

## 常用符号表

|                              |                           |
|------------------------------|---------------------------|
| $E_a$ ——轴向闪络场强               | $U_{cg50}$ ——50%操作冲击干闪络电压 |
| $E_{ax}$ ——许用轴向场强            | $U_{cn}$ ——额定操作冲击耐受电压     |
| $E_c$ ——潮湿表面部分工频湿闪络梯度        | $U_{cs50}$ ——50%操作冲击湿闪络电压 |
| $E_{rm}$ ——最大径向场强            | $U_g$ ——工频干闪络电压           |
| $E_{rx}$ ——许用径向场强            | $U_{gn}$ ——额定工频干耐受电压      |
| $F$ ——机械破坏力                  | $U_j$ ——工频击穿电压            |
| $F_n$ ——额定机械破坏力              | $U_{jn}$ ——额定工频击穿电压       |
| $I_n$ ——额定电流                 | $U_{l50}$ ——50%雷电冲击闪络电压   |
| $L_c$ ——湿闪络距离的潮湿表面部分         | $U_{ln}$ ——额定雷电冲击耐受电压     |
| $L_k$ ——湿闪络距离的空气间隙部分         | $U_m$ ——绝缘子最高电压           |
| $L_g$ ——干闪络距离                | $U_n$ ——绝缘子额定电压           |
| $L_x$ ——泄漏距离                 | $U_s$ ——工频湿闪络电压           |
| $M$ ——破坏扭矩                   | $U_{sn}$ ——额定工频湿耐受电压      |
| $M_n$ ——额定破坏扭矩               | $\delta$ ——击穿距离           |
| $P$ ——破坏内压力                  | $\lambda$ ——胶装比, 台阶长度     |
| $P_n$ ——额定破坏内压力              | $\sigma$ ——机械破坏应力         |
| $U_{c50}$ ——50%操作冲击闪络电压(干和湿) |                           |

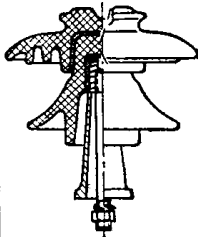
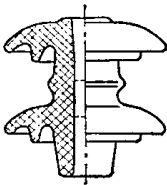
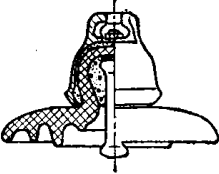
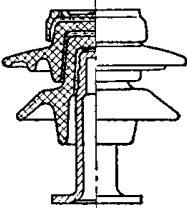
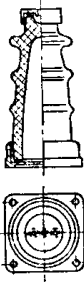
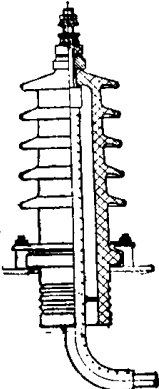
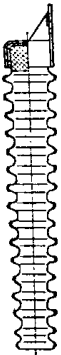
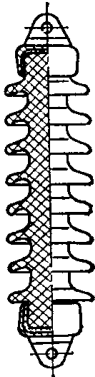
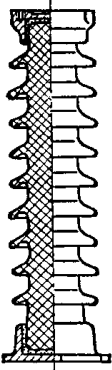
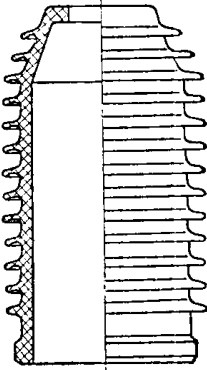
# 第1章 概 述

架空输电线路的导线、变电所的母线和各种电气设备的带电体，都需要用绝缘子支持，使之与大地或接地物绝缘，以保证电能安全可靠地输送到广大城乡用户。绝缘子是使用范围广阔、数量庞大的重要电工产品，与安全供电的关系极为密切。

在运行中，绝缘子承受着工作电压和各种过电

压的作用；承受着导线重量、自重、覆冰重量、风力、系统短路电动力、设备操作机械力、以及震动力等作用；此外，由于绝缘子大多数暴露在大气中工作，还受到大气条件（雨、雪、雾、露、温度、湿度、气压等）变化以及环境污染的影响，工作条件是非常恶劣的。因此，对绝缘子的性能要求是多

表27·1-1 绝缘子的基本型式和分类

| 应用场所      | 线 路 绝 缘 子                                                                           |                                                                                     |                                                                                     | 电 站、电 器 绝 缘 子                                                                        |                                                                                       |                                                                                      |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 型式        | 针 式                                                                                 | 螺 形                                                                                 | 盘 形 悬 式                                                                             | 针 式 支 柱                                                                              | 空 心 支 柱                                                                               | 套 管                                                                                  |
| 可 击 穿 型   |  |  |  |  |  |  |
| 型式        | 横 担                                                                                 |                                                                                     | 棒 形 悬 式                                                                             | 棒 形 支 柱                                                                              | 容 器 瓷 套                                                                               |                                                                                      |
| 不 可 击 穿 型 |  |                                                                                     |  |  |  |                                                                                      |

注：绝缘子按其绝缘体内最短击穿距离是否小于其外部空气中的闪络距离的一半，分为“可击穿型”和“不可击穿型”两类。因空气的击穿强度比固体介质的击穿强度低，故当电压升高时，不可击穿型在空气中首先发生闪络，绝缘体内部不会被击穿；可击穿型则有可能被击穿。

种多样的,一般可以概括为机械性能、电气性能和热稳定性三个方面。

绝缘子的主要零件是绝缘件,其材料的选择需考虑满足上述机、电和热三个方面的性能要求;此外,还需考虑原料来源和制造成本等条件。电工陶瓷能满足上述要求,而且原材料来源丰富、易于成型,已广泛用于制造各种绝缘子。玻璃经过钢化后也具有良好的机、电和热性能,并且原料来源丰富、成本低廉,更适于用机械化自动化方法大量生产悬式绝缘子。此外,有机绝缘材料(如环氧树脂、塑料等)也可用于制造绝缘子,但因成本高,目前应用还不广泛。

绝缘子生产有机械的、化学的和热工的过程,有复杂的物理化学变化,需加强制造过程的工艺控制。

为了满足不同用途,绝缘子结构形式种类繁多。应用广泛的交流高压绝缘子的基本型式和分类可概括于表 27·1-1。

低压绝缘子包括低压线路用(针式、蝶形、拉紧)绝缘子、布线用(鼓形、瓷管、瓷夹板等)绝缘子和低压电器绝缘瓷件。直流绝缘子是正在发展的产品。这两类绝缘子与交流高压绝缘子相仿,本篇对其未作全面介绍,只在有关部分稍有涉及。

我国绝缘子生产,可以满足 330 千伏及以下电网建设和电器配套的需要。随着超高压、大容量、远距离输电的发展,绝缘子尺寸愈益增大,性能要求越来越高,必须在超高压绝缘子结构、大型制品制造工艺、污秽试验技术、高压电器用特种电工陶瓷等方面有相应的发展。

## 第 2 章 绝缘子的电气性能

### 1 电气性能要求

绝缘子在交流电力系统中要受到长期运行条件下的工频电压、暂态过电压、操作过电压和雷电过电压四种电压的作用,因此对它有相应的电气性能要求。

长期运行条件下的工频电压是指系统的最大线对地电压。暂态过电压是指由于接地故障、甩负荷或谐振所引起的接近于工频、持续时间相当长的一种过电压。这二种电压作用下的绝缘性能,可用于干和湿工频耐受电压或干和湿工频闪络电压以及一分钟工频试验电压来表示。

操作过电压是指由于设备操作等原因引起的持续时间很短(约  $10^{-2}$  秒)的一种过电压。操作过电压作用下的绝缘性能,对不太高的电压等级,用干和湿工频耐受电压或干和湿工频闪络电压来表示;对超高压系统,用干和湿操作冲击耐受电压或干和湿操作冲击闪络电压来表示。操作冲击电压的标准波形,国际电工委员会(以下简称 IEC)采用 250/2500 微秒( $\mu$ s)。

雷电过电压是由于雷击而引起的持续时间更短(约  $10^{-4}$  秒)的一种过电压。雷电过电压作用下的

绝缘性能用雷电冲击耐受或闪络电压来表示。雷电冲击电压的标准波形我国采用 1.5/40  $\mu$ s (IEC 采用 1.2/50  $\mu$ s)。

为了节省设备绝缘费用、保证电力系统安全运行,采用过电压限制设备来降低过电压值,然后按照绝缘配合原则规定设备的试验电压。对于电站、电器绝缘子,一般规定各种耐受电压;对线路绝缘子,一般规定各种闪络电压。330 kV 及以下电站、电器绝缘子的额定试验电压见表 27·2-1;更高电压等级的电站、电器绝缘子额定试验电压可参考 IEC 标准值(见表 27·2-2)。线路绝缘应按污秽等级、系统内过电压水平和耐雷水平等要求进行配合(详见本手册《电力系统》篇)。各电压等级线路绝缘的试验电压尚无标准。线路绝缘子的性能见本篇第 3 章。低压绝缘子一般应经受 2kV 工频电压试验,持续 1 分钟。

为了保证可击穿型绝缘子在运行中遭受各种电压作用时,不致使绝缘击穿而造成绝缘的永久性破坏,一般规定绝缘子的油中工频击穿电压不小于其额定干耐受电压的 1.6 倍,或不小于额定干闪络电压的 1.3~1.5 倍。

