theta = I_0 \cos^2 \theta$$

$$\text{BZ8: } I_\theta = I_0$$

$$\text{BZ4: } I_\theta = I_0 \cos^{1.5} \theta$$

$$\text{BZ9: } I_\theta = I_0 (1 + \sin \theta)$$

$$\text{BZ5: } I_\theta = I_0 \cos \theta$$

$$\text{BZ10: } I_\theta = I_{90} \sin \theta$$

光强分布曲线以极坐标表示。以极坐标原点为中心，将灯具在空间各方向的发光强度用矢量表示，连接各矢量的端点，即形成光强分布曲线。

大多数灯具的形状是轴对称的旋转体，所以光强分布是轴对称的，通过灯具轴线一个平面上的光强分布曲线，来表示灯具在整个空间的光强分布，如图 13-3-2 (a) 所示；对于

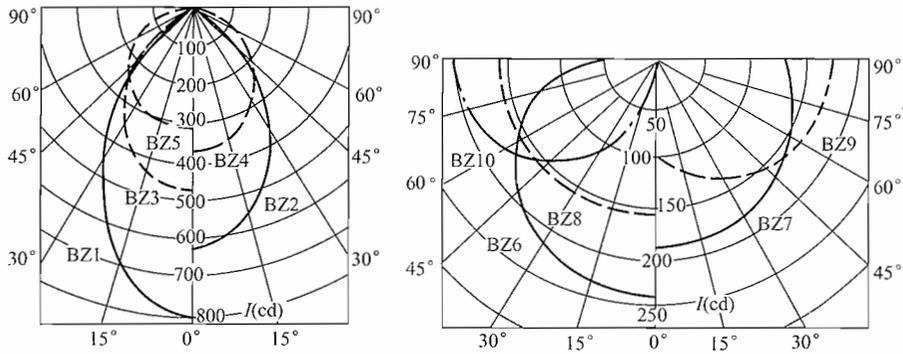


图 13-3-1 BZ 分类的光强分布曲线

非轴对称旋转体的灯具，如直管荧光灯具，其发光强度的空间分布是不对称的，因此需要若干个测光平面的光强分布曲线来表示，通常取两个面，即纵向（ $C=90^\circ$ ）和横向（ $C=0^\circ$ ），必要时取第三个面（ $C=45^\circ$ ），如图 13-3-2（b）所示。

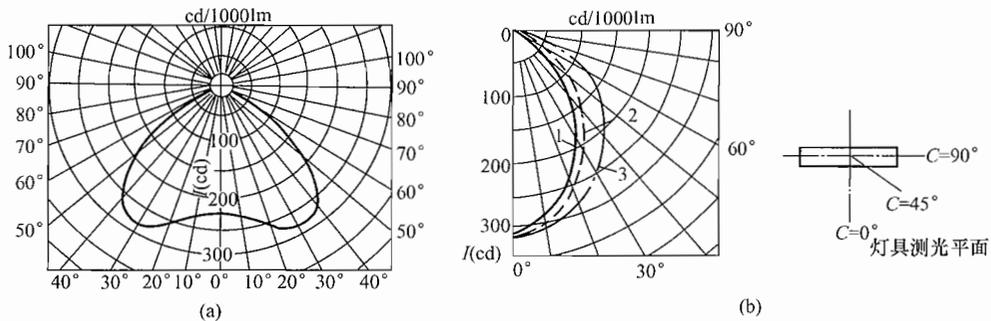


图 13-3-2 灯具的配光曲线

(a) 旋转轴对称灯具；(b) 长条形灯具  
1— $C=0^\circ$ 曲线；2— $C=45^\circ$ 曲线；3— $C=90^\circ$ 曲线

为了便于对灯具的光强分布特性进行比较，曲线的光强值都是按光通量为 1000lm 给出的，因此，实际光强值应是曲线上表示的光强值乘以灯具中光源实际光通量与 1000 之比值。

6) 按 1/2 照度角对灯具的分类。各类配光类型及 1/2 照度角  $\theta$  列于表 13-3-8。这个分类方法主要是说明照度的均匀度原则，引出最大允许距高比。

表 13-3-8 按 1/2 照度角对灯具的分类

分类名称	1/2 照度角 $\theta$	$L/h$ (灯具安装距离/灯具安装高度)
特窄照型	$\theta < 14^\circ$	$L/h < 0.5$
窄照型	$14^\circ \leq \theta < 19^\circ$	$0.5 \leq L/h < 0.7$
中照型	$19^\circ \leq \theta < 27^\circ$	$0.7 \leq L/h < 1.0$
广照型	$27^\circ \leq \theta < 37^\circ$	$1.0 \leq L/h < 1.5$
特广照型	$\theta > 37^\circ$	$1.5 \leq L/h$

表 13-3-8 中 1/2 照度角  $\theta$  指灯具下方水平面上 Q 点照度为正下方 P 点照度值一半，

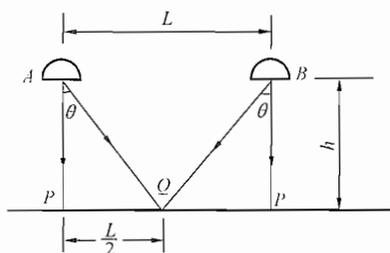


图 13-3-3 1/2 照度角及最大允许距高比的含义

Q 点与光中心的连线和 P 点与光中心的连线之间的夹角。灯具这样布置时，被照面上即可获得均匀照度。在这种条件下的灯具安装距离  $L$  和灯具安装高度  $h$  之比 ( $L/h$ ) 就是灯具的最大允许距高比。1/2 照度角及最大允许距高比的含义如图 13-3-3 所示。

7) 投光灯的分类。投光灯均以光束角的大小进行分类。光束角指的是灯具 1/10 最大光强之间的夹角。

按光束角的大小将投光灯分为 7 类，见表 13-3-9。

表 13-3-9

按照投光灯的光束角分类

光束类别	光束角 ( $^{\circ}$ )	最低光束角效率 (%)	适用场所
特窄光束	10 ~ 18	35	远距离照明、细高建筑立面照明
窄光束	18 ~ 29	30 ~ 36	足球场四角布灯照明、垒球场、细高建筑立面照明
中等光束	29 ~ 46	34 ~ 45	中等高度建筑立面照明
中等宽光束	46 ~ 70	38 ~ 50	较低高度建筑立面照明
宽光束	70 ~ 100	42 ~ 50	篮球场、排球场、广场、停车场
特宽光束	100 ~ 130	46	低矮建筑立面照明、货场、建筑工地
超宽光束	> 130	50	低矮建筑立面照明

8) 道路照明灯具按防眩光要求，可分为截光型、半截光型和非截光型三类，其要求如下：

a. 截光型灯具：灯具的最大光强方向与灯具向下垂直轴夹角为  $0^{\circ} \sim 65^{\circ}$ ， $90^{\circ}$  角和  $80^{\circ}$  角方向上的光强最大允许值分别为  $10\text{cd}/1000\text{lm}$  和  $30\text{cd}/1000\text{lm}$  的灯具；且不管光源光通量的大小，其在  $90^{\circ}$  角方向上的光强最大值不得超过  $1000\text{cd}$ 。

b. 半截光型灯具：灯具的最大光强方向与灯具向下垂直轴夹角为  $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ， $90^{\circ}$  角和  $80^{\circ}$  角方向上的光强最大允许值分别为  $50\text{cd}/1000\text{lm}$  和  $100\text{cd}/1000\text{lm}$  的灯具；且不管光源光通量的大小，其在  $90^{\circ}$  角方向上的光强最大值不得超过  $1000\text{cd}$ 。

c. 非截光型灯具：灯具的最大光强方向不受限制， $90^{\circ}$  角方向上的光强最大值不得超过  $1000\text{cd}$  的灯具。

(3) 灯具效率。是在相同使用条件下，灯具发出的总光通量与灯具内所有光源发出的总光通量之比，也称灯具光输出比。

按 GB 50034—2013《建筑照明设计标准》规定，选用的灯具效率不应低于表 13-3-10 ~ 表 13-3-15 所列值。应当注意的是，标准规定的这些灯具效率是最低允许值，并非优化值，应力求选用更高效率的灯具。

表 13-3-10

直管形荧光灯灯具的效率

%

灯具出光口形式	敞开式	保护罩（玻璃或塑料）		格栅
		透明	棱镜	
灯具效率	75	70	55	65

表 13-3-11 紧凑型荧光灯筒灯灯具的效率 %

灯具出光口形式	敞开式	保护罩	格栅
灯具效率	55	50	45

表 13-3-12 小功率金属卤化物灯筒灯灯具的效率 %

灯具出光口形式	敞开式	保护罩	格栅
灯具效率	60	55	50

表 13-3-13 高强度气体放电灯 (HID) 灯具的效率 %

灯具出光口形式	敞开式	格栅或透光罩
灯具效率	75	60

表 13-3-14 发光二极管筒灯灯具的效能 lm/W

色温	2700K		3000K		4000K	
	格栅	保护罩	格栅	保护罩	格栅	保护罩
灯具效能	55	60	60	65	65	70

表 13-3-15 发光二极管平面灯灯具的效能 lm/W

色温	2700K		3000K		4000K	
	反射式	直射式	反射式	直射式	反射式	直射式
灯具效能	60	65	65	70	70	75

(4) 灯具选择。照明设计中选择灯具应满足使用功能和照明质量要求, 提高能效, 又要有符合场所环境条件的防护等级, 还要便于安装、维护, 综合经济性良好 (包括初建费及运行维护费用低) 等。主要要求如下:

1) 限制眩光。

a. 室内场所应选表面亮度较低和遮光角符合要求的灯具。

b. 城市快速路、主干路必须选用截光型或半截光型灯具, 次干路应选用半截光型灯具, 支路宜选用半截光型灯具。

2) 提高能效。

a. 选择灯具效率高的灯具。

b. 选择光通维持率好的灯具。

c. 在满足限制眩光的条件下, 尽量选择直接型灯具, 只有在一些高等级的公共场所, 当视觉要求不高且空间亮度要求较高时 (如机场候机厅、高档宾馆大堂等), 可以选用一部分均匀扩散型, 半间接型或间接型灯具。

3) 选择配光适宜的灯具。为了提高光的利用率和满足照度均匀度要求, 应按房间的室形指数 (RI) 选择灯具的配光。RI 的表达式如下

$$RI = \frac{2A}{hl} \quad (13-3-1)$$

表达房间室形状况的另一个参数是室空间比（RCR），其表达式如下

$$RCR = \frac{5hl}{2A} = \frac{2.5hl}{A} = \frac{5}{RI} \quad (13-3-2)$$

上两式中  $A$ ——房间地面面积， $m^2$ ；

$h$ ——灯具离工作面高度，等于灯具离地高度减工作面高度， $m$ ；

$l$ ——房间周长， $m$ 。

按  $RI$  值（或  $RCR$  值）选择灯具配光，可参照表 13-3-16。

表 13-3-16 按室形指数  $RI$ （或  $RCR$ ）选择灯具配光

$RI$	$RCR$	灯具配光	对应的距高比 ( $L/h$ )
约 5.0~1.7	约 1~3	宽	~1.0~1.6
约 1.7~0.85	约 3~6	中	~0.8~1.0
约 0.85~0.5	约 6~10	窄	~0.5~0.8

注 每个灯具的最大允许距高比应由制造厂给出，其值和灯具配光相关。

4) 按场所环境条件和使用要求选择灯具。

a. 特别潮湿场所，应采用相应防护措施的灯具；

b. 有腐蚀性气体或蒸汽场所，应采用相应防腐要求的灯具，可参见表 7-3-6 和表 7-3-7；

c. 高温场所，宜采用散热性能好、耐高温的灯具；

d. 多尘埃的场所，应采用防护等级不低于 IP5X 的灯具；

e. 在室外的场所，应采用防护等级不低于 IP54 的灯具；

f. 装有锻锤、大型桥式吊车等振动、摆动较大场所应有防振和防脱落措施；

g. 易受机械损伤、光源自行脱落可能造成人员伤害或财物损失场所应有防护措施；

h. 有爆炸危险场所应按本书 1.5.1 选择；

i. 在火灾危险环境，灯具的防护等级不应低于 IP4X；有可燃粉尘或纤维的，不低于 IP5X。

j. 有洁净度要求的场所，应采用不易积尘、易于擦拭的洁净灯具，并应满足洁净场所的相关要求；

k. 需防止紫外线照射的场所，如博物馆中对光敏感的展品陈列室，应采用隔紫外线灯具或无紫外线光源。

(5) 灯具布置。

1) 灯具布置应与建筑结构条件相适应，考虑梁、屋架及吊顶的布置和位置等因素。

2) 灯具的间距 ( $L$ ) 适宜，应与灯具的配光相适应，使布灯的实际距高比 ( $L/h$ ) 不超过所选灯具的最大允许距高比，以符合照度均匀度要求。

3) 应按照房间或场所的生产设备、工作台的布置，保持作业面照度的要求，区别对待非作业面、通道的不同照度要求。

4) 装有高大设备的生产场所、机房、库房（如锻造车间、空调机房、锅炉房、配电室、超市、图书库等），应按设备、机柜、货柜、货架的位置布灯，以保证灯光照亮作业面，避免光线被设备、机柜、管道遮挡。

5) 灯具布置位置应考虑安全维修(如变压器室、开关柜室等)的条件,和方便维修的条件(如大空间、自动扶梯、楼梯间顶部)。

## 13.4 照明配电及控制

### 13.4.1 照明电压

(1) 照明电压选择。

1) 一般照明光源的电源电压应采用 220V; 1500W 及以上的高强度气体放电灯的电源电压宜采用 380V。

2) 安装在水下的灯具应采用安全特低电压供电,其交流电压值不应大于 12V,无纹波直流供电不应大于 30V。

3) 当移动式 and 手提式灯具采用 III 类灯具时,应采用安全特低电压 (SELV) 供电,其电压限值应符合下列规定:

- a. 在干燥场所交流不大于 50V,无纹波直流不大于 120V;
- b. 在潮湿场所,交流不大于 25V,无纹波直流不大于 60V。

(2) 电压质量要求。照明灯具输入端的电压不宜大于光源的额定电压的 105%,且不低于下列数值:

- 1) 一般工作场所不宜低于其额定电压的 95%。
- 2) 当远离变电所的小面积一般工作场所难以满足 1) 要求时,可为 90%。
- 3) 应急照明和用安全特低电压 (SELV) 供电的照明不宜低于其额定电压的 90%。
- 4) 城市道路照明不宜低于其额定电压的 90%。

### 13.4.2 照明供电电源

(1) 供照明用的配电变压器的设置应符合下列规定:

- 1) 当电力设备无大功率冲击性负荷时,照明和电力宜共用变压器。
- 2) 当电力设备有大功率冲击性负荷时,照明宜与冲击性负荷接自不同变压器;当需接自同一变压器时,照明应由专用馈电线供电。
- 3) 当照明安装功率较大或有谐波含量较大时,宜采用照明专用变压器。

(2) 应急照明的供电应符合下列规定:

1) 疏散照明的应急电源宜采用蓄电池(或干电池)装置,或蓄电池(或干电池)与供电系统中有效地独立于正常照明电源的专用馈电线路的组合,或采用蓄电池(或干电池)装置与自备发电机组组合的方式。

2) 安全照明的应急电源应和该场所的供电线路分别接自不同变压器或不同馈电干线,必要时可采用蓄电池组供电。

3) 备用照明的应急电源宜采用供电系统中有效地独立于正常照明电源的专用馈电线路或自备发电机组。

### 13.4.3 照明配电系统

(1) 照明配电宜采用放射式和树干式结合的系统。

(2) 三相配电干线的各相负荷宜平衡分配,最大相负荷不宜大于三相负荷平均值的 115%,最小相负荷不宜小于三相负荷平均值的 85%。

(3) 正常照明单相分支回路的电流不宜大于 16A,所接光源数或发光二极管灯具数不

宜超过 25 个；当连接建筑装饰性组合灯具时，回路电流不宜大于 25A，光源数不宜超过 60 个；连接高强度气体放电灯的单相分支回路的电流不宜大于 25A。

(4) 电源插座不宜和普通照明灯接在同一分支回路。

(5) 在电压偏差较大的场所，宜设置稳压装置。

(6) 使用电感镇流器的气体放电灯应在灯具内设置电容补偿，荧光灯功率因数不应低于 0.9，高强气体放电灯功率因数不应低于 0.85。

(7) 在气体放电灯的频闪效应对视觉作业有影响的场所，应采用下列措施之一：

1) 采用高频电子镇流器。

2) 相邻灯具分接在不同相序。

#### 13.4.4 照明配电系统的接地

(1) 建筑物照明配电系统的接地方式应与该建筑整个配电系统统一考虑，一般宜采用 TN-S 或 TN-C-S 系统，不应采用 TN-C 接地系统。

(2) 城市道路照明的接地方式，按 CJJ 45—2006《城市道路照明设计标准》规定宜采用 TN-S 或 TT 接地系统；而新修订的 CJJ 45—2015 规定应采用 TT 或 TN-S 接地系统，因为国际标准要求户外装置应采用 TT 系统。我国的行业标准正在逐步向国际标准靠拢。

所以，道路照明应采用 TT 接地系统。如有困难时，可采用 TN-S 系统，但应有一定的措施，如应采用剩余电流动作保护器（RCD）作为接地故障防护。

(3) 当采用 I 类灯具时，灯具的外露可导电部分应可靠接地。

(4) 当照明装置采用安全特低电压供电时，应采用安全隔离变压器，且二次侧不应接地。

#### 13.4.5 照明配电系统的保护

(1) 所有照明配电线路应装设短路保护、过负荷保护和间接接触防护（接地故障防护）。

(2) 短路保护和过负荷保护宜采用断路器或熔断器作为保护电器。当采用 TN 接地系统时，该保护电器可兼作接地故障防护；当不能满足在规定时间内切断电源要求时，应增加剩余电流动作保护器（RCD）作为接地故障防护。当采用 TT 系统时，应选用 RCD 作为接地故障防护。

(3) 保护电器应装设在每段配电回路和末端回路的首端，以及树干式线路分支处，不应安装在配电回路的末端（即照明配电箱的进线处）；照明配电箱的进线处应装设隔离开关。

(4) 各种保护的技术要求和保护电器的技术参数应按本书 7.3 节的要求确定。

#### 13.4.6 照明配电线路导体选择

(1) 导体选择。

1) 照明分支线路和插座回路应选用铜芯绝缘线。

2) 照明配电线路宜选用铜芯绝缘线或铜芯电缆。

3) 疏散照明的线路和消防设施有关场所（如消防控制室）的备用照明的线路，应满足发生火灾时连续供电的需要。

(2) 导体截面积选择。

1) 导体截面积选择应符合下列要求：

a. 导体载流量（计入敷设方式及环境条件）不应小于计算电流。

b. 线路电压降应满足灯端电压要求 [符合本书 13.4.1 (2) 的规定]。

c. 导体应满足动稳定与热稳定要求。

d. 导体最小截面积应满足机械强度的要求。绝缘导线穿管敷设或在槽盒内敷设时,铜芯不小于  $1.5\text{mm}^2$ ; 铝芯不小于  $10\text{mm}^2$ 。

e. 照明负荷稳定且长时间工作(如地下铁路站;地下商场、超市)的线路,宜按经济电流密度选择。

2) 主要供给气体放电灯和 LED 灯的三相四线制配电线路,其中性线(N线)截面积应满足不平衡电流及谐波电流的要求,且不应小于相线截面积。

3) 当三次谐波电流较大时,配电线路及中性线截面积选择。供给气体放电灯的线路,存在一定的谐波电流,通常最大的和影响最显著的是三次谐波电流,因为它在中性线上叠加,当三相平衡时,中性线三次谐波电流为相线的 3 倍。当三次谐波电流为基波电流的 33% 以下时,按相线电流(含谐波电流)选择导线截面积;当超过 33% 时,则应按中性线电流选择截面积,计算电流应除以校正系数。其选择要求和校正系数列于表 13-4-1。

表 13-4-1 按三次谐波电流选导线截面积

相电流中三次谐波分量 (%)	校正系数		相电流中三次谐波分量 (%)	校正系数	
	按相线电流选截面积	按中性线电流选截面积		按相线电流选截面积	按中性线电流选截面积
0~15	1.0		33~45		0.86
15~33	0.86		>45		1.0

注 本表适用于中性线与相线等截面积的 4 芯或 5 芯电缆及穿管导线,以 3 芯电缆或穿管线的载流量为基础,即把整个回路的导体视为一个综合发热体考虑。

三次谐波在中性线中产生的电流  $I'_N$  按下式计算

$$I'_N = 3I_c I_3 \quad (13-4-1)$$

三次谐波叠加在相线后的相线电流  $I'_c$  按下式计算

$$I'_c = I_c \sqrt{1 + (I_3)^2} \quad (13-4-2)$$

上两式中  $I_c$ ——不考虑谐波时相线的计算电流, A;

$I_3$ ——3 次谐波电流为基波电流的百分比。

为了说明实际应用和计算方法,特举例如下。

【例 13-4-1】 三相四线制配电线路,计算电流为 39A,三相平衡,采用铜芯 PVC 绝缘 4 芯电缆,试计算三次谐波含量为 0%、20%、40%、50% 和 86% 时的电缆截面积。

解:不同含量的三次谐波电流时导体截面积的计算和选择见表 13-4-2。

表 13-4-2 不同含量的三次谐波电流时导体截面积的计算和选择

三次谐波电流为基波电流的百分比 (%)	选择截面积的计算电流 (A)		PVC 绝缘 4 芯电缆	
	按相线电流	按中性线电流	截面积 ( $\text{mm}^2$ )	载流量 (A)
0	39		6	41
20	$\frac{\sqrt{39^2 + (39 \times 0.2)^2}}{0.86} = 46.2$		10	57
40		$\frac{39 \times 0.4 \times 3}{0.86} = 54.4$	10	57

续表

三次谐波电流为基波电流的百分比 (%)	选择截面积的计算电流(A)		PVC 绝缘 4 芯电缆	
	按相线电流	按中性线电流	截面积 (mm <sup>2</sup> )	载流量 (A)
50		$\frac{39 \times 0.5 \times 3}{1.0} = 58.5$	16	76
86		$\frac{39 \times 0.86 \times 3}{1.0} = 100.6$	35	118

### 13.4.7 照明控制

(1) 公共建筑和工业建筑的走廊、楼梯间、门厅等公共场所的照明，宜按建筑使用条件和天然采光状况采取分区、分组控制措施。

(2) 公共场所应采用集中控制，并按需要采取调光或降低照度的控制措施。

(3) 旅馆的每间（套）客房应设置节能控制总开关；楼梯间、走道的照明，除疏散照明外，宜采用自动调节照度等节能措施。

(4) 住宅建筑共用部位的照明，应采用延时自动熄灭或自动降低照度等节能措施。当应急疏散照明采用节能自熄开关时，应采取消防时强制点亮的措施。

(5) 除设置单个灯具的房间外，每个房间照明控制开关不宜少于 2 个。

(6) 当房间或场所装设两列或多列灯具时，宜按下列方式分组控制：

- 1) 生产场所宜按车间、工段或工序分组。
- 2) 在有可能分隔的场所，宜按每个有可能分隔的场所分组。
- 3) 电化教室、会议厅、多功能厅、报告厅等场所，宜按靠近或远离讲台分组。
- 4) 除上述场所外，所控灯列可与侧窗平行。

(7) 有条件的场所，宜采用下列控制方式：

- 1) 可利用天然采光的场所，宜随天然光照度变化自动调节照度。
- 2) 办公室的工作区域，公共建筑的楼梯间、走道等场所，可按使用需求自动开关灯或调光。

3) 地下车库宜按使用需求自动调节照度。

4) 门厅、大堂、电梯厅等场所，宜采用夜间定时降低照度的自动控制装置。

(8) 大型公共建筑宜按使用需求采用适宜的自动（含智能控制）照明控制系统。

(9) 城市道路照明控制。

1) 应根据所在地区的地理位置（纬度）和季节变化合理确定开关灯时间，并根据天空亮度修正。

2) 黄昏时天然光照度宜为 15lx 时开启路灯，清晨天然光照度为 20lx（对次干路和支路）或 30lx（对快速路和主干路）时关灯。

3) 道路照明应采用集中遥控方式，有条件时最好采用光控和时控相结合的控制方式，所有情况都应具有集中手动控制功能。

4) 道路照明同一电杆装有两只光源时，半夜时应能关闭一个，只装一个光源时，宜采用功率转换控制（如双功率镇流器等方式）；采用 LED 灯时，宜采取变亮度的调节方式。

(10) 城市夜景照明控制：

- 1) 应具备平日、一般节日、重大节日开灯的多种控制模式。

2) 应能分区、分建筑物集中控制, 或自动定时控制。

(11) 应急照明控制。

1) 各类应急照明应能在正常照明熄灭后, 按规定时间自动点亮。

2) 应急照明中的疏散照明, 以及消防控制中心等的备用照明应与消防系统联动控制。

3) 疏散照明不应装设就地控制开关, 如必须装设时, 应有应急时强制接通点亮的措施。

## 13.5 照度计算

### 13.5.1 用利用系数法计算平均照度

(1) 特点和应用范围。利用系数法是用于计算灯具均匀布置的房间或场所的平均照度, 该方法计入了由灯具内光源发出的光直接投射到工作面的光通量, 也包括了照射到室内各表面经反射后照射到工作面的光通量。

应用条件是灯具生产企业能提供经过测试的利用系数表。该表是按某个灯具的效率和配光特性而测出, 并按房间不同的室形指数 (RI) 及顶、墙、地表面反射比而列出的一组利用系数, 其格式示例见表 13-5-1。

由于照明设计标准规定的各场所照度标准值系采用维持平均照度, 用该方法计算比较准确, 使用简单, 因此得到广泛应用。

利用系数法也适用于灯具均匀布置的室外照明。

(2) 利用系数法计算式。

1) 用利用系数法计算维持平均照度的公式如下

$$E_{av} = \frac{N\Phi UK}{A} \quad (13-5-1)$$

式中  $E_{av}$ ——工作面上的维持平均照度, lx;

$\Phi$ ——光源的光通量, lm;

$N$ ——场所内光源数量;

$U$ ——利用系数;

$K$ ——维护系数, 其值见表 13-2-2;

$A$ ——房间或工作面面积,  $m^2$ 。

表 13-5-1 利用系数表 (格式示例)

有效顶棚反射比 (%)	80					70	50					30	0
墙反射比 (%)	70	50			30	50	50			30	30	0	
地面反射比 (%)	10	30	10	30	10	20	30	10	30	10	10	0	
室形系数 RI													
0.6	42	32	31	28	27	31	32	31	28	27	27	24	
0.8	47	39	38	35	34	38	39	37	35	34	34	30	
1	51	45	42	40	39	43	43	42	40	39	38	35	
1.25	55	51	48	46	44	49	49	47	45	44	44	41	
1.5	57	55	51	50	48	52	52	50	49	47	47	44	
2	59	59	54	55	52	56	56	53	53	51	50	48	

续表

有效顶棚反射比 (%)	80				70	50				30	0	
	70	50		30	50	50		30	30	0		
墙反射比 (%)	70	50		30	50	50		30	30	0		
地面反射比 (%)	10	30	10	30	10	20	30	10	30	10	10	0
2.5	61	63	57	59	54	59	59	55	56	54	53	50
3	62	66	59	62	57	61	62	57	59	56	55	53
4	63	68	60	65	58	63	63	58	61	57	56	54
5	64	70	61	68	60	64	65	60	63	58	58	55

注 表中利用系数应除以100。

2) 利用系数 ( $U$ ) 是光源投射到工作面上的有效光通量 ( $\Phi_1$ ) 与光源的光通量 ( $\Phi$ ) 之比, 表达式见式 (13-5-2)

$$U = \frac{\Phi_1}{\Phi} \quad (13-5-2)$$

通常,  $U$  值由利用系数表查得。

(3) 室形指数 ( $RI$ ) 表达式见式 (13-3-1)。

(4) 室内各表面的反射比。顶棚、墙面、地面的反射比, 由表面材料决定。当灯具悬挂在顶棚以下一定高度时, 顶棚有效反射比应做修正; 墙面有窗或装饰物时, 墙面有效反射比也应修正; 工作面在地板以上一定距离, 地面有效反射比也应修正。

(5) 应用利用系数法计算维持平均照度的步骤。

- 1) 填写原始数据: 光源光通量  $\Phi$ , 房间尺寸, 灯高度, 各表面反射比;
- 2) 计算室形指数 ( $RI$ ): 按式 (13-3-1) 计算;
- 3) 确定维护系数 ( $K$ ): 由表 13-2-2 查得, 道路照明由表 13-2-3 查得;
- 4) 确定利用系数 ( $U$ ): 按选择的灯具, 从该灯具的利用系数表查得, 按  $RI$  值和各表面反射比查表; 可得出  $U$  值, 必要时, 采用内插法求得相应的  $U$  值。

5) 计算维护平均照度 ( $E_{av}$ ): 按式 (13-5-1) 计算, 也可用已知的  $E_{av}$  值代入式 (13-5-1) 计算需要的光源数量; 按灯具布置情况, 选定光源数量后, 再用式 (13-5-1) 计算出实际维护平均照度。

(6) 计算示例。

【例 13-5-1】某办公室宽 6m, 长 13.2m, 吊顶高 2.8m, 各表面反射比: 顶 0.7, 墙 0.5, 地 0.2, 设计照度标准 300lx, 拟选用三基色直管荧光灯, T8 型,  $R_a = 85$ ,  $T_{cp} = 4000K$ , 光通量 3350lm, 选用嵌入式格栅灯具, 计算需要的灯管数和实际维持平均照度。

解: 1) 填写原始数据 (略)。

2) 计算  $RI$ : 按式 (13-3-1)

$$RI = \frac{2A}{hl} = \frac{2 \times (13.2 \times 6)}{(2.8 - 0.75) \times 2 \times (13.2 + 6)} = 2.01$$

3) 维护系数  $K$ : 查表 13-2-2, 取 0.8。

4) 查利用系数表: 按选择的灯具型号, 查该灯具的利用系数表, 本例题借用表 (13-5-1) 格式示例表, 查得  $U = 0.56$ 。

5) 按已知  $E_{av} = 300lx$  计算需要光源数, 将式 (13-5-1) 移项后得

$$N = \frac{E_{av} A}{\Phi UK} = \frac{300 \times (6 \times 13.2)}{3350 \times 0.56 \times 0.8} = 15.8$$

为取整数, 并考虑布置对称, 拟选用 16 支灯管, 用式 (13-5-1) 计算实际照度

$$E_{av} = \frac{16 \times 3350 \times 0.56 \times 0.8}{6 \times 13.2} = 303(\text{lx})$$

### 13.5.2 点光源的点照度计算

(1) 点光源点照度的基本计算公式。当光源尺寸与光源到计算点之间的距离相比小得多时, 可将光源视为点光源。一般圆盘形发光体的直径不大于照射距离的 1/5, 线状发光体的长度不大于照射距离的 1/4 时, 按点光源进行照度计算误差不大于 5%。距离平方反比定律及余弦定律适用于点光源产生的点照度计算。这些定律是照明计算的基本公式。

1) 距离平方反比定律: 点光源  $S$  在与照射方向垂直的平面  $N$  上产生的照度  $E_n$  与光源的光强  $I_0$  成正比, 与光源至被照面的距离  $R$  的平方成反比。由式 (13-5-3) 表示 (见图 13-5-1)

$$E_n = \frac{I_0}{R^2} \quad (13-5-3)$$

式中  $E_n$ ——点光源在与照射方向垂直的平面上产生的照度, lx;

$I_0$ ——与灯具垂直线呈  $\theta$  角的照射方向的光强, cd;

$R$ ——点光源至被照面的计算点距离, m。

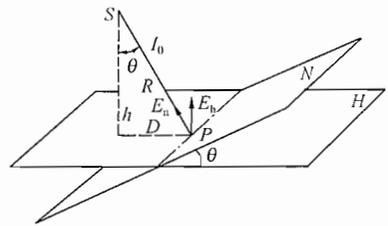


图 13-5-1 点光源的点照度

2) 余弦定律: 点光源  $S$  照射在水平面  $H$  上产生的照度  $E_h$  与光源的光强  $I_0$  及被照面法线与入射光线的夹角  $\theta$  的余弦成正比, 与光源至被照面计算点的距离  $R$  平方成反比。可由式 (13-5-4) 表示

$$E_h = \frac{I_0}{R^2} \cos\theta \quad (13-5-4)$$

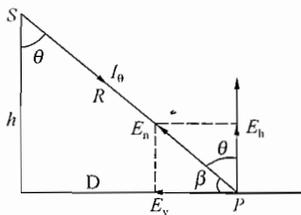


图 13-5-2 点光源  $S$  在水平面与垂直面的照度

式中  $E_h$ ——点光源照射在水平面上  $P$  点产生的照度, lx;

$I_0$ ——与灯具垂直线呈  $\theta$  角的照射方向的光强, cd;

$R$ ——点光源至被照面计算点  $P$  的距离, m;

$\cos\theta$ ——被照面的法线与入射光线的夹角的余弦。

(2) 点光源水平面和垂直面照度的计算。

1) 点光源在水平面照度  $E_h$  的计算: 按照余弦定律, 点光源  $S$  在水平面照度  $E_h$  (见图 13-5-2) 可按式 (13-5-4) 计算。

2) 点光源在垂直面照度  $E_v$  的计算: 按照余弦定律, 点光源  $S$  在垂直面照度  $E_v$  (见图 13-5-2) 为

$$E_v = \frac{I_0}{R^2} \cos\beta = \frac{I_0}{R^2} \sin\theta \quad (13-5-5)$$

3)  $E_h$  和  $E_v$  应用光源安装高度  $h$  表示的计算式: 已知光源的安装高度 (指计算高度)  $h$  时,  $E_h$  和  $E_v$  的计算式为

$$E_h = \frac{I_0}{R^2} \cos\theta = \frac{I_0 \cos\theta}{\left(\frac{h}{\cos\theta}\right)^2} = \frac{I_0 \cos^3\theta}{h^2} \quad (13-5-6)$$

$$E_v = \frac{I_0}{R^2} \sin\theta = \frac{I_0 \cos\theta}{\left(\frac{h}{\cos\theta}\right)^2} = \frac{I_0 \cos^2\theta \sin\theta}{h^2} \quad (13-5-7)$$

以上各式中  $h$ ——光源距所计算水平面的安装高度（指计算高度），m；  
其他符号含义同上。

4)  $E_h$  应用直角坐标的计算：由图 13-5-3 可得

$$E_h = \frac{I_0 \cos\theta}{R^2} = \frac{I_0 h}{R^2 R} = \frac{I_0 h}{R^3}$$

其中

$$R = (h^2 + D^2)^{\frac{1}{2}} = (h^2 + x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$E_h = \frac{I_0 h}{(h^2 + x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (13-5-8)$$

5) 点光源在不同平面上  $P$  点的法线方向照度之比：点光源  $S$  在不同平面上  $P$  点的法线方向照度之比等于点光源  $S$  到该平面上的垂直线长度之比（见图 13-5-4），即

$$E_1 = \frac{I}{R^2} \cos\theta_1; E_2 = \frac{I}{R^2} \cos\theta_2$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} = \frac{\frac{h_1}{R}}{\frac{h_2}{R}} = \frac{h_1}{h_2} \quad (13-5-9)$$

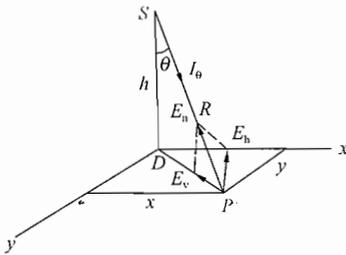


图 13-5-3 直角坐标中的点光源水平面照度

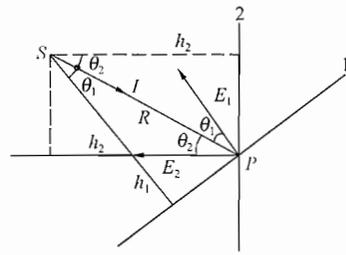


图 13-5-4 点光源在不同平面上  $P$  点的法线方向照度

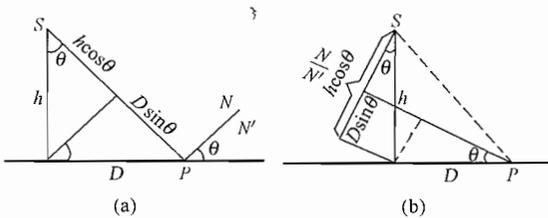


图 13-5-5 点光源倾斜面照度

(a) 受光面能受到光照射；(b)  $\theta$  角增大受光面变化

因而点光源倾斜面照度  $E_\varphi$  为

$$E_\varphi = \left( \cos\theta \pm \frac{D}{h} \sin\theta \right) E_h = \psi E_h \quad (13-5-10)$$

式中  $E_\varphi$ ——倾斜面上  $P$  点的照度，lx；

$E_h$ ——水平面上  $P$  点的照度, lx;

$h$ ——光源至水平面上的计算高度, m;

$D$ ——光源在水平面上的投影至倾斜面与水平面交线的垂直距离, m;

$\psi$ ——比值。

$$\psi = \cos\theta \pm \frac{D}{h}\sin\theta \quad (13-5-11)$$

式 (13-5-11) 中正号表示图 13-5-5 (a) 的情况, 负号表示图 13-5-5 (b) 的情况。 $\psi$  值可在图 13-5-6 中查出, 该图中虚线表示式 (13-5-12) 中负的  $\psi$  值。

(4) 多光源下的点照度计算。

在多光源照射下在水平面或倾斜面上的点照度分别由式 (13-5-12) 及式 (13-5-13) 计算

$$\begin{aligned} E_{h\Sigma} &= E_{h1} + E_{h2} + \cdots + E_{hn} \\ &= \sum_{i=1}^n E_{hi} \end{aligned} \quad (13-5-12)$$

$$\begin{aligned} E_{\varphi\Sigma} &= E_{\varphi1} + E_{\varphi2} + \cdots + E_{\varphi n} \\ &= \psi_1 E_{h1} + \psi_2 E_{h2} + \cdots + \psi_n E_{hn} \\ &= \sum_{i=1}^n \psi_i E_{hi} \end{aligned} \quad (13-5-13)$$

以上式中

$E_{h\Sigma}$ ——多光源照射下在水平面上的点照度, lx;

$E_{h1}, \cdots, E_{hi}, \cdots, E_{hn}$ ——各光源照射下在水平面上的点照度, lx;

$E_{\varphi\Sigma}$ ——多光源照射下在倾斜面上的点照度, lx;

$E_{\varphi1}, \cdots, E_{\varphi i}, \cdots, E_{\varphi n}$ ——各光源照射下在倾斜面上的点照度, lx。

(5) 点光源应用空间等照度曲线的照度计算。

$I_0$  为光源的光强分布值, 则水平照度  $E_h$  为

$$E_h = \frac{I_0 \cos^3 \theta}{h^2}$$

$$E_h = f(h, D)$$

按此相互对应关系即可制成空间等照度曲线。通常  $I_0$  取光源光通量为 1000lm 时的光强分布值, 则 400W 某型工矿灯具 (内装 400W 金属卤化物灯) 的空间等照度曲线如图 13-5-7 所示。

已知灯的计算高度  $h$  和计算点至灯具轴线的水平距离  $D$ , 应用等照度曲线可直接查出光源设定为 1000lm 时的水平照度  $\varepsilon$ 。如光源实际光通量为  $\Phi$ , 维护系数为  $K$ , 则计算点的实际水平照度为

$$E_h = \frac{\Phi \varepsilon K}{1000} \quad (13-5-14)$$

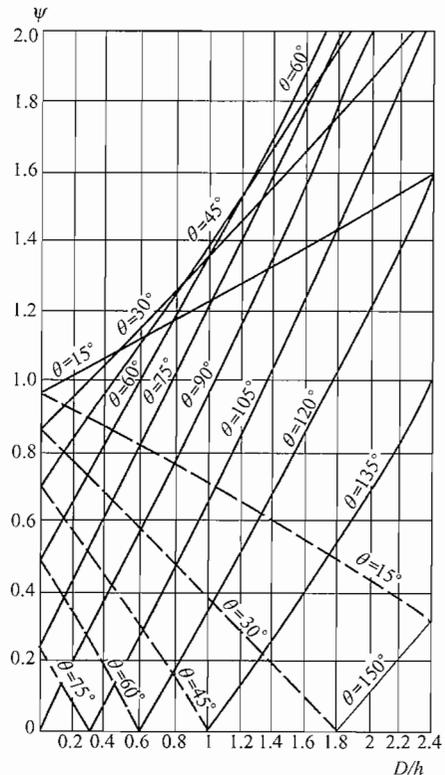


图 13-5-6  $\psi$  与  $D/h$  关系曲线

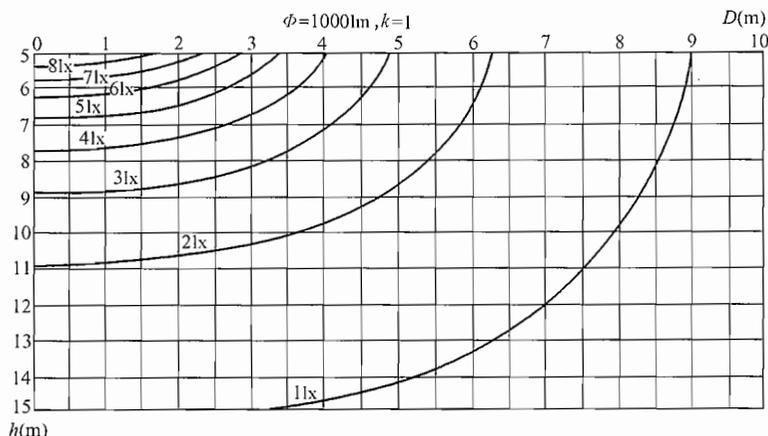


图 13-5-7 400W 某型工矿灯具（内装 400W 金属卤化物灯）的空间等照度曲线

则计算点的垂直平面上的照度为

$$E_v = \frac{D}{h} E_h \quad (13-5-15)$$

计算点的倾斜面上的照度为

$$E_\varphi = E_h \left( \cos\theta \pm \frac{D}{h} \sin\theta \right) = \psi E_h \quad (13-5-16)$$

当有多个相同灯具投射到同一点时，其实际水平照度可按式（13-5-17）计算

$$E_h = \frac{\Phi \sum \varepsilon K}{1000} \quad (13-5-17)$$

式中  $\Phi$ ——光源的光通量，lm；

$\sum \varepsilon$ ——各灯（1000lm）对计算点产生的水平照度之和，lx；

$K$ ——灯具的维护系数。

注：由于多数制造厂不能提供灯具的空间等照度曲线，所以这个方法应用很少。

（6）计算示例。

【例 13-5-2】如图 13-5-8 所示，某车间装有 8 只 400W 某型工矿灯具，内装 400W 金属卤化物灯，灯具的计算高度  $h = 10\text{m}$ ，光源光通量  $\Phi = 32\,000\text{lm}$ ，灯具光强分布（当光源为 1000lm 时）见表 13-5-2。

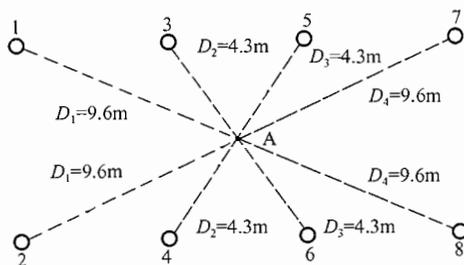


图 13-5-8 灯具平面布置

表 13-5-2

光源光强分布

$\theta$ ( $^{\circ}$ )	0	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5
$I_{\theta}$ (cd)	243.4	235.0	235.6	239.1	240.3	240.5	233.4	224.8	215.1	205.0
$\theta$ ( $^{\circ}$ )	47.5	52.5	57.5	62.5	67.5	72.5	77.5	82.5	87.5	
$I_{\theta}$ (cd)	197.6	187.9	176.7	162.1	112.6	48.9	22.5	11.6	3.3	

灯具维护系数  $K=0.7$ , 试求 A 点的水平面照度值。

解: 1) 按点光源水平面照度计算公式计算

$$E_{h1} = E_{h2} = E_{h7} = E_{h8}$$

$$R_1 = \sqrt{h^2 + D_1^2} = \sqrt{10^2 + 9.6^2} = 13.86(\text{m})$$

$$\cos\theta_1 = \frac{h}{R_1} = \frac{10}{13.86} = 0.72$$

$$\theta_1 = 43.8^{\circ}, I_{\theta_1} = 203.1(\text{cd})$$

$$E_{h1} = \frac{I_{\theta_1} \cos\theta_1}{R_1^2} = \frac{203.1 \times 0.72}{13.86^2} = 0.76(\text{lx})$$

$$E_{h3} = E_{h4} = E_{h5} = E_{h6}$$

$$R_2 = \sqrt{h^2 + D_2^2} = \sqrt{10^2 + 4.3^2} = 10.89(\text{m})$$

$$\cos\theta_2 = \frac{h}{R_2} = \frac{10}{10.89} = 0.918, \theta_2 = 23.3^{\circ}, I_{\theta_2} = 239.4(\text{cd})$$

$$E_{h3} = \frac{I_{\theta_2} \cos\theta_2}{R_2^2} = \frac{239.4 \times 0.918}{10.89^2} = 1.85(\text{lx})$$

$$E_{h\Sigma} = 4 \times (0.76 + 1.85) = 10.44(\text{lx})$$

$$E_{Ah} = \frac{32\,000 \times 10.44 \times 0.7}{1000} = 233.9(\text{lx})$$

2) 应用空间等照度曲线计算

从图 13-5-7 所示的等照度曲线图中查出

$$h = 10\text{m} \quad \left. \begin{array}{l} D_1 = 9.6\text{m} \\ D_4 = 9.6\text{m} \end{array} \right\} \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_7 = \varepsilon_8 = 0.75(\text{lx})$$

$$\left. \begin{array}{l} D_2 = 4.3\text{m} \\ D_3 = 4.3\text{m} \end{array} \right\} \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 1.9(\text{lx})$$

所以  $\Sigma \varepsilon = 4 \times (0.75 + 1.9) = 10.6(\text{lx})$

$$E_{Ah} = \frac{32\,000 \times 10.6 \times 0.7}{1000} = 237.4(\text{lx})$$

## 13.6 照明工程节能标准与措施

### 13.6.1 实施绿色照明工程

(1) 绿色照明的提出与发展。1991 年美国环保署首先提出“绿色照明”的理念, 很快

得到联合国的支持和许多国家关注，社会经济发展与环境效益的密切关联，绿色照明有广阔的发展前景。

我国于1993年开始准备启动绿色照明，于1996年正式制定了《中国绿色照明工程实施计划》，经过多年努力，取得了显著的效果。

(2) 实施绿色照明的宗旨。绿色照明是节约能源、保护环境，有益于提高人们生产、工作、学习效率和生活质量，保护人们身心健康的照明。

可见绿色照明不是单纯的节能，而是有明确的宗旨和目标，关系多方面（包括行政、管理和技术，以及工程设计、产品研制和运行维护等）的系统工程。要求保证必要的照明水平和质量，通过节约能源，减少发电中有害物的排放，达到保护环境的目的。

(3) 照明节能的原则措施。

- 1) 根据视觉工作的需要，合理确定照度标准值；
- 2) 按需要的照度做出照明节能最优化的设计方案；
- 3) 在满足显色性要求基础上选用高效光源和镇流器、驱动电源；
- 4) 在符合眩光限制条件下选用高效灯具；
- 5) 室内顶、墙等表面采用高反射比的材料；
- 6) 照明和空调系统的结合；
- 7) 设置有利于节能按实际需要的关灯和自动控制装置；
- 8) 把照明和尽量利用天然光相结合；
- 9) 建立定期清洁照明灯具和室内表面，以及适时更换光源的维护制度。

(4) 应用高效光源的节能效益和经济效应。高效光源的节能效益是毋庸置疑的，其经济效益也特别好。

1) 高效光源的节能效益：以 T8 三基色荧光灯（中色温、配电子镇流器）取代常用的 T8 卤粉荧光灯（高色温、配电感镇流器），以金卤灯（400W）代替荧光高压汞灯（400W），以高压钠灯（400W）代替荧光高压汞灯（400W）以及以 LED 筒灯代替单端荧光灯筒灯为例，其节能效益见表 13-6-1 ~ 表 13-6-3。

表 13-6-1 T8-36W 三基色与卤粉荧光灯的能效比较

光源类型	镇流器型式	相关色温 (K)	$R_a$	光通量 (lm)	总输入功率 (W)	含镇流器光效 (lm/W)	能效比 (%)
T8 (卤粉) 36W	电感式	6200	72	2500	45	55.6	100
T8 (三基色) 36W	电子式	4000	85	3350	37	90.5	163

表 13-6-2 金属卤化物灯或高压钠灯与荧光高压汞灯的能效比较

光源类型	功率 (W)	光通量 (lm)	光效 (lm/W) (不含镇流器)	$R_a$	能效比 (%)	备注
荧光高压汞灯	400	22 000	55	35	100	
金属卤化物灯	400	35 000	87.5	65	159	
高压钠灯	400	48 000	120	23	218	用于道路及无显色性要求场所

表 13-6-3 LED 筒灯与单端荧光灯(紧凑型)的能效比较

光源类型	输入总功率 (W)	相关色温 (K)	$R_a$	光通量 (lm)	灯具 效率	灯具输出 光通量 (lm)	整灯效能 (lm/W)	能效比 (%)
单端荧光灯筒灯	26 + 3	2700	80	1800	0.6	1080	37.3	100
LED 筒灯	26	2700	80	2200	—	2200	84.6	226.8

2) 高效光源的经济效益: 一般来说, 高效节能产品的价格较高, 应该能够从运行时节省的电费得到合理回收。而高效光源虽价格较高, 但由于其高效使得在同一场所使用的灯数减少, 从而使用的灯具和镇流器数减少, 不仅不增加初建投资, 有时还降低了初建投资, 获得了双重经济效益。LED 灯技术提高非常快, 节能效果十分明显, 但必须坚持质量标准, 应符合本书 13.2.2.3 (5) 的规定。

### 13.6.2 照明节能的技术措施

(1) 合理选择和确定照度标准值。GB 50034—2013《建筑照明设计标准》规定了各类场所的照度标准值, 由于我国幅员辽阔, 各地经济差距很大, 建筑标准也不同, 应根据这些条件, 在满足基本视觉要求的条件下, 选择合理的照度值; 同时在计算照度时, 不应超过标准值的 110%。

(2) 合理选择照明方式。对视觉作业要求照度高, 而作业面密度又不大的场所, 宜采用混合照明方式, 即增加局部照明来满足这些作业面的照度要求。

对于同一场所不同区域有不同照度要求的作业时, 应分区域采用不同的照度标准值。

(3) 推广应用高光效照明光源。

1) 有条件逐步推广应用 LED 灯:

a. 长时工作或停留的场所, 应选用显色性好 ( $R_a > 80$ 、 $R_g > 0$ )、色温低 ( $T_{cp} \leq 4000K$ )、光线柔 (表面亮度较低)、色容差和色偏差小的产品。

b. 优先应用于交通信号灯, 疏散照明, 夜景照明, 广告牌, 装饰照明, 各类建筑的走廊、楼梯间、电梯大堂、电梯内、厕所、地下车库, 无人长时逗留, 只进行检查、巡视和短时操作、维护的机房、库房和工作场所。

c. 逐步推广到道路照明、地铁车站、火车站、候机楼、商场及其他场所。

2) 使用直管荧光灯, 应选用细管径 (T8 或 T5)、三基色灯; 在满足均匀度条件下, 应选用功率较大的灯管 (T8 选 36 ~ 45W、T5 选 28 ~ 35W), 不宜选管长 600mm 的小灯管 (T8 为 18W、T5 为 14W)。

3) 高大场所选用金属卤化物灯, 宜选用陶瓷金属卤化物灯, 显色要求不高的场所和道路照明可选用高压钠灯。

4) 不应选用普通照明用白炽灯, 应更换现有的白炽灯; 禁止使用 60W 以上白炽灯。

5) 不应选用荧光高压汞灯和自镇流荧光高压汞灯, 现有的应限期更换。

6) 应限制卤素灯的应用, 除商场的贵重商品和博物馆的特殊展品的重点照明外, 不得选用卤素灯, 应适时更换旅馆、餐厅、走廊、电梯内现有的卤素灯; 禁止使用大功率 (如 100W 及以上) 卤钨灯。

7) 没有特殊要求, 宜减少紧凑型荧光灯的应用, 宜用直管荧光灯或 LED 灯取代。

8) 选用的光源应选择符合该光源的国家能效标准中规定的“节能评价值”产品, 即能

效等级为2级或1级的产品。

(4) 选用高效节能灯具。

- 1) 选用灯具效率高的灯具。
- 2) 除下列情况下宜选用开敞式直接型灯具：
  - a. 限制眩光需要带格栅或漫射罩的；
  - b. LED灯需要限制眩光和表面亮度带漫射罩的；
  - c. 有防水防尘、防爆等特殊要求的。
- 3) 选用与房间室形指数（ $RI$ ）相适应的灯具配光。

(5) 合理的照明控制。

- 1) 应按本书13.4.7的要求设置照明控制方式。
- 2) 各种公共场所（如走廊、楼梯间、电梯内、厕所等），地下车库，机房，库房等，应发挥LED灯的调光优势，采用红外感应或光敏自动控制等方式。

(6) 配电系统的节能措施。

- 1) 建筑内照明宜采用专用馈电线路供电，照明配电箱应靠近负荷中心。
- 2) 道路照明宜采用专用变压器供电，变压器应采用能效等级为2级或1级的节能产品。
- 3) 照明分支线应选用铜线，配电干线宜用铜线；线路截面积应满足末端灯的端电压要求。

4) 长时间工作的场所（如地铁车站、三班制生产场所、商场、超市、地下公共停车场）宜按经济电流密度选择导体截面积。

5) 道路照明当采用高强度气体放电灯配节能电感镇流器时，应在每个灯具内装设补偿电容器，使功率因数达到0.85~0.90；当采用LED灯时，应使每个灯的谐波含量不超过GB 17625.1—2012的规定。

6) 建筑内照明当采用气体放电灯配节能电感镇流器时，宜在灯内装设补偿电容器，使功率因数不低于0.9；当采用LED灯时，谐波含量应符合GB 17625.1—2012的规定；对于功率小于等于25W的LED灯，宜有降低谐波的措施。

(7) 住宅应以户为单位计量照明用电；写字楼、综合商场等租用场地，应分户计量，其他场所宜按条件分单位计量，以考核用电量。

(8) 合理利用天然光。

1) 办公室、教室、会议室、工业场所、厕所、洗手间等，应接近窗和远离窗区域分别装设开关，近窗区段的照明灯，应优先按条件采取手动或自动开关灯或调节灯光。

2) 无天然采光房间、场所和地下室，有条件时，宜装设各种导光和反光装置引入天然光作照明；或设置光伏发电，作为照明能源。

### 13.6.3 严格执行照明功率密度（ $LPD$ ）限值

(1) 关于 $LPD$ 限值的规定：GB 50034—2013规定了各类建筑部分常用房间或场所的 $LPD$ 限值，CJJ 45—2006也规定了各类道路的 $LPD$ 限值，其目的是从宏观上来控制照明的安装功率（以单位面积计），作为照明节能的考核指标之一。

除 $LPD$ 限值现行值外，还规定了 $LPD$ 的目标值。目标值的实施可以由相关标准（如节能建筑、绿色建筑评价标准）规定，也可由全国或行业、或地方主管部门规定。

建筑照明的功率密度限值（ $LPD$ ）见表13-6-4~表13-6-18，城市道路照明功率密

度限值 (LPD) 见表 13-6-19。

表 13-6-4 住宅建筑每户照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
起居室	100	≤6.0	≤5.0
卧室	75		
餐厅	150		
厨房	100		
卫生间	100		
职工宿舍	100	≤4.0	≤3.5
车库	30	≤2.0	≤1.8

表 13-6-5 图书馆建筑照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
一般阅览室、开放式阅览室	300	≤9.0	≤8.0
目录厅(室)、出纳室	300	≤11.0	≤10.0
多媒体阅览室	300	≤9.0	≤8.0
老年阅览室	500	≤15.0	≤13.5

表 13-6-6 办公建筑和其他类型建筑中具有办公用途场所  
照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
普通办公室	300	≤9.0	≤8.0
高档办公室、设计室	500	≤15.0	≤13.5
会议室	300	≤9.0	≤8.0
服务大厅	300	≤11.0	≤10.0

表 13-6-7 商店建筑照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
一般商店营业厅	300	≤10.0	9.0
高档商店营业厅	500	≤16.0	14.5
一般超市营业厅	300	≤11.0	≤10.0
高档超市营业厅	500	≤17.0	≤15.5
专卖店营业厅	300	≤11.0	≤10.0
仓储超市	300	≤11.0	≤10.0

注 商店、高档商店、专卖店的营业厅需装设重点照明时, 该营业厅的 LPD 限值应增加 5W/m<sup>2</sup>。

表 13-6-8 旅馆建筑照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
客房	—	≤7.0	≤6.0
中餐厅	200	≤9.0	≤8.0
西餐厅	150	≤6.5	≤5.5
多功能厅	300	≤13.5	≤12.0
客房层走廊	50	≤4.0	≤3.5
大堂	200	≤9.0	≤8.0
会议室	300	≤9.0	≤8.0

表 13-6-9 医疗建筑照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
治疗室、诊室	300	≤9.0	≤8.0
化验室	500	≤15.0	≤13.5
候诊室、挂号厅	200	≤6.5	≤5.5
病房	100	≤5.0	≤4.5
护士站	300	≤9.0	≤8.0
药房	500	≤15.0	≤13.5
走廊	100	≤4.5	4.0

表 13-6-10 教育建筑照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
教室、阅览室	300	≤9.0	≤8.0
实验室	300	≤9.0	≤8.0
美术教室	500	≤15.0	≤13.5
多媒体教室	300	≤9.0	≤8.0
计算机教室、电子阅览室	500	≤15.0	≤13.5
学生宿舍	150	≤5.0	≤4.5

表 13-6-11 美术馆建筑照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
会议报告厅	300	≤9.0	≤8.0
艺术品售卖区	300	≤9.0	≤8.0
公共大厅	200	≤9.0	≤8.0
绘画展厅	100	≤5.0	≤4.5
雕塑展厅	150	≤6.5	≤5.5

表 13-6-12 科技馆建筑照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
科普教室	300	≤9.0	≤8.0
会议报告厅	300	≤9.0	≤8.0
纪念品售卖区	300	≤9.0	≤8.0
儿童乐园	300	≤10.0	≤8.0
公共大厅	200	≤9.0	≤8.0
常设展厅	200	≤9.0	≤8.0

表 13-6-13 博物馆建筑其他场所照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
会议报告厅	300	≤9.0	≤8.0
美术制作室	500	≤15.0	≤13.5
编目室	300	≤9.0	≤8.0
藏品库房	75	≤4.0	≤3.5
藏品提看室	150	≤5.0	4.5

表 13-6-14 会展建筑照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
会议室、洽谈室	300	≤9.0	≤8.0
宴会厅、多功能厅	300	≤13.5	≤12.0
一般展厅	200	≤9.0	≤8.0
高档展厅	300	≤13.5	≤12.0

表 13-6-15 交通建筑照明功率密度限值

房间或场所		照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
			现行值	目标值
候车 (机、船) 室	普通	150	≤7.0	≤6.0
	高档	200	≤9.0	≤8.0
中央大厅、售票大厅		200	≤9.0	≤8.0
行李认领、到达大厅、出发大厅		200	≤9.0	≤8.0
地铁站厅	普通	100	≤5.0	≤4.5
	高档	200	≤9.0	≤8.0
地铁进出站门厅	普通	150	≤6.5	≤5.5
	高档	200	≤9.0	≤8.0

表 13-6-16 金融建筑照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
		现行值	目标值
营业大厅	200	≤9.0	≤8.0
交易大厅	300	≤13.5	≤12.0

表 13-6-17 工业建筑非爆炸危险场所照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )		
		现行值	目标值	
1 机、电工业				
机械加工	粗加工	200	≤7.5	≤6.5
	一般加工公差 ≥0.1mm	300	≤11.0	≤10.0
	精密加工公差 <0.1mm	500	≤17.0	≤15.0
机电、仪表 装配	大件	200	≤7.5	≤6.5
	一般件	300	≤11.0	≤10.0
	精密	500	≤17.0	≤15.0
	特精密	750	≤24.0	≤22.0
电线、电缆制造		300	≤11.0	≤10.0
线圈绕制	大线圈	300	≤11.0	≤10.0
	中等线圈	500	≤17.0	≤15.0
	精细线圈	750	≤24.0	≤22.0
线圈浇注		300	≤11.0	≤10.0
焊接	一般	200	≤7.5	≤6.5
	精密	300	≤11.0	≤10.0
钣金		300	≤11.0	≤10.0
冲压、剪切		300	≤11.0	≤10.0
热处理		200	≤7.5	≤6.5
铸造	熔化、浇铸	200	≤9.0	≤8.0
	造型	300	≤13.0	12.0
精密铸造的制模、脱壳		500	≤17.0	≤15.0
锻工		200	≤8.0	≤7.0
电镀		300	≤13.0	≤12.0
酸洗、腐蚀、清洗		300	≤15.0	14.0
抛光	一般装饰性	300	≤12.0	≤11.0
	精细	500	≤18.0	≤16.0
复合材料加工、铺叠、装饰		500	≤17.0	≤15.0
机电修理	一般	200	≤7.5	≤6.5
	精密	300	≤11.0	≤10.0

续表

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )		
		现行值	目标值	
2 电子工业				
整机类	整机厂	300	≤11.0	≤10.0
	装配厂房	300	≤11.0	≤10.0
元器件类	微电子产品及集成电路	500	≤18.0	≤16.0
	显示器件	500	≤18.0	≤16.0
	印制电路板	500	≤18.0	≤16.0
	光伏组件	300	≤11.0	≤10.0
	电真空器件、机电组件等	500	≤18.0	≤16.0
电子材料类	半导体材料	300	≤11.0	≤10.0
	光纤、光缆	300	≤11.0	≤10.0
酸、碱、药液及粉配制		300	≤13.0	≤12.0

表 13-6-18 公共和工业建筑非爆炸危险场所通用房间或场所照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )		
		现行值	目标值	
走廊	一般	50	≤2.5	≤2.0
	高档	100	≤4.0	3.5
厕所	一般	75	≤3.5	≤3.0
	高档	150	≤6.0	≤5.0
试验室	一般	300	≤9.0	≤8.0
	精细	500	≤15.0	≤13.5
检验	一般	300	≤9.0	≤8.0
	精细, 有颜色要求	750	≤23.0	≤21.0
计量室、测量室		500	≤15.0	≤13.5
控制室	一般控制室	300	≤9.0	≤8.0
	主控室	500	≤15.0	≤13.5
电话站、网络中心、计算机站		500	≤15.0	≤13.5
动力站	风机房、空调机房	100	≤4.0	≤3.5
	泵房	100	≤4.0	≤3.5
	冷冻站	150	≤6.0	≤5.0
	压缩空气站	150	≤6.0	≤5.0
	锅炉房、煤气站的操作层	100	≤5.0	≤4.5

续表

房间或场所		照度标准值 (lx)	照明功率密度限值 (W/m <sup>2</sup> )	
			现行值	目标值
仓库	大件库	50	≤2.5	≤2.0
	一般件库	100	≤4.0	≤3.5
	半成品库	150	≤6.0	≤5.0
	精细件库	200	≤7.0	≤6.0
公共车库		50	≤2.5	≤2.0
车辆加油站		100	≤5.0	≤4.5

表 13-6-19 机动车交通道路的照明功率密度值

道路级别	车道数 (条)	照明功率密度值 (LPD) (W/m <sup>2</sup> )	对应的照度值 (lx)
快速路、主干路	≥6	1.05	30
	<6	1.25	
	≥6	0.70	20
	<6	0.85	
次干路	≥4	0.70	15
	<4	0.85	
	≥4	0.45	10
	<4	0.55	
支路	≥2	0.55	10
	<2	0.60	
	≥2	0.45	8
	<2	0.50	

注 1. 本表仅适用于高压钠灯, 当采用金属卤化物灯时, 应将表中对应的 LPD 乘以 1.3。

2. 本表仅适用于设置连续照明的常规路段。

3. 设计计算照度高于标准值时, LPD 值不得相应增加。

### (2) 关于 LPD 限值的说明:

1) 标准规定的 LPD 限值是宏观控制照明节能一个指标, 而不是微观的、具体的参数, 因此, 不能用此值作为计算照度的指标。

2) 规定的 LPD 限值最低要求, 是照明安装功率 (单位面积计) 的最大允许值, 而不是优化值。

3) 考虑到面积很小的房间 (室形指数 RI 较小), 灯具的利用系数低, 有时难以达到规定的 LPD 限值, 所以 GB 50034—2013 规定, 当  $RI \leq 1$  时, 可以增加 LPD 限值, 增加幅度不应超过 20%。

4) 当房间的照度标准值提高或降低一级 [符合 13.2.1 (3) 或 (4)] 时, 其 LPD 限值应按比例增加或折减。设计时计算照度和照度标准值产生的偏差, LPD 限值不应增减。

5) 装有装饰性灯具的场所, 在考核其 LPD 限值时, 可将装饰性灯具的功率按 50% 计算。装饰性灯具是指枝形花灯、壁灯、艺术吊灯、暗槽灯等。

计算示例：某场所面积  $100\text{m}^2$ ，照明安装功率共  $2000\text{W}$ （含镇流器功耗），其中装饰性灯具为  $800\text{W}$ 。则

$$\text{实际的照明功率密度} = \frac{2000}{100} = 20 (\text{W}/\text{m}^2)$$

$$\text{考核的照明功率密度} = \frac{(2000 - 800) + 800 \times 50\%}{100} = 16 (\text{W}/\text{m}^2)$$

(3) 实际  $LPD$  的计算式为

$$LPD = \frac{\sum (P_L - P_B)}{A} (\text{W}/\text{m}^2) \quad (13-6-1)$$

式中  $P_L$ ——光源额定功率， $\text{W}$ ；

$P_B$ ——光源配套的镇流器或变压器功耗， $\text{W}$ ；

$A$ ——房间或场所的面积， $\text{m}^2$ 。

要求：按式 (13-6-1) 计算出的实际  $LPD$  值应小于或等于标准规定的  $LPD$  限值；如果达不到此要求，应重新优化方案，改变光源、灯具类型、功率或数量，再按式 (13-6-1) 计算，直到符合要求为止。

## 电气传动

电气传动 (electric drive) 是用以实现生产过程机械设备电气化及其自动控制的电气设备和系统的技术的总称。

### 14.1 电气传动系统的组成及分类

一个电气传动系统由电动机、电源装置和控制装置三部分组成, 它们各自有多种设备或线路可供选用。工程设计中应根据生产机械的负载性质、工艺要求及环境条件选择电气传动方案。

#### 14.1.1 电源装置

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》2.1.2节。

电动机的电源装置分为母线供电装置、机组变流装置及电力电子变流装置三大类。

(1) 母线供电装置(与电器控制系统配合使用)可分为:

- 1) 交流母线。
- 2) 直流母线。

(2) 机组变流装置可分为:

- 1) 直流发电机组, 20世纪70年代以前广泛使用, 随着电力电子技术发展已逐步淘汰。
- 2) 变频机组。

(3) 电力电子变流装置按变流种类可分为:

- 1) 整流。
- 2) 交流调压。
- 3) 变频, 又分成交-直-交间接变频和交-交直接变频两类。

(4) 电力电子变流装置按使用的器件可分为:

- 1) 汞弧整流器, 在20世纪60~70年代以前盛行, 现已淘汰。
- 2) 普通晶闸管。

3) 新型自关断器件, 如门极关断(GTO)晶闸管、IGCT、IEGT等适用于中压几百千瓦至兆瓦功率等级(GTO晶闸管已被IGCT和IEGT所取代); 电力晶体管(BJT)、IGBT适用于几千瓦至兆瓦功率等级(BJT已被IGBT所取代); 电力场效应晶体管(POWER MOSFET)适用几千瓦以下功率等级; 其他还有静电感应晶体管(SIT)和静电感应晶闸管(SITH)等, 主要用于高频变换等。

#### 14.1.2 电气传动控制系统

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》2.1.3节。

##### 14.1.2.1 按所用的器件分

- (1) 电器控制: 又称继电器-接触器控制, 与母线供电装置配合使用。
- (2) 电机扩大机和磁放大器控制: 与机组供电装置配合使用, 在20世纪30~60年代

盛行，随电子技术发展，已逐步淘汰。

(3) 电子控制装置又分为电子管控制装置（在 20 世纪 40 ~ 60 年代少数传动设备用过，已淘汰）和半导体控制装置（又有分立器件、中小规模集成电路及微机和专用大规模集成电路等几代产品）。

#### 14.1.2.2 按工作原理分

(1) 逻辑控制：通过电气控制装置控制电动机起动、停止、正反转或有级变速，控制信号来自主令电器或可编程序控制器。

(2) 连续速度调节：与机组或电力电子变流装置配合使用，连续改变电动机转速。这类系统按控制原则分开环控制、闭环控制及复合控制三类。按控制信号的处理方法分模拟控制、数字控制、模拟/数字混合控制三类。

直流连续速度调节一般都采用双环线路，交流调速常用线路有：电压/频率比控制、转差频率控制、矢量控制和直接转矩控制。

### 14.1.3 电动机

#### 14.1.3.1 电动机的类型

依据：《电气传动自动化技术手册（第 3 版）》2.1.2.2 节。

电动机的类型如下：



#### 14.1.3.2 电动机的机械特性

依据：《电气传动自动化技术手册（第 3 版）》2.1.2.2 节。

(1) 各类电动机的自然机械特性曲线见图 14-1-1。

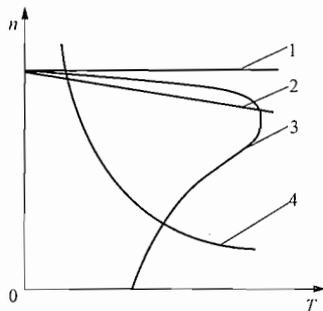


图 14-1-1 电动机的自然机械特性

1—同步电动机；2—他励直流电动机；3—异步电动机；4—串励直流电动机

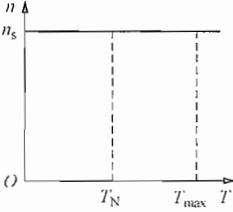
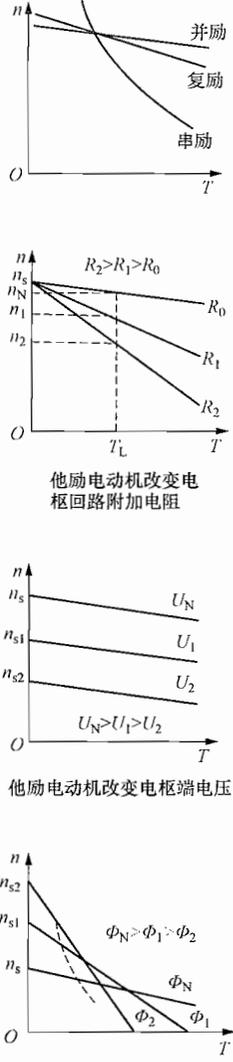
(2) 各类电动机的机械特性、计算公式及主要性能见表 14-1-1。

表 14-1-1

电动机的机械特性

类型	特性公式	符号	特性曲线	性能
交流电动机 异步电动机	$p = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi$ $T = \frac{m_1 U_1^2 r_2' s}{\omega_s (r_1 s + r_2')^2 + s^2 x_k^2}$ $s_{cr} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$ $x_k = x_1 + x_2'$ $T_{cr} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_s (\sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r_1)}$ $T = \frac{2T_{cr}(1+q)}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s} + 2q}$ $s_{cr} = s_N (\lambda_T + \sqrt{\lambda_T^2 - 1})$ $\lambda_T = \frac{T_{cr}}{T_N}$ $T_s = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{\omega_s (r_1 + r_2')^2 + x_k^2}$ $s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$ $\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}$ $n_s = \frac{60f_1}{p}$ $q = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$ 大型电动机的 $r_1$ 很小，可以忽略，则有 $s_{cr} \approx \frac{r_2'}{x_k^2}$ $T_{cr} \approx \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_s x_k}$ $T_{cr} \approx \frac{2T_{cr}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}}$ $T_{cr} \approx \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{\omega_s r_2'^2 + x_k^2}$ $n_s = \frac{60f}{p}$ $T_s = \frac{9.55 m_1 U_1 E_0 \sin\theta}{n_s x_s}$ $T_{max} = \frac{9.55 m_1 U_1 E_0}{n_s x_s}$	$p$ —电磁功率 (kW); $m_1$ —相数; $U_1$ —定子相电压 (V); $I_1$ —定子相电流 (A); $\cos\varphi$ —功率因数; $T$ —电磁转矩 (N·m); $r_1$ —定子相电阻 ( $\Omega$ ); $r_2'$ —折算到定子侧的转子电阻 ( $\Omega$ ); $x_1$ —定子电抗 ( $\Omega$ ); $x_2'$ —折合到定子侧的转子电抗 ( $\Omega$ ); $x_k$ —短路电抗 ( $\Omega$ ); $s$ —转差率; $s_N$ —额定转差率; $s_{cr}$ —临界转差率; $\lambda_T$ —转矩过载倍数; $T_N$ —额定转矩 (N·m); $T_{cr}$ —临界转矩 (N·m); $T_s$ —起动转矩 (N·m); $\omega$ —角速度 (1/s); $\omega_s$ —同步角速度 (1/s); $n_s$ —同步转速 (r/min); $f_1$ —供电频率 (Hz); $p$ —磁极对数; $q$ —系数		笼型电动机： 简单、耐用、可靠、易维护、价格低、特性硬。但起动和调速性能差，轻载时功率因数低。一般无调速要求的机械广泛应用。在变频电源供电下可平滑调速。变极数多速电动机，可分级变速调节，但体积大，价格较贵。 绕线转子电动机：因有集电环，维护比笼型电动机麻烦，价格也稍贵，但由于它起动转矩大，起动时功率因数高，且可进行小范围的速度调节，控制设备简单，故广泛用于各种生产机械，尤其用于电网容量小、起动次数多的机械，如提升机、起重机及轧钢机械等

续表

类型	特性公式	符号	特性曲线	性能
交流电动机	$n_s = \frac{60f}{p}$ $T_s = \frac{9.55m_1 U_1 E_0}{n_s x_s} \sin\theta$ $T_{max} = \frac{9.55m_1 U_1 E_0}{n_s x_s}$	$E_0$ —空载电动势 (V); $\theta$ —电动势与电压的相角差; $T_s$ —同步转矩 (N·m); $x_s$ —同步电抗 ( $\Omega$ );		一般不调速, 也可变频调速
直流电动机	$E = K_c \Phi n = C_e n$ $K_c = \frac{pN}{60a}$ $T = K_T \Phi I_a = C_T I_a$ $K_T = \frac{K_c}{1.03}$ $n = \frac{U - I_a(R_a + R)}{K_c \Phi}$ $n_s = \frac{U}{K_c \Phi}$ $n = \frac{U}{K_c \Phi} - \frac{R_a + R}{K_c K_T \Phi^2} T$ $T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}$	$E$ —反电动势 (V); $\Phi$ —磁通 (Wb); $K_c$ —电动机电动势结构常数; $K_T$ —电动机转矩结构常数; $N$ —电枢绕组的导体总数; $a$ —电枢绕组的支路对数; $I_a$ —电枢电流 (A); $U$ —电枢电压 (V); $T$ —电磁转矩 (N·m); $R_a$ —电枢电阻 ( $\Omega$ ); $R$ —电枢回路附加电阻 ( $\Omega$ ); $T_N$ —额定转矩 (N·m); $T_L$ —负载转矩 (N·m); $P_N$ —额定功率 (kW); $C_e$ —电动机电动势常数; $C_T$ —电动机转矩常数;		调速性能好, 范围宽, 采用电子控制下, 能充分适应各种机械负载特性的需要, 但它的价格贵、维护复杂, 且需直流电源, 因此只在交流电动机不能满足调速要求时才采用。 串励直流电动机的特点是起动转矩大、过载能力大、特性软, 适用于电力牵引机械和起重机等。 复励直流电动机的起动转矩和过载能力比并励直流电动机大, 但调速范围稍窄。接成积复励时, 适用于起动转矩很大、负载具有强烈变化的设备上

续表

类型	特性公式	符号	特性曲线	性能
直流电动机				

### 14.1.3.3 生产机械的负载类型

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》2.2.1节。

生产机械的负载转矩  $T_L$  随转速  $n$  而变化的特性 [ $T_L = f(n)$ ] 称为负载特性，通常有以下三种类型。

(1) 恒转矩负载。负载转矩  $T_L$  与转速  $n$  无关，在任何转速下， $T_L$  总保持恒定或大致恒定，这类负载称为恒转矩负载，它多数呈反抗性的，即  $T_L$  的极性随转速方向的改变而改变，总是起反阻转矩作用，见图 14-1-2 (a)，轧钢机、造纸机、运输机、机床等均属于此类负载。还有一种位势性转矩负载， $T_L$  的极性不随转速方向的改变而改变，见图 14-1-2 (b)，电梯、卷扬机、起重机的提升机构均属于此类。

(2) 恒功率负载。某些机械，如机床的切削，通常在粗加工时，切削量大，

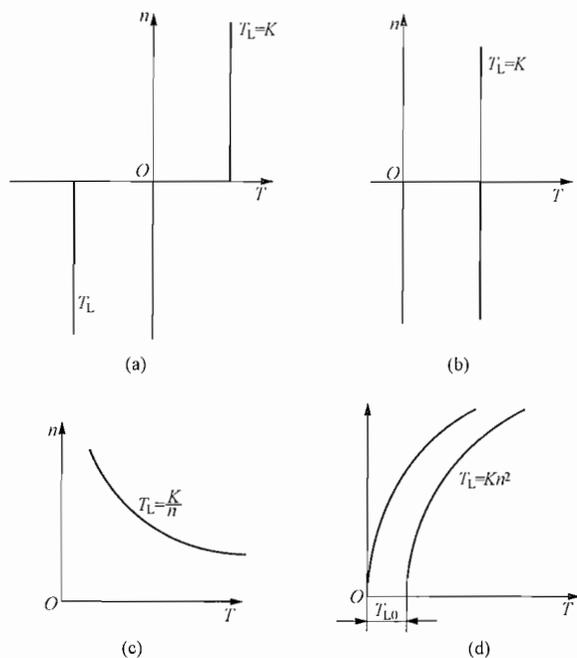


图 14-1-2 生产机械的负载特性

(a) 恒转矩负载；(b) 恒位势转矩负载；

(c) 恒功率负载；(d) 风机、泵类负载

阻转矩也大，采用低速；而精加工时，切削量小，阻转矩小，采用高速。负载转矩  $T_L$  与转速  $n$  成反比，形成恒功率负载，见图 14-1-2 (c)。轧钢机中的卷取机及开卷机要求恒张力轧制时也属恒功率负载。负载的恒功率性质是就一定的速度变化范围而言的，当速度很低时，受机械强度限制， $T_L$  不可能无限增大，在低速区转为恒转矩性质。负载

的恒功率和恒转矩区对传动方案的选择有很大影响,电动机(无论是交流电动机还是直流电动机)在恒磁调速时最大输出转矩不变——恒转矩调速;而在弱磁调速时,最大输出转矩与转速成反比——恒功率调速。如果电动机的恒功率和恒转矩调速范围与负载的恒功率和恒转矩区一致,电动机及供电装置功率最小,但若负载恒功率区很宽,要继续维持上述关系,将要求特殊的宽弱磁调速范围电动机,这给电动机制造及控制带来困难,成本反而增高,这时需寻找一个折中方案,适当增大电动机功率,减小弱磁调速范围。

(3) 风机、水泵负载(二次型负载)。在各种风机、水泵、油泵中,随叶轮的转动,空气、水、油对叶片的阻力在一定转速范围内大致与转速 $n$ 的二次方成正比,其特性见图14-1-2(d)。图14-1-2(d)中, $T_{L0}$ 系机器传动部分的摩擦阻转矩,电动机启动时,速度低,阻力矩小,易启动。在额定转速附近,较小的 $n$ 变化将使机械出力有较大变化。

#### 14.1.3.4 电动机的工作制

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》2.2.2,2.2.3节。

电动机的工作制对应于生产机械的各种工作制。

##### 14.1.3.4.1 生产机械的工作制

(1) 长期工作制。生产机械长期恒速(或变化不大)运行。根据负载施加方式不同,又可分为下列三类。

1) 平稳负载。负载转矩长时间不变或变化不大,例如风机、泵、压缩机、磨粉机等,这类机械对电气传动装置的要求简单,只要有足够的功率和启动转矩就行。

2) 波动或重复短时负载。负载长期施加,但大小波动或周期性重复施加。例如某些恒速轧钢机,这类机械除要求电气传动装置有足够的功率和启动转矩外,还要求有足够的过载转矩。

3) 短时负载。施加负载时间很短,在负载周期中占比例很小。这类机械通常有较大飞轮力矩,施加负载时,速度略降低,飞轮发出能量做功,电动机功率可适当减小。对电气传动装置的要求是有足够的启动和过载转矩,电动机发热校验一般都不成问题。

(2) 短期和重复短期工作制。

1) 短期工作制。生产机械经较长时间间隔起停或加减速一次,完成一个工作循环,例如起停式剪切机械和长期工作制的短时负载一样,要求电动机的启动和过载转矩大于负载转矩(发热校验一般不成问题)。区别在于短期工作制的生产机械对起制动(或加减速)时间或行程有要求,需有足够的加减速动态转矩。

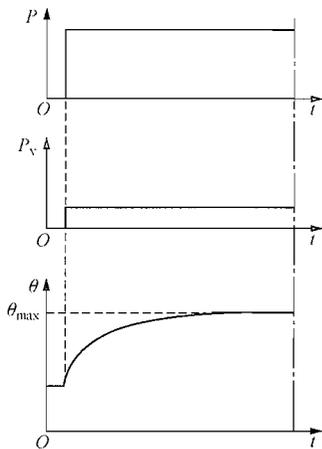
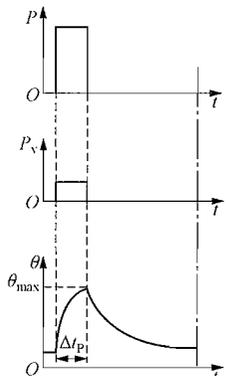
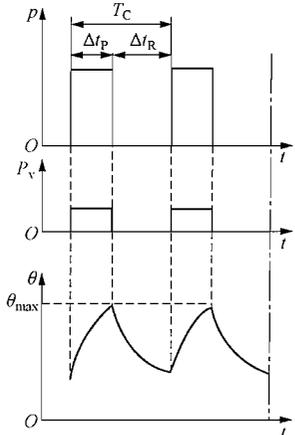
2) 重复短期工作制。生产机械周期性的起停或加减速,间隔较短,例如可逆轧机、提升机械等。它除了要求有足够的起制动转矩(满足机械对加减速时间或行程的要求)和过载能力外,还要进行发热校验。不同于长期工作制的重复短时负载的发热校验,要考虑加减速电流所增加的损耗。

##### 14.1.3.4.2 电动机工作制的分类

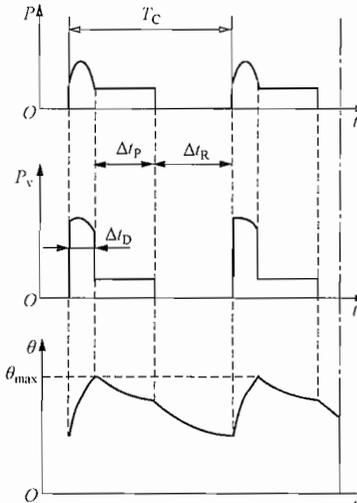
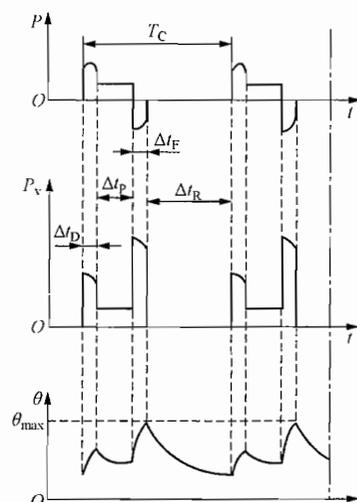
对应于生产机械的各种工作制,通常将传动电动机的工作制类型分为表14-1-2所示的10类。

表 14-1-2

电动机的工作制类型

序号	工作制类别	定义	示意图
1	连续工作制 S1	保持在恒定负载下运行至热稳定状态	 <p><math>P</math>—负载; <math>P_v</math>—电气损耗; <math>\theta</math>—温度; <math>\theta_{\max}</math>—达到的最高温度; <math>t</math>—时间</p>
2	短时工作制 S2	在恒定负载下按给定的时间运行,电动机在该时间内不足以达到热稳定状态时,随之停机和断能,其时间足以使电机再度冷却到与冷却介质温度之差在 2K 以内	 <p><math>P</math>—负载; <math>P_v</math>—电气损耗; <math>\theta</math>—温度; <math>\theta_{\max}</math>—达到的最高温度; <math>t</math>—时间; <math>\Delta t_p</math>—恒定负载运行时间</p>
3	断续周期工作制 S3	按一系列相同的工作周期运行,每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段停机和断能时间。这种工作制,每一周期的起动电流不致对温升有显著影响	 <p><math>P</math>—负载; <math>P_v</math>—电气损耗; <math>\theta</math>—温度; <math>\theta_{\max}</math>—达到的最高温度; <math>t</math>—时间; <math>T_c</math>—负载周期; <math>\Delta t_p</math>—恒定负载运行时间; <math>\Delta t_R</math>—停机和断能时间; 负载持续率 = <math>\Delta t_p / T_c</math></p>

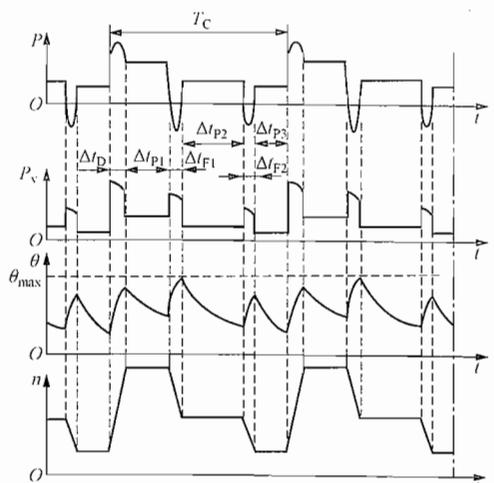
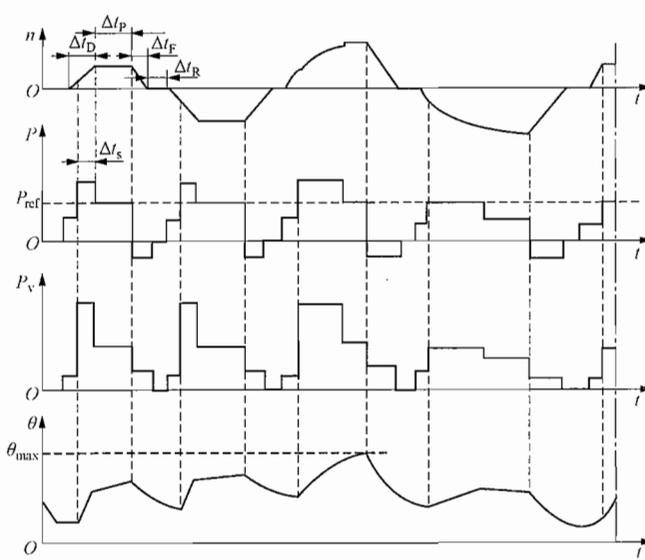
续表

序号	工作制类别	定义	示意图
4	包括起动的断续周期工作制 S4	按一系列相同的工作周期运行,每一周期包括一段对温升有显著影响的起动时间、一段恒定负载运行时间及一段停机和断能时间	 <p><math>P</math>—负载; <math>P_v</math>—电气损耗; <math>\theta</math>—温度; <math>\theta_{\max}</math>—达到的最高温度; <math>t</math>—时间; <math>T_C</math>—负载周期; <math>\Delta t_D</math>—起动/加速时间; <math>\Delta t_P</math>—恒定负载运行时间; <math>\Delta t_R</math>—停机和断能时间; 负载持续率 = <math>(\Delta t_D + \Delta t_P) / T_C</math></p>
5	包括电制动的断续周期工作制 S5	按一系列相同的工作周期运行,每一周期包括一段起动时间、一段恒定负载运行时间、一段电制动时间及一段停机和断能时间状态	 <p><math>P</math>—负载; <math>P_v</math>—电气损耗; <math>\theta</math>—温度; <math>\theta_{\max}</math>—达到的最高温度; <math>t</math>—时间; <math>T_C</math>—负载周期; <math>\Delta t_D</math>—起动/加速时间; <math>\Delta t_P</math>—恒定负载运行时间; <math>\Delta t_F</math>—电制动时间; <math>\Delta t_R</math>—停机和断能时间; 负载持续率 = <math>\Delta t_P / T_C</math></p>

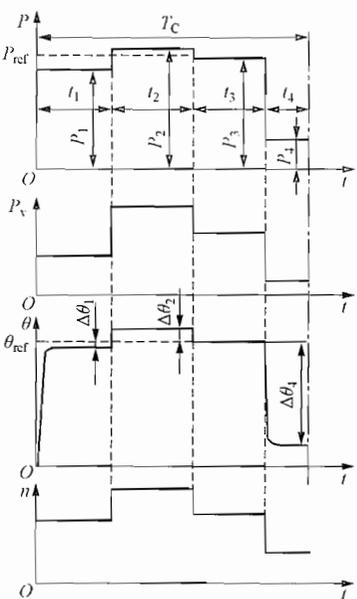
续表

序号	工作制类别	定义	示意图
6	连续周期工作制 S6	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段空载运行时间，无停机和断能时间	<p><math>P</math>—负载；<math>P_v</math>—电气损耗；<math>\theta</math>—温度；<math>\theta_{\max}</math>—达到的最高温度；<math>t</math>—时间；<math>T_C</math>—负载周期；<math>\Delta t_P</math>—恒定负载运行时间；<math>\Delta t_V</math>—空载运行时间；负载持续率 = <math>\Delta t_P / T_C</math></p>
7	包括电制动的连续周期工作制 S7	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段启动时间、一段恒定负载运行时间和一段电制动时间，无停机和断能时间	<p><math>P</math>—负载；<math>P_v</math>—电气损耗；<math>\theta</math>—温度；<math>t</math>—时间；<math>T_C</math>—负载周期；<math>\Delta t_D</math>—启动/加速时间；<math>\Delta t_P</math>—恒定负载运行时间；<math>\Delta t_F</math>—电制动时间；负载持续率 = 1</p>

续表

序号	工作制类别	定义	示意图
8	包括负载与转速相应变化的连续周期工作制 S8	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段按预定转速运行的恒定负载运行时间和一段或几段按不同转速运行的其他恒定负载时间（例如变极多速异步电动机），无停机和断能时间	 <p>The diagram for S8工作制 shows four vertically stacked graphs sharing a common time axis (t). The top graph shows load (P) with a repeating periodic waveform. The second graph shows electrical loss (P<sub>v</sub>) with a similar periodic waveform. The third graph shows temperature (θ) with a periodic curve that rises during load periods and falls during rest periods, reaching a maximum value θ<sub>max</sub>. The bottom graph shows speed (n) with a periodic step-like waveform. Labels include T<sub>C</sub> for the load cycle, Δt<sub>D</sub> for start/acceleration time, Δt<sub>P1</sub>, Δt<sub>P2</sub>, Δt<sub>P3</sub> for constant load running times at different power levels, and Δt<sub>F1</sub>, Δt<sub>F2</sub> for electric braking times.</p> <p><math>P</math>—负载; <math>P_v</math>—电气损耗; <math>\theta</math>—温度; <math>\theta_{max}</math>—达到的最高温度; <math>n</math>—转速; <math>t</math>—时间; <math>T_C</math>—负载周期; <math>\Delta t_D</math>—起动/加速时间; <math>\Delta t_P</math>—恒定负载运行时间 (<math>P_1, P_2, P_3</math>); <math>\Delta t_F</math>—电制动时间 (<math>F_1, F_2</math>); 负载持续率 = <math>(\Delta t_D + \Delta t_{P1}) / T_C, (\Delta t_{F1} + \Delta t_{P2}) / T_C, (\Delta t_{F2} + \Delta t_{P3}) / T_C</math></p>
9	负载和转速作非周期变化的工作制 S9	负载和转速在允许范围内作非周期性变化的工作制，这种工作制包括经常性过载，其值可远远超过基准负载	 <p>The diagram for S9工作制 shows four vertically stacked graphs sharing a common time axis (t). The top graph shows speed (n) with a non-periodic, irregular waveform. The second graph shows load (P) with a non-periodic, irregular waveform. The third graph shows electrical loss (P<sub>v</sub>) with a non-periodic, irregular waveform. The bottom graph shows temperature (θ) with a non-periodic, irregular curve that rises during high-load periods and falls during low-load periods, reaching a maximum value θ<sub>max</sub>. Labels include Δt<sub>D</sub> for start/acceleration time, Δt<sub>P</sub> for constant load running time, Δt<sub>F</sub> for electric braking time, Δt<sub>n</sub> for stop and energy cut-off time, and Δt<sub>s</sub> for overload time. A horizontal dashed line indicates the reference load P<sub>ref</sub>.</p> <p><math>P</math>—负载; <math>\Delta t_{ref}</math>—基准负载; <math>P_v</math>—电气损耗; <math>\theta</math>—温度; <math>\theta_{max}</math>—达到的最高温度; <math>n</math>—转速; <math>t</math>—时间; <math>\Delta t_D</math>—起动/加速时间; <math>\Delta t_P</math>—恒定负载运行时间; <math>\Delta t_F</math>—电制动时间; <math>\Delta t_n</math>—停机和断能时间; <math>\Delta t_s</math>—过载时间</p>

续表

序号	工作制类别	定义	示意图
10	离散恒定负载和转速工作制 S10	包括特定数量的离散负载（或等效负载）/转速（如可能）的工作制，每一种负载/转速组合的运行时间应足以使电机达到热稳定。在一个工作周期中的最小负载值可为零（空载或停机 and 断能）	 <p>The diagram illustrates the S10 duty cycle with four vertically stacked graphs sharing a common time axis <math>t</math>.  1. Top graph: Power <math>P</math> vs <math>t</math>. It shows a periodic load profile with four distinct levels: <math>P_1</math>, <math>P_2</math>, <math>P_3</math>, and <math>P_4</math>. The duration of each level is <math>t_1, t_2, t_3, t_4</math> respectively. A dashed box encloses the first three levels, labeled <math>T_C</math>. A horizontal dashed line represents the reference power <math>P_{ref}</math>.  2. Second graph: Electrical loss <math>P_v</math> vs <math>t</math>. It shows a step function where the loss is constant for each load level <math>P_i</math>.  3. Third graph: Temperature <math>\theta</math> vs <math>t</math>. It shows the temperature rising from a reference value <math>\theta_{ref}</math> during each load period. The temperature rise for each level is <math>\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3</math>. A dashed line indicates the maximum temperature <math>\theta_{max}</math>.  4. Bottom graph: Speed <math>n</math> vs <math>t</math>. It shows a step function where the speed is constant for each load level.</p> <p><math>P</math>—负载；<math>P_{ref}</math>—基准负载；<math>P_v</math>—电气损耗；<math>\theta</math>—温度；<math>\theta_{max}</math>—达到的最高温度；<math>n</math>—转速；<math>t</math>—时间；<math>\Delta t_D</math>—起动/加速时间；<math>\Delta t_P</math>—恒定负载运行时间；<math>\Delta t_F</math>—电制动时间；<math>\Delta t_n</math>—停机和断能时间；<math>\Delta t_s</math>—过载时间</p>

这 10 类工作制中，工作制 S1 可以按照电动机铭牌给出的连续定额作长期运行。对于工作制 S2，电动机应在实际冷状态下起动，并在规定的时限内运行。短时定额的时限一般规定为 10、30、60min 或 90min，视电动机而定。

对于工作制 S3 和 S6，每一工作周期的时间为 10min。

对于 S3、S4、S5、S6 和 S8 这 5 种工作制，负载持续率为 15%、25%、40% 和 60%。

对于 S4、S5、S7 和 S8 这 4 种工作制，每小时的等效起动次数一般分为 150、300 次或 600 次，并应给出电动机的转动惯量  $J_m$  和折算到电动机轴上的全部外加转动惯量  $J_{ext}$  之值。

## 14.2 电动机的选择

### 14.2.1 电动机选择的基本要求

摘自 GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》2.1 节。

2.1.1 电动机的工作制、额定功率、堵转转矩、最小转矩、最大转矩、转速及其调节范围等电气和机械参数应满足电动机所拖动的机械（以下简称机械）在各种运行方式下的要求。

2.1.2 电动机类型的选择应符合下列规定：

1 机械对起动、调速及制动无特殊要求时，应采用笼型电动机，但功率较大且连续工作的机械，当在技术经济上合理时，宜采用同步电动机。

2 符合下列情况之一时，宜采用绕线转子电动机：

- 1) 重载起动的机械, 选用笼型电动机不能满足起动要求或加大功率不合理时。
- 2) 调速范围不大的机械, 且低速运行时间较短时。
- 3 机械对起动、调速及制动有特殊要求时, 电动机类型及其调速方式应根据技术经济比较确定。当采用交流电动机不能满足机械要求的特性时, 宜采用直流电动机; 交流电源消失后必须工作的应急机组, 亦可采用直流电动机。
- 4 变负载运行的风机和泵类等机械, 当技术经济上合理时, 应采用调速装置, 并选用相应类型的电动机。

#### 2.1.3 电动机额定功率的选择应符合下列规定:

1 连续工作负载平稳的机械应采用最大连续定额的电动机, 其额定功率应按机械的轴功率选择。当机械为重载起动时, 笼型电动机和同步电动机的额定功率应按起动条件校验; 对同步电动机, 尚应校验其牵入转矩。

2 短时工作的机械应采用短时定额的电动机, 其额定功率应按机械的轴功率选择; 当无合适规格的短时定额电动机时, 可按允许过载转矩选用周期工作定额的电动机。

3 断续周期工作的机械应采用相应的周期工作定额的电动机, 其额定功率宜根据制造厂提供的不同负载持续率和不同起动次数下的允许输出功率选择, 亦可按典型周期的等值负载换算为额定负载持续率选择, 并应按允许过载转矩校验。

4 连续工作负载周期变化的机械应采用相应的周期工作定额的电动机, 其额定功率宜根据制造厂提供的数据选择, 亦可按等值电流法或等值转矩法选择, 并应按允许过载转矩校验。

5 选择电动机额定功率时, 应根据机械的类型和重要性计入储备系数。

6 当电动机使用地点的海拔和冷却介质温度与规定的工作条件不同时, 其额定功率应按制造厂的资料予以校正。

2.1.4 电动机的额定电压应根据其额定功率和配电系统的电压等级及技术经济的合理性确定。

2.1.5 电动机的防护形式应符合安装场所的环境条件。

2.1.6 电动机的结构及安装形式应与机械相适应。

## 14.2.2 电动机类型的选择

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》2.3节。

### 14.2.2.1 直流与交流电动机的选择

交流电动机结构简单、价格便宜、维护工作量大, 但起制动及调速性能不如直流电动机。因此在交流电动机能满足生产需要的场合都应采用交流电动机, 仅在起制动和调速等方面不能满足需要时才考虑直流电动机。近年来, 随着电力电子及控制技术的发展, 交流调速装置的性能与成本已能和直流调速装置竞争, 越来越多的直流调速应用领域被交流调速占领。在选择电动机种类时应从以下几方面考虑选用交流电动机还是直流电动机。

(1) 不需调速的机械。包括长期工作制、短时工作制和重复短时工作制机械, 应采用交流电动机。仅在某些操作特别频繁、交流电动机在发热和起制动特性不能满足要求时, 才考虑直流电动机, 只需几级固定速度的机械可采用多极交流电动机。

(2) 需要调速的机械。

1) 转速与功率之积：受换向器换向能力限制，按目前的技术水平，直流电动机最大的转速与功率之积约为  $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r}/\text{min}$ ，当接近或超过该值时，宜采用交流电动机，这问题不仅存在于大功率设备，对某些中小功率设备在要求转速特别高时也存在。

2) 飞轮力矩：为改善换向器换向条件，要求直流电动机电枢漏感小，电动机转子短粗，因而造成飞轮力矩  $GD^2$  大。交流电动机（无换向器电动机除外）无此限制，转子细长， $GD^2$  小，电动机转速越高，交直流电动机  $GD^2$  之差越大，当直流电动机的  $GD^2$  不能满足生产机械要求时，宜采用交流电动机。表 14-2-1 中列出几台实际电动机的  $GD^2$  值，供参考。

表 14-2-1 交直流电动机的  $GD^2$  值

功率 (kW)	转速 (r/min)	$GD^2$ ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ )	
		交流	直流
9500	70/140	441	794
9000 (交流) $2 \times 4500$ (直流双电枢)	250/578	42	188

3) 为解决直流电动机  $GD^2$  大和功率受限制的问题，过去许多机械采用双电枢或三电枢直流电动机传动，但电动机造价高，占地面积大，易产生轴扭振，随着交流调速技术的发展，上述方案已不可取，应考虑改用单台交流电动机。

4) 在环境恶劣场合，例如高温、多尘、多水气、易燃、易爆等场合，宜采用无换向器、无火花、易密闭的交流电动机。

5) 交直流电动机调速性能差不多，目前高性能系统的转矩响应时间都是  $10 \sim 20 \text{ ms}$ ，速度响应时间都在  $100 \text{ ms}$  左右，交流电动机  $GD^2$  小，略快一些，为获得同样的性能，交流调速系统比直流调速系统复杂，要求较高调整维护水平。

6) 对电网的影响。

a. 可控整流直流调速装置存在输入功率因数低及输入电流中存在 5、7、11、13、…次谐波问题。

b. 晶闸管交-直-交变频交流调速装置的输入部分仍是可控整流，对电网的影响和直流调速时相同。

c. 晶闸管交-交变频交流调速也基于移相控制，输入功率因数和直流调速时差不多，输入电流中除 5、7、11、13、…次谐波外，还有旁频、谱线数目增加，但幅值减少。

d. IGBT 和 IGCT (或 IEGT) PWM 交流变频调速传动输入功率因数好，接近“1”，采用有源前端整流 (PWM 整流) 可以做到功率因数等于“1”，且输入电流为正弦，供电设备容量小，不必装无功补偿装置，节约供电费用。

7) 成本：交流调速用变流装置比直流调速用整流装置贵，因为交流调速用变流装置按电动机的电压电流峰值选择器件，当三相电流中某一相电流处于峰值时，另两相电流只有一半，器件得不到充分利用，交流电动机比直流电动机便宜，可以补偿变流装置增加的成本，目前：

a. 中小功率 ( $300 \text{ kW}$  以下) 传统系统采用 IGBT 的 PWM 变频调速装置的成本比直流装置略贵，但可以从电动机差价和减少维修中得到补偿，交流调速正逐步取代直流

调速。

b. 大功率 (2000kW 以上) 调速传动系统, 交流电动机和调速装置的总价格已与直流相当或略低, 新建设备基本上已全部采用交流传动, 原有直流调速设备也逐步改用交流调速设备。

c. 中功率 (200 ~ 2000kW) 调速传动系统, 交流装置比直流装置贵许多, 目前直流用得较多, 由于 IGBT PWM 变频可节约电费, 现在 1000kW 以下的新建传动系统也在考虑使用交流。

8) 损耗与冷却通风。

a. 采用直流电动机时, 主电路功率流入转子, 散热困难, 需要通风功率大, 冷却水多。

b. 采用交流同步电动机时, 主电路功率流入定子, 散热条件好, 通风功率小, 比直流电动机节能、节水一半左右。

c. 采用交流异步电动机时, 主电路功率虽也流入定子, 但功率因数低, 效率与直流电动机差不多。

#### 14.2.2.2 普通励磁同步电动机

(1) 优点。

1) 电动机功率因数高。

2) 用于变频传动时, 电动机功率因数等于“1”, 使变频装置容量最小, 变频器输入功率因数改善。

3) 效率比异步电动机的高。

4) 气隙比异步电动机的大, 大容量电动机制造容易。

(2) 缺点。

1) 需附加励磁装置。

2) 变频调速控制系统比异步电动机的复杂。

(3) 应用场合。

1) 大功率不调速传动。

2) 600r/min 以下大功率交-交变频调速传动, 例如轧机、卷扬机、船舶驱动、水泥磨机等。交-交变频用同步电动机属普通励磁同步电动机范围, 但与不调速电动机相比有如下特点: 最高频率 20Hz 以下; 电动机电压按晶闸管变频装置最大输出电压配用, 目前线电压有效值一般在 1600 ~ 1700V; 阻尼绕组按改善电动机特性设计, 不考虑异步起动; 电动机机械强度加强, 按直流电动机强度设计。

#### 14.2.2.3 异步电动机

(1) 特点。

1) 笼型异步电动机结构简单, 制造容易, 价格便宜。

2) 绕线转子异步电动机可以通过在转子回路中串电阻、频敏电阻或通过双馈改变电动机特性, 改善起动性能或实现调速。

3) 功率因数及效率低。在采用变频调速时, 加大变频器容量。

4) 气隙小, 大功率电动机制造困难。

5) 调速控制系统比同步电动机的简单。

(2) 应用场合。

1) 2000 ~ 3000kW 以下、不调速、操作不频繁场合, 宜用笼型异步电动机。

2) 2000 ~ 3000kW 以下、不调速，但要求起动力矩大或操作较频繁场合，宜用绕线转子异步电动机。

3) 环境恶劣场合宜用笼型异步电动机。

4) 2000 ~ 3000kW 以下，转速大于 100r/min 的交流调速系统，由于异步电动机的临界转矩  $T_{cr}$  在恒功率弱磁调速段与  $(\omega_{sn}/\omega_s)^2$  成比例，随转速上升，以二次方关系下降，所以不适合用于  $(\omega_{sn}/\omega_s) > 2$  的场合。

#### 14.2.2.4 直流电动机

(1) 需要较大起动转矩和恒功率调速的机械，如电车、牵引机车等，用串励直流电动机。

(2) 其他使用直流电动机场合，一般均用他励直流电动机。注意要按生产机械的恒转矩和恒功率调速范围，合理地选择电动机的基速及弱磁倍数。

#### 14.2.3 电动机转速的选择

依据：《钢铁企业电力设计手册》23.2.2 节。

合理地选择电动机的转速，应从技术经济多方面考虑：

(1) 对于不需要调速的高转速或中转速机械，如水泵、压缩机、鼓风机，一般应选用相应转速的异步或同步电动机直接与机械相连接。

(2) 不需要调速的低转速机械，一般选用适当转速的电动机通过减速机来传动。

(3) 对于需要调速的机械，电动机的转速与生产机械要求的最高速度相适应，并留有 10% ~ 15% 向上调速的裕量，连接方法可直接连或者通过减速机传动。如选用直流电动机，应从充分利用电动机功率出发，合理选择电动机的基速。对于恒功率调速的某些机械，应适当选择减速机传动比及电动机的基速，使电动机在基速附近或以上运行。

(4) 反复短时工作的机械，电动机的转速除去能满足最高速度要求外，还需从保证生产机械达到最大的加、减速度而选择最合适的传动比，使生产机械获得最高生产率。

#### 14.2.4 电动机电压的选择

依据：《钢铁企业电力设计手册》23.2.3 节。

##### 14.2.4.1 交流电动机电压的选择

交流电动机的额定电压应根据下列条件经技术经济比较后确定：

(1) 工业企业供电电压一般为 10kV、6kV、380V。

(2) 电动机额定电压选择与工业企业供电电压有关，应经技术经济比较后确定。

当企业供电电压为 10kV 时，大容量电动机采用 10kV 直接供电；中等容量电动机，如果有 10kV 电压者，应优先采用；当总降具有 6kV 电压的三绕组主变压器时，应采用 6kV 电动机，并设 6kV 母线。当只有 10kV 电源时，电动机的额定电压采用 6kV 还是 3kV，在经过技术经济比较后，采用 10/3kV 比 10/6kV 中间变压器供电在技术经济上如果更加合理时，才可以采用 3kV 电动机。

当企业供电电压为 6kV 时，中等容量的电动机应采用 6kV 电动机。

对于 200 ~ 300kW 额定容量的电动机，其额定电压采用低压或高压，应经技术经济比较后确定。

上述技术经济比较的内容包括：

1) 设备费及其建筑费、安装费、设备费包括变压器、电动机、电缆、开关设备等。

2) 维护费，尚包括变压器、电动机、电缆中的电能损耗。

(3) 说明 (GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》条文说明)。

2.1.4 直流电动机的电压主要由功率决定。交流电动机的电压选择涉及电机本身和配电系统两个方面。一般情况下,中小型电动机为 380V 或 660V,大中型电动机为 10kV。对恒速负载,功率大于 200kW 的电动机其额定电压宜选 10kV。对变速负载宜采用变频调速,功率在 200kW~1500kW 的电动机其额定电压宜选 660V。在我国,660V 等级电压在矿井中广泛使用,并已列入了国家标准 GB/T 156《标准电压》。

#### 14.2.4.2 直流电动机电压的选择

随着电力电子元件与直流电机制造技术水平的提高,直流电动机电枢电压有提高的趋势。在选择直流电动机电枢电压时,宜在容量范围内,采用较高电压,以减小损耗,减少变流装置桥臂的晶闸管并联支路数或提高变流装置的电流储备系数,提高可靠性。

#### 14.2.5 电动机结构防护型式与冷却方式选择

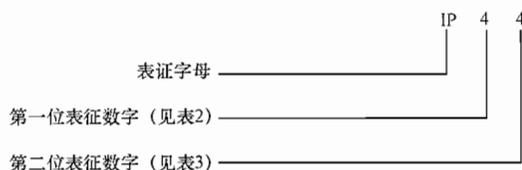
##### 14.2.5.1 电动机的结构防护型式

摘自 GB/T 4942.1—2006《旋转电机整体结构的防护等级 (IP 代码) 分级》。

##### 3 标志

防护等级的标志由表征字母“IP”及附加在其后的两个表征数字组成。表征数字的含义分别见第 4 章和第 5 章中的表。

##### 3.3 标志示例



#### 4 防护等级——第一位表征数字

##### 4.1 防护等级的含义

第一位表征数字表示外壳对人和壳内部件提供的防护等级。

表 2 中第三栏说明第一位表征数字代表的防护等级所能“防止”进入壳内物体的含义。

术语“防止”表示能防止人体某一部分、手持的工具或导体进入外壳,即使进入,也能与带电或危险的转动部件(光滑的旋转轴和类似部件除外)之间保持足够的间隙。

表 2 中第三栏也表示能防止进入的最小固体异物尺寸。

表 2 第一位表征数字表示的防护等级

第一位 表征数字	防护等级	
	简述 <sup>a</sup>	含 义
0	无防护电机	无专门防护
1 <sup>b</sup>	防护大于 50mm 固体的电机	能防止大面积的人体(如手)偶然或意外地触及、接近壳内带电或转动部件(但不能防止故意接触) 能防止直径大于 50mm 的固体异物进入壳内

续表

第一位 表征数字	防护等级	
	简述 <sup>a</sup>	含义
2 <sup>b</sup>	防护大于12mm 固体的电机	能防止手指或长度不超过80mm的类似物体触及或接近壳内带电或转动部件 能防止直径大于12mm的固体异物进入壳内
3 <sup>b</sup>	防护大于2.5mm 固体的电机	能防止直径大于2.5mm的工具或导线触及或接近壳内带电或转动部件 能防止直径大于2.5mm的固体异物进入壳内
4 <sup>b</sup>	防护大于1mm 固体的电机	能防止直径或厚度大于1mm的导线或片条触及或接近壳内带电或转动部件 能防止直径大于1mm的固体异物进入壳内
5 <sup>c</sup>	防尘电机	能防止触及或接近壳内带电或转动部件 虽不能完全防止灰尘进入，但进尘量不足以影响电机的正常运行
6	尘密电机	完全防止尘埃进入

<sup>a</sup> 本表第2栏中的简述不作为防护型式的规定。

<sup>b</sup> 第一位表征数字为1、2、3、4的电机所能防止的固体异物，系包括形状规则或不规则的物体，其3个相互垂直的尺寸均超过“含义”栏中相应规定的数值。

<sup>c</sup> 本部分的防尘等级是一般的防尘，当尘的颗粒大小、属性如纤维状或粒状已作规定时，试验条件按制造厂和用户协议。

## 5 防护等级——第二位表征数字

### 5.1 第二位表征数字表示由于外壳进水而引起有害影响的防护等级。

表3中第三栏说明第二位表征数字所代表的每一防护等级外壳的防护型式细节内容。

表3 第二位表征数字表示的防护等级

第二位 表征数字 <sup>a</sup>	防护等级	
	简述 <sup>a</sup>	含义
0	无防护电机	无专门防护
1	防滴电机	垂直滴水应无有害影响
2	15°防滴电机	当电机从正常位置向任何方向倾斜至15°以内任一角度时，垂直滴水应无有害影响
3	防淋水电机	与铅垂线成60°角范围内的淋水应无有害影响
4	防溅水电机	承受任何方向的溅水应无有害影响
5	防喷水电机	承受任何方向的喷水应无有害影响
6	防海浪电机	承受猛烈的海浪冲击或强烈喷水时，电机的进水量应不达到有害的程度
7	防浸水电机	当电机浸入规定压力的水中经规定时间后，电机的进水量应不达到有害的程度
8	持续潜水电机	电机在制造厂规定的条件下能长期潜水 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> 本表第二栏中“简述”不作为防护型式的规定。

<sup>b</sup> 电机一般为水密型，但对某些类型电机也可允许水进入，但不应达到有害的程度。

### 14.2.5.2 电动机冷却方式

摘自 GB/T 1993—1993 《旋转电机冷却方法》。

4 表示冷却介质的特征字母

4.1 冷却介质（见 7.1.3 和 7.1.5 条）用表 1 中规定的特征字母表示：

表 1 冷却介质的性质

特征字母	冷却介质	特征字母	冷却介质
a (见 4.2)	空气	w	水
f	氟利昂	u	油
h	氢气	s (见 4.3)	本表已表明外的其他冷却介质
n	氮气	y (见 4.4)	尚待确定的冷却介质
c	二氧化碳		

4.2 如有冷却介质为空气，则描述冷却介质的字母“A”在简化标记中可以省略。

4.3 对于表征字母“S”，应在其他地方，例如技术文件或商业文件中表明冷却介质的名称。

例如：IC3S7，S 在文件中给出说明。

4.4 冷却介质尚未确定前暂时用“Y”表示。冷却介质选定以后用它相应的字母取代。

5 冷却回路布置的特征数字

在基本符号 IC 后面的数字表示按表 2 规定的冷却介质的回路布置（见 7.1.2 条）以便传递走电机热量。

表 2 回路布置

特征数字	简要说明	定义
0 <sup>1)</sup>	自由循环	冷却介质从周围介质直接地自由吸入，然后直接返回到周围介质（开路）
1 <sup>1)</sup>	进口管或进口通道循环	冷却介质通过进口管或进口通道从电机的远方介质中吸入电机，经过电机后，直接返回到周围介质（开路）
2 <sup>1)</sup>	出口管或出口通道循环	冷却介质直接从周围介质吸入，经过电机后，通过出口管或通道回到远离电机的远方介质（开路）
3 <sup>1)</sup>	进出管或进出通道循环	冷却介质通过进口管或通道从远方介质吸入，流经电机后，通过出口管或通道回到远方介质（开路）
4	机壳表面冷却	初级冷却介质在电机内的闭合回路内循环，并通过机壳表面把热量（包括经定子铁心和其他热传导部件传递到机壳表面的热量），传递到最终冷却介质、即周围环境介质。机壳外部表面可以是光滑的或带肋的，也可以带外罩以改善热传递效果
5 <sup>2)</sup>	内装式冷却器 (用周围环境介质)	初级冷却介质在闭合回路内循环，并通过与电机成为一体的内装式冷却器把热量传给最终冷却介质，后者为周围环境介质
6 <sup>2)</sup>	外装式冷却器 (用周围环境介质)	初级冷却介质在闭合回路内循环，并通过直接安装在电机上的外装式冷却器把热量传递给最终冷却介质，后者为周围环境介质

续表

特征数字	简要说明	定 义
7 <sup>2)</sup>	内装式冷却器 (用远方介质)	初级冷却介质在闭合回路内循环, 并通过与电机成为一体的内装式冷却器把热量传递给次级冷却介质, 后者为远方介质
8 <sup>2)</sup>	外装式冷却器 (用远方介质)	初级冷却介质在闭合回路内循环, 并通过装在电机上面的外装式冷却器把热量传递给次级冷却介质, 后者为远方介质
9 <sup>2),3)</sup>	分装式冷却器 (用周围环境介质 或远方介质)	初级冷却介质在闭合回路内循环, 并通过与电机分开独立安装的冷却器把热量传递给次级冷却介质, 后者为周围环境介质或远方介质

注: 1) 为除尘和消声, 机壳或通道内可设置过滤器或迷宫。特征数字0~3也适用于装有冷却器的电机, 通过冷却器使进入电机的冷却介质温度低于周围介质温度或者是降低排出冷却介质的温度, 以保持较低的环境温度。

2) 冷却器性质无规定(光管或是有冷却片的管子)。

3) 分装式冷却器可以安装在电机旁或远离电机处。而气态的次级冷却介质可以是周围介质或远方介质(可见附录A, 表A3)。

## 6 冷却介质运动的推动方法特征数字

按照表3规定的数字紧跟在(在完整标记方法中)代表冷却介质性质的字母后面, 表示冷却介质运动的推动方法(见7.1.4和7.1.6条)。

表3 推 动 方 法

特征数字	简要说明	定 义
0	自由对流	依靠温度差促使冷却介质运动, 转子的风扇作用可忽略不计
1	自循环	冷却介质运动与电机转速有关, 或因转子本身的作用, 或为此目的专门设计并安装在转子上的部件使介质运动, 也可以是由转子拖动的整体风扇或泵的作用促使介质运动
2、3、4		备 用
5 <sup>1)</sup>	内装式独立部件	由整体部件驱动介质运动, 该部件所需动力与主机转速无关, 例如自带驱动电动机的风扇或泵
6 <sup>1)</sup>	外装式独立部件	由安装在电机上的独立部件驱动介质运动, 该部件所需动力与主机转速无关, 例如自带驱动电动机的风扇或泵
7 <sup>1)</sup>	分装式独立部件或 冷却介质系统压力	与电机分开安装的独立的电气或机械部件驱动冷却介质运动, 或者是依靠冷却介质循环系统中的压力驱动冷却介质运动。例如, 有压力的给水系统或供气系统
8 <sup>1)</sup>	相对运动	冷却介质运动起因于它与电机之间有相对运动, 或者是电机在介质中运动, 或者是周围介质流过电机(液体或气体)
9	其他部件	冷却介质由上述方法以外的其他方法驱动, 应予以详细说明

注: 1) 独立部件作为推动冷却介质运动的主要驱动源, 并不排除主电机转子或转子上安装的风扇的作用。

## 7 标记系统

电机冷却方法使用的标记, 由下述字母和数字组成。

### 7.1 IC 代码的排列

以完整标记 IC8A1W7 和简化标记 IC81W 为例说明标记系统如下:

完整标记	-----	IC	8	A	1	W	7
简化标记	-----	IC	8		1	W	

(国际通用冷却符号)

#### 7.1.1 标志字母

#### 7.1.2 冷却回路的布置

按第 5 章用特征数字表示。

#### 7.1.3 初级冷却介质

按第 4 章用特征字母表示。冷却介质如为空气, 在简化标记中字母 A 可省略。

#### 7.1.4 初级冷却介质运动的推动方法

按第 6 章用特征数字表示。

#### 7.1.5 次级冷却介质

按第 4 章用特征字母表示, 冷却介质如为空气, 在简化标记中字母 A 可省略。

#### 7.1.6 次级冷却介质运动的推动方法

按第 6 章用特征数字表示。冷却介质如为水且推动方法为 7, 在简化标记中数字 7 可省略。

### 7.2 标记方法的应用

应优先使用简化标记法。完整标记法主要是在不能使用简化标记方法的情况下才使用。

### 7.3 电机的不同部分具有同样冷却回路布置的标记

电机的不同部分, 可使用不同的冷却介质或不同的冷却介质运动的推动方法。如不同部分的冷却回路布置相同, 对这种电机可在每一部分的名称后面用适当的标记方法标记。

例如: 对于定、转子中不同的冷却回路

转子 IC7H1W 定子 IC7W5W ----- (简化标记)

转子 IC7H1W7 定子 IC7WSW7 ----- (完整标记)

例如: 对电机的不同回路

发电机 IC7H1W 励磁机 IC75W ----- (简化标记)

发电机 IC7H1W7 励磁机 IC7A5W7 ----- (完整标记)

### 7.4 电机的不同部分采用不同冷却回路布置的标记

电机的不同部分可使用不同冷却回路布置, 在电机的相应部分的名称之后, 按规定标记并在不同部分的标记之间用“/”号划分开。

例如: 发电机 IC81W/励磁机 IC75W ----- (简化标记)

发电机 IC8A1W7/励磁机 IC7A5W7 ----- (完整标记)

### 7.5 直接冷却绕组的标记

对直接冷却（内冷）绕组，其相应回路的标记部分应加括号。

例如：转子 IC7H1W 定子 IC7（W5）W .....（简化标记）

转子 IC7H1W7 定子 IC7（W5）W7 .....（完整标记）

例如：转子 IC7（H1）W 定子 IC7（W5）W .....（简化标记）

转子 IC7（H1）W7 定子 IC7（W5）W7 .....（完整标记）

### 7.6 备用或紧急冷却的标记

根据备用或紧急冷却情况，可用不同冷却回路布置。其标记方法是在正常的冷却方法标记后面紧跟以加括号的特殊冷却系统标记，包括“备用”或“紧急”字样和标志字母 IC。

例如：IC71W（紧急 IC01） .....（简化标记）

IC7A1W7（紧急 IC0A1） .....（完整标记）

### 7.7 组合标记

当 7.3~7.6 条中两个或两个以上的情况同时出现时，应按上述规定的标记方法组合使用。

### 7.8 特征数字的替换

对尚未确定特征数字或无特殊要求的应用场合，省略的数字用“X”替代。

例如：IC3X，IC4XX。

### 7.9 标记和图示的范例

在附录 A 中，对某些常用的旋转电机给出了不同的标记方法及相应的示意图。

## 14.2.5.3 电动机结构形式与冷却方式的选择

依据：《钢铁企业电力设计手册》23.2.4 节。

电动机结构形式应按下列环境条件确定：

(1) 在采暖的干燥厂房中，采用开启式，防护式电机。如 IP21 结构。

(2) 在不采暖的干燥厂房，或潮湿而无潮气凝结的厂房中，采用开启式和防护式如 IP21 或 IP23 结构电机。但在潮湿厂房的电动机需具有能耐潮的绝缘。

(3) 在特别潮湿的厂房中，由于空气中的水蒸气经常饱和，并可能凝成水滴，需用防滴式、防溅式或封闭式如 IP44 结构电动机，并带耐潮绝缘。

(4) 在有非导电灰尘的厂房中，当灰尘易除掉并对电机无害，且电机采用滚珠轴承时，可采用开启式或防护式电动机；当灰尘不易除掉，对绝缘有害时，采用封闭式如 IP44 结构电动机；当落在电机绕组上的灰尘或纤维妨碍电机正常冷却时，宜采用如 IP44 型封闭式电动机。

(5) 在有导电灰尘或不导电灰尘，但同时有潮气存在的厂房中，应采用如 IP44 结构封闭式电动机。

14

(6) 当对电机绝缘有害的灰尘或化学成分不多时，如果通风良好，可不用封闭式电动机，采用防护式如 IP21 结构的电动机。

(7) 在有腐蚀性蒸气或气体的厂房中，应采用密闭式如 IP54 结构电动机或耐酸绝缘的封闭风冷式电动机。

(8) 在有火灾危险的厂房中，应按现行规程选择电机。

(9) 在有爆炸危险厂房中，应按现行规程选择电机。

(10) 电动机安装在户外时, 无论直接露天装设或装在棚子下面, 均须保护电动机的绝缘不受大气、潮气的破坏。在露天装设时, 应采用封闭式如 IP44 结构电动机。装在棚子下时, 可采用防护式或封闭式电动机。

常用的电动机冷却方式有: 自然冷却式、自带冷却鼓风机式、管道通风式及背包风水冷却式。由于电动机的冷却方式与电机结构密切相关, 所以在选择电动机形式时, 应针对不同的生产机械与具体的安装环境, 确定合适的冷却方式。当电动机需要密闭循环冷却时, 首先考虑选择背包风水冷却式电动机。当大型电动机没有此种冷却方式时, 选择管道密封通风式。自带冷却鼓风机式电动机, 只适应安装于无水气、无灰尘的干燥厂房内, 热轧车间内不宜采用。对用于交流调速的电动机, 还要注意有低速运行时的冷却问题。

#### 14.2.6 电动机绝缘等级的选择

依据:《钢铁企业电力设计手册》23.2.5, 23.3.3.1。

环境温度在 40℃ 以下且在正常环境工作, 可选用 A 级、E 级绝缘等级的电动机; 湿热带环境宜选用 E 级绝缘等级的电动机。

环境温度在 40℃ 以上, 如冶金车间生产线上的电动机宜选用 F 级或 B 级绝缘等级的电动机。

只有在环境温度高, 环境条件恶劣, 才选用 H 级绝缘等级的电动机。如连铸机的拉矫机可选用 H 级绝缘等级的直流电动机; 热轧车间生产线上选 H 级绝缘等级 YZ 及 YZR 型交流电动机。

各种绝缘材料的允许工作温度、允许温升见表 14-2-2。

冷却空气小于等于 40℃ 时电动机各部件允许温升见表 14-2-3。

表 14-2-2 各种绝缘材料的允许工作温度、允许温升

绝缘等级	允许工作温度 (℃)	环境温度为 40℃ 时允许温升 (℃) (电阻法)
Y	90	
A	105	60
E	120	75
B	130	80
F	155	100
H	180	125
C	> 180	

表 14-2-3 电机各部件允许温升

电机各部件	允许温升 $\tau$ (℃)	
	A 级绝缘	B 级绝缘
大型 ( $S_N > 5000\text{kVA}$ ) 交流电机的线圈	60 <sup>①</sup>	80 <sup>①</sup>
功率较上述电机小的交流电机的线圈、多层励磁线圈、与整流子连接的电枢线圈	50 <sup>②</sup>	70 <sup>②</sup>
单层励磁线圈、异步电动机转子的棒状线圈	60 <sup>②</sup>	80 <sup>②</sup>
铁芯及与绝缘线圈接触的其他部分	65 <sup>②</sup>	90 <sup>①</sup>
滑环	60 <sup>③</sup>	80 <sup>③</sup>
	65 <sup>③</sup>	85 <sup>③</sup>

续表

电机各部件	允许温升 $\tau$ (°C)	
	A级绝缘	B级绝缘
整流子	60 <sup>③</sup>	80 <sup>③</sup>
滑动轴承	40 <sup>③</sup>	40 <sup>③</sup>
滚动轴承	55 <sup>③</sup>	55 <sup>③</sup>

① 用埋入测温器测量；

② 用电阻法测量；

③ 用温度计测量；

### 14.2.7 电动机功率的选择与计算

电动机额定功率的选择见 14.2.1 中的 2.1.3。

#### 14.2.7.1 电动机功率计算的基本公式

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》2.3.7.1节。

电动机功率计算的基本公式见表 14-2-4。

表 14-2-4 电动机功率计算常用公式

名称	公式	符 号
1. 功率	$P = \frac{T_M n_M}{9550}$ $P = \frac{Fv}{\eta} \times 10^{-3}$ $P = \frac{T_M \omega_M}{1000}$	$P$ —电动机功率 (kW) $T_M$ —电动机转矩 (N·m) $n_M$ —电动机转速 (r/min) $\omega_M$ —电动机角速度 (rad/s) $F$ —作用力 (N) $v$ —运动速度 (m/s) $\eta$ —传动效率
2. 运动物体的动能	$\omega_M = \frac{\pi n_M}{30}$ $E = \frac{mv^2}{2}$ $E = \frac{J\omega^2}{2}$ $E = \frac{GD^2 n^2}{7200}$	$E$ —运动物体的动能 (J) $m$ —物体的质量 (kg) $J$ —转动惯量 (kg·m <sup>2</sup> ) $GD^2$ —飞轮力矩 (N·m <sup>2</sup> )
3. 折算到电动机轴上的静阻负载转矩	$T_L = T_m \frac{1}{i\eta}$ $T_L = F \frac{v}{\omega_M} \cdot \frac{1}{\eta}$ $T_L = \frac{FR}{i\eta}$ $i = \frac{n_M}{n_m}$	$T_L$ —电动机轴上的静阻负载转矩 (N·m) $T_m$ —机械轴上的静阻转矩 (N·m) $R$ —物体运动的旋转半径 (m) $i$ —传动比 $n_m$ —机械轴转速 (r/min) $J_m$ —机械轴上的转动惯量 (kg·m <sup>2</sup> ) $GD_m^2$ —机械轴上的飞轮转矩 (N·m <sup>2</sup> )
4. 折算到电动机轴上的转动惯量和飞轮转矩	$J = J_m / i^2$ $GD^2 = GD_m^2 / i^2$ $GD^2 = 365 G_m v_m^2 / n_M^2$ $GD^2 = 4gJ$ $GD^2 = GD_M^2 + \frac{GD_{m1}^2}{i_1^2} + \frac{GD_{m2}^2}{i_2^2} + \dots + \frac{GD_{mn}^2}{i_n^2}$ $i_1 = \frac{n_M}{n_{m1}}, i_2 = \frac{n_M}{n_{m2}}, \dots, i_n = \frac{n_M}{n_{mn}}$	$GD_M^2$ —电动机转子飞轮转矩 (N·m <sup>2</sup> ) $GD_{m1}^2, GD_{m2}^2, \dots, GD_{mn}^2$ —相应于转速 $n_{m1}, n_{m2}, \dots, n_{mn}$ 轴上的飞轮转矩 $i_1, i_2, \dots, i_n$ —各轴对电动机轴的传动比

续表

名称	公式	符号
5. 电动机起、制动时间 (1) 动态转矩恒定下 起动(加速)时间 制动(减速)时间 (2) 动态转矩线性变化下 (3) 动态转矩非恒定, 也非线性变化时	$t_s = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375T_d}$ $T_d = T_M - T_L$ $t_b = \frac{GD^2(n_1 - n_2)}{375(-T_d)}$ $-T_d = -(T_M + T_L)$ $t_s = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375(T_{M1} - T_{M2})} \ln \frac{T_{M1} - T_L}{T_{M2} - T_L}$ $t_b = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375(T_{M1} - T_{M2})} \ln \frac{T_{M1} + T_L}{T_{M2} + T_L}$ $t_b = \frac{GD^2}{375} \int_{n_1}^n \frac{dn}{dt} (T_d > 0 \text{ 时加速})$ $t_b = \frac{GD^2}{375} \int_{n_2}^n \frac{dn}{dt} (T_d < 0 \text{ 时减速})$	
6. 动态转矩恒定时, 加减速过程电动机行程	$s = \frac{GD^2(n_2^2 - n_1^2)}{4500T_d}$	

#### 14.2.7.2 几种常用机械传动中所用电动机的功率计算

(1) 离心式风机(《钢铁企业电力设计手册》23.4.1.1)。

离心式风机的电动机功率计算公式

$$P = \frac{KQH}{\eta\eta_c} \times 10^{-3}$$

式中  $P$ ——电动机功率, kW;

$Q$ ——送风量,  $m^3/s$ ;

$H$ ——空气压力, Pa;

$\eta_c$ ——传动效率, 直接传动时为 1;

$\eta$ ——风机效率, 约为 0.4~0.75;

$K$ ——裕量系数, 其值见表 14-2-5。

表 14-2-5

电动机容量裕量系数  $K$

功率 (kW)	1.0 以下	1~2	2~5	>5
裕量系数	2	1.5	1.25	1.15~1.10

(2) 离心泵及活塞泵。

1) 离心泵及活塞泵电动机功率的计算(《钢铁企业电力设计手册》23.4.1.2)。

离心泵及活塞泵电动机功率的计算公式

$$P = \frac{K\gamma Q(H + \Delta H)}{102\eta\eta_c} \times 10^3$$

式中  $P$ ——电动机功率, kW;

- $\gamma$ ——液体密度,  $\text{t}/\text{m}^3$ ;  
 $Q$ ——泵的出水量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $H$ ——水头,  $\text{m}$ ;  
 $\Delta H$ ——主管损失水头,  $\text{m}$ ;  
 $\eta$ ——水泵效率, 一般取 0.6 ~ 0.84;  
 $\eta_c$ ——传动效率, 与电动机直接连接时为 1;  
 $K$ ——裕量系数, 见表 14-2-6。

表 14-2-6 裕量系数  $K$ 

功率 (kW)	2 以下	2 ~ 5	5 ~ 50	50 ~ 100	100 以上
裕量系数	1.7	1.5 ~ 1.3	1.15 ~ 1.10	1.08 ~ 1.05	1.05

当管道长、流速高、弯头与阀门的数量多时, 裕量系数还要适当放大。

2) 电动机与水泵配套时的容量计算 (《钢铁企业电力设计手册》6.6)。

通常电动机与水泵配套时的容量按下式确定

$$P = K_c \frac{P_2}{\eta_m} = K_c \frac{\gamma Q H}{102 \eta_{\text{pum}} \eta_m}$$

- 式中  $P$ ——与水泵配套电机容量, kW;  
 $P_2$ ——水泵工作范围内的最大轴功率, kW;  
 $\eta_m$ ——机械传动效率;  
 $Q$ 、 $H$ 、 $\eta_{\text{pum}}$ ——水泵工作范围内的最大轴功率对应的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ; 扬程,  $\text{m}$ ; 效率, %;  
 $\gamma$ ——水的容量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 102——换算系数, ( $1\text{kW} = 102\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$ );  
 $K_c$ ——电动机的备用系数, 见表 14-2-7。

表 14-2-7 电动机的备用系数  $K_c$ 

水泵轴功率 (kW)	< 5	5 ~ 10	10 ~ 50	50 ~ 100	> 100
$K_c$	2.0 ~ 1.3	1.3 ~ 1.15	1.15 ~ 1.10	1.10 ~ 1.05	1.05

(3) 离心式压缩机 (《钢铁企业电力设计手册》23.4.1.3)。

离心式压缩机, 其电动机功率计算公式为

$$P = \frac{Q(A_d + A_r)}{2\eta} \times 10^{-3}$$

- 14 式中  $P$ ——电动机功率, kW;  
 $Q$ ——压缩机生产率,  $\text{m}^3/\text{s}$   
 $A_d$ ——压缩  $1\text{m}^3$  空气至绝对压力  $P_1$  的等温功,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;  
 $A_r$ ——压缩  $1\text{m}^3$  空气至绝对压力  $P_1$  的绝热功,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;  
 $\eta$ ——压缩机总效率, 约为 0.62 ~ 0.8。  
 $A_d$ 、 $A_r$  值与终点压力的关系见表 14-2-8。

表 14-2-8  $A_d$ 、 $A_r$  值与终点压力  $P_1$  的关系

$P_1^{\text{①}}$	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10
$A_d$ (N·m)	39 717	67 666	107 873	136 312	157 887	175 539	191 230	203 978	215 746	225 553
$A_r$ (N·m)	42 169	75 511	126 506	167 694	201 036	230 456	255 954	280 470	301 064	320 677

① 大气压的倍数。

(4) 起重机 (《电气传动自动化技术手册 (第3版)》2.3.7.2)。

起重机属断续周期工作制,按其工作繁重程度,大致可分为轻、中、重和特重4级,各级对应的负载持续率  $FC$  (%) 大致为:轻级  $FC = 15\%$ , 中级  $FC = 25\%$ , 重级  $FC = 40\%$ , 特重级  $FC = 60\%$ 。各类起重机的负载程度参见表 14-2-9。

表 14-2-9 通用桥(梁)式起重机各机构工作类型实例表

类别及用途	各机构常用工作类型			
	起升		行走	
	主	副	小车	大车
电站安装检修用吊钩起重机	轻	轻	轻	轻
车间仓库一般用途吊钩起重机	中	中	中	中
繁重工作车间和仓库吊钩起重机	重	中	中	重
间断装卸用抓斗起重机	重	—	重	重
连续装卸用抓斗起重机	特重	—	特重	特重
电磁起重机	重	—	中	重

起重机各机构传动电动机功率 (kW) 可按下式计算

$$P = \frac{Fv}{\eta} \times 10^{-3}$$

式中  $v$ ——运动线速度, m/s;

$\eta$ ——机械传动效率;

$F$ ——运动时的阻力, N。

对于起升机构,  $F$  用额定起升重量代入; 对于行走机构

$$F = G_{\Sigma}(C + 7v) \times 10^{-3}$$

式中  $G_{\Sigma}$ ——运动部分总重力, N;

$C$ ——行走阻力系数; 用滚动轴承时,  $C = 10 \sim 12$ , 用滑动轴承时,  $C = 20 \sim 25$ 。

## 14.2.8 电动机的校验

依据:《电气传动自动化技术手册 (第3版)》2.3.7.3。

### 14.2.8.1 电动机校验的一般内容

电动机的功率计算一般由机械设计部门选定。按负载先预选一台电机, 然后进行下述校验:

(1) 发热校验。根据生产机械的工作制及负载图, 按等效电流 (方均根电流) 法或平均损耗法进行计算。有些生产机械负载图不易确定, 可通过试验、实测或对比 (与实际运行的类似机械相比较) 等方法来校验。从生产的发展、负载的性质以及考虑电网电压的波动、计算误差等因素, 应留有适当裕度 (一般 10% 左右; 同步电动机时考虑到其他一些因素, 如补偿功率因数等, 可以更大一些)。

(2) 起动校验。计及起动时电源电压的降低，校验起动过程中的最小转矩是否大于负载转矩，以保证电动机顺利起动。

(3) 过载能力校验。对于短时工作制、重复短时工作制和长期工作制，需校验电动机最大过载转矩是否大于负载最大峰值转矩。

(4) 电动机  $GD^2$  校验。某些机械对电动机动态性能有特殊要求，例如飞剪对电动机起动时间和行程有要求；连轧机主传动对速降及速度响应时间有要求；这时需校验电动机  $GD^2$  能否满足生产要求。

(5) 其他一些特殊的校验。例如辊道类电动机的打滑转矩校验等。

#### 14.2.8.2 恒定负载连续工作制下电动机的校验

根据负载转矩及转速，计算出所需要的负载功率  $P_L$ ，选择电动机的额定功率  $P_N$  (kW) 略大于  $P_L$

$$P_N > P_L = \frac{T_L n_N}{9550}$$

式中  $T_L$ ——折算到电动机轴上的负载转矩， $N \cdot m$ ；

$n_N$ ——电动机的额定转速  $r/min$ 。

当负载转矩恒定且需要在基速以上调速时，其额定功率 (kW) 应按所要求的最高工作转速计算

$$P_N \geq \frac{T_L n_{max}}{9550}$$

式中  $n_{max}$ ——电动机的最高工作转速， $r/min$ 。

对起动条件严酷（静阻转矩较大或带有较大的飞轮力矩）且采用笼型异步电动机或同步电动机传动的场合，在初选电动机的额定功率和转速后，还要按式 (14-2-1) 和 (14-2-2) 分别校验起动过程中的最小转矩和允许的最大飞轮力矩，以保证生产机械能顺利地起动和在起动过程中电动机不致过热。

电动机的最小起动转矩  $T_{Mmin}$  ( $N \cdot m$ ) 为

$$T_{Mmin} \geq \frac{T_{Lmax} K_s}{K_u^2} \quad (14-2-1)$$

式中  $T_{Lmax}$ ——起动过程中可能出现的最大负载转矩， $N \cdot m$ ；

$K_s$ ——保证起动时有足够加速转矩的系数，一般取  $K_s = 1.15 \sim 1.25$ ；

$K_u$ ——电压波动系数，即起动时电动机端电压与额定电压之比，全压起动时  $K_u = 0.85$ 。

允许的最大飞轮力矩  $GD_{xm}^2$  ( $N \cdot m^2$ ) 为

$$GD_{mec}^2 \leq GD_{xm}^2 = GD_0^2 \left( 1 - \frac{T_{Lmax}}{T_{sav} K_u^2} \right) - GD_M^2 \quad (14-2-2)$$

式中  $GD_{mec}^2$ ——折算到电动机轴上传动机械的最大飞轮力矩， $N \cdot m^2$ ；

$GD_0^2$ ——包括电动机在内的整个传动系统所允许的最大飞轮力矩， $N \cdot m^2$ ，折算到电动机轴上的数值，由电机资料中查取；

$GD_M^2$ ——电动机转子的飞轮力矩， $N \cdot m^2$ ；

$T_{sav}$ ——电动机的平均起动转矩， $N \cdot m$ 。

按式 (14-2-1) 和式 (14-2-2) 两项校验均能通过, 则可以采用所选电动机功率。

#### 14.2.8.3 短时工作制下电动机的校验

短时工作制下, 同样可按式 (14-2-1) 或式 (14-2-2) 计算出所需要的负载功率, 然后选择具有适当工作时间的短时定额电动机。如果没有合适的短时定额电动机, 也可选用断续定额电动机。计算电动机功率 (kW) 时, 应考虑其过载能力, 对于异步电动机

$$P_N \geq \frac{P_{L\max}}{0.75\lambda}$$

式中  $P_{L\max}$ ——短时负载功率的最大值, kW;

$\lambda$ ——电动机的转矩过载倍数。

#### 14.2.8.4 变动负载连续工作制电动机的校验

对于图 14-2-1 (a) 所示的变动负载连续周期工作制 (S6、S7 或 S8) 下电动机的发热校验, 可分为两个步骤。先按等效 (方均根) 电流法或等效转矩法, 计算出一个周期  $T_c$  内的等效电流  $I_{\text{rms}}$  或等效转矩  $T_{\text{rms}}$ 。选取电动机的额定电流  $I_N \geq I_{\text{rms}}$  或额定转矩  $T_N \geq T_{\text{rms}}$ , 即

$$I_N \geq I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \cdots + I_n^2 t_n}{T_c}} \quad (14-2-3)$$

或

$$T_N \geq T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + T_3^2 t_3 + \cdots + T_n^2 t_n}{T_c}} \quad (14-2-4)$$

式中  $I_1 \sim I_n$ ——各分段时间内的电流值, A;

$T_1 \sim T_n$ ——各分段时间内的转矩值, N·m;

$T_c$ ——一个周期的总时间,  $T_c = t_1 + t_2 + \cdots + t_n$ , s。

当负载不是矩形, 而是图 14-2-1 (b) 所示的三角形或梯形时, 则应将每一时间间隔内转矩 (或电流) 值换算成等效平均值后, 同样用式 (14-2-3) 或式 (14-2-4) 计算等效电流或等效转矩。对应时间  $t_2$  内电流 (或转矩) 的等效平均值为

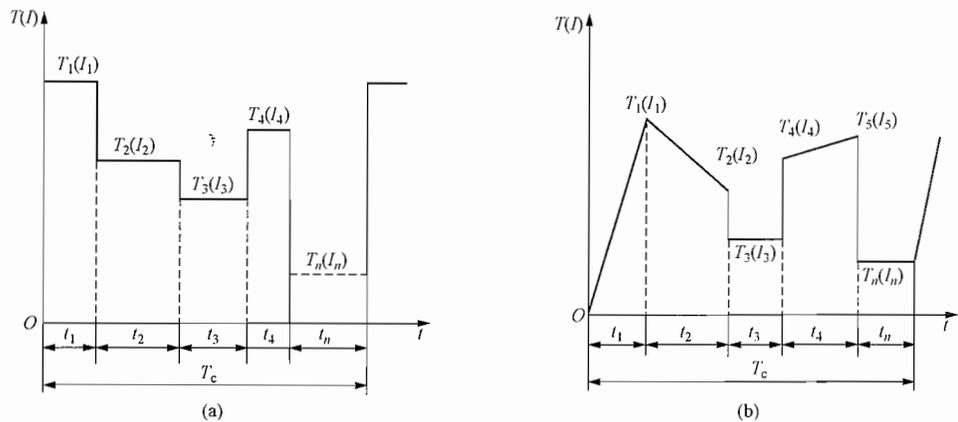


图 14-2-1 变动负载连续周期工作制电动机的负载图

(a) 矩形负载; (b) 梯形或三角形负载

$$T_{av2} = \sqrt{\frac{T_1^2 + T_1 T_2 + T_2^2}{3}}$$

$$I_{av2} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3}}$$

对应时间  $t_1$  内三角形曲线电流（或转矩）的等效平均值为

$$I_{av1} = \sqrt{\frac{I_1^2}{3}} = 0.578 I_1$$

$$T_{av1} = \sqrt{\frac{T_1^2}{3}} = 0.578 T_1$$

根据  $I_{rms}$ （或  $T_{rms}$ ）选取电动机的额定值后，还要用最大负载转矩  $T_{Lmax}$  校验电动机过载能力，即

$$T_N \geq \frac{T_{Lmax}}{0.9 K_u \lambda} \quad (14-2-5)$$

式中  $T_N$ ——电动机额定转矩， $N \cdot m$ ；

$T_{Lmax}$ ——最大负载转矩， $N \cdot m$ ；

$K_u$ ——电网电压波动对电动机转矩影响的系数，一般对同步电动机取  $K_u = 0.85$ ，对异步电动机取  $K_u = 0.72$ ，对直流电动机取  $K_u = 1.0$ ；

$\lambda$ ——电动机转矩过载倍数，由电机资料中查取。

#### 14.2.8.5 断续周期工作制下电动机的校验

对于 S3 ~ S5 断续周期工作制（见图 14-2-2），应尽量选用断续定额电动机（如 JZ、JZR、ZZ、ZZY 等系列）；所选用的负载持续率额定值  $FC_N$ ，应尽量接近实际工作条件下的  $FC$  值；当实际工作的  $FC$  值大于 60% 时，可采取强迫通风或选用连续定额电动机。

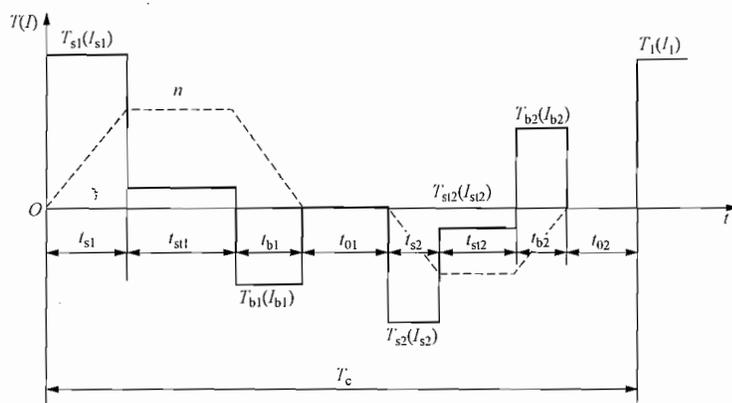


图 14-2-2 重复短时工作制电动机的速度和负载图

断续工作制下，电动机的校验可采用等效电流（或等效转矩）法，也可采用平均损耗法。由于前者较简便，通常被较多采用。

(1) 选用断续定额电动机。等效电流（A）为

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum I_s^2 t_s + \sum I_{\text{st}}^2 t_{\text{st}} + \sum I_b^2 t_b}{C_\alpha (\sum t_s + \sum t_b) + \sum t_{\text{st}}}}$$

等效转矩 (N·m) 为

$$T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum T_s^2 t_s + \sum T_{\text{st}}^2 t_{\text{st}} + \sum T_b^2 t_b}{C_\alpha (\sum t_s + \sum t_b) + \sum t_{\text{st}}}}$$

(2) 选用连续定额电动机。等效电流 (A)、等效转矩 (N·m) 为

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum I_n^2 t_s + \sum I_{\text{st}}^2 t_{\text{st}} + \sum I_b^2 t_b}{C_\alpha (\sum t_s + \sum t_b) + \sum t_{\text{st}} + C_\beta \sum t_0}}$$

$$T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum T_n^2 t_s + \sum T_{\text{st}}^2 t_{\text{st}} + \sum T_b^2 t_b}{C_\alpha (\sum t_s + \sum t_b) + \sum t_{\text{st}} + C_\beta \sum t_0}}$$

式中  $T_s$ 、 $I_s$ ——起动转矩、起动电流, N·A;

$T_b$ 、 $I_b$ ——制动转矩、制动电流, N·A;

$T_{\text{st}}$ 、 $I_{\text{st}}$ ——稳态运转转矩、稳态运动电流, N·A;

$\sum t_s$ ——一个周期中起动时间的总和, s;

$\sum t_b$ ——一个周期中制动时间的总和, s;

$\sum t_{\text{st}}$ ——一个周期中稳态运转时间之和, s;

$\sum t_0$ ——一个周期中停歇时间的总和, s;

$C_\alpha$ ——电动机起、制动过程中的散热恶化系数,  $C_\alpha = \frac{(1 + C_\beta)}{2}$ ;

$C_\beta$ ——停止时电动机散热恶化系数, 见表 14-2-10。

表 14-2-10

$C_\beta$  值

电动机的冷却方式	$C_\beta$	电动机的冷却方式	$C_\beta$
封闭式电动机 (无冷却风扇)	0.95 ~ 0.98	封闭式电动机 (自带内冷风扇)	0.45 ~ 0.55
封闭式电动机 (强迫通风)	0.9 ~ 1.0	防护式电动机 (自带内冷风扇)	0.25 ~ 0.35

