

# 第40篇 电气安全

主编单位:

北京经济学院

编写单位:

北京劳动保护科学研究所

主 编:

杨有启

编写人:

赵录臻

8130/1-01

# 第1章 概述

电气安全，主要是在生产与生活中防止触电及其它电气危害。为了保证人身安全和设备的正常运行，除必须有相应的安全组织措施、对电气设备有正确的设计外，还必须注意使用中的安全技术，以防止触电及设备事故的发生。

电气安全技术是随着生产实践而不断发展起来的。电对人体的伤害作用是多方面的：电流通过人体会造成电击（通称触电）；电流的热效应会造成电灼伤；电流的化学效应会造成电烙印和皮肤金属化等。电磁场能量对人体的辐射作用，会导致头晕、乏力、神经衰弱等症。雷电及静电的放电火花及其他效应可能导致火灾或爆炸，造成设备损坏和人身伤亡。因此必须研究电气安全技术，充分利用电能对人类服务。

## 1 电流对人体的作用

电流通过人体内部，对人体伤害的严重程度与通过人体电流的大小、电流通过人体的持续时间、电流通过人体的途径、电流的种类以及人体的状况等多种因素有关，而且各因素之间有着十分密切联系，不是相互孤立的。

### 1.1 伤害程度与电流大小的关系

通过人体的电流越大，人体的生理反应越明显、感觉越强烈，引起心室颤动所需的时间越短，致命的危险就越大。

对于工频交流电，按照电流通过人体的大小不同，人体呈现不同的状态，可将电流划分为以下三级：

a. **感知电流** 引起人的感觉的最小电流，称为感知电流。实验资料表明，对于不同的人，感知电流也不相同，成年男性的平均感知电流约为 1.1 毫安<sup>⊖</sup>；成年女性的平均感知电流约为 0.7 毫安。

b. **摆脱电流** 人触电后能自主摆脱电源的最大电流称为摆脱电流。实验资料表明，对于不同的人，摆脱电流也不相同，成年男性的平均摆脱电流约为 16 毫安。成年女性约为 10.5 毫安。

摆脱电流的概率曲线如图 40-1-1 所示。

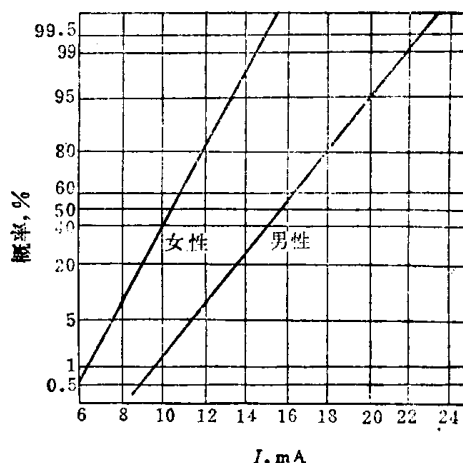


图 40-1-1 摆脱电流概率曲线

从安全的角度考虑，宜取概率为 0.5% 时人的摆脱电流作最小摆脱电流。由图可知，男性最小摆脱电流为 9 毫安，女性为 6 毫安。实验资料表明，儿童的摆脱电流较成人为小。

c. **致命电流** 在较短时间内危及生命的最小电流称为致命电流。在电流不超过数百毫安的情况下，电击致命的主要原因，是电流引起心室颤动或窒息造成的。因此，可以认为引起心室颤动的电流即致命电流。

引起心室颤动的电流与通电时间有关，根据实验资料得出，当通电时间超过心脏搏动周期时，引起心室颤动的电流仅数十毫安（一般是 50 毫安以上）；当通电时间不足心脏搏动周期，但超过 10 毫秒并发生在心脏搏动周期特定相位上时，引起心室颤动的电流在数百毫安以上。

工频电流通过人体（成年男性）的实验资料列入表 40-1-1。资料中，电流通过人体是经由手—躯干—手的途径。如经由单手—躯干—两脚的途径，相应感觉的电流较大。

根据动物实验和统计分析得出的资料列入表 40-1-2。该资料考虑了通电时间的影响，表中，O 是没有感觉的范围；A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 是不引起心室颤动、

⊖ 平均感知电流系指有效值，以下各种状态的电流均指有效值。

表 40-1-1 工频电流对人体作用的实验资料

感 觉 情 况	mA		
	被试者百分数		
	5%	50%	95%
手表面有感觉	0.7	1.2	1.7
手表面似乎有麻痹似的连续针刺感	1.0	2.0	3.0
手关节有连续针刺感	1.5	2.5	3.5
手有轻微颤动, 关节有受压迫感	2.0	3.2	4.4
前肢部有受手铐压迫似的轻度痉挛	2.5	4.0	5.5
上肢部有轻度痉挛	3.2	5.2	7.2
手硬直有痉挛, 但能伸开, 已感到有轻度疼痛	4.2	6.2	8.2
上肢部、手有剧烈痉挛, 失去感觉, 手的前表面有连续针刺感	4.3	6.6	8.9
手的肌肉直到肩部全面痉挛, 还可能摆脱带电体	7.0	11.0	15.0

不致产生严重后果的范围; B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 是容易产生严重后果的范围。

考虑到时间长短的影响, 建议按图 40-1-2 确定电流对人体的作用。图中 a 以下的 I 区是没有感觉的区域, a 是有感觉的起点; a 和 b 之间的 II 区是开始有感觉但一般没有病理伤害的区域; b 和 c 之间的 III 区是有感觉但一般不引起心室颤动的区

表 40-1-2 工频电流对人体作用的分析资料

电流范围	电 流 mA	通电时间	人 体 生 理 反 应
O	0~0.5	连续通电	没有感觉
A <sub>1</sub>	0.5~5	连续通电	开始有感觉, 手指手腕等处有痛感, 没有痉挛, 可以摆脱带电体
A <sub>2</sub>	5~30	数 分 钟 以 内	痉挛, 不能摆脱带电体, 呼吸困难, 血压升高, 是可忍受的极限
A <sub>3</sub>	30~50	数 秒 到 数 分	心脏跳动不规则, 昏迷, 血压升高, 强烈痉挛, 时间过长即引起心室颤动
B <sub>1</sub>	50~数百	低于心脏搏动周期	受强烈冲击, 但未发生心室颤动
		超过心脏搏动周期	昏迷, 心室颤动, 接触部位留有电流通过的痕迹
B <sub>2</sub>	超过数百	低于心脏搏动周期	在心脏搏动周期特定的相位触电时, 发生心室颤动, 昏迷, 接触部位留有电流通过的痕迹
		超过心脏搏动周期	心脏停止跳动, 昏迷, 可能致命的电灼伤

