

第 5 篇

绝 缘 子、 避 雷 器

第 5 篇

绝 缘 子、 避 雷 器

主编单位 西安电瓷研究所

编写单位 西安电瓷研究所
西安高压电瓷厂

主 编 沈光汉 汪仁根

编 写 人 丘志贤 居季春 汪仁根

主 审 刘其昶 沈嘉禄 梁毓锦

常用符号表

BIL——基准冲击绝缘水平峰值

C ——电容

C_o ——回路主电容

C_n ——第 n 链电容

c_0 ——电磁波速度

D_{av} ——平均直径 (算术的)

E ——电场强度

e ——电子电荷

E_{sp} ——许用轴向场强

E_{fa} ——轴向闪络场强

E_{faw} ——潮湿表面部分工频湿闪络电压梯度

E_{rm} ——最大径向场强

E_{rp} ——许用径向场强

F ——风压力

F_b ——机械破坏力

F_{br} ——额定机械破坏力

f_{pn} ——额定工业频率

H ——避雷器高度

I ——电流有效值

I_i ——续流峰值

I_{kn} ——额定短路电流有效值

I_1 ——雷电流峰值

I_n ——标称放电电流峰值

I_{pr} ——预期放电电流峰值

I_r ——额定电流

I_{ref} ——参考电流峰值

I_s ——操作冲击电流峰值

J_r ——电流密度

L_o ——回路主电感

L_c ——爬电距离

L_d ——干闪络距离

L_g ——湿闪络距离的空气间隙部分

L_i ——绝缘长度

L_n ——第 n 链电感

L_R ——额定电感

L_w ——湿闪络距离的潮湿表面部分

l_1 ——线路长度

M_b ——破坏扭矩

M_{br} ——额定破坏扭矩

P_{1CT}, P_{2CT} ——老化试验开始和结束时在 U_{CT} 下的功率损耗

P_{1r}, P_{2r} ——老化试验开始和结束时在 U_r 下的功率损耗

p ——伞伸出

p_b ——破坏内压力

p_{br} ——额定破坏内压力

S ——避雷器的风向投影面积

s ——伞间距

T ——热力学温度

电流的视在持续时间

t ——电流持续时间

U_a ——试验工频电源电压有效值

工频电压

U_c ——持续运行电压有效值

U_{CT} ——加速老化试验电压有效值

U_d ——直流电压

U_i ——续流下的电压降峰值

U_{fa} ——工频闪络电压

U_{fad} ——工频干闪络电压

U_{faw} ——工频湿闪络电压

U_{iml} ——雷电过电压峰值

U_1 ——雷电冲击电压

U_{LC} ——试验回路充电电压峰值

U_{lm} ——系统最大线电压有效值

U_{150} ——50%雷电冲击闪络电压峰值

U_m ——设备最高电压

U_{oc} ——系统中性点电压有效值

U_{pa} ——工频击穿电压

U_{par} ——额定工频击穿电压

U_{phm} ——系统最大相电压有效值

U_{pr} ——预期操作过电压峰值

U_r ——避雷器额定电压有效值

绝缘子额定电压有效值

U_{ref} ——参考电压

U_{res} ——残压峰值

U_s ——操作冲击电压

U_{s50} ——50%操作冲击闪络电压
 U_{sd50} ——50%操作冲击干闪络电压
 U_{sw50} ——50%操作冲击湿闪络电压
 U_{wa} ——工频耐受电压
 U_{wad} ——工频干耐受电压
 U_{war} ——额定工频耐受电压
 U_{waw} ——工频湿耐受电压
 U_{wd} ——直流耐受电压
 U_{wdd} ——直流干耐受电压
 U_{wdr} ——额定直流耐受电压
 U_{wdw} ——直流湿耐受电压
 U_{wl} ——雷电冲击耐受电压
 U_{wlr} ——额定雷电冲击耐受电压
 U_{ws} ——操作冲击耐受电压
 U_{wsd} ——操作冲击干耐受电压
 U_{wsr} ——额定操作冲击耐受电压
 U_{wsw} ——操作冲击湿耐受电压
 U_{1mA} ——直流 1mA 下的电压
 u_r ——单间隙承担的额定电压有效值