此外,绝缘子在运行中常受到各种污秽和潮湿

表27·2-1 电站电器绝缘子额定试验电压（按 GB 311-64） kV

| 绝缘子额定电压<br>$U_n$<br>(有效值) | 绝缘子最高<br>工作电压<br>$U_m$<br>(有效值) | 额定工频耐受电压<br>(有效值) |                | 额定雷电冲击耐受电压<br>(正、负极性1.5/40 $\mu$ s)<br>$U_{cn}$<br>(峰值) | 额定 1 分钟工<br>频试验电压②<br>(有效值) | 额定油中工频<br>击穿电压③<br>$U_{jn}$<br>(有效值) |
|---------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
|                           |                                 | 干<br>$U_{gn}$     | 湿①<br>$U_{sn}$ |                                                         |                             |                                      |
| 3                         | 3.5                             | 27                | 20             | 44                                                      | 25                          | 43                                   |
| 6                         | 6.9                             | 36                | 26             | 60                                                      | 32                          | 58                                   |
| 10                        | 11.5                            | 47                | 34             | 80                                                      | 42                          | 75                                   |
| 15                        | 17.5                            | 63                | 45             | 105                                                     | 57                          | 101                                  |
| 20                        | 23                              | 75                | 55             | 125                                                     | 68                          | 120                                  |
| 35                        | 40.5                            | 110               | 85             | 195                                                     | 100                         | 176                                  |
| 60                        | 69                              | 180               | 140            | 335                                                     | 165                         | —                                    |
| 110                       | 126                             | 295               | 215            | 480                                                     | 265                         | —                                    |
| 154                       | 177                             | 375               | 290            | 660                                                     | 340                         | —                                    |
| 220                       | 252                             | 550               | 425            | 950                                                     | 490                         | —                                    |
| 330④                      | 363                             | 710               | 550            | 1200                                                    | 630                         | —                                    |

① 仅对户外绝缘子进行。 ② 仅对具有内绝缘的套管进行。 ③ 仅对可击穿型绝缘子进行，本栏数据仅适用于瓷或玻璃绝缘子。 ④ 330kV级试验电压按现行数据列入。

表27·2-2 最高工作电压 362 千伏及  
以上电站电器绝缘子额定耐受电压<sup>〔1〕</sup>

kV

| 绝缘子最高<br>工作电压<br>$U_m$<br>(有效值) | 额定操作冲击耐<br>受电压干和湿，<br>正、负极性，<br>250/2500 $\mu$ s<br>$U_{ccn}$<br>(峰值) | 额定雷电冲击干耐<br>受电压正、负极性，<br>1.2/50 $\mu$ s<br>$U_{cn}$<br>(峰值) |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 362                             | 850                                                                   | 950<br>1050                                                 |
|                                 | 950                                                                   | 1050<br>1175                                                |
| 420                             | 950                                                                   | 1050<br>1175                                                |
|                                 | 1050                                                                  | 1175<br>1300<br>1425                                        |
| 525                             | 1050                                                                  | 1175<br>1300<br>1425                                        |
|                                 | 1175                                                                  | 1300<br>1425<br>1550                                        |
| 765                             | 1300                                                                  | 1425<br>1550<br>1800                                        |
|                                 | 1425                                                                  | 1550<br>1800<br>2100                                        |
|                                 | 1550                                                                  | 1800<br>1950<br>2400                                        |

大气条件的作用，要求它具有一定的抗污性能（见本章第 4 节）。

高压绝缘子在直流电力系统中也要受到直流运行电压、持续过电压、操作过电压以及雷电过电压的作用。由于高压直流输电技术还处于发展阶段，下面参考 IEC 刊物 438<sup>〔2〕</sup>，对直流绝缘子的性能要求加以简单介绍。

在直流电力系统中，其持续过电压约为系统最大运行电压的 1.3~1.4 倍，持续时间小于 1 秒。因此，对于运行电压小于  $\pm 250$  kV 的直流系统用绝缘子，其正常运行电压和持续过电压下的绝缘性能，暂时规定有 1 分钟交流湿耐受试验电压，试验电压有效值等于直流系统最大运行电压的 1.4~1.5 倍。

在高压直流系统中，其操作过电压较交流系统低。因此，对运行电压等于或高于  $\pm 250$  kV 的直流系统用绝缘子，规定有操作冲击干（对户内绝缘子）或湿（对户外绝缘子）耐受试验电压，耐受电压峰值不大于额定运行电压的 1.5~1.7 倍。

在直流系统中，由于整流装置故障排除特性较好，故障排除时间短，可以减小绝缘子被电弧烧坏的危险，因此对雷电过电压允许有较高的闪络概率，因而雷电冲击绝缘水平可以较低。

直流绝缘子在最大运行电压下的抗污性能是很重要的。目前规定直流污秽试验还不成熟，因此可以暂用交流电压污秽试验代替，试验电压有效值应

等于直流运行电压。对直流绝缘子应规定泄漏距离。

高压直流绝缘子击穿电压可规定为一般的油中工频击穿电压。但对于大电容制品(如套管),可以考虑为直流击穿试验电压。

## 2 闪络电压特性

绝缘子闪络和耐受电压是指具有一定闪络概率的电压值。通常取闪络概率为50%的电压值作为闪络电压。耐受电压与试验时电压施加方式(即一次施加还是二次施加)和施加电压次数以及允许闪络次数等有关。一般取闪络概率为10%的电压值作为耐受电压。

绝缘子闪络的概率分布一般为正态分布,其概率分布函数用50%闪络电压和标准偏差 $\sigma\Theta$ 来表示。耐受电压可由此算得。额定闪络电压与耐受电压的间隔见表27·2-3。

表 27·2-3 额定闪络电压与额定耐受电压的间隔(额定耐受电压为100%)

| 电压种类   | 闪络概率分布标准偏差<br>$\sigma\%$ | 额定闪络电压<br>% | 间隔<br>% |
|--------|--------------------------|-------------|---------|
| 工频电压   | 3                        | 104         | 4       |
| 雷电冲击电压 | 3                        | 104         | 4       |
| 操作冲击电压 | 6                        | 108         | 8       |

绝缘子的闪络电压与下列条件有关:

(1) 安装方法 绝缘子干闪络电压与试验时试品安装方法有关。根据试验,在试验时绝缘子安装位置离地面较高,地面影响较小,干闪络电压值较高。支柱绝缘子操作冲击闪络电压与试验时试品离地面高度关系特别明显。

绝缘子湿闪络电压与试品安装角度有关。垂直安装时由于电弧顺着雨流方向发展,其闪络电压一般较水平和倾斜安装时低。

(2) 淋雨条件 绝缘子湿闪络电压与淋雨条件有关。一般随降雨强度的提高和雨水电阻率的减小而降低。国家标准 GB311-64 和 GB775-79 规定的标准淋雨条件为:雨强 3mm/min,雨水电阻率 10000 $\Omega\cdot\text{cm}$ ,雨流与垂线成 45° 角。

(3) 大气条件 绝缘子闪络电压与大气条件的关系见本手册《高电压技术》篇。标准大气状态为周

围气温 20°C, 压力 1013 毫巴, 湿度 11 克/米<sup>3</sup>。

如无特别说明,本篇有关闪络电压曲线均系在标准试验条件下获得的,工频电压均系有效值,冲击电压均系峰值。

### 2.1 闪络距离

绝缘子干闪络电压随干闪络距离的增加而升高。干闪络距离  $L_d$  系指绝缘子二电极间通过周围空气的最短距离。盘形悬式绝缘子串的干闪络距离近似地等于其串长。支柱绝缘子柱的干闪络距离为其各元件干闪络距离之和。

绝缘子湿闪络电压随湿闪络距离的空气间隙部分  $L_k$  和潮湿表面部分  $L_w$  的增加而升高。

几种绝缘子闪络距离见图 27·2-1~27·2-3。

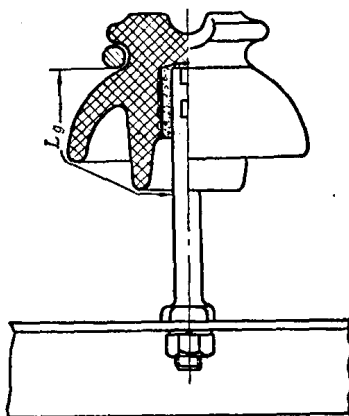


图 27·2-1 针式绝缘子的干闪络距离

### 2.2 闪络电压计算值裕度

影响绝缘子闪络电压值的因素较多,例如试品形状尺寸误差、试验设备和试验方法误差以及试验人员的技术熟练程度等。闪络电压值误差包括不同试验室引起的试验室误差和同一试验室的重复性误差二部分。这二种误差一般均服从正态分布规律,它们的和称为再现性误差  $\sigma_z$ 。