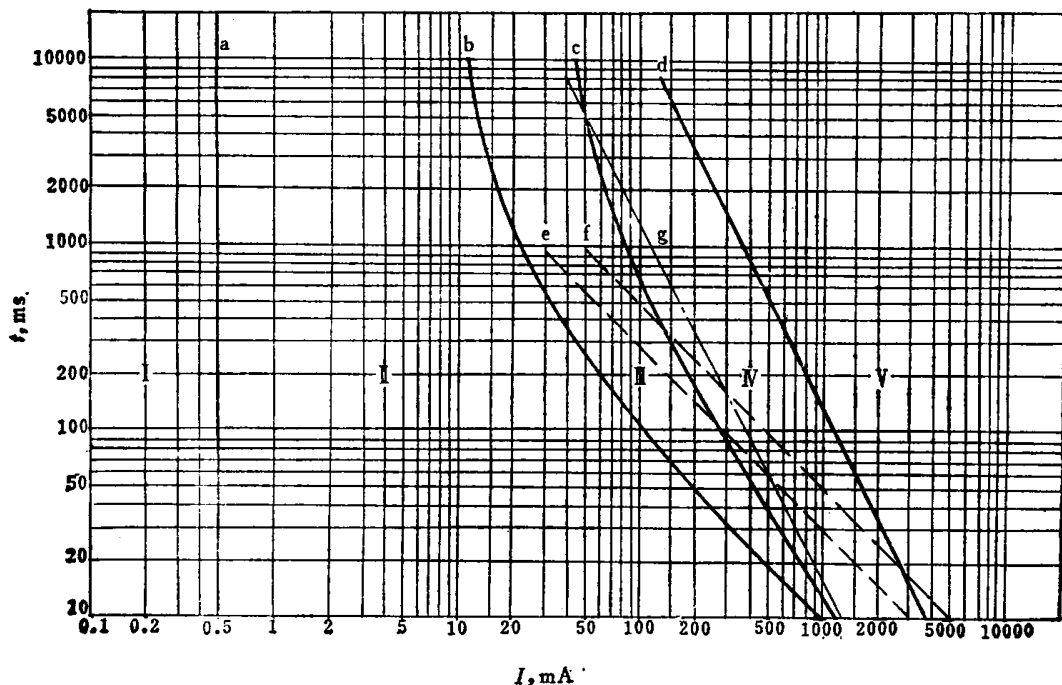


图 40-1-2 电流对人体作用区域划分图

e— $It=30\text{mA}\cdot\text{s}$  线 f— $\sqrt{t}=50\text{mA}\cdot\text{s}$  线 g— $I=\frac{116}{\sqrt{t}}\text{mA}$  线

域; c 和 d 之间的 IV 区是有心室颤动危险的区域; d 以上的 V 区是心室颤动危险较大的区域。

### 1.2 伤害程度与通电时间的关系

表 40.1-2 和图 40.1-2 均表明, 通电时间愈长, 愈容易引起心室颤动, 即电击危险性愈大。这是因为:

(1) 通电时间愈长, 能量累积增加, 引起心室颤动的电流减小。根据统计分析得出, 当发生心室颤动的概率为 0.5% 时, 引起心室颤动的工频电流和通电时间的关系可用下式 $\ominus$ 表达:

$$I = \frac{116 \sim 185}{\sqrt{t}} \text{ mA} \quad (40.1-1)$$

式中  $I$ ——引起心室颤动的电流 mA

$t$ ——通电时间 s

式 40.1-1 的允许时间范围是 0.01~5 秒。这个关系式亦可用下式表达:

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } t \geq 1 \text{ 秒时, } I = 50 \text{ mA} \\ \text{当 } t < 1 \text{ 秒时, } I = \frac{50}{t} \text{ mA} \end{array} \right\} \quad (40.1-2)$$

式 40.1-2 的允许时间范围也是 0.01~5 秒。

(2) 当通电时间短促时, 只在心脏搏动周期的特定相位上才有可能引起心室颤动。通电时间愈长, 与该特定相位重合的可能性愈大, 心室颤动的可能性也就越大, 即电击危险性越大。

(3) 通电时间愈长, 人体电阻因出汗等原因而降低, 导致通过人体的电流进一步增加, 电击危险亦随之增加。

### 1.3 伤害程度与电流途径的关系

电流通过心脏会引起心室颤动, 较大的电流还会使心脏停止跳动, 这都会使血液循环中断导致死亡。电流通过中枢神经或有关部位, 会引起中枢神经系统强烈失调而导致死亡。电流通过头部会使人昏迷, 若电流较大, 会对脑产生严重损害, 使人不醒而死亡。电流通过脊髓, 会使人截瘫。因此, 从左手到胸部是最危险的电流途径, 从手到手、从手到脚也是很危险的电流途径; 从脚到脚是危险性较小的电流途径。

### 1.4 伤害程度与电流种类的关系

直流电流、高频电流、冲击电流和静电电荷对

人体都有伤害作用, 其伤害程度一般较工频电流为轻。

#### 1.4.1 直流电流对人体的作用

表 40.1-3 是直流电流沿手—躯干—手的途径通过人体(成年男性)的实验资料。

表 40.1-3 直流电流对人体作用的实验资料  
mA

感 觉 情 况	被试者百分数		
	5%	50%	95%
手表面及指尖端稍有连续针刺感	6	7	8
手表面发热, 有剧烈连续针刺感, 手关节有轻度压迫感	10	12	15
手关节及手表面有针刺似的强烈压迫感	18	21	25
前肢部有连续针刺感, 手关节有压痛, 手有刺痛, 强烈的灼热感	25	27	30
手关节有强度压痛, 直到肩部有连续针刺感	30	32	35
手关节有剧烈压痛, 手上似针刺般疼痛	30	35	40

直流电的最小感知电流, 对于男性约为 5.2 毫安, 女性约为 3.5 毫安; 平均摆脱电流, 对于男性约为 76 毫安, 女性约为 51 毫安; 可能引起心室颤动的电流, 通电时间 0.3 秒时约为 1300 毫安, 通电时间 3 秒时约为 500 毫安。

#### 1.4.2 高频电流对人体的作用

电流的频率不同, 对人体的伤害程度亦不同。25~300 赫兹的交流电对人体的伤害最严重, 1000 赫兹以上, 伤害程度明显减轻, 但高压高频电流也有电击致命的危险。男性摆脱电流与频率的关系见图 40.1-3 所示。如系女性, 则摆脱电流约降低三分之一。图中曲线 1、2、3、4、5、6、7 相应的概率分别为 99.5%、99%、75%、50%、25%、1%、0.5%。

10000 赫兹高频交流电的最小感知电流, 对于男性约为 12 毫安, 女性约为 8 毫安; 平均摆脱电流, 对于男性约为 75 毫安, 女性约为 50 毫安; 可能引起心室颤动的电流, 通电时间 0.03 秒时约为 1100 毫安, 通电时间 3 秒时约为 500 毫安。

$\ominus$  该式相应于体重为 50 公斤的人的心室颤动电流。

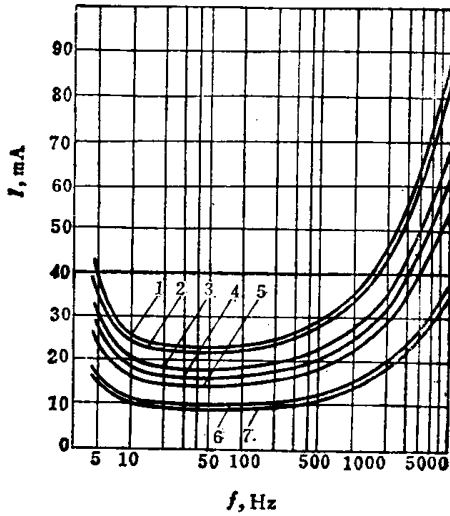


图 40-1-3 摆脱电流与频率的关系

### 1.4.3 冲击电流和静电电荷对人体的伤害

雷电和静电都能产生冲击电流，冲击电流能引起强烈的肌肉收缩，给人以冲击的感觉。数十至一百微秒的冲击电流使人感觉冲击的最小值为数十毫安以上。10~100 微秒接近 100 安的冲击电流仍不致引起心室颤动使人致命。

静电电荷对人体的伤害与静电能量有关，亦即与带电体的电容和电压有关。如系电容器放电，当电容为 740 微微法时，电压与电击程度的关系见表 40-1-4。

表 40-1-4 静电电荷对人体的作用

电压 kV	能量 mJ	电击程度
1	0.37	没有感觉
2	1.48	稍有感觉
5	9.25	刺痛
10	37	剧烈刺痛
15	83.2	轻微痉挛
20	148	轻微痉挛
25	232	中等痉挛