V_0 ——基本风速
 W ——线路放电试验时试品吸收的能量
 X_0 ——零序电抗
 X_1 ——正序电抗
 Z_0 ——线路波阻抗
 Z_c ——测试耦合阻抗
 Z_{et} ——阻塞阻抗
 Z_t ——检测阻抗
 α ——伞倾角
 空气动力系数
 β ——非线性系数
 δ ——击穿距离
 λ ——胶装比
 台阶长度
 爬电比距
 σ_{av} ——平均破坏应力（算术的）
 σ_b ——机械破坏应力
 ϕ_b ——势垒

第 1 章 绝缘子概述

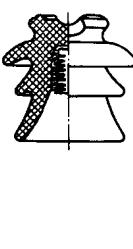
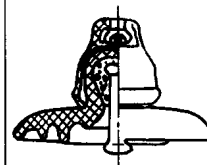
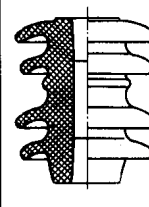
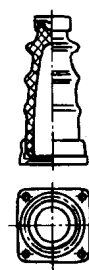
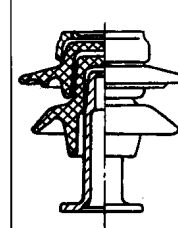
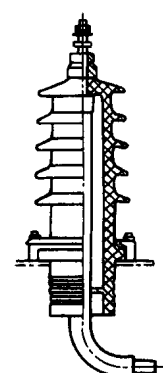
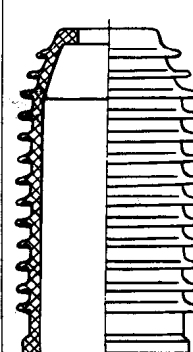
1 绝缘子的用途和分类

绝缘子是供处在不同电位的电气设备或导体电气绝缘和机械固定用的器件，是输配电设备中的重要元器件。其分类见表 5·1-1 和表 5·1-2。

瓷和玻璃绝缘子是目前广泛使用的绝缘子，但在要求特殊的场合，如在气体绝缘开关设备（GIS）中已

广泛采用环氧树脂浇铸的绝缘子，户外也在部分地应用复合绝缘子。GIS 用环氧树脂绝缘子的特点是形状复杂和尺寸小（适应小尺寸气体管道中的极高电场强度的要求）；并能耐受 SF₆ 分解产物的作用。复合绝缘子的特点是尺寸小、重量轻和机械强度高，给运输、安装和维护带来极大方便，并为简化杆塔结构和紧凑型线路的发展提供了良好的条件（GIS 用绝缘子参见第

表 5·1-1 绝缘子按用途和结构分类

类别名称	线路绝缘子			电站、电器绝缘子		
用途	架空电力线路、电气化铁道牵引线路			电站和电器		
结构	针式	盘形悬式	蝶式	隔板支柱	针式支柱	套管
可击穿型 (B 型)						
结构	线路柱式	长棒形	横担	棒形支柱	空心绝缘子	
不可击穿型 (A 型)						

3 篇第 11 章)。

表 5·1-2 绝缘子按其它方式分类

分类依据	类 别
电压种类	交流绝缘子：用于交流电压 直流绝缘子：用于直流电压
电压高低	高压绝缘子：额定电压 $U_r > 1\text{kV}$ 低压绝缘子：额定电压 $U_r \leq 1\text{kV}$
主绝缘材料	瓷、玻璃、有机材料绝缘子 复合绝缘子：主绝缘至少由两种绝缘材料构成
击穿可能性	A 型绝缘子： $\delta/L_d \geq 1/3$ （浇铸树脂）或 $1/2$ （其它材料），见图 5·1-1a B 型绝缘子： $\delta/L_d < 1/3$ （浇铸树脂）或 $1/2$ （其它材料），见图 5·1-1b