由于闪络电压有分散性,因此根据闪络电压曲线和计算公式而得的计算值,应高于标准规定的额定值。

(1) 当额定值为闪络电压时,计算值裕度见表 27·2-4。

⊙ 此标准偏差是相对于分布的平均值的百分数,下文有关正态分布的标准偏差  $\sigma$  亦同。

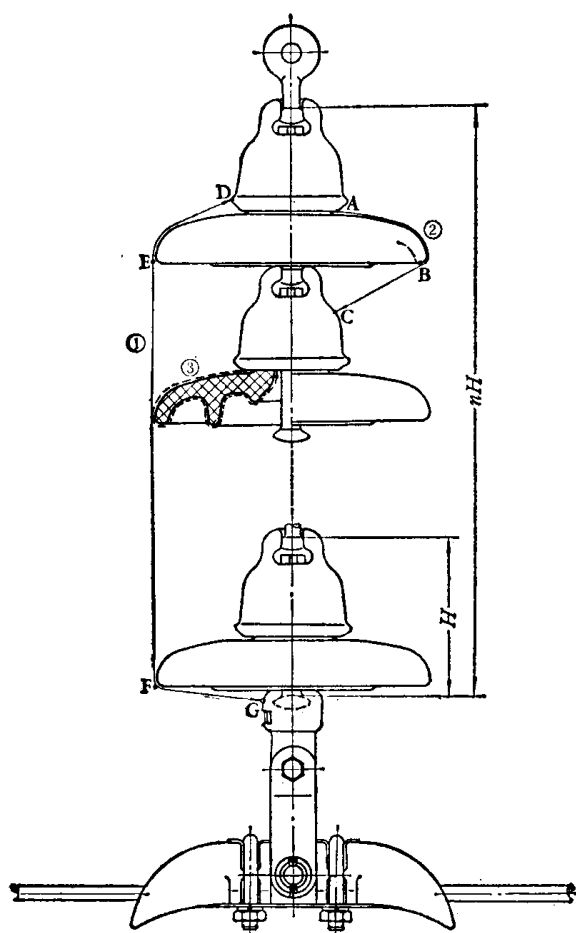
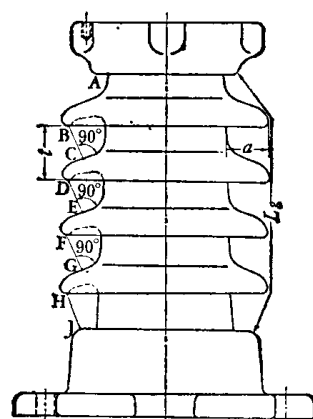


图27-2-2 盘形悬式绝缘子串的闪络距离和闪络路径

$$L_g = \overline{DE} + \overline{EF} + \overline{FG} \approx nH$$

$$L_k = n\overline{EC} \quad L_c = n\overline{AB}$$

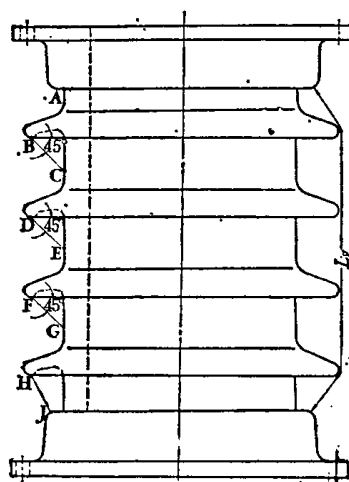
①、②、③—闪络路径



a) 伞间距小时

$$L_k = \overline{BC} + \overline{DE} + \overline{FG} + \overline{HI}$$

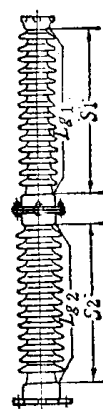
$$L_c = \overline{AB} + \overline{CD} + \overline{EF} + \overline{GH}$$



b) 伞间距大时

$$L_k = \overline{BC} + \overline{DE} + \overline{FG} + \overline{HI}$$

$$L_c = \overline{AB} + \overline{CD} + \overline{EF} + \overline{GH}$$



c) 支柱绝缘子柱

$$L_g = L_{g1} + L_{g2}$$

$$\approx S_1 + S_2$$

图27-2-3 支柱绝缘子和电器瓷套的闪络距离

表27-2-4 闪络电压计算值裕度

(额定闪络电压为100%)

| 试验型式 | 再现性标准偏差<br>$\sigma_z$ % | 闪络电压计算值<br>% | 裕度<br>% |
|------|-------------------------|--------------|---------|
| 干试验  | 6                       | 108~110      | 8~10    |
| 湿试验  | 8                       | 111~114      | 11~14   |

(2) 当额定值为耐受电压时, 计算值裕度应为表 27-2-3 第4栏和表 27-2-4 第4栏裕度之和。

## 2.3 针式绝缘子的闪络电压特性

针式绝缘子闪络电压经验曲线示于图 27-2-4, 图中 50% 雷电冲击闪络电压为正极性 (比负极性时低); 工频湿闪络电压  $U_s$  曲线已简化为对于闪络距离  $L_g$  的关系。

## 2.4 盘形悬式绝缘子串的闪络电压特性

盘形悬式绝缘子一般均连接成串使用, 因此应着重注意串的闪络特性。

a. 闪络路径 标准盘形悬式绝缘子串的闪络路径可能有三条 (见图 27-2-2):

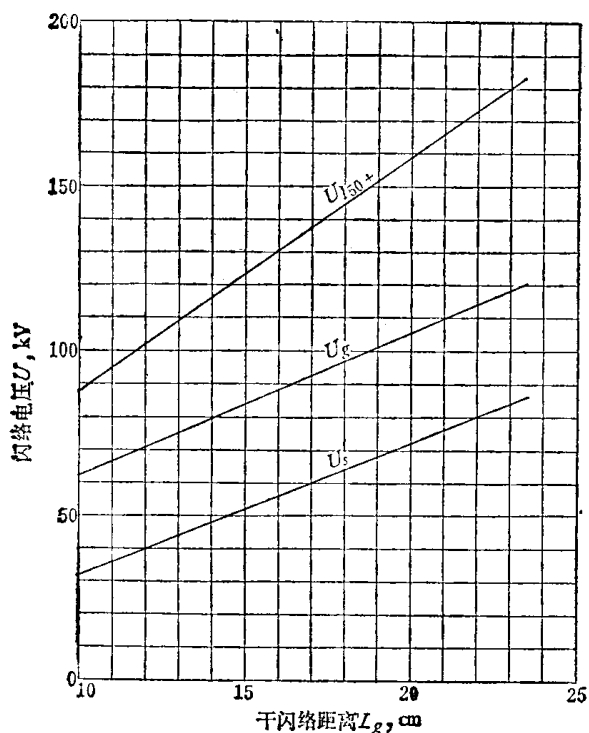


图27-2-4 针式绝缘子闪络电压曲线  
 $U_{150+} = 7.2L_g + 15$   $U_g = 4.35L_g + 19$   
 $U_s = 4L_g - 8$