对于笼型和绕线转子异步电动机及恒定励磁的并 (他) 励直流电动机, 采用等效电流 (或等效转矩) 法均可; 但对于串励直流电动机和利用变励磁调速的直流并 (他) 励电动机, 则不能采用等效转矩法, 而应采用等效电流法。

实际的负载持续率  $FC_s$  值为

$$FC_s = \frac{\sum t_s + \sum t_b + \sum t_{\text{st}}}{T_c} \times 100\%$$

当求出的  $FC_s$  值与所选的电动机额定负载持续率  $FC_N$  值不相等 (但相差不多) 时, 应按上述公式计算出的  $I_{\text{rms}}$  (或  $T_{\text{rms}}$ ) 值 (A) 折算到与所选电动机的  $FC_N$  值下相等效的数值, 即

$$I'_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{FC_s}{FC_N}} I_{\text{rms}}$$

或

$$T'_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{FC_s}{FC_N}} T_{\text{rms}}$$

如果求出的  $FC_s$  值与所选  $FC_N$  值相差较大，例如实际算出的  $FC_s$  值为 35%，而初选的电动机额定  $FC_N$  为 25%，则应再选  $FC_N = 40\%$  的额定值，重新进行校验。

当选取的电动机额定转矩  $T_N \geq T'_{\text{rms}}$  或额定电流  $I_N \geq I'_{\text{rms}}$  时，若再按式（14-2-5）校验最大过载转矩也能通过，则可以采用所选电动机。

#### 14.2.8.6 环境温度变化时电动机容量的修正（《钢铁企业电力设计手册》23.5.5）

当环境温度  $t_s$  和额定环境温度  $t_N$ （例如  $t_N = 40^\circ\text{C}$ ）不同时，电动机的可用功率  $P$  修正为

$$P = XP_N \quad (14-2-6)$$

式中  $P_N$ ——额定环境温度下的电动机额定功率，kW；

$X$ ——环境温度改变时的修正系数。

假定电动机的温升正比于它的损耗，则环境温度变化时电动机的稳定温升也相应变化，可得

$$X = \sqrt{1 \pm \frac{\Delta\tau}{\tau_N} (\gamma + 1)}$$

式中  $\Delta\tau$ ——环境温度改变值， $^\circ\text{C}$ ；

$\tau_N$ ——额定环境温度  $t_N$  时的电动机额定温升， $^\circ\text{C}$ ；

$\gamma$ ——电动机的固定损耗和额定可变损耗之比，具体可查阅手册；

+——环境温度低于额定环境温度；

-——环境温度高于额定环境温度。

由设备资料可知，某些电动机当环境温度低于额定值  $t_N$  时，其容量不需修正；某些电动机当环境温度高于额定环境温度时，则应按式（14-2-6）修正其容量，但当环境温度高于额定环境温度  $10^\circ\text{C}$  时，电动机容量的降低值由电机厂规定，不能按式（14-2-6）计算。因此，按环境温度修正电动机的容量应根据具体情况确定。

### 14.3 交、直流电动机的起动方式及起动校验

#### 14.3.1 电动机的起动条件

##### 14.3.1.1 电动机起动的基本要求

摘自 GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》。

##### 2.2 电动机的起动

2.2.1 电动机起动时，其端子电压应能保证机械要求的起动转矩，且在配电系统中引起的电压波动不应妨碍其他用电设备的工作。

2.2.2 交流电动机起动时，配电母线上的电压应符合下列规定：

1 配电母线上接有照明或其他对电压波动较敏感的负荷，电动机频繁起动时，不宜低于额定电压的 90%；电动机不频繁起动时，不宜低于额定电压的 85%。

2 配电母线上未接照明或其他对电压波动较敏感的负荷，不应低于额定电压的 80%。

3 配电母线上未接其他用电设备时，可按保证电动机起动转矩的条件决定；对于低压电动机，尚应保证接触器线圈的电压不低于释放电压。

2.2.3 笼型电动机和同步电动机起动方式的选择应符合下列规定:

1 当符合下列条件时,电动机应全压起动:

- 1) 电动机起动时,配电母线的电压符合本规范第 2.2.2 条的规定。
- 2) 机械能承受电动机全压起动时的冲击转矩。
- 3) 制造厂对电动机的起动方式无特殊规定。

2 当不符合全压起动的条件时,电动机宜降压起动,或选用其他适当的起动方式。

3 当有调速要求时,电动机的起动方式应与调速方式相匹配。

2.2.4 绕线转子电动机宜采用在转子回路中接入频敏变阻器或电阻器起动,并应符合下列规定:

1 起动电流平均值不宜超过电动机额定电流的 2 倍或制造厂的规定值。

2 起动转矩应满足机械的要求。

3 当有调速要求时,电动机的起动方式应与调速方式相匹配。

2.2.5 直流电动机宜采用调节电源电压或电阻器降压起动,并应符合下列规定:

1 起动电流不宜超过电动机额定电流的 1.5 倍或制造厂的规定值。

2 起动转矩和调速特性应满足机械的要求。

#### 14.3.1.2 电动机起动条件检验

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》5.1.1.1、《工业与民用配电设计手册(第3版)》第六章第四节 四、《钢铁企业电力设计手册》5.4.2节。

电动机的起动方式,一般分为直接起动和减压起动。起动时应满足下述条件:

(1) 起动时,对电网造成的电压降不超过规定的数值。

(2) 起动功率不超过供电设备和电网的过载能力。

电动机起动时,供电变压器容量的校验如下:若每昼夜起动不超过 6 次,每次持续时间  $t$  不超过 15s,变压器的负荷率  $\beta$  小于 0.9 (或  $t$  不超过 30s 而  $\beta$  小于 0.7) 时,起动时的最大电流允许为变压器额定电流的 4 倍;若每昼夜起动 10~20 次,则允许最大起动电流相应地减为 3~2 倍。变压器—电动机组的变压器容量应大于电动机容量,经常起动或重载起动时,变压器容量应比电动机容量大 15%~30%。

(3) 电动机的起动转矩应大于传动机械的静阻转矩,即

$$U_M^* \geq \sqrt{\frac{1.1T_L^*}{T_s^*}}$$

$$T_L^* = T_L/T_N$$

$$T_s^* = T_s/T_N$$

式中  $U_M^*$ ——起动时施加到电动机上的端电压标么值;

$T_L^*$ ——传动机械静阻转矩标么值;

$T_s^*$ ——电动机的起动转矩标么值。

传动机械的静阻转矩,一般可根据机械工艺资料计算出来,或由工艺设计资料提供。在得不到工艺资料时,可参照表 14-3-1 估算。

(4) 起动时,应保证电动机及起动设备的动稳定和热稳定性。

(5) 低压电动机起动时还应保证接触器线圈的电压不低于释放电压。

表 14-3-1

常用生产机械所需转矩相对值

传动机械名称	所需转矩相对值		
	起始静阻转矩	牵入转矩	最大转矩
(1) 离心式扇风机、鼓风机、压缩机和水泵 管道阀门关闭时起动	0.3	0.6	1.5
管道阀门开启时起动	0.3	1	1.5
(2) 往复式空压机、氨压缩机和煤气压缩机	0.4	0.2	1.4
(3) 往复式真空泵（管道阀门关闭时起动）	0.4	0.2	1.6
(4) 胶带运输机	1.4~1.5	1.1~1.2	
(5) 球磨机	1.2~1.3	1.1~1.2	1.75
(6) 对辊、颚式和圆锥形破碎机（空载起动）	1	1	2.5
(7) 锤形破碎机（空载起动）	1.5	1	2.5
(8) 持续额定功率运行的交、直流发电机	0.12	0.08	1.5
(9) 允许 25% 过负荷运行的交、直流发电机	0.18	0.1	2

(6) 大型高压电动机的起动方式、应符合制造厂的规定。如降压范围、电动机允许的最低端电压和允许连续起动次数等。

同步电动机的实际起动时间为

$$t_s = \frac{GD^2 n_N^2}{3580 P_{Nm} (u_{sm}^2 m_{sa} - m_r)}$$

为使同步电动机铜制阻尼笼温度不超过 300℃，在冷却状态下连续起动两次（或在热状态下起动一次）时，同步电动机的最长允许起动时间为

$$t_{Smax} = \frac{235G}{P_{Nm} u_{sm}^2 m_{sa}}$$

上两式中  $t_s$ ——电动机的起动时间，s；

$t_{Smax}$ ——同步电动机的最长允许起动时间，s；

$P_{Nm}$ ——电动机的额定功率，kW；

$n_N$ ——电动机的额定转速，r/min；

$G$ ——同步电动机阻尼笼中阻尼条的铜重，kg；

$m_{sm}$ ——电动机的起动转矩相对值；

$m_r$ ——机组的静阻转矩相对值；

$GD^2$ ——机组的总飞轮矩，kN·m<sup>2</sup>；

$u_{sm}$ ——起动时电动机端子电压相对值；

$m_{sa}$ ——电动机的平均起动转矩相对值，同步电动机为  $0.5(m_{sm} + m_{te})$ ，但当  $m_{sm} \leq m_{te}$  时为  $1.1m_{sm}$ ，普通笼型电动机为  $m_{sm} + 0.2(m_{max} - m_{sm})$ ，JK 型高速笼型电动机为  $1.05m_{sm}$ ；

$m_{te}$ ——同步电动机的牵入转矩相对值；

$m_{max}$ ——电动机的最大转矩相对值。

电动机的实际起动时间应小于电动机的最长允许起动时间。

当电动机的实际起动时间等于电动机的最长允许起动时间，即  $t_s = t_{Smax}$  时，可计算出同步电动机的最低起动电压，此时阻尼笼条温度为 300℃。计算方法参考《钢铁企业电力设计手册》24.4.2 节。

## 14.3.1.3 电动机起动时电压下降的计算

依据：《工业与民用配电设计手册（第3版）》第六章第四节六。

(1) 由无限大电源容量的系统供电时，假定电动机投入运行前的母线电压等于网络标称电压，则起动时母线和电动机端子电压的计算见表 14-3-2。

表 14-3-2 无限大容量电源系统供电的电动机起动时电压下降计算

起动方式	全压起动	变压器-电动机组 (全压起动)	电抗器降压起动	自耦变压器 降压起动
计算电路				
起动回路的额定输入容量	$S_{st} = \frac{1}{\frac{1}{S_{stM}} + \frac{X_1}{U_m^2}}$	$S_{st} = \frac{1}{\frac{1}{S_{stM}} + \frac{x_{TM}}{S_{rTM}} + \frac{X_1}{U_m^2}}$	$S_{st} = \frac{1}{\frac{1}{S_{stM}} + \frac{X_r}{U_m^2} + \frac{X_1}{U_m^2}}$	$S_{st} = \frac{1}{\frac{1}{k_z^2 S_{stM}} + \frac{X_1}{U_m^2}}$
电压 相对 值	母线 $u_{stm} = \frac{S_{km} + Q_{ph}}{S_{km} + Q_{ph} + S_{st}}$		电动机端子 $u_{stM} = u_{stm} \frac{S_{st}}{S_{stM}}$	$u_{stM} = u_{stm} \frac{S_{st}}{k_z S_{stM}}$
起动电流	$I_{st} = u_{stm} \frac{S_{st}}{\sqrt{3} U_m}$			
起动电流	$I_{stM} = I_{st}$	$I_{stM} = u_{stm} \frac{S_{stM}}{\sqrt{3} U_{rTM}}$	$I_{stM} = I_{st}$	$I_{stM} = u_{stm} \frac{S_{stM}}{\sqrt{3} U_{lm}}$
校验起动 电抗器过负荷 能力		$k_1 = u_{stm} \frac{S_{stM}}{S_{rTM}}$	$I_{st} > I_{st} \frac{t_{st}}{60} \cdot \frac{N}{2}$	$S_{rTz} > u_{stm} S_{st} \frac{t_{st}}{60} \cdot \frac{N}{2}$
符号说明	<p><math>S_k</math>——供电变压器一次侧短路容量, MVA;</p> <p><math>S_{rT}</math>——供电变压器的额定容量, MVA;</p> <p><math>x_T</math>——供电变压器的电抗相对值, 取为阻抗电压相对值 <math>u_T</math>;</p> <p><math>S_{km}</math>——母线短路容量, MVA,</p> $S_{km} = \frac{S_{rT}}{x_T + \frac{S_{rT}}{S_k}}$ <p><math>Q_{ph}</math>——预接负荷的无功功率, Mvar, 在供电变压器二次侧母线上, 可取 0.6 (<math>S_T - 0.75 S_{TM}</math>), 如预接负荷为 <math>S_{ph}</math>, 其功率因数为 <math>\cos\varphi_{ph}</math>, 则 <math>Q_{ph} = S_{ph} \sqrt{1 - \cos^2\varphi_{ph}}</math>;</p>	<p><math>S_{rTM}</math>——变压器电动机组的变压器额定容量, MVA;</p> <p><math>x_{TM}</math>——变压器电动机组的变压器电抗相对值, 取为阻抗电压相对值 <math>u_{TM}</math>;</p> <p><math>k_1</math>——电动机起动时变压器输出电流与其额定电流的比值;</p> <p><math>S_{rM}</math>——电动机额定容量, MVA, 其值为 <math>\sqrt{3} U_{rM} I_{rM}</math>;</p> <p><math>S_{stM}</math>——电动机额定起动容量, MVA, 其值为 <math>k_{st} S_{rM}</math>;</p> <p><math>k_{st}</math>——电动机额定起动电流倍数;</p> <p><math>I_{rM}</math>——电动机额定电流, kA;</p>	<p><math>X_r</math>——每相电抗器额定电抗, <math>\Omega</math>;</p> <p><math>I_{stk}</math>——电抗器起动电流, kA, 选取 <math>\geq I_{st}</math>;</p> <p><math>S_{rTz}</math>——自耦变压器额定容量, MVA, 选取 <math>\geq u_{stm} S_{st}</math>;</p> <p><math>k_z</math>——自耦变压器变比;</p> <p><math>N</math>——连续起动次数, 按制造厂规定取 2 次;</p> <p><math>t_{st}</math>——电动机起动一次的时间, s;</p> <p><math>U_m</math>——母线标称电压, kV, <math>U_m = U_n</math>;</p> <p><math>U_n</math>——网络标称电压, kV;</p> <p><math>U_{stm}</math>——电动机起动时母线电压, kV;</p>	

续表

符号说明	$X_1$ ——导线穿管或 $\leq 10\text{kV}$ 电缆的线路电抗, $\Omega$ , 取为 $0.08l$ , 长线路计入电阻因素时铜芯线取 $(0.08 + 6.1/S)l$ , $\leq 150\text{mm}^2$ 时可取 $(18.3/S)l$ , 铝芯线取 $(0.08 + 10/S)l$ , $\leq 240\text{mm}^2$ 时可取 $(30/S)l$ , 用于 $10\text{kV}$ 交联聚乙烯电缆时 $0.08$ 改为 $0.09$ , $6\text{kV}$ 纸绝缘时 $0.08$ 改为 $0.07$ ; $S$ ——导线或电缆芯的截面, $\text{mm}^2$ ; $l$ ——线路长度, $\text{km}$	$U_{rM}$ ——电动机额定电压, $\text{kV}$ ; $S_{st}$ ——电动机起动时起动回路的额定输入容量, $\text{MVA}$ ; $I_{st}$ ——电动机起动时起动回路的额定输入电流, $\text{kA}$ ; $I_{stM}$ ——电动机起动电流, $\text{kA}$	$u_{stm}$ ——电动机起动时母线电压相对值, 即 $U_{stm}/U_m = U_{stm}/U_n$ ; $U_{stM}$ ——电动机起动时的端子电压, $\text{kV}$ ; $u_{stM}$ ——电动机起动时的端子电压相对值, 即 $U_{stM}/U_{rM}$
------	---	--	--

(2) 如果电动机起动回路的线路较短, 则表 14-3-2 中  $X_1$  可以忽略,  $S_{st}$  计算式中的有关项相应地也可忽略。

(3) 表 14-3-2 中变压器—电动机组的变压器  $S_m$  分接头为  $+5\%$ , 相当于变压器电压提升为 0。如果分接头为 0, 则  $S_{st}$  及  $u_{stM}$  的计算式应为

$$S_{st} = \frac{1}{\frac{1}{1.05^2 S_{stm}} + \frac{x_{TM}}{S_{rTM}} + \frac{X_1}{U_m^2}} = \frac{1}{1.1 S_{stM} + \frac{x_{TM}}{S_{rTM}} + \frac{X_1}{U_m^2}}$$

$$u_{stM} = u_{stm} \frac{S_{st}}{1.05^2 S_{stm}} \times 1.05 = u_{stm} \frac{S_{st}}{1.05 S_{stM}}$$

(4) 表 14-3-2 中电抗器降压起动的  $S_{st}$  计算式及  $I_{stk}$  校验式适用于起动电抗器。如果用水泥电抗器, 则计算式及校验式应分别改为

$$S_{rst} = \frac{1}{\frac{1}{S_{stM}} + \frac{x_k}{S_{rk}} + \frac{X_1}{U_m^2}}$$

$$I\sqrt{t} > 0.9 I_{stM} \sqrt{t_{st} N}$$

式中  $x_k$ ——水泥电抗器的电抗相对值;

$S_{rk}$ ——电抗器的额定通过容量,  $\text{MVA}$ , 其值为 $\sqrt{3}U_{rk}I_{rk}$ ;

$U_{rk}$ ——电抗器的额定电压,  $\text{kV}$ ;

$I_{rk}$ ——电抗器的额定电流,  $\text{kA}$ , 选取 $I_{rk} \approx I_{rM}$ ;

$I_{rM}$ ——电动机的额定电流;

$I\sqrt{t}$ ——电抗器的热稳定度,  $\text{kA} \cdot \text{s}^{1/2}$ ;

$N$ ——电动机连续起动次数, 一般取 2 次。

(5) 电动机起动时, 母线上的电压下降相对值可用负荷变动量计算

$$\Delta u_{stm} = \frac{S_{st}}{S_{km} + Q_{fh} + S_{st}}$$

(6) 如果电源容量不太大, 发电机容量为电动机额定起动容量的 1 ~ 1.4 倍时, 则母线电压的计算值需留裕量。

(7) 电动机起动时在配电系统中要引起电压下降。起动前的电压有效值  $U$  与起动时的电压有效值  $U_{st}$  之差称为电压下降 (曾称电压波动, 但为区别连续电压变动或电压周期性变动, 改成电压下降), 用相对值 (与系统标称电压  $U_n$  的比值) 或百分数表示, 即

$$\Delta u_{st} = \frac{U - U_{st}}{U_n}$$

或

$$\Delta u_{st} = \frac{U - U_{st}}{U_n} \times 100\%$$

电动机起动时的电压相对值 (与系统标称电压  $U_n$  的比值) 或百分数表示为

$$u_{st} = \frac{U_{st}}{U_n}$$

或

$$u_{st} = \frac{U_{st}}{U_n} \times 100\%$$

### 14.3.2 异步电动机的起动方式及计算方法

#### 14.3.2.1 三相异步电动机的基本控制环节

依据:《电气传动自动化技术手册 (第3版)》5.1.1.2 节。

三相异步电动机的起动控制一般有直接起动、减压起动 (包括软起动) 和变频起动等方式。直接起动方式又称为全电压起动方式, 即起动时电源电压全部施加在电动机定子绕组上。减压起动方式即起动时将电源电压降低一定的数值后再施加到电动机定子绕组上, 待电动机的转速接近同步转速后, 再使电动机在电源电压下运行。软起动方式即使施加到电动机定子绕组上的电压从零按预设的函数关系逐渐上升, 直至起动过程结束, 再使电动机在全电压下运行。变频起动一般采用交-直-交变频电路, 通过电流控制实现恒加速度起动, 当电动机达到起动要求后, 通过开关切换使电动机直接投入电网运行。

#### 14.3.2.2 笼型异步电动机的起动方式及计算方法

(1) 笼型异步电动机各种起动方式比较 (《钢铁企业电力设计手册》24.1.1 节《工业与民用配电设计手册》第六章第四节 六《电气传动自动化技术手册》5.1.1.4 节)。

笼型异步电动机的起动方式一般有全压起动、降压起动和变频起动三种。其中, 降压起动又分为:

- 1) 星形-三角形降压起动;
- 2) 延边三角形降压起动;
- 3) 电阻降压起动;
- 4) 电抗器降压起动;
- 5) 自耦变压器降压起动;
- 6) 晶闸管降压软起动。

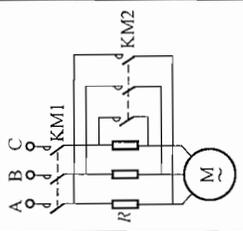
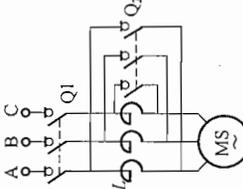
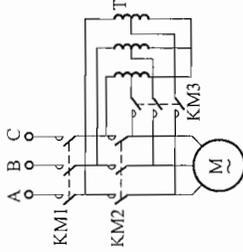
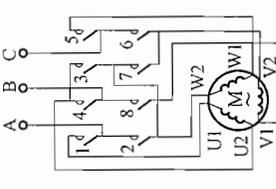
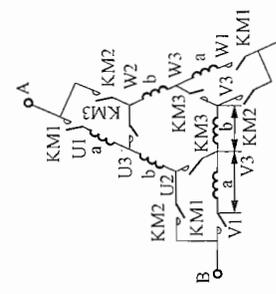
同步电动机和高压笼型电动机一般只采用 4)、5) 两种降压起动方式。

绕线型异步电动机的起动方式一般有频敏变阻器起动, 电阻分级起动和交流电力电子开关起动 (交流电力电子开关只用于交流低压电动机)。

表 14-3-3 列出了各种起动方式的特点及适用范围。

表 14-3-3

笼型电动机各种启动方式比较

启动方式	全压启动	三相电阻减压启动	电抗器减压启动		自耦变压器减压启动		星-三角减压启动	延边三角形减压启动	
			减电压百分数	减电压百分数	减电压百分数	减电压百分数		抽头比例 $K = a/b$ ①	
启动电压 $U_s$ 额定电压 $U_N$	1	0.8	50%	45%	80%	65%	0.58	1:2	2:1
启动转矩 全压启动转矩	1	0.64	0.50	0.45	0.80	0.65	0.33	0.78	0.66
启动电流 全压启动电流	1	0.8	0.25	0.20	0.64	0.43	0.33	0.6	0.43
启动电路图									
适用场所	高压、低压电动机	低压电动机	高压电动机	高压、低压电动机	高压、低压电动机	高压、低压电动机	绕组额定电压 380V，具有 9 个出线头的电动机	绕组额定电压 380V，具有 9 个出线头的电动机	绕组额定电压 380V，具有 9 个出线头的电动机
特点	启动方法简便，启动电流和启动电压降较大	启动电流较大，启动转矩较小。启动过程中电阻中电能消耗较大	启动电流较大，启动转矩较小	启动电流较大，启动转矩较大	启动电流较小，启动转矩较大	启动电流小，启动转矩小	启动电流小，启动转矩小	启动电流小，启动转矩较大，具有自耦变压器及星-三角两种减压启动方式的优点	启动电流小，启动转矩较大，具有自耦变压器及星-三角两种减压启动方式的优点

注  $U_N$ —电动机额定电压； $\alpha$ —减压系数， $\alpha = U_s/U_N$ ； $I_s$ —直接启动时启动电流； $T_s$ —直接启动时启动转矩； $I_s/U_N = (1 + \sqrt{3}K) / (1 + 3K)$ ； $T_s/T_N = (1 + K) / (1 + 3K)$ ； $I_s/I_N = (1 + K) / (1 + 3K)$ ； $T_s/T_N = (1 + K) / (1 + 3K)$ ； $I_s/I_N = (1 + K) / (1 + 3K)$ 。

① 延边三角形启动是根据下面公式及抽头比  $K = a/b$  估算： $U_s/U_N = (1 + \sqrt{3}K) / (1 + 3K)$ ； $T_s/T_N = (1 + K) / (1 + 3K)$ ； $I_s/I_N = (1 + K) / (1 + 3K)$ 。

## (2) 直接起动。

## 1) 直接起动的主要参数:

- a. 接通电流峰值 (最大值)  $I_s = 2\sqrt{2}I_{an}$  ( $I_{an}$  为起动电流)。
- b. 起动电流 (有效值)  $I_{an} = (4 \sim 8.4) \times$  额定电流  $I_n$  (特殊情况下可达到  $13I_n$ )。
- c. 空载电流  $I_0 = (0.95 \sim 0.20) I_n$ 。
- d. 起动时间  $T_{an}$  在正常条件下  $T_{an} < 10s$ , 在重载起动时  $T_{an} > 10s$  (验证电动机发热是必要的)。

2) 按电源容量估算允许直接起动的笼型电动机最大功率见表 14-3-4 (《电气传动自动化技术手册 (第 3 版)》5.1.1.4 表 5-6) 和表 14-3-5 (《工业与民用配电设计手册 (第 3 版)》第六章第四节表 6-19)。

表 14-3-4 按电网容量允许直接起动的笼型电动机功率

电网	允许直接起动的笼型电动机功率
小容量发电厂	每 1kVA 发电机容量为 0.1 ~ 0.12kW
变电所	经常起动时, 不大于变压器容量的 20% 不经常起动时, 不大于变压器容量的 30%
高压线路	不超过电动机连接线路上的短路容量的 3%
变压器 - 电动机组	电动机功率不大于变压器容量的 80%

表 14-3-5 按电源容量估算的允许全压起动的电动机最大功率

电动机连接处电源容量的类别		允许全压起动的电动机最大功率 (kVA 或 kW)
配电网在连接处的三相短路容量 $S_k$		$(0.02 \sim 0.03) S_k$ ①
10 (6) / 0.4kV 变压器的额定容量 $S_{rT}$ (假定变压器高压侧短路容量 $\geq 50S_{rT}$ )		经常起动—— $0.2S_{rT}$ 不经常起动—— $0.3S_{rT}$
小型发电机功率 $P_{rC}$		$(0.12 \sim 0.15) P_{rC}$
$P_{rC} \leq 200kW$ 的 柴油发电机组	碳阻式自动调压	$(0.12 \sim 0.15) P_{rC}$
	带励磁机构的可控硅调压	$(0.15 \sim 0.25) P_{rC}$
	可控硅、相复励自励调压	$(0.15 \sim 0.3) P_{rC}$
	三次谐波励磁调压	$(0.25 \sim 0.5) P_{rC}$
	无励磁	$(0.25 \sim 0.37) P_{rC}$

① 对应于电动机额定起动电流倍数为 7 ~ 4.5 时。

## 3) 供电变压器允许直接起动笼型电动机的最大功率见表 14-3-6。

表 14-3-6 6 (10) / 0.4kV 变压器允许直接起动笼型电动机的最大功率

变压器供电的其他 负载 $S_{n1}/kVA$ 及其功率因数 $\cos\varphi$	起动时的 电压降 $\Delta U (\%)$	供电变压器的容量 $S_b$ (kVA)														
		100	125	160	180	200	250	315	320	400	500	560	630	750	800	1000
		起动笼型电动机的最大功率 $P_d$ (kW)														
$S_{n1} = 0.5S_b$ $\cos\varphi = 0.7$	10	22	30	30	40	40	55	75	75	90	110	115	135	155	180	215
	15	30	40	55	55	75	90	100	100	155	155	185	225	240	260	280
$S_{n1} = 0.6S_b$ $\cos\varphi = 0.8$	10	17	22	30	30	40	55	75	75	90	110	115	135	135	155	185
	15	30	30	55	55	75	90	100	100	155	185	185	225	240	260	285

注 上表所列系指电动机与变电所低压母线直接相连时的数据。

(3) 星形-三角形降压启动（《钢铁企业电力设计手册》24.2.2节）。

星形-三角形降压启动适用于正常运行时绕组为三角形接线，且具有6个出线端子的低压笼型电动机。启动时电动机定子绕组接成星形，（此时绕组电压为额定线电压的 $1/\sqrt{3}$ ，启动转矩和启动电流为全压启动时的 $1/\sqrt{3}$ ），随后将三相绕组转接成三角形。这种启动方式的启动转矩小，一般只适用于轻载启动的场合。

(4) 延边三角形降压启动（《钢铁企业电力设计手册》24.2.3节）。

延边三角形降压启动是在星形-三角形降压启动的基础上加以改进的一种启动方式。电动机启动时，定子绕组的一部分b绕组接成三角形，另一部分a绕组接成星形，如图14-3-1所示。

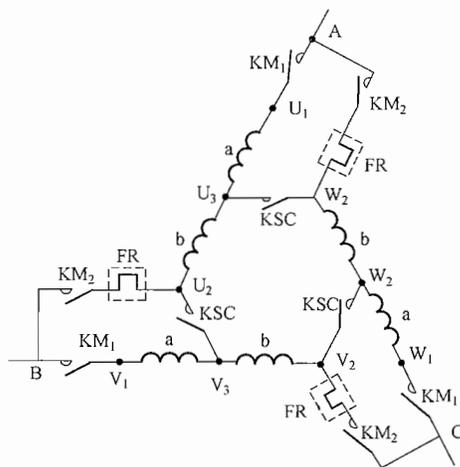


图 14-3-1 延边三角形启动电动机定子三相绕组接线图

由图14-3-1可见，它是一个有三条延长边的三角形，故称作延边三角形。此种启动方式适用于具有9个出线端子的低压笼型电动机。启动时，接触器 $KM_1$ 、 $KSC$ 闭合， $KM_2$ 断开，电动机定子绕组接成延边三角形，即b绕组接成三角形，a绕组接成星形。启动完毕，接触器 $KM_1$ 、 $KM_2$ 闭合， $KSC$ 断开，电动机定子绕组接成三角形，即每相的a绕组与b绕组串联后，再将其接成三角形。此时电动机进入正常运行状态。

由图14-3-1可知，当端子A、B、C接至电源，作延边三角形启动时，电动机每相绕组所承受的电压小于三角形接线时的电压，而大于星形接线时的电压。每相绕组承受电压的大小，与绕组中间抽头（ $D_7$ 、 $D_8$ 、 $D_9$ ）的位置有关，如果接成星形的绕组a（ $D_1-D_7$ 、 $D_2-D_8$ 、 $D_3-D_9$ ）的匝数越多，则电动机的相电压就越低。

采用此种启动方式时，电动机的启动电压和启动转矩与定子绕组的抽头匝数有关，工程设计中可按下述方法估算：

1) 电动机的启动电压

$$\frac{U'_{q\Delta}}{U_{q\Delta}} = \frac{1 + \sqrt{3}K}{1 + 3K}$$

式中  $U'_{q\Delta}$ ——电动机延边启动时的启动电压，V；

$U_{q\Delta}$ ——电动机全压启动时的启动电压，即380V；

$K$ ——星形部分和三角形部分的抽头比，即  $K = \frac{a}{b}$ 。

2) 电动机的启动电流和启动转矩

$$\frac{I'_{q\Delta}}{I_{q\Delta}} = \frac{1 + K}{1 + 3K}$$

式中  $I'_{q\Delta}$ ——电动机延边起动时的起动电流, A;

$I_{q\Delta}$ ——电动机全压起动时的起动电流, A。

由于电动机的起动转矩与额定起动转矩之比和起动电流与全压起动电流之比相同, 因此上式可改写为

$$\frac{M'_{q\Delta}}{M_{q\Delta}} = \frac{1 + K}{1 + 3K}$$

式中  $M'_{q\Delta}$ ——电动机延边起动时的起动转矩, N·m;

$M_{q\Delta}$ ——电动机全压起动时的起动转矩, N·m。

(5) 电阻降压起动 (《钢铁企业电力设计手册》24.2.4 节)。

1) 定子回路接入对称电阻起动。定子回路接入对称电阻这种起动方式的起动电流较大, 而起动转矩较小。如起动电压降至额定电压的 80%, 其起动电流为全压起动电流的 80%, 而起动转矩仅为全压起动转矩的 64%, 且起动过程中消耗电能较大。因此电阻降压起动一般用于轻载起动的低压笼型电动机。

起动电阻的计算步骤如下:

a. 根据生产机械的静阻转矩  $M_j$  与电动机的起动转矩  $M_{qd}$ , 求出电动机的允许起动电压  $U_{qd}$

$$U_{qd} \geq U_{ed} \sqrt{\frac{1.1M_j}{M_{qd}}} \quad (24-5)$$

式中  $U_{qd}$ ——电动机允许起动电压, V;

$U_{ed}$ ——电动机额定电压, V。

b. 计算电动机的起动阻抗  $Z_{qd}$

$$Z_{qd} = \frac{380}{\sqrt{3}I_{qd}}$$

式中  $Z_{qd}$ ——起动阻抗,  $\Omega$ ;

$I_{qd}$ ——电动机起动电流, A。

c. 计算每相允许的全部外加电阻  $R_w$

$$R_w = \sqrt{\left(\frac{Z_{qd}}{a}\right)^2 - X_{qd}^2} - R_{qd}$$

式中  $R_w$ ——全部外加电阻,  $\Omega$ ;

$a$ ——电动机的起动电压与额定电压之比,  $a = \frac{U_{qd}}{U_{ed}}$ ;

$X_{qd}$ ——电动机的起动电抗,  $\Omega$ ;

$R_{qd}$ ——电动机的起动电阻,  $\Omega$ 。

$$X_{qd} = Z_{qd} \sin \varphi_{qd};$$

$$R_{qd} = Z_{qd} \cos \varphi_{qd}。$$

在工程计算中, 电动机起动时的功率因数  $\cos \varphi_{qd}$  可取 0.25, 则  $\sin \varphi_{qd}$  为 0.97。

d. 计算外加降压电阻  $R$ 

$$R = R_w - R_l$$

式中  $R$ ——外加降压电阻,  $\Omega$ ;

$R_l$ ——线路电阻,  $\Omega$ , 当线路较短时可忽略不计。

e. 按等效起动电流及外加降压电阻值选择起动电阻器。

2) 定子回路接入单相电阻起动。笼型电动机的定子回路接入单相电阻起动, 可以限制起动转矩, 但不能减少未接电阻的其他两相的起动电流。所以只适用于要求降低起动转矩而对起动电流并无限制的生产机械。定子回路接入单相电阻的主接线如图 14-3-2 所示。

起动电阻计算步骤如下:

a. 生产机械所允许的起动转矩  $M'_{qd}$  与电动机的额定起动转矩  $M_{qd}$  之比  $\mu_q$  为

$$\mu_q = \frac{M'_{qd}}{M_{qd}} \quad (24-10)$$

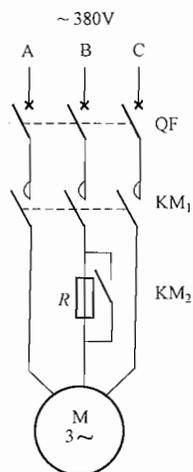


图 14-3-2 定子回路接入单相电阻起动的主接线图

b. 计算电动机的起动阻抗  $Z_{qd}$

$$Z_{qd} = \frac{380}{\sqrt{3}I_{qd}}$$

c. 求外加电阻  $R_w$

$$R_w = \frac{3}{2} Z_{qd} \left[ \frac{1 - 2\mu_q}{2\mu_q} \cos\varphi_{qd} + \sqrt{\left( \frac{1 - 2\mu_q}{2\mu_q} \right)^2 \cos^2\varphi_{qd} + \frac{1 - \mu_q}{\mu_q}} \right]$$

式中  $\cos\varphi_{qd}$ ——电动机起动时的功率因数, 一般可取  $\cos\varphi_{qd} = 0.25$ 。

d. 计算流过电阻的电流  $I'_{qd}$

$$I'_{qd} = I_{qd} \sqrt{\frac{9}{4 \left( \frac{R_w}{Z_{qd}} \right)^2 + 12 \frac{R_w}{Z_{qd}} \cos\varphi_{qd} + 9}}$$

式中  $I'_{qd}$ ——流过电阻的电流, A。

e. 按等效起动电流及外加电阻值选择起动电阻器。

(6) 自耦变压器降压起动 (《钢铁企业电力设计手册》24.2.5 节)。

自耦变压器降压起动通常用于要求起动转矩较高而起动电流较小的场合。

起动用的自耦变压器的容量可按下式计算

$$S_{bz} = \frac{S_{qd} N t_q}{2}$$

$$S_{bz} = \frac{S_{qd} t_{js}}{2}$$

$$S_{qd} = \left( \frac{U_{qd}}{U_{ed}} \right)^2 K_{iq} S_{ed}$$

式中  $S_{qd}$ ——电动机起动容量, kVA;

$U_{qd}$ ——电动机起动电压, V;

14

或

- $U_{ed}$ ——电动机额定电压, V;  
 $K_{iq}$ ——电动机起动电流倍数;  
 $S_{ed}$ ——电动机额定容量, kVA;  
 $N$ ——电动机允许连续起动次数;  
 $t_q$ ——电动机一次起动时间, min;  
 $t_{js}$ ——电动机计算起动时间, min,  $t_{js} = t_q N$ ;  
 $S_{bz}$ ——自耦变压器容量, kVA。

自耦变压器均具有 65% 和 80% 额定电压的两组抽头, 相应的起动转矩和起动电流分别为其额定值的 42.3% 及 64%, 校验自耦变压器起动时的过负荷能力, 见表 14-3-2 中相关公式。

### (7) 电抗器压降起动。

电抗器压降起动的计算见表 14-3-2 中相关公式。

(8) 晶闸管降压软起动 (《电气传动自动化技术手册》5.1.1.5 节、《工业与民用配电设计手册》第十二章第一节三、《钢铁企业电力设计手册》24.2.6.2 节)。

晶闸管降压软起动采用软起动控制器。

1) 工作原理。其主要结构是一组串接于电源与被控电动机之间的三相反并联晶闸管及其电子控制电路, 利用晶闸管移相控制原理, 控制三相反并联晶闸管的导通角, 使被控电动机的输入电压按不同的要求而变化, 从而实现不同的起动功能。起动时, 使晶闸管的触发延迟角从 0 开始, 逐渐增加, 直至全导通, 电动机的端电压从零开始, 按预设函数关系逐渐上升, 直至达到满足起动转矩而使电动机平滑起动, 再使电动机全电压运行。图 14-3-3 是软起动控制器的主电路原理图。

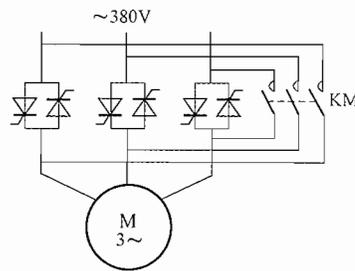


图 14-3-3 软起动主电路原理图

### 2) 软起动器降压起动笼型电动机的特点见表 14-3-7。

表 14-3-7 笼型电动机各种降压起动方式的特点

降压起动方式	星-三角降压	电阻降压	自耦变压器降压	软起动器
起动电压	$0.58U_r$	$KU_r$	$KU_r$	$KU_r$
起动电流	$0.33I_{st}$	$KI_{st}$	$K^2I_{st}$	$KI_{st}$
起动转矩	$0.33M_{st}$	$K^2M_{st}$	$K^2M_{st}$	$K^2M_{st}$
优缺点及应用范围	起动电流小, 但二次冲击电流较大; 起动转矩较小; 允许起动次数较高; 设备价格较低; 适用于定子绕组为三角形接线的 6 个引出端子的中小型电动机 (如 Y2 和 Y 系列电动机), 采用较广	起动电流较大, 起动转矩小; 允许起动次数由起动电阻容量决定; 起动变阻器的耗电量较大, 不节能; 多用于降低起动转矩的冲击	起动电流小, 起动转矩较大; 只允许连续起动 2~3 次; 设备价格较高, 但性价比比较优, 采用较广	通常为斜坡电压起动, 也可突跳起动; 起动电流、起动转矩, 上升和下降时间可调, 有多种控制方式; 可带多种保护; 允许起动次数较高; 设备价格最高

注  $U_r$ —电动机额定电压;  $I_{st}$ 、 $M_{st}$ —电动机的全压起动电流及起动转矩;  $K$ —起动电压/额定电压, 对自耦变压器为变比。

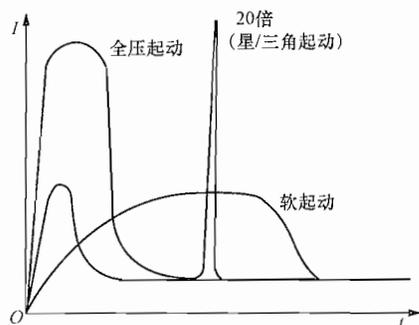


图 14-3-4 笼型电动机全压启动，  
星形-三角形降压启动和软启动的电流波形图

3) 笼型电动机软启动的电流波形见图 14-3-4。与全压启动、星/三角启动相比，软启动的电流波形平缓，有明显的优势。

4) 软启动器的应用。为了便于控制和应用，通常将软启动控制器、断路器和控制电路组成一个较完整的电动机控制中心（MCC），以实现电动机的软启动、软停车、故障保护、报警、自动控制等功能，同时它还具有运行和故障状态监视、接触器操作次数、电动机运行时间和触头弹跳监视、试验等辅助功能。另外还可以附加通信单元、图形显示操作单元和编程器单元等，可直接与通信总线联网。在实际应用中可有以下几种

工作模式。

a. 软启动控制器加旁路接触器。对于泵类、风机类负载往往要求软启动、软停车。该电路有如下优点：在电动机运行时可以避免软启动器产生的谐波；软启动器仅在启动、停车时工作，可以避免长期运行使晶闸管发热，延长了使用寿命；一旦软启动器发生故障，可由旁路接触器作为应急备用。

b. 单台软启动控制器启动多台电动机。在某些应用场合中，可用一台软启动控制器对多台电动机进行软启动，以节约资金投入。但不能同时启动或停机，只能一台台分别启动停机。

(9) 变频启动。笼型电动机变频启动的特点见 14.3.3.4 节。

#### 14.3.2.3 绕线型异步电动机的启动方式及计算方法

依据：《电气传动自动化技术手册》5.1.1.3 节、《钢铁企业电力设计手册》24.3.2 节。

绕线转子异步电动机一般采用电阻分级启动或频敏变阻器启动两种方式。前者启动转矩大但控制较复杂，且启动电阻体积大、维修麻烦；而后者具有恒转矩的起、制动特性，又是静止元件，很少需要维修，因此除下列情况外，绕线转子异步电动机多采用频敏变阻器启动：

- ①有低速运转要求的传动装置。
- ②要求利用电动机的过载能力，承担启动转矩的传动装置，如加热炉的推钢机。
- ③初始启动转矩很大的传动装置，如球磨机、转炉倾动机构等。

(1) 转子回路串接电阻启动。在三相绕线转子异步电动机的三相转子回路中分别串接启动电阻或电抗器，再加之电源及自动控制电路，就构成了三相绕线转子异步电动机的启动控制线路。图 14-3-5（方案 1）是转子回路中串接电阻的启动控制路线。方案 1 是通过欠电流继电器的释放值设定进行控制的，利用电动机转子电流大小的变化来控制电阻切除。图 14-3-6（方案 2）将主电路中的电流继电器去掉，通过时间继电器的定时设定来控制电阻切除。

转子电阻对称切除时的主回路接线和启动特性见图 14-3-7。

采用分析法计算各级电阻值，各种功率的绕线型电动机，其启动电阻级数参考值见表 14-3-8。

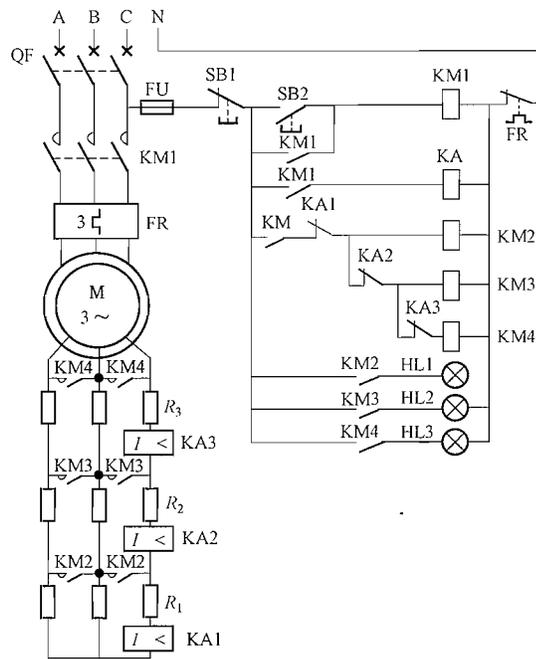


图 14-3-5 转子电路串电阻减压  
起动控制线路 (方案 1)

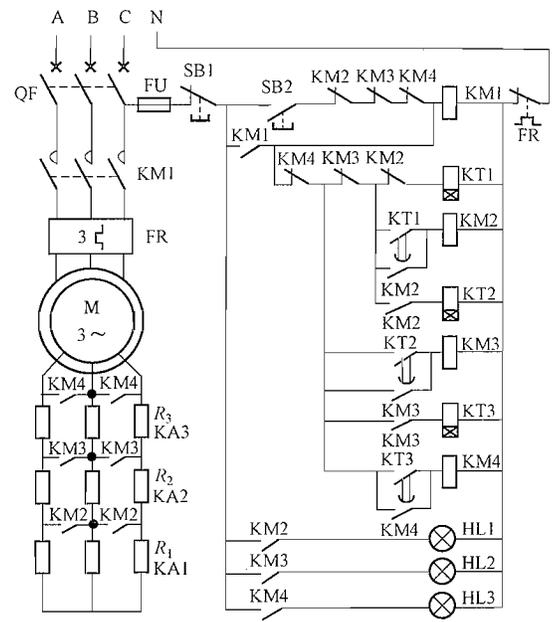


图 14-3-6 转子电路串电阻减压  
起动控制线路 (方案 2)

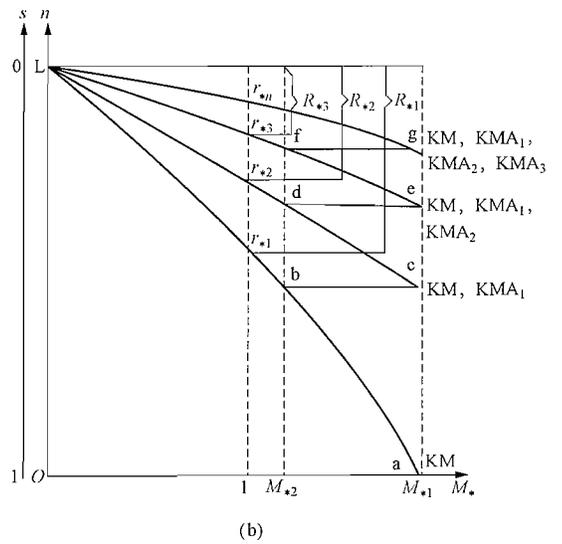
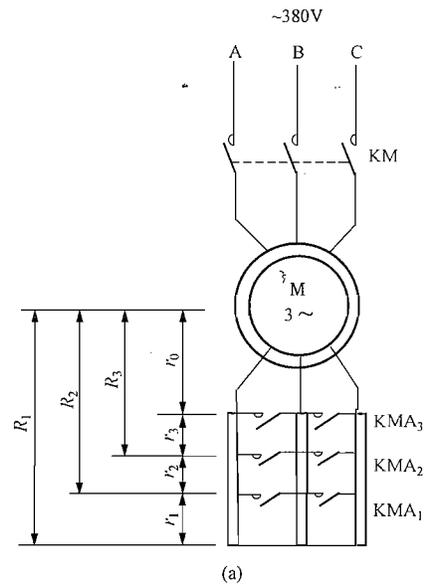


图 14-3-7 绕线型电动机转子电阻对称切除时的主回路接线图和起动特性  
(a) 主回路; (b) 起动特性

表 14-3-8 绕线型电动机的功率和起动电阻级数

电动机功率 (kW)	手动控制器控制时 (每相)	接触器继电器控制时		
		全负荷	半负荷	通风机离心泵
0.75~7.5	2	1	1	1
10~20	2~3	2	1	2
22~35	3~4	2	2	2
35~55	3~4	3	2	3
60~95	4~5	4	3	3
100~200	4~5	5	3	4
220~370	4~5	6	4	5

对称切除各级起动电阻值计算

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{s_e M_{*1}}}$$

式中  $\lambda$ ——最大起动转矩与切换转矩之比，即  $\lambda = \frac{M_{*1}}{M_{*2}}$ ；

$m$ ——起动电阻的级数（不包括反接制动电阻）；

$s_e$ ——额定转差率；

$M_{*1}$ ——最大起动转矩标么值，一般取  $M_{*1} \leq 0.8 \sim 0.9 M_{*max}$ ， $M_{*max}$  为电动机的最大转矩标么值，比值可从电机产品样本中查得；

$M_{*2}$ ——切换转矩标么值，应大于传动机械的静阻转矩标么值  $M_{*j}$ ，一般取  $M_{*2} \geq 1.1 \sim 1.2 M_{*j}$ 。

转子回路总电阻标么值按下式求得

$$\left. \begin{aligned} R_{*m} &= r_{*n} \lambda \\ \dots\dots \\ R_{*2} &= R_{*3} \lambda \\ R_{*1} &= R_{*2} \lambda \end{aligned} \right\}$$

各级起动电阻标么值按下式求得

$$\left. \begin{aligned} r_{*m} &= r_{*n} (\lambda - 1) \\ \dots\dots \\ r_{*2} &= r_{*3} \lambda \\ r_{*1} &= r_{*2} \lambda \end{aligned} \right\}$$

14 式中  $r_{*n}$ ——转子内电阻标么值 ( $r_{*n} = s_e$ )。

换算为有名值时

$$\begin{aligned} r_n &= s_e R_{zc} \\ R_{zc} &= \frac{U_{zc}}{I_{zc}} \end{aligned}$$

式中  $U_{zc}$ ——电动机转子额定电压，V；

$I_{ze}$ ——电动机转子额定电流, A;

$R_{ze}$ ——电动机转子额定电阻,  $\Omega$ 。

(2) 转子串频敏变阻器起动。频敏变阻器实质上是一个铁心损耗非常大的三相电抗器。它由数片 E 形硅钢片叠成, 具有铁心、线圈两个部分, 制成开启式, 并采用星形连接。将其串接在绕线转子异步电动机转子回路中, 相当于使其转子绕组接入一个铁损较大的电抗器。频敏变阻器的阻抗能够随着转子电流频率的下降自动减小, 所以它是绕线转子异步电动机较为理想的一种起动设备。常用于较大容量的绕线式异步电动机的起动控制。

当电动机反接时, 频敏变阻器的等效变阻器阻抗最大, 从反接制动到反向起动过程中, 其等效阻抗始终随转子电流频率的减少而减少, 使电动机在反接过程中转矩亦接近恒定。因此频敏变阻器尤为适用于反接制动和需要频繁正、反转工作的机械。

频敏变阻器结构简单, 占地面积小, 运行可靠, 无须经常维修, 但其功率因数低、起动转矩小, 对于要求低速运转和起动转矩大的机械不宜采用。绕线转子异步电动机采用频敏变阻器时的起动特性见图 14-3-8。

根据生产机械的负载特性, 可按表 14-3-9 选择频敏变阻器的类型。

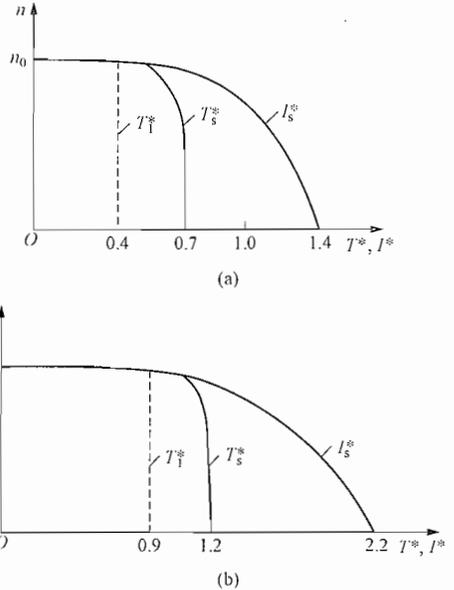


图 14-3-8 绕线转子异步电动机采用频敏变阻器时的起动特性  
(a) 轻载起动; (b) 重载起动  
 $T_L^*$ —负载转矩标么值  $T_s^*$ —起动转矩标么值  
 $I_s^*$ —起动电流标么值

表 14-3-9 按机械负载特性选用频敏变阻器

起动负载性质	特征		传动设备举例
偶尔 起动	轻载	起动转矩 $T_s \geq (0.6 \sim 0.8) T_N$ , 阻转矩 $T_j < 0.5 T_N$ , 折算至电动机轴上的飞轮力矩 $GD^2$ 较小, 起动时间 $t_s \leq 20s$	空压机、水泵、变流机等
	重轻载	起动转矩 $T_s \leq (0.9 \sim 1.1) T_N$ , 阻转矩 $T_j < 0.8 T_N$ , 折算至电动机轴上的飞轮力矩 $GD^2$ 较大, 起动时间 $t_s > 20s$	锯床、真空泵、带飞轮的轧钢主电机
	重载	起动转矩 $T_s \leq (1.2 \sim 1.4) T_N$ , 阻转矩 $T_j \leq 0.8 T_N$ , 折算至电动机轴上的飞轮力矩 $GD^2$ 不太大, 起动时间介于轻载和重轻载之间	胶带输送机、轴流泵、排气阀打开起动的鼓风机
反复 短时 起动	第一类	起动次数 250 次/h 以下, $t_s Z$ 值 $< 400s$	$T_s \leq 1.5 T_N$ 推钢机、拉钢机及轧线定尺移动 出炉辊道、延伸辊道、检修吊车大小车 轧机前后升降台及其辊道、起重机的吊车 拔钢机、定尺辊道、翻钢机、压下
	第二类	起动次数 $< 400$ 次/h, $t_s Z$ 值 $< 630s$	
	第三类	起动次数 $< 630$ 次/h, $t_s Z$ 值 $< 1000s$	
	第四类	起动次数 $> 630$ 次/h, $t_s Z$ 值 $< 1600s$	

①  $t_s Z$  值为每小时起动次数  $Z$  (起动一次算一次, 反接制动一次算三次, 动力制动一次算一次) 与每次起动时间  $t_s$  的乘积。无规则操作或操作极频繁的电动机, 由于每次起动不一定升至额定转速, 在设计中一般可取  $t_s = 1.5 \sim 2s$ 。

偶尔起动用频敏变阻器，可采用起动后用接触器短接的控制方式，见图 14-3-9 (a)。对于重复短时工作的频敏变阻器，为简化控制电路，可常接在转子回路中，见图 14-3-9 (b)。

频敏变阻器的铁心与轭铁间设有气隙，在绕组上留有几组抽头，改变气隙  $\delta$  和绕组匝数，便可调整电动机的起动电流和起动转矩，其特性见图 14-3-10。由此可见：

1) 起动电流过大及起动太快时，应增加匝数；反之，当起动电流过小及起动转矩不够时，应减少匝数，见图 14-3-10 (a)。

2) 刚起动时，起动转矩过大，对机械有冲击，但起动完毕后，稳定转速低于额定转速；当短接频敏变阻器时，电流冲击较大，可增大气隙，但起动电流有所增大，见图 14-3-10 (b)。

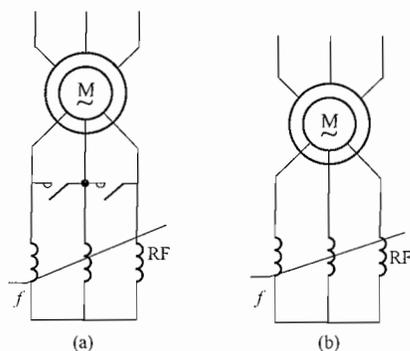


图 14-3-9 频敏变阻器接线  
(a) 起动后切除；(b) 常接在转子回路中

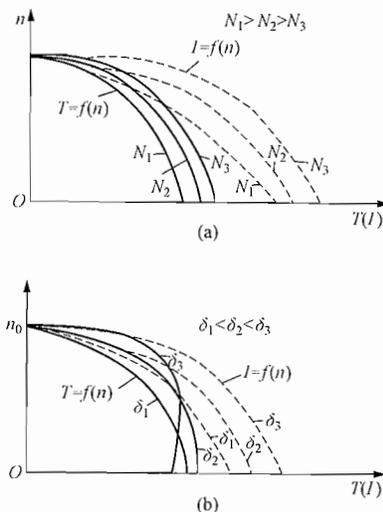


图 14-3-10 改变频敏变阻器匝数和气隙时的特性  
(a) 改变匝数  $N$ ；(b) 改变气隙  $\delta$

### 14.3.3 同步电动机的起动方式及计算方法

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》5.1.1.9节。

当电网容量足够大且允许直接起动时，应尽量采用直接起动；只有在电网和电动机本身结构不允许直接起动时，才可考虑采用电抗器或自耦变压器减压起动。对用大容量变流机组传动的同步电动机，可创造条件采用准同步起动。

#### 14.3.3.1 直接起动

同步电动机是否允许直接起动，首先取决于电动机本身的结构条件，它由电机制造厂决定。如果不能取得电机制造厂资料时，通常可按下述条件估算，符合下述条件时，可以直接起动。

对于  $U_N = 3\text{kV}$  的电动机

$$\frac{P_N}{\text{极对数}} \leq 250 \sim 300\text{kW}$$

对于  $U_N = 6\text{kV}$  的电动机

$$\frac{P_N}{\text{极对数}} \leq 200 \sim 250\text{kW}$$

其次,可按母线电压水平核算电动机是否允许直接起动。忽略有功电流及电阻的影响,并假定起动前电源电压为恒定值,而且母线电压  $U_b$  等于额定电压  $U_N$ 。

按图 14-3-11 (a) 所示的等效电路,并已知母线上最小短路容量为  $S_{dl}$  (并以  $S_{dl}$  作为基准值),则电动机允许直接起动的条件为

$$K_{is} S_N < \alpha (S_{dl} + Q_{lh}) \quad (14-3-1)$$

$$\alpha = \frac{1}{U_b^*} - 1$$

$$\text{当 } U_b^* = 0.8 \text{ 时, } \alpha = \frac{1}{0.8} - 1 = 0.25$$

$$U_b^* = 0.85 \text{ 时, } \alpha = \frac{1}{0.85} - 1 = 0.176$$

$$U_b^* = 0.9 \text{ 时, } \alpha = \frac{1}{0.9} - 1 = 0.11$$

式中  $K_{is}$ ——额定电压时,电动机的起动电流倍数;

$S_N$ ——电动机的额定容量 (MVA);

$Q_{lh}$ ——母线上负载的无功功率 (Mvar);

$U_b^*$ ——母线允许电压标么值,  $U_b^* = U_b / U_N$ 。

如能满足式 (14-3-1) 的要求,则可直接起动,否则应采取减压起动。

#### 14.3.3.2 电抗器减压起动

采用电抗器减压起动时,等效电路见图 14-3-11 (b)。此时应保证

$$(U_{sN}^* U_s^*)^2 T_s^* > 1.1 T_L^* \quad (14-3-2)$$

$$\text{即 } U_s^* > \frac{1.05}{U_{sN}^*} \sqrt{\frac{T_L^*}{T_s^*}}$$

式中  $U_{sN}^*$ ——电动机额定起动电压标么值;

$U_s^*$ ——起动时电动机端电压标么值;

$T_s^*$ ——额定电压下起动转矩标么值,  $T_s^* = T_s / T_N$ ;

$T_L^*$ ——机械的静阻转矩标么值,  $T_L^* = T_L / T_N$ 。

为了满足式 (14-3-2) 要求,采用电抗器减压起动的条件为

$$U_{sN}^* \frac{S_{dl} + Q_{lh}}{K_{is} S_N} > \beta \sqrt{\frac{T_L^*}{T_s^*}} \quad (14-3-3)$$

$$\beta = \frac{1.05}{1 - U_b^*}$$

$$\text{当 } U_b^* = 0.8 \text{ 时 } \beta = \frac{1.05}{1 - 0.8} = 5.25$$

$$U_b^* = 0.85 \text{ 时 } \beta = \frac{1.05}{1 - 0.85} = 7$$

$$U_b^* = 0.9 \text{ 时 } \beta = \frac{1.05}{1 - 0.9} = 10.5$$

如不能满足式 (14-3-3) 的要求,则应采用自耦变压器减压起动,见图 14-3-11 (c)。

图 14-3-12 为同步电动机采用电抗器减压起动电路简图,电抗器  $L$  每相电抗值  $X_L$

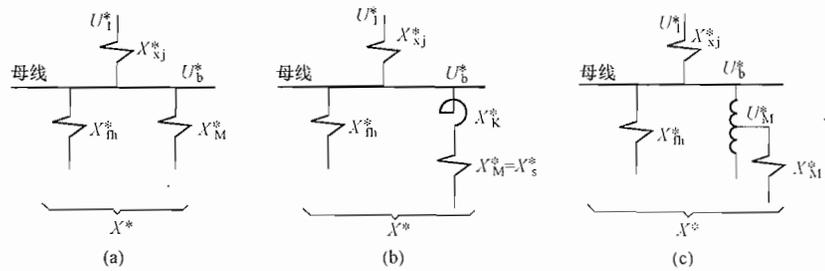


图 14-3-11 同步电动机起动时的等效电路

(a) 直接起动; (b) 电抗器减压起动; (c) 自耦变压器减压起动

$X_{sj}^*$ —系统电抗标么值  $U_1^*$ —电源电压标么值  $X_n^*$ —母线上负载电抗标么值  $X_M^*$ —电动机起动等效电抗标么值

( $\Omega$ ) 可用下式估算

$$X_L = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_s^*} - X_m$$

式中  $I_s^*$ ——接入电抗器后电动机的起动电流, A;

$X_m$ ——当  $s=1$  时, 电动机定子每相的电抗,  $\Omega$ 。

上式计算简便, 可用在工程设计中的估算, 但计算出的  $X_L$  值偏大。

#### 14.3.3.3 自耦变压器减压起动

如果用电抗器减压起动不能满足要求, 则应采用自耦变压器减压起动。图 14-3-13 所示为采用自耦变压器减压起动时的电路。由于定子侧要用三台高压开关, 因此这种起动方式投资较高。但是在获得同样起动转矩的情况下, 其起动电流较小。两种起动方式的比较见表 14-3-10。

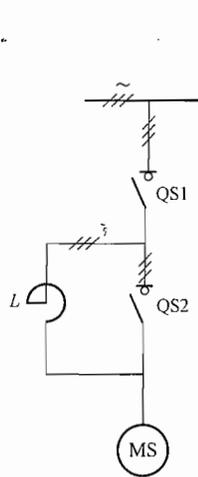


图 14-3-12 同步电动机采用电抗器  
降压起动电路简图

(起动: QS1 闭合, QS2 断开;  
运转: QS1、QS2 均闭合)

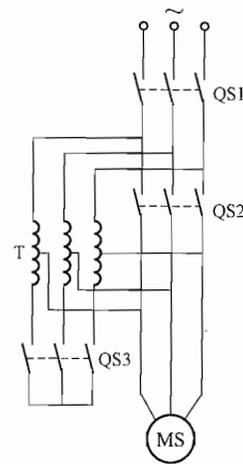


图 14-3-13 同步电动机用自耦变压器  
减压起动时的电路

(起动: QS1、QS3 闭合, QS2 断开;  
运转: QS3 断开, QS1、QS2 闭合)

表 14-3-10 同步电动机两种起动方式比较表

减压起动方式	电抗器减压起动	自耦变压器减压起动
电动机起动电压	$\alpha U_N$	$\alpha U_N$
电动机起动电流	$\alpha I_s$	$\alpha^2 I_s$
电动机起动转矩	$\alpha^2 T_s$	$\alpha^2 T_s$

注  $\alpha$ —压降系数 ( $\alpha < 1$ ), 对自耦变压器为电压比。

$I_s$ —直接起动时的起动电流。

$T_s$ —直接起动时的起动转矩。

图 14-3-11 (c) 为自耦变压器减压起动等效电路, 起动时, 必须满足下述条件:

$$(U_b^* K_b)^2 T_s^* > 1.1 T_L^* \quad (14-3-4)$$

式中  $K_b$ ——自耦变压器的电压比。

为满足式 (14-3-4) 的要求, 其起动条件为

$$\delta \frac{S_{dl} + Q_{fn}}{K_b S_N} > 1.1 \frac{T_L^*}{T_s^*}$$

$$\delta = U_b^* (1 - U_b^*)$$

当  $U_b^* = 0.8$  时,  $\delta = 0.8 (1 - 0.8) = 0.16$

$U_b^* = 0.85$  时,  $\delta = 0.85 (1 - 0.85) = 0.128$

$U_b^* = 0.9$  时,  $\delta = 0.9 (1 - 0.9) = 0.09$

#### 14.3.3.4 变频起动

随着大功率晶闸管变流器的发展, 对大功率同步电动机和大型蓄能电站发电机及电动机组可以采用静止变频装置实现平滑起动, 其特点是:

- (1) 起动平稳, 对电网冲击小。
- (2) 由于起动电流冲击小, 不必考虑对被起动电动机的加强设计。
- (3) 起动装置功率适度, 一般约为被起动电动机功率的 5% ~ 7% (视起动时间、飞轮力矩和静阻转矩而异)。
- (4) 若干台电动机可公用一套起动装置, 较为经济。
- (5) 由于是静止装置, 便于维护。

图 14-3-14 所示为采用晶闸管变频装置起动大功率同步电动机的原理简图, 采用交-直-交变频电路, 通过电流控制实现恒加速度起动, 当电动机接近同步转速时进行同步协调控制, 直至达到同步转速后, 通过开关切换使电动机直接投入电网运行。用此种方法可起动功率为数千至数万千瓦的同步电动机或大型蓄能机组。

#### 14.3.4 直流电动机的起动方式

小型直流电动机可以直接起动, 中、大型直流电动机可采用电枢回路串电阻起动和降压起动等, 其起动转矩较大。由变流装置供电的他励电动机, 可借调节电枢电压实现起动。

##### 14.3.4.1 直接起动

由于直流电动机电枢电感很小, 故只有 1kW 以下的小型直流电动机允许直接起动。

起动瞬间的电枢电流。

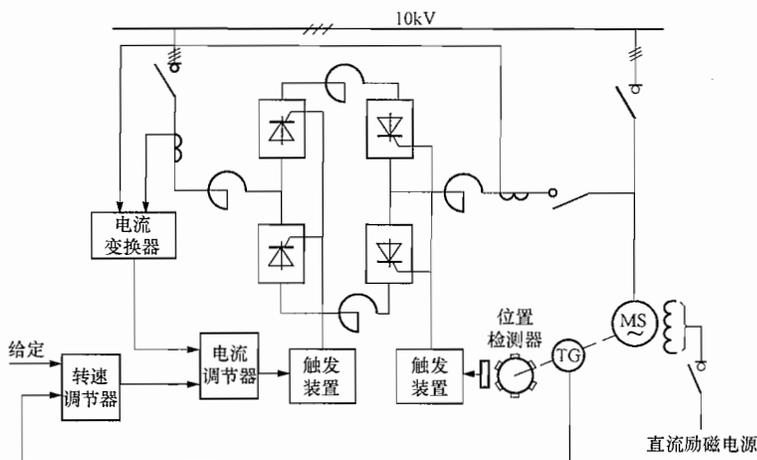


图 14-3-14 采用晶闸管变频装置起动同步电动机的原理图

$$I_{as} = \frac{U}{R_a}$$

式中  $U$ ——电枢端电压，V；

$R_a$ ——电枢回路电阻（包括电枢绕组、补偿绕组、串励绕组的电阻）， $\Omega$ 。  
并励和复励电动机的起动电流

$$I_s = I_{as} + I_f$$

式中  $I_f$ ——并励励磁电流。

若并励励磁绕组的电阻为  $r_f$  ( $\Omega$ )，则

$$I_f = \frac{U}{r_f}$$

串励电动机直接起动时的起动电流

$$I_s = I_{as}$$

#### 14.3.4.2 直流他励电动机的起动

一般采用电枢回路串电阻限制起动电流的方法。

(1) 首先应满励磁，据  $T = C_M \Phi I_a$ ，当采取措施限制起动电流  $I_a = (1.5 \sim 2.0) I_N$  时，为保证有足够大的起动转矩，起动时应保证  $I_f = I_{fN}$  使  $\Phi = \Phi_N$ 。

(2) 据起动电流  $I_a = \frac{U}{R_a + R_\Omega}$  可知，减小起动电流的途径有降低端电压  $U$  或电枢回路串电阻  $R_\Omega$ 。

(3) 电枢回路分级起动电阻的计算方法如下：

起动时各级电枢回路总电阻为

$$R_1 = \beta \cdot R_a$$

$$R_2 = \beta^2 \cdot R_a$$

⋮

$$R_{m-1} = \beta^{m-1} \cdot R_a$$

$$R_m = \beta^m \cdot R_a = R_{\Omega m} + R_{\Omega m-1} + \cdots + R_{\Omega 2} + R_{\Omega 1} + R_a$$

各级起动电阻为

$$\begin{aligned} R_{\Omega 1} &= (\beta - 1) \cdot R_a \\ R_{\Omega 2} &= \beta \cdot R_{\Omega 1} \\ &\vdots \\ R_{\Omega_{m-1}} &= \beta^{m-2} \cdot R_{\Omega 1} \\ R_{\Omega_m} &= \beta^{m-1} \cdot R_{\Omega 1} = R_m - R_{m-1} \end{aligned}$$

式中, 起动电流比  $\beta = \frac{I_1}{I_2} = \frac{T_1}{T_2}$ ,  $m$  为起动分级数,  $I_1$  或  $T_1$  为最大起动电流或起动转矩,  $I_2$  或  $T_2$  为切换电流或切换转矩。一般可取为  $I_1 = (1.5 \sim 2.0) I_N$  或  $T_1 = (1.5 \sim 2.0) T_N$ , 而  $I_2 = (1.1 \sim 1.2) I_N$  或  $I_2 = (1.1 \sim 1.2) I_z$ , 式中  $I_z$  式为负载 (稳定) 电流。

#### 14.3.4.3 直流串励电动机的起动

依据:《电气传动自动化技术手册 (第3版)》

##### 5.1.1.10 节。

直流串励电动机, 由于其机械特性为非线性, 采用分析法计算较困难, 通常多采用图解法, 其计算步骤如下:

(1) 绘制电动机的自然机械特性曲线。根据电动机的特性数据绘制  $I = f(n)$  特性曲线。如果得不到电动机数据, 可采用图 14-3-15 所示的通用特性曲线。

(2) 根据传动装置允许的最大起动电流  $I_1$ , 确定电动机电枢回路的总起动电阻 ( $\Omega$ )

$$R_a = \frac{U_N}{I_1}$$

(3) 直流串励电动机起动电路如图 14-3-16 (a) 所示。根据已定的起动级数及假定的切换电流  $I_2$ , 求出电动机接入总起动电阻时的转速  $n_2$  (r/min) [图 14-3-16 (b) 中的  $b$  点]

$$n_2 = n_1 \frac{U_N - I_2 R_a}{U_N - I_2 r_N}$$

式中  $n_1$ ——自然机械特性曲线上  $h$  点的转速, r/min;

$U_N$ ——外加直流额定电压, V;

$r_N$ ——电动机电枢回路总内阻,  $\Omega$ ;  $r_N = r_a + r_{cq}$ ;

$r_a$ ——电动机电枢和补偿极以及电刷电阻之和,  $\Omega$ ;

$r_{cq}$ ——电动机串励绕组电阻,  $r_{cq} = r_1 + r_2 + r_3$ ,  $\Omega$ 。

(4) 根据已定的  $I_1$  和  $I_2$  值, 在自然机械特性曲线上找出相应的  $g$  点和  $h$  点, 并在人工机械特性曲线上找出相应的  $a$  点和  $b$  点。通过  $g$ 、 $h$  与  $a$ 、 $b$  点分别画两条直线交于  $t$  点。

(5) 在  $I_1$  和  $I_2$  之间绘制三级起动曲线, 如果作出的起动特性与自然机械特性的交点正合适, 则表明所取的  $I_1$ 、 $I_2$  值合适, 否则应改变  $I_1$  值, 重新绘制起动特性, 直到合适为止。

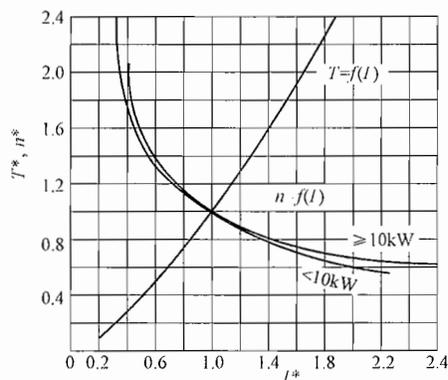


图 14-3-15 ZZ 系列串励直流电动机的通用特性曲线

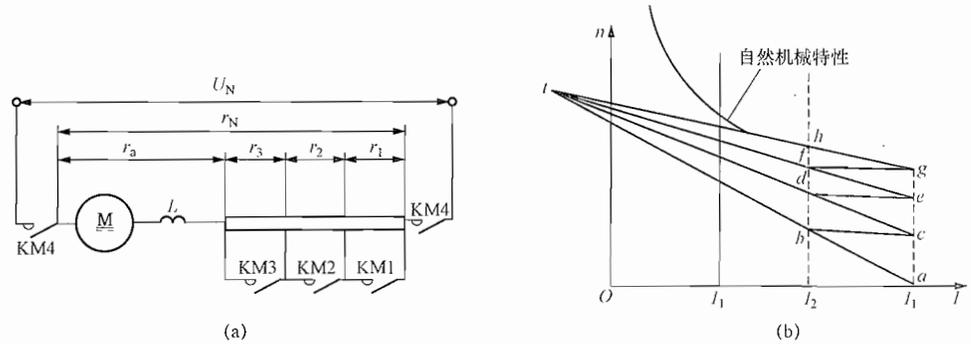


图 14-3-16 串励直流电动机起动特性

(a) 起动电路简图；(b) 起动特性

(6) 求起动时的外接电阻及各级电阻值 ( $\Omega$ )

$$R_q = R_s - r_N$$

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{ac}{ga} R_q \\ r_2 &= \frac{ce}{ga} R_q \\ r_3 &= \frac{eg}{ga} R_q \end{aligned} \right\}$$

式中  $R_q$ ——起动时外接的总电阻,  $\Omega$ ;

$r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ ——各级的起动电阻值,  $\Omega$ 。

## 14.4 交、直流电动机调速技术

### 14.4.1 调速系统分类及工作象限

调速即速度控制, 指在传动系统运行中人为或自动地改变电动机的转速, 以满足工作机械对不同转速的要求。从机械特性上看, 就是通过改变电动机的参数或外加电压等方法来改变电动机的机械特性, 从而改变它与工作机械特性的交点, 改变电动机的稳定运转速度。调速指令通过人工设置或经上级控制器设置, 调速系统按设定值改变电动机转速。

#### 14.4.1.1 调速的分类

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》4.1.1节。

(1) 开环调速和闭环调速。电动机的转速给定被设置后不能自动纠正转速偏差的调速方式称为开环调速; 具有自纠偏能力, 能根据转速给定和实际值之差自动校正转速, 使转速不随负载、电网波动及环境温度变化而变化的调速方式称为闭环调速。

14

(2) 无级调速和有级调速。无级调速又称为连续调速, 指电动机的转速可以平滑调节。其特点为转速变化均匀, 适应性强, 易实现调速自动化, 因此在工业装置中被广泛应用。有级调速又称为间断调速或分级调速。它的转速只有有限的几级, 调速范围有限, 且不易实现调速自动化。

数字控制的调速系统, 由于速度给定被量化后是间断的, 严格说来属有级调速, 但由于级数非常多, 级差很小, 仍认为是无级调速。

(3) 向上调速和向下调速。在额定工况(施加额定频率的额定电压、带额定负载)运

行的电动机的转速称为额定转速，也称为基本转速或基速。从基速向提高转速方向的调速称为向上调速，例如直流电动机的弱磁调速；从基速向降低转速方向的调速称为向下调速，例如直流电动机的降压调速。

(4) 恒转矩调速和恒功率调速。在调速过程中，在流过固定电流（电动机发热情况不变）的条件下，若电动机产生的转矩维持恒定值不变，则称这种调速方式为恒转矩调速。这时，电动机输出的功率与转速成正比。在流过固定额定电流的条件下，若电动机输出的功率维持额定值不变，则称这种调速方式为恒功率调速。这时，电动机产生的转矩与转速成反比。

以直流电动机为例，忽略电动机电枢内阻压降后，近似认为：

电动机电压

$$U = C_e \Phi n$$

电动机转矩

$$T = C_m \Phi I$$

功率

$$P = UI = (C_e/C_m)nT$$

式中  $C_e$ 、 $C_m$ ——电动机常数；

$n$ ——转速；

$\Phi$ ——磁通；

$I$ ——电枢电流。

若调速时维持磁通为额定值不变，通过改变电压调节转速，则额定电流产生的转矩也维持额定值不变，功率与转速成正比，这种调速方式是恒转矩调速；若调速时维持电压不变，通过改变磁通调速，则磁通与转速成反比，相应额定电流产生的转矩与转速成反比，而功率不变，这种调速方式是恒功率调速。

恒转矩和恒功率调速方式的选择应与生产机械负载类型相配合。如果恒转矩调速方式用于恒功率类型的负载，电动机功率需按最大转矩和最高转速之积来选择，导致电动机功率比负载功率大许多倍（恒功率负载最大转矩出现在最低速、高转速时转矩最小，转矩和转速的乘积远小于最大转矩和最高转速之积）。如果电动机的恒功率调速范围和负载要求的恒功率范围一致，电动机容量最小。如果负载要求的恒功率范围大，电动机的恒功率调速范围受到机械和电气条件的限制不能满足时，只能适当放大电动机容量，增大调速系统的恒功率调速范围。

#### 14.4.1.2 调速装置控制系统的分类

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》4.2节。

调速装置的控制系统的分两大类：模拟控制系统和数字控制系统。模拟控制系统基于模拟控制器件，在这类控制系统中，所有控制量的采集（采样）、各功能块之间的信息交换，以及它们的计算、控制、输出等功能的执行都是连续的、并行进行的，故又称为连续控制系统。数字控制系统基于数字控制器件，其核心是处理器，在这类控制系统中，一个处理器要完成大量的任务，在一定时间内又只能做一件事，所以这些任务必须分时串行执行，把原本是连续的任务间断成每隔一定时间（周期）执行一次，故又称为离散控制。

早期的控制系统都是模拟系统，近年来随着计算技术的发展，数字控制系统正逐步取代模拟系统。数字系统的特点是：

(1) 精度高，速度快，存储量大，有强大的计算、调节和逻辑判断功能，可以实现许

多过去无法实现的高级复杂的控制方法，获得快速、精密的控制效果。

(2) 可以设计统一的硬件电路和基础软件，由应用者编写应用软件来满足不同的控制系统要求，既标准，又灵活，为系统开发、升级提供方便，可靠性高。

(3) 有强大的诊断、报警、数据处理及数字通信功能，为实现远程控制、集中控制和中央计算机调度管理提供了条件。

两种控制系统的原理、环节和框图基本相同。

### 14.4.1.3 电动机的工作象限

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》2.3.5，6.1.4.2节。

(1) 电动机的四种运行状态。按照电动机转矩  $T$  的方向不同，有四种运行状态，对应于  $T-n$  坐标平面上的四个象限（见图 14-4-1）。

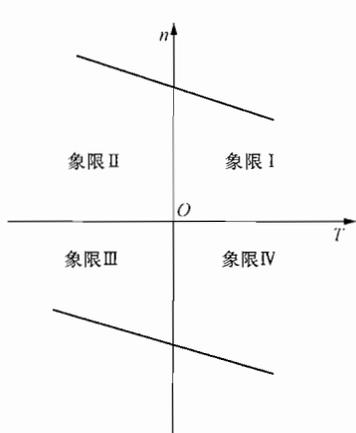


图 14-4-1  $T-n$  坐标平面上的四个象限

状态 I： $n > 0, T > 0$ ，正向电动状态，工作于象限 I，能量从电动机传向负载机械。

状态 II： $n > 0, T < 0$ ，正向制动状态，工作于象限 II，能量从机械返回电动机。

状态 III： $n < 0, T < 0$ ，反向电动状态，工作于象限 III，能量由电动机传向机械。

状态 IV： $n < 0, T > 0$ ，反向制动状态，工作于象限 IV，能量由机械返回电动机。

#### (2) 直流电动机的工作象限

直流电动机的四象限工作图见图 14-4-2，直流电动机的两象限工作图见图 14-4-3。

所谓一象限运行，就是指在 I 或 III 象限运行。这时，只能整流运行，而不能靠逆变进行制动。因此，一象限运行也可采用半控桥式整流联结。一象限运行时，电动机的电流和转速都不能反向。

所谓两象限运行，就是在 I 和 IV 象限，或 II 和 III 象限内运行。这时应采用可以逆变的单变流器联结。在图 14-4-3 中，当卷扬机提升重物时，电动机工作在电动状态，变流器整流运行；下放重物时，即使不向电动机提供能量，在重物作用下也能自行下放。为了制动，电动机应工作在发电状态，变流器逆变运行，但变流器电流方向不变。两象限运行时，电动机的转速可逆，但电流不可逆。

所谓四象限运行，就是可以在所有四个象限内工作，电动机的转速与电流都可逆。

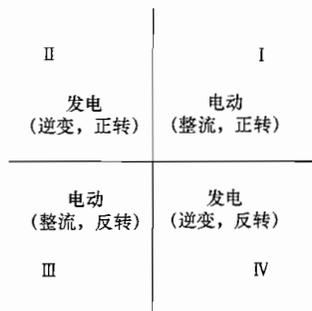


图 14-4-2 四象限工作图

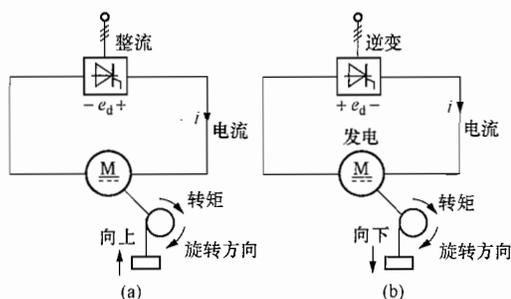


图 14-4-3 两象限运行工作图

## 14.4.2 直流电动机的调速

### 14.4.2.1 直流电动机的调速方法

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》6.1.1节。

(1) 直流电动机的调速原理。直流电动机的机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_0}{C_e C_T \Phi^2} T = n_0 - \frac{R_0}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (14-4-1)$$

式中  $n_0$ ——理想空载转速； $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ ；

$U$ ——加在电枢回路上的电压；

$\Phi$ ——电动机磁通；

$R_0$ ——电动机电枢回路的电阻；

$C_e$ ——电动势常数；

$C_T$ ——转矩常数；

$T$ ——电动机转矩。

由式(14-4-1)可知，改变  $R$ 、 $U$  及  $\Phi$  中的任何一个参数，都可以改变电动机的机械特性，从而对电动机进行调速。

(2) 改变电枢回路电阻调速。从式(14-4-1)可知，当电枢回路串联附加电阻  $R$  时(见图14-4-4)，其特性方程式变为

$$n = n_0 - \frac{R_0 + R}{C_e C_T \Phi^2} T$$

式中  $R_0$ ——电动机电枢电阻；

$R$ ——电枢回路串联的附加电阻。

即电动机电枢回路中串联附加电阻时，特性的斜率增加。在一定负载转矩下，电动机的转速下降增加，因而电动机的实际转速降低了。图14-4-4所示为附加电阻值不同时的一组特殊曲线。如果负载转矩  $T_L$  为常数，则

$$n = n_0 - \frac{T_L}{C_e C_T \Phi^2} R_0 - \frac{T_L}{C_e C_T \Phi^2} R = A - BR \quad (14-4-2)$$

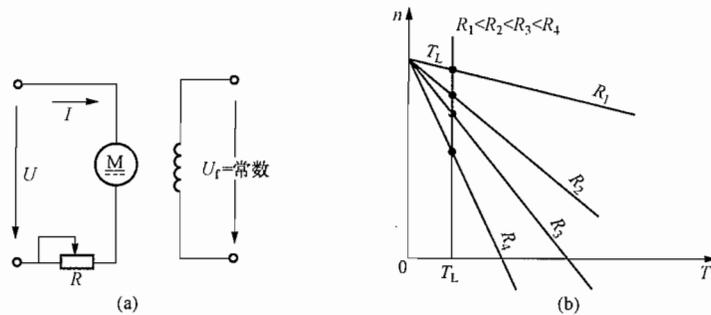


图14-4-4 直流电动机电枢回路串联电阻调速

(a) 线路；(b) 机械特性

式中

$$A = n_0 - \frac{T_L}{C_e C_T \Phi^2} R_0$$

$$B = \frac{T_L}{C_e C_T \Phi^2}$$

式(14-4-2)表明了控制量 $R$ 与被控制量 $n$ 之间的关系,其调速特性见图14-4-5。

由图14-4-5可知,当 $R=0$ 时,电动机工作在额定转速 $n_N$ (当外加电压及励磁电流均为额定值时);当 $R=R_1$ 时,转速为 $n_1$ ,并且 $n_1 < n_N$ ;当 $R=R_2$ 时,电动机堵转( $n=0$ ),这时

$$R_2 = \frac{U}{I_L} - R_0$$

式中 $I_L$ ——产生足以平衡负载转矩 $T_L$ 所需要的电流, $I_L = T_L / C_T \Phi$ 。

当 $R > R_2$ 时,转速变为负值,即电动机将要反转,这种情况称为负载倒拉反转制动(如为了平稳而缓慢地下放重物)。这时可以加大 $R$ ,使电动机产生的转矩小于 $T_L$ ,电动机减速,直到停止,在重物的作用下,电动机又反向转动,重物以低速下放。但要注意,这时不能断开电动机的电源,否则由于没有电动机的制动转矩,会使重物越降越快,容易发生事故。

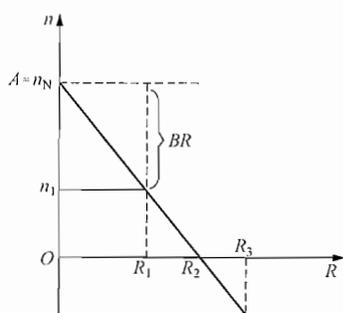


图14-4-5 电枢串联电阻时的调速特性

用这种方法调速,因其机械特性变软,系统转速受负载的影响较大,轻载时达不到调速的目的,重载时还会产生堵转;

而且在串联电阻中流过的是电枢电流,长期运行损耗也大,所以在使用上有一定的局限性。

电枢回路串电阻的调速方法,属于恒转矩调速,并且只能在需要向下调速时使用。在工业生产中,小容量时,可串联一台手动或电动变阻器来调速;容量较大时,多用继电器-接触器系统来切换电枢串联电阻,故属于有级调速。

(3) 改变电枢电压调速。当改变电枢电压时,理想空载转速 $n_0$ 也将改变,但机械特性的斜率不变,这时机械特性方程为

$$n = \frac{U'}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T = n'_0 - K_m T$$

式中 $U'$ ——改变后的电枢电压;

$n'_0$ ——改变电压后的理想空载转速, $n'_0 = \frac{U'}{C_e \Phi}$ ;

$K_m$ ——特性曲线的斜率, $K_m = \frac{R}{C_e C_T \Phi^2}$ 。

其特性曲线是一族以 $U'$ 为参数的平行直线,见图14-4-6。由图14-4-6可见,在整个调速范围内均有较大的硬度,在允许的转速变化率范围内,可获得较低的稳定转速。这种

调速方式的调速范围较宽，一般可达 10 ~ 12，如果采用闭环控制系统，调速范围可达几百至几千。

改变电枢电压调速方式属于恒转矩调速，并在空载或负载转矩时也能得到稳定转速，通过电压正反向变化，还能使电动机平滑地起动的四个象限工作，实现回馈制动。这种调速方式控制功率较小，效率较高，配上各种调节器，可组成性能指标较高的调速系统，因而在工业中得到了广泛的应用。

为了改变电动机的电枢电压，需要有独立的可调压的电源，一般采用的有直流发电机、晶闸管变流器和由各种电力电子器件构成的直流电源等，各种方案的比较见表 14-4-1。

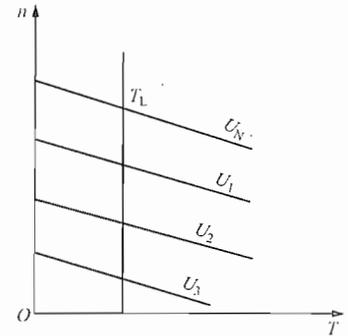


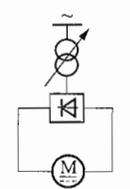
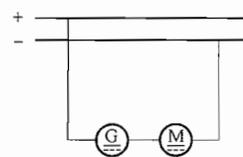
图 14-4-6 改变电枢电压调速时的机械特性

表 14-4-1

直流电动机改变电压调速的方法

变压方法	原理电路	装置组成	性能及适用场合
电动机-发电机组 (旋转变流机组)		原动机可用同步电机、绕线转子异步电动机（包括带飞轮和转差调节的机组）、笼型异步电动机、柴油机等。励磁方式有励磁机、电机扩大机、磁放大器、晶闸管励磁装置等。控制方式有继电器-接触器、磁放大器和半导体控制装置等	输出电流无脉动，带飞轮的机组对冲击负载有缓冲作用，带同步电机的机组能提供无功功率，改善功率因数。因为有旋转机组，效率较低，噪声、振动大。继电器-接触器和电机扩大机控制时，控制功率大，构成闭环系统一般动态指标较差，用晶闸管励磁可提高动态指标
晶闸管变流器		包括交流变压器、晶闸管变流装置、平波电抗器和半导体控制装置等	效率高，噪声、振动小，控制功率小，构成闭环系统动态指标好。但输出电流有脉动，深控时功率因数低，对电网的冲击和谐波影响大
直流斩波器		包括晶闸管（或其他电力电子器件）、换相电感电容、输入滤波电感电容及半导体控制装置等	适用于由公共直流电源或蓄电池及恒定电压直流电源供电的场合，如电机车、蓄电池车等电动车辆
柴油交流发电机-硅整流器		柴油交流发电机、硅整流装置及相应的控制装置等	改变交流发电机电压，经硅整流装置整流得到可变直流电压，用于电动轮车等独立电源场合

续表

变压方法	原理电路	装置组成	性能及适用场合
交流调压器 硅整流器		调压变压器、硅整流装置等	效率高，噪声、振动小，输出电流脉动较小，比晶闸管供电功率因数有改善，但实现自动调速较困难。适用于不经常调速的小功率（小于15kW）手动开环控制场合
升压机组		与公共直流电源串联的直流发电机或晶闸管变流装置及相应的控制装置	适用于公共直流电源供电场合，设备较经济，但调速范围不大

(4) 改变磁通调速。在电动机励磁回路中，改变其串联电阻  $R_f$  的大小 [见图 14-4-7 (a)]，或采用专门的励磁调节器来控制励磁电压 [见图 14-4-7 (b)]，都可以改变励磁电流和磁通。这时电动机的电枢电压通常保持为额定值  $U_N$ ，因为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e \Phi} I$$

所以，理想空载转速  $[U_N / (C_e \Phi)]$  与磁通 ( $\Phi$ ) 成反比；电动机机械特性的斜率与磁通的二次方成反比。此时，转矩和电流与转速的关系见图 14-4-8。

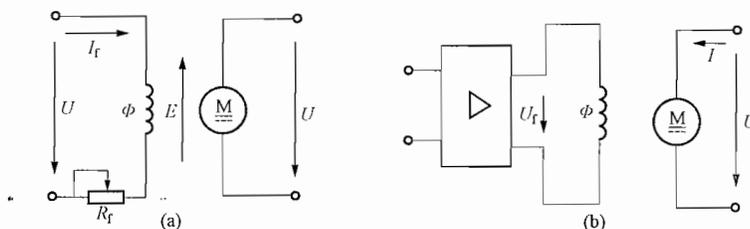


图 14-4-7 直流电动机改变磁通的调速线路

(a) 励磁回路串联电阻调速；(b) 用放大器控制励磁电压调速

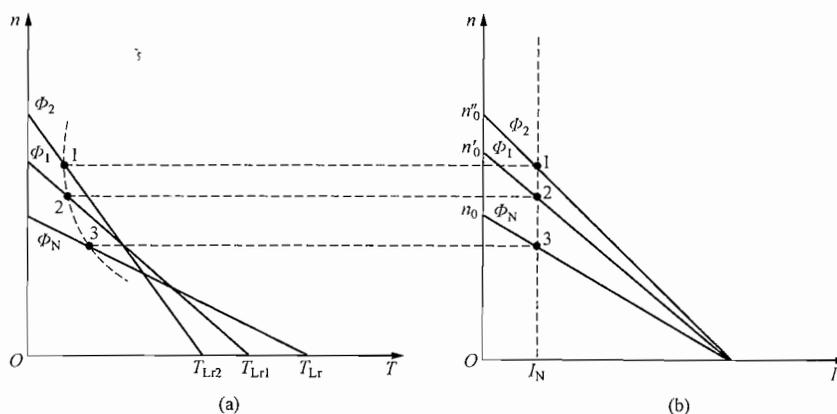


图 14-4-8 调磁通时  $n=f(T)$  与  $n=f(I)$  曲线

(a)  $n=f(T)$  曲线；(b)  $n=f(I)$  曲线

在调速过程中,为使电动机容量得到充分利用,应该使电枢电流一直保持在额定电流  $I_N$  不变,见图 14-4-8 (b) 中的垂直虚线。这时,磁通与转速成双曲线关系,  $\Phi \propto 1/n$ , 即  $T \propto 1/n$ , 见图 14-4-8 (a) 中的虚线。在虚线左边各点工作时,电动机没有得到充分利用;在虚线右边各点工作时,电动机过载,不能长期工作。因此,改变磁通调速适合于带恒功率负载,即为恒功率调速。

采用改变励磁的方法进行调速时,在高速下由于电枢电流去磁作用增大,使转速特性变得不稳定,换向性能也会下降。因此,采用这种方法的调速范围很有限。无换向极电动机的调速范围为基速的 1.5 倍左右,有换向极电动机的调速范围为基速的 3~4 倍,有补偿绕组电动机的调速范围为基速的 4~5 倍。

(5) 调速方式的性能比较。直流系统的三种调速方式的性能比较见表 14-4-2。

表 14-4-2 调速方式的性能比较

调速方式和方法		控制装置	调速范围	转速变化率	平滑性	动态性能	恒转矩或恒功率	效率
改变电枢电阻	串电枢电阻	变阻器或接触器、电阻器	2:1	低速时大	用变阻器较好,用接触器和电阻器较差	无自动调节能力	恒转矩	低
改变电枢电压	电动机-发电机组	发电机组或电机扩大机(磁放大器)	1:10 ~ 1:20	小	好	较好	恒转矩	60% ~ 70%
	静止变流器	晶闸管变流器	1:50 ~ 1:100	小	好	好	恒转矩	80% ~ 90%
	斩波器(脉冲调制)	IGBT 或晶闸管开关电路	1:50 ~ 1:100	小	好	好	恒转矩	80% ~ 90%
改变磁通	串联电阻或用可交直流电源	直流电源变阻器	1:3 ~ 1:5	较大	较好	差	恒功率	80% ~ 90%
		电机扩大机或磁放大器			好	较好		
		晶闸管变流器				好		

#### 14.4.2.2 直传动系统的调速方案选择

##### 14.4.2.2.1 发电机-电动机组调速系统

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》6.1.2节。

直流发电机-直流电动机组成的调速系统,见图 14-4-9。

电枢主路由一台直流发电机对一台直流电动机供电,电动机速度连续可调,并且在电动机额定电枢电压以下,靠调整发电机输出端电压(调压调速)来调整电动机转速,当电动机电压达到额定值以后,靠减弱电动机励磁电流,电动机升速一直达到电动机最高额定转速。

近年来,在发电机励磁和电动机励磁回路中,多采用晶闸管变流器传动方案,用控制两套晶闸管装置输出电压分别改变发电机输出电压和

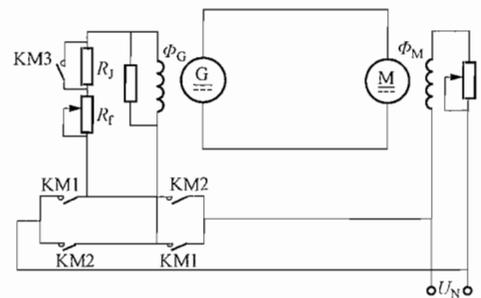


图 14-4-9 发电机-电动机调速系统

电动机励磁电流，实现速度控制，对于需要正/反转的可逆直流调速系统，通常发电机励磁晶闸管装置为双向可逆装置，而电动机晶闸管装置为单向不可逆装置。

由于直流发电机及拖动发电机的原动机的存在，造成整体效率低，对环境有污染，不利于节水、节电等，并且随着大功率电力电子设备的出现和发展，促使大功率晶闸管变流装置成本的不断下降，直流发电机-电动机组方案，已逐步被取代。

#### 14.4.2.2.2 斩波器调速系统

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》6.1.3节。

斩波器是一种采用电力电子开关的调速系统。它能从恒定的直流电源产生出经过斩波的可变直流电压，从而达到调速的目的。

(1) 降压斩波器。图14-4-10示出了一个简单的降压斩波器调速系统电路和斩波后的电压波形。在图14-4-10(a)中，UCH是斩波器， $E$ 是一个恒压的直流电源，VD是续流二极管， $L$ 是平波电抗器。在 $t_{\text{on}}$ 期间内，UCH导通，电源 $E$ 和直流电动机M接通；在 $t_{\text{off}}$ 期间内，UCH关断，电动机电枢电流 $I_M$ 经VD流通。

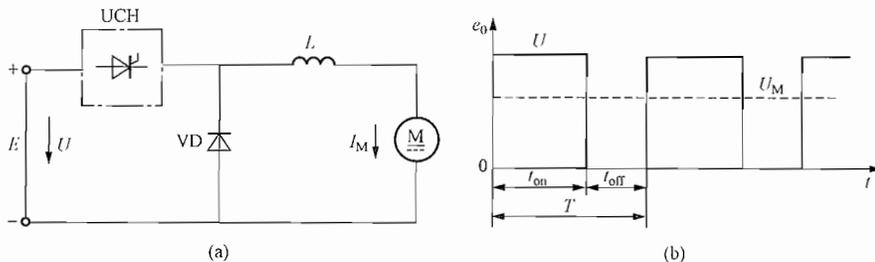


图14-4-10 简单的斩波器调速系统

(a) 系统电路；(b) 斩波后波形

加在电动机M上的平均电压为

$$U_M = U \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}} = U \frac{t_{\text{on}}}{T} = kU \quad (14-4-3)$$

式中  $t_{\text{on}}$ ——导通时间；

$t_{\text{off}}$ ——关断时间；

$U$ ——恒压电源电压值；

$T$ ——斩波周期， $T = t_{\text{on}} + t_{\text{off}}$ ；

$k$ ——工作率， $k = \frac{t_{\text{on}}}{T}$ 。

由式(14-4-3)可知，改变 $k$ 就可以改变 $U_M$ ，从而进行调速。 $k$ 的改变可以有以下两种方法：

1) 恒频系统。 $T$ 保持不变（即频率不变），只改变 $t_{\text{on}}$ ，即脉宽调制（PWM）方式。

2) 变频系统。改变 $T$ （即改变频率），但同时保持 $t_{\text{on}}$ 不变或者保持 $t_{\text{off}}$ 不变，即频率调制（FM）方式。

变频系统的频率变化范围必须与调压（即调速）范围相适应。因而在调压范围较大时，频率变化范围也必须大，这就给滤波器的设计带来困难，同时对信号传输和通信的干扰可能性也加大。另外，在输出电压很低时，其频率也低，较长的关断时间容易使电动机电流断

续。所以，斩波器调速应优先选用恒频系统。

(2) 升压斩波器。其基本电路见图 14-4-11 (a)，电流波形见图 14-4-11 (b)，输出特性见图 14-4-11 (c)。

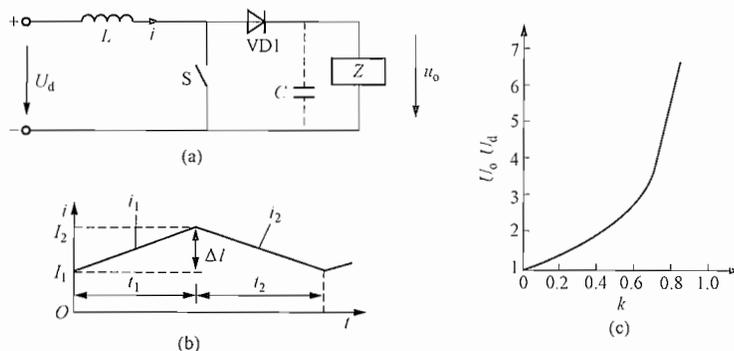


图 14-4-11 基本的升压斩波电路

(a) 电路；(b) 波形；(c) 输出特性

在  $t_1$  时间里，开关 S 接通，于是有

$$u_L = U_d = L \frac{di}{dt}$$

将上式积分，得电感上的峰-峰脉动电流为

$$\Delta I = \frac{U_d}{L} t_1$$

在  $t_2$  时间间隔里，开关 S 断开，且输出电压保持恒定的  $U_o$ ，于是有

$$u_L = U_o - U_d = L \frac{di}{dt} \quad (14-4-4)$$

$$\Delta I = \left\{ \frac{(U_o - U_d)}{L} \right\} t_2$$

考虑式 (14-4-4)，则得

$$U_o = \frac{U_d}{1-k} \quad (14-4-5)$$

由式 (14-4-5) 可知，随着  $k$  的增加，输出电压将超过电源电压  $U_d$ 。当  $k=0$  时，输出电压为  $U_d$ ；当  $k \rightarrow 1$  时，输出电压将变得非常大，见图 14-4-11 (c)。利用升压斩波电路可以实现两个直流电压源之间的能量交换，见图 14-4-12 (a)。该电路工作于两种模式，如图 14-4-12 (b) 等值电路所示。

(3) 复合斩波器。在直流电动机的斩波控制中，常常需要使电动机正转和反转、电动运行和再生制动。上述降压斩波器是在第 I 象限工作，而升压斩波器则是在第 II 象限工作。在从电动状态到再生制动状态切换时，可以通过改变电路联结方式来实现，但在要求快速响应的情况下，就需要用门极信号平稳地从电动过渡到再生，使电压和电流都是可逆的，复合斩波器是将基本的降压和升压斩波器组合起来，组成在两象限工作的电流可逆斩波器，或能够在四象限工作的桥式可逆斩波器。

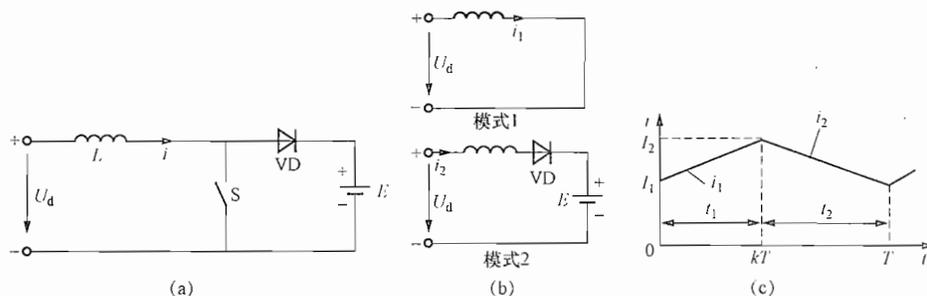


图 14-4-12 能量传输原理说明

(a) 电路；(b) 等效电路；(c) 波形

1) 电流可逆斩波电路。图 14-4-13 (a) 给出了电流可逆斩波电路的原理图。在该电路中，V1 和 VD1 构成降压斩波电路，由电源向直流电动机供电，电动机为电动运行，工作于第 I 象限；V2 和 VD2 构成升压斩波电路，把直流电动机的动能转变为电能反馈到电源，使电动机作再生制动运行，工作于第 II 象限。需要注意的是，若 V1 和 V2 同时导通，将导致电源短路，进而会损坏电路中的开关器件或电源，因此必须防止出现这种情况。

当电路只作降压斩波器运行时，V2 和 VD2 总处于断态；只作升压斩波器运行时，则 V1 和 VD1 总处于断态。两种工作情况与前面讨论过的完全一样。此外该电路还有第 3 种工作方式，即在一个周期内，交替地作为降压斩波电路和升压斩波电路工作。在这种工作方式下，当降压斩波电路或升压斩波电路的电流断续而为零时，使另一个斩波电路工作，让电流反方向流过，这样电动机电枢回路总有电流流过。例如，当降压斩波电路的 V1 关断后，由于积蓄的能量少，经一段时间，电抗器  $L$  的储能即释放完毕，电枢电流为零。这时使 V2 导通，由于电动机反电动势  $E_M$  的作用使电枢电流反向流过，电抗器  $L$  积蓄能量。待 V2 关断后，由于  $L$  积蓄的能量和  $E_M$  共同作用，使 VD2 导通，向电源反送能量。当反向电流变为零，即  $L$  积蓄的能量释放完毕时，再次使 V1 导通，又有正向电流流通，如此循环，两个斩波电路交替工作。

图 14-4-13 (b) 给出的就是这种工作方式下的输出电压、电流波形，图中在负载电流  $i_o$  的波形上还标出了流过各器件的电流。

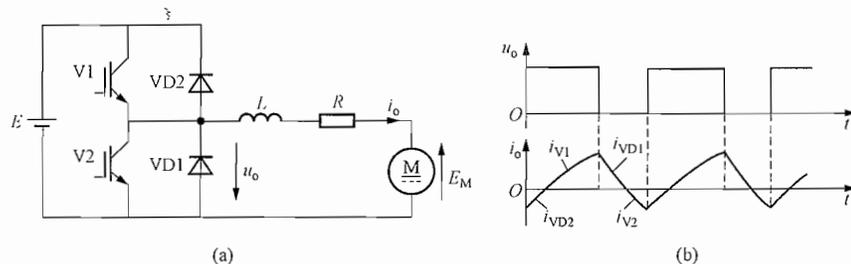


图 14-4-13 电流可逆斩波电路及其波形

(a) 电路；(b) 波形

2) 桥式可逆斩波电路。电流可逆斩波电路虽可使电动机的电枢电流可逆，实现电动机

的两象限运行,但其所能提供的电压极性是单向的。当需要电动机进行正、反转以及可电动又可制动的场合,就必须将两个电流可逆斩波电路组合起来,分别向电动机提供正向和反向电压,这就组成为图 14-4-14 所示的桥式可逆斩波电路。

当使 V4 保持通态时,该斩波电路等效为图 14-4-13 (a) 所示的电流可逆斩波电路,向电动机提供正电压,可使电动机工作于第 I、II 象限,即正转电动和正转再生制动状态。此时,需防止 V3 的导通造成电源短路。

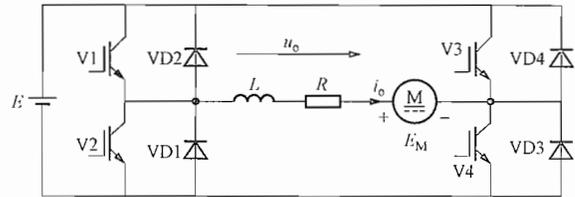


图 14-4-14 桥式可逆斩波电路

当使 V2 保持为通态时,于是 V3、VD3 和 V4、VD4 等效为又一组电流可逆斩波电路,向电动机提供负电压,可使电动机工作于第 III、IV 象限。其中 V3 和 VD3 构成降压斩波电路,向电动机供电,使其工作于第 3 象限即反转电动状态,而 V4 和 VD4 构成升压斩波电路,可使电动机工作于第 IV 象限即反转再生制动状态,此时也同样不能让 V1 导通,以防电源短路。

14.4.2.2.3 晶闸管变流器的主电路方案

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》6.2.1.1、6.1.4 节。

(1) 常用的晶闸管变流器主电路方案见表 14-4-3。

表 14-4-3 主电路接线方案对照表

	不可逆接线方式	电动机励磁可逆接线方式	交叉可逆接线方式	反并联可逆接线方式	
主回路接线方案					
性能特点	(1) 只提供单一方向转矩,变流器只限于整流状态工作,机械的减速、停车不能用变流装置控制 (2) 设备费用少,晶闸管数量少,控制线路及保护方式简单	(1) 主电路电流单向,靠改变电动机励磁电流方向实现电动机转矩可逆,变流器可工作在整流和逆变工作状态,机械的减速、停车可通过变流器控制实现制动 (2) 主电路设备和晶闸管数量少,保护方式简单,在	(1) 靠两套变流器实现主电路电流双向可逆。同时,两套变流器间存在环流回路,通过控制装置和环流回路内限流电抗器 L1、L2 控制环流为额定电流的 5%~10%,因此,变流器内电流连续,可改善电动机空载时变流器特性和减少电流换向死时至 0~1ms	(1) 靠正反向两组晶闸管实现主电路电流双向可逆运转,电流换向时通过逻辑控制电路的一定时序,选择封锁和释放晶闸管的触发脉冲,实现主电流方向可逆。电流方向切换时,为保证由导通转为封锁的晶闸管能可靠恢复阻断,一般须有 5~10ms 的切换死时 (2) 接线方式 a 使用一台交流变压器和两套晶闸管变流器,每套变流器各有独立的电抗器和快速断路器,用以保护环流回路及限制故障情况下环流电流上升率,设备多、主电路接线较为复杂	

续表

	不可逆接线方式	电动机励磁可逆接线方式	交叉可逆接线方式	反并联可逆接线方式
性能特点	(3) 不宜用在经常起动、停车或要求调速的场所	大容量机械中较为经济 (3) 磁场反向存在 0.5 ~ 2.0s 死时, 不宜工作在频繁正反转可逆系统	(2) 设备费用高, 变流变压器、保护开关、电抗器以及晶闸管变流装置必须设有独立的两套, 控制复杂, 多用于快速性和精度要求很高的位置控制系统等	(3) 接线方式 b 的设备费用少, 晶闸管对接或变流器直接反并联, 环流回路内不设限流电抗器和快速断路器, 设备紧凑, 对晶闸管有较高要求
适用范围	多用于单方向连续运行或某些缓慢减速及负载变动不大的生产机械 容量范围一般为 100kW 以下, 适用的生产机械包括风机、水泵和线材轧机以及造纸机等	多用于要求正反转可逆, 但不频繁反转和调速的生产机械, 容量范围可在 300kW 以上 适用的生产机械如大型卷扬机和厚板轧机等	控制灵活, 电流换向无死时, 快速性能好, 大多用于机械特性要求高的生产机械中, 容量可达数千千瓦, 适用的生产机械如高速连轧机主传动、压下位置驱动系统等	可灵活地实现四象限内电动机频繁起、制动和调速等状态运转, 快速性好 (数毫秒), 便于组成有电流闭环的转速 (或电压) 控制装置, 已普遍用于各类控制性能高的生产机械中, 装置容量可达数千千瓦 适用于轧机主副传动, 以及卷扬机主传动和造纸机械等

注 符号 T 为变流变压器; U 为晶闸管变流器;  $L_1$ 、 $L_2$  为环流电抗器; QF 为快速断路器; LF 为滤波电抗器; M 为传动直流电动机。

(2) 电枢回路晶闸管不可逆系统。典型的晶闸管变流器控制的直流电动机不可逆调速系统见图 14-4-15。系统中包括两个环, 内环是电流控制环, 外环是转速控制环。每个环都含有一个调节器 (速度调节器 ASR 及电流调节器 ACR), 它们是比例积分 (PI) 环节或比例积分微分 (PID) 环节, 用来改善系统的静态和动态特性, 以及综合输入和反馈信号。

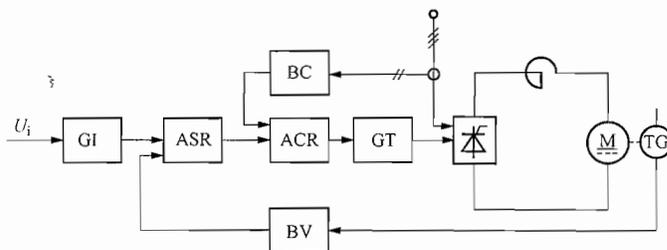


图 14-4-15 不可逆双环调速系统

GI—给定积分器; ASR—速度调节器; ACR—电流调节器; GT—触发器;

BV—速度变换器; BC—电流变换器; TG—测速发电机

当电网或电动机负载发生变化或有其他扰动时, 通过转速控制环, 系统能起自动调节和稳定的作用。

在很多应用场合,为了进一步扩大调速范围,除采用调压调速外,同时还采用弱磁调速。为此,需要将调压与调磁两者结合起来,并能在两种调速方式的分界线上(基速)实行自动切换。图 14-4-16 所示为同时采用两种调速方法时在整个调速范围内的电动机的调速特性。

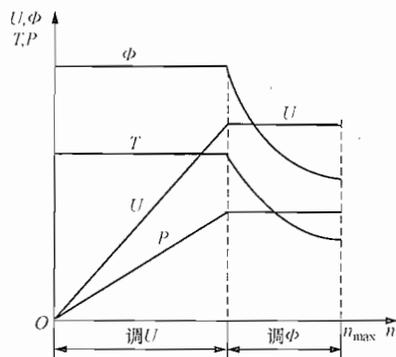


图 14-4-16 调压与调磁时电动机的调速特性

(3) 直流电动机可逆方式。很多生产机械要求其传动电动机能在两个方向旋转,并能产生两个方向的转矩。因此,要求电动机的电枢电压(或励磁电流)、电枢电流必须能在两个方向工作。但晶闸管只能单方向流过电流,因此,要满足上述要求,就要正反向各设一套整流器组成双变流器联结,或通过开关切换电动机与整流器的连接来实现。这时电动机就能在四个象限内工作。

直流电动机可逆方式的比较见表 14-4-4。

表 14-4-4 直流电动机可逆方式的比较

比较项目	电枢用一套变流装置开关切换	电枢用一套变流装置磁场反向	电枢用两套变流装置电枢反向
设备	(1) 电枢变流装置一套 (2) 电枢回路切换开关 (3) 切换逻辑	(1) 电枢变流装置一套 (2) 励磁变流装置两套 (3) 切换逻辑	(1) 电枢变流装置两套 (2) 无环流切换逻辑或环流电抗器
性能	有触点开关快速性差,正反转开关切换死时为 0.2~0.5s,减速时开关要切换两次 采用晶闸管开关可将切换死时减少到 0.1s	快速性差,正反转磁通反向时间为几百毫秒到 1s,减速时磁通要切换两次	快速性好,切换死时零到几十毫秒
可靠性	主电路不产生环流,有触点开关,维护工作最大,寿命低	主电路不产生环流,无触点切换,要求有可靠的可逆励磁回路	要求触发器、逻辑切换可靠及抗干扰能力强
投资	系统简单,投资少	系统复杂,但投资较少	系统较简单,但投资大
适用场合	正反转调速不频繁,受开关容量限制,一般在几十千瓦以下,如起重机等	正反转调速不频繁,对调速精度要求不高,容量为几十到几千千瓦,如卷扬机等	正反转调速频繁,容量从几到几千千瓦,如轧机主、辅传动,可逆运转机床等

#### (4) 靠接触器反接的可逆系统。

1) 用接触器反接电枢电路。电枢用一套晶闸管整流器供电、由接触器切换的可逆系统见图 14-4-17。

这种系统使用触头切换,触头维护工作量大,寿命较短,切换零电流死区时为 0.2~0.5s,适用于小功率、不需要频繁切换的场合。

2) 用接触器反接磁场回路。图 14-4-18 是一种磁场反向的可逆调速系统,电动机电枢回路由带有电流内环的单方向转速系统的晶闸管整流器供电,励磁回路用两套晶闸管整流器组成的可逆系统供电,或者采用一套晶闸管整流器,靠磁场回路的接触器实现励磁电流

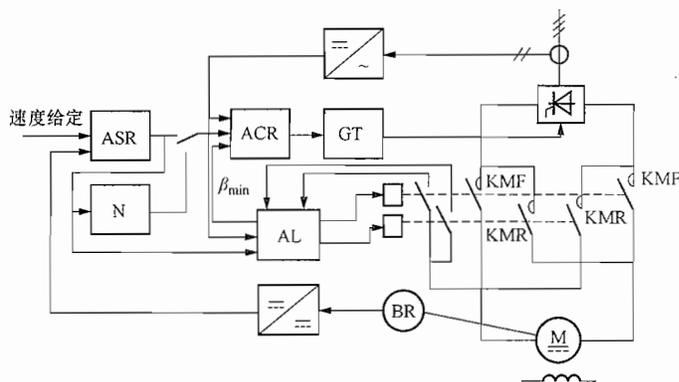


图 14-4-17 电枢用切换开关反向的可逆系统

N—反号器；AL—逻辑装置；ASR—速度调节器；ACR—电流调节器

反接。

磁场可逆系统的特点是，电动机的反转或降速是用改变其励磁电流的方向，使电动机产生相应转矩来实现的。

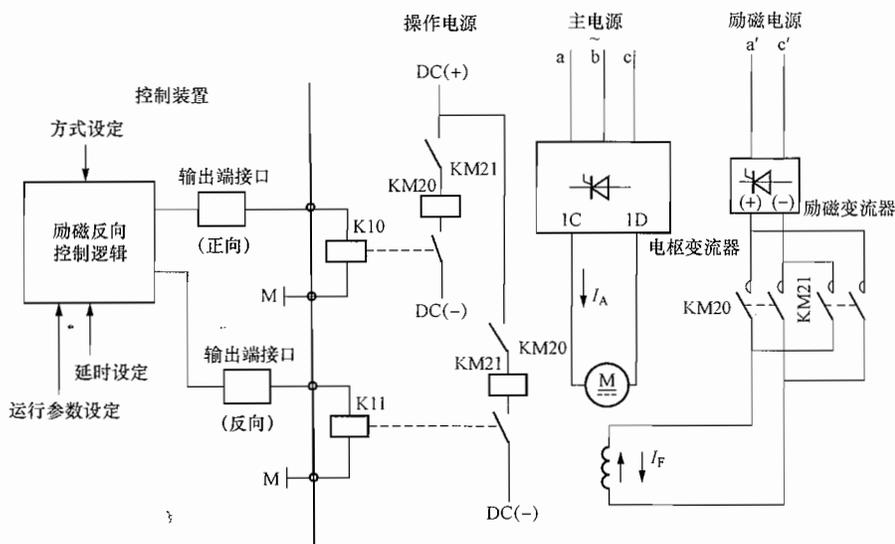


图 14-4-18 励磁电流可逆的控制系统

磁场反向可逆系统的主要优点是，可省去一套电枢回路的变流装置，投资较少，但系统快速性差，磁场反向时间需要几百毫秒到 1s。因此，一般只用在正反转调速不频繁或调速精度要求不高的场合，容量范围从几十到几千千瓦。

控制系统可以实现直流电动机减速过程的制动控制，见图 14-4-18。图 14-4-18 中，电动机励磁回路中的晶闸管变流器采用单向不可逆装置，而电动机励磁电流方向靠换接励磁接触器 KM20 和 KM21 来实现。

使用励磁反向可以实现电枢一套变流器条件下的制动及能量回馈过程，其制动方式可以选择为降速时的励磁反向制动按时序接触器反接，待制动过程结束，再转换到原来的励磁电

流方向，也可以选择为改变电动机的旋转方向使其反转。

(5) 电枢回路晶闸管可逆系统。通常两套晶闸管整流装置有反并联联结、交叉联结和直接反并联联结三种方式。

1) 反并联联结。见图 14-4-19。它是将两组整流器反向并联，交流侧接在同一个变压器二次绕组上，可以向电动机提供可逆的电枢电流。

这种线路的特点如下：

a. 由于正反两组整流器都用同一台变压器供电，所以变压器的利用率最高。

b. 由于有两个环流回路，至少需要两台电抗器，电抗器除了能限制环流外，还应在正常工作时满足电动机允许的最小电流连续程度和纹波的要求，并且在故障时能限制电流上升率，使直流快速断路器在快速熔断器熔断前先跳闸。

c. 反并联的两组整流器接在同一台变压器的二次绕组上，相互之间有影响。特别是在作为有环流线路运行时影响更大，可靠性较差。

这种方案一般都用在无环流可逆线路中。对于有环流可逆系统，一般不采用这种线路，而采用交叉联结方式。

2) 交叉联结。它是将两组整流器分别由一台变压器的两个二次绕组供电的，见图 14-4-20。

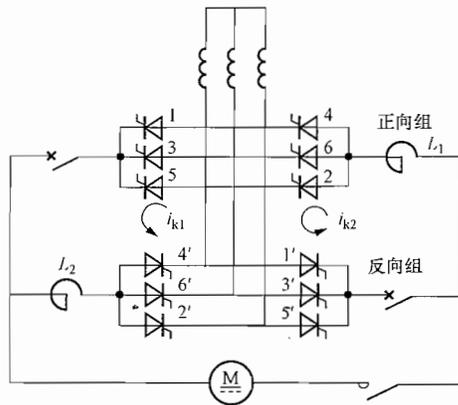


图 14-4-19 反并联可逆线路

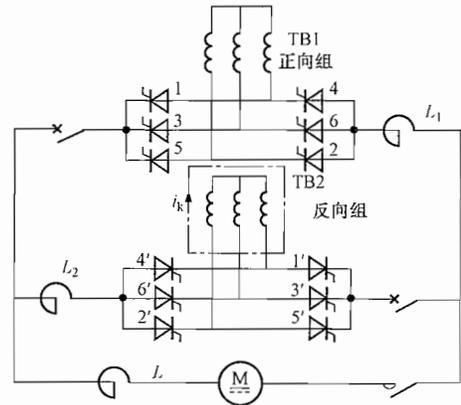


图 14-4-20 交叉联结可逆线路

交叉联结可逆线路的特点如下：

a. 由于有环流及变压器有两个二次绕组，故变压器的利用率较低，初期投资较大。

b. 由于只有一个环流回路，故可用一台空心电抗器或两台铁心电抗器限制环流。这种线路的环流比反并联线路的小，因而电抗器的体积也小。

c. 环流要通过四个晶闸管，而且只有一个环流回路，不像反并联线路那样两桥之间相互有影响，因此，可靠性较高。

3) 直接反并联。可以将正反向两个晶闸管压在一套散热器上，组成一个可逆单元组件。用 6 套这种组件可组成直接反并联线路，见图 14-4-21。

这种线路有如下特点：

a. 由于正反向器件不同时导电，因此散热器的体积增加不多，从而能缩小装置体积。

b. 正反向臂共用一个桥臂电抗器和快速熔断器，可节省装置成本。

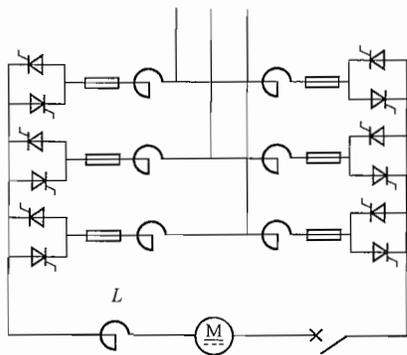


图 14-4-21 直接反并联可逆线路

c. 主电路只用一台直流电抗器和一台直流快速断路器，使主电路简化。

这种控制方式，由于主电路设备少，目前在调速系统中被广泛采用。

#### 14.4.2.2.4 晶闸管变流器可逆系统的控制方案

晶闸管变流器可逆系统控制方案有：有环流可逆控制，逻辑无环流可逆控制，有准备逻辑无环流可逆控制及错位选能无环流可逆控制等方式，详见《电气传动自动化技术手册（第3版）》第6章6.1.5节。

#### 14.4.2.3 晶闸管变流装置主电路参数计算

##### 14.4.2.3.1 变流器连接及基本电路参数

晶闸管变流装置的主电路设备通常包括：变流变压器（或交流进线电抗器）、晶闸管变流器、直流滤波电抗器、交直流侧过电压吸收器、过电流保护和快速断路器等。变流装置的主电路方案，应按照生产机械的工作制和传动电动机的容量范围，参照表 14-4-3 选取。常用的晶闸管变流器线路及有关的计算系数和特点参见表 14-4-6。

##### 14.4.2.3.2 变流变压器的计算

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》6.2.2节。

(1) 变流电压的原始方程。假定：①整流回路电感足够大；②忽略变压器及主电路馈线电阻，则

$$U_d = K_{UV} e \left( b \cos \alpha_{\min} - K_x \frac{U_{V\phi} I_{T\max}}{100 I_{TN}} \right) - n U_{df} \quad (14-4-6)$$

式中  $U_d$ ——变流器输出电压平均值，V；

$e$ ——变压器阻抗电压百分值（见表 14-4-5）；

$K_{UV}$ ——整流电压计算系数（见表 14-4-6）；

$K_x$ ——换相电抗压降计算系数（见表 14-4-6）；

$b$ ——电网电压下波动系数，无特殊要求时取  $b = 0.95$ ；

$\alpha_{\min}$ ——最小触发延迟角， $\cos \alpha_{\min}$  取 0.85 ~ 1.0（在可逆变流系统中，有环流系统接近该值的下限，无环流时接近上限）；

$I_{T\max}/I_{TN}$ ——变压器允许过载系数；

$U_{V\phi}$ ——变流变压器二次相电压，V；

$U_{df}$ ——晶闸管正向瞬态压降，取 1.5V；

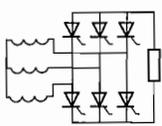
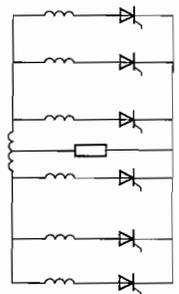
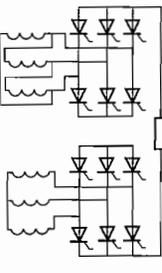
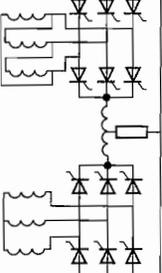
$n$ ——电流通过晶闸管的器件数。

14

表 14-4-5 变压器阻抗电压百分值  $e$  (%)

变压器容量 (kVA)	$e$
100 以下	5
100 ~ 1000	5 ~ 7
1000 以上	7 ~ 10

表 14-4-6 常用大功率传动用整流线路有关的计算系数及特点

接法	线路图	换相电抗压降计算系数 $K_X$	整流电压计算系数 $K_{UV}$	晶闸管电压计算系数 $K_{UT}$	晶闸管电流计算系数 $K_{IT}$	变压器阀侧相电流计算系数 $K_{IV}$	变压器网侧相电流计算系数 $K_{IL}$	变压器等值容量计算系数 $K_{ST}$	变压器漏感计算系数 $K_{TL}$	变压器电感计算系数 $K_L$	变压器电阻计算系数 $K_R$	整流线路最大滞后时间 $T_{inv}/ms$	特点及适用范围				备注	
													线路组成	电压脉动	能否逆变	变压器利用率		应用范围
三相全桥		0.5	2.34	2.45	0.367	0.816	0.816	1.05	1.22	2	2	3.3	较复杂	较小	能	好	应用范围极广	
双反星形带平衡电抗器		2	1.17	2.45	0.184	0.289	0.408	1.27	2.45	1	1	3.3	较复杂	较小	能	较好	多用于输出电流大的直流电源系统, 调速装置已少采用	
双桥串联 <sup>①</sup>		0.259	4.68	2.45	0.367	0.816	1.58	1.03	0.634	4	4	3.3	复杂	最小	能	最好	1000kW 以上, 晶闸管需串联之处	
双桥并联 <sup>①</sup>		0.259	2.34	2.45	0.183	0.408	0.79	1.03	1.268	1	1	3.3	复杂	最小	能	最好	1000kW 以上, 晶闸管不需串联处	需增加平衡电抗器

① 双桥串联或并联是指变压器有两组阀侧绕组 (或两台变压器) 分别接成 y (Y) 和 d (Δ) 组成两组三相桥式整流后再串联或通过平衡电抗器并联成 12 脉波相整流的线路。

(2) 变流变压器二次相电压。对于电压调节系统,按式(14-4-6)计算,变流器输出电压等于电动机额定电压,即 $U_d = U_{MN}$ 。变压器阀侧相电压(V)为

$$U_{V\phi} = \frac{U_{MN} + nU_{df}}{K_{UV} \left( b \cos \alpha_{\min} - K_X \frac{e}{100} \frac{I_{T\max}}{I_{TN}} \right)} \quad (14-4-7)$$

对于转速调节系数,按式(14-4-6)计算,变流器输出电压为

$$U_d = U_{MN} + \left( \frac{I_{M\max}}{I_{MN}} - 1 \right) I_{MN} R_{Ma} + \frac{I_{M\max}}{I_{MN}} I_{MN} R_{ad} + K_{DF} K_{UV} U_{V\phi}$$

变压器二次相电压(V)为

$$U_{V\phi} = \frac{U_{MN} + \left( \frac{I_{M\max}}{I_{MN}} - 1 \right) I_{MN} R_{Ma} + \frac{I_{M\max}}{I_{MN}} I_{MN} R_{ad} + nU_{df}}{K_{UV} \left( b \cos \alpha_{\min} - K_X \frac{e}{100} \frac{I_{T\max}}{I_{TN}} - K_{DF} \right)} \quad (14-4-8)$$

式中  $U_{MN}$ ——电动机额定电压, V;

$I_{MN}$ ——电动机额定电流, A;

$R_{Ma}$ ——电动机电枢回路电阻,  $\Omega$ ;

$R_{ad}$ ——电动机电枢回路附加电阻,  $\Omega$ ;

$I_{M\max}/I_{MN}$ ——电动机允许过载倍数,无特殊情况,认为 $I_{M\max}/I_{MN} = I_{T\max}/I_{TN}$ ;

$K_{DF}$ ——考虑动态特性的调节裕度,一般 $K_{DF}$ 在0.05~0.10范围内选取。

对于转速调节系统,按式(14-4-8)选择的二次相电压 $U_{V\phi}$ ,还应该校验在电动机为额定转速并超调5%及供电交流电网电压下波动 $b=0.95$ 时是否满足下式

$$0.95 K_{UV} U_{V\phi} \cos \beta_{\min} \geq 1.05 (U_{MN} - I_{MN} R_{Ma})$$

$$\beta_{\min} = \gamma + u = \arccos \left[ \cos \gamma - 2K_X \frac{e}{100} \frac{I_{M\max}}{I_{MN}} \right]$$

式中  $\beta_{\min}$ ——系统允许的最小触发超前角;

$\gamma$ ——最小安全储备角,通常 $\gamma = 10^\circ \sim 20^\circ$ ;

$u$ ——重叠角。

对于励磁电流调节系统,有

$$U_d = U_{fN} + L_f \frac{di_f}{dt}$$

变压器二次相电压(V)为

$$U_{V\phi} = \frac{U_{fN} + L_f \frac{di_f}{dt}}{K_{UV} \left[ b \cos \alpha_{\min} - K_X \frac{e}{100} \right]}$$

式中  $U_{fN}$ ——额定励磁电压, V;

$L_f$ ——励磁绕组电感, H;

$di_f/dt$ ——励磁电流变化率, A/s;

$\alpha_{\min}$ ——最小触发延迟角,对于电动机励磁,通常取 $\alpha_{\min} = 10^\circ \sim 20^\circ$ 。

一般情况下,励磁电流不需要强励;特殊场合下,要求励磁电流超调,电流强励倍数可

考虑 1.2 ~ 1.3 倍。在要求励磁电流快速变化的条件下, 考虑  $L_r di_r/dt$  对输出电压的影响, 电压强迫倍数一般取 2 ~ 4 倍。

上述计算公式是同时考虑了各种不利的因素来计算  $U_{V\phi}$  的。如果实际上不需要同时考虑各种不利因素相叠加时, 上述计算公式中的一些参数如  $b$ 、 $I_{Mmax}/I_{MN}$ 、 $K_{DF}$  值可按实际情况决定。

当整流线路采用三相桥式整流, 并采用速度调节系统时, 一般情况下, 等效 Y 连接的阀侧相电压  $U_{V\phi}$  与电动机额定电压  $U_{MN}$  有下列关系:

对不可逆系统

$$\sqrt{3}U_{V\phi} = 0.95 \sim 1.0U_{MN}$$

对可逆系统

$$\sqrt{3}U_{V\phi} = 1.05 \sim 1.1U_{MN}$$

在实际应用中, 标准变流器系列已规定了阀侧电压值, 使用时可不必计算。例如, 对中小功率装置, 晶闸管变流器主电路采用三相全控桥线路时, 变流变压器二次线电压和直流电动机额定电压的匹配见表 14-4-7

表 14-4-7

国内中小功率标准系列阀侧电压

V

不可逆系统		可逆系统	
二次线电压 $\sqrt{3}U_{V\phi}$	电动机额定电压 $U_{MN}$	二次线电压 $\sqrt{3}U_{V\phi}$	电动机额定电压 $U_{MN}$
210	220	230	220
380	400	380	360
420	440	460	440

(3) 变流变压器的二次和一次相电流。二次 (阀侧) 相电流 (A) 为

$$I_{V\phi} = K_{IV}I_{dN}$$

式中  $K_{IV}$ ——二次 (阀侧) 相电流计算系数 (见表 14-4-6)。

在晶闸管供电时,  $I_{dN} = I_{MN}$ ; 在晶闸管励磁时, 则等于额定励磁电流, 即  $I_{dN} = I_{IN}$ 。在有环流系统中, 变压器设有两套独立的二次绕组 (见表 14-4-3), 在转矩换向时轮换通电, 每套二次绕组的通电持续率是 50%。

二次相电流为

$$I_{V\phi} = K_{IV} \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} I_{dN} + I_K \right]$$

通常考虑环流

$$I_K = (0.05 \sim 0.10) I_{dN}$$

变流变压器一次 (网侧) 相电流 (A) 为

$$I_{L\phi} = K_{IL} \frac{I_{dN}}{K} \quad (14-4-9)$$

式中  $K_{IL}$ ——一次 (网侧) 相电流计算系数 (见表 14-4-6);

$K$ ——变压器电压比。

考虑变压器励磁电流, 一次电流有效值可在式 (14-4-9) 计算结果上再增加 3% ~

5%，视变压器容量和电磁参数而定。

(4) 变压器的二次容量、一次容量。

一次容量 (VA)

$$S_1 = m_1 \frac{K_{\text{IL}}}{K_{\text{UV}}} U_{\text{d0}} I_{\text{dN}}$$

二次容量 (VA)

$$S_2 = m_2 \frac{K_{\text{IV}}}{K_{\text{UV}}} U_{\text{d0}} I_{\text{dN}}$$

等值容量 (VA)

$$S_{\text{T}} = \frac{1}{2}(S_1 + S_2) = K_{\text{ST}} U_{\text{d0}} I_{\text{dN}}$$

$$K_{\text{ST}} = \frac{1}{2K_{\text{UV}}}(m_1 K_{\text{IL}} + m_2 K_{\text{IV}})$$

式中  $U_{\text{d0}}$ ——空载整流电压；

$m_1$ 、 $m_2$ ——变压器一次和二次绕组相数，对于三相全控桥： $m_1 = m_2 = 3$ ，对双并联 12 脉波全控桥： $m_1 = 3$ ， $m_2 = 6$ ；

$K_{\text{ST}}$ ——等值容量计算系数（见表 14-4-6），它表示变压器等值容量与理想直流功率之比，比值大小代表了变压器的利用率。

交流变压器的容量分级推荐采用表 14-4-8 所列数值。

									kVA
100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
10000	12500	16000	(20000)	25000	(31500)	40000	(50000)	63000	80000

注 括号内数值不推荐使用。

(5) 在设计和选择交流变压器时，还需要考虑以下因素：

1) 交流变压器短路机会较多，因此变压器绕组和结构应有较大的机械强度。在同等容量下交流变压器体积将比一般电力变压器大些。

2) 晶闸管装置发生过电压机会较多，因此变压器应有较高的绝缘强度。

3) 交流变压器的漏抗可限制短路电流，改善电网侧的电流波形，因此变压器漏抗可略大一些。另外，漏抗增加了换相电抗压降  $\Delta U_{\text{x}}$ ，恶化了功率因数，故不能太大。一般的阻抗电压在 5% ~ 10% 范围内。

4) 为了避免电压畸变和负载不平衡时中点浮动，交流变压器一次和二次绕组中的一个应接成三角形或者附加短路绕组。

(6) 交流变压器的不平衡磁势（《钢铁企业电力设计手册》26.3.1 节）。由于变压器磁化曲线的非线性和整流电路的各种接线，整流变压器存在励磁不平衡磁势、直流不平衡磁势和交流不平衡磁势。

1) 励磁不平衡磁势。励磁不平衡磁势是由于变压器铁芯磁化曲线的非线性产生的，不仅整流变压器有，其他变压器也有。

当变压器的一次侧接成三相星形，其中性点与电网的中性点相连时，若变压器的一次绕

组上加以正弦波电压, 由于变压器铁芯磁化曲线的非线性影响, 将使各相的励磁电流成为非正弦波形, 如图 14-4-22 所示。由图 14-4-22 可见, 这一励磁电流包含有基波分量和三次谐波分量。但是, 由于变压器的中性点与电网的中性点是相连的, 故三次谐波电流可以通过中性线流回。

当变压器初级绕组的中性点与电网的中性点不连接时, 三相中的三次谐波电流就不可能在三相电网中流过, 因此变压器的励磁电流中就不含有三次谐波分量: 不含三次谐波的励磁电流将产生平顶波形的磁通, 该磁通将在每相绕组中感应出尖顶波形的电压, 使电压波形畸变, 其幅值超过正常值的 50%~60%, 这对变压器的绝缘是不利的。为了避免这种现象, 整流变压器的一次绕组一般采用三角形接法, 使励磁电流中的三次谐波分量在三角形绕组中环流, 从而保证二次绕组感应出的电压为正弦波。

2) 交、直流不平衡磁势。由于整流变压器的二次电流均不是正弦波电流, 因此, 它含有直流分量和交流分量。直流分量将产生直流不平衡磁势; 交流分量中的 3、6、9、…次谐波属于零序分量, 将产生交流不平衡磁势。

交、直流不平衡磁势对整流电路的工作影响很大, 在选择整流电路和确定变压器一次绕组的接法时, 必须加以注意。

直流不平衡磁势在整流变压器铁芯中产生方向一致、大小相等的直流磁通, 它不会在绕组中感应出电势, 也不在相邻铁芯中引起发热。当变压器采用三相铁芯时, 三个芯柱中的直流不平衡磁势的大小相等, 方向一致, 因此, 它们所产生的磁通仅能通过空气隙和变压器外壳构成通路。由于这条磁路的磁阻很大, 所以, 通过的磁通很少, 引起变压器铁芯饱和的程度也较弱, 因此, 这种不平衡磁势的影响不大。但当整流变压器由三只单相变压器组成时, 直流不平衡磁势将使铁芯饱和, 造成很大影响, 一般是不允许的。

交流不平衡磁势是由变压器二次电流中的零序分量产生的。当变压器的一次绕组为星形接线时, 交流不平衡磁势会在一次绕组内感应出一个很高的 3 倍于电源频率的电压, 并在相邻铁芯中引起附加损耗, 这在一般情况下是不允许的。但当变压器的一次绕组采用三角形接线时, 零序交流分量可在三角形内环流, 不致出现在线电流上。

(7) 变流变压器绕组接线方式 (《钢铁企业电力设计手册》26.3.5 节)。对于采用多套晶闸管变流装置的供电系统, 为了减少谐波系统, 整流变压器的一、二次绕组通常采用 D/d 及 D/y 两种接线方式交替组合。组合的原则是: 工作制度相同且整流变压器容量相等或接近的传动设备为一组; 一台整流变压器采用 D/d 接线, 另一台整流变压器采用 D/y 接线。

整流变压器的接线组别通常选用 Dd12 及 Dy11。

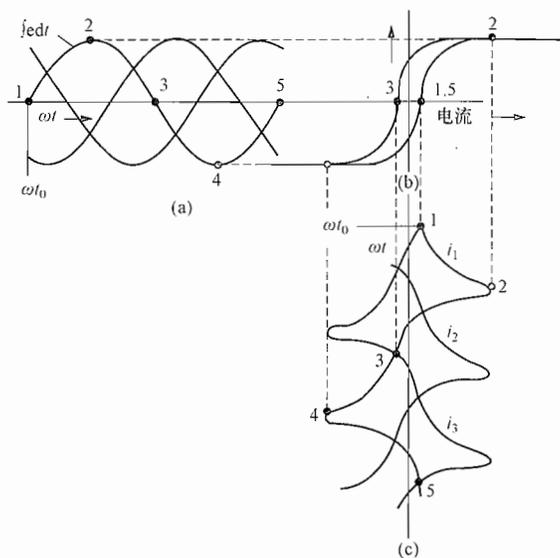


图 14-4-22 变压器初级电压及励磁电流波形  
(a) 一次绕组外加电压波形; (b) 变压器铁芯磁化曲线; (c) 励磁电流波形

常用整流变压器一、二次绕组的接线及其向量关系如图 14-4-23 所示。

### 14.4.2.3.3 交流进线电抗器的选择

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》6.2.2.5节。

对于一般单机传动系统，每台晶闸管变流器可单独用一台变流变压器，以便将交流供电电压变换成变流器所需的交流电压。

若当变流器所需的交流电压与供电电源电压相同或者一台变压器供给多台变流装置使用

时，变流器也可省去变压器。不过这时变流器需经专门设计的交流电抗器接到供电电网上，而且供电电源的额定容量至少是单台传动装置容量的 5~10 倍，其典型主回路如图 14-4-24 所示。通常，在单机容量超过 500kW 时，一般需设有专用变流变压器，单机容量在 500kW 以下的中小容量装置，可以用几台组成一组，由公用变流变压器供电。每台晶闸管变流装置分别通过交流电抗器（ $L_1 \sim L_3$ ）供电。其主要作用除用以限制晶闸管导通时的  $di/dt$  以及限制变流装置发生故障和短路时短路电流上升速率外，还用以改善电源电压波形，消除变流器运转时对电源系统的公害。

电抗器电感量的计算方法，通常考虑当供电公共变压器的短路容量为单台传动装置额定容量的 100 倍以上时，允许采用公共变压器供电，其进线交流电抗器的电感量应满足：当变流器输出额定电流时电抗器绕组上的电压降不低于供电电源额定相电压的 4%。据此，在晶闸管换相期间，由于换相元件将

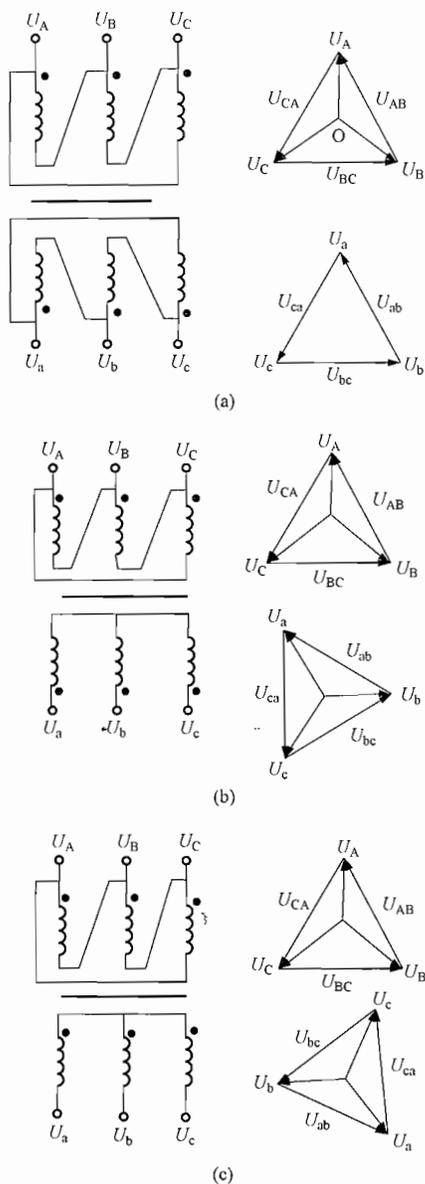


图 14-4-23 常用整流变压器接线及其向量关系  
 (a) Dd11 接线， $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CA}$ 与  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ 、 $U_{ca}$ 同相；  
 (b) Dy11 接线， $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CA}$ 滞后  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ 、 $U_{ca}$   $30^\circ$ ；  
 (c) Dy5 接线， $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CA}$ 超前  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ 、 $U_{ca}$   $150^\circ$

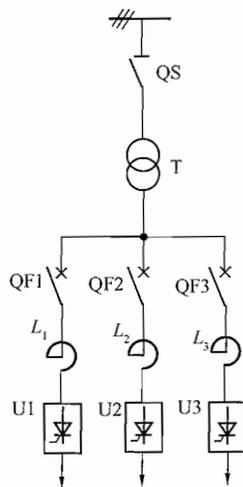


图 14-4-24 公共变压器供电系统

交流电压的相应相短路,造成电源电压换相瞬间出现缺口,在额定输出时,其换相缺口应满足不大于该瞬间电源电压的20%。电感量按式(14-4-10)选取。

交流电抗器的电感量计算公式为

$$L = \frac{0.04U_{V\phi}}{2\pi f \times 0.816I_{dN}} \times 10^3 \quad (14-4-10)$$

式中  $U_{V\phi}$ ——供电电网相电压有效值, V;

$I_{dN}$ ——变流器输出额定电流, A;

$f$ ——电网频率, 1/s。

在设计中推荐采用表14-4-9所列经验数据。

表14-4-9 电抗器设计经验数据

交流输入线电压 $\sqrt{3}U_{V\phi}$ (V)	电抗器额定电压降 $\Delta U_K = 2\pi fL \times 0.816I_{dN}$ (V)	电抗器额定电流 (A)
230	5	$0.816I_{dN}$
380	8.8	$0.816I_{dN}$
460	10	$0.816I_{dN}$

#### 14.4.2.3.4 晶闸管的选择计算

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》6.2.3节。

晶闸管额定电压(反向重复峰值电压 $U_{RRM}$ )的选择,除取决于变流器供电电源的交流电压外,还与变流器换相过程以及正常操作和事故切断电路时可能出现的各类过电压有关。此外,设计时还应根据装置使用场合的重要程度留有足够的安全裕度。器件的额定电流与通过器件的电流波形以及冷却介质情况、散热器材料与外形尺寸等密切相关。选用时除根据传动电动机的负载图计算等效结温外,还必须注意到,晶闸管自身热容量很小,在承受短时的事故及过载电流条件下应不致造成损坏。正确选择晶闸管的额定参数,不仅关系到变流系统设计的经济合理性,亦为正确地使用晶闸管以及变流装置的可靠运转奠定了良好的基础。此外,对于大容量装置,由于受单个晶闸管容量的限制,大多需要由数个器件并联或串联构成。因此,在设计高电压和大容量变流装置时,还应按照实际情况选取合理的均压、均流系数,以及由于结构和环境条件变化而引起的其他折算系数。

(1) 晶闸管额定电压 $U_{RRM}$ 的选择。考虑到晶闸管在恢复阻断时所引起的换相过电压,以及在操作和事故过程中所产生的各类过电压的影响,在计算和选择晶闸管额定电压(反向重复峰值电压 $U_{RRM}$ )时,必须考虑一定的电压安全系数,其数值大小与器件质量及使用场所有关,一般取2~2.5倍。对于三相桥式整流线路,在晶闸管不串联时,推荐选用的额定电压 $U_{RRM}$ 可根据电源进线线电压有效值按表14-4-10选取。

表14-4-10

三相桥式线路晶闸管额定电压推荐表

单位: V

	380	440	500	610	660	750	850	1000
电源进线线电压	380	440	500	610	660	750	850	1000
空载整流电压	513	594	675	824	891	1012	1148	1350
晶闸管额定电压	1350	1500	1650	2000	2200	2500	2800	3200

在有晶闸管串联以及其他整流线路时可按下式选取

$$U_{RRM} \geq (2 \sim 3) \frac{K_{UT} U_{V\phi}}{nK_U}$$

式中  $K_{UT}$ ——电压计算系数（见表 14-4-6）；

$n$ ——器件串联数；

$K_U$ ——均压系数，一般取  $K_U=0.8\sim 0.9$ ；

$U_{V\phi}$ ——电源进线相电压有效值。

(2) 晶闸管通态平均电流  $I_{T(AV)}$  的选择。晶闸管通态平均电流， $I_{T(AV)}$ （额定正向半波平均值）的选择，应该按照所组成装置的最大负载电流、过负载时间、电流波形和所配用的散热器热阻，来计算管芯的最高结温，并使之低于器件所允许的最高结温。用这种方法计算，通常需要掌握较多的器件特性数据，及使用条件下大量的装置试验曲线。精确计算十分繁杂，通常是采用各种近似计算方法。最简便而常用的是按电动机的最大过载电流来选择晶闸管的额定电流， $I_{T(AV)}$ ，并留有 1.0~2.0 的电流储备系数，在整流回路电感足够大，并且整流电流已经连续时，按下式选取。

$$I_{T(AV)} \geq (1.0 \sim 2.0) \frac{K_{IT} I_{dmax}}{K_1 n_p}$$

式中  $K_{IT}$ ——电流计算系数（见表 14-4-6）；

$n_p$ ——晶闸管并联数；

$K_1$ ——均流系数，一般取 0.8~0.9；

$I_{dmax}$ ——最大整流电流值。

#### 14.4.2.3.5 直流回路电抗器的选择和计算

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》6.2.4节。

晶闸管变流器和直流发电机组不同，其所产生的供电电压和电流除直流成分外，同时还包含有谐波；此外在负载电流较小时，还会出现电流断续的现象，造成对变流器特性的不利影响，设计时应予以注意。