通常认为，冲击电流引起心室颤动的界限是 27 瓦秒。当人体电阻为 500 欧姆时，引起心室颤动的冲击电流与冲击时间的关系如图 40-1-4 所示。

### 1.5 伤害程度与人体状况的关系

伤害程度与人体状况的关系有以下几点：

- (1) 电流对人体的作用，女性较男性为敏感。

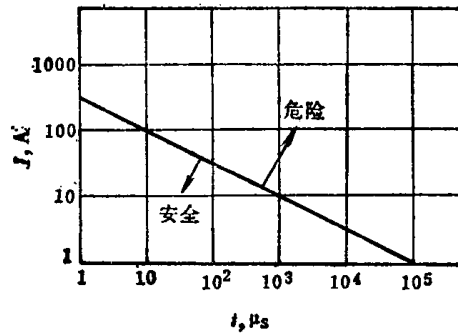


图 40-1-4 冲击电流的危险界限

$I$ —冲击电流起始值  $t$ —冲击时间

实验资料表明：女性的感知电流和摆脱电流约比男性的低三分之一；

- (2) 小孩遭受电击较成人危险；
- (3) 引起心室颤动的电流约与体重成正比。

## 2 安全电压

安全电压是制定安全措施的依据，安全电压决定于人体允许的电流和人体电阻。

### 2.1 人体允许电流

在摆脱电流范围内，人被电击以后，能自主地摆脱带电体，解除触电危险，一般情况下，可以把摆脱电流看作是允许电流。男性的最小允许电流为 9 毫安，女性的最小允许电流为 6 毫安。在系统或设备装有防止触电的速断保护装置的情况下，人体的允许电流可按 30 毫安考虑。

在空中、水面等可能因电击导致摔死、淹死的场合，人体的允许电流应按不引起强烈痉挛的 5 毫安考虑。

### 2.2 人体电阻

人体电阻不是纯电阻，除电阻外，还包含有与皮肤电阻并联的电容。因电容很小，可以忽略不计。体内电阻基本上不受外界因素影响，其数值约为 500 欧姆。

皮肤电阻随条件不同在很大范围内变化，使得人体电阻也在很大范围内变化。皮肤表面 0.05~0.2 毫米厚的角质层的电阻高达  $10 \times 10^3 \sim 10 \times 10^4$  欧姆，但角质层不是一张完整的薄膜，而且很容易遭到破坏，计算人体电阻时，不宜考虑在内。

不同条件下的人体电阻可按表 40-1-5 考虑。

表 40-1-5 不同条件下的人体电阻  $\Omega$ 

接触电压 V	人 体 电 阻			
	皮肤干燥①	皮肤潮湿②	皮肤湿润③	皮肤浸入水中④
10	7000	3500	1200	600
25	5000	2500	1000	500
50	4000	2000	875	440
100	3000	1500	770	375
250	1500	1000	650	325

- ① 相当干燥场所的皮肤, 电流途径为单手至双足。  
 ② 相当潮湿场所的皮肤, 电流途径为单手至双足。  
 ③ 相当有水蒸汽等特别潮湿场所的皮肤, 电流途径为双手至双足。  
 ④ 相当游泳池或浴池中的情况, 基本上为体内电阻。

一般情况下, 人体电阻可按 1000~2000 欧姆考虑。

影响人体电阻的因素很多, 除皮肤厚薄外, 皮肤潮湿、多汗、有损伤、带有导电性粉尘等都会降低人体电阻; 接触面积加大、接触压力增加也会降低人体电阻; 通过电流加大、通电时间加长, 会增加发热出汗, 也会降低人体电阻; 接触电压增高, 会击穿角质层, 并增加机体电解, 也会降低人体电阻。

考虑到皮肤干湿对人体电阻的影响, 人体电阻与接触电压的关系如图 40-1-5 所示。图中 a 是人体电阻的上限, c 是人体电阻的下限, b 是人体电阻的平均值。a 和 b 之间相应于干燥的皮肤, b 和 c 之间相应于潮湿的皮肤。

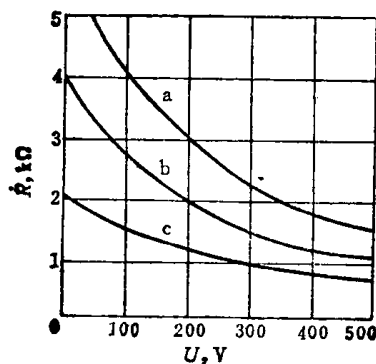


图 40-1-5 人体电阻和接触电压的关系

此外, 人体电阻随频率的增加而降低, 频率为 100 千赫兹时的人体电阻约为 50 赫兹时的二分之一。

## 2.3 安全电压值

我国的安全电压, 多采用 36 伏和 12 伏。凡手提照明灯、高度不足 2.5 米的一般照明灯, 危险环境和特别危险环境的局部照明和携带式电动工具等, 如无特殊安全结构和安全措施, 其安全电压均应采用 36 伏。

凡工作地点狭窄, 行动困难以及周围有大面积接地导体环境(如金属容器内、隧道内、矿井内)的手提照明灯, 其安全电压应采用 12 伏。

国外对接触电压的限定值多规定为 50 伏和 25 伏, 这个规定是以人体允许电流与人体电阻的乘积为依据。其中: 50 伏一级, 大体相应于人体允许电流为 30 毫安、人体电阻为 1700 欧姆的情况, 即大体相当于危险环境的安全电压。25 伏一级, 大体相应于人体允许电流为 30 毫安、人体电阻为 650 欧姆的情况, 即大体相当于特别危险环境的安全电压。此外, 还有 2.5 伏一级的安全电压, 这一级大体相应于人体允许电流为 5 毫安、人体电阻为 500 欧姆的情况, 即相应于人体大部分浸入水中, 且如果不能摆脱带电体或强烈痉挛即可招致其他严重伤亡的情况。

## 3 电磁场对人体的作用

电磁场对人体有伤害作用。电磁场以电磁波的形式向四周空间辐射, 按照辐射频率不同, 电磁场分为工频电磁场和射频电磁场。在高压和超高压电力技术中, 会遇到很强的工频电磁场。射频电磁场是频率很高的电磁波, 大体分为高频、超高频、特高频等三个频段。在电热、医疗、无线电等技术中, 会遇到很强的射频电磁场。射频电磁场频段的划分见表 40-1-6。

### 3.1 电磁场对人体的伤害

人体在电磁场作用下, 吸收辐射能量, 会受到不同程度的伤害。射频电磁场对人体的主要作用, 是引起中枢神经系统的功能失调和以交感神经抑制为主的植物神经功能失调。临床症状主要表现为神经衰弱症候群, 如头痛、头晕、全身无力、睡眠失常(白天嗜睡、晚上失眠、多梦)、记忆力减退、易激动、伸直手臂时手指轻微颤动、还有多汗、脱发、指甲脆弱、食欲不振、消瘦等。临床症状中, 以头晕、乏力、失眠、健忘等症状最多。

表 40-1-6 射频电磁场的频段和波段

频段	高 频			超 高 频		特 高 频 (微 波)		
	0.1 以下	0.1~1.5	1.5~6	6~30	30~300	300~3000	3000~30000	30000 以上
频 率 MHz	0.1 以下	0.1~1.5	1.5~6	6~30	30~300	300~3000	3000~30000	30000 以上
波 长 m	3000 以上	3000~200	200~50	50~10	10~1	1~0.1	0.1~0.01	0.01 以下
波 段	长 波	中 波	中短波	短 波	超短波	分米波	厘米波	毫米波

微波和超短波电磁场,除引起较严重的神经衰弱症状外,最明显的是引起植物神经功能紊乱。并以副交感神经兴奋为主的心血管系统症状较多,如心脏、血压反应异常,往往有心悸、心区疼痛、心区有压迫感等症状。