(1) 沿最短路径。一般工频、雷电冲击和操作冲击干闪络以及正极性操作冲击湿闪络即如此；

(2) 沿绝缘子表面和空气间隙交替组成的路径。一般工频湿闪络和负极性操作冲击湿闪络即如此；

(3) 沿绝缘体表面。一般污秽闪络即如此。

**b. 工频干闪络和雷电冲击闪络** 标准盘形悬式绝缘子串的工频干闪络和雷电冲击闪络电压曲线见图 27-2-5 和图 27-2-6。

绝缘子串工频干闪络电压和雷电冲击闪络电压不取决于绝缘子型式，仅与串的长度有关，即闪络一般沿最短路径发生。

绝缘子串的雷电冲击闪络电压，一般负极性时比正极性时稍高，因此串的试验一般在正极性情况下进行。

**c. 工频湿闪络** 悬式绝缘子串的工频湿闪络电压与绝缘子型式有关，主要取决于湿闪络距离的空气间隙部分长度  $L_k$  和潮湿表面部分长度  $L_e$ ，特别是  $L_k$ 。

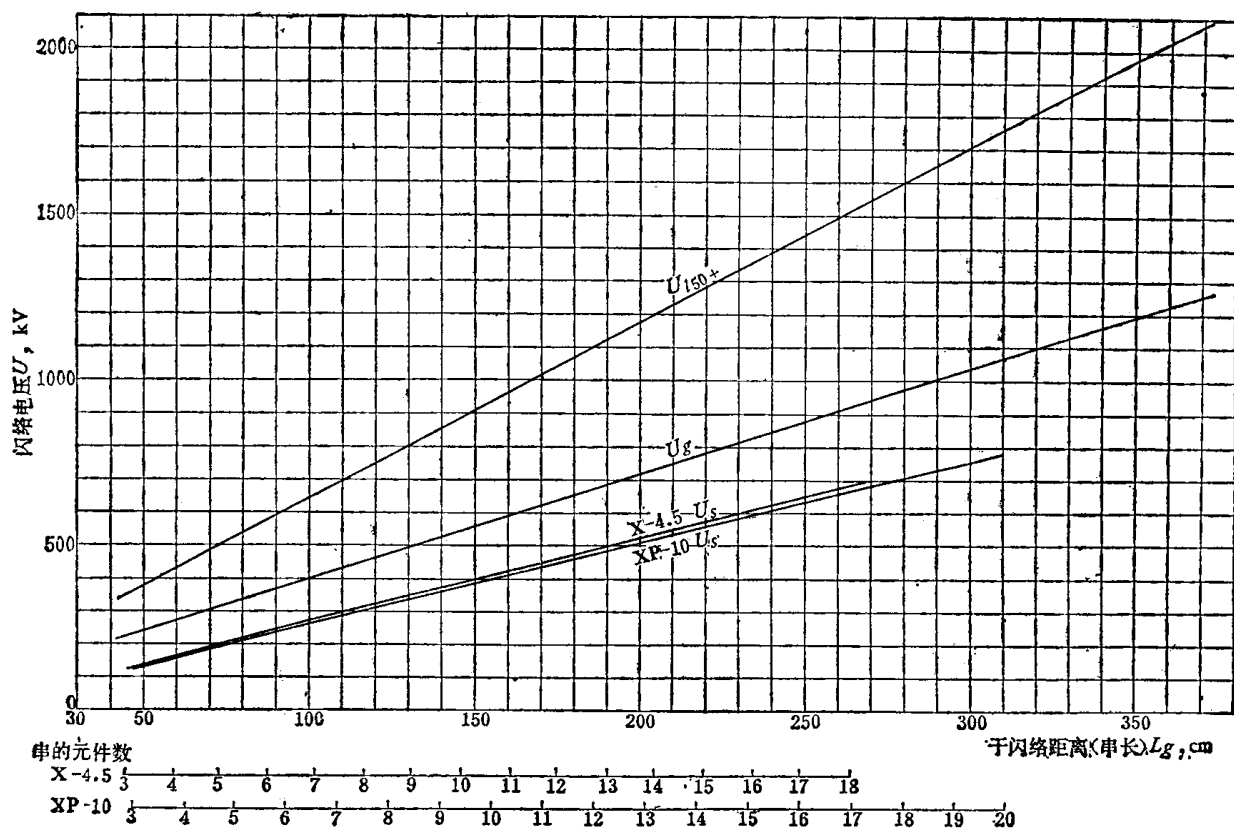


图27-2-5 标准盘形悬式绝缘子串工频和雷电冲击闪络电压曲线

$$U_{150+} = 5.33L_g + 110 \quad U_g = 3.18L_g + 85$$

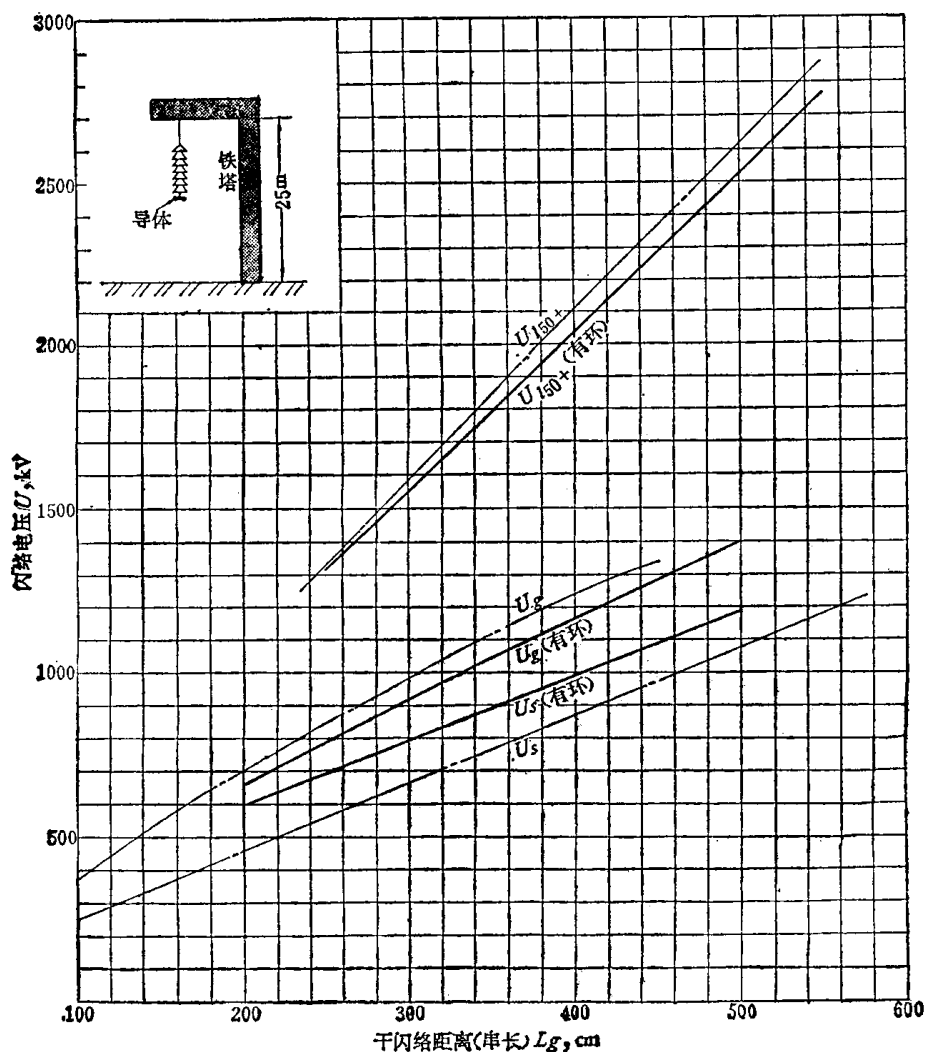


图27-2-6 长绝缘子串工频和雷电冲击闪络电压曲线

—— 根据我国数据, 采用330kV送电线路用椭圆形均压环

- - - - - 根据文献<sup>[4]</sup>, 30吨盘形悬式瓷绝缘子试品装置如图左上角所示 (波形为 $1.1 \times 4.5 \mu s$ )

标准盘形悬式绝缘子串工频湿闪络电压  $U_s$  可按式估算:

$$U_s = 2.76L_k + E_c L_c \quad \text{kV} \quad (27-2-1)$$

式中  $L_k$ ——范围为 25~220 cm

$L_c$ ——范围为 30~270 cm

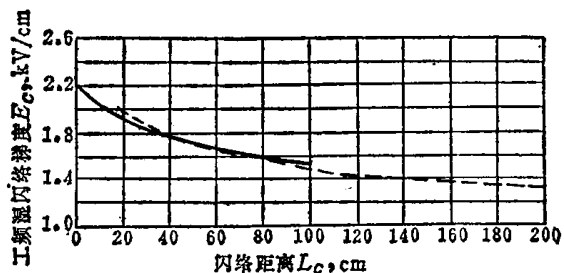
$E_c$ ——潮湿部分闪络梯度 kV/cm (见图 27-2-7), 当  $L_c > 200$  cm 时,  $E_c$  可按式计算:

$$E_c = 2.4L_c^{-0.111} \quad \text{kV/cm}$$

用式 (27-2-1) 算得的 X-4.5 和 XP-10 型工频湿闪络电压曲线见图 27-2-5。

d. 操作冲击闪络 标准盘形悬式绝缘子串正极性干和湿 50% 操作冲击闪络电压 ( $U_{cg50+}$  和

$U_{cg50+}$ ) 的曲线见图 27-2-8。

图27-2-7 普通伞裙绝缘子垂直安装时工频湿闪络梯度  $E_c$  <sup>[8]</sup>

—— 实测值 - - - - - 计算值

负极性时的闪络电压一般比正极性时高, 在同一极性下干闪络电压比湿闪络电压略高, 因此一般按正极性湿操作冲击试验。

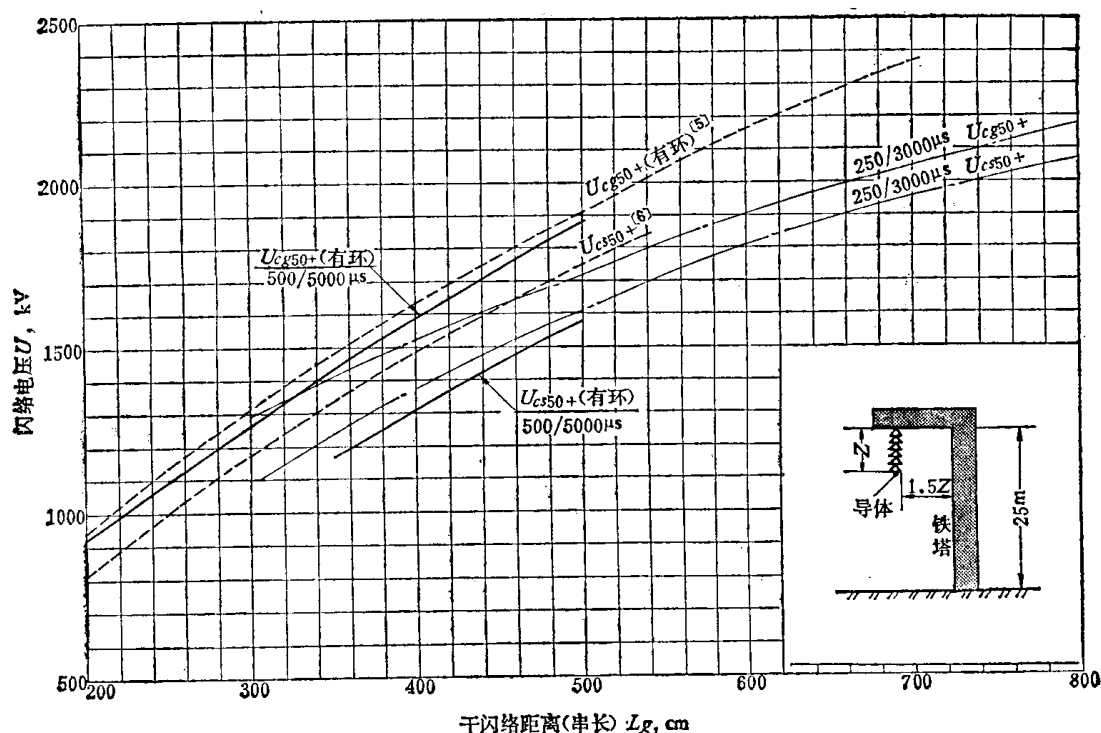


图27-2-8 标准盘形悬式绝缘子串操作冲击闪络电压曲线

- 根据我国数据。采用330kV送电线路，用椭圆形均压环，试验数据按IEC刊物60-1〔7〕校正
- - - 根据文献〔4〕。30吨盘形悬式瓷绝缘子，试品装置如图右下角所示（波形为250/3000μs）
- 根据文献〔5,6〕。各种标准盘形悬式瓷和玻璃绝缘子，试验装置模拟电杆和横担，采用分裂导线，干试验时采用750kV线路用均压环；冲击波等效波头时间约4000μs；湿试验时雨强3~4mm/min