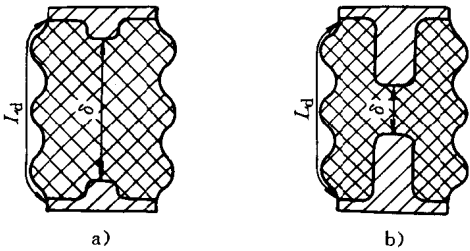


图 5·1-1 A 型和 B 型绝缘子

a) A 型绝缘子 b) B 型绝缘子

L_d —干闪络距离（经由绝缘体外部空气的最短闪络距离）

δ —击穿距离（经由绝缘体固体绝缘材料内的最短击穿距离）

同样，在高压套管中也在广泛应用 SF_6 气体绝缘套管和 SF_6 -油套管等。

2 绝缘子的运行条件和对它的要求

绝缘子在运行中受到下列各种负荷的作用

电气负荷：工作电压和各种过电压、工作电压下的电晕和局部放电、故障条件下的电弧放电、高电压下的介质损耗、直流电压下的离子迁移和热破坏等；

机械负荷：导线或导电部件的重量、绝缘子自重、覆冰重量、导线张力、风力、设备操作机械力、短路时的电动力、电器内部的气体压力、导电部件或设备的振动以及地震等；

热负荷：周围空气的高温、低温以及温变作用，电器设备内部绝缘气体或绝缘油的高温作用，从导电部件通过的额定电流或短路电流的热效应等；

其他环境作用因素：如各种降水过程（雾、露、毛毛雨、小雨、暴雨、冰、雪等），空气中的水分，阳光（尤其是阳光中的紫外线），空气中的氧和臭氧以及其他气体（如二氧化硫）和沉降物，电气设备内的各种油（如变压器油）和气体（如 SF_6 ）等。

实际上，绝缘子在运行中常受到上述各种作用因素的联合作用，如盘形绝缘子在电气、机械、热和环境作用因素的长期反复作用下，一般其机电强度逐渐下降，复合绝缘子外套在潮湿、局部表面放电以及紫外线的照射下产生起痕、蚀损，严重的可导致芯杆暴露在大

气中，最后引起击穿、断裂等。

为此，对绝缘子提出了各种性能和可靠性（寿命）要求。性能要求可概括为电气性能、力学性能和热性能等。

绝缘子常因其价格较低廉而忽视其可靠性要求。实际上，由于其用量极大，其可靠性对电力系统的正常运行关系非常密切。制造部门需加强制造过程的全面质量管理，进行各种提高可靠性的筛选和寿命试验；安装和运行部门需正确安装和加强维护、监测，才能不断提高产品的可靠性。

第 2 章 绝缘子的电气性能和计算

1 绝缘子的额定耐受电压标准值

交流绝缘子的电气性能要求是根据三相交流高压电力设备绝缘配合的原则确定的。其中电站、电器绝缘子的耐受电压见表 5·2-1；线路绝缘子的电气性能要求参见本篇第 3 章；外绝缘污秽性能参见本篇第 6 章。

额定耐受电压值的使用条件见表 5·2-1；

最高环境气温不超过 $+40^\circ\text{C}$ ；

安装地点海拔不超过 1000m。

额定耐受电压值是指标准参考大气（温度 20°C ，压力 101.3kPa，绝对湿度 $11\text{g}/\text{m}^3$ ）条件下试验的。

外绝缘额定干耐受电压温度校正因数 K_t ：对环境气温高于 40°C 处的设备，其外绝缘在干燥状态下的试验电压应取表 5·2-1 额定耐受电压乘以温度校正因数

K_t

$K_t=1+0.0033(t-40)$

式中 t ——环境空气温度 (℃)。

外绝缘额定耐受电压海拔校正因数 K_a ：对海拔高于 1000m 但不超过 4000m 处的设备的外绝缘，其试验电压应取表 5·2-1 额定耐受电压乘以海拔校正因数 K_a 。