由于直流的脉动会使电动机的换向条件恶化，并且增加电动机的铜耗、铁耗及轴电压，因此除需选用变流器供电的特殊系列直流电动机外，通常还采用在直流回路内附加电抗器，以限制电流脉动分量的方法。

在电流断续时，除电动机换向条件恶化，变流器内阻加大，放大倍数大大降低外，同时电动机的电气时间常数也要发生变化。若闭环系统中调节器参数是按电流连续时选择的，那么在轻载时控制性能恶化，除需在闭环控制中采用若干自适应环节外，如电流调节器输出端、叠加变流器断续非线性补偿前馈控制等，也可采用增大回路电感，以免在正常工作范围内出现电流断续等措施。

在有环流系统中（见表 14-4-3）由于存在环流回路，环流经正反向组变流器流通，通常附加电抗器将环流电流限制在一定的数值内。对三相全控桥可逆有环流变流器的主电路，电抗器配置可采用图 14-4-25 所示的方式。在图 14-4-25 (a) 所示线路中，配置 3 台电抗器， $L_1$ 、 $L_2$ 用以抑制环流。当电动机正向运转时，变流器 U1 和  $L_1$  通过负载电流  $I_d$ ，同时允许电抗器  $L_1$  饱和；U2 和  $L_2$  通过环流  $I_K$ ，环流电抗器  $L_2$  不饱和，电抗值  $\omega_K L_2$  抑制环流的大小。在电动机反向运转时，U2 和  $L_2$  通过负载电流， $L_2$  饱和，U1 和  $L_1$  通过环流，其电抗用以限制环流的大小。电枢回路电抗器  $L_3$  用以滤平变流器输出电流的脉动分量，在最大允许过载范围内，电抗器不应饱和。环流电抗  $L_1$ 、 $L_2$  可接通电流时间按 50% 考虑，平波电抗  $L_3$  为长期连续。图 14-4-25 (b) 所示线路配置两台电抗器，兼作抑制环路电流和平波。

这两台电抗器应在最大允许过载范围内不饱和。图 14-4-25 (b) 所示电抗器的视在容量远远超过图 14-4-25 (a) 的情况, 通常不推荐选用。

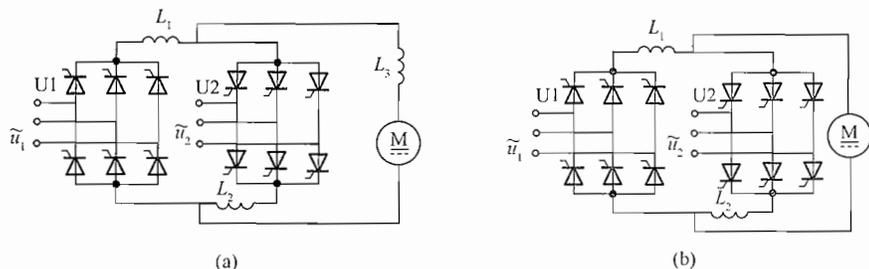


图 14-4-25 有环流可逆变流器主回路电抗器配置图  
(a) 三台电抗器的线路 (其中  $L_1$ 、 $L_2$  允许饱和); (b) 两台不允许饱和的电抗器线路

在无环流可逆变流器系统中, 有时为了抑制事故情况下的短路电流上升率, 以及为了使直流快速断路器在过电流切断瞬间能与快速熔断器保护协调, 在直流回路内也需要附加一定数量的限流电感。通常, 电感量较小并要求在过载短路条件下电抗器不能饱和。因此, 电抗器多用空心形式。随着变流器件和保护元件的不断完善, 直流电动机承受过载和换向性能的不断提高, 变流装置亦可以不采用上述电抗器, 以进一步简化主电路结构和降低费用。

在大功率系统中, 为改善变流器网侧电流波形和减少输出电流脉动, 多采用等效多脉波整流线路, 电抗器用于平衡变流装置中并联部分交流电压的相位差, 形成多脉波整流电压。

设计时, 根据上述各方面的因素分别计算所需要的电抗器的电感值, 然后根据功能选取其中的最大值作为所选电抗器的电感值。

常用直流回路电抗器的参数计算有以下几种:

(1) 电动机电枢电感  $L_M$  和变压器漏感。由于电动机电枢和变压器存在漏感, 因而增大了直流回路的等效电抗, 在设计和计算附加电抗器的电感量时, 应根据等效电路折算后, 从所需的总电感中扣除。

(2) 限制直流脉动率的电感值。从限制直流电流脉动率, 选择附加电抗器的电感值。

(3) 使直流电流连续的电感值。要求变流器在某一最小工作电流  $I_{\min}$  时仍维持电流连续, 计算电抗器的电感值。

(4) 限制均衡电流的电感值。在有环流可逆变流器系数中, 若两组变流器的触发角满足  $\alpha = \beta$ , 计算限制环流回路内均衡电流的电抗器电感值。

(5) 双桥并联平衡电抗器的电感值。在双桥并联的变流器线路中平衡电抗器  $L_1$ 、 $L_2$  用以平衡两组三相整流桥间电压的相位差。计算平衡电抗器的电感值。

(6) 限制故障电流上升率的电感值。在表 14-4-3 所示接线方案中, 快速断路器 QF 用以切除在变流器主回路内产生的故障电流。为了可靠保护电路内的晶闸管, 以及保证在快速断路器切断时不损坏电路内的快速熔断器, 通常直流侧附加一定数值的电感, 限制故障电流的上升率, 以保证在故障电流切断过程中, 晶闸管和快速熔断器内的  $i^2t$  值不超过器件的允许值。

以上常用直流回路电抗器参数的详细计算方法可参考《电气传动自动化技术手册 (第 3 版)》第 6 章 6.2.4 节。

#### 14.4.2.3.6 快速熔断器的选择和计算

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》6.2.5.9节、《钢铁企业电力设计手册》26.6.3.1节。

快速熔断器主要用来切断内部和外部的短路电流，具有快速限制短路电流的作用。当与其他保护设备（如过电流继电器、直流快速开关等）协调使用时，可使晶闸管元件得到可靠保护。

对于三相全控整流桥电路，快速熔断器有相接、臂接和接于整流装置的直流侧三种方式，见图14-4-26。

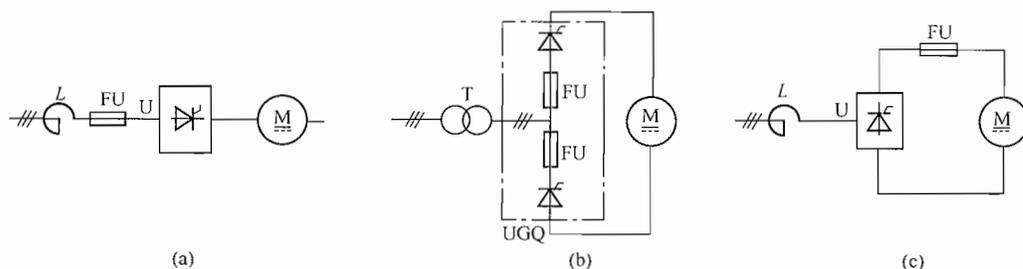


图14-4-26 快速熔断器的几种接法

(a) 相接；(b) 臂接；(c) 接直流侧

当快速熔断器相接时，可以防止因晶闸管损坏或直流侧故障而造成的短路。但由于相接熔断器的电流有效值比桥臂晶闸管的电流有效值大，因此在通过故障电流时，熔断器对晶闸管的保护效果就差些，故多用于中小容量装置。快速熔断器接于直流侧时，可实现负载侧的短路或过电流保护，但对晶闸管本身造成的短路不起保护作用，故多用于小功率装置。通常采用的臂接快速熔断器，其额定电压  $U_{FN}$ 、额定电流  $I_{FN}$  按下式选取，条件允许时还应校验熔断过程的  $I^2t$  值，在大容量系统中还应校验断路器的断流容量。

快速熔断器的额定电压  $U_{FN}$  (V) 应大于线路正常工作时的电压有效值，但考虑电源电压的上波动（一般为 +10%），还应留有适当的裕量，即

$$U_{FN} \geq 1.1U_{VL}$$

式中  $U_{VL}$ ——整流变压器二次线电压有效值。

快速熔断器的额定电流  $I_{FN}$ ，应按由负载图计算出的一个工作周期内的负载电流有效值选取，即

$$I_{FN} \geq 1.3K_1I_{DN}$$

式中  $K_1$ ——电流计算系数，对三相全控桥， $K_1 = 1/\sqrt{3}$ ；

$I_{DN}$ ——负载电流的方均根值。

选择快速熔断器时应考虑：

(1) 由于晶闸管元件的实际工作电流均小于器件本身的额定电流，因此快速熔断器的电流容量  $I_R$  可取为

$$1.57I_{T(AV)} \geq I_R \geq \frac{I_{A(RMS)}}{(n_p K_1)}$$

式中  $I_{T(AV)}$ ——器件通态平均电流；

- $I_R$ ——快速熔断器的额定电流有效值；  
 $I_{A(RMS)}$ ——臂的实际工作电流均方根值；  
 $n_p$ ——并联支路数；  
 $K_1$ ——均流系数。

(2) 电压等级应根据熔断后快速熔断器实际承受的电压来确定。当电压为非正弦波时，按峰值电压选取相应的电压等级，当使用于直流侧时，快速熔断器的电压等级一般应降低 25% ~ 50% 使用。

(3) 快速熔断器的  $I^2t$  值应小于晶闸管元件允许的  $I^2t$  值，即  $[I^2t]_R < [I^2t]_{TA}$ 。

(4) 快速熔断器分断时的电弧电压峰值（即断开过电压）必须小于晶闸管元件允许的反向峰值电压。

(5) 快速熔断器的断流能力必须大于线路可能出现的最大短路电流。

#### 14.4.3 交流电动机的调速

##### 14.4.3.1 交流电动机调速的原理及分类

###### 14.4.3.1.1 交流电动机调速原理

依据：《钢铁企业电力设计手册》25.1.2 节、《电气传动自动化技术手册（第3版）》7.1.2 节。

交流电动机的转速为：

异步电动机

$$n = n_0(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s) \quad (14-4-11)$$

同步电动机

$$n = n_0 = \frac{60f_1}{p}$$

式中  $n$ ——电动机转速，r/min；  
 $n_0$ ——电动机同步转速，r/min；  
 $p$ ——电动机极对数；  
 $s$ ——转差率；  
 $f_1$ ——电源频率，Hz。

因此，交流电动机的调速可以概括为改变极对数，控制电源频率以及通过改变某些参数如定子电压、转子电压等使电机转差率  $s$  发生变化（即电机转速发生变化）等几种方式。

###### 14.4.3.1.2 交流调速系统分类

交流调速系统有多种分类方法：

- (1) 按调速方法分：变  $f$ 、变  $p$ 、变  $s$ 。
- (2) 按调速效率分：高效、低效。

高效调速方案	{	变极数控制		
		{	变频变压控制	电流型
				电压型
			脉宽调制型	
			无换向器电机控制	
		串级（双馈）控制		

低效调速方案 { 转子串电阻  
(包括电阻斩波) 控制  
液力耦合器控制  
电磁转差离合器控制  
定子变压控制

(3) 按调速平滑性分: 有级、无级。

(4) 按调速装置所在位置分: 定子侧、转子侧、转子轴上。

(5) 按使用的电动机分: 异步电动机有笼形异步电动机、绕线转子异步电动机; 同步电动机有励磁同步电动机、永磁同步电动机、无刷直流电动机、开关磁阻电动机。

(6) 常用调速系统:

1) 有级调速:

a. 变极对数——变  $p$ , 高效, 定子侧, 异步电动机。

b. 转子串电阻——变  $s$ , 低效, 转子侧, 绕线转子异步电动机。

2) 无级调速:

a. 定子侧: 定子调压——变  $s$ , 低效, 异步电动机。

定子变频——变  $f$ , 高效, 异步电动机或同步电动机。

b. 转子侧: 串级调速 (向下调) ——变  $s$ , 高效, 绕线转子异步电动机。

双馈调速 (上下调) ——调  $s$ , 高效, 绕线转子异步电动机。

c. 转子轴上: 液力耦合器——调  $s$ , 低效, 异步电动机或同步电动机。

电磁转差离合器——调  $s$ , 低效, 异步电动机或同步电动机。

#### 14.4.3.1.3 交流电动机调速方案分类与比较交流电动机调速方案分类 (见表 14-4-11)

表 14-4-11

交流电动机调速方案分类

交流电动机种类	交流电动机调速方案		
异步电动机 $n = \frac{60f_1}{p} (1-s)$	变换极对数 $p$ 调速 (仅适用于笼型异步电动机)		
	改变频率 $f$ 调速	交-直-交变频 (包括 VVVF 与 PWM 型)	
		交-交变频	
	变转差率 $s$ 调速	调定子供电电压	定子外接电抗器 晶闸管交流调压
		调节转子电阻 (仅适用于绕线型电动机)	电阻有级切换 电阻斩波控制
		串级调速 (双馈调速) (仅适用于绕线型电机)	低同步串级 { 普通串级 内反馈串级
超同步串级			
离合器调速	电磁转差离合器		
	调速型液力耦合器		
同步电动机 $n = \frac{60f_1}{p}$	它控式		
	自控式 (无换向器电机)		

常用交流调速方案比较见表 14-4-12。

常用交流调速方案比较

调速方法	电动机类型	控制方法	调速比	特点	应用范围				
变频 $f$	变极电动机	用接触器切换, 改变定子绕组接线, 可获得二~四种成倍数的不同转速	2:1~4:1	简单, 有级调速, 恒转矩或恒功率, 转速变化率小	适用于需要分级调速的机械, 如小型转炉的吹氧管卷扬机及给料机				
变频 $f$	同步电动机或笼型异步电动机	协调控制电动机定子频率和电压以调节电动机的转速	10:1或更大	恒转矩, 无级调速, 可逆或不可逆, 效率高, 系统较复杂, 价格较高, 转速变化率小	适用于轧道; 高速传动、小功率同步协调运转等机械, 如热轧车间成品辊道等				
	自同步控制变频调速(无换向器电动机)	调节电枢电压 $U$ 以实现同步电动机自控式变频调速的目的	10:1或更大	恒转矩, 无级调速, 可逆或不可逆, 效率高, 系统复杂, 价格较高, 转速变化率小	恶劣环境场合, 高速传动, 如轧机、高炉鼓风机、大型同步电动机的起动装置等				
变频 $f$	绕组型异步电动机	在转子回路中通以可控直流比较电压 $U_c$ , 以改变电动机的转差率, 达到平滑调速的目的	2:1~4:1	不可逆, 无级调速效率高, 功率因数低, 电机串级为恒功率, 其他为恒转矩, 如将硅整流器改为晶闸管可实现超同步运行, 低速时转速变化率大	用于风机、泵、中大功率的压缩机等, 装置容量随调速比的加大而增大, 调速比不宜太大				
						具有双定子绕组的绕组型异步电动机	1.6:1~2.0:1	不可逆, 无级调速, 系统简单, 效率高, 功率因数高, 恒功率调速, 设备少, 价格低, 定子电流中谐波分量小	适用于风机、水泵调速节能
							用接触器分段控制转子回路电阻 转子回路电阻斩波控制, 等效改变电阻	1.5:1	简单, 价廉, 有级调速, 特性软, 效率低, 转速变化率大
变参数改变转差率 $s$	转子串接电阻								

表 14-4-12

续表

调速方法	电动机类型	控制方法	调速比	特点	应用范围
定子调压	绕线型或笼型异步电动机	用晶闸管相控或饱和电阻器改变电动机的定子电压从而达到调速	3:1 ~ 10:1 (转速闭环)	恒转矩无级调速,效率随转速降低而成比例下降。转速变化率大	用于要求平滑启动、短时低速运行的机械,如起重机械、泵、风机、电弧炉电极提升机械等
转差离合器	电磁调速异步电动机	调节离合器的励磁以实现传动机械的调速	5:1 ~ 10:1 (转速闭环)	恒转矩,无级调速,不能电气制动,效率随转速降低而成比例下降,闭环控制时转速变化率小	适用于中、小功率要求平滑启动、短时低速运行的机械
调速型液力耦合器	绕线型或笼型异步电动机	调节液力耦合器工作腔里的油量实现传动机械的调速	3:1 ~ 5:1	平滑启动,无级调速,效率随转速降低而成比例下降	适用于大、中功率风机、泵等要求长期运转,短时低速运行的机械
转子接入交-交变频器	绕线型异步电动机	将转子电流和电压矢量变换到磁链定向的坐标进行矢量控制,实现双馈变频调速	1.6:1	不可逆,无级调速,可在电动机同步转速的(1.1~0.7) $n_0$ 之间调速,效率高,动态性能好,功率因数可调,造价低	适用于中小型轧机技术改造

能耗转差调节  
变参数改变转差率

双馈变频调速

#### 14.4.3.1.4 变频调速的原理、特性和分类

依据：《钢铁企业电力设计手册》25.5.1节。

变频调速是一种高效率、高性能的调速方式，采用异步电动机（或同步机），使其在整个工作范围内保持在正常的小转差率下运转，实现无级平滑调速。

(1) 变频调速的原理及机械特性。由式(14-4-11)可知，当转差率 $s$ 不变时，交流电动机的转速与电源频率成正比变化。

如果忽略定子压降的影响，异步电动机的定子电压满足下面的关系式

$$U_1 \approx E_1 = K_e f_1 \Phi_m \quad (14-4-12)$$

电动机的电磁转矩 $M$  (N·m)、最大转矩 $M_m$  (N·m) 及电磁功率 $P$  (kW) 为

$$M = K_m \Phi_m I_2 \cos\varphi_2 \quad (14-4-13)$$

$$M_m = \frac{pm_1 U_1^2}{4\pi f_1 (r_1 + \sqrt{r_1^2 + X_k^2})} \quad (14-4-14)$$

$$P = \frac{Mn}{9550} \quad (14-4-15)$$

式中  $E_1$ ——定子感应电势，V；

$K_e$ ——电势常数；

$f_1$ ——定子电源频率，Hz；

$\Phi_m$ ——主磁通的最大值；

$K_m$ ——电机的转矩常数；

$I_2$ ——转子电流，A；

$\cos\varphi_2$ ——转子功率因数；

$p$ ——定子的极对数；

$m_1$ ——定子的相数；

$r_1$ ——定子绕组的电阻， $\Omega$ ；

$X_k$ ——电机短路电抗， $\Omega$ ；

$n$ ——电动机转速，r/min。

异步电动机变频调速，当频率较高时，由于 $X_k \gg r_1$ ，故式(14-4-14)中 $r_1$ 的影响可忽略，电动机电源电压 $U_1$ ，定子电源频率 $f_1$ 与最大转矩 $M_m$ 的变化满足下面的关系式

$$\frac{U_1}{f_1 \sqrt{M_m}} = \text{常数} \quad (14-4-16)$$

当频率较低时， $r_1 \gg X_k$ ，忽略 $X_k$ 的影响，则由式(14-4-14)可得

$$\frac{U_1^2}{f_1 M_m} = \text{常数} \quad (14-4-17)$$

异步电动机从基速向下调速时，为了不使磁通增加，通常采用 $U/f = \text{常数}$ 的控制方式。由式(14-4-12)可知，在调速过程中电机磁通可基本保持不变，考虑到定子电阻压降的影响，低频时电动机磁通实际将略有减小，由式(14-4-16)、式(14-4-17)

可知最大转矩  $M_m$  也将随频率的降低而减小。异步电动机采用压频比为常数控制时的机械特性，见图 14-4-27。

为了能在低速时输出最大转矩不变，应采用  $E_1/f_1 = \text{常数}$  的协调控制。由式（14-4-12）可知，这时电动机磁通保持恒定，因此异步电动机的效率、功率因数、最大转矩倍数均保持不变。但由于感应电势  $E_1$  难以测量和控制，故在实际应用中，一般可在控制回路中加入一个函数发生器控制环节，以补偿低频时定子电阻所引起的电压降，使电动机在低频时仍能近似保持恒磁通。

图 14-4-28 为函数发生器的各种补偿特性。图 14-4-29 为电压补偿后的恒转矩变频调速特性曲线。图 14-4-30 为异步电动机在不同频率时的调速特性曲线。

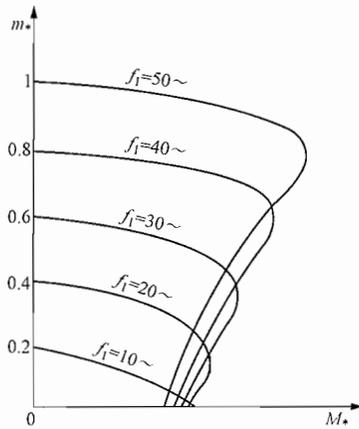


图 14-4-27  $U_1/f_1 = \text{常数}$  时变频调速机械特性

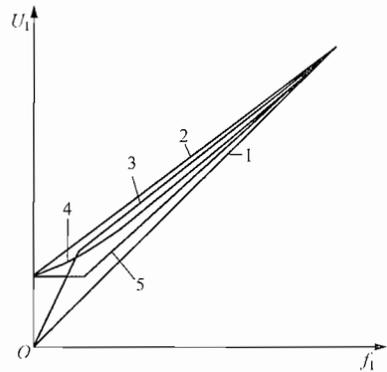


图 14-4-28 恒磁通变频调速时的补偿特性  
1—无补偿时  $U_1$  与  $f_1$  的关系；  
2~5—有补偿时各种  $U_1$  与  $f_1$  的关系

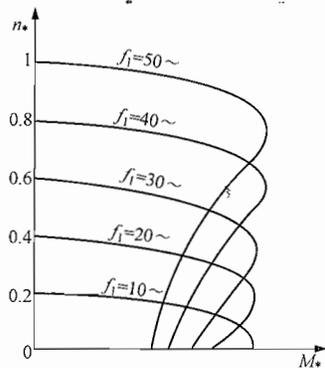


图 14-4-29 补偿后的恒  $M_m$  变频调速的机械特性

电动机在额定转速以上运转时，定子频率将大于额定频率，但由于电动机绕组本身不允许耐受过高的电压，电动机电压必须限制在允许值范围内，这样就不能再升高电压采用  $U_1/f_1$  或  $E_1/f_1$  协调控制方式了。在这种情况下可以采取恒功率变频调速。由式（14-4-12）~式（14-4-15）可得

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1 P}} = \text{常数}$$

如果要求恒功率调速运行，必须使  $U_1/\sqrt{f_1} = \text{常数}$ ，即在频率升高时，要求电压升高相对少些。实际上在额定转速以上调速时，由于电动机定子电压受额定电压的限制，因此升高频率时，磁通减少，转矩也减少，可以得到近似恒定功率

调速。

(2) 变频器的分类与比较。变频器按其结构型式可分为交-交变频器和交-直-交变频器，交-直-交变频器又有电压型和电流型两大类。

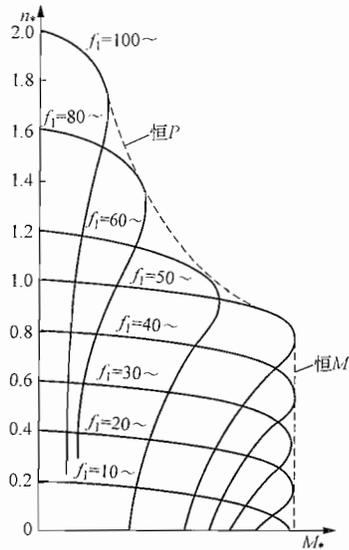


图 14-4-30 异步电动机在不同频率时的调速特性曲线

交-直-交变频器先将电网的工频交流电整流成直流电,再将此直流电逆变成频率可调的交流。因此又称为间接变频器,如图 14-4-31 所示。调频功能由逆变器实现,调压功能视其实现环节不同,又对应有不同的结构形式。

交-交变频器是将电网的工频交流电直接变成电压和频率都可调的交流电,无需中间直流环节,故又称为直接变频器,如图 14-4-32 所示。

交-直-交变频器与交-交变频器主要特点比较,见表 14-4-13。

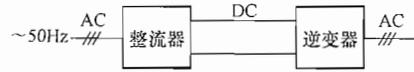


图 14-4-31 交-直-交变频器



图 14-4-32 交-交变频器

表 14-4-13 交-交变频器与交-直-交变频器主要特点比较

比较内容	变频器类型	
	交-交变频器(电压型)	交-直-交变频器
换能方式	一次换能,效率较高	二次换能,效率略低
换流方式	电源电压换流	强迫换流或负载换流
元件数量	较多	较少
元件利用率	较低	较高
调频范围	输出最高频率为电源频率的 $1/3 \sim 1/2$ <sup>①</sup>	频率调节范围宽
电源功率因数	较低	如用可控整流桥调压,则低频低压时功率因数较低,如用斩波器或是 PWM 方式调压,则功率因数高
适用场合	低速大功率传动	各种传动装置,稳频稳压电源和不间断电源

① 指一般的采用电源电压换流的交-交变频器。

交-直-交变频器按其电源性质又分为电压型变频器和电流型变频器。

电流型变频器主电路的典型构成方式如图 14-4-33 所示。其特点是中间直流环节采用大电感作为储能环节,无功功率将由该电感来缓冲。由于电感的作用,直流电流  $I_d$  趋于平稳,电动机的电流波形为方波或阶梯波,电压波形接近于正弦波。直流电源的内阻较大,近似于电流源,故称为电流源型变频器或电流型变频器。

电流型变频器的一个较突出的优点是,当电动机处于再生发电状态时,回馈到直流侧的再生电能可以方便地回馈到交流电网,不需在主电路内附加任何设备,只要利用网侧的不可逆变流器改变其输出电压极性(控制角  $\alpha > 90^\circ$ )即可。

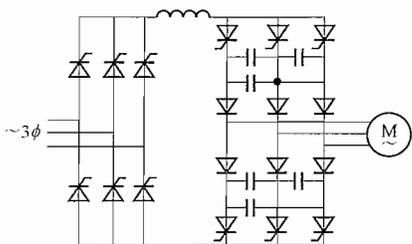


图 14-4-33 电流型变频器的主电路

VD1 ~ VD6 称为回馈二极管。

这种变频器大多数情况下采用 6 脉波运行方式，晶闸管在一周期内导通 180°，属 180°导电型。该电路的特点是，中间直流环节的储能元件采用大电容，负载的无功功率将由它来缓冲。由于大电容的作用，主电路直流电压  $E_d$  比较平稳，电动机端的电压为方波或阶梯波。直流电源内阻比较小，相当于电压源，故称为电压源型变频器或电压型变频器。

对负载电动机而言，变频器是一个交流电压源，在不超过容量限度的情况下，可以驱动多台电动机并联运行，具有不选择负载的通用性。

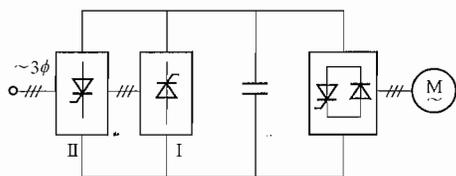


图 14-4-35 再生能量回馈型电压型变频器

这种电流型变频器可用于频繁急加减速的大容量电动机传动。在大容量风机、泵类节能调速中也有应用。

电压型变频器典型的一种主电路结构形式如图 14-4-34 所示，其中用于逆变器晶闸管的换相电路未画出。图中逆变器的每个导电臂均由一个可控开关器件和一个不控器件（二极管）反并联组成。晶闸管 VT1 ~ VT6 称为主开关器件，

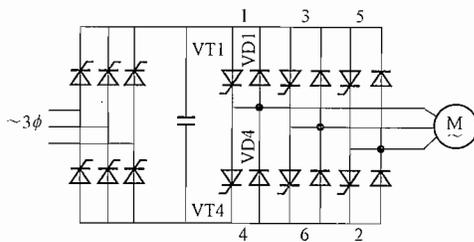


图 14-4-34 电压型变频器的主电路

缺点是电动机处于再生发电状态时，回馈到直流侧的无功能量难于回馈给交流电网。要实现这部分能量向电网的回馈，必须采用可逆变流器。如图 14-4-35 所示，网侧变流器采用两套全控整流器反并联。电动时由桥 I 供电，回馈时电桥作有源逆变运行（ $\alpha > 90^\circ$ ），将再生能量回馈给电网。

电流型与电压型交-直-交变频器主要特点比较见表 14-4-14。

表 14-4-14 电流型与电压型交-直-交变频器主要特点比较

比较内容	变频器类型	
	电流型	电压型
直流滤波环节	电抗器	电容器
输出电压波形 <sup>①</sup>	取决于负载，当为异步电动机时，近似正弦形	矩形
输出电流波形 <sup>①</sup>	矩形	取决于逆变器电压与负载电动机电势，有较大的谐波分量
输出动态阻抗	大	小

续表

比较内容	变频器类型	
	电流型	电压型
再生制动	方便, 主回路不需附加设备	需要在电源侧设置反并联逆变器
其他	(1) 可用普通晶闸管, 但对耐压要求较高。 (2) 有电流环控制, 即使负载短路, 仍可运行。能适应电动机堵转工作状态	(1) 需要快速晶闸管或自关断器件, 关断时间短, 电压变化率高, 但对耐压要求较低。 (2) 输出过载或短路时, 保护随之动作, 停止运行
适用范围	单机, 不频繁切换的多机传动	多机传动, 稳频稳压电源及不间断电源

① 均指简单的三相桥式逆变器, 既不用 PWM, 也不用多重叠加。

### 14.4.3.2 有级调速

#### 14.4.3.2.1 变极对数调速

依据:《钢铁企业电力设计手册》25.2.2节。

改变电动机定子绕组的接线来改变磁极对数而实现的调速只能是有级的, 且级差较大, 仅适用要求几种特定速度的生产机械, 应用受到限制。变极与调压相结合的变极调压调速, 变极与电磁转差离合器相结合的变极电磁调速异步电动机调速的出现, 可以得到既简单又能在相当范围内平滑调速的调速系统, 且转差功率损失少、效率高。

变更极对数的方法有:

(1) 在定子上设置单一绕组, 改变其不同的接线组合, 这种方法常用于 2:1、3:2、4:3 的双速电动机。

(2) 在定子上设置两套不同极数的独立绕组, 这种方法用于 4:3、6:5 等双速电动机。

(3) 在定子上设置两套不同极对数的独立绕组, 而且每个独立绕组又有不同的接线组合, 得到不同的极对数, 这种方法用于三速或四速电动机。

图 14-4-36 示出单绕组双速电动机的接线方法。图 14-4-37 为双绕组三速电动机接线方法, 图 14-4-38 为四速电动机接线方法。

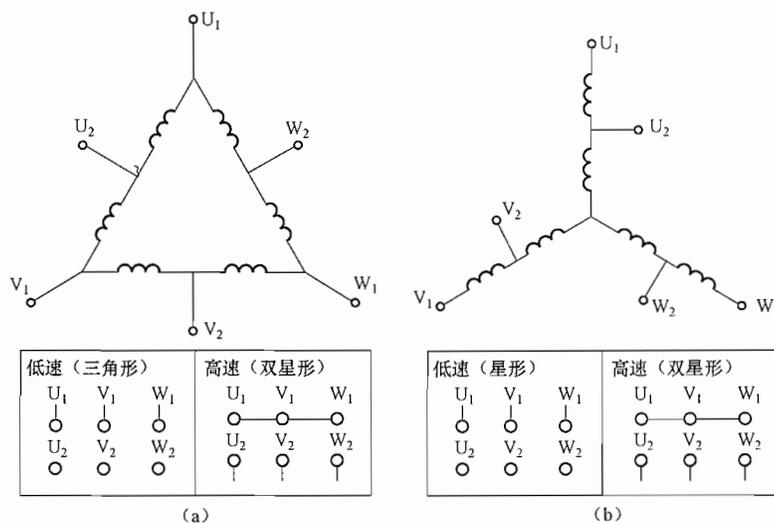


图 14-4-36 双速电动机接线方法

(a) 三角形/双星形接法; (b) 星形/双星形接法

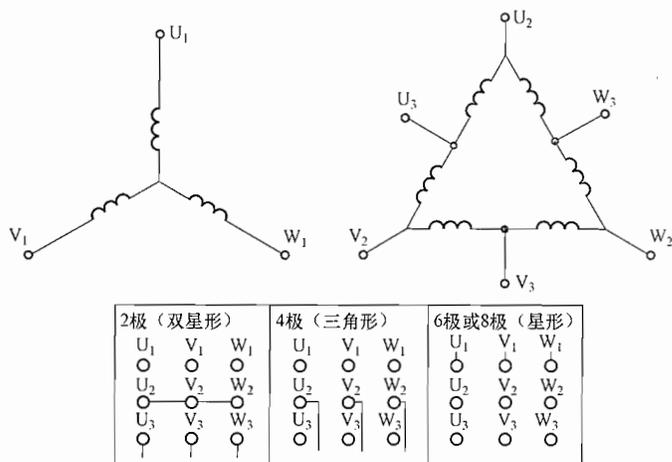


图 14-4-37 三速电动机接线方法

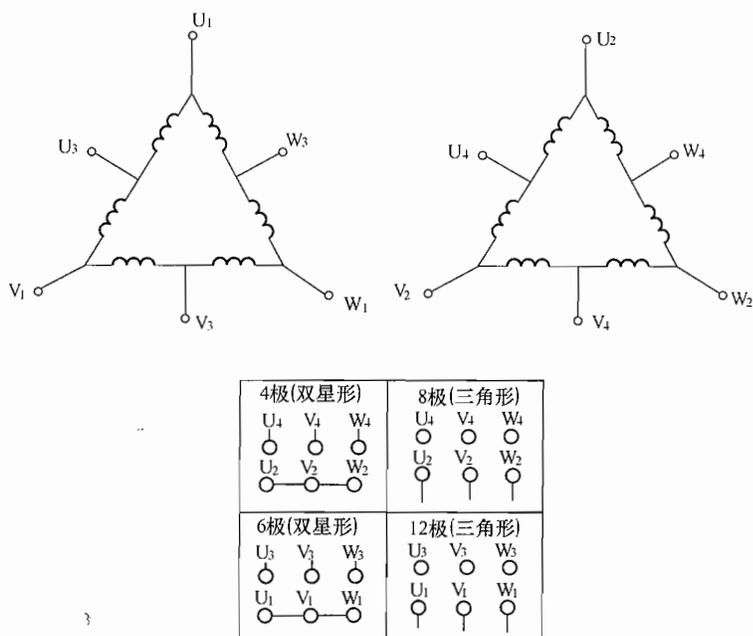


图 14-4-38 四速电动机接线方法

#### 14.4.3.2.2 转子串电阻调速

依据：《钢铁企业电力设计手册》25.2.1节。

绕线型异步电动机转子回路串接电阻，除用以限制起动电流同时可用以调节其转速。当忽略转子回路的电感时，电动机的额定转差率表达式为

$$s_N = \frac{\sqrt{3}I_{2N}R_2}{U_{2N}}$$

式中  $s_N$ ——电动机的额定转差率；

$I_{2N}$ ——电动机转子额定电流，A；

$U_{2N}$ ——电动机转子额定电压, V;

$R_2$ ——电动机转子电阻,  $\Omega$ 。

由上式可知, 转差率与电动机的转子电阻有关, 转子电阻增加时转差率也增加, 电动机的转速下降; 反之电动机的转速增加。

异步电动机转子串电阻时的机械特性见图 14-4-39, 其中  $R_1 < R_2 < R_3$ 。由图中可以看出, 异步电动机转子串电阻具有以下特点:

(1) 转子串电阻时, 同步转速  $n_0$  不变, 最大转矩  $T_m$  也不变。

(2) 最大转矩对应的转差率  $s_m$  与转子电阻  $r_2 + R$  成正比, 即转子串接电阻越大, 则机械特性越软。

控制转子回路电阻一般采用交流低压电控设备切除转子回路外接电阻, 也可采用斩波器控制转子回路等效电阻。

异步电动机转子串电阻调速在性能上类似于定子调压调速, 也是通过改变转差率而达到速度调节的效果, 同时调速时由于定子电压不变, 所以电机的主磁通维持不变。当保持转子电流为额定值时, 调速前后转矩保持不变, 属恒转矩调速。

转子串电阻调速的优点是设备和线路简单, 投资不高, 但其机械特性较软, 调速范围受到一定限制, 且低速时转差功率损耗较大, 效率低, 经济性差。目前, 转子串电阻调速只用在一些调速要求不高的场合。由于它的起动转矩大, 主要用于起重机械中。

#### 14.4.3.3 定子侧交流调速系统

##### 14.4.3.3.1 定子调压调速

依据: 《电气传动自动化技术手册 (第3版)》7.3.1节、《钢铁企业电力设计手册》25.2.3节。

定子调压调速系统是一种通过改变定子电压幅值 (频率不变), 实现电动机转速调节的调速系统。

(1) 定子调压调速特性。异步电动机的电磁转矩为

$$T = \frac{m_s}{\omega_0} \cdot \frac{U_s^2 \frac{r_r}{s}}{\left(r_s + \frac{r_r}{s}\right)^2 + (x_s + x_r)^2}$$

式中  $U_s$ ——定子电压幅值;

$r_s$  和  $x_s$ ——定子电阻和漏抗;

$r_r$  和  $x_r$ ——折算到定子侧的转子电阻和漏抗;

$\omega_0$  和  $s$ ——同步机械角速度和转差率。

当电源频率、异步电动机参数不变、转差率  $s$  一定时,  $T$  正比于  $U_s^2$ , 对应不同的定子电压, 可以得到一组不同的人为机械特性。如图 14-4-40 所示, 与负载  $T_1$  相交的 a、b、c 的不同转速, 可以稳定工作。所以, 改变异步电机的定子供电电压  $U_s$  大小, 可实现调速。

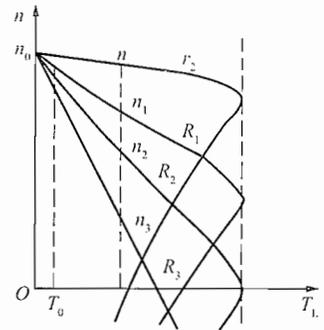


图 14-4-39 绕线式异步电动机转子串电阻调速的机械特性

普通笼形异步电动机机械特性工作段的  $s$  很小，对恒转矩负载而言，调速范围很小，见图 14-4-40。但对于风机和泵类机械，由于负载转矩  $T_L = kn^2$ ，即与转速二次方成比例，采用调压调速可以得到较宽的调速范围，见图 14-4-41，在 a、b 和 c 三点都能稳定工作。

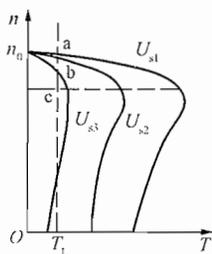


图 14-4-40 不同的  $U_s$  的机械特性

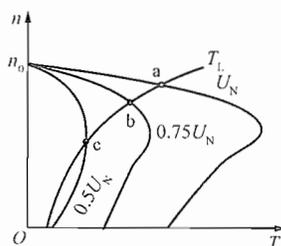


图 14-4-41 风机、泵类负载调压调速特性

要扩大恒转矩负载的调速范围，常用高阻转子电动机或转子外接电阻（或频敏变阻器）的绕线转子异步电动机。高阻转子电动机（如力矩电动机）的调压调速特性见图 14-4-42。低速工作时，特性很软，工作不易稳定，负载和电压稍有波动，会引起转速很大变化。为提高调速硬度，减小转速波动，宜采用转速闭环控制系统，其原理图见图 14-4-43 (a)，闭环控制特性见图 14-4-43 (b)。假设系统原来工作于 a 点：开环工作时，若负载由  $T_{L1}$  变到  $T_{L2}$ ，由于  $U_s$  不变，工作点将由 a 点沿同一机械特性曲线移到 b 点，转速变化很大；闭环工作时，负载由  $T_{L1}$  变到  $T_{L2}$ ，在速度调节器 ASR 的作用下，转速下降使  $U_s$  增大，工作点将由 a 移至 c，转速变化减小，调速范围可达 1:10。

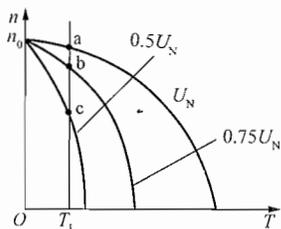


图 14-4-42 高阻转子电动机  
调压调速特性

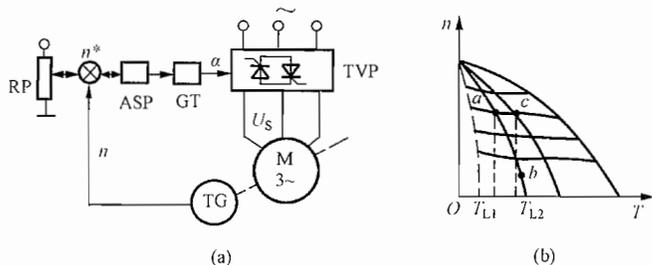


图 14-4-43 有转速闭环的调压调速特性

(a) 原理图；(b) 闭环控制特性

TVR—晶闸管调压器；ASR—速度调节器；GT—触发器；

RP—给定电位器；TG—测速发电机

(2) 晶闸管交流调压器（《电气传动自动化技术手册（第3版）》7.2.2节、《钢铁企业电力设计手册》下册25.2.3.1节）。晶闸管交流调压器接于交流电源和电动机之间，通过改变电动机输入电压来改变电动机的机械特性，实现调速。交流调压器的工作原理基于晶闸管移相控制，几种可能的三相交流调压电路及某一相负载上的输出电压波形见图 14-4-44。

图 14-4-44 (a) 为带零线的三相调压电路，最大移相范围为  $180^\circ$ ，三相对称。输出电流中存在奇次谐波， $\alpha = 90^\circ$  时三次谐波电流最大，且流过中线，形成零序电流，不仅加大损耗，而且造成三相电网电压畸变，较少使用。

图 14-4-44 (b) 为不带零线的三相调压电路，最大移相范围  $150^\circ$ ，三相对称。虽有

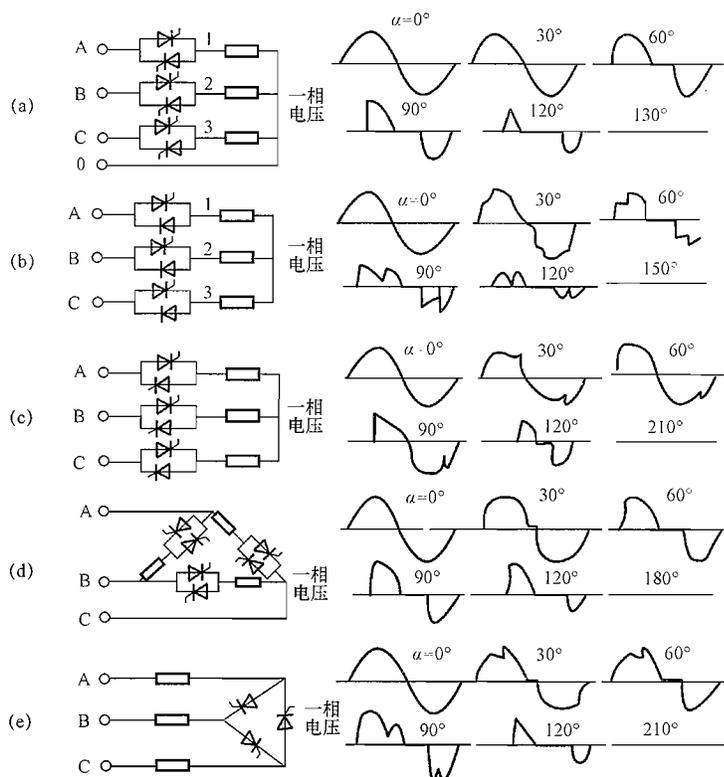


图 14-4-44 常用三相交流调压电路及某一相输出电压波形

三次谐波电压，但无通路，无三次谐波电流，需用宽脉冲或双脉冲。

图 14-4-44 (c) 为半控调压电路，每相只有一个晶闸管和一个整流二极管，设备简单，但正、负半周电压、电流不对称，造成谐波电流中有奇次，也有偶次，产生与基波转矩相反的负转矩；使电动机输出转矩减小，效率降低，仅在小功率电动机中使用。

图 14-4-44 (d) 为晶闸管与负载接成内三角形的三相调压电路，其原理与图 14-4-44 (a) 相似，但同样负载容量时，流过晶闸管的电流比图 14-4-44 (a) 小，承受的电压高，存在三次谐波电流，且需电动机引出六个接线端，很少使用。

图 14-4-44 (e) 使用器件最少，电路最简单，属于不对称控制，负载上有偶次谐波，电动机输出转矩降低，影响效率，仅用于小功率电动机中。电动机中点要打开，且只能接成星形。

比较而言，图 14-4-44 中的 (b) 和 (e) 使用较多。

(3) 功率损耗分析（《电气传动自动化技术手册（第3版）》7.3.1.2节、《钢铁企业电力设计手册》下册25.2.3.3节）。

1) 转差功率损耗系数。异步电动机调压调速系统是一种低效调速系统，随转速降低，转差率加大，大量转差功率消耗在电动机转子电阻或外加电阻（或频敏变阻器）上，究竟消耗了多少转差功率是决定这类调速工作性能的重要因素。分析表明，转差功率损耗与调速范围及负载性质有密切关系。

在采用相对值计算及忽略定子电阻，定、转子漏抗条件下：  
转差功率

$$\Delta p \approx e_r i_r \quad (14-4-18)$$

## 转子电流

$$i_r \approx T_L = n^\alpha \quad (14-4-19)$$

式中  $e_r$ 、 $i_r$ 、 $T_L$  和  $n$ ——转子电动势、转子电流、负载转矩和转速相对值；

$\alpha$ ——代表负载性质的指数， $\alpha=0$  表示恒转矩负载； $\alpha=1$  表示负载转矩与转速成比例； $\alpha=2$  表示负载转矩与转速二次方成比例（风机、泵类负载）。

转子电动势相对值  $e_r$  的基值是转差率  $s=1$ （转子不转）时的转子电动势  $E_{r0}$ ，所以  $e_r = s$ ；转速相对值  $n$  的基值是理想空载转速，所以  $n = (1-s)$ 。把上述关系代入式（14-4-18）和式（14-4-19），则转差功率为

$$\Delta p = s(1-s)^\alpha$$

转差功率相对值  $\Delta p$  的基值是  $P_{r, \max} = E_{r0} I_{rN} \approx P_N$ （电动机额定功率），所以它又称为转差功率损耗系数，式中  $I_{rN}$  为转子额定电流。

不同负载特性（不同  $\alpha$  值）时的  $\Delta p$  曲线见图 14-4-45。由曲线可看出，在  $\alpha=2$  时，电动机的转差功率损耗系数最小，所以调压调速较适合于风机、泵类负载，对于恒转矩负载则不宜长期低速工作。

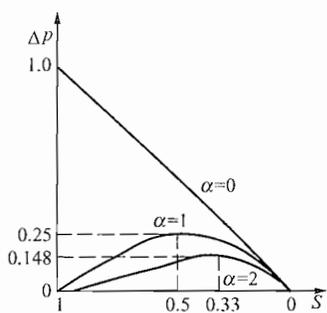


图 14-4-45 不同负载性质的  $\Delta p$  曲线

b) 谐波对电动机运行的影响。晶闸管调压控制装置采用相位控制，输出电压、电流都是非正弦波，引起高次谐波

电流，影响电机输出功率，其主要原因为：

- 高次谐波使电动机损耗增加，对于中型电动机效率下降 2% 左右。
- 由于感抗值与频率成比例变化，谐波电流存在，使电动机的总电抗变大，降低了功率因数，影响转矩输出。
- 5 次与 7 次谐波电流产生的脉动转矩会使电动机转速不均匀，影响电机正常工作。

在使用晶闸管调压调速时，考虑谐波影响，电动机需适当增加容量，在  $s=0.33$  时，增加的百分比如下：

调压器电路	增加值
三相 Y 连接，见图 14-4-44 (b)	8%
三相 YN 连接，见图 14-4-44 (a)	14%
三相不对称 Y 连接，见图 14-4-44 (c)	38.2%
零点 $\Delta$ 连接，见图 14-4-44 (e)	43.4%

(4) 调压调速的优缺点及使用范围。

调压调速的主要优点是简单、便宜、使用维修方便；主要缺点是转差功率损耗高，效率低，谐波大。在一些容量不大、调速范围不宽、精度要求不高（一般为 3%）、连续工作时间不长的设备中可以采用调压调速，例如起重机械、风机和泵类机械等。

#### 14.4.3.3.2 交-交变频调速系统

依据：《电气传动自动化技术手册（第 3 版）》7.3.2 节、《钢铁企业电力设计手册》下册 25.5.4 节。

交-交变频调速系统是一种不经过中间直流环节，直接将较高固定频率的电压变换为频

率较低而可变的输出电压的变频调速系统。交-交变频器又称周期变换器 (cycle converter), 是采用晶闸管作为开关元件, 借助电源电压进行换流, 因此通常其输出频率只能在电源频率的  $1/3 \sim 1/2$  及以下。这种系统特别适合于大容量的低速传动装置。

### (1) 交-交变频器原理。

1) 单相输出交-交变频器原理。单相输出交-交变频器见图 14-4-46。它实质上是一套三相桥式无环流反并联的可逆整流装置, 只是其触发移相控制信号  $u_{ST}$  是幅值和频率可变的交流信号, 相应的整流输出电压也是幅值和频率可变的交流电压, 以实现变频。装置中晶闸管的关断通过电源交流电压的自然换相来实现。这种变频器无中间直流环节, 故称为交-交直接变频器。

输出端接感性负载的交-交变频器的输出电压和电流波形见图 14-4-47。一个周期的波形可以分为 6 段:

- $u_o > 0, i_o < 0$ , 变流器工作于第 II 象限, 反向组逆变。
- 电流过零, 无环流“死时”。
- $u_o > 0, i_o > 0$ , 变流器工作于第 I 象限, 正向组整流。
- $u_o < 0, i_o > 0$ , 变流器工作于第 IV 象限, 正向组逆变。
- 电流过零, 无环流“死时”。
- $u_o < 0, i_o < 0$ , 变流器工作于第 III 象限, 反向组整流。

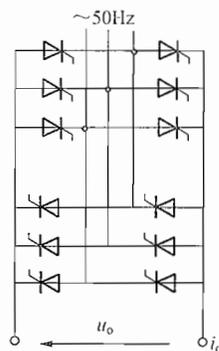


图 14-4-46 单相输出交-交变频器

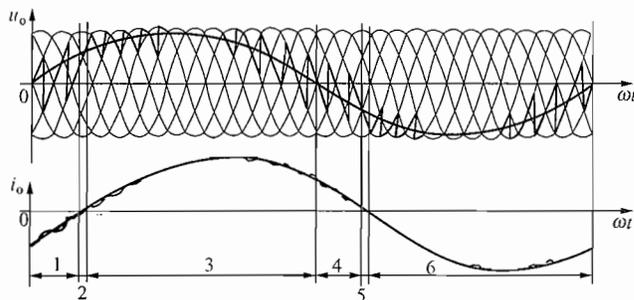


图 14-4-47 交-交变频器输出电压、电流波形

如果输出电压、电流之间的相位差  $\varphi < 90^\circ$ , 能量从电网流向负载; 如果  $\varphi > 90^\circ$ , 能量从负载流向电网, 负载电动机可以四象限工作。在每一个输出周期中, 有两次电流过零, 存在两个无环流死区时间 (简称为“死时”), “死时”的长短对输出波形影响很大, 若最高输出频率为 20Hz, 一个周期长 50ms, 要求每个死时小于 2ms。

2) 三相输出交-交变频器原理。三相输出交-交变频器由输出电压彼此差  $120^\circ$  的三套单相输出交-交变频器组成。主电路有两种接线方式: 公共交流母线方式和输出 Y 连接方式, 见图 14-4-48 和图 14-4-49。

输出 Y 连接的三相输出交-交变频器有两个特点:

- 触发脉冲需大于  $30^\circ$ 。由于变频器输出中性点不与负载中性点相连接, 所以至少要有两个桥、四个晶闸管同时有触发脉冲才能建立电流, 为此要求触发脉冲为双脉冲, 且宽度大于  $30^\circ$ 。
- 可利用直流偏置和 (或) 交流偏置技术提高装置出力及改善电网侧功率因数。

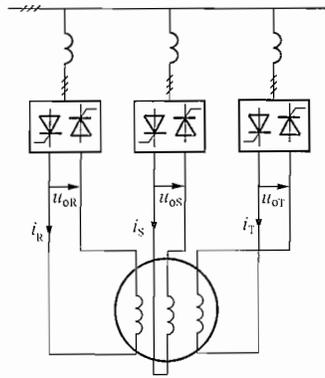


图 14-4-48 公共交流母线的三相交-交变频

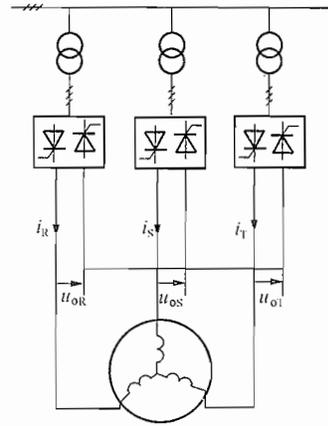


图 14-4-49 输出Y连接的三相交-交变频

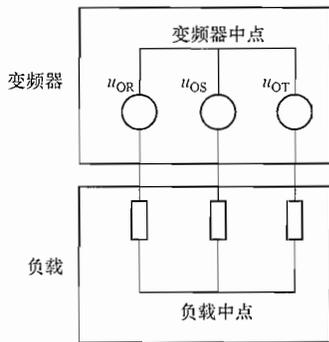


图 14-4-50 输出Y连接三相交-交变频器的等效电路

输出Y连接三相交-交变频器的等效电路见图 14-4-50。由于变频器中性点不与负载中性点相连接，如果变频器输出的三个相电压  $u_{oR}$ 、 $u_{oS}$ 、 $u_{oT}$  中含有同样的直流分量或三次谐波分量，均不会在线电压中反映出来，而输出到负载上。

负载电动机低速运行时，变频器输出电压很低，三套整流装置都工作于深控区域，电网侧功率因数差。如果三个相电压中都含有同样的直流分量，触发延迟角  $\alpha$  减小，既改善功率因数，又不影响电动机运行。这种技术称为“直流偏置”，由于实现起来较麻烦，很少使用。

负载电动机高速运行时，变频器输出电压高，如果使变频器输出相电压中含有适当的三次谐波、使之变成

图 14-4-51 所示的准梯形波，能获得如下好处：

- 准梯形波的幅值比基波幅值低 15%，而电动机端仅接收基波，所以负载相电压幅值提高 15%（出力提高）。
- 一个输出周期中，整流装置较长时间工作在高输出电压区域，变频器电网侧平均功率因数也提高 15%。

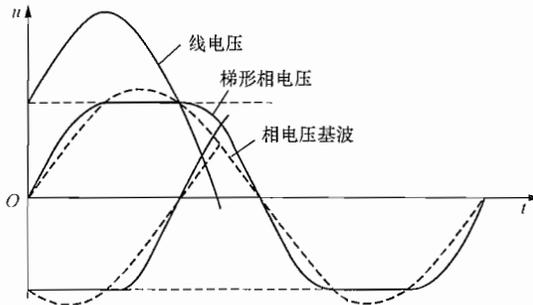


图 14-4-51 准梯形波相电压及线电压波形

这种技术称为“交流偏置”，实现容易，效果好，被广泛应用。

公共交流母线方式的三套单相输出交-交变频器通过进线电抗器接至 50Hz 公共交流母线，三组输出必须相互隔离，电动机的三个绕组需分开，引出 6 根线。这种方式的特点是：

- 只需一台电源变压器，简单、经济。
- 三套单相变频器完全独立，相互影响小，触发脉冲为双窄脉冲。
- 许多交-交变频调速电动机的电压为 1600 ~ 1700V，属中压范畴，变频器及引线都需满足中压规范要求。采用公共交流母线方式后，变频器及引线对地电压为相电压，小于 1000V，属低压范畴，执行低压规范。
- 使用准梯形波后，三次谐波电压将加至电动机绕组，但若电动机是隐极电动机，这种三次谐波也不会对电动机运行带来影响。

(2) 交-交变频器的特点及与直流调速的比较。

1) 交-交变频器的特点。交-交变频器的特点主要特点有两个，即一个是所需晶闸管元件多，一个三相输出的 6 脉冲交-交变频器至少需要 36 只晶闸管或 18 只直接反并联的大功率晶闸管组件；另一个特点是输出频率有限度，一般是供电电源频率的 1/3 左右，可用的频率范围一般认为是

$$f_{\max} \approx \frac{pf_0}{15}$$

式中  $f_0$ ——电网频率，Hz；

$p$ ——脉波数。

对于 50Hz 的电网与三相桥式电路 ( $p=6$ ) 而言， $f_{\max} \approx 20\text{Hz}$ 。因此，交-交变频主要适用于大型的交流电动机，尤以同步电动机为主要对象。在矿井提升机、粗轧机等大功率、低转速的传动装置中，交-交变频获得了越来越广泛的应用。交-交变频也易实现四象限运行，且有良好的起动能力和动态特性。

由于交-交变频应用于大型设备，因此对控制有较高的要求，通常采用无环流的矢量控制系统。

2) 交-交变频调速与直流调速的比较。

交-交变频与直流调速相比，有如下特点：

a. 由于同步电动机可靠、维护量小，一般说来，交-交变频传动维护间隔可达 6 个月，而直传动仅 2 个月。

b. 交-交变频的功率回路与直流调速相同，同样可实现四象限运行，虽然控制部分复杂，但控制模型已经解决，实用性与直传动相同，仅费用较高。全数字的矢量控制系统已投入运行。

c. 交-交变频同步电动机的效率比直流电动机高 2%。

d. 交-交变频同步传动的功率因数  $\cos\varphi$  比直传动低 10%，因此要求增加无功补偿设备。同样存在 5, 7, 11, 13 次谐波，并存在旁频谐波。高次谐波含量比直传动装置小 1/3 左右。旁频谐波频率与正常谐波对应的表达式为：

$$f_r = (pm \pm 1)f_n \pm 2Lmf$$

式中  $f_n$ ——电网频率，Hz；

$L$ ——电动机相数；

$f$ ——电动机侧电压频率，Hz；

$p$ ——脉波数；

$m$ ——自然数，1, 2, 3, ...

旁频波的幅值一般在 2% 以下。

e. 在可逆系统中，由于同步电动机比直流电动机有较小的转动惯量，除了加速时间短可节电外，还有较好的振荡性能。一台 6000kW 的交-交变频同步电动机的转动惯量比同容量的直流电动机小 4.7 倍。在有振荡激励时，同步电动机具有缓冲振荡的作用。

f. 从一定的功率界线（约 2000kW）开始，电动机加供电电源的总费用，交-交变频同步传动较直流传动低。

由以上可知交-交变频同步传动往往用于功率大于 2000kW 以上低转速可逆传动中，用于轧钢机、提升机、碾磨机等设备。

(3) 交-交变频器输出频率上限。交-交变频器输出电压、电流波形（见图 14-4-47）中，除基波外，还含有许多谐波，产生这些谐波的原因有两个：

1) 交-交变频器的输出波形是可控整流波形，含有较大谐波，输出频率越高，每周期中波动数越少，谐波比例越大。

2) 无环流“死时”，使电流过零不平滑，带来低次谐波，输出频率越高，每周期中“死时”占的比例越大，谐波比例越大。

通常用两个指标评价谐波大小：输出电流畸变率  $DF$  和电动机转矩相对脉动率  $\Delta T$ 。根据仿真结果表明，若限制  $DF \leq 20\%$ ， $\Delta T \leq 30\%$ ，则在使用 6 脉波可控整流、死时为 2ms 时，最大输出频率  $f_{0, \max} = 16.7\text{Hz}$ ，输出频率  $f_0$  超过上述  $f_{0, \max}$  值后， $DF$  和  $\Delta T$  快速增加。

$\phi 76.2\text{mm}$  ( $\phi 3\text{in}$ ) 晶闸管、风冷、6 脉波可控整流柜用于交-交变频时，每柜输出最大峰值电流  $I_{\text{BN}}$  与频率  $f_0$  的关系见图 16-4-52。 $f_0 > 16 \sim 20\text{Hz}$  后，随  $f_0$  增加，谐波电流加大， $I_{\text{BN}}$  急骤下降，装置出力减小，因此交-交变频器最大输出频率被限制为

$$f_{0, \max} \leq 16 \sim 20\text{Hz}$$

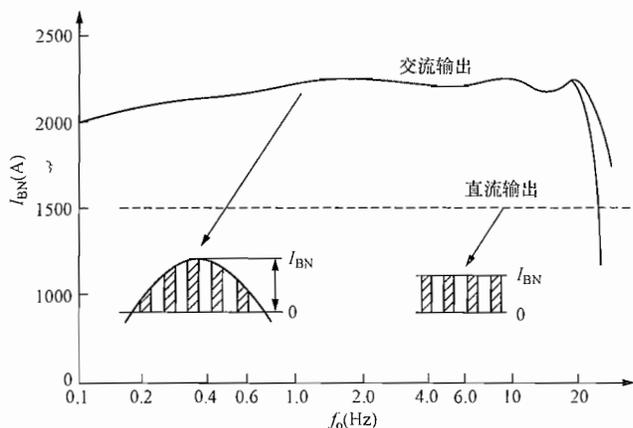


图 14-4-52 每桥最大峰值电流  $I_{\text{BN}}$  与频率  $f_0$  的关系

同样的晶闸管整流装置，用于交-交变频时，每桥最大峰值电流  $I_{\text{BN}}|_{f_0 \neq 0}$  比用于直流时的最大直流电流  $I_{\text{BN}, f_0=0}$  要大，因为用于变频时，每个晶闸管仅在半个周期中工作，另半个周

期不工作,即使在工作半周内流过管子的电流也时大时小。令它们之比为交-交变频器电流输出增大系数,即

$$K_c = \frac{I_{\text{BN}} |_{f_0 \neq 0}}{I_{\text{BN}} |_{f_0 = 0}}$$

该系数与晶闸管和散热器的规格和型式、柜子和风道结构等因素有关,每种特定的整流柜有一条自己的曲线,该曲线是交-交变频器电流计算的基础。按图 14-4-52,  $K_c \approx 1.3$ 。

(4) 交-交变频器电网侧功率因数。由于输入电流为非正弦波,在计算电网侧输入功率因数时采用一种更普遍的定义,即功率因数为

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

式中  $P$ ——输入功率;

$S$ ——视在功率,  $S = \sqrt{3}U_i I_i$ ; ( $U_i$ 、 $I_i$  为输入线电压、电流有效值)。

影响交-交变频器输入功率因数的因素有两个:

1) 和输出电压幅值  $U_{\text{om}}$  与变频器输出最大整流电压(理想空载直流电压)  $U_{\text{do,max}}$  之比成比例,  $U_{\text{om}}$  越低,  $\lambda$  越差。

2) 负载电动机的功率因数  $\cos\varphi$  越低,  $\lambda$  越差,这是因为在输出同样的电压、电流幅值情况下,  $\cos\varphi$  越低,电流瞬时值大时,对应的电压瞬时值低,而电压高时对应的电流小。

三相输出交-交变频器的输入功率因数  $\lambda$  与  $U_{\text{om}}$  及  $\cos\varphi$  的关系见图 14-4-53。

在采用准梯形波相电压时,最大输出电压基波幅值  $U_{\text{om,max}} = 1.15U_{\text{do,max}}$ ,  $K = 1$ 。由图 14-4-53 看出,三相输出交-交变频器的输入功率因数和直流输出时的可控整流器功率因数差不多。这一功率因数曲线族是交-交变频器无功功率计算的基础。

若交-交变频器的负载是容性的,例如负载同步电动机工作在超前区,变频器输入功率因数仍为感性,负载超前的无功功率不仅不能通过变频器送到电网,不能补偿变频器本身产生的无功功率,反而和感性负载一样降低输入功率因数。负载同步电动机最好工作在  $\cos\varphi = 1$  状态。

(5) 交-交变频器主电路参数计算。

1) 整流变压器计算。在空载及最小触发延迟角  $\alpha_{\text{min}} = 0$  条件下,交流变频器输出最大可能的交流线电压有效值(理想空载交流输出电压)为

$$U_{\text{o,max}} = \frac{1.35 \times \sqrt{3}}{\sqrt{2}} K_b U_{20} = 1.65 K_b U_{20}$$

式中  $U_{20}$ ——整流变压器二次线电压有效值;

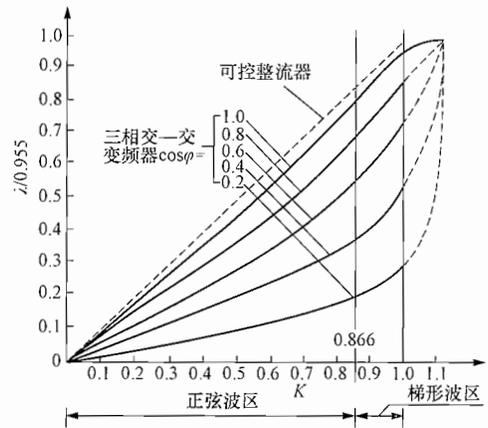


图 14-4-53  $\lambda$  与  $U_{\text{om}}$  及  $\cos\varphi$  的关系

横坐标  $K = (U_{\text{om}} / U_{\text{do,max}}) / 1.15$

$U_{\text{do,max}}$ —梯形波最大基波幅值

$K_b$ ——交流偏置提高输出电压系数，采用交流偏置时， $K_b = 1.15$ ；不采用时， $K_b = 1$ 。

电动机额定电压（线电压有效值）为

$$U_m = (K_n K_u K_g K_r K_p) U_{0, \max}$$

式中  $K_n$ ——电网侧（包括整流变压器）线路阻抗引起的压降系数；

$K_u$ ——电动机侧线路压降及晶闸管压降系数；

$K_g = \cos \alpha_{\min}$ ，通常  $\alpha_{\min} = 5^\circ \sim 10^\circ$ ；

$K_r$ ——调节裕量系数，通常  $K_r = 0.95$ ，有5%的调节裕量；

$K_p$ ——电网压降系数，若调节系统弱磁点用不稳压整流电源设定，电网电压降低，弱磁点提前， $K_p = 1$ 。

由于线路压降很难精确计算，通常近似取  $(K_n K_u K_g K_r K_p) \approx 1/1.25$ ，则

$$U_{20} = 1.25 \frac{U_m}{1.65 K_b}$$

变压器容量

$$S = \sqrt{3} \times 0.82 I_m U_{20} \times 3 = 4.26 I_m U_{20}$$

式中  $I_m$ ——电动机额定电流。

2) 晶闸管电压、电流计算。

a. 晶闸管电压裕量校验。晶闸管电压裕量为

$$K_v = \frac{U_{TN}}{\sqrt{2} U_{20}}$$

式中  $U_{TN}$ ——晶闸管额定电压；

$U_{20}$ ——变压器二次线电压有效值。

要求  $K_v = 2.1 \sim 2.5$ 。

b. 晶闸管并联支路数计算。在大功率可控整流装置中，晶闸管常并联工作，且多采用桥并方式，并联支路数计算也就是并联桥数  $N$  的计算，即

$$N \geq \frac{\sqrt{2} I_{m, \max}}{K_B I_{BN}} \quad (14-4-20)$$

式中  $I_{m, \max}$ ——电动机最大电流有效值；

$K_B$ ——均流系数；

$I_{BN}$ ——每桥额定电流。

式(14-4-20)右侧计算值一般不是整数， $N$ 取一个比它大的整数。每桥额定电流  $I_{BN}$ 与晶闸管规格、散热器形式、柜子结构、冷却条件、变频器输出频率范围等有关（参见图14-4-52）。

## 14

### 14.4.3.3.3 交-直-交变频调速系统。

(1) 交流调速的PWM变流器（《电气传动自动化技术手册（第3版）》7.2.4节）。

1) 电压型PWM逆变器。若降压变流器的电源是直流  $U_1 = 2E_1$ ，而产生占空比  $D$  的控制信号是加入1/2偏置的交流信号

$$D = [1 + m \sin(\omega t - \theta)]/2$$

式中  $m$ ——调制系数， $1 \geq m \geq 0$ ；

$\omega$ ——角频率,  $\omega = 2\pi f$ ;

$\theta$ ——相角。

则变换器输出电压 (一个开关周期的平均值)  $u_0 = mE_i \sin(\omega t + \theta)$ , 它是幅值为  $mE$ 、角频率为  $\omega$ 、相角为  $\theta$  的交流电压, 这时变流器成为单相电压型逆变器, 见图 14-4-54。由于交流输出电流周期性地变换方向, 该逆变器的两组开关  $S$  和  $\bar{S}$  应是两组带有反并联续流二极管的自关断器件 V1 (VD1) 和 V2 (VD2), 电流正半波时流经 V1 和 VD2, 电流负半波时流经 V2 和 VD1。为防止“直通”, 在设计 V1 和 V2 的切换控制电路时需设置“死时”, 在“死时”期间, 输出电流经 VD1 或 VD2 续流。

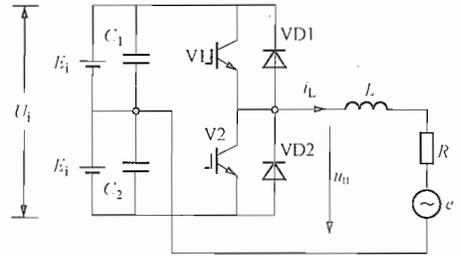


图 14-4-54 单相电压型 PWM 逆变器

2) 电压型 PWM 整流器。电压型 PWM 整流是电压型逆变器的逆应用, 基于升压变换电路, 输入是正弦交流电压  $u_i$ , 产生占空比  $D$  的控制信号也是正弦交流, 即

$$u_i = U_i \sin \omega t$$

$$D = [1 + m \sin(\omega t - \theta)] / 2$$

则输出电压 (在一个开关周期的平均值) 是直流电压  $U_0 (> U_i)$ , 见图 14-4-55。

该整流器的两组开关也应是两组带有反并联续流二极管的自关断器件 V1 (VD1) 和 V2 (VD2), 并在设计 V1 和 V2 的切换控制电路时需设置“死时”。

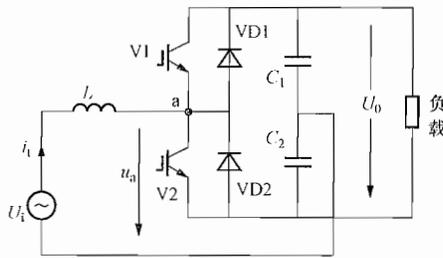


图 14-4-55 单相电压型 PWM 整流

PWM 整流的特点:

- 输出端接大滤波电容, 输出电压  $U_0$  是平直的直流, 两组开关连接点 a 的电压是正弦电压  $u_a$ 。
- 输入电流  $i_i$  是流经电感  $L$  的电流, 开关频率的脉动小; 由于  $u_i$  和  $u_a$  都是正弦波, 所以  $i_i$  在一个开关周期的平均值也是正弦波。
- 由于  $I_i = -j(U_i - U_a) / (\omega L)$  (式中  $U_i$ 、 $U_a$  和  $I_i$  是正弦电压、电流  $u_i$ 、 $u_a$  和  $i_i$  对应的矢量), 所以输入电流  $i_i$  的相位 (与输入电压  $u_i$  间所夹的功率因数角  $\varphi$ ) 和幅值可以通过改变占空比控制信号中的  $m$  和  $\theta$  角来控制 (见图 14-4-56), 从而实现输入电流的有功分量和无功分量的分别控制。
- 允许功率双向流动: 当有功电流分量  $> 0$  时, 功率从交流电源流向直流负载; 当有功分量  $< 0$  时, 功率从负载流向电源。

由于 PWM 整流具有上述优良性能, 常用作高性能交-直-交变频器前端的交-直变流器, 称为有源前端 (AFE) 变流器。

3) 三相电压型 PWM 逆变器和 PWM 整流器。把三个单相电压型 PWM 逆变器组合起来, 去掉中性线, 就构成一台三相 PWM 逆变器, 见图 14-4-57。

把三个单相电压型 PWM 整流器组合起来, 去掉中性线, 就构成一台三相 PWM 整流器, 由于它是三相逆变器的逆应用, 所以它的电路和图 14-4-57 一样, 只是输入、输出互换,

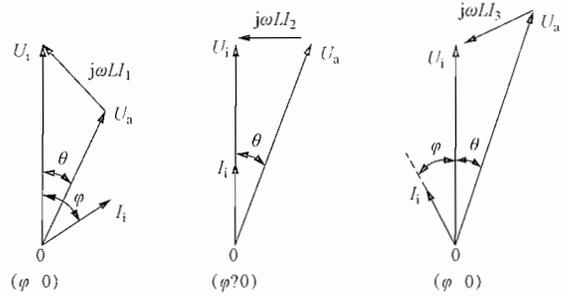


图 14-4-56 PWM 整流输入电流、电压矢量图

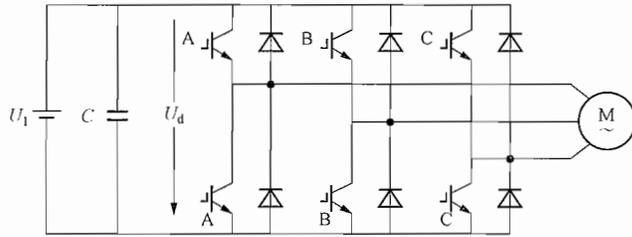


图 14-4-57 三相电压型 PWM 逆变器

输入为串有进线电感的三相交流电源，输出为并有电容的直流负载。

把三相电压型 PWM 逆变器和 PWM 整流器的直流侧连接起来，就构成一台电压型双 PWM 交-直-交变频器，见图 14-4-58。图中左侧为整流器，右侧为逆变器。

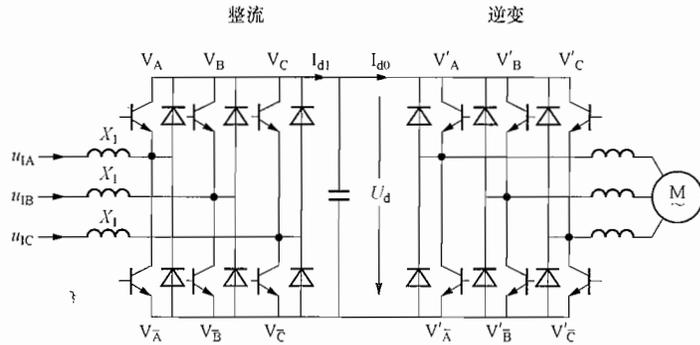


图 14-4-58 电压型双 PWM 交-直-交变频器

4) 三相电流型 PWM 整流器和 PWM 逆变器。在单相输出矩阵变频器（见图 14-4-59）中，若控制信号的角频率和输入电源电压的角频率一样  $\omega_m = \omega_i$ ，则输出电压将变为直流（ $\omega_0 = 0$ ），这时矩阵变频器变为电流型 PWM 整流器。为提高输出电压，可把原来的零式电路改为桥式电路（见图 14-4-60），并修改调制规则为

$$\begin{aligned}
 D_A &= M(\omega_i t) & D_{\bar{A}} &= M(\omega_i t + \pi) \\
 D_B &= M(\omega_i t - \alpha) & D_{\bar{B}} &= M(\omega_i t + \pi - \alpha) \\
 D_C &= M(\omega_i t + \alpha) & D_{\bar{C}} &= M(\omega_i t + \pi + \alpha)
 \end{aligned} \tag{14-4-21}$$

式中  $M(\theta) = m\cos\theta$  (若  $m\cos\theta \geq 0$ );

$M(\theta) = 0$  (若  $m\cos\theta < 0$ );

$m$ ——调制系数,  $1 \geq m \geq -1$ ;

$$\alpha = \frac{2\pi}{3}$$

可以证明输出电压为直流 (一个开关周期的平均值), 即

$$U_a = 1.5mU_{im}$$

是零式电路的 3 倍。输入电流是三相正弦电流, 与输入电压同相, 功率因数为 1。

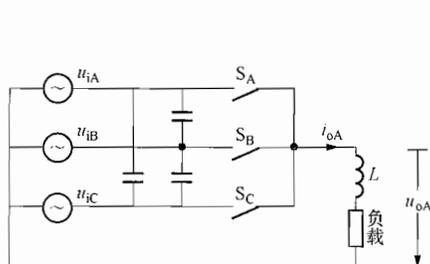


图 14-4-59 单相输出零式矩阵变频器

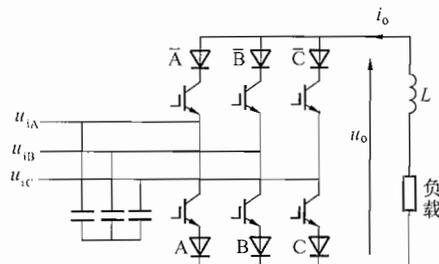


图 14-4-60 桥式电流型 PWM 整流

若  $m > 0$ , 输出电压为正, 电动工况, 能量从电源流向负载, 降压变流; 若  $m < 0$ , 输出电压为负, 回馈工况, 能量从负载流向电源, 升压变流。电动和回馈两种工况, 输出电压极性相反, 电流方向不变, 调制开关仅承受双向电压, 无双向电流要求, 因此调制开关简化成单向开关 (见图 14-4-60)。在此条件下, 只要设置适当的重叠时间就能安全换相, 简化了换相控制。

电流型 PWM 逆变器是电流型 PWM 整流器的逆应用, 两者电路相同, 只是输入、输出端互换。逆变器的输入是串有电感的直流电源, 输出为并有电容的三相负载, 基于升压变流电路, 调制规则同式 (14-4-21), 通常设定  $m = 1$ , 这时三相输出电流为

$$i_{oA} = I_d \cos(\omega_1 t)$$

$$i_{oB} = I_d \cos(\omega_1 t - \alpha)$$

$$i_{oC} = I_d \cos(\omega_1 t + \alpha)$$

式中  $I_d$ ——直流输入电流。

把电流型 PWM 逆变器和 PWM 整流器的直流侧连起来, 就构成一台电流型双 PWM 交-直-交变频器, 见图 14-4-61。图中左侧为整流器, 右侧为逆变器。

(2) 定子侧低压电压型交-直-交变频调速系统 (《电气传动自动化技术手册 (第 3 版)》7.3.4 节)。

1) 应用情况。定子侧低压 (小于 1000V) 交-直-交变频调速系统是一种应用最广泛的交流调速系统。低压

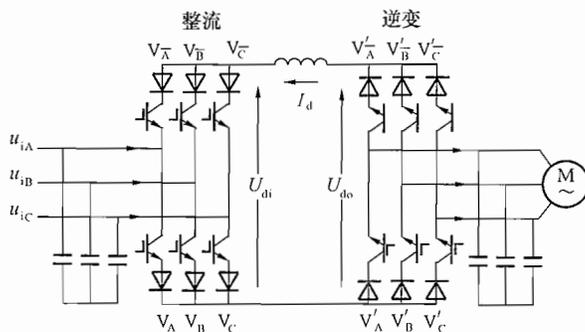


图 14-4-61 电流型双 PWM 交-直-交变频器

交-直-交变频有电压型和电流型两类。由于缺少能承受反向电压的电力电子器件及中间直流回路中的电抗器大、低效等原因，低压电流型交-直-交变频器很少应用。现在几乎所有低压交-直-交变频器都是电压型的。电压型交-直-交变频器有多种结构型式，使用多种电力电子器件，现在这类变频器几乎全是基于 IGBT 的 PWM 变频器。

电压型 PWM 变频器逆变器的原理是：只要占空比  $D$  是幅值、频率和相角可调，且加入  $1/2$  偏置后的正弦信号，则逆变器输出电压（一个开关周期平均值）是具有同样频率和相位，且幅值与占空比信号幅值成比例的正弦电压。

电压型 PWM 的实现方法有三角载波比较法（电压正弦法），电流跟踪控制法（电流正弦法），空间电压矢量法（磁链正弦法）指定谐波消除法等。

根据被控制量的不同，逆变器有开环输出电压控制和闭环输出电流控制两类控制系统。

2) 逆变器的开环输出电压控制。开环输出电压控制时，逆变器的输出是电压源，其输出电压跟随给定信号变化，受负载电流变化影响小，多用于开环压频比（ $U/f$ ）控制调速系统。

由恒定直流电压供电的电压型逆变器的输出本身就是电压源，只要采用三角载波比较或空间电压矢量等 PWM 控制方法，就可实现输出电压跟随给定变化的要求。通常系统的设定为电压幅值和频率信号，空间电压矢量法要求的控制信号是交流电压幅值及相角，为此需增设一个积分器，把频率变换为相角；三角载波比较法要求的输入信号是三相正弦

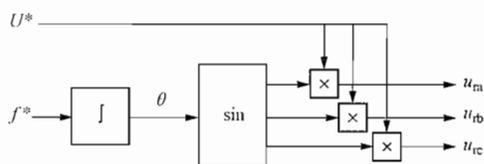


图 14-4-62 输入信号变换环节

交流信号  $u_{ra}$ 、 $u_{rb}$ 、 $u_{rc}$ ，为此需要一个变换环节（见图 14-4-62），把输入的幅值  $U^*$  和频率  $f^*$  变为  $u_{ra}$ 、 $u_{rb}$ 、 $u_{rc}$ 。

为防止出现每组开关上、下两个开关器件“直通”故障，必须在开关切换过程中设置死时，先关、后通，对于 IGBT，“死时”取  $5\mu\text{s}$  左右（器件容量越大，死时越长）。“死时”的存在会

影响逆变器输出电压的幅值和相位：

a. 若负载功率因数角  $\varphi$  为滞后角，则逆变器实际输出电压比无“死时”的理想电压相位超前，“死时”越大， $\varphi$  越大，超前越多。

b.  $|\varphi| < 90^\circ$  时，逆变器实际输出电压比无“死时”的理想电压幅值减小，“死时”越大，减小越多， $\varphi$  越小，影响越大， $\varphi = 0$  时，“死时”对幅值的影响见图 14-4-63。

对于开环电压控制，这死时影响必须给予补偿。

开环电压控制简单，应用非常广泛。它的问题是输出电压中不可避免地存在微小不对称和直流分量，在电动机起动之初，电动机定子漏抗很小，大功率电动机的定子电阻也小，这些不对称和直流电压分量会导致大的电流不对称和直流分

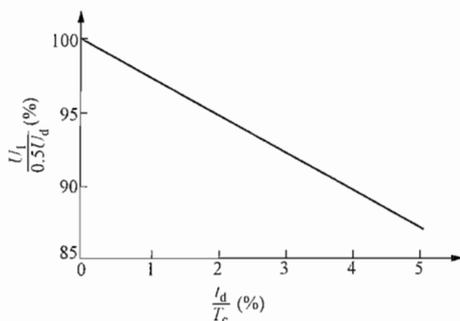


图 14-4-63 死时对输出电压幅值的影响 ( $\varphi = 0$ )

量,产生附加制动转矩,起动时电流大,转矩小,影响起动。

3) 逆变器的闭环电流控制。闭环电流控制的任务是控制逆变器的输出电流,使其无差地(无相位和幅值误差)跟随给定变化,不受负载电动势变化的影响,用于高性能调速系统内环。从本质上来说,电压型逆变器输出是电压源,只有采用电流闭环控制才能获得电流源的性能。

用三个交流电流调节器,通过三个独立的电流闭环,似乎可以实现电流控制要求,但由于三相电流之和等于零条件的约束,只能有两个独立控制变量,三个PI调节器不能正确工作,另外PI调节器只能消除直流误差,对于交流信号它们是有差的,会带来相位和幅值误差。

实用的闭环电流控制方法是直流电流闭环调节,其框图见图14-4-64。此法不直接控制三相交流电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ ,而是控制它们的两个直流分量:磁化分量 $i_d$ 和转矩分量 $i_q$ ,使其分别等于给定值 $i_d^*$ 、 $i_q^*$ 。

在图14-4-64中, $DCR_d$ 和 $DCR_q$ 是两个直流电流调节器,它们的PI功能使两直流电流无静差。

VR是矢量回转变换器,它把 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 变换成 $i_d$ 、 $i_q$ 。

$VPC_d$ 和 $VPC_q$ 是电压预控环节,用以减小电流响应时间(从几十减至几毫秒),有些系统中无预控,所以它们用点画线表示。

K/P是直角坐标-极坐标变换器,它把两个直流电压给定信号 $u_d^*$ 、 $u_q^*$ 变换成幅值 $U^*$ 和幅角 $\theta_u^*$ 信号, $u_d^*$ 、 $u_q^*$ 来自调节器和预控输出。

PWM控制采用空间电压矢量或三角载波比较法,它所需的 $U^*$ 来自K/P, $\theta^* = \theta_u^* + \theta$ ( $\theta$ 为基准旋转角, $\theta = \omega t$ )。

闭环电流控制可以自动消除开关器件切换过程中死时对逆变器输出的影响,不需要死时补偿环节。它也不存在电动机起动之初电流不对称及直流分量大问题,有助于起动。

4) 公共直流母线。如果在一个工作面或一条生产线上有多台电动机需要变频调速,宜采用公共直流母线供电方式,即由一套大的整流电源向多套逆变器供电,见图14-4-65。

采用公共直流母线的优点:

a. 整流器容量小。由于不可能所有变频调速电动机同时全速、满载工作,整流器的容量小于各逆变器容量之和。

b. 解决再生制动问题容易。若公共母线下的一台或几台电动机再生工作,而其他电动机电动工作,再生的能量可以通过直流母线流入正在电动工作的电动机,大大减小了需要吸

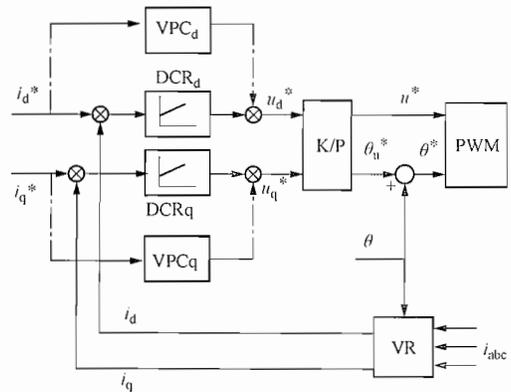


图 14-4-64 直流电流闭环调节框图

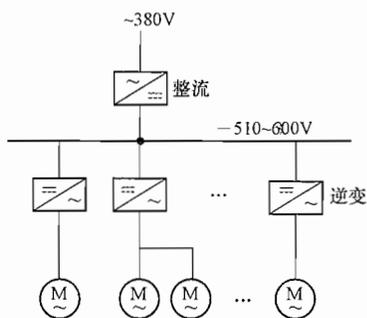


图 14-4-65 公共直流母线

收或回馈的功率，另外由于只有一个直流母线，仅需一套能量吸收或回馈装置就能解决所有电动机的再生制动问题。

c. 安装尺寸小。因为网侧元件，如熔断器、接触器、进线电抗等可以集中采用一套，比多套网侧元件分散安装尺寸小。

5) 降容曲线。普通电动机用于变频调速后需适当降容，降容的原因是：

a. 逆变器输出的谐波给电动机带来附加损耗，约增加 10%。

b. 普通电动机多为自通风电动机，随转速下降，通风量下降，冷却效果下降，电动机输出转矩需相应降低（对于外通风电动机，转矩不降）。

c. 在额定转速以上是弱磁调速区，电动机的转矩约按  $f_n/f$  比例降低，功率近似不变，但异步电动机的颠覆转矩按  $(f_n/f)^2$  减小，故在弱磁范围较宽的应用场合，需校验颠覆转矩（留 30% 裕量）。

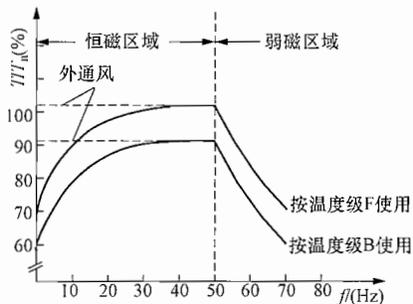


图 14-4-66 普通电动机用于变频调速后的降容曲线

普通电动机用于变频调速后的降容曲线见图 14-4-66。

(3) 定子侧中压交-直-交变频调速系统（《电气传动自动化技术手册（第 3 版）》7.3.5 节）。

定子侧中压（1~10kV）交-直-交变频调速系统是一种应用广泛的大功率交流调速系统。

中压交-直-交变频器种类很多，应用较多的三类是电压型中点钳位三电平变频器、电压型 H 桥级联变频器和电流型变频器。

中压电压等级问题是影响我国推广应用大中功率中压变频调速的主要障碍。我国现有电压等级情况：①为限制电动机直接起动时母线压降，200kW 以上电动机一般用中压。②为减少供电线损，400V 以上只有 10kV 和正在淘汰中的 6kV 两种电压等级。因为电压等级高，变频器中器件串联数多，电流利用率低，价高，可靠性受影响。

解决中压电压等级的问题一般采取以下措施：①把供电和用电的电压等级分开，区别对待，现在的中压变频器都配有输入变压器，一次侧接 10kV 电网，二次侧根据功率大小，选变频器和电动机的电压等级。②由于采用变频调速后，起动电流小，低压电动机功率可扩展至 800~1000kW，500kW 以下用 400V，500kW 以上用 690V，现已有 690V 的电动机和变频器标准产品。③功率大于 800~1000kW，小于 2000kW 场合，宜用中压变频，但在现有技术条件下，尽量避免选用 10kV 变频器，宜用 6kV 或 3（3.3）kV。

(4) 电流型逆变器主回路参数计（《钢铁企业电力设计手册》下册 25.5.3.4 节）。

典型的电流型逆变器主回路如图 14-4-67（a）所示。假设整流后的电流波形完全平直，换相过程较短，所引起的电压尖波可忽略不计，逆变器输出电流为理想的矩形波，如图 14-4-67（b）所示。串联二极管逆变器主回路参数计算如下。

1) 直流侧电压  $U_d$ 。直流侧电压  $U_d$  为

$$U_d = AU_L \cos\varphi + 2U_{dr}$$

式中  $U_L$ ——电动机的线电压，V；

$A$ ——三相桥式整流电路的电压转换系数,  $A = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} = 1.35$ ;

$\cos\varphi$ ——负载功率因数;

$U_{df}$ ——晶闸管管压降, 取  $1.5V$ 。

2) 直流侧电流  $I_d$ 。逆变器输出电流是矩形波, 将输出电流分解成傅氏级数得

$$i_L = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left( \sin\omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \dots \right)$$

输出基波电流的有效值  $I_L$  为

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{2}\pi} I_d \\ &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = 0.78 I_d \end{aligned}$$

基波电流为电机产生有效转矩的电流, 电动机实际通过的电流是矩形波电流的有效值  $I_-$

$$I_- = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.816 I_d$$

所以, 直流侧电流  $I_d$  为

$$I_d = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_L = \sqrt{\frac{3}{2}} I_-$$

式中  $I_L$ ——电动机负载电流基波有效值, A;

$I_-$ ——电动机定子电流有效值, A。

对电动机负载, 一般要求考虑一定的过载能力, 因此要计算出最大直流电流  $I_{dm}$

$$I_{dm} = K I_d$$

式中  $K$ ——过载倍数 (一般取  $1.5 \sim 2.0$ )。

3) 换向电容  $C$  由下式确定

$$C = \frac{t_0^2}{3L}$$

式中  $C$ ——换相电容,  $\mu F$ ;

$t_0$ ——晶闸管计算用反压时间,  $\mu s$ ;

$L$ ——星形接线电动机的每相漏感,  $\mu H$ 。

电容器峰值电压  $U_{cm}$

$$U_{cm} = I_{dm} \sqrt{\frac{4L}{3C}} + \sqrt{2} U_L \sin\varphi$$

式中  $\sin\varphi$ ——电动机电流滞后正弦值。

4) 逆变侧晶闸管的电压、电流值。逆变侧晶闸管所承受的正、反最大电压为

$$U_{VT} = I_d \sqrt{\frac{4L}{3C}} + \sqrt{2} U_L \sin\varphi$$

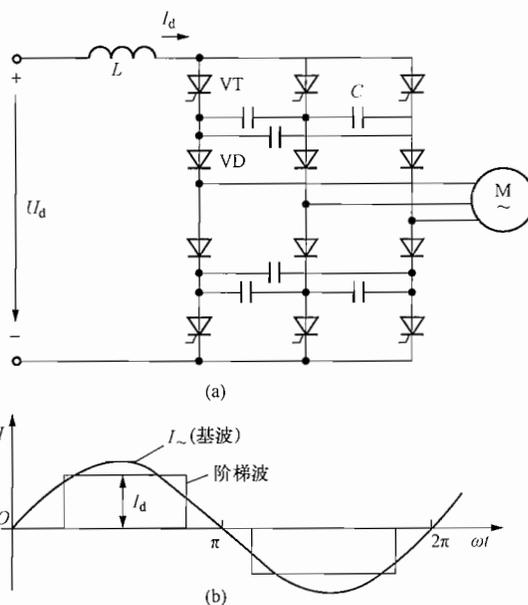


图 14-4-67 串联二极管式电流型逆变器电路  
(a) 逆变电路; (b) 输出矩形电流及其基波

逆变侧晶闸管流过的电流  $I_L$ ，考虑到晶闸管导通角为  $120^\circ$ ，则晶闸管电流有效值  $I_{VT}$  为

$$I_{VT} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}$$

5) 隔离二极管的电压与电流。隔离二极管承受的最大反向电压  $U_{VD}$  为

$$U_{VD} = I_d \sqrt{\frac{4L}{3C}} + 2\sqrt{2}U_L \sin\varphi$$

隔离二极管的电流等级选用与主晶闸管相同的电流等级。

6) 平波电抗器。平波电抗器用于限制直流电流脉动，较大的平波电感可增加系统运行的稳定性。平波电感的理论计算较复杂，在工程实际中，常采用经验公式计算所需平波电感值  $L_d$

$$L_d = (10 \sim 20)L$$

(5) 电流型变频器的多重化（《钢铁企业电力设计手册》下册 25.5.3.5 节）。

除 GTO 电流型 PWM 逆变器的输出正弦电压、正弦电流（高次谐波很少）外，其他电流型变频器输出电流波形为  $120^\circ$  方波。由傅氏级数分析，输出电流中含有 5、7、11、13、… 高次谐波，它使电动机的损耗增加，噪声加剧，产生转矩脉动，导致电机发热使输出功率减少等，因此在大容量的电流型变频器中，常采用将几组具有不同输出相位的逆变器并联运行的多重化技术。多重化不仅可降低输出电流的谐波含量，还可减少转矩脉动和增加输出功率。

1) 不完全的电流双重叠加（直接型）。直接型双重电流叠加线路见图 14-4-68，其中变频器 II 的电流相位较变频器 I 的电流相位滞后  $30^\circ$ ，两者的直流电流  $I_d$  保持一致，电动机的电流  $i_A$  为两台变频器电流的合成，呈阶梯形。 $M_1$  和  $M_2$  合成电动机总转矩  $M$ ，其最低次脉动频率仍为输出频率的 6 倍，即仍有 5、7 次谐波，但幅值减小了，见表 14-4-15。

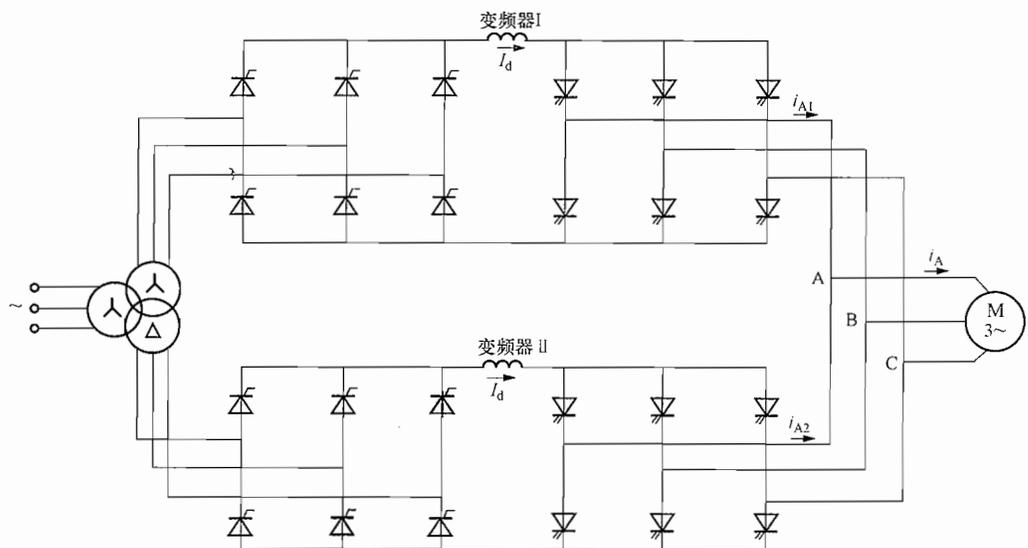


图 14-4-68 直接型双重电流叠加逆变器

表 14-4-15 多重化联结及可能达到的最低谐波含量 (%)

谐波次数 $n$	基本型	输出直接并联			经输出变压器后并联		
	逆变器	二重	三重	四重	二重	三重	四重
1	100	100	100	100	100	100	100
5	20.00	5.36	4.54	4.28	0	0	0
7	14.30	3.83	2.64	2.35	0	0	0
11	9.10	9.10	1.68	1.20	9.10	0	0
13	7.70	7.70	1.74	1.01	7.70	0	0
17	5.88	1.58	5.88	0.97	0	5.88	0
19	5.26	1.41	5.26	1.13	0	5.26	0
23	4.35	4.35	0.99	4.35	4.35	0	4.35
25	4.00	4.00	0.74	4.00	4.00	0	4.00
29	3.45	0.92	0.64	0.74	0	0	0
31	3.23	0.86	0.73	0.53	0	0	0
35	2.86	2.86	2.86	0.38	2.86	2.86	0
37	2.7	0.27	2.70	0.36	2.70	2.70	0
41	2.44	0.65	0.55	0.40	0	0	0
43	2.33	0.62	0.43	0.50	0	0	0
47	2.13	2.13	0.39	2.13	2.13	0	2.13
49	2.04	2.04	0.46	2.04	2.04	0	2.04

直接多重化接线的缺点,是两个变频器的输出功率不同。由于  $i_{A2}$  滞后于  $i_{A1}$ , 而输出电压是一个, 故变频器 II 的直流电压低于变频器 I 的直流电压, 与此相应的变频器 II 的输出功率小于变频器 I 的功率。

2) 完全的电流双重叠加(耦合型)。耦合型双重电流叠加线路及其有关波形见图 14-4-69 和图 14-4-70。这种采用输出变压器进行耦合双重叠加后, 消除合成电流波形中的 5、7 次谐波, 使最低次谐波为 11 次, 转矩脉动频率升高为输出频率的 12 倍, 脉动幅值减小。另外, 耦合型双重叠加除减少高次谐波, 降低转矩脉动外, 还可以降低换流电容的充电电压。因此, 与六相电流型变频器相比, 耦合型双重叠加方案可以取消过电压吸收环节, 使线路简化, 设备减少。

为了进一步降低谐波电流与抑制转矩脉动或增大输出功率, 对于更大容量的变频器可采

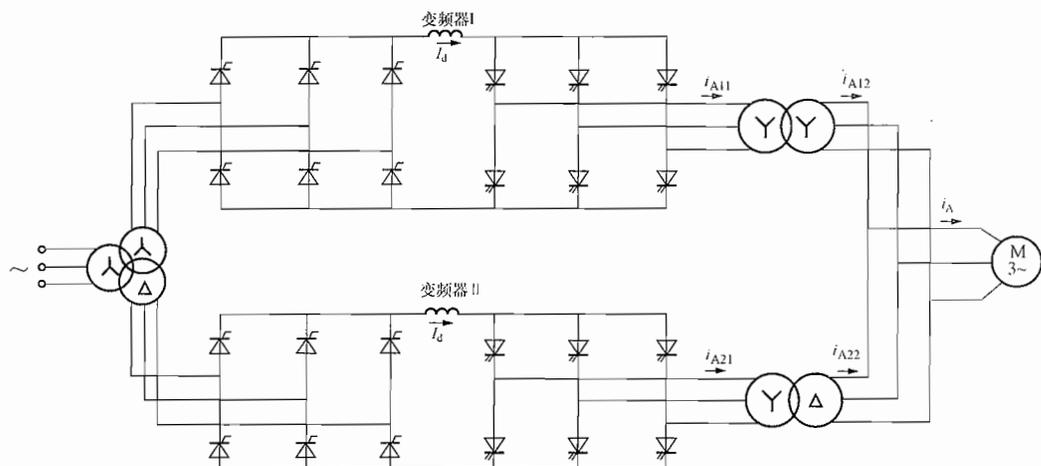


图 14-4-69 耦合型双重电流叠加逆变器

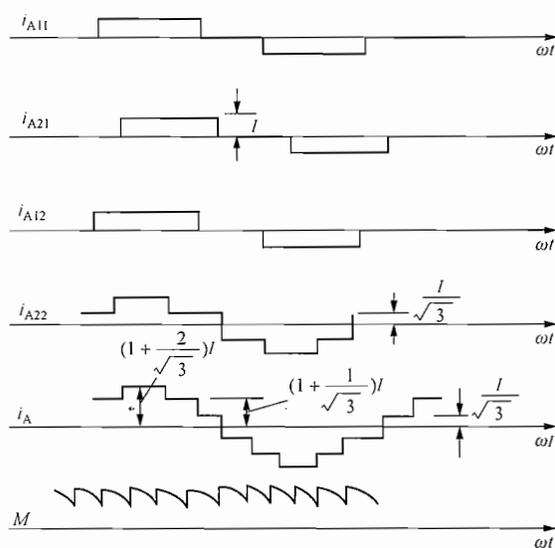


图 14-4-70 耦合型双重电流叠加的有关波形

用三重叠加或四重叠加的方案。表 14-4-15 列出了各种多重化联结方式及其可能达到的最低谐波含量。

(6) 电压型逆变器工作原理及参数计算（《钢铁企业电力设计手册》下册 25.5.2.2 节）。

电压型逆变器直流中间环节采用大容量电容器滤波（通常使用电解电容），因此输出电压保持平直，不受负载影响，等值阻抗很小，可以看作电压源，故称之为电压型逆变器，基本电路及输出波形如图 14-4-71 所示。

根据电压型逆变器中主逆变开关元件导通时间的不同，三相桥式电压型逆变器可分为  $180^\circ$  通电和  $120^\circ$  通电两种工作方式。 $180^\circ$  通电型的特点，是每只主

逆变开关元件的导通时间为  $180^\circ$ ，在任意瞬间有三只主逆变元件同时导通（每相桥臂有一只元件导通），它们的换流是在同一相桥臂内运行。 $180^\circ$  通电型的优点是元件利用率高，输出电压稳定与负载无关。 $120^\circ$  通电型的特点是每只主逆变元件的导通时间为  $120^\circ$ ，在任意瞬间只有两只主逆变元件同时导通，它们的换流是在相邻桥臂中进行。从换流安全的角度看， $120^\circ$  比  $180^\circ$  通电型有利，这是因为同一相桥臂上的两只主逆变元件导通之间有  $60^\circ$  的间隔。但由于在任意瞬间均有一相的两只主逆变元件都处于关断状态，这点电位受负载影响很难确定，因此对于电动机类负载，输出电压基波的大小及相位均与负载有关，因此很难确定其输出电压波形。由于这个原因目前几乎所有的电压型逆变器都采用  $180^\circ$  通电工作方式。 $180^\circ$  导通电压型逆变器导通顺序及输出电压值见表 14-4-16。

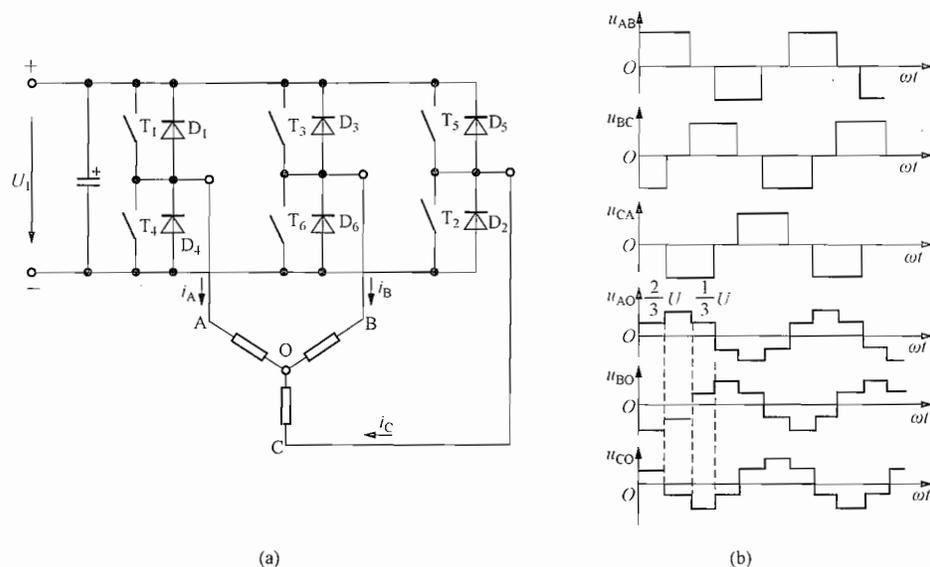


图 14-4-71 电压型逆变器 ( $U = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$ )  
 (a) 电压型逆变器基本电路; (b) 电压波形 (180°通电机)

表 14-4-16 180°导通电压型逆变器导通顺序及相电压值

$\omega_1 t$	$0^\circ \sim 60^\circ$	$60^\circ \sim 120^\circ$	$120^\circ \sim 180^\circ$	$180^\circ \sim 240^\circ$	$240^\circ \sim 300^\circ$	$300^\circ \sim 360^\circ$
导通的晶闸管	$T_1 T_2 T_3$	$T_2 T_3 T_4$	$T_3 T_4 T_5$	$T_4 T_5 T_6$	$T_5 T_6 T_1$	$T_6 T_1 T_2$
负载等值电路						
输出相电压值	$U_{AO}$	$+\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{3}{2}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$+\frac{1}{3}U_d$
	$U_{BO}$	$+\frac{1}{3}U_d$	$+\frac{2}{3}U_d$	$+\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{2}{3}U_d$
	$U_{CO}$	$-\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$+\frac{1}{3}U_d$	$+\frac{2}{3}U_d$	$+\frac{1}{3}U_d$
输出线电压值	$U_{AB}$	0	$-U_d$	$-U_d$	0	$+U_d$
	$U_{BC}$	$+U_d$	$+U_d$	0	$-U_d$	$-U_d$
	$U_{CA}$	$-U_d$	0	$+U_d$	$+U_d$	0

根据图 14-4-71 (b) 的电压波形, 可导出 180°通电工作方式下的三相桥式电压型逆

变器直流输入与交流输出量间的关系

$$U_{AB} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{AB}^2 dt}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} U_d = 0.816 U_d$$

$$U_{AO} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{AO}^2 dt}$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{3} U_d = 0.471 U_d$$

式中  $U_{AB}$ ——逆变器输出线电压有效值，V；  
 $U_{AO}$ ——逆变器输出相电压有效值，V；  
 $U_d$ ——直流电压，V。

对逆变器输出电压进行谐波分析，将其分解成傅里叶级数得

$$U_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_d \left( \sin\omega t - \frac{1}{5}\sin5\omega t - \frac{1}{7}\sin7\omega t + \frac{1}{11}\sin11\omega t + \dots \right)$$

基波电压有效值  $U_{AB1}$  与直流电压的关系为

$$U_{AB1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d = 0.780 U_d$$

按照能量守恒关系，可得出输出线电流的有效值  $I_L$  与输入直流电流  $I_d$  的关系为

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_L \cos\varphi = 1.35 I_L \cos\varphi$$

式中  $\cos\varphi$ ——负载的功率因数。

14.4.3.4 转子侧交流调速系统

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》7.4.1节、《钢铁企业电力设计手册》下册25.3节。

(1) 转子侧高效调速系统。转子侧串级调速和双馈调速系统都是转子侧高效调速系统，只适用于绕线转子异步电动机，电动机定子绕组接电网，转子绕组经调速装置VF接

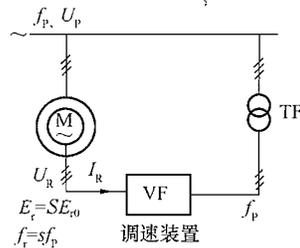


图 14-4-72 转子侧串级和双馈调速系统示意图

电网，见图 14-4-72，通过在转子回路中引入可控的附加电动势  $E_r$  来改变转差率  $s$ ，实现调速。调速装置一端接转子绕组，它的频率和电压随转差率  $s$  变化而变化，另一端接电网，频率和电压固定，所以该调速装置实质上是一台变频器（从可变频率和电压变为固定频率和电压），这类调速系统亦可看作为转子侧变频调速。图中， $E_m$  是转子不转 ( $s=1$ ) 时的转子电动势。

这类调速系统有四种工作状态：次同步（低于同步速， $s>0$ ）电动（转矩  $T_d>0$ ）状态；次同步再生（转矩  $T_d<0$ ）状态；超同步（高于同步速， $s<0$ ）电动状态；超同步再生状态。这四种工作状态的功率流图见图 14-4-73。

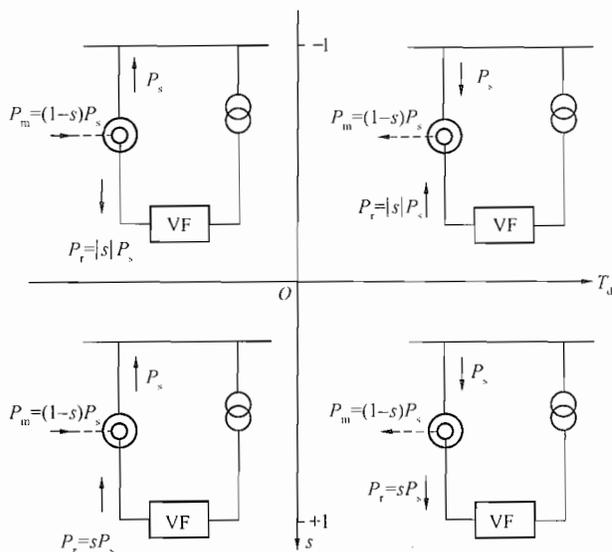


图 14-4-73 四种工作状态的功率流图

转子侧高效调速的特点是：

- 1) 适合于大容量的绕线型异步电动机，其转差功率可返回电网，或加以利用，效率较高。
- 2) 可平滑无级调速。
- 3) 转子回路接有整流器，转子电流单方向流动，不能产生制动转矩。
- 4) 空载速度能平滑下移，无失控区。
- 5) 在未采取补偿措施时，功率因数低，但超同步运行时功率因数高。
- 6) 在未采取保护措施时，电网电压突然大幅度降低，串调装置可能停止运行。
- 7) 转子侧调速多用于中压绕线转子异步电动机，它的转子电压是低压，VF 为低压变频器，避免了定子侧中压变频带来的许多麻烦。
- 8) 转子侧串级和双馈调速多用于调速范围小的场合，通常转差率  $s < 0.4$ ，转子功率  $P_r = sP_s$  小，VF 容量比电动机额定容量小很多。

基于上述特点，转子侧高效调速系统在风机和泵类机械、小型连续轧机、大功率飞轮储能装置、变速发电（工作于再生状态）等场合得到广泛应用。

(2) 串级调速系统。常见串级调速系统有传动串级调速系统（晶闸管逆变串级调速）、斩波 + 晶闸管逆变串级调速系统、斩波 + PWM 逆变串级调速系统等多种方式。

1) 传统串级调速系统（晶闸管逆变串级调速）。传统串级调速系统原理见图 14-4-74。它的调速装置 VF 是晶闸管电流型交-直-交变频器，由不可控整流器 UR、直流储能电抗器  $L$  和晶闸管逆变器 UI 组成。工作时通过改变 UI 的触发延迟角  $\alpha$  ( $\alpha > 90^\circ$ ) 来改变直流电压  $U_{BR}$ ，从而改变转子电压  $U_R$ ，实现调速。

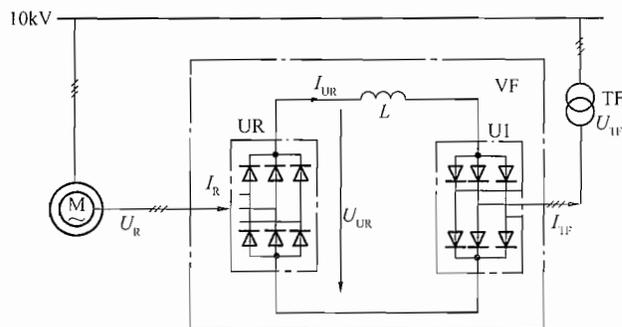


图 14-4-74 传统串级调速系统原理图

传统串级调速系统简单，有转子侧高效调速的三大优点，但也存在许多影响应用的缺点：

- a. 功率因数低。
- b. 谐波大，它主要由逆变器 UI 产生。
- c. 储能直流电抗器  $L$  体积、质量大，损耗比储能电容大。

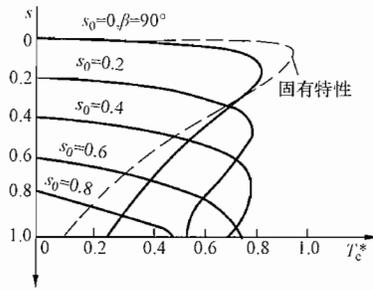


图 14-4-75 电动机在串级调速时的机械特性

d. 当电网故障，电压突然降低过多时，晶闸管逆变器 UI 将颠覆，烧快速熔断器。

e. 由于在转子回路中加入了许多元器件，使转子回路电阻增加，另外 UR 整流重叠角也在转子回路中引入等效电阻，导致电动机在串级调速时的机械特性变软（见图 14-4-75），满载时的最高转速低于电动机额定转速。

2) 斩波 + 晶闸管逆变串级调速系统。为改善传统串级调速的功率因数，开发了斩波 + 晶闸管逆变串级调速系统，已用于产品。斩波 + 晶闸管逆变串级调速原理见图 14-4-76，与传统串级调速（见图 14-4-74）相比，在 VF 中增加了由电感  $L_S$ 、斩波开关 CS、二极管 SD 和储能电容  $C_S$  组成的升压斩波环节 BC。工作时晶闸管逆变器的触发超前角固定于最小值  $\beta_{\min} = 30^\circ$ ，逆变直流电压  $U_D$  基本不变，串入转子电路的直流电压为

$$U_{UR} = (1 - D)U_D \quad (14-4-22)$$

通过改变斩波占空比  $D$  实现调速。

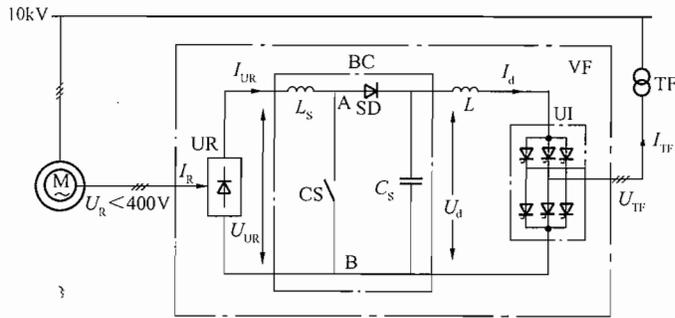


图 14-4-76 斩波 + 晶闸管逆变串级调速原理图

斩波 + 晶闸管逆变串级调速具有转子侧高效调速的三大特点，与传统串级调速相比，斩波 + 晶闸管逆变串级调速的优点是：

- a. UI 的触发超前角固定于最小值  $\beta_{\min}$ ，由晶闸管逆变器 UI 产生的无功功率  $Q_{UI}$  减至最小，功率因数改善。
- b. 若负载为风机或泵，负载转矩与转速二次方成比例，逆变器 UI 的容量可进一步减小至  $(0.2 \sim 0.3) P_N$  ( $P_N$  为电动机额定功率)。
- c. 由于拖动风机和泵时 UI 容量减小，变压器 TF 和电抗器  $L$  的容量、体积、重量减小，无功  $Q_{UI}$  和谐波量也相应减小。

斩波 + 晶闸管逆变串级调速的不足是:

- 需要两台电抗器, 体积、质量和损耗偏大。两套储能 (电感储能和电容储能), 设备多。
- 电动机的无功功率  $Q_{\text{ex}}$  和  $Q_{\text{u}}$  没减小, 加之 UI 产生的少量无功功率  $Q_{\text{UI}}$ , 功率因数仍偏低。UI 仍产生 5、7 等次谐波。
- 仍存在电网电压突然降低, UI 逆变颠覆问题。
- 仍存在机械特性变软, 最高转速达不到电动机额定转速问题。

3) 斩波 + PWM 逆变串级调速系统。把晶闸管逆变器 UI 改为电压型 PWM 逆变器 UPI 可以克服斩波 + 晶闸管逆变串级调速系统的不足。斩波 + PWM 逆变串级调速原理见图 14-4-77。图中的 PWM 逆变器 UPI 是一台处于逆变工作状态的低压 PWM 整流器——有源前端 (AFE) 整流器, 它的电压控制外环保证直流电压  $U_{\text{d}}$  恒定, 根据式 (14-4-22), 只要通过改变斩波开关 CS 的占空比  $D$ , 就能实现调速。由于 UPI 是电压型逆变器, 所以在直流回路中无储能电抗器  $L$ 。当斩波开关 CS 的开关频率选到 2kHz 左右时, 仅靠电动机漏感已能满足升压斩波需要, 不需电感  $L_{\text{s}}$ , 但为减小 CS 开关的  $du/dt$  高的影响, 仍保留  $L_{\text{s}}$  (电感值较小)。

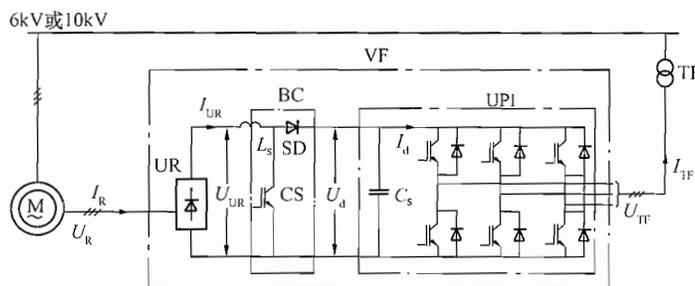


图 14-4-77 斩波 + PWM 逆变串级调速原理图

斩波 + PWM 逆变串级调速具有转子侧高效调速的三大特点, 与斩波 + 晶闸管逆变串级调速相比, 斩波 + PWM 逆变串级调速的优点是:

- PWM 逆变器可以产生容性无功功率, 部分补偿电动机的无功功率  $Q_{\text{ex}}$  和  $Q_{\text{u}}$ , 功率因数进一步提高 (可高于异步电动机本身的功率因数)。
- PWM 逆变器电网侧的电流为正弦波, 不产生 5、7 等次谐波。
- AFE 具有抗电网故障、电压突然降低的能力, 不存在 PWM 逆变颠覆问题。
- 直流回路少一台庞大的储能电抗器。

斩波 + PWM 逆变串级调速的缺点是仍存在机械特性变软, 最高转速达不到电动机额定转速问题。

4) 串级调速系统的转矩控制。电动机转矩近似比例于转子电流  $I_{\text{R}}$ , 可以通过 UR 整流后的直流电流  $I_{\text{UR}}$  反馈实现转矩闭环控制。

(3) 双馈调速系统。双馈调速系统的调速装置 VF 可以是各种能四象限工作的变频装置, 常用的有两种: 交-交变频器和电压型双 PWM 交-直-交变频器 (PWM 整流 + PWM 逆变)。基于交-交变频的双馈调速用于大功率场合, 例如: 轧机主传动, 飞轮储能, 大型

水轮发电机的变速发电等。使用交-交变频器会给电网带来较大无功功率和谐波，但由于双馈调速的调速范围较小，变频器容量远小于电动机功率，这些无功功率和谐波影响不大。基于双PWM交-直-交变频的双馈调速用于中大功率场合，例如风力发电等。使用双PWM交-直-交变频器不会给电网带来无功功率和谐波。

双馈调速系统除了具有转子侧高效调速的三大特点外，还有下述特点：

1) 可以工作于次同步和超同步转速，在总调速范围不变条件下，最大转差率可以比串级调速减小一半，相应的调速装置容量也小一半。

2) 可以工作于电动状态和再生发电状态，所以既可用于电动机调速，也可用发电机变速发电。

3) 转子回路中无不可控整流器，无换相重叠角，转子电流正弦。

4) 可以通过改变转子电压的幅值和相角，控制定子电流相位和电动机功率因数。

双馈调速系统的不足是四象限变频器价高，控制复杂，难以用于普通调速场合（目前主要用于风力发电和大功率变速发电）。

#### 14.4.3.5 转子轴上交流调速系统

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》7.4.2、《钢铁企业电力设计手册》下册25.2.4节。

(1) 电磁转差离合器调速系统。电磁转差离合器调速系统见图14-4-78，由笼型异步电动机、电磁转差离合器和晶闸管励磁装置组成。晶闸管直流励磁电源功率小，常用单相整流。

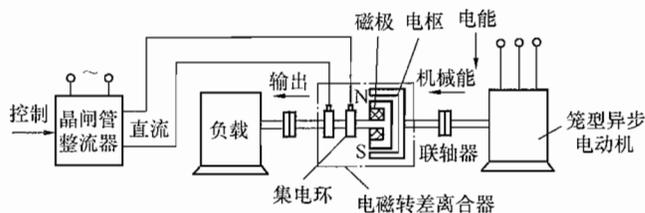


图 14-4-78 电磁转差离合器调速系统

电动机、电磁转差离合器和晶闸管励磁装置组成。晶闸管直流励磁电源功率小，常用单相整流。电磁转差离合器由电枢和磁极两部分组成，两者无机械联系，都可自由转动。电枢是一个金属碗，无绕组，由电动机带动恒速旋转、称为主动部分；磁极用联轴器与负载相连，称为从动部分。当励磁绕组通以励磁电流时，在电枢中感应出涡流，涡流与磁场作用产生转矩，带动磁极和负载转动。如负载恒定，励磁电流越大，磁场越强，只需在电枢和磁极间有较小转差率，就能产生足够的转矩带动负载，输出轴转速就高。如励磁恒定，负载越大，需要的转差率越大，输出轴转速就低。所以通过改变励磁电流即可实现对负载的调速。

电磁转差离合器调速系统在不同励磁电流时的开环机械特性见图14-4-79(a)，是一族下垂软特性曲线，空载转速 $n_0$ 不变，随转矩增加，转速下降多，励磁电流越小，特性越软，在负载转矩小于10%额定转矩时有一个失控区。采用转速闭环控制可以得到图14-4-79(b)所示较硬的机械特性，转速负反馈使负载增加引起的转速降由增加励磁来补偿，从而使转速在负载变化时保持稳定。闭环控制的转速变化率在2%左右，调速范围达10:1。

电磁转差离合器调速系统的特点为：

1) 由于电磁转差离合器调速装置的电动机是笼型异步电动机，转差离合器的磁极线圈也是集中绕组，控制系统也比较简单，因而这种调速装置具有较高的可靠性，且价格便宜，维护容易。

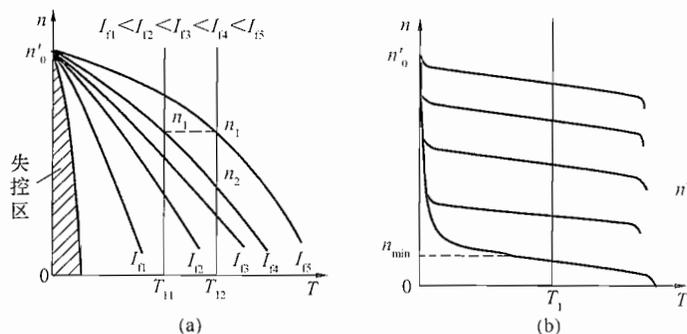


图 14-4-79 电磁转差离合器调速系统的机械特性  
(a) 开环特性; (b) 闭环特性

- 2) 调速平滑, 可以进行无级调速, 调速范围较大, 也有一定的调速精度。
- 3) 运行很平稳, 不存在脉动转矩引起负载机械振动或共振问题。而且当负载或原动机受到突然的冲击时, 离合器可以起缓冲的作用。
- 4) 对电网无谐波影响。
- 5) 控制装置容量小, 一般为电动机容量的 1% ~ 2%, 因此安装面积占地小。
- 6) 低速时效率很低, 电磁离合器传递效率的最大值为 80% ~ 90%。在任何转速下离合器的传递效率  $\eta$  用下式表示

$$\eta = \frac{n_2}{n_1} = 1 - s$$

式中  $n_2$ ——离合器的输出转速, r/min;

$n_1$ ——传动电动机转速, r/min;

$s$ ——转差率,  $s = (n_1 - n_2) / n_1$ 。

因此随着输出转速的降低, 传递效率亦相应降低, 这是因为电枢中的涡流损失与转差成正比的缘故, 所以这种调速系统不适于长期处于低速的生产机械。

7) 负载端速度损失大, 额定转速仅为电动机同步转速的 80% ~ 85%; 用低电阻端环的转差离合器时其额定转速可达 95%。

8) 负载小时有 10% 额定转矩的失控区。

9) 电磁转差离合器调速电机适用于通风机, 水泵类负载和恒转矩负载的机械, 而不适用于恒功率负载。

## (2) 液力耦合器调速。

1) 液力耦合器调速原理。液力耦合器是一种装于电动机轴和负载轴之间的机械无级调速装置, 它由两个互不接触的金属叶轮组成, 一个与电动机轴连接, 另一个与负载轴连接, 两个轮间充满油, 利用油和叶轮间的摩擦力来传输转矩, 带动负载转动。油压越大, 液力耦合器传递的转矩越大, 因此可以通过调节油压来改变转矩, 从而实现调速。

液力耦合器调速是一种低效的调速方法, 它的转差能量变成油的热能而消耗掉, 漏油和机械磨损也是影响这种调速方法应用的重要原因, 随变频技术发展, 它正逐步被取代。

2) 出口调节式液力耦合器 (《钢铁企业电力设计手册》下册 25.7 节)。

a. 工作原理。液力耦合器是液力传动元件，又称液力联轴器，它是利用液体的动能来传递功率的一种动力式液压传动设备。将其安装在异步电动机和工作机（如风机、水泵等）之间来传递两者的扭矩，可以在电机转速恒定的情况下，无级调节工作机的转速，并具有空载起动，过载保护，易于实现自动控制等特点。

液力耦合器有三种基本类型：普通型、限矩型和调速型。

调速型液力耦合器又可分为进口调节式和出口调节式。其调速范围对恒转矩负载约为3:1，对离心式机械（风机、泵类）约为4:1，最大可达5:1。

以出口调节式液力耦合器为例说明其工作原理，结构示意图见图14-4-80。

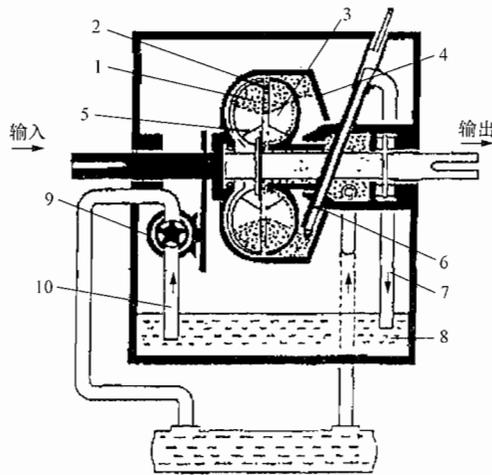


图 14-4-80 出口调节式液力耦合器结构图

- 1—涡轮；2—工作腔；3—泵轮；4—勺管室；  
5—挡板；6—勺管；7—排油管；8—油箱；  
9—主循环油泵；10—吸油管

液力耦合器相当于离心泵和涡轮机的组合，当电机通过液力耦合器输入轴驱动泵轮时，泵轮如一台离心泵，使工作腔中的工作油沿泵轮叶片流道向外缘流动，液液流出后，穿过泵轮和涡轮间的空隙，冲击涡轮叶片以驱动涡轮，使其像涡轮机一样把液体的动能和压能转变为输出的机械能，然后液体又经涡轮内缘流道回到泵轮，开始下一次循环，从而把电机的能量柔性传递给工作机。

液力耦合器在运转时，工作油供油泵从液力耦合器油箱里吸油经冷却器冷却后送至勺管壳体中的进油室，并经泵轮入油口进入工作腔。同时工作腔中的油液从泵轮泄油孔泄入外壳（勺管室），形成一个旋转油环。调速是通过勺管室内勺管的移动进行的，导管的移动由外面控制，勺管口的径向位置决定了勺管室里油环的厚度，因此也决定了工作腔里的油量，这个

油量也就决定了工作腔里的油量，这个油量也就决定了输出轴转速的高低。当勺管伸入旋转着的油环时，油就从勺管内引出，减少了油环的厚度，使输出轴转速降低，相反勺管缩回时，引出的油量减少，使油环厚度增大，工作腔内保持较多油量，输出轴的转速上升。

b. 调速型液力耦合器的选配设计计算。一般厂家提供的产品样本都列有耦合器的适用条件和范围，但在使用时仍应进行校验计算，以满足最不利工况的需要。下面介绍两种简单的方法。

(a) 查表法。用计算出的负荷容量和转速，从产品样本的有关曲线和参数表中初步选定。

(b) 确定耦合器有效工作直径法。可按下列下式

$$D = K \sqrt[5]{\frac{P_N}{n_B^3}}$$

式中  $D$ ——耦合器的有效工作直径，m；

$K$ ——系数，与耦合器性能有关， $K=14.7 \sim 13.8$ ，工程一般选用 14.7；

$P_N$ ——负载额定轴功率，kW；

$n_B$ ——泵轮转速, r/min。

如果工作机的实际负载不知道, 可以用电动机的额定功率和转速来计算, 这样, 一般耦合器选择偏大。

c. 液力耦合器特征参数计算。

(a) 转矩。耦合器涡轮转矩 ( $M_T$ ) 与泵轮转矩 ( $M_B$ ) 相等或者说输出转矩等于输入转矩

$$M_B = M_T \text{ 或 } M_1 = M_2$$

(b) 转速比  $i$ 。涡轮转速 ( $n_T$ ) 与泵轮转速 ( $n_B$ ) 之比

$$i = \frac{n_T}{n_B}$$

(c) 转差率  $s$ 。泵轮与涡轮的转速差与泵轮转速的百分比

$$s = \frac{n_B - n_T}{n_B} \times 100\% = (1 - i) \times 100\%$$

调速型液力耦合器的额定转差率  $s_N \leq 3\%$

(d) 效率  $\eta$ 。输出功率与输入功率之比

$$\eta = \frac{P_T}{P_B} = \frac{M_T n_T}{M_B n_B} = \frac{\eta_T}{\eta_B} = i$$

即效率与转速比相等。因此, 通常使之在高速比下运行, 其效率一般为 0.96 ~ 0.97。

(e) 泵轮转矩系数  $\lambda_B$ 。这是反映液力耦合器传递转矩能力的参数。

耦合器所能传递的转矩值  $M_B$  与液体比重  $\gamma$  的一次方、转速  $n_B$  的二次方, 以及工作轮有效直径  $D$  的五次方成正比, 即

$$M_B = \lambda_B \gamma n_B^2 D^5$$

或

$$\lambda_B = \frac{M_B}{\gamma n_B^2 D^5}$$

$\lambda_B$  与耦合器腔型有关, 其值由试验确定,  $\lambda_B$  值高, 说明耦合器的性能较好。

(f) 过载系数  $\lambda_m$ 。指能传递的最大转矩  $M_{\max}$  与额定转矩  $M_N$  之比

$$\lambda_m = \frac{M_{\max}}{M_N}$$

#### 14.4.4 电气传动装置的谐波电流

由于电力电子器件的非线性和波形非正弦的特点, 由电力电子器件组成的电气传动自动化装置的电源侧 (网侧) 的电流不仅含有基波, 还含有丰富的谐波。而由半控型电力电子器件组成的电气传动装置又具有固有的功率因数低的缺点。这些都会给电网的运行和效率带来不良的影响, 同时也会对接在该公用电网中的其他用电设备带来一些不良的影响甚至危害。

##### 14.4.4.1 直流传动装置的谐波电流

依据: 《电气传动自动化技术手册 (第3版)》11.2.1节。

在直流传动系统中的整流装置, 其负载是电阻 (反电动势) ——电感性质, 本节介绍常用的网侧谐波电流计算方法。

假设网侧电压、供电变压器参数、电抗器参数和触发延迟角等均各相对称, 整流电流按近似方波考虑。在上述条件下, 网侧谐波电流次数  $h$  为

$$h = km \pm 1$$

式中  $k$ ——正整数,  $k=1, 2, 3\cdots$ ;

$m$ ——整流装置输出电压脉波数。

当  $m=6$  (例如:三相桥式整流) 时, 谐波电流的次数为 5、7、11、13、17、19、23、25…。在考虑谐波电流的影响时, 一般情况下, 考虑到 25 次已足够。

这种次数为正整数的谐波又称为特征谐波。实际上, 由于各种非理想因素的存在, 例如: 电网电压的不对称、触发延迟角不对称的影响, 还存在着非特征次数或不是正整数的分数次谐波。但这些谐波的幅值通常都很小, 在工程设计计算中一般可以不考虑它们的影响。

$h$  次谐波电流的有效值  $I_h$  可按下式计算

$$I_h = \frac{I_1}{h} \times \frac{\sin(h\gamma/2)}{h\gamma/2} \quad (14-4-23)$$

式中  $I_1$ ——网侧基波电流有效值;

$\gamma$ ——换相重叠角, rad。

当换相重叠角很小时,  $\frac{\sin(h\gamma/2)}{h\gamma/2} \approx 1$ , 式 (14-4-23) 成为

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (14-4-24)$$

按式 (14-4-23) 计算得出的谐波电流, 特别是高次数的谐波电流都偏大。在工程设计计算中, 可按式 (14-4-25) 计算  $h$  次谐波电流的有效值  $I_h$ 。

$$I_h = k_h \frac{I_1}{h} \quad (14-4-25)$$

式中  $I_1$ ——网侧基波电流有效值;

$k_h$ ——修正系数, 可按脉波数  $m$  从表 14-4-17 中查得。

表 14-4-17 修正系数  $k_h$  的取值表

$h$	5	7	11	13	17	19	23	25
$m=6$	1.0	1.0	0.75	0.70	0.50	0.40	0.25	0.20
$m=12$	0.3	0.3	0.75	0.70	0.20	0.15	0.25	0.20

在表 14-4-17 中,  $m=12$  也包括由两个  $m=6$  的整流单元并联或串联, 这两个整流单元电源相位差  $30^\circ$ , 而构成  $m=12$  的整流装置。

对于  $m=6$  的整流装置, 也可按下式估算谐波电流  $I_h$

$$I_h = \frac{I_1}{\left(h - \frac{5}{h}\right)^{1.2}} \quad (14-4-26)$$

对于换相重叠角较小的整流装置, 用式 (14-4-25) 或式 (14-4-26) 计算谐波电流较为合适。对于换相重叠角较大的整流装置, 可用式 (14-4-23) 计算谐波电流并参照表 14-4-17 对次数较高的谐波电流做适当的修正。

对于广泛应用的三相桥式的整流装置, 其网侧基波电流有效值  $I_1$  可按下式计算

$$I_1 = \frac{\gamma/2}{\sin(\gamma/2)} \times \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

式中  $I_d$ ——整流电流平均值;

$\gamma$ ——换相重叠角, rad。

当  $\gamma$  很小时

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = 0.78 I_d$$

#### 14.4.4.2 交-交变频器的谐波电流

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》11.2.2节。

交-交变频器实际上就是其直流输出电压按正弦波调制的可逆整流器。因此,它和一般的整流器一样,其网侧电流中除基波外,也含有  $km \pm 1$  次的整数次谐波电流。这些谐波电流的频率只和交-交变频器的输入(网侧)频率和相数有关,称为特征谐波。除此之外,其网侧电流中还存在着与交-交变频器的输出频率和相数有关的非整数次谐波电流,称为旁频谐波。交-交变频器网侧电流总的频谱为

$$f_v = \sum |(pm \pm 1)f_n \pm 2qnf_0|$$

式中  $f_v$ ——交-交变频器网侧电流的频率;

$f_n$ ——交-交变频器电源(电网)的频率;

$f_0$ ——交-交变频器输出的频率;

$m$ ——交-交变频器对电源的脉波数;

$n$ ——交-交变频器输出的相数;

$p$ ——正整数,  $p=0, 1, 2, 3, \dots$

$q$ ——正整数,  $q=1, 2, 3, \dots$

例如:对电源为6脉波、输出为三相交-交变频器,其网侧电流除了有  $f_v = f_n$  的基波外,还有  $f_v = 5f_n, 7f_n, 11f_n, 13f_n, \dots$ , 整数次的特征谐波,以及  $f_v = f_n \pm 6qf_0, 5f_n \pm 6qf_0, 7f_n \pm 6qf_0, 11f_n \pm 6qf_0, 13f_n \pm 6qf_0, \dots$ , 一般是非整数次的旁频谐波。而实际上,由于变频器的输出电流不是完全的正弦波以及输出电流过零死区等的影响,还存在  $\pm 2qf_0, \pm 4qf_0$  的旁频。由于交-交变频器网侧电流谐波的次数和大小不仅和输入频率、输出频率和相数有关,而且还和变频器主电路的结构有关。因此理论计算各谐波的次数和大小是很复杂的。由于理论计算比较困难,并且做了很多理想化的假设,其计算得到的结果与实际情况有相当的差距,因此在工程应用中,一般是采用计算机仿真或与类似应用现场实测数据相比较的方法来确定变频器网侧谐波电流。表14-4-18给出了一个6脉波整流的三相交-交变频器通过计算机仿真得到的交-交变频器各次谐波电流有效值与基波电流有效值之比的数据,可供参考。

表 14-4-18 谐波电流有效值与基波电流有效值之比 (%)

$f_v/\text{Hz}$	50	250	350	550	650
$0f_0$	100.0	11.8	5.5	2.2	1.5
$-2f_0$	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0
$+2f_0$	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0
$-4f_0$	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0
$+4f_0$	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0

续表

$f_c/\text{Hz}$	50	250	350	550	650
$-6f_0$	6.4	1.5	1.0	1.0	1.0
$+6f_0$	3.4	3.6	2.6	1.0	1.0
$-12f_0$	2.8	2.0	1.9	1.0	1.0
$+12f_0$	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
$-18f_0$	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7
$+18f_0$	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7
$-24f_0$	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7
$+24f_0$	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7

由表 14-4-18 可知：交-交变频器的特征谐波的次数与直传动整流装置的特征谐波的次数相同，不过其幅值却比较小，这对谐波治理是有利的。但交-交变频器有非特征谐波（旁频），其频谱很广，而且其频率与变频器的输出频率有关，这一点给交-交变频器的谐波治理带来一些不利的因素。

#### 14.4.4.3 电压源交-直-交变频器的谐波电流

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》11.2.3节。

本节讨论的是目前在中小功率变频器中应用最广泛的电压源交-直-交变频器的谐波电流。这种变频器由整流器（交流整流成直流）和逆变器（直流逆变成交流）两部分组成。通常，整流器为三相桥式不可逆或可逆整流，输出侧有大电容可看作是电压源，逆变器为 PWM 方式。

(1) 变频器网侧谐波电流的次数。对电网而言，变频器就是一个整流装置，其网侧谐波电流次数  $h$  为

$$h = km \pm 1$$

式中  $k$ ——正整数， $k=1, 2, 3, \dots$ ；

$m$ ——整流器整流脉波数。

整流器为三相桥式整流（ $m=6$ ）时，变频器网侧谐波电流的次数为 5、7、11、13、17、19、23、25…在考虑谐波电流的影响时，一般情况下，考虑到 25 次已足够。

(2) 变频器网侧电流的谐波含量。变频器中的整流器与直传动整流装置有所不同：变频器中整流器的负载是电容-电阻性质，在轻载时，整流器网侧电流可能不连续，即使负载增加而使电流连续时，其波形也与直传动整流装置网侧电流的波形不一样。一般说来，电压源交-直-交变频器网侧电流的谐波含量要比直传动整流装置网侧电流的谐波含量要大一些。

由于整流器的负载是电容-电阻性质，因此理论计算网侧谐波比较复杂。多数较知名的变频器厂商都可以提供所制造的变频器的谐波含量的数据或资料，读者可以据此计算谐波含量。如果得不到相关的数据或资料时，也可由表 14-4-19 或表 14-4-20 来估算变频器的谐波含量。

表 14-4-19 额定负载时谐波含量表

	$I_h/I_1$ (%)							
	5	7	11	13	17	19	23	25
交流侧有电抗器	38	14.5	7.4	3.4	3.2	1.9	1.7	1.3
直流侧有电抗器	30	13	8.4	5.0	4.7	3.2	3.0	2.2
交直流侧都有电抗器	28	9.1	7.2	4.1	3.2	2.4	1.6	1.4

注 1.  $I_h$ — $h$  次谐波电流有效值;  $I_1$ —基波电流有效值。  
2. 整流器为三相桥式整流, 变频器负载为额定值。

表 14-4-20 不同负载率时基波及谐波含量表

$I_0/I_{ON}$	$I_A/I_{ON}$ (%)								
	基波	5	7	11	13	17	19	23	25
25%	26	15	7.8	2.6	1.7	1.3	0.80	0.60	0.46
50%	52	23	8.9	4.1	2.3	1.8	1.2	0.82	0.69
75%	77	28	8.9	5.4	2.7	2.3	1.7	1.0	0.90
100%	103	32	9.1	6.2	3.5	2.5	1.9	1.3	1.2

注 1.  $I_h$ — $h$  次谐波电流有效值。  
2.  $I_0$ —变频器输出电流有效值;  $I_{ON}$ —变频器额定输出电流有效值。  
3. 整流器为三相桥式整流, 整流器交流侧有进线电抗器。

## 14.5 交、直流电动机电气制动方式及计算方法

### 14.5.1 能耗制动

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》5.1.2.2节。

能耗制动是将运转中的电动机与电源断开并改接为发电机,使电能在其绕组中消耗(必要时还可消耗在外接电阻中)的一种电制动方式。

交流笼型和绕线转子异步电动机采用能耗制动时,应在交流供电电源断开后,立即向定子绕组(可取任意两相绕组)通入直流励磁电流  $I_f$ ,以便产生制动转矩。制动转矩的大小取决于直流励磁电流  $I_f$  的大小及电动机的转速。当  $n \approx n_0$  时,制动转矩最大;随着转速  $n$  的降低,制动转矩急剧减小。当  $n = (0.1 \sim 0.2)n_0$  时,制动转矩达到最小值。为获得较好的制动特性,励磁电流  $I_f$  通常取电动机定子空载电流  $I_0$  的 1~3 倍。绕线转子异步电动机能耗制动时,应在转子回路中串接  $(0.3 \sim 0.4)R_{2N}$  的常接电阻,可使平均制动转矩等于额定转矩(此时平均制动转矩值为最大)。制动时,励磁所用直流电源  $U_b$  可为 48、110V 或 220V,为减小在附加制动电阻  $R_b$  上的能量损耗,在供电条件允许的情况下,  $U_b$  越小越好。在多电动机集中控制而又都采用能耗制动的情况下(如大型轧钢车间),可设置专用的直流 48V 能耗制动电源,这样更为经济。

同步电动机采用能耗制动时,可将其定子从电源上断开后,接到外接电阻或频敏变阻器上,并在转子中继续通入适当的励磁电流,电动机即转入能耗制动状态工作。此时电动机作为一台变速的发电机运转,将机械惯性能量消耗在外接电阻或频敏变阻器上。采用频敏变阻器制动,其制动性能比用电阻时更为优良。

表 14-5-1 列举各种电动机能耗制动的接线方式、制动特性及其适用范围。

表 14-5-1 各种电动机能耗制动的性能

电动机类型	异步电动机	直流电动机	同步电动机	
			电阻	频敏变阻器
接线方式				
制动特性				
参数	<p>一般取 <math>I_f = (1 \sim 3) I_0</math></p> <p><math>I_f</math> 越大, 制动转矩越大</p> $R_b = \frac{U_f}{I_f} - 2r_{Ms}$	<p>制动电阻</p> $R_b = \frac{E}{I_b} - R_a$ <p>一般取</p> $I_b = (1.5 \sim 2.0) I_N$	$Z_1 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}I_f}$ $R_b = K_1 Z_1 - r_{Ms}$ <p>一般取 <math>I_1 = I_N</math></p> $I_f = 1 \sim 2I_{1N}$	
特点	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 制动转矩较平滑, 可方便地改变制动转矩。</li> <li>2. 制动转矩随转速的降低而减小。</li> <li>3. 可使生产机械可靠地停止。</li> <li>4. 能量不能回馈电网, 效率较低。</li> <li>5. 串励直流电动机因其励磁电流随制动电流的减小而减小, 低速时不能得到需要的制动转矩, 不宜采用能耗制动</li> </ol>			
适用的场所	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适用于经常起动、频繁逆转并要求迅速准确停车的机械, 如轧钢车间升降台等。</li> <li>2. 并励直流电动机一般采用能耗制动。</li> <li>3. 同步电动机和大容量笼型异步电动机因反接制动冲击电流太大, 功率因数低, 也多采用能耗制动。</li> <li>4. 交流高压绕线转子异步电动机为防止集电环上感应高压, 也多采用能耗制动。</li> <li>5. 采用一套变流器供电的不可逆晶闸管供电系统, 也多采用能耗制动</li> </ol>			

注  $I_{1N}$ —定子额定电流 (A);  $I_f$ —励磁电流 (A);  $I_{1N}$ —转子额定励磁电流 (A);  $I_b$ —初始制动电流 (A);  $K_1$ —制动时阻抗与额定阻抗的比值;  $U_{1N}$ —定子额定电压 (V);  $E$ —制动时电枢反电动势 (V);  $R_b$ —制动电阻 ( $\Omega$ );  $R_a$ —电枢电阻 ( $\Omega$ );  $R_d$ —电动机定子绕组电阻 ( $\Omega$ );  $U_f$ —直流励磁电压 (V);  $r_{Ms}$ —电动机定子绕组每相电阻 ( $\Omega$ );  $I_0$ —定子空载电流 (A)。

交流电动机能耗制动时的机械特性曲线, 可由电动机资料查取。

### 14.5.2 反接制动

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》5.1.2.3节。

反接制动是将三相交流异步电动机的电源相序反接或将直流电动机的电源极性反接而产生制动转矩的一种电制动方法。表 14-5-2 中列出几种电动机采用反接制动时的接线方式、

制动特性及其适用的范围。

表 14-5-2

反接制动的接线方式和制动特性

电动机类型	异步电动机	直流电动机
接线方法		
制动特性		
制动电阻 (Ω) 计算	$R_{\Sigma} = \frac{s_{\beta} R_{2N}}{T_{\beta}^*}$ $r_{fb} = R_{\Sigma} - \sum r_s - r_N$ $R_{2N} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} r_N = s_N R_{2N}$ <p>一般取 <math>T_{\beta}^* = 1.5 \sim 2.0</math></p>	$r_{fb} = \frac{U_N + E_{\max}}{I_{b\max}} - r_a + \sum r_s$ <p>一般取 <math>I_{b\max} = (1.5 \sim 2.0) I_N</math></p>
特点	<p>(1) 在任何转速下制动都有较强的制动效果。</p> <p>(2) 制动转矩较大且基本恒定。</p> <p>(3) 制动开始时, 直流电动机电枢或交流电动机定子上相当于施加两倍额定电压, 为防止初始制动电流过大, 应串入较大阻值的电阻, 能量损耗较大, 不经济。</p> <p>(4) 绕线转子异步电动机采用频敏变阻器进行反接制动最为理想, 因反接开始时, <math>s_{\beta} = 2</math>, 频敏变阻器阻抗增大一倍, 可以较好地限制制动电流, 并得到近似恒定的制动转矩。</p> <p>(5) 制动到零时应切断电源, 否则有自动逆转的可能</p>	

续表

电动机类型	异步电动机	直流电动机
适用的场所	(1) 适用于需要正、反转的机械，如轧钢车间辊道及其他辅助机械 (2) 串励直流电动机多用反接制动 (3) 笼型电动机因转子不能接入外接电阻，为防止制动电流过大而烧毁电动机，只有小功率（10kW以下）电动机才能采用反接制动	

注  $R_{\Sigma}$ —反接制动时，转子回路总电阻；  
 $T_{\beta}^*$ —反接制动转矩的标么值。 $T_{\beta}^* = T_{\beta}/T_N$ ；  
 $s_{\beta}$ —反接制动开始时，电动机的转差率，一般取  $s_{\beta} = 2$ ；  
 $\Sigma r_s$ —起动电阻之和；  
 $s_N$ —额定转差率；

$r_{\beta}$ —反接制动电阻；  
 $I_{bmax}$ —允许最大的反接制动电流；  
 $E_{max}$ —电动机最大反电动势；  
 $r_a$ —电动机电枢电阻

反接制动时，电动机转子电压很高，有较大的反接制动电流。为了限制反接电流，在转子中必须再串接反接制动电阻  $r_{\beta}$ 。绕线转子异步电动机在反接制动时，转子接频敏变阻器比接电阻更好。因其阻抗可随频率的变化而变化，能自动地限制反接制动电流，因此它更适应于经常反接的系统，能获得平滑的正反向运转。

反接继电器 KA1、KA2 是保证当反接制动开始时，将反接电阻  $r_{\beta}$  接入电路，而当制动到电动机转速接近于零时，将电阻  $r_{\beta}$  短接。因此要正确地整定反接继电器的吸合电压及其线圈的连接点，见图 14-5-1 继电器 KA2 的线圈连接在 A、B 两点上。当反接制动开始时，KA2 断开，电阻  $r_{\beta}$  接入，以限制反接制动电流。此时使电源电压  $U_N$  与电阻  $r_x$  上压降相等，则电动机