绝缘子串操作冲击干闪络电压和正极性操作冲击湿闪络电压一般不取决于绝缘子型式，而仅与串的长度有关，即闪络一般沿最短路径发生。

随着输电线路额定电压的提高，悬式绝缘子串的元件数也要增多。由于杂散电容的影响，沿串的电压分布不均匀性增大。在串的导线侧装设均压环可使绝缘子与导线之间的电容增大，使串电压分布均匀一些，从而减小串的电晕放电，减少线路的无线电干扰。但是，由于均压环缩短了串的闪络距离，使串的闪络电压比无均压环时稍低。

## 2.5 瓷横担和户外棒形支柱

### 绝缘子的闪络电压特性

a. 雷电冲击和工频干闪络 瓷横担和户外棒形支柱绝缘子的雷电冲击和工频干闪络电压曲线示于图27-2-9~27-2-11。

与绝缘子串一样，柱的雷电冲击闪络电压负极性比正极性时高。

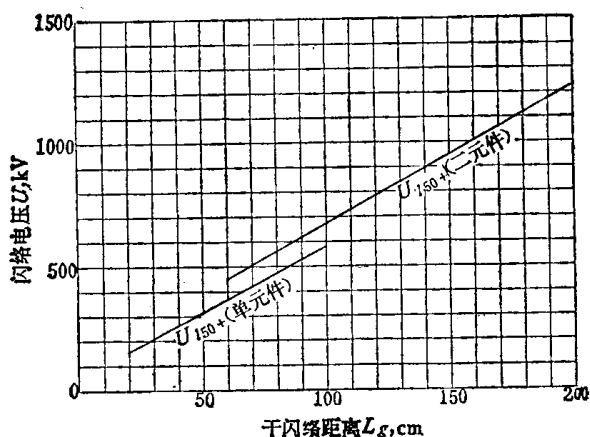


图27-2-9 瓷横担绝缘子雷电冲击闪络电压曲线

$$U_{150+} = 5.34L_g + 46 \text{ (单元件)}$$

$$U_{150+} = 5.55L_g + 117 \text{ (二元件)}$$

这二种绝缘子的雷电冲击闪络梯度与元件的数量和组合方式有关。由图27-2-9和图27-2-10可见，单元件绝缘子的闪络梯度比多元件绝缘子柱低。一般来说，单元件的电极布置较接近于棒-板

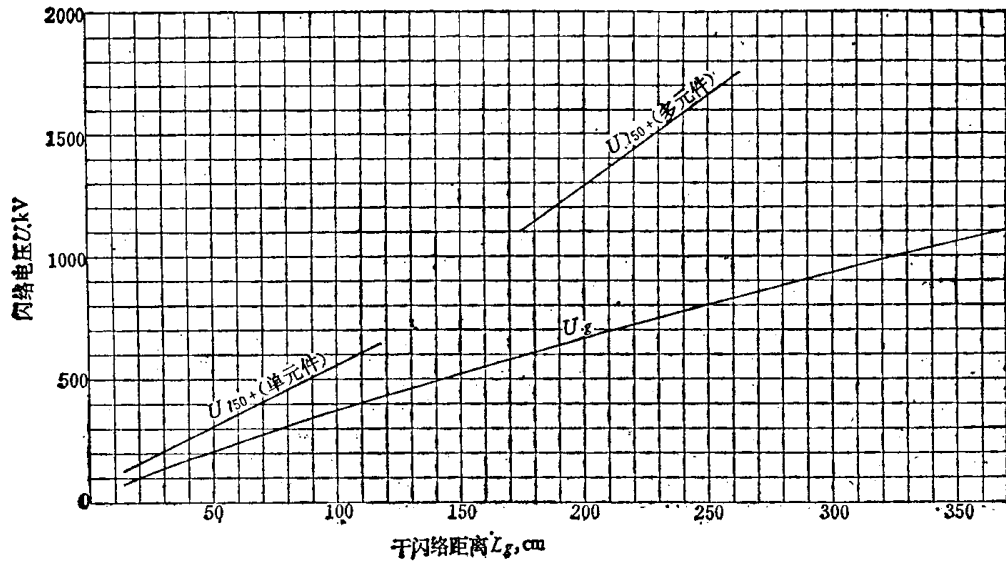


图27-2-10 户外棒形支柱绝缘子雷电冲击和工频干闪络电压曲线

$$U_{150+} = 5L_g + 55 \text{ (单元件)} \quad U_g = 8.04L_g^{0.833}$$

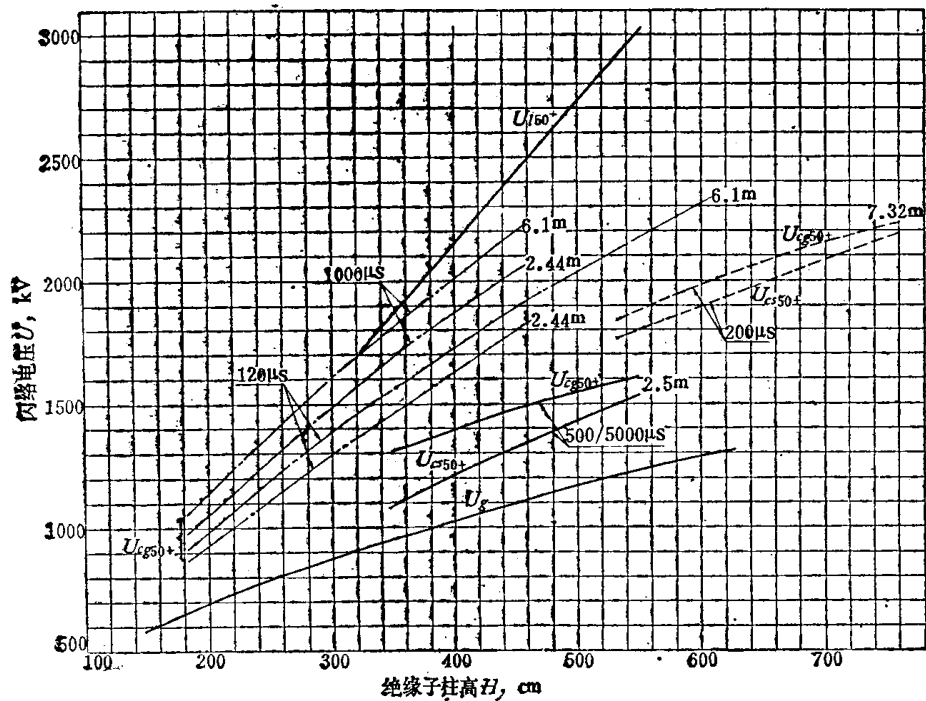


图27-2-11 长绝缘子柱的闪络电压曲线

- 根据我国数据, 操作冲击试验时按 IEC 刊物 506 (1975)<sup>[8]</sup>, 其他按 GB 311-64 和 GB 775-79, 采用直径 60~100cm 单圆环和双圆环
- - - 根据文献<sup>[9]</sup>, 试品安装在立柱状网格钢上, 支持结构顶部
- 根据文献<sup>[10]</sup>, 试品安装在水平安放的高出地面的接地槽钢上, 曲线旁边 2.44m, 2.5m, 6.1m 和 7.32m 表示试品底座离地高度

间隙,而多元件可看作由棒-板间隙(底部元件)和几个棒-棒间隙(上部元件)相串连而成。由于棒-棒间隙闪络梯度较棒-板间隙高,故多元件绝缘子闪络梯度较高。此外,棒形支柱绝缘子元件长短的组合方式对柱的冲击闪络电压也有一定的影响,例如组合的元件较长且由长短不同的元件串接成柱时,长元件置于柱的顶部对提高冲击闪络电压有利。

**b. 工频湿闪络** 普通伞裙的圆柱形绝缘子(如瓷横担、户外棒形支柱绝缘子以及电器套管等)垂直安装时的工频湿闪络电压可按下式估算:

$$U_s = 3L_k + E_c L_c \quad \text{kV} \quad (27\cdot2-2)$$

式中,  $L_k$  和  $L_c$  范围为 7~125 cm,  $E_c$  见图 27·2-7。

一般当伞径不变时,伞数增多可以增大  $L_k$  和  $L_c$  数值。但当伞数增加到一定程度,例如当伞伸出  $a$  对伞间距  $t$  之比即  $a/t \approx 0.5$  时,工频湿闪络电压已趋近饱和。标准型户外棒形支柱绝缘子的  $a/t$  比值,一般均大于 0.5,常取 0.55~0.8,以增大泄漏距离。此时湿闪络已不沿  $L_k$  和  $L_c$  路径发展,而是沿伞缘,即沿干闪络距离  $L_g$  的路径发展,其工频湿闪络电压  $U_s$  可按下式估算:

$$U_s = 2.92L_g + 7 \quad \text{kV} \quad (27\cdot2-3)$$

当  $a/t > 0.5$  时,  $L_g$  范围为 13~200 cm。

多棱圆柱形绝缘子(如多棱瓷横担)垂直安装时,其  $U_s$  亦可按公式(27·2-2)估算,但此时  $L_k = 0$ ,  $L_c = L_x$  ( $L_x$  为泄漏距离)。多棱圆柱形绝缘子淋雨时,绝缘件表面全被淋湿,而且雨水连成水流,水流截面逐渐增大,因此其湿闪络电压比伞裙绝缘子低得多。故一般电压等级较高的直立安装的绝缘子应采取伞裙结构。