$K_a=1/(1.1-H\times10^{-4})$

式中 H ——设备安装点的海拔 (m)。

本篇第 3 章线路绝缘子额定耐受电压值的使用条件、标准参考大气以及温度、海拔校正适用上面的规定。

外绝缘破坏性放电试验大气校正因数参见基础卷 (一) 第 5 篇第 8 章 4 节。

表 5·2-1 电站电器绝缘子的额定耐受电压标准值^{[1][2]} (kV)

绝缘子额定电压 U_n (有效值)	绝缘子最高电压 U_m (有效值)	额定工频一分钟 耐受电压 (有效值)		额定雷电冲击 耐受电压 (峰值)			额定操作冲击耐 受电压，干和湿① (峰值)	
		内绝缘，干		变压器和 电抗器套 管，全波	变压器套 管，截波	其他套管 和支柱绝 缘子， 全波	套管	支柱 绝缘子
		变压器和 电抗器 套管	其他 套管					
6	7.2	26	23	60	65	60	—	—
10	12	37	30	75	85	75	—	—
15	17.5	—	40	—	—	105	—	—
20	24	58	50	125	140	125	—	—
35	40.5	90	80	200	220	185	—	—
66	72.5	147	140	325	360	325	—	—
110	126	220	185	480	530	450	—	—
220	252	395	360	850	935	850	—	—
		435	395	950	1050	950	—	—
330	363	485	460②	1050	1175	1050	850	850
		535	510②	1175	1300	1175	950	950
500	550	660	630②	1425	1550	1425	1050	1175
		715	680②	1550	1675	1550	1175	1240
		—	740②	—	—	1675	—	—

① 湿耐受电压仅对户外外绝缘有此要求。

② 仅对套管。

2 绝缘子的耐受电压和闪络电压

2·1 绝缘子的耐受电压和闪络电压计算值

绝缘子闪络电压一般为正态分布，其概率分布函数用 50% 闪络电压 (即均值) 和标准偏差 $\sigma^\ominus$ 来表示。

绝缘子的耐受电压是指具有一定耐受概率的电压值，因此它与耐受试验方法有关，即与试验时电压施加

持续时间、电压施加次数以及允许闪络次数等有关。

绝缘子电气计算时，一般将其额定耐受电压增加一定裕度后求出闪络电压计算值，再从本章以下各节中给出的闪络电压曲线中找出闪络距离。根据我国标准 GB311.2^[3] 和 GB775.2^[4] 等规定的耐受电压试验方法，闪络电压计算值推荐于表 5·2-2。

⊖ 此标准偏差 σ 是相对于分布的均值的百分比。

表 5-2-2 闪络电压计算值与额定耐受电压值的
推荐关系 (额定耐受电压为 100%)

电 压 种 类	闪络电压分布 标准偏差 σ (%)	闪络电压 计算值① (%)	裕度 (%)
工频电压	5	118	18
雷电冲击电压	3	110	10
操作冲击电压	6	123	23

① 考虑到试验的重复性和再现性,取耐受概率为 99.9% 的电压值作为额定耐受电压,因而此计算值为额定耐受电压的 $1/(1-3.08\sigma)$ 倍。

2.2 影响绝缘子电气特性的因素

影响绝缘子电气特性的因素参见基础卷(一)第 5 篇第 3 章 6 节。

2.2.1 试验方法对闪络电压的影响 (表 5-2-3)

表 5-2-3 试验方法对闪络电压的影响

影响因素	影 响 情 况
淋 雨 电压 种类	一般情况下工频湿闪络电压比干闪络电压低得多,操作冲击时湿闪络电压比干闪络电压稍低,雷电冲击时淋雨一般无影响(或稍有降低)

(续)