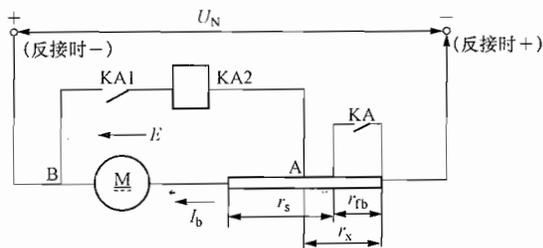


图 14-5-1 反接继电器整定简图

的反电动势  $E$  大致上与  $r_s$  上的压降相等，所以继电器 KA2 线圈两端电压接近于零，KA2 不吸合。当电动机转速接近零时， $E = 0$ ，KA2 线圈两端电压升高，KA2 吸合，使 KA2 吸合，KA2 触头将  $r_{\beta}$  短接。反接制动完毕。

连接点 A 由下述关系决定，反接开始时，制动电流  $I_b = I_{bmax}$ ， $E = E_{max} \approx U_N$ ，所以有

$$I_{bmax} r_x = U_N$$

$$r_x = \frac{U_N}{I_{bmax}}$$

由于  $I_{bmax} = (U_N + E_{max}) / R_{\Sigma}$ ， $R_{\Sigma} = r_s + r_{\beta}$ ，所以

$$r_x = R_{\Sigma} \frac{U_N}{U_N + E_{max}} \approx \frac{1}{2} R_{\Sigma}$$

即继电器 KA2 连接点 A，应设在电阻  $R_{\Sigma}$  值的一半处，KA2 的吸合电压一般整定在  $0.4 \sim 0.45 U_N$ 。

## 14

### 14.5.2.1 反接制动的安全要求

GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》中有关反接制动的强制性条文：

2.5.5 当反转会引起危险时，反接制动的电动机应采取防止制动终了时反转的措施。

### 14.5.2.2 绕线型电动机反接制动电阻的选择和计算

依据：《钢铁企业电力设计手册》24.3.3 节。

绕线型电动机带有反接制动的主回路接线图见图 14-5-2。

反接制动时，电动机的转子电压较高，并有很大的制动电流，为此必须接入反接制动电阻，以限制制动电流。

其计算方法如下：

反接制动时，转子回路总电阻标么值为

$$R_{*\Sigma} = \frac{s_{fj}}{M_{*fj}}$$

反接制动电阻标么值为

$$R_{*fj} = R_{*\Sigma} - R_{*q}$$

式中  $s_{fj}$ ——反接制动时电动机的转差率，一般取  $s_{fj} = 2$ ；

$M_{*fj}$ ——反接制动转矩标么值，一般取  $1.5 \sim 2.0$ ；

$R_{*q}$ ——转子回路总起动电阻标么值（包括转子内电阻）。

一般取反接制动电阻的发热等效电流， $I_{*dsfj} = 0.4$ （ $Z = 300$  次/h）、 $I_{*dsfj} = 0.6$ （ $Z = 600$  次/h）。

### 14.5.3 回馈制动

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》5.1.2.4节。

回馈制动是当三相交流异步电动机转速大于理想空载转速时，将电能返回电源系统的一种电制动方式。当电动机被生产机械的位势负载或惯性拉着作为发电机运转时，将机械能变为电能，送回电网而得到制动转矩。此时，其转速  $n$  大于同步转速  $n_0$ ，其运行特性曲线在第二象限，此时电动机工作状态如同一个与电网并联的异步发电机，同时从电网吸取无功功率作励磁之用。三相交流异步电动机回馈制动，常用于多速（变极对数）三相交流异步电动机由高速换接到低速过程中产生制动作用。表 14-5-3 列出各类电动机采用回馈制动时的接线方式、制动特性及适用的场所。

表 14-5-3 回馈制动的性能

电动机类型	直流电动机	异步电动机
接线方式		
制动特性		

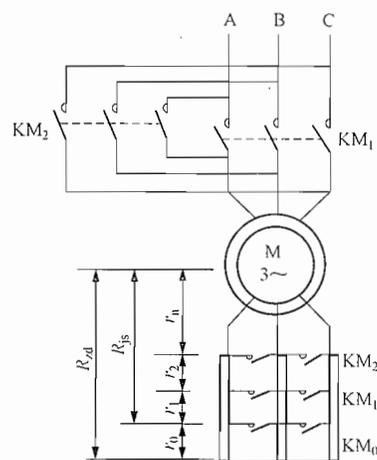


图 14-5-2 绕线型电动机带有反接制动的主回路接线图

续表

电动机类型	直流电动机	异步电动机
特点	(1) 能量可回馈电网，效率高、经济。 (2) 只能在 $n > n_0$ 时得到制动转矩	
适用的场所	适用于位势负载场合，如高速时重物下放，获得稳定制动，如起重机下放负载等	

## 14.6 电动机保护配置及计算方法

### 14.6.1 高压电动机继电保护配置及整定计算

见本书第9章9.2.4有关内容。

### 14.6.2 低压电动机保护的一般规定

摘自 GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》2.3节。

#### 2.3 低压电动机的保护

##### 2.3.1 交流电动机应装设短路保护和接地故障的保护。

2.3.2 交流电动机的保护除应符合本规范第2.3.1条的规定外，尚应根据电动机的用途分别装设过载保护、断相保护、低电压保护以及同步电动机的失步保护。

2.3.3 每台交流电动机应分别装设相间短路保护，但符合下列条件之一时，数台交流电动机可共用一套短路保护电器：

1 总计算电流不超过20A，且允许无选择切断时。

2 根据工艺要求，必须同时起停的一组电动机，不同时切断将危及人身设备安全时。

2.3.4 交流电动机的短路保护器件宜采用熔断器或低压断路器的瞬动过电流脱扣器，亦可采用带瞬动元件的过电流继电器。保护器件的装设应符合下列规定：

1 短路保护兼作接地故障的保护时，应在每个不接地的相线上装设。

2 仅作相间短路保护时，熔断器应在每个不接地的相线上装设，过电流脱扣器或继电器应至少在两相上装设。

3 当只在两相上装设时，在有直接电气联系的同一网络中，保护器件应装设在相同的两相上。

2.3.5 当交流电动机正常运行、正常起动或自起动时，短路保护器件不应误动作。短路保护器件的选择应符合下列规定：

1 正确选用保护电器的使用类别。

2 熔断体的额定电流应大于电动机的额定电流，且其安秒特性曲线计及偏差后应略高于电动机起动电流时间特性曲线。当电动机频繁起动和制动时，熔断体的额定电流应加大1级或2级。

3 瞬动过电流脱扣器或过电流继电器瞬动元件的整定电流应取电动机起动电流周期分量最大有效值的2倍~2.5倍。

4 当采用短延时过电流脱扣器作保护时，短延时脱扣器整定电流宜躲过起动电流周期分量最大有效值，延时不宜小于0.1s。

2.3.6 交流电动机的接地故障的保护应符合下列规定：

1 每台电动机应分别装设接地故障的保护,但共用一套短路保护的数台电动机可共用一套接地故障的保护器件。

2 交流电动机的间接接触防护应符合现行国家标准 GB 50054《低压配电设计规范》的有关规定。

3 当电动机的短路保护器件满足接地故障的保护要求时,应采用短路保护器件兼作接地故障的保护。

### 2.3.7 交流电动机的过载保护应符合下列规定:

1 运行中容易过载的电动机、起动或自起动条件困难而要求限制起动时间的电动机,应装设过载保护。连续运行的电动机宜装设过载保护,过载保护应动作于断开电源。但断电比过载造成的损失更大时,应使过载保护动作于信号。

2 短时工作或断续周期工作的电动机可不装设过载保护,当电动机运行中可能堵转时,应装设电动机堵转的过载保护。

2.3.8 交流电动机宜在配电线路的每相上装设过载保护器件,其动作特性应与电动机过载特性相匹配。

2.3.9 当交流电动机正常运行、正常起动或自起动时,过载保护器件不应误动作。过载保护器件的选择应符合下列规定:

1 热过载继电器或过载脱扣器整定电流应接近但不小于电动机的额定电流。

2 过载保护的動作时限应躲过电动机正常起动或自起动时间。热过载继电器整定电流应按下式确定

$$I_{zd} = K_k K_{jx} \frac{I_{ed}}{n K_h} \quad (2.3.9)$$

式中:  $I_{zd}$ ——热过载继电器整定电流 (A);

$I_{ed}$ ——电动机的额定电流 (A);

$K_k$ ——可靠系数,动作于断电时取 1.2,动作于信号时取 1.05;

$K_{jx}$ ——接线系数,接于相电流时取 1.0,接于相电流差时取 $\sqrt{3}$ ;

$K_h$ ——热过载继电器返回系数,取 0.85;

$n$ ——电流互感器变比。

3 可在起动过程的一定时限内短接或切除过载保护器件。

### 2.3.10 交流电动机的断相保护应符合下列规定:

1 连续运行的三相电动机,当采用熔断器保护时,应装设断相保护;当采用低压断路器保护时,宜装设断相保护。

2 断相保护器件宜采用断相保护热继电器,亦可采用温度保护或专用的断相保护装置。

2.3.11 交流电动机采用低压断路器兼作电动机控制电器时,可装设断相保护;短时工作或断续周期工作的电动机亦可不装设断相保护。

### 2.3.12 交流电动机的低电压保护应符合下列规定:

1 按工艺或安全条件不允许自起动的电动机应装设低电压保护。

2 为保证重要电动机自起动而需要切除的次要电动机应装设低电压保护。次要电动机宜装设瞬时动作的低电压保护。不允许自起动的重要电动机应装设短延时的低电压

保护，其时限可取0.5s~1.5s。

3 按工艺或安全条件在长时间断电后不允许自起动的电动机，应装设长延时的低电压保护，其时限按照工艺的要求确定。

4 低电压保护器件宜采用低压断路器的欠电压脱扣器、接触器或接触器式继电器的电磁线圈，亦可采用低电压继电器和时间继电器。当采用电磁线圈作低电压保护时，其控制回路宜由电动机主回路供电；当由其他电源供电，主回路失压时，应自动断开控制电源。

5 对于需要自起动不装设低电压保护或装设延时低电压保护的重要电动机，当电源电压中断后在规定时间内恢复时，控制回路应有确保电动机自起动的措施。

2.3.13 同步电动机应装设失步保护。失步保护宜动作于断开电源，亦可动作于失步再整步装置。动作于断开电源时，失步保护可由装设在转子回路中或用定子回路的过载保护兼作失步保护。必要时，应在转子回路中加装失磁保护和强行励磁装置。

2.3.14 直流电动机应装设短路保护，并根据需要装设过载保护。

他励、并励及复励电动机宜装设弱磁或失磁保护。串励电动机和机械有超速危险的电动机应装设超速保护。

2.3.15 电动机的保护可采用符合现行国家标准 GB 14048.6《低压开关设备和控制设备 第4-2部分：接触器和电动机起动器 交流半导体电动机控制器和起动器（含软起动器）》保护要求的综合保护器。

2.3.16 旋转电机励磁回路不宜装设过载保护。

### 14.6.3 低压异步电动机保护的配置

#### 14.6.3.1 短路和接地故障保护电器选择

依据：《工业与民用配电设计手册（第三版）》第十二章第一节五。

(1) 熔断器的选择。

1) 使用类别的选择：熔断器的使用类别及其标识见本书第7章7.3.4。配电设计中最常用的gC和aM熔断器的熔断特性对比见表14-6-1和图14-6-1。

表 14-6-1 gG 和 aM 熔断器的约定时间和约定电流

类别	额定电流 $I_r$	约定时间 (h)	约定不熔断电流 $I_{nf}$	约定熔断电流 $I_f$
gG	$I_r \leq 4$	1	$1.5I_r$	$2.1I_r (1.6I_r)$
	$4 < I_r < 16$	1	$1.5I_r$	$1.9I_r (1.6I_r)$
	$16 \leq I_r \leq 63$	1	$1.25I_r$	$1.6I_r$
	$63 < I_r \leq 160$	2	$1.25I_r$	$1.6I_r$
	$160 < I_r \leq 400$	3	$1.25I_r$	$1.6I_r$
	$I_r > 400$	4	$1.25I_r$	$1.6I_r$
aM	全部 $I_r$	60s	$4I_r$	$6.3I_r$

注 括号内数据用于螺栓连接熔断器。

aM 熔断器的分断范围是  $6.3I_r$  至其额定分断电流之间，在低倍额定电流下不会误动作，容易躲过电动机的起动电流，但在高倍额定电流时比 gG 熔断器“灵敏”，有利于与接触器

和过载保护器协调配合。aM 熔断器的额定电流可与电动机额定电流相近而不需特意加大,对上级保护器件的选择也很有利。

因此,电动机的短路和接地故障保护电器应优先选用 aM 熔断器。

2) 额定电流的选择:除按规范要求直接查熔断器的安秒特性曲线外,推荐用下列方法。

a. aM 熔断器的熔断体额定电流可按下列两个条件选择:

(a) 熔断体额定电流大于电动机的额定电流。

(b) 电动机的起动电流不超过熔断体额定电流的 6.3 倍。

综合两个条件,熔断体额定电流可按不小于电动机额定电流的 1.05 ~ 1.1 倍选择。

b. gG 熔断器的规格宜按熔断体允许通过的起动电流来选择。

aM 和 gG 熔断器的熔断体允许通过的起动电流参考表 14-6-2,该表适用于电动机轻载和一般负载起动。按电动机功率配置熔断器的参考表,见表 14-6-3。

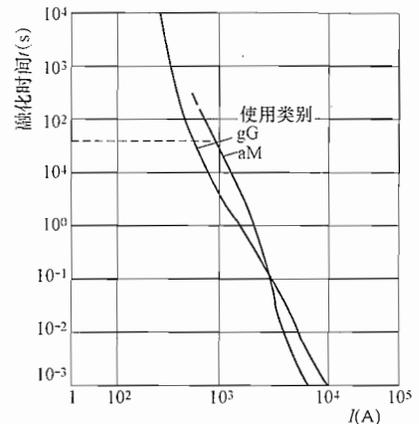


图 14-6-1 NH 型 200A 熔断器的熔化时间—电流特性曲线

表 14-6-2 熔断体允许通过的起动电流

熔断体额定电流 (A)	允许通过的起动电流 (A)		熔断体额定电流 (A)	允许通过的电流 (A)	
	aM 型熔断器	gG 型熔断器		aM 型熔断器	gG 型熔断器
2	12.6	5	63	396.9	240
4	25.2	10	80	504.0	340
6	37.8	14	100	630.0	400
8	50.4	22	125	787.7	570
10	63.0	32	160	1008	750
12	75.5	35	200	1260	1010
16	100.8	47	250	1575	1180
20	126.0	60	315	1985	1750
25	157.5	82	400	2520	2050
32	201.6	110	500	3150	2950
40	252.0	140	630	3969	3550
50	315.0	200			

表 14-6-3 按电动机功率配置熔断器的参考规格

电动机额定功率 (kW)	电动机额定电流 (A)	电动机起动电流 (A)	熔断体额定电流 (A)	
			aM 熔断器	gG 熔断器
0.55	1.6	8	2	4
0.75	2.1	12	4	6
1.1	3	19	4	8
1.5	3.8	25	4 或 6	10
2.2	5.3	36	6	12

续表

电动机额定 功率 (kW)	电动机额定 电流 (A)	电动机起动 电流 (A)	熔断体额定电流 (A)	
			aM 熔断器	gG 熔断器
3	7.1	48	8	16
4	9.2	62	10	20
5.5	12	83	16	25
7.5	16	111	20	32
11	23	167	25	40 或 50
15	31	225	32	50 或 63
18.5	37	267	40	63 或 80
22	44	314	50	80
30	58	417	63 或 80	100
37	70	508	80	125
45	85	617	100	160
55	104	752	125	200
75	141	1006	160	200
90	168	1185	200	250
110	204	1388	250	315
132	243	1663	315	315
160	290	1994	400	400
200	361	2474	400	500
250	449	3061	500	630
315	555	3844	630	800

## (2) 低压断路器的选择。

## 1) 断路器类型及附件的选择:

a. 电动机主回路应采用电动机保护用低压断路器, 其保护特性见表 14-6-4。其瞬动过电流脱扣器的动作电流与长延时脱扣器动作电流之比 (以下简称瞬动电流倍数) 宜为 14 倍左右或 10~20 倍可调。

b. 仅用作短路保护时, 即在另装过载保护电器的常见情况下, 宜采用只带瞬动脱扣器的低压断路器, 或把长延时脱扣器作为后备过电流保护。

表 14-6-4 电动机保护用断路器特性

名称	电流种类和范围	保护特性		主要用途
		直接起动	一般型 过电流脱扣器瞬动倍数 $(3 \sim 15)I_e$	
电动机保护用断路器	交流 60~630A	限流型	过电流脱扣器瞬动倍数 $12I_e$	保护笼型电动机
		间接起动	过电流脱扣器瞬动倍数 $(3 \sim 8)I_e$	同上, 还可装在近变压器端 保护笼型和绕线转子电动机

14

c. 兼作电动机过载保护时, 即在没有其他过载保护电器的情况下, 低压断路器应装有瞬动脱扣器和长延时脱扣器, 且必须为电动机保护型。

d. 兼作低电压保护时, 即不另装接触器或起动器的情况下, 低压断路器应装有低电压脱扣器。

e. 低压断路器的电动操动机构、分励脱扣器、辅助触点及其他附件, 应根据电动机的控制要求装设。

2) 过电流脱扣器的整定电流:

- a. 瞬动脱扣器的整定电流应为电动机起动电流的 2~2.5 倍, 本节取 2.2 倍;
- b. 长延时脱扣器用作后备保护时, 其整定电流  $I_{\text{set}}$  应按满足相应的瞬动脱扣整定电流为电动机起动电流 2.2 倍的条件确定

$$I_{\text{set}} \geq \frac{2.2I_{\text{st}}}{K_{\text{sd}}} = \frac{2.2K_{\text{st}}I_{\text{r}}}{K_{\text{sd}}}$$

式中  $I_{\text{r}}$ ——电动机的额定电流, A;

$I_{\text{st}}$ ——电动机的起动电流, A;

$K_{\text{st}}$ ——电动机的堵转电流倍数;

$K_{\text{sd}}$ ——断路器的瞬动电流倍数。

c. 长延时脱扣器用作电动机过载保护时, 其整定电流应接近但不小于电动机的额定电流, 且在 7.2 倍整定电流下的动作时间应大于电动机的起动时间。此外, 相应的瞬动脱扣器应满足 2) 项 a) 的要求, 否则应另装过载保护电器, 而不得随意加大长延时脱扣器的整定电流。

3) 过电流脱扣器的额定电流和可调范围应根据整定电流选择; 断路器的额定电流应不小于长延时脱扣器的额定电流。

4) 起动冲击电流在 1/4 周期 (0.005s) 即达到峰值, 瞬动元件是否起动仅取决于电磁力的大小, 与后续的断路器机械动作固有时间无关。因此, 为防止断路器在电动机起动时误动作, 其瞬动过电流脱扣器的动作电流应躲过起动电流峰值或至少高于第一半波有效值。

#### 14.6.3.2 过载和断相保护电器的选择

依据:《工业与民用配电设计手册(第三版)》第十二章第一节六。

(1) 热继电器和过载脱扣器的选择。

1) 类型和特性选择:

- a. 三相电动机的热继电器宜采用断相保护型。
- b. 热继电器和过载脱扣器的整定电流应当可调, 调整范围宜不小于其电流上限的 20%。
- c. 热继电器和过载脱扣器在 7.2 倍整定电流下的动作时间, 应大于电动机的起动时间。为此, 应根据电动机的机械负载特性选择过载保护器件的脱扣级别, 详见表 14-6-5。

表 14-6-5 电动机用过载保护器件的脱扣级别和脱扣时间

脱扣级别	以整定电流倍数表示的试验电流				适用范围
	1.05*	1.2	1.5	7.2	
	冷态开始	热态	热态	冷态开始	
	脱扣时间 $t$				
10A	2h 内不脱扣	<2h	<2min	2s < $t$ ≤ 10s	轻载起动
10	2h 内不脱扣	<2h	<4min	4s < $t$ ≤ 10s	一般负载
20	2h 内不脱扣	<2h	<8min	6s < $t$ ≤ 20s	一般负载到重载
30	2h 内不脱扣	<2h	<12min	9s < $t$ ≤ 30s	重载起动

\* 适用于有温度补偿的热继电器。电磁式和无温度补偿的热继电器为 1.0。

热继电器的复位方式应根据防止电动机意外起动的原则而定: 用按钮、自复式转换开关或类似的主令电器手动控制起停时, 宜采用自动复位的热继电器。用自动接点以连续通电方

式控制起停时，应采用手动复位的热继电器，但工艺有特殊要求者除外。

## 2) 整定电流的确定：

a. 一般情况下，热继电器和过载脱扣器的整定电流应接近但不小于电动机额定电流；对于有温度补偿的热继电器，整定电流应不小于电动机额定电流；对于电磁式和无温度补偿的热继电器，整定电流应不小于电动机额定电流的 1.05 倍。为了方便，设计中可按整定电流调节范围的上限不小于电动机额定电流 1.05 倍的条件选配元件的规格。在运行中，应根据实测数据对整定电流加以修正。

b. 电动机的起动时间太长而导致过载保护误动时，宜在起动过程中短接过载保护器件，也可以经速饱和电流互感器接入主回路。不能采取提高整定电流的做法，以免运行中过载保护失灵。

c. 电动机频繁起动、制动和反向时，过载保护器件的整定电流只能适当加大。这将不能实现完全的过载保护，但一定程度的保护对防止转子受损仍然有效。

d. 电动机的功率较大时，热继电器可接在电流互感器二次回路中，其整定电流应除以互感器的变比。

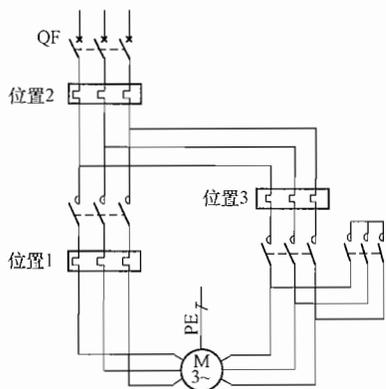


图 14-6-2 星形—三角形起动  
电路中热继电器的装设位置

e. 电动机采用星形—三角形起动时，热继电器的可能装设位置有 3 个（见图 14-6-2），其整定电流也不同：

(a) 通常，热继电器与电动机绕组串联（位置 1），整定电流应为电动机额定电流乘以 0.58。这种配置能使电动机在星形起动时和三角形运行中都能受到保护。

(b) 热继电器装在电源进线上（位置 2），整定电流应为电动机额定电流。由于线电流为相电流的  $\sqrt{3}$  倍，在星形起动过程中，热继电器的动作时间将延长 4~6 倍，故不能提供完全的保护。但能提供起动失败的保护。

(c) 热继电器装在三角形电路中（位置 3），整定电流应为电动机额定电流乘以 0.58。在星形起动过程中，没有电流流过热继电器，这相当于解除了保护，可用于起动困难的情况。

f. 装有单独补偿电容器的电动机：当电容器接在热继电器之前时，对整定电流无影响。

当电容器接在过载保护器件之后时，整定电流应计及电容电流之影响。补偿后的电动机电流可用矢量分解合成法计算，也可近似地取电动机额定电流乘以 0.92~0.95。

g. 三相热继电器用于单相交流或直流电路时，其 3 个双金属片均应被加热。为此，热继电器的 3 个极应串联使用。

## (2) 过电流继电器的选择。

### 1) 过载保护用过电流继电器：

a. 过载保护宜采用带瞬动元件的反时限过电流继电器，其反时限特性曲线应为电动机保护型，瞬动电流不宜小于反时限起动电流的 14 倍。

b. 过电流继电器的整定电流应按下式确定

$$I_{\text{set}} = K_{\text{rel}} K_{\text{jx}} \frac{I_r}{K_c n_{\text{TA}}}$$

式中  $I_{set}$ ——过电流继电器的整定电流, A;

$I_r$ ——电动机的额定电流, A;

$K_{rel}$ ——可靠系数, 由动作电流误差决定, 机电式继电器动作于断电时取 1.1 ~ 1.2, 动作于信号时取 1.05;

$K_{jx}$ ——接线系数, 接于相电流时取 1.0, 接于相电流差时取 $\sqrt{3}$ ;

$K_r$ ——继电器返回系数, 按产品数据或取 0.85 ~ 0.9;

$n_{TA}$ ——电流互感器变比。

注: 过电流继电器的整定电流是动作电流, 为防止误动作, 应引入可靠系数。热过载继电器或脱扣器的整定电流是不动作电流, 故不再乘以可靠系数。

2) 堵转保护用过电流继电器及时间继电器:

a. 堵转保护宜采用瞬动电流继电器和时间继电器组成的定时限过电流保护。

b. 电流继电器宜按不大于电动机堵转电流的 75% 整定。时间继电器宜按正常起动时间的 1.5 倍整定。

(3) 增安型电动机过载保护的特殊要求。

1) 为防止增安型电动机堵转时在爆炸危险环境中产生危险的高温, 过载保护电器应在电动机堵转时间  $t_c$  内可靠动作。符合这项要求的过载保护也称为增安型电动机的堵转保护。

2) 中小型增安型电动机的过载保护宜采用专用的增安型电动机保护用热继电器。

#### 14.6.4 起动控制电器及过载保护电器与短路保护电器的协调配合

依据:《工业与民用配电设计手册(第三版)》第十二章第一节七。

**14.6.4.1 协调配合的基本要求:** 起动控制电器及过载保护电器(以下统称起动器)应与短路保护电器互相协调配合。根据 GB 14048.4—2010《低压开关设备和控制设备 低压机电式接触器和电动机起动器》, 协调配合的要点如下:

(1) 过载保护电器(OLPD)与短路保护电器(SCPD)之间应有选择性:

1) 在 OLPD 与 SCPD 两条时间—电流特性曲线交点所对应的电流(大致相当于电动机堵转电流)以下, SCPD 不应动作, 而 OLPD 应动作使起动器断开; 起动器应无损坏。

2) 在两条曲线交点对应的电流以上, SCPD 应在 OLPD 动作之前动作; 起动器应满足制造厂规定的协调配合条件。

(2) 短路情况下的协调配合条件允许有两类:

1) 1 类配合。起动器在短路情况下可以损坏, 但不应对周围人身和设备造成危害。

2) 2 类配合。起动器在短路情况下不对人身和设备造成危害, 且应能继续使用, 但允许有容易分离的触头熔焊。

3) 上述各项要求。由起动器制造厂通过试验来验证。

(3) 起动器供货商应成套供应或推荐适用的短路保护电器, 以保证协调配合的要求。

#### 14.6.4.2 协调配合类型的选择

(1) 一般情况下, 1 类配合是可以接受的。短路的发生显然是电动机或其末端线路电器元件损坏所致, 因而检查和更换元器件是难免的。

(2) 对连续运行要求很高的电动机或容易达到所需的配合条件时, 宜选用 2 类配合。

### 14.6.4.3 起动器与熔断器的协调配合

采用熔断器作短路保护，容易达到协调配合的要求，包括2类配合。国内外多家起动器或接触器制造厂提供了适用的熔断器配套规格表。表14-6-6列出了部分国产型号接触器与熔断器的协调配合规格。

表 14-6-6 部分国产接触器与熔断器的协调配合

熔断器型号、规格	接触器型号、规格（380V，AC-3的额定工作电流）				
R16、RT16-10 RT6-16 RT16-20 RT16-25 RT16-32	CJ45-6.3 CJ45-9M、9、12	CJ20-9  CJ20-16	GC1-09 GC1-12 GC1-16 GC1-25	CK1-10  CK1-16	NC8-09 NC8-12
RT16-40 RT16-50 RT16-63 RT16-80 RT16-100	CJ45-16、25 CJ45-32、40  CJ45-50、63	CJ20-25  CJ20-40	GC1-32 GC1-40、50 GC1-63 GC1-80	CK1-25  CK1-40	NC8-16、25 NC8-32 NC8-40 NC8-50
RT16-125 RT16-160 RT16-200 RT16-250 RT16-315	CJ45-75、95 CJ45-110、140  CJ45-170、205 CJ45-250、300	CJ20-63  CJ20-100 CJ20-160	GC1-95  GC1-100、125 GC1-160~250	CK1-63~80  CK1-100~125 CK1-160~250	NC8-63 NC8-80 NC8-100
RT16-400 RT16-500 RT16-630 RT16-800	CJ45-400、475	CJ20-250 CJ20-400 CJ20-630	GC1-350~500 GC1-630 GC1-800	CK1-315~500	
协调配合条件	2类配合	2类配合	不 详		

### 14.6.4.4 起动器与低压断路器的协调配合

低压断路器在短路分断时间内的焦耳积分（ $I^2t$ ）高于熔断器相应的 $I^2t$ 。

## 14.7 低压交流电动机控制电器的选择

低压交流电动机控制电器包括电动机主回路（含电动机定子回路和转子回路）的控制电器和控制回路（又称操作回路）的控制电器。本节所述为低压电动机控制电器的选择原则和规定，低压电器选择的一般要求见本书第7章7.3。

常用低压交流电动机控制电器的品种和用途见表14-7-1。

表 14-7-1 常用低压交流电动机控制电器

名称	主要品种	用 途
断路器	开启式空气断路器 塑料外壳式断路器 限流式断路器 剩余电流保护断路器	用作交、直流线路的过载、短路或低电压保护，也可用于不频繁通断操作电路。漏电保护断路器用于人身触电保护

续表

名称	主要品种	用途
熔断器	有填料封闭管式熔断器 保护半导体器件熔断器 无填料密闭管式熔断器 自复熔断器	用作交、直流线路和设备的短路和过载保护
隔离器刀开关	熔断器组合电器 刀开关 负荷开关	用作电路隔离, 也能接通与分断电路额定电流
转换开关	组合开关 换向开关	主要作为两种及以上电源或负载的转换和通断电路用
接触器	交流接触器 真空接触器 半导体接触器	用作远距离频繁地起动或控制交流电动机以及接通分断正常工作的主电路和控制电路
控制继电器	电流继电器 电压继电器 时间继电器 中间继电器 热过载继电器 温度继电器	在控制系统中, 作控制其他电器或作主电路的保护之用
起动器	转子变阻式起动器 综合式起动器 直接起动器 自耦减压起动器 星形—三角形起动器	用作交流电动机的起动或正反向控制
控制器	凸轮控制器 平面控制器	用于电气控制设备中转换主回路或励磁回路的接法, 以达到电动机起动、换向和调速
主令电器	按钮 限位开关 微动开关 万能转换开关	用作接通、分断控制电路, 以发布命令或用作程序控制
变阻器	铁基合金电阻器	用作改变电路参数或变电能为热能
	频敏变阻器	在交流电动机起动、制动时改变电路参数

### 14.7.1 低压交流电动机主回路

#### 14.7.1.1 低压交流电动机主回路的一般规定

摘自 GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》2.4 节。

#### 2.4 低压交流电动机的主回路

2.4.1 低压交流电动机主回路宜由具有隔离功能、控制功能、短路保护功能、过载保护功能、附加保护功能的器件和布线系统等组成。

2.4.2 隔离电器的装设应符合下列规定:

1 每台电动机的主回路上应装设隔离电器, 但符合下列条件之一时, 可数台电动机共用一套隔离电器:

- 1) 共用一套短路保护电器的一组电动机。
- 2) 由同一配电箱供电且允许无选择地断开的一组电动机。
- 2 电动机及其控制电器宜共用一套隔离电器。
- 3 符合隔离要求的短路保护电器可兼作隔离电器。
- 4 隔离电器宜装设在控制电器附近或其他便于操作和维修的地点。无载开断的隔离电器应能防止误操作。

2.4.3 短路保护电器应与其负荷侧的控制电器和过载保护电器协调配合。短路保护电器的分断能力应符合现行国家标准 GB 50054《低压配电设计规范》的有关规定。

2.4.4 控制电器的装设应符合下列规定：

1 每台电动机应分别装设控制电器，但当工艺需要时，一组电动机可共用一套控制电器。

2 控制电器宜采用接触器、起动器或其他电动机专用的控制开关。起动次数少的电动机，其控制电器可采用低压断路器或与电动机类别相适应的隔离开关。电动机的控制电器不得采用开启式开关。

3 控制电器应能接通和断开电动机堵转电流，其使用类别和操作频率应符合电动机的类型和机械的工作制。

4 控制电器宜装设在便于操作和维修的地点。过载保护电器的装设宜靠近控制电器或为其组成部分。

2.4.5 导线或电缆的选择应符合下列规定：

1 电动机主回路导线或电缆的载流量不应小于电动机的额定电流。当电动机经常接近满载工作时，导线或电缆载流量宜有适当的裕量；当电动机为短时工作或断续工作时，其导线或电缆在短时负载下或断续负载下的载流量不应小于电动机的短时工作电流或额定负载持续率下的额定电流。

2 电动机主回路的导线或电缆应按机械强度和电压损失进行校验。对于向一级负荷配电的末端线路以及少数更换导线很困难的重要末端线路，尚应校验导线或电缆在短路条件下的热稳定。

3 绕线式电动机转子回路导线或电缆载流量应符合下列规定：

1) 起动后电刷不短接时，其载流量不应小于转子额定电流。当电动机为断续工作时，应采用导线或电缆在断续负载下的载流量。

2) 起动后电刷短接，当机械的起动静阻转矩不超过电动机额定转矩的 50% 时，不宜小于转子额定电流的 35%；当机械的起动静阻转矩超过电动机额定转矩的 50% 时，不宜小于转子额定电流的 50%。

## 14

### 14.7.1.2 低压交流电动机主回路接线

依据：《工业与民用配电设计手册（第3版）》第十二章第一节二、三。

(1) 笼型电动机主回路常用接线。笼型电动机主回路常用接线见图 14-7-1。

(2) 变极多速电动机的主回路接线。变极多速电动机的主回路及其绕组接线见图 14-7-2。

(3) 笼型电动机星形—三角形转换主回路接线。笼型电动机星形—三角形转换主回路接线见图 14-7-3。

(4) 笼型电动机电阻降压起动主回路接线。笼型电动机电阻降压起动主回路接线见图 14-7-4。

(5) 笼型电动机自耦变压器降压起动主回路接线。笼型电动机自耦变压器降压起动主回路接线见图 14-7-5。

(6) 笼型电动机用软起动器起动主回路接线。笼型电动机用软起动器起动主回路接线见图 14-7-6。

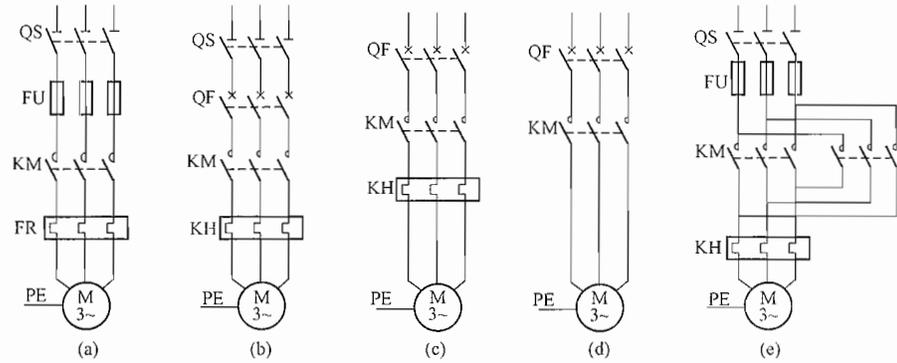


图 14-7-1 笼型电动机主回路常用接线

(a) 典型接线，短路和接地故障保护电器为熔断器；(b) 典型接线，短路和接地故障保护电器为断路器；(c) 断路器兼作隔离电器；(d) 不装设过载保护或断路器兼作过载保护；(e) 双向（可逆）旋转的接线示例

QS—隔离器或隔离开关；FU—熔断器；KM—接触器；KH—热继电器

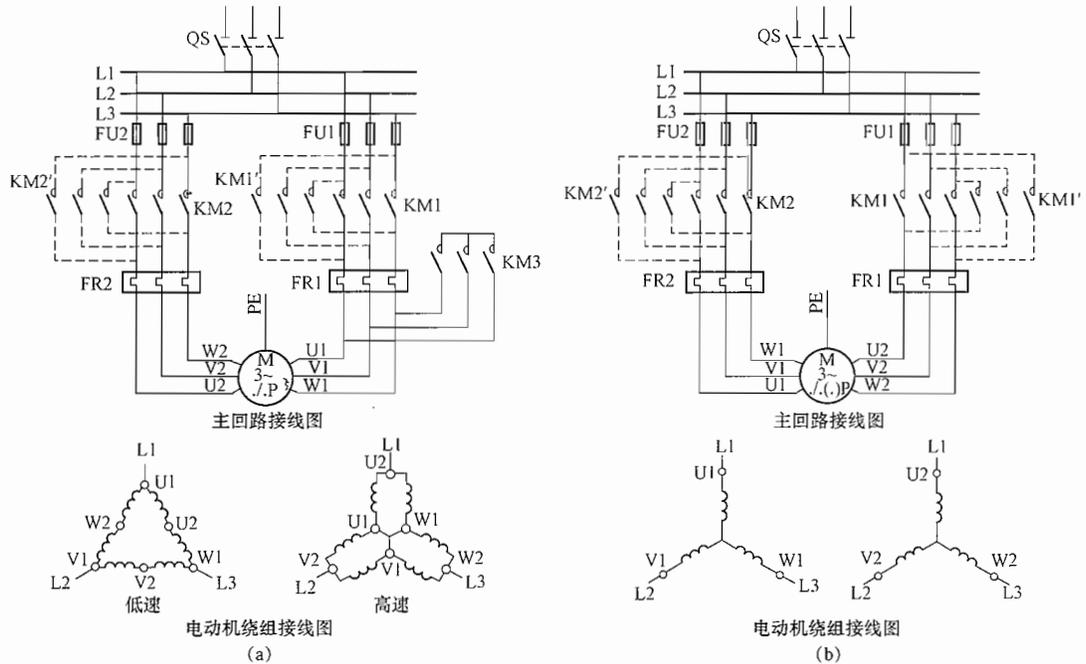


图 14-7-2 变极多速电动机的主回路及其绕组接线（一）

(a) 带 1 个抽头绕组、6 个接线端子的 4/2 或 8/4 极电动机；KM1—低速接触器，电流为  $I_{t1}$ ；KM2—高速接触器，电流为  $I_{t2}$ ；KM3—星形接触器，电流为  $0.5I_{t2}$ ；(b) 带 2 个独立绕组、6 个接线端子的 6/4 或 8/6 极电动机：

KM1—低速接触器，电流为  $I_{t1}$ ；KM2—高速接触器，电流为  $I_{t2}$

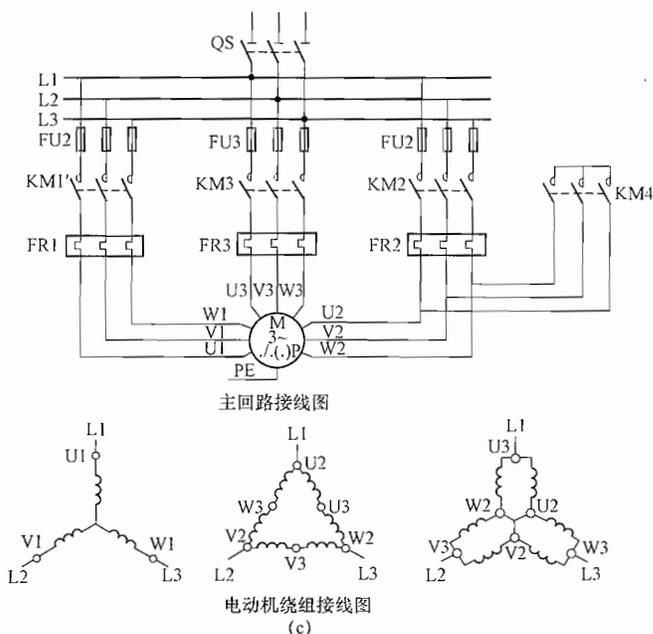


图 14-7-2 变极多速电动机的主回路及其绕组接线（二）

(c) 带 2 个独立绕组（其中一个带抽头）、9 个接线端子的 6/4/2 或 8/4/2 或 8/6/2 极电动机；KM1—低速接触器，电流为  $I_{t1}$ ；KM2—中速接触器，电流为  $I_{t2}$ ；KM3—高速接触器，电流为  $I_{t3}$ ；KM4—星形接触器，电流为  $0.5I_{t3}$ 。  
注：虚线表示用于可逆旋转的接线。其他符号同图 14-7-1。

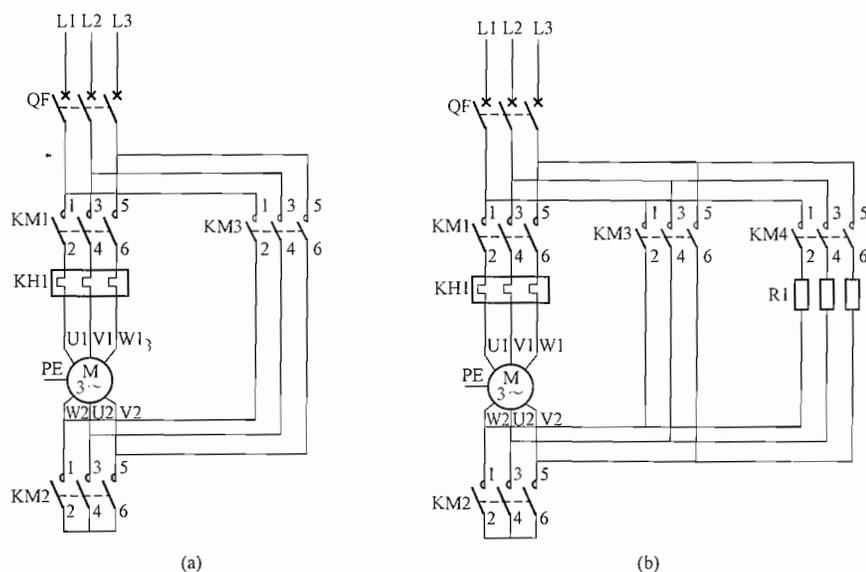


图 14-7-3 笼型电动机星形—三角形转换起动主回路接线

(a) 常用星形—三角形启动（起动时间不超过 10s）；(b) 不中断的星形—三角形启动  
KM1—主接触器，电流为  $0.58I_t$ ；KM2—星形接触器，电流为  $0.33I_t$ ；KM3—三角形接触器，电流为  $0.58I_t$ ；  
KM1—主接触器，电流为  $0.58I_t$ ；KM2—星形接触器，电流为  $0.58I_t$ （为分断过渡电阻的电流，需较大规格）；  
KM3—三角形接触器，电流为  $0.58I_t$ ；KM4—过渡接触器，电流为  $0.26I_t$ ；R1—过渡电阻

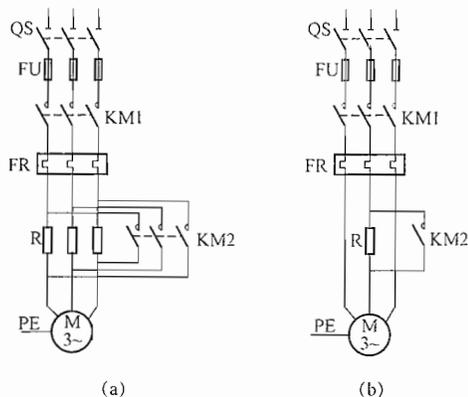


图 14-7-4 笼型电动机电阻降压起动主回路接线

(a) 降低起动电流; (b) 降低起动转矩

KM1—主回路接触器, 电流为  $I_r$ ; KM2—加速接触器, 电流为  $I_r$  (按 AC-1 条件选用); R—起动电阻

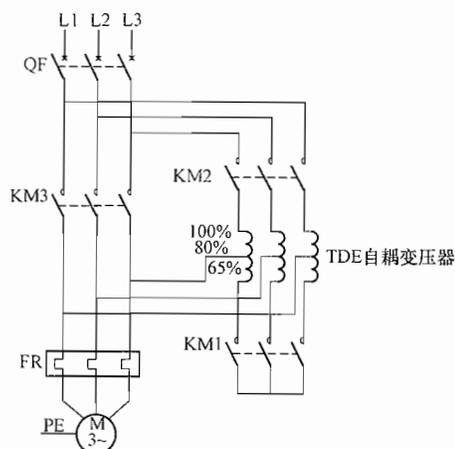


图 14-7-5 笼型电动机自耦变压器降压起动主回路接线

KM1—星形接触器, 电流为  $0.25I_r$  (按最高抽头电压为  $0.8U_r$ );

KM2—变压器接触器, 电流为  $0.64I_r$  (按最高抽头电压为  $0.8U_r$ ); KM3—主接触器, 电流为  $I_r$

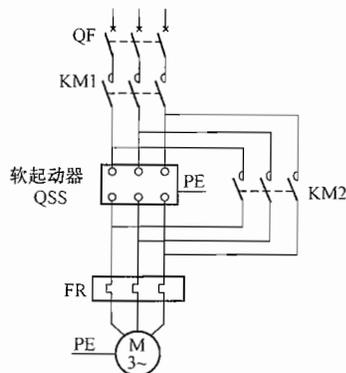


图 14-7-6 笼型电动机用软起动器起动主回路接线

KM1—主接触器, 电流为  $I_r$ ; KM2—旁路接触器, 电流为  $I_r$  (按需要装设)

(7) 绕线转子电动机常用主回路接线。绕线转子电动机常用主回路接线见图 14-7-7。

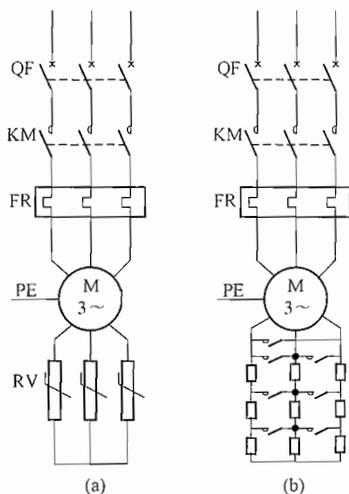


图 14-7-7 绕线转子电动机常用的主回路接线  
(a) 采用频敏变阻器启动；(b) 采用多级电阻启动

### 14.7.1.3 定子主回路控制电器的选择

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》5.2、《工业与民用配电设计手册（第3版）》第十一章第五节。

根据图 14-7-2~图 14-7-7 异步电动机主回路接线，电路由隔离器、刀开关，低压断路器，接触器，热继电器，熔断器等组成。

(1) 隔离器、刀开关。隔离器、刀开关的主要功能是隔离电源。在满足隔离功能要求的前提下，选用的主要原则足保证其额定绝缘电压和额定工作电压不低于线路的相应数据，额定工作电流不小于线路的计算电流。当要求有通断能力时，须选用具备相应额定通断能力的隔离器。如需接通短路电流，则应选用具备相应短路接通能力的隔离开关。

(2) 低压断路器。低压断路器俗称自动空气开关，是低压配电网中的主要开关电器之一，它不仅可以接通和分断正常负载电流、电动机工作电流和过载电流，而且可以接通和分断短路电流。它主要用在不太频繁操作的低压配电线路或开关柜（箱）中作为电源开关使用，并对线路、电器设备及电动机等实行保护，当它们发生严重过电流、过载、短路、断相、漏电等故障时，能自动切断线路，起到保护作用，应用十分广泛。

根据断路器在电路中的不同用途，断路器被区分为配电用断路器、电动机保护用断路器和其他负载（如照明）用断路器等。

低压断路器的选用应根据具体使用条件选择使用类别，选择额定工作电压、额定电流、脱扣器整定电流和分励、欠电压脱扣器的电压电流等参数，参照产品样本提供的保护特性曲线选用保护特性，并需对短路特性和灵敏系数进行校验。当与另外的断路器或其他保护电器之间有配合要求时，应选用选择型断路器。

1) 额定工作电压和额定电流。低压断路器的额定工作电压  $U_n$  和额定电流  $I_n$  应分别不低于线路、设备的正常额定工作电压和工作电流或计算电流。断路器的额定工作电压与通断能力及使用类别有关，同一台断路器产品可以有几个额定工作电压和相对应的通断能力及使用类别。

2) 长延时脱扣器整定电流  $I_{n1}$ 。所选断路器的长延时脱扣器整定电流  $I_{n1}$  应大于或等于线路的计算负载电流，可按计算负载电流的 1~1.1 倍确定；同时应不大于线路导体长期允许电流的 0.8~1 倍。

3) 瞬时或短延时脱扣器的整定电流  $I_{n2}$ 。所选断路器的瞬时或短延时脱扣器整定电流应大于线路尖峰电流，配电断路器可按不低于尖峰电流的 1.35 倍的原则确定，电动机保护电路当动作时间大于 0.02s 时可按不低于 1.35 倍起动电流，如果动作时间小于 0.02s，则应为不低于 1.7~2 倍起动电流的原则确定。这些系数是考虑到整定误差和电动机起动电流可能

变化等因素而加的。

4) 短路通断能力和短时耐受能力校验。低压断路器的额定短路分断能力和额定短路接通能力应不低于其安装位置上的预期短路电流, 当动作时间大于 0.02s 时, 可不考虑短路电流的非周期分量, 即把短路电流周期分量有效值作为最大短路电流; 当动作时间小于 0.02s 时, 应考虑非周期分量, 即把短路电流第一周期内的全电流作为最大短路电流。

5) 灵敏度系数校验。根据灵敏度系数校验所选定的断路器, 还应按短路电流进行灵敏度系数校验。灵敏度系数即线路中最小短路电流 (一般取电动机接线端或配电线路末端的两相或单相短路电流) 和断路器瞬时或延时脱扣器整定电流之比。两相短路时的灵敏度系数应不小于 2, 单相短路时的灵敏度系数, 对于 DZ 型断路器可取 1.5, 对于其他型断路器可取 2。如果经校验灵敏度系数达不到上述要求, 除调整整定电流外, 也可利用延时脱扣器作为后备保护。

6) 分励和欠电压脱扣器的参数确定: 分励和欠电压脱扣器的额定电压应等于线路额定电压, 电源类别 (交、直流) 应按控制线路情况确定。国标规定的额定控制电源电压系列 (V) 为直流 (24)、(48)、110、125、220、250; 交流 (24)、(36)、(48)、110、127、220, 括号中的数据不推荐采用。

(3) 接触器。接触器是一种适用于在低压配电系统中远距离控制、频繁操作交直流主电路及大容量控制电路的自动控制开关电器, 主要应用于自动控制交直流电动机、电热设备、电容器组等设备, 应用十分广泛。接触器具有强大的执行机构, 大容量的主触头及迅速熄灭电弧的能力。当系统发生故障时, 能根据故障检测组件所给出的动作信号, 迅速、可靠地切断电源, 并有低电压释放功能。与保护电器组合可构成各种电磁起动器, 用于电动机的控制及保护。

接触器主要有如下特性参数:

1) 接触器的型式。包括极数、电流种类、使用频率、灭弧介质和操作方式等。

2) 额定值和极限值。包括额定工作电压、额定绝缘电压、约定发热电流、约定封闭发热电流 (有外壳时的)、额定工作电流或额定功率、额定工作制、额定接通能力、额定分断能力。见表 14-7-2。

表 14-7-2 部分交流接触器和起动器的接通、分断能力及其条件

使用类别	分断电流的倍数 ( $I_c/I_r$ )	通断条件			
		$\cos\varphi$	通电时间 (s)	间隔时间 (s)	操作循环次数
AC-1	1.5	0.80	0.05	10~240	50
AC-2	4.0	0.65	0.05	10~240	50
AC-3	8.0	0.45/0.35	0.05	10~240	50
AC-4	10.0	0.45/0.35	0.05	10~240	50
AC-5a	3.0	0.45	0.05	10~240	50
AC-5b	1.5	—	0.05	60	50

续表

使用类别	接通电流的倍数 ( $I/I_r$ )	接通条件			
		$\cos\varphi$	通电时间 (s)	间隔时间 (s)	操作循环次数
AC-3	10.0	0.45/0.35	0.05	10	50
AC-4	12.0	0.45/0.35	0.05	10	50

注 1.  $\cos\varphi$  栏中, 分子数值用于  $I_r \leq 100A$ , 分母用于  $I_r > 100A$  时。

2. 间隔时间栏中的 10~240s, 按额定电流  $I_r$  值大小确定。

3) 耐受过载电流的能力。耐受过载电流能力是指接触器承受电动机的起动电流和操作过载引起的过载电流所造成的热效应的能力。使用类别为 AC-2、AC-3 和 AC-4 的交流接触器应能耐受相当于 AC-3 类最大额定工作电流 8 倍的过电流, 见表 14-7-3。

表 14-7-3 接触器耐受过载电流能力

额定工作电流 (A)	试验电流	通电时间 (s)
$\leq 630$	$8 \times I_{rmax}$ (AC-3)	10
$> 630$	$6 \times I_{rmax}$ (AC-3), 最小值为 5040A	10

4) 使用类别。接触器和起动器的使用类别列于表 14-7-4。

表 14-7-4 接触器和起动器使用类别及代号

电流	使用类别代号	典型用途举例
交流	AC-1	无感或微感负载、电阻炉
	AC-2	绕线转子异步电动机的起动、分断
	AC-3	笼型异步电动机的起动、在运转中分断
	AC-4	笼型异步电动机的起动、反接制动或反向运转、点动
	AC-5a	气体放电灯的通断
	AC-5b	白炽灯的通断
	AC-6a	变压器的通断
	AC-6b	电容器组的通断
	AC-7a	家用电器和类似用途的低感负载
	AC-7b	家用电动机负载
	AC-8a	具有手动复位过载脱扣器的密封制冷压缩机中的电动机控制
	AC-8b	具有自动复位过载脱扣器的密封制冷压缩机中的电动机控制
直流	DC-1	无感或微感负载、电阻炉
	DC-3	并励电动机的起动、反接制动或反向运转、点动、在动态中分断
	DC-5	串励电动机的起动、反接制动或反向运转、点动、在动态中分断
	DC-6	白炽灯的通断

直接起动器属于 AC-3、AC-4、AC-7b、AC-8a、AC-8b 中的一种或多种。

所有星—三角起动器和两级自耦减压起动器属于 AC-3 类别。

转子变阻式起动器属于 AC-2 类别。

5) 额定工作制。

- a. 八小时工作制（连续工作制）：主触头闭合，承载稳定电流，但不超过 8h。
- b. 不间断工作制：主触头闭合，承载稳定电流超过 8h，达数周、数月甚至数年。
- c. 断续周期工作制或断续工作制：主触头保持闭合的有载时间与无载时间都很短（有确定的比值），不足以使电器达到热平衡。断续工作制用通电时间和负载因数表征其特性，负载因数是通电时间与整个通断操作周期之百分比，标准值为 15%、25%、40% 及 60%。

每小时操作循环次数（操作频率）的优选级别：接触器为 1、3、12、30、120、300、1200；起动器为 1、3、12、30。

d. 短时工作制：主触头闭合时间不足以使电器达到热平衡，无载时间足以使其温度恢复到正常状况。

e. 周期工作制：稳定或可变负载有规律地反复运行的一种工作制。

6) 控制电路。常用的接触器操作控制电路是电气控制电路。电气控制电路有电流种类、额定频率、额定控制电路电压  $U_c$  和额定控制电源电压  $U_s$  等几项参数。当需要在控制电路中接入变压器、整流器和电阻器等时，接触器控制电路的输入电压（即控制电源电压  $U_s$ ）和其线圈电路电压（即控制电路电压  $U_c$ ）可以不同。但在多数情况下，这两个电压是一致的。当控制电路电压与主电路额定工作电压不同时，应采用如下标准数据。

直流：24, 48, 110, 125, 220, 250V；

交流：24, 36, 48, 110, 127, 220V。

具体产品在额定控制电源电压下的控制电路电流由制造厂提供。

7) 辅助电路。包括辅助电路种类、触头种类及触头数量等，一般以附件型式提供。

8) 机械寿命和电寿命。接触器的机械寿命用其在需要正常维修或更换机械零件前，包括更换触头，所能承受的无载操作循环次数来表示。

接触器的选用主要是选择型式、主电路参数、控制电路参数和辅助电路参数，以及按电寿命、使用类别和工作制选用，另外需考虑负载条件的影响，分述如下：

1) 型式的确定。型式的确定，主要是确定极数和电流种类，电流种类由系统主电流种类确定。三相交流系统中一般选用三极接触器，当需要同时控制中性线时，则选用四极交流接触器，单相交流和直流系统中则常有两极或三极并联的情况。一般场合下，选用空气电磁式接触器；易燃易爆场合应选用防爆型及真空接触器等。

2) 主电路参数的确定。主电路参数的确定主要是额定工作电压、额定工作电流（或额定控制功率）、额定通断能力和耐受过载电流能力。接触器可以在不同的额定工作电压和额定工作电流下工作。但在任何情况下，所选定的主电路额定工作电压都不得高于接触器的额定绝缘电压，所选定的主电路额定工作电流（或额定控制功率）也不得高于接触器在相应工作条件下规定的额定工作电流（或额定控制功率）。

接触器的额定通断能力应高于通断时电路中实际可能出现的电流值，耐受过载电流能力也应高于电路中可能出现的工作过载电流值。电路的这些参数都可通过不同的使用类别及工作制来反映，当按使用类别和工作制选用接触器时，实际上已考虑了这些因素。生产中广泛使用的中、小容量笼型异步电动机，其中大部分电动机的负载是一般任务，它相当于 AC-3 使用类别。对于控制机床电动机的接触器，其负载比较复杂，如果负载明显地属于重任务类，则应选用 AC-4 类别；如果负载为一般任务与重任务混合的情况，则可根据实际情况

选用 AC-3 或 AC-4 类接触器，如确定选用 AC-3 类时，也要降级使用。适用于 AC-2 类的接触器一般也不宜用于控制 AC-3 及 AC-4 类的负载，因为它的接通能力较低，在频繁接通这类负载时容易发生触头熔焊现象。

3) 控制电路参数和辅助电路参数的确定。接触器的线圈电压应按选定的控制电路电压确定。交流接触器的控制电路电流种类分交流和直流两种，一般情况下，多用交流，当操作频繁时则常选用直流。

接触器的辅助触头种类和数量，一般应根据系统控制要求确定所需的辅助触头种类（常开或常闭）、数量和组合型式，同时应注意辅助触头的通断能力和其他额定参数。当接触器的辅助触头数量和其他额定参数不能满足系统要求时，可增加接触器式继电器以扩大功能。

4) 电寿命和使用类别的选用。接触器的电寿命参数由制造厂给出。电寿命指标和使用类别有关。接触器制造厂商均以不同形式（表格或曲线）给出有关产品电寿命指标的资料，可以根据需要选用。

(4) 热继电器。热继电器是一种利用电流热效应原理工作的电器，具有与电动机容许过载特性相近的反时限动作特性，主要与接触器配合使用，用于对三相异步电动机的过电流和断相保护。

三相异步电动机在实际运行中，常会遇到因电气或机械原因等引起的过电流（过载和断相）现象。因此，在电动机回路中应设置电动机保护装置。常用的电动机保护装置种类很多，但使用最多、最普遍的是双金属片式热继电器。目前，双金属片式热继电器均是三相式，并有带断相保护和不带断相保护两种。

选用热继电器时，应根据使用条件、工作环境、电动机的型式及运行条件与要求、电动机起动情况及负载情况等几个方面综合加以考虑。必要时应进行合理计算。

1) 热继电器型式的选择，一般热继电器均有上述几种安装方式，应按实际安装情况选择。安装时，热继电器应布置在整个开关柜（箱）的下部。

2) 原则上，热继电器的额定电流应按电动机的额定电流选择。但对于过载能力较差的电动机，其配用的热继电器的额定电流应适当小些。通常选取热继电器的额定电流（实际上是选取热组件的额定电流）为电动机额定电流的 60% ~ 80%，并应校验其动作特性。

在不频繁起动的场合，要保证热继电器在电动机的起动过程中不产生误动作。通常，当电动机起动电流为其额定电流的 6 倍及以下、起动时间不超过 5s 时，若很少连续起动，就可按电动机的额定电流选用热继电器。当电动机起动时间较长，就不宜采用热继电器，而采用过电流继电器作为保护。

3) 热继电器的主要参数是热组件的整定电流范围，该参数选择得好坏，直接影响热继电器的保护性能和动作的可靠性。通常选择的整定电流范围的中间值应等于或稍大于电动机的额定电流，每一种额定工作电流等级的热继电器有若干不同额定电流的热组件可供选择。

4) 由于热继电器有热惯性，不能作短路保护，应考虑与短路保护配合问题。

5) 当电动机工作于重复短时工作制时，要按图 14-7-8 热继电器的反时限特性示意图来确定热继电器的允许操作频率。因为热继电器的操作频率是很有限的，操作频率较高时，

热继电器的动作特性会变差,甚至不能汇常工作。对于可逆运行和频繁通断的电动机,不宜采用热继电器作保护,必要时可选用装入电动机内部的温度继电器。

6) 热继电器安装接线时,应注意连线的导线截面积和长度在允许范围内。

(5) 熔断器。熔断器是一种当电流超过规定值一定时间后,以它本身产生的热量使熔体熔化而分断电路的电器,也可以说,它是一种利用热效应原理工作的电流保护电器。它广泛应用于低压配电系统和控制系统及用电设备中作短路和过电流保护,能在电路发生短路或严重过电流时快速自动熔断,从而切断电路电源,起到保护作用。

熔断器互相配合或与其他开关电器的保护特性配合,在一定短路电流范围内可满足选择性保护要求。

选用的一般原则:熔断器的主要参数有额定电压、额定电流、额定分断电流等,当有上下级熔断器选择性配合要求时,应考虑过电流选择比。选用时,首先应根据实际使用条件确定熔断器的类型,包括选定合适的使用类别和分断范围,在保证使熔断器的最大分断电流大于线路中可能出现的峰值短路电流有效值的前提下,选定熔体的额定电流。同时应使熔断器的额定电压不应低于线路额定电压。

一般全范围熔断器(g类熔断器)兼有过电流保护功能,主要用作配电主干线路及电缆、母线等的短路保护和过电流保护;而部分范围熔断器(a类熔断器)的作用主要用于照明线路和电动机等设备的短路保护。由于低倍过电流不能使这种熔断器动作,故在使用这种熔断器时,应另外配用热继电器等过电流保护组件。

熔体额定电流的确定:

1) 用于保护负载电流比较平稳的照明或电热设备,以及一般控制电路的熔断器,其熔体额定电流 $I_n$ 一般按线路计算电流确定。

2) 用于保护电动机的熔断器,应按电动机的起动电流倍数考虑躲过电动机起动电流的影响,一般选熔体额定电流 $I_{Fe}$ 为电动机额定电流 $I_{Me}$ 的1.5~3.5倍。对于不经常起动或起动时间不长的电动机,选较小倍数;对于频繁起动的电动机选较大倍数;对于给多台电动机供电的主干线母线处的熔断器的熔体额定电流可按下式计算

$$I_{Fe} \geq (2.0 \sim 2.5) I_{M_{\max}} + \sum I_{Me}$$

式中  $I_{Fe}$ ——熔断器的额定电流;

$I_{Me}$ ——电动机的额定电流。

$I_{M_{\max}}$ ——多台电动机中容量最大的一台电动机的额定电流;

$\sum I_{Me}$ ——其余电动机额定电流之和。

为防止发生越级熔断,上、下级(即供电干、支线)熔断器间应有良好的协调配合,宜进行较详细的整定计算和校验。

3) 熔断器与其他开关电器配合使用时的选用:通常电动机控制电路由熔断器、断路

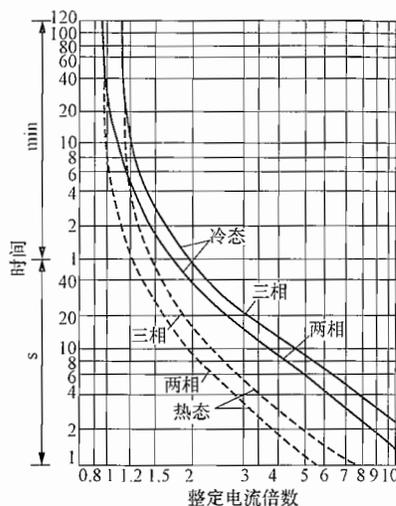


图 14-7-8 热继电器的反时限特性示意图

器、接触器、热继电器、电缆（导线）、电动机所组成。其中的断路器作为电路的电源开关，接触器用于远距离控制电动机，热继电器用于保护电动机、电动机馈电电缆和接触器不受过电流破坏，而接触器、热继电器、电动机馈电电缆和电动机本身的短路保护由断路器负责。如果回路中某处的短路电流可能超过所设断路器的额定分断能力，则需在断路器的电源侧增设一只后备保护熔断器。后备保护熔断器必须在短路电流达到断路器的额定分断能力以的分断。

#### 14.7.1.4 转子回路控制电器的选择

绕线型异步电动机转子回路控制电器包括串入转子回路的频敏变阻器、电阻器及接入、切除以上设备时采用的接触器。

绕线型异步电动机启动时采用的频敏变阻器及电阻器的选择方法见 14.3。

采用转子串电阻调速时，电阻值的选择方法见 14.4。

反接制动时接入转子回路电阻器的选择方法见 14.5.2。

接入、切除频敏变阻器和电阻器的接触器的选用方法根据转子回路的电压、电流选择接触器的型式及额定工作电压、额定工作电流、额定通断能力和耐受过载电流能力等参数，具体可参考本章低压电动机定子回路接触器的选择方法。

### 14.7.2 低压交流电动机控制回路

#### 14.7.2.1 低压交流电动机控制回路的一般规定

摘自 GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》2.5节。

##### 2.5 低压交流电动机的控制回路

2.5.1 电动机的控制回路应装设隔离电器和短路保护电器，但由电动机主回路供电且符合下列条件之一时，可不另装设：

- 1 主回路短路保护器件能有效保护控制回路的线路时。
- 2 控制器回路接线简单、线路很短且有可靠的机械防护时。
- 3 控制回路断电会造成严重后果时。

2.5.2 控制回路的电源及接线方式应安全可靠、简单适用，并应符合下列规定：

- 1 当 TN 或 TT 系统中的控制回路发生接地故障时，控制回路的接线方式应能防止电动机意外启动或不能停车。
- 2 对可靠性要求高的复杂控制回路可采用不间断电源供电，亦可采用直流电源供电。直流电源供电的控制回路宜采用不接地系统，并应装设绝缘监视装置。
- 3 额定电压不超过交流 50V 或直流 120V 的控制回路的接线和布线应能防止引入较高的电压和电位。

2.5.3 电动机的控制按钮或控制开关宜装设在电动机附近便于操作和观察的地点。当需在不能观察电动机或机械的地点进行控制时，应在控制点装设指示电动机工作状态的灯光信号或仪表。

2.5.4 自动控制或连锁控制的电动机应有手动控制和解除自动控制或连锁控制的措施；远方控制的电动机应有就地控制和解除远方控制的措施；当突然启动可能危及周围人员安全时，应在机械旁装设启动预告信号和应急断电控制开关或自锁式停止按钮。

2.5.5 当反转会引起危险时，反接制动的电动机应采取防止制动终了时反转的措施。

**2.5.6 电动机旋转方向的错误将危及人员和设备安全时。应采取防止电动机倒相造成旋转方向错误的措施。**

#### 14.7.2.2 低压交流电动机控制回路的电器选择

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》5.2.7、5.2.8节。

(1) 控制回路常用隔离电器和短路保护电器有熔断器、断路器及开关设备。选择时应根据控制回路电压等级及负荷容量选择电器参数。

(2) 接入控制回路中的接触器、起动机线圈及主回路控制电器（包括接触器、断路器、熔断器、热断电器等）的辅助触点，应根据控制回路的电压等级，电流负荷性质大小及辅助触点的数量、容量，在选择主回路电器时加以考虑。

(3) 控制回路中选用各种不同功能的继电器，用于控制电路中进行信号传递、放大、转换、连锁等，从而控制主电路和辅助电路按预定的动作程序进行工作，实现自动控制和保护的目。

继电器的选用原则如下：

1) 时间继电器。选用时间继电器时，要考虑的特殊要求主要是延时范围、延时类型、延时精度和工作条件。

2) 保护继电器。保护继电器是指在电路中起保护作用的各种继电器，主要有过电流继电器、欠电流继电器、过电压继电器和欠电压（零电压、失电压）继电器等。

3) 过电流继电器。过电流继电器主要用作电动机的短路保护，对其选择的主要参数是额定电流和动作电流。

4) 欠电流继电器。欠电流继电器一般用于直流电动机的励磁回路中监视励磁电流，作为直流电动机的弱磁超速保护或励磁电路与其他电路之间的连锁保护。选择的主要参数为额定电流和释放电流，其额定电流应大于或等于额定励磁电流，其释放电流整定值应低于励磁电路正常工作范围内可能出现的最小励磁电流，可取最小励磁电流的0.85倍。选用欠电流继电器时，其释放电流的整定值应留有一定的调节裕量。

5) 过电压继电器。过电压继电器用来保护设备不受电源系统过电压的危害，多用于发电机—电动机机组系统中。选择的主要参数是额定电压和动作电压：过电压继电器的动作值一般按系统额定电压的1.1~1.2倍整定。一般过电压继电器的吸引电压可在其线圈额定电压的一定范围内调节，为了保证过电压继电器的正常工作，通常在其吸引线圈电路中串联附加分压电阻的方法确定其动作值，并按电阻分压比确定所需串入电阻的值。计算时，应按继电器的实际吸合动作电压值考虑。

6) 欠电压（零电压、失电压）继电器。欠电压继电器在线路中多用作失电压保护，防止电源故障后恢复供电时系统的自启动。欠电压继电器常用一般电磁式继电器或小型接触器充任，其选用只要满足一般要求即可，对释放电压值无特殊要求。

(4) 主令电器。主令电器是电气自动控制系统中用于发送或转换控制指令的电器，是一种用于辅助电路的控制电器。主令电器应用广泛、种类繁多，按其作用可分为按钮、行程开关、接近开关、万能转换开关（组合开关）、主令控制器及其他主令电器，如脚踏开关、倒顺开关、紧急开关、钮子开关、指示灯等。

主令电器的选用原则。主令电器首先应满足控制电路的电气要求，如额定工作电压、额定

工作电流（含电流种类）、额定通断能力、额定限制短路电流等。这些参数的确定原则与选用主电路开关电器和控制电器的原则相同。其次，应满足控制电路的控制功能要求，如触头类型（动合、动断、要否延时等）、触头数目及其组合型式等。此外，还需要满足一系列特殊要求，这些要求随电器的动作原理、防护等级、功能执行组件类型和具体设计的不同而异。

## 14.8 电动机调速系统性能指标

### 14.8.1 电气传动控制系统的性能指标

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》9.1节。

电气传动控制系统的性能指标主要包括动态和静态性能指标。动态性能指标主要是指在给定信号或扰动信号作用下，系统输出的动态响应中的各项指标。静态性能指标是指在控制信号和扰动信号作用结束后3~4倍动态调节时间后的系统输出的实际值各项性能指标。

这些性能指标用于评价或考核电气传动控制系统的品质。

如果没有特别规定，测量电气传动控制系统的性能指标可以在以下条件下进行：

- (1) 基本速度（或额定频率）。
- (2) 电动机额定电压。
- (3) 空载（一般应将电动机与负载机械的联轴器、齿轮箱等脱开，否则应相应降低系统的性能指标，并注意阶跃给定下机械实际承受的能力）。

将测量结果等效折算到额定条件下，作为系统的性能指标。

### 14.8.2 调速系统的静态指标

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》4.1.2节。

#### 14.8.2.1 稳态调速精度

稳态调速精度是转速给定值 $n^*$ 与实际值 $n$ 之差 $\Delta n$ 的相对值（%），其基值为电动机额定转速 $n_N$ 。在计算 $\Delta n$ 时，要考虑三个导致转速变化的因素：

- (1) 负载转矩变化（从空载至额定转矩 $T_N$ ）。
- (2) 环境温度变化（ $\pm 10^\circ\text{C}$ ）
- (3) 供电电网电压变化（ $-5\% \sim +10\%$ ）。

$$\text{稳态调速精度} = \frac{\Delta n}{n_N} \times 100\% = \frac{n^* - n}{n_N} \times 100\%$$

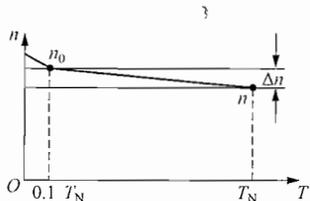


图 14-8-1 静差率示意

#### 14.8.2.2 静差率和调速范围

静差率又称为转速变化率，是指在某一设定转速下，负载由空载（ $\leq 0.1T_N$ ）到额定负载（ $T_N$ ）变化时，空载转速 $n_0$ 与额定负载下的转速 $n$ 之差的相对值（%），其基值是 $n$ （见图14-8-1）

$$\text{静差率} = \frac{n_0 - n}{n} \times 100\%$$

静差率与调速系统机械特性的硬度有关，特性越硬，静差率越小；另外，静差率还与工作转速有关，转速越低，静差率越大。

调速范围又称为调速比，是指在符合规定的静差率条件下，电动机从最高转速 $n_{\max}$ 到最低转速 $n_{\min}$ 的转速变化倍数（见图14-8-2）

$$\text{调速范围} = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

调速范围和静差率两项指标不是相互孤立的, 必须同时提出才有意义。

#### 14.8.2.3 稳速精度

稳速精度是指在规定的电网质量和负载扰动条件下, 按给定转速在规定的运行时间  $T$  内连续运行, 每隔一定时间间隔  $t_s$  测量一次转速平均值, 取其中的最大值  $n_{\max}$  和最小值  $n_{\min}$ , 稳速精度值 (%) 按下式计算 (见图 14-8-3)

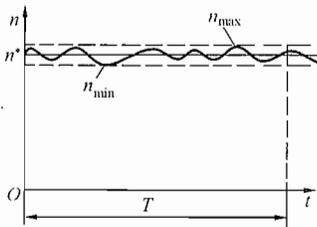


图 14-8-3 稳速精度示意

$$\text{稳速精度} = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\max} + n_{\min}} \times 100\%$$

#### 14.8.2.4 转速分辨率

在数字控制调速系统中, 转速设定值被量化后, 严格说来调速是有级的。转速分辨率是指相邻两级转速设定之差  $\Delta n^*$  的相对值 (%), 其基值是最高转速设定值  $n_{\max}^*$ , 即

$$\text{转速分辨率} = \frac{\Delta n^*}{n_{\max}^*} \times 100\%$$

转速分辨率取决于数字控制器的位数。

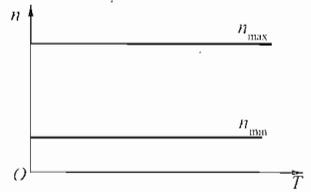


图 14-8-2 调速范围示意

### 14.8.3 调速系统的动态指标

#### 14.8.3.1 阶跃给定信号响应指标

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》9.1.1节。

在一般电气传动控制系统中, 典型的响应特性是速度给定、电流给定(或转矩给定)在阶跃变化后, 实际速度、实际电流(或实际转矩)跟随给定变化的时间响应曲线, 见图 14-8-4。

由于系统输出时间响应曲线可能含有大量纹波, 如果没有特别约定, 时间响应曲线应取平均曲线。

此外, 从给定信号发出到实际值开始响应可能存在传输延时(滞后)时间  $t_0$ , 在具体测量考核时, 应予以注意。

(1) 响应时间  $t_{an}$ 。又称起调时间, 是指在规定的运行和使用条件下, 施加规定的单位阶跃给定信号, 系统实际值第一次达到给定值的时间。

(2) 动态响应偏差带  $\pm \delta\%$ 。实际值与给定值相比较的正负偏差值范围, 以实际值与给定值相比较的偏差值除以最大给定值的百分数表示, 如果没有特别规定, 该偏差带一般为  $\pm 2\%$  左右。

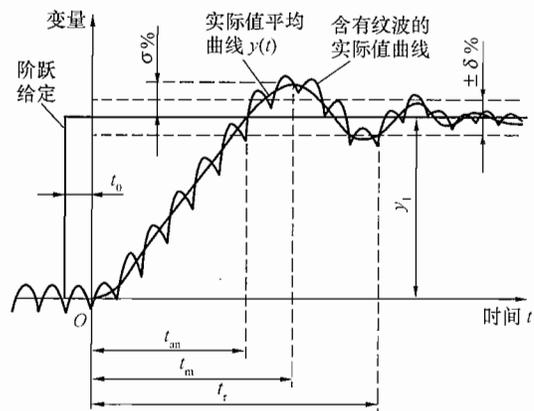


图 14-8-4 在阶跃给定控制信号下的系统响应

$y_1$ —阶跃给定值;  $t_0$ —信号传输时间;

$t_m$ —实际值达到最大峰值的时间;  $t_{an}$ —响应时间;

$t_r$ —调节时间;  $\pm \delta\%$ —动态响应偏差带

(3) 超调量  $\sigma\%$ 。实际值超过给定值的最大数值除以最大给定值的绝对值，以百分数表示。

$$\sigma\% = \left| \frac{y(t_m) - y_1}{y_m} \right| \times 100\%$$

式中  $y(t_m)$  ——实际值超过给定值的最大数值；  
 $y_1$  ——给定值；  
 $y_m$  ——最大给定值。

(4) 调节时间  $t_r$ 。实际值进入偏差带  $\pm\delta\%$  且不再超出该偏差带的时间。

(5) 振荡次数  $N$ 。实际值在  $t_r$  调节时间内围绕给定值摆动的次数。

### 14.8.3.2 斜坡给定信号响应指标

斜坡给定信号的动态响应指标主要是实际值的跟踪误差  $\delta_1\%$ ，定义为给定值以商定的固定斜率变化到额定值，实际值在跟随给定值变化过程中的误差值与最大给定值的比值，以百分数表示，见图 14-8-5。

### 14.8.3.3 阶跃扰动信号作用下的指标

这些指标是指在给定不变情况下，在阶跃扰动作用下的控制系统性能指标，主要以动态波动量、回升时间、恢复时间和动态偏差面积等指标衡量，见图 14-8-6。

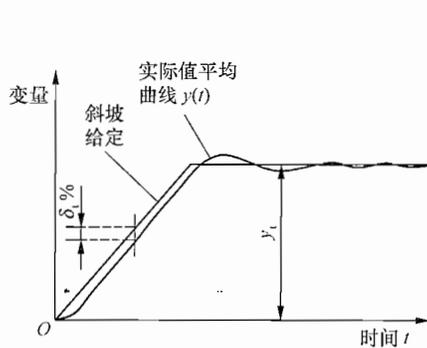


图 14-8-5 系统对斜坡给定的响应特性  
 $y_1$ —稳态给定值； $\delta_1\%$ —跟踪误差

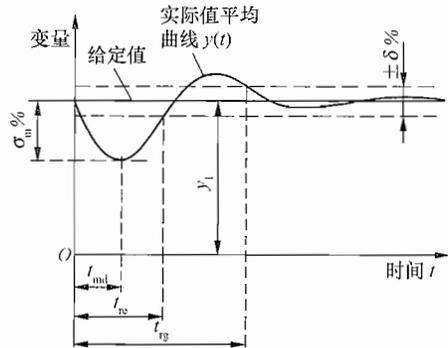


图 14-8-6 系统对阶跃扰动信号的动态响应  
 $y_1$ —给定值； $\sigma_m\%$ —动态波动量；  
 $t_{md}$ —达到最大偏差的时间； $t_{rc}$ —动态恢复时间；  
 $t_r$ —调节时间； $\pm\delta\%$ —偏差带

速度控制系统中的负载转矩跃变、电网电压快速波动等一般属于阶跃变化的扰动信号。一般在额定阶跃转矩扰动下考核各项指标。

(1) 动态波动量  $\sigma_m\%$ 。在动态扰动下，实际值与给定值的最大偏差绝对值与最大给定值之比，以百分数表示。

$$\sigma_m\% = \left| \frac{y(t_{md}) - y_1}{y_m} \right| \times 100\%$$

式中  $y(t_{md})$  ——实际值与给定值的最大偏差；  
 $y_1$  ——给定值；  
 $y_m$  ——最大给定值。

(2) 动态波动恢复时间  $t_{re}$ 。在动态扰动下, 实际值从开始波动到第一次恢复到偏差带  $\pm 8\%$  的时间。

(3) 动态调节时间  $t_{rg}$ 。实际值在动态扰动下从开始波动到恢复到偏差带  $\pm 8\%$  且不再超出偏差带的时间。

(4) 动态偏差面积  $A_m\%$ 。动态波动量  $\sigma_m\%$  与动态波动恢复时间  $t_{re}$  的乘积的  $1/2$  作为动态偏差面积, 即

$$A_m\% = \left| \frac{\sigma_m\% \times t_{re}}{2} \right|$$

$A_m\%$  是衡量电气传动控制系统最重要的动态性能指标之一。

#### 14.8.4 电气传动系统性能指标的工程应用

##### 14.8.4.1 工程应用方法

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》9.2节。

对于任何一个连续的线性的自动控制系统或环节, 描述其特性的最直接和最有效的方法是微分方程。但随着微分方程的阶次的增高, 求解十分不便。工程上常用拉氏变换法将微分方程变成代数方程, 使求解大为简便。

传递函数的定义: 任一系统或环节在零初值条件下输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比定义为系统或环节的传递函数。一个传动系统由被调节对象及系统各种调节器、功率变换器等环节组成, 各环节有各自的传递函数, 系统的传递函数由各环节的传递函数叠加组成。

通过研究和计算传递函数, 设计开发出与电气传动对象相适应的控制系统, 使系统的各种稳态和动态性能指标达到应用要求, 是传动系统设计的一个目标和任务。

随着计算机技术的迅速发展, 工程系统通用仿真软件的应用得到了很快发展, 可以通过仿真软件, 设计、模拟各种复杂系统的模型结构, 进行系统的各种运行状态的模拟, 得出相应的大量数据, 大大缩短了真实系统的研制时间和经费。计算机仿真已成为电气传动控制系统工程研究的重要方法。此外, 目前电气传动控制系统已大量采用数字控制, 不仅采用了常规系统的控制方法 [如比例积分微分(PID)调节器], 还引入了诸如自适应控制、模糊控制等方法, 达到并超过了模拟系统的性能指标。

##### 14.8.4.2 二阶闭环调节系统及其品质指标

依据:《钢铁企业电力设计手册》下册 26.8.1 节。

对于晶闸管直流调速系统的静态性能指标即品质指标, 通常是以阶跃给定下被调节量(输出量)的过渡过程来评价的。

如果系统的调节对象是一个放大系数为  $K_x$ , 时间常数为  $T_1$  的惯性环节, 选用一个积分调节器与调节对象串联, 即构成二阶闭环调节系统的标准形式, 见图 14-8-7。

为了得到二阶预期系统的过渡过程, 积分调节器的积分时间  $\tau_i$  按下式计算

$$\tau_i = 2K_x T_1$$

此时, 可以得到二阶闭环调节系统的典型传递函数为

$$K(s)_b = \frac{1}{1 + 2T_1 s + 2T_1^2 s^2}$$

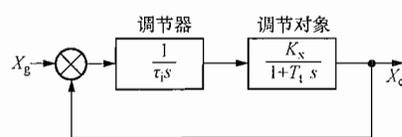


图 14-8-7 二阶闭环调节系统结构图的标准形式

二阶闭环调节系统的品质指标为：

(1) 起调时间  $t_q$ 。 $t_q$ 是阶跃给定作用后，输出量  $X_c$ 第一次达到给定量 1 所经历的时间

$$t_q = 4.7T_1$$

(2) 最大超调量  $\Delta X_{c_{\max}}$ 。系统的最大超调量等于过渡过程中  $X_c$ 与给定值 1 的最大偏差，即

$$\Delta X_{c_{\max}} = 4\%$$

(3) 调整时间  $t_1$ 。从调整开始 ( $t=0$ ) 到超调量衰减到小于 2% 的时间称为调整时间，二阶闭环调节系统的调整时间为

$$t_1 = 8.5T_1$$

(4) 超调次数  $Z$ 。二阶闭环调节系统的超调次数

$$Z = 0.6 < 1$$

即超调仅有一次。

(5) 静态误差  $\Delta X_j$ 。阶跃给定下，经过相当长时间之后，稳定状态下输出量  $X_c$ 与给定量  $X_g$ 之间的误差称静误差  $\Delta X_j$ 。二阶闭环调节系统的静态误差

$$\Delta X_j = 0$$

即二阶闭环调节系统属无差调节系统。

## 14.9 PLC 的应用

### 14.9.1 PLC 的基本组成及工作原理

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》12.3.1节。

#### 14.9.1.1 PLC 的基本组成

可编程控制器（Programmable Logical Controller, PLC）是一种专用的工业控制装置。它比一般的计算机具有更强的与工业过程相连接的接口和更直接的适用于控制要求的编程语言。所以 PLC 与计算机控制系统相似，也具有电源模块、中央处理单元（CPU）、存储器、输入输出接口模块、编程器和外部设备等，

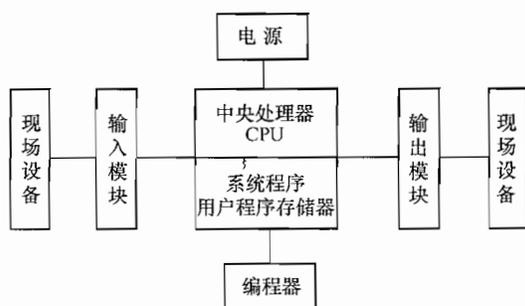


图 14-9-1 可编程控制器结构框图

小型 PLC 多为 CPU 与 I/O 接口集成在一起的单元式结构，功能较少，大中型 PLC 系统构成通常采用模块化结构，功能强，设计灵活。其结构框图见图 14-9-1。

(1) 中央处理单元（Central Processing Unit, CPU）是 PLC 控制系统的中枢。它包括微处理器和控制接口电路。它要完成软硬系统的诊断，对电源、系统硬件配置、编程过程中的语法进行检查，并根据

不同情况进行处理，在运行过程中，按系统程序赋予的功能，读入存储器内的用户程序，并以扫描方式读入所有输入装置的状态和数据，存入输入映像区中，然后逐条解读用户程序，执行包括逻辑运算、算术运算、比较、变换、数据传输等任务，在扫描程序结束后，更新内部标志位，将结果送入输出映像区或寄存器内，最后将映像区内的各输出状态和数据传送到相应的输出设备中，如此循环运行。CPU 还要完成与编程设备的通信、连接打印机等功能。

(2) 存储器是用来存放程序和数据的存储器,包括系统程序存储区,用户程序存储区和系统数据存储器。系统程序存储区存放 PLC 的系统程序,包括监控程序、管理程序、命令解释程序、自诊断程序、模块化功能子程序等,其随 CPU 固化在 EPROM 中。用户程序存储区用于存放用户编制的应用程序,不同的 PLC 存储容量大小不同,有随机的,也有扩展存储的, RAM、EPROM、EEPROM 都可用来存放用户程序。系统数据存储器包括输入过程映像区、输出过程映像区及内部继电器、数据寄存器、定时器、计数器、累加器等。

(3) 电源单元是 PLC 内部电源及总线电源供给部分。其作用是把外部供给电源转换成 PLC 内部各单元所需电源。它还应包括掉电保护电路和后备电池电源,以保持 RAM 在外部电源掉电后存储的内容不丢失。因其应用于工业环境中,各种电磁干扰较多,且工业供电电压波动范围较大,应采用电压适应范围宽、输出稳定的专用电源模块。一般电源模块供电电压范围为 AC 85 ~ 264V DC 18 ~ 30V。

(4) I/O 接口模块是 PLC 的 CPU 与现场输入、输出装置或其他外部设备之间的连接接口部件。PLC 系统通过 I/O 模块与现场设备相连,每个模块都有与之对应的编程地址,模块上具有 I/O 状态显示,为满足不同需要,有数字量输入输出模块、模拟量输入输出模块、计数器等特殊功能模块可供选择,PLC 所有 I/O 模块都具有光耦合电路,以提高 PLC 的抗干扰能力。I/O 接口模块既可与 CPU 放置在一起,也可通过远程站放置在设备附近。

(5) 编程器与外部设备。编程器通过通信接口与 CPU 相连,实现人机对话,用户可通过编程器对 PLC 进行程序编制、系统调试和状态监控等操作,根据功能需要,有手持式和台式编程器可供选择,手持式编程器多用于小型 PLC 上,采用液晶显示器,信息量少,必须在线编程。大中型 PLC 多采用台式编程器,它由台式计算机或笔记本计算机,配以专用的程序开发软件组成,信息量大,功能齐全,既可实现在线 (on-line) 和离线 (off-line) 编程,还可完成程序的上载及打印输出等功能。

#### 14.9.1.2 PLC 的工作原理

继电器连锁控制采用硬件逻辑并行运行的方式,随着继电器线圈的得电或失电,不管在控制线路的哪个位置,该继电器的触点同时动作。而 PLC 是采用计算机技术的软件逻辑连锁,其 CPU 按顺序周期性地逐条扫描用户程序,每次扫描都有一定的时间,当一条语句被执行后,其产生的结果并不马上反映到输出设备上,必须等本次扫描结束后才会被统一执行。但用户程序的扫描顺序也不是固定不变的,可以通过定时中断或外部中断加以调整。

(1) I/O 映像区。在 PLC 内开辟了 I/O 映像区。其大小与 PLC 系统 CPU 规模有关。对于系统的每一个输入点,总有输入映像区的一个位与其相对应。对于系统的每一个输出点,都有输出映像区的一个位与其相对应。系统的输入、输出点的编址号与 I/O 映像区映像寄存器地址号相对应。PLC 工作时将采集到的输入信号状态存入输入映像区对应位上;将运算结果存放到输出映像区对应的位上。PLC 在执行用户程序时所需输入输出继电器的数据取用于 I/O 映像区,而不直接与外部设备发生关系。

I/O 映像区的建立,使 PLC 工作时只和内存有关地址单元内所存信息状态发生关系,而系统输出也只给内存某一地址单元设置一状态。这样不仅加快了程序执行速度,而且还使控制系统与外界隔离。同时对外部设备更新时间快慢不影响系统扫描时间,提高了系统的抗干扰能力。

(2) 循环扫描的工作方式。PLC 运行时，其循环扫描过程一般分为三个阶段进行，即输入采样阶段、用户程序执行阶段和输出刷新阶段。期间，CPU 以一定的扫描速度重复执行上述过程，见图 14-9-2。PLC 通电后，系统程序按照一定顺序对系统内部的各种任务进行查询、判断和执行，这个过程实质上是按顺序循环扫描的过程。执行一个循环

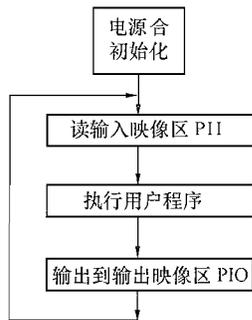


图 14-9-2 PLC 循环扫描工作过程

扫描过程所需的时间称为扫描周期，其典型值为 1~150ms。由于 PLC 工作是采用循环扫描的工作方式，所以在编制用户程序时要特别注意，尽量不要编制循环程序或尽量少用循环语句。而循环时间不能超过系统的循环扫描时间，否则系统不能正常工作。

1) 初始化。初始化即系统上电时对系统进行复位，对一些通信模块及一些智能模块进行初始化设定及同步等。初始化工作只在 PLC 上电时执行一次。

2) 输入采样阶段。PLC 以扫描方式读入所有输入模块的状态和数据，并存入输入映像区的寄存器中，输入采样结束后，转入用户程序执行阶段，此时即使输入状态和数据发生了变化，输入映像区中的内容也不会改变，只能在下一个循环周期中才能被刷新。因此，如果输入信号是脉冲形式，其脉冲宽度必须大于一个扫描周期才能保证被系统接收到。

3) 程序执行阶段。CPU 总是按一定顺序依次地扫描用户程序，如果程序是梯形图形式，就按照先左后右、先上后下的顺序对控制线路进行解读运算，如果程序是语句表形式，则按照先上后下的顺序对程序进行解读，然后根据解读的结果，刷新系统 RAM 存储区中对应寄存器的状态，或者刷新输出映像区的状态。在用户程序执行过程中，输入映像区内的状态和数据不会发生变化，而输出映像区和内部继电器、数据寄存器、定时器、计数器、累加器等中间变量的状态及数据都有可能发生变化，其状态与在用户程序中的位置有关，同一中间变量在前面改变后将在后面程序应用时起作用。

PLC 的扫描既可按照固定的顺序进行，也可按照用户程序所指定的顺序进行。比如可采取硬件中断方式或时间间隔中断方式来执行程序，这样可使一些要求响应快的任务得到最快的响应，提高了系统的实时性。

4) 输出刷新阶段。当扫描用户程序结束后，PLC 就进入输出刷新阶段，在此期间，CPU 按照输出映像区内对应的状态和数据刷新所有的输出锁存电路，再经输出模块驱动外部设备，达到控制的目的。

(3) PLC 系统的扫描周期。PLC 系统的扫描周期为包括系统自诊断、通信、输入采样、用户程序执行和输出刷新等用时的总和。对扫描时间产生影响的因素较多，不同型号、不同系列的 PLC 本身固有的扫描速度是不同的，这与所采用的处理器型号有很大关系，早期的处理器多采用单片机、微处理器，如 MCS51J、MC68000、Intel8086 等，随着近年来计算机技术的发展，功能强、速度快的高档微处理器应用于 PLC 系统，如 80386、80486，有的 PLC 还采用了双 CPL 技术，大大提高了 PLC 的扫描速度。就同型号的 PLC 来说，影响扫描时间的因素主要有：通信所占时间的长短与连接的外部设备多少、通信距离的远近、通信方式、通信介质等（一般大型 PLC 有较大的 I/O 映像区，映像区内 I/O 速度快慢不影响 PLC 扫描时间）。影响系统循环扫描时间的主要因素为：

- 1) 输入采样和输出刷新所需的时间取决于所连接的 I/O 点数多少。
- 2) PLC 的扫描速度与用户程序的长短密切相关, 用户程序的长短则取决于控制对象的复杂程度和编程的技巧。同样一个功能, 如果程序编制得巧, 程序执行得就快, 若程序中用了很多循环语句, 则程序执行就慢。
- 3) 除此之外, 还必须考虑用户程序中是否含有大量的运算指令和特殊功能指令, 因为扫描特殊功能指令的时间远远超过扫描基本逻辑指令所需的时间, 而且不同的特殊功能指令所需要的时间都不相同。

#### 14.9.2 PLC 系统的组态

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》12.3.2节。

为了经济地实施在传动工程和自动化技术中的众多任务, 高性能的组态工具是必不可少的。各个 PLC 生产厂商都依据国际标准 IEC 61131 的规定, 提供用于系统有效配置的组态环境。利用组态工具, 可为系统提供用于本地和远程操作的过程外部设备。能够在程序生成期间或程序生成之后确定硬件部件(如 CPU、程序存储器、I/O 模块地址、通信参数、远程 I/O 等)。这一组态任务能够在线(连接 PLC)以及离线(仅在 PC 上)完成。在在线操作中, 下载组态立即检查硬件的真实性, 以排除错误的输入。

组态及编程软件方面, 每个厂家都有自己的系统, 如 SIEMENS 公司的 STEP7、Schneider 公司的 MODICON CONCEPT、CE Fanuc 公司的 CONTROL 等。

#### 14.9.3 PLC 系统的编程语言

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》12.3.3节。

各个 PLC 厂商都对各自 PLC 有一套组态及编程软件, 但它们都有一个共同点, 即符合国际标准 IEC 61131-3:2002《可编程序控制器 第3部分:编程语言》。在我国也相应制定了国家标准 GB/T 15969.3—2005《可编程序控制器 第3部分:编程语言》。在这些标准中, 规定了可编程序控制器(PLC)编程语言的整套语法和定义。它包括图形化编程语言[如功能块图(FBD)语言、顺序功能图(SFC)语言、梯形图(LD)语言]和文本化编程语言[如指令表(IL)语言、结构文本(ST)语言]。

##### 14.9.3.1 功能块图(FBD)语言

功能块图(Function Block Diagram, FBD)用来描述功能、功能块和程序的行为特征, 是对预先封装在功能块中的功能单元进行分级处理的工具。

功能块概念是标准编程系统的一个重要的特征, 任何功能块可以用其他更小的、更易管理的功能块来编程, 这样就可以由许多功能块构造一个有层次的结构合理的程序。

功能块用矩形块来表示, 每一功能块的左侧有不少于一个的输入端, 在右侧有不少于一个的输出端, 功能块的类型名称通常写在块内, 但功能块实例的名称通常写在块的上部, 功能块的输入/输出名称写在块内的输入输出点的相应地方。各个功能块通过实际参数或链接使之连接在一起, 要连接的输入、输出参数要有相应的数据类型。

在一个功能块图程序区段中, 每个功能块的处理顺序是由区段中间的数据流来决定的。一个简单的算术运算功能块图的处理顺序见图 14-9-3, 即先处理(1)加法运算, 再处理(2)减法运算, 最后是(3)做乘法运算, 输出结果。

##### 14.9.3.2 顺序功能图(SFC)语言

顺序功能图(Sequential Function Chart, SFC)是一种描述控制程序的顺序行为特征的

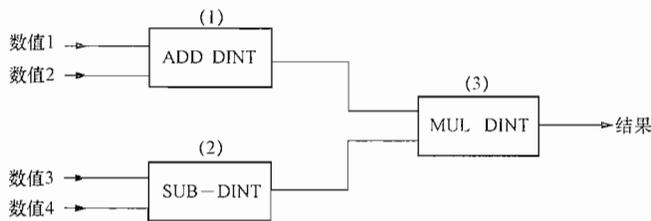


图 14-9-3 功能块图处理顺序

图形化语言，可对复杂的过程或操作由顶到底地进行辅助开发。SFC 允许一个复杂的问题逐层地分解为步和较小的能够被详细分析的顺序。

顺序功能图可以由步、有向连接和转移等集合描述。

步用矩形框表示，描述了被控系统的每一特殊状态。一个步可以是激活的，也可以是休止的，只有当步处于激活状态时，与之相应的动作才会被执行，至于一个步是否处于激活状态，则取决于上一步及转移。

有向连线表示功能图的状态转化路线，每一步是通过有向连线连接的。

转移表示从一个步到另一个步的转换，这种转换并非任意的，只有当满足一定的转换条件时，转移才能发生。

每一步是用一个或多个动作（action）来描述的。动作包含了在步被执行时应当发生的一些行为的描述，动作用一个附加在步上的矩形框来表示。

在顺序功能图语言中，每一个步中需要完成什么任务，在转移中有什么逻辑条件，可使用其他任何一种编程语言（如语句表、梯形图语言等）来编写。

功能图来源于佩特利（Petri）网，由于它具有图形表达方式，能较简单和清楚地描述复杂系统的所有现象，并能对系统中存在的一些故障、不安全因素等反常现象进行分析和建模，在模型的基础上能直接编程，因此该语言也得到了广泛应用。在 Schneider 公司的 MODICON CONCEPT、两门子公司 S7-SFC 等都提供了顺序功能图编程语言。

顺序功能图语言不仅仅是一种语言，也是一种组织控制程序的图形化方式。图 14-9-4 是一段顺序功能图语言程序。

在图 14-9-4 中，S0、S1、S2、S3 为步，其中 S0 为起始步，T1、T2、T3、T4、T5 为转移。转移的逻辑条件为 1 时转换，进入下一步，而为 0 时不转换，停留在原步。图中，S0 步转换到 S1、S2 是一分支结构。当 T1 为 1 时，转换到 S1 步，而当 T4 为 1 时，转换到 S2 步。而 S1、S2 转换到 S3 是逻辑或，执行完 S1 且 T2 为 1，则转换到 S3；或执行完 S2 且 T5 为 1，转换到 S3。当 S3 执行完成且 T3 为 1，继续往下转换。

顺序功能图语言有以下特点：

(1) 以功能为主线，条理清楚，便于对程序的理解及对功能修改。

(2) 对于大型及复杂的程序，可分工设计，采用较灵活的程序结构，可节省编程时间及调试时间。

(3) 程序执行中，只有激活的步中指令，CPU 才对它进行扫描，而未激活的步则不进行扫描，因此程序运行时，其循环扫描时间比其他编程语言编制的程序短得多。

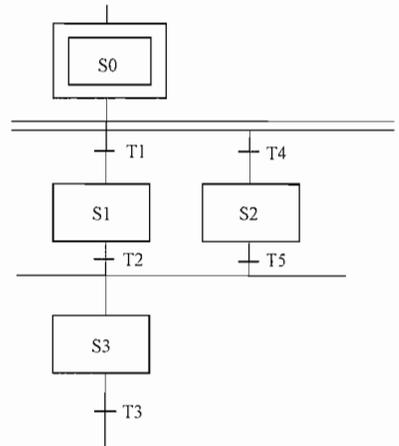


图 14-9-4 顺序功能图语言程序

### 14.9.3.3 梯形图 (LD)

梯形图 (Ladder Diagram, LD) 是 PLC 编程中被最广泛使用的一种图形化语言。梯形图来源于美国, 是基于图形表示的继电器逻辑。梯形图程序的左、右两侧有两垂直的电力轨线, 左侧的电力轨线名义上为功率流从左向右沿着水平梯级通过各个触点、功能、功能块、线圈等提供能量, 功率流的终点是右侧的电力轨线。每一个触点代表了一个布尔变量的状态, 每一个线圈代表了一个实际设备的状态。

IEC 61131-3 中的梯形图 (LD) 语言是对各 PLC 厂商的梯形图 (LD) 语言合理的吸收、借鉴, 语言中的各图形符号与各 PLC 厂商的基本一致, IEC 61131-3 的主要的图形符号包括:

(1) 触点类: 动合开触点、动断触点、正转换读出触点、负转换触点。

(2) 线圈类: 一般线圈、取反线圈、置位 (锁存) 线圈、复位去锁线圈、保持线圈、置位保持线圈、复位保持线圈、正转换读出线圈、负转换读出线圈。

(3) 功能和功能块: 包括标准的功能和功能块以及用户自己定义的功能块。

### 14.9.3.4 指令表 (IL) 语言

指令表 (Instruction List, IL) 语言是一种低级语言, 与汇编语言很相似, IEC 61131-3 的指令表语言是在借鉴、吸收世界范围的 PLC 厂商的指令表语言的基础上形成的一种标准语言, 可以用来描述功能、功能块和程序的行为, 还可以在顺序功能流程图中描述动作和转变的行为。

指令表语言能用于调用, 如有条件和无条件地调用功能块和功能, 还能执行赋值以及在区段内执行有条件或无条件的转移。指令表语言不但简单易学, 而且非常容易实现, 可不通过编译和连接编程就可以下载到 PLC。IEC 61131-3 的其他语言, 如功能块图、结构化文本等, 都可以转换为指令表语言。

指令表语言是由一系列指令组成的语言。每条指令在新一行开始, 指令由操作符和紧随其后的操作数组成, 操作数是指在 IEC 61131-3 的“公共元素”中定义的变量和常量。有些操作符可带若干个操作数, 这时, 各个操作数用逗号隔开。指令前可加标号, 后面跟冒号, 在操作数之后可加注释。

指令表语言是所谓面向累加器 Accu 的语言, 即每条指令使用或改变当前 Accu 内容。

IEC 61131-3 将这一 Accu 标记为“结果”。通常, 指令总是以操作数 LD (“装入 Accu 命令”) 开始。指令表程序如下所示:

```
START: LD   A (*注释*)
        AND  B
        ST   C
```

### 14.9.3.5 结构文本 (ST) 语言

结构文本 (Structured Text, ST) 语言是一种高级的类似于 Pascal 的文本语言, 可以用来描述功能、功能块和程序的行为, 还可以在顺序功能流程图中描述步、动作和转变的行为。结构文本 (ST) 语言是专门为工业控制应用而开发的编程语言, 具有很强的编程能力, 用于对变量赋值、回调功能和功能块、创建表达式、编写条件语句和迭代程序等, 非常适合于解决以计算为主的 PLC 任务。除了传统的 PLC 编程以外, 结构化文本还提供了强大的程序控制和数据结构, 以解决复杂的现场处理算法和过程优化。

结构文本（ST）语言的程序格式自由，可以在关键词与标识符之间任何地方插入制表符、换行字符和注释。对于熟悉计算机高级语言开发的人员来说，结构文本（ST）语言更是易学易用。

#### 14.9.4 PLC 与计算机控制系统的比较

依据：《钢铁企业电力设计手册》下册 27.1.1.3 节。

通用计算机具有十分强大的计算与数据处理能力，同时数据处理的速度已达到极高的水平，但是应用通用计算机进行工业控制，在很多方面远远没有 PLC 功能强大，表 14-9-1 给出了它们的对比。

表 14-9-1 PLC 与计算机控制系统功能与特点比较

比较项目	通用计算机	PLC
工作方式	中断方式	扫描方式
编程语言	汇编语言、高级语言	助记符语句表，梯形图等
工作环境	要求较高	可在较差的环境下工作
对使用者的要求	需进行专门的学习培训才能掌握	语言易学，稍加培训即可使用
可靠性	商业级要求	工业级，且有多种特殊设计，包括监视计时功能（Watch Dog Timer——WDT）
软件系统	功能强大，但占用存储空间过大	功能专用，占用存储空间小
价格	高	较低
适用领域	办公，管理，科学计算，家庭等	工业控制

#### 14.9.5 PLC 硬件选择方法

##### 14.9.5.1 PLC 机型的选择

依据：《钢铁企业电力设计手册》下册 27.4 节、《电气传动自动化技术手册（第 3 版）》12.3.5.1 节。

##### 14.9.5.1.1 PLC 机型的选择原则

PLC 的选型是系统设计的一个重要环节，通常各 PLC 制造厂生产的产品在可靠性上基本上是过关的，面对众多机型，不同的功能参数，就需要设计人员进行 PLC 选型时综合考虑。

PLC 的选型主要根据使用场合、控制对象、工作环境、费用以及用户的特殊要求来选择机型，使得既在功能上满足要求，又经济合理。

在 PLC 选型前，需要考虑以下几点：

- (1) 开关量输入总点数及电压等级。
- (2) 开关量输出总点数及输出功率。
- (3) 模拟量输入/输出总点数。
- (4) 是否有特殊的控制功能，如高速计数、PID 定位、通信等智能模块的选用。
- (5) 现场设备（被控对象）对响应速度、采样周期的要求。
- (6) 是否有较复杂的数值运算。
- (7) 中控室离现场设备的距离。
- (8) 是否要预留发展的可能。

(9) 熟悉 PLC 机型的详细资料及应用的实绩。

选择 PLC 机型时,要对其 I/O 点数、存储器容量、功能、I/O 模块、外形结构、系统组成、外围设备、设置条件及价格等多项指标作综合分析和比较,然后才能确定出较理想的 PLC 机型。

#### 14.9.5.1.2 中央处理器 (CPU) 模块的选择

CPU 模块是 PLC 系统的中枢,其性能的好坏,可靠性的高低直接关系到控制系统的先进性和稳定性,在选择时要注意其响应时间、运算速度和内存的大小。另外,在组成系统时,整个系统的响应速度和输入输出的处理方法、网络和扩展机架的多少、传输距离远近等许多因素有关,这是一个综合的指标,PLC 一般采用通用微处理器作为其核心,多为 16 位或 32 位,有的制造厂商还针对 PLC 的特点开发了专用的 CPU 芯片。PLC 主板上多为单 CPU,为了提高系统的快速性,一些功能强的大型 PLC 还采用了双 CPU 或多 CPU 构成系统。这样可以把一个 CPU 的任务分散开,如一个 CPU 完成浮点运算,另一个 CPU 完成位逻辑运算,再一个 CPU 完成与编程器或操作站的通信等。

在一个大的系统设计中,为提高系统的可靠性,可选择 CPU 模块及通信冗余设计。

#### 14.9.5.1.3 存储器容量的选择

与微机一样,PLC 系统的软件也分系统软件和应用软件,足够大的内存是保证系统快速运行的必要条件。一般 CPU 的系统程序已固化在 EPROM 中,且随主板提供一定的 RAM 存储区和用户程序存储区,用户不够用的话,还可选择存储卡来扩展容量。存储器种类有以下几种:

(1) RAM。这是一种可随时读/写的存储器,它读写方便,多作为 I/O 映像区和各类软设备区,包括中间继电器、数据寄存器、定时器、计数器和累加器等,与另外两种常用的存储器相比较,其存取速度最快;但作为程序存储器时,必须靠电池保持,否则停电时会造成信息丢失。

(2) EPROM。这是一种可擦除的只读存储器。在紫外线连续照射下,能将存储器内的所有内容清除。用户在程序编完后,用专用编程器离线写入程序。在断电情况下,存储器内的所有内容保持不变,因此一般用来存放系统程序及需要永久保存的用户程序。

(3) EEPROM。这是一种可电擦除的只读存储器,它兼有 RAM 和 EPROM 的优点,使用编程器就能很容易地对其所存储的内容进行修改,但必须在把其内容全部清除后才能写入程序,且其读/写操作的次数有限,约为 10000 次。

存储器容量的估算:

这里所说的存储器容量要和用户程序所需的内存容量相区分,前者指的是硬件存储器的容量,而后者指的是存储器中为用户开放的部分,前者总要大一些。到底开放给用户编程的容量有多少,可通过 PLC 的样本资料仔细辨认。只要估算出用户程序所需的内存容量,相应地就可决定存储器容量的大小。

用户程序所需的内存容量与最大的输入/输出点数成正比,此外,还受有无通信数据、通信数据量的大小以及编程人员的编程水平等影响。在无数据通信的情况下,一般的内存容量的经验公式如下

$$M = K_1 K_2 [(DI + DO) C_1 + AIC_2 + AOC_3]$$

式中  $M$ ——内存容量,字;

- $K_1$ ——备用系数，一般取  $K_1 = 1.25 \sim 1.40$ ；  
 $K_2$ ——编程人员熟练程度，一般取  $K_2 = 0.85 \sim 1.15$ ；  
 $DI$ ——开关量输入总点数；  
 $DO$ ——开关量输出总点数；  
 $AI$ ——模拟量输入回路数；  
 $AO$ ——模拟量输出回路数；  
 $C_1$ ——开关量输入/输出内存占有率，一般取  $C_1 = 10$ ；  
 $C_2$ ——模拟量输入内存占有率，一般取  $C_2 = 100 \sim 120$ ；  
 $C_3$ ——模拟量输出内存占有率，一般取  $C_3 = 200 \sim 250$ 。

在有通信接口的情况下，需根据通信接口的数量、每个接口通信数据量的大小以及具体 PC 制造厂的块转移指令所占的内存字数，确定出数据通信所占的内存大小，最后与上式的结果相加，即可估算出 PC 内存容量的大小。

表 14-9-2 给出了中小型 PLC 的 I/O 点数与存储器容量的关系。

表 14-9-2 中小型 PLC 的 I/O 点数与存储器容量的关系

I/O 点数	折合继电器数	存储器容量
128 点以下	60 个以下	0.5K 以下
128 ~ 256 点	60 ~ 100 个	0.5K ~ 1K
256 ~ 512 点	100 ~ 300 个	1K ~ 4K
512 点以上	300 ~ 1000 个	4K 以上

#### 14.9.5.1.4 输入/输出 (I/O) 点数的估算

控制系统总的输入/输出点数可根据每个单体设备的 I/O 点数来决定，最后按实际的 I/O 点数另加 10% ~ 20% 的备用系数来考虑。进行 PLC 硬件设计时，对 I/O 点数进行估算是一个很重要的基础工作，它直接影响存储器容量的估算。

一般来讲，一个按钮需占一个输入点；一个光电开关占一个输入点，一个信号灯占一个输出点；而对选择开关来说，一般有几个位置就占用几个输入点，对各种位置开关，一般占一个或两个输入点。

(1) 开关量输入点数。开关量输入点数可按下式进行估算。

$$DI = K \left[ \sum_{i=1}^N (a_{1i} + a_{2i}) + a_3 \right]$$

式中  $DI$ ——开关量输入总点数；

$K$ ——备用系数，一般取  $K = 1.1 \sim 1.2$ ；

$a_{1i}$ ——单个系统类型参数；

单速可逆系统： $a_{1i} = 3 \times$ 操作点数

单速不可逆系统： $a_{1i} = 2 \times$ 操作点数

多速（有级）可逆系统： $a_{1i} = 3 \times$ 操作点数 + 速度挡数

多速（有级）不可逆系统： $a_{1i} = 2 \times$ 操作点数 + 速度挡数；

$a_{2i}$ ——单个系统检测点数，如：接触器辅助接点数 XC、热继电器 RJ、自动开关辅助接点 ZK、限位开关 XW、选择开关 XK 以及故障信号、联动信号等；

$a_3$ ——其他点数，如：系统自动/半自动/手动选择开关。系统集中/机旁选择开关、生产线上的检测元件，以及与其他控制设备的硬件连锁信号等；

$N$ ——单个系统的总数。

(2) 开关量输出点数。开关量输出点数可按下式进行估算

$$DO = K \left[ \sum_{i=1}^N (b_{1i} + b_{2i}) + b_3 \right]$$

式中  $DO$ ——开关量输出总点数；

$K$ ——备用系数，一般取  $K = 1.1 \sim 1.2$ ；

$b_{1i}$ ——单个系统类型参数；

单速可逆系统： $b_{1i} = 2$

单速不可逆系统： $b_{1i} = 1$

多速（有级）系统： $b_{1i} = \text{速度挡数}$ ；

$b_{2i}$ ——单个系统显示设备及连锁所需的点数；

$b_3$ ——其他点数，如系统的显示点数、报警音响设备所需的点数，以及与其他控制设备的硬件连锁信号等；

$N$ ——单个系统的总点数。

(3) 模拟量输入/输出 (AI/AO) 点数。目前，大多数 PLC 制造厂均提供相应的 AI 和 AO 模块，可参考 PLC 制造厂的 AI、AO 模块的说明，根据工程的实际需要来确定 AI、AO 的回路数及相应的 AI/AO 模块数量，并预留出适当的备用量。

#### 14.9.5.1.5 功能选择

根据控制系统的要求进行 PLC 的功能选择，它通常包括运算功能的选择和处理速度的选择两个方面。

(1) 运算功能选择。PLC 除具有顺控功能（逻辑运算）外，还具有定时、计数、四则运算、函数运算等功能。如果控制系统的要求很简单，只需要顺控功能时，就可以选择经济实惠的 PLC。如果需要跟踪的话，就得选择带位移寄存器的 PLC 等。总之，选择运算功能的依据是：从指令系统中看所需要的功能是否能得到全部满足，或是利用编程来间接得到满足。目前，PLC 的功能多样化和高级化，因此不要单纯追求高功能，以避免造成不必要的浪费。

(2) 处理速度的选择。对 PLC 来说，输入/输出点从十几点到两千余点都有，从输入——数据处理——输出的全过程只允许在几十毫秒内完成，它相当于继电器的固有动作时间，再长就没有意义了。

不同的 PLC 机型，其处理速度也不同。通常，大型 PC 的处理速度较快，小型 PLC 的处理速度较慢。同一机型，PLC 的处理速度一般与用户程序容量大小成正比，用户程序容量越大，扫描周期越长，不采取特殊措施的处理速度就会越慢，大多数情况下，PLC 的处理速度均能满足控制系统的要求，只有在控制系统的实时快速响应要求较高的场合下，PLC 的处理速度才会成为突出的问题。

#### 14.9.5.1.6 外形结构的选择

从 PLC 的基本单元和扩充单元的形态看，PLC 的外形结构分如下几种。

(1) 平极型 PLC。平板型 PLC 多为 I/O 点数少的小规模机型，构造特点是轻薄短小。

它从机电一体化角度考虑，多安装在机械设备或控制盘上。这种 PLC 把 CPU、I/O 均装在一个印刷板内，电源采用外部供电方式，I/O 点地址固定，不能扩展或很少有扩展。对大批量生产的通用机械设备来说，它的特点是价格低廉。

平板型 PLC 的机型很多，选择时，不能光着眼于价格低廉，还必须根据使用的控制目的来考虑。

(2) 块状型 PLC。小规模 PLC 多采用这种型式，它的增设单元以模块为单位进行扩展。它多采用德国工业标准 (DIN) 中的导轨式安装方式，具有适中的扩展性和价格低廉等优点，运算功能目前也有向高功能化发展的趋势，选择时，也和平板型 PLC 一样，不能光着眼于价格低廉，还必须根据使用的控制目的来考虑。

(3) 输入/输出模块插件型 PLC。这种型式的 PLC 有专供扩展 I/O 模块用的插件式框架槽 (机箱) 它适合于中、大规模的控制系统，不同制造厂 PLC 机箱的外形尺寸也不完全相同，一部分制造厂采用 19in (~48cm) 的标准机箱。机箱内多为 8 槽，但也有 2、4、6、8、10 槽的机箱。各种 I/O 模块被设计成统一的外形尺寸，以便插入机箱中的槽内。

#### 14.9.5.2 模块的选择

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》12.3.5.1节。

##### (1) 输入/输出模块的选择。

1) 数字量输入模块的选择。数字量信号又称为开关量、离散量，是在生产过程中使用最多的变量，输入设备包括按钮、转换开关、限位开关、接近开关、继电器触点等，每个模块的点数一般有 4、8、16、32、48、64 点等。

a. 电压等级。数字量输入信号有交流和直流两种，较常见的为 DC 5、DC 12、DC 24、DC 48、DC 115V 和 AC 48、AC 115、AC 220V 等，根据现场不同的要求，选择不同的产品型号。一些模块在同一电压等级下交直流信号通用。在选择信号电压等级时，要注意现场的实际情况，以 DC 24V 应用最多，若现场有防火、防爆、防可燃性气体或灰尘的要求，必须安装安全栅或本安型模块。在电缆传输距离较长时，能量损耗较大，造成逻辑高电平电压过低，此时应采用 48V/115V/220V 等电压等级输入。

b. 模块密度。每块模块的路数从 4 点到 64 点不等，低密度模块接线方便，但占用空间太大。高密度模块受本身空间的制约，需选用专用的接线端子板和插件将信号引至宽松的环境，增加了造价，所以模块路数多选用为 16 点和 32 点。

c. 响应时间。交流输入模块一般包括整流电路、隔离电路、滤波电路和指示电路，直流输入模块包括隔离电路、滤波电路和指示电路，滤波电路一般采用 RC 电路，它可以抑制外部干扰脉冲信号，但也使响应延迟 10~25ms，为使 CPU 能读取到外部信号变化，输入信号的维持时间必须大于一个扫描周期与模块响应延迟时间之和，因此快速响应的现场控制，要选择输入信号延迟时间短的模块。

d. 光隔离。并不是所有的模块都有光隔离，外部电路串进来的信号波形尖峰脉冲、电压电流冲击会造成误动作或模块的损坏，为抑制这些干扰，尽量选择每个通道配置光隔离功能的模块。

典型输入电路见图 14-9-5，其中直流数字输入电路见图 14-9-5 (a)，交流数字输入电路见图 14-9-5 (b)。

2) 数字量输出模块的选择。数字量输出模块用来驱动生产过程中的执行机构和显示生

产状态,主要包括继电器、信号灯、电磁阀、报警器、电机等。

a. 输出方式。数字量输出模块大多采用晶体管、双向晶闸管或继电器触点构成,前两种开关频率较高,驱动能力较小,每点的输出电流大致为 $0.25 \sim 3\text{A}$ 。继电器输出模块驱动能力较大,每点的输出电流大致为 $5 \sim 7\text{A}$ 。因触点隔离效果好,便于多种形式的外部设备共用一块模块,但其工作频率和使用寿命较无触点方式要低。

b. 输出功率的选择。对输出模块而言,要考虑每一个通道独立工作时连续输出电流和模块本身允许输出的最大电流,设计系统时应结合实际情况,合理分配每块模块的输出信号,尽量避免在同一时间内、同一模块上所有输出同时动作。若单点输出能力不足,可采用两点输出驱动同一台设备或加中间继电器的方法加以解决。

c. 噪声电压的抑制。对于感性负载,当输出点接通和断开的瞬时会产生噪声电压,必须采取措施加以抑制,对于交流输出模块,可以在负载两端并联 $RC$ 吸收电路,对于直流输出模块,可以在负载两端并联二极管电路加以吸收。

d. 响应时间。继电器输出电路包括指示电路、隔离电路、继电器,其输出为继电器触点,开关频率较低,约为 $3600$ 次/h,响应时间较长,约为 $10\text{ms}$ 。双向晶闸管的输出电路一般包括指示电路、隔离电路、双向晶闸管、 $RC$ 吸收电路、熔丝管、故障指示和检测电路,其响应时间比继电器输出短,由 off 变为 on 时,小于 $1\text{ms}$ ,当由 on 变为 off 时间较长,由于晶闸管特点,一旦导通后,其门极的控制信号不再起作用,只有当阳极电流小于其维持电流时,才能关断。晶体管输出电路响应时间较短,不论由“off”变为“on”还是由“on”变为“off”,均不超过 $2\text{ms}$ 。

典型输出电路见图 14-9-6。其中继电器数字输出电路见图 14-9-6 (a),双向晶闸管数字输出电路见图 14-9-6 (b),晶体管数字输出电路见图 14-9-6 (c)。

3) 模拟量输入模块的选择。在工业生产过程中,存在着大量的连续变化的信号,如温度、料位、流量、压力、位移等,通过各种传感器及检测仪器仪表将其转化为连续的电气量,如电压信号或电流信号,需将这些信号连接到适当的模拟量输入模块上,经过模/数转换器变成数字量,使 PLC 能够以别接收。

a. 模拟信号的输入方式。检测元件的输出一般为电压型和电流型信号,其电压信号范围有 $-1 \sim +1\text{V}$ , $-5 \sim +5\text{V}$ , $0 \sim 10\text{V}$ , $-10 \sim +10\text{V}$ ,有的仪表将受检变量转换成电流信号,其范围为 $4 \sim 20\text{mA}$ , $-20 \sim +20\text{mA}$ ,电压信号使用方便,但在长距离传输时存在较大的衰减,使用电流信号就能避免这个问题,所以必须根据现场输入信号的形式和测量范围合

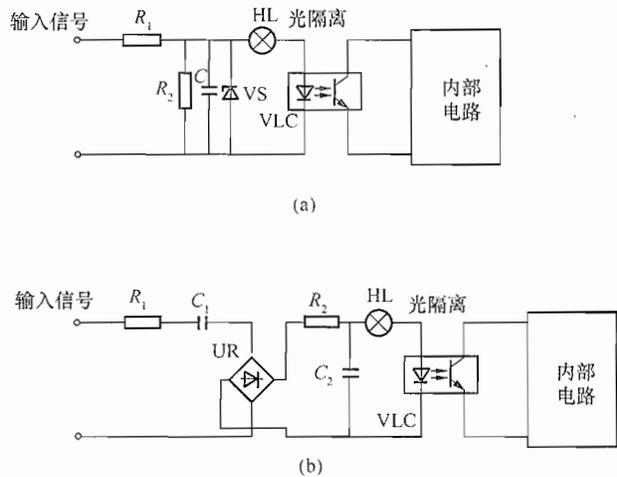


图 14-9-5 典型输入电路

(a) 直流数字输入电路; (b) 交流数字输入电路

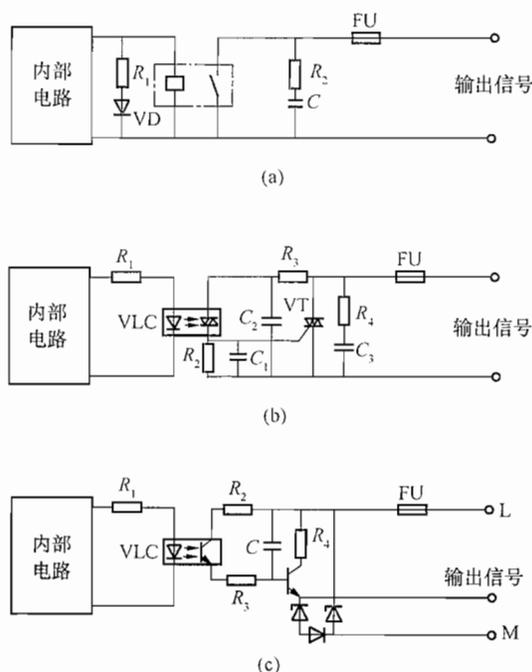


图 14-9-6 典型输出电路

(a) 继电器数字输出电路；(b) 双向晶闸管数字输出电路；(c) 晶体管数字输出电路

理选择模块类型。另外一些厂商生产的 PLC 也相应地开发了热电偶及热电阻（如 Pt100、Pt200 等）温度检测模拟量输入模块。

b. 数值的对应关系和分辨率。对于每一种检测仪表，都有其自身的测量范围，检测结果对应着模拟量信号大小，其最大值不能超过输入模块的量程。例如，电机转速为  $0 \sim 1000\text{r/min}$ ，对应  $0 \sim 10\text{V}$ ；闸门打开角度  $0 \sim 360^\circ$ ，对应  $4 \sim 20\text{mA}$  等。输入模块通过 A/D 转换器将其转换成数字量，模块不同，变成数字量的位数也不相同，一般有 12、13、14、16 位等，位数越多，分辨率越高，检测精度也越高。

c. 转换时间。转换时间包括基本转换时间和处理时间，基本转换时间取决于输入通道的转换方法，一个模拟量输入模块通常包括 2、4、8、16 路输入，模/数转换器以循环扫描方式逐一采集每一路输入。转换成数字化的测量值，再以中断命令的形式传递给 CPU 进行处理，由于不同厂商使用的芯

片不同，采样时间差异也大，为  $10 \sim 20\text{ms}$ 。一般几路输入通过模块内部的多路转换器切换到一块模/数转换器上，这样同一转换器通道越多，时间就越长。

d. 输入端的连接方式。现场检测设备多种多样，其提供的信号方式也不尽相同，当模拟信号为电压信号时，有单端输入和差压输入两种；当输入为电流信号时，二线式变送器通过模块供电，四线式变送器需要单独供电电源，工业环境中存在着很多的干扰源，接线时要特别注意电缆的屏蔽和保护，尽量使用双纹屏蔽电缆，屏蔽电缆两端的屏蔽层应接地。其典型框图见图 14-9-7。

4) 模拟量输出模块的选择。在工业生产过程中，需要对现场执行机构进行连续调节或数值显示时，就需要 PLC 能够输出模拟的电压、电流信号来驱动。

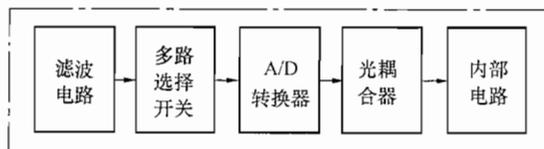


图 14-9-7 模拟量输入模块框图

a. 模拟量输出模块有一个数/模转换器，它接收 CPU 运算后的数值，并按比例将其转换成模拟量信号输出，电压变化范围有  $0 \sim 5\text{V}$ 、 $-10 \sim +10\text{V}$  等，电流输出范围有  $4 \sim 20\text{mA}$ 、 $-20 \sim +20\text{mA}$ 。

b. 分辨率，同模拟量输入模块一样，输出模块的数/模转换器也有 10、12、16 位等，位数不同、分辨率也不同，位数越多，输出信号的波形阶梯越小，连续性越好。

c. 转换时间，输出通道的转换时间包括从内部存储区传送数字化输出值和数模转换时

间,一般为 15~25ms。

其典型框图见图 14-9-8。

(2) 特殊功能模块。随着 PLC 应用领域的扩大和技术的发展,为适应现场某些特殊控制的需要,各厂商都设计了相应的智能模块,如高速计数器模块、PID 调节模块、定位模块、电子凸轮控制器模块等,这些模块均带有自己的微处理器(CPU)和存储器等,能独立完成所赋予的任务,而不需占用主 CPU 模块的资源。下面简单介绍高速计数器模块的选择方法。

高速计数器模块用于连接旋转编码器、脉冲发生器等设备,实时检测计量脉冲信号,根据每个脉冲变化对应的当量值,精确地反映现场设备的位置或速度的变化情况,

1) 输入的脉冲形式。连接设备提供的脉冲信号可以是单相的,也可以是两相的,幅值可以是 5、12、24V 等。

2) 计数频率。输入通道的计数频率指每秒能分辨的脉冲数,一般有 20、50、200、500kHz 等,它体现了模块的性能高低,但实际选用时,要看外部信号的变化间隔,不能盲目追求高性能,因其价格往往相差甚远。

3) 计数范围。计数器一路通道一般为 32 位或正负位加 31 位、即两个字。

4) 计数方式。根据需要,高速计数模块有多种工作方式,如向上计数、向下计数、上升沿计数、下降沿计数、电平计数等。

(3) 通信处理模板。早期的 PLC 控制系统多为集中方式,由中央机架和 3 或 4 个扩展机架组成,所有外部信号通过硬接线方式连至中央控制室。随着计算机技术和通信技术的发展,PLC 控制系统也发生了巨大变化,通信速度更快,传输距离更远,可靠性更高。PLC 的通信通常包括上位机和 PLC 之间、PLC 和 PLC 之间、PLC 和远程 I/O 之间及 PLC 和传动设备的通信。

1) 通信的物理接口。一般有 RS232C、RS422、RS485 等方式,不同厂商都推出了自己的通信网络,如 Schneider 公司的 MODICON MB+、MB, SIEMENS 公司的 Profibus DP, Rockwell 公司的 AB DH、DH+ 等。

2) 通信协议。有主从通信和对等通信等。

3) 通信速率。采用 RS232C、RS422 通信方式时,从 1.2~9.6kbit/s 不等,较远距离多采用 RS485 方式,如 SIEMENS 公司推出的现场总线方式的 Proibus DP 网络可从 9.6kbit/s~12Mbit/s。工业以太网的速率更高,已达到 10Mbit/s/100Mbit/s。不同的通信介质和传输距离也会影响到通信速率,双绞屏蔽线经济实用,但传输距离较短;光纤传输距离可达到数十千米,且不受电磁干扰的影响,但接线需要专用的熔接设备。

## 14.9.6 数据通信、局域网与现场总线的运用技术

### 14.9.6.1 数据通信

#### 14.9.6.1.1 基本概念

依据:《电气传动自动化技术手册(第3版)》12.4.1节。

数据通信是指按一定通信协议传输离散数据的通信。收、发信者可以是计算机或数据终端设备。数据可能来自各种计算机或测试控制系统。协议是指为了有效和可靠地进行通信而



图 14-9-8 模拟量输出模块框图

制定的一系列约定，用于管理和控制系统之间的数据交换。

数据通信系统的基本构成见图 14-9-9。它主要包括数据终端设备（Data Terminal Equipment, DTE）、数据电路终接设备（Data Circuit-terminating Equipment, DCE）、传输信道以及相应的通信协议。DTE 是数据的来源和归宿。它可以是一般终端（如键盘显示终端、智能终端等）、仪器设备或计算机。DCE 在 DTE 和传输信道之间提供变换和编译码功能，并负责建立、保持和拆除线路连接。传输信道可以是公用交换网或其他专用线路，它与两端的 DCE 所构成的数据通路常称为数据电路，数据电路一旦加上相应的通信协议后，就可确保数据通信协调可靠地进行，这种加上通信协议后的数据电路称为数据链路（Data Link）。通常只有在建立起数据链路后，通信双方才可能真正有效地进行数据传输。因此，数据链路所遵循的通信协议也是实现数据通信必不可少的条件之一。

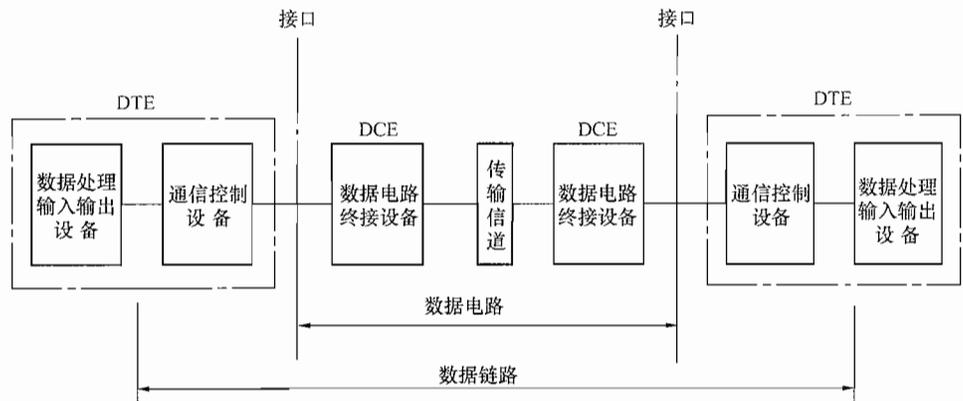


图 14-9-9 数据通信系统构成框图

数据通信是计算机技术与通信相结合而产生的一种新的通信方式。它具有自动化程度高、传输速度快，可靠性很高等优点。由于绝大多数数据通信系统均采用了标准的通信协议，使不同类型的设备以及不同系统间的互联成为可能，扩大了数据通信的应用范围。目前，它已成为各类计算机网络和信息处理系统赖以建立的基础。

#### 14.9.6.1.2 PLC 数据的基本通信方式

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》12.3.4节。

数据的基本通信方式有并行通信和串行通信两种。

(1) 并行通信。并行数据通信是指以字节或字为单位的数据传输方式。在这种数据传输方式中，除了 8 根或 16 根数据线、1 根公共线外，还需要数据通信双方联络用的控制线，



图 14-9-10 并行通信

见图 14-9-10。

并行数据通信的通信过程是：

1) 发送方在发送数据之前，首先判别接收方发出的应答信号线的状态，以决定是否可以向接收方发送数据。

2) 发送方在确定可以向接收方发送数据后，在数据线上发送数据，并在选通线上输出一个状态信号给接收方，表示数据线上的数据有效。

3) 接收方在接收数据前，先判别发送方发出的选通信号线的状态，以决定是否可以向接收方接收数据。

收数据。

4) 接收方在确定可以接收数据后, 在数据线上接收数据, 并在应答信号线上输出一个状态信号给发送方, 表示可以再发送数据。并行传送时, 一个数据的所有位同时传送, 因此, 每个数据位都需要一条单独的传输线, 一个数据有多少二进制位就需要多少条传输线, 一次即可传送完成。并行通信传输速率快, 但硬件成本高, 不宜于远距离通信, 常用于近距离、高速度的数据传输场合。如用在 PLC 的内部各元器件之间、主机与扩展模块或近距离智能模块的处理器之间。

(2) 串行通信。串行通信是以二进制的位 (bit) 为单位的数据传输方式。除了公共线外, 数据传输在一个传输方向上只用一根通信线。这根线既作为数据线, 又作为通信联络控制线。

数据和联络信号在这根线上按位进行传输。串行通信在传送数据时, 数据的各个不同位分时使用同一根传输线。从低位开始一位接一位地依次传送, 数据有多少位就需要传送多少次; 只要几条传输线就可以在两设备间交换信息, 图 14-9-11 中, 如由设备 1 向设备 2 传送一个 8 位数据 101 1001 1, 则传送时由低位到高位一位接一位地依次传送。

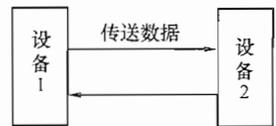


图 14-9-11 串行通信

串行通信传送速度慢, 但需要的信号线少, 最少只需要两根线, 可以大大节省成本, 所以特别适合于远距离传输, 串行通信多用于计算机与计算机之间、计算机与 PLC 之间、多台 PLC 之间的数据传送。

### 14.9.6.2 局域网

#### 14.9.6.2.1 局域网的概念

依据:《电气传动自动化技术手册 (第 3 版)》12.4.4 节。

计算机局域网 (LAN) 是计算机网络发展中一个重要而又活跃的领域, 具有如下特点:

- (1) 地理范围有限, 通常处在 0.1 ~ 10km 的范围内 (典型为几千米)。
- (2) 具有较高的带宽, 数据传输率高, 一般为 1 ~ 100Mbit/s。
- (3) 数据传输可靠, 误码率低。

局域网结构简单、灵活, 可靠性高, 是办公自动化、管理信息系统、生产过程控制与管控一体化系统等应用领域中, 数据通信的支持平台, 也是网络扩展的基础。

网络扩展是通过中继器、集线器、网桥、交换机以及网关等设备实现的, 它们工作在网络体系结构中的不同层次。表 14-9-3 表示这些网络连接设备在 OSI 七层参考模型中的层次位置及作用。

网络设备	所处 OSI 层	用途
中继器、集线器	物理层	在电缆段间复制比特流
网桥、第 2 层交换机	数据链路层	在 LAN 之间存储转发帧
路由器、第 3 层交换机	网络层	在不同子网间存储转发分组
网关	传输层以上	提供不同体系间互连接口

#### 14.9.6.2.2 以太网及 TCP/IP 通信协议

依据:《电气传动自动化技术手册 (第 3 版)》12.6.1 节。

以太网及 TCP/IP 通信技术在 IT 行业获得了很大的成功，成为 IT 行业应用中首选的网络通信技术。以太网及 TCP/IP 技术逐步在自动化行业中得到应用，并发展成为一种技术潮流。以太网在自动化行业中的应用分为两个方面问题，或者说两个层次的问题。一是工厂自动化技术与 IT 技术、因特网（Internet）技术相结合，成为未来的制造业电子商务技术、网络制造技术雏形。另一个方面，即以太网能否在工业过程控制底层，也就是设备层或称为现场层广泛应用。甚至取代现有的现场总线技术成为统一的工业网络标准。

(1) 以太网是 1975 年美国施乐（Xerox）公司的 Palo Alto 研究中心研制成功的，以太网采用无源电缆作为总线来传送数据帧，故以传播电磁波的“以太（Ether）”来命名。1981 年美国施乐（Xerox）公司、数字（Digital）装备公司和英特尔（Intel）公司联合推出以太网（Ether-Net）规约 ETHER80，1982 年修改为第二版 DIX Ethernet V2，因此“以太网”应该是特指“DIX Ethernet V2”所描述的技术。

(2) IEEE 802.3 是 20 世纪 80 年代初期美国电气和电子工程师学会 IEEE 802 委员会制定的局域网体系结构标准，即 IEEE 802 参考模型标准。IEEE 802 参考模型相当于 OSI 参考模型的最低两层；1983 年，IEEE 802 委员会以美国施乐（Xerox）公司、数字（Digital）装备公司和英特尔（Intel）公司提交的 DIX Ethernet V2 为基础，推出了 IEEE 802.3；IEEE 802.3 又叫作具有 CS-MA/CD（带碰撞检测的载波侦听多址访问）的网络标准。CSMA/CD 是 IEEE 802.3 采用的媒体接入控制技术，或称介质访问控制技术。因此 IEEE 802.3 以“以太网”为技术原型，本质特点是采用 CSMA/CD 的介质访问控制技术。“以太网”与 IEEE 802.3 略有区别。但在忽略网络协议细节时，人们习惯将 IEEE 802.3 称为“以太网”。

(3) TCP/IP。TCP/IP 是多台相同或不同类型计算机进行信息交换的一套通信协议。TCP/IP 协议组的准确名称应该是 Internet 协议族，TCP 和 IP 是其中两个协议。而 Internet 协议族 TCP/IP 还包含了与这两个协议有关的其他协议及网络应用，如用户数据报协议（UDP）、地址转换协议（ARP）和因特网控制报文协议（ICMP）。由于 TCP/IP 是 Internet 采用的协议组，所以将 TCP/IP 体系结构称作 Internet 体系结构。以太网是 TCP/IP 使用最普遍的物理网络，实际上 TCP/IP 技术支持各种局域网协议，包括令牌总线、令牌环、FDDI（光纤分布式数据接口）、SLIP（串行线路 IP）、PPP（点对点协议）、X.2.5 数据网等。由于 TCP/IP 是世界上最大的 Internet 采用的协议组，而 TCP/IP 底层物理网络多数使用以太网协议，因此，以太网 + TCP/IP 成为 IT 行业中应用最普遍的技术。

一般文中所提到的“以太网”，按习惯主要指 IEEE 802.3 标准，如果进一步采用 TCP/IP 协议族，则采用“以太网 + TCP/IP”来表示。

#### 14.9.6.2.3 以太网进入自动化领域

依据：《电气传动自动化技术手册（第 3 版）》12.6.1 节。

(1) 自动化技术从单机控制发展到工厂自动化、系统自动化。近年来，自动化技术发展使人们认识到，单纯提高生产设备单机自动化水平，并不一定能给整个企业带来好的效益；因此，企业给自动化技术提出的进一步要求是：将整个工厂作为一个系统实现其自动化，目标是实现企业的最佳经济效益。因此，有了现代制造自动化模型，所以说自动化技术由单机自动化发展到系统自动化。自动化技术从单机控制向工厂自动化（FA）、系统自动化方向发展。制造业对自动化技术提出了数字化通信及信息集成技术的要求，即要求应用数字化通信技术实现工厂信息纵向的透明通信。

(2) 工厂底层设备状态及生产信息集成、车间底层数字通信网络是信息集成系统的基础,为满足工厂上层管理对底层设备信息的要求,工厂车间底层设备状态及生产信息集成是实现全厂 FA/CIMS (计算机集成制造系统) 的基础。

(3) 现场总线 (FieldBus) 是工厂底层设备之间的通信网络,是计算机数字通信技术在自动化领域的应用,为车间底层设备信息及生产过程信息集成提供了通信技术平台,工厂底层应用现场总线技术实现了全厂信息纵向集成的透明通信,即从管理层到自动化底层的数据存取。

(4) 根据现场总线技术概念,面对自动化行业千变万化的现场仪表设备,要实现不同厂商不同种类产品的互连,现场总线技术标准化工作至关重要。为此,国际电工委员会 (IEC) 于 1984 年提出制定现场总线技术标准 IEC 61158。

IEC 61158 的目标是制定面向整个工业自动化的现场总线标准。为此,根据不同行业对自动化技术的需求不同,将自动化技术分为五个不同的行业;IEC 61158 是要制定出一部满足工业自动化五大行业不同应用需求的现场总线技术标准。自动化行业将面临一个多种总线技术标准并存的现实世界。

(5) 以太网进入自动化领域。IEC 61158 制定统一的现场总线技术标准努力的失败,使一部分人自然转向了在 IT 行业已经获得成功的以太网技术。因此,现场总线标准之争,给了以太网进入自动化领域一个难得的机会。积极推进这种技术概念的如 Schneider 公司,面向工厂自动化提出了基于以太网 + TVP/IP 的解决方案,称之为“透明工厂”。可以理解为:“协议规范统一,信息透明存取”。

Schneider 公司是将以太网技术引入工厂设备底层,广泛取代现有现场总线技术的积极倡导者和实践者,已有一批工业级产品问世和实际应用。

#### 14.9.6.2.4 以太网与工业以太网

依据:《电气传动自动化技术手册 (第 3 版)》12.6.1 节、12.6.3 节。

以太网符合 IEEE 802.3,传输介质采用 UTP3 类线、UTP5 类线、屏蔽双绞电缆、光纤、同轴电缆,也可采用无线传输方式。

插件:RJ45、AUI (附加单元接口)、BNC (插入式标准连接器)。

编码:同步、曼彻斯特编码。

传输速率:10Mbit/s、100Mbit/s、1000Mbit/s。

工业以太网与以太网 IEEE 802.3 标准兼容,但对产品设计时原料的选用及产品的强度和实用性,必须考虑到工业网络的需要。工现场对工业以太网的要求包括:

- (1) 适应现场的温度、湿度、振动等环境参数。
- (2) 供电采用柜内低压直流或交流电源。
- (3) 具有抗干扰、抗辐射性。
- (4) 安装方便,适应工业环境安装要求 (一般为卡轨安装)。

以太网构成方式比较复杂,可以由一台或多台交换机构成以太网,也可以通过交换机、网桥、路由器等设备、组成一个光、电混合的以太网。此方式是由多个简单局域网组成一个大型网络,主干网采用光纤连接成自愈环网,不同局域网间通过路由器及网桥进行信息转发。一个常见的工业控制以太网构成图见图 14-9-2。

该网是由 OSM (光纤交换机模块) 构成主干环网。其他交换机构成支网,形成光电混

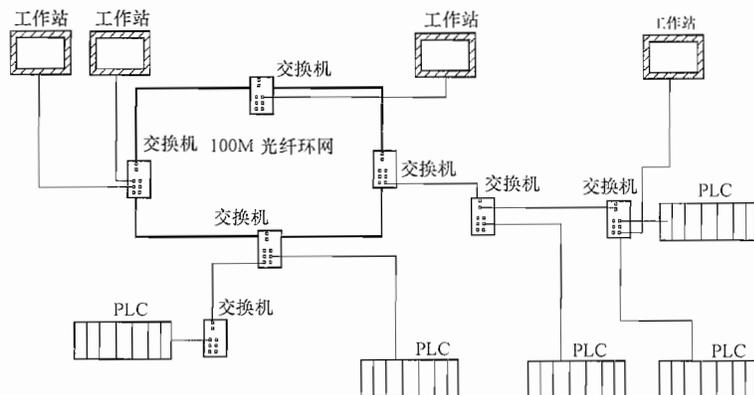


图 14-9-12 工业以太网构成

合以太网。

### 14.9.6.3 现场总线

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》12.5节。

(1) 现场总线的基本概念。现场总线（Fieldbus）是指安装在制造或过程区域的现场装置与控制室内的自动控制装置之间进行的开放的、数字式的、串行多点通信的数据控制网络。它在制造业、流程工业、交通、楼宇等方面的自动化系统中具有广泛的应用前景。

随着微处理器与计算机功能的不断增强和价格的急剧降低，计算机与计算机网络系统得到迅速发展，而处于生产过程底层的测控系统，采用一对一连线，用电压、电流的模拟信号进行测量控制，或采用自封闭式的集散控制系统，难以实现设备之间以及系统与外界之间的信息交换，使各自动化系统成为“信息孤岛”。要实现整个企业的信息集成，要实施综合自动化，就必须设计出一种能在工业现场环境运行的、性能可靠的、造价低廉的通信系统，形成工厂底层网络，完成现场自动化设备之间的多点数字通信，实现底层现场设备之间以及生产现场与外界的信息交换。现场总线就是在这种实际需求的驱动下应运而生的。

带有现场总线接口的数字控制装置、测量仪表等现场控制、测量设备，采用可进行简单连接的双绞线等作为总线，把多个现场控制、测量仪表连接成网络系统，并按公开、规范的通信协议，在位于现场的多个控制、测量设备之间以及与远程监控计算机之间，实现数据传输与信息交换，形成各种适应实际需要的自动控制系统。简而言之，它把单个分散的控制、测量设备变成网络节点，以现场总线为纽带，把它们连接成可以相互沟通信息、共同完成自控任务的网络系统与控制系统，它使自动化领域实现了突飞猛进的发展。正如众多分散的计算机被网络连接在一起，使计算机的功能、作用发生变化的一样。现场总线则使自控系统与设备具有了通信能力，把它们连接成网络系统，加入到信息网络的行列。

现场总线控制系统既是一个开放通信网络，又是一种全分布控制系统。它作为智能设备的联系纽带，把挂接在现场总线上、作为网络节点的智能设备连接为网络系统、并进一步构成自动化系统，实现基本控制、补偿计算、参数修改、报警、显示、监控、优化及控管一体化的综合自动化功能。这是一项以智能传感器、控制、计算机、数字通信、网络为主要内容的综合技术。

现场总线（Fieldbus）的出现，导致原有的控制装置、自动化仪表、集散控制系统

(DCS)、可编程序控制器 (PLC) 在产品的体系结构、功能结构方面较大的变革, 各类产品相继进行了更新换代。传统的模拟控制装置和仪表将基本让位于具备数字通信能力的全数字控制装置和仪表。

按照 ISO (国际标准化组织) 的 OSI (开放系统互连) 参考模型的规定, 网络结构由七层构成, 由于现场总线要求信息传输的实时性强、可靠性高, 因此大多现场总线仅定义了其中最重要的和必需的物理层、数据链路层及应用层, 且多为短帧传送, 传输速率一般在几千位/秒至 10Mbit/s 之间。

现场总线自动化系统是开放的, 可以由不同设备制造厂商提供的遵从相同通信协议的各种现场总线设备共同组成。甚至不同的现场总线可以通过网桥连接在一个完整的自动化系统中。

近年, 现场总线得到了迅猛发展, 已广泛地用于各类工业自动化控制系统, 正受到国内外工业自动化设备制造厂商及用户的广泛关注。现场总线的出现, 对传统的工业自动化带来了革命, 就像从分立器件向集成电路, 从模拟控制系统向全数字控制系统的革命性转变一样。从而开创了工业自动化控制技术的新时代。这是计算机控制技术、信息处理技术、网络通信技术、传感技术等新技术快速发展的结果。

## (2) 现场总线的特点。

1) 现场总线的结构特点。现场总线系统打破了传统控制系统的结构型式。传统的控制系统采用一对一的设备连线, 按分控制系统或回路分别进行连接; 位于现场的控制和检测设备与位于控制室的主控制器之间采用一对一的物理连接。

现场总线系统由于采用了智能的具有现场总线通信接口的数字现场设备, 能够把原先如 PLC 系统中处于控制室的控制模块、输入输出模块等放置在现场, 加上现场设备具有通信能力, 现场的控制、测量设备可以与电动机、阀门等执行机构直接传送信号, 因而控制系统功能能够不依赖控制室的计算机或控制仪表, 直接在现场完成, 实现了彻底的分散控制。

由于采用数字信号替代模拟信号, 因而可实现一对电线上传输多个信号 (包括多个运行参数值、多个设备状态、故障信息), 同时又为多台设备提供电源; 现场设备以外不再需要模拟/数字、数字/模拟转换部件。这样就为简化系统结构、节约硬件设备、节约连接电缆与各种安装维护费用创造了条件。