此外,射频电磁场还可能引起脑生物电流及脑血流图的某些改变,还可能引起血液白血球数的变化,也可能损害眼睛导致白内障等。

高强度工频电磁场,对人体也有不同程度的伤害作用。

电磁场对人体的作用主要是功能性改变,具有可复性特征。所产生的症状,一般在脱离接触后数周之内就可消失,但在高强度、长时间作用下,个别入可能持续较久,不容易恢复。

### 3.2 影响伤害程度的因素

电磁场对人体的伤害受以下因素的影响:

**a. 电磁场强度** 电磁场强度愈高,人体吸收能量愈多,伤害愈重。电磁场强度又与以下因素有关:

(1) 发射源功率愈大,电磁场强度愈高;

(2) 与发射源距离愈大,电磁场强度愈低,电磁场强度随着距离的增加按指数规律下降;

(3) 与屏蔽和接地有关。经屏蔽后,电磁场强度急剧降低。屏蔽装置如接地良好,能加强屏蔽效果;

(4) 与二次发射有关。二次发射是指金属物品在电磁场作用下,感应出的射频电流所产生的电场。由于二次发射会破坏电磁场的自然分布,使某些地方的电磁场强度可能增加。

**b. 电磁波频率** 一般情况下,电磁波频率愈高,人体的偶极子激励程度加剧,伤害愈重。另外,

随着频率的增高,电磁波的衰减变慢,这也加剧其危害。

**c. 电磁波波形特征** 在其他参数相同的情况下,脉冲波比连续波伤害严重。

**d. 电磁波作用时间** 电磁波连续照射时间越长或间歇照射时,间歇时间越短,以及累积照射时间越长,对人体伤害愈重。

**e. 人体被照射面积和部位** 人体被照射面积愈大,人体吸收能量愈多,伤害愈重;就人体部位而言,血管分布较少的部位,传热能力较差,所吸收的能量转化的热量容易积累,造成损失较大。

**f. 人员情况** 电磁场的伤害,女性较男性敏感,少年儿童也比较敏感。

### 3.3 电磁场安全标准参考值

电磁场安全标准按电磁场功率密度或电磁场强度的大小,并考虑到照射时间长短和频率高低来确定。安全标准参考值见表 40-1-7。

表 40-1-7 电磁场安全标准参考值

电磁场频率 MHz	电场强度 V/m	磁场强度 A/m	功率密度 mW/cm <sup>2</sup>
0.1~30	不大于 20	不大于 5	—
30~300	不大于 5	—	—
10 以上	—	—	不超过 10
300 以上	—	—	不超过 0.01~1

测量电磁场强度时,仪表探头距高频设备的距离应按下述原则选取:短波及以下者取 5 厘米,超短波及以上者取 10 厘米。

## 第2章 绝缘、屏护和间距

### 1 绝缘

良好的绝缘是保证电气设备和线路正常运行,防止触电事故的重要措施。电气设备或线路的绝缘必须与电压等级相配合,必须与使用环境和运行条件相适应。

绝缘在强电场等因素的作用下会发生击穿。气体和液体绝缘击穿后都能自己恢复绝缘性能,固体绝缘击穿后不能自己恢复绝缘性能。除击穿破坏外,由于腐蚀性气体、蒸汽、潮汽、粉尘的作用和机械损伤,也会降低绝缘性能或导致绝缘损坏。在正常情况下,绝缘也会逐渐老化而失去绝缘性能。

为了防止绝缘损坏造成事故,应当按照规定严格检查绝缘性能。绝缘性能主要用绝缘电阻、泄漏电流、耐压强度、介质损耗等指标来衡量。

#### 1.1 绝缘电阻

绝缘电阻用摇表(兆欧表)测定。一般来说,测量额定电压500伏以下的线路或设备的绝缘电阻,应采用500伏或1000伏的摇表;测量额定电压500伏以上的线路或设备的绝缘电阻,应采用1000~2500伏的摇表。

为了安全,测量前应将被测线路或设备断开电源,对于高压设备,测量前后要注意放电。

##### 1.1.1 低压线路和设备的绝缘电阻

新装和大修后的低压线路和设备,绝缘电阻不应低于0.5兆欧姆;运行中的低压线路和设备,绝缘电阻不应低于每伏工作电压1000欧姆;在潮湿环境,绝缘电阻不应低于每伏工作电压500欧姆。控制线路的绝缘电阻一般不应低于1兆欧姆;潮湿的环境可降低为0.5兆欧姆。

##### 1.1.2 高压线路和设备的绝缘电阻

高压线路和设备的绝缘电阻一般不应低于1000兆欧姆。其中:

架空线路每个悬式绝缘子的绝缘电阻不应低于

300兆欧姆。

运行中电缆的绝缘电阻可参考表40-2-1的要求。

表40-2-1 电缆线路的绝缘电阻

额定电压 kV	3	6~10	20~35
绝缘电阻 MΩ	300~750	400~700	600~1500

注:表内绝缘电阻值,在干燥季节应取较大值;潮湿季节应取较小值。

电力变压器投入运行前,其绝缘电阻不应低于出厂时的70%。

变压器的绝缘电阻随温度增加而显著降低,其绝缘电阻可参考表40-2-2的要求。

表40-2-2 变压器的绝缘电阻 MΩ

额定电压 kV		温 度 °C							
		10	20	30	40	50	60	70	80
3~10	良好值	900	450	225	120	64	36	19	12
	最低值	600	300	150	80	43	24	13	8
20~35	良好值	1200	600	300	155	83	50	27	15
	最低值	800	400	230	105	55	33	18	10
60~220	良好值	2400	1200	600	315	165	100	50	30
	最低值	1600	800	400	210	110	65	35	21

注:测定变压器绝缘电阻时,如发现绝缘电阻低于出厂或大修后试验值的70%时,应根据有关规定对绝缘油作耐压强度及其他试验。

高压交流电动机的定子绝缘电阻不应低于每千伏1兆欧姆,转子绝缘电阻不应低于每千伏0.5兆欧姆。

对于电力变压器、电力电容器和交流电动机等重要高压设备,除要求测量其绝缘电阻外,为了判断其受潮情况,还要求测量吸收比 $R_{60}/R_{15}$ (即从开始测量第60秒的绝缘电阻与第15秒的绝缘电阻的比值)。当油浸电力变压器的温度为10~30°C时,绝



缘未受潮的吸收比约为 1.3~2; 绝缘受潮或绝缘有局部缺陷的吸收比趋近于 1。

## 1.2 耐压试验

耐压试验是检验电气设备承受过电压的能力, 主要包括工频耐压试验, 直流耐压试验和冲击电压试验。其中, 最常用的是工频耐压试验。

电力变压器、电动机、低压配电装置等在投入运行前均需作工频耐压试验; 低压电力和照明线路, 如绝缘电阻不能满足要求时也需作工频耐压试验; 电工安全用具应根据规定, 定期作工频耐压试验; 油浸电力电缆投入运行前需作直流耐压试验; 阀型避雷器必要时需作工频放电电压试验; 电气设备的绝缘油需在油杯中用标准电极作耐压强度试验等。

工频耐压试验的试验电压一般选择在其额定电压的一倍多至数倍之间, 但不得低于 1000 伏。绝缘油的耐压强度不得低于表 40-2-3 的要求。

表 40-2-3 绝缘油的耐压强度 kV

使用电压	15 及以下	20~35	44~220
新油及再生油	25	35	40
运行中的油	20	30	35

作工频耐压试验时, 先以任意速度加压至试验电压的 40% 左右, 再以每秒 3% 试验电压的速度升高到试验电压, 并持续到规定的时间, 然后在 5 秒钟内把电压降低到试验电压的 25% 以下, 再切断电源。

耐压试验的加压时间一般为 1 分钟(瓷质和液体绝缘为主者)或 5 分钟(有机固体绝缘为主者), 但有例外的情况, 如电压互感器为 3 分钟, 油浸电力电缆为 10 分钟等。