影响因素	影 响 情 况
淋 雨 雨水电阻 率和雨强	湿闪络电压随雨水电阻率降低而升高,随雨强减小而增大,如标准雨强 1~2mm/min 时比雨强 3mm/min 时稍高
冲击电压 波形	闪络电压在 1.2/50 冲击时比 1.5/40 冲击时略高;操作冲击闪络电压与波前时间关系呈 U 形曲线 ^[5]
冲击电 压极性	冲击闪络电压一般负极性时较高,有的高得多些,有的略高 ^[6]
支柱绝缘子 安装高度	直立安装时支柱绝缘子底座离地越高冲击闪络电压越高,特别是操作冲击时更是如此 ^[7]

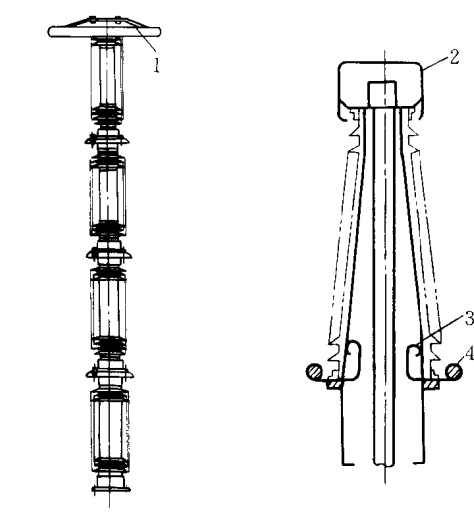
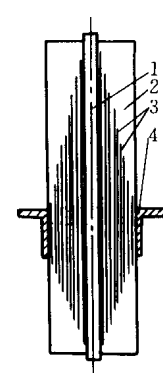
2.2.2 电极布置对电气特性的影响

绝缘子的闪络电压常介于两种典型的电极布置棒-棒和棒-板电极布置的闪络电压之间。对于两电极毗邻布置的支柱式电极布置,当其两电极大小相同时(如长棒形绝缘子),其闪络电压接近棒-棒电极布置的闪络电压,对一电极比另一电极大的支柱式电极布置以及套管电极布置,其闪络电压接近棒-板电极布置的闪络电压。套管电极布置属插入式结构,存在滑闪放电问题,此时仅用增大表面距离的办法来提高闪络电压,其效果不大。电极布置对电气特性影响见表 5-2-4。

表 5-2-4 电极布置对电气特性的影响

电 极 布 置	影 响 情 况	备 注
将电极嵌入 固体绝缘材料 内部	降低介质交界面处电 场强度,提高沿面闪络 电压 a) 户内联合胶装支柱绝缘子 b) GIS 用绝缘子	1—电极 2—固体绝缘材料 φ —电位分布百分数

(续)

电极布置	影响情况	备 注
装均压环或屏蔽装置	 a) 棒形支柱绝缘子 b) SF₆ 套管	1—均压环 2—顶部屏蔽 3—圆筒形喉道状屏蔽 4—底部屏蔽
应用电容式套管原理		1—高压电极 (导电杆或管) 2—绝缘介质 3—极板 4—接地电极
支柱绝缘子元件布置	1. 多元件的雷电冲击闪络电压梯度较单元件的高 (见图 5·2-9 和图 5·2-10) 2. 绝缘子柱总高相同时, 元件高度较大者其操作冲击闪络电压较高 ^[6]	

2·2·3 闪络距离和伞棱的影响

典型绝缘子的闪络距离取值法见图 5·2-1~图 5·2-3。盘形绝缘子串的干闪络距离 L_d 近似等于其串长 (图 5·2-2 的 nH)。绝缘子柱的干闪络距离近似等于各元件净距 (电极间直线距离, 图 5·2-3c 的 S_1 和 S_2) 之和。绝缘子的湿闪络距离由空气间隙部分 L_g 和潮湿表面部分 L_w 组成。