## 2) 现场总线的技术特点。

a. 系统的开放性。开放是指对相关标准的一致性、公开性, 强调对标准的共识与遵从。一个开放系统, 是指它可以与世界上任何遵守相同标准的其他设备或系统连接。通信协议一致公开, 各不同制造厂商的设备之间可实现信息交换。现场总线开发者就是要致力于建立统一的工厂底层网络的开放系统。用户可按自己的需要和考虑, 把来自不同制造厂商的产品组成大小随意的系统。通过现场总线构筑自动化领域的开放互联系统。

b. 互可操作性与互用性。互可操作性是指实现互联设备间、系统间的信息传送与交换; 而互用则指不同制造厂商的性能类似的设备可实现相互替换。

c. 现场设备的智能化与功能自治性。它将传感测量、补偿计算、工程量处理与控制等功能分散到现场设备中完成, 仅靠现场设备即可完成自动控制的基本功能, 并可随时诊断设备的运行状态。

d. 系统结构的高度分散性。现场总线已构成一种新的全分散性控制系统的体系结构, 从根本上改变了现有集中与分散相结合的集散控制系统体系, 简化了系统结构, 提高了可

靠性。

e. 对现场环境的适应性。工作在生产现场前端、作为工厂网络底层的现场总线，是专为现场环境而设计的，可支持双绞线、同轴电缆、光缆、射频、红外线和电力线等，具有较强的抗干扰能力，能采用两线制实现供电与通信，并可满足本质安全防爆要求等。

### 3) 现场总线的优点。

由于现场总线的以上特点，特别是现场总线系统结构的简化，使控制系统从设计、安装、投运到正常生产运行及检修维护，都体现出优越性。

a. 节省硬件数量与投资。由于现场总线系统中分散在现场的智能数字设备能直接完成检测、计算、局部控制等功能，因而可减少变送器、转换器的数量，不再需要信号调理、变换、隔离等器件极其复杂接线，还可以用工业控制机作为操作站，从而节省了硬件投资，减少了控制室的占地面积。

b. 节省安装费用。现场总线系统的接线十分简单，一对双绞线或一条电缆上通常可挂接多台设备，因而电缆、端子、槽盒、桥架的用量大大减少，连线设计与接头校对的工作量也大大减少。当需要增加现场控制设备时，无须增设新的电缆，可就近连接在原有的电缆上，既节省了投资，也减少了设计、安装的工作量。

c. 节省维护开销。由于现场控制设备具有自诊断与简单故障处理的能力，并通过数字通信将相关的诊断维护信息送往控制室，用户可以随时查询所有设备的运行及诊断维护信息，以便早期分析故障原因并快速排除，缩短了维护停工时间；同时由于系统的结构简化、连线简单而减少了维护工作量。

d. 用户具有高度的系统集成主动权。用户可以自由选择不同制造厂商所提供的设备来集成系统，避免因选择了某一品牌的产品而被“框死”了使用设备的选择范围，不再为系统集成中不兼容的协议、接口而一筹莫展。

e. 提高了系统的准确性与可靠性。由于现场总线设备的智能化、数字化，与模拟信号相比，它从根本上提高了测量与控制的精确度，减少了传送误差；同时由于实现了彻底的分散控制，提高了系统的可靠性。

### (3) Profibus 现场总线（《电气传动自动化技术手册（第3版）》12.5.4.1节）。

1) 概述。Profibus 现场总线是由 SIEMENS 公司为主的十几家德国公司和研究所共同推出的，1991 年成为德国国家标准 DIN 19245，1996 年成为欧洲标准 EN 50170 的一部分，现为 IEC 61158 标准的类型 3。由于 SIEMENS 等公司的大力推广，以及他们的产品在工业自动化市场上的占有率的影响，Profibus 现场总线是目前世界上应用较为广泛、在中国市场上应用量最大的一种国际性的开放式的现场总线，目前世界上许多自动化产品生产厂商都为他们生产的产品提供了 Profibus 接口。Profibus 系列原有三个兼容部分组成，即 Profibus DP、Profibus FMS 和 Profibus PA。

Profibus DP 是一种经过优化的高速通信总线，特别适用于装置一级自动控制系统与分散 I/O 之间通信，总线周期一般小于 10ms。

Profibus FMS 是设计用来解决车间级通用性通信任务，提供大量的通信任务，完成中等传输速度的循环和非循环通信任务，总线周期一般小于 100ms。

Profibus PA 专为过程自动化设计，它能够将变送器和执行器连接到一根公共总线上，使用两根线可以完成供电和数据通信，并能实现本质安全性能。

Profibus 现场总线的体系结构见图 14-9-13。为了提高 Profibus 现场总线性能,近几年 PNO 陆续推出了新版本的 Profibus DP-V1 和 Profibus DP-V2,同时随着实时工业以太网的发展,逐步取消 Profibus FMS 总线。

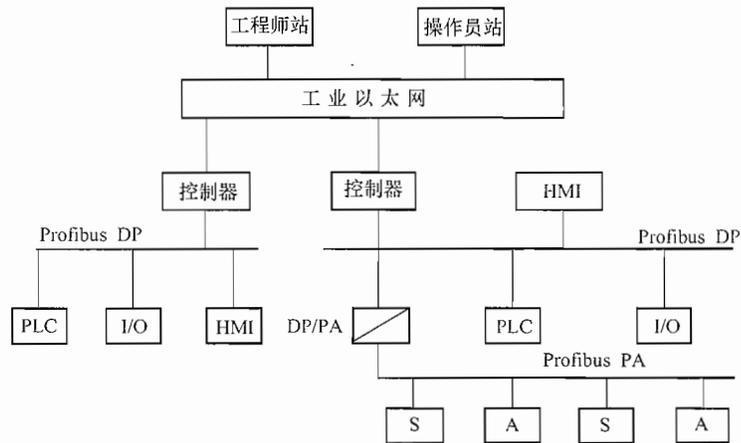


图 14-9-13 Profibus 现场总线的体系结构

Profibus DP-V1 主要是增加了非循环服务,并扩大了与 2 类主站的通信,原 Profibus DP 性能的特征是在循环连接 (MSCY-C1) 的基础上应用数据交换服务,实现一个主站和一系列从站之间集中的数据交换。1 类主站指 PLC、PC 或控制器,2 类主站指操作员站、编程器等。Profibus DP-V1 扩展了上述功能,在已有的 MSCY-C1 连接基础上,增加了非循环服务,可以对从站中任何数据组进行非循环读写,同时为进入因特网通信扩充了功能。

Profibus DP-V2 可以实现循环通信、非循环通信及从站之间的通信,由于从站之间可直接通信,通信时间缩短了 1 个 Profibus DP 总线周期和主站周期,同时建立了其时间偏差小于  $1\mu\text{s}$  的等间隔时间的总线循环周期,即适用于高精度定位控制,又可实现闭环控制。Profibus DP-V2 可根据不同的应用需求开发专用行规 (Profile),如用于运动控制的 ProfiDrive 及用于联锁保护的 ProfiSafe 等。

2) 通信模型结构。采用了 OSI 参与模型的物理层、数据链路层,同时加上了服务层,见表 14-9-4。

表 14-9-4

Profibus 现场总线模型与 ISO/OSI 参数模型

ISO/OSI 参数模型	Profibus 现场总线模型	
	Profibus - DP	Profibus - FMS
应用层	用户接口	应用层接口
表示层		信息规范层 FMS
会话层		
传输层		
网络层		
数据链路层	数据链路层	数据链路层
物理层	物理层	物理层

Profibus DP 使用了第一层、第二层及用户接口，这种结构确保了数据传输的快速和有效地进行。用户接口规定了用户系统以及不同设备可调用的应用功能，并详细说明了各种不同的 Profibus DP 设备的设备行为描述，同时提供了传输用的 RS 485 传输技术或光纤传输技术。

Profibus FMS 对 OSI 参考模型的第一层、第二层和第七层（应用层）均加以定义。

Profibus PA 采用了扩展的 DP 协议，使用了描述现场设备行为的 PA 行规。根据 IEC 61158-2 标准，这种传输技术可确保其本质安全性，并通过总线给现场设备供电。使用分段式耦合器，Profibus PA 设备能方便地集成到 Profibus DP 网络上。

3) 主要特性参数（见表 14-9-5、表 14-9-6）。

表 14-9-5 Profibus 现场总线主要特性参数

	Profibus DP、FMS	Profibus PA
拓扑结构	总线型	线型或树形或两者相结合
介质	屏蔽双绞电缆或光缆	双绞线
传输速率	9.6kbit/s ~ 12Mbit/s	31.25kbit/s、电压式
通信距离/段	见表 14-9-6	1900m
站点数/段	32	32
总站点数	126	126
本质安全	不支持	支持/不支持
从站最大传输信息量	246 字节的输入/输出数据	

表 14-9-6 RS485 传输速率与通信距离的关系

传输速率/ (kbit/s)	9.6	93.75	187.5	500	1500	12000
通信距离/m	1200	1200	1000	400	200	100

## 14.9.7 人机接口的运用技术

### 14.9.7.1 常用的人机接口设备

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》12.7.3节。

(1) 客户机/服务器。客户机/服务器 (Client/Server) 是在网络基础上以数据库管理为后援、以微机为工作站的一种系统结构，客户机/服务器结构包括连接在一个网络中的多台计算机。

客户机运行那些使用户能阐明其服务请求的程序，并将这些请求传送到服务器，由客户机执行的处理为前端处理 (Front-end Processing)。前端处理具有所有与提供、操作和显示相关数据的功能。

在服务器上执行的计算机称为后端处理 (Back-end Processing)。后端硬件是一台管理数据资源并执行引擎功能 (如存储、操作和保护数据) 的计算机。

通过将任务合理分配到 Client 端和 Server 端，降低系统的通信开销，充分利用两端硬件的资源优势。

生产管理人员可通过 Client 端，输入、调用和察看生产数据。

(2) 专用的人机接口设备 (HMI)。人机接口操作设备用于设置、显示、存储和记录信息和变量，并能进行设备的运行操作。

这类设备防护等级高，一般放置在工业现场。可通过以太网、Profibus - DP 等通信方式与下一级控制设备进行通信。

#### 14.9.7.2 监控操作站 HMI

依据：《钢铁企业电力设计手册》下册 27.3.7 节。

操作站系统是操作和监视系统的统称，用来对控制过程进行操作管理和监视，实际上也是一种人一机接口装置。操作站系统由本身的硬件和软件组成。

操作站是由控制系统的需要而产生的，而操作站系统的形成又使得工业自动化控制进一步发展，它是传统的模拟屏装置和现代工业电视无法比拟的，它对整个控制系统不仅进行宏观和微观监视，而且能够进行实时操作和操作指导，使整个控制系统具有透明性或半透明性。

(1) 对操作站系统的要求。对操作站系统的要求为：

- 1) 工业过程的显示和管理。
- 2) 实时快速响应，如过程信号快速响应、画面快速刷新等。
- 3) 与自动化系统可兼容。
- 4) 适应集散性要求。
- 5) 实时数据库管理。
- 6) 适应工厂的恶劣环境。
- 7) 连续可靠运行。
- 8) 掉电自动恢复。
- 9) 通用性强。
- 10) 工程投资合理。

(2) 操作站系统的内容。操作站系统所包含的内容为：

1) 通信。为了对自动控制系统进行管理和监视，操作站一方面需要从生产过程中收集大量信息，另一方面需要把大量的管理信息传送给生产过程。数据通信是操作站系统的重要组成部分。

2) 信息管理。操作站的主要目的是对信息进行管理，其管理水平的高、低是衡量操作站系统好坏的一个重要标志。

(3) 操作站的类型。现代的工业自动控制系统是多层次的，操作站也相应地分为以下几种类型：

1) 设备操作站。它是操作站系统的最低层，用来对具体设备进行监视及管理，其主要任务包括：设备状态监视、参数给定及修改、故障报警及处理。

2) 本地操作站。它作为多级控制系统的一部分在本地进行管理和监视，完成大量数据处理和过程运行管理。本地操作站除了完成设备操作站的功能外，还应完成的功能包括：多设备的综合管理、数据的批处理、过程运行监视、故障诊断及分析、文本报告等。

3) 中央操作站。工厂自动控制系统一般为多级的，过程运行均由中央控制室进行监视和管理，全厂的信息通过网络通信联系起来。通常，这些信息不仅用在中央控制室，也需要呈送给管理部门、设计部门和维护部门，中央操作站就是为此而设计的。它除了完成本地操作站的任务外，还应完成的功能包括：数据通信、批量数据的存储及管理、操作站间的协调、用户程序综合利用、生产决策指导等。

(4) 操作站系统的主要功能。操作站系统的主要功能为：

1) 实时画面监视。通过多级画面和图表相结合的方式，用过程变量控制画面和图表的变化，分层次描述实时控制过程。

2) 实时操作。在画面监视过程中，通过对画面的干预，可对整个控制过程进行实时操作。操作站系统本身实时进行故障诊断、分析、处理，并能给出适当的操作指导。

3) 信息的存储与报告。操作站系统在完成实时监视与操作的同时，还能对批量信息进行存储和报告，可供决策时参考。

(5) 操作站系统的性能评估。

目前，大多数 PLC 生产厂都能提供操作站系统，操作站系统的性能评估可以从以下几个方面考虑：

1) 通信速度。通信速度是指操作站系统与控制系统进行信息交换的速度。在本地操作站中，由于其实时性，对信息交换有较高的速度要求。在中央操作站中，由于要处理大量的信息，也对信息交换有较高的要求。通信速度的提高，系统的价格也相应增加。

2) 系统容量。操作站系统主要是用来处理信息的，因此，信息的存储和处理容量是操作站系统性能评估的一个重要指标。在评估容量时，要考虑静态和动态两个方面。所谓静态，指的是不参与控制过程交换的部分，如系统能容纳的画面多少等；动态指的是参与控制过程交换的部分，如一个画面中变量和动态图形等。

3) 系统生成的难易程度。系统生成的难易程度可从硬件和软件两个方面来考虑。在构成操作站时所需的硬件越少越方便，在硬件方面还应注意在不同站中的通用性。通常，硬件评估相对容易，而软件评估就要复杂得多。操作站系统中的支持软件直接影响系统生成的难易程度，较强的支持软件，能使用户在生成系统时既方便又省时，支持软件在系统生成中的优劣主要是指画面的生成过程、变量的定义方式等。

4) 系统使用的方便程度。系统使用的方便程度主要体现在软件上，当一个操作站系统生成后，使用是否方便，主要反映在画面的读取、故障查找、参数更改等难易程度上。

5) 系统的灵活性。一个大型控制系统，可能会有多个操作站，操作站的大小程度不一，一般要求构成操作站系统的硬件和软件具有一定的通用性，这样，可节省部分工程投资，系统生成和维护也较方便。

#### 14.9.7.3 监控组态软件

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》12.7节。

组态的概念最早来自英文 configuration，含义是使用软件工具对计算机及软件的各种资源进行配置，达到使计算机或软件按照预先设置，自动执行特定任务，满足使用者要求的目的。监控组态软件是面向监控与数据采集（Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA）的软件平台工具，具有丰富的设置项目，使用方式灵活，功能强大。监控组态软件最早出现时，人机接口（Human Machine Interface, HMI 或 Man Machine Interface, MMI）是其主要内涵，即主要解决人机图形界面问题。随着它的快速发展，实时数据库、实时控制、SCADA、网络通信、开放数据接口、对 I/O 设备的广泛支持已经成为它的主要内容。随着技术的发展、监控组态软件将会不断被赋予新的内容。

监控组态软件的主要任务是使用软件的自动化工程技术人员在不改动软件程序的源代码的情况下，生成适合工程需要的应用系统。自动化工程技术人员在组态软件中只需填写一些

设计的表格，再利用图形功能把被控对象形象地画出来，通过内部数据连接把被控对象的属性与 I/O 设备实时数据进行逻辑连接。当用组态软件生成的应用系统投入运行后，与被控对象相连的 I/O 设备数据发生变化会直接带动被控对象的属性变化。

监控组态软件的主要特点是实时多任务。例如数据采集与输出、数据处理与算法实现、图形显示及人员对话、实时数据的存储、实时通信等多个任务要在同一台计算机上同时运行。

一般的组态软件都由下列组件组成：图形界面系统、实时数据库系统、第三方程序接口组件。

常用的监控组态软件见表 14-9-7。

表 14-9-7 国际上较知名的监控组态软件

公司名称	产品名称	国别	公司名称	产品名称	国别
Intellution	FIX、iFIX	美国	Rockwell	RSView	美国
Wonderware	Intouch	美国	信肯通	Think&Do	美国
Vema Soft	Paragon、Paragon TNT	美国	National Instruments	Lab View	美国
TA Engineering	AIMAX	美国	Iconics	genesis	美国
GE	Cimplicity	美国	PC soft	WizCon	以色列
Siemens	WinCC	德国	Citech	Citect	澳大利亚

## 15.1 火灾自动报警系统

### 15.1.1 消防的基础知识

(摘自1999年《全国消防设施专项人员考试必读》和2014年《消防安全技术实务》公安部消防局编写)

1. 燃烧的必要条件：可燃物、助燃物（氧化剂）、引火源（温度）。

燃烧的发生和发展，必须具备这3个必要条件，人称着火三角形，如图1-1-1所示。

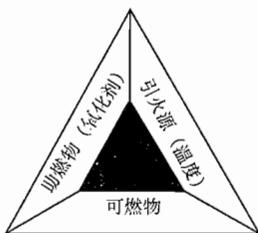


图1-1-1 着火三角形

2. 火灾的定义：在时间和空间上失去控制的燃烧所造成的灾害。

3. 火灾的分类：

按照燃烧对象的性质分类。按照国家标准 GB/T 4968—2008《火灾分类》的规定，火灾分为A、B、C、D、E、F 6类。

A类火灾：固体物质火灾。这种物质通常具有有机物性质，一般在燃烧时能产生灼热的余烬。例如，木材、棉、毛、麻、纸张火灾等。

B类火灾：液体或可熔化固体物质火灾。例如，汽油、煤油、原油、甲醇、乙醇、沥青、石蜡等火灾。

C类火灾：气体火灾。例如，煤气、天然气、甲烷、乙烷、氢气、乙炔等火灾。

D类火灾：金属火灾。例如，钾、钠、镁、钛、锆、锂等火灾。

E类火灾：带电火灾。物体带电燃烧的火灾。例如，变压器等设备的电气火灾等。

F类火灾：烹饪器具内的烹饪物（如动物油脂或植物油脂）火灾。

4. 灭火的几种基本原理：灭火即熄灭或阻止物质燃烧的措施。通常分为冷却（编者注：水消防等）、窒息（编者注：IG541即烟烙尽、二氧化碳气体灭火等）、隔离（编者注：泡沫等）和化学抑制（编者注：七氟丙烷、FM200等）四个方面。

5. 闪燃、阴燃、爆燃、爆炸的定义：

——闪燃：在液体表面上能产生足够的可燃气体，遇火能产生一闪即灭的燃烧现象。

——阴燃：物质无可见光的缓慢燃烧。通常产生烟和温度升高的迹象。（编者注：故设感烟、感温探测器探测火灾。）

——爆燃：以亚音速传播的爆炸。（编者注：又称“轰燃”。）

——爆炸：由于物质急剧氧化或分解反应产生温度、压力增加或两者同时增加的现象。

编者注：为便于读者查阅和引用，本章黑体字的条文为强制性条文。

6. 常见燃烧产物的种类及其毒性：常见燃烧产物一般分为气体、热量、可见烟等几种。气体一般为一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫、氰化氢等，可引起单纯窒息、化学窒息及黏膜刺激。统计资料表明，火灾中死亡人员中大约 75% 是由于吸入毒性气体而致死的。（编者注：故需设置和联锁控制防排烟系统，含排烟风机、正压送风机、消防补风机及其风口、阀门等。）

#### 7. 建筑火灾发展的几个阶段：

对于建筑火灾而言，最初发生在室内的某个房间或某个部位，然后由此蔓延到相邻的房间或区域，以及整个楼层，最后蔓延到整个建筑物。其发展过程大致可分为初期增长阶段、充分发展阶段和衰减阶段。图 1-2-2 为建筑室内火灾温度—时间曲线。

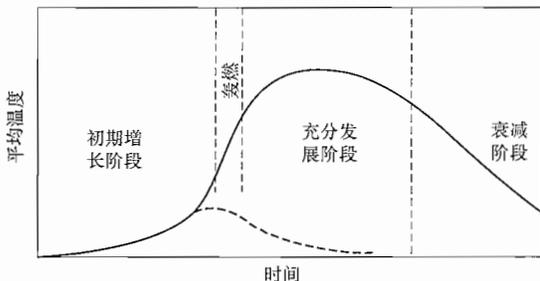


图 1-2-2 建筑室内火灾温度—时间曲线

#### 8. 火灾发生的常见原因：

2012 年，全国因电气原因引发的火灾占火灾总数的 32.2%；因吸烟引发的火灾占火灾总数的 6.2%；因生活用火不慎引发的火灾占火灾总数的 17.9%；因生产作业不慎引发的火灾占火灾总数的 4.1%。

### 15.1.2 火灾自动报警系统的定义与设计中应遵循的规范及国家标准图

#### 15.1.2.1 火灾自动报警系统的定义

GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中规定：

2.0.1 火灾自动报警系统 探测火灾早期特征、发出火灾报警信号，为人员疏散、防止火灾蔓延和启动自动灭火设备提供控制与指示的消防系统。

#### 15.1.2.2 设计中应遵循的规范及国家标准图

- (1) GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》；
- (2) GB 50016—2014《建筑设计防火规范》；
- (3) GB 50166—2007《火灾自动报警系统施工及验收规范》；
- (4) GB 50067—2014《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》；
- (5) GB 50368—2005《住宅建筑规范》；
- (6) GB 50174—2008《电子信息系统机房设计规范》；
- (7) GB 50028—2006《城镇燃气设计规范》；
- (8) GB 50058—2014《爆炸环境电力装置设计规范》；
- (9) 国家标准图 14X505-1《火灾自动报警系统设计规范》图示。

#### 15.1.3 火灾自动报警系统的设置原则

##### 15.1.3.1 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》第 8 章中规定：

#### 8.4.1 下列建筑或场所应设置火灾自动报警系统：

- 1 任一层建筑面积大于 1500m<sup>2</sup>或总建筑面积大于 3000m<sup>2</sup>的制鞋、制衣、玩具、

电子等类似用途的厂房；

2 每座占地面积大于  $1000\text{m}^2$  的棉、毛、丝、麻、化纤及其制品的仓库，占地面积大于  $500\text{m}^2$  或总建筑面积大于  $1000\text{m}^2$  的卷烟仓库；

3 任一层建筑面积大于  $1500\text{m}^2$  或总建筑面积大于  $3000\text{m}^2$  的商店、展览、财贸金融、客运和货运等类似用途的建筑，总建筑面积大于  $500\text{m}^2$  的地下或半地下商店；

4 图书或文物的珍藏库，每座藏书超过 50 万册的图书馆，重要的档案馆；

5 城市级及以上广播电视建筑、邮政建筑、电信建筑，城市或区域性电力、交通和防灾等指挥调度建筑；

6 特等、甲等剧场，座位数超过 1500 个的其他等级的剧场或电影院，座位数超过 2000 个的会堂或礼堂，座位数超过 3000 个的体育馆；

7 大、中型幼儿园的儿童用房等场所，老年人建筑，任一层建筑面积大于  $1500\text{m}^2$  或总建筑面积大于  $3000\text{m}^2$  的疗养院的病房楼、旅馆建筑和其他儿童活动场所，不少于 200 床位的医院门诊楼、病房楼和手术部等；

8 歌舞娱乐放映游艺场所；

9 净高大于 2.6m 且可燃物较多的技术夹层，净高大于 0.8m 且有可燃物的闷顶或吊顶内；

10 电子信息系统的主机房及其控制室、记录介质库，特殊贵重或火灾危险性大的机器、仪表、仪器设备室、贵重物品库房；

11 二类高层公共建筑内建筑面积大于  $50\text{m}^2$  的可燃物品库房和建筑面积大于  $500\text{m}^2$  的营业厅；

12 其他一类高层公共建筑；

13 设置机械排烟、防烟系统，雨淋或预作用自动喷水灭火系统，固定消防水炮灭火系统、气体灭火系统等需与火灾自动报警系统联锁动作的场所或部位。

(8.4.1 条文说明：……本条所规定的场所，如未明确具体部位的，除个别火灾危险性小的部位，如卫生间、泳池、水泵房等外，需要在该建筑内全部设置火灾自动报警系统。)

8.4.2 建筑高度大于 100m 的住宅建筑，应设置火灾自动报警系统。

建筑高度大于 54m，但不大于 100m 的住宅建筑，其公共部位应设置火灾自动报警系统，套内宜设置火灾探测器。

建筑高度不大于 54m 的高层住宅建筑，其公共部位宜设置火灾自动报警系统。当设置需联动控制的消防设施时，公共部位应设置火灾自动报警系统。

高层住宅建筑的公共部位应设置具有语音功能的火灾声警报装置或应急广播。

8.4.3 建筑内可能散发可燃气体、可燃蒸汽的场所应设置可燃气体报警装置。

### 15.1.3.2 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》其他章节中的有关规定：

5.3.2……2 高层建筑内的中庭回廊应设置自动喷水灭火系统和火灾自动报警系统。

5.3.6 餐饮、商店等商业设施通过有顶棚的步行街连接，且步行街两侧的建筑需利用步行街进行安全疏散时，应符合下列规定：

8 步行街两侧的……商铺内应设置自动喷水灭火系统和火灾自动报警系统，每层

回廊均应设置自动喷水灭火系统。步行街内宜设置自动跟踪定位射流灭火系统。

9 步行街两侧建筑的商铺内外均应设置疏散照明、灯光疏散指示标志和消防应急广播系统。

5.4.7 剧场、电影院、礼堂……5 设置在高层建筑内时，应设置火灾自动报警系统及自动喷水灭火系统等自动灭火系统。

5.4.8 建筑内的观众厅、会议厅、多功能厅等人员密集场所……3 设置在高层建筑内时，应设置火灾自动报警系统和自动喷水灭火系统等自动灭火系统。

5.4.12 燃油或燃气锅炉、油浸变压器、充有可燃油的高压电容器和多油开关等，……布置在民用建筑内时……

7 应设置火灾报警装置；

8 应设置与锅炉、变压器、电容器和多油开关等的容量及建筑规模相适应的灭火设施，当建筑内其他部位设置自动喷水灭火系统时，应设置自动喷水灭火系统。

5.4.13 布置在民用建筑内的柴油发电机房应符合下列规定：

4 机房内设置储油间时，其总储存量不应大于  $1\text{m}^3$ ，储油间应采用耐火极限不低于  $3.00\text{h}$  的防火隔墙与发电机间分隔；确需在防火隔墙上开门时，应设置甲级防火门。

5 应设置火灾报警装置。

6 应设置与柴油发电机容量和建筑规模相适应的灭火设施，当建筑内其他部位设置自动喷水灭火系统时，机房内应设置自动喷水灭火系统。

5.4.17 建筑采用瓶装液化石油气瓶组供气时，应符合下列规定：

5 瓶组间应设置可燃气体浓度报警装置。

5.5.23 建筑高度大于  $100\text{m}$  的公共建筑，应设置避难层（间）。避难层（间）应符合下列规定：

7 应设置消防专线电话和应急广播。

5.5.24 高层病房楼应在二层及以上的病房楼层和洁净手术部设置避难间。避难间应符合下列规定：

4 应设置消防专线电话和消防应急广播。

6.2.7 附设在建筑内的消防控制室、灭火设备室、消防水泵房和通风空气调节机房、变配电室等，应采用耐火极限不低于  $2.00\text{h}$  的防火隔墙和  $1.50\text{h}$  的楼板与其他部位分隔。……

通风、空气调节机房和变配电室开向建筑内的门应采用甲级防火门，消防控制室和其他设备房开向建筑内的门应采用乙级防火门。

6.2.9 建筑内的电梯井等竖井应符合下列规定：

3 建筑内的电缆井、管道井应在每层楼板处采用不低于楼板耐火极限的不燃材料或防火封堵材料封堵。

建筑内的电缆井、管道井与房间、走道等相连通的孔隙应采用防火封堵材料封堵。

6.4.11 建筑内的疏散门应符合下列规定：

1 民用建筑和厂房的疏散门，应采用向疏散方向开启的平开门，不应采用推拉门、卷帘门、吊门、转门和折叠门。

4 人员密集场所内平时需要控制人员随意出入的疏散门和设置门禁系统的住宅、宿舍、公寓建筑的外门，应保证火灾时不需使用钥匙等任何工具即能从内部易于打开，并应在显著位置设置具有使用提示的标识。

6.4.14 避难走道的设置应符合下列规定：

6 避难走道内应设置消火栓、消防应急照明、应急广播和消防专线电话。

6.5.1 防火门的设置应符合下列规定：

1 设置在建筑内经常有人通行处的防火门宜采用常开防火门。常开防火门应能在火灾时自行关闭，并应具有信号反馈的功能。

2 除允许设置常开防火门的位置外，其他位置的防火门均应采用常闭防火门。常闭防火门应在其明显位置设置“保持防火门关闭”等提示标识。

6.5.3 防火分隔部位设置防火卷帘时，应符合下列规定：

5 需在火灾时自动降落的防火卷帘，应具有信号反馈的功能。

7.3.8 消防电梯应符合下列规定：

7 电梯轿厢内部应设置专用消防对讲电话。

8.1.7 设置火灾自动报警系统和需要联动控制的消防设备的建筑（群）应设置消防控制室。消防控制室的设置应符合下列规定：

1 单独建造的消防控制室，其耐火等级不应低于二级；

2 附设在建筑内的消防控制室，宜设置在建筑内首层或地下一层，并宜布置在靠外墙部位；

3 不应设置在电磁场干扰较强及其他可能影响消防控制设备正常工作的房间附近；

4 疏散门应直通室外或安全出口。

8.1.8 消防水泵房和消防控制室应采取防水淹的技术措施。

11.0.13 总建筑面积大于 1500m<sup>2</sup>的木结构公共建筑应设置火灾自动报警系统，木结构住宅建筑内应设置火灾探测与报警装置。

### 15.1.3.3 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》对电气火灾监控系统的设置要求：

10.2.7 下列建筑或场所的非消防用电负荷宜设置电气火灾监控系统：

1 建筑高度大于 50m 的乙、丙类厂房和丙类仓库，室外消防用水量大于 30L/s 的厂房（仓库）；

2 一类高层民用建筑；

3 座位数超过 1500 个的电影院、剧场，座位数超过 3000 个的体育馆，任一层建筑面积大于 3000m<sup>2</sup>的商店和展览建筑，省（市）级及以上的广播电视、电信和财贸金融建筑，室外消防用水量大于 25L/s 的其他公共建筑；

4 国家级文物保护单位的重点砖木或木结构的古建筑。

#### 15.1.3.4 其他规范对火灾自动报警系统的设置要求

(1) GB 50067—2014《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》中的规定：

**9.0.7** 除敞开式汽车库、屋面停车场外，下列汽车库、修车库应设置火灾自动报警系统：

- 1 I类汽车库、修车库；
- 2 II类地下、半地下汽车库、修车库；
- 3 II类高层汽车库、修车库；
- 4 机械式汽车库；
- 5 采用汽车专用升降机作汽车疏散出口的汽车库。

**5.1.3** 室内无车道且无人员停留的机械式汽车库，应符合下列规定：

2 汽车库内应设置火灾自动报警系统和自动喷水灭火系统，自动喷水灭火系统应选用快速响应喷头。

(2) GB 50368—2005《住宅建筑规范》中的规定：

**9.7.2** 35层及35层以上的住宅建筑应设置火灾自动报警系统。

(3) JGJ 122—1999《老年人建筑设计规范》中规定：

**5.0.8** 老年人专用厨房应设燃气泄漏报警装置。

(4) GB 50028—2006《城镇燃气设计规范》中的规定：

**10.5.7** 商业用户中燃气锅炉和燃气直燃型吸收式冷（温）水机组的安全技术措施应符合下列要求：

- 3 应设置火灾自动报警系统和自动灭火系统。

(5) GB 50028—2006《城镇燃气设计规范》中的规定：

**10.5.3** 商业用气1 燃气引入管应设手动快速切断阀和紧急自动切断阀；紧急自动切断阀停电时必须处于关闭状态（常开型）；……3 用气房间应设置燃气浓度监测报警器，并由管理室集中监视和控制。

(6) GB 50174—2008《电子信息系统机房设计规范》中的规定：

**13.2.1** 采用管网式洁净气体灭火系统或高压细水雾灭火系统的主机房，应同时设置两种火灾探测器，且火灾报警系统应与灭火系统联动。

13.1.2 A级电子信息系统机房的主机房应设置洁净气体灭火系统。B级电子信息系统机房的主机房，以及A级和B级机房中的变配电、不间断电源系统和电池室，宜设置洁净气体灭火系统，也可设置高压细水雾灭火系统。

13.1.3 C级电子信息系统机房以及本规范第13.1.2条和第13.1.3条中规定区域以外的其他区域，可设置高压细水雾灭火系统或自动喷水灭火系统。自动喷水灭火系统宜采用预作用系统。

13.1.2、13.1.3 条文说明：目前用于电子信息系统机房的洁净气体灭火系统主要有七

氟丙烷（HFC-227ea，FM-200<sup>®</sup>为HFC-227ea的进口产品）、烟烙尽（IG-541，Inergen<sup>®</sup>为IG-541的进口产品）、二氧化碳。气体灭火系统自动化程度高、灭火速度快，对于局部火灾有非常强的抑制作用，但由于造价高，因此应选择火灾对机房影响最大的部分设置气体灭火系统。

对于空间较大，且只有部分设备需要重点保护的房间（如变配电室），为进一步降低工程造价，可仅对设备（如配电柜）采取局部保护措施，如可采用“火探”自动灭火装置。

细水雾灭火系统可实现灭火和控制火情的效果，具有冷却与窒息的双重作用。对于水渍和导电性敏感的电子信息设备，应选用平均体积直径（ $DV_{0.5}$ ）50~100 $\mu\text{m}$ 的细水雾，这种细水雾具有气体的特性。

实践证明，自动喷水灭火系统是非常有效的灭火手段，特别是在抑制早期火灾方面，且造价相对较低。考虑到湿式自动喷水灭火系统存在水渍损失及误动作的可能，因而要求采用相对安全的预作用系统。

(7) JGJ 25—2010《档案馆建筑设计规范》中的规定：

**6.0.5** 特级、甲级档案馆和属于一类高层的乙级档案馆建筑均应设置火灾自动报警系统。其他乙级档案馆的档案库、服务器机房、微缩用房、音像技术用房、空调机房等房间应设置火灾自动报警系统。

(8) JGJ 57—2000《剧场建筑设计规范》中的规定：

**8.1.1** 甲等及乙等的大型、特大型剧场舞台台口应设防火幕。

**8.3.3** 超过1500个座位的剧场，舞台的葡萄架下，应设雨淋喷水灭火系统。

**8.4.1** 甲等及乙等的大型、特大型剧场下列部位应设有火灾自动报警装置：观众厅、观众厅闷顶内、舞台、服装室、布景库、灯控室、声控室、发电机房、空调机房、前厅、休息厅、化妆室、栅顶、台仓、吸烟室、疏散通道及剧场中设置雨淋喷水灭火系统的部位。

(9) GB 50073—2013《洁净厂房设计规范》中的规定：

**8.1.1** 第4款 当易燃、易爆、有毒物质管道敷设在技术夹层或技术夹道内时，必须采取可靠的浓度检测报警、通风措施。

**9.3.3** 洁净厂房的生产层、技术夹层、机房、站房等均应设置火灾报警探测器。洁净厂房生产区及走廊应设置手动火灾报警按钮。

(10) GB 50041—2008《锅炉房设计规范》中的规定：

**11.1.8** 燃气调压间、燃气锅炉间可燃气体浓度报警装置，应与燃气供气母管总切断阀和排风扇联动，设有防灾中心时，应将信号传至防灾中心。

**17.0.5** ……单台热水锅炉额定热功率大于等于7MW或总额定热功率大于等于28MW的独立锅炉房，应设置火灾探测器和自动报警装置。

### 15.1.3.5 民用建筑防火分类

GB 50016—2014《建筑设计防火规范》中的规定：

5.1.1 民用建筑根据其建筑高度和层数可分为单、多层民用建筑和高层民用建筑。高层民用建筑根据其建筑高度、使用功能和楼层的建筑面积可分为一类和二类。民用建筑的分类应符合表 5.1.1 的规定。

表 5.1.1 民用建筑的分类

名称	高层民用建筑		单、多层民用建筑
	一类	二类	
住宅建筑	建筑高度大于 54m 的住宅建筑（包括设置商业服务网点的住宅建筑）	建筑高度大于 27m，但不大于 54m 的住宅建筑（包括设置商业服务网点的住宅建筑）	建筑高度不大于 27m 的住宅建筑（包括设置商业服务网点的住宅建筑）
公共建筑	1. 建筑高度大于 50m 的公共建筑； 2. 建筑高度 24m 以上部分任一楼层建筑面积大于 1000m <sup>2</sup> 的商店、展览、电信、邮政、财贸金融建筑和其他多种功能组合的建筑； 3. 医疗建筑、重要公共建筑； 4. 省级及以上的广播电视和防灾指挥调度建筑、网局级和省级电力调度建筑； 5. 藏书超过 100 万册的图书馆、书库	除一类高层公共建筑外的其他高层公共建筑	1. 建筑高度大于 24m 的单层公共建筑； 2. 建筑高度不大于 24m 的其他公共建筑

注：1 表中未列入的建筑，其类别应根据本表类比确定。

2 除本规范另有规定外，宿舍、公寓等非住宅类居住建筑的防火要求，应符合本规范有关公共建筑的规定。

3 除本规范另有规定外，裙房的防火要求应符合本规范有关高层民用建筑的规定。

### 15.1.3.6 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中的规定：

#### 附录 D 火灾探测器的具体设置部位

D.0.1 火灾探测器可设置在下列部位：

- 1 财贸金融楼的办公室、营业厅、票证库。
- 2 电信楼、邮政楼的机房和办公室。
- 3 商业楼、商住楼的营业厅、展览楼的展览厅和办公室。
- 4 旅馆的客房和公共活动用房。
- 5 电力调度楼、防灾指挥调度楼等的微波机房、计算机房、控制机房、动力机房和办公室。
- 6 广播电视楼的演播室、播音室、录音室、办公室、节目播出技术用房、道具布景房。
- 7 图书馆的书库、阅览室、办公室。
- 8 档案楼的档案库、阅览室、办公室。
- 9 办公楼的办公室、会议室、档案室。
- 10 医院病房楼的病房、办公室、医疗设备室、病历档案室、药品库。
- 11 科研楼的办公室、资料室、贵重设备室、可燃物较多的和火灾危险性较大的实验室。

## 15

- 12 教学楼的电化教室、理化演示和实验室、贵重设备和仪器室。
- 13 公寓（宿舍、住宅）的卧房、书房、起居室（前厅）、厨房。
- 14 甲、乙类生产厂房及其控制室。
- 15 甲、乙、丙类物品库房。
- 16 设在地下室的丙、丁类生产车间和物品库房。
- 17 堆场、堆垛、油罐等。
- 18 地下铁道的地铁站厅、行人通道和设备间，列车车厢。
- 19 体育馆、影剧院、会堂、礼堂的舞台、化妆室、道具室、放映室、观众厅、休息厅及其附设的一切娱乐场所。
- 20 陈列室、展览室、营业厅、商业餐厅、观众厅等公共活动用房。
- 21 消防电梯、防烟楼梯的前室及合用前室、走道、门厅、楼梯间。
- 22 可燃物品库房、空调机房、配电室（间）、变压器室、自备发电机房、电梯机房。
- 23 净高超过2.6m且可燃物较多的技术夹层。
- 24 敷设具有可延燃绝缘层和外护层电缆的电缆竖井、电缆夹层、电缆隧道、电缆配线桥架。
- 25 贵重设备间和火灾危险性较大的房间。
- 26 电子计算机的主机房、控制室、纸库、光或磁记录材料库。
- 27 经常有人停留或可燃物较多的地下室。
- 28 歌舞娱乐场所中经常有人滞留的房间和可燃物较多的房间。
- 29 高层汽车库、Ⅰ类汽车库、Ⅰ、Ⅱ类地下汽车库、机械立体汽车库、复式汽车库、采用升降梯作汽车疏散出口的汽车库（敞开车库可不设）。
- 30 污衣道前室、垃圾道前室、净高超过0.8m的具有可燃物的闷顶、商业用或公共厨房。
- 31 以可燃气为燃料的商业和企事业单位的公共厨房及燃气表房。
- 32 其他经常有人停留的场所、可燃物较多的场所或燃烧后产生重大污染的场所。
- 33 需要设置火灾探测器的其他场所。

### 15.1.3.7 设计中应注意的问题

(1) GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》与GB 50016—2014《建筑设计防火规范》的关系。GB 50016—2014是建筑防火设计的基础性规范，是“母规”，是各个专业消防系统设置标准的首要依据。设计某个建筑时，需要不需要设置火灾自动报警系统，首先要根据GB 50016—2014的要求来确定，其中很多是强制性要求。在确定了需要设置火灾自动报警系统之后，如何设置整个系统、如何设置探测器、如何进行联动控制等，这是GB 50116—2013的主要任务，应根据GB 50116—2013进行设计。

(2) 对于某些有特殊要求的建筑，如锅炉房、汽车库、洁净厂房、老年人建筑、燃气工程等，在GB 50016—2014的基础上，根据这些建筑的特点制定了有关规范，补充了一些具体要求，设计中也应一并考虑。

## 15.1.4 火灾自动报警系统的构成

### 15.1.4.1 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》的一般规定及术语:

#### 2.0.1 火灾自动报警系统

探测火灾早期特征、发出火灾报警信号,为人员疏散、防止火灾蔓延和启动自动灭火设备提供控制与指示的消防系统。

#### 2.0.2 报警区域

将火灾自动报警系统的警戒范围按防火分区或楼层等划分的单元。

#### 2.0.3 探测区域

将报警区域按探测火灾的部位划分的单元。

#### 2.0.7 联动控制信号

由消防联动控制器发出的用于控制消防设备(设施)工作的信号。

### 3.1 一般规定

3.1.2 火灾自动报警系统应设有自动和手动两种触发装置。

3.1.5 任一台火灾报警控制器所连接的火灾探测器、手动火灾报警按钮和模块等设备总数和地址总数,均不应超过3200点,其中每一总线回路连接设备的总数不宜超过200点,且应留有不少于额定容量10%的余量;任一台消防联动控制器地址总数或火灾报警控制器(联动型)所控制的各类模块总数不应超过1600点,每一联动总线回路连接设备的总数不宜超过100点,且应留有不少于额定容量10%的余量。

3.1.6 系统总线上应设置总线短路隔离器,每只总线短路隔离器保护的火灾探测器、手动火灾报警按钮和模块等消防设备的总数不应超过32点;总线穿越防火分区时,应在穿越处设置总线短路隔离器。

3.1.7 高度超过100m的建筑中,除消防控制室内设置的控制器外,每台控制器直接控制的火灾探测器、手动报警按钮和模块等设备不应跨越避难层。

3.1.8 水泵控制柜、风机控制柜等消防电气控制装置不应采用变频启动方式。

### 3.2 系统形式的选择和设计要求

3.2.1 火灾自动报警系统形式的选择,应符合下列规定:

- 1 仅需要报警,不需要联动自动消防设备的保护对象宜采用区域报警系统。
- 2 不仅需要报警,同时需要联动自动消防设备,且只设置一台具有集中控制功能的火灾报警控制器和消防联动控制器的保护对象,应采用集中报警系统,并应设置一个消防控制室。

3 设置两个及以上消防控制室的保护对象,或已设置两个及以上集中报警系统的保护对象,应采用控制中心报警系统。

3.2.2 区域报警系统的设计,应符合下列规定:

1 系统应由火灾探测器、手动火灾报警按钮、火灾声光警报器及火灾报警控制器等组成,系统中可包括消防控制室图形显示装置和指示楼层的区域显示器。

2 火灾报警控制器应设置在有人值班的场所。

3.2.3 集中报警系统的设计,应符合下列规定:

1 系统应由火灾探测器、手动火灾报警按钮、火灾声光警报器、消防应急广

播、消防专用电话、消防控制室图形显示装置、火灾报警控制器、消防联动控制器等组成。

3.2.4 控制中心报警系统的设计，应符合下列规定：

- 1 有两个及以上消防控制室时，应确定一个主消防控制室。
- 2 主消防控制室应能显示所有火灾报警信号和联动控制状态信号，并应能控制重要的消防设备；各分消防控制室内消防设备之间可互相传输、显示状态信息，但不应互相控制。

3.3 报警区域和探测区域的划分

3.3.1 报警区域的划分应符合下列规定：

- 1 报警区域应根据防火分区或楼层划分；可将一个防火分区或一个楼层划分为一个报警区域，也可将发生火灾时需要同时联动消防设备的相邻几个防火分区或楼层划分为一个报警区域。

3.3.2 探测区域的划分应符合下列规定：

- 1 探测区域应按独立房（套）间划分。一个探测区域的面积不宜超过 $500\text{m}^2$ ；从主要入口能看清其内部，且面积不超过 $1000\text{m}^2$ 的房间，也可划为一个探测区域。

- 2 红外光束感烟火灾探测器和缆式线型感温火灾探测器的探测区域的长度，不宜超过 $100\text{m}$ ；空气管差温火灾探测器的探测区域长度宜为 $20\text{m}\sim 100\text{m}$ 。

3.4 消防控制室

3.4.1 具有消防联动功能的火灾自动报警系统的保护对象中应设置消防控制室。

3.4.2 消防控制室内设置的消防设备应包括火灾报警控制器、消防联动控制器、消防控制室图形显示装置、消防专用电话总机、消防应急广播控制装置、消防应急照明和疏散指示系统控制装置、消防电源监控器等设备或具有相应功能的组合设备。

3.4.3 消防控制室应设有用于火灾报警的外线电话。

3.4.5 消防控制室送、回风管的穿墙处应设防火阀。

3.4.6 消防控制室内严禁穿过与消防设施无关的电气线路及管路。

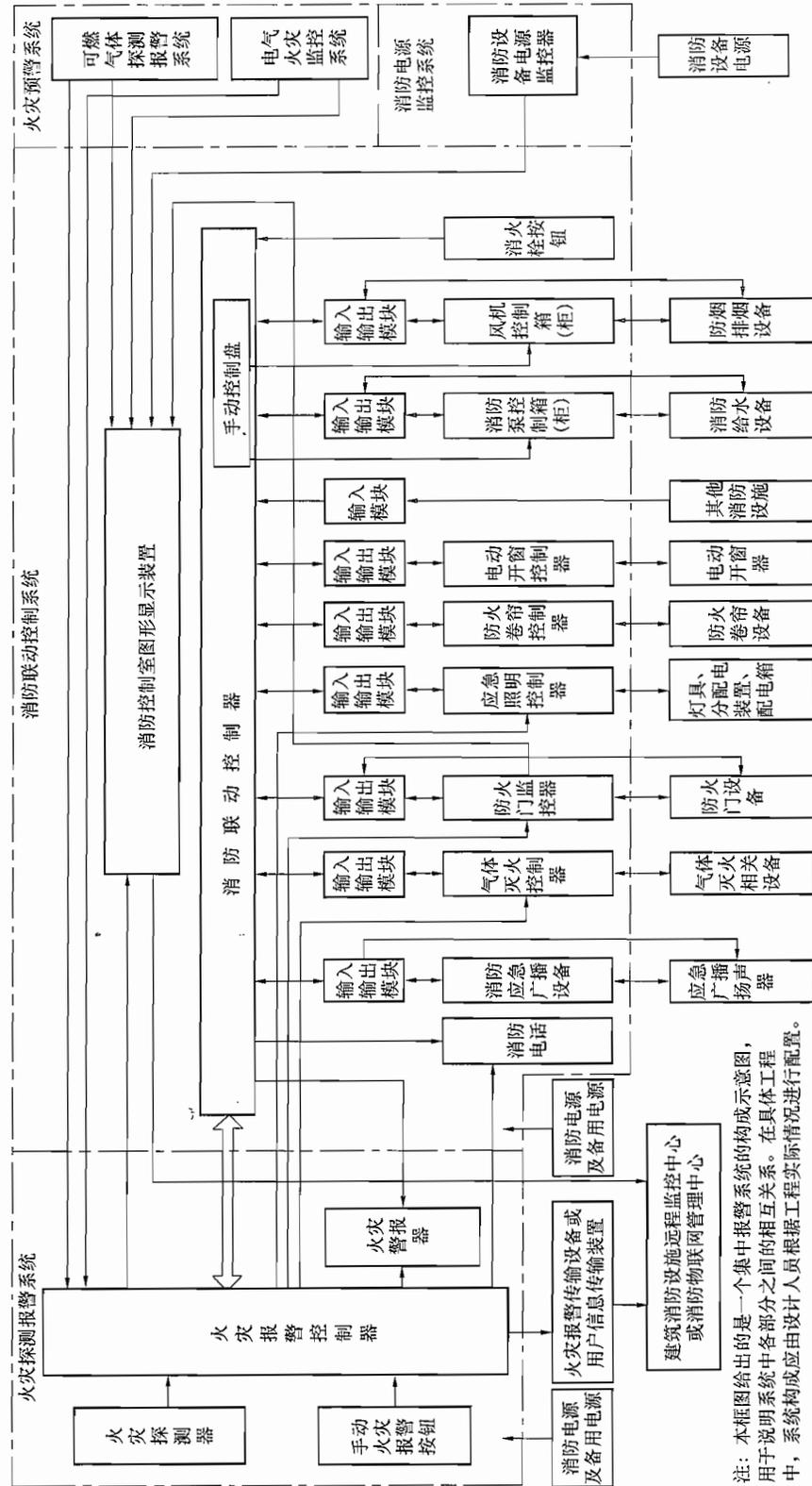
3.4.7 消防控制室不应设置在电磁场干扰较强及其他影响消防控制室设备工作的设备用房附近。

3.4.8 消防控制室内设备的布置应符合下列规定：

- 1 设备面盘前的操作距离，单列布置时不应小于 $1.5\text{m}$ ；双列布置时不应小于 $2\text{m}$ 。
- 2 在值班人员经常工作的一面，设备面盘至墙的距离不应小于 $3\text{m}$ 。
- 3 设备面盘后的维修距离不宜小于 $1\text{m}$ 。
- 4 设备面盘的排列长度大于 $4\text{m}$ 时，其两端应设置宽度不小于 $1\text{m}$ 的通道。
- 5 与建筑其他弱电系统合用的消防控制室内，消防设备应集中设置，并应与其他设备间有明显间隔。

#### 15.1.4.2 火灾自动报警系统示意图

(1) 火灾自动报警系统框图，如图 15-1-1 所示。

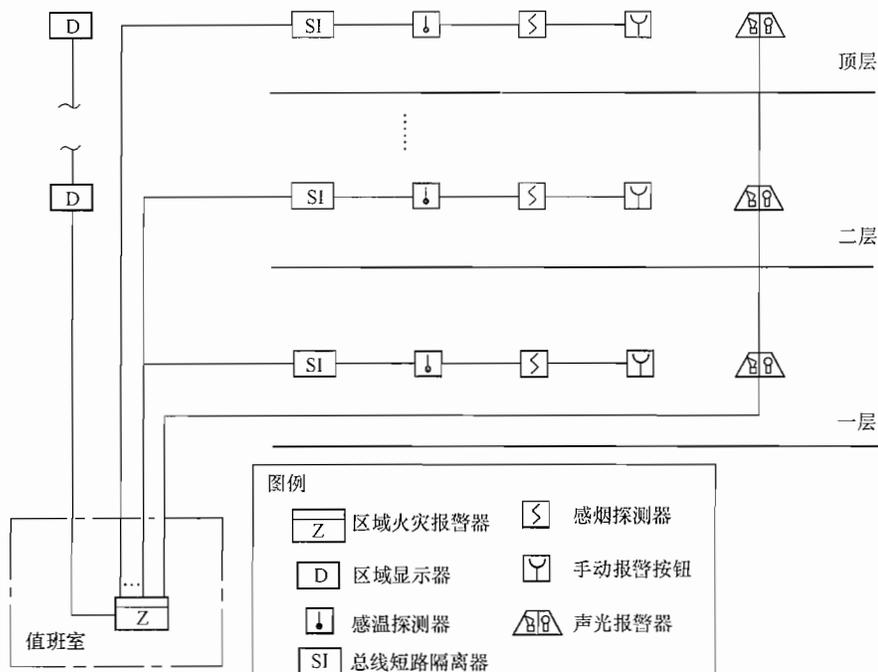


注：本框图给出的是一个集中报警系统的构成示意图，用于说明系统中各部分之间的相互关系。在具体工程中，系统构成应由设计人员根据实际情况进行配置。

图 15-1-1 火灾自动报警系统框图

15

(2) 区域报警系统，如图 15-1-2 所示。



- 注：1. 本图适用于仅需要报警，不需要联动自动消防设备的保护对象。  
2. 图形显示装置及区域显示器为可选设备，可根据实际情况决定是否安装。

图 15-1-2 区域报警系统图

(3) 集中报警系统框图，如 15-1-3 所示。

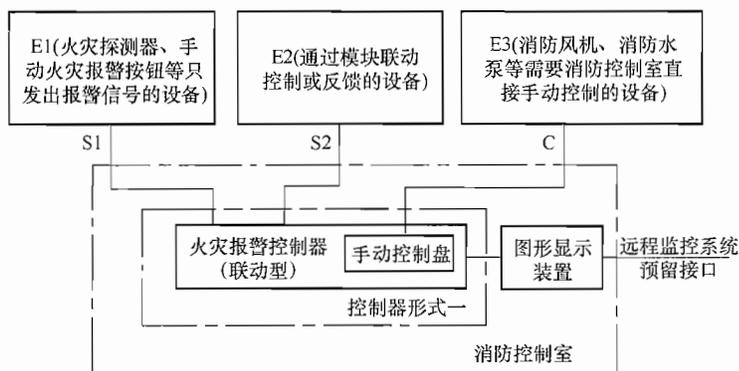


图 15-1-3 集中报警系统框图

(4) 火灾报警控制器与消防联动控制器的容量要求, 如图 15-1-4 所示。

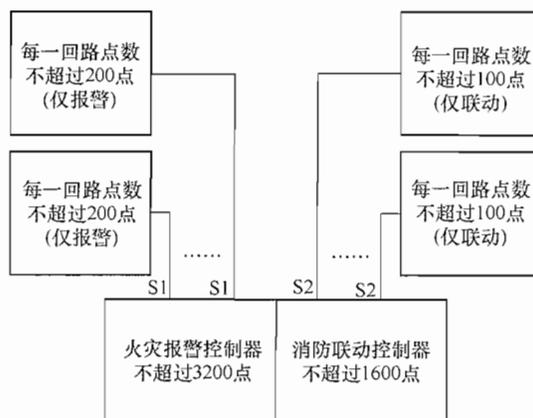


图 15-1-4 火灾报警控制器与消防联动控制器的容量要求

(5) 总线短路隔离器的设置, 如图 15-1-5 所示。

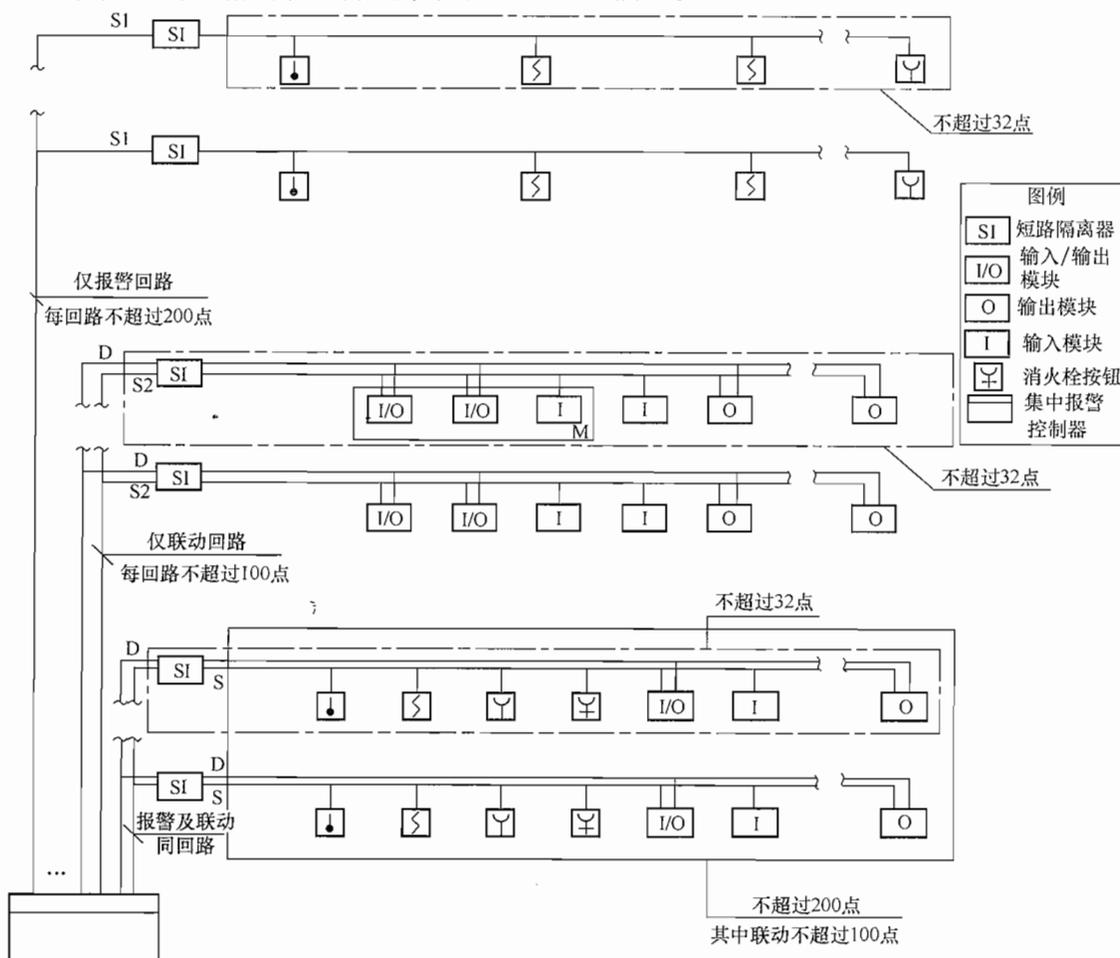


图 15-1-5 总线短路隔离器的设置 (树形结构)

(6) 集中报警系统示例, 如图 15-1-6 所示。

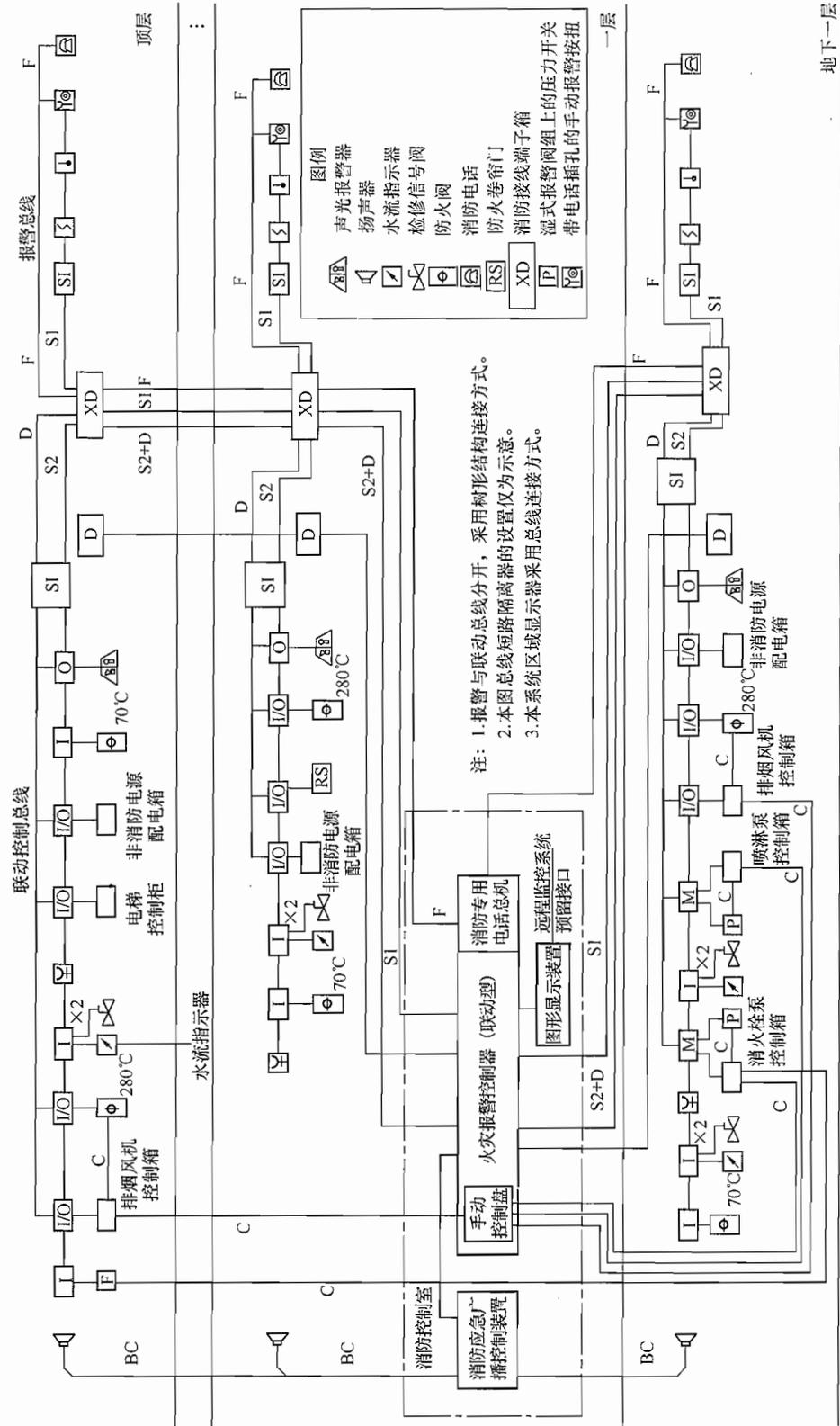


图 15-1-6 集中报警系统示例

### 15.1.5 火灾探测器的选择

#### 15.1.5.1 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中的一般规定：

5.1.1 火灾探测器的选择应符合下列规定：

- 1 对火灾初期有阴燃阶段，产生大量的烟和少量的热，很少或没有火焰辐射的场所，应选择感烟火灾探测器。
- 2 对火灾发展迅速，可产生大量热、烟和火焰辐射的场所，可选择感温火灾探测器、感烟火灾探测器、火焰探测器或其组合。
- 3 对火灾发展迅速，有强烈的火焰辐射和少量烟、热的场所，应选择火焰探测器。
- 4 对火灾初期有阴燃阶段，且需要早期探测的场所，宜增设一氧化碳火灾探测器。
- 5 对使用、生产可燃气体或可燃蒸气的场所，应选择可燃气体探测器。
- 6 应根据保护场所可能发生火灾的部位和燃烧材料的分析，以及火灾探测器的类型、灵敏度和响应时间等选择相应的火灾探测器，对火灾形成特征不可预料的场所，可根据模拟试验的结果选择火灾探测器。
- 7 同一探测区域内设置多个火灾探测器时，可选择具有复合判断火灾功能的火灾探测器和火灾报警控制器。

#### 15.1.5.2 常用火灾探测器分类与选择

(1) 常用火灾探测器分类与选择，见表 15-1-1。

表 15-1-1 常用火灾探测器分类与选择表

火灾探测器种类	型式	探测方式	典型使用场合
感烟火灾探测器	点型	光电式	最常用
		离子式	常用
	线型	红外光束式	大空间
感温火灾探测器	点型	定温式	厨房
		差温式	
		差定温式	控制气体灭火、雨淋灭火等
	线型	感温电缆定温式	计算机房地板下、吊顶内 需分区控制雨淋的场所、电缆隧道
		空气管差温式	
光纤感温探测器	石油储罐、公路、铁路隧道		
感光火灾探测器 (火焰探测器)	点型	紫外火焰式	控雨淋
		红外火焰式	控雨淋
		红外、紫外复合式	燃油试验间、喷漆厂房等处控雨淋
图像式感烟探测器	多道光束	光截面式	大空间
	(锥体型)	图像对比式	大空间
图像式火焰探测器	(锥体型)	彩色、红外双波段式	体育馆、会展中心、候机楼、候车大厅等 高大空间场所，常与自动水炮配合使用

续表

火灾探测器种类	型式	探测方式	典型使用场合
可燃气体探测器	防爆型	铂丝式	燃气站、燃气表房、锅炉房等场所 (灵敏度可调、可显示气体浓度值)
		半导体式	
	家用型	半导体式	厨房
吸气式 感烟火灾报警系统	感烟	激光式分析仪	重要通信机房、计算机房、冷库

15

(2) 火灾发展过程中, 各种火灾探测器的报警反应时间, 如图 15-1-7 所示。

### 15.1.5.3 常用火灾探测器的适用场合

GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中的规定:

#### 5.2 点型火灾探测器的选择

5.2.1 对不同高度的房间, 可按表 5.2.1 选择点型火灾探测器。

表 5.2.1 对不同高度的房间点型火灾探测器的选择

房间高度 $h$ (m)	点型感 烟火灾 探测器	点型感温火灾探测器			火焰 探测器
		A1、A2	B	C、D、E、 F、G	
$12 < h \leq 20$	不适合	不适合	不适合	不适合	适合
$8 < h \leq 12$	适合	不适合	不适合	不适合	适合
$6 < h \leq 8$	适合	适合	不适合	不适合	适合
$4 < h \leq 6$	适合	适合	适合	不适合	适合
$h \leq 4$	适合	适合	适合	适合	适合

注: 表中 A1、A2、B、C、D、E、F、G 为点型感温探测器的不同类别, 其具体参数应符合本规范附录 C 的规定。

5.2.2 下列场所宜选择点型感烟火灾探测器:

- 1 饭店、旅馆、教学楼、办公楼的厅堂、卧室、办公室、商场、列车载客车厢等。
- 2 计算机房、通信机房、电影或电视放映室等。
- 3 楼梯、走道、电梯机房、车库等。
- 4 书库、档案库等。

5.2.5 符合下列条件之一的场所, 宜选择点型感温火灾探测器; 且应根据使用场所的典型应用温度和最高应用温度选择适当类别的感温火灾探测器:

- 1 相对湿度经常大于 95%。
- 2 可能发生无烟火灾。
- 3 有大量粉尘。
- 4 吸烟室等在正常情况下有烟或蒸汽滞留的场所。
- 5 厨房、锅炉房、发电机房、烘干车间等不宜安装感烟火灾探测器的场所。

5.2.7 符合下列条件之一的场所, 宜选择点型火焰探测器或图像型火焰探测器:

- 1 火灾时有强烈的火焰辐射。

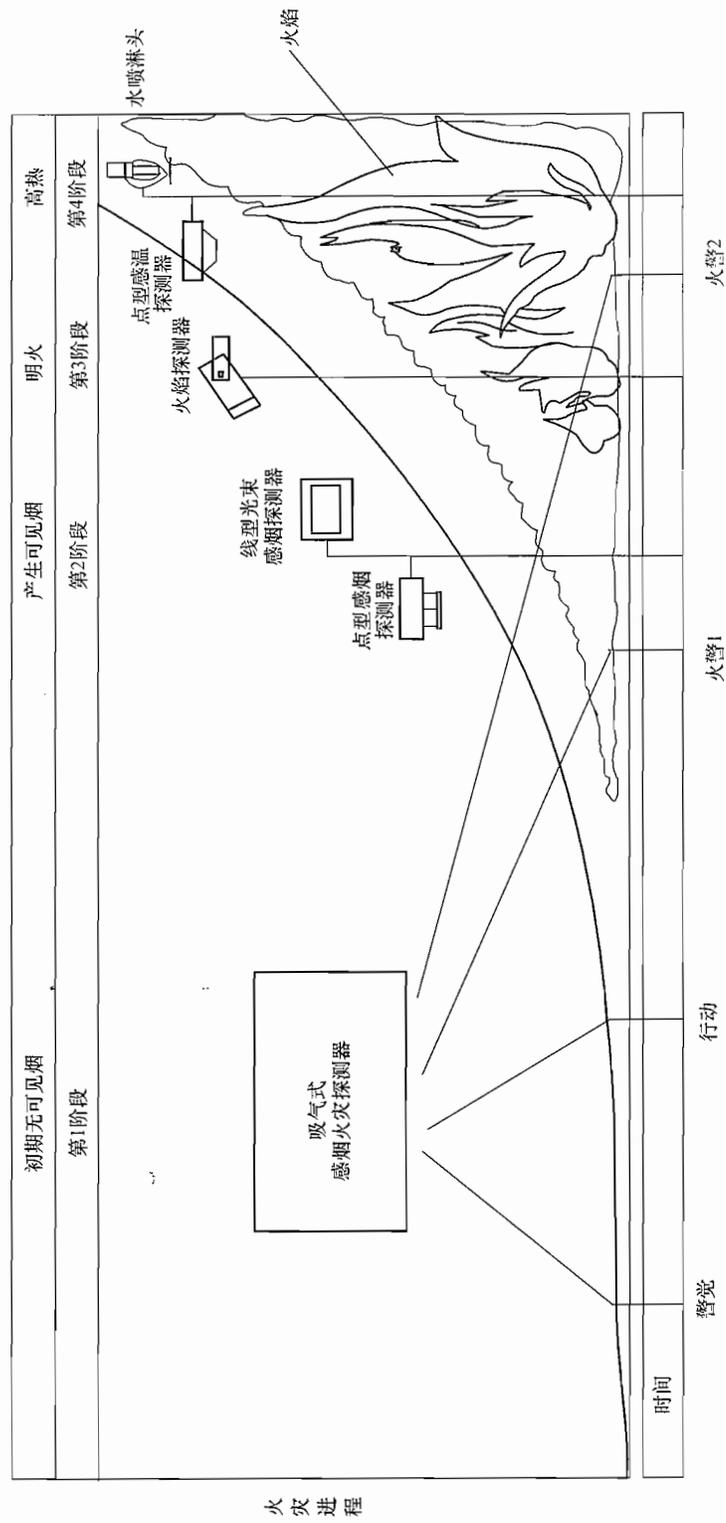


图 15-1-7 各种火灾探测器反应时间示意图

- 2 可能发生液体燃烧等无阴燃阶段的火灾。
- 3 需要对火焰做出快速反应。
- 5.2.9 探测区域内正常情况下有高温物体的场所，不宜选择单波段红外火焰探测器。
- 5.2.10 正常情况下有明火作业，探测器易受X射线、弧光和闪电等影响的场所，不宜选择紫外火焰探测器。
- 5.2.11 下列场所宜选择可燃气体探测器：
  - 1 使用可燃气体的场所。
  - 2 燃气站和燃气表房以及存储液化石油气罐的场所。
  - 3 其他散发可燃气体和可燃蒸汽的场所。
- 5.2.12 在火灾初期产生一氧化碳的下列场所可选择点型一氧化碳火灾探测器：
  - 1 烟不容易对流或顶棚下方有热屏障的场所。
  - 2 在棚顶上无法安装其他点型火灾探测器的场所。
  - 3 需要多信号复合报警的场所。
- 5.3 线型火灾探测器的选择
  - 5.3.1 无遮挡的大空间或有特殊要求的房间，宜选择线型光束感烟火灾探测器。
  - 5.3.3 下列场所或部位，宜选择缆式线型感温火灾探测器：
    - 1 电缆隧道、电缆竖井、电缆夹层、电缆桥架。
    - 2 不易安装点型探测器的夹层、闷顶。
    - 3 各种皮带输送装置。
    - 4 其他环境恶劣不适合点型探测器安装的场所。
  - 5.3.4 下列场所或部位，宜选择线型光纤感温火灾探测器：
    - 1 除液化石油气外的石油储罐。
    - 2 需要设置线型感温火灾探测器的易燃易爆场所。
    - 3 需要监测环境温度的地下空间等场所宜设置具有实时温度监测功能的线型光纤感温火灾探测器。
    - 4 公路隧道、敷设动力电缆的铁路隧道和城市地铁隧道等。
  - 5.3.5 线型定温火灾探测器的选择，应保证其不动作温度符合设置场所的最高环境温度的要求。
- 5.4 吸气式感烟火灾探测器的选择
  - 5.4.1 下列场所宜选择吸气式感烟火灾探测器：
    - 1 具有高速气流的场所。
    - 2 点型感烟、感温火灾探测器不适宜的大空间、舞台上、建筑高度超过12m或有特殊要求的场所。
    - 3 低温场所。
    - 4 需要进行隐蔽探测的场所。
    - 5 需要进行火灾早期探测的重要场所。
    - 6 人员不宜进入的场所。

### 15.1.6 系统设备的设置

#### 15.1.6.1 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中的规定:

##### 6.1 火灾报警控制器和消防联动控制器的设置

6.1.1 火灾报警控制器和消防联动控制器,应设置在消防控制室内或有人值班的房间和场所。

6.1.3 火灾报警控制器和消防联动控制器安装在墙上时,其主显示屏高度宜为1.5m~1.8m,其靠近门轴的侧面距墙不应小于0.5m,正面操作距离不应小于1.2m。

6.1.4 集中报警系统和控制中心报警系统中的区域火灾报警控制器在满足下列条件时,可设置在无人值班的场所:

- 1 本区域内无需要手动控制的消防联动设备。
- 2 本火灾报警控制器的所有信息在集中火灾报警控制器上均有显示,且能接收起集中控制功能的火灾报警控制器的联动控制信号,并自动启动相应的消防设备。
- 3 设置的场所只有值班人员可以进入。

##### 6.2 火灾探测器的设置

6.2.1 探测器的具体设置部位应按本规范附录D采用。

6.2.2 点型火灾探测器的设置应符合下列规定:

- 1 探测区域的每个房间应至少设置一只火灾探测器。
- 2 感烟火灾探测器和A1、A2、B型感温火灾探测器的保护面积和保护半径,应按表6.2.2确定。

表6.2.2 感烟火灾探测器和A1、A2、B型感温火灾探测器的保护面积和保护半径

火灾探测器的种类	地面面积 ·S (m <sup>2</sup> )	房间高度 h (m)	一只探测器的保护面积A和保护半径R					
			屋顶坡度θ					
			θ≤15°		15°<θ≤30°		θ>30°	
			A (m <sup>2</sup> )	R (m)	A (m <sup>2</sup> )	R (m)	A (m <sup>2</sup> )	R (m)
感烟火灾探测器	S≤80	h≤12	80	6.7	80	7.2	80	8.0
	S>80	6<h≤12	80	6.7	100	8.0	120	9.9
		h≤6	60	5.8	80	7.2	100	9.0
感温火灾探测器	S≤30	h≤8	30	4.4	30	4.9	30	5.5
	S>30	h≤8	20	3.6	30	4.9	40	6.3

注:建筑高度不超过14m的封闭探测空间,且火灾初期会产生大量的烟时,可设置点型感烟火灾探测器。

3 感烟火灾探测器、感温火灾探测器的安装间距,应根据探测器的保护面积A和保护半径R确定,并不应超过本规范附录E探测器安装间距的极限曲线D<sub>1</sub>~D<sub>11</sub>(含D<sub>9</sub>)规定的范围。

4 一只探测区域内所需设置的探测器数量,不应小于公式(6.2.2)的计算值:

$$N = \frac{S}{K \cdot A} \quad (6.2.2)$$

式中： $N$ ——探测器数量（只）， $N$ 应取整数；  
 $S$ ——该探测区域面积（ $m^2$ ）；  
 $K$ ——修正系数，容纳人数超过10000人的公共场所宜取0.7~0.8；容纳人数为2000人~10000人的公共场所宜取0.8~0.9，容纳人数为500人~2000人的公共场所宜取0.9~1.0，其他场所可取1.0；  
 $A$ ——探测器的保护面积（ $m^2$ ）。

附录 E 探测器安装间距的极限曲线

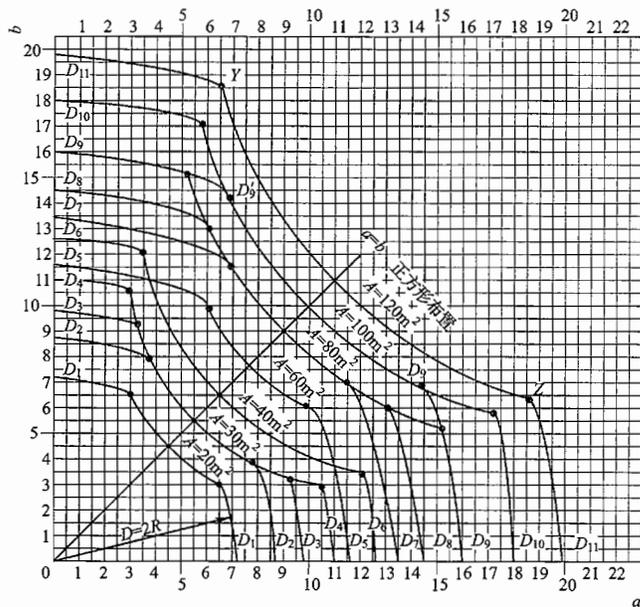


图 E 探测器安装间距的极限曲线

$A$ —探测器的保护面积（ $m^2$ ）； $a$ 、 $b$ —探测器的安装间距（ $m$ ）；  
 $D_1 \sim D_{11}$ （含  $D'_5$ ）—在不同保护面积  $A$  和保护半径下确定探测器安装间距  $a$ 、 $b$  的极限曲线；  
 $Y$ 、 $Z$ —极限曲线的端点（在  $Y$  和  $Z$  两点间的曲线范围内，保护面积可得到充分利用）

6.2.3 在有梁的顶棚上设置点型感烟火灾探测器、感温火灾探测器时，应符合下列规定：

- 1 当梁突出顶棚的高度小于200mm时，可不计梁对探测器保护面积的影响。
- 2 当梁突出顶棚的高度为200mm~600mm时，应按本规范附录F、附录G确定梁对探测器保护面积的影响和一只探测器能够保护的梁间区域的数量。
- 3 当梁突出顶棚的高度超过600mm时，被梁隔断的每个梁间区域应至少设置一只探测器。
- 4 当被梁隔断的区域面积超过一只探测器的保护面积时，被隔断的区域应按本规范第6.2.2条第4款规定计算探测器的设置数量。
- 5 当梁间净距小于1m时，可不计梁对探测器保护面积的影响。

## 附录 F 不同高度的房间梁对探测器设置的影响

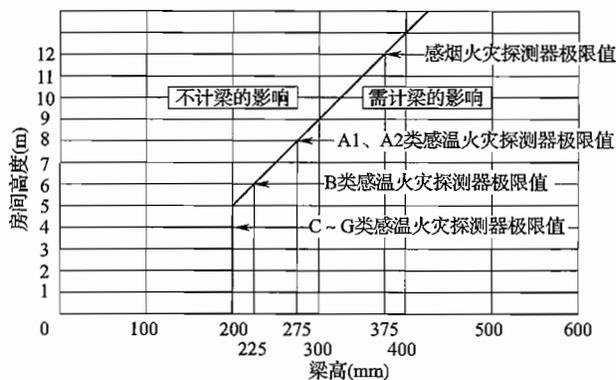


图 F 不同高度的房间梁对探测器设置的影响

## 附录 G 按梁间区域面积确定一只探测器保护的梁间区域的个数

表 G 按梁间区域面积确定一只探测器保护的梁间区域的个数

探测器的保护面积 $A$ ( $m^2$ )		梁隔断的梁间区域 面积 $Q$ ( $m^2$ )	一只探测器保护的 梁间区域的个数 (个)
感温 探测器	20	$Q > 12$	1
		$8 < Q \leq 12$	2
		$6 < Q \leq 8$	3
		$4 < Q \leq 6$	4
		$Q \leq 4$	5
	30	$Q > 18$	1
		$12 < Q \leq 18$	2
		$9 < Q \leq 12$	3
		$6 < Q \leq 9$	4
		$Q \leq 6$	5
感烟 探测器	60	$Q > 36$	1
		$24 < Q \leq 36$	2
		$18 < Q \leq 24$	3
		$12 < Q \leq 18$	4
		$Q \leq 12$	5
	80	$Q > 48$	1
		$32 < Q \leq 48$	2
		$24 < Q \leq 32$	3
		$16 < Q \leq 24$	4
		$Q \leq 16$	5

6.2.4 在宽度小于3m的内走道顶棚上设置点型探测器时，宜居中布置。感温火灾探测器的安装间距不应超过10m；感烟火灾探测器的安装间距不应超过15m；探测器至端墙的距离，不应大于探测器安装间距的1/2。

6.2.5 点型探测器至墙壁、梁边的水平距离，不应小于0.5m。

6.2.6 点型探测器周围0.5m内，不应有遮挡物。

6.2.7 房间被书架、设备或隔断等分隔，其顶部至顶棚或梁的距离小于房间净高的5%时，每个被隔开的部分应至少安装一只点型探测器。

6.2.8 点型探测器至空调送风口边的水平距离不应小于1.5m，并宜接近回风口安装。探测器至多孔送风顶棚孔口的水平距离不应小于0.5m。

6.2.9 当屋顶有热屏障时，点型感烟火灾探测器下表面至顶棚或屋顶的距离，应符合表6.2.9的规定。

表6.2.9 点型感烟火灾探测器下表面至顶棚或屋顶的距离

探测器的 安装高度 $h$ (m)	点型感烟火灾探测器下表面至顶棚或屋顶的距离 $d$ (mm)					
	顶棚或屋顶坡度 $\theta$					
	$\theta \leq 15^\circ$		$15^\circ < \theta \leq 30^\circ$		$\theta > 30^\circ$	
	最小	最大	最小	最大	最小	最大
$h \leq 6$	30	200	200	300	300	500
$6 < h \leq 8$	70	250	250	400	400	600
$8 < h \leq 10$	100	300	300	500	500	700
$10 < h \leq 12$	150	350	350	600	600	800

6.2.10 锯齿形屋顶和坡度大于 $15^\circ$ 的人字形屋顶，应在每个屋脊处设置一排点型探测器，探测器下表面至屋顶最高处的距离，应符合本规范第6.2.9条的规定。

6.2.11 点型探测器宜水平安装。当倾斜安装时，倾斜角不应大于 $45^\circ$ 。

6.2.12 在电梯井、升降机井设置点型探测器时，其位置宜在井道上方的机房顶棚上。

6.2.13 一氧化碳火灾探测器可设置在气体能够扩散到的任何部位。

6.2.14 火焰探测器和图像型火灾探测器的设置，应符合下列规定：

1 应计及探测器的探测视角及最大探测距离，可通过选择探测距离长、火灾报警响应时间短的火焰探测器，提高保护面积要求和报警时间要求。

2 探测器的探测视角内不应存在遮挡物。

3 应避免光源直接照射在探测器的探测窗口。

4 单波段的火焰探测器不应设置在平时有阳光、白炽灯等光源直接或间接照射的场所。

6.2.15 线型光束感烟火灾探测器的设置应符合下列规定：

1 探测器的光束轴线至顶棚的垂直距离宜为0.3m~1.0m，距地高度不宜超过20m。

2 相邻两组探测器的水平距离不应大于14m，探测器至侧墙水平距离不应大于7m，且不应小于0.5m，探测器的发射器和接收器之间的距离不宜超过100m。

3 探测器应设置在固定结构上。

4 探测器的设置应保证其接收端避开日光和人工光源直接照射。

5 选择反射式探测器时,应保证在反射板与探测器间任何部位进行模拟试验时,探测器均能正确响应。

6.2.16 线型感温火灾探测器的设置应符合下列规定:

1 探测器在保护电缆、堆垛等类似保护对象时,应采用接触式布置;在各种皮带输送装置上设置时,宜设置在装置的过热点附近。

2 设置在顶棚下方的线型感温火灾探测器,至顶棚的距离宜为0.1m。探测器的保护半径应符合点型感温火灾探测器的保护半径要求;探测器至墙壁的距离宜为1m~1.5m。

3 光栅光纤感温火灾探测器每个光栅的保护面积和保护半径,应符合点型感温火灾探测器的保护面积和保护半径要求。

6.2.17 管路采样式吸气感烟火灾探测器的设置,应符合下列规定。

1 非高灵敏型探测器的采样管网安装高度不应超过16m;高灵敏型探测器的采样管网安装高度可超过16m。

2 探测器的每个采样孔的保护面积、保护半径,应符合点型感烟火灾探测器的保护面积、保护半径的要求。

3 一个探测单元的采样管总长不宜超过200m,单管长度不宜超过100m,同一根采样管不应穿越防火分区。采样孔总数不宜超过100个,单管上的采样孔数量不宜超过25个。

4 当采样管道采用毛细管布置方式时,毛细管长度不宜超过4m。

6.3 手动火灾报警按钮的设置

6.3.1 每个防火分区应至少设置一只手动火灾报警按钮。从一个防火分区内的任何位置到最邻近的手动火灾报警按钮的步行距离不应大于30m。手动火灾报警按钮宜设置在疏散通道或出入口处。

6.3.2 手动火灾报警按钮应设置在明显和便于操作的部位。当采用壁挂方式安装时,其底边距地高度宜为1.3m~1.5m,且应有明显的标志。

6.4 区域显示器的设置

6.4.1 每个报警区域宜设置一台区域显示器(火灾显示盘);宾馆、饭店等场所应在每个报警区域设置一台区域显示器。当一个报警区域包括多个楼层时,宜在每个楼层设置一台仅显示本楼层的区域显示器。

6.4.2 区域显示器应设置在出入口等明显和便于操作的部位。当采用壁挂方式安装时,其底边距地高度宜为1.3m~1.5m。

6.5 火灾警报器的设置

6.5.1 火灾光警报器应设置在每个楼层的楼梯口、消防电梯前室、建筑内部拐角等处的明显部位,且不宜与安全出口指示标志灯具设置在同一面墙上。

6.5.2 每个报警区域内应均匀设置火灾警报器,其声压级不应小于60dB;在环境噪声大于60dB的场所,其声压级应高于背景噪声15dB。

6.5.3 当火灾警报器采用壁挂方式安装时,其底边距地面高度应大于2.2m。

6.6 消防应急广播的设置

6.6.1 消防应急广播扬声器的设置,应符合下列规定:

1 民用建筑内扬声器应设置在走道和大厅等公共场所。每个扬声器的额定功率不应小于3W，其数量应能保证从一个防火分区内的任何部位到最近一个扬声器的直线距离不大于25m，走道末端距最近的扬声器距离不应大于12.5m。

2 在环境噪声大于60dB的场所设置的扬声器，在其播放范围内最远点的播放声压级应高于背景噪声15dB。

3 客房设置专用扬声器时，其功率不宜小于1W。

6.6.2 壁挂扬声器的底边距地面高度应大于2.2m。

6.7 消防专用电话的设置

6.7.1 消防专用电话网络应为独立的消防通信系统。

6.7.2 消防控制室应设置消防专用电话总机。

6.7.3 多线制消防专用电话系统中的每个电话分机应与总机单独连接。

6.7.4 电话分机或电话插孔的设置，应符合下列规定：

1 消防水泵房、发电机房、配变电室、计算机网络机房、主要通风和空调机房、防排烟机房、灭火控制系统操作装置处或控制室、企业消防站、消防值班室、总调度室、消防电梯机房及其他与消防联动控制有关的且经常有人值班的机房应设置消防专用电话分机。

2 设有手动火灾报警按钮或消火栓按钮等处，宜设置电话插孔，并宜选择带有电话插孔的手动火灾报警按钮。

3 各避难层应每隔20m设置一个消防专用电话分机或电话插孔。

4 电话插孔在墙上安装时，其底边距地面高度宜为1.3m~1.5m。

6.7.5 消防控制室、消防值班室或企业消防站等处，应设置可直接报警的外线电话。

6.8 模块的设置

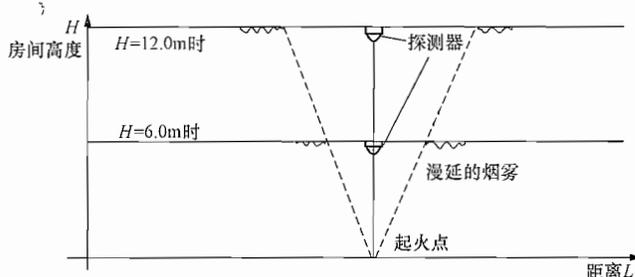
6.8.1 每个报警区域内的模块宜相对集中设置在本报警区域内的金属模块箱中。

6.8.2 模块严禁设置在配电（控制）柜（箱）内。

6.8.3 本报警区域内的模块不应控制其他报警区域的设备。

### 15.1.6.2 探测器保护面积、保护半径、安装间距，修正系数等问题的解析。

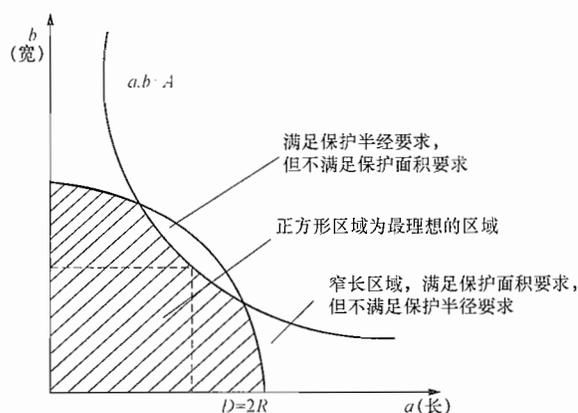
(1) 探测器保护面积、保护半径与房间高度关系示意图，如图15-1-8所示。



注：地面某点起火后，烟雾、温度呈倒锥形向上漫延，碰到房顶后向四周漫延。烟雾、温度垂直漫延的速度比水平漫延快，故在同样的报警时间内，较高房间的保护面积和保护半径比较低房间要大些。

图15-1-8 探测器保护面积、保护半径与房间高度关系示意图

(2) 探测器安装间距极限示意图, 如图 15-1-9 所示。



注: 探测器安装间距需同时满足保护面积  $A$  和保护半径  $R$  的要求, 需满足以下不等式方程: 
$$\begin{cases} a \cdot b \leq A \\ D \leq 2R \end{cases}$$

其结果为阴影区域。

图 15-1-9 探测器安装间距极限示意图

(3) 探测器修正系数对照表, 见表 15-1-2。

表 15-1-2

探测器修正系数对照表

修正系数	GB 50116—2013 中对应的场所	GB 50116—1998 中对应的保护对象等级
0.7~0.8	>10000 人的公共场所	特级保护对象
0.8~0.9	2000~10000 人的公共场所	一级保护对象
0.9~1.0	500~2000 人的公共场所	二级保护对象
1.0	其他场所	其他

### 15.1.7 消防联动控制设计

#### 15.1.7.1 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中的规定:

##### 4.1 一般规定

4.1.1 消防联动控制器应能按设定的控制逻辑向各相关的受控设备发出联动控制信号, 并接受相关设备的联动反馈信号。

4.1.2 消防联动控制器的电压控制输出应采用直流 24V, 其电源容量应满足受控消防设备同时启动且维持工作的控制容量要求。

4.1.3 各受控设备接口的特性参数应与消防联动控制器发出的联动控制信号相匹配。

4.1.4 消防水泵、防烟和排烟风机的控制设备, 除应采用联动控制方式外, 还应在消防控制室设置手动直接控制装置。

4.1.5 启动电流较大的消防设备宜分时启动。

4.1.6 需要火灾自动报警系统联动控制的消防设备, 其联动触发信号应采用两个独立

的报警触发装置报警信号的“与”逻辑组合。

#### 4.2 自动喷水灭火系统的联动控制设计

4.2.1 湿式系统和干式系统的联动控制设计，应符合下列规定：

1 联动控制方式，应由湿式报警阀压力开关的动作信号作为触发信号，直接控制启动喷淋消防泵，联动控制不应受消防联动控制器处于自动或手动状态影响。

2 手动控制方式，应将喷淋消防泵控制箱（柜）的启动、停止按钮用专用线路直接连接至设置在消防控制室内的消防联动控制器的手动控制盘，直接手动控制喷淋消防泵的启动、停止。

3 水流指示器、信号阀、压力开关、喷淋消防泵的启动和停止的动作信号应反馈至消防联动控制器。

4.2.2 预作用系统的联动控制设计，应符合下列规定：

1 联动控制方式，应由同一报警区域内两只及以上独立的感烟火灾探测器或一只感烟火灾探测器与一只手动火灾报警按钮的报警信号，作为预作用阀组开启的联动触发信号。由消防联动控制器控制预作用阀组的开启，使系统转变为湿式系统；当系统设有快速排气装置时，应联动控制排气阀前的电动阀的开启。湿式系统的联动控制设计应符合本规范第4.2.1条的规定。

2 手动控制方式，应将喷淋消防泵控制箱（柜）的启动和停止按钮、预作用阀组和快速排气阀入口前的电动阀的启动和停止按钮，用专用线路直接连接至设置在消防控制室内的消防联动控制器的手动控制盘，直接手动控制喷淋消防泵的启动、停止及预作用阀组和电动阀的开启。

3 水流指示器、信号阀、压力开关、喷淋消防泵的启动和停止的动作信号，有压气体管道气压状态信号和快速排气阀入口前电动阀的动作信号应反馈至消防联动控制器。

4.2.3 雨淋系统的联动控制设计，应符合下列规定：

1 联动控制方式，应由同一报警区域内两只及以上独立的感温火灾探测器或一只感温火灾探测器与一只手动火灾报警按钮的报警信号，作为雨淋阀组开启的联动触发信号。应由消防联动控制器控制雨淋阀组的开启。

2 手动控制方式，应将雨淋消防泵控制箱（柜）的启动和停止按钮、雨淋阀组的启动和停止按钮，用专用线路直接连接至设置在消防控制室内的消防联动控制器的手动控制盘，直接手动控制雨淋消防泵的启动、停止及雨淋阀组的开启。

3 水流指示器、压力开关、雨淋阀组、雨淋消防泵的启动和停止的动作信号应反馈至消防联动控制器。

#### 4.3 消火栓系统的联动控制设计

4.3.1 联动控制方式，应由消火栓系统出水干管上设置的低压压力开关、高位消防水箱出水管上设置的流量开关或报警阀压力开关等信号作为触发信号，直接控制启动消火栓泵，联动控制不应受消防联动控制器处于自动或手动状态影响。当设置消火栓按钮时，消火栓按钮的动作信号应作为报警信号及启动消火栓泵的联动触发信号，由消防联

动控制器联动控制消防栓泵的启动。

4.3.2 手动控制方式,应将消防栓泵控制箱(柜)的启动、停止按钮用专用线路直接连接至设置在消防控制室内的消防联动控制器的手动控制盘,并应直接手动控制消防栓泵的启动、停止。

4.3.3 消防栓泵的动作信号应反馈至消防联动控制器。

4.4 气体灭火系统、泡沫灭火系统的联动控制设计

4.4.1 气体灭火系统、泡沫灭火系统应分别由专用的气体灭火控制器、泡沫灭火控制器控制。

4.4.2 气体灭火控制器、泡沫灭火控制器直接连接火灾探测器时,气体灭火系统、泡沫灭火系统的自动控制方式应符合下列规定:

1 应由同一防护区域内两只独立的火灾探测器的报警信号、一只火灾探测器与一只手动火灾报警按钮的报警信号或防护区外的紧急启动信号,作为系统的联动触发信号,探测器的组合宜采用感烟火灾探测器和感温火灾探测器,各类探测器应按本规范第6.2节的规定分别计算保护面积。

2 气体灭火控制器、泡沫灭火控制器在接收到满足联动逻辑关系的首个联动触发信号后,应启动设置在防护区内的火灾声光报警器,且联动触发信号应为任一防护区域内设置的感烟火灾探测器、其他类型火灾探测器或手动火灾报警按钮的首次报警信号;在接收到第二个联动触发信号后,应发出联动控制信号,且联动触发信号应为同一防护区域内与首次报警的火灾探测器或手动火灾报警按钮相邻的感温火灾探测器、火焰探测器或手动火灾报警按钮的报警信号。

3 联动控制信号应包括下列内容:

- 1) 关闭防护区域的送(排)风机及送(排)风阀门;
- 2) 停止通风和空气调节系统及关闭设置在该防护区域的电动防火阀;
- 3) 联动控制防护区域开口封闭装置的启动,包括关闭防护区域的门、窗;
- 4) 启动气体灭火装置、泡沫灭火装置,气体灭火控制器、泡沫灭火控制器,可设定不大于30s的延迟喷射时间。

5 气体灭火防护区出口外上方应设置表示气体喷洒的火灾声光报警器,指示气体释放的声信号应与该保护对象中设置的火灾声报警器的声信号有明显区别。启动气体灭火装置、泡沫灭火装置的同时,应启动设置在防护区入口处表示气体喷洒的火灾声光报警器;组合分配系统应首先开启相应防护区域的选择阀,然后启动气体灭火装置、泡沫灭火装置。

4.4.3 气体灭火控制器、泡沫灭火控制器不直接连接火灾探测器时,气体灭火系统、泡沫灭火系统的自动控制方式应符合下列规定:

1 气体灭火系统、泡沫灭火系统的联动触发信号应由火灾报警控制器或消防联动控制器发出。

2 气体灭火系统、泡沫灭火系统的联动触发信号和联动控制均应符合本规范第4.4.2条的规定。

4.4.4 气体灭火系统、泡沫灭火系统的手动控制方式应符合下列规定:

1 在防护区疏散出口的门外应设置气体灭火装置、泡沫灭火装置的手动启动和停止按钮，手动启动按钮按下时，气体灭火控制器、泡沫灭火控制器应执行符合本规范第4.4.2条第3款和第5款规定的联动操作；手动停止按钮按下时，气体灭火控制器、泡沫灭火控制器应停止正在执行的联动操作。

4.4.5 气体灭火装置、泡沫灭火装置启动及喷放各阶段的联动控制及系统的反馈信号，应反馈至消防联动控制器。系统的联动反馈信号应包括下列内容：

- 1 气体灭火控制器、泡沫灭火控制器直接连接的火灾探测器的报警信号。
- 2 选择阀的动作信号。
- 3 压力开关的动作信号。

4.4.6 在防护区域内设有手动与自动控制转换装置的系统，其手动或自动控制方式的工作状态应在防护区内、外的手动和自动控制状态显示装置上显示，该状态信号应反馈至消防联动控制器。

#### 4.5 防烟、排烟系统的联动控制设计

4.5.1 防烟系统的联动控制方式应符合下列规定：

1 应由加压送风口所在防火分区内的两只独立的火灾探测器或一只火灾探测器与一只手动火灾报警按钮的报警信号，作为送风口开启和加压送风机启动的联动触发信号，并应由消防联动控制器联动控制相关层前室等需要加压送风场所的加压送风口开启和加压送风机启动。

2 应由同一防烟分区内且位于电动挡烟垂壁附近的两只独立的感烟火灾探测器的报警信号，作为电动挡烟垂壁降落的联动触发信号，并应由消防联动控制器联动控制电动挡烟垂壁的降落。

4.5.2 排烟系统的联动控制方式应符合下列规定：

1 应由同一防烟分区内的两只独立的火灾探测器的报警信号，作为排烟口、排烟窗或排烟阀开启的联动触发信号，并应由消防联动控制器联动控制排烟口、排烟窗或排烟阀的开启，同时停止该防烟分区的空气调节系统。

2 应由排烟口、排烟窗或排烟阀开启的动作信号，作为排烟风机启动的联动触发信号，并应由消防联动控制器联动控制排烟风机的启动。

4.5.3 防烟系统、排烟系统的手动控制方式，应能在消防控制室内的消防联动控制器上手动控制送风口、电动挡烟垂壁、排烟口、排烟窗、排烟阀的开启或关闭及防烟风机、排烟风机等设备的启动或停止，防烟、排烟风机的启动、停止按钮应采用专用线路直接连接至设置在消防控制室内的消防联动控制器的手动控制盘，并应直接手动控制防烟、排烟风机的启动、停止。

4.5.4 送风口、排烟口、排烟窗或排烟阀开启和关闭的动作信号，防烟、排烟风机启动和停止及电动防火阀关闭的动作信号，均应反馈至消防联动控制器。

4.5.5 排烟风机入口处的总管上设置的280℃排烟防火阀在关闭后应直接联动控制风机停止，排烟防火阀及风机的动作信号应反馈至消防联动控制器。

#### 4.6 防火门及防火卷帘系统的联动控制设计

4.6.1 防火门系统的联动控制设计，应符合下列规定：

1 应由常开防火门所在防火分区内的两只独立的火灾探测器或一只火灾探测器与一只手动火灾报警按钮的报警信号,作为常开防火门关闭的联动触发信号,联动触发信号应由火灾报警控制器或消防联动控制器发出,并应由消防联动控制器或防火门监控器联动控制防火门关闭。

2 疏散通道上各防火门的开启、关闭及故障状态信号应反馈至防火门监控器。

4.6.2 防火卷帘的升降应由防火卷帘控制器控制。

4.6.3 疏散通道上设置的防火卷帘的联动控制设计,应符合下列规定:

1 联动控制方式,防火分区内任两只独立的感烟火灾探测器或任一只专门用于联动防火卷帘的感烟火灾探测器的报警信号应联动控制防火卷帘下降至距楼板面 1.8m 处;任一只专门用于联动防火卷帘的感温火灾探测器的报警信号应联动控制防火卷帘下降到楼板面;在卷帘的任一侧距卷帘纵深 0.5m~5m 内应设置不少于 2 只专门用于联动防火卷帘的感温火灾探测器。

2 手动控制方式,应由防火卷帘两侧设置的手动控制按钮控制防火卷帘的升降。

4.6.4 非疏散通道上设置的防火卷帘的联动控制设计,应符合下列规定:

1 联动控制方式,应由防火卷帘所在防火分区内任两只独立的火灾探测器的报警信号,作为防火卷帘下降的联动触发信号,并应联动控制防火卷帘直接下降到楼板面。

2 手动控制方式,应由防火卷帘两侧设置的手动控制按钮控制防火卷帘的升降,并应能在消防控制室內的消防联动控制器上手动控制防火卷帘的降落。

4.6.5 防火卷帘下降至距楼板面 1.8m 处、下降到楼板面的动作信号和防火卷帘控制器直接连接的感烟、感温火灾探测器的报警信号,应反馈至消防联动控制器。

4.7 电梯的联动控制设计

4.7.1 消防联动控制器应具有发出联动控制信号强制所有电梯停于首层或电梯转换层的功能。

4.7.2 电梯运行状态信息和停于首层或转换层的反馈信号,应传送给消防控制室显示,轿厢内应设置能直接与消防控制室通话的专用电话。

4.8 火灾警报和消防应急广播系统的联动控制设计

4.8.1 火灾自动报警系统应设置火灾声光警报器,并应在确认火灾后启动建筑内的所有火灾声光警报器。

4.8.3 公共场所宜设置具有同一种火灾变调声的火灾声警报器;具有多个报警区域的保护对象,宜选用带有语音提示的火灾声警报器;学校、工厂等各类日常使用电铃的场所,不应使用警铃作为火灾声警报器。

4.8.4 火灾声警报器设置带有语音提示功能时,应同时设置语音同步器。

4.8.5 同一建筑内设置多个火灾声警报器时,火灾自动报警系统应能同时启动和停止所有火灾声警报器工作。

4.8.6 火灾声警报器单次发出火灾警报时间宜为 8s~20s,同时设有消防应急广播时,火灾声警报应与消防应急广播交替循环播放。

4.8.7 集中报警系统和控制中心报警系统应设置消防应急广播。

4.8.8 消防应急广播系统的联动控制信号应由消防联动控制器发出。当确认火灾后，应同时向全楼进行广播。

4.8.10 在消防控制室应能手动或按预设控制逻辑联动控制选择广播分区、启动或停止应急广播系统，并应能监听消防应急广播。在通过传声器进行应急广播时，应自动对广播内容进行录音。

4.8.11 消防控制室内应能显示消防应急广播的广播分区的工作状态。

4.8.12 消防应急广播与普通广播或背景音乐广播合用时，应具有强制切入消防应急广播的功能。

4.9 消防应急照明和疏散指示系统的联动控制设计

4.9.2 当确认火灾后，由发生火灾的报警区域开始，顺序启动全楼疏散通道的消防应急照明和疏散指示系统，系统全部投入应急状态的启动时间不应大于5s。

4.10 相关联动控制设计

4.10.1 消防联动控制器应具有切断火灾区域及相关区域的非消防电源的功能，当需要切断正常照明时，宜在自动喷淋系统、消火栓系统动作前切断。

4.10.2 消防联动控制器应具有自动打开涉及疏散的电动栅栏等的功能，宜开启相关区域安全技术防范系统的摄像机监视火灾现场。

4.10.3 消防联动控制器应具有打开疏散通道上由门禁系统控制的门和庭院电动大门的功能，并应具有打开停车场出入口挡杆的功能。

#### 15.1.7.2 其他消防联动控制要求：

(1) GB 50974—2014《消防给水及消火栓系统技术规范》中的规定：

4.3.9 消防水池的出水、排水和水位应符合下列规定：

2 消防水池应设置就地水位显示装置，并应在消防控制中心或值班室等地点设置显示消防水池水位的装置，同时应有最高和最低报警水位。

11.0.1 消防水泵控制柜应设置在消防水泵房或专用消防水泵控制室内，并应符合下列要求：

1 消防水泵控制柜在平时应使消防水泵处于自动启泵状态；

11.0.2 消防水泵不应设置自动停泵的控制功能，停泵应由具有管理权限的工作人员根据火灾扑救情况确定。

(2) 对空调、通风系统风管中防火阀的监控功能：

1) 某区域内两个感烟探测器（或任意两个报警装置）报警后，火灾自动报警系统应能联锁关闭有关风管上的带电气控制功能的防火阀、接收其反馈信号，并联锁关闭有关空调机、通风机，防止火灾蔓延。同时应联锁启动声光报警装置等。

2) 火灾自动报警系统应能接收各防火阀受温度控制而动作的反馈信号，并联锁关闭有关空调机、通风机，联锁启动声光报警装置等。

#### 15.1.7.3 消防联控制关系示意图

(1) 湿式自动喷水灭火系统联动控制图示，如图 15-1-10 所示。

(2) 消火栓系统联动控制图示，如图 15-1-11 所示。

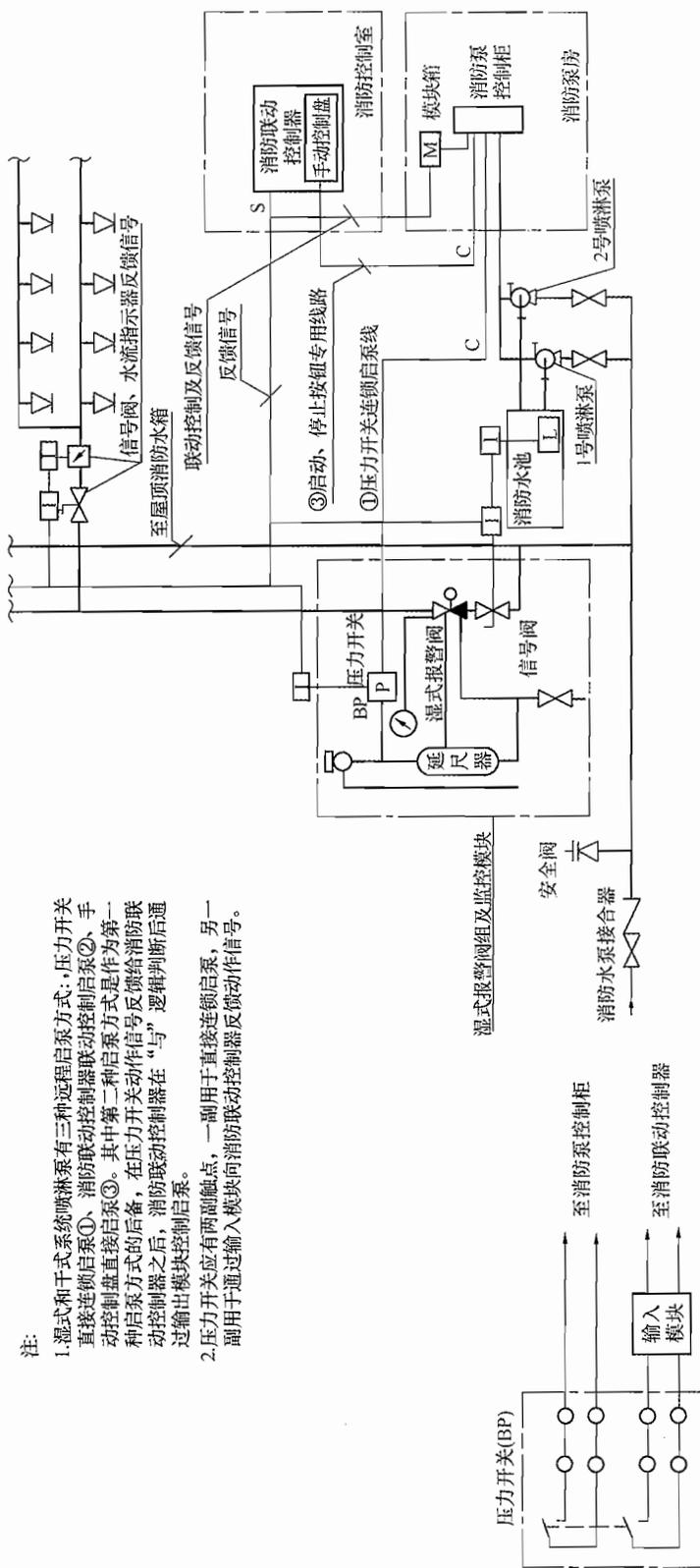
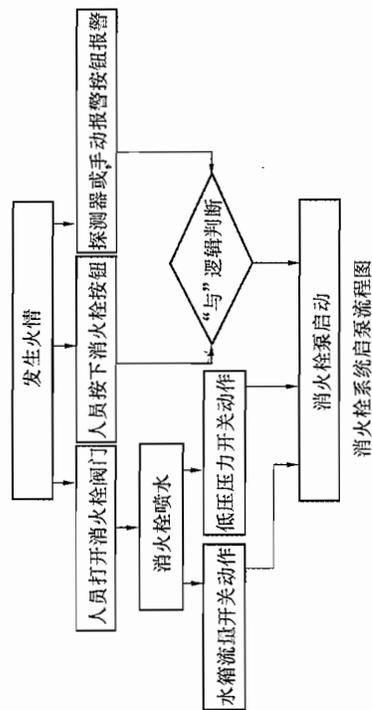
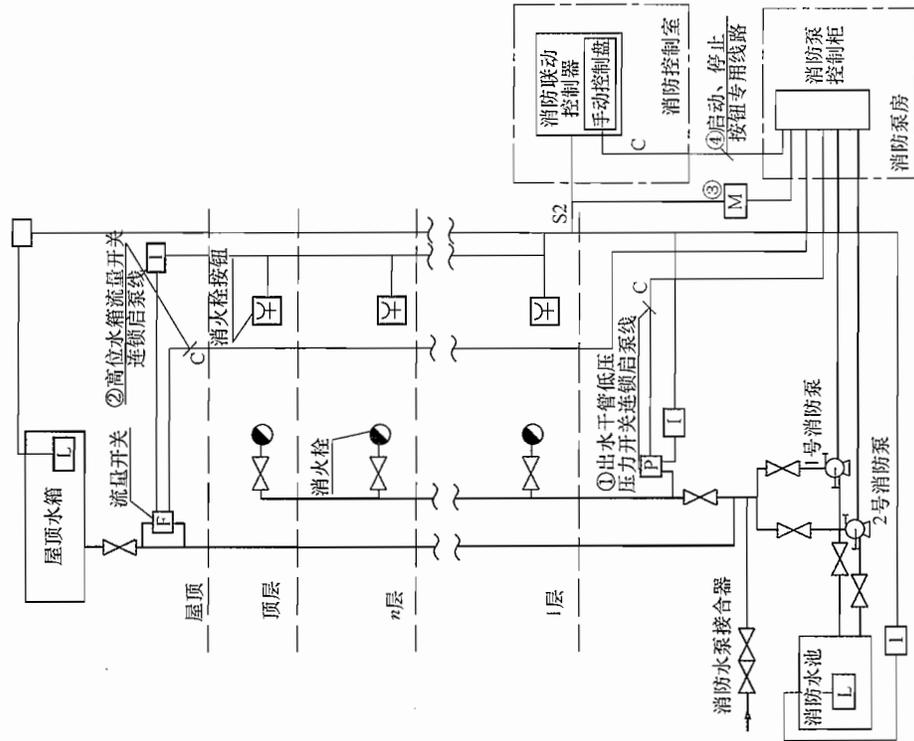


图 15-1-10 湿式自动喷水灭火系统联动控制图示

注:

1. 湿式和干式系统喷淋泵有三种远程启泵方式: ①压力开关直接连锁启泵①、消防联动控制器联动启泵②、手动控制盘直接启泵③。其中第二种启泵方式是作为第一种启泵方式的后备, 在压力开关动作信号反馈给消防联动控制器之后, 消防联动控制器在“与”逻辑判断后通过输出模块控制启泵。
2. 压力开关应有两副触点, 一副用于直接连锁启泵, 另一副用于通过输入模块向消防联动控制器反馈动作信号。

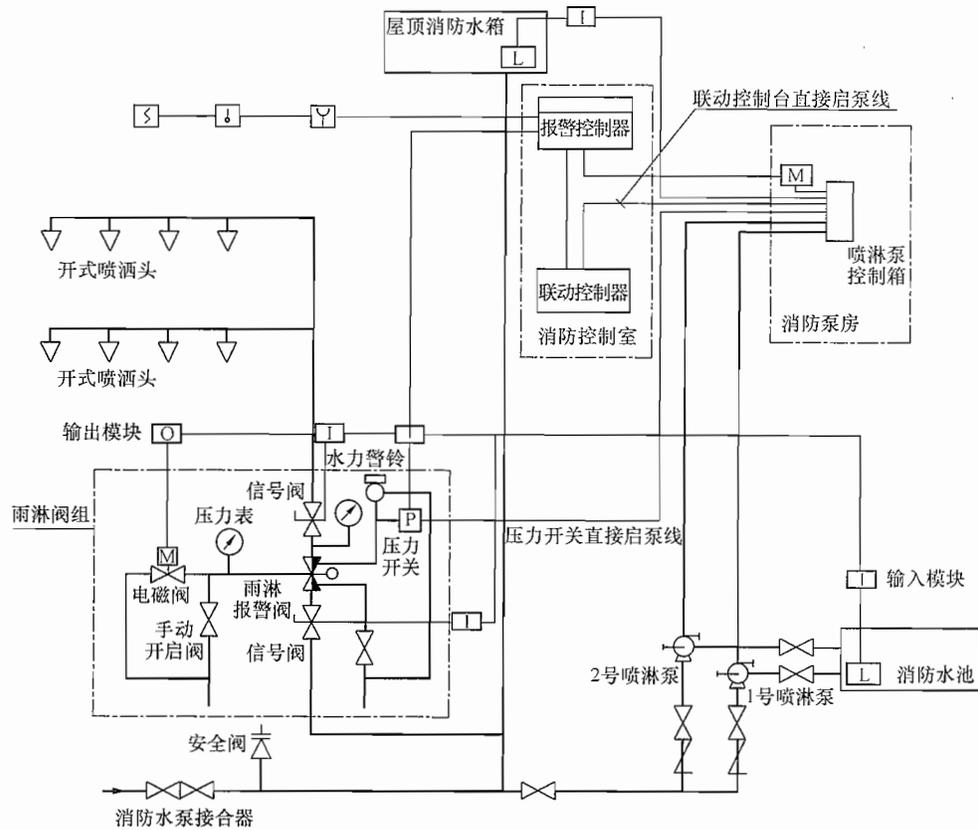
压力开关接线图



注：  
 1. 系统内出水管上的低压压力开关、高位消防水箱出水管上的流量开关、报警阀压力开关的设置由给水排水专业确定，本方案为湿式消防栓系统，未设置报警阀。  
 2. 设置的低压压力开关和流量开关应具有2副触点，一副用于直接连锁启泵，另一副通过输入模块接入总线。  
 3. 当建筑物内有火灾自动报警系统时，消防栓按钮应通过总线接至消防联动控制器。

图 15-1-11 消防栓系统联动控制图

(3) 雨淋自动灭火系统联动控制图示, 见图 15-1-10。



注:

1. 雨淋系统采用开式喷头, 雨淋阀动作后该区域所有喷头同时喷水灭火。
2. 水喷雾灭火系统、细水喷雾灭火系统、水幕系统控制关系与本图相同。

图 15-1-12 雨淋自动灭火系统联动控制图示

(4) 气体灭火系统联动控制图示, 如图 15-1-13 所示。

(5) 防排烟系统联动控制图示, 如图 15-1-14 所示。

### 15.1.8 住宅建筑火灾自动报警系统

#### 15.1.8.1 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中的规定:

##### 7.1 一般规定

7.1.1 住宅建筑火灾自动报警系统可根据实际应用过程中保护对象的具体情况按下列分类:

- 1 A类系统可由火灾报警控制器、手动火灾报警按钮、家用火灾探测器、火灾声警报器、应急广播等设备组成。
- 2 B类系统可由控制中心监控设备、家用火灾报警控制器、家用火灾探测器、火灾声警报器等设备组成。
- 3 C类系统可由家用火灾报警控制器、家用火灾探测器、火灾声警报器等设备组成。
- 4 D类系统可由独立式火灾探测报警器、火灾声警报器等设备组成。

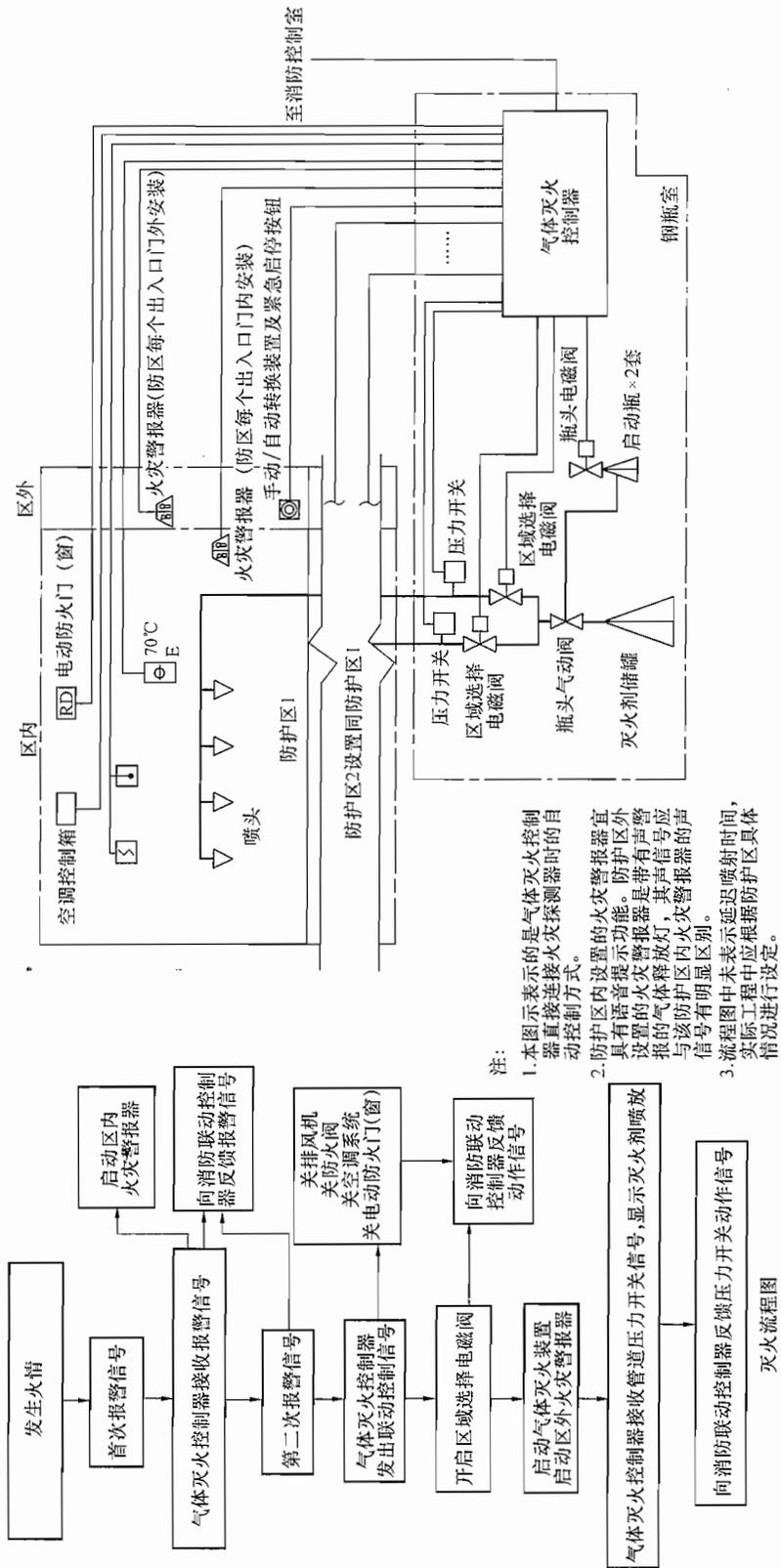
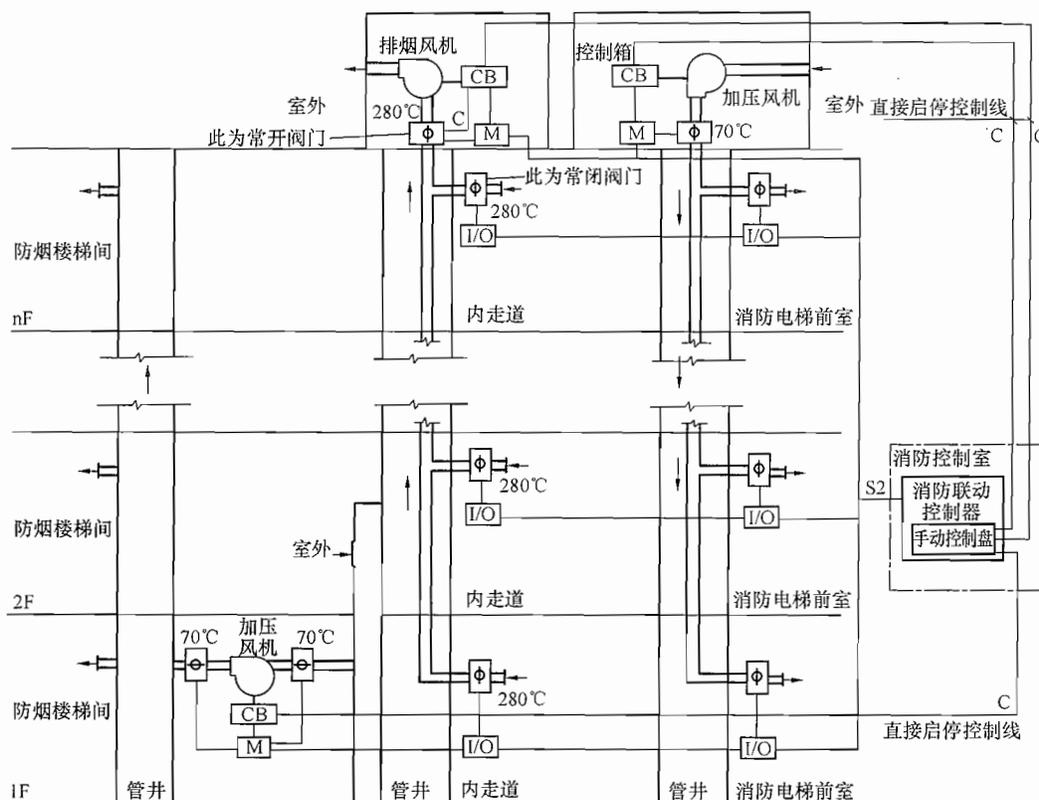


图 15-1-13 气体灭火系统联动控制图示



注:

1. 消防控制室手动控制送风口、电动挡烟垂壁、排烟口、排烟窗、排烟阀的开启或关闭由总线控制盘上的一键式操作按键通过总线实现。
2. 消防控制室手动控制防烟、排烟风机的启停由手动控制盘通过专用线路实现。

图 15-1-14 防排烟系统联动控制图示

### 7.1.2 住宅建筑火灾自动报警系统的选择应符合下列规定:

- 1 有物业集中监控管理且设有需联动控制的消防设施的住宅建筑应选用 A 类系统。
- 2 仅有物业集中监控管理的住宅建筑宜选用 A 类或 B 类系统。
- 3 没有物业集中监控管理的住宅建筑宜选用 C 类系统。
- 4 别墅式住宅和已投入使用的住宅建筑可选用 D 类系统。

### 7.2 系统设计

#### 7.2.1 A 类系统的设计应符合下列规定:

- 1 系统在公共部位的设计应符合本规范第 3~6 章的规定。
- 2 住户内设置的家用火灾探测器可接入家用火灾报警控制器,也可直接接入火灾报警控制器。
- 3 设置的家用火灾报警控制器应将火灾报警信息、故障信息等相关信息传输给相连接的火灾报警控制器。
- 4 建筑公共部位设置的火灾探测器应直接接入火灾报警控制器。

#### 7.2.2 B 类和 C 类系统的设计应符合下列规定:

- 1 住户内设置的家用火灾探测器应接入家用火灾报警控制器。
- 2 家用火灾报警控制器应能启动设置在公共部位的火灾声警报器。
- 3 B类系统中，设置在每户住宅内的家用火灾报警控制器应连接到控制中心监控设备，控制中心监控设备应能显示发生火灾的住户。

#### 7.3 火灾探测器的设置

7.3.1 每间卧室、起居室内应至少设置一只感烟火灾探测器。

7.3.2 可燃气体探测器在厨房设置时，应符合下列规定：

- 1 使用天然气的用户应选择甲烷探测器，使用液化气的用户应选择丙烷探测器，使用煤制气的用户应选择一氧化碳探测器。

- 3 甲烷探测器应设置在厨房顶部，丙烷探测器应设置在厨房下部，一氧化碳探测器可设置在厨房下部，也可设置在其他部位。

- 5 宜采用具有联动关断燃气关断阀功能的可燃气体探测器。

- 6 探测器联动的燃气关断阀宜为用户可以自己复位的关断阀，并应具有胶管脱落自动保护功能。

#### 7.4 家用火灾报警控制器的设置

7.4.1 家用火灾报警控制器应独立设置在每户内，且应设置在明显和便于操作的部位。当采用壁挂方式安装时，其底边距地高度宜为1.3m~1.5m。

7.4.2 具有可视对讲功能的家用火灾报警控制器宜设置在进户门附近。

#### 7.5 火灾声警报器的设置

7.5.1 住宅建筑公共部位设置的火灾声警报器应具有语音功能，且应能接受联动控制或由手动火灾报警按钮信号直接控制发出警报。

7.5.2 每台警报器覆盖的楼层不应超过3层，且首层明显部位应设置用于直接启动火灾声警报器的手动火灾报警按钮。

#### 7.6 应急广播的设置

7.6.1 住宅建筑内设置的应急广播应能接受联动控制或由手动火灾报警按钮信号直接控制进行广播。

7.6.2 每台扬声器覆盖的楼层不应超过3层。

7.6.3 广播功率放大器应具有消防电话插孔，消防电话插入后应能直接讲话。

7.6.4 广播功率放大器应配有备用电池，电池持续工作不能达到1h时，应能向消防控制室或物业值班室发送报警信息。

7.6.5 广播功率放大器应设置在首层内走道侧面墙上，箱体面板应有防止非专业人员打开的措施。

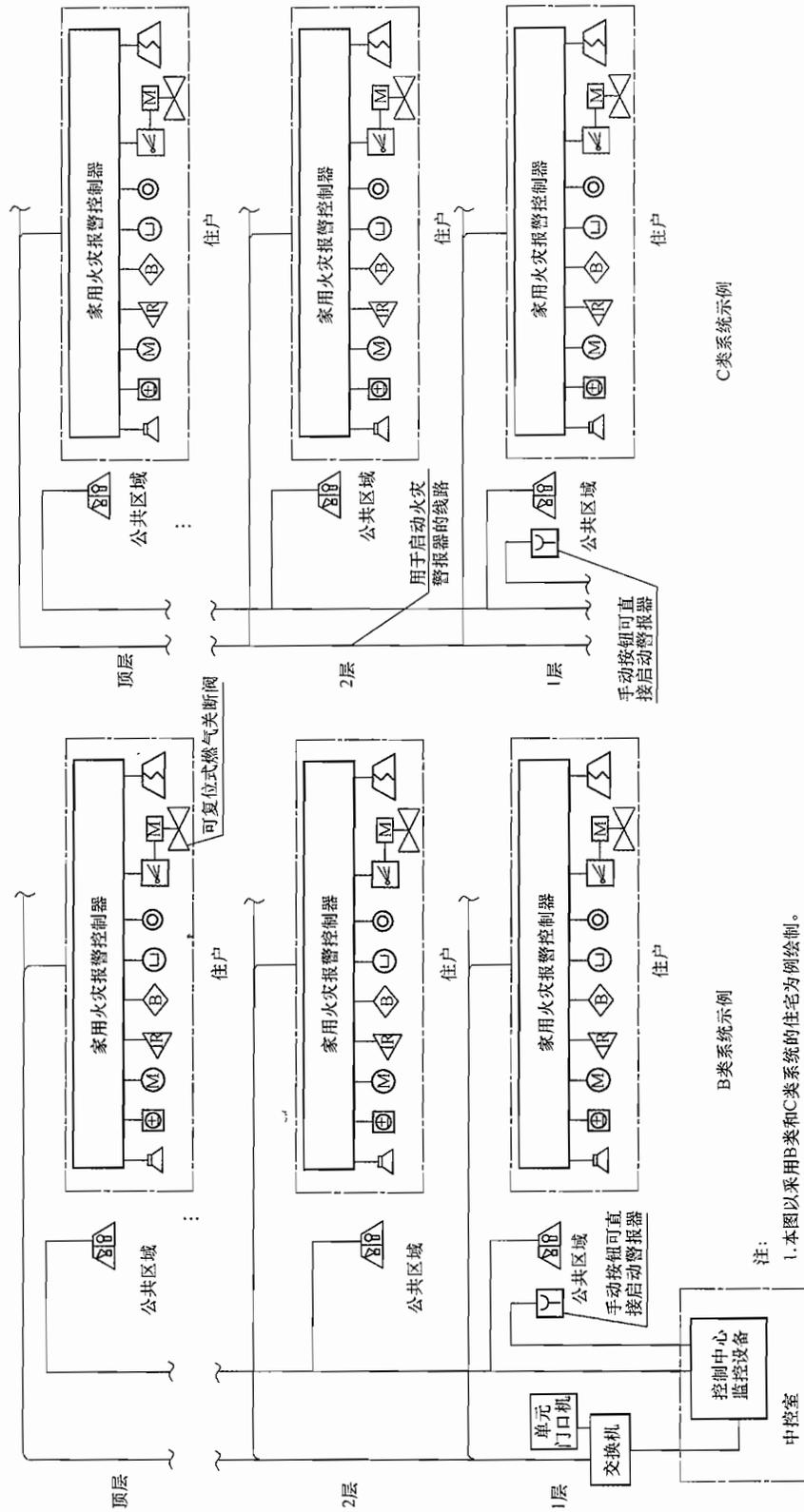
### 15.1.8.2 住宅建筑火灾自动报警系统示例，如图15-1-15所示。

### 15.1.9 可燃气体探测报警系统

GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中的规定：

8.1.1 可燃气体探测报警系统应由可燃气体报警控制器、可燃气体探测器和火灾声光警报器等组成。

8.1.2 可燃气体探测报警系统应独立组成，可燃气体探测器不应接入火灾报警控制器



注：  
 1. 本图以采用B类和C类系统的住宅为例绘制。  
 2. B类、C类系统中，可燃气体探测器可接入家用火灾报警控制器。  
 3. B类系统中家用火灾报警控制器通过超5类网线与中控室的控制中心监控设备进行信息及其他信息的交互，家用火灾报警控制器或手动火灾报警按钮报警后由控制中心监控设备启动公共区域的火灾报警。C类系统中公共区域的火灾报警由家用火灾报警控制器或手动报警按钮直接启动。  
 4. 在实际工程中，设计人员应根据工程实际情况和生产厂家提供的产品说明进行系统设计。

- 图形符号：
- ☐ — 空调温控器
  - Ⓜ — 电动窗帘控制器
  - ◁ — 被动红外入侵探测器
  - ◇ — 玻璃破碎探测器
  - ◎ — 按钮

图 15-1-15 住宅建筑火灾自动报警系统示例

的探测器回路；当可燃气体的报警信号需接入火灾自动报警系统时，应由可燃气体报警控制器接入。

8.1.7 可燃气体探测报警系统设置在有防爆要求的场所时，尚应符合有关防爆要求。

8.2.1 探测气体密度小于空气密度的可燃气体探测器应设置在被保护空间的顶部，探测气体密度大于空气密度的可燃气体探测器应设置在被保护空间的下部，探测气体密度与空气密度相当时，可燃气体探测器可设置在被保护空间的中间部位或顶部。

#### 15.1.10 电气火灾监控系统

GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中的规定：

9.1.1 电气火灾监控系统可用于具有电气火灾危险的场所。

9.1.2 电气火灾监控系统应由下列部分或全部设备组成：

- 1 电气火灾监控器。
- 2 剩余电流式电气火灾监控探测器。
- 3 测温式电气火灾监控探测器。

9.1.3 电气火灾监控系统应根据建筑物的性质及电气火灾危险性设置，并应根据电气线路敷设和用电设备的具体情况，确定电气火灾监控探测器的形式与安装位置。在无消防控制室且电气火灾监控探测器设置数量不超过8只时，可采用独立式电气火灾监控探测器。

9.1.4 非独立式电气火灾监控探测器不应接入火灾报警控制器的探测器回路。

9.1.6 电气火灾监控系统的设置不应影响供电系统的正常工作，不宜自动切断供电电源。

9.1.7 当线型感温火灾探测器用于电气火灾监控时，可接入电气火灾监控器。

#### 15.1.11 系统供电

15.1.11.1 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中的规定：

10.1.1 火灾自动报警系统应设置交流电源和蓄电池备用电源。

10.1.2 火灾自动报警系统的交流电源应采用消防电源，备用电源可采用火灾报警控制器和消防联动控制器自带的蓄电池电源或消防设备应急电源。当备用电源采用消防设备应急电源时，火灾报警控制器和消防联动控制器应采用单独的供电回路，并应保证在系统处于最大负载状态下不影响火灾报警控制器和消防联动控制器的正常工作。

10.1.3 消防控制室图形显示装置、消防通信设备等的电源，宜由UPS电源装置或消防设备应急电源供电。

10.1.4 火灾自动报警系统主电源不应设置剩余电流动作保护和过负荷保护装置。

10.1.5 消防设备应急电源输出功率应大于火灾自动报警及联动控制系统全负荷功率的120%，蓄电池组的容量应保证火灾自动报警及联动控制系统在火灾状态同时工作负荷条件下连续工作3h以上。

10.1.6 消防用电设备应采用专用的供电回路，其配电设备应设有明显标志。其配电线路和控制回路宜按防火分区划分。

10.2.1 火灾自动报警系统接地装置的接地电阻值应符合下列规定：

- 1 采用共用接地装置时，接地电阻值不应大于 $1\Omega$ 。

2 采用专用接地装置时,接地电阻值不应大于 $4\Omega$ 。

10.2.2 消防控制室内的电气和电子设备的金属外壳、机柜、机架和金属管、槽等,应采用等电位连接。

10.2.3 由消防控制室接地板引至各消防电子设备的专用接地线应选用铜芯绝缘导线,其线芯截面面积不应小于 $4\text{mm}^2$ 。

10.2.4 消防控制室接地板与建筑接地体之间,应采用线芯截面面积不小于 $25\text{mm}^2$ 的铜芯绝缘导线连接。

### 15.1.11.2 GB 50166—2007《火灾自动报警系统施工验收规范》中的规定:

3.3.4 控制器的主电源应有明显的永久性标志,并应直接与消防电源连接,严禁使用电源插头。

### 15.1.12 布线

GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中的规定:

11.1.1 火灾自动报警系统的传输线路和 $50\text{V}$ 以下供电的控制线路,应采用电压等级不低于交流 $300\text{V}/500\text{V}$ 的铜芯绝缘导线或铜芯电缆。采用交流 $220\text{V}/380\text{V}$ 的供电和控制线路,应采用电压等级不低于交流 $450\text{V}/750\text{V}$ 的铜芯绝缘导线或铜芯电缆。

11.1.2 火灾自动报警系统传输线路的线芯截面选择,除应满足自动报警装置技术条件的要求外,还应满足机械强度的要求。铜芯绝缘导线和铜芯电缆线芯的最小截面面积,不应小于表11.1.2的规定。

表 11.1.2 铜芯绝缘导线和铜芯电缆线芯的最小截面面积

序号	类 别	线芯的最小截面面积 ( $\text{mm}^2$ )
1	穿管敷设的绝缘导线	1.00
2	线槽内敷设的绝缘导线	0.75
3	多芯电缆	0.50

11.2.1 火灾自动报警系统的传输线路应采用金属管、可挠(金属)电气导管、 $B_1$ 级以上的刚性塑料管或封闭式线槽保护。

11.2.2 火灾自动报警系统的供电线路、消防联动控制线路应采用耐火铜芯电线电缆,报警总线、消防应急广播和消防专用电话等传输线路应采用阻燃或阻燃耐火电线电缆。

11.2.5 不同电压等级的线缆不应穿入同一根保护管内,当合用同一线槽时,线槽内应有隔板分隔。

11.2.6 采用穿管水平敷设时,除报警总线外,不同防火分区的线路不应穿入同一根管内。

## 15.2 建筑设备监控系统

### 15.2.1 设计中应遵循的规范和监控的主要内容

#### 15.2.1.1 设计中应遵循的规范及国家标准图:

- (1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》(第18章及24章);
- (2) JGJ/T 334—2014《建筑设备监控系统工程技术规范》;

## 15

- (3) GB 50314—2015《智能建筑设计标准》；
- (4) GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》（自控部分）；
- (5) 国家标准图 09X700《智能建筑弱电工程设计施工图集》；
- (6) 国家标准图 12DX603《住宅小区建筑电气设计与施工》。

### 15.2.1.2 监控的主要内容

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

18.1.1 本章适用于建筑物（群）所属建筑设备监控系统（BAS）的设计。BAS可对下列子系统进行设备运行和建筑节能的监测与控制：

- 1 冷冻水及冷却水系统；
- 2 热交换系统；
- 3 采暖通风及空气调节系统；
- 4 给水与排水系统；
- 5 供配电系统；
- 6 公共照明系统；
- 7 电梯和自动扶梯系统。

(2) GB 50314—2015《智能建筑设计标准》中的规定：

4.5.2 建筑设备管理系统宜包括建筑设备监控系统、建筑能效监管系统，以及需纳入管理的其他业务设施系统等。

4.5.3 建筑设备监控系统应符合下列规定：

- 1 监控的设备范围宜包括冷热源、供暖通风和空气调节、给水排水、供配电、照明、电梯等，并宜包括以自成控制体系方式纳入管理的专项设备监控系统等；
- 2 采集的信息宜包括温度、湿度、流量、压力、压差、液位、照度、气体浓度、电量、冷热量等建筑设备运行基础状态信息；
- 3 监控模式应与建筑设备的运行工艺相适应，并应满足对实时状况监控、管理方式及管理策略等进行优化的要求。

4.5.4 建筑能效监管系统应符合下列规定：

- 1 能耗监测的范围宜包括冷热源、供暖通风和空气调节、给水排水、供配电、照明、电梯等建筑设备，且计量数据应准确，并应符合国家现行有关标准的规定；
- 2 能耗计量的分项及类别宜包括电量、水量、燃气量、集中供热耗热量、集中供冷耗冷量等使用状态信息。

### 15.2.2 建筑设备监控系统的功能和构成

#### 15.2.2.1 建筑设备监控系统的功能

(1) 对建筑物内各类设备的监视、控制、测量，应做到运行安全、可靠、节省能源、节省人力。

(2) 近年来国内新建了不少大体量、超高层建筑，这些建筑物的内部有大量的电气设备、空调设备、卫生设备等。这些设备多而散：多，即数量多，需要控制、监视、测量的对象多，多达几百点到上千点；散，即这些设备分散在各个楼层和角落。如采用分散管理，就

地控制、监视和测量，工作量难以想象。为了合理利用设备，节约能源，确保设备的安全运行，自然地提出了如何加强设备管理的问题。

(3) 自动控制、监视、测量是建筑设备监控系统的三个基本方面。使用电子计算机管理系统后可以大量节省人力、物力和能源，并能及时掌握设备的运行状态、能量的变动情况。

(4) 建筑设备监控系统的网络结构模式应采用集散式或分布式控制的方式，由管理层网络与监控层网络组成，实现对设备运行状态的监视和控制。

(5) 建筑设备监控系统应实时采集，记录设备运行的有关数据，并进行分析处理。

(6) 建筑设备监控系统应满足管理的需要。

(7) 本节中列举了建筑设备监控系统的监视、控制和测量的常用功能，在实际工程设计中应根据工作项目建筑设备的实际情况，选择配置相关监控功能。

#### 15.2.2.2 建筑设备监控系统的构成

建筑设备监控系统，亦称楼宇自控系统（Building Automation Control system, BAS）、建筑设备管理系统（Building Management System, BMS）。建筑设备监控系统由监控主机、现场控制器、仪表和通信网络 4 个部分组成。

#### 15.2.2.3 监控主机的组成和功能

(1) 监控主机的硬件要求：

1) 监控主机一般采用与系统处理性能相适应的工业型或办公用微机，并带有能满足系统通信要求的网络接口。

2) 主机外围设备包括打印机、控制台等，打印机用于报表和图形打印。

(2) 监控主机的软件要求：

1) 监控主机软件包括系统软件、图形显示组态软件和应用软件，系统软件应采用通用、稳定、可靠的操作系统及数据库软件。

2) 图形显示组态软件应支持整个系统的硬件设备，具备中文界面，并易于组态编程操作。

3) 应用软件是针对具体项目由组态软件生成的，其功能应能满足整个系统的自动检测、控制和管理要求，且为用户留有后续维护管理的手段。

(3) 监控主机的功能要求。监控主机是设备监控系统的核心，其主要功能为：通过现场控制器，自动控制系统内的设备和参数在合理优化的状态下工作，自动监视系统中每台设备的运行状态和系统的运行参数，自动记录、存储和查询历史运行数据，对设备故障和异常参数及时报警和自动记录等。

#### 15.2.2.4 现场控制器的功能要求

(1) 现场控制器是安装于监控对象附近的小型专用计算机控制设备，其主要功能为：对现场仪表信号进行采集和数据转换，进行基本控制运算，输出控制信号至现场执行机构，与监控主机及其他现场控制器进行数据通信。

(2) 直接数字控制器（Direct Digital Controller, DDC）是安装在各种受控设备现场，对机电设备进行直接控制的现场控制器。DDC 应能全自动运行，采集处理监测点的数据，并有脱离监控主机，对相关机电设备实施监控的能力。

(3) 现场控制器的信号分为模拟量输入（Analog Input, AI）、模拟量输出（Analog Output, AO）、开关量输入（Digital Input, DI）、开关量输出（Digital Output, DO）4 种。

(4) 现场控制器的信号应与现场仪表的信号相匹配。

(5) 现场控制器的信号测量和数据转换精度，应满足系统的测量和控制要求。

(6) 输入、输出参数：模拟量输入采用 0V ~ 10VDC 和 4mA ~ 20mADC，模拟量输出采用 0V ~ 10VDC 和 4mA ~ 20mADC；数字量输出、输入一般采用无源接点，容量不小于 24VAC，3A 或 240VAC，1.5A。

(7) 可在现场显示并修改各设定参数值及控制参数值（可直接显示、操作，亦可通过现场外接手提电脑等设备显示与操作）。

(8) 有自诊断与现场诊断功能。

(9) 有标准通信接口，向中央控制机或分系统控制机传送数据，接收其下达的实时控制指令。

(10) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

18.4.3 控制网络层的控制器（分站）宜采用直接数字控制器（DDC）、可编程逻辑控制器（PLC）或兼有 DDC、PLC 特性的混合型控制器 HC（Hybrid Controller）。

18.4.4 在民用建筑中，除有特殊要求外，应选用 DDC 控制器。

18.4.5 控制器（分站）的技术要求，应符合下列规定：

16 每个控制器（分站）在管理网络层故障时应能继续独立工作。

18.4.6 每台控制器（分站）的监控点数（硬件点），应留有余量，不宜小于 10%。

18.4.7 控制网络层的配置应符合下列规定：

1 宜采用总线拓扑结构，也可采用环形、星形拓扑结构；用双绞线作为传输介质；

2 控制网络层可包括并行工作的多条通信总线，每条通信总线可通过网络通信接口与管理网络层（中央管理工作站）连接，也可通过管理网络层服务器的 RS232 通信接口或内置通信网卡直接与服务器连接；

3 当控制器（分站）采用以太网通信接口而与管理网络层处于同一通信级别时，可采用交换式集线器连接，与中央管理工作站进行通信；

4 控制器（分站）之间通信，应为对等式（peer to peer）直接数据通信；

5 控制器（分站）可与现场网络层的智能现场仪表和分布式智能输入、输出模块进行通信；

6 当控制器（分站）采用分布式智能输入、输出模块时，可以用软件配置的方法，把各个输入、输出点分配到不同的控制器（分站）中进行监控。

### 15.2.2.5 仪表

(1) 仪表的分类：

1) 仪表分为输入类检测仪表和输出类执行仪表两大类。

2) 检测仪表中分为处理模拟量信号（AI）的传感器类仪表和处理开关量（DI）的控制器类仪表。

3) 模拟量检测仪表包括温度、湿度、压力、压差、流量、液位、一氧化碳、二氧化碳含量、照度、电量等测量仪表。

4) 执行仪表包括电动调节阀、电动蝶阀、电磁阀、电动风门执行机构等。

5) 执行仪表中分为对被调量可进行连续调节（AO）的调节阀类仪表，和对被调量进行通断两种状态控制（DO）的控制阀类仪表。

(2) 仪表的主要功能:

1) 检测仪表的主要功能是将要检测的参数稳定、准确、可靠的转换成现场控制器可接受的电信号。

2) 执行仪表的主要功能是接受现场控制器的信号,对现场参数进行自动或远程调节、控制。

### 15.2.3 输入、输出类信号与数字量、模拟量信号的判定

**15.2.3.1** 建筑设备监控系统需要控制空调、制冷、热交换、通风、给排水、电气等各种建筑设备,熟悉和了解各系统的控制要求,并准确、熟练地判定各种信号的类别,是监控系统设计的基础。

**15.2.3.2** 输入、输出类信号的判定。输入类和输出类信号应从控制器的角度去判定:将采集到的信号传送给控制器的是输入类信号;根据控制器发出的指令去控制其他设备的是输出类信号。输入、输出类信号判定示意图如图 15-2-1 所示。

**15.2.3.3** 数字量信号与模拟量信号的判定。

(1) 只有开或关两档的信号属于数字量信号,如灯的开、关状态输入信号(DI),控制普通风机启、停的继电器触点输出信号(DO)。

(2) 随着时间的推移呈现规则或不规则多种状态的信号,属于模拟量信号,如温度、湿度、压力、流量、CO<sub>2</sub>含量等的模拟量输入信号(AI),控制调节阀开度、变频风机转速的模拟量输出信号(AO)等。模拟量信号示例如图 15-2-2 所示。

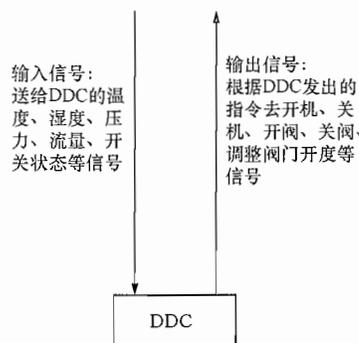


图 15-2-1 输入、输出类信号判定示意图

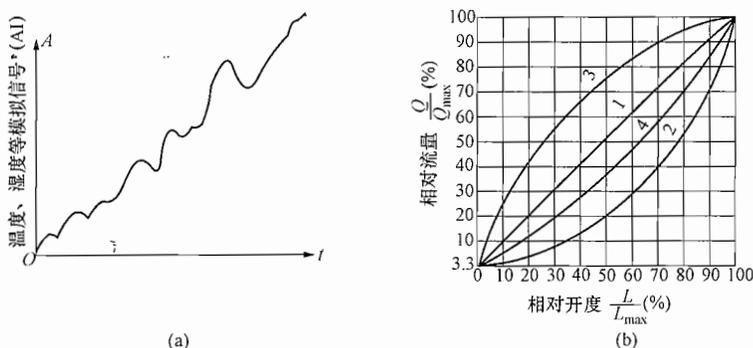


图 15-2-2 模拟量信号示例

(a) 温度、湿度等模拟量信号示例(AI点);(b) 调节阀模拟量流量调节特性示例(AO点)