耐压试验应注意以下事项:

(1) 耐压试验必须在绝缘电阻合格时, 才能进行;

(2) 试验电压应按规定选取, 不得任意超过规定值;

(3) 试验电流不应超过试验装置的允许电流;

(4) 为了人身安全, 试验场地应设立防护围栏, 应能防止工作人员偶然接近带电的高压装置, 试验装置应有完善的保护接零(或接地)措施, 试验前后应注意放电;

(5) 每次试验之后, 应使调压器迅速返回零位, 最好能有自动回零装置。

## 1.3 泄漏电流

泄漏电流是设备在外加高电压作用下经绝缘部分泄漏的电流。作泄漏电流试验时, 由于外加电压较高, 而且电压稳定, 比较容易发现绝缘硬伤、脆裂等内部缺陷。

泄漏电流试验一般只对某些安全要求较高的设备, 如某些电工安全用具(绝缘手套、绝缘靴、绝缘垫等)。某些日用电器和电动工具、某些高压设备(阀型避雷器、油浸电力电缆等)才有必要按规定进行。

## 1.4 介质损耗

介质损耗试验是测量绝缘介质损耗角的正切值( $\text{tg} \delta$ )。当绝缘老化、轻微受潮或有局部缺陷时, 虽然总的泄漏电流增加很少, 但产生介质损耗的有功电流明显增加, 遂使介质损耗角  $\delta$  及其正切值( $\text{tg} \delta$ )明显增加, 因此, 测量  $\text{tg} \delta$  能很好地检查绝缘的质量。通常需作测量  $\text{tg} \delta$  的绝缘, 除高压套管(纯瓷套管除外)、电压互感器、电力电容器、绝缘油外, 一般的绝缘不作介质损耗试验。

$\text{tg} \delta$  与温度和电压有关: 温度升高,  $\text{tg} \delta$  值也随着升高; 电压越高, 则要求绝缘材料的  $\text{tg} \delta$  值越低。

高压套管的  $\text{tg} \delta$ , 在投入运行之前不得大于出厂时的 130%; 绝缘油的  $\text{tg} \delta$ , 新油及再生油在 70°C 时不应大于 0.5%; 运行中的绝缘油在 70°C 时应不大于 2%。

## 2 屏护

### 2.1 带电体的屏护

带电体的屏护用于电气设备不便于绝缘或绝缘不足以保证安全的场合, 是防止触电、电弧短路或电弧伤人的一种措施。常用的屏护有遮栏、护罩、护盖、箱匣等。

有的屏护装置是设备自身配带的(如开关的防护壳盖); 有的屏护装置是专门设置的(如开关箱、绝缘挡板、遮栏等)。专门的屏护装置中, 有固定的, 也有可移动的, 可移动的多为临时性屏护装置。在使用中可根据具体情况, 采用板状屏护装置或网眼屏护装置。网眼屏护装置的网眼不应大于  $20 \times 20 \sim$

40×40毫米。

屏护装置不直接与带电体接触，对所用材料的电性能没有严格要求。屏护装置所用材料应当有足够的机械强度和良好的耐火性能。凡用金属材料制成的屏护装置，为了防止屏护装置意外带电造成触电危险，必须将屏护装置接地或接零。

变配电设备应有完善的屏护装置，安装在室外地上的变压器，以及安装在车间或公共场所的变配电设备，均需装设遮栏或栅栏作为屏护。遮栏高度不应低于1.7米，下部边缘离地不应超过0.1米。

网眼遮栏与带电体的距离不宜小于表40-2-4的要求。户内栅栏高度不应低于1.2米，户外不应低于1.5米。对于低压设备，栅栏与裸导体的距离不应小于0.8米，围栏高度不应低于1.2米，栏条间距离不应超过0.2米。户外变电装置围墙高度一般不应低于2.5米。

表 40-2-4 网眼遮栏与带电体的距离

电 压 kV	1 以下	10	20~35
距 离 m	0.15	0.35	0.6

屏护装置应与以下安全措施配合使用：

(1) 被屏护的带电部分应有明显标志，标明规定的符号或涂上规定的颜色。

(2) 遮栏、栅栏等屏护装置上，应根据被屏护的对象挂上“高压、生命危险”、“站住、生命危险”、“切勿攀登、生命危险”等警告牌。

(3) 配合采用信号装置和联锁装置。前者一般是用灯光或仪表指示有电；后者是采用专门装置，当人体越过屏护装置可能接近带电体时，被屏护装置自动断电。

## 2.2 电磁场的屏蔽

电磁场的屏蔽是限制电磁场扩散，防止电磁场对人体伤害的措施。电磁场的屏蔽装置常采用铜板、铝板或网眼细小的铜网、铝网制成。在电磁场作用下，屏蔽装置内产生感应电势，由感应电势产生的电流或者经屏蔽接地装置流入大地，或者在屏蔽装置内形成涡流，从而使电磁场在很大程度上被屏蔽于一定范围之内。

屏蔽装置对电磁场是有反射的。对于某些由于

反射而影响正常工作的射频装置，宜采用特殊材料制成的吸收性屏蔽装置，吸收性屏蔽主要用于微波电磁场的防护。

电磁场的屏蔽装置可以制成以下三种形式：

a. 局部屏蔽装置 将发射射频电磁场的部件屏蔽起来。

b. 整体屏蔽装置 将射频装置完全屏蔽起来。

c. 屏蔽室 将工作人员的工作室屏蔽起来。

此外，工作人员的导电衣裤、鞋袜、手套和头罩等，对电磁场也有屏蔽作用。

## 3 间距

为了防止人体触及或接近带电体；为了防止车辆或其他物体碰撞或过分接近带电体；为了防止火灾和各种短路事故，在带电体与地面之间、带电体与其他设施和设备之间、带电体与带电体之间均需保持一定的安全距离，简称为间距。间距的大小决定于电压的高低、设备的类型以及安装的方式等因素。

### 3.1 线路间距

#### 3.1.1 架空线路

架空线路导线与地面或水面的距离，不应低于表40-2-5的数值。

表 40-2-5 导线与地面(或水面)的最小距离 m

线路经过地区	线路电压 kV		
	1 以下	10	35
居民区	6	6.5	7
非居民区	5	5.5	6
不能通航或浮运的河、湖 (至冬季水面)	5	5	—
不能通航或浮运的河、湖 (至50年一遇的洪水水面)	3	3	—
交通困难地区	4	4.5	5