闪络距离和设置伞棱对电气特性影响见表 5·2-5。

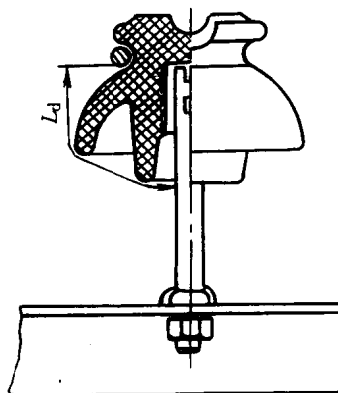


图 5·2-1 针式绝缘子的干闪络距离

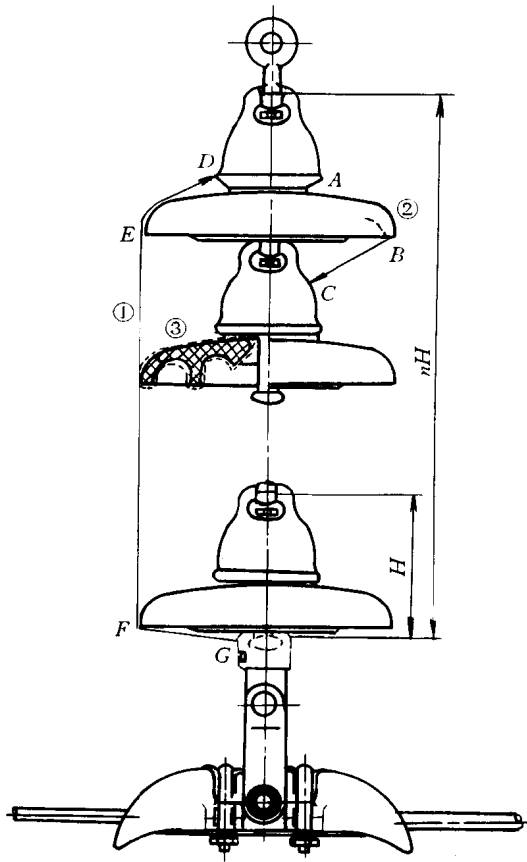


图 5-2-2 盘形悬式绝缘子串的闪络距离和闪络路径

$$L_d = \widehat{DE} + \widehat{EF} + \widehat{FG} \approx nH \quad L_g = n \widehat{BC} \quad L_w = n \widehat{AB}$$

①、②、③—闪络路径

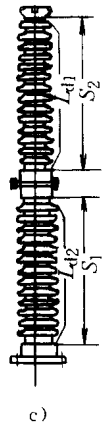
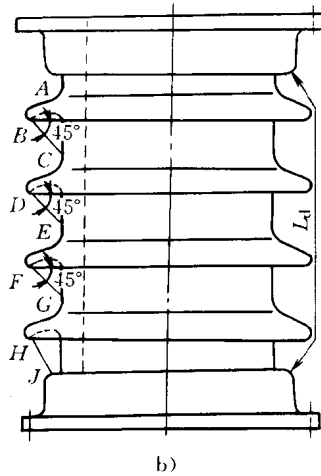
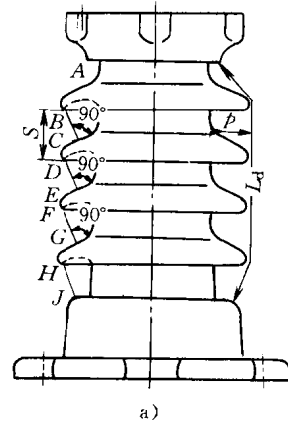


图 5-2-3 支柱绝缘子和空心绝缘子的闪络距离

a) 伞间距小时 b) 伞间距大时

$$L_g = \widehat{BC} + \widehat{DE} + \widehat{FG} + \widehat{HJ} \quad L_g = \widehat{BC} + \widehat{DE} + \widehat{FG} + \widehat{HJ}$$

$$L_w = \widehat{AB} + \widehat{CD} + \widehat{EF} + \widehat{GH} \quad L_w = \widehat{AB} + \widehat{CD} + \widehat{EF} + \widehat{GH}$$