多棱圆柱形绝缘子水平安装时,其工频湿闪络电压可按下式估算:

$$U_s = 1.47L_x + 27 \quad \text{kV} \quad (27\cdot2-4)$$

泄漏距离  $L_x$  范围为 23~180 cm。

在淋雨试验时,绝缘件表面亦全被淋湿,但雨水不会连成水流,对湿闪络电压无何影响,因此水平安装时采用多棱绝缘子即可满足要求。

**c. 操作冲击闪络** 户外棒形支柱绝缘子柱的操作冲击闪络电压曲线见图 27·2-11。

与绝缘子串一样,柱的操作冲击闪络电压负极性时比正极性时高;同极性时,干闪络电压比湿闪络电压略高。

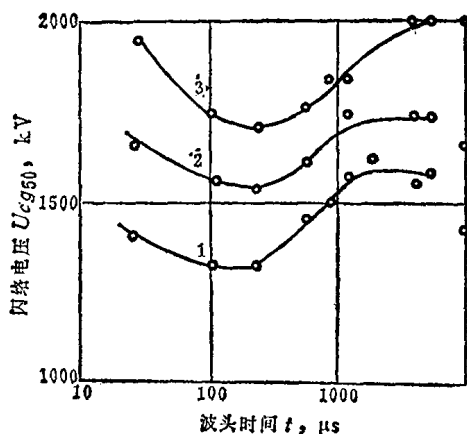


图27·2-12 绝缘子柱操作冲击闪络电压

与操作波波头长的关系<sup>[11]</sup>

1—4×KO-110 2—5×KO-110 3—7×KO-110  
KO-110 高 110cm

绝缘子柱的操作冲击闪络电压与操作波波头时间的关系见图 27·2-12。从图可以看出,高度为 4~8 米的柱,与最低闪络电压相适应的临界波头时间介于 150~450 μs 之间,并随着柱的高度的增加,最低值移向波头较长的区域(悬式绝缘子串也有同样现象)。

绝缘子柱的操作冲击闪络电压与试品装置方式和底座离地高度的关系,可以从图 27·2-11 看出。一般正极性闪络电压随着底座离地高度的增加而略有增加,并且绝缘子柱底座没有接地槽钢时(图中点划线所示曲线),闪络电压比有接地槽钢时(图中虚线所示曲线)高。

较高电压等级的绝缘子柱,在高压端设适当尺寸的均压环,可以提高柱的工频、雷电冲击和操作冲击闪络电压。

## 2.6 户内支柱绝缘子的闪络电压特性

户内支柱绝缘子的闪络电压曲线见图 27·2-13。

## 2.7 高压瓷套的闪络电压特性

套管电场的特点是中间法兰部位电场集中,容易导致表面滑闪放电,使套管的闪络电压仅略高于滑闪电压,并且不随长度成比例地提高,因此,要采取措施阻止滑闪放电的发展。

具有足够滑闪电压的套管瓷套和电器瓷套的干闪络电压曲线见图 27·2-14。

瓷套的负极性冲击闪络电压一般也高于正极性

时的闪络电压。

瓷套工频湿闪络电压,可按式(27·2-2)~(27·2-4)估算。

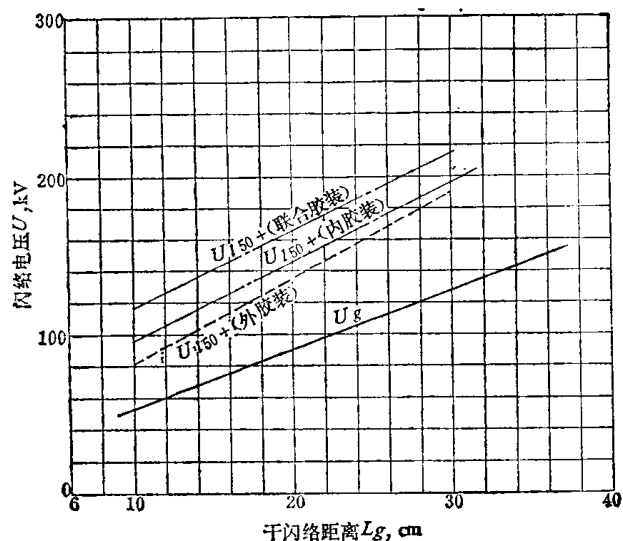


图27·2-13 户内支柱绝缘子闪络电压曲线

$$U_g = 3.73L_g + 16$$

$$U_{150+} = 5L_g + 66 \text{ (联合胶装)}$$

$$U_{150+} = 5L_g + 45 \text{ (内胶装)}$$

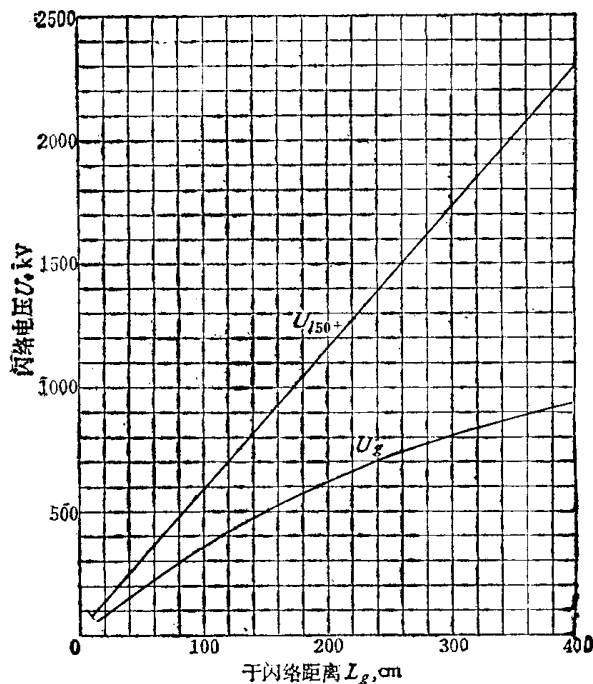


图27·2-14 套管瓷套和电器瓷套干闪络电压曲线

$$U_{150+} = 5.7L_g + 20$$

### 3 油中工频击穿电压特性

可击穿型绝缘子的工频击穿电压与击穿部位绝缘厚度、电场均匀程度、材料击穿强度以及试验时绝缘油的性质等因素有关。根

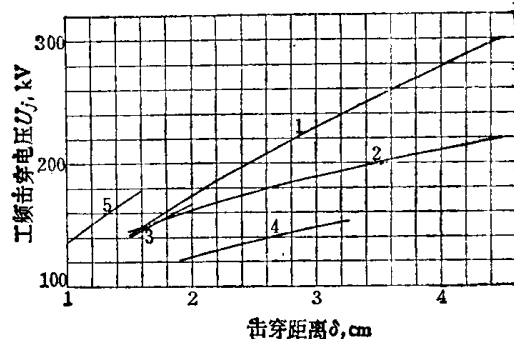


图27·2-15 绝缘子工频击穿电压曲线

1—针式支柱瓷绝缘子 2—针式瓷绝缘子 3—盘形悬式瓷绝缘子 4—无均压层纯瓷穿墙套管 5—钢化玻璃盘形悬式绝缘子

据国内一些工厂生产的绝缘子产品抽查试验数据所得的经验曲线示于图27·2-15。图中击穿距离系指易击穿部位中最薄部分的公称尺寸。易击穿部位示例见图27·2-16。纯瓷穿墙套管易击穿部位为中间法兰处瓷体壁厚的最小位置。由二层或三层瓷件胶合成的针式绝缘子和针式支柱绝缘子,其击穿距离 $\delta$ 系指各层瓷件的总厚度。每层瓷件厚度一般不超过1.5~2.5 cm。对于盘形悬式绝缘子,图27·2-16击穿距离系指绝缘件顶部厚度。

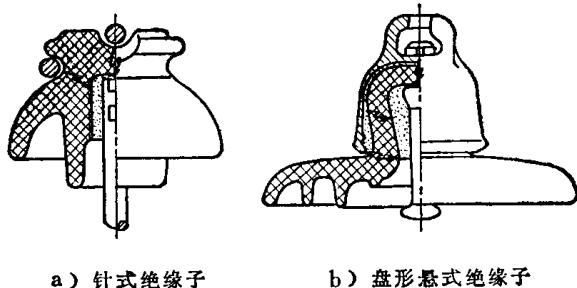


图27·2-16 绝缘子易击穿部位示例

绝缘子工频击穿电压测量结果一般也服从正态分布规律,但其分散性比闪络电压大得多。因此,根据击穿电压曲线估算的击穿电压计算值,应高于额定击穿电压。计算值裕度见表27·2-5。

表27·2-5 工频击穿电压计算值裕度  
(额定击穿电压为100%)

| 击穿电压测量值<br>分布标准偏差<br>$\sigma\%$ | 击穿电压计算值<br>% | 裕度<br>% |
|---------------------------------|--------------|---------|
| 11                              | 120~125      | 20~25   |

#### 4 污秽闪络和污秽环境分级

##### 4.1 污秽闪络机理和特点

在运行中,绝缘子表面沉积有一定的污秽层,当遇到潮湿气候条件时,就可能发生污秽闪络(简称污闪)。

**a. 污秽层** 绝缘子受到的污秽有沿海污秽和工业污秽二种。由海风带来的海水水滴沉积在绝缘子上,水分蒸发后,盐分留在绝缘体表面,经过一定时间,表面全被蒙上盐层,此即沿海污秽。内陆盐碱污秽与沿海污秽相类似。在化工、冶金、水泥企业,或火力发电厂附近,绝缘子上也会逐渐沉积一层污秽,此即工业污秽。靠近公路,铁路,由道路扬起的灰尘亦属工业污秽。