架空线路应避免跨越建筑物，架空线路不应跨越燃烧材料作屋顶的建筑物。架空线路导线与建筑物的距离不应低于表40-2-6的数值。

架空线路导线与街道或厂区树木的距离，不应低于表40-2-7的数值。

架空线路应与有爆炸危险的厂房和有火灾危险的厂房保持一定的防火间距。

表 40-2-6 导线与建筑物的最小距离 m

线路电压 kV	1 以下	10	35
垂直距离	2.5	3.0	4.0
水平距离	1.0	1.5	3.0

表 40-2-7 导线与树木的最小距离 m

线路电压 kV	1 以下	10	35
垂直距离	1.0	1.5	3.0
水平距离	1.0	2.0	—

表 40-2-8 架空线路与工业设施的最小距离 m

项 目				线 路 电 压 kV		
				1 以下	10	35
铁 路	标准轨距	垂直距离	至轨顶面 至承力索或接触线	7.5 3.0	7.5 3.0	7.5 3.0
		水平距离	电杆外缘 $\left\{ \begin{array}{l} \text{交叉} \\ \text{至轨道中心} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{平行} \end{array} \right.$	5.0 杆高加 3.0		
	窄 轨	垂直距离	至轨顶面 至承力索或接触面	6.0 3.0	6.0 3.0	7.5 3.0
		水平距离	电杆外缘 $\left\{ \begin{array}{l} \text{交叉} \\ \text{至轨道中心} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{平行} \end{array} \right.$	5.0 杆高加 3.0		
道 路	垂直距离		6.0	7.0	7.0	
	水平距离(电杆至道路边缘)		0.5	0.5	0.5	
通航河流	垂 直 距 离	至 50 年一遇洪水位 至最高航行水位的最高桅顶	6.0 1.0	6.0 1.5	6.0 2.0	
	水 平 距 离	边导线至河岸上缘	最高杆(塔)高			
弱电线路	垂直距离		1.0	2.0	3.0	
	水平距离(两线路边导线间)		1.0	2.0	4.0	
电力线路	1 kV 以下	垂直距离	1	2	3	
		水平距离(两线路边导线间)	2.5	2.5	5.0	
	10 kV	垂直距离	2	2	3	
		水平距离(两线路边导线间)	2.5	2.5	5.0	
	35 kV	垂直距离	3	3	3	
		水平距离(两线路边导线间)	5.0	5.0	5.0	
特殊管道	垂直距离 $\left\{ \begin{array}{l} \text{电力线在上方} \\ \text{电力线在下方} \end{array} \right.$		1.5 1.5	3.0 —	3.0 —	
	水平距离(边导线至管道)		1.5	2.0	4.0	
索 道	垂直距离 $\left\{ \begin{array}{l} \text{电力线在上方} \\ \text{电力线在下方} \end{array} \right.$		1.5 1.5	2.0 2.0	3.0 3.0	
	水平距离(边导线至管道)		1.5	2.0	4.0	

架空线路与道路、通航河流、管道、索道及其他架空线路交叉或接近的距离,不应低于表 40·2-8 的要求。表中各项水平距离如系开阔地区,一般不应小于电杆高度。表中特殊管道系指输送易燃、易爆物的管道。

检查以上各项距离,均需考虑到当地气象(温度、复冰、风力)的变化。

几种线路同杆架设时,电力线路必须位于弱电线路的上方,高压线路必须位于低压线路的上方。线路间距离应满足表 40·2-9 的要求。

表 40·2-9 同杆线路的最小距离 m

项 目	直 线 杆	分支(或转角)杆
10 kV 与 10 kV	0.8	0.45/0.60 <sup>①</sup>
10 kV 与 低压	1.2	1.0
低压与 低压	0.6	0.3
低压与 弱电	1.2	—

① 转角或分支线横担距上面的横担采用 0.45 m, 距下面的横担采用 0.6 m。

线路导线间距离应满足表 40·2-10 的要求。

表 40·2-10 线路导线间的最小距离 m

线路电压 kV	档 距 m								
	40 及以下	50	60	70	80	90	100	110	120
10	0.6	0.65	0.7	0.75	0.85	0.9	1.0	1.05	1.15
低压	0.3	0.4	0.45	0.5	—	—	—	—	—

### 3.1.2 接户线和进户线

接户线系指从配电网到用户进线处第一个支持物的一段导线;进户线系指从接户线引入室内的一段导线。

10 千伏接户线对地距离不应小于 4.0 米;低压接户线对地距离不应小于 2.5 米。低压接户线跨越通车街道时,对地距离不应小于 6 米;跨越通车困难的街道或人行道时,不得小于 3.5 米。

低压接户线与建筑物有关部分的距离,不应小于下列数值:

与接户线下方窗户的垂直距离	30 cm
与接户线上方阳台或窗户的垂直距离	80 cm
与窗户或阳台的水平距离	75 cm
与墙壁、构架的距离	5 cm

进户线的进户管口与接户线端头之间的垂直距离,一般不应超过 0.5 米。

### 3.1.3 户内低压线路

户内低压线路有多种敷设方式,间距要求各不相同。户内低压线路与工业管道和工艺设备之间的最小距离见表 40·2-11。

应用表 40·2-11 时,应注意以下几点:

(1) 表内无括号的数字为电线管路在管道上面时的数据,有括号的数字为电线管路在管道下面时的数据(电线管路应尽可能敷设在热力管道下方)。

(2) 在不能满足表中所列距离的情况下,应采取以下措施:

1) 电线管路 & 蒸汽管不能保持表中距离时,应在蒸汽管或电线管外包以隔热层,此时平行净距可减为 200 毫米,交叉处仅须考虑施工操作和便于维护的距离;

2) 电线管路 & 暖水管不能保持表中距离时,可在暖水管外包隔热层;

3) 裸母线与其他管道交叉不能保持表中距离时,应在交叉处的裸母线外加装保护网或罩。

(3) 当上水管与电线管路平行敷设且在同一垂直面时,应将电线管路敷设于水管上方。

(4) 裸母线应敷设在经常维护的管道上方。

户内低压裸导线与地面、生产设备和建筑物之间的最小距离不应小于下列数值:

距地面	3.5 m
距汽车通道的地面	6 m
距起重机铺板	2.2 m
距需要经常维护的管道	1 m
距需要经常维护的生产设备	1.5 m
固定点间距 2 米以内时距建筑物	0.05 m
固定点间距 2~4 米时距建筑物	0.10 m
固定点间距 4~6 米时距建筑物	0.15 m
固定点间距 6 米以上时距建筑物	0.20 m

裸导体采用网状遮栏保护时,离地面最小高度可以减低为 2.5 米。

户内低压明线安装高度可参考表 40·2-12。

### 3.1.4 电缆线路

电缆线路可以暗设,也可以明设。暗设有沿电缆隧道或电缆沟敷设的,也有直接埋在地下的。直接埋地电缆,埋设深度一般不应小于 0.7 米,与

表 40-2-11 户内线路与工业管道和工艺设备的最小距离 mm

布线方式		导线穿金属管	电 缆	明设绝缘导线	裸 母 线	天车滑触线	配电设备
煤气管	平行	100	500	1000	1000	1500	1500
	交叉	100	300	300	500	500	—
乙炔管	平行	100	1000	1000	2000	3000	3000
	交叉	100	500	500	500	500	—
氧气管	平行	100	500	500	1000	1500	1500
	交叉	100	300	300	500	500	—
蒸汽管	平行	1000 (500)	1000 (500)	1000 (500)	1000	1000	500
	交叉	300	300	300	500	500	—
暖热水管	平行	300 (200)	500	300 (200)	1000	1000	100
	交叉	100	100	100	500	500	—
通风管	平行	—	200	100	1000	1000	100
	交叉	—	100	100	500	500	—
上、下水管	平行	—	200	100	1000	1000	100
	交叉	—	100	100	500	500	—
压缩空气管	平行	—	200	100	1000	1000	100
	交叉	—	100	100	500	500	—
工艺设备	平行	—	—	—	1500	1500	—
	交叉	—	—	—	1500	1500	—

表 40-2-12 户内低压明线离地面最小高度 m

敷设类别	木 槽 板	塑料线直接沿墙敷设	瓷夹板明线	瓷柱直接支持敷设	塑料护套线
水平敷设	0.15	2.0	2.0	2.0	0.15
垂直敷设	0.15	1.3	1.3	1.3	0.15

一些工程设施的最小距离不应小于表 40-2-13 的要求。

应用表 40-2-13 时, 必须注意几点:

(1) 电缆相互交叉时, 高压电缆应在低压电缆下方, 如果其中一条电缆在交叉点前后 1 米范围内穿管保护或用隔板隔开时, 最小距离可减为 0.25 米;

(2) 电缆与热力管道接近或交叉时, 如有隔热措施, 平行和交叉的最小距离可分别减为 0.5 和 0.25 米;