1—直线;2—等百分比;3—快开;4—抛物线

### 15.2.4 建筑设备监控系统图

(1) 监控系统网络拓扑结构示例,如图 15-2-3 所示。

(2) 监控系统分布示意图,如图 15-2-4 所示。

(3) 监控系统图例,如图 15-2-5 所示。

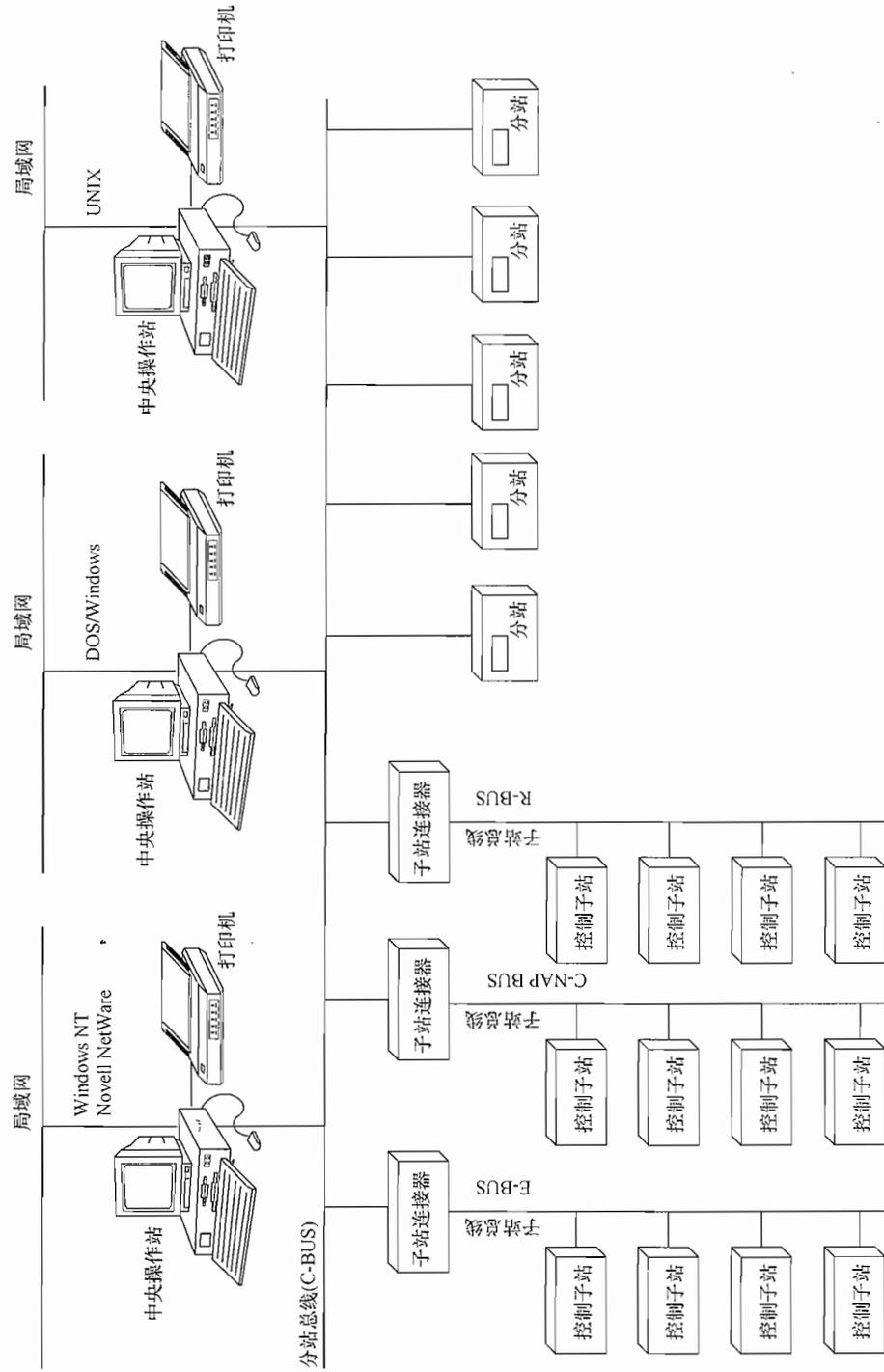
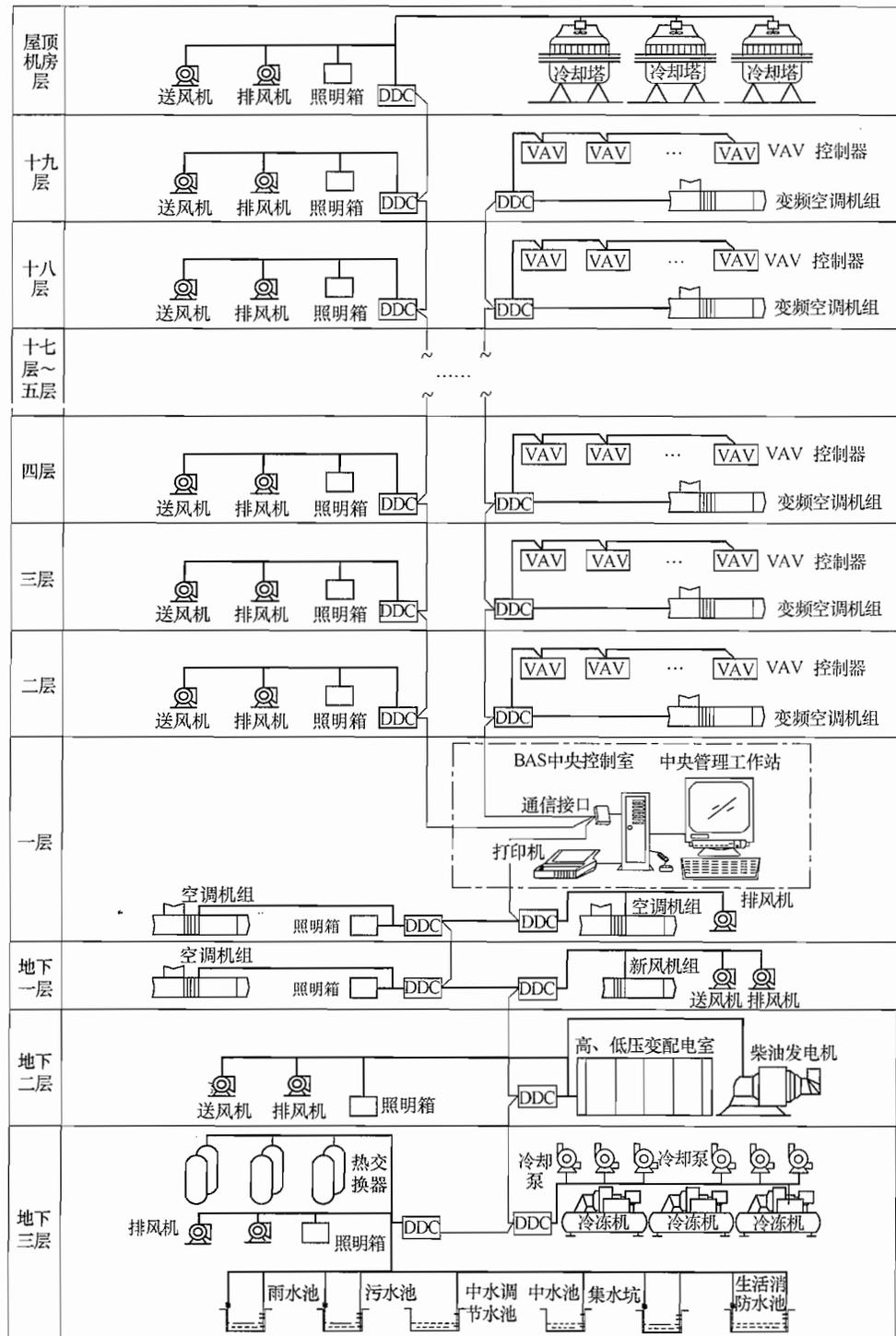


图 15-2-3 监控系统网络拓扑结构示意图示例



注:

1. 本图仅举例说明BAS的控制系统图,不同建筑设备布置应根据具体情况而定。
2. DDC控制器可根据经济合理的原则采用按楼层或按设备控制方式进行布置。

图 15-2-4 监控系统分布示意图

BAS常用文字符号

字母	被测变量	第一位 修饰词(小写)	后 继 功 能
A	分析		报警
C			控制,调节
D		差	
E	电压		检测元件
F	流量		
H	手动		
I	电流		指示
J	功率	扫描	
K	时间或时间程序		操作
L	物位		灯
M	湿度		
N	热量		
P	压力或真空		
Q			积分,累积
R			记录或打印
S	速度或频率		开关或联锁
T	温度		传送
U	多变量		多功能
V			阀,风门,百叶窗
W	重量或力		运算,转换单元,间放
Y			
Z	位置		驱动/执行器

BAS常用图形符号

图形符号	说 明	图形符号	说 明
	就地安装仪表		电动二通阀
	盘面安装仪表		电动三通阀
	盘内安装仪表		电磁阀
	管道安装仪表		电动蝶阀
	仪表盘, DDC站		电动风门
	热电阻		电缆桥架(宽×高)
	湿度传感器		电缆及编号
	节流孔板		
	一般检测点		

常用工艺设备图形符号

符号来源	图形符号	说 明
		风机
		水泵
GBJ114-88 8-2		空气过滤器
GBJ114-88 8-6		空气加热/冷却器 S=+为加热, S=-为冷却
GBJ114-88 7-3		风门
GBJ114-88 8-3		加湿器
		水冷机组
		冷却塔
		热交换器
		电气配电/照明箱

图 15-2-5 常用图例与文字符号

## 15.2.5 采暖通风及空气调节系统的监控要求

### 15.2.5.1 新风机组

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

18.10.1 新风机组的监控应符合下列规定：

- 1 新风机与新风阀应设连锁控制；
- 2 新风机启停控制应设置自动控制和手动控制；
- 3 当发生火灾时，应接受消防联动控制信号连锁停机；
- 4 在寒冷地区，新风机组应设置防冻开关报警和连锁控制；
- 5 新风机组应设置送风温度自动调节系统；
- 6 新风机组宜设置送风湿度自动调节系统；
- 7 新风机组可设置由室内 CO<sub>2</sub> 浓度控制送风量的自动调节系统。

18.10.2 新风机组的参数监测应符合下列规定：

- 1 新风机组应设置送风温度、湿度显示；
- 2 应设置新风过滤器两侧压差监测、压差超限报警；
- 3 应设置机组启停状态及阀门状态显示；
- 4 宜设置室外温、湿度监测。

(2) 新风机组监控系统图示例，如图 15-2-6 所示。

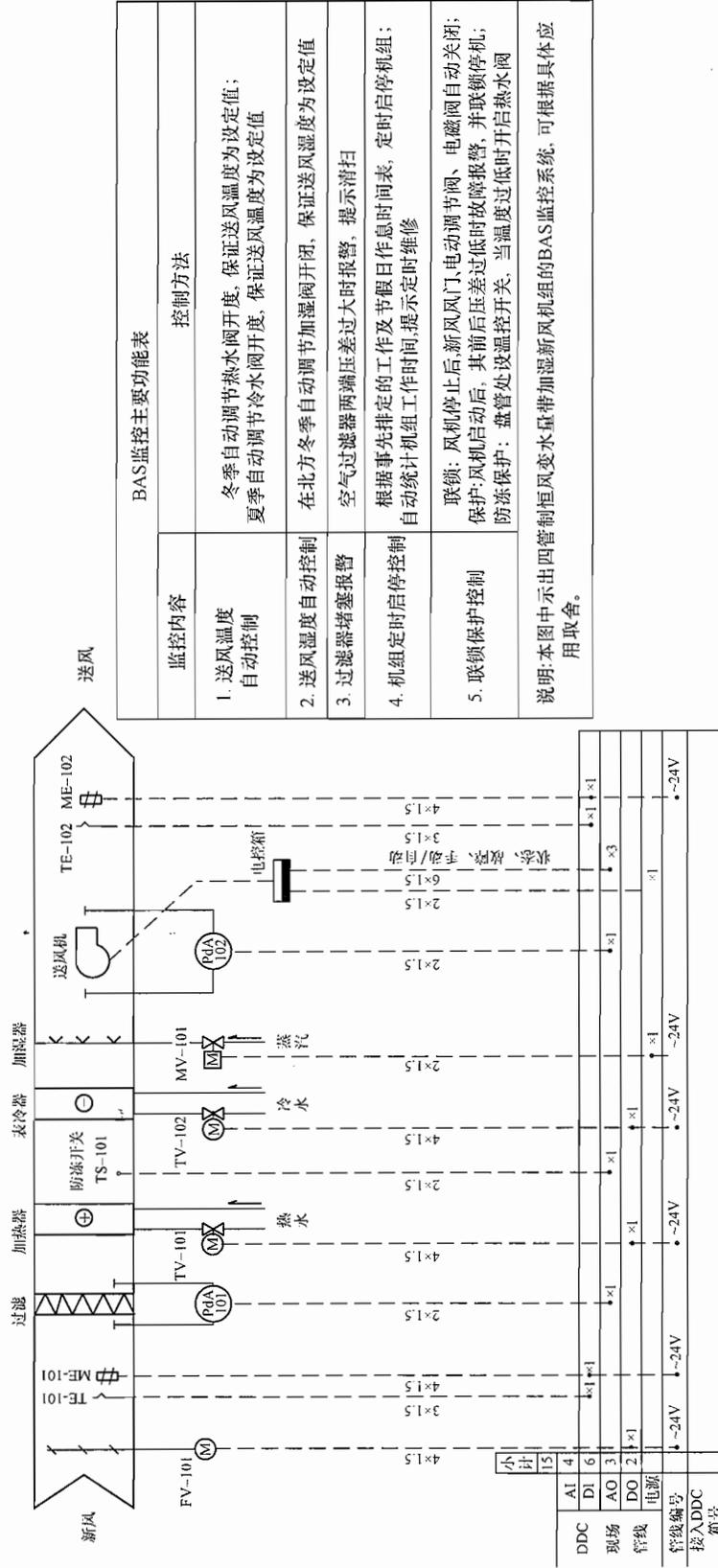
### 15.2.5.2 空调机组

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中规定：

18.10.3 空调机组的监控应符合下列规定：

- 1 空调机组应设置风机、新风阀、回风阀连锁控制；
- 2 空调机组启停，应设置自动控制和手动控制；
- 3 当发生火灾时，应接受消防联动控制信号连锁停机；
- 4 在寒冷地区，空调机组应设置防冻开关报警和连锁控制；
- 5 在定风量空调系统中，应根据回风或室内温度设定值，比例、积分连续调节冷风阀或热水阀开度，保持回风或室内温度不变；
- 6 在定风量空调系统中，应根据回风或室内湿度设定值，开关量控制或连续调节加湿除湿过程，保持回风或室内湿度不变；
- 7 在定风量系统中，宜设置根据回风或室内 CO<sub>2</sub> 浓度控制新风量的自动调节系统；
- 8 当采用单回路调节不能满足系统控制要求时，宜采用串级调节系统；
- 9 在变风量空调机组中，送风量的控制宜采用定静压法、变静压法或总风量法，并应符合下列要求：
  - 1) 当采用定静压法时，应根据送风静压设定值控制变速风机转速；
  - 2) 当采用变静压法时，为使送风管道静压值处于最小状态，宜使变风量箱风阀均处于 85%~99% 的开度；
  - 3) 当采用总风量法时，应以所有变风量末端装置实时风量之和，控制风机转速以改变送风量。

18.10.4 空调机组的参数监测应符合下列规定：



注: 电控箱至DDC的3个DI电为启停状态、故障状态、手动/自动状态显示。空调机组与新风机组相同。

图 15-2-6 新风机监控系统图

- 1 空调机组应设置送、回风温度显示和趋势图；当有湿度控制要求时，应设置送、回风湿度显示；
- 2 空气过滤器应设置两侧压差的监测、超限报警；
- 3 当有二氧化碳浓度控制要求时，应设置 CO<sub>2</sub> 浓度监测，并显示其瞬时值。

(2) GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节系统设计规范》中的规定：

**9.4.9 空调系统的电加热器应与送风机联锁，并应设无风断电、超温断电保护装置；电加热器必须采取接地及剩余电流保护措施。**

(3) 定风量全空气调节机组监控系统图如图 15-2-7 所示，变风量空调机组监控系统图如图 15-2-8 所示。

(4) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中对风机盘管系统的规定：

18.10.5 风机盘管是与新风机组配套使用的空调末端设备，其监控应符合下列规定：

- 1 风机盘管宜由开关式温度控制器自动控制电动水阀通断，手动三速开关控制风机高、中、低三种风速转换；
- 2 风机启停应与电动水阀联锁，两管制冬夏均运行的风机盘管宜设手动控制冬夏季切换开关。

## 15.2.6 冷冻水及冷却水系统的监控要求

### 15.2.6.1 压缩式制冷系统

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

18.8.1 压缩式制冷系统的监控应符合下列规定：

1 冷水机的电机、压缩机、蒸发器、冷凝器等内部设备的自动控制和保护均由机组自带的控制系统监控，宜由供应商提供数据总线通信接口，直接与建筑设备监控系统交换数据。冷冻水及冷却水系统的外部水路的参数监测与控制，应由建筑设备监控系统控制器（分站）完成。

2 建筑设备监控系统应具有下列控制功能：

- 1) 制冷系统启、停的顺序控制；
- 2) 冷冻水供水压差恒定闭环控制；
- 3) 备用泵投切、冷却塔风机启停和冷水机低流量保护的开关量控制；
- 4) 根据冷量需求确定冷水机运行台数的节能控制；
- 5) 宜对冷水机组出水温度进行优化设定；
- 6) 冷却水最低水温控制；
- 7) 冷却塔风机台数控制或风机调速控制。

中小型工程冷冻水宜采用一次泵系统，系统较大、阻力较高且各环路负荷特性或阻力相差悬殊时，宜采用二次泵系统；二次泵宜选用变频调速控制。

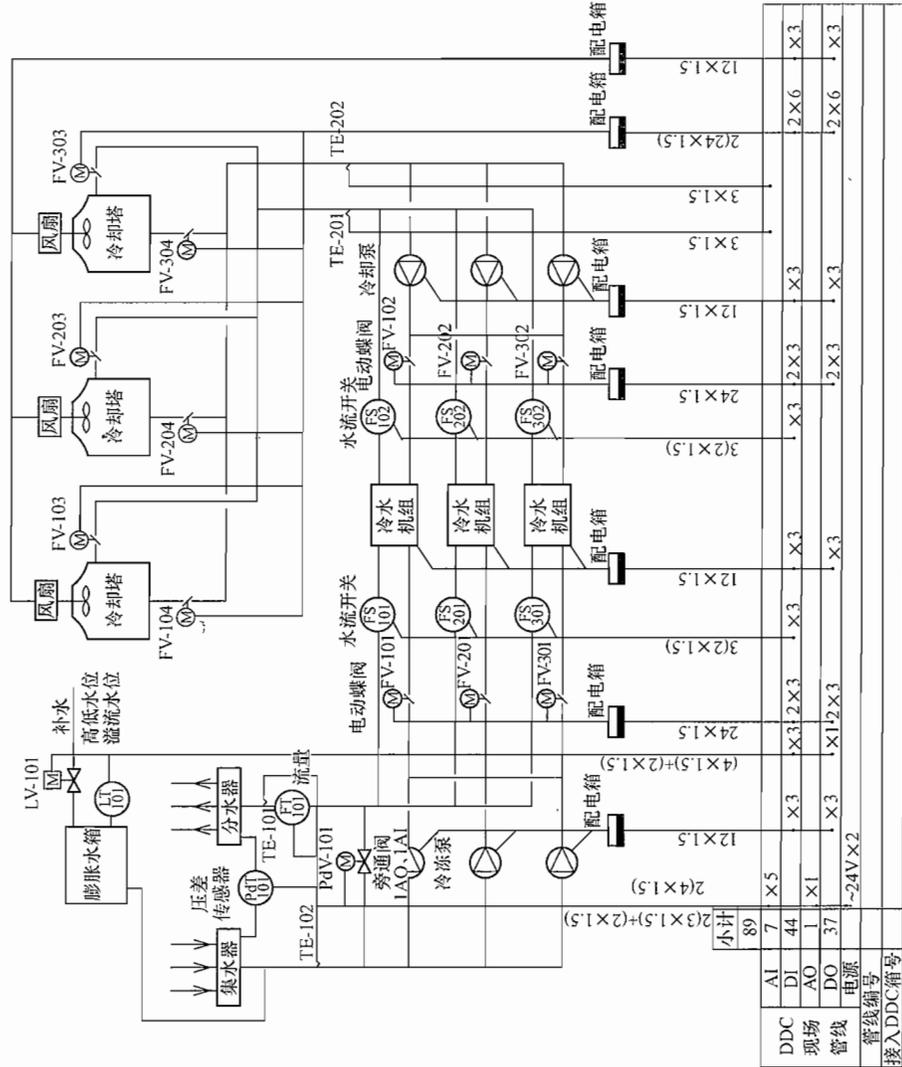
3 冷冻水及冷却水系统参数监测应符合下列要求：

- 1) 冷冻水供水、回水温度测量应设置自动显示、超限报警、历史数据记录、打印及趋势图；





BAS 监控主要功能表	
监控内容	控制方法
1. 冷负荷需求计算	根据冷冻水供、回水温度和供水流量测点值，自动计算建筑空调实际所需冷负荷量
2. 冷水机组台数控制	根据建筑所需冷负荷及差压旁通阀开度，自动调整冷水机组运行台数，达到最佳节能目的
3. 冷水机组联锁控制	启动：冷却塔蝶阀开启，冷却塔风机开启，冷却水蝶阀开启，开冷却水泵，开冷水机组蝶阀开启，开冷冻水泵，关冷水机组蝶阀，关冷却水泵，关冷冻水蝶阀，关冷却塔风机，关蝶阀 停止：停冷水机组，关冷冻水泵，关冷却水蝶阀，关冷却水泵，关蝶阀，关冷却塔风机，关蝶阀
4. 冷冻水压差控制	根据冷冻水供回水压差，自动调整旁通调节阀，维持供水压差恒定
5. 冷却水温度控制	根据冷却水温度，自动控制冷却塔风机的启停台数
6. 水泵保护控制	水泵启动后，水流开关检测水流状态，如故障则自动停机。 水泵运行时，如发生故障，备用泵自动投入运行
7. 机组定时启停控制	根据事先排定的工作及节假日作息时间表，定时启停机组。 自动统计机组各水泵、风机的累计工作时间，提示定时维修
8. 机组运行参数	监测系统内各检测点的温度、压力、流量等参数，自动显示，定时打印及故障报警
9. 水箱补水控制	自动控制进水电磁阀的开启与闭合，使膨胀水箱水位维持在允许范围内，水位超限进行故障报警



注：每个电动蝶阀的2个D0点开阀、关阀控制（正转、反转）。2个DI点为阀开、阀关到位显示。

图 15-2-9 冷冻系统监控系统图

3 热交换系统宜设置二次供回水恒定压差控制；根据设在二次供回水管道上的差压变送器测量值，调节旁通阀开度或调节热水泵变频器的频率以改变水泵转速，保持供回水压差在设定值范围。

18.9.2 热交换系统的参数监测应符合下列规定：

1 汽-水换热器应监测蒸汽温度、二次供回水温度、供回水压力，并应监测热水循环泵运行状态；当温度、压力超限及热水循环泵故障时报警；

2 水-水换热器应监测一次供回水温度、压力、二次供回水温度、压力，并应监测热水循环泵运行状态；当温度、压力超限及热水循环泵故障时报警；

3 二次水流量测量宜设置瞬时值显示、流量积算、历史数据记录、打印；

4 当需要经济核算时，应根据二次供回水温差及流量瞬时值计算热量和累计热量消耗。

### 15.2.7.2 热交换系统控制图

热交换系统控制系统图，如图 15-2-10 所示。

### 15.2.8 生活给水、中水与排水系统的监控要求

#### 15.2.8.1 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

18.11.1 生活给水系统的监控应符合下列规定：

1 当建筑物顶部设有生活水箱时，应设置液位计测量水箱液位，其高、低Ⅰ值宜用作控制给水泵，高、低Ⅱ值用于报警；

2 当建筑物采用变频调速给水系统时，应设置压力变送器测量水管压力，用于调节给水泵转速以稳定供水压力；

3 应设置给水泵运行状态显示、故障报警；

4 当生活给水泵故障时，备用泵应自动投入运行；

5 宜设置主、备用泵自动轮换工作方式；

6 给水系统控制器宜有手动、自动工况转换。

18.11.2 中水系统的监控应符合下列规定：

1 中水箱应设置液位计测量水箱液位，其上限信号用于停中水泵，下限信号用于启动中水泵；

2 主泵故障时，备用泵应自动投入运行；

3 宜设置主、备用泵自动轮换工作方式；

4 中水系统控制器宜有手动、自动工况转换。

18.11.3 排水系统的监控应符合下列规定：

1 当建筑物内设有污水池时，应设置液位计测量水池水位，其上限信号用于启动排污泵，下限信号用于停泵；

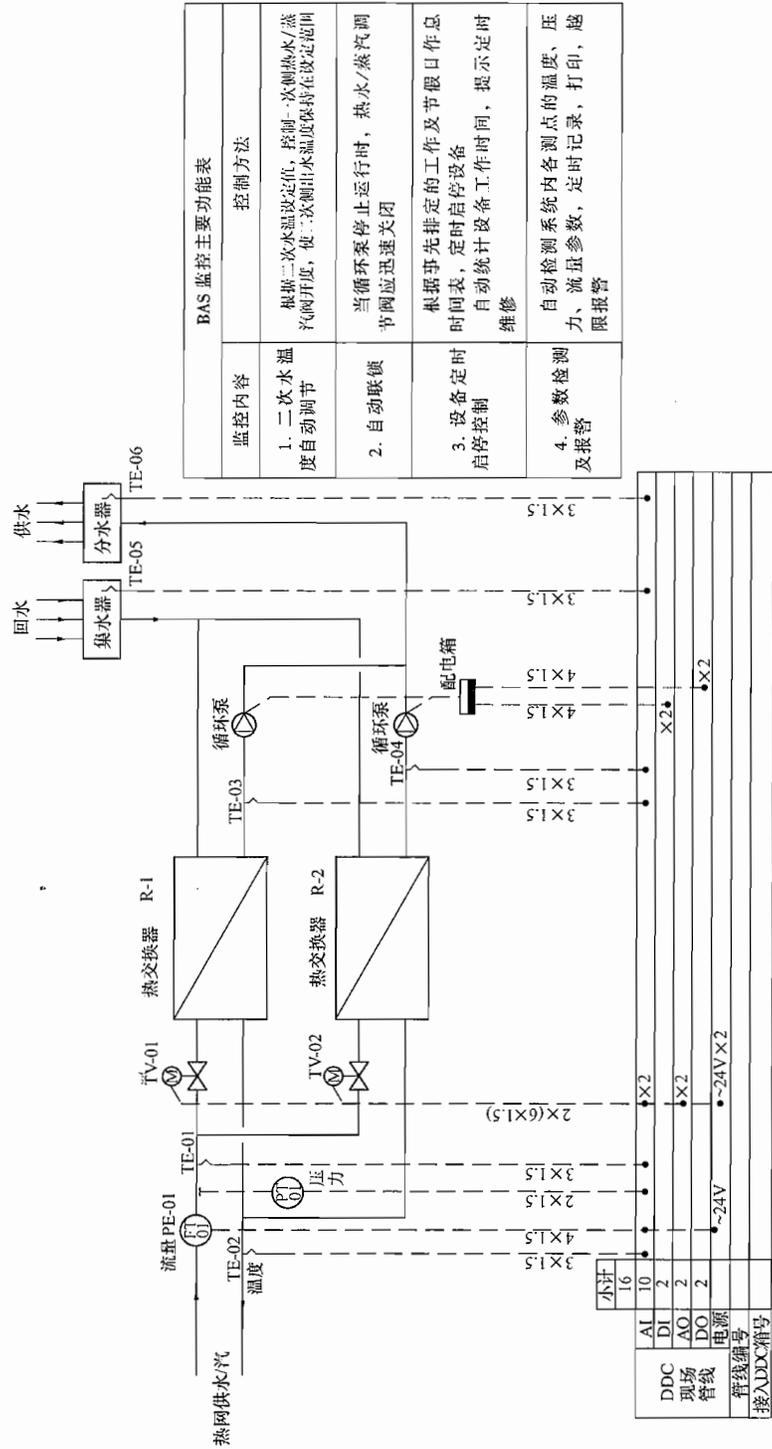
2 应设置污水泵运行状态显示、故障报警；

3 当污水泵故障时，备用泵应能自动投入；

4 排水系统的控制器应设置手动、自动工况转换。

### 15.2.8.2 给水系统控制图

生活给水系统控制系统图，如图 15-2-11 所示。



注: 根据GJJ 34—2010《城市供热管网风设计规范》第2.1.10条文说明, 一般散热器采暖供水温度为80~95℃, 空调采暖供水温度60~65℃, 生活热水供水温度为50~65℃

图 15-2-10 热交换系统控制系统图

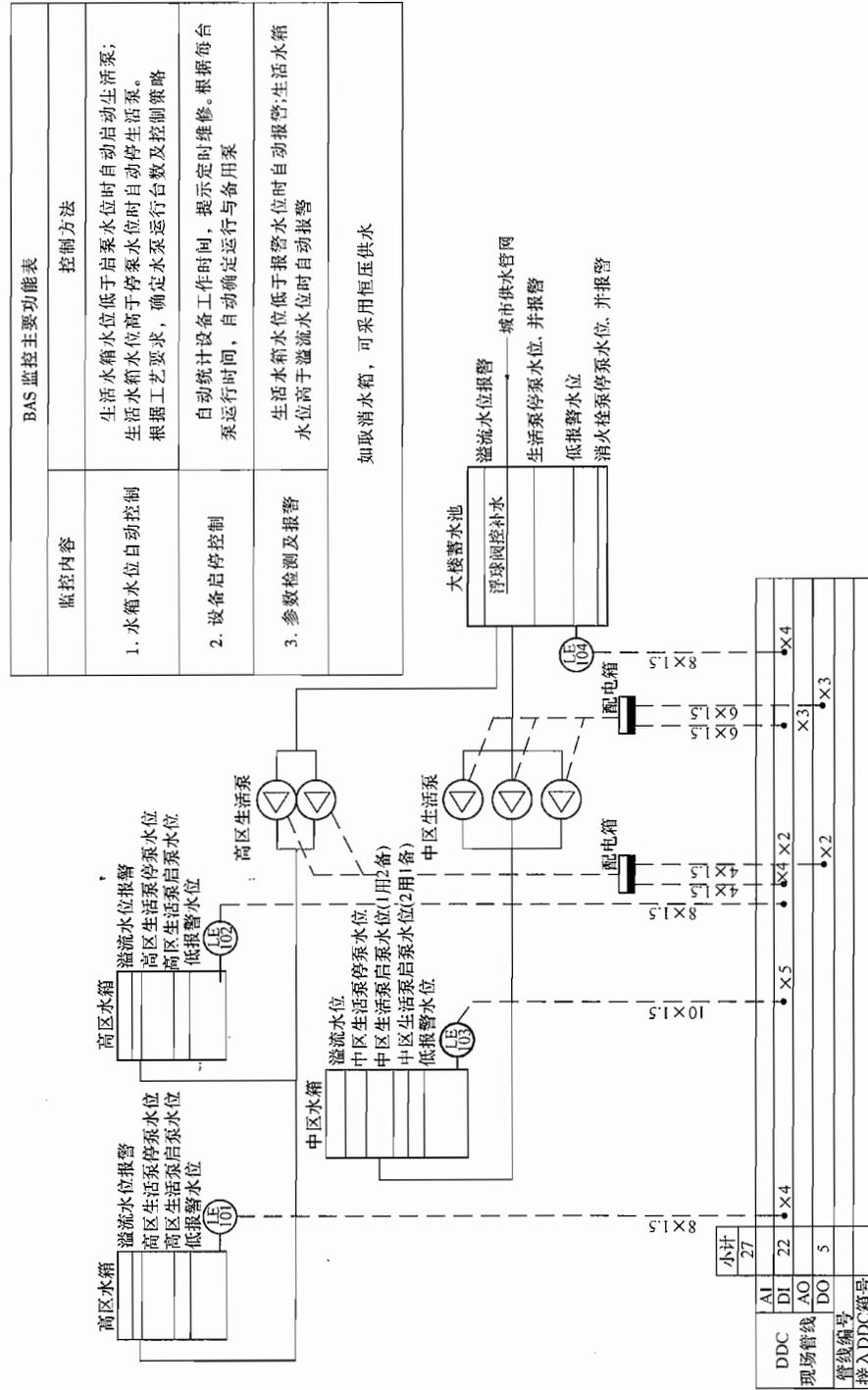


图 15-2-11 生活给水系统控制流程图

### 15.2.9 供配电系统的监测要求

#### 15.2.9.1 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

18.12.1 建筑设备监控系统应对供配电系统下列电气参数进行监测：

1 10（6）kV 进线断路器、馈线断路器和联络断路器，应设置分、合闸状态显示及故障跳闸报警；

2 10（6）kV 进线回路及配出回路，应设置有功功率、无功功率、功率因数、频率显示及历史数据记录；

3 10（6）kV 进出线回路宜设置电流、电压显示及趋势图和历史数据记录；

4 0.4kV 进线开关及重要的配出开关应设置分、合闸状态显示及故障跳闸报警；

5 0.4kV 进出线回路宜设置电流、电压显示、趋势图及历史数据记录；

6 宜设置0.4kV 零序电流显示及历史数据记录；

7 宜设置功率因数补偿电流显示及历史数据记录；

8 当有经济核算要求时，应设置用电量累计；

9 宜设置变压器线圈温度显示、超温报警、运行时间累计及强制风冷风机运行状态显示。

18.12.2 柴油发电机组宜设置下列监测功能：

1 柴油发电机工作状态显示及故障报警；

2 日用油箱油位显示及超高、超低报警；

3 蓄电池组电压显示及充电器故障报警。

15.2.9.2 建筑设备监控系统对供配电系统一般只监不控。当供配电系统本身采用智能化控制系统时，宜通过网络接口将各种数据传给全楼监控系统。

#### 15.2.10 公共照明系统的监控要求：

##### 15.2.10.1 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

18.13.1 公共照明系统的监控应符合下列规定：

1 室内照明系统宜采用分布式控制器，当采用第三方专用控制系统时，该系统应有与建筑设备监控系统网络连接的通信接口；

2 室内照明系统的控制器应有自动控制 and 手动控制等功能；正常工作时，宜采用自动控制，检修或故障时，宜采用手动控制；

3 室内照明宜按分区时间表程序开关控制，室外照明可按时间表程序开关控制，也可采用室外照度传感器进行控制，室外照度传感器应考虑设备防雨防尘的防护等级；

4 照明控制箱应由分布式控制器与配电箱两部分组成，可选择一体的，也可选择分体的；控制器与其配用的照度传感器宜选用现场总线连接方式。

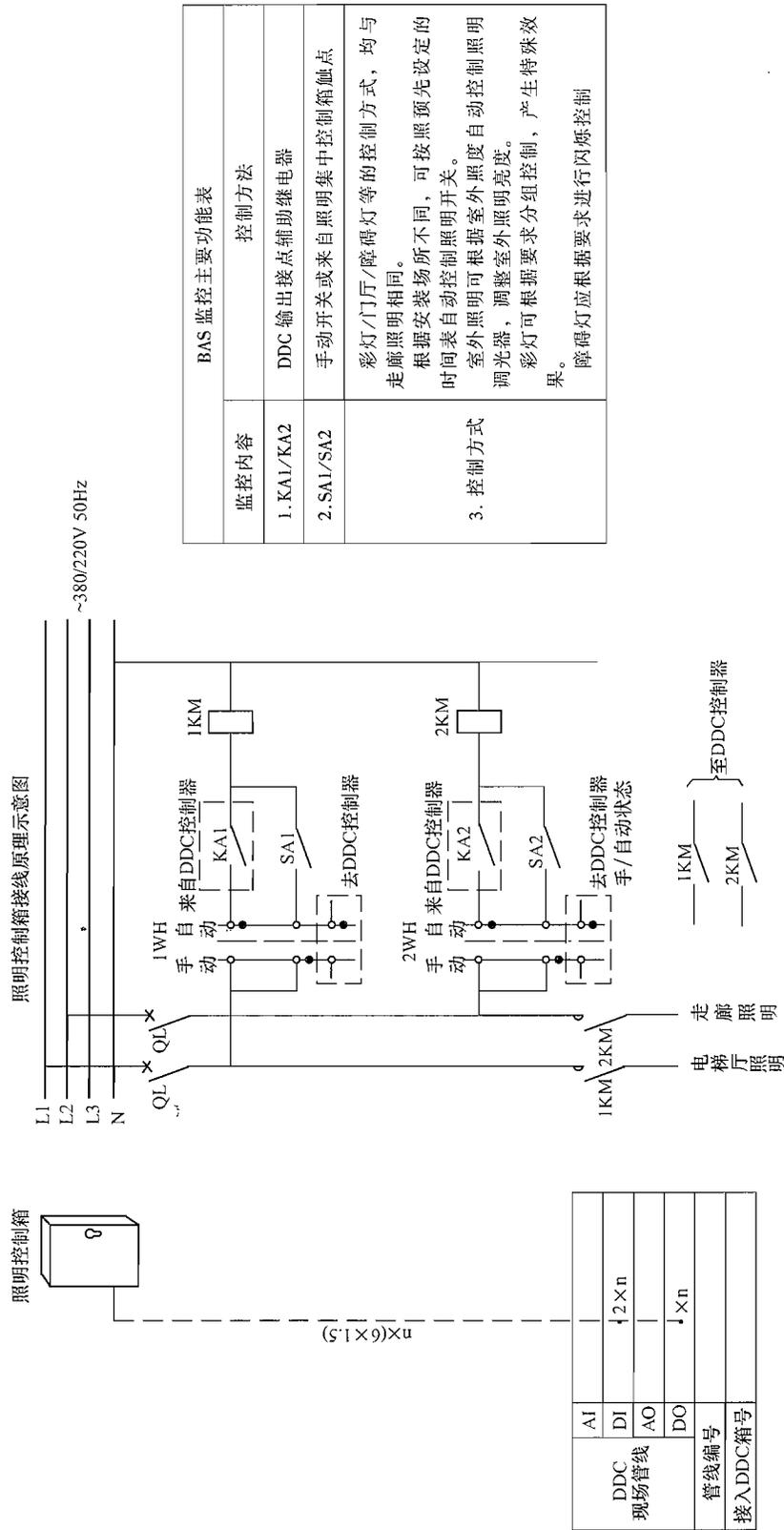
15.2.10.2 照明系统监控原理示意图，如图 15-2-12 所示。

#### 15.2.11 电梯和自动扶梯系统

JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

18.14.1 电梯和自动扶梯运行参数的监测应符合下列规定：

1 宜设置电梯、自动扶梯运行状态显示及故障报警；



注: 一般 DDC 的 DO 点允许接入 220V 电源, 启停控制方便。因为控制点多, 日常使用, 启停频繁。而火灾报警系统的输出模块一般为 24V, 需经继电器转换后再去控制水泵、风机。

图 15-2-12 照明系统监控原理示意图

- 2 当监控电梯群组运行时，电梯群宜分组、分时段控制；
- 3 宜对每台电梯的运行时间进行累计。

18.14.2 建筑设备监控系统与火灾信号应设有联锁控制。当系统接收火灾信号后，应将全部客梯迫降至首层。

## 15.2.12 现场网络层及微控制器

### 15.2.12.1 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

18.5.1 中型及以上系统的现场网络层，宜由通信总线连接微控制器、分布式智能输入输出模块和传感器、电量变送器、照度变送器、执行器、阀门、风阀、变频器等智能现场仪表组成。也可使用常规现场仪表和一对一连线。

18.5.2 现场网络层宜采用 TCP/IP、BACnet、LonTalk、Meter Bus 和 ModBus 等国际标准化通信总线。

18.5.3 微控制器应具有对末端设备进行控制的功能，并能独立于控制器（分站）和中央管理工作站完成控制操作。

18.5.4 微控制器按专业功能可分为下列几类：

- 1 空调系统的变风量箱微控制器、风机盘管微控制器、吊顶空调微控制器、热泵微控制器等；

- 2 给水排水系统的给水泵微控制器、中水泵微控制器、排水泵微控制器等；

- 3 变配电微控制器、照明微控制器等。

18.5.5 微控制器宜直接安装在被控设备的控制柜（箱）里，成为控制设备的一部分。

18.5.6 作为控制器的组成部分的分布式智能输入输出模块，应通过通信总线与控制器计算机模块连接。

18.5.7 智能现场仪表应通过通信总线与控制器、微控制器进行通信。

18.5.8 控制器、微控制器和分布式智能输入输出模块，应与常规现场仪表进行一对一的配线连接。

18.5.9 现场网络层的配置应符合下列规定：

- 1 微控制器、分布式智能输入输出模块、智能现场仪表之间，应为对等式直接数据通信。

- 2 现场网络层可包括并行工作的多条通信总线，每条通信总线可视为一个现场网络。

- 3 每个现场网络可通过网络通信接口与管理网络层（中央管理工作站）连接，也可通过网络管理层服务器 RS232 通信接口或内置通信网卡直接与服务器连接。

- 4 当微控制器和（或）分布式智能输入输出模块，采用以太网通信接口而与管理网络层处于同一通信级别时，可采用交换式集线器连接，与中央管理工作站进行通信。

- 5 智能现场仪表可通过网络通信接口与控制网络层控制器（分站）进行通信。

- 6 智能现场仪表宜采用分布式连接，用软件配置的方法，可把各种现场设备信息分配到不同的控制器、微控制器中进行处理。

### 15.2.12.2 数字通信的优点

数字通信比模拟通信有以下优点：

(1) 简化了控制装置的硬件结构。大大减少了布线的复杂性和费用。模拟信号传输时，一对线上只能传输单一信息，构成较复杂系统时，现场布线复杂，使用的电缆、电线较多。数字通信可在同一总线上进行双向多信息的数字传输。

(2) 传输的信息更加丰富。不但能传输测量值，还能传输状态信息和控制信息。

(3) 提高了信号的传输精度。数字信号抗干扰能力强，能对被传输数据的正确性进行检验、纠错。经过限幅、整形、放大、再生，传输中基本上可以不降低精度。但如果信噪比太低，误码率会增大，故也要限制传输距离。

(4) 模拟信号传输信噪比示意图，如图 15-2-13 所示。数字信号传输抗干扰性能示意图，如图 15-2-14 所示。

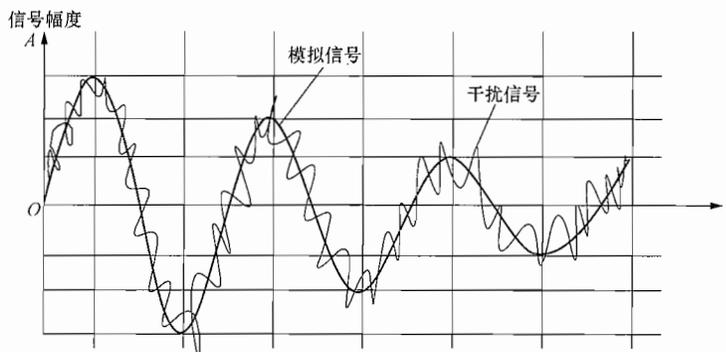


图 15-2-13 模拟信号传输信噪比示意图

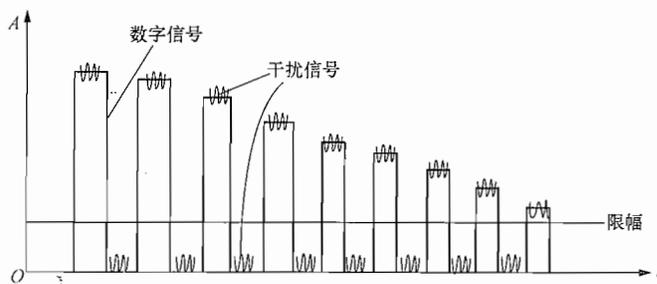


图 15-2-14 数字信号传输抗干扰性能示意图

### 15.2.13 现场仪表的选择

#### 15.2.13.1 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

18.7.1 传感器的选择应符合下列规定：

- 1 传感器的精度和量程，应满足系统控制及参数测量的要求；
- 2 温度传感器量程应为测点温度的 1.2~1.5 倍，管道内温度传感器热响应时间不应大于 25s，当在室内或室外安装时，热响应时间不应大于 150s；
- 3 仅用于一般温度测量的温度传感器，宜采用分度号为 Pt1000 的 B 级精度（二线制）；当参数参与自动控制和经济核算时，宜采用分度号为 Pt100 的 A 级精度（三线制）；

4 湿度传感器应安装在附近没有热源、水滴且空气流通，能反映被测房间或风道空气状态韵位置，其响应时间不应大于150s；

5 压力（压差）传感器的工作压力（压差），应大于测点可能出现的最大压力（压差）的1.5倍，量程应为测点压力（压差）的1.2~1.3倍；

6 流量传感器量程应为系统最大流量的1.2~1.3倍，且应耐受管道介质最大压力，并具有瞬态输出；流量传感器的安装部位，应满足上游10D（管径）、下游5D的直管段要求，当采用电磁流量计、涡轮流量计时，其精度宜为1.5%；

7 液位传感器宜使正常液位处于仪表满量程的50%；

8 成分传感器的量程应按检测气体、浓度进行选择，一氧化碳气体宜按0~300ppm或0~500ppm；二氧化碳气体宜按0~2000ppm或0~10000ppm（ppm=10<sup>-6</sup>）；

9 风量传感器宜采用皮托管风量测量装置，其测量的风速范围不宜小于2~16m/s，测量精度不应小于5%；

10 智能传感器应有以太网或现场总线通信接口。

18.7.2 调节阀和风阀的选择应符合下列规定：

1 水管道的两通阀宜选择等百分比流量特性；

2 蒸汽两通阀，当压力损失比大于或等于0.6时，宜选用线性流量特性；小于0.6时，宜选用等百分式流量特性；

4 调节阀的口径应通过计算阀门流通能力确定；

5 空调系统宜选择多叶对开型风阀，风阀面积由风管尺寸决定，并应根据风阀面积选择风阀执行器，执行器扭矩应能可靠关闭风阀；风阀面积过大时，可选多台执行器并联工作。

18.7.3 执行器宜选用电动执行器，其输出的力或扭矩应使阀门或风阀在最大流体流通压力时可靠开启和闭合。

24.2.3 流量仪表的选择应符合下列规定：

1 流量仪表的量程选择，当采用方根刻度显示时，正常流量宜为满量程的70%~80%，最大流量不应大于满量程的95%，最小流量不应小于满量程的30%；当采用线形刻度显示时，正常流量宜为满量程的50%~70%，最大流量不应大于满量程的90%，最小流量不应小于满量程的10%（对于方根特性经开方变成直线特性时为满量程的20%）。

**15.2.13.2** 在需要对被控对象进行通、断两种状态的控制时，应采用电动控制阀。在需要对被控对象进行流量的连续调节时，应采用电动调节阀，两种阀门不可代替使用。

#### 1. 电动调节阀

建筑设备监控系统中常用的电动调节阀有两通阀、三通阀、套筒阀等，应根据现场被控设备的技术条件进行选择。其控制信号应与现场控制器的输出信号相匹配。重要场所的阀门位置信号反馈送至现场控制器，阀门技术规格应满足安装场所的工作压力、温度和最大允许差压值要求。

#### 2. 电动控制阀

建筑设备监控系统中常用的电动控制阀有电动蝶阀、闸阀、电磁阀等。电动蝶阀多用于

大口径水管路中的流量控制,电磁阀一般用于小管径且正常工作时线圈不带电的场合。重要场所或安装位置就地操作困难的大口径电动控制阀,应在就地或便于操作的地点设置阀门的电控操作箱,便于紧急情况或调试阶段的手动控制。

3. 电动风门执行机构在建筑设备监控系统中用于风门的控制,应使输出连接方式和转矩与风门的机械结构相匹配,并使输出扭矩可满足风门的动作要求。

### 15.2.13.3 变频器的选择

JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定:

18.7.4 水泵、风机变频器输出频率范围应为 $1\sim 55\text{Hz}$ ,变频器过载能力不应小于120%额定电流,变频器外接给定控制信号应包括电压信号和电流信号,电压信号为直流 $0\sim 10\text{V}$ ,电流信号为直流 $4\sim 20\text{mA}$ 。

### 15.2.13.4 BAS 监控点一览表

数字、模拟、输入、输出监控点常用监控内容参见表 15-2-1。

### 15.2.14 监控系统的线路敷设

(1) 为保证网络工作的可靠性和稳定性,一般建筑设备监控的网络线应采用手拉手连接方式,而不应 T 接。

(2) 为抗干扰,模拟量的信号线( $0\sim 10\text{V}$ , $4\sim 20\text{mA}$ 等)宜采用屏蔽线,开关量信号线和控制线可采用非屏蔽线缆。导线截面应根据线路长度、电压降、线路损耗确定,一般宜为 $0.75\sim 1.5\text{mm}^2$ 。

(3) 网络通信线应采用屏蔽双绞线(如 DJYP2V  $2\times 2\times 1.0$ ),可单独布管,亦可敷设于综合布线线槽中。

(4) 在空调机房、配电间上下对应的高层建筑、多层建筑,宜在空调机房、配电间内设置建筑设备监控线槽或管路等竖向布线通路,主要网络通信线宜竖向布放。上下层间机房监控点不多时,为节约投资可几层合设 DDC 或层间调剂 DDC 监控点的容量。

(5) 空调机房、冷冻机房、变电站等监控点集中的机房,宜设建筑设备监控系统线槽。为抗干扰,此线槽应采用双格金属线槽,信号线和 220V 控制线分开敷设。

### 15.2.15 供热分户计量远传要求

(1) 《北京市民用建筑节能管理办法》北京市人民政府令【第 256 号】中的规定(自 2014 年 8 月 1 日起施行):

第十八条 新建民用建筑应当按标准和规定安装能耗计量设施,大型公共建筑应当安装能耗分项计量设施。新建民用建筑安装供热计量与温控装置应当符合下列要求:

- (三) 供热计量装置达到数据远传通讯功能;
- (四) 建筑物室内分户安装采暖温度采集远传装置。

(2) 256 号文为北京市的政府规定,包括民用公共建筑和居住建筑。对于北方的其他地区可供参考。

(3) 有条件时,宜将热能表、水表、燃气表、电表等纳入能耗计量及数据远传系统,实现“四表出户”、“多表出户”、远程抄表,提高能源管理水平和能源使用效率。

(4) 能耗计量及数据远传(包括有线传输、无线传输等多种传输方式)系统示例,如图 15-2-15、图 15-2-16 所示。



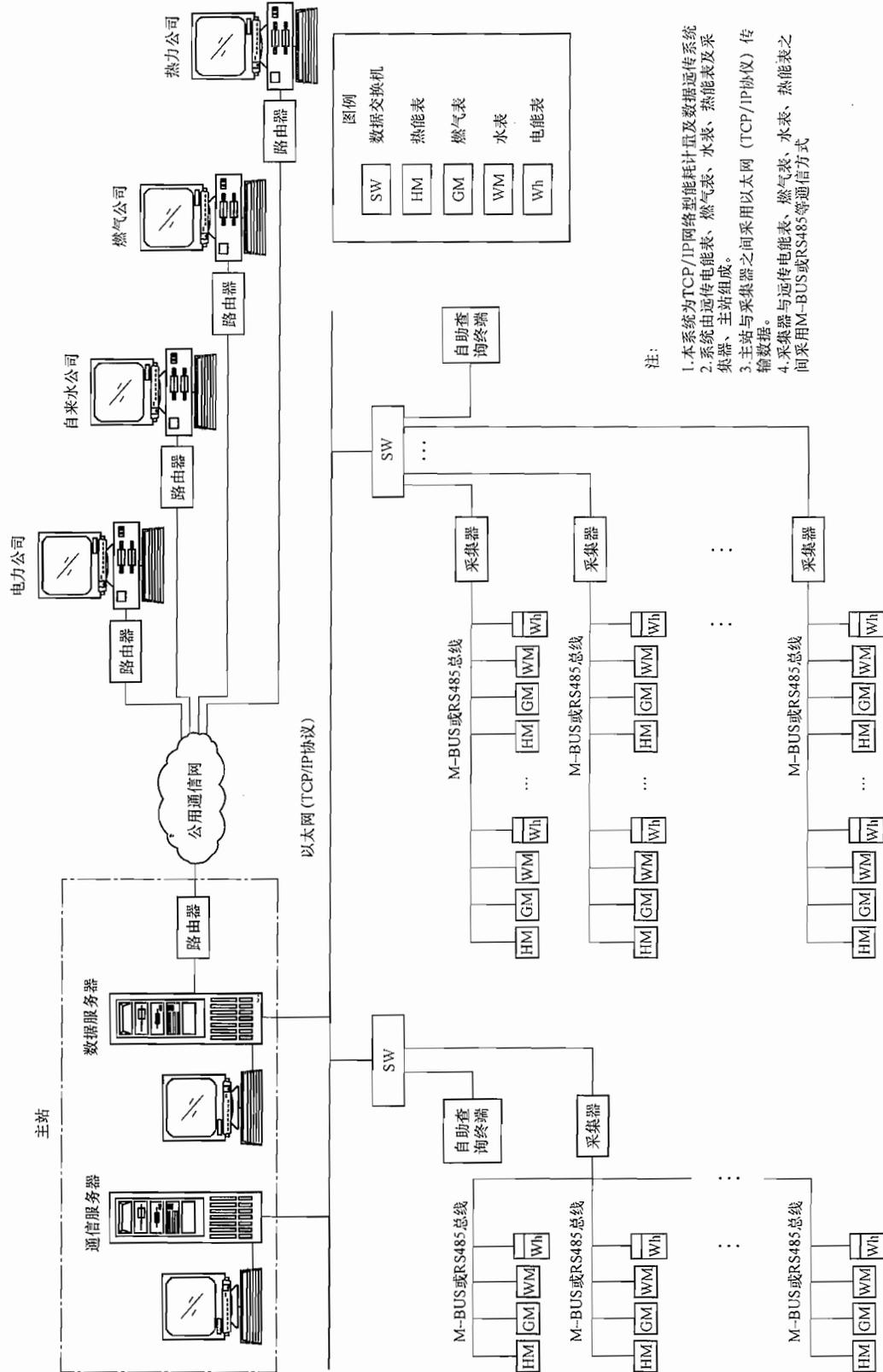
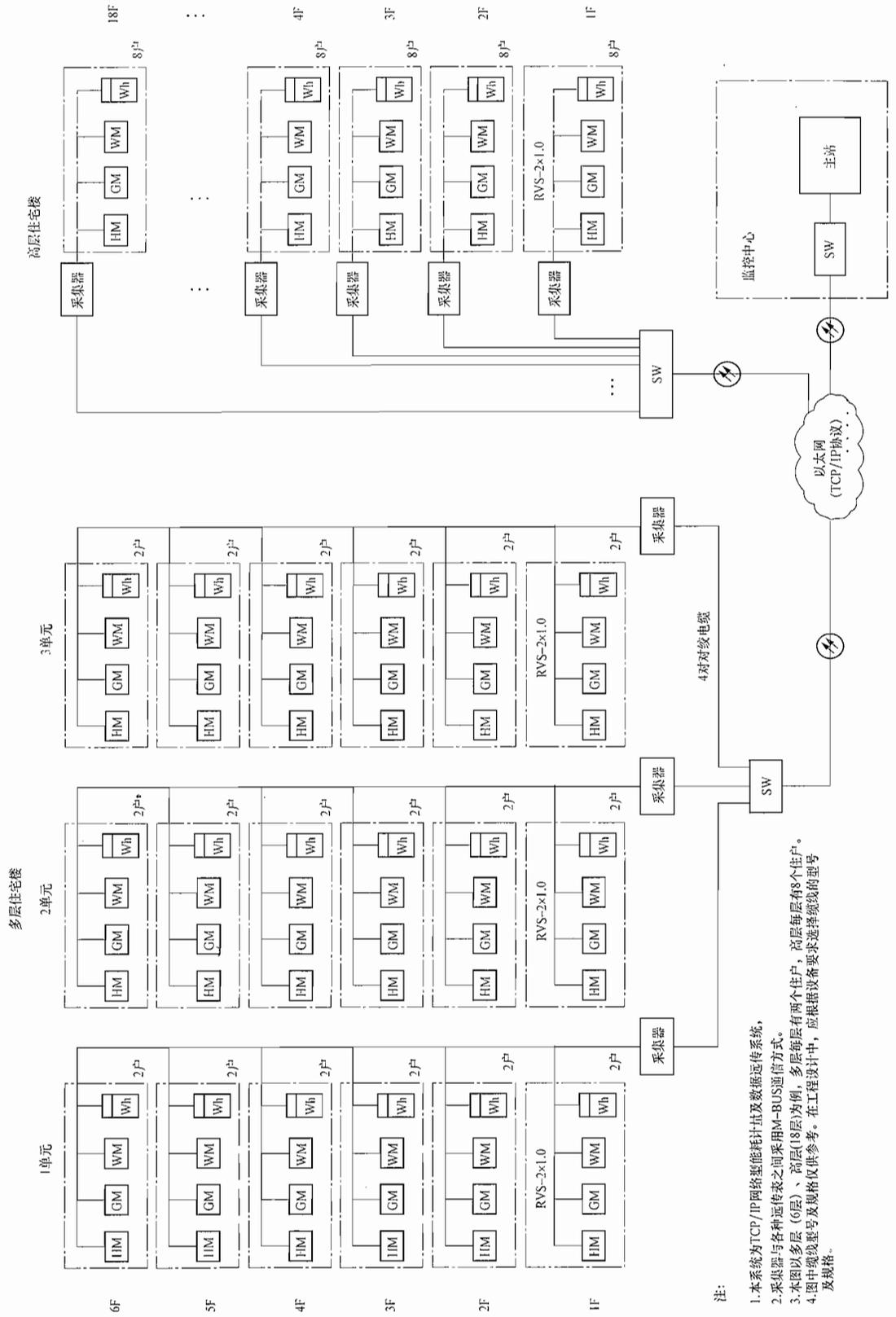


图 15-2-15 能耗计量及数据远传系统拓扑图



注:

1. 本系统为TCP/IP网络型能耗计量及数据远传系统。
2. 采集器与各种远传表之间采用M-BUS通信方式。
3. 本图以多层(6层)、高层(18层)为例,多层每层有两个住户,高层每层有8个住户。
4. 图中线缆型号及规格仅供参考,在工程设计中,应根据设备要求选择线缆的型号及规格。

图 15-2-16 能耗计量及数据远传系统图

## 15.3 安全防范系统

### 15.3.1 安全防范系统的概念和总体要求

#### 15.3.1.1 设计中应遵循的规范及国家标准图：

- (1) GB 50348—2004 《安全防范工程技术规范》；
- (2) GB 50394—2007 《入侵报警系统工程设计规范》；
- (3) GB 50395—2007 《视频安防监控系统工程设计规范》；
- (4) GB 50396—2007 《出入口控制系统工程设计规范》；
- (5) GB 50198—2011 《民用闭路监视电视系统工程技术规范》；
- (6) GB 50314—2015 《智能建筑设计标准》；
- (7) JGJ 16—2008 《民用建筑电气设计规范》；
- (8) 国家标准图 09X700 《智能建筑弱电工程设计施工图集》。

#### 15.3.1.2 安全防范系统的构成

安全防范系统一般由安全管理系统和若干个相关子系统组成。现阶段常用的安全防范子系统主要包括：视频安防监控系统、入侵报警系统、出入口控制系统（即门禁系统）、电子巡查系统（即巡更系统）、停车场管理系统，一卡通系统等子系统。各子系统的基本配置包括前端、传输、信息处理/控制/管理、显示/记录四大单元。

#### 15.3.1.3 安全防范系统的设计原则

安全防范工程设计应遵循技防（技术防范）、物防、人防相结合的原则和系统的防护级别与被保护对象的风险等级相适应的原则。设计中应根据被保护对象的使用性质、安全防范等级、投资规模等确定安全防范系统的构成和设置标准。

#### 15.3.1.4 高风险对象的风险等级与防护级别的划分

GB 50348—2004 《安全防范系统技术规范》中的规定：

##### 4.1.1 防护对象风险等级的划分应遵循下列原则：

1 根据被防护对象自身的价值、数量及其周围的环境等因素，判定被防护对象受到威胁或承受风险的程度。

2 防护对象的选择可以是单位、部位（建筑物内外的某个空间）和具体的实物目标。不同类型的防护对象，其风险等级的划分可采用不同的判定模式。

3 防护对象的风险等级分为三级，按风险由大到小定为一级风险、二级风险和三级风险。

4.1.2 安全防范系统的防护级别应与防护对象的风险等级相适应。防护级别共分为三级，按其防护能力由高到低定为一级防护、二级防护和三级防护。

#### 15.3.1.5 纵深防护体系

高风险对象应优先选择纵深防护体系，区分纵深层次、防护重点，划分不同等级的防护区域。纵深防护体系是兼有周界、监视区、防护区、禁区的防护体系，如图 15-3-1（此图摘自北京市公安局技防办研发中心编制的《安全技术防范讲义》2003 年）所示。

15

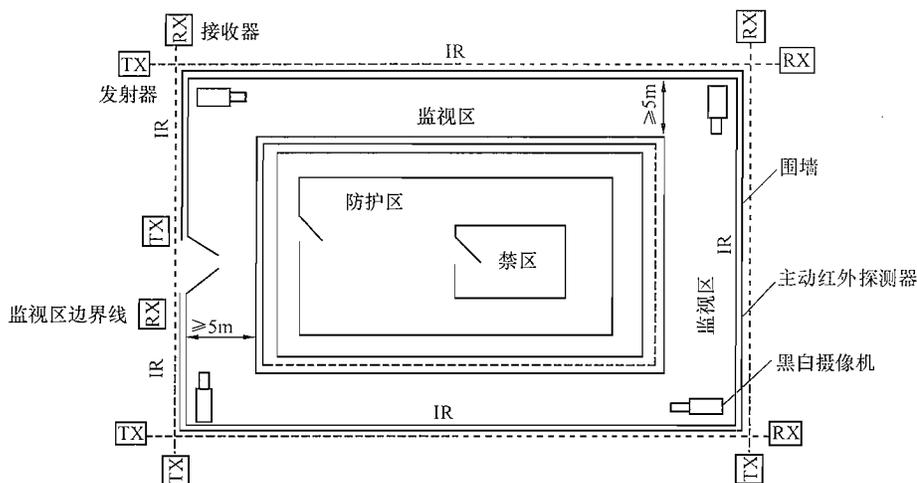


图 15-3-1 纵深防护体系示意图

### 15.3.1.6 安防监控中心

(1) GB 50348—2004《安全防范工程技术规范》中的规定：

**3.13.1** 监控中心应设置为禁区，应有保证自身安全的防护措施和进行内外联络的通信手段，并应设置紧急报警装置和留有向上一级接处警中心报警的通信接口。

**3.13.2** 监控中心的面积应与安防系统的规模相适应，不宜小于 $20\text{m}^2$ 。应有保证值班人员正常工作的相应辅助设施。

**3.13.4** 监控中心内的温度宜为 $16\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度宜为 $30\%\sim 75\%$ 。

(2) GB 50314—2015《智能建筑设计标准》中的规定：

**4.6.6** 总建筑面积大于 $20000\text{m}^2$ 的公共建筑或建筑高度超过 $100\text{m}$ 的建筑所设置的应急响应系统，必须配置与上一级应急响应系统信息互联的通信接口。

(3) 高风险对象的安防监控中心应独立设置。一般工程中，为节省昼夜值班人员和功能互补，安防监控可与消防监控合设监控中心。

### 15.3.1.7 安防系统集成

设有多个安防子系统时，应考虑安防系统的集成设计，实现资源共享、联动控制。出入口控制系统必须考虑与消防报警系统的联动，保证火灾情况下的紧急逃生。

## 15.3.2 视频安防监控系统

### 15.3.2.1 视频安防监控系统的组成和功能

(1) 常用系统的类型。

1) 普通模拟视频监控系统通常包括各种摄像机、视频电缆、矩阵切换器、硬盘录像机、监视器、视频分配器、云台/镜头控制器等。

2) 采用数字化、网络化传输的视频监控系统通常包括网络摄像机、网络电缆或光缆、数据交换机、监视器、磁盘阵列存储器、视频服务器等。

3) 高风险场合必要时可配置音频探测器、监听、录音和音视频同步切换设备，以便于

图像及声音复核。

(2) GB 50395—2007《视频安防监控系统工程设计规范》中的规定：

4.0.1 视频安防监控系统包括前端设备、传输设备、处理/控制设备和记录/显示设备四部分。

5.0.1 视频安防监控系统应对需要进行监控的建筑物内(外)的主要公共活动场所、通道、电梯(厅)、重要部位和区域等进行有效的视频探测与监视,图像显示、记录与回放。

5.0.4 系统控制功能应符合下列规定:

1 系统应能手动或自动操作,对摄像机、云台、镜头、防护罩等的各种功能进行遥控,控制效果平稳、可靠。

2 系统应能手动切换或编程自动切换,对视频输入信号在指定的监视器上进行固定或时序显示,切换图像显示重建时间应能在可接受的范围内。

3 矩阵切换和数字视频网络虚拟交换/切换模式的系统应具有系统信息存储功能,在供电中断或关机后,对所有编程信息和时间信息均应保持。

4 系统应具有与其他系统联动的接口。当其他系统向视频系统给出联动信号时,系统能按照预定工作模式,切换出相应部位的图像至指定监视器上,并能启动视频记录设备,其联动响应时间不大于4s。

5.0.5 监视图像信息和声音信息应具有原始完整性。

5.0.7 图像记录功能应符合下列规定:

2 系统应能记录下列图像信息:

1) 发生事件的现场及其全过程的图像信息;

2) 预定地点发生报警时的图像信息。

3 系统记录的图像信息应包含图像编号/地址、记录时的时间和日期。

5.0.9 具有视频移动报警的系统,应能任意设置视频警戒区域和报警触发条件。

8.0.1 第1款 摄像机供电宜由监控中心统一供电或由监控中心控制的电源供电。

### 15.3.2.2 视频安防监控系统指标

(1) GB 50395—2007《视频安防监控系统工程设计规范》中的规定:

5.0.10 在正常工作照明条件下系统图像质量的性能指标应符合以下规定:

1 模拟复合视频信号应符合以下规定:

视频信号输出幅度  $1V_{p-p} \pm 3dB$  VBS

(编者注:VBS为图像信号、消隐脉冲和同步脉冲组成的全电视信号。)

实时显示黑白电视水平清晰度 $\geq 400TVL$

实时显示彩色电视水平清晰度 $\geq 270TVL$

回放图像中心水平清晰度 $\geq 220TVL$

黑白电视灰度等级 $\geq 8$

随机信噪比 $\geq 36dB$

2 数字视频信号应符合以下规定:

单路画面像素数量 $\geq 352 \times 288$  (CIF)

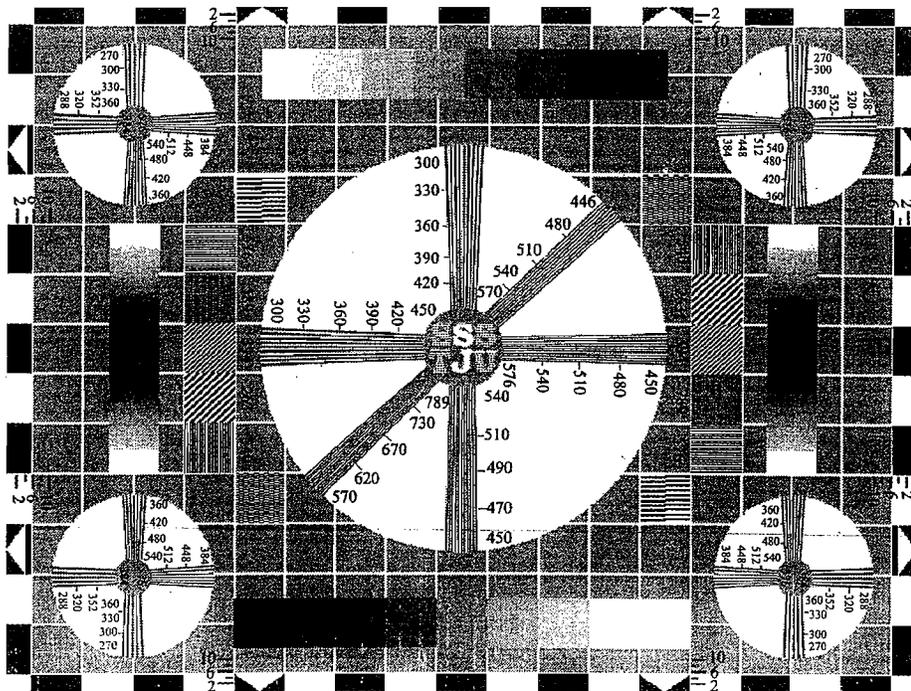
（编者注：CIF 为标准化图像格式）

单路显示基本帧率  $\geq 25f_{ps}$

15

（2）技术指标中，清晰度 TVL 及灰度的概念见 GB/T 50525—2010《视频显示系统工程测量规范》附录 A。

附录 A 复合测试图示例



附录 A 复合测试

### 15.3.2.3 摄像机的选型与设置

（1）GB 50395—2007《视频安防监控系统工程设计规范》中的规定：

6.0.1 摄像机的选型与设置应符合以下规定：

- 1 为确保系统总体功能和总体技术指标，摄像机选型要充分满足监视目标的环境照度、安装条件、传输、控制 and 安全管理需求等因素的要求。
- 2 监视目标的最低环境照度不应低于摄像机靶面最低照度的 50 倍。
- 3 监视目标的环境照度不高，而要求图像清晰度较高时，宜选用黑白摄像机；监视目标的环境照度不高，且需安装彩色摄像机时，需设置附加照明装置。
- 4 在监视目标的环境中可见光照明不足或摄像机隐蔽安装监视时，宜选用红外灯作光源。
- 5 应根据现场环境照度变化情况，选择适合的宽动态范围的摄像机；监视目标的照度变化范围大或必须逆光摄像时，宜选用具有自动电子快门的摄像机。
- 6 摄像机镜头安装宜顺光源方向对准监视目标，并宜避免逆光安装。
- 9 摄像机应有稳定牢固的支架，摄像机应设置在监视目标区域附近不易受外界损

伤的位置,设置位置不应影响现场设备运行和人员正常活动,同时保证摄像机的视野范围满足监视的要求。设置的高度,室内距地面不宜低于2.5m;室外距地面不宜低于3.5m。

10 电梯轿厢内的摄像机应设置在电梯轿厢门侧顶部左或右上角,并能有效监视乘员的体貌特征。

(2) GB 50198—2011《民用闭路监视电视系统工程技术规范》中的规定:

3.2.2 选择不同灵敏度的摄像机应根据监视目标的环境照度来确定,监视目标的最低环境照度宜高于摄像机最低照度的10倍。

#### 15.3.2.4 镜头的选型与设置

GB 50395—2007《视频安防监控系统工程设计规范》中的规定:

6.0.2 镜头的选型与设置应符合以下规定(图6.0.2):

2 用于固定目标监视的摄像机,可选用固定焦距镜头,监视目标离摄像机距离较大时可选用长焦镜头;在需要改变监视目标的观察视角或视场范围较大时应选用变焦距镜头(注:一般与电动云台配套使用);监视目标离摄像机距离近且视角较大时可选用广角镜头。

3 镜头焦距的选择根据视场大小和镜头到监视目标的距离等来确定,可参照如下公式计算(编者注:即式6.0.2与图6.0.2)。

5 监视目标环境照度变化范围高低相差达到100倍以上,或昼夜使用的摄像机应选用自动光圈或遥控电动光圈镜头。

6 变焦镜头应满足最大距离的特写与最大视场角观察需求,并宜选用具有自动光圈、自动聚焦功能的变焦镜头。

#### 15.3.2.5 摄像机镜头的选择与计算

(1) GB 50395—2007《视频安防监控系统工程设计规范》第6.0.2条的附图与公式:

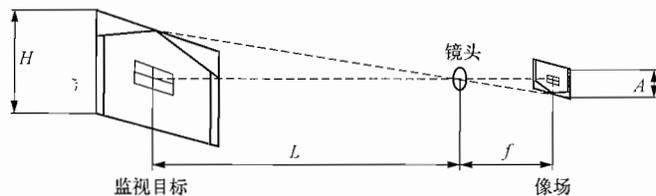


图 6.0.2 光学成像关系图

$$f = \frac{A \times L}{H} \quad (\text{式 6.0.2})$$

式中  $f$ ——焦距 (mm);  
 $A$ ——像场高/宽 (mm);  
 $L$ ——镜头到监视目标的距离 (mm);  
 $H$ ——视场高/宽 (mm)。

(2) 摄像机镜头焦距计算示意图, 如图 15-3-2 所示。

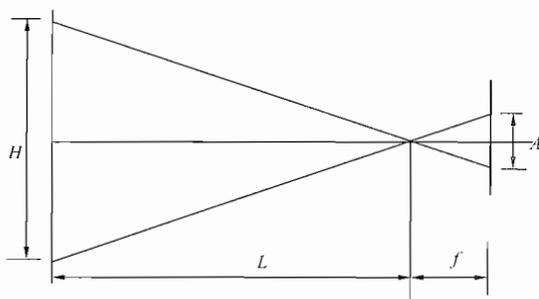


图 15-3-2 摄像机镜头焦距计算示意图

根据相似三角形关系  $\frac{f}{L} = \frac{A}{H}$ , 故  $f = \frac{AL}{H}$ 。

(3) 摄像机镜头常用的焦距有: 4mm 广角镜头、6mm~8mm 普通镜头、16mm 长焦望远镜头等。常用变焦镜头的变焦倍数有: 3 倍、6 倍、10 倍、22 倍等。

(4) GB 50395—2007《视频安防监控系统工程设计规范》条文说明第 6.0.2 条解释:

上式中,  $f$  近似等于像距,  $L$  近似等于物距。

在物理原理上, 式中的  $f$  应为像距, 但摄像机镜头通常都是使用在物距远大于像距和镜头焦距的情况下, 物距通常为米级, 而焦距通常为毫米级, 根据下述的焦距公式, 可以得出, 像距通常非常接近于镜头的焦距, 在近似计算中, 可将像距直接代换为镜头焦距。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$

式中  $f$ ——镜头焦距;

$u$ ——观察的物体的物距;

$v$ ——物体所成像的像距。

编者注: 物距  $u$  相当于该规范式 6.0.2 中的  $L$ 。当  $u \gg v$  时,  $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ ,  $\frac{1}{f} \approx \frac{1}{\infty} + \frac{1}{v}$ ,  $\frac{1}{f} \approx \frac{1}{v}$ ,  $f \approx v$ , 即焦距近似等于像距。

### 15.3.2.6 数字视频监控系统的设计要求

GB 50198—2011《民用闭路监视电视系统工程技术规范》中的规定:

3.2.9 当通过网络传输时可采用网络摄像机, 网络摄像机的选择应符合下列规定:

1 网络摄像机的组成应包括镜头、滤光器、图像传感器、图像压缩和具有网络连接功能的部件。

2 网络摄像机应具有 IP 地址等网络参数设置的功能。

3 特殊需要时, 网络摄像机可具备移动探测、警报信号输出/输入设备和电子邮件支持等功能。

3.2.13 视频编码设备的标准应符合下列规定:

1 图像分辨率不宜低于  $352 \times 288$ , 根据应用要求可采用  $704 \times 576$ 、 $1280 \times 720$ 、

1920×1080 等更高的分辨率。

3.3.10 条文说明：当监视电视数字信号在 IP 网络中传输时，系统网络带宽的设计应按下列原则估算：

4 对于有线 IP 网络，352×288 分辨率的单路视频编码率可采用 512kbps 估算，其他分辨率的单路视频编码率  $B$  按下式进行估算：

$$B = \frac{H \times V}{352 \times 288} \times 512 \quad (3.3.10)$$

式中  $B$ ——视频编码率 (kbps)；

$H$ ——水平方向像素分辨率；

$V$ ——垂直方向像素分辨率。

5 宜根据联网系统的应用情况预留网络带宽。

3.4.6 每路存储的图像分辨率必须不低于 352×288，每路存储的时间必须不少于 7×24h。

3.4.10 监控（分）中心的显示设备的分辨率必须不低于系统对采集规定的分辨率。

3.4.11 监控（分）中心电视墙的设置应符合下列规定：

3 电视墙后侧距墙不应小于 0.8m。若电视墙后侧靠窗，应在窗外加装遮阳伞。电视墙上的主监视器到操作人员的距离应是监视器屏面高度的 4~6 倍。

### 15.3.2.7 视频安防监控系统中应注意的问题

(1) 一般大型民用公共建筑的主要出入口、走廊、电梯厅、电梯轿厢内、自动扶梯口、商场的货场、自选商场、收银台处、财务部门、重要物品库等处应设摄像机。银行、博物馆等高风险场所的防护要求，详见《安全防范工程技术规范》和其他有关规范。

(2) 出入口、走廊等处，需要小范围或窄范围监视时，应采用固定摄像机；在电梯厅、电梯轿厢内等处短距离、宽角度监视时，应采用固定焦距广角摄像机；在汽车库、展览大厅、候机厅、大型开敞式商场、室外广场等处需要大范围并远距离监视时，宜采用带云台与变焦镜头的摄像机或一体化快球摄像机，必要时可选用带预置位控制的云台。在狭长的走廊、通道等处，为减少盲区、节约投资和适于观看，宜采用两台摄像机，而不宜采用带云台摄像机（1 台带云台、解码器、变焦镜头的摄像机，造价约为同档次固定摄像机的数倍）。

(3) 在商场、饭店、展览中心等需要识别颜色的场合，应采用彩色摄像机；在照度较低、清楚度要求高的场合，宜采用黑白摄像机；在室外或照度变化大的场合，宜采用具有低照度时自动转为黑白图像的彩色摄像机，应避免逆光安装，并应采用自动光圈镜头。

(4) 周界防护、重点防护部位等夜晚需要使用摄像机的部位，应采用低照度摄像机，必要时可配红外灯。

(5) 宜将摄像机设置为具有移动图像报警功能。

(6) 一般中小工程，传输距离不大于 300m 时，可采用视频信号直接传输方式。视频信号为不经调制的 0~6MHz 基带视频信号，应采用 SYV 系列视频同轴电缆。

(7) 小型监控系统（如 16 路以下）可由硬盘录像机、监视器等组成，可不设矩阵切换器、电视墙。大中型监控系统需要同时监视多个画面时，可采用硬盘录像机加矩阵切换器、

电视墙的方式，监控中心应设硬盘录像机及视频分配器（或硬盘录像机带有环入、环出功能）、矩阵切换器、监视器等。

(8) 规模比较大、传输距离比较远的监控系统，宜采用数字视频监控系统，采用网络摄像机、综合布线、数据交换机等组网。视频监控图像传输信息量比较大，一般应独立组成安防网络，设置独立的综合布线系统、数据交换机和干线光缆，不宜与数据、语音通信的综合布线系统合用一套网络。安防监控中心应设数据交换机、视频服务器、监视器、磁盘阵列存储器等。

(9) 视频监控系统应设置与入侵报警系统的接口，发生入侵报警后联锁启动录像，并将报警区域的图像自动切换，显示于主屏幕中。

(10) 当摄像机距离监控中心较远、低压（12V 或 24V）直接供电困难时，可采用分两级供电的方式，即从监控中心至各层弱电间采用交流 220V 供电，经设于弱电间的电源适配器给本层的多个摄像机供电。与分散供电相比，可以减少电源适配器的数量，（每层的几台摄像机可合用 1 个电源适配器），更安全、可靠、灵活、方便、美观，亦便于扩充。同时不必到处为摄像机留电源插座，减少了弱电与电气配电之间的交叉关系，减少了各个分包商之间的配合问题。

(11) 室外摄像机或安装于空旷场所建筑物外墙上的摄像机，应设电涌保护器，并应考虑温度控制、防尘、防雨等防护罩问题。

### 15.3.2.8 视频监控系统图示例

模拟视频安防监控系统如图 15-3-3 所示；数字视频安防监控系统如图 15-3-4 所示。

## 15.3.3 入侵报警系统

### 15.3.3.1 入侵报警系统的设计要求

GB 50394—2007《入侵报警系统工程设计规范》中的规定：

4.0.1 入侵报警系统通常由前端设备（包括探测器和紧急报警装置）、传输设备、处理/控制/管理设备和显示/记录设备四个部分构成。

4.0.2 根据信号传输方式的不同，入侵报警系统组建模式宜分为以下模式：

1 分线制：探测器、紧急报警装置通过多芯电缆与报警控制主机之间采用一对一专线相连（图 4.0.2-1）。（编者注：图从略）

2 总线制：探测器、紧急报警装置通过其相应的编址模块与报警控制主机之间采用报警总线（专线）相连（图 4.0.2-2）。

5.1.1 入侵报警系统的设计应符合整体纵深防护和局部纵深防护的要求，纵深防护体系包括周界、监视区、防护区和禁区。

5.2.2 入侵报警系统不得有漏报警。

5.2.3 入侵报警功能设计应符合下列规定：

1 紧急报警装置应设置为不可撤防状态，应有防误触发措施，被触发后应自锁。

2 当下列任何情况发生时，报警控制设备应发出声、光报警信息，报警信息应能保持到手动复位，报警信号应无丢失。

1) 在设防状态下，当探测器探测到有入侵发生或触动紧急报警装置时，报警控制设备应显示出报警发生的区域或地址；

2) 在设防状态下，当多路探测器同时报警（含紧急报警装置报警）时，报警控制设备应依次显示出报警发生的区域或地址。

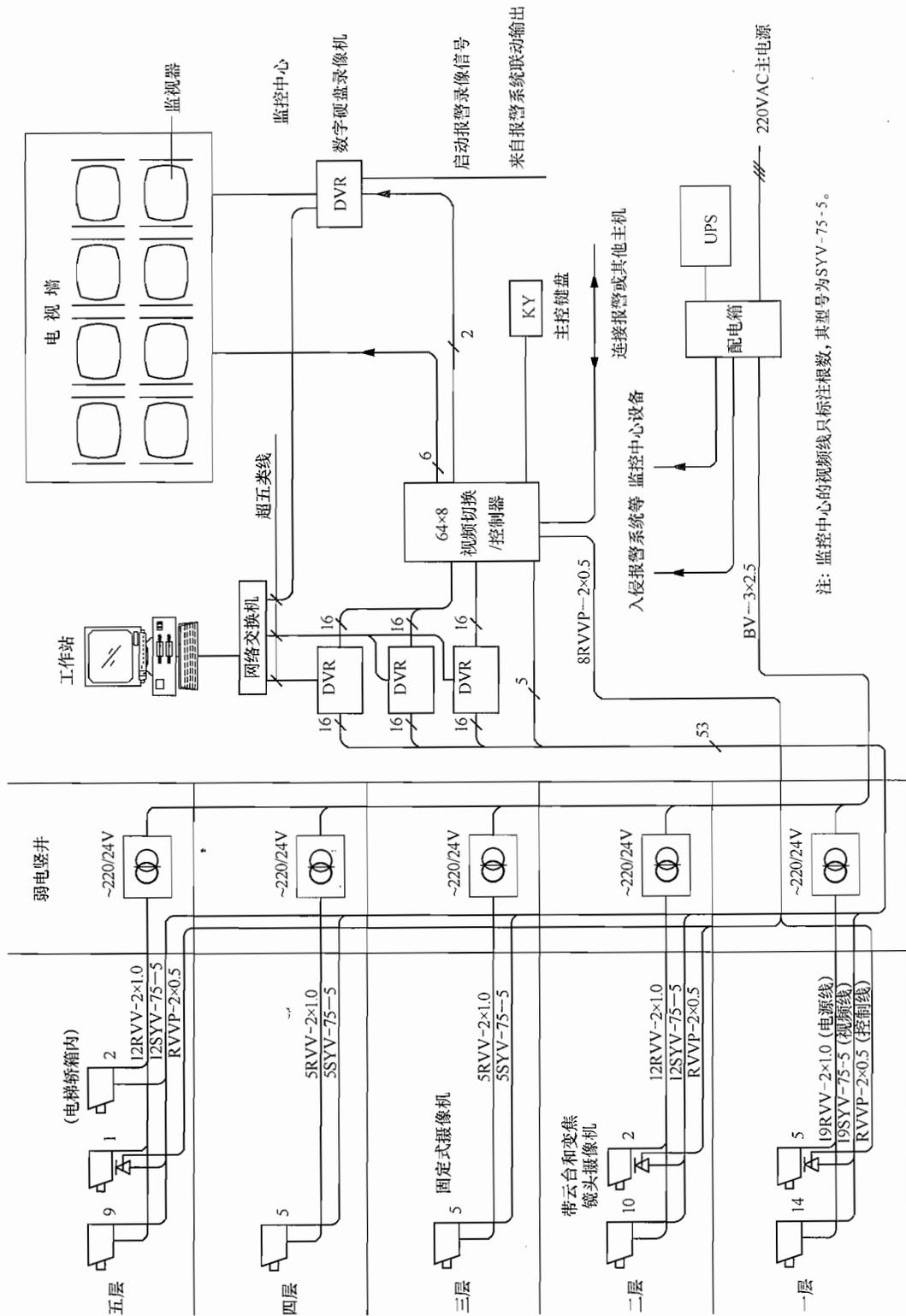
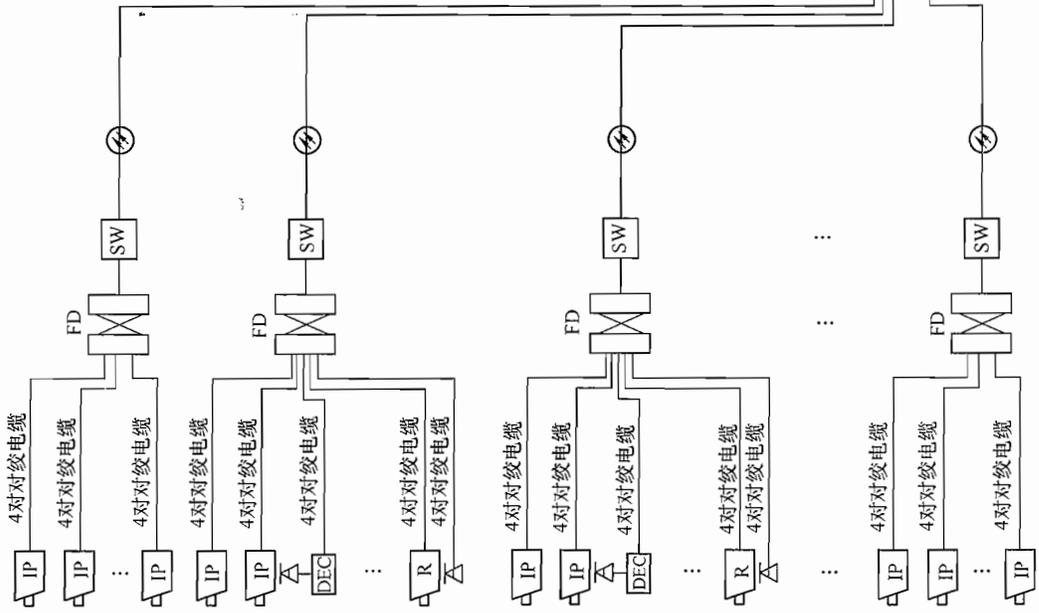


图 15-3-3 模拟视频安防监控系统



注：

1. 本系统为全网络化视频监控安防系统，摄像机采用网络摄像机。
2. 与外网相连时应考虑网络安全性能要求，可采用设置防火墙等措施。
3. 网络摄像机可采用POE供电方式，用4对网线同时传输信号和低压供电。

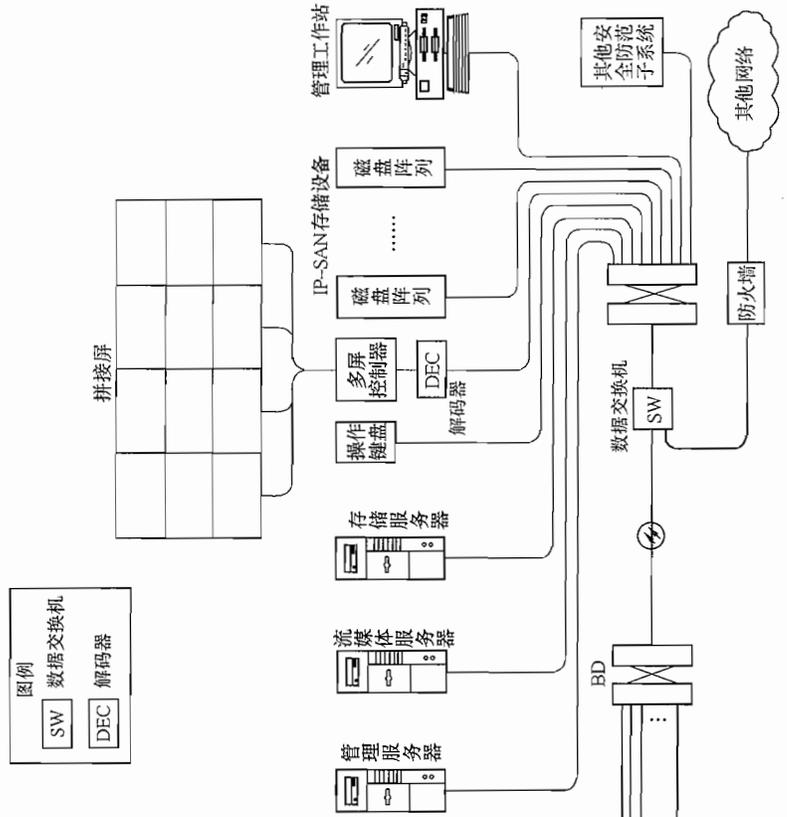


图 15-3-4 数字视频安防监控系统

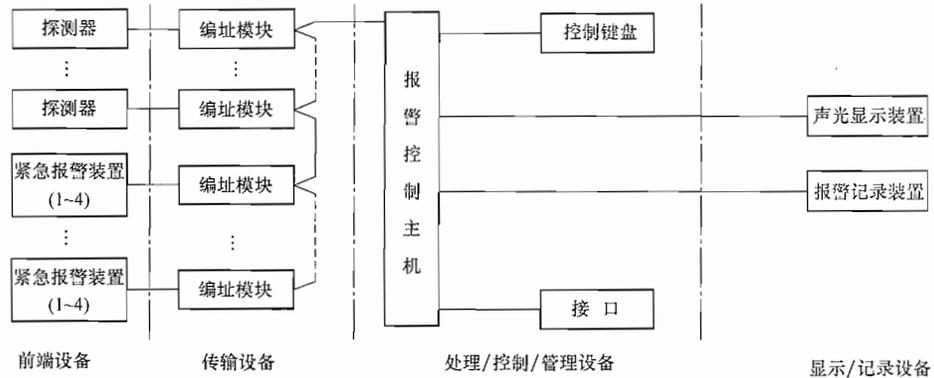


图 4.0.2-2 入侵报警系统构成的总线制模式

3 报警发生后，系统应能手动复位，不应自动复位。

4 在撤防状态下，系统不应探测器的报警状态做出响应。

#### 5.2.4 防破坏及故障报警功能设计应符合下列规定：

当下列任何情况发生时，报警控制设备上应发出声、光报警信息，报警信息应能保持到手动复位，报警信号应无丢失：

- 1 在设防或撤防状态下，当入侵探测器机壳被打开时。
- 2 在设防或撤防状态下，当报警控制器机盖被打开时。
- 3 在有线传输系统中，当报警信号传输线被断路、短路时。
- 4 在有线传输系统中，当探测器电源线被切断时。
- 5 当报警控制器主电源/备用电源发生故障时。

6 在利用公共网络传输报警信号的系统中，当网络传输发生故障或信息连续阻塞超过 30s 时。

6.1.1 探测器的选型除应符合本规范第 3.0.3 条的规定外，尚应符合下列规定：

- 1 根据防护要求和设防特点选择不同探测原理、不同技术性能的探测器。多技术复合探测器应视为一种技术的探测器。
- 2 所选用的探测器应避免各种可能的干扰，减少误报，杜绝漏报。
- 3 探测器的灵敏度、作用距离、覆盖面积应能满足使用要求。

6.1.2 周界用入侵探测器的选型应符合下列规定：

1 规则的外周界可选用主动式红外入侵探测器、遮挡式微波入侵探测器、振动入侵探测器、激光式探测器、光纤式周界探测器、振动电缆探测器、泄漏电缆探测器、电场感应式探测器、高压电子脉冲式探测器等。

2 不规则的外周界可选用振动入侵探测器、室外用被动红外探测器、室外用双技术探测器、光纤式周界探测器、振动电缆探测器、泄漏电缆探测器、电场感应式探测器、高压电子脉冲式探测器等。

4 内周界可选用室内用超声波多普勒探测器、被动红外探测器、振动入侵探测器、室内用被动式玻璃破碎探测器、声控振动双技术玻璃破碎探测器等。

6.1.3 出入口部位用入侵探测器的选型应符合下列规定：

- 1 外周界出入口可选用主动式红外入侵探测器、遮挡式微波入侵探测器、激光式

探测器、泄漏电缆探测器等。

2 建筑物内对人员、车辆等有通行时间界定的正常出入口（如大厅、车库出入口等）可选用室内用多普勒微波探测器、室内用被动红外探测器、微波和被动红外复合入侵探测器、磁开关入侵探测器等。

3 建筑物内非正常出入口（如窗户、天窗等）可选用室内用多普勒微波探测器、室内用被动红外探测器、室内用超声波多普勒探测器、微波和被动红外复合入侵探测器、磁开关入侵探测器、室内用被动式玻璃破碎探测器、振动入侵探测器等。

6.1.4 室内用入侵探测器的选型应符合下列规定：

1 室内通道可选用室内用多普勒微波探测器、室内用被动红外探测器、室内用超声波多普勒探测器、微波和被动红外复合入侵探测器等。

2 室内公共区域可选用室内用多普勒微波探测器、室内用被动红外探测器、室内用超声波多普勒探测器、微波和被动红外复合入侵探测器、室内用被动式玻璃破碎探测器、振动入侵探测器、紧急报警装置等。宜设置两种以上不同探测原理的探测器。

3 室内重要部位可选用室内用多普勒微波探测器、室内用被动红外探测器、室内用超声波多普勒探测器、微波和被动红外复合入侵探测器、磁开关入侵探测器、室内用被动式玻璃破碎探测器、振动入侵探测器、紧急报警装置等。宜设置两种以上不同探测原理的探测器。

6.1.5 探测器的设置应符合下列规定：

1 每个/对探测器应设为一个独立防区。

2 周界的每一个独立防区长度不宜大于200m。

3 需设置紧急报警装置的部位宜不少于2个独立防区，每一个独立防区的紧急报警装置数量不应大于4个，且不同单元空间不得作为一个独立防区。

4 防护对象应在入侵探测器的有效探测范围内，入侵探测器覆盖范围内应无盲区，覆盖范围边缘与防护对象间的距离宜大于5m。

7.1.3 防区较少，且报警控制设备与各探测器之间的距离不大于100m的场所，宜选用分线制模式。

7.1.4 防区数量较多，且报警控制设备与所有探测器之间的连线总长度不大于1500m的场所，宜选用总线制模式。

### 15.3.3.2 入侵报警系统中应注意的问题

(1) 银行营业厅、博物馆、财务室、计算机网络中心机房、重要档案室、贵重物品处、展览馆等处，应设置入侵探测器。根据现场情况，一般场所宜采用吸顶式或壁挂式红外/微波双鉴式探测器；狭长门窗等处宜设幕帘式红外探测器、主动红外多波束探测器，博物馆等高大空间宜采用三技术探测器，重要房间窗户处可设玻璃破碎探测器等。必要时可设音频探测器，以便进行声音复核。改建项目布线不方便时，可设无线入侵探测器。

(2) 周界规整的一般场所可设主动红外光束对射式周界探测器。根据现场情况，可采用单波束、双波束、四波束或多波束周界报警探测器。根据需要探测的距离选取不同规格的产品，如40、60、100、200m等。

(3) 周界不整齐又非常重要的场所，可采用感应电缆式周界报警系统、泄漏电缆周界

报警系统、微波报警系统、电子围栏等措施，并宜配套安装带红外灯的摄像机，报警后自动启动录像，以便进行图像复核。

(4) 入侵报警系统规模小时，宜采用 RVV-5×0.5 多线传输方式，规模较大时，应采用总线模块报警方式。入侵报警系统应具备断线报警功能。

(5) 探测器电源宜集中供给。周界报警系统的探测器距离较远、压降太大时，可采用 220V AC 电源分组供电，将电源适配器安装于探测器附近，有条件时可在围墙内暗装电源箱，电源箱及接线盒应防水。

(6) 自选商场、敞开式百货商场、图书馆、书店等处，宜设置防止非法带出货物的安检门报警装置。

(7) 被动红外加微波双鉴探测器是一种多技术探测器，是指运用两种或两种以上检测技术合成的探测装置。多技术探测器的使用大大降低了系统的误报率，提高了报警的可靠性与准确性，是目前应用最广的探测器之一。

(8) 视频移动探测器，利用摄像机作为探测器，通过检测视频信号的变化来触发报警。先用摄像机拍摄一幅监控目标图像作为标准，并与随后的一组摄像机图像进行分析对比，有变化时报警。对于金融系统和博物馆内要害部位的安全防范，是一种既方便又可靠的报警装置。

(9) 玻璃破碎探测器，利用压电式微音器，装于面对玻璃的位置。由于只对 10~15kHz 高频的玻璃破碎声音进行有效的检测，因此不会因玻璃本身的振动而引起反应。这种探测器普遍应用于对玻璃门窗的防护。

(10) 手动及脚挑报警开关，常用于银行、收银处等处人工报警。

(11) 开关入侵探测器，一般由开关传感器（如微动开关、干簧继电器、门磁开关等）与相关电路组成常开或常闭式报警装置。

(12) 高压电子脉冲式探测器（又称电子围栏），可用于外周界规则或不规则的周界报警系统，同时具有一定的威慑作用。

(13) 无线传输探测器。在防范区域分散或不易架设传输线的地方，无线传输探测器有其独特的作用。几乎用任何型式的传感器所组成的探测器都能组成无线探测器，这就给用户带来了很大的方便。

### 15.3.4 出入口控制系统（即门禁系统）

#### 15.3.4.1 出入口控制系统的设计要求

GB 50396—2007《出入口控制系统工程设计规范》中的规定：

4.0.1 出入口控制系统主要由识读部分、传输部分、管理/控制部分和执行部分以及相应的系统软件组成。

3.0.4 出入口控制系统工程的设计，应符合下列要求：

2 出入口控制系统的设置必须满足消防规定的紧急逃生时人员疏散的相关要求。

3 供电电源断电时系统闭锁装置的启闭状态应满足管理要求。

5.1.7 软件及信息保存应符合下列规定：

3 当供电不正常、断电时，系统的密钥（钥匙）信息及各记录信息不得丢失。

5.1.8 系统应能独立运行，并应能与电子巡查、入侵报警、视频安防监控等系统联动，宜与安全防范系统的监控中心联网。

6.0.2 设备的设置应符合下列规定：

2 采用非编码信号控制和/或驱动执行部分的管理与控制设备，必须设置于该出入口的对应受控区、同级别受控区或高级别受控区内。

7.0.4 执行部分的输入电缆在该出入口的对应受控区、同级别受控区或高级别受控区外的部分，应封闭保护，其保护结构的抗拉伸、抗弯折强度应不低于镀锌钢管。

8.0.1 供电……还应符合下列规定：

3 备用电源应保证系统连续工作不少于48h，且执行设备能正常开启50次以上。

9.0.1 系统安全性设计……应符合下列规定：

2 系统必须满足紧急逃生时人员疏散的相关要求。当通向疏散通道方向为防护面时，系统必须与火灾报警系统及其他紧急疏散系统联动，当发生火警或需紧急疏散时，人员不使用钥匙应能迅速安全通过。

#### 15.3.4.2 出入口控制系统设计中应注意的问题

(1) 银行、博物馆、展览馆、写字楼、商场等，在内部人员与外来人员分界处、安防/消防监控中心、网络中心机房、通信机房、财务部门、重要库房等处，应设置出入口控制系统。

(2) 出入口控制系统一般包括控制主机、门禁控制器、读卡器、电子门锁及门磁开关、出门按钮等。

(3) 一般场合的出入口控制系统宜采用非接触式感应卡，单向设读卡器，控制无关人员进入。重要部门可设双向读卡器、指纹识别器等，以便于实时记录人员出入情况，以备核查。金库、文物库等特别重要部门可设掌形仪、虹膜识别装置等。

(4) 出入口控制系统联网一般采用RS485接口、手拉手方式用4芯或8芯屏蔽线连接。如受控门比较分散、线路较长、单独布线联网不便时，可采用网络型联网方式，接入综合布线和计算机网络系统。

(5) 受控房间为双扇门或多扇门时，为节约投资，可在主要入口设电子锁，其余门扇处安装机械锁闭装置和门磁开关，监视其开关状况。

(6) 受控门距离弱电间不太远时，为安全可靠、便于维护、节约投资，门禁控制器宜安装于弱电间内，并尽量采用多门门禁控制器。

(7) 控制器应设在受控区内，不应安装在门外走廊的墙上或吊顶内。

(8) 为工程简单，酒店客房一般采用非联网型电子门锁及IC卡。

#### 15.3.4.3 出入口控制系统示意图

出入口控制系统示意图如图15-3-5所示。

#### 15.3.5 电子巡查系统（即巡更系统）

(1) 银行、博物馆、大型商场、酒店、写字楼、住宅小区、厂区等场所，根据用户要求可设置离线式或在线式电子巡查系统。

(2) 为节省投资、减少工程量，除用户有特殊要求外，一般工程宜采用离线巡查方式。在主要出入口、楼梯口、主要通道等巡查路线上设无源巡查点，在安防控制室设巡查主机。保安人员手持巡查棒沿巡查路线读取信息，然后将信息输入到巡查主机。

(3) 银行、博物馆等对实时性能要求高的高风险场合，应采用在线式巡查系统。此时应设在线式巡查按钮或钥匙、数据采集器、联网线路、信息处理主机、UPS电源等。

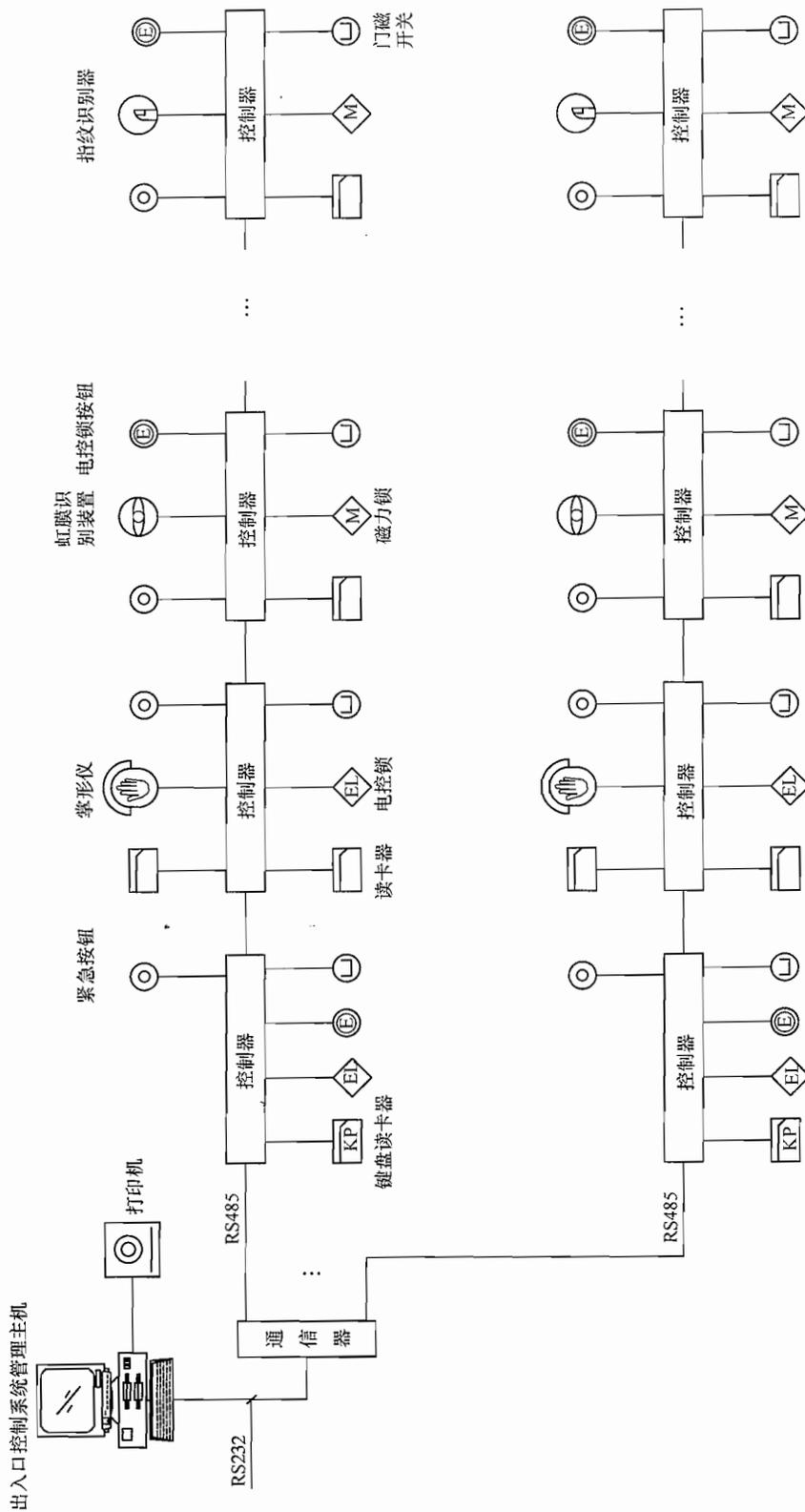


图 15-3-5 出入口控制系统示意图

注:

1. 本图为基于总线结构的系统, 总线与系统管理主机之间通过通信器连接, 控制器与控制器之间通过RS485总线连接。
2. 通信器的通信端口数量根据所连接总线数量确定。
3. 前端设备的选用、选型由工程设计确定。

(4) 可将离线式巡查系统和出入口控制系统相结合, 将读卡器作为巡查系统的在线巡查点, 组成综合的巡查监控系统。

### 15.3.6 停车场管理系统

#### 15.3.6.1 系统的组成

停车场管理系统通常包括中央控制计算机、自动识别装置、车票发放及检验装置、挡车器、车辆检测器、监控摄像机、车位提示牌等设备。

#### 15.3.6.2 系统的分类及适用对象

停车场根据其使用对象可划分为内部停车场、公用停车场及综合停车场三种。内部停车场主要面向该停车场的固定车主及长期租用车位的单位及个人。此种停车场的特点是使用者固定, 禁止外部车主使用, 使用者对设施的使用时间长、次数多且高峰时间集中, 对停车场管理的安全性、可靠性及处理速度要求较高。公用停车场主要为临时性散户提供服务。使用者通常是临时一次性使用, 数量多、时间短。而综合停车场集各种对象于一身, 情形复杂一些。

#### 15.3.6.3 停车场管理系统的设计

(1) 在大型建筑的汽车库、停车场应设停车场管理系统。根据内部停车、外来车辆管理等需要, 一般含: 管理主机、读卡器、出票机、栏杆机、控制器、地感线圈(或红外探测器)、车位显示装置、摄像机等。

(2) 入口处宜设远距离感应读卡器, 以方便不停车刷卡, 加快车辆进出速度, 或设车牌识别系统。

(3) 为安全, 出入口宜设摄像机和进出车辆图像对比功能。

(4) 一般工程可按整个停车场或按层设空余车位显示装置。根据用户要求和投资情况, 必要时可在每个车位上方设车位状态探测器, 车道上设车位引导显示屏, 控制室可显示每个车位的空闲状态, 并通过引导屏引导车辆尽快就位, 提高车库利用率和服务水平。

#### 15.3.6.4 停车场管理系统图

停车场(库)管理系统设备、线路平面图如图 15-3-6 所示。

### 15.3.7 访客对讲系统

#### 15.3.7.1 访客对讲系统的组成

访客对讲系统一般包括单元门口主机、用户分机、电控门锁、供电电源及管理主机(极简单除外)。

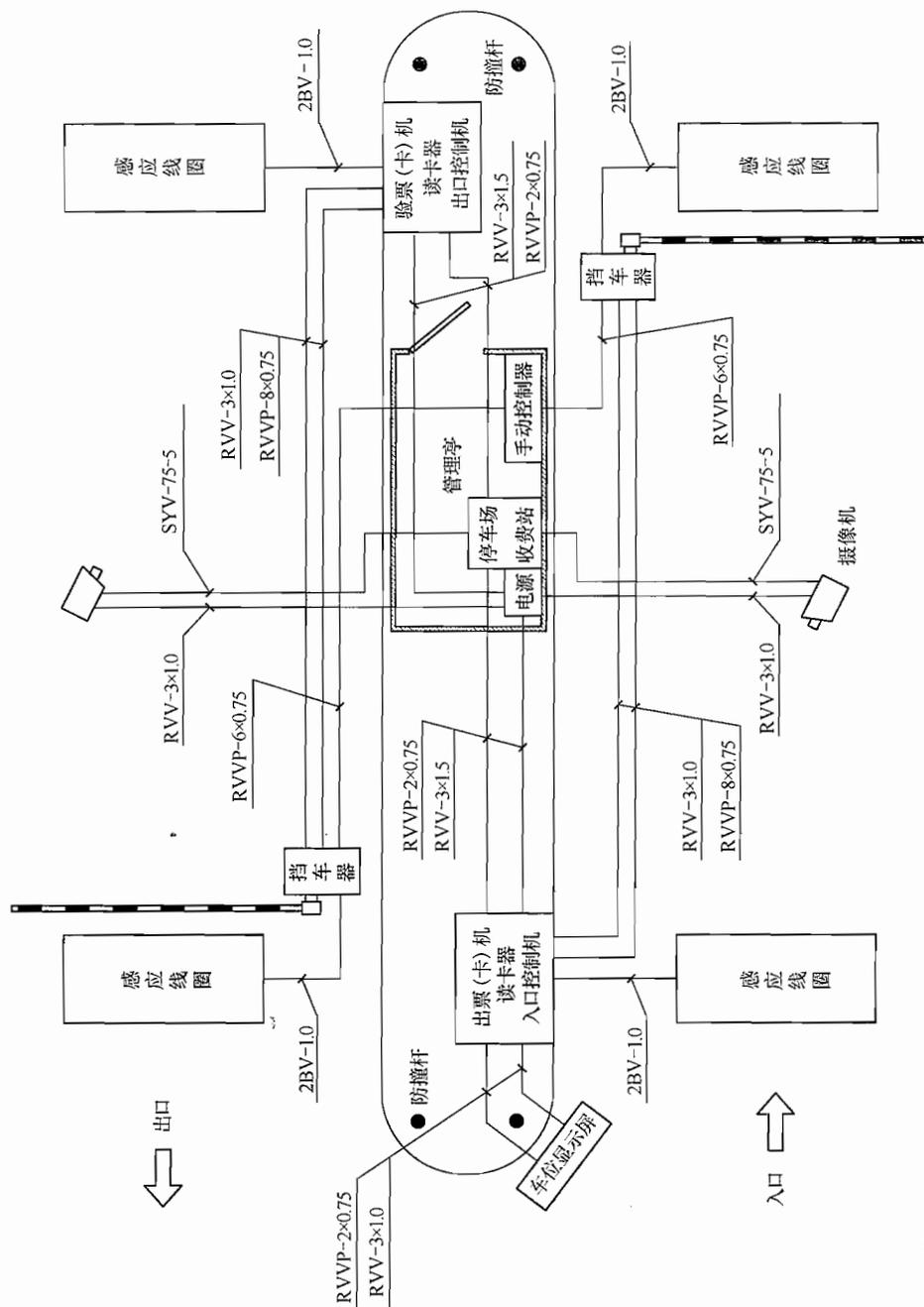
在小区出入口保安室内安装管理主机, 各单元门口安装防盗门及单元门口主机, 住户室内安装用户分机。住户刷卡或按密码开门进入。来访者在单元门口通过单元门口主机呼叫住户, 住户同意后开启单元电控门锁, 来访者方可进入楼内。

#### 15.3.7.2 访客对讲系统的分类

对讲系统从简单到复杂、从独立分散到整体联网基本上分以下四种(每种又可分为单纯对讲型与可视对讲型):

(1) 单户型。也称别墅型一对一(可视)对讲机, 供单户使用, 其特点是在别墅内客厅、厨房、浴厕等多处均安装对讲分机, 以达到方便主客对讲和开门功能。

(2) 单元及大楼型。目前使用较多的一种形式, 由住宅单元或大楼入口处电控门锁、对讲开门主机及各户室内机组成。系统多为总线编码方式, 具有户数容量大、安装容易、配



注：  
 1.本图为一入、一出的停车场(库)管理系统设备图布置。  
 2.图中缆线型号及规格仅供参考。

图 15-3-6 停车场(库)管理系统设备、线路平面图

线简单等特点。

(3) 小区联网型。在单元型基础上使各单元（各楼）与小区物业管理部门之间联网，具有专门的管理主机，系统可多达成百上千户。

(4) 智能家居控制型。在小区联网型可视对讲系统技术基础上，采用带有对讲功能的智能家居控制器，增加有关传感器等设备和线路，可增加火灾报警、入侵报警、紧急求助报警、自动拨打电话报警、智能表（水表、电表、煤气表等）信号远传等多项功能，组成智能家居控制系统。

### 15.3.7.3 访客对讲系统的设计

(1) 大楼门口主机宜安装在门口防盗门框架上或采用墙内嵌入式安装，门口机中心距地宜为 1.5m，室内分机宜设置在住户门厅墙壁上或客厅内，安装高度距地宜为 1.4~1.5m。主机应自带备用电源，市电停电后能自动投入，蓄电池应至少保证系统在停电情况下连续工作 24h。系统的供电应由配电箱公共回路引出。

(2) 住宅区应设报警值班室，内设控制管理主机，实现小区内访客对讲系统统一管理和报警。独立管理的高层住宅首层应设不少于 6m<sup>2</sup> 的值班室（兼报警用）。

(3) 一般产品可视对讲与非可视对讲系统可以兼容，工程设计中可根据可视对讲系统布线，由用户根据各自需求安装可视或非可视对讲分机。

### 15.3.7.4 DBJ 01-608—2002《北京市住宅区及住宅安全防范设计标准》中的规定：

（注：此为北京市施工图审查要点，其他地区可作为参考。）

3.1.1 住宅楼入口或单元入口应设访客对讲装置，住户应设对讲机，并附有紧急报警按钮，有条件时宜设可视对讲装置。

3.1.2 应在所有通往楼内的通道口，包括地下车库直接通向楼内的通道，安装与楼门相同的访客对讲装置或其他电子出入管理系统。

3.1.3 各楼门对讲信号线应引至报警值班室（控制中心）。

### 15.3.7.5 访客对讲系统示意图

访客对讲系统示意图如图 15-3-7 所示。

### 15.3.8 安防系统集成及一卡通系统

#### 15.3.8.1 安防系统集成

设有多个安防子系统时，应考虑安防系统的集成设计，实现资源共享、联动控制，应能实现（但不限于）以下基本功能：

(1) 出入口控制系统必须考虑与消防报警系统的联动，保证火灾情况下的紧急逃生。

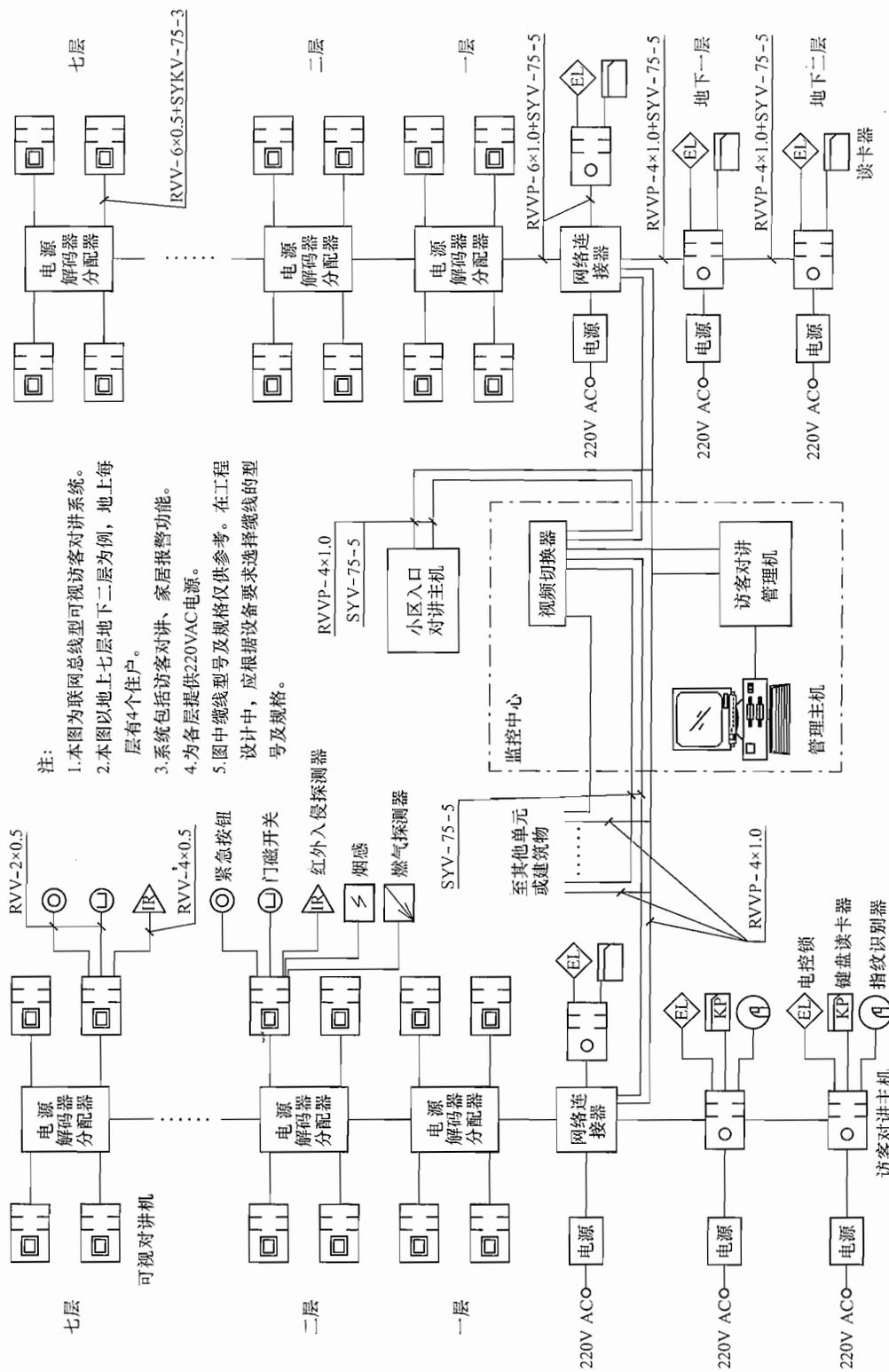
(2) 周界报警、入侵报警、出入口控制等系统报警后，视频监控系统应能立即自动弹出报警部位的图像以供复核，自动打开红外灯或附近灯光，控制录像机对报警区域以较高清晰度录像等。

(3) 各个子系统之间应采用开放的、互相兼容的通信协议和接口。

(4) 系统应有相应的信息处理、控制、管理能力，有相应容量的数据库。

#### 15.3.8.2 一卡通系统

(1) 在出入口控制系统的基础上，通过设置统一的智能卡和数据库，在有关部位设置读卡器和操作主机，一个单位可以很方便地实现出入口控制、电子巡查、考勤管理、就餐收



- 注:
- 1.本图为联网总线型可视访客对讲系统。
  - 2.本图以地上七层地下二层为例，地上每层有4个住户。
  - 3.系统包括访客对讲、家居报警功能。
  - 4.为各层提供220VAC电源。
  - 5.图中线缆型号及规格仅供参考。在工程设计中，应根据设备要求选择线缆的型号及规格。

图 15-3-7 访客对讲系统示意图

费、内部消费、停车场管理、图书资料借阅、会议签到等一系列电子化管理，各系统主机有分有合配合工作，资源共享，各负其责，组成方便、高效、快捷的一卡通管理系统。

(2) 在剧场、电影院、体育场馆等处，可设电子售票与检票系统，包括售票计算机、读卡器、检票管理计算机、手持检票机、相应软件等。电子售票系统可以实时了解和统计客流情况与经营情况。

(3) 目前全国不少城市公共交通、地铁检票等已实现了一卡通，可随时统计客流情况，并根据客流情况调配车辆，优化线路走向。方便了乘客，同时还可减少车上行窃等刑事案件的发生，大大提高了管理水平。

### 15.3.8.3 安全防范系统集成示意图

安全防范系统集成示意图如图 15-3-8 所示。

## 15.4 通信网络系统

### 15.4.1 通信网络系统的概况

#### 15.4.1.1 通信网络系统包含的内容

通信网络系统的内容包括：电话通信系统、电话管线、计算机网络系统、移动通信室内覆盖系统、通信接入网、卫星通信系统。

#### 15.4.1.2 设计中应遵循的规范

- (1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》；
- (2) GB/T 50622—2010《用户电话交换系统工程设计规范》；
- (3) GB/T 50605—2010《住宅区与住宅建筑内通信设施工程设计规范》；
- (4) GB 50846—2012《住宅区和住宅建筑内光纤到户通信设施工程设计规范》；
- (5) GB 50373—2006《通信管道与通道工程设计规范》；
- (6) GB 50174—2008《电子信息系统机房设计规范》；
- (7) GB 50314—2015《智能建筑设计标准》。

### 15.4.2 电话通信系统

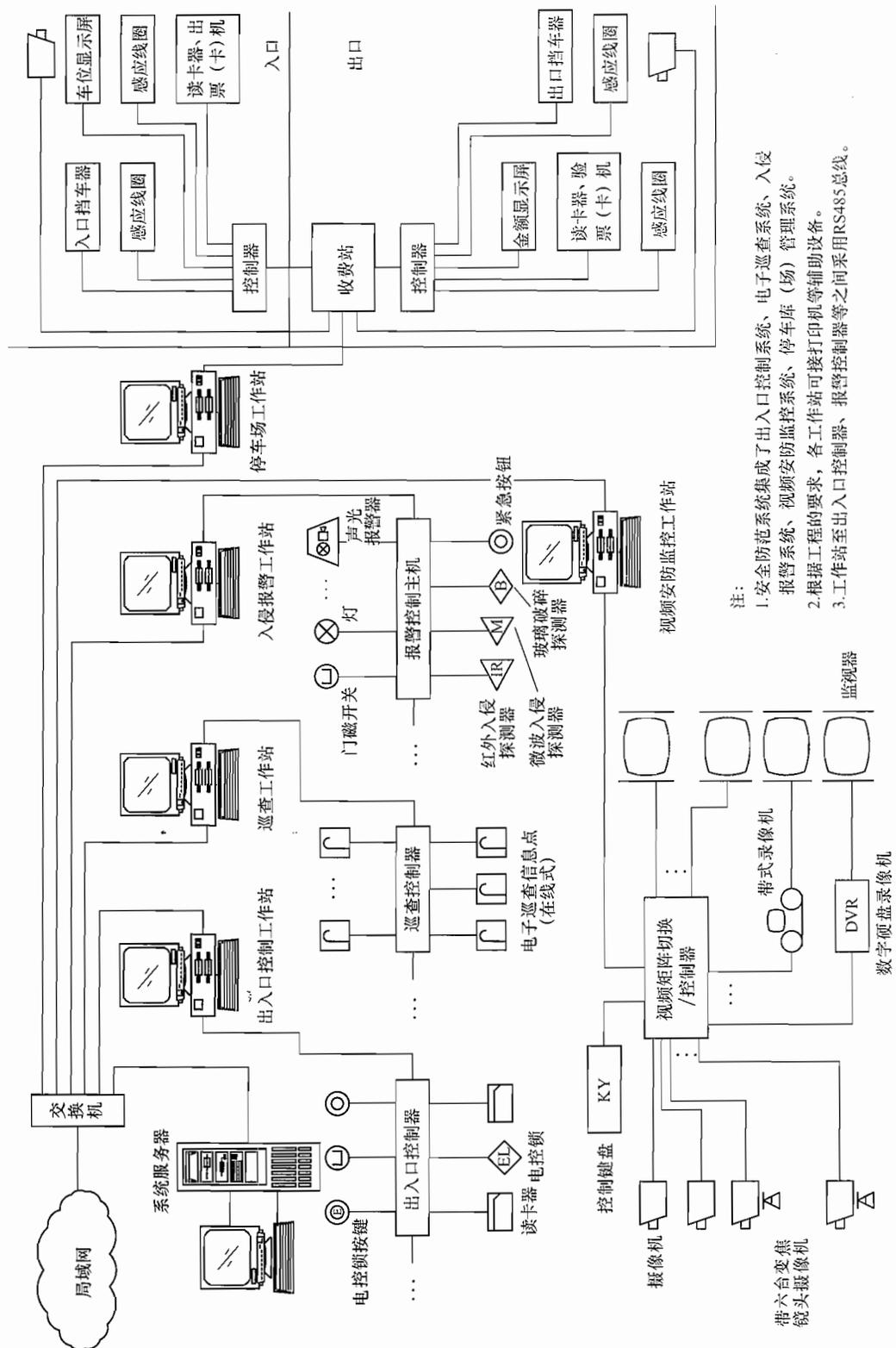
#### 15.4.2.1 用户电话交换机的种类和发展过程

(1) 电话交换机从人工交换发展为自动交换、从空分制交换发展为时分制交换、从模拟交换发展为数字交换、从单一电话交换发展为语音/数据/图像的综合业务数字交换。

经历了磁石式人工电话交换机、共电式人工电话交换机、步进制自动电话交换机、纵横制自动电话交换机发展到目前常用的数字程控电话交换机。

(2) 数字程控时分制电话交换机，以大规模集成电路和数字通信理论为基础，将模拟的话音信号进行取样、量化、数字编码、模数转换（A/D 转换），由存储程序控制进行时分制交换—时隙交换（不再像以上各类交换机的空分交换），再经过解码、数模转换还原成语音信号。程控交换机功能强大，使用灵活，数字传输抗干扰性能强，实现了可处理语音、数据、图像等多媒体信号的综合业务数字通信网。

(3) 电话模块局方式。目前公用电话网更新换代快，通信质量好、可靠性高，不少单位和大型建筑的业主，走通信社会化的道路，不再自设电话站，而采用电话模块局的方式。一般由业主和当地电信部门协商，将电话模块局建于大型建筑或建筑群内，业主提供机房面积，所有设备由电信部门出资并负责安装管理。开通后，电信部门按照直拨线路收取通信月



注：  
 1. 安全防范系统集成出入口控制系统、电子巡查系统、入侵报警系统、视频监控系统的停车场（场）管理系统。  
 2. 根据工程的要求，各工作站可接打印机等辅助设备。  
 3. 工作站至出入口控制器、报警控制器等之间采用RS485总线。

图 15-3-8 安全防范系统集成示意图

## 15

租费，但给予单位内部通话不收通话费等优惠政策。这样对于电信部门，延伸了电话局的服务半径，减少了管线投资，对于用户，减少了后勤维护人员，提高了通信质量，适合写字楼、机关、企业、一般事业单位、大学等场合。但有特殊要求的保密单位、宾馆、大中型医院等，宜自设电话交换机。

(4) IP电话、语音与数据通信合一。

## 15.4.2.2 数字程控用户电话交换系统

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

20.2.1 数字程控用户电话交换设备应根据使用需求，设置在行政机关、金融、商场、宾馆、文化、医院、学校等建筑物内。

20.2.2 数字程控用户电话交换设备，应提供普通电话业务、ISDN通信和IP通信等业务。

20.2.3 用户终端应通过数字程控用户电话交换设备与各公用通信网互通，实现语音、数据、图像、多媒体通信业务的需求。

20.2.4 数字程控用户交换机系统应符合下列要求：

1 用户交换机系统应配置交换机、话务台、用户终端、终端适配器等配套设备以及应用软件。

2 用户交换机应根据工程的需求，以模拟或数字中继方式，通过用户信令、中继随路信令或公共信道信令方式与公用电话网相连。

(2) 数字程控用户交换机一般性系统结构如图 15-4-1 所示。

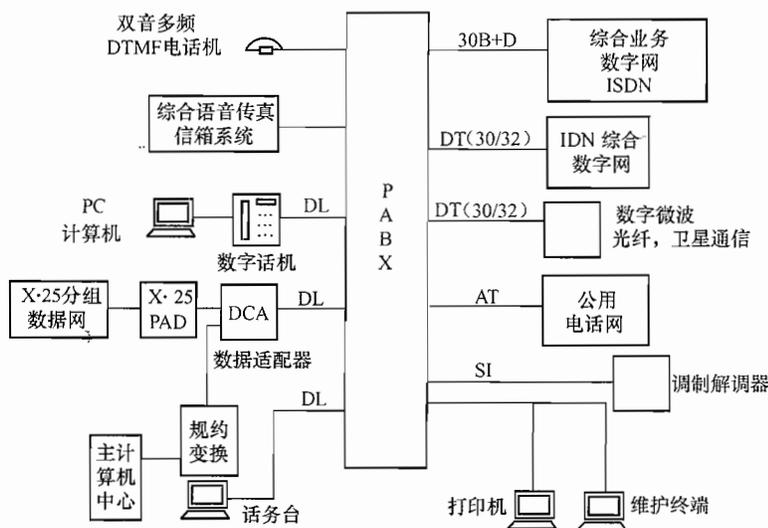


图 15-4-1 数字程控用户交换机一般性系统结构

AT—模拟中继；DL—数字用户；DT—数字中继；SI—RS232C 串行接口；  
DTMF—双音多频；PAD—X.25 分组拆装；PABX—专用自动用户交换机

## 15.4.2.3 用户交换机的中继方式

数字用户交换机中继入网方式通常可采用全自动接入方式、半自动接入方式、混合接入

方式。具体选用哪一种，应根据用户交换机容量的大小、与公用电话网进行通话的话务量和密切的程度、业务的类型以及当地电话局接口端局的设备制式和当地电话局提供的中继线方式来确定。

混合中继方式（DOD<sub>1</sub> + DID + BID 中继方式），即自动出中继 + 自动入中继 + 半自动入中继方式，如图 15-4-2 所示。

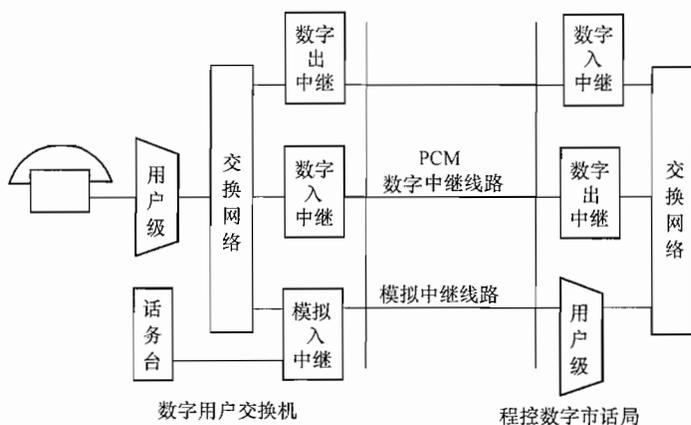


图 15-4-2 混合中继方式

#### 15.4.2.4 电话系统的设计

(1) 电话用户数量的确定。电话用户数量的确定应根据建筑物的类别、应用的对象、使用功能以及使用单位提供的用户数量表，并结合物业管理部门的实际需要，综合考虑用户近期初装容量及远期发展的终期容量。

当建设单位或建筑的物业管理部提供不出用户数量表而今后又可能发展时，应根据最终应用对象的性质以及远期发展的状况来确定，可参考综合布线系统中的工作区面积划分表 [见 15.5.2.1 - (2)]，按 1 个工作区设一个电话插孔考虑。

(2) 交换机容量和中继线数量的确定。JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

20.2.7 第 1 款之 1) 用户交换机除应满足近期容量的需求外，尚应考虑中远期发展扩容以及新业务功能的应用；

2) 用户交换机的实装内线分机的容量，不宜超过交换机容量的 80%；

20.2.7 第 2 款之 3) 中继线数量的配置，应根据用户交换机实际容量大小和出入局话务量大小等因素，可按用户交换机容量的 10% ~ 15% 确定。

#### 15.4.2.5 程控电话交换机房的设计

(1) 电话交换机房的位置。

1) GB/T 50622—2010《用户电话交换系统工程设计规范》中的规定：

14.1.1 机房选址应符合下列规定：

1 单体建筑机房宜设置在建筑物的首层至四层，当条件不具备时，也可设置在地下一层（建筑物地下有多层时）。

2 群体建筑的机房宜设置在中心位置的建筑物内。

14.1.2 机房在建筑物内的位置选择应符合下列规定：

1 机房不应设置在厕所、浴室或其他易积水、潮湿场所的正下方或贴邻，不应设置在变压器室、配电室等强电磁干扰场所的楼上、楼下或隔壁房间。

2 机房应远离粉尘、油烟、有害气体、强振动源、强噪声源场所以及生产、存储具有腐蚀性、易燃、易爆物品的场所。

3 机房宜靠近本建筑物的进线室和弱电间，方便各种线路进出。

2) 电话站应建在办公楼、科研楼等环境较好、电话需求量大的建筑物内，宜靠近计算机网络中心。

(2) 程控电话交换机房的面积。

1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

4 程控用户交换机机房的布置，应根据交换机的机架、机箱、配线架，以及配套设备配置情况、现场条件和管理要求决定。在交换机及配套设备尚未选型时，机房的使用面积应符合表 20.2.8 的规定。

表 20.2.8 程控用户交换机机房的使用面积

交换机容量数 (门)	交换机机房 使用面积 (m <sup>2</sup> )	交换机容量数 (门)	交换机机房 使用面积 (m <sup>2</sup> )
≤500	≥30	2001~3000	≥45
501~1000	≥35	3001~4000	≥55
1001~2000	≥40	4001~5000	≥70

注：1 表中机房使用面积应包括话务台或话务员室、配线架（柜）、电源设备和蓄电池的使用面积；

2 表中机房的使用面积，不包括机房的备品备件维修室、值班室及卫生间。

2) 电话机房的面积应满足终期容量的需要，并应根据所选设备的外形尺寸、维修面积、外线规模、中继方式、人员多少、建筑型式等各种因素考虑。一般包括交换机房、配线间、话务室、电源间、维修间等，容量小时可适当合并。

(3) 电话站电源。

GB/T 50622—2010《用户电话交换系统工程设计规范》中的规定：

13.1.1 用户电话交换系统、调度系统、会议电话系统、呼叫中心宜合用供电系统，其交流电源应按建筑物最高等级负荷供电。

13.1.2 电源系统应支持直流供电和交流供电两种方式。

13.1.3 当采用直流供电方式时，应符合下列规定：

1 直流供电电源采用在线充电方式以全浮充制运行。

2 直流供电系统由整流配电设备和蓄电池组组成，按设备容量可采用分散或集中的供电方式。

3 直流供电系统应使用高频开关型整流器、阀控式密封铅酸蓄电池。

4 直流供电额定电压为 -48V，允许变动范围为 -57V ~ -40V。

(4) 电话站设计中应注意的问题。

1) 电话站的交流电源应按所在楼内的重要负荷供电, 宜设双路互投电源。当交流电源不够可靠时, 应加大蓄电池的容量。

2) 电话站所需交流电源容量应按电话站远期容量考虑, 根据所选设备的要求, 并同时考虑以下因素叠加计算:

- a. 交换机正常运行所需功率 (可按每门 48V、50mA 估算)。
- b. 传输设备等其他通信设备所需功率。
- c. 给蓄电池充电所需功率。
- d. 整流器效率 (可按 0.7 左右估算)。

注: 综合考虑以上 a. ~d. 项因素叠加之后, 交流电源可按电话站终期容量每门 10W 左右进行估算。空调与维修设备所需电源应由普通电源另外供给, 未计入以上容量。

3) 蓄电池组。

- a. 容量可接近期所需容量计算, 并适当考虑发展余量。
- b. 蓄电池供电时间, 应根据交流电源的可靠性、本机通信的重要性、万一通信中断可能造成的危害程度确定, 一般在 4~8h 之间选取。
- c. 当交流电源负荷等级在二级及以上时, 可备用 1 组蓄电池; 当交流电源负荷等级为三级或交换机容量较大时 (如 2000 门以上), 宜备用 2 组蓄电池。

4) 配线设备。

- a. 应采用小型卡接式配线架 (柜), 容量不太大时, 可采用单面配线柜 (架), 容量大于 2000 门时, 宜采用双面配线架。
- b. 配线柜 (架) 的容量: 线路侧容量应为远期交换机容量的 1.5~2 倍; 交换机侧容量应为远期交换机容量的 1.5 倍左右; 单面配线设备容量为两者之和。
- c. 保安器的数量应根据线路情况确定。中继线和配至其他建筑的用户线应配保安器。

5) 根据管理需要, 电话站可设计计费装置。交换机容量大于 1000 门时, 宜设维护终端。

(5) 电话站机房环境要求, 详见“15.10 弱电机房工程设计与环境要求”。

### 15.4.3 电话管线的设计

#### 15.4.3.1 电信间、设备间的设置

(1) 公共建筑一般需要设综合布线系统, 电信间、设备间的设置见“15.5 综合布线系统”一节。

(2) 根据 GB/T 50605—2010《住宅区与住宅建筑内通信设施工程设计规范》中 3.0.10, 每栋住宅建筑内应设电信间, 其使用面积, 对于高层住宅楼不宜小于  $9\text{m}^2$ , 对于多层住宅楼不宜小于  $5\text{m}^2$ ; 每个住宅小区内均应设电信设备间, 其使用面积宜为  $15\sim 30\text{m}^2$ 。

(3) 设备间、电信间应设在进出线方便的位置, 应设置照明、交流电源和接地装置。

#### 15.4.3.2 电话系统常用缆线的选择

(1) 设置综合布线系统的建筑中, 根据用户要求和发展的灵活性, 电话线可与计算机网络线共同采用综合布线系统的 UTP 八芯双绞线。此时布线要求同综合布线系统。

(2) 一般室内电话线宜采用  $\text{RVS}2 \times 0.2\text{mm}^2$ 、 $\text{RVS}2 \times 0.5\text{mm}^2$  塑料绝缘双绞软线或  $\text{HPV}2 \times 0.5\text{mm}$  塑料绝缘线。

(3) 一般室内电话电缆宜采用带色谱和铝塑综合护套结构的 HYA 系列 0.5mm 直径全塑电话电缆。常用电话电缆芯线对数系列为：10、20、30、50、100、200、300、400、600 对等。

#### 15.4.3.3 室内电话配线方式

在不采用综合布线的情况下，电话系统通常采用直接配线方式或交接配线方式。

(1) 楼内直接配线方式，如图 15-4-3 所示。从楼内总配线架引出电话电缆，直接配线至各层，接头少、故障率少，适合于多层建筑。

(2) 楼内交接配线方式，如图 15-4-4 所示。除楼内总配线架外，几层设一个分配线箱，再引出电缆至附近楼层，比直接配线减少了上升电缆根数，利用分配线箱可调节各层之间电话用户容量，适合于高层建筑。

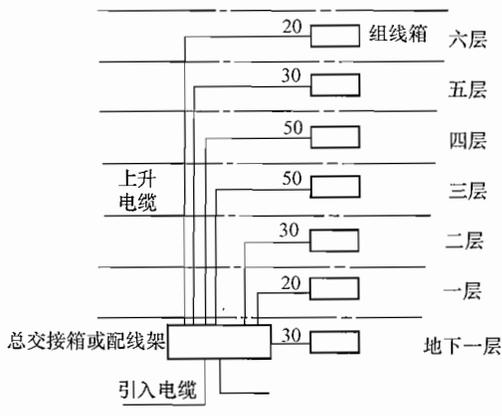


图 15-4-3 楼内直接配线方式

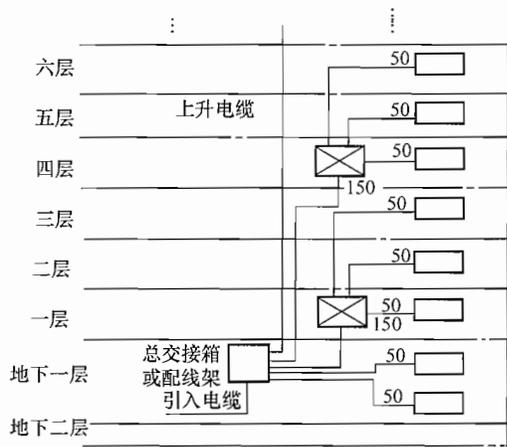


图 15-4-4 楼内交接配线方式

#### 15.4.3.4 光纤到户

(1) GB 50846—2012《住宅区和住宅建筑光纤到户通信设施工程设计规范》规定：

**1.0.3** 住宅区和住宅建筑内光纤到户通信设施工程的设计，必须满足多家电信业务经营者平等接入、用户可自由选择电信业务经营者的要求。

**1.0.4** 在公用电信网络已实现光纤传输的县级及以上城区，新建住宅区和住宅建筑的通信设施应采用光纤到户方式建设。

**1.0.7** 新建住宅区和住宅建筑内的地下通信管道、配线管网、电信间、设备间等通信设施，必须与住宅区及住宅建筑同步建设。

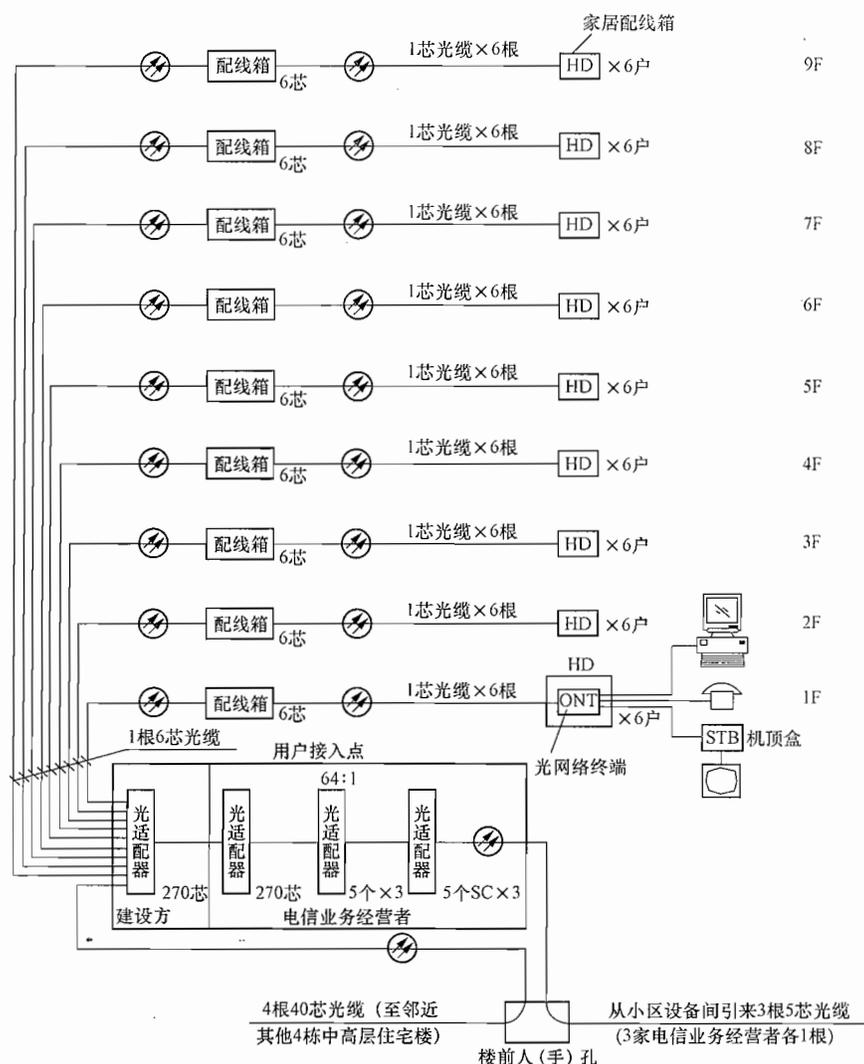
3.2.6 用户接入点至每一户家居配线箱的光缆数量，应根据地域情况、用户对通信业务的需求及配置等级确定，其配置应符合表 3.2.6 的规定。

表 3.2.6 光缆配置

配置	光纤(芯)	光缆(条)
高配置	2	1
低配置	1	1

注：高配置采用 2 芯光纤，其中 1 芯作为备份。

(2) 住宅楼光纤到户通信系统示例, 如图 15-4-5 所示。



注:

1. 本系统为采用 EPON 或 GPON 光纤到户接入网技术的光纤到户方案, 支持语音、数据、IPTV 的应用。
2. 本系统图按每层 6 户考虑, 为每户提供 1 根 1 芯光缆。
3. 本建筑物设置独立的配线区, 或与邻近的住宅楼 (共 270 户) 组成一个配线区, 配线区所有光分路器设置在本建筑物的弱电间 (电信间) 内, 光分路器的支路侧端口数应大于本配线区的用户数。配线区应满足 3 家电信业务经营者配线设备、光分路器设置。
4. 本图中所标出配线光缆、用户光缆及配线设备的容量为实际需要计算值, 在工程设计中应预留不少于 10% 的维修余量, 并按光缆、配线设备的规格选用。

图 15-4-5 住宅楼光纤到户通信系统示例

#### 15.4.4 计算机网络系统

##### 15.4.4.1 计算机网络及机房的构成

(1) 计算机网络一般可分为三层网络结构: 接入层交换机 (楼层交换机)、汇聚层交换

机（楼栋交换机）、核心交换机（建筑群中心交换机）。通常，核心交换机设于建筑群的网络中心机房内，汇聚层交换机设于各建筑的网络设备间内，接入层交换机设于每层弱电间内。规模不大的建筑可以分为两层结构。

(2) 网络中心机房的组成、面积应根据规模大小确定，可以包括服务器机房、网络交换机房、网络接入与配线间、存储设备间、监控室、打印室、UPS间、换鞋间、气体灭火瓶间等。规模较小时，可设主机房与监控室。设计中应考虑计算机房的位置、面积、楼板等效活荷载、供电、接地、空调、消防等各个方面的环境条件。机房的具体环境要求等详见 15.10。

(3) 涉密单位应根据国家有关电子信息系统保密的规定设置保密的内网，需要时另设外网。内网、外网的设备和线路之间应严格进行物理隔离，应分别设置网络机房。

(4) 计算机网络交换机、服务器等设备发展变化较快，一般由用户和网络承包商根据实际使用需要另行配置。但在可行性研究、初步设计中，对于国家拨款项目、政府投资项目、援外项目等需为其估算投资，以免漏项。

(5) 目前计算机网络一般采用星型拓扑结构，利用综合布线系统作为信号传输平台。根据传输速率的不同要求，可采用超五类或六类系统，必要时可采用屏蔽系统或光缆传输系统。详见 15.5。

#### 15.4.4.2 计算机网络的几种型式

(1) 单栋中小型建筑的局域网，可以采用两层交换网络，如图 15-4-6 所示。

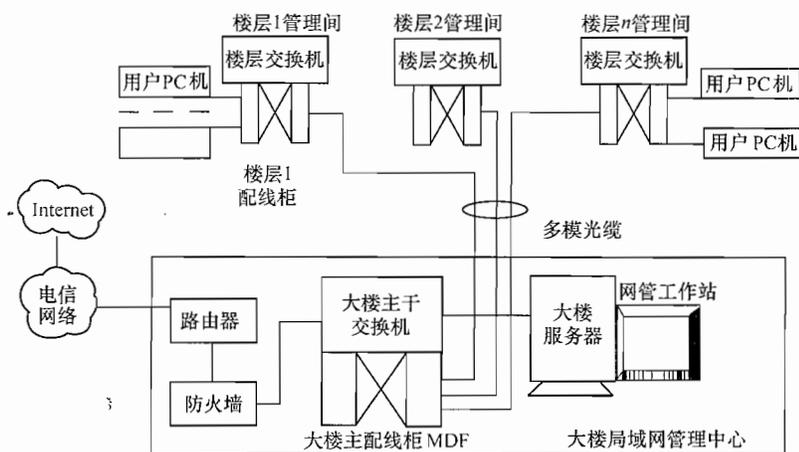


图 15-4-6 两层交换网络示意图

(2) 大型建筑或建筑群可采用三层交换网络，如图 15-4-7 所示。

- 1) 网络应采用星型拓扑结构。
- 2) 局域网主干采用千兆以太网。在网控中心设置千兆以太网核心交换机。
- 3) 在各楼设备间设置汇聚层交换机，并配置 1000M 上传端口，光纤上连至核心交换机。
- 4) 各楼层弱电间设置接入层交换机，并以光纤或铜缆双绞线上连至汇聚层交换机。
- 5) 接入层交换机经楼内综合布线接至用户信息插口。
- 6) 网控中心除网络核心交换机外，还包括各类服务器、管理工作站以及与广域网连接