**b. 污闪机理** 上述污层所含盐分在潮湿气候条件下被溶解,形成电解层。空气中存在的一些化工气体(例如氯气)也会溶解到此电解层中,从而更增大了电导率。在电压作用下,沿污层流过的泄漏电流使水分蒸发,在电流密度较大部位首先干燥,然后在该处形成很小的电弧。当电流较小时,电弧在交流电流过零时可以熄灭;但在污层电导率比较高时,因泄漏电流较大,电弧可以不断延伸和扩大,引起完全闪络——污闪。

##### c. 污闪特点

(1) 一般在长期运行电压下发生污闪:污秽闪络过程不是一般空气间隙的电击穿过程,而是一种热击穿过程,需要一定的电能和经过一定的时间才能发生闪络。因此一般在长期运行电压下才发生污闪。但在中性点非直接接地系统中,当一相接地,健全相处在线电压下较长时间运行时,或在工频电压上叠加有较高的操作过电压情况下,也可能发生污闪。

(2) 可造成大面积、长时间停电:由于污秽扩散范围较大,潮湿气候条件持续时间较长,污闪通常在一相当长时间内多处发生,且不易为自动重

合闸所消除。因此,污闪事故率虽比雷害事故率低,但所造成的停电损失却比雷害事故大得多。

##### 4.2 污秽环境分级

输电线路绝缘的污秽环境,目前根据污染源种类和离污源的远近,划分为四级,对每一级提出不同的泄漏比距的要求,见表27·2-6。

表27·2-6 输电线路外绝缘污秽  
环境分级<sup>[12,13]</sup>

| 污秽等级 | 污秽条件                                                     | 泄漏比距<br>cm/kV |
|------|----------------------------------------------------------|---------------|
| 0    | 一般地区                                                     | 1.6           |
| 1    | 空气污秽的工业区附近;盐碱地区;炉烟污秽地区                                   | 2.0~2.5       |
| 2    | 空气污秽较严重的地区;沿海地带及盐场附近;重盐碱地区;空气污秽而又有重雾的地带;距化学性污染源300米以外的地区 | 2.6~3.2       |
| 3    | 电导率很高的空气污秽地区;发电厂的烟囱或冷却水塔的影响范围内;严重的盐雾地区;距化学性污染源300米以内的地区  | $\geq 3.8$    |

表27·2-6中,泄漏比距是指外绝缘的泄漏距离对系统额定线电压之比,它是根据标准型盘形悬式绝缘子运行经验总结出来的。当采用半导体釉绝缘子时,泄漏比距应另行考虑。

国际电工委员会标准刊物71-2<sup>[14]</sup>提出了自然污秽水平分级以及污秽水平、试验水平和泄漏距离之间关系的暂行标准,见表27·2-7。

表27·2-7 污秽水平、试验水平和泄漏  
距离间关系的 IEC 暂行标准<sup>[14]</sup>

| 污秽水平   | 试 验 水 平                   |                  | 泄漏距离/最高相-地电压<br>cm/kV |
|--------|---------------------------|------------------|-----------------------|
|        | 盐 雾 法                     | 固体层法             |                       |
|        | 耐受盐量<br>kg/m <sup>3</sup> | 污层电导率<br>$\mu S$ |                       |
| 没有明显污秽 | $\leq 5$                  | 5~10             | 2.0~2.5               |
| 轻污秽    | 10~20                     | 10~20            | 3.0~3.5               |
| 重污秽    | 40~80                     | 20~40            | 4.0~5.0               |
| 很重污秽   | $\geq 160$                | $> 50$           | $\geq 6$              |

绝缘子泄漏距离指正常承受运行电压的二电极

间沿绝缘件外表面轮廓的最短距离,如图 27·2-17 中 A、B 两点间虚线所示距离。绝缘子泄漏距离一般以公称值表示。绝缘件表面如被复半导体釉,也包括在泄漏距离之内。多元件串接或叠装的绝缘子,其泄漏距离为各元件泄漏距离之和。表 27·2-6 分级方法还不够完善,分级还不够准确;对绝缘子的要求仅根据泄漏比距还不够全面,根据污秽量并通过污秽耐受试验来选择绝缘更为合理。

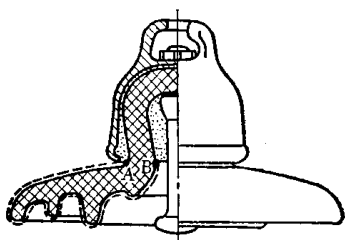


图27·2-17 绝缘子泄漏距离示例

## 第3章 高压绝缘子

### 1 绝缘子设计要点

绝缘子设计包括结构设计,电气、机械计算等,主要是经验设计,通常还着重于经过生产与运行实践的检验。由于瓷和玻璃制造工艺上的特点,绝缘子机电性能,特别是机械强度和工频击穿电压分散性比较大,设计时考虑的裕度要比一般机械零件设计的裕度大,并须注意设计工艺性。

#### a. 主要设计内容

(1) 结构型式选择:根据性能和使用要求,参照生产和运行经验,选择主体绝缘结构的型式(参见本章有关绝缘子各节)。

(2) 电气计算:根据电气性能要求(参见表 27·2-1 和表 27·2-2,表 27·3-9~27·3-11),确定闪络电压和工频击穿电压计算值,再查出闪络距离和击穿距离(参见第2章有关曲线)。

(3) 机械强度计算:根据机械性能要求,求出机械(或机电)破坏负荷计算值(参见本章第3节),确定主体结构尺寸(参见本章第3节及有关绝缘子各节),并选定绝缘件材料(参见第5章第1节)。

(4) 结构设计:进行设计时,注意设法使电场分布均匀,采取措施提高电气性能;充分发挥绝缘件的材料强度,选择合理的胶装结构(或卡台)与金属附件连接结构,避免应力集中,采取有利于提高其机械性能的措施;绝缘件、金属附件和胶合剂三者的机械强度应配合适当;黑色金属附件应有防锈层,特别是线路绝缘子,其附件表面应热镀锌。

b. 绝缘件设计工艺性 绝缘子的结构设计要考虑制造工艺性。设计不良导致制造困难,甚至无法加工。绝缘件设计应注意:

(1) 瓷件一般应设计成回转体,其内孔一般应为直孔。要避免出现不便于机械化自动化加工的槽、孔等结构。

(2) 各部分厚薄变化要均匀,避免尖锐边缘。

(3) 直径、高度和壁厚的比例要适当,细长结构容易弯曲变形,应予避免。

(4) 选择瓷件装烧支承面应注意重心平稳,且考虑该处不上釉对绝缘子性能影响不大。

(5) 模压制品应有一定的脱模斜度。

(6) 瓷件尺寸允许偏差值与制造工艺方法和制品尺寸有关。

### 2 胶装结构、卡台和伞棱

#### 2.1 胶装结构和卡台

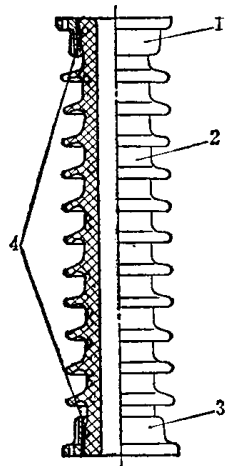
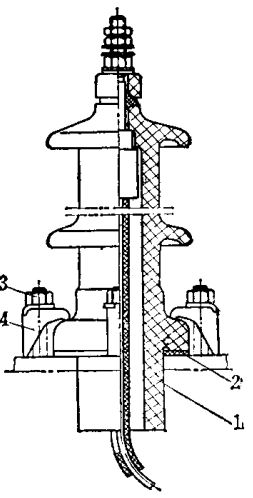
绝缘件与金属附件的连接,一般有胶装连接和卡装连接两种。

胶装连接使用广泛。胶合剂一般为水泥胶合剂,某些产品也可采用硫磺石墨胶合剂和密陀僧胶合剂等。为避免绝缘件、胶合剂和金属附件三者因热膨胀系数相差太大而引起开裂,绝缘件和金属附件同水泥胶合剂相接触的表面应涂以缓冲层(一般采用沥青);针式和盘形悬式绝缘子金属脚的顶端和二层绝缘件之间,要垫以弹性衬垫(例如油毡纸衬垫)。

卡装连接一般用于电容式套管和高压电器瓷套。

胶装和卡装的比较见表27·3-1。

表27·3-1 胶装和卡装的比较

| 连接结构及简图                                                                                                                                          | 特 点                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <div>胶装</div> <div></div> <div>1—上法兰 2—瓷件<br/>3—下法兰 4—胶合剂</div> | <div>1.对绝缘件尺寸精度一般无特殊要求, 安装调整较简单</div> <div>2.机械强度较高</div> <div>3.内胶装时各零件膨胀不同易引起开裂</div> |
| <div>卡装</div> <div></div> <div>1—瓷件 2—衬垫 3—紧固螺母和螺杆 4—压件</div> | <div>1.可拆卸</div> <div>2.机械强度较低</div> <div>3.要求卡装连接部位尺寸精确, 研磨工作量大, 安装调整较麻烦</div>         |

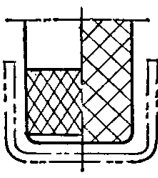
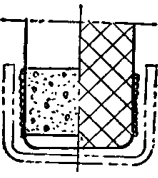
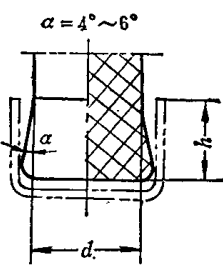
2.1.1 圆柱形绝缘子的胶装结构