(3) 电缆与热力管道交叉时的隔热措施, 当采用电缆穿石棉水泥管保护时, 保护管应超出热力管(沟)两端 2 米; 当采用隔热层保护时, 隔热层应超过

表 40-2-13 直接埋地电缆与工程设施的最小距离 m

敷 设 条 件	平 行 敷 设	交 叉 敷 设
与电杆或建筑物地下基础之间	0.6	—
10 千伏以下的电力电缆之间 (或与控制电缆之间)	0.1	0.5
10~35 千伏的电力电缆之间 (或与其它电缆之间)	0.25	0.5
不同部门的电缆(包括通讯电缆)之间	0.5	0.5
与热力管道之间	2.0	0.5
与可燃气体及易燃、可燃液体管道之间	1.0	0.5
与水管、压缩空气管道之间	0.5	0.5
与道路之间	1.5	1.0
与普通铁路路轨之间	3.0	1.0
与直流感电气化铁路路轨之间	1.0	—

表 40-2-14 电缆沟和隧道电缆与工程设施的最小距离 mm

敷 设 条 件	隧道高度 1000 mm	电 缆 沟 深 度	
		600 mm 以下	600 mm 以上
两边有电缆支架, 支架间水平距离	1000	300	500
一边有电缆支架, 支架与墙壁之间	900	300	450
支架层间(电力电缆)	200	150	150
支架层间(控制电缆)	120	100	100
电力电缆间水平间距	35	35	35

表 40-2-15 变配电设备带电体的最小距离 mm

项 目		额 定 电 压 kV						
		1 以下	1~3	6	10	15	20	35
带电部分至接地部分之间和不同相带电部分之间	户外	—	200	200	200	300	300	400
	户内	15~30①	75	100	125	150	180	300
带电部分至栅栏	户外	—	950	950	950	1050	1050	1150
	户内	100	825	850	875	900	930	1050
带电部分至网状遮栏	户外	—	300	300	300	400	400	500
	户内	100	175	200	225	250	280	400
带电部分至板状遮栏	户外	—	—	—	—	—	—	—
	户内	50	105	130	155	180	210	330
无遮栏导体至地面	户外	—	2700	2700	2700	2800	2800	2900
	户内	—	2375	2400	2425	2450	2480	2600
不同时停电检修的无遮栏裸导体之间②	户外	—	2200	2200	2200	2300	2300	2400
	户内	—	1850	1900	1925	1950	1980	2100

① 如系空气中距离, 可取 15 毫米; 如系沿绝缘表面的距离应取 30 毫米。

② 系指水平距离, 如系垂直距离, 35 千伏以下者可减为 1000 毫米。

热力管(沟)两边和电缆两边 1 米;

(4) 电缆与铁路或道路交叉时应穿管保护, 保护管应伸出轨道或路面 2 米以外;

(5) 电缆与建筑物基础的距离, 应能保证电缆埋设在建筑物散水以外; 电缆引入建筑物时应穿管保护, 保护管亦应超出建筑物散水以外。

沿电缆沟和隧道敷设的低压电缆应满足表 40-2-14 的间距要求。

户内明设的电缆与其他线路之间的最小距离不应小于下列数值:

低压电缆之间	35 mm
低压电缆与高压电缆之间	150 mm
低压电缆与照明线路之间	100 mm
高压电缆与照明线路之间	150 mm

### 3.2 变配电设备间距

#### 3.2.1 带电体的间距

变配电设备的带电体与其他带电体或接地体等设施之间的最小距离, 不应小于表 40-2-15 的要求。

室内安装的变压器, 其外廓与变压器室四壁之间的最小距离不应小于表 40-2-16 所列数值。

表 40-2-16 变压器外廓与变压器室四壁的最小距离 m

变 压 器 容 量 kVA	1000 及以下	1250 及以上
变压器外廓与变压器室后、侧壁	0.6	0.8
变压器外廓与变压器室门	0.8	1.0

室外安装的变压器，其外廓之间的距离一般不应小于1.5米，外廓与围栏或建筑物之间不应小于0.8米。室外配电箱底部离地面高度一般为1.3米。

### 3.2.2 配电装置的通道

低压配电装置正面通道宽度，一般不应小于下列数值：

配电装置单列布置时	1.5m
配电装置双列布置时	2m

低压配电装置背面通道应符合以下要求：

(1) 宽度一般不应小于1米，有困难时可减为0.8米；

(2) 通道内高度低于2.3米，无遮栏的裸导电部分与对面墙或设备的距离不应小于1米，而与对面其他裸导电部分的距离不应小于1.5米；

(3) 通道上方裸导电部分的高度低于2.3米时，应加遮栏，遮栏后的通道高度不应低于1.9米。

高压配电装置宜与低压配电装置分室装设，如在同一室内单列布置时，高压开关柜与低压配电屏之间的距离不应小于2米。配电装置长度超过6米时，屏后应有两个通向本室或其他房间的出口，且其间距离不宜大于15米。

### 3.3 用电设备间距

用电设备的安装应符合安全要求，包括间距的要求。

车间低压配电盘底口距地面高度，暗装的可取1.4米，明装的可取1.2米。明装的电度表板底口距地面高度可取1.8米。

常用开关设备安装高度为1.3~1.5米，为了便于操作，开关手柄与建筑物之间应保持150毫米的距离。板把开关离地面高度可取1.4米。拉线开关离地面高度可取3米。明装插座离地面高度1.3~1.5米；暗装的可取0.2~0.3米。

室内吊灯灯具高度应大于2.5米；受条件限制时可减为2.2米，如果还要降低，应采取适当安全措施；当灯具在桌面上方或人碰不到的地方时，高度可

减为1.5米。户外照明灯具高度不应小于3米，墙上灯具高度允许减为2.5米。

### 3.4 检修间距

为了防止人体接近带电体，必须保证足够的检修间距。

在低压操作中，人体或其所携带工具等与带电体的距离不应小于0.1米。

在高压无遮栏操作中，人体或其所携带工具与带电体之间的最小距离不应小于下列数值：

10kV 及以下	0.7m
20~35kV	1.0m

当不足上述距离时，应装设临时遮栏，并应符合表40.2-4的要求。

用绝缘杆操作时，上述距离可减为：

10kV 及以下	0.4m
20~35kV	0.6m

在线路上工作时，人体或其所携带工具等与临近带电线路的最小距离不应小于下列数值：

10kV 及以下	1.0m
35kV	2.5m

如不足上述数值时，临近的线路应当停电。

用水冲洗时，小型喷嘴与带电体之间的最小距离不应小于下列数值：

10kV 及以下	0.4m
35kV	0.6m

工作中使用喷灯或气焊时，火焰不得喷向带电体。火焰与带电体的最小距离不得小于下列数值：

10kV 及以下	1.5m
35kV	3m

在架空线路附近进行起重工作时，起重机具(包括被吊物)与线路导线之间的最小距离可参考表40.2-17的数值。

表 40.2-17 起重机具与线路导线的最小距离

电压 kV	1 以下	10	35
距离 m	1.5	2	4

## 第3章 接地和接零

接地和接零在工程上应用极为广泛，是防止电气设备意外带电（如漏电）造成触电危险的重要措施。接地就是把设备的某一部分通过接地装置同大地连接起来。接零就是把电气设备正常时不带电的金属部分与电网的零线连接起来。

### 1 接地概要

#### 1.1 接地分类

按照不同用途，接地可分为正常接地和非人为的故障接地两类。正常接地又有工作接地和安全接地之分。工作接地有两种情况：(1)利用大地作导线的接地，在正常情况有电流通过，如直流工作接地、弱电工作接地等；(2)维持系统安全运行的接地，在正常情况下没有电流或只有很小的不平衡电流流过，如110千伏以上高压系统的工作接地、三相四线制380伏系统变压器中性点的工作接地等。安全接地主要包括防止触电的保护接地、防雷接地、防静电接地及屏蔽接地等。故障接地是指带电体与大地之间发生意外的连接，如电气设备的碰壳短路、电力线路的接地短路等。