的路由器，与 Internet 连接。

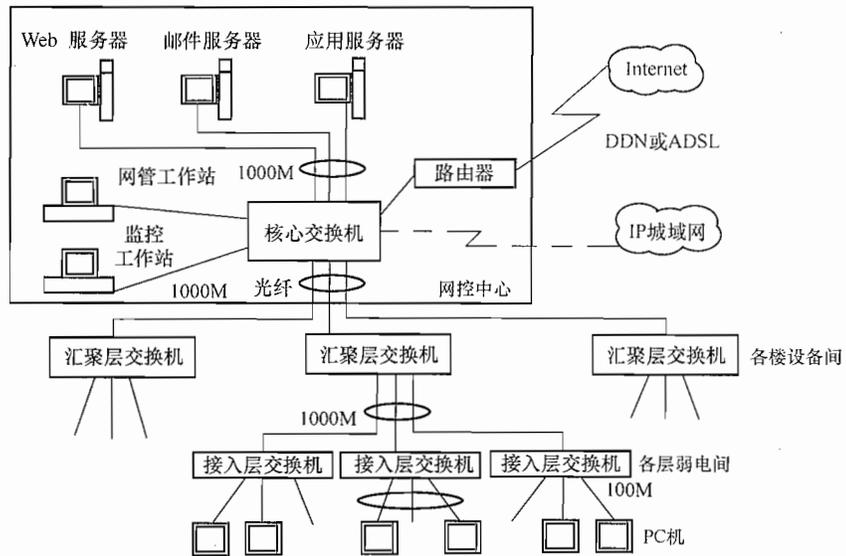


图 15-4-7 三层交换网络示意图

(3) 采用万兆以太网交换机做主干的网络结构如图 15-4-8 所示。

万兆高端路由器和交换机定位于园区网络和企业网络的核心。它具有强大的 VPN 支持能力和完善的  $Q_{os}$  质量保证。

它适用于构建经济、简便且可管理的园区间的连接或城域网。

它可以提供一些新的应用支持，如数据中心远距离镜像、数据异地备份、灾难恢复等重要的存储网络的应用。

#### 15.4.4.3 网络互联设备

OSI 开放系统互联的七层协议参考模型，如图 15-4-9 所示。

(1) 物理层设备。

1) 网络接口卡 NIC (Network Interface Card) 也称为适配器，它插在 PC 主机板和数据总线的扩展槽中，用 RJ-45 插座或 RS232 接口与终端设备相连。

2) 中继器 (Repeater)，它的功能是互联同类型网段实现物理信号的接收、放大、整形和转发。中继器不能控制和分析信息，不具备网络管理功能，不能用于不同类型子网的互联。

3) 集线器 (HUB)，它将各个独立的网段集中到一个设备上，运行同种协议，作为网络传输介质的一个节点。当网络系统中某条线路或某一节点出现故障时，不会影响网上其他节点的工作。

(2) 数据链路层设备。

1) 网桥，用于连接不同的网，网桥在不同的网段间转发数据帧并加以过滤，将带有地址的信号从一个传输介质发送到另一个传输介质，将多个局域网互联成一个互通的大型局域网。它可分为本地网桥和远程网桥两种。

2) 交换机，是网络的重要设备之一。为了提高局域网的吞吐率，需要将局域网分为若干个网段来减少冲突域，交换机的每个端口都可视为一个冲突域。

15

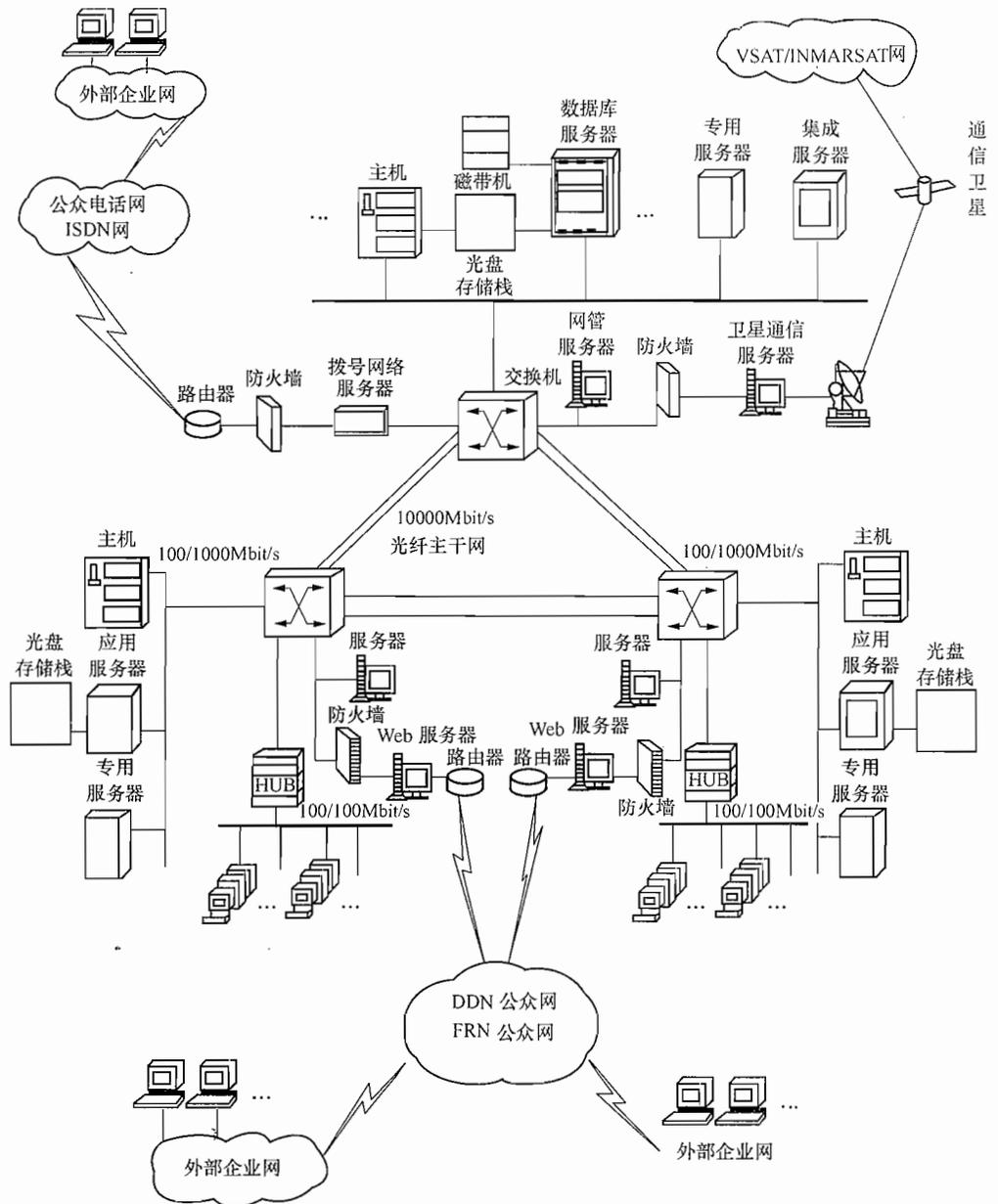


图 15-4-8 采用万兆位以太网交换机做主干的网络结构

a. 交换机的主要性能参数，包括交换容量（即支持负载所需的带宽），是直通方式还是存储—转发方式，是单工还是双工制，交换机的端口数，流量控制，交换效率，过滤特性，支持的网络地址数和网络类型，交换机的安全性和升级的灵活性等。

b. 交换机按照其网络结构，一般采用多层交换技术。

c. 交换机视其功能和端口性能价格差别很大。交换机的选择应根据网络的规模、工作性质、复杂性和成本等因素分级权衡。

(3) 网络层设备。

1) 路由器, 运行在 OSI 协议的第三层, 能够在复杂的网络单元间建立非常灵活的连接。

2) 交换路由器, 将第二层交换机和第三层路由器两者的优势结合成一个灵活实用的解决方案, 是目前网络核心交换机经常采用的方式。

a. 交换路由器定位于网络的核心交换机。

b. 交换路由器具有极高的端口密度, 具有广泛的接口选择(园区主干、城域网、广域网接口)。

c. 支持多协议环境, 支持线速多层交换, 有效消除第三层的瓶颈。

3) 网关, 工作在 OSI 协议的第四层到第七层。其作用是将一种协议转换成另一种协议, 并保留原有信息的内容不变。

(4) 设计网络互联设备。

1) 网络互联设备应依据建筑物的使用性质、园区的规模、信息点的多少, 根据实际需求和资金投入情况并考虑网络的发展冗余, 选取组网方案。

2) 根据组网方案选择网络互联设备, 可以分期和动态的规划网络间的互联。资金到位后可以将原来的核心交换设备作为汇聚层交换设备使用。但在设备选择初期要有全盘考虑。

#### 15.4.4.4 电子信息系统机房的设计

(1) GB 50174—2008《电子信息系统机房设计规范》中的规定:

4.2.1 电子信息系统机房的组成应根据系统运行特点及设备具体要求确定, 宜由主机房、辅助区、支持区、行政管理区等功能区组成。

4.2.2 主机房的使用面积应根据电子信息设备的数量、外形尺寸和布置方式确定, 并应预留今后业务发展需要的使用面积。在对电子信息设备外形尺寸不完全掌握的情况下, 主机房的使用面积可按下式确定:

1 当电子信息设备已确定规格时, 可按下式计算:

$$A = K \sum S \quad (4.2.2-1)$$

式中  $A$ ——主机房使用面积 ( $m^2$ );

$K$ ——系数, 可取 5~7;

$S$ ——电子信息设备的投影面积 ( $m^2$ );

2 当电子信息设备尚未确定规格时, 可按下式计算:

$$A = FN \quad (4.2.2-2)$$

式中  $F$ ——单台设备占用面积, 可取  $3.5 \sim 5.5 m^2/台$ ;

$N$ ——主机房内所有设备(机柜)的总台数。

4.2.3 辅助区的面积宜为主机房面积的 0.2~1 倍。

4.2.4 用户工作室的面积可按  $3.5 \sim 4 m^2/人$  计算; 硬件及软件人员办公室等有人长期工作的房间面积, 可按  $5 \sim 7 m^2/人$  计算。

6.1.4 变形缝不应穿过主机房。

6.2.2 有人操作区域和无人操作区域宜分开布置。

6.3.2 电子信息系统机房的耐火等级不应低于二级。

应用层
表示层
会话层
传输层
网络层
数据链路层
物理层

图 15-4-9 OSI 七层协议

**6.3.3** 当 A 级或 B 级电子信息系统机房位于其他建筑物内时，在主机房与其他部位之间应设置耐火极限不低于 2h 的隔墙，隔墙上的门应采用甲级防火门。

**6.3.4** 面积大于 100m<sup>2</sup> 的主机房，安全出口不应少于两个，且应分散布置。面积不大于 100m<sup>2</sup> 的主机房，可设置一个安全出口，并可通过其他相邻房间的门进行疏散。门应向疏散方向开启，且应自动关闭，并应保证在任何情况下均能从机房内开启。

**8.1.7** 电子信息设备应由不间断电源系统供电。不间断电源系统应有自动和手动旁路装置。确定不间断电源系统的基本容量时应留有余量。不间断电源系统的基本容量可按下式计算：

$$E \geq 1.2P \quad (8.1.7)$$

式中  $E$ ——不间断电源系统的基本容量（不包含备份不间断电源系统设备）[（kW/kV·A）]；

$P$ ——电子信息设备的计算负荷 [（kW/kV·A）]。

**8.1.8** 用于电子信息系统机房内的动力设备与电子信息设备的不间断电源系统应由不同回路配电。

**8.3.4** 电子信息系统机房内所有设备的金属外壳、各类金属管道、金属线槽、建筑物金属结构等必须进行等电位联结并接地。

(2) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

23.2.3-2-1 主机房面积……当系统设备未选型时，按下式计算：

$$A = KN \quad (23.2.3-2)$$

式中  $K$ ——单台设备占用面积，可取 4.5~5.5m<sup>2</sup>/台；

$N$ ——机房内设备的总台数。

2) 辅助用房的面积不宜小于主机房面积的 1.5 倍。

#### 15.4.5 移动通信室内覆盖系统

(1) 为提高移动通信室内信号传输质量，在地下室和体量较大的建筑物内应设置移动通信室内覆盖系统。

(2) 根据常规分工情况，设计中应为中国移动、中国联通、中国网通等各个运营商预留移动通信设备机房位置、弱电间内设备位置、供电及接地条件、线槽通路等，具体设备由各个移动通信运营商提供和安装。

(3) 几家移动通信运营商一般分别设置基站、放大器、耦合器、分配器箱等，故宜在地下一层（或顶层等处）为它们预留无线通信基站机房，面积 30m<sup>2</sup> 左右，预留电源（含设备用电和空调用电，20kW 左右）、接地等条件。在弱电间应为它们预留一定的位置（一般 3 个运营商至少需要安装 3 个设备机柜及各自的整流、配电、电池等设备）。

(4) 移动通信系统的电缆比较粗、比较硬，而且各个运营商一般均分别布放电缆，设计中应为其预留线槽，线槽拐弯处应倒角。每层建筑面积较大、分布天线较多时，应为其预留 200mm×100mm 线槽；每层面积不大、分布天线较少时（如 1~2 组），可采用 100mm×100mm 线槽。

(5) 移动通信室内覆盖系统示例，如图 15-4-10 所示。

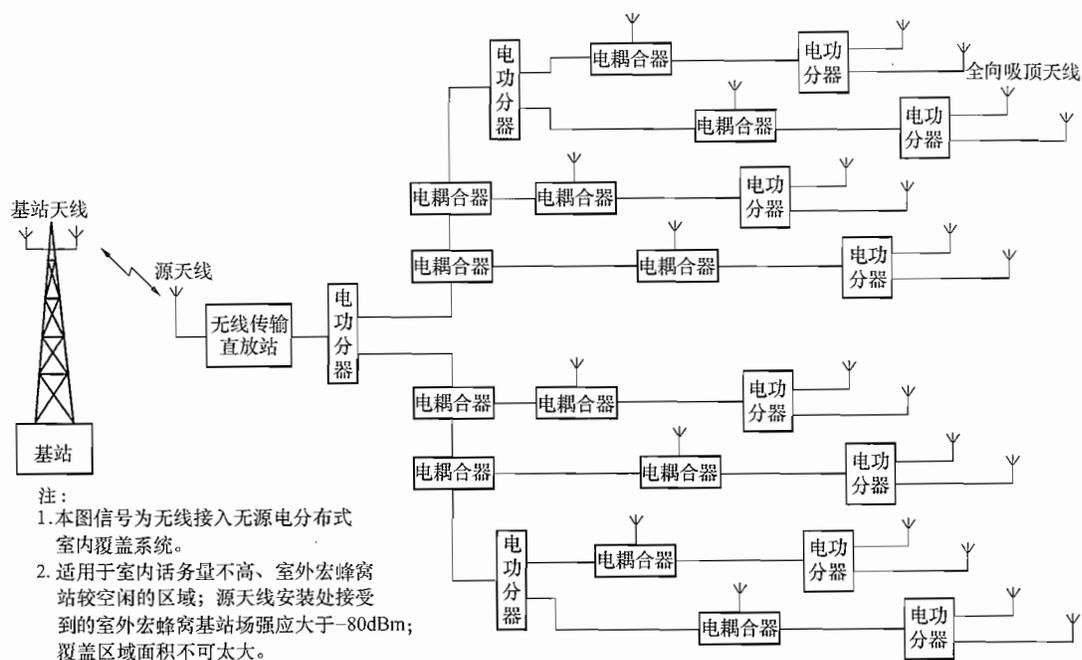


图 15-4-10 移动通信室内覆盖系统示例

### 15.4.6 通信接入网

#### 15.4.6.1 现代电信网中接入网的划分

接入网也称为用户接入网，是由业务节点接口和相关用户网络接口之间一系列传送实体（例如：线路设施和传输设备）组成的。泛指本地交换机与用户设备之间实施网络。

在现代电信网中，根据所采用的传输媒介，可分为有线接入网和无线接入网。其中有有线接入网又可分为铜线接入网、光纤接入网、混合光纤/同轴电缆接入网等；无线接入网又可分为固定无线接入网和移动接入网。另外，还可以根据具体情况综合采用这些接入技术。

#### 15.4.6.2 接入网中几个典型的例子

(1) 铜线接入技术是指在用户线上，通过采用先进的数字信号处理技术来提高双绞铜线对的传输容量，向用户提供各种业务的接入手段。

接入网的分类如图 15-4-11 所示。传统的电话用户接入网结构见图 15-4-12。

ADSL 属于非对称式传输，它在一对铜线上支持上行速率  $640\text{ kbit/s} \sim 1\text{ Mbit/s}$ ，下行速率  $1 \sim 8\text{ Mbit/s}$ ，有效传输距离在  $3 \sim 5\text{ km}$  范围以内。

(2) 光纤接入网 (OAN) 是指在接入网中采用光纤作为主要传输媒介来实现用户信息传送的网络方式，它与铜线接入网相比，有着许多无可比拟的优点和广阔的应用前景。

它的主要优点是：可传输宽带交换型业务，且传输质量好，可靠性高；另外，光纤衰减小，可不需要中继器。

(3) 混合光纤/同轴电缆 (HFC) 接入网是一种综合应用模拟和数字传输技术、同轴电缆和光纤技术、射频技术的接入网络，是数据通信网、CATV 网相结合的一种方式。

通过 HFC 的基本结构和网络组成，可见 HFC 实际是在一条光纤上，采用通带模拟调制方式进行全业务传送的一种综合业务实现方式，通过对  $1\text{ GHz}$  以下频段的安排，实现多

15

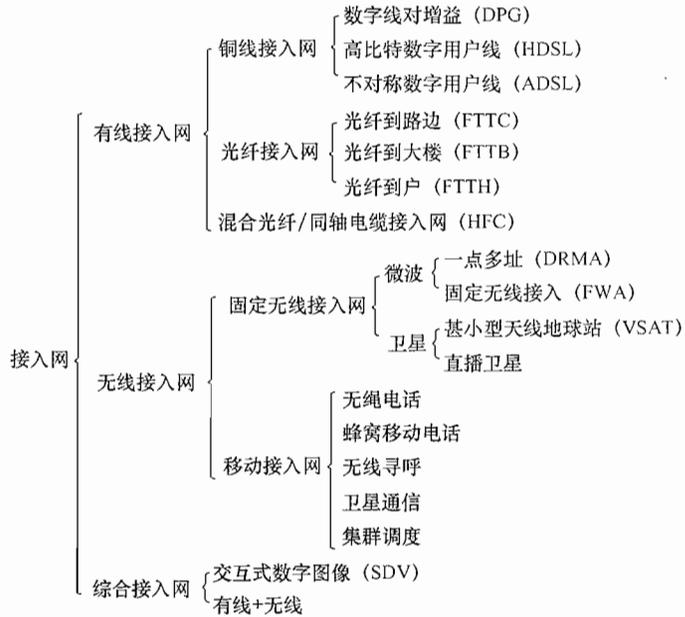


图 15-4-11 接入网的分类

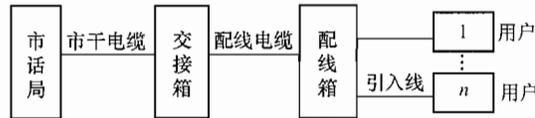


图 15-4-12 传统的电话接入网结构

业务的上行、下行双向通信。混合光纤/同轴电缆（HFC）接入网示意图如图 15-4-13 所示。

### 15.4.7 卫星通信系统

#### 15.4.7.1 卫星通信

卫星通信是指利用人造地球卫星

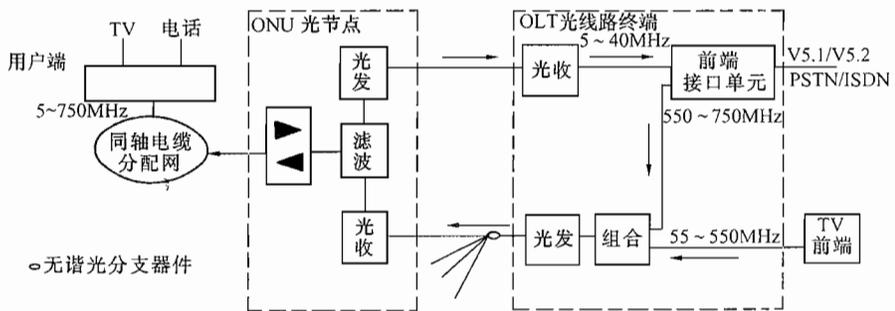


图 15-4-13 混合光纤/同轴电缆（HFC）接入网示意图

作为中继站转发无线电波，在两个或多个地球站之间进行的通信。

目前，卫星通信已成为远距离、全球通信的主要手段之一。它的通信业务已从简单的电报、电话，发展到电话、电视、数据传输、传真、综合业务数字网、导航定位、应急通信等诸领域。站址从固定发展到移动，信号从模拟到数字，用户从民用到军用，成为各种用户不可缺少的通信手段之一。

### 15.4.7.2 卫星通信的特点

与其他通信手段相比,卫星通信具有以下特点:

(1) 通信距离远,且费用与通信距离无关。显然,这是地面微波中继通信、光纤通信以及短波通信等其他通信手段无法比拟的。利用单颗地球同步卫星通信,其最大通信距离可达18000km(约为地球周长的1/3),如图15-4-14所示。

(2) 通道特性稳定,图像质量好。由于卫星居高临下,电波入射角大,又是直播,传播线路大部分是外层空间,不易受地形、建筑物和气候的影响,不需多次转接和变换。载频高、人为的噪声干扰小,故信号强度稳定。信噪比高,无地面电视接收时的阴影和多路径反射造成的重影,所以图像质量好。

(3) 覆盖面积大,可进行多址通信。许多其他类型的通信手段常常只能实现点对点的通信。而卫星通信,只要是在卫星天线波束的覆盖区域内,都可设置地球站,共用同一颗卫星,在这些地球站之间进行双边或多边通信,即多址通信。

(4) 通信频带宽、传输容量大。可同时传输多路彩色电视、大量电话以及数据等其他信息。

(5) 机动灵活。卫星通信不仅能作为大型固定地球站之间的远距离干线通信,而且可在车载、船载、机载等移动地球站间进行通信,甚至还可为个人终端提供通信服务。

### 15.4.7.3 VSAT 卫星通信系统

(1) VSAT (very small aperture terminal) 的中文含义是“甚小口径天线地球站”。它是由天线尺寸小于2.4m、G/T值低于9.7dB/K、设备紧凑、全固态化、功耗小、价格低廉的卫星用户小站和一个枢纽站组成的通信网,主要用来进行2Mbit/s以下的低速数据双向通信。

(2) 我国VSAT系统通常使用Ku频段和C频段。Ku频段VSAT天线口径一般为1.2~1.8m;C频段VSAT天线口径一般为1.8~3m。

(3) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定:

20.5.3 第3款 VSAT通信系统工作频率的使用,应符合以下要求:

1) 工作频率在C频段时:上行频率应为5.850~6.425GHz;下行频率应为3.625~4.200GHz;

2) 工作频率在Ku频段时:上行频率应为14.00~14.500GHz;下行频率应为12.250~12.750GHz。

(4) 波长与频率的关系。

$$\text{波长} = \frac{\text{电磁波传播速度(m/s)}}{\text{频率}}$$

$$\text{即 } \lambda = \frac{300000\text{km/s}}{f} = \frac{3 \times 10^8\text{m/s}}{f}$$

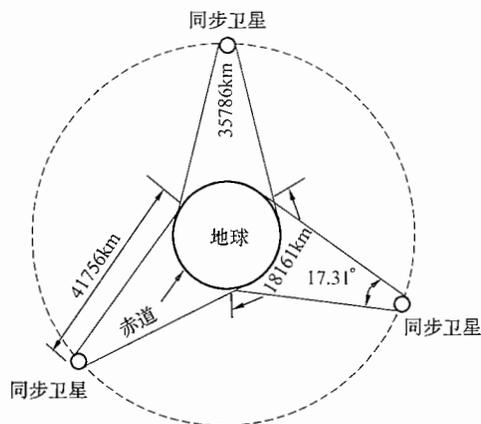


图 15-4-14 卫星电视信号对地球覆盖示意图

故频率越高，波长越短。天线尺寸与工作波长有关，波长越短，相应的天线尺寸越小。

#### 15.4.7.4 VSAT 卫星通信系统的构成

一个典型的 VSAT 系统，是由许多智能化小型地球站、一个（或数个）大的主站构成。空中的通信卫星为中继，VSAT 可与主站或其他 VSAT 通信，提供信息业务，如图 15-4-15 所示。

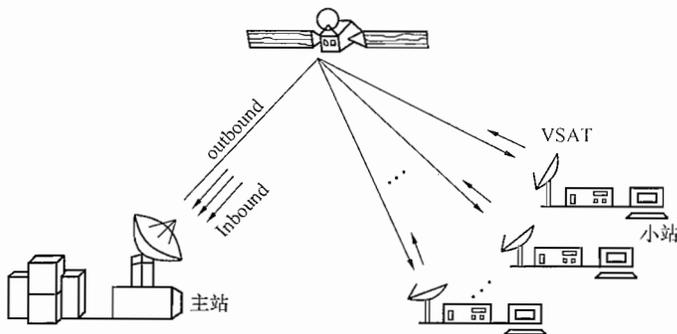


图 15-4-15 VSAT 系统的基本构成

(1) 主站（或称中心站）：它是 VSAT 网的管理控制中心。它与普通地球站一样，使用大型天线，其天线直径 Ku 频段一般为 3.5~8m；C 频段一般为 7~13m，配有高功率放大器，低噪声放大器和上、下变频器，调制解调器及数据接口设备等。

主站设有网络控制中心，负责对全网监测、管理、控制和维护。并实时监测、诊断各小站和主站自身的工作状况，以及测试信道质量、负责信道分配、统计、计费等。

(2) 小站：小站（VSAT）由小口径天线，建筑的室外单元和室内单元三部分组成。小站（VSAT）天线有正馈和偏馈两种形式。正馈天线尺寸较大，偏馈天线尺寸小，增益高、旁瓣小。室外单元主要包括固态功放、低噪声放大、变频组件、上下变频器、正交模耦合器等。室外单元安装在天线反射面焦点处。室内单元由调制解调器与基带处理单元功能强的微处理器组成，安装在大厦建筑内与用户终端设备直接相连，完成数据信息的发送和接收。

(3) 卫星：VSAT 使用的卫星设备是 Ku 频段或 C 频段的同步卫星转发器。

#### 15.4.7.5 VSAT 系统优越性

VSAT 系统主要用来替代地面专用网，完成中心站与远地分散的终端站之间的通信。

VSAT 系统的优越性包括以下几点：

- (1) 通信链路费用与距离无关。
- (2) 远地分散的小站可以方便地进入通信链路。
- (3) 载波之间无须互联。
- (4) 无须本地环路连接。
- (5) 数据、语音、图像信道带宽动态分配。
- (6) 主站对远端站具有监控能力。
- (7) 主站可以对小站的状况进行诊断。
- (8) 网络扩充能力强。
- (9) 投资固定。

## 15.5 综合布线系统

### 15.5.1 综合布线系统的构成

#### 15.5.1.1 综合布线系统的结构

(1) GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》中的规定：

3.1.1 综合布线系统应为开放式网络拓扑结构，应能支持语音、数据、图像、多媒体业务等信息的传递。

3.1.2 综合布线系统工程宜按下列七个部分进行设计：

1 工作区：一个独立的需要设置终端设备（TE）的区域宜划分为一个工作区。工作区应由配线子系统的信息插座模块（TO）延伸到终端设备处的连接缆线及适配器组成。

2 配线子系统：配线子系统应由工作区的信息插座模块、信息插座模块至电信间配线设备（FD）的配线电缆和光缆、电信间的配线设备及设备缆线和跳线等组成。

3 干线子系统：干线子系统应由设备间至电信间的干线电缆和光缆，安装在设备间的建筑物配线设备（BD）及设备缆线和跳线组成。

4 建筑群子系统：建筑群子系统应由连接多个建筑物之间的主干电缆和光缆、建筑群配线设备（CD）及设备缆线和跳线组成。

5 设备间：设备间是在每幢建筑物的适当地点进行网络管理和信息交换的场地。对于综合布线系统工程设计，设备间主要安装建筑物配线设备。电话交换机、计算机主机设备及入口设施也可与配线设备安装在一起。

6 进线间：进线间是建筑物外部通信和信息管线的入口部位，并可作为入口设施和建筑群配线设备的安装场地。

7 管理：管理应对工作区、电信间、设备间、进线间的配线设备、缆线、信息插座模块等设施按一定的模式进行标识和记录。

3.1.3 综合布线系统的构成应符合以下要求：

1 综合布线系统基本构成应符合图 3.1.3-1 要求。

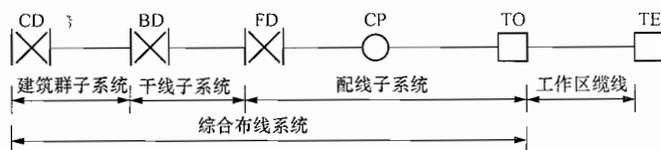


图 3.1.3-1 综合布线系统基本构成

注：配线子系统中可以设置集合点（CP点），也可不设置集合点。

(2) 综合布线系统的结构示意图如图 15-5-1 所示。

#### 15.5.1.2 综合布线系统的分级与组成

GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》中的规定：

3.1.1 综合布线铜缆系统的分级与类别划分应符合表 3.2.1 的要求。

15

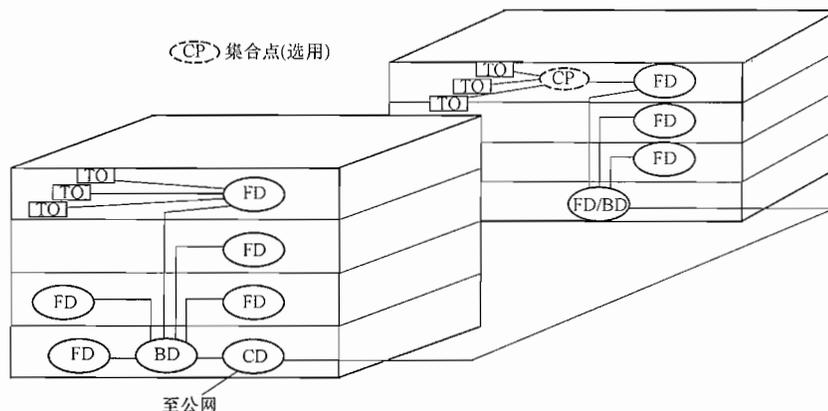


图 15-5-1 综合布线系统结构示意图

FD—楼层配线设备；BD—建筑物配线设备；CD—建筑群配线设备；TO—信息插座

表 3.2.1 铜缆布线系统的分级与类别

系统分级	支持带宽 (Hz)	支持应用器件	
		电缆	连接硬件
A	100K	—	—
B	1M	—	—
C	16M	3 类	3 类
D	100M	5/5e 类	5/5e 类
E	250M	6 类	6 类
F	600M	7 类	7 类

注：3 类、5/5e 类（超 5 类）、6 类、7 类布线系统应能支持向下兼容的应用。

3.2.2 光纤信道分为 OF-300、OF-500 和 OF-2000 三个等级，各等级光纤信道应支持的应用长度不应小于 300m、500m 及 2000m。

3.2.3 综合布线系统信道应由最长 90m 水平缆线、最长 10m 的跳线及设备缆线及最多 4 个连接器件组成，永久链路则由 90m 水平缆线及 3 个连接器件组成。连接方式如图 3.2.3 所示。

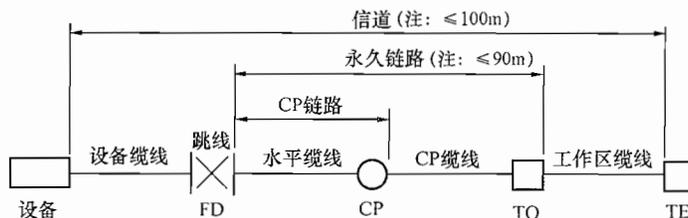


图 3.2.3 布线系统信道、永久链路、CP 链路构成

3.3.1 综合布线系统水平缆线与建筑物主干缆线及建筑群主干缆线之和所构成信道的总长度不应大于 2000m。

### 15.5.1.3 屏蔽布线系统

GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》中的规定：

- 3.5.1 综合布线区域内存在的电磁干扰场强高于3V/m时，宜采用屏蔽布线系统进行防护。
- 3.5.2 用户对电磁兼容性有较高的要求（电磁干扰和防信息泄漏）时，或网络安全保密的需要，宜采用屏蔽布线系统。
- 3.5.3 采用非屏蔽布线系统无法满足安装现场条件对缆线的间距要求时，宜采用屏蔽布线系统。
- 3.5.4 屏蔽布线系统采用的电缆、连接器件、跳线、设备电缆都应是屏蔽的，并保持屏蔽层的连续性。

## 15.5.2 综合布线系统的设计

### 15.5.2.1 工作区面积划分

(1) 一个独立的需要设置终端设备的区域宜划分为一个工作区。对于一般办公区，一个工作区的服务面积可按5~10m<sup>2</sup>估算，或按不同的应用场合调整面积的大小。

(2) GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》条文说明中规定：

- 4.1.2 目前建筑物的功能类型较多，大体上可分为商业、文化、媒体、体育、医院、学校、交通、住宅、通用工业等类型，因此，对工作区面积的划分应根据应用的场合做具体的分析后确定，工作区面积需求可参照表6所示内容。

表6 工作区面积划分表

建筑物类型及功能	工作区面积 (m <sup>2</sup> )
网管中心、呼叫中心、信息中心等终端设备较为密集的场地	3~5
办公区	5~10
会议、会展	10~60
商场、生产机房、娱乐场所	20~60
体育场馆、候机室、公共设施区	20~100
工业生产区	60~200

### 15.5.2.2 配线子系统的配置

(1) GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》中的规定：

- 4.2.4 每一个工作区信息插座模块（电、光）数量不宜少于2个，并满足各种业务的需求。
- 4.2.5 底盒数量应以插座盒面板设置的开口数确定，每一个底盒支持安装的信息点数量不宜大于2个。
- 4.2.6 光纤信息插座模块安装的底盒大小应充分考虑水平光缆（2芯或4芯）终接处的光缆盘留空间和满足光缆对弯曲半径的要求。
- 4.2.7 工作区的信息插座模块应支持不同的终端设备接入，每一个8位模块通用插座应连接1根4对对绞电缆；对每一个双工或2个单工光纤连接器件及适配器连接1根2芯光缆。

4.2.8 从电信间至每一个工作区水平光缆宜按2芯光缆配置。光纤至工作区域满足用户群或大客户使用时，光纤芯数至少应有2芯备份，按4芯水平光缆配置。

(2) GB 50312—2007《综合布线系统工程验收规范》中的规定：

6.0.2条 6 每个2口86面板底盒宜终接2条对绞电缆或1根2芯/4芯光缆，不宜兼做过路盒使用。

### 15.5.2.3 干线子系统的配置

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

21.3.7 电信间FD主干侧各类配线模块，应按电话、计算机网络的构成及主干电缆或光缆所需容量、模块类型和规格进行配置。主干缆线的配置应符合下列规定：

1 对于语音业务，大对数主干电缆的对数，应按每一个语音信息点（8位模块）配置1对线。当语音信息点8位模块通用插座连接ISDN用户终端设备，并采用S接口（4线接口）时，相应的主干电缆应按2对线配置，并在总需求线对的基础上至少预留10%的备用线对。

2 对于数据业务，主干缆线配置，应符合下列规定：

1) 最小量配置，宜按集线器（HUB）或交换机（SW）群（宜按4个HUB或SW组群）设置一个主干端口，每一个主干端口宜考虑一个备份端口；

2) 最大量配置，按每个集线器（HUB）或交换机（SW）设置一个主干端口，每4个主干端口宜考虑一个备份端口。

当主干端口为电接口时，每个主干端口应按4对线容量配置。

当主干端口为光接口时，每个主干端口应按2芯光纤容量配置。

(2) 干线光端口与光纤数量配置。

根据GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》4.3.5条第2款和JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》21.3.7条第2款的要求，总结出干线光端口与光纤数量配置参考表，见表15-5-1。

表 15-5-1 干线光端口与光纤数量配置参考表

所需端口与 光纤数量 配置情况	举例 说明	主干端口	备用端口	例1		例2		例3	
				96点 = 24口/台×4台， 1群	4芯 光纤	192点 = 24口/台×8台， 8台/4台=2群	8芯 光纤	256点， 取24口/台×11台， 11台/4台，取3群	12芯 光纤
最小量配置	每群1个	每群1个 =每4台1个	1主+1备 =2个端口	4芯 光纤	2主+2备 =4个端口	8芯 光纤	3主+3备 =6个端口	12芯 光纤	
最大量配置	每台1个	每4台1个	4主+1备 =5个端口	10芯 光纤	8主+2备 =10个端口	20芯 光纤	11主+3备 =14个端口	28芯 光纤	

注 1. 先根据所需数据信息点数计算出所需数据交换机的台数。再根据所需数据交换机的台数计算出所需光端口数。每个光端口按2芯光纤配置（收、发分纤传输）。

2. 本表举例中数据交换机的容量是按照每台24口计算的。如果为48口交换机，需另行计算。

3. 计算数据交换机台数和群数时，如出现小数，向上进一位（不能按四舍五入处理）。

(3) 当楼层信息插座较少时, 在规定长度的范围内, 可几层合用1个配线柜, 并合并计算光纤芯数。计算所得的光纤芯数还应按光缆的标称容量和实际需要进行选取。

(4) 如有用户需要光纤到桌面 (FTTD), 光缆可经或不经 FD 直接从 BD 引至桌面, 上述光纤芯数不包括光纤到桌面的应用在内。

(5) 配线设备交接硬件的选用, 宜符合下列要求:

- 1) 用于电话的配线设备, 宜选用 IDC 卡接式模块 (如 110 配线架);
- 2) 用于计算机网络的配线设备, 宜选用 RJ45 或 IDC 插接式模块。

#### 15.5.2.4 设计中应注意的问题

(1) 综合布线系统, 包括缆线、配线设备、接插件等无源设备与工程, 但不包括数据交换机、计算机主机、电话交换机等有源设备。故 GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》中对设备间、电信间的面积、温湿度环境要求、电源要求等, 都是针对无源布线设备提出的。实际工程中, 交换机等有源设备经常是和配线设备设置在同一机房甚至同一个机柜内。此时机房面积、温湿度环境、电源容量等要求应综合考虑, 标准适当提高。

(2) 设计中应注意, 从配线架至信息插座的配线长度 (即链路长度) 不得超过 90m, 需包含上下敷设长度、拐弯长度、机房内线缆长度等, 否则难以达到综合布线系统验收指标。

(3) 综合布线系统工程中, 选用产品类别及链路、信道等级时, 应综合考虑建筑物的功能、应用网络、业务终端类型、业务的需求及发展、性能价格、现场安装条件等因素。

(4) 同一布线信道及链路的缆线和连接器件应保持系统等级与阻抗的一致性。在布线系统设计时, 同一链路中所选的配线电缆、连接硬件、跳线、连接线的等级和类别应一致。如采用屏蔽系统时, 缆线、器件、跳线均应采用屏蔽型; 采用超五类系统时, 缆线、器件、跳线均应采用超五类的; 采用六类系统时, 缆线、器件、跳线均应采用六类的。

(5) 工程设计中信息点设置的密度是个重要问题, 直接影响用户使用的方便程度和投资的多少, 故每个项目应与用户商议确定。

(6) 标准较高的写字楼等民用建筑, 语音、数据可均采用综合布线系统, 以便于灵活分配数据、语音信息点。根据业主要求和传输速率的要求, 可采用六类或超五类非屏蔽布线系统。

(7) 写字楼等可按  $6\text{m}^2$  左右设 2 个信息点 (数据、语音各 1 个) 考虑, 并宜设置双孔信息插座。宾馆客房每间应至少设 1 个信息插座, 以便于客户上网或作为 IPTV、视频点播用。宾馆客房电话不宜采用综合布线系统, 宜采用普通电话线, 以便于与卫生间电话附机复接, 简单实用, 节约投资, 又可避免综合布线系统验收时可能产生的不必要的麻烦。

(8) 大开间办公室或开发商投资的项目, 信息点位置和数量不确定因素较多, 宜采用初期投资较少、灵活性较大的开放式办公室布线结构, 设集中式多用户信息插座或集合点接线箱, 安装于柱子上或比较固定的墙上。从该箱至信息点的布线, 由用户装修时与办公家具结合布放。此方案先期施工的配线长度应适当减少, 为后期配线留有余地。

(9) 在机场候机楼、新闻发布厅、报告厅等可能需要无线上网的场所, 宜设无线上网连接点 (即 WLAN 的 AP)。

(10) 在住宅、工业厂房等信息点比较分散的场合, 距离电信间 (弱电间) 较远、超出配线距离要求时, 可采用墙挂式综合布线配线箱, 内设数据交换机, 以延长配线距离。

(11) 门禁控制器、考勤机、食堂售饭、车库管理室等“一卡通”网点宜预留信息点。

(12) 单模和多模光缆的选用应符合网络的构成方式、业务的互通互连方式和光缆在网络中的传输距离。一般在楼内宜采用多模光缆，建筑物之间宜采用多模或单模光缆，需直接与电信运营商相连时宜采用单模光缆。多模光缆造价较低，与其配套的光端机造价亦较低。单模光缆衰减比多模光缆更小，远距离传输（如大于500m）时宜采用。光缆传输系统应使用标准的光缆连接器，连接器端接于光接口单元（LIU）。

(13) 从工程造价考虑，一般场所宜采用非屏蔽系统。当非屏蔽系统不能满足工程需要时，可采用屏蔽布线系统。

(14) 配线子系统缆线一般应采用非屏蔽或屏蔽4对对绞电缆，在信息量特别大的场所，需要时也可采用室内多模或单模光缆（即光纤到桌面）。

#### 15.5.2.5 综合布线系统有关房间要求

GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》中的规定：

##### 6.2 电信间（编者注：即弱电间）

6.2.1 电信间的数量应按所服务的楼层范围及工作区面积来确定。如果该层信息点数量不大于400个，水平缆线长度在90m范围以内，宜设置一个电信间；当超出这一范围时宜设两个或多个电信间；每层的信息点数量较少，且水平缆线长度不大于90m的情况下，宜几个楼层合设一个电信间。

6.2.2 电信间应与强电间分开设置，电信间内或其紧邻处应设置缆线竖井。

6.2.3 电信间的使用面积不应小于5m<sup>2</sup>，也可根据工程中配线设备和网络设备的容量进行调整。

6.2.5 电信间应采用外开丙级防火门，门宽大于0.7m。电信间内温度应为10~35℃，相对湿度宜为20%~80%。如果安装信息网络设备时，应符合相应的设计要求。

##### 6.3 设备间

6.3.2 每幢建筑物内应至少设置1个设备间，如果电话交换机与计算机网络设备分别安装在不同的场地或根据安全需要，也可设置2个或2个以上设备间、以满足不同业务的设备安装需要。

6.3.4 设备间的设计应符合下列规定：

2 设备间宜尽可能靠近建筑物缆线竖井位置，有利于主干缆线的引入。

4 设备间应尽量远离高低压变配电、电机、X射线、无线电发射等有干扰源存在的场地。

5 设备间室温度应为10~35℃，相对湿度应为20%~80%，并应有良好的通风。

6 设备间内应有足够的设备安装空间，其使用面积不应小于10m<sup>2</sup>，该面积不包括程控用户交换机、计算机网络设备等设施所需的面积在内。

7 设备间梁下净高不应小于2.5m，采用外开双扇门，门宽不应小于1.5m。

6.3.8 设备间应提供不少于两个220V带保护接地的单相电源插座，但不作为设备供电电源。

6.3.9 设备间如果安装电信设备或其他信息网络设备时，设备供电应符合相应的设计要求。

### 15.5.2.6 线路敷设要求

(1) GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》中的规定：

6.5.6 缆线布放在管与线槽内的管径与截面利用率，应根据不同类型的缆线做不同的选择。管内穿放大对数电缆或4芯以上光缆时，直线管路的管径利用率应为50%~60%，弯管路的管径利用率应为40%~50%。管内穿放4对对绞电缆或4芯光缆时，截面利用率应为25%~30%。布放缆线在线槽内的截面利用率应为30%~50%。

6.5.5 管线的弯曲半径应符合表6.5.5的要求。

表6.5.5 管线敷设弯曲半径

缆线类型	弯曲半径 (mm) / 倍
2芯或4芯水平光缆	>25mm
其他芯数和主干光缆	不小于光缆外径的10倍
4对非屏蔽电缆	不小于电缆外径的4倍
4对屏蔽电缆	不小于电缆外径的8倍
大对数主干电缆	不小于电缆外径的10倍
室外光缆、电缆	不小于缆线外径的10倍

注：当缆线采用电缆桥架布放时，桥架内侧的弯曲半径不应小于300mm。

(2) 设计中应注意的问题。

1) 综合布线系统水平线缆一般较多，宜采用金属线槽在吊顶内敷设。线槽规格应按照截面利用率进行核算。布放缆线在线槽内的截面利用率应为30%~50%（以下经验数据可供工程设计中参考：50根以下六类线宜采用100×50线槽，50~100根六类线宜采用100×100线槽；100~200根六类线宜采用200×100线槽）。

2) 从线槽引至信息插座的网线宜采用钢管暗棚或埋地敷设。管内穿放4对对绞电缆或4芯光缆时，截面利用率应为25%~30%。每根管内穿线不应超过4根。超五类非屏蔽线2根宜套SC20管，4根套SC25管。超五类屏蔽线2根宜套SC20管。六类非屏蔽线2根宜套SC25管。

3) 六类线及超五类屏蔽线较粗、较硬，对弯曲半径、扭绞系数等要求更高，不宜采用4孔信息插座，也不应将信息插座出线盒作为过路盒串接至其他插座。

4) 根据保密要求，涉密网与非密网必须进行物理隔离，即涉密网的线缆必须单设线槽或钢管敷设，而且与其他管线应保持必要的间距。非涉密的外网线路可与普通电话线路敷设在同一线槽内。

5) 在高大空间等处，必要时可采用地面金属线槽方式布线。电脑教室等处线缆较多时，可采用网络地板方式布线。计算机主机房、网络设备间等处可采用防静电活动地板或电缆桥架布线。

### 15.5.2.7 电气防护及接地

GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》中的要求：

7.0.1 综合布线电缆与附近可能产生高电平电磁干扰的电动机、电力变压器、射频应

用设备等电器设备之间应保持必要的间距，并应符合下列规定：

- 1 综合布线电缆与电力电缆的间距应符合表 7.0.1-1 的规定。

表 7.0.1-1 综合布线电缆与电力电缆的间距

类别	与综合布线接近状况	最小间距 (mm)
380V 电力电缆 < 2kV · A	与缆线平行敷设	130
	有一方在接地的金属线槽或钢管中	70
	双方都在接地的金属线槽或钢管中 <sup>②</sup>	10 <sup>①</sup>
380V 电力电缆 2 ~ 5kV · A	与缆线平行敷设	300
	有一方在接地的金属线槽或钢管中	150
	双方都在接地的金属线槽或钢管中 <sup>②</sup>	80
380V 电力电缆 > 5kV · A	与缆线平行敷设	600
	有一方在接地的金属线槽或钢管中	300
	双方都在接地的金属线槽或钢管中 <sup>②</sup>	150

注：① 当 380V 电力电缆 < 2kV · A，双方都在接地的线槽中，且平行长度 ≤ 10m 时，最小间距可为 10mm。

② 双方都在接地的线槽中，系指两个不同的线槽，也可在同一线槽中用金属板隔开。

7.0.2 综合布线系统应根据环境条件选用相应的缆线和配线设备，或采取防护措施，并应符合下列规定：

- 1 当综合布线区域内存在的电磁干扰场强低于 3V/m 时，宜采用非屏蔽电缆和非屏蔽配线设备。

- 2 当综合布线区域内存在的电磁干扰场强高于 3V/m 时，或用户对电磁兼容性有较高要求时，可采用屏蔽布线系统和光缆布线系统。

- 3 当综合布线路由上存在干扰源，且不能满足最小净距要求时，宜采用金属管线进行屏蔽，或采用屏蔽布线系统及光缆布线系统。

7.0.3 在电信间、设备间及进线间应设置楼层或局部等电位接地端子板。

7.0.4 综合布线系统应采用共用接地的接地系统，如单独设置接地体时，接地电阻不应大于 4Ω。如布线系统的接地系统中存在两个不同的接地体时，其接地电位差不应大于 1V（有效值）。

7.0.9 当电缆从建筑物外面进入建筑物时，应选用适配的信号线路浪涌保护器，信号线路浪涌保护器应符合设计要求。

### 15.5.2.8 综合布线系统图示例

综合布线系统图示例如图 15-5-2 所示。

### 15.5.3 综合布线系统的主要系统指标

#### 15.5.3.1 主要系统指标

(1) GB 50311—2007《综合布线系统工程设计规范》中的规定：

5.0.2 相应等级的布线系统信道及永久链路、CP 链路的具体指标项目，应包括下列内容：

- 1 3 类、5 类布线系统应考虑指标项目为衰减、近端串音（NEXT）。

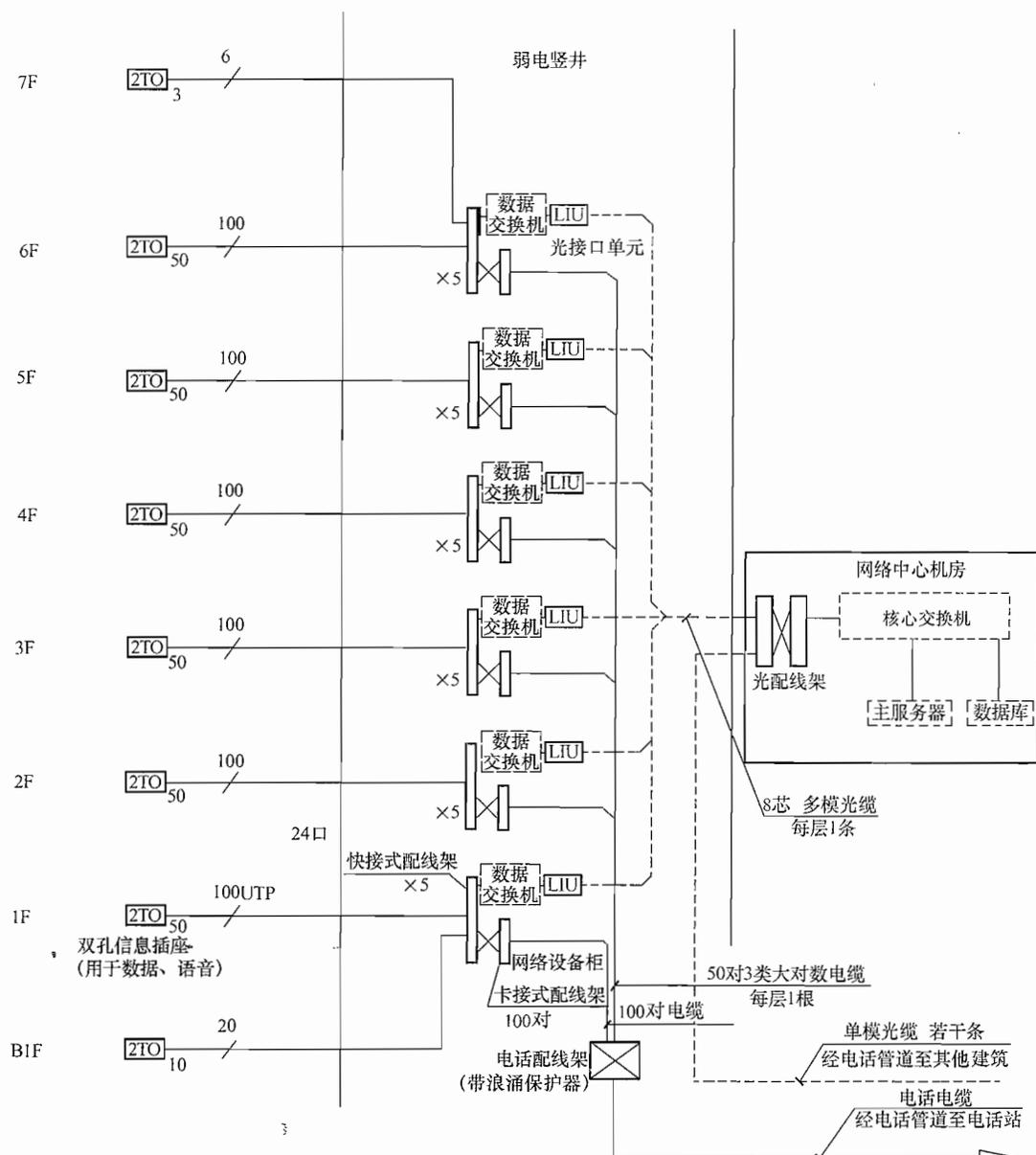


图 15-5-2 综合布线系统图示例

2 5e类、6类、7类布线系统，应考虑指标项目为插入损耗（IL）、近端串音、衰减串音比（ACR）、等电平远端串音（ELFEXT）、近端串音功率和（PS NEXT）、衰减串音比功率和（PS ACR）、等电平远端串音功率和（PS ELFEXT）、回波损耗（RL）、时延、时延偏差等。

(2) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》附录中的规定：

L.0.1 回波损耗（RL）只在布线系统中的C、D、E、F级采用，在布线的两端应符合回波损耗值的要求，布线系统的最小回波损耗值应符合表L.0.1的规定。

表 L.0.1 最小回波损耗值

频率 (MHz)	最小回波损耗 (dB)							
	信道				永久链路			
	C级	D级	E级	F级	C级	D级	E级	F级
1	15.0	17.0	19.0	19.0	15.0	19.0	21.0	21.0
16	15.0	17.0	18.0	18.0	15.0	19.0	20.0	20.0
100	—	10.0	12.0	12.0	—	12.0	14.0	14.0
250	—	—	8.0	8.0	—	—	10.0	10.0
600	—	—	—	8.0	—	—	—	10.0

L.0.2 布线系统的最大插入损耗 (IL) 值应符合表 L.0.2 的规定。

表 L.0.2 最大插入损耗值

频率 (MHz)	最大插入损耗 (dB)											
	信道						永久链路					
	A级	B级	C级	D级	E级	F级	A级	B级	C级	D级	E级	F级
0.1	16.0	5.5	—	—	—	—	16.0	5.5	—	—	—	—
1	—	5.8	4.2	4.0	4.0	4.0	—	5.8	4.0	4.0	4.0	4.0
16	—	—	14.4	9.1	8.3	8.1	—	—	12.2	7.7	7.1	6.9
100	—	—	—	24.0	21.7	20.8	—	—	—	20.4	18.5	17.7
250	—	—	—	—	35.9	33.8	—	—	—	—	30.7	28.8
600	—	—	—	—	—	54.6	—	—	—	—	—	46.6

(编者注:从表 L.0.2 中可以看出,频率越高,插入损耗越大)。

L.0.3 线对与线对之间的近端串音 (NEXT) 在布线的两端均应符合表 L.0.3 布线系统的最小近端串音值的规定。

表 L.0.3 最小近端串音值 (编者注:实为最小串音衰减值)

频率 (MHz)	最小近端串音 (dB)											
	信道						永久链路					
	A级	B级	C级	D级	E级	F级	A级	B级	C级	D级	E级	F级
0.1	27.0	40.0	—	—	—	—	27.0	40.0	—	—	—	—
1	—	25.0	39.1	60.0	65.0	65.0	—	25.0	40.1	60.0	65.0	65.0
16	—	—	19.4	43.6	53.2	65.0	—	—	21.1	45.2	54.6	65.0
100	—	—	—	30.1	39.9	62.9	—	—	—	32.3	41.8	65.0
250	—	—	—	—	33.1	56.9	—	—	—	—	35.3	60.4
600	—	—	—	—	—	51.2	—	—	—	—	—	54.7

(编者注:从表 L.0.3 中可以看出,频率越高,串音衰减越小,即越容易产生串音)。

L.0.4 近端串音功率和 (PSNEXT) 只应用于 D、E、F 级布线系统,在布线的两端均应符合表 L.0.4 布线系统的最小 PSNEXT 值的规定。

表 L.0.4 最小 PSNEXT 值 (编者注: 即近端串音功率和)

频率 (MHz)	最小 PSNEXT (dB)					
	信道			永久链路		
	D 级	E 级	F 级	D 级	E 级	F 级
1	57.0	62.0	62.0	57.0	62.0	62.0
16	40.6	50.6	62.0	42.2	52.2	62.0
100	27.1	37.1	59.9	29.3	39.3	62.0
250	—	30.2	53.9	—	32.7	57.4
600	—	—	48.2	—	—	41.7

L.0.5 线对与线对之间的衰减串音比 (ACR) 只应用于布线系统 D、E、F 级, ACR 值是 NEXT 与插入损耗分贝值之间的差值, 在布线的两端均应符合表 L.0.5 布线系统的最小 ACR 值的规定。

表 L.0.5 最小 ACR 值 (编者注: 即最小衰减串音比)

频率 (MHz)	最小 ACR (dB)					
	信道			永久链路		
	D 级	E 级	F 级	D 级	E 级	F 级
1	56.0	61.0	61.0	56.0	61.0	61.0
16	34.5	44.9	56.9	37.5	47.5	58.1
100	6.1	18.2	42.1	11.9	23.3	47.3
250	—	-2.8	23.1	—	4.7	31.6
600	—	—	-3.4	—	—	8.1

### 15.5.3.2 链路衰减、近端串音衰减、ACR 的关系

链路衰减、近端串音衰减、ACR 的关系示意图如图 15-5-3 所示。

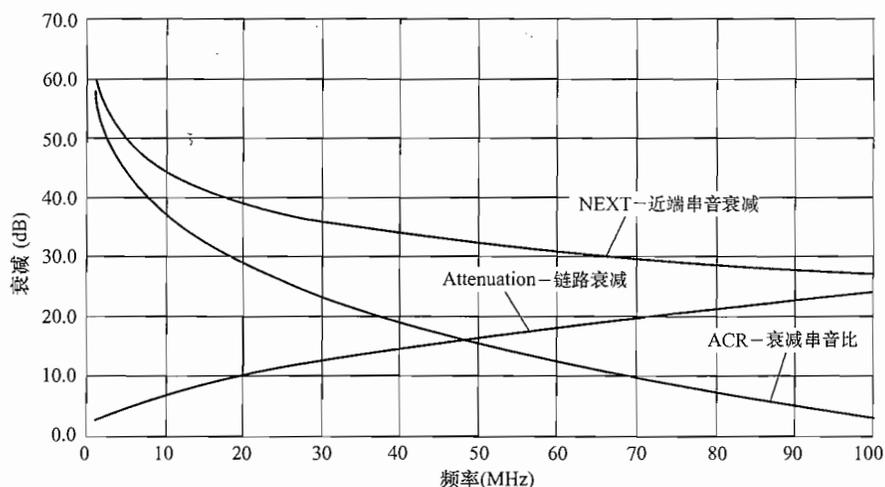


图 15-5-3 链路衰减、近端串音衰减、ACR 的关系示意图

从图 15-5-3 可以看出，频率越高，链路衰减越大，近端串音衰减越小（即串音越大），ACR 值越小，信噪比越差。

### 15.5.3.3 链路衰减、近端串音衰减、ACR 的概念

链路衰减、近端串音衰减、ACR 的概念示意图如图 15-5-4 所示。

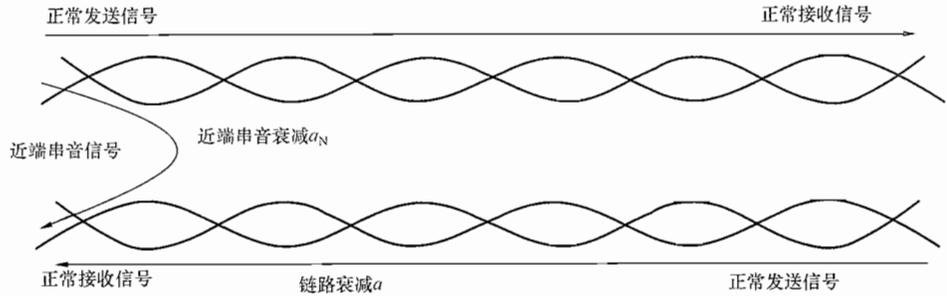


图 15-5-4 链路衰减、近端串音衰减、ACR 的概念示意图

注：ACR 为链路衰减与近端串音衰减的比率， $ACR (dB) = a_N (dB) - a (dB)$ 。

### 15.5.3.4 分布参数对信号传输影响

分布参数对信号传输影响示意图如图 15-5-5 所示。

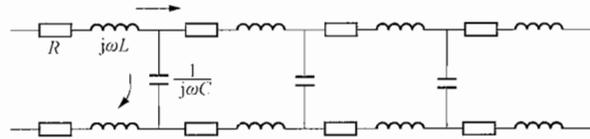


图 15-5-5 分布参数对信号传输影响示意图

R—导线电阻；L—导线分布电感；C—导线间分布电容；

$\omega$ —角频率， $\omega = 2\pi f$ ；f—传输信号的频率；j—复数中的虚数单位（与向量、相位有关）

说明：频率越高，感抗越大，容抗越小，故衰减越大，而且与其他线对之间的串扰越严重。

### 15.5.3.5 万兆网布线系统中串扰关系

万兆网布线系统中串扰关系如图 15-5-6 所示。

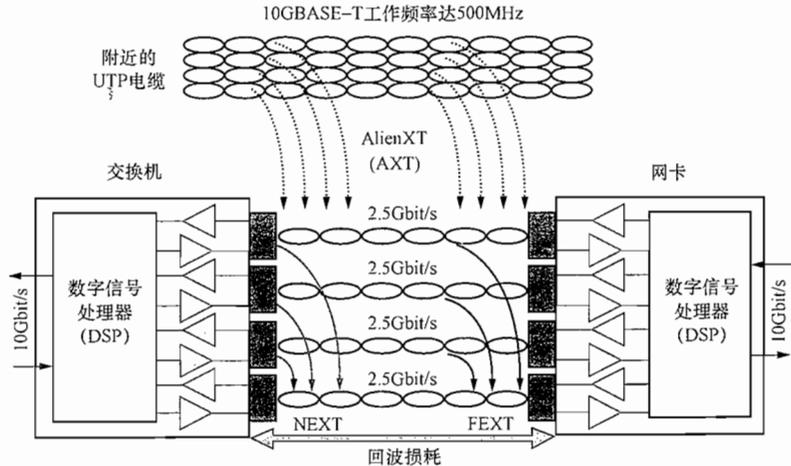


图 15-5-6 万兆网布线系统中串扰关系示意图

注：此图摘自 2011 年万兆网白皮书。

## 15.6 有线电视系统

### 15.6.1 有线电视系统的构成

#### 15.6.1.1 有线电视系统的概况

(1) 有线电视系统一般由前端部分、传输部分和分配部分三大部分组成。

1) 前端部分包括信号源、信号处理和信号放大合成输出部分。信号源包括接收天线、天线放大器、变频器、卫星接收天线及其设备、自办节目用的放像机,以及导频信号源等。信号处理部分包括频道变换器、频道处理器和调制器等。信号放大合成包括信号放大器、混合器、分配器以及集中供电电源等。

2) 传输系统由同轴电缆、光缆多路分配以及它们之间的组合和其他相应的器件及设备组成。

3) 分配系统由支干线、延长放大器、用户放大器和相应的无源器件,如分配器、分支器和用户终端组成。

(2) 有线电视系统技术发展变化很快,从电缆传输为主到光缆干线传输为主,从隔频少量节目传输到邻频 862MHz 几十套节目传输,从单向电视传输到双向多业务传输,从分散的小规模共用天线系统到城市的有线电视网,从模拟电视向数字电视发展等。现在有线电视系统干线已普遍采用光缆传输,其衰减小、信号质量好,并已纳入城市有线电视网统一建设和管理。故此处侧重于对与建筑工程设计有关的网络前端及以下分配网络设计进行论述。

(3) 国家标准图 03X401—2《有线电视系统》和 09X700《智能建筑弱电工程设计与施工》(上)中的有线电视部分,均由负责北京有线电视网建设和运营的歌华公司主编,汇集了国家标准和行业标准的有关内容,并补充了新技术发展的内容和工程经验,是本节编制的重要参考资料。

(4) 有线电视系统以传输电视信号为主,同时应考虑传输非电视信号的综合信息业务,设计中宜采用 862MHz 双向邻频传输系统,可传输上百套电视节目及其他信号。选用的无源器件、电缆等均应能传输 1000MHz 的信号。暂时不具备双向传输条件的,放大器等有源设备可分步实施,应预留可改为双向传输的可扩展性。

#### 15.6.1.2 有线电视系统的综合应用

智能建筑中,有线电视成为一个综合性、多功能的信息服务系统工程,具备传输电视、宽带上网、双向通信等功能。有线电视系统将朝着大型化、多功能的方向发展,成为社会信息的重要传播媒介和手段。

#### 15.6.1.3 有线电视系统双向传输的频谱分配

有线电视系统频谱图如图 15-6-1 所示。

### 15.6.2 有线电视系统的设计

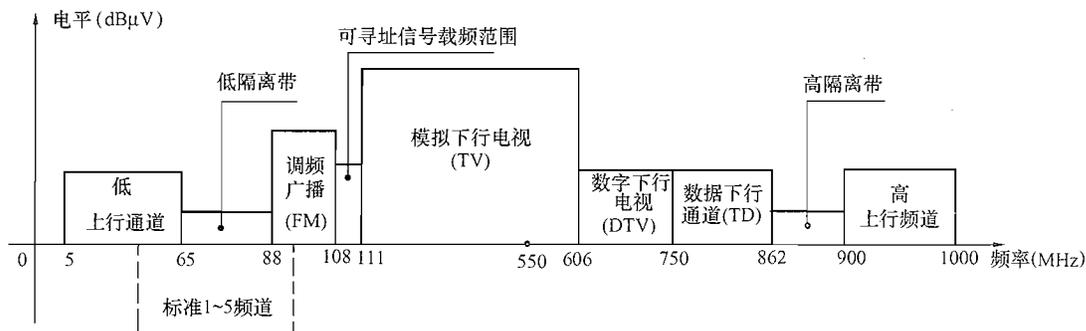
#### 15.6.2.1 系统的基本模式及主要技术指标分配

(1) GB 50200—1994《有线电视系统工程技术规范》中的规定:

2.2.1 系统可采用无干线系统、独立前端系统、有中心前端系统、有远地前端系统四种基本模式,并宜符合下列要求:

2.2.1.1 无干线系统模式规模很小,不需传输干线,由前端直接引至用户分配网络(图 2.2.1-1)。

15



注：

1. 本图是用于有线电视传输系统中频道基波配置的频谱图。
2. 频谱中下行模拟电视频道分为标准频道（DS—XX）和增补频道（Z—XX）。Z—XX是有线电视专用频道，有线电视接收机应有42个增补频道。
3. 由于网络双向业务通道的开通，下行频道DS—1至DS—5不宜选用。
4. 一个模拟电视频道的带宽为8MHz。在系统设计时，频道在频谱图上的排列是连续的，称为邻频传输系统；在频谱中有间隔时，称为隔频传输系统。
5. 横坐标表示频率，纵坐标表示网络传输中信号电平的相对高低。
6. 在一个传输系统中为防止上、下行信号的串扰特设置了隔离带。

图 15-6-1 有线电视系统频谱图

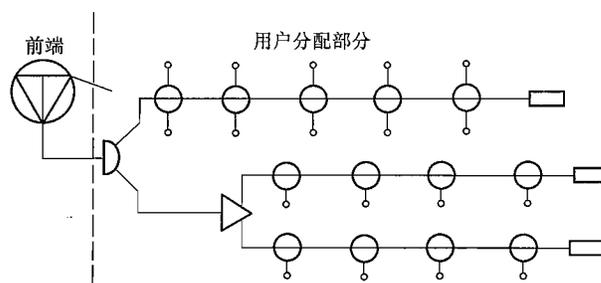


图 2.2.1-1 无干线系统模式

2.2.1.2 独立前端系统模式是典型的电缆传输分配系统，由前端、干线、支线及用户分配网组成（图2.2.1-2）。

2.2.2 系统载噪比、交扰调制比和载波互调比的最小设计值应符合表2.2.2的规定。

系统载噪比、交扰调制比、载波互调比的最小设计值（dB） 表 2.2.2

项 目	设计值
载噪比 (C/N)	44
交扰调制比 (CM)	47
载波互调比 (IM)	58

2.2.3 各种系统模式的前端、干线和分配部分的主要技术指标的分配系数应符合下列规定：

2.2.3.1 无干线系统的指标分配系数应符合表2.2.3-1的规定。

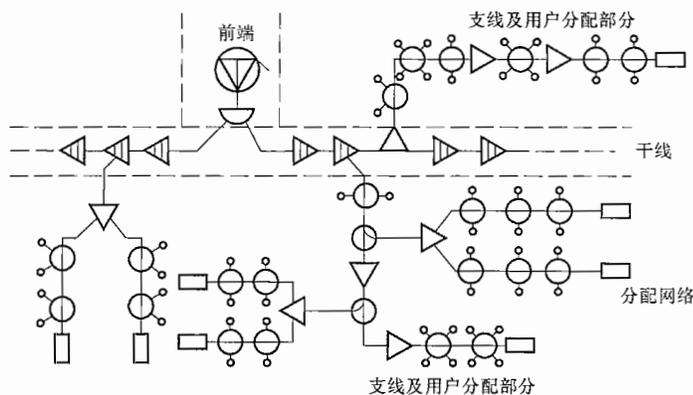


图 2.2.1-2 独立前端系统模式

无干线系统指标分配系数

表 2.2.3-1

项 目	前 端	分 配 网 络
载 噪 比	4/5	1/5
交 扰 调 制 比	1/5	4/5
载 波 互 调 比	1/5	4/5

2.2.3.2 独立前端系统的指标分配系数，应根据干线的衰减值  $A$  (dB)，按表 2.2.3-2 的规定选取。

独立前端系统指标分配系数

表 2.2.3-2

项 目	前 端		干 线		分 配 网 络	
	$A < 100\text{dB}$	$A \geq 100\text{dB}$	$A < 100\text{dB}$	$A \geq 100\text{dB}$	$A < 100\text{dB}$	$A \geq 100\text{dB}$
载 噪 比	7/10	5/10	2/10	4/10	1/10	1/10
交 扰 调 制 比	2/10	1/10	2/10	5/10	6/10	4/10
载 波 互 调 比	2/10	1/10	2/10	5/10	6/10	4/10

编者注：现在干线电缆已没有衰减大于 100dB 的情况了，故阴影部分可不予考虑。

2.2.4 载噪比、交扰调制比、载波互调比的分贝 (dB) 数可按下列公式计算：

$$[C/N]_x = 44 - 10\lg a \quad (2.2.4-1)$$

$$[CM]_x = 47 - 20\lg b \quad (2.2.4-2)$$

$$[IM_2]_x = 58 - 10\lg c \quad (2.2.4-3)$$

式中  $[C/N]_x$ ——分配给某一部分载噪比的分贝数；

$a$ ——分配给该部分载噪比的系数；

$[CM]_x$ ——分配给某一部分交扰调制比的分贝数；

$b$ ——分配给该部分交扰调制比指标的系数；

$[IM_2]_x$ ——分配给某部分二阶载波互调比的分贝数；

$c$ ——分配给该部分载波互调比的系数。

2.5.2 干线放大器常温下输出电平的最高值应按下列式计算：

$$S_{oa} = S_{oamax} - 10\lg n - 7.5\lg(N-1) - (1/2)[CM_a - 47] \quad (2.5.2)$$

式中  $S_{oa}$ ——干线放大器常温下输出电平的最高值 (dB $\mu$ V)；

$S_{oamax}$ ——干线放大器的标称最大输出电平 (dB $\mu$ V)；

$CM_a$ ——分配给干线部分的交扰调制比 (dB)；

$n$ ——该干线上串接放大器的个数；

$N$ ——系统传输的频道数目。

(2) 干线放大器最大输出电平计算举例：

如干线放大器标称最大输出电平为 110dB，串联 3 个放大器，传输频道数为 51 个，分配给干线的交扰调制比的系数为 0.2，则：

$$\begin{aligned} S_{oa} &= S_{oamax} - 10\lg n - 7.5\lg(N-1) - 0.5(CM_a - 47) \\ &= 110 - 10\lg 3 - 7.5\lg(51-1) - 0.5(47 - 20\lg 0.2 - 47) \\ &= 110 - 10\lg 3 - 7.5\lg 50 + 0.5(20\lg 0.2) \\ &= 110 - 4.8 - 7.5 \times 1.7 + 10\lg 0.2 \\ &= 110 - 4.8 - 12.75 - 7 \\ &= 110 - 24.55 \\ &= 85.45(\text{dB}) \end{aligned}$$

(3) 从以上示例可以看出，干线放大器串联个数、频道数量、交扰调制比分配的指标，对放大器最大输出电平影响很大。放大器标称最大输出电平的标准，是按照单一放大器传输 2 个频道给出的，工程中采用时必须扣除频道数量和放大器串联个数等影响，不应直接将放大器产品标称的最大输出电平作为实际可输出的电平值进行计算。因放大器串联多，噪声叠加，对信噪比不利；频道数量增多，对交扰调制比指标不利。

(4) 分配网络与干线类似，也需考虑放大器串联个数、传输的频道数量、交扰调制比分配的指标，对放大器的最大输出电平的影响。故一台放大器不能带太多用户。

### 15.6.2.2 有线电视系统对机房、传输方式、阻抗、电平等要求

GB 50200—1994《有线电视系统工程技术规范》中的规定：

2.7.1 有自办节目功能的前端，应设置单独的前端机房。播出节目在 10 套以下时，前端机房的使用面积宜为 20m<sup>2</sup>；播出节目每增加 5 套，机房面积宜增加 10m<sup>2</sup>。

2.3.6.3 天线放大器应安装在竖杆（架）上。天线至前端的馈线采用屏蔽性能好的同轴电缆，其长度不得大于 20m，并不得靠近前端输出口和干线输出电缆。

2.3.6.4 两副天线的水平或垂直间距不应小于较长波长天线的工作波长的 1/2，且不应小于 1m。

2.3.6.5 最低层天线与支承物顶面的间距不应小于其工作波长。

2.4.4 采用相邻频道传输的前端设备，应符合下列要求：

2.4.4.1 应具有 60dB 以上的邻频信号抑制特性。

2.6.4 分配网络宜采用分配—分支或分支—分支方式。

2.6.5 分配器的空余端和最后一个分支器的主输出口，必须终接 75 $\Omega$  负载。

2.1.5.3 选用的设备和部件的输入、输出标称阻抗、电缆的标称特性阻抗均应为 75 $\Omega$ 。

2.1.2 传输方式的确定,当传输干线的衰耗(以最高工作频率下的衰耗值为准)小于100dB时,可采用甚高频(VFH)、超高频(UHF)直接传输方式;传输干线的衰耗大于100dB时,应采用甚高频(VHF)传输方式或邻频传输方式。

2.2.5 系统输出口电平设计值宜符合下列要求:

2.2.5.1 非邻频系统可取 $70 \pm 5\text{dB}\mu\text{V}$ 。

2.2.5.2 采用邻频传输的系统可取 $64 \pm 4\text{dB}\mu\text{V}$ 。

注:在强场强区的较高楼层可提高电平,以避免同频干扰。

2.2.6 系统输出口频道间的电平差的设计值不应大于表2.2.6的规定。

系统输出口频道间电平差(dB)

表2.2.6

频道	频 段	系统输出口电平差
任意频道	超高频段	13
	甚高频段	10
	甚高频段中任意60MHz内	6
	超高频段中任意100MHz内	7
相邻频道		2

4.2.1 系统图像质量的主观评价应符合下列规定:

4.2.1.1 图像质量采用五级损伤制评定,五级损伤制评分分级应符合表4.2.1-1的规定。

五级损伤制评分级

表4.2.1-1

图像质量损伤的主观评价	评分分级
图像上不觉察有损伤或干扰存在	5
图像上有稍可觉察的损伤或干扰,但不讨厌	4
图像上有明显觉察的损伤或干扰,令人感到讨厌	3
图像上损伤或干扰较严重,令人相当讨厌	2
图像上损伤或干扰极严重,不能观看	1

4.2.1.2 图像和伴音(包括调频广播声音)质量损伤的主观评价项目应符合表4.2.1-2的规定。

主观评价项目

表4.2.1-2

项 目	损伤的主观评价现象
载噪比	噪波,即“雪花干扰”
交扰调制比	图像中移动的垂直或斜图案,即“窜台”
载波互调比	图像中的垂直,倾斜或水平条纹,即“网纹”
载波交流声比	图像中上下移动的水平条纹,即“滚道”
同波值	图像中沿水平方向分布在右边一条或多条轮廓线,即“重影”
色/亮度时延差	色、亮信息没有对齐,即“彩色鬼影”
伴音和调频广播的声音	背景噪声,如丝丝声、哼声、蜂声和串音等

15

### 15.6.2.3 邻频传输与隔频传输的概念

(1) 邻频传输示意图如图 15-6-2 所示。

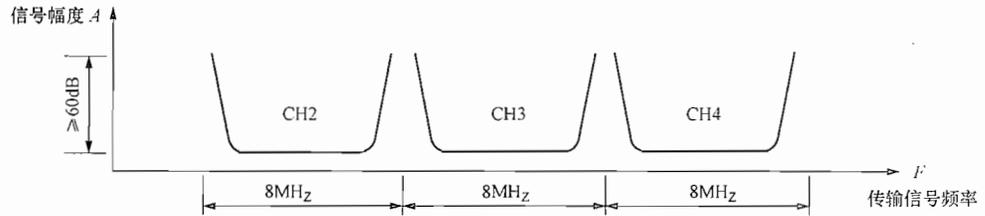


图 15-6-2 邻频传输示意图

注：邻频传输系统应具有 60dB 以上的邻频信号抑制特性。

(2) 隔频传输示意图如图 15-6-3 所示。

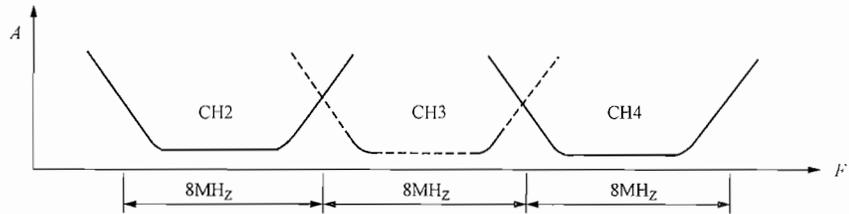


图 15-6-3 隔频传输示意图

注：中间的频道 CH3，因串扰严重，不能使用。

### 15.6.2.4 信号传输电平的概念

(1) 通信系统中信号的强弱常用电平表示。功率电平以 1mW 为基准。

(2) 某处功率电平值为该处功率与 1mW 之比取对数并乘以 10 倍的值，称分贝 (dB)。

$$\text{基准: } 10 \lg \frac{P}{P_0} = 10 \lg \frac{P}{1\text{mW}}$$

$$1\text{mW: } 10 \lg \frac{P}{P_0} = 10 \lg \frac{1\text{mW}}{1\text{mW}} = 10 \lg 1 = 10 \times 0 = 0\text{dB}$$

$$2\text{mW: } 10 \lg \frac{2\text{mW}}{1\text{mW}} = 10 \lg 2 = 10 \times 0.3026 \approx 3\text{dB}, \text{ 即功率增加 1 倍, 增加 3dB.}$$

$$1\text{W: } 10 \lg \frac{1\text{W}}{1\text{mW}} = 10 \lg 10^3 = 10 \times 3 \lg 10 = 10 \times 3 \times 1 = 30\text{dB}, \text{ 即功率增加 1000 倍, 增加 30dB.}$$

(3) 电压电平系从功率电平导出，某处电压电平值为电压之比取对数并乘以 20 倍的值，称分贝 (dB)。

$$10 \lg \frac{P}{P_0} = 10 \lg \frac{P}{1\text{mW}} = 10 \lg \frac{U^2/R}{U_0^2/R} = 10 \lg \frac{U^2}{U_0^2} = 10 \times 2 \lg \frac{U}{U_0} = 20 \lg \frac{U}{U_0} \text{dB}$$

(4) 有线电视信号以 1μV 为基准，为 0dB。

$$1\text{mV: } 20 \lg \frac{1\text{mV}}{1\mu\text{V}} = 20 \lg 10^3 = 20 \times 3 = 60(\text{dB}/\mu\text{V})$$

$$1\text{V: } 20 \lg \frac{1\text{V}}{1\mu\text{V}} = 20 \lg 10^6 = 20 \times 6 = 120(\text{dB}/\mu\text{V})$$

### 15.6.2.5 有线电视系统设计中应注意的问题

(1) 有线电视系统一般采用光纤同轴混合网传输方式 (HFC), 每 500 户以下应设置一个光节点, 应设置光电转换间, 面积不宜小于  $4\text{m}^2$ , 也可与电话等电缆进线交接间合设。

(2) 需要安装接收天线时, 天线安装位置应设置在较高处, 避开接收电波方向上的阻挡物和周围的金属构件, 并应远离公路、高压电力线以及工业干扰等干扰源。天线放大器应安装于竖杆上, 并需加避雷器。为尽量减少衰减和保证信噪比要求, 天线至前端的馈线应采用屏蔽性能好的同轴电缆, 其长度不得大于 20m, 并不得靠近前端输出口和输出电缆。

(3) 住宅楼每户应引入 1 路电视线路, 接至户内的电视设备箱或智能家居配线箱 (弱电箱)。室内至少客厅、主卧室应设电视终端盒。宾馆客房等处应设电视终端盒。办公楼的会议室、报告厅、多功能厅、餐厅、值班室等处宜设电视终端盒。

(4) 分配网络宜采用分配一分支或分支一分支方式。为便于检修, 分支器、分配器应安装于弱电间、楼梯间、走廊等公共部位。为避免扰民和安全防范, 住宅、宾馆客房有线电视线路不得在上下楼层户间或客房之间串接。

(5) 有线电视电缆应采用适合于射频传输的 SYWV 系列物理发泡射频同轴电缆, 干线宜采用 SYWV-75-9 电缆, 支线一般采用 SYWV-75-5 或 SYWV-75-7 电缆, 套钢管或沿金属线槽敷设。SYV 系列视频同轴电缆, 较低频段传输性能较好, 但射频传输衰减大, 适用于基带视频安防监控系统 ( $0\sim 8\text{MHz}$ ), 不适用于  $862\text{MHz}$  的邻频有线电视系统。

(6) 小区内室外有线电视线路, 有条件时宜沿弱电管道埋地敷设。需要架空敷设时, 应将电缆沿墙降至防雷保护区内、不妨碍车辆运行的高度 (如  $H=4.5\text{m}$  左右) 再行跨越, 其吊线应做接地处理。为防止遭到雷击, 不得直接在两建筑物屋顶之间架空敷设电缆。

### 15.6.2.6 分配网络系统图示例

六层楼星形无源分配网如图 15-6-4 所示, 六层楼树枝形无源分配网如图 15-6-5 所示。

## 15.6.3 卫星电视接收系统

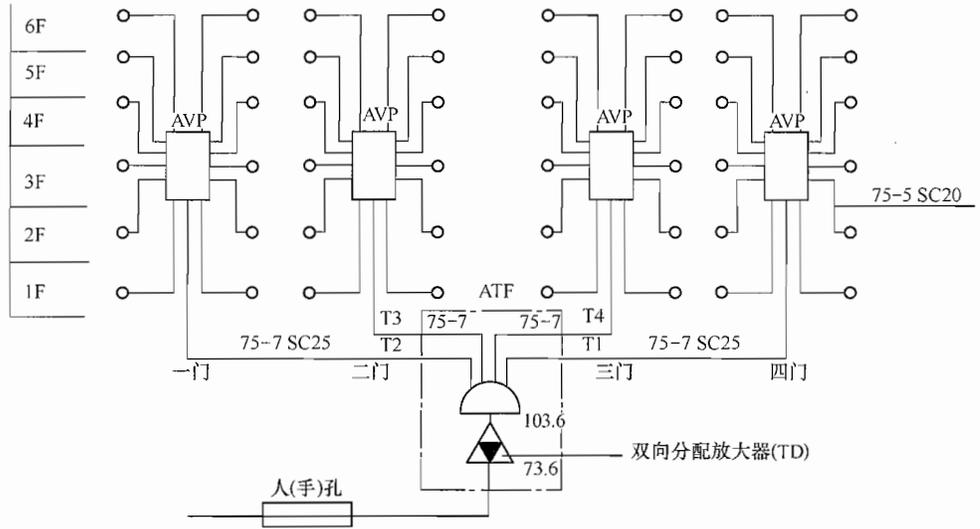
### 15.6.3.1 卫星天线

涉外宾馆、科研单位等如需接收卫星传输的信号, 应提醒业主办有关申请手续。如接收中星 10 号卫星 (位于东经  $110.5^\circ$ ) 的信号, 可采用  $4.5\text{m}$  板式天线。接收其他卫星的天线规格需根据卫星位置、信号强度确定。设计中需与结构专业配合预留天线基础、天线荷载 ( $6\text{m}$  天线质量可达  $2\text{t}$  左右)、风荷载等及引下管线。

### 15.6.3.2 卫星电视接收天线的位置

卫星接收天线应正面朝南, 在接收方向上不应有建筑物、女儿墙、冷却塔、广告牌等遮挡物。考虑减小风荷载、维修管理方便、建筑立面美观等因素, 卫星天线宜设于裙房顶, 也可设于楼顶, 有条件时也可设于花园草地上。天线附近应设避雷针进行防雷保护, 天线基座应从两个方向与避雷带焊接, 天线馈线应经电涌保护器再接入机房。

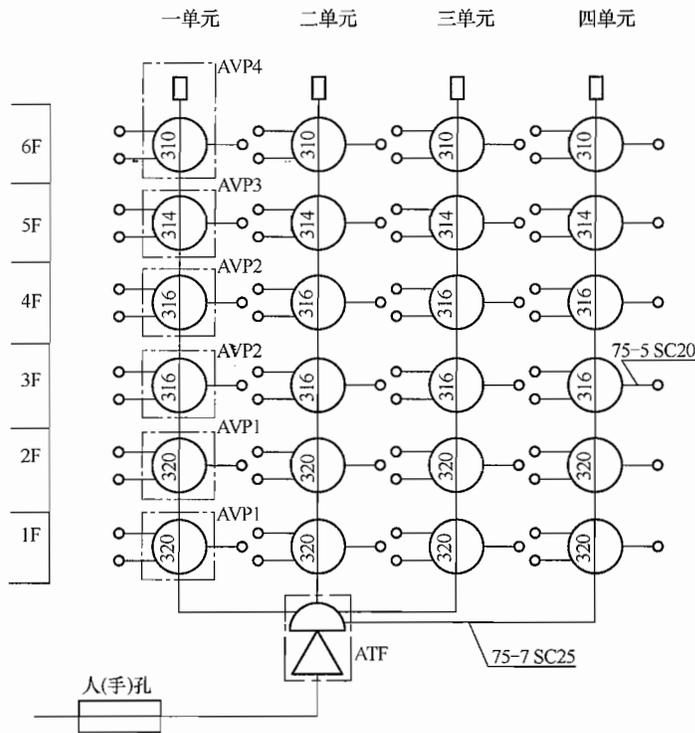
15



注：

1. 本示例为一门12户采用终端型分支器，每户设计一个系统输出端。
2. 每户安装两个或多个输出端时，需安装用户放大器。
3. TD的倾斜量为8dB，即下行最低传输频率电平为95.6dB $\mu$ V，TD的上行增益为30dB，平坦输出。
4. AVP是安装箱，内装12路终端分支器或12路可寻址分支器，安装在三层或四层均可。
5. ATF放大器箱安装在首层。
6. 选用此方案，设计人员应考虑管线的竖向通道。

图 15-6-4 六层楼星形无源分配网



注：

1. 本示例为一门18户采用分支器，每户设计一个系统输出端。
2. AVP为楼内分配箱，设置于各层公共楼道内。ATF为放大器箱。
3. 层间电缆为SYWV-75-7P2；进户电缆为SYWV-75-5P2。
4. 层间电缆长度取3.5m，分配放大器（TD）输出电平设定后，选择不同分支损耗的分支器保证系统输出口电平达标。
5. 本图适用于单向传输系统。

图 15-6-5 六层楼树枝形无源分配网

### 15.6.3.3 卫星天线的方位角、俯仰角

为保证卫星天线信号不被遮挡,应根据建筑所处地区的经纬度,用公式或图解法计算卫星接收天线的方位角与俯仰角(此公式与图表摘自《全国民用建筑工程设计技术统一措施—电气》)。

(1) 用简化公式计算卫星天线的方位角与俯仰角。

为了计算方便也可采用简化公式。假定卫星的轨道位置经度为 $\lambda_s$ ,接收地的经度为 $\varphi$ ,纬度为 $Q$ ,则接收天线的方位角和仰角可按下式计算。

相对经度,差值为

$$\phi = \varphi - \lambda_s$$

方位角,以正北方向为 $0^\circ$ ,顺时针旋转,故北半球对于卫星的方位角为 $(180^\circ + \alpha)$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \phi}{\sin Q} \right)$$

仰角 $\delta$ 为

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{\cos \beta - 0.1513}{\sin \beta} \right)$$

式中  $\cos \beta = \cos Q \cos \phi$ 。

根据 $\cos \beta$ 即可求出 $\sin \beta$ 值。

(2) 用图解法查天线方位角和仰角,如图15-6-6所示。

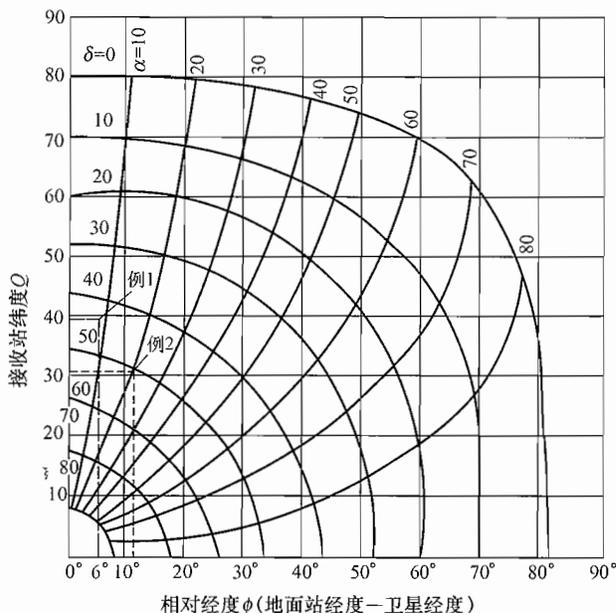
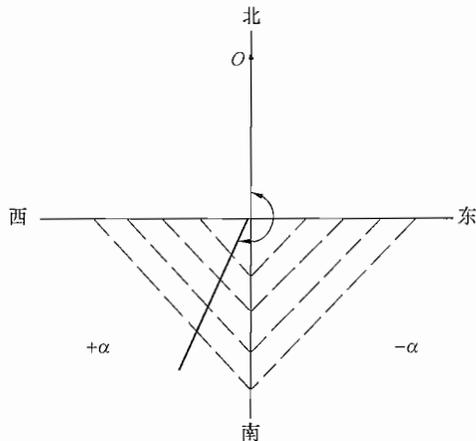


图 15-6-6 利用接收站纬度、接收站与卫星的相对经度查天线方位角( $\alpha$ )和仰角( $\delta$ )

(3) 我国处于北半球,以上式或上图计算出的 $\alpha$ 是以正南为 $0^\circ$ 的计算值。但世界上用的方位角值是以地磁北极为 $0^\circ$ 的,故需要加上 $180^\circ$ 进行调整,见下式和图15-6-7。

以地磁北极定向时的方位角由下式决定:方位角 $=180^\circ \pm \alpha$ , $\alpha$ 的正或负取值决定于卫星的定点位置。如果天线指向零位为正南,则 $\alpha$ 的正、负取值如图15-6-7所示。图15-6-7说明当卫星在地面站西边时(印度洋上空), $\alpha$ 取正值,当卫星在地面站东边时(太平

图 15-6-7  $\alpha$  的正负取值示意图

洋上空),  $\alpha$  为负值。

(4) 利用图解法计算卫星天线的方位角、俯仰角示例。

【例 1】在北京地区(位于东经  $116.45^\circ$ , 北纬  $39.92^\circ$ ), 接收中星 10 号卫星(位于东经  $110.5^\circ$ ) 的信号。

相对经度 = 北京的经度  $116.45^\circ$  - 卫星轨道位置经度  $110.5^\circ = 5.95^\circ$ 。

从图中可查得: 相对经度  $5.95^\circ$  与北纬  $39.92^\circ$  的交点为  $+9^\circ$ 。

方位角 =  $180^\circ + 9^\circ = 189^\circ$ 。

俯仰角 =  $43^\circ$ 。

即在北京接收中星 10 号卫星的方位角为  $189^\circ$ , 俯仰角  $43^\circ$ 。

【例 2】在上海地区(位于东经  $121.48^\circ$ , 北纬  $31.22^\circ$ ), 接收中星 10 号卫星(位于东经  $110.5^\circ$ ) 的信号。

相对经度 = 上海的经度  $121.48^\circ$  - 卫星轨道经度  $110.5^\circ = 10.98^\circ$ 。

从图中可查得: 相对经度  $10.98^\circ$  与上海纬度  $31.22^\circ$  的交点为  $+20.3^\circ$ 。

方位角 =  $180^\circ + 20.3^\circ = 200.3^\circ$ 。

图中可查得俯仰角为  $51.7^\circ$ 。

即在上海接收中星 10 号卫星的方位角为  $200.3^\circ$ , 俯仰角为  $51.7^\circ$ 。

#### 15.6.3.4 卫星电视接收前端子系统

下行邻频传输前端子系统如图 15-6-8 所示。

#### 15.6.4 防雷、接地与安全防护

GB 50200—1994《有线电视系统工程技术规范》中的规定:

- 2.9.1 系统的防雷设计应有防止直击雷、感应雷和雷电侵入波的措施。
- 2.9.2 接收天线的竖杆(架)上应装设避雷针。避雷针的高度应能满足对天线设施的保护。当安装独立的避雷针时, 避雷针与天线之间的最小水平间距应大于  $3\text{m}$ 。
- 2.9.3 独立避雷针和接收天线的竖杆均应有可靠的接地。当建筑物已有防雷接地系统时, 避雷针和天线竖杆的接地应与建筑物的防雷接地系统共地连接; 当建筑物无专门的防雷接地可利用时, 应设置专门的接地装置, 从接闪器至接地装置的引下线宜采用两根, 从不同的方位以最短的距离沿建筑物引下; 其接地电阻不应大于  $4\Omega$ 。
- 2.9.5 设置在天线附近的放大器, 当采用单独的电源线馈电时, 电源线应单独穿金属管敷设, 并严禁架空明敷。
- 2.9.6 进入前端的馈线应加装避雷保护器。
- 2.9.10.1 架空电缆直接引入时, 在入户处应增设避雷器, 并应将电缆外导体接到电气设备的接地装置上。
- 2.9.12 不得直接在两建筑物屋顶之间敷设电缆, 应将电缆沿墙降至防雷保护区以内, 并不得妨碍车辆的运行; 其吊线应做接地处理。

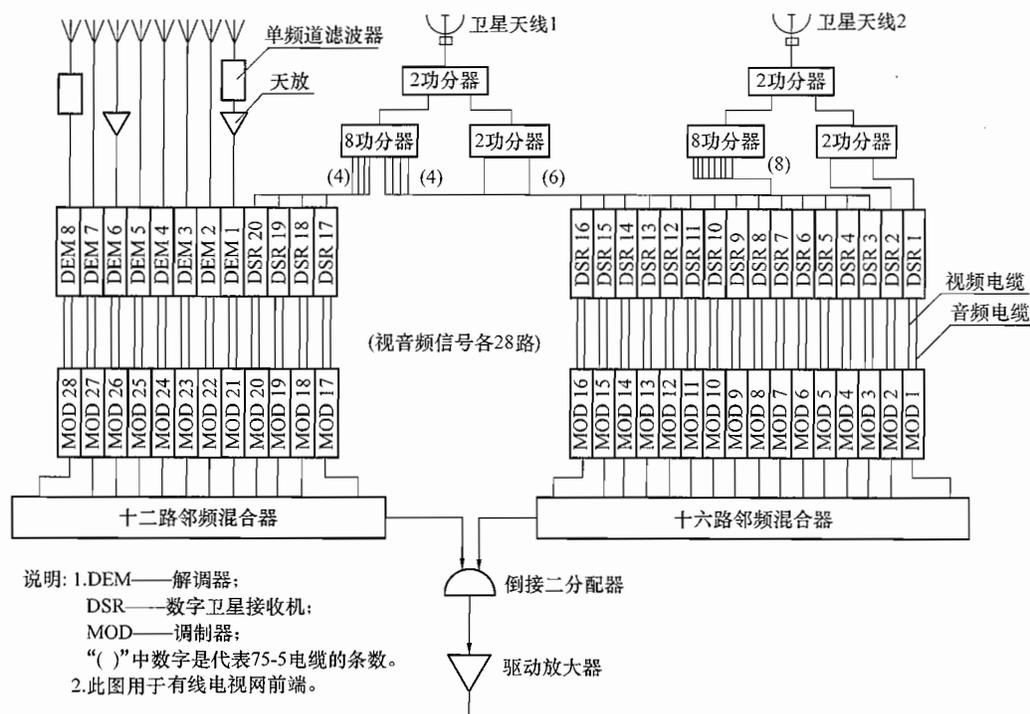


图 15-6-8 下行邻频传输前端子系统图

2. 8. 10. 2 不得将电缆与电力线同线槽、同出线盒、同连接箱安装。

## 15.7 公共广播、厅堂扩声及会议系统

### 15.7.1 设计中应遵循的规范:

- (1) JGJ 16—2008 《民用建筑电气设计规范》;
- (2) GB 50526—2010 《公共广播系统工程技术规范》;
- (3) GB 50371—2006 《厅堂扩声系统设计规范》;
- (4) GB 50116—2013 《火灾自动报警系统设计规范》;
- (5) GB 50799—2012 《电子会议系统工程设计规范》;
- (6) GB 50635—2010 《会议电视会场系统工程设计规范》;
- (7) GB 50524—2010 《红外线同声传译系统工程技术规范》;
- (8) JGJ/T 131—2012 《体育场馆声学设计及测量规范》。

### 15.7.2 广播扩声系统的应用类型及系统组成

各类建筑工程的广播扩声系统按使用功能分类如下:

(1) 公共广播系统, 为宾馆、商厦和各类大楼提供背景音乐和广播节目, 在不少工程中, 公共广播系统又兼作应急广播。公共广播系统的控制功能较多, 如选区广播和全呼功能、强切功能、广播优先权功能等。由于扬声器负载多而分散, 传输线路距离较长, 因此一般采用定电压输出 (70V 或 100V), 对声压级的要求不高, 音质要求以中音或中高音为主。

(2) 厅堂扩声系统, 是应用最广泛的系统, 包括各类剧场、礼堂、电影院、体育馆、

歌舞厅、卡拉OK厅等，它的专业性较强，不仅要考虑电声技术问题，还涉及建筑声学问题，不仅作语言扩声，还能供各种文艺演出使用。对音质的要求很高，房间建筑声学条件对扩声效果影响很大。

(3) 会议扩声系统，一般用于会议中心、报告厅、宾馆的会议室及大教室等场所。

(4) 室外扩声系统，主要用于体育场、广场、公园、艺术广场等。它的特点是服务区面积大，空间宽旷，声音传播以直达声为主。

(5) 流动演出扩声系统。扩声系统有固定安装和流动系统两大类，流动系统是在固定系统的声学特性条件不能满足使用时，临时设置的一种便于安装、调试和使用的高性能、轻便的扩声系统，常用于各种大型场地（如体育场、艺术广场和宴会厅等）做文艺演出等使用。

### 15.7.3 公共广播系统的设计

#### 15.7.3.1 公共广播系统设计的基本要求

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

16.2.1 广播系统根据使用要求可分为业务性广播、服务性广播和火灾应急广播。

16.2.5 广播系统宜采用定压输出，输出电压宜采用70V或100V。（编者注：70V为半功率播放，100V为满功率播放。）

16.2.8 广播系统中，从功放设备输出端至线路上最远扬声器间的线路损耗，应满足下列要求：

1 业务性广播不应大于2dB（1000Hz时）；

2 服务性广播不应大于1dB（1000Hz时）。

16.5.4 广播系统功放设备的容量，宜按下列公式计算：

$$P = K_1 \cdot K_2 \cdot \sum P_0 \quad (16.5.4-1)$$

式中  $P$ ——功放设备输出总电功率（W）；

$P_0$ ——每分路同时广播时最大电功率（W）；

$K_1$ ——线路损耗补偿系数（线路损耗1dB时应为1.26，线路损耗2dB时应为1.58）；

$K_2$ ——老化系数，宜取1.2~1.4。

(2) 对JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中16.5.4条的解析：

1)  $10\lg 1.26 = 1\text{dB}$ ； $10\lg 1.58 = 2\text{dB}$ 。

2) 根据16.5.4-1式得，

$$\begin{aligned} P &= K_1 \cdot K_2 \cdot \sum P_0 \\ &= (1.26 \sim 1.58) \times (1.2 \sim 1.4) \times \sum P_0 \\ &= (1.52 \sim 2.212) \sum P_0 \end{aligned}$$

故功放容量不应小于所驱动的、需同时广播的扬声器功率总和的1.5倍。

(3) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

16.5.7 扬声器的选择除满足灵敏度、频响、指向性等特性及播放效果的要求外，应符合下列规定：

1 办公室、生活间、客房等可采用1~3W的扬声器箱；

2 走廊、门厅及公共场所的背景音乐、业务广播等扬声器箱宜采用3~5W；

- 3 在建筑装饰和室内净高允许的情况下, 对大空间的场所宜采用声柱或组合音箱;
- 4 扬声器提供的声压级宜比环境噪声大 10~15dB, 但最高声压级不宜超过 90dB;
- 5 在噪声高、潮湿的场所设置扬声器箱时, 应采用号筒扬声器;
- 6 室外扬声器应采用防水防尘型。

(4) GB 50526—2010《公共广播系统工程技术规范》中的规定:

3.2.5 紧急广播系统的应具备功能除应符合本规范第 3.2.1 条的规定外, 尚应符合下列规定:

1 当公共广播系统有多种用途时, 紧急广播应具有最高级别的优先权。公共广播系统应能在手动或警报信号触发的 10s 内, 向相关广播区播放警示信号 (含警笛)、警报语声文件或实时指挥语声。

2 以现场环境噪声为基准, 紧急广播的信噪比应等于或大于 12dB。

3 紧急广播系统设备应处于热备用状态, 或具有定时自检和故障自动告警功能。

4 紧急广播系统应具有应急备用电源, 主电源与备用电源切换时间不应大于 1s; 应急备用电源应能满足 20min 以上的紧急广播。以电池为备用电源时, 系统应设置电池自动充电装置。

3.5.3 当传输距离在 3km 以内时, 广播传输线路宜采用普通线缆传送广播功率信号; 当传输距离大于 3km, 且终端功率在千瓦级以上时, 广播传输线路宜采用五类线缆、同轴电缆或光缆传送低电平广播信号。

3.5.4 当广播扬声器为无源扬声器, 且传输距离大于 100m 时, 额定传输电压宜选用 70V、100V; 当传输距离与传输功率的乘积大于 1km·kW 时, 额定传输电压可选用 150V、200V、250V。

3.5.5 公共广播系统室内广播功率传输线路, 衰减不宜大于 3dB (1000Hz)。

3.5.4 与 3.5.5 条文说明:

当今公共广播服务区的覆盖范围日益扩大, 成千瓦、上千米的线路十分寻常。如果把线路衰减定得过于严格, 将会大大增加工程负担。基于同样理由, 本规范对室外线路衰减不予限定。

当传输线采用铜导线、额定传输电压为 100V、线路衰减为 3dB, 且广播扬声器沿线均布时, 式 (1) [编者注: 公式 (1) 本书从略。] 可简化为式 (2):

$$S \approx 5LP \quad (2)$$

式中  $S$ ——传输线路截面积 ( $\text{mm}^2$ );

$L$ ——传输距离 (km);

$P$ ——负载扬声器总功率 (kW)。

3.5.6 火灾隐患地区使用的紧急广播传输线路及其线槽 (或线管) 应采用阻燃材料。

3.5.7 具有室外传输线路 (除光缆外) 的公共广播系统应有防雷设施。公共广播系统的防雷和接地应符合现行国家标准《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343 的有关规定。

3.6.6 当采用无源广播扬声器, 且传输距离大于 100m 时, 宜选用内置线间变压器的定压式扬声器。定压式扬声器的额定工作电压应与广播线路额定传输电压相同。

3.6.7 用于火灾隐患区的紧急广播扬声器应符合下列规定:

- 1 广播扬声器应使用阻燃材料, 或具有阻燃后罩结构。

3.7.2 非紧急广播用的广播功率放大器，额定输出功率不应小于其所驱动的广播扬声器额定功率总和的1.3倍。

3.7.3 用于紧急广播的广播功率放大器，额定输出功率不应小于其所驱动的广播扬声器额定功率总和的1.5倍；全部紧急广播功率放大器的功率总容量，应满足所有广播分区同时发布紧急广播的要求。

4.2.3 公共广播的功率传输线路不应与通信线缆或数据线缆共管或共槽。

4.2.4 除用电力载波方式传输的公共广播线路外，其他公共广播线路均严禁与电力线路共管或共槽。

4.2.5 公共广播功率传输线路的绝缘电压等级必须与其额定传输电压相容；线路接头不应裸露；电位不等的接头必须分别进行绝缘处理。

(5) GB 50314—2015《智能建筑设计标准》中的规定：

4.7.6 机房工程紧急广播系统备用电源的持续供电时间，必须与消防疏散指示标志照明备用电源的连续供电时间一致。

4.7.6 条文说明紧急广播系统是建筑物中最基本的紧急疏散设施之一，是建筑物中各类安全信息指令发布和传播最直接、最广泛、最有效的重要技术方式之一。为了确保紧急广播系统在大规模、超高层的建筑中可靠运行，本条提出了强化安全性能的规定。

### 15.7.3.2 公共广播系统的构成型式

(1) 定压输出广播系统示意图如图15-7-1所示。

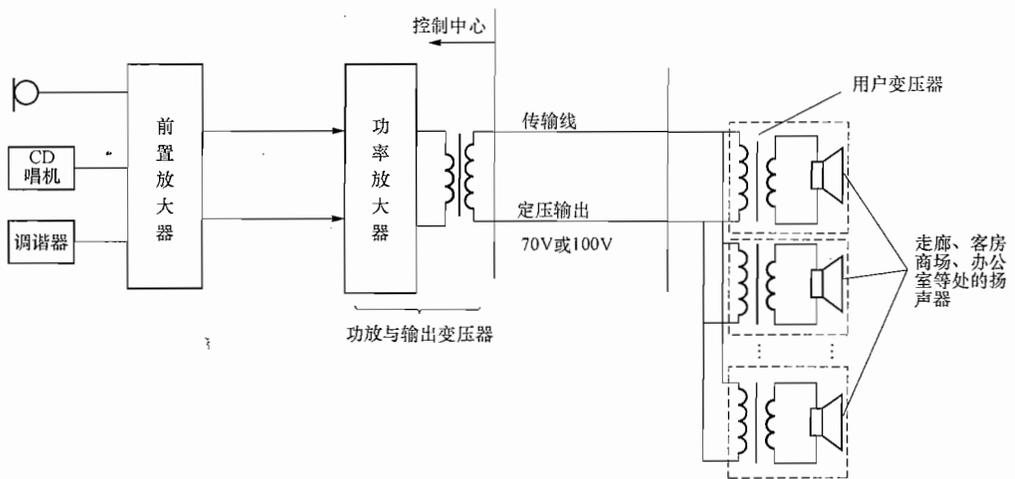


图15-7-1 定压输出广播系统示意图

(2) 无源终端系统与有源终端系统。

GB 50526—2006《公共广播系统工程技术规范》条文说明中的描述：

3.4.2 由定压式广播功率放大器驱动功率传输线路，直接激励无源广播扬声器放声的系统，是典型的无源终端系统（图1）。

经由信号传输线路激励有源广播扬声器放声的系统，是典型的有源终端系统（图2）。

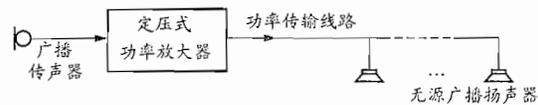


图1 无源终端方式

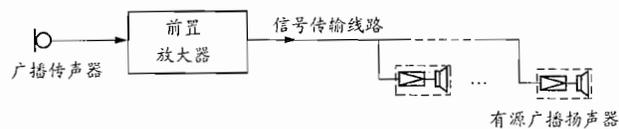


图2 有源终端方式

在具有主控中心和分控中心的系统中，分控中心通常是主控中心的有源终端；而由某些分控中心管理的子系统则可以选用图1的无源终端方式或图2的有源终端方式构建。这就是一种典型的有源终端和无源终端相结合的系统（图3）。

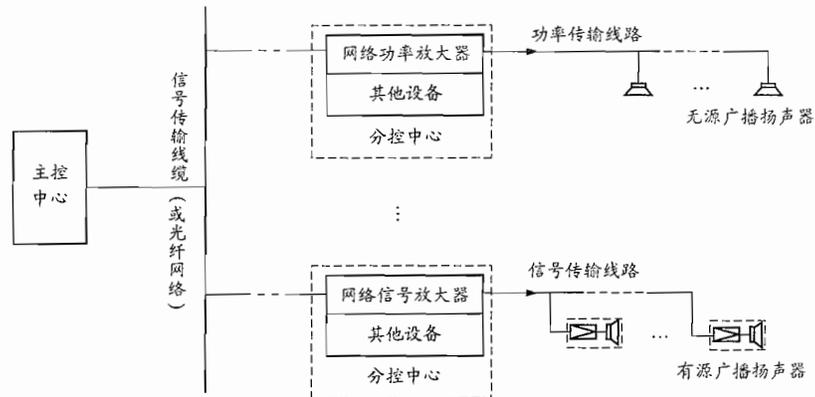


图3 有源终端和无源终端相结合的方式

### 15.7.3.3 公共广播系统扬声器的布置

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

16.6.5 背景音乐扬声器的布置应符合下列规定：

1 扬声器（箱）的中心间距应根据空间净高、声场均匀度要求、扬声器的指向性等因素确定。要求较高的场所，声场不均匀度不宜大于6dB。

2 扬声器箱在吊顶安装时，应根据场所按公式（16.6.5-1）~公式（16.6.5-3）确定其间距；

1) 门厅、电梯厅、休息厅内扬声器箱间距可按下式计算：

$$L = (2 \sim 2.5)H \quad (16.6.5-1)$$

式中  $L$ ——扬声器箱安装间距（m）；

$H$ ——扬声器箱安装高度（m）。

2) 走道内扬声器箱间距可按下式计算：

$$L = (3 \sim 3.5)H \quad (16.6.5-2)$$

3) 会议厅、多功能厅、餐厅内扬声器箱间距可按下式计算：

$$L = 2(H - 1.3) \tan \frac{\theta}{2} \quad (16.6.5-3)$$

式中  $\theta$ ——扬声器的辐射角，宜大于或等于  $90^\circ$ 。

## 15

(2) 扬声器辐射角范围与安装间距示意图。

扬声器辐射角范围与安装间距示意图如图 15-7-2 所示。

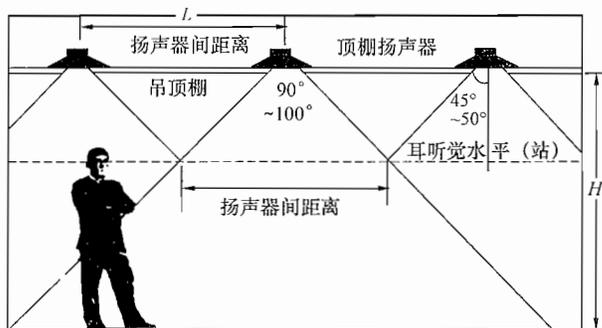


图 15-7-2 扬声器辐射角范围与安装间距示意图

### 15.7.3.4 公共广播系统中应注意的问题

(1) 公共广播包括消防应急广播、业务广播（语音为主）及服务性广播（以背景音乐为主）。

(2) 按照 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中 4.8.7 条的要求，集中报警系统和控制中心报警系统都必须设消防应急广播系统。

(3) 一般工程应急广播宜与业务广播共用扬声器等设备及广播线路，可节省投资。同时在日常使用中，可随时发现设备和线路中的故障，及时维修，保持系统完好率，避免产生急用时失效的问题。

(4) 在饭店、商场等处，当消防广播与业务广播主机设备不在同一个房间时，可共用扬声器与广播线路，音源、功率放大器等主机设备宜分别设置。如果共用主机设备和广播扬声器、广播线路时，消防控制室必须能起动功率放大器进行满功率广播。此时，广播室应设消防电源，发生火灾时也不能被切断。广播室人员平时下班，也不应拉闸断电。

(5) 宾馆客房应设应急广播扬声器，以保证能及时以高声强持续广播叫醒所有人员疏散。如设几套背景音乐广播，火灾时应强制接通应急广播。仅靠走廊上设置的扬声器，难以叫醒所有睡熟中的客人。要想由服务人员挨门叫醒所有人员并及时疏散，是不现实的，对于服务人员也是非常危险的。

(6) 进深较深的大开间办公室应设应急广播扬声器，应保证广播信号高于背景噪声 15dB，及时通知所有人员疏散。

(7) 走廊、门厅、操作间、商场等处宜采用 3~5W 扬声器。大开间的车间、汽车库等处，宜采用 10W 号筒式扬声器。噪声较大的场合，扬声器的声压级应比环境噪声高 15dB。航站楼、会展中心等空间高大、人员较多的场合，宜采用 20~30W 壁挂式音箱。

(8) 航站楼等对广播的舒适度和清晰度要求较高的场合，宜设噪声探测器，根据现场环境噪声调节广播音量，以指导旅客及时登机。

(9) 扬声器的安装间距应根据空间高度、声场均匀度要求、扬声器指向性、建筑柱网模数等因素确定。一般商场营业厅等场合一个扬声器的覆盖面积可按  $50 \sim 64\text{m}^2$  计算 (如  $7 \sim 8\text{m}$  柱网, 每个柱网 1 个扬声器), 满足  $L = (2 \sim 2.5)H$  的要求。走廊内吸顶安装时, 扬声器间距宜为  $10 \sim 15\text{m}$ , 满足  $L = (3 \sim 3.5)H$  的要求。

(10) 会议室采用吸顶扬声器时, 为保证声场的均匀性、收听的清晰度和舒适度, 扬声器数量应适当增加, 安装间距应适当减少, 可采用下式估算:

$$L = 2(H - 1.3) \sim 2.4(H - 1.3)$$

式中  $L$ ——扬声器安装间距, m;

$H$ ——扬声器安装高度, m。

当采用语言最佳频率  $400\text{Hz}$  为信号源测量时, 扬声器的辐射角均为  $90^\circ \sim 100^\circ$ 。由图 15-7-2 可得出下式

$$L = 2(H - 1.3) \tan \frac{\theta}{2}$$

式中  $\theta$ ——项棚式扬声器的辐射角。

$$\text{当 } \theta = 90^\circ \text{ 时, } L = 2(H - 1.3) \tan \frac{90^\circ}{2} = 2(H - 1.3)。$$

$$\text{当 } \theta = 100^\circ \text{ 时, } L = 2(H - 1.3) \tan \frac{100^\circ}{2} = 2.4(H - 1.3)。$$

1.3m 为人体坐姿时, 耳朵的平均高度, 由上述结果可知背景音乐扬声器在顶棚安装时, 其间距大约为扬声器辐射角在人耳高度上的假想平面的投影直径。

(11) 扬声器的安装高度。有吊顶处宜吸顶安装, 无吊顶处墙挂时一般宜为  $2.5\text{m}$ , 空间较高时宜为  $3 \sim 4\text{m}$ 。室外扬声器装于墙上或电杆上时, 安装高度一般宜为  $4 \sim 5\text{m}$ 。室外扬声器的金属外壳应与电杆的金属构件紧密连接并接地。室外背景音乐广播扬声器, 需要时也可设于草坪上。

#### 15.7.4 厅堂扩声系统的概念与技术指标

##### 15.7.4.1 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定:

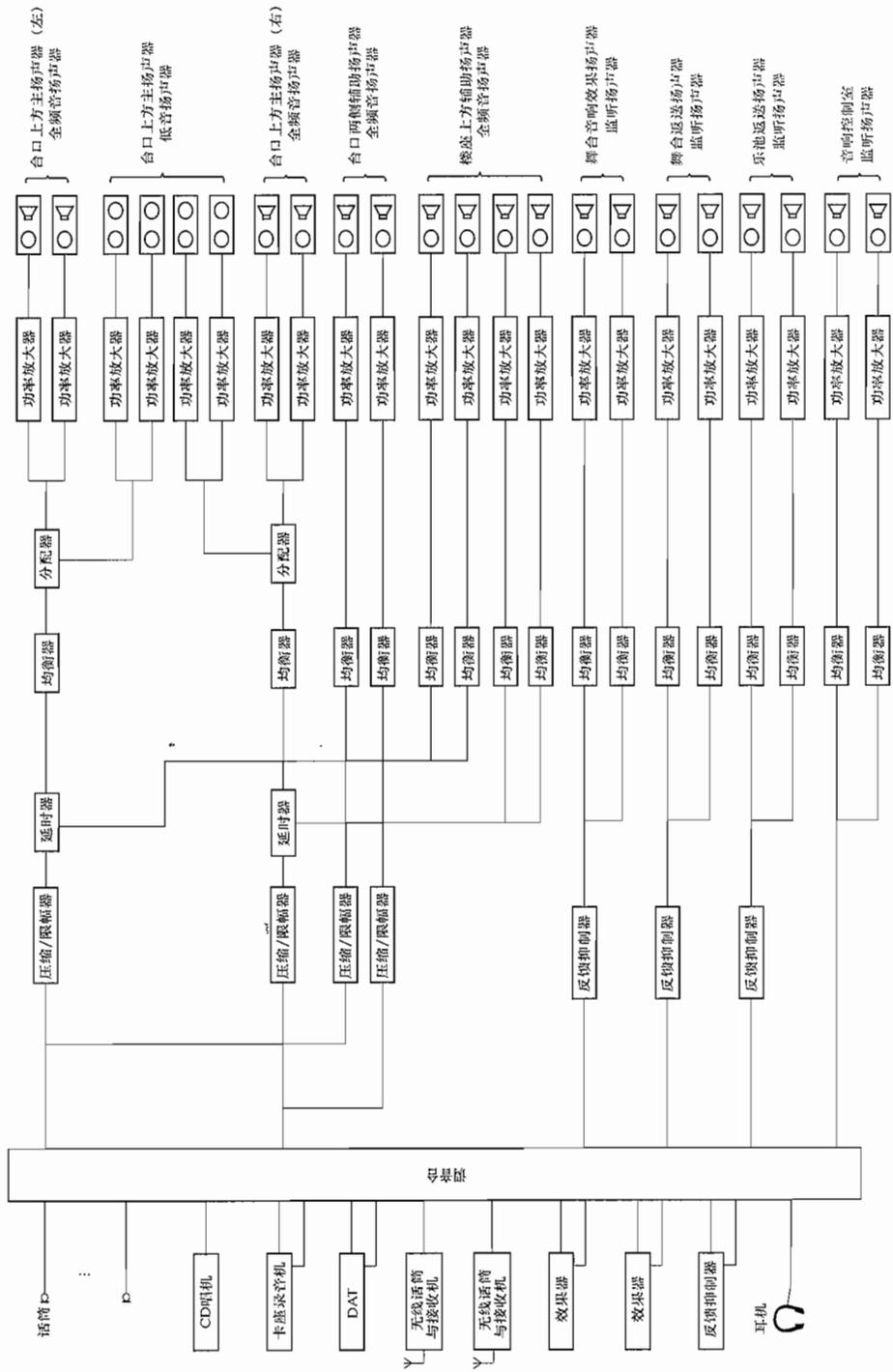
16.1.3 扩声系统的设置应符合下列规定:

- 1 扩声系统应根据建筑物的使用功能、建筑设计和建筑声学设计等因素确定;
- 2 扩声系统的设计应与建筑设计、建筑声学设计同时进行, 并与其他有关专业密切配合;
- 5 下列场所宜设置扩声系统:
  - 1) 听众距离讲台大于  $10\text{m}$  的会议场所;
  - 2) 厅堂容积大于  $1000\text{m}^3$  的多功能场所;
  - 3) 要求声压级较高的场所。

##### 15.7.4.2 扩声系统设备组成

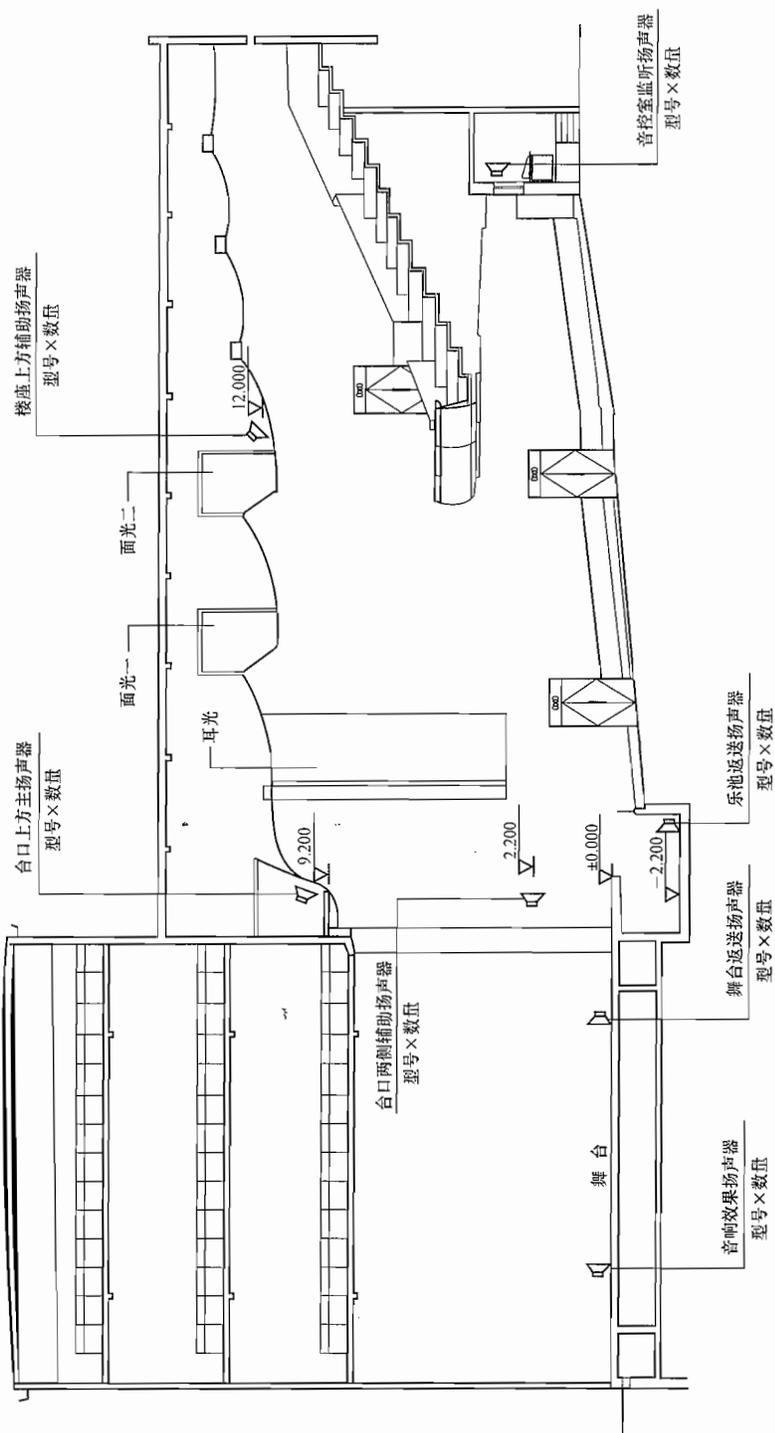
(1) 扩声系统通常由节目源 (各类话筒、CD、LD 或 DVD 等)、调音台 (各声源的混合、分配、调音润色)、信号处理设备 (周边器材或数字音频处理器 DSP)、功放和扬声器系统等设备组成。扩声系统包括设备和声场。主要过程为将声信号转换为电信号, 经放大、处理、传输, 再转换为声信号还原于所服务的声场环境。

(2) 剧场扩声系统示例, 如图 15-7-3 ~ 图 15-7-6 所示。



工程名称		A剧场	
项目		扩声系统	
审定	设计		
审核	制图		
设计负责人	校对		
工程负责人			
扩声系统原理图			

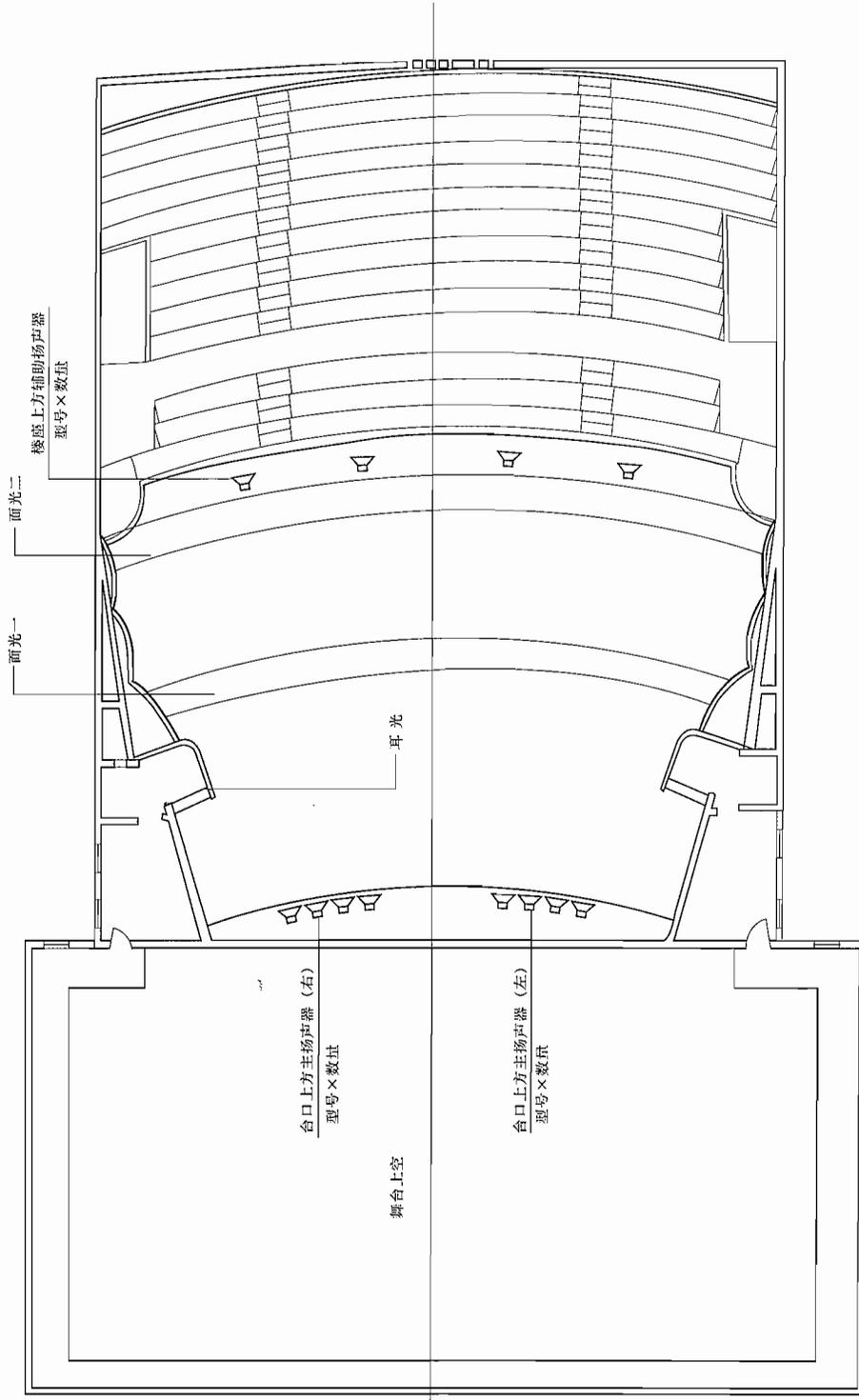
图 15-7-3 A 剧场扩声系统原理图例



工程名称		A剧场	
项目		扩声系统	
审定	设计	扬声器布置剖面图	
审核	制图		
设计负责人	校对		
工程负责人			

图 15-7-4 A 剧场扬声器布置剖面图

15



工程名称		A剧场	
项目		扩声系统	
设计	审核	扬声器布置二层平面图	
制图	校对		
设计负责人	工程师		

图 15-7-5 A 剧场扬声器布置二层平面图

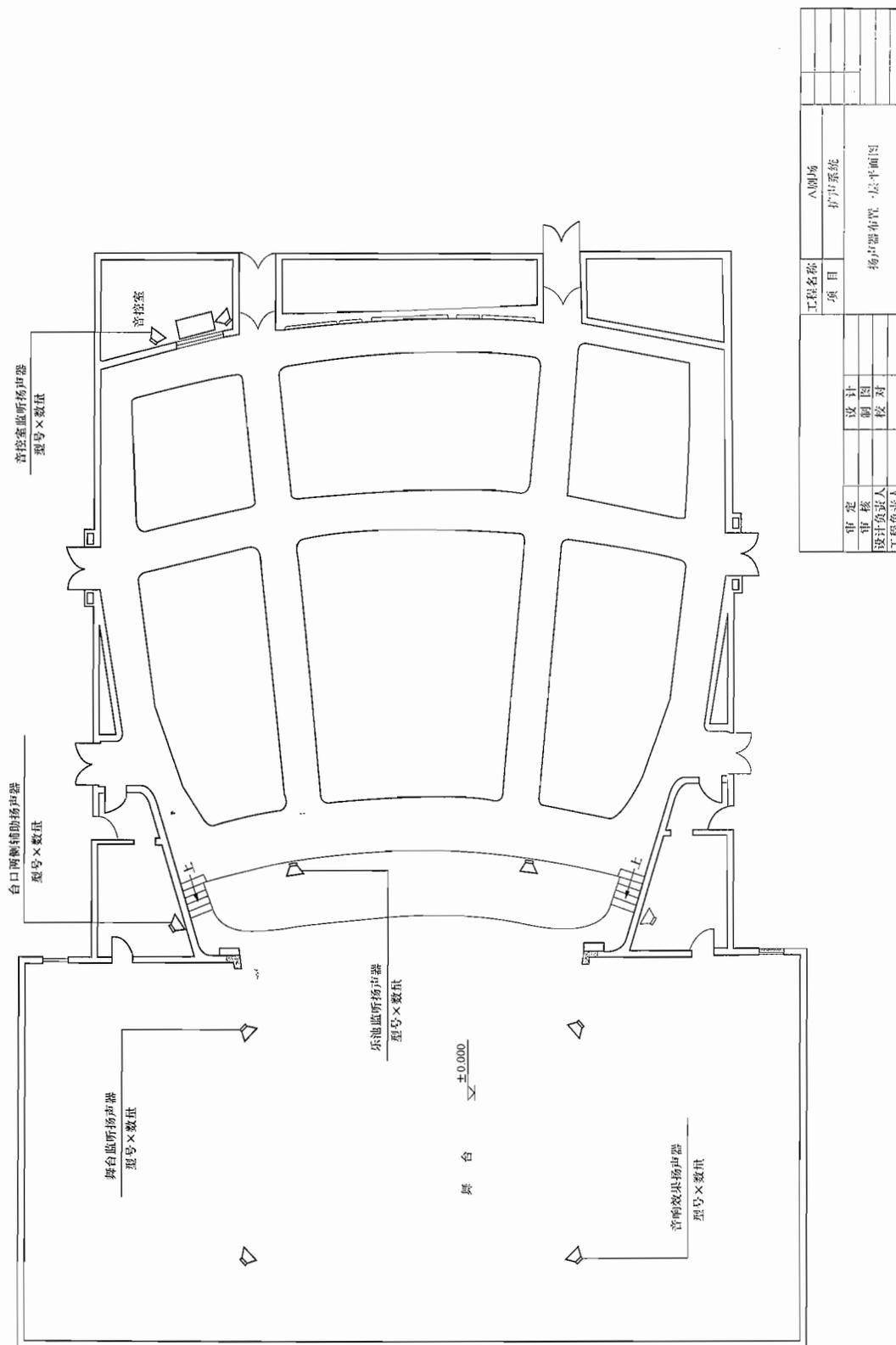


图 15-7-6 A 剧场扬声器布置一层平面图

这四张图摘自文化部行业标准 WH/T 19—2003《扩声系统的图符代号及制图规则》。

#### 15.7.4.3 扩声系统的部分术语

(1) GB 50371—2006《厅堂扩声系统设计规范》中的术语：

##### 2.0.1 扩声系统

扩声系统包括设备和声场。主要过程为：将声信号转换为电信号，经放大、处理、传输，再转换为声信号还原于所服务的声场环境；主要设备包括：传声器、音源设备、调音台、信号处理器、功率放大器和扬声器系统。

##### 2.0.4 最大声压级

扩声系统完成调试后，在厅堂内各测量点可能的最大峰值声压级的平均值。

##### 2.0.5 最大可用增益

厅堂扩声系统在声反馈临界状态时的增益减去6dB。

##### 2.0.6 传输频率特性

扩声系统在稳定工作状态下，厅堂内各测量点稳态声压级的平均值相对于扩声设备输入端的电平的幅频响应。

##### 2.0.7 传声增益

扩声系统在最大可用增益状态时，厅堂内各测量点稳态声压级平均值与扩声系统心形传声器处稳态声压级的差值，单位：dB。

##### 2.0.8 声场不均匀度

厅堂内（有扩声时）各测量点的稳态声压级的差值，单位：dB。

##### 2.0.9 声反馈

扩声系统中的扬声器系统放出的部分声能反馈到传声器的效应。

##### 2.0.10 系统总噪声级

扩声系统在最大可用增益工作状态下，厅堂内各测量点扩声系统所产生的各频带的噪声声压级（扣除环境背景噪声影响）平均值，以NR—曲线评价。

##### 2.0.12 数字信号处理 digital signal processing (DSP)

用数字技术对信号进行采集、储存、传输、变换等的方法和技术。

(2) 系统失真：扩声器系统由输入信号到输出信号全过程中产生的非线性畸变。

(3) 混响时间：声源达到稳定，待停止发声后，室内声压级衰减60dB所需的时间。

#### 15.7.4.4 扩声系统的几个基本概念和有关计算公式

(1) 声压级、声强级、声功率级、分贝的概念。GB/T 50155—2015《供暖通风与空气调节术语标准》中的规定：

##### 9.1.2 声压级

声压与基准声压之比的常用对数乘以20，以分贝为单位。

##### 9.1.6 声强级

声强与基准声强之比的常用对数乘以10，以分贝为单位。

##### 9.1.7 声功率级

声功率与基准声功率之比的常用对数乘以10，以分贝为单位。

### 9.1.8 分贝

标度声压级、声强级和声功率级等各种级的单位，以符号 dB 表示。它是两个功率或类似功率的两个同类量比值的常用对数乘以 10 的量纲一值。一般在使用中常取其中一个量作为基准。

(2) 声压级。场地内各供声点应保证足够的声压级，根据用途，平均声压级应为 85 ~ 100dB。声压级的计算式为

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0} (\text{dB}) \quad (15-7-1)$$

式中  $L_p$ ——声压级，dB；

$P$ ——声压，Pa；

$P_0$ ——参考声压，取  $P_0 = 0.00002 \text{Pa}$ 。

人耳的感知范围是 0 ~ 120dB。

(3) 最大声压级。

$$L_p = L_s + 20 \lg \frac{1}{r} + 10 \lg W_E = L_s - 20 \lg r + 10 \lg W_E \quad (15-7-2)$$

式中  $L_p$ ——最大直达声压级；

$L_s$ ——1 瓦米扬声器平均轴向灵敏度，又称扬声器特性灵敏度级，dB；

$r$ ——扬声器到听众点的距离，m；

$W_E$ ——扬声器使用的电功率，W。

注：1. 从声压级计算所需扬声器的功率，即  $10 \lg W_E = L_p - L_s + 20 \lg r$

2. 上式仅为直达声的声压级计算。房间内声压级和声场情况，与房间的体型、吸声系数、声反射情况等有很大关系，应结合建筑声学去计算。

(4) 扬声器功率与声压级的关系。JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》附录 G 中的规定：

#### G.0.3 扬声器所需功率

$$10 \lg W_E = L_p - L_s + 20 \lg r \quad (\text{G.0.3})$$

式中  $L_p$ ——根据需要所选定的最大声压级 (dB)；

$L_s$ ——扬声器特性灵感敏度级 (dB)；

$W_E$ ——扬声器的电功率 (W)；

$r$ ——测点到扬声器的距离 (m)。

(5) 扬声器到听众的最大距离，又称扬声器最远供声距离。

根据 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》第 16.6.7 条，扬声器至最远听众的距离，不应大于临界距离的 3 倍，即

$$d_{\max} \leq 3r_c$$

式中  $d_{\max}$ ——扬声器到听众席的最大距离；

$r_c$ ——临界距离，即在该点上的直达声强与混响声强相等。

当混响声压级大于直达声压级 12dB，且超过临界距离  $r_c$  的 3 倍时，清晰度就要变差了，也就是说处于同样大小的一个房间，房间里吸声增加得大一点，最大距离可以远一点，也可

以保持一定的清晰度。

(6) 临界距离。

- 1) 临界距离为从声源至某点的直达声强与混响声强相等的距离。
- 2) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》附录 G.0.2 第 2 款中的规定：

$$r_c = 0.14D(\theta) \sqrt{QR} \quad (\text{G.0.2-4})$$

式中  $r_c$ ——临界距离 (m)；

$Q$ ——扬声器指向性因数，见表 G.0.1；

$R$ ——房间常数；

$D(\theta)$ ——扬声器  $\theta$  方向的指向性系数 (编者注：轴向上为 1)。

$$\text{其中房间常数 } R = \frac{S \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

$S$ ——室内总面积 ( $\text{m}^2$ ) (编者注：应为室内总表面积)；

$\bar{\alpha}$ ——平均吸声系数。

表 G.0.1 声源的指向性因数

声源位置	$Q$	声源位置	$Q$
房间中或舞台中	1	靠一墙角	4
靠一边墙	2	在三面交角上	8

3) 声源指向性因数图示，如图 15-7-7 所示。

点声源位置		声源指向性因数
A	整个自由空间 	$Q=1$
B	半个自由空间 	$Q=2$
C	1/4自由空间 	$Q=4$
D	1/8自由空间 	$Q=8$

图 15-7-7 声源指向性因数图示

#### 15.7.4.5 厅堂扩声系统的技术指标

(1) 扩声系统技术指标等级，应根据建筑物的用途、类别、服务对象、声学标准、投资情况等多种因素综合考虑确定。根据 GB 50371—2006《厅堂扩声系统设计规范》，厅堂扩声系统分为文艺演出类、多用途类和会议类。下表中传输频率特性中的图见该规范，本书从略。

GB 50371—2006《厅堂扩声系统设计规范》中的规定：

4.2.1 文艺演出类扩声系统声学特性指标应符合表 4.2.1 中的规定。

表 4.2.1 文艺演出类扩声系统声学特性指标

等级	最大声压级 (dB)	传输频率特性	传声增益 (dB)	稳态声场不均匀度 (dB)	早后期声能比 (可选项) (dB)	系统总噪声级
一级	额定通带*内: 大于或等于 106dB	以 80~8000Hz 的平均声压级为 0dB, 在此频带内允许范围: -4dB~+4dB; 40~80Hz 和 8000~16000Hz 的允许范围见图 4.2.1-1	100~8000Hz 的平均值大于或等于 -8dB	100Hz 时小于或等于 10dB; 1000Hz 时小于或等于 6dB; 8000Hz 时小于或等于 +8dB	500~2000Hz 内 1/1 倍频带分析的平均值大于或等于 +3dB	NR-20
二级	额定通带内: 大于或等于 103dB	以 100~6300Hz 的平均声压级为 0dB, 在此频带内允许范围: -4dB~+4dB; 50~100Hz 和 6300~12500Hz 的允许范围见图 4.2.1-2	125~6300Hz 的平均值大于或等于 -8dB	1000Hz、4000Hz 小于或等于 +8dB	500~2000Hz 内 1/1 倍频带分析的平均值大于或等于 +3dB	NR-20

注: \* 额定通带是指优于表 4.2.1~表 4.2.3 中传输频率特性所规定的通带。

#### 4.2.2 多用途类扩声系统声学特性指标应符合表 4.2.2 中的规定。

表 4.2.2 多用途类扩声系统声学特性指标

等级	最大声压级 (dB)	传输频率特性	传声增益 (dB)	稳态声场不均匀度 (dB)	早后期声能比 (可选项) (dB)	系统总噪声级
一级	额定通带内: 大于或等于 103dB	以 100~6300Hz 的平均声压级为 0dB, 在此频带内允许范围: -4dB~+4dB; 50~100Hz 和 6300~12500Hz 的允许范围见图 4.2.2-1	125~6300Hz 的平均值大于或等于 -8dB	1000Hz 时小于或等于 6dB; 4000Hz 时小于或等于 +8dB	500~2000Hz 内 1/1 倍频带分析的平均值大于或等于 +3dB	NR-20
二级	额定通带内: 大于或等于 98dB	以 125~4000Hz 的平均声压级为 0dB, 在此频带内允许范围: -6dB~+4dB; 63~125Hz 和 4000~8000Hz 的允许范围见图 4.2.2-2	125~4000Hz 的平均值大于或等于 -10dB	1000Hz、4000Hz 时小于或等于 +8dB	500~2000Hz 内 1/1 倍频带分析的平均值大于或等于 +3dB	NR-25

#### 4.2.3 会议类扩声系统声学特性指标应符合表 4.2.3 中的规定。

表 4.2.3 会议类扩声系统声学特性指标

等级	最大声压级 (dB)	传输频率特性	传声增益 (dB)	稳态声场不均匀度 (dB)	早后期声能比 (可选项) (dB)	系统总噪声级
一级	额定通带内: 大于或等于 98dB	以 125~4000Hz 的平均声压级为 0dB, 在此频带内允许范围: -6dB~+4dB; 63~125Hz 和 4000~8000Hz 的允许范围见图 4.2.3-1	125~4000Hz 的平均值大于或等于 -10dB	1000Hz、4000Hz 时小于或等于 +8dB	500~2000Hz 内 1/1 倍频带分析的平均值大于或等于 +3dB	NR-20

						续表
等级	最大声压级 (dB)	传输频率特性	传声增益 (dB)	稳态声场不均匀度 (dB)	早后期声能比 (可选项) (dB)	系统总噪声级
二级	额定通带内: 大于或等于 95dB	以 125 ~ 4000Hz 的平均声压级为 0dB, 在此频带内允许范围: -6dB ~ +4dB; 63 ~ 125Hz 和 4000 ~ 8000Hz 的允许范围见图 4.2.3-2	125 ~ 4000Hz 的平均值大于或等于 -12dB	1000Hz、4000Hz 小于或等于 +10dB	500 ~ 2000Hz 内 1/1 倍频带分析的平均值的大于或等于 +3dB	NR-25

(2) JGJ 16—2008《民用建筑设计规范》附录中对混响时间的规定:

H.0.1 各类建筑物的混响时间设计值可参考表 H.0.1。

表 H.0.1 混响时间推荐值

厅堂用途	混响时间 (s)	厅堂用途	混响时间 (s)
电影院、会议厅	1.0 ~ 1.2	电影同期录音摄影棚	0.8 ~ 0.9
立体声宽银幕电影院	0.8 ~ 1.0	语音录音 (播音)	0.4 ~ 0.5
演讲、戏剧、话剧	1.0 ~ 1.4	音乐录音 (播音)	1.2 ~ 1.5
歌剧、音乐厅	1.5 ~ 1.8	电话会议、同声传译室	~0.4
多功能厅、排练室	1.3 ~ 1.5	多功能体育馆	<2
声乐、器乐练习室	0.3 ~ 0.45	电视、演播室、室内音乐	0.8 ~ 1

(3) 不同用途的厅堂最佳混响时间与容积的关系。各种用途厅堂的中频最佳混响时间和容积的关系参见图 15-7-8, 此图摘自《北京市建筑设计技术细则》电气专业。

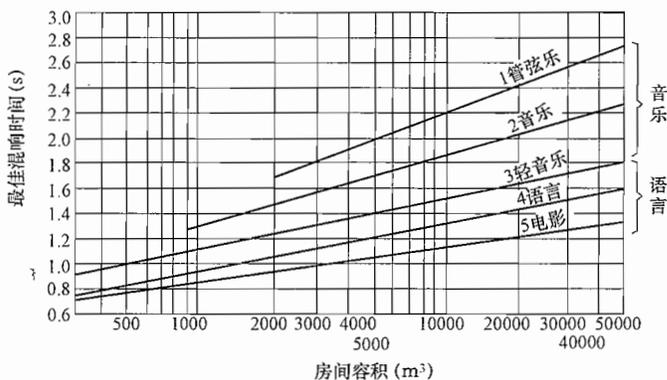


图 15-7-8 各种用途厅堂的中频最佳混响时间和容积的关系

### 15.7.5 厅堂扩声系统的设计要求

#### 15.7.5.1 扩声系统设备的互联

扩声系统的各设备之间为使信号能达到最佳传输条件, 获得最大的信号噪声比, 必须实行阻抗和电平匹配。

#### 15.7.5.2 扩声系统的设备配置及选择

扩声系统的设备配置必须依据场地的面积、高度, 室内建筑空间形态、使用环境及工程

设计要求达到的声学特性指标等因素综合考虑。首先应考虑选择何种扬声器箱,然后根据扬声器箱的各种技术参数进行声场的初步计算并确定扬声器箱的品种和数量。其次根据扬声器箱的功率要求配以相应容量的功放,最后再选用相应档次的调音台、周边器材(均衡器、压缩/限幅器、效果器、反馈抑制器、电子分频器等)和节目声源(各类有线/无线话筒、CD机、LD机等)。

### 15.7.5.3 传声器的选择与布置

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定:

16.5.2 传声器的选择应符合下列规定:

- 1 传声器的类别应根据使用性质确定,其灵敏度、频率特性和阻抗等均应与前级设备的要求相匹配;
- 2 在选定传声器的频率响应特性时,应与系统中的其他设备的频率响应特性相适应;传声器阻抗及平衡性应与调音台或前置增音机相匹配;
- 3 应选择抑制声反馈性能好的传声器;
- 4 应根据实际情况合理选择传声器的类别,满足语言或音乐扩声的要求;
- 5 当传声器的连接线超过10m时,应选择平衡式、低阻抗传声器。

16.6.1 传声器的设置应符合下列规定:

- 1 合理布置扬声器和传声器,两者之间的间距宜大于临界距离,并使传声器位于扬声器辐射角之外;
- 2 当室内声场不均匀时,传声器宜避免设在声压级高的部位;
- 3 传声器应远离谐波干扰源及其辐射范围;
- 4 对于会议厅、多功能厅、体育场馆等场所,应按需要合理配置不同类型的传声器。

(2) GB 50371—2006《厅堂扩声系统设计规范》中的规定:

- 3.2.1 系统宜配置足够数量的传声器。
- 3.2.2 传声器的类型应满足适用本厅堂不同类型声源信号的拾音。
- 3.2.3 主要传声器宜选用有利于抑制声反馈的传声器。
- 3.2.4 应分别在台口、乐池、侧台附近和观众席等处按功能需要设传声器插座。
- 3.2.5 具有演出功能的厅堂,若现场多个工位同时需要传声器信号,宜设置传声器信号分配系统。
- 3.2.6 传声器信号接线应采用带屏蔽的平衡电缆。

(3) 合理布置传声器,可以有效抑制声反馈,提高听众区的声压级,并且可以改进扩声的音质。

### 15.7.5.4 扬声器的选择与布置

(1) 扬声器的布置:整个扬声器系统的布置如何,与整个系统的扩声质量密切相关,扬声器布置应考虑以下几方面:

- 1) 使整个建筑空间环境的声场均匀;
- 2) 视听方向一致、声音亲切自然;

3) 有利于克服反馈, 提高传声增益;

4) 线路简单, 便于维护及调整覆盖面;

5) 按扬声器覆盖角(4000~8000Hz为轴线下降6dB)覆盖全部观众席;

6) 为使声、像一致, 扬声器发出的声音, 宜比自然声源延迟5~30ms。声音传播速度为340m/s。先入为主, 要让观众先听到直达声, 必要时可在扩声系统中加延迟器, 推迟扩声信号从扬声器到达观众耳朵的时间, 使得声像一致。

(2) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定:

16.6.4 扬声器的布置宜分为分散布置、集中布置及混合布置三种方式, 其布置应根据建筑功能、体形、空间高度及观众席设置等因素确定, 并应符合下列规定:

1 下列情况, 扬声器或扬声器组宜采用集中布置方式:

1) 当设有舞台并要求视听效果一致;

2) 当受建筑体形限制不宜分散布置。

集中布置时, 应使听众区的直达声较均匀, 并减少声反馈。

2 下列情况, 扬声器或扬声器组, 宜采用分散式布置方式:

1) 当建筑物内的大厅净高较高, 纵向距离长或者大厅被分隔成几部分使用时, 不宜集中布置;

2) 厅内混响时间长, 不宜集中布置。

分散布置时, 应控制靠近前台第一排扬声器的功率, 减少声反馈; 应防止听众区产生双重声现象, 必要时可在不同分通路采取相对时间延迟措施。

3 下列情况, 扬声器或扬声器组宜采用混合布置方式:

1) 对眺台过深或设楼座的剧院, 宜在被遮挡的部分布置辅助扬声器系统;

16.3.5 室内、外扩声系统的声场应符合下列规定:

1 室内声场计算宜采用声能密度叠加法, 计算时应考虑直达声和混响声的叠加, 宜增大50ms以前的声能密度, 减弱声反馈, 加大清晰度;

2 室外扩声应以直达声为主, 宜控制50ms以后出现的反射声。

(3) GB 50371—2006《厅堂扩声系统设计规范》中的规定:

3.1.1 从方案设计开始, 扩声系统设计就应与建筑声学设计、建筑设计和其他有关工程设计专业密切配合。装修设计时, 在控制厅内混响时间、房间体型、反射声分布和避免声缺陷等问题时, 应将扬声器系统位置作为主要声源点之一。

3.1.2 扩声系统应保证听众有足够的声压级, 声音清晰、声场均匀。

3.1.7 扩声系统对服务区以外有入区域不应造成环境噪声污染。

3.3.2 扬声器系统, 必须有可靠的安全保障措施, 不产生机械噪声。当涉及承重结构改动或增加荷载时, 必须由原结构设计单位或具备相应资质的设计单位核查有关原始资料, 对既有建筑结构的安全性进行核验、确认。

#### 15.7.5.5 功率放大器的配置要求

(1) 扩声系统的功率馈送方式:

1) 厅堂类建筑扩声系统宜采用定阻(低阻)输出, 不经过线间变压器, 频带宽, 音

质好。

2) 体育场、广场类建筑,当传输距离较远时,宜采用定压(高阻)输出,70V或100V传输,线路衰减小。

3) 声控室与主扬声器距离较远时,宜在主扬声器系统安装位置附近区域设置功放机房。也可根据工程需要和投资情况,采用带有放大器的有源音箱和数字信号处理系统(DSP)。

(2) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定:

16.5.5 扩声系统功放设备的配置与选择应符合下列规定:

1 功放设备的单元划分应满足负载分组的要求。

3 扩声系统应有功率储备,语言扩声应为3~5倍,音乐扩声应为10倍以上。

16.5.6 广播、扩声系统功放设备应设置备用单元,其备用数量应根据广播、扩声的重要程度等确定。

16.3.8 第2款 同一供声范围的不同分路扬声器(或扬声器系统)不应接至同一功率单元,避免功放设备发生故障时造成大范围失声。

(3) GB 50371—2006《厅堂扩声系统设计规范》中的规定:

3.6.1 第7款 声控室与主扬声器系统距离较远时,宜在主扬声器系统安装位置的附近区域设置功放机房。

3.3.4 功率放大器与主扬声器系统之间的连线功率损耗应小于主扬声器系统功率的10%,次低频扬声器系统的连线功率损耗宜小于5%。

### 15.7.5.6 数字化扩声系统

近年来,广播扩声系统也实现了数字化、网络化的发展。数字音频处理设备可以代替传统的均衡器、压限器、反馈抑制器、效果器等周边设备。数字化调音台可将调试好的各种场景的程序存储下来,降低了现场操作难度,提高了可靠性。数字化音频矩阵和数字网络化传输方式,解决了远距离音频信号传输的传输衰减、信噪比、失真等许多难题,也使得输入、输出调配更加灵活、方便。设计中可根据工程需要和投资情况选用。

### 15.7.5.7 利用专用软件进行扩声系统设计

厅堂扩声涉及扩声和建筑声学等多方面问题。故重要场所和大型场馆的扩声系统设计,宜由专业设计部门采用声学专用设计软件(如EASE软件等)进行计算机辅助设计和模拟分析,以实现更好的音响效果,并避免产生声缺陷。

### 15.7.6 多媒体会议与同声传译系统

#### 15.7.6.1 系统构成

(1) 在报告厅、多功能厅、大型会议室等处,应根据学术交流等使用需求和投资情况,设置具备相应功能的会议与扩声系统。宜设置多媒体视频会议系统,包括会议主席机、代表机、会议控制主机、摄像机、自动影像跟踪系统、扩声系统、投影与显示系统、无线触摸控制屏等。在需要召开国际会议或进行国际交流的场所,需要设置同声传译系统,必要时可设表决系统等。

(2) 在中型会议室、大中型教室等处宜设多媒体会议/教学系统,包括投影仪、电动幕

布、影音信号源、扩声系统、视频展台、切换控制台、交互式电子显示白板等设备。

(3) 图像、语音信号可通过楼内有线电视系统传送至有关房间，也可通过通信网络传送到其他有关部门，实现异地电视会议、异地电化教学、异地医疗会诊等。

#### 15.7.6.2 会议发言系统

(1) 会议发言系统包括主席机、代表机、会议控制主机等。

(2) 根据新技术发展情况，会议发言系统主席机、代表机及译员机之间宜采用编码总线制传输方式，布线简单、信号传输质量好。

#### 15.7.6.3 会议扩声系统

(1) 会议扩声系统一般包括有线话筒、无线话筒与接收机、调音台、功率放大器、音箱、DVD机、录音机、AV（音频视频）管理中心及音频信号处理器、反馈抑制器、效果器等。

(2) 大型会场宜采用音箱，中小型会场、吊顶较低时，宜采用吸顶式扬声器。

(3) 扬声器布置时应考虑声回授问题，避免产生啸叫。

(4) 声控室宜设于舞台对面、侧面或夹层等便于观察舞台的位置，地面应高于观众厅地面，以避免观众遮挡视线；宜设活动地板，应设观察窗、隔音门，墙面、吊顶等应做吸音处理。

(5) 会议扩声系统图示例，如图 15-7-9 所示。

#### 15.7.6.4 投影显示与摄像记录系统

(1) 显示系统包括多媒体投影机、电动投影幕、背投显示屏、液晶显示屏、等离子显示屏、升降液晶显示屏等。

(2) 投影机的数量、光通量、投影幕的尺寸等选择应根据视距、视角、室内净高等因素选择。根据 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》20.4.8 第 6 款，会场前排与会人员观看投影机幕布或彩色视频显示器的最小视距，宜按视频画面对角线的规格尺寸 2~3 倍计算；最远视距宜按视频画面对角线的规格尺寸 8~9 倍计算。

(3) 大厅较宽时，可设 2 套投影机，或 2 块背投显示屏。为照顾后排观众，宜在后部墙上或柱子上设等离子显示屏作为补充。为方便主席台上人员观看，可在主席台会议桌上安装升降式液晶显示屏，或在主席台边缘设置 2~3 块等离子显示屏。

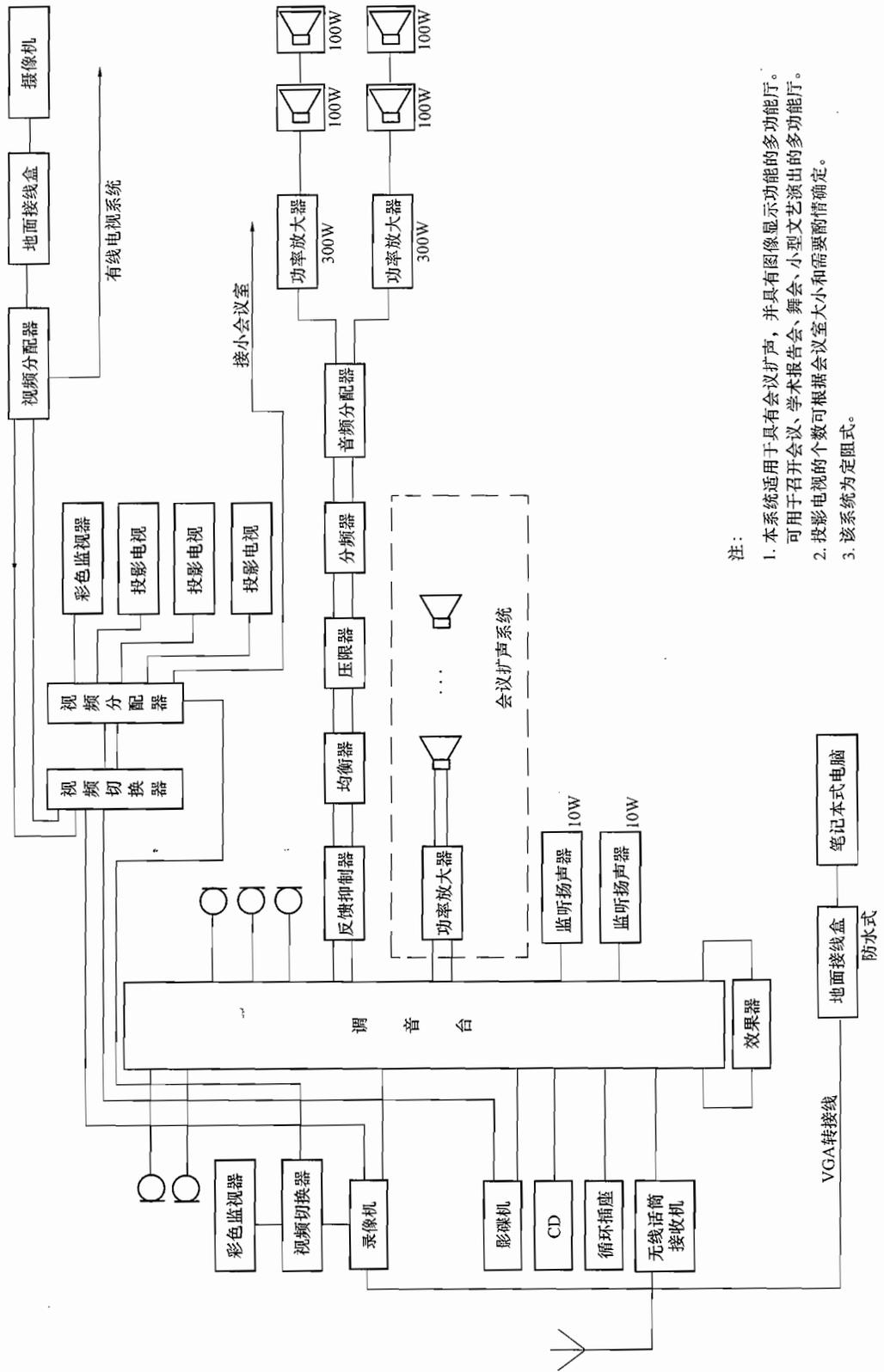
(4) 摄像记录系统包括高速快球摄像机、视频切换控制分配器、录像机等。宜与会议发言系统相配合，选用带有云台、变焦镜头、预置位的摄像机和自动跟踪软件，实现图像跟踪发言人员，在大屏幕上同步显示的功能。

#### 15.7.6.5 同声传译系统

(1) 同声传译系统按传输方式分为有线同声传译系统、无线射频同声传译系统、无线红外同声传译系统；按信号处理方式分为模拟传输系统与数字传输系统。为布线简单、可靠，使用、维护方便，现在普遍采用无线红外同声传译系统，有条件时可采用数字传输系统。需设置译员机、红外发射机、红外辐射板、红外线接收机等。大部分听众收听会议扩声系统扬声器的声音，为部分需要的听众配备红外接收机。

(2) 应根据同声传译语种数量设置相应数量的译音室，其地面宜高出观众席 600mm 左右，应避免被观众遮挡。

(3) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：



注:

1. 本系统适用于具有会议扩声, 并具有图像显示功能的多功能厅。可用于召开会议、学术报告会、舞会、小型文艺演出的多功能厅。
2. 投影电视的个数可根据会议室大小和需要酌情确定。
3. 该系统为定阻式。

图 15-7-9 会议扩声系统图示例

16.8.7 同声传译系统宜设专用的译员室，并应符合下列规定：

1 译员室的位置应靠近会议厅（或观众厅），并宜通过观察窗清楚地看到主席台（或观众厅）的主要部分。观察窗应采用中间有空气层的双层玻璃隔声窗。

2 译员室的室内面积宜并坐两个译员，为减少房间共振，房间的三个尺寸要互不相同，其最小尺寸不宜小于 $2.5\text{m}\times 2.4\text{m}\times 2.3\text{m}$ （长 $\times$ 宽 $\times$ 高）。

3 译员室与机房（控制室）之间宜设联络信号，室外宜设译音工作指示信号。

4 译员室应进行吸声隔声处理并宜设置带有声闸的双层隔声门，译员之间宜设置隔声间。室内噪声不应高于NR20，室内应设空调并做好消声处理。

### 15.7.6.6 数字多媒体会议与同声传译系统

数字多媒体会议与同声传译系统示例，如图15-7-10所示。

### 15.7.7 扩声系统控制室的位置及供电要求：

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

16.8.5 扩声控制室的位置，应通过观察窗直接观察到舞台（讲台）活动区和大部分观众席，宜设在下列位置：

- 1 剧院类建筑，宜设在观众厅后部；
- 2 体育场馆类建筑，宜设在主席台侧；
- 3 会议厅、报告厅类建筑，宜设在厅的后部。

当采用视频监控时，扩声控制室的位置可不受上述限制。

16.9.1 广播、扩声系统的交流电源，应符合下列规定：

1 交流电源供电等级应与建筑物供电等级相适应；对重要的广播、扩声系统宜由两路供电，并在末端配电箱处自动切换；

2 交流电源的电压偏移值不应大于10%，当不能满足要求时，应加装自动稳压装置，其功率不应小于使用功率的1.5倍。

16.9.2 广播、扩声系统，当功放设备的容量在250W及以上时，应在广播、扩声控制室设电源配电箱。广播、扩声设备的功放机柜由单相、放射式供电。

16.9.3 广播、扩声系统的交流电源容量宜为终期广播、扩声设备容量的1.5~2倍。

(2) GB 50371—2006《厅堂扩声系统设计规范》中的规定：

3.6.1 厅堂应设置扩声控制室，并符合如下技术要求：

1 扩声控制室宜设置在便于观察舞台（主席台）及观众席的位置。

2 具有演出功能的厅堂，应面向舞台及观众席开设观察窗，窗的位置及尺寸确保调音人员正常工作时对舞台的大部分区域和部分观众席有良好的视野。观察窗可开启，操作人员在正常工作时能够获得现场的声音。

3 声控室面积应满足设备布置、设备操作及正常检修的需要。地面宜铺设活动架空地板，或设置有盖电缆地沟。

9 扩声系统设备不宜与可控硅调光设备或动力设备共用一个电源变压器；若电源电压不稳定或受干扰严重，应配备电源稳压器或隔离变压器。电源的总容量宜为功放额定功率总和的两倍以上。

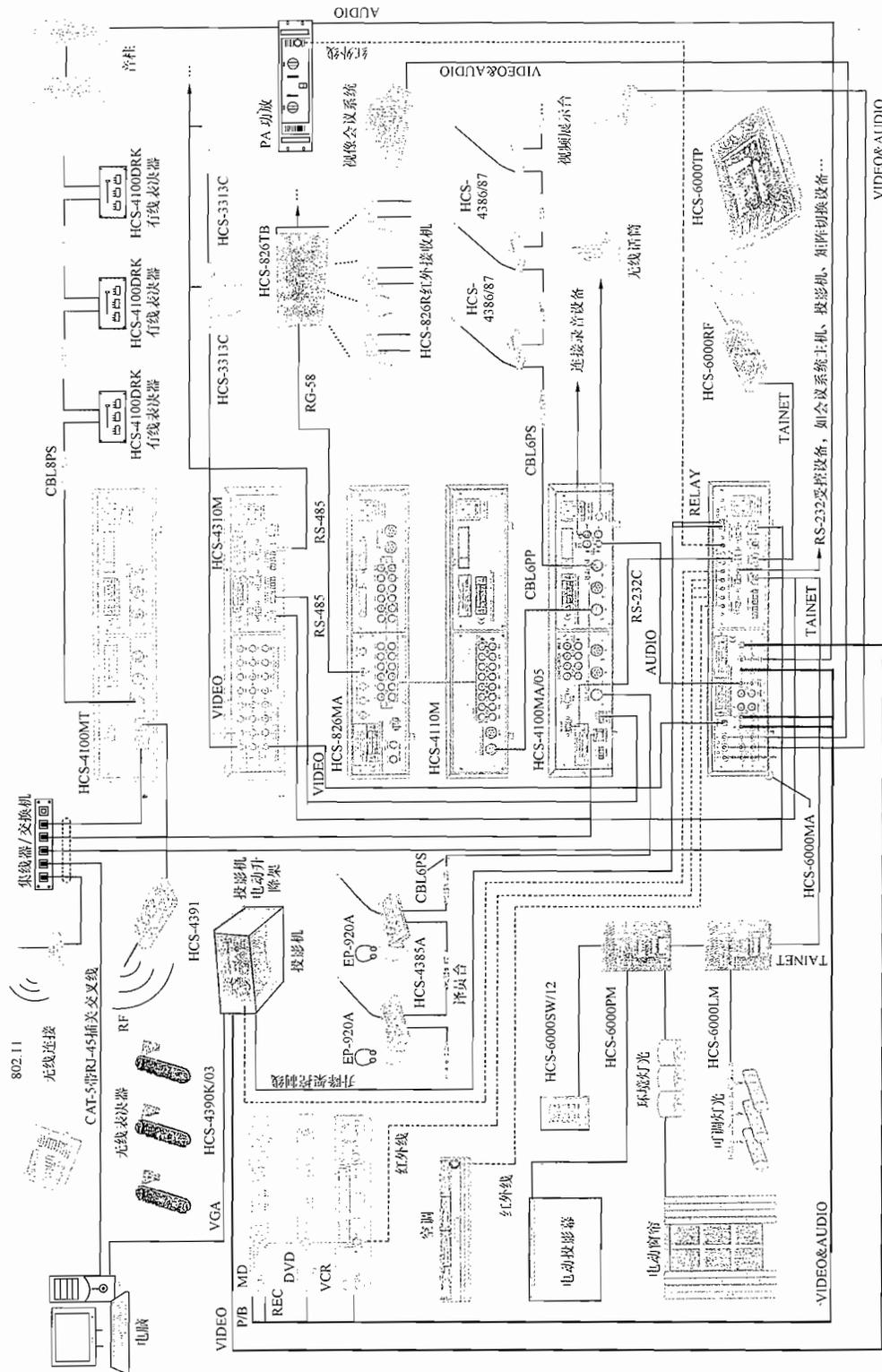


图 15-7-10 数字多媒体会议与同声传译系统示意图例

注：以上示例中的配置为数字会议系统与中控系统配合，所组成的一套完整的智能会议解决方案。系统的核心是数字会议系统和中央控制系统。

数字会议系统由以下几部分组成：①电子表决系统；②讨论会议系统；③摄像机自动跟踪系统；④IC卡签到系统；⑤同声传译系统；⑥视像会议系统。

中央控制系统由以下几部分组成：①数字会议管理控制中心；②无线触摸屏控制系统；③电源控制器；④灯光控制器。

以上的配置可以实现多种功能，包括：会议讨论功能、投票表决功能、摄像机自动跟踪功能、同声传译功能、视像会议功能、IC卡签到功能。中控系统可实现集中控制系统电源的开关，环境灯光的调节及开关，窗帘及投影幕布的开关、升降，可调节扩声系统的音量及音质，通过红外线可控制多种电器，如DVD、录像机及显示器、投影仪等。连接局域网或Internet可以实现远端甚至异地控制。数字会议系统与中控系统的无缝连接，增加了许多功能：①通过无线触摸屏控制会议话筒的开启或关闭；②实现对摄像机进行遥控调节。

10 声控室与舞台（主席台）之间应预留各种类型和足够数量的线缆。

3.6.2 具有演出功能的厅堂，应设有现场调音位置。现场调音位置的听音效果在观众厅应具有代表性，并预留各种类型和足够数量的信号通道接口。

(3) 广播机房的其它环境要求等，详见 15.10 弱电机房工程有关部分。

### 15.7.8 广播、扩声系统线路

#### 15.7.8.1 功率放大器至扬声器缆线截面的计算

(1) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》附录中的规定：

H.0.2 从功放设备输出端至线路最远的用户扬声器的线路缆线截面可按式 (H.0.2) 计算：

$$q = 0.035(100 - n) \frac{L \cdot W}{n \cdot U^2} \quad (\text{H.0.2})$$

(编者注：规范书中此式有笔误)

式中  $q$ ——铜芯缆线截面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$L$ ——从功率放大器到扬声器的缆线长度 (m)；

$W$ ——输入到扬声器的电功率 (W)；

$U$ ——扩音机的输出电压 (V)；

$n$ ——缆线上的电压降，用功率放大器输出电压百分率表示 (%)。

(2) 计算举例。

【例 15-7-1】铜芯电缆长 200m，输入到扬声器的电功率为 200W，传输电压为 100V，沿线的电压降为 10%，则导线的截面积为

$$q = \frac{0.035(100 - 10)200 \times 200}{10 \times 100^2} = 1.26(\text{mm}^2)$$

考虑到机械强度要求和缆线的规格系列，宜选用 RVS2 × 1.5mm<sup>2</sup> 的电缆或双绞线。

#### 15.7.8.2 广播、扩声系统线路敷设中应注意的问题

(1) 室内公共广播每层支线一般可采用 ZR-RVS 2 × 1.5mm<sup>2</sup> 阻燃双绞线，干线一般可采用 ZR-RVS 2 × 2.5mm<sup>2</sup> 阻燃双绞线。当某些回路驱动的扬声器较多、功率较大、距离较远时，应另行计算导线截面。

(2) 厅堂扩声系统,一般扬声器或扬声器组功率较大,低阻输出,传输电压较低,需认真计算导线截面。

(3) 广播主干线缆回路多时可采用金属线槽,分支线应套钢管敷设。用作应急广播时,应采用阻燃线穿钢管敷设于楼板内,埋深 30mm 以上,明敷时金属套管或金属线槽应做防火处理。

(4) 广播输入信号线(话筒线等)的信号非常弱,为防干扰,必须采用屏蔽线,并且单独套钢管敷设。

(5) 为防止广播输出线路对广播输入信号线和其他信号线路产生干扰,广播输出线路不应与其他弱电线路同管、同线槽敷设。

(6) 广播系统规模较大、经常需要现场播音、人员较多时,宜分设广播机房和录播室,规模较小时可合设广播室,主要用于消防应急广播时宜设于消防控制室内。

(7) 广播设备的交流电源容量,应按终期广播设备耗电量的 2 倍计算(广播设备耗电量约为音频输出功率的 3 倍左右)。

## 15.8 公共显示装置与呼叫信号系统

### 15.8.1 设计中应遵循的规范及国家标准图

- (1) GB 50464—2008《视频显示系统工程技术规范》;
- (2) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》;
- (3) GB 50635—2010《会议电视会场系统工程设计规范》;
- (4) GB 50395—2007《视频安防监控系统工程设计规范》;
- (5) GB 50198—2011《民用闭路监视电视系统工程技术规范》;
- (6) GB 50763—2012《无障碍设计规范》;
- (7) JGJ 312—2013《医疗建筑电气设计规范》;
- (8) 国家标准图 08SD706—2《医疗场所电气设计与设备安装》。

### 15.8.2 公共显示装置的种类及术语

GB 50464—2008《视频显示系统工程技术规范》中的规定:

1.0.2 条文说明:本规范适用于工程项目中的发光二极管(LED)显示屏、阴极射线管显示屏(CRT)、液晶显示屏(LCD)、等离子体显示屏(PDP)、数字光学处理器(DLP)、反射式液晶(LCOS)正投或背投产品的单屏、拼接屏视频显示系统工程的设计、施工和验收,例如展览会馆、机场、运动场馆、公安、交通、电力、水利指挥调度中心、电信监控中心、新闻中心、证券公司、购物中心、银行、大型娱乐活动等场所安装的 LED、DLP、PDP、LCD 视频显示屏。

#### 2.1.1 视频显示系统 video display system

由视频显示屏系统、传输系统、控制系统和辅助系统组成,可实现一路或多路视频信号同时、部分或全屏显示。

#### 2.1.8 LED 视频显示屏 LED video display screen (panel)

通过一定的控制方式,由 LED 器件阵列组成,用于显示视频的屏幕。

#### 2.1.9 阴极射线管显示屏(CRT display) cathode ray tube display

由电子束器件构成,从电子枪发射电子束轰击涂有荧光粉的玻璃面(荧光屏)实

现电光转换，重现图像的显示屏。

#### 2.1.10 液晶显示屏 (LCD) liquid crystal display

外加电压使液晶分子取向改变，以调制透过液晶的光强度，产生灰度或彩色图像的显示屏。

#### 2.1.11 等离子体显示屏 (PDP) plasma display panel

利用气体放电产生的等离子体引发紫外线，来激发红、绿、蓝荧光粉，发出红、绿、蓝三种基色光，在玻璃平板上形成彩色图像的显示屏。

#### 2.1.12 数字光学处理器 (DLP) digital light processor

采用半导体数字光学微镜阵列作为光阀的成像装置。

#### 2.1.15 像素 pixel/picture element

组成一幅图像的全部可能亮度和色度的最小成像单元。

#### 2.1.16 像素中心距 pixel pitch

相邻像素中心之间的距离。

#### 3.1.1 LED 视频显示系统的分类，应符合下列规定：

- 1 可根据使用环境分为室内型显示系统和室外型显示系统。
- 2 可根据显示颜色分为单基色显示系统、双基色显示系统和全彩色（红、绿、蓝三基色）显示系统。

#### 4.2.2 第7款 显示屏的每种基色应具有256级（8bit）的灰度处理能力。

#### 3.3.1 电视型视频显示系统的分类应符合下列规定：

- 1 可根据显示器件的种类分为CRT、LCD、PDP等显示系统。
- 2 可根据显示屏的组成数量分为单屏电视显示系统和拼接显示系统。

### 15.8.3 最小组字单元与像束的概念

(1) JGJ-16—2008《民用建筑电气设计规范》条文说明中的解释：

17.3.5 设计对显示方案的技术要求，第1款中：

⑦组字：在应用中，以像素矩阵组成数字、字母、汉字字符。设计中，应对数字、字母、汉字最小组字单元有所规定。数字、字母最小基本组字单元选择 $5 \times 5$ 或 $5 \times 7$ 等，汉字最小基本单元选择 $16 \times 16$ 或 $24 \times 24$ 等。组字单元的确定是显示屏总像素构成的最基本依据。

(2) 汉字笔画较多，最小组字单元一般按 $16 \times 16$ 选取。最小组字单元与像束关系示意图，见图15-8-1。

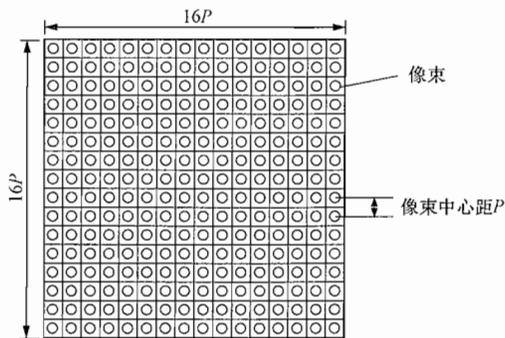


图15-8-1 最小组字单元与像束关系示意图

### 15.8.4 LED 视频显示屏系统的工程设计

#### 15.8.4.1 GB 50464—2008《视频显示系统工程技术规范》中的规定：

4.2.2 LED 视频显示屏系统的设计应符合下列规定：

- 1 像素中心距应根据合理或最佳视距计算。

2 显示屏的水平左右视角分别不宜小于 $\pm 50^\circ$ ，垂直上视角不宜小于 $10^\circ$ ，垂直下视角不宜小于 $20^\circ$ 。

3 显示屏亮度应符合表 4.2.2 的规定，在重要的公共场所亮度应可调节。

表 4.2.2 视频显示屏的亮度 ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )

场所	种 类		
	三基色 (全彩色)	双色	单色
室外	$\geq 5000$	$\geq 4000$	$\geq 2000$
室内	$\geq 800$	$\geq 100$	$\geq 60$

4 背景照度小于  $20\text{lx}$  时，全彩色室外 LED 显示屏最高对比度不应小于  $800:1$ ，室内不应小于  $200:1$ 。

4.2.3 LED 视频显示屏系统的安全性设计应符合下列规定：

2 显示屏应有完整的接地系统。

3 室外 LED 视频显示屏应有防雷系统。

5 处于游泳馆、沿海地区等腐蚀性环境的 LED 视频显示屏应采取防腐蚀措施。

4.2.1 LED 视频显示屏系统的安装现场设计应符合下列规定：

1 显示屏发光面应避免强光直射。

2 显示屏图像分辨率应大于等于  $320 \times 240$ 。

3 视距和像素中心距应按下式计算：

$$H = k \cdot P \quad (4.2.1)$$

式中  $H$ ——视距 (m)；

$k$ ——视距系数，最大视距宜取 5520，最小视距宜取 1380；

$P$ ——像素中心距 (m)。

4.2.1 条文说明：LED 视频显示屏系统首先应确定是室内屏还是室外屏，全面考虑各项因素，确定其安装方式、安装位置、像素密度、屏体尺寸。

1 室外屏应尽量避免发光面朝南，不得已时应考虑遮挡。由于 LED 发光二极管存在一定的视角，显示屏安装时宜向下倾斜  $5^\circ$ 。

#### 15.8.4.2 LED 显示屏所需尺寸与最大视距、字符高度的关系

(1) 显示屏尺寸应根据最大视距、需要显示的内容、字数、最小字符高度、解析度等因素综合考虑。屏幕的大小与观看效果和投资多少有着很大关系，屏幕太小了看不清楚，太大了造价大幅度上升。

(2) 根据 GB 50464—2008《视频显示系统工程技术规范》4.2.1 条文说明和 TY/T 1001.1《体育场馆设备使用要求及检验方法 第 1 部分：LED 显示屏》，屏幕最小尺寸可按照以下公式计算（编者注：按此公式计算出的为最小尺寸，有条件时宜取大一些）。

比赛信息显示系统显示的文字的最小高度和最大观看距离的关系公式：

$$H = k \cdot d \quad (\text{编者注：即 } d = H/k = H/345)$$

式中  $H$ ——最大视距，m；

$k$ ——视距系数，一般取 345；

$d$ ——字符高度，m。

(3) 计算举例。

在已知最大视距，求所需屏幕最小尺寸时，即  $d = H/k = H/345$ 。如  $H = 70\text{m}$  时， $d = 70/345$ ，即单个字高不应小于  $0.2\text{m}$ 。综合体育馆用显示屏至少应能显示 12 行，27 列汉字，行间距不应小于汉字字符的  $1/10$ ，故  $0.2\text{m} \times 12 \times 1.1 = 2.64\text{m}$ ，显示屏高度可取  $3.0\text{m}$  或以上。

### 15.8.4.3 LED 显示屏视距与像束中心距的关系

(1) GB 50464—2008《视频显示系统工程技术规范》4.2.1 条文说明中的解释：

3 视距和像素中心距  $H = k \cdot P$  公式来源：已公布的《体育场馆设备使用要求及检验方法 第一部分：LED 显示屏》TY/T 1001.1—2005 给出了最大视距和字符高度的公式：

$$H = k \cdot d$$

式中  $H$ ——最大视距 (m)；

$k$ ——视距系数，一般取 345；

$d$ ——字符高度 (m)，字符为 16 点阵汉字。

因此  $H = k \cdot P = 345 \times 16P = 5520P$ ； $P$  为像素中心距 (m)， $k$  为视距系数，最大视距系数  $k$  一般取 5520，根据经验数据：

理想视距 =  $1/2$  最大视距，理想视距系数  $k$  一般取 2760；

最小视距 =  $1/2$  理想视距，最小视距系数  $k$  一般取 1380；

合理视距范围：最小视距 (=  $1/2$  理想视距)  $\leq$  合理视距  $\leq$  最大视距 (=  $2 \times$  理想视距)。

在选取像素中心距时，一般采用理想视距值。

(2) 提示：(1) 中的视距系数  $k$  有两种，含义不同，一个是相对于字符高度的视距系数  $k$ ，另一个是相对于像束中心距的视距系数，为防混淆，在此称为  $k'$ ，则  $H = k \cdot d = 345 \times 16P = 5520P = k' \cdot P$ 。

(3) 计算举例。如最大视距为  $70\text{m}$  时， $P = \frac{70\text{m}}{5520} = 12\text{mm}$ ，即宜选用像素中心距为  $12\text{mm}$  的显示屏。

(4) 最大视距、理想视距、最小视距关系示意图如图 15-8-2 所示。

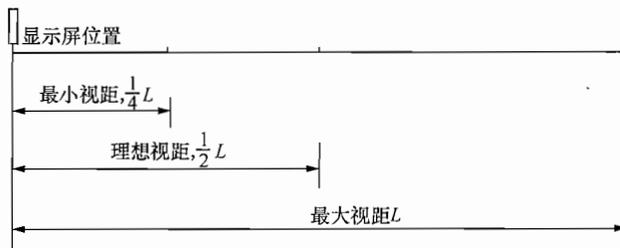


图 15-8-2 最大视距、理想视距、最小视距关系示意图

#### 15.8.4.4 国际田联要求

国际田联《田径场地设施标准手册》中对显示屏尺寸的要求：“显示屏的高度应为最大视距的3%~5%。一个大型田径场最远视距为250m，要求显示屏高度应为7.5~12.5m。”

#### 15.8.4.5 LED显示系统设计中应注意的问题

(1) LED文字屏的尺寸由所需显示文字的行数、列数、像素数量、视距等因素决定。全彩屏还应保证一定的图像解析度。

(2) 室内近距离观看时，为保证足够的像素和清晰度，宜使用像素点间距5.0mm以下的发光管。近距离观看时如果像束中心距大、像素少则马赛克现象严重。体育馆范围较大，视距较远，像束中心距可采用10~12mm的。体育场像束中心距可采用16~24mm的室外屏。

(3) 显示屏的造价与彩色型式、像素密度、屏幕尺寸关系很大。LED显示屏的造价随每平方米像素数量的增加呈直线上升趋势。设计中需慎重考虑使用场合、实用效果与工程造价。

(4) 设计中需为LED显示屏预留电源，文字屏约400~500W/m<sup>2</sup>，彩色屏约1000W/m<sup>2</sup>以上（彩色屏可能所有发光管全亮，故耗电量较高）。

(5) 小型LED屏可吊装。体育场馆等处的大型LED显示屏背后需预留1m以上的检修空间或机房。显示屏发热量较大，其背后的机房应设置通风装置。

(6) 每台控制器可控制多台文字屏，一般采用手拉手方式串接。因图像信息量较大，每台控制器可控制1台彩色图像显示屏。控制器至显示屏之间的信号线，距离较远时应采用光缆，距离小于100m时可采用六类或超五类双绞线。

(7) LED屏可以用来显示文字和图像，平面尺寸拼装灵活，亮度高、使用寿命长，可作为电动计分牌、公告栏、广告宣传栏等，在体育场馆、候机楼、火车站、银行、商场、写字楼、大堂等处得到了广泛应用。

(8) LED显示屏按颜色分，有单色屏（红或绿）、双色屏（红+绿）、双基色屏（红+绿，各色具有256级灰度）、全彩色屏（即三基色屏，红+绿+蓝，各色具有256级灰度）。单色屏或双色屏造价便宜，适宜显示文字。双基色屏造价也不高，可显示文字和图像，比较常用，但色彩逼真度稍差。全彩色屏色彩好，但造价较高。

(9) 按照安装工艺分，有单灯式、模块式、表贴式。全彩色表贴式显示屏色彩更好，造价较高。

#### 15.8.4.6 室内LED显示屏部分参数表，见表15-8-1。

表 15-8-1 室内LED显示屏功耗及质量

发光器件	密度	颜色	功能	功耗 (W/m <sup>2</sup> )	质量 (kg/m <sup>2</sup> )
φ3mm	6.25 万点/m <sup>2</sup>	单色	图文、动画	500 (最大)	30
		三色		750 (最大)	30
		256 色	图文、动画、视频	750 (最大)	30
φ3.7mm φ4.8mm	4.41~4.5 万点/m <sup>2</sup> 2.78 万点/m <sup>2</sup>	单色	图文、动画	1000 (最大) 500 (平均)	32
		三色		2000 (最大) 720 (平均)	32
		256 色	图文、动画、视频	2000 (最大) 900 (平均)	32

续表

发光器件	密度	颜色	功能	功耗 (W/m <sup>2</sup> )	质量 (kg/m <sup>2</sup> )
φ5mm	1.72 万点/m <sup>2</sup>	单色	图文、动画	450 (最大) 200 (平均)	20
		三色		900 (最大) 290 ~ 350 (平均)	
		256 色	图文、动画、视频	900 (最大) 350 (平均)	30
φ8mm	1 万点/m <sup>2</sup>	全颜色	图文、动画、视频	1300 (最大)	
φ10mm	4300 点/m <sup>2</sup>	单色	图文、动画	130 (最大) 120 (平均)	20 ~ 30
		三色		260 (最大) 180 (平均)	
		256 色	图文、动画、视频	260 (最大) 240 (平均)	20 ~ 30
□12mm ×12mm	4290 点/m <sup>2</sup>	全颜色	图文、动画、视频	670 (最大) 340 (平均)	50 (含承重框架)

注 此表摘自《全国民用建筑工程设计技术措施—电气》(2009年版)。

#### 15.8.4.7 LED 大屏幕显示系统框图

LED 大屏幕显示系统框图如图 15-8-3 所示。

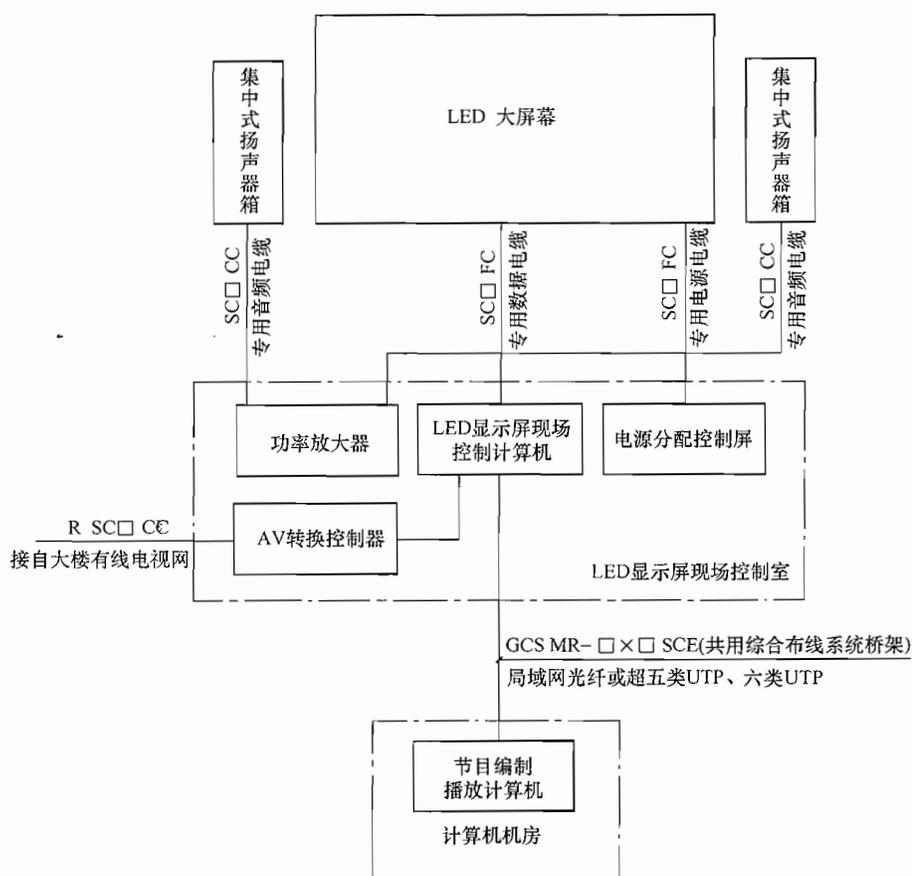


图 15-8-3 LED 显示系统框图

### 15.8.5 电视型视频显示屏的工程设计

#### 15.8.5.1 显示屏尺寸大小与视距的关系

(1) GB 50395—2007《视频安防监控系统工程设计规范》中的规定：

6.0.9 显示设备的选型与设置应符合以下规定：

- 1 选用满足现场条件和使用要求的显示设备。
- 2 显示设备的清晰度不应低于摄像机的清晰度，宜高出 100TVL。
- 3 操作者与显示设备屏幕之间的距离宜为屏幕对角线的 4~6 倍，显示设备的屏幕尺寸宜为 230mm 到 635mm。根据使用要求可选用大屏幕显示设备等。（编者注：230mm 相当于 9"，635mm 相当于 25"。）

(2) GB 50198—2011《民用闭路监视电视系统工程技术规范》中的规定：

3.4.10 监控（分）中心的显示设备的分辨率必须不低于系统对采集规定的分辨率。

3.4.11 监控（分）中心电视墙的设置应符合下列规定：

- 1 电视墙宜由上箱体和下箱体组成。
- 2 电视墙整体结构根据需要可设计成平面形和弧形。
- 3 电视墙后侧距墙不应小于 0.8m。若电视墙后侧靠窗，应在窗外加装遮阳伞。电视墙上的主监视器到操作人员的距离应是监视器屏面高度的 4 倍~6 倍。

(3) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定：

23.2.4 第 6 款 视频监控系统和有线电视系统电视墙前面的距离，应满足观看视距的要求，电视墙与值班人员之间的距离，应大于主监视器画面对角线长度的 5 倍。设备布置应防止在显示屏上出现反射眩光。

20.4.8 会议电视系统用房设计应符合下列规定：

6 会场前排与会人员观看投影机幕布或彩色视频显示器的最小视距，宜按视频画面对角线的规格尺寸 2~3 倍计算；最远视距宜按视频画面对角线的规格尺寸 8~9 倍计算。（编者注：与 LED 屏类似，最佳视距宜按视频画面对角线的规格尺寸 4~6 倍计算。）

(4) GB 50635—2010《会议电视会场系统工程设计规范》中的规定：

3.3.3 屏幕显示器的设置应符合下列规定：

1 在会场应设置至少 2 台屏幕显示器，并应分别用于显示本端会场和远端会场的图像或数据信息。

2 屏幕显示器的设置应根据会场的形状、大小、高度等具体条件，使参会者处在屏幕显示器视角范围之内。屏幕显示器大小应按下式计算：

$$h = d/k \quad (3.3.3)$$

式中  $h$ ——屏幕显示器高度 (m)；

$d$ ——最佳视距 (m)；

$k$ ——系数，宜取 6。

(5) 按(4)中的3.3.3式计算示例:

1) 根据最佳视距选择显示器的高度。

$$h = d/k = d/6$$

当  $d = 9\text{m}$  时,

$$h = 9\text{m}/6 = 1.5\text{m}$$

即最佳视距为  $9\text{m}$  时, 宜选用高度为  $1.5\text{m}$  的显示器。

2) 根据显示器的高度确定最佳视距。

$$d = k \cdot h = 6h$$

当  $h = 1\text{m}$  时,

$$d = 6\text{m},$$

即采用高度为  $1\text{m}$  的显示器时, 最佳视距为  $6\text{m}$ 。

(6) 对以上规范的理解和分析。

关于显示屏尺寸大小与视距的关系, 以上几本规范给出的计算方式不同, 计算结果也就不同。工程设计中应按具体情况具体分析采用。

1) 年代不同, 标准不同。早几年出版的规范中, 要求的显示屏尺寸偏小。近几年显示技术快速发展, 价格逐步降低, 使得工程中使用较大尺寸的显示屏成为现实, 故较新出版的规范, 标准提高了一些。工程中宜按较高标准设计。

2) 早几年出版的规范按屏幕对角线尺寸计算, 近几年出的规范按屏幕高度尺寸计算。

前些年工程中使用 4:3 的屏幕较多。近几年随着平板显示屏的发展, 16:9 宽屏显示屏得到了广泛采用, 但其对角线与高度的比例关系与 4:3 屏幕大不相同, 能否看得清楚主要取决于高度。故较新规范均按屏幕高度计算。

3) 显示屏宽、高、对角线比例示意图如图 15-8-4 所示。

4) 屏幕大小与监控人员视距及机房面积的关系。现在工程中, 监控中心经常设 1 个或几个尺寸较大的主屏幕。如按早几年规范中要求的, 以屏幕对角线尺寸的 4~6 倍计算视距, 则监控中心需要较大的空间和面积, 工程中难以做到。设计中, 根据 GB 50198—2011《民用闭路监视电视系统工程技术规范》中 3.4.11 第 3 款, 按主显示屏高度的 4~6 倍计算视距和监控中心所需面积。

5) 最佳视距与最远视距、最小视距。

监控室值班人员至屏幕的距离应按最佳视距(即理想视距)计算。会议系统等观看人员较多场合, 除计算最佳视距外, 尚需核算最远视距与最小视距, 以保证所有人员都能看清楚。

### 15.8.5.2 显示屏安装高度

GB 50635—2010《会议电视会场系统工程设计规范》中的规定:

3.5.2 PDP、LCD、CRT 显示器的布置应符合下列规定(图 3.5.2):

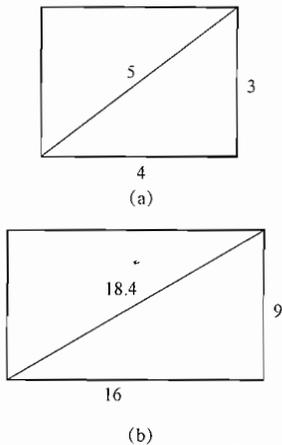


图 15-8-4 显示屏宽、高、  
对角线比例示意图  
(a) 4:3 显示屏;  
(b) 16:9 显示屏

1 会场主显示器的墙装高度宜按下列公式计算确定:

$$H' = H'_1 + H'_2 + H'_3 \quad (3.5.2-1)$$

$$H'_1 = D' \tan \theta' \quad (3.5.2-2)$$

式中:  $H'$ ——显示器的安装高度 (m);

$D'$ ——参会者与显示器之间的水平距离 (m);

$H'_1$ ——参会者坐姿水平视线与显示器中心水平线之间的垂直距离 (m);

$H'_2$ ——参会者坐姿平均身高 (m), 宜取 1.40m;

$H'_3$ ——主席台高度 (m), 取 0.20m ~ 0.40m; 当无主席台时, 取 0;

(编者注:  $H'_3$  也可观众席与主席台地面的高差。)

$\theta'$ ——参会者与显示器中心法线的垂直视角。

2 参会者与会场主显示器屏幕垂直观看角宜小于或等于  $20^\circ$ , 与会场主显示器屏幕水平观看角应小于主屏幕显示器的水平视角参数。

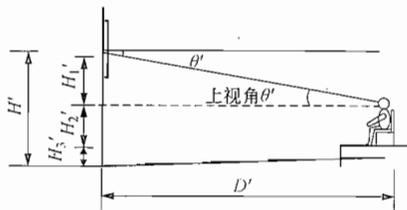


图 3.5.2 显示器安装高度示意

### 15.8.6 医院呼叫系统

#### 15.8.6.1 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定:

17.2.1 呼应信号系统宜由呼叫分机、主机、信号传输、辅助提示等单元组成。

17.2.2 医院病房护理呼应信号系统设计应符合下列规定:

1 根据医院的规模、医护标准的要求, 在医院病房区宜设置护理呼应信号系统。

2 护理呼应信号系统, 应按护理区及医护责任体系划分成若干信号管理单元, 各管理单元的呼叫主机应设在护士站。

3 护理呼应信号系统的功能应符合下列要求:

1) 应随时接受患者呼叫, 准确显示呼叫患者床位号或房间号;

2) 当患者呼叫时, 护士站应有明显的声、光提示, 病房门口应有光提示, 走廊宜设置提示显示屏;

3) 应允许多路同时呼叫, 对呼叫者逐一记忆、显示, 检索可查;

4) 特护患者应有优先呼叫权;

5) 病房卫生间或公共卫生间厕位的呼叫, 应在主机处有紧急呼叫提示;

6) 对医护人员未作临床处置的患者呼叫, 其提示信号应持续保留。

#### 15.8.6.2 JGJ 312—2013《医疗建筑电气设计规范》中的规定:

14.1.1 医疗建筑的呼叫信号系统宜包括候诊呼叫信号系统、护理呼叫信号系统、病房探视系统。

14.1.2 医疗建筑的呼叫信号装置应使用 50V 及以下安全特低电压。

14.2.2 候诊呼叫信号系统应由护士站或分诊台主机、各诊室终端、呼叫扬声器、显示屏等组成。

14.2.3 候诊室、检验室、放射科、发药处、出入院手续办理处、门诊手术室、注射室

等场所，宜设置候诊呼叫信号装置。

14.2.4 候诊呼叫信号系统应与医疗专用信息系统联网。

14.4.1 三级医院的重症监护室或隔离病房等场所，宜设置病房探视系统。二级及以下医院的重症监护室或隔离病房等场所，可设置病房探视系统。

14.4.2 病房探视系统宜由护士站终端、语音对讲、图像显示等组成，并宜采用网络传输技术，通过语音或视频实现隔离区探视双方的语音对讲或单、双向可视对讲。

### 15.8.6.3 医院呼叫系统的设计

(1) 在医院病房、产房等处应设病房护理呼叫系统。在护士站设呼叫主机，在各个病床处、卫生间设呼叫及对讲按钮或呼叫按钮。走廊设呼叫显示屏，显示呼叫的房间号及床号。为简化布线关系，病房护理呼叫系统宜采用总线连接方式。

(2) 病房护理呼叫系统示例如图 15-8-5 所示。

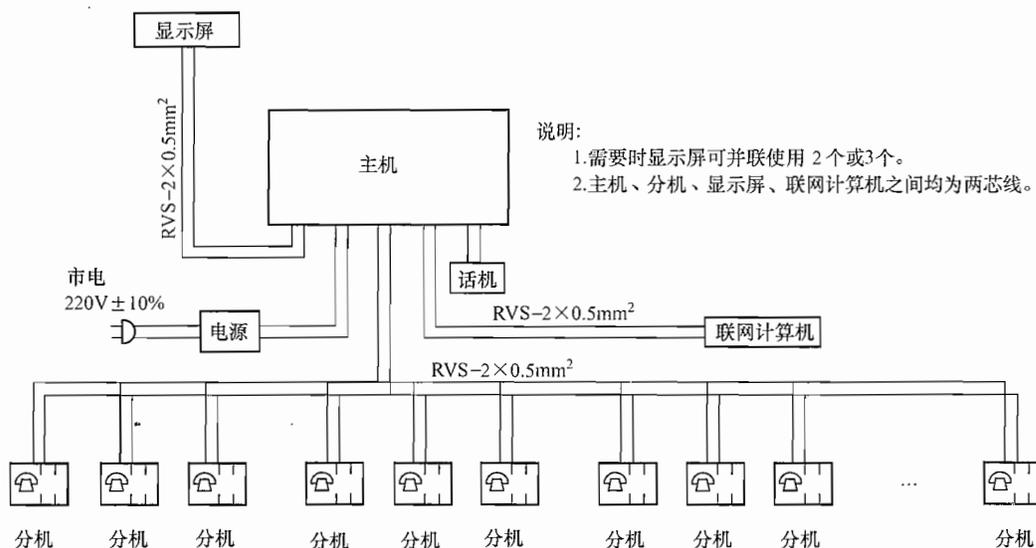


图 15-8-5 病房护理呼叫系统示例

(3) 候诊叫号系统示例如图 15-8-6 所示。

### 15.8.6.4 救助呼叫按钮

GB 50763—2012《无障碍设计规范》中的规定（编者注：这几条为住建部《建筑工程施工图设计文件技术审查要点》第 6.4.1 条）：

第 3.9.3 条：“无障碍厕所的无障碍设计应符合下列规定：

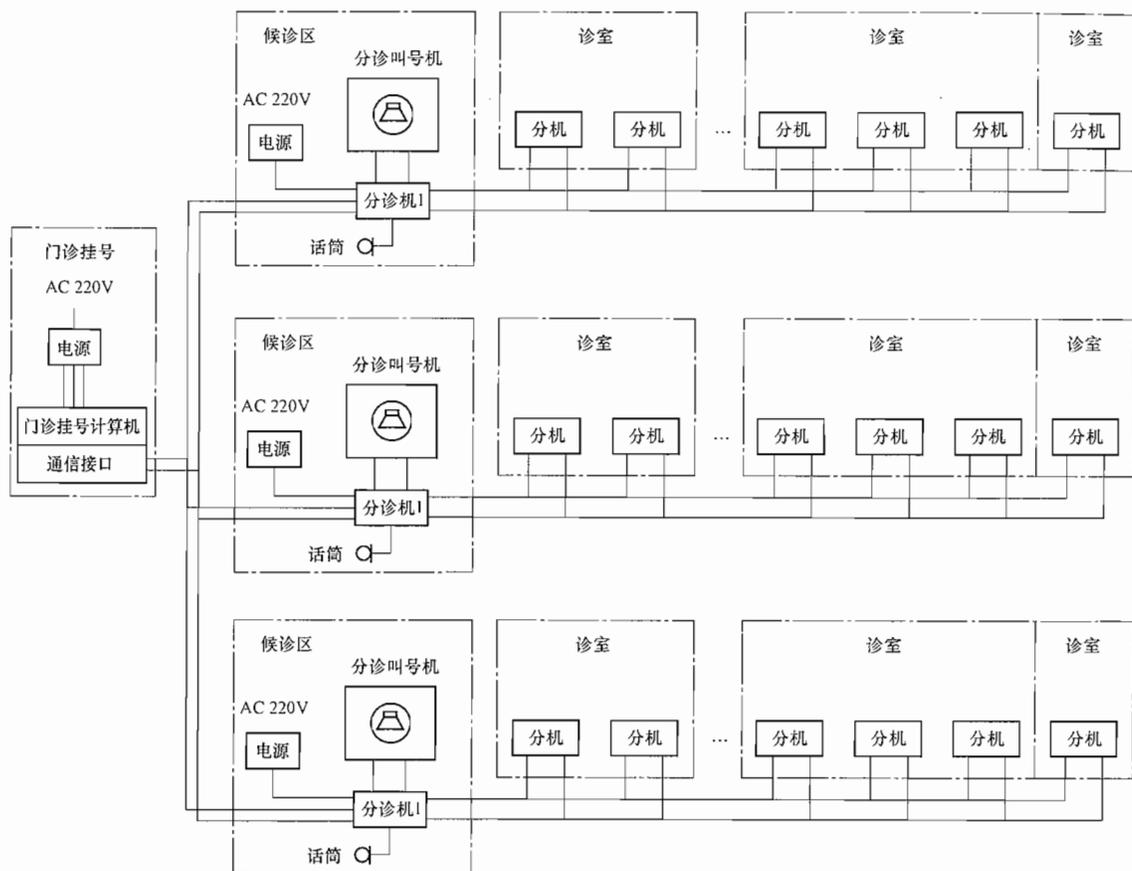
10 在座便器旁的墙面上应设高 400mm~500mm 的救助呼叫按钮。

3.11.5 无障碍客房的其他规定：

3 客房和卫生间应设高 400mm~500mm 的救助呼叫按钮。

3.12.4 无障碍住房及宿舍的其他规定：

4 居室和卫生间应设求助呼叫按钮。



注:

1. 候诊叫号系统是从门诊挂号开始,到各个诊区之间搭建一个总线系统平台,将每个就医者的挂号资料(挂号医生通过简单的询问得出的初步就诊建议)、就诊科室、就诊号等通过挂号处的电脑主机输送到相应诊区;分诊台处的分机及诊区显示屏分别显示当前的就诊情况、每位就诊者的序号等,使就诊病人合理安排时间,安心就诊。免去了人工分诊给医护人员和就诊病人带来的诸多不便。
2. 候诊叫号系统包括多线制和总线制两种形式,目前多采用总线(二总线或四总线)系统;通过系统集成和配套软件实现各种功能。
3. 候诊叫号系统的一般功能。
  - 3.1 随时接受诊区内各诊室医生对就诊者的呼叫,候诊区的声音提示装置及显示屏能准确提示就诊者诊号以及到哪个诊室就诊。
  - 3.2 几个诊室同时呼叫时,能逐一记忆、显示,并自动分配就诊者到不同诊室就诊。
  - 3.3 通过各自的功能键,挂号处与各诊区分诊台之间、诊区分诊台与各诊室之间可以实现双向呼叫,双向通话,随时互相了解情况。
  - 3.4 候诊区的扬声器及显示屏同时具有广播及宣教功能。在无人呼叫时可根据不同诊区的特点播放一些疾病预防、自诊断、治疗等常识性的宣传片,或播放一些轻松的节目以缓解病人的紧张情绪。
4. 候诊叫号系统的设计应注意以下几点:
  - 4.1 显示屏显示内容简单明了,显示被呼叫者诊号及要就诊的诊室。
  - 4.2 显示屏一般设在诊区分诊台上方或附近容易看见的地方;分诊控制机设在分诊台,由医护人员操作和管理。
  - 4.3 诊室分机安装在医生工作台上方便操作的地方,一般距工作台0.3m左右。
  - 4.4 候诊叫号系统的订货和安装一般在主体建筑施工结束后进行,设计中应考虑预留后期安装的技术条件。

图 15-8-6 候诊叫号系统示例

## 15.9 智能化集成系统

### 15.9.1 GB 50314—2015《智能建筑设计标准》中的规定：

#### 2.0.4 智能化集成系统

为实现建筑物的运营及管理目标，基于统一的信息平台，以多种类智能化信息集成方式，形成的具有信息汇聚、资源共享、协同运行、优化管理等综合应用功能的系统。

### 15.9.2 系统集成的目的及基本功能

(1) 为使整个建筑内各个智能化系统之间实现资源共享、联动控制、统一管理，宜对各智能化系统进行集成。系统集成主机一般可设在消防监控室，并通过网络与建筑设备监控主机、消防监控主机、公共广播主机、视频监控主机、出入口控制主机等联网，实现物理上、逻辑上、功能上的集成。

(2) 确认火灾后自动解控各层通道上受出入口控制系统控制的门，便于人员疏散。

(3) 安防报警系统、视频监控系统、出入口控制系统报警后，自动连锁建筑设备监控系统打开有关层的灯光，并自动录像。

(4) 通过智能卡一卡通系统，对出入口控制系统、安全防范、汽车库管理、考勤记录、会议签到、资料借阅、内部消费等进行综合管理。

(5) 建筑设备监控、火灾报警、视频监控、安防报警、出入口控制及一卡通、广播系统，以及智能电力监控系统、冷冻机组控制系统、群控电梯的控制系统等各个子系统应能提供开放的协议和接口，以便于通过网络传输，实现较高层次的系统集成。

### 15.9.3 智能化系统集成图示及应用提示

15.9.3.1 智能化系统集成所包括的基本内容与系统构成示例，如图 15-9-1、图 15-9-2 所示。

注：此图及以下应用提示摘自国家标准图 09×700《智能建筑弱电工程设计与施工》（上册）。

#### 15.9.3.2 智能化系统集成的应用提示：

(1) 系统集成的目的是构成一个系统集成平台，实现如下功能：

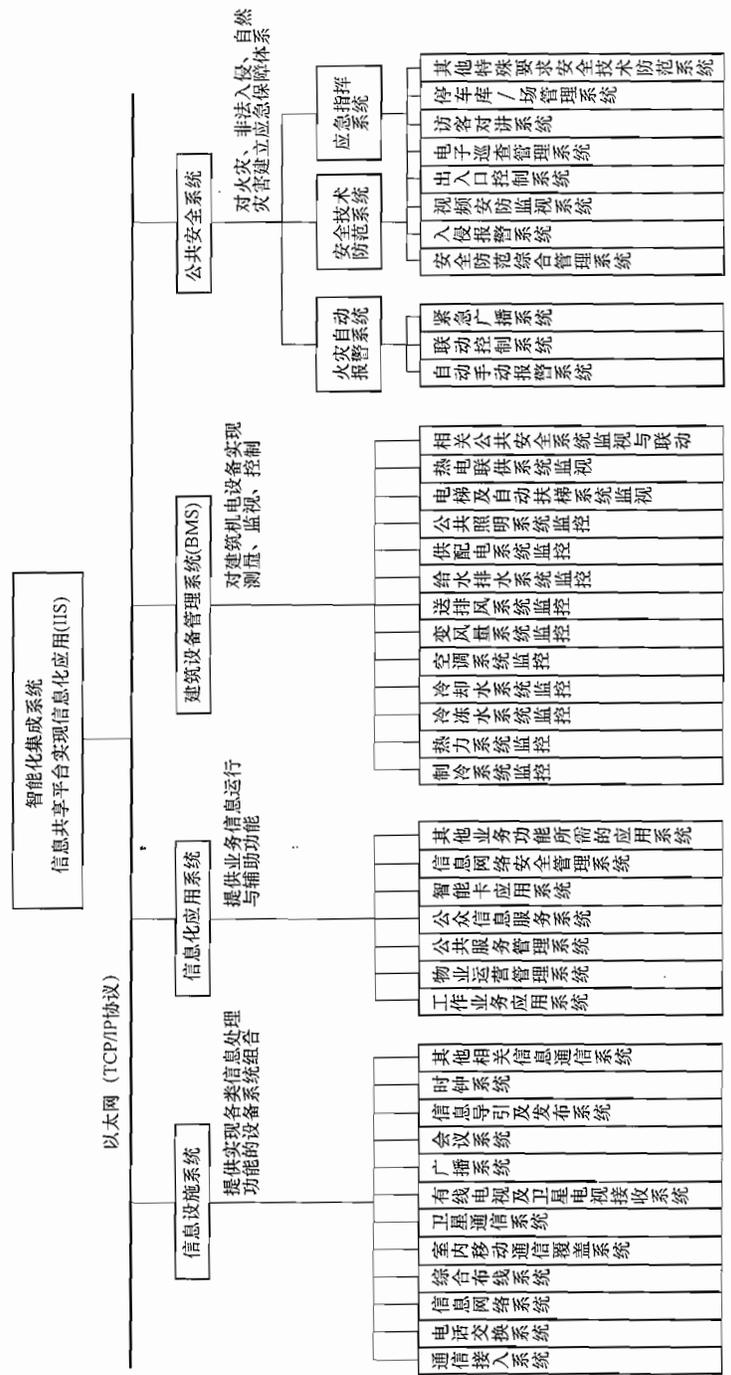
- 1) 对各个子系统集中监控和管理。
- 2) 资源共享平台。
- 3) 相关子系统之间联动。
- 4) 升级成应急指挥系统。
- 5) 能耗监测和能源管理的平台。
- 6) 作为远程监控、管理的统一接口。

(2) 系统集成的方式一般有以下几种：

1) 对单体建筑包括分系统集成（例如智能卡管理、安防集成等）和全局系统集成（例如 BMS 和 IBMS）。

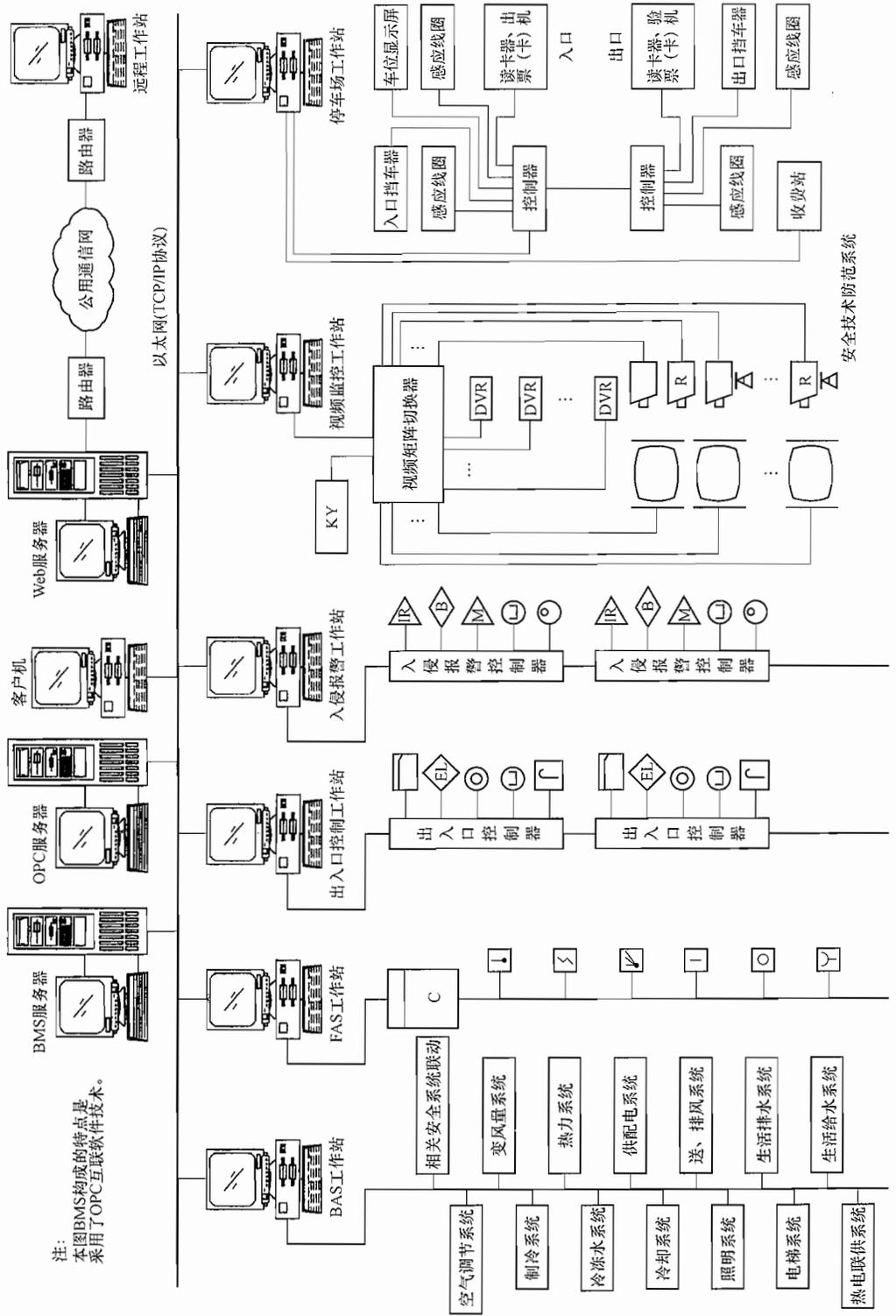
2) 对建筑群而言，可构成复合的 BMS 和 IBMS 系统，也可构成复合的分系统集成以及单个子系统的复合集成（例如视频监控系统）。

(3) 系统集成的设计原则：



BMS:建筑设备管理系统,在系统集成平台上通过TCP/IP、OPC、ODBC、网关等互联技术,集成了火灾自动报警、建筑设备监控、安防、广播等子系统,构成BMS。  
 在某些情况下,把建筑设备监控系统兼作为系统集成平台,实现集中监控、共享资源、相关子系统联动等功能。  
 IBMS:建筑集成管理系统,一般情况下,把信息网络系统兼作系统集成平台,通过TCP/IP、OPC、ODBC、网关等互联技术,集成了火灾自动报警、建筑设备监控、安防、广播及信息网络等子系统,构成IBMS。实现集中监控、共享资源、相关子系统联动、能耗检测、紧急指挥、远程监控等功能。在某些情况下,系统集成平台单独配置。

图 15-9-1 公共建筑智能化集成系统基本内容



注：本图BMS构成的特点采用了OPC互联软件技术。

图 15-9-2 建筑物管理系统(BMS)示意图

- 1) 贯彻设计一步到位、分步实施的原则。
- 2) 应用协议、接口、软件应考虑开放性、可扩展性、兼容性。
- 3) 应根据工程实际需要, 经济发展与管理水平配置集成系统, 提高实用性、可操作性和性价比。

(4) 系统集成的设计步骤:

- 1) 完成各子系统功能, 满足用户基本使用和管理要求。
- 2) 对使用与管理功能要求紧密相连的子系统如安全技术防范系统、火灾自动报警系统、建筑设备管理系统考虑技术与功能接口, 在确保独立运行的基础上, 可以进行集成化控制和联动。

3) 对建筑区域内单个建筑的各子系统集成与建筑群的各子系统集成以及建筑群的某几个子系统集成。

(5) 系统集成需要注意的几个问题:

- 1) 系统集成平台应配置集中的数据库系统, 实现资源共享以及子系统间进行信息交互。
- 2) 系统集成平台应配置集成服务器, 支持 OPC、ODBC 等各种集成协议。
- 3) 系统集成平台应配置各子系统的监控软件, 实现集中监控。

## 15.10 弱电机房工程设计与环境要求

### 15.10.1 设计中应遵循的规范

- (1) JGJ 16—2008 《民用建筑电气设计规范》;
- (2) GB 50174—2008 《电子信息系统机房设计规范》;
- (3) GB 50343—2012 《建筑物电子信息系统防雷技术规范》;
- (4) GB 50057—2010 《建筑物防雷设计规范》。

### 15.10.2 弱电机房的设置与位置

(1) JGJ 16—2008 《民用建筑电气设计规范》中的规定:

23.1.2 民用建筑中的电子信息系统, 宜分类合设设备机房, 并符合下列规定:

- 1 综合布线设备间宜与计算机网络机房及电话交换机房靠近或合并;
- 2 消防控制室可单独设备, 亦可与安防系统、建筑设备监控系统合用控制室;
- 3 公共广播可与消防控制室合并设置, 亦可与有前端的有线电视系统综合设机房。

23.1.3 高层建筑或电子信息系统较多的多层建筑, 除设备机房外, 应设置电信间。

23.1.5 各系统机房面积、电信间面积、布线通道应留有发展空间。

23.2.1 机房的位置选择应符合下列规定:

- 1 机房宜设在建筑物首层及以上层, 当地下为多层时, 也可设在地下一层;
- 2 机房宜靠近电信间, 方便各种线路进出;
- 3 机房应远离强电磁场干扰场所, 不应设置在变压器室、配电室的楼上、楼下或隔壁场所;
- 4 机房宜远离振动源和噪声源的场所, 当不能避免时, 应采取隔振、消声和隔声措施;

6 机房应远离粉尘、油烟、有害气体以及生产或储存具有腐蚀性、易燃、易爆物品的场所；

7 机房不应设置在厕所、浴室或其他潮湿、易积水场所的正下方或贴邻。

23.2.2 电信间的位置选择应符合下列规定：

1 电信间是楼层电子信息系统管线敷设和设备安装占用的建筑空间，宜设在进出线方便，便于安装、维护的公共部位；

2 电信间位置宜上下层对位，应设独立的门，不宜与其他房间形成套间；

3 电信间不应与水、暖、气等管道共用井道；

4 应避免靠近烟道、热力管道及其他散热量大或潮湿的设施。

23.2.3 机房、电信间设计应符合下列规定：

3 机房及电信间不允许与其无关的水管、风管、电缆等各种管线穿过；

4 电信间面积应符合下列规定：

1) 设有综合布线机柜时，电信间面积宜大于或等于 $5\text{m}^2$ ；

2) 无综合布线机柜时，可采用壁柜式电信间，面积宜大于或等于 $1.5\text{m}$ （宽） $\times$  $0.8\text{m}$ （深）。

23.2.4 机房、电信间设备布置应符合下列规定：

4 设备的间距和通道应符合下列要求：

1) 机柜正面相对排列时，其净距离不应小于 $1.5\text{m}$ 。

2) 背后开门的设备，背面离墙边净距离不应小于 $0.8\text{m}$ 。

3) 机柜侧面距墙不应小于 $0.5\text{m}$ ，机柜侧面离其他设备净距不应小于 $0.8\text{m}$ ，当需要维修测试时，则距墙不应小于 $1.2\text{m}$ 。

4) 并排布置的设备总长度大于 $4\text{m}$ 时，两侧均应设置通道；

5) 通道净宽不应小于 $1.2\text{m}$ 。

5 墙挂式设备中心距地面高度宜为 $1.5\text{m}$ ，侧面距墙应大于 $0.5\text{m}$ 。

23.3.2 各类机房对土建专业的要求应符合下列规定：

4 电信间预留楼板孔洞应上下对齐，楼板孔洞布线后应采用防火堵料封堵；

5 电信间地面应略高于走廊地面，或设防水门坎。

(2) GB 50981—2014《建筑机电工程抗震设计规范》中的规定：

**1.0.4 抗震设防烈度为6度及6度以上地区的建筑机电工程必须进行抗震设计。**

### 15.10.3 弱电机房设计中应注意的问题

#### 15.10.3.1 机房设置方面

(1) 设计中应在各系统设置、机房面积、弱电间面积、布线通路等各方面留有充分的发展余地，为智能化各系统提供适当的运行和发展空间。

(2) 为节约机房面积、节省昼夜值班人员，并使相关系统功能互补，建筑物内的智能化系统宜分类合设弱电机房。消防控制系统与安防系统、应急广播、建筑设备监控系统等宜合设消防/安防监控室；综合布线主设备间与计算机网络机房、电话交换机房宜靠近；背景音乐与有线电视宜合设广播电视机房；弱电各系统进线的进线间宜合设。机房面积应根据远

期设备安装位置和操作、维护距离等因素确定。当几个系统合用机房时,为便于管理、操作,应按功能分区布置。

(3) 弱电各个机房均应避开伸缩缝,以利于防水、防火、防地震等不稳定因素。

(4) 消防控制室应满足消防规范要求,应设于一层(或地下一层),直通室外或安全出口,并应设耐火2h的墙、1.5h的楼板和防火门与建筑的其他部位隔开。安防控制室应设置为禁区。设在底层的弱电机房的外门、外窗应采取安全措施。消防、安防控制室应设外线电话和数据插座。

(5) 根据保密要求和安防规范要求,在涉密的计算机网络机房、高风险单位的安防控制室等处应设出入口控制系统。在其余通信机房、消防控制室等重要机房主要入口,宜设出入口控制系统。

(6) 网络中心的设备机房与控制室或操作间宜分开设置。因网络设备对清洁度要求较高,但噪声较大、温度较低、电磁环境等对人员长期工作不利。

(7) 较大的网络机房应单设电池室。因机房一般等效均布活荷载为 $8 \sim 10 \text{ kN/m}^2$ ,而UPS机柜加上电池一般较重,大容量电池室楼板荷载需要 $16 \text{ kN/m}^2$ 甚至更多。机房的荷载应以房间为单位确定,如果不做分隔,整个机房的荷载均要加大,会造成浪费。

(8) 大型程控电话交换机房、大型计算机房的机房专用空调机组直接放置在机房内时,空调机组周围宜设防漏水报警装置,并应在加湿进水管侧的地板上设地漏。

(9) 当采用模块局方式时,经用户与当地电信部门商议,一般程控电话交换机、开关电源、蓄电池、光电变换设备、传输设备、配线设备、空调设备、活动地板、室内装修等均由电信部门考虑并提供。设计中应为其预留机房面积、供电电源、接地、出线通路等条件。

(10) 为防雷,从室外引入至各个机房的电缆应设电涌保护器,光缆的金属加强芯应接地。

(11) 需要昼夜值班的消防/安防控制室、电话交换机房,当附近没有公共卫生间可供利用时应单设卫生间。

(12) 消防/安防监控中心布置图示例如图15-10-1所示。

### 15.10.3.2 弱电机房环境方面

(1) 消防控制室、安防控制室、计算机网络机房、通信机房、业务广播室、建筑设备监控主机等均应按照楼内的重要负荷供电。与消防有关的设备应接自消防电源,由双路电源末端互投箱供电。同时火灾报警与消防控制设备应设置备用电源与电池,其容量随选定的设备配置。

(2) 机房供电容量应按照远期规划的设备耗电量确定,并留有充分余量。现在设备小型化了,但刀片式服务器等设备密集度越来越高,单个机柜的耗电量比以前更高了。如设计过程中网络中心机房无确切资料时,可按远期可能装满的机柜数量、平均每个机柜耗电 $5 \text{ kW}$ 左右进行估算。UPS容量可按照近期需要配置,根据发展需要再逐步配置到位,可多台并机使用,以减少初期投资、避免电池老化浪费。

(3) 重要的网络机房宜设置机房专用空调机组,以保证其温湿度要求和日夜连续运行的需要。有人经常值班但无可开启外窗的房间应设新风装置。

15

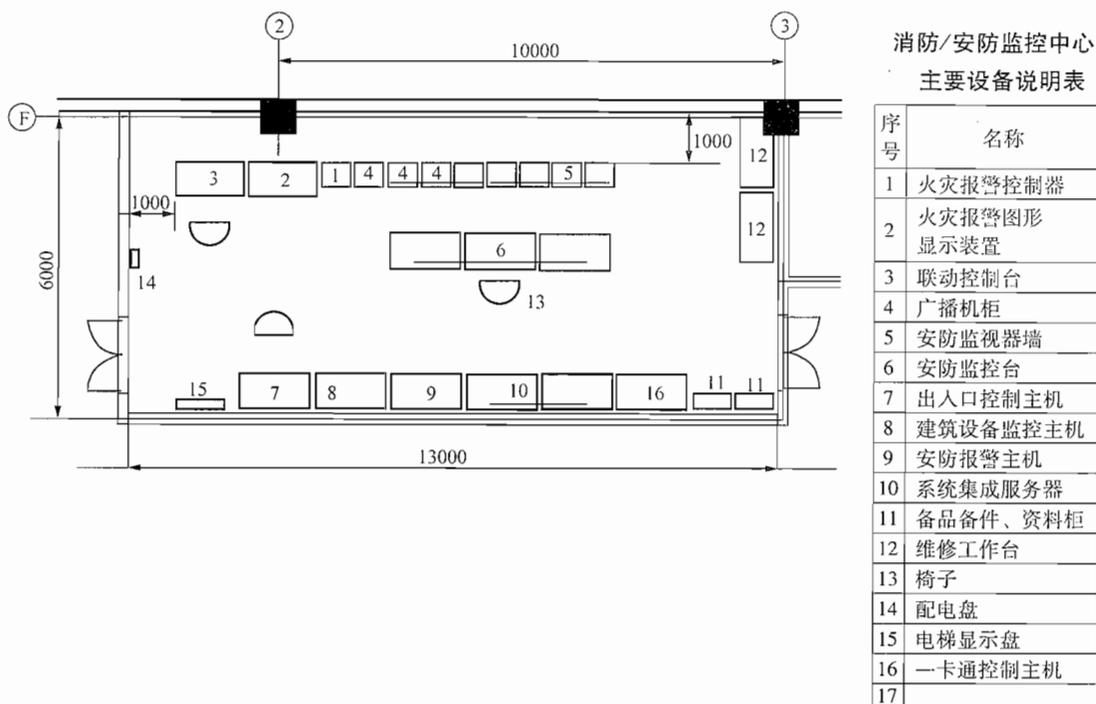


图 15-10-1 消防/安防监控中心布置图示例

(4) 弱电机房的耐火等级不应小于二级，不应设置自动喷水灭火喷头，应设手提式灭火器。按照电子计算机房设计规范等要求，大中型计算机房、大型通信机房应设火灾自动报警和气体自动灭火系统。采用有管网灭火系统时应设钢瓶间。采用气体灭火时，喷洒区之间的吊顶、活动地板应封闭，以保证某区喷洒时能做到全封闭，玻璃隔断需防火并能耐受气体灭火的压力。

(5) 各个机房应采用共用接地方式，接地电阻值不宜大于  $1\Omega$ 。机房工作接地、保护接地、防雷接地、活动地板接地等均接至接地端子箱，形成等电位联结。根据规范、国家标准图和工程实际，接地可采用 S 型接法、M 型接法、S/M 型接法。

(6) 为布线方便、灵活和防静电，各个机房宜设防静电活动地板，高度一般宜为 300mm。为布线干净、整齐，在活动地板下应设弱电线槽。

### 15.10.3.3 弱电间（即电信间）方面

(1) 高层建筑或弱电系统较多的多层建筑均应设置弱电楼层配线间（简称弱电间），弱电间的位置选择应设在靠近负荷中心、便于安装、维修的公共部位。

(2) 设有综合布线系统时，由弱电间至最远信息插座的布线长度，不应超过 90m（包括水平及垂直路径）；超过 90m 时，应增设弱电间或增设网络设备箱。

(3) 弱电间与配电间应分开设置。如受条件限制必须合用时，强、弱线路及设备必须分设在配线间的两侧，并要求强、弱电箱体前应留有不小于 0.8m 的操作、维护距离。

(4) 弱电间位置应上下层对应，每层均应设独立的门，不应与其他房间形成套间，以便于管理。

(5) 设有网络设备柜时, 弱电间面积不宜小于  $5\text{m}^2$ , 如覆盖的信息点超过 400 个时, 应适当增加面积。当每层建筑面积不大、信息点不多、弱电间面积紧张时, 可将网络机柜与其他弱电设备分层布置, 两层合设一个网络柜。

(6) 无综合布线机柜时, 可采用壁柜式弱电间。系统较多时, 弱电间面积宜不小于  $3\text{m} \times 0.8\text{m}$ , 并设两个双扇外开门; 系统较少时弱电间面积宜不小于  $1.5\text{m} \times 0.6\text{m}$ , 设外开双扇门。

(7) 弱电间内应设 220V 电源。当弱电间内用电设备较多时宜设配电箱。因弱电间一般含有网络设备柜和其他通信设备, 电源应按重要负荷考虑, 配电箱宜设 8 个回路左右。因每层耗电量不大, 为节约投资, 可在某几层设双路互投箱, 再将电源配至邻近几层的配电箱。弱电间内应设接地干线和接地端子。

(8) 弱电间应上下对应预留楼板洞, 楼板洞尺寸应留有发展余地, 布线后用防火堵料封堵。

(9) 弱电间内地面应略高于走廊地面或设防水门坎。弱电间墙壁应为耐火极限不低于  $1.0\text{h}$  的不燃烧体, 门应采用丙级防火门。

(10) 弱电间内各设备箱应明装, 箱体安装高度宜为  $1.2 \sim 1.5\text{m}$ 。设备较多时, 可上下布置两层。

(11) 设有网络设备柜的弱电间宜设空调 (严寒地区除外), 以保证网络交换机等设备能正常工作。上下对应的多个弱电间可采用多联分体空调系统 (如 VRV), 以解决室外机安装位置等问题。

(12) 弱电间设备与布置图示例如图 15-10-2 所示。



图 15-10-2 弱电间设备与布置图示例

#### 15.10.4 弱电各机房环境要求参考表

根据 GB 50174—2008 《电子信息系统机房设计规范》、JGJ 16—2008 《民用建筑电气设

计规范》、GB 50034—2013《建筑照明设计标准》综合考虑，设计中一般弱电机房环境要求可参考表15-10-1与表15-10-2。

表 15-10-1 弱电各机房对建筑、结构要求参考表

房间名称		室内净高 (活动地板 至吊顶) (m)	楼、地面等效均布活 荷载 (kN/m <sup>2</sup> )	地面材料	门及宽度 (m)
电话 站	程控交换机室	≥2.6	8~10	防静电活动地板	外开双扇防火门, 1.2~1.5
	总配线架室	≥2.5	≥4.5	防静电活动地板	外开双扇防火门, 1.2~1.5
	话务室	≥2.5	≥3.0	防静电活动地板	隔音门1.0
	整流配电室	≥2.5	≥6	防尘、防滑地面	外开双扇防火门, 1.2~1.5
	免维护电池室	≥2.5	≥16	防尘、防滑地面	外开双扇防火门, 1.2~1.5
	电缆进线室	≥2.2	≥3.0	水泥地	外开双扇防火门, ≥1.0
计算 机房	网络中心机房	≥2.6	8~10	防静电活动地板	外开双扇甲级防火门, ≥1.2~1.5
	监控室	≥2.5	≥6	防静电活动地板	外开双扇防火门, ≥1.0
	UPS间	≥2.5	8~10	防静电活动地板	外开双扇防火门, ≥1.0
	免维护电池室	≥2.5	≥16	防尘、防滑地面	外开双扇防火门, 1.2~1.5
	气体灭火 钢瓶间		≥8	防尘地面	门, ≥1.0
综合布线主设备室		≥2.5	≥6	防静电活动地板	外开双扇防火门, 1.2~1.5
电信间(弱电间)				防尘地面	外开丙级防火门, ≥0.8
广播 室	录播室	≥2.5	≥2.0	防静电地毯	隔音门, 1.0
	设备室	≥2.5	≥4.5	防静电活动地板 或防尘防滑地面	双扇门, 1.2~1.5
消防控制室		≥2.5	≥6	防静电活动地板	外开双扇乙级防火门, 1.5或1.2
安防监控室		≥2.5	≥6	防静电活动地板	外开双扇防火门, 1.5或1.2
有线电视机房		≥2.5	≥4.5	防静电活动地板	外开双扇门, 1.2~1.5
会议 电视	电视会议室	≥3.5	≥3.0	防静电地毯	双扇隔音门, ≥1.2~1.5
	控制室	≥2.5	≥4.5	防静电活动地板	外开单扇隔音门, ≥1.0

15

表 15-10-2 弱电各机房对暖通、空调、电气、给排水专业要求参考表

房间名称	空调、通风			最低照度(lx) 距地 0.75m 水平面	消防 电源	重要负 荷电源	应急 照明	
	温度(℃)	相对湿度(%)	通风					
电话站	程控交换机室	18~28	35~75	新风	500		用交流供电时, √	√
	总配线架室	10~28	30~75		500			
	话务室	18~28	30~75	新风	300			√
	整流配电室	18~28			200		√	
	免维护电池室	15~25		通风	100			
	电缆进线室			通风	200			
计算机房	网络中心机房 (A级、B级)	23±1	40~55	新风	500		√	√
	网络中心机房 (C级)	18~28	35~75	新风	500		√	√
	监控室	18~28	35~75	新风	500			√
	UPS间	18~28		通风	300		√	√
	免维护电池室	15~25		通风	100			
综合布线主设备室		18~28	30~75		500		√	√
弱电间	有网络设备	18~28	30~75		300		√	
	无网络设备	10~35	20~80				√	
广播室	录播室	18~28	30~80	新风	150, 不宜选用荧光灯			
	设备室	18~28	30~80		500		√	√
消防控制室		18~28	35~75	新风	500	√		√
安防监控室		18~28	35~75	新风	500		√	√
有线电视机房		18~28	30~75	新风	500		√	
扩声控制室		18~28	30~75	新风	500		√	√

### 15.10.5 电子信息系统防雷保护设施与接地

#### 15.10.5.1 GB 50343—2012《建筑物电子信息系统防雷技术规范》中的规定:

5.1.2 需要保护的电子信息系统必须采取等电位联结与接地保护措施。

5.1.3 建筑物电子信息系统应根据需要保护的设备数量、类型、重要性、耐冲击电压额定值及所要求的电磁场环境等情况选择下列雷电电磁脉冲的防护措施:

- 1 等电位联结和接地;
- 2 电磁屏蔽;
- 3 合理布线;
- 4 能量配合的浪涌保护器防护。

5.2.5 防雷接地与交流工作接地、直流工作接地、安全保护接地共用一组接地装置时,

接地装置的接地电阻值必须按接入设备中要求的最小值确定。

5.2.10 新建建筑物的电子信息系统在设计、施工时，宜在各楼层、机房内墙结构柱主钢筋处引出和预留等电位接地端子。

5.2.1 机房内电子信息设备应作等电位联结。等电位联结的结构形式应采用 S 型、M 型或它们的组合（图 5.2.1）。

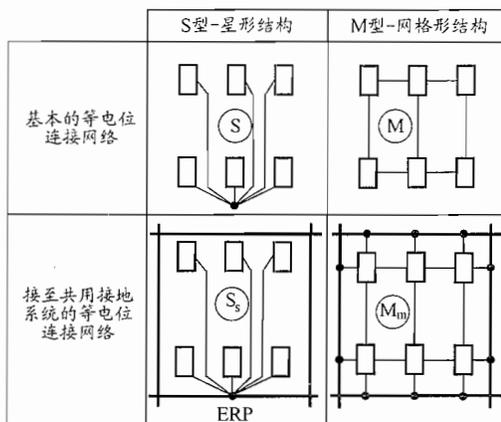


图 5.2.1 电子信息系统等电位联结网络的基本方法

——共用接地系统；——等电位联结导体；□设备；●等电位联结网络的联结点；ERP 接地基准点； $S_s$  单点等电位联结的星形结构； $M_m$  网状等电位联结的网格形结构。

5.2.4 条文说明：信息化时代的今天，声音、图像、数据为一体的网络信息应用日益广泛。各地都在建造新的广播电视大楼，其声音、图像系统的电子设备系微电流接地系统，应设置专用的工艺垂直接地干线以满足其要求，参考图 6。

#### 15.10.5.2 GB 50174—2008《电子信息系统机房设计规范》中的规定：

8.4.2 保护性接地和功能性接地宜共用一组接地装置，其接地电阻应按其中最小值确定。

8.4.4 电子信息系统机房内的电子信息设备应进行等电位联结，等电位联结方式应根据电子信息设备易受干扰的频率及电子信息系统机房的等级和规模确定，可采用 S 型、M 型或 SM 混合型。

8.4.4 条文说明：对电子信息设备进行等电位联结是保障人身安全、保证电子信息系统正常运行、避免电磁干扰的基本要求。

电子信息设备有两个接地：一个是为电气安全而设置的保护接地，另一个是为实现其功能性而设置的信号接地。按 IEC 标准规定，除个别特殊情况外，一个建筑物电气装置内只允许存在一个共用的接地装置，并应实施等电位联结，这样才能消除或减少电位差。对电子信息设备也不例外，其保护接地和信号接地只能共用一个接地装置，不能分接不同的接地装置。在 TN-S 系统中，设备外壳的保护接地和信号接地是通过连接 PE 线实现接地的。

S 型（星形结构、单点接地）等电位联结方式适用于易受干扰的频率在 0~30kHz（也可高至 300kHz）的电子信息服务的信号接地。从配电箱 PE 母排放射引出的 PE 线

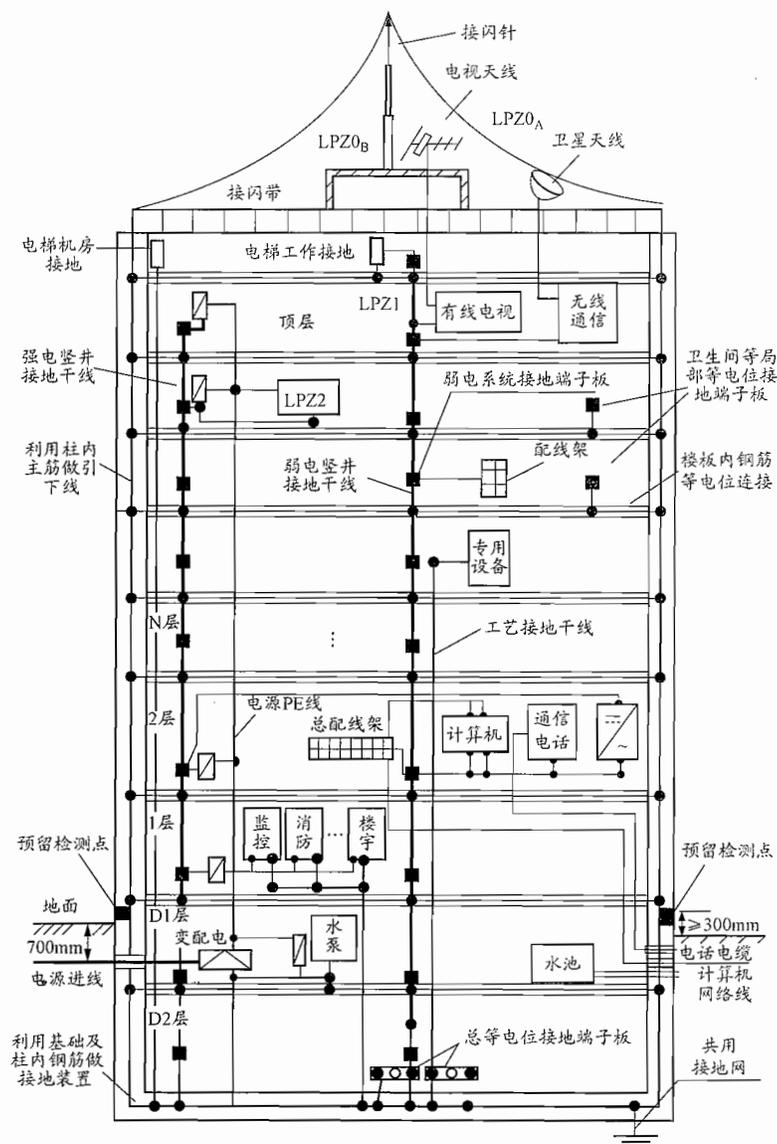


图6 建筑物等电位联结及其共用接地系统示意图

□—配电箱；■—楼层等电位接地端子板；

PE—保护接地线；MEB—总等电位接地端子板

兼做设备的信号接地线，同时实现保护接地和信号接地。对于C级电子信息系统机房中规模较小（建筑面积 $100\text{m}^2$ 以下）的机房，电子信息设备可以采用S型等电位联结方式。

M型（网形结构、多点接地）等电位联结方式适用于易受干扰的频率大于 $300\text{kHz}$ （也可低至 $30\text{kHz}$ ）的电子信息服务的信号接地。电子信息设备除连接PE线作为保护接地外，还采用两条（或多条）不同长度的导线尽量短直地与设备下方的等电位联结网格联结，大多数电子信息设备应采用此方案实现保护接地和信号接地。

8.4.5 采用 M 型或 SM 混合型等电位联结方式时，主机房应设置等电位联结网格，网格四周应设置等电位联结带，并应通过等电位联结导体将等电位联结带就近与接地汇流排、各类金属管道、金属线槽、建筑物金属结构等进行连接。每台电子信息设备（机柜）应采用两根不同长度的等电位联结导体就近与等电位联结网格连接。

8.4.5 条文说明：要求每台电子信息设备有两根不同长度的联结导体与等电位联结网格联结的原因是：当联结导体的长度为干扰频率波长的  $1/4$  或其奇数倍时，其阻抗为无穷大，相当于一根天线，可接收或辐射干扰信号，而采用两根不同长度的联结导体，可以避免其长度为干扰频率波长的  $1/4$  或其奇数倍，为高频干扰信号提供一个低阻抗的泄放通道。

8.4.6 等电位联结网格应采用截面积不小于  $25\text{mm}^2$  的铜带或裸铜线，并应在防静电活动地板下构成边长为  $0.6\sim 3\text{m}$  的矩形网格。

8.4.6 条文说明：等电位联结网格的尺寸取决于电子信息设备的摆放密度，机柜等设备布置密集时（成行布置，且行与行之间的距离为规范规定的最小值时），网格尺寸宜取小值（ $600\text{mm}\times 600\text{mm}$ ）；设备布置宽松时，网格尺寸可视具体情况加大，目的是节省铜材（参见图 1）。

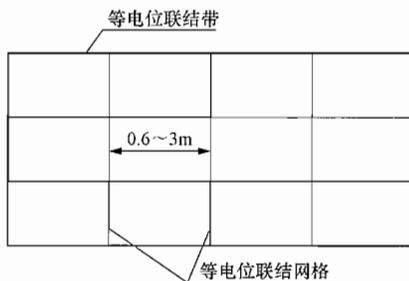


图 1 等电位联结带与等电位联结网格

8.4.7 等电位联结带、接地线和等电位联结导体的材料和最小截面积，应符合表 8.4.7 的要求。

表 8.4.7 等电位联结带、接地线和等电位联结导体的材料和最小截面积

名 称	材 料	最小截面积 ( $\text{mm}^2$ )
等电位联结带	铜	50
利用建筑内的钢筋做接地线	铁	50
单独设置的接地线	铜	25
等电位联结导体（从等电位联结带至接地汇集排或至其他等电位联结带；各接地汇集排之间）	铜	16
等电位联结导体（从机房内各金属装置至等电位联结带或接地汇集排；从机柜至等电位联结网格）	铜	6

### 15.10.5.3 设计中应注意的问题

(1) 电子信息系统接地应采用共用接地方式, 接地电阻要求不大于 $1\Omega$ 。在计算机网络中心机房、通信机房、消防/安防监控室、有线电视机房、各弱电间等处均应设等电位接地端子箱。

(2) 除了保护作用外, 电子信息系统需要功能性接地, 以地电位作为所有信号的参照点。如果没有良好的接地系统, 信号不能稳定、可靠地进行传输, 甚至可能乱套。

(3) 根据 GB 50343—2012《建筑物电子信息系统防雷技术规范》, 从外线引入建筑物的各个系统的电缆与电线应设电涌保护器, 室外摄像机缆线应设电涌保护器。引入建筑物处光缆的金属加强芯应接地。

## 15.11 室内弱电线路敷设

### 15.11.1 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定:

20.7.2 建筑物内通信配管设计应符合下列规定:

1 多层建筑物中竖向垂直主干管道, 宜采用墙内暗管敷设方式, 也可根据实际需求, 采用通信线缆竖井敷设方式;

2 高层建筑物宜采用通信线缆竖井与暗管敷设相结合的方式;

10 建筑物内通信配线电缆的保护导管, 在地下层、首层和潮湿场所宜采用壁厚不小于 $2\text{mm}$ 的金属导管, 在其他楼层、墙内和干燥场所敷设时, 宜采用壁厚不小于 $1.5\text{mm}$ 的金属导管; 穿放电缆时直线管的管径利用率宜为 $50\% \sim 60\%$ , 弯曲管的管径利用率宜为 $40\% \sim 50\%$ ;

11 建筑物内用户电话线的保护导管宜采用管径 $25\text{mm}$ 及以下的管材, 在地下室、底层和潮湿场所敷设时宜采用壁厚大于 $2\text{mm}$ 金属导管; 在其他楼层、墙内和干燥场所敷设时, 宜采用壁厚不小于 $1.5\text{mm}$ 的薄壁钢导管或中型难燃刚性乙烯导管; 穿放对用户电话线的导管截面利用率宜为 $20\% \sim 25\%$ , 穿放多对用户电话线或4对对绞电缆的导管截面利用率宜为 $25\% \sim 30\%$ ;

12 建筑物内敷设的通信配线电缆或用户电话线宜采用金属线槽, 线槽内不宜与其他线缆混合布放, 其布放线缆的总截面利用率宜为 $30\% \sim 50\%$ 。

### 15.11.2 JGJ 48—2014《商店建筑设计规范》中的规定:

7.3.14 对于大型和中型商店建筑的营业厅, 线缆的绝缘和护套应采用低烟低毒阻燃型。

7.3.15 大中型商店建筑的营业场所内导线明敷设时, 应穿金属管、可绕金属电线导管或金属线槽敷设。

7.3.16 对于大型和中型商店建筑的营业厅, 除消防设备及应急照明外, 配电干线回路应设置防火剩余电流动作报警系统。

1.0.4 商店建筑的规模应按单项建筑内的商店总建筑面积进行划分, 并应符合表1.0.4的规定。

表 1.0.4 商店建筑的规模划分

规模	小型	中型	大型
总建筑面积	<5000m <sup>2</sup>	5000m <sup>2</sup> ~ 20000m <sup>2</sup>	>20000m <sup>2</sup>

15

### 15.11.3 设计中应注意的问题

#### (1) 线槽布线。

1) 弱电各个系统干线或缆线较多处宜采用金属线槽布线。线路较少时或支线宜套金属管或阻燃 PVC 管敷设。

2) 同一路径上弱电各系统的线缆，宜分系统或分类别设置线槽。广播线应单独设置线槽，以防止广播线对其他弱电系统造成干扰。

3) 因弱电线缆一般根数多、截面小、比较松散，线槽内所敷电缆或导线的总截面宜为线槽内截面积的 30% 左右，不应超过线槽内截面积的 50%。

4) 弱电线槽在吊顶内敷设时宜靠近吊顶龙骨（可敷设于风管之下），以便于用户维护和使用中必要时增加线缆。

5) 多层线槽敷设时，其上下层间距离应考虑线槽分支、出线、开盖加线等需要。弱电线槽间上下净距不宜小于 0.15m。弱电线槽与强电线槽平行敷设时，各线槽均应接地，并宜分别敷设于走廊两侧或风管、水管的两侧，以避免干扰。参照《综合布线系统工程设计规范》表 7.0.1-1，弱电与强电线槽净距不应小于 0.15m。

6) 垂直线槽内敷设的线缆均应绑扎在横档上。各线槽穿越的上下层孔洞与水平孔洞均应用防火枕或防火堵料封堵。

7) 从首层各弱电机房至弱电间的水平主干线槽，不应敷设于大堂等处的固定吊顶内，宜设在地下一层、设备层、汽车库或其他便于布线和检修的地下层，以避免大堂装修使用后，线槽内缆线不易调整。

8) 公用线槽不应穿过客房、住户，不宜穿过独立办公室等房间（无公共走廊的大开间办公室除外）。

#### (2) 套管布线。

管线在楼板内暗敷时，宜采用金属管、阻燃 PVC 管；明敷时宜采用金属管；在吊顶内敷设时应采用金属管或难燃塑料管。镀锌钢管、焊接钢管（SC 管）的标称管径为内径，JDG 管、PVC 管的标称管径为外径，故采用 JDG 管、PVC 管时应比 SC 管管径放大一级。

#### (3) 其他布线方式。

1) 在高大空间内采用普通线槽或套管布线有困难时，可采用金属地面线槽布线，宜暗敷于楼板垫层内或现浇混凝土楼板内。强电、弱电线路应分槽敷设，两种线路交叉处应设置有屏蔽分隔板的分线盒。线槽在交叉、转弯或分支处应设置分线盒，线槽的直线长度超过 6m 时，宜加装分线盒。

2) 在布点分散且线缆较多的场合，如电脑培训教室、语音教室、电子阅览室等，可采用网络地板布线。选用网络地板布线方式时应适当考虑楼板荷重问题。

3) 管路穿越沉降缝或伸缩缝时，应做沉降或伸缩处理。

### 15.11.4 弱电平面图线型及敷设方式参考表

弱电系统多，线型种类多，标注、说明比较烦琐。设计中宜采用表格方式予以说明，除

注明者外,一般室内弱电平面图各个系统的缆线型式与敷设方式,参见表 15-11-1(工程设计中应根据需要进行增减和修改)。

表 15-11-1 弱电平面图线型及敷设方式参考表

平面图	图中线型	缆线类别	缆线信号、规格	套钢管 (SC) 管径	线路敷 设方式
火警、 广播 平面图	—————	单纯火灾报警	ZR-RVS2×1.0mm <sup>2</sup>	15	埋顶板及埋墙
	-----	联动控制总线	NH-RVS2×1.0mm <sup>2</sup>	15	埋顶板及埋墙
	-----	联动控制总线 +24V 电源线	(NH-RVS2×1.0) + (NH-BV2×1.5)	20	埋顶板及埋墙
	——P——P——	24V 电源线	NH-BV2×1.5mm <sup>2</sup>	15	埋顶板及埋墙
	——FF——FF——	火警电话线	ZR-RVS2×1.0mm <sup>2</sup>	1~2 对 15 3~5 对 20	埋地及暗墙
	——G——G——	可燃气体报警控制线	ZR-KVV4×1.5mm <sup>2</sup>	20	暗棚或埋地, 引出时套管明敷
	——K——K——	消防水泵、风机直 接控制线	NH-KVV8×1.5mm <sup>2</sup>	25	埋地或埋顶 板及埋墙
	——S——S——	广播线	ZR-RVS2×1.0mm <sup>2</sup>	15	埋顶板及埋墙
	——FS——FS——	火警线槽	防火线槽		吊顶内敷设
	——S——S——	广播线槽	防火线槽		吊顶内敷设
弱电平 面图	—————	综合布线	2 根 UTP 超五类八芯双绞线 (2 根 FTP 超五类八芯双绞线) (2 根 UTP 六类八芯双绞线) (2 根 FTP 六类八芯双绞线)	20 (20) (25) (25)	线槽至插座, 暗棚及暗墙; 插座至插座, 埋地及埋墙
	————— /	综合布线	1 根 UTP 超五类八芯双绞线 1 根 UTP 超六类八芯双绞线	15	线槽至插座, 暗棚及暗墙; 插座至插座, 埋地及埋墙
	——4D——4D——4D——4D——	综合布线	4 根 UTP 超五类八芯双绞线	25	线槽至插座, 暗棚及暗墙

续表

平面图	图中线型	缆线类别	缆线信号、规格	套钢管 (SC) 管径	线路敷 设方式
弱电 平面图	— F — F —	电话线	RVS2 × 0.5mm <sup>2</sup> 或 RVS2 × 0.2mm <sup>2</sup>	1~3 对 15; 4~6 对 20	线槽至插座, 暗棚及暗墙; 插座至插座, 埋地及埋墙
	— V — V —	视频监控视频线 + 电源线 (24V 或 12V)	(SYV - 75 - 5) + (BV2 × 1.5)	20	暗棚及暗墙
	— VC — VC —	视频监控视频线 + 电源线 (24V 或 12V) + 云台控制线	(SYV - 75 - 5) + (BV2 × 1.5) + RVVP2 × 1.0	25	暗棚及暗墙
	— BS — BS —	防盗报警线	RVV5 × 0.5mm <sup>2</sup>	15	暗棚及暗墙
	— TV — TV —	有线电视线	SYWV - 75 - 5	20	暗棚及暗墙
	— BA — BA —	建筑设备监控	见平面图 (或系统图)	20	暗棚及暗墙
	— M — M —	出入口控制	见平面图 (或系统图)	15	暗棚及暗墙
	—————	综合布线线槽	金属线槽		吊顶内敷设
	— F — F —	电话线槽	金属线槽		吊顶内敷设
	— V — V —	安防系统及 有线电视线槽	金属线槽		吊顶内敷设
	-----	移动通信线槽	金属线槽		吊顶内敷设

注 1. 暗棚敷设包括顶板内敷设和吊顶内敷设, 可根据工程情况采用。

2. 图中线型可根据本单位绘图习惯和系统内容多少进行增减、调整, 内容少时可采用实线、虚线、点划线等。

此表包括了线型图例、线缆型号、套管规格、敷设方式等, 供设计人员参考。有了此表, 阅图可一目了然, 便于对照施工。同时便于根据弱电内容多少进行修改、调整, 便于专

业内部各个设计项目的统一。采用此表后,说明书各个系统不必再详细论述采用的线型、套管、敷设方式等,可减少重复和繁琐的内容。说明书中主要说明设计意图,对于线路敷设方式,仅说明特殊情况即可。

## 15.12 室外弱电线路敷设

### 15.12.1 设计中应遵循的规范:

- (1) GB 50373—2006《通信管道与通道工程设计规范》;
- (2) GB/T 50605—2010《住宅区与住宅建筑内通信设施工程设计规范》;
- (3) JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》。

### 15.12.2 GB 50373—2006《通信管道与通道工程设计规范》中的规定:

**2.0.1** 通信管道与通道规划应以城市发展规划和通信建设总体规划为依据。通信管道建设规划必须纳入城市建设规划。

**2.0.4** 对于新建、改建的建筑物,楼外预埋通信管道应与建筑物的建设同步进行,并应与公用通信管道相连接。

**3.0.1** 通信管道与通道路由的确定应符合下列要求:

1 通信管道与通道宜建在城市主要道路和住宅小区,对于城市郊区的主要公路也应建设通信管道。

**3.0.3** 通信管道与通道应避免与燃气管道、高压电力电缆在道路同侧建设,不可避免时,通信管道、通道与其他地下管线及建筑物间的最小净距,应符合表 3.0.3 的规定。

表 3.0.3 通信管道、通道和其他地下管线及建筑物间的最小净距表

其他地下管线及建筑物名称		平行净距 (m)	交叉净距 (m)
已有建筑物		2.0	—
规划建筑物红线		1.5	—
给水管	$d \leq 300\text{mm}$	0.5	0.15
	$300\text{mm} < d \leq 500\text{mm}$	1.0	
	$d > 500\text{mm}$	1.5	
污水、排水管		1.0	0.15
热力管		1.0	0.25
燃气管	压力 $\leq 300\text{kPa}$ (压力 $\leq 3\text{kg}/\text{cm}^2$ )	1.0	0.3
	$300\text{kPa} < \text{压力} \leq 800\text{kPa}$ ( $3\text{kg}/\text{cm}^2 < \text{压力} \leq 8\text{kg}/\text{cm}^2$ )	2.0	
电力电缆	35kV 以下	0.5	0.5
	$\geq 35\text{kV}$	2.0	
高压铁塔基础边		2.50	—
通信电缆 (或通信管道)		0.5	0.25
通信电杆、照明杆		0.5	—
绿化	乔木	1.5	—
	灌木	1.0	—

续表

其他地下管线及建筑物名称	平行净距 (m)	交叉净距 (m)
道路边石边缘	1.0	—
铁路钢轨 (或坡脚)	2.0	—
沟渠 (基础底)	—	0.5
涵洞 (基础底)	—	0.25
电车轨底	—	1.0
铁路轨底	—	1.5

注: 1 主干排水管后铺设时, 其施工沟边与管道间的平行净距不宜小于 1.5m。

2 当管道在排水管下部穿越时, 交叉净距不宜小于 0.4m, 通信管道应作包封处理。包封长度自排水管道两侧各长 2m。

3 在交越处 2m 范围内, 燃气管不应做接合装置和附属设备; 如上述情况不能避免时, 通信管道应做包封处理。

4 如电力电缆加保护管时, 交叉净距可减至 0.15m。

3.0.4 人孔内不得有其他管线穿越。

6.0.1 通信管道的埋设深度 (管顶至路面) 不应低于表 6.0.1 的要求。当达不到要求时, 应采用混凝土包封或钢管保护。

表 6.0.1 路面至管顶的最小深度表 (m)

类别	人行道下	车行道下	与电车轨道交越 (从轨道底部算起)	与铁道交越 (从轨道底部算起)
水泥管、塑料管	0.7	0.8	1.0	1.5
钢管	0.5	0.6	0.8	1.2

6.0.2 进入人孔处的管道基础顶部距人孔基础顶部不应小于 0.40m, 管道顶部距人孔上覆底部不应小于 0.30m。

6.0.3 当遇到下列情况时, 通信管道埋设应作相应的调整或进行特殊设计:

- 1 城市规划对今后道路扩建、改建后路面高程有变动时。
- 2 与其他地下管线交越时的间距不符合表 3.0.3 的规定时。
- 3 地下水位高度与冻土层深度对管道有影响时。

6.0.4 管道敷设应有一定的坡度, 以利渗入管内的地下水流向人孔。管道坡度应为 3‰~4‰, 不得小于 2.5‰; 如街道本身有坡度, 可利用地势获得坡度。

6.0.4 条文说明: 为使管道具有合理的埋深, 通常有两种管道坡度设置方法: 一字坡和人字坡。

15.12.3 GB/T 50605—2010《住宅区与住宅建筑内通信设施工程设计规范》中的规定:

3.0.1 建设住宅区及住宅建筑时, 应遵照城市规划的相关规定, 并按本规范的要求在楼外预埋地下通信管道; 在楼内敷设管槽及通信光缆与电缆; 并在适当的部位预留设备间、电信间, 用于安装配线等通信设备。

3.0.3 住宅区地下通信管道设计应该根据地理环境条件、用户数量及通信业务的需求,

结合综合管道的规划确定管道的总容量和敷设方式及敷设路由，并应符合下列规定：

- 1 住宅区内的通信光缆与电缆宜采用地下通信管道敷设的方式。
- 2 通信管道容量应按线缆的终期容量设计，并应满足住宅区智能化弱电系统对管道的需求，同时应预留2个~3个备用管孔。

4.1.5 地下通信管道在路经市政道路时，埋深与间距要求应符合现行国家标准《通信管道与通道工程设计规范》GB 50373的有关规定。

4.1.6 地下通信管道的最小埋深，在住宅区内应根据场地条件、管材强度、外部荷载、土壤状况、与其他管道交叉、地下水位高低、冰冻层厚度等因素来确定。管道最小埋深不应低于表4.1.6的规定。

表4.1.6 管道最小埋深 (m)

管道位置 管材规格	绿化带	人行道	车行道
塑料管	0.5	0.7	0.8
钢管	0.3	0.5	0.6

注：1 塑料管的最小埋深达不到表中要求时，应采用混凝土封或钢管等保护措施。

2 管道最小埋深是指管道的顶面至路面的距离。

#### 15.12.4 JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》中的规定

20.7.4 建筑群内地下通信管道设计应符合下列规定：

- 1 建筑群规划红线内的地下通信管道设计，应与红线外公用通信管网、红线内各建筑物及通信机房引入管道衔接。
- 2 建筑群地下通信管道，宜有两个方向与公用通信管网相连。

#### 15.12.5 设计中应注意的问题

(1) 弱电室外线路，应统筹考虑各系统需求，包括电话、电视、计算机网络、火灾报警及消防控制、广播、视频监控、周界报警、建筑设备监控等各系统，并需考虑室外设置的摄像机、放大器等设备的远程供电问题。

(2) 小区内弱电线路应尽量采用弱电管道敷设方式。电缆较少且没有条件建管道时，可采用铠装电缆直埋、架空敷设等方式。

(3) 弱电室外电缆（及光缆）种类多，但外径一般不大，宜采用高强度塑料栅格管（单格管、4格管等）敷设，如图15-12-1所示。用栅格管敷设，大小直径的电缆可灵活搭配，管孔利用率较高。也可采用双壁波纹塑料管道、混凝土管道等。穿越道路、埋深受限时宜用钢管。管孔数量应按照远期规划、考虑扩容需要和增加新系统的需要，充分预留备用管孔。

(4) 管道出线、拐弯等处，应设人孔（或手孔）。为拉线方便，厂区或小区内管道的人孔之间水平距离不宜超过100m。与其他管线或道路交叉、埋深难以满足要求或开挖土方量太大时，可设人

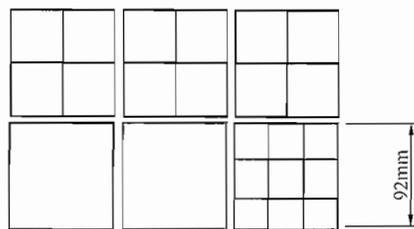


图15-12-1 高强度塑料栅格管道组合型式示例

孔调节管道标高。

(5) 不大于12个标准孔（以 $D=90\text{mm}$ 管孔计）以下的管道，应设小号人孔；大于13个标准孔的管道，应设大号人孔。根据管道的走向和位置，应分别设置直通人孔、拐弯人孔、分支人孔、局前人孔、扇形人孔、标准手孔、小号手孔等。人孔应尽量采用电信部门通用的标准型式。

(6) 人孔内净高一般为 $1.8\text{m}$ 。为拉线方便，管道底部标高与人孔底部的间距不应小于 $400\text{mm}$ ；管道顶部标高与人孔顶部的间距不应小于 $300\text{mm}$ 。

(7) 为防止管道内积水，管道应设置 $0.3\% \sim 0.4\%$ 的坡度。为减少土方量或便于管道交叉，必要时可设置双向人字坡，并使积水排向人孔。不同系统的缆线不宜合占同一个管孔。同一系统（如视频安防监控系统）的几根弱电缆线同时布放时可合占1孔。

(8) 为防止干扰和保证安全， $220\text{V}$ 电源线不应敷设于弱电管道内。广播输出线（ $100\text{V}$ 左右）与弱电管道同路由敷设时，为避免干扰其他弱电线路，可采用铠装电缆与弱电管道同路由但直埋敷设，不占管孔，或采用屏蔽电缆单独占用管孔敷设。

(9) 做单体建筑设计时，应考虑外线的工程量和连接方便。建筑物弱电各系统的出线应尽量集中，减少出口数量，以便于减少人孔（手孔）数量和管道长度。

(10) 管道的埋深（管道顶至地面），宜为 $0.8 \sim 1.2\text{m}$ 。

## 附录一 关于印发《注册电气工程师执业资格制度暂行规定》《注册电气工程师执业资格考试实施办法》和《注册电气工程师执业资格考核认定办法》的通知

(人发〔2003〕25号)

附录

各省、自治区、直辖市人事厅(局)、建设厅(建委、规委),国务院各部委、各直属机构人事(干部)部门,总政干部部、总后基建营房部,中央管理的有关企业:

根据《人事部、建设部关于发布〈勘察设计注册工程师制度总体框架及实施规划〉及〈全国勘察设计注册工程师管理委员会组成人员名单〉的通知》(人发〔2001〕5号)要求,现将《注册电气工程师执业资格制度暂行规定》和《注册电气工程师执业资格考试实施办法》《注册电气工程师执业资格考核认定办法》,请遵照执行。

附表1 注册电气工程师新旧专业对照表

附表2 中华人民共和国注册电气工程师执业资格考核认定申报表

中华人民共和国人事部

中华人民共和国建设部

二〇〇三年三月二十七日

### 注册电气工程师执业资格制度暂行规定(略)

### 注册电气工程师执业资格考试实施办法

**第一条** 建设部、人事部共同负责注册电气工程师执业资格考试工作。

**第二条** 全国勘察设计注册工程师管理委员会负责审定考试大纲、年度试题、评分标准与合格标准。

全国勘察设计注册工程师电气专业管理委员会(以下简称电气专业委员会)负责具体组织实施考试工作。

考务工作委托人事部人事考试中心负责。各地的考试工作,由当地人事行政部门会同建设行政部门组织实施,具体职责分工由各地协商确定。

**第三条** 考试分为基础考试和专业考试。参加基础考试合格并按规定完成职业实践年

限者，方能报名参加专业考试。专业考试合格后，方可获得《中华人民共和国注册电气工程师执业资格证书》。

**第四条** 符合《注册电气工程师执业资格制度暂行规定》第十条的要求，并具备以下条件之一者，可申请参加基础考试：

（一）取得本专业（指电气工程、电气工程自动化专业，详见附表1，下同）或相近专业（指自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术专业，详见附表1，下同）大学本科及以上学历或学位。

（二）取得本专业或相近专业大学专科学历，累计从事电气专业工程设计工作满1年。

（三）取得其他工科专业大学本科及以上学历或学位，累计从事电气专业工程设计工作满1年。

**第五条** 基础考试合格，并具备以下条件之一者，可申请参加专业考试：

（一）取得本专业博士学位后，累计从事电气专业工程设计工作满2年；或取得相近专业博士学位后，累计从事电气专业工程设计工作满3年。

（二）取得本专业硕士学位后，累计从事电气专业工程设计工作满3年；或取得相近专业硕士学位后，累计从事电气专业工程设计工作满4年。

（三）取得含本专业在内的双学士学位或本专业研究生班毕业后，累计从事电气专业工程设计工作满4年；或取得相近专业双学士学位或研究生班毕业后，累计从事电气专业工程设计工作满5年。

（四）取得通过本专业教育评估的大学本科学历或学位后，累计从事电气专业工程设计工作满4年；或取得未通过本专业教育评估的大学本科学历或学位后，累计从事电气专业工程设计工作满5年；或取得相近专业大学本科学历或学位后，累计从事电气专业工程设计工作满6年。

（五）取得本专业大学专科学历后，累计从事电气专业工程设计工作满6年；或取得相近专业大学专科学历后，累计从事电气专业工程设计工作满7年。

（六）取得其他工科专业大学本科及以上学历或学位后，累计从事电气专业工程设计工作满8年。

**第六条** 截止到2002年12月31日前，符合下列条件之一者，可免基础考试，只需参加专业考试：

（一）取得本专业博士学位后，累计从事电气专业工程设计工作满5年；或取得相近专业博士学位后，累计从事电气专业工程设计工作满6年。

（二）取得本专业硕士学位后，累计从事电气专业工程设计工作满6年；或取得相近专业硕士学位后，累计从事电气专业工程设计工作满7年。

（三）取得含本专业在内的双学士学位或本专业研究生班毕业后，累计从事电气专业工程设计工作满7年；或取得相近专业双学士学位或研究生班毕业后，累计从事电气专业工程设计工作满8年。

（四）取得本专业大学本科学历或学位后，累计从事电气专业工程设计工作满8年；或取得相近专业大学本科学历或学位后，累计从事电气专业工程设计工作满9年。

（五）取得本专业大学专科学历后，累计从事电气专业工程设计工作满9年；或取得相近专业大学专科学历后，累计从事电气专业工程设计工作满10年。

(六) 取得其他工科专业大学本科及以上学历或学位后, 累计从事电气专业工程设计工作满 12 年。

(七) 取得其他工科专业大学专科学历后, 累计从事电气专业工程设计工作满 15 年。

(八) 取得本专业中专学历后, 累计从事电气专业工程设计工作满 25 年。或取得相近专业中专学历后, 累计从事电气专业工程设计工作满 30 年。

**第七条** 参加考试由本人提出申请, 所在单位审核同意, 到当地考试管理机构报名。考试管理机构按规定程序和报名条件审核合格后, 发给准考证。参加考试人员在准考证指定的时间、地点参加考试。

国务院各部门所属单位和中央管理的企业的专业技术人员按属地原则报名参加考试。

**第八条** 考点原则上设在省会城市和直辖市, 如确需在其他城市设置, 须经建设部和人事部批准。

**第九条** 坚持考试与培训分开的原则。考试工作人员要认真执行考试回避制度, 参加命题和考试组织管理工作的人员, 不得参与考试有关的培训和参加考试。

**第十条** 严格执行考试考务工作的有关规章制度, 做好试卷命题、印刷、发送过程中的保密工作, 严格遵守保密制度, 严防泄密。

**第十一条** 严肃考场纪律, 严禁弄虚作假, 对违反考试纪律和有关规定者, 要严肃处理, 并追究当事人和领导责任。

## 注册电气工程师执业资格考核认定办法 (略)

附表 1

### 注册电气工程师新旧专业对照表

专业划分	新专业名称	旧专业名称
本专业	电气工程及其自动化	电力系统及其自动化 高电压与绝缘技术 电气技术 (部分) 电机电器及其控制 电气工程及其自动化
相近专业	自动化 电子信息工程 通信工程 计算机科学与技术	工业自动化 自动化 自动控制 流体传动及控制 (部分) 飞行器制导与控制 (部分) 电子工程 信息工程 应用电子技术 电磁场与微波技术

续表

专业划分	新专业名称	旧专业名称
相近专业	自动化 电子信息工程 通信工程 计算机科学与技术	广播电视工程 无线电技术与信息系统 电子与信息技术 通信工程 计算机通信 计算机及应用
其他工科专业	除本专业和相近专业外的工科专业	

注 表中“新专业名称”指中华人民共和国教育部高等教育司1998年颁布的《普通高等学校本科专业目录》中规定的专业名称；“旧专业名称”指1998年《普通高等学校本科专业目录》颁布前各院校所采用的专业名称。

附表 2

## 中华人民共和国注册电气工程师执业资格考核 认定申报表（略）

## 附录二 关于公布注册电气工程师执业资格考试 专业考试大纲的通知

(注工〔2007〕6号)

各省、自治区、直辖市勘察设计注册工程师管理机构，国务院各有关部门、总后基建营房部注册工程师管理机构：

根据人事部、建设部《关于印发〈注册电气工程师执业资格制度暂行规定〉、〈注册电气工程师执业资格考试实施办法〉和〈注册电气工程师执业资格考核认定办法〉的通知》(人发〔2003〕25号)的文件精神，电气专业委员会对《注册电气工程师执业资格考试专业考试大纲》进行了修订，经全国勘察设计注册工程师管理委员会审定，现予以公布。

附件1 注册电气工程师(发输变电)执业资格考试专业考试大纲

附件2 注册电气工程师(供配电)执业资格考试专业考试大纲

二〇〇七年三月十二日

### 附件1

#### 注册电气工程师(发输变电)执业资格考试专业考试大纲

- 1 安全
  - 1.1 熟悉工程建设标准强制性条文(电力工程部分)；
  - 1.2 掌握电力工程电气保护的要求和主要防护措施；
  - 1.3 掌握危险环境电力装置的设计要求；
  - 1.4 了解劳动、安全、卫生的有关规定。
- 2 环境保护与节能
  - 2.1 掌握电力工程对环境的影响及防治措施；
  - 2.2 熟悉电力工程的节能措施；
  - 2.3 掌握电力工程节能型产品的选用方法；
  - 2.4 熟悉提高电能质量的措施；
  - 2.5 了解清洁能源发电的特点。
- 3 消防
  - 3.1 熟悉电气设备消防安全的要求和措施；
  - 3.2 掌握电缆防火的要求和措施；
  - 3.3 熟悉电力工程火灾报警系统的设计要求。

- 4 电气主接线
  - 4.1 掌握电气主接线设计的基本要求（含接入系统设计要求）；
  - 4.2 掌握各级电压配电装置的基本接线设计；
  - 4.3 熟悉各种电气主接线型式设计；
  - 4.4 掌握主接线设计中的设备配置；
  - 4.5 了解发电机及变压器中性点的接地方式。
- 5 短路电流计算
  - 5.1 掌握短路电流的计算方法（实用算法）；
  - 5.2 掌握短路电流计算结果的应用；
  - 5.3 熟悉限制短路电流的设计措施。
- 6 设备选择
  - 6.1 熟悉电气主设备选择的技术条件和环境条件；
  - 6.2 熟悉发电机、变压器、电抗器、电容器的选择；
  - 6.3 掌握开关电器和保护电器的选择；
  - 6.4 掌握电流互感器、电压互感器的选择；
  - 6.5 熟悉成套电器的选择；
  - 6.6 掌握高压电瓷及金具的选择；
  - 6.7 掌握中性点设备的选择；
  - 6.8 了解发电机励磁系统的选择。
- 7 导体及电缆的设计选择
  - 7.1 掌握导体的选择及设计要求；
  - 7.2 熟悉电缆的选择；
  - 7.3 掌握电缆敷设设计要求。
- 8 电气设备布置及配电装置设计
  - 8.1 熟悉电气设备布置的要求；
  - 8.2 掌握高压配电装置的设计；
  - 8.3 了解特殊地区的电气设备布置及配电装置设计。
- 9 过电压保护和绝缘配合
  - 9.1 熟悉电力系统过电压种类和过电压水平；
  - 9.2 掌握雷电过电压的特点及相应的限制和保护设计；
  - 9.3 掌握暂时过电压的特点及相应的限制和保护设计；
  - 9.4 掌握操作过电压的特点及相应的限制和保护设计；
  - 9.5 了解输电线路、配电装置及电气设备的绝缘配合方法及绝缘水平的确定。
- 10 接地
  - 10.1 熟悉电气接地的设计；
  - 10.2 了解直流输电系统接地的基本要求；
  - 10.3 熟悉高土壤电阻率地区接地设计；
  - 10.4 掌握接地电阻、接触电位差、跨步电位差的计算。
- 11 仪表和控制

- 11.1 熟悉控制方式的设计选择;
- 11.2 熟悉二次设备的布置设计;
- 11.3 掌握二次回路的设计要求;
- 11.4 熟悉电气系统采用计算机监控的设计;
- 11.5 了解二次设备及控制电缆抗干扰的要求;
- 11.6 了解电测量及计量的设置要求。
- 12 继电保护、安全自动装置及调度自动化
  - 12.1 掌握线路、母线和断路器继电保护的配置、整定计算及设备选择;
  - 12.2 熟悉电气主设备继电保护的配置、整定计算及设备选择;
  - 12.3 了解安全自动装置的原理及配置;
  - 12.4 了解电力系统调度自动化的功能及配置。
- 13 直流系统
  - 13.1 熟悉直流系统的设计要求;
  - 13.2 掌握蓄电池的选择及容量计算;
  - 13.3 掌握充电器的选择及容量计算;
  - 13.4 掌握直流设备的选择和布置设计;
  - 13.5 了解直流系统绝缘监测装置的选择及配置要求。
- 14 发电厂和变电所用电
  - 14.1 熟悉厂(所)用电负荷的分类、电压选择;
  - 14.2 掌握厂(所)用电接线要求、备用方式和负荷配置原则;
  - 14.3 掌握厂(所)用电系统的计算和设备选择;
  - 14.4 熟悉厂(所)用电设备布置设计的一般要求;
  - 14.5 了解保安电源系统的设计;
  - 14.6 了解厂(所)用电系统的测量、保护、控制和自动装置;
  - 14.7 掌握 UPS 的选择。
- 15 照明
  - 15.1 熟悉发电厂、变电所照明系统的设计要求;
  - 15.2 熟悉照明系统的供电方式;
  - 15.3 掌握照明设备的选择;
  - 15.4 掌握照度计算的基本方法;
  - 15.5 了解绿色照明的特点。
- 16 输电线路
  - 16.1 熟悉输电线路路径的选择;
  - 16.2 掌握输电线路导、地线的选择;
  - 16.3 掌握输电线路电气参数的计算;
  - 16.4 了解杆塔塔头设计;
  - 16.5 了解输电线路对电信线路的影响及防护;
  - 16.6 掌握电线力学特性的计算;
  - 16.7 熟悉各种杆塔荷载的一般规定及计算;

## 注册电气工程师（发输变电）执业资格考试 专业考试规范及设计手册

- 16.8 熟悉杆塔的定位校验；
- 16.9 了解电线的防振。
- 17 电力系统规划设计
- 17.1 了解电力系统规划设计的内容和方法；
- 17.2 了解电力系统安全稳定运行的基本要求；
- 17.3 熟悉无功补偿型式选择及容量配置。

### 一、规程、规范

- 1. 《建筑设计防火规范》GB 50016；
- 2. 《小型火力发电厂设计规范》GB 50049；
- 3. 《供配电系统设计规范》GB 50052；
- 4. 《低压配电设计规范》GB 50054；
- 5. 《工程建设标准强制性条文》（电力工程部分）；
- 6. 《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》GB 50058；
- 7. 《35~110kV 变电所设计规范》GB 50059；
- 8. 《3~110kV 高压配电装置设计规范》GB 50060；
- 9. 《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB 50062；
- 10. 《标准电压》GB 156；
- 11. 《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116；
- 12. 《电力工程电缆设计规范》GB 50217；
- 13. 《并联电容器装置设计规范》GB 50227；
- 14. 《火力发电厂与变电所设计防火规范》GB 50229；
- 15. 《电力设施抗震设计规范》GB 50260；
- 16. 《高压输变电设备的绝缘配合》GB 311.1；
- 17. 《高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准》GB/T 16434；
- 18. 《同步电机励磁系统》GB/T 7409.1~7409.3；
- 19. 《电力变压器 第一部分 总则》GB 1094.1；
- 20. 《电力变压器 第二部分 温升》GB 1094.2；
- 21. 《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》GB/T 6451；
- 22. 《电力变压器选用导则》GB/T 17468；
- 23. 《高压交流架空送电线无线电干扰限值》GB 15707；
- 24. 《电信线路遭受强电线路危险影响的允许值》GB 6830；
- 25. 《电能质量 供电电压允许偏差》GB 12325；
- 26. 《电能质量 电压波动和闪变》GB 12326；
- 27. 《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549；

28. 《电能质量 三相电压允许不平衡度》GB/T 15543;
29. 《继电保护和安全自动装置技术规程》GB 14285;
30. 《大中型火力发电厂设计规范》GB 50660;
31. 《火力发电厂厂用电设计技术规定》DL/T 5153;
32. 《水力发电厂机电设计规范》DL/T 5186;
33. 《水力发电厂厂用电设计技术规范》DL/T 5164;
34. 《火力发电厂、变电所直流系统设计技术规定》DL/T 5044;
35. 《火力发电厂和变电站照明设计技术规定》DL/T 5390 ;
36. 《水力发电厂照明设计规范》DL/T 5140;
37. 《水利水电劳动安全与工业卫生设计规范》DL 5061;
38. 《火力发电厂劳动安全和工业卫生设计规程》DL 5053;
39. 《220kV ~ 750kV 变电站设计技术规程》DL/T 5218;
40. 《220kV ~ 500kV 变电所所用电设计技术规程》DL/T 5155;
41. 《330 ~ 500kV 变电所无功补偿装置设计技术规定》DL 5014;
42. 《变电所总布置设计技术规程》DL/T 5056;
43. 《电力设备典型消防规程》DL 5027;
44. 《高压配电装置设计技术规程》DL/T 5352;
45. 《水利水电工程高压配电装置设计规范》SL 311;
46. 《导体和电器选择设计技术规定》DL 5222;
47. 《大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件》DL 583;
48. 《大型汽轮发电机励磁系统技术条件》DL/T 843;
49. 《35kV ~ 110kV 无人值班变电所设计规范》DL/T 5103;
50. 《火力发电厂、变电所二次接线设计技术规程》DL/T 5136;
51. 《电力装置的电测量仪表装置设计规范》GB/T 50063;
52. 《220kV ~ 500kV 变电所计算机监控系统设计技术规程》DL/T 5149;
53. 《电能量计量系统设计技术规程》DL/T 5202;
54. 《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》DL/T 620;
55. 《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065;
56. 《高压直流输电大地返回运行系统设计技术规定》DL/T 5224;
57. 《水力发电厂过电压保护和绝缘配合设计技术导则》DL/T 5090;
58. 《水力发电厂接地设计技术导则》DL/T 5091;
59. 《110 ~ 500kV 架空送电线路设计技术规程》DL/T 5092;
60. 《220kV ~ 500kV 紧凑型架空送电线路设计技术规定》DL/T 5217;
61. 《高压直流架空送电线路技术导则》DL 436;
62. 《光纤复合架空地线》DL/T 832;
63. 《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》DL 5033;
64. 《高压架空电线无线电干扰计算方法》DL/T 691;
65. 《电力系统设计技术规程》DL/T 5429;
66. 《电力系统调度自动化设计技术规程》DL 5003;

67. 《地区电网调度自动化设计技术规程》DL 5002；
68. 《电力系统安全自动装置设计技术规定》DL/T 5147；
69. 《电力系统电压和无功电力技术导则》SD 325；
70. 《电力系统安全稳定控制技术导则》DL/T 723；
71. 《电力系统安全稳定导则》DL/T 755；
72. 《35kV ~ 220kV 城市地下变电所设计规定》DL/T 5216；
73. 《透平型同步电机技术要求》GB/T 7064；
74. 《大中型水轮发电机基本技术条件》SL 321；
75. 《火力发电厂厂内通信设计技术规定》DL/T 5041；
76. 《风力发电场设计技术规范》DL/T 5383；
77. 《风电场接入电力系统技术规定》GB/T 19963；
78. 《光伏电站设计规范》GB 50797。

注：以上所有规程、规范以考试年度1月1日以前实施的最新版本为准。

## 二、设计手册

1. 西北电力设计院编《电力工程电气设计手册》（电气一次部分），中国电力出版社，1989年；
2. 西北电力设计院编《电力工程电气设计手册》（电气二次部分），水利电力出版社，1991年；
3. 电力工业部电力规划设计总院编《电力系统设计手册》，中国电力出版社，1998年；
4. 水利电力部水利水电建设总局编《水电厂机电设计手册》（电气一次分册），水利电力出版社，1982年；
5. 水利电力部水利水电建设总局编《水电厂机电设计手册》（电气二次分册），水利电力出版社，1983年；
6. 东北电力设计院编《电力工程高压送电线路设计手册》第二版，中国电力出版社，2003年。

注：设计手册的内容与规程、规范不一致之处，以规程、规范为准。

## 注册电气工程师（发输变电）执业资格考试专业考试 科目、题量、分值、时间分配及题型特点

1. 考试科目
  - (1) 安全；
  - (2) 环境保护与节能；
  - (3) 消防；
  - (4) 电气主接线；
  - (5) 短路电流计算；
  - (6) 设备选择；
  - (7) 导体及电缆的设计选择；

- (8) 电气设备布置及配电装置设计;
- (9) 过电压保护和绝缘配合;
- (10) 接地;
- (11) 仪表和控制;
- (12) 继电保护、安全自动装置及调度自动化;
- (13) 直流系统;
- (14) 发电厂和变电所用电;
- (15) 照明;
- (16) 输电线路;
- (17) 电力系统规划设计。

## 2. 考试时间分配及试题分值

考试分为2天,第一天为专业知识题,分值为200分;第二天为案例分析题,分值为100分;每天上、下午各3小时。

第一天专业知识题为选择题,上、下午各70道题,其中单选题各40题,每题1分,多选题各30题,每题2分,上、下午分值合计200分。

第二天案例分析题上午25道题、下午选答25道题,每题2分,上、下午分值合计为100分。

## 3. 题型特点

考题由概念题、综合概念题、计算题及案例分析题组成。

## 附件2

### 注册电气工程师(供配电)执业资格考试专业考试大纲

#### 1 安全

- 1.1 熟悉工程建设标准电气专业强制性条文;
- 1.2 了解电流对人体的效应;
- 1.3 掌握安全电压及电击防护的基本要求;
- 1.4 掌握低压系统接地故障的保护设计和等电位联结的有关要求;
- 1.5 掌握危险环境电力装置的特殊设计要求;
- 1.6 了解电气设备防误操作的要求及措施;
- 1.7 掌握电气工程设计的防火要求及措施;
- 1.8 了解电力设施抗震设计和措施。

#### 2 环境保护与节能

- 2.1 熟悉电气设备对环境的影响及防治措施;
- 2.2 熟悉供配电系统设计的节能措施;
- 2.3 熟悉提高电能质量的措施;

- 2.4 掌握节能型电气产品的选用方法。
- 3 负荷分级及计算
  - 3.1 掌握负荷分级的原则及供电要求；
  - 3.2 掌握负荷计算的方法。
- 4 110kV 及以下供配电系统
  - 4.1 熟悉供配电系统电压等级选择的原则；
  - 4.2 熟悉供配电系统的接线方式及特点；
  - 4.3 熟悉应急电源和备用电源的选择及接线方式；
  - 4.4 了解电能质量要求及改善电能质量的措施；
  - 4.5 掌握无功补偿设计要求；
  - 4.6 熟悉抑制谐波的措施；
  - 4.7 掌握电压偏差的要求及改善措施。
- 5 110kV 及以下变配电所所址选择及电气设备布置
  - 5.1 熟悉变配电所所址选择的基本要求；
  - 5.2 熟悉变配电所布置设计；
  - 5.3 掌握电气设备的布置设计；
  - 5.4 了解特殊环境的变配电装置设计。
- 6 短路电流计算
  - 6.1 掌握短路电流计算方法；
  - 6.2 熟悉短路电流计算结果的应用；
  - 6.3 熟悉影响短路电流的因素及限制短路电流的措施。
- 7 110kV 及以下电气设备选择
  - 7.1 掌握常用电气设备选择的技术条件和环境条件；
  - 7.2 熟悉高压变配电设备及电气元件的选择；
  - 7.3 熟悉低压配电设备及电器元件的选择。
- 8 35kV 及以下导体、电缆及架空线路的设计
  - 8.1 掌握导体的选择和设计；
  - 8.2 熟悉电线、电缆选择和设计；
  - 8.3 熟悉电缆敷设的设计；
  - 8.4 掌握电缆防火与阻燃设计要求；
  - 8.5 了解架空线路设计要求。
- 9 110kV 及以下变配电所控制、测量、继电保护及自动装置
  - 9.1 掌握变配电所控制、测量和信号设计要求；
  - 9.2 掌握电气设备和线路继电保护的配置、整定计算及选型；
  - 9.3 了解变配电所自动装置及综合自动化的设计要求。
- 10 变配电所操作电源
  - 10.1 熟悉直流操作电源的设计要求；
  - 10.2 熟悉 UPS 电源的设计要求；
  - 10.3 了解交流操作电源的设计要求。

## 11 防雷及过电压保护

- 11.1 了解电力系统过电压的种类和过电压水平；
- 11.2 熟悉交流电气装置过电压保护设计要求及限制措施；
- 11.3 掌握建筑物防雷的分类及措施；
- 11.4 掌握建筑物防雷和防雷击电磁脉冲设计的计算方法和设计要求。

## 12 接地

- 12.1 掌握电气装置接地的一般规定；
- 12.2 熟悉电气装置保护接地的范围；
- 12.3 熟悉电气装置的接地装置设计要求；
- 12.4 了解各种接地型式的适用范围；
- 12.5 了解接触电压、跨步电压计算方法。

## 13 照明

- 13.1 了解照明方式和照明种类的划分；
- 13.2 熟悉照度标准及照明质量的要求；
- 13.3 掌握光源及电气附件的选用和灯具选型的有关规定；
- 13.4 掌握照明供电及照明控制的有关规定；
- 13.5 掌握照度计算的基本方法；
- 13.6 掌握照明工程节能标准及措施。

## 14 电气传动

- 14.1 熟悉电气传动系统的组成及分类；
- 14.2 了解电动机选择的技术要求；
- 14.3 掌握交、直流电动机的起动方式及起动校验；
- 14.4 掌握交、直流电动机调速技术；
- 14.5 掌握交、直流电动机的电气制动方式及计算方法；
- 14.6 掌握电动机保护配置及计算方法；
- 14.7 熟悉低压电动机控制电器的选择；
- 14.8 了解电动机调速系统性能指标；
- 14.9 熟悉 PLC 的应用。

## 15 建筑智能化

- 15.1 掌握火灾自动报警系统及消防联动控制的设计要求；
- 15.2 掌握建筑设备监控系统的设计要求；
- 15.3 掌握安全防范系统的设计要求；
- 15.4 熟悉通信网络及系统的设计要求；
- 15.5 了解有线电视系统的设计要求；
- 15.6 了解扩声和音响系统的设计要求；
- 15.7 了解呼叫系统及公共显示装置的设计要求；
- 15.8 熟悉建筑物内综合布线设计要求。

## 2016年注册电气工程师（供配电）执业资格考试 专业考试规范及设计手册

### 一、规程、规范

1. 《绝缘配合 第1部分：定义、原则和规则》GB 311.1；
2. 《户外严酷条件下的电气设施 第1部分：范围和定义》GB 9089.1；
3. 《户外严酷条件下的电气设施 第2部分：一般防护要求》GB 9089.2；
4. 《防止静电事故通用导则》GB 12158；
5. 《电能质量 供电电压偏差》GB/T 12325；
6. 《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326；
7. 《用电安全导则》GB/T 13869；
8. 《电流对人体和家畜的效应 第1部分：通用部分》GB/T 13870.1；
9. 《电流通过人体的效应 第二部分：特殊情况》GB/T 13870.2；
10. 《系统接地的型式及安全技术要求》GB 14050；
11. 《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549；
12. 《电能质量 三相电压不平衡》GB/T 15543；
13. 《建筑物电气装置 第4-42部分：安全防护 热效应保护》GB 16895.2；
14. 《建筑物电气装置 第5-54部分：电气设备的选择和安装——接地配置、保护导体和保护联结导体》GB 16895.3；
15. 《建筑物电气装置 第5部分：电气设备的选择和安装 第53章：开关设备和控制设备》GB 16895.4；
16. 《低压电气装置 第4-43部分：安全防护 过电流保护》GB 16895.5；
17. 《低压电气装置 第5-52部分：电气设备的选择和安装 布线系统》GB 16895.6；
18. 《低压电气装置 第7-706部分：特殊装置或场所的要求 活动受限制的可导电场所》GB 16895.8；
19. 《建筑物电气装置 第7部分：特殊装置或场所的要求 第707节：数据处理设备用电气装置的接地要求》GB/T 16895.9；
20. 《低压电气装置 第4-44部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10；
21. 《低压电气装置 第4-41部分：安全防护 电击防护》GB 16895.21；
22. 《电击防护 装置和设备的通用部分》GB/T 17045；
23. 《建筑设计防火规范》GB 50016；
24. 《建筑照明设计标准》GB 50034；
25. 《人民防空地下室设计规范》GB 50038；
26. 《供配电系统设计规范》GB 50052；
27. 《20kV及以下变电所设计规范》GB 50053；
28. 《低压配电设计规范》GB 50054；

29. 《通用用电设备配电设计规范》GB 50055;
30. 《建筑物防雷设计规范》GB 50057;
31. 《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058;
32. 《35kV~110kV 变电站设计规范》GB 50059;
33. 《3~110kV 高压配电装置设计规范》GB 50060;
34. 《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》GB 50062;
35. 《电力装置的电测量仪表装置设计规范》GB/T 50063;
36. 《交流电气装置的过电压和绝缘配合设计规范》GB/T 50064;
37. 《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065;
38. 《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》GB 50067;
39. 《人民防空工程设计防火规范》GB 50098;
40. 《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116;
41. 《石油化工企业设计防火规范》GB 50160;
42. 《电子信息系统机房设计规范》GB 50174;
43. 《有线电视系统工程技术规范》GB 50200;
44. 《电力工程电缆设计规范》GB 50217;
45. 《并联电容器装置设计规范》GB 50227;
46. 《火力发电厂与变电站设计防火规范》GB 50229;
47. 《电力设施抗震设计规范》GB 50260;
48. 《城市电力规划规范》GB 50293;
49. 《综合布线系统工程设计规范》GB 50311;
50. 《智能建筑设计标准》GB 50314;
51. 《66kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061;
52. 《工业电视系统工程设计规范》GB 50115;
53. 《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343;
54. 《安全防范工程技术规范》GB 50348;
55. 《厅堂扩声系统设计规范》GB 50371;
56. 《入侵报警系统工程设计规范》GB 50394;
57. 《视频安防监控系统工程设计规范》GB 50395;
58. 《出入口控制系统工程设计规范》GB 50396;
59. 《视频显示系统工程技术规范》GB 50464;
60. 《红外线同声传译系统工程技术规范》GB 50524;
61. 《公共广播系统工程技术规范》GB 50526;
62. 《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545;
63. 《会议电视会场系统工程设计规范》GB 50635;
64. 《电子会议系统工程设计规范》GB 50799;
65. 《工程建设标准强制性条文》(电力工程部分);
66. 《电力工程直流电源系统设计技术规程》DL/T 5044;
67. 《导体和电器选择设计技术规定》DL/T 5222;

68. 《民用建筑电气设计规范》JGJ 16；

69. 《住宅建筑电气设计规范》JGJ 242。

注：以上所有规程、规范以考试年度1月1日以前实施的最新版本为准。

## 二、设计手册

1. 西北电力设计院编《电力工程电气设计手册》（电气一次部分），中国电力出版社，1989年12月；

2. 西北电力设计院编《电力工程电气设计手册》（电气二次部分），水利电力出版社，1991年8月；

3. 中国航空工业规划设计研究院等编《工业和民用配电设计手册》（第三版），中国电力出版社，2005年10月；

4. 《钢铁企业电力设计手册》编委会编《钢铁企业电力设计手册》，冶金工业出版社，1996年1月；

5. 北京照明学会照明设计专业委员会编《照明设计手册》（第二版），中国电力出版社，2006年12月；

6. 机械电子工业部天津电气传动设计研究所编著《电气传动自动化技术手册》（第三版），机械工业出版社，2011年5月；

7. 东北电力设计院编《电力工程高压送电线路设计手册》（第二版），中国电力出版社，2003年。

注：设计手册的内容与规程、规范不一致之处，以规程、规范为准。

## 注册电气工程师（供配电）执业资格考试专业考试 科目、题量、分值、时间分配及题型特点

### 1. 考试科目

- (1) 安全；
- (2) 环境保护与节能；
- (3) 负荷分级及计算；
- (4) 110kV及以下供配电系统；
- (5) 110kV及以下变配电所所址选择及电气设备布置；
- (6) 短路电流计算；
- (7) 110kV及以下电气设备选择；
- (8) 35kV及以下导体、电缆及架空线路的设计；
- (9) 110kV及以下变配电所控制、测量、继电保护及自动装置；
- (10) 变配电所操作电源；
- (11) 防雷及过电压保护；
- (12) 接地；
- (13) 照明；

(14) 电气传动;

(15) 建筑智能化。

## 2. 考试时间分配及试题分值

考试分为2天,第一天为专业知识题,分值为200分;第二天为案例分析题,分值为100分;每天上、下午各3小时。

第一天专业知识题为选择题,上、下午各70道题,其中单选题各40题,每题1分,多选题各30题,每题2分,上、下午分值合计200分。

第二天案例分析题上午25道题、下午选答25道题,每题2分,上、下午分值合计为100分。

## 3. 题型特点

考题由概念题、综合概念题、计算题及案例分析题组成。

### 附录三 专业考试注意事项

注册电气工程师执业资格考试为非滚动管理考试，参加专业考试的考生应在一个考试年度内通过全部科目。

(1) 注册电气工程师专业考试分为2天，第一天为专业知识考试，成绩上、下午合并计分；第二天为专业案例考试，成绩上、下午合并计分。考试时间每天上、下午各3小时。

专业知识考试试卷全部为客观题，在答题卡上作答；专业案例考试要求考生填涂答题卡的同时，在试卷上写出答案和解答过程。

第一天为客观题，上、下午各70道题，其中单选题40题，每题分值为1分，多选题30题，每题分值为2分，试卷满分200分；第二天为案例题，上午25道必答题，下午选答25道题，如考生在答题卡和试卷上作答超过25道题，按题目序号从小到大的顺序对作答的前25道题评分，其他作答题无效，每题分值为2分，试卷满分100分。

(2) 试卷作答用笔：黑色或蓝色墨水的钢笔、签字笔；考生在试卷上作答时，必须使用试卷作答用笔，不得使用铅笔，否则视为无效试卷。

填涂答题卡用笔：2B铅笔。

(3) 考生应考时应携带试卷作答用笔、2B铅笔、三角板、橡皮和无声、无编程功能的科学计算器。

(4) 参加专业考试的考生允许携带正规出版社出版的各种专业规范、参考书和复习手册。

(5) 考生须用试卷作答用笔将工作单位、姓名、准考证号分别填写在答题卡和试卷相应栏目内。在其他位置书写单位、姓名、考号等信息的作为违纪试卷，不予评分。

(6) 对于2天的考试，考生都必须按题号在答题卡上将所选选项对应的字母用2B铅笔涂黑。如有改动，请考生务必用橡皮将原选项的填涂痕迹擦净，以免造成电脑读卡时误读。在答题卡上书写与题意无关的语言，或在答题卡上作标记的，均按违纪试卷处理。

(7) 专业案例考试试卷已把试题、答案选项、答题预留位置全部汇总于一本试卷中，不再另配答题纸。

(8) 考生在作答专业案例考试时，必须在每道试题对应的答案方括号内填写上该试题所选答案（即填写上所选选项对应的字母），并必须在相应试题“解答过程”下面的空白处写明该题的案例分析或计算过程、计算结果及主要依据，同时还须将所选答案用2B铅笔填涂在答题卡上。考生在试卷上书写案例分析过程及公式时，字迹应工整、清晰，以免影响专家阅卷评分工作。对不按上述要求作答的，视为无效，该试题不予计分。