(1) 瓷件胶装端结构特点及应用范围 (表27·3-2)

(2) 附件胶合面: 附件胶合面可以作成带锯齿形槽、圆弧形槽和不带槽等几种。为了提高扭转强度, 附件胶合面应带纵槽。配合瓷件胶装端锥形

上釉结构, 附件胶合面可作成锥形面, 但其锥角可比瓷件锥角小。

表27·3-2 瓷件胶装端结构特点及应用范围

| 胶装端结构及简图                                                                                                       | 特 点                                        | 应用范围                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|
| <div>辊花</div> <div></div>    | 工艺简单, 不易转动, 机械强度较低                         | 弯曲强度要求不高的产品以及抗扭结构中    |
| <div>上砂薄釉</div> <div></div>  | 机械强度较高, 不易转动, 但要增加上砂工序且易造成掉砂、粘砂等缺陷         | 弯曲和扭转强度要求较高的产品        |
| <div>锥形上釉</div> <div></div> | 工艺简单, 机械强度较高, 易转动, 但在锥形面下半部采取辊纵槽等措施, 可避免转动 | 广泛应用于支柱绝缘子、瓷横担以及电器瓷套中 |

(3) 胶装比的选择: 胶装比  $\lambda$  为瓷件胶装部位高度  $h$  与瓷件主体直径  $d$  之比, 即  $\lambda = h / d$ , 见表27·3-2简图。增大胶装比可明显地提高绝缘子机械强度, 但胶装比过大要增加绝缘子高度和附件重量。胶装比选择见表27·3-3。

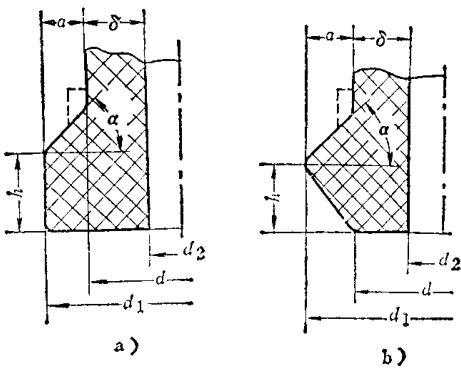
表27·3-3 胶装比的选择

| 机械强度要求 | 胶 装 比 $\lambda$ | 应 用 举 例             |
|--------|-----------------|---------------------|
| 低      | 0.25~0.4        | 套管、瓷套               |
| 中 等    | 0.5~0.7         | 支柱、瓷横担绝缘子           |
| 高      | >0.7            | 高强度绝缘子, 如充气式空气断路器瓷套 |

(4) 胶合缝宽度: 胶合缝宽度要小, 但是考虑到胶装部位零件尺寸的变化, 此缝隙不应小于2~3 mm。

2.1.2 卡台推荐规格 (表27·3-4)

表27·3-4 高压瓷套卡台推荐规格



图中虚线表示该部分径向尺寸要求较精确而需研磨的结构

|                      |                                                      |        |         |         |         |         |         |
|----------------------|------------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 瓷套杆径<br>mm $d$       | 50以下                                                 | 50~100 | 100~150 | 150~200 | 200~300 | 300~500 | 500~800 |
| 壁厚<br>mm $\delta$    | 5~15                                                 | 15~25  | 20~30   | 20~35   | 25~35   | 30~45   | 35~50   |
| 卡台伸出<br>mm $a$       | $a = (0.8 \sim 1) \delta$ 推荐: 10, 15, 20, 25, 30, 35 |        |         |         |         |         |         |
| 卡台高<br>mm $h$        | $h = (1 \sim 2) \delta$ 推荐: 18, 25, 35, 45, 60       |        |         |         |         |         |         |
| 卡台斜度<br>deg $\alpha$ | 推荐: 0, 15①, 30, 45①                                  |        |         |         |         |         |         |

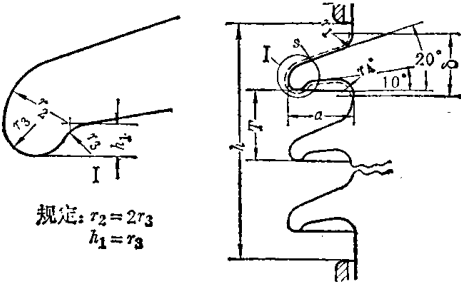
① 推荐优先采用。

2·2 伞 棱

2·2·1 标准伞棱规格

瓷横担绝缘子、棒形支柱绝缘子,套管和瓷套等圆柱形绝缘子的标准伞(或称伞裙)和标准棱的规格分别见表 27·3-5 和表 27·3-6。

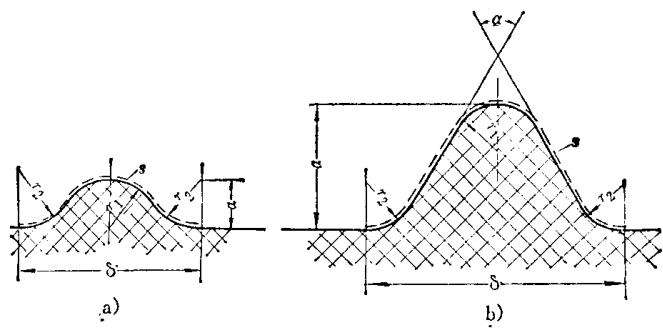
表27·3-5 标准伞的规格尺寸表



mm

|       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $a$   | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    | 55    | 60     | 65     | 70     | 75     | 80     | 85     |
| $r_1$ | 10    | 10    | 10    | 15    | 15    | 15    | 15    | 18     | 18     | 18     | 18     | 18     | 18     |
| $r_2$ | 8     | 8     | 8     | 10    | 10    | 10    | 10    | 12     | 12     | 12     | 12     | 12     | 12     |
| $r_3$ | 4     | 4     | 4     | 5     | 5     | 5     | 5     | 6      | 6      | 6      | 6      | 6      | 6      |
| $r_4$ | 6     | 7     | 8     | 8     | 9     | 10    | 10    | 12     | 13     | 14     | 14     | 15     | 15     |
| $h_1$ | 4     | 4     | 4     | 5     | 5     | 5     | 5     | 6      | 6      | 6      | 6      | 6      | 6      |
| $v$   | 42.01 | 50.83 | 59.65 | 68.30 | 77.12 | 85.93 | 95.39 | 103.12 | 111.94 | 120.76 | 130.21 | 138.03 | 148.49 |

表27-3-6 标准棱的规格尺寸表



mm

| 图        | a    |      |      |      | b     |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha$ | —    |      |      |      | 20°   |       |       |       | 30°   |       |       |       |
| $r_1$    | 4    | 5    | 6    | 6    | 4     | 5     | 5     | 4     | 5     | 5     | 5     | 5     |
| $r_2$    | 4    | 5    | 6    | 7    | 5     | 6     | 6     | 5     | 6     | 6     | 8     | 8     |
| $a$      | 4    | 5    | 6    | 6    | 15    | 20    | 25    | 15    | 20    | 25    | 30    | 35    |
| $v$      | 2.90 | 3.62 | 4.35 | 4.15 | 20.10 | 27.36 | 35.76 | 18.96 | 25.73 | 33.40 | 40.17 | 47.84 |

2.2.2 泄漏距离计算

伞棱应符合本章 2.2.1 节规定（见表 27.3-5 和表 27.3-6 的附图）。主体直径，伞棱外径上下相同的绝缘子，其泄漏距离可按下式计算：

$$L_x = nv + h \quad \text{mm} \quad (27.3-1)$$

式中  $n$  ——伞或棱数

$v$  ——一个伞或一个棱净增加的泄漏距离，

$v = s - \delta$  mm,  $v$  值可以从表 27.3-5 和表 27.3-6 中查得,  $s$  和  $\delta$  的意义见表 27.3-5 和表 27.3-6 附图

$h$  ——绝缘子二电极间直线距离 mm

3 绝缘子机械破坏负荷计算

3.1 额定破坏负荷

绝缘子在运行中要承受各种力的作用。为了保证绝缘子有一定的机械强度，一般根据其使用情况，对绝缘子提出了各种静的额定机械破坏负荷要求（见本章各有关性能表）。

3.2 破坏负荷计算值裕度

绝缘子机械破坏负荷测量结果一般也服从正态

分布规律，但其分散性比较大。影响因素除试品形状、尺寸误差和测试误差等外，主要为绝缘体材料不均匀性和制造工艺过程的不稳定。因此，机械破坏负荷的计算值（平均值）应比标准规定的额定值高，其裕度应视产品的重要性根据破坏负荷标准偏差来确定，见表 27.3-7。

表27-3-7 机械破坏负荷计算值裕度  
(额定破坏负荷为 100%)

| 产 品 类 别 | 破坏负荷测量值分布标准偏差 % | 破坏负荷计算值 % | 裕 度 % |
|---------|-----------------|-----------|-------|
| 盘形悬式绝缘子 | 10              | 125~130   | 25~30 |
| 其他绝缘子   | 26              | 135~140   | 35~40 |

3.3 破坏负荷计算公式和参数

破坏负荷计算公式和参数见表 27.3-8。

绝缘子机械破坏负荷与绝缘件、金属附件以及它们间的连接方式有关。表 27.3-8 仅指瓷件的机械破坏负荷计算，并考虑了附件的胶装比要求。表中危险断面是绝缘子在机械负荷作用下最可能发生破坏的断面。表中简图仅举出了最可能破坏的一个断面。