#### 1.2 流散电阻和接地电阻

电流自接地体的周围向大地流散所遇到的全部电阻叫做流散电阻(图40-3-1)。

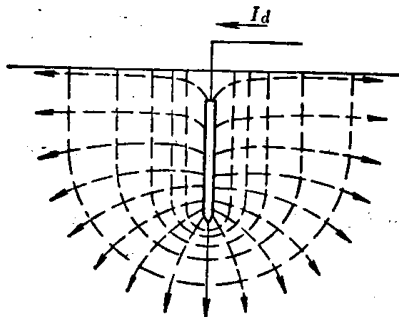


图40-3-1 电流自接地体流散图

接地体的流散电阻与接地线的电阻之和叫做接地电阻。接地线的电阻一般很小，可以忽略不计。因此，可以认为流散电阻就是接地电阻。

通常说的接地电阻都是对于工频电流而言的，当接地装置通过雷电流时，由于雷电流有强烈的冲击性，接地电阻发生很大的变化，为了区别起见，这时的接地电阻称为冲击接地电阻。

#### 1.3 对地电压

对地电压是带电体与大地之间的电位差(大地电位为零)。

电流沿接地体流入大地时，其周围各点对地电压不为零；而且各点对地电压随着远离接地体而逐渐降低。图40-3-2为半球形接地体的对地电压曲线。接地体半径为 $S_0$ 。如果接地体周围土壤是均匀的，则电流 $I_d$ 从接地体向周围土壤作半球形流散。如果忽略接地线和接地体本身的电阻，可求得接地体对地电压为：

$$U_a = \frac{\rho I_d}{2\pi S_0} \quad (40-3-1)$$

式中  $\rho$ ——土壤电阻率

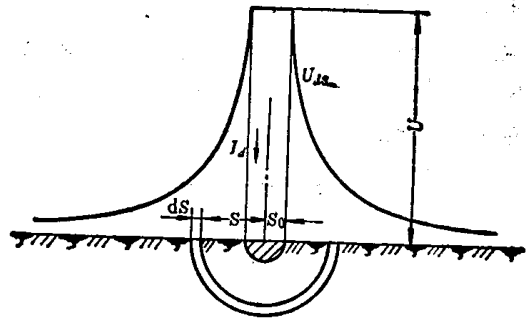


图40-3-2 半球形接地体对地电压曲线

按照同样的方法，可求得接地体周围，与接地体中心相距 $S$ 的任一点的对地电压为：

$$U_{as} = \frac{\rho I_d}{2\pi S} \quad (40-3-2)$$

显然，各点对地电压与该点到接地体中心的距离保持反比关系。依此关系画出接地体及其周围各点对地电压曲线如图40-3-2所示。

接地体周围各点对地电压的相对值，即各点对地电压与接地体对地电压的比值为：

$$\frac{U_{as}}{U_a} = \frac{S_0}{S} \quad (40-3-3)$$



依此式可画出对地电压相对值  $\frac{U_{ps}}{U_a}$  与距离倍数  $\frac{S}{S_0}$  的关系曲线,如图 40.3-3 所示。

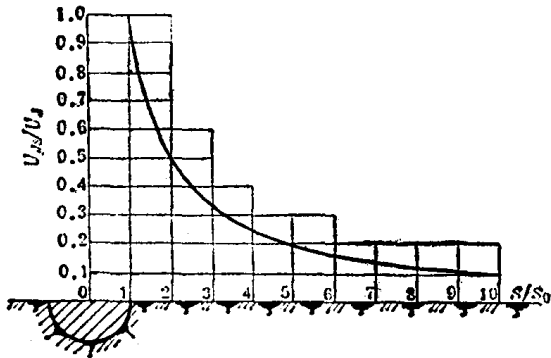


图 40.3-3 半球接地体对地电压相对值曲线

其他形状接地体的对地电压曲线也大体具有双曲线的特点,即接地体周围各点对地电压与该点至接地体的距离保持反比关系。随着距离的增大,对地电压逐渐降低,并趋近于零。

### 1.4 接触电压和跨步电压

接触电压是指加于人体某两点之间的电压。如图 40.3-4 所示,当设备漏电,电流  $I_d$  自接地体入地时,漏电设备对地电压为  $U_a$ ,对地电压曲线呈双曲线形状,至离开接地体 20 米处,对地电压接近于零。甲触及漏电设备外壳,其接触电压即其手和脚之间的电压差,即图中的  $U_c$ 。接触电压通常按人体离开设备 0.8 米考虑。

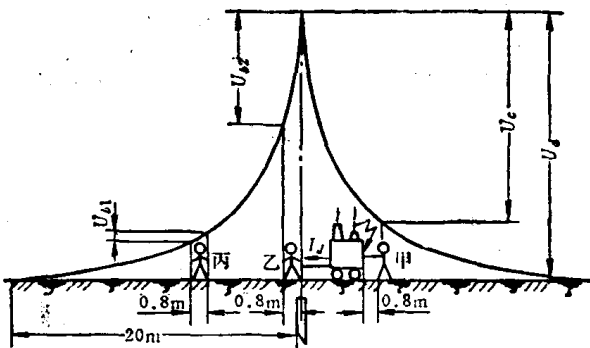


图 40.3-4 接触电压和跨步电压示意图

跨步电压是指人站立在流过电流的大地上,加于人的两脚之间的电压。如图 40.3-4 中的  $U_{s1}$  和  $U_{s2}$ 。人的跨步一般按 0.8 米考虑,大牲畜的跨步通常按 1.0~1.4 米考虑。图中,乙紧靠接地体位置,承受的跨步电压最大;丙离开了接地体,承受的跨步

电压要小一些;对于垂直埋设的单一接地体,离开接地体 20 米以外,跨步电压接近于零。

### 1.5 接地电流和接地短路电流

凡从带电体流入地下的电流即属于接地电流。

系统一相接地可能导致系统发生短路,这时的接地电流叫做接地短路电流,如接地的 380/220 伏系统的单相接地短路电流。在高压系统中,接地短路电流可能很大,接地短路电流 500 安及以下的,称小接地短路电流系统;接地短路电流大于 500 安的,称大接地短路电流系统。

## 2 保护接地原理和应用范围

### 2.1 保护接地原理

如图 40.3-5 所示,在不接地的低压系统中,当一相碰壳时,接地电流  $I_d$  通过人体和电网对地绝缘阻抗形成回路。如各相对地绝缘阻抗相等,则漏电流设备对地电压为:

$$U_a = \frac{3UR_r}{|3R_r + Z|} \quad (40.3-4)$$

式中  $U$ ——电网相电压  
 $R_r$ ——人体电阻  
 $Z$ ——电网每相对地绝缘的复数阻抗

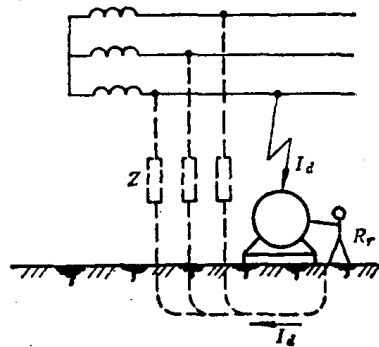


图 40.3-5 不接地的危险性原理图

电网对地绝缘阻抗  $Z$  由电网对地分布电容和对地绝缘电阻组成,并可看作是二者的并联。一般情况下,绝缘电阻大于分布电容的容抗,如果把绝缘电阻看作是无量大,则对地电压为:

$$U_a = \frac{3UR_r}{|3R_r + X_c|} = \frac{3UR_r}{\sqrt{9R_r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \quad (40.3-5)$$

式中  $C$ ——每相对地分布电容