c) 支柱绝缘子柱

$$L_d = L_{d1} + L_{d2} \approx S_1 + S_2$$

表 5-2-5 闪络距离和伞棱对电气特性的影响

影响因素	影响情况
闪络距离 L_d 、 L_g 、 L_w	干闪络电压随 L_d 的增大而升高；湿闪络电压随 L_g 和 L_w 的增大而升高
伞的参数①对工频湿闪络电压 U_{faw} 的影响	1. 伞伸出 p 的影响： p 较小时，伞下易被淋湿，因而 L_g 较小， L_w 起主要作用； p 较大时， L_g 较大， U_{faw} 升高 2. 伞倾角 α 的影响： $\alpha = 20^\circ \sim 30^\circ$ 时， U_{faw} 较高； α 继续增大时， U_{faw} 下降 3. 伞数 n 的影响： n 增大时， U_{faw} 升高，但当 $p/s \approx 0.5$ 时，放电沿伞间气隙发展， U_{faw} 趋于饱和
盘形绝缘子 H/D 对湿闪络电压的影响	盘形绝缘子串湿闪络电压随其元件高度 H 对盘径 D 之比 H/D 的增加而降低 ^[8]
伞棱对滑闪电压或冲击闪络电压的影响	伞棱可以阻止放电的发展，明显提高滑闪电压或冲击闪络电压。例如，在 35kV 及以下户内支柱绝缘子上端高压电极附近设置伞棱，20、35kV 穿墙套管靠近接地电极中间法兰部位设置大伞裙并覆盖半导体釉

① 伞的参数 p 、 s 、 α 等意义参见本篇第 6 章 4.1 节。

3 绝缘子的闪络电压特性曲线

本节给出的闪络电压特性曲线一般是指按 GB311.2 和 GB775.2^{[3][4]} 以及有关产品标准规定的试验条件下测得的闪络电压均值曲线(回归线),不同的试验条件在图中指明。

3.1 针式瓷绝缘子的闪络电压特性 (图 5.2-4)^[9]

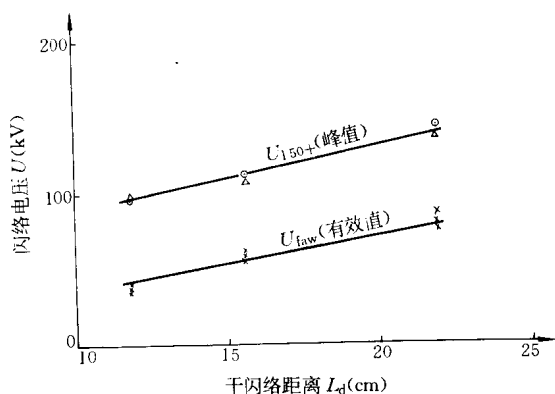


图 5.2-4 针式瓷绝缘子的闪络电压曲线

×—工频湿闪络, 西安电瓷所 ○—50%雷电冲击闪络, 武汉高压研究所 △—50%雷电冲击闪络, 西安电瓷所

3.2 盘形悬式瓷或玻璃绝缘子串的闪络电压特性

盘形绝缘子串闪络电压特性见图 5.2-5~图 5.2-7, 其中有带均压环和不带均压环的两种。超高压绝缘子串一般带有均压环, 以均匀电压分布, 减少电晕放电和无线电干扰。

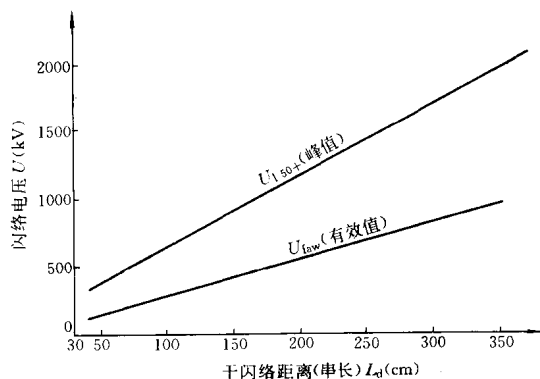


图 5.2-5 无均压环盘形绝缘子串的闪络电压曲线

$U_{150+} = 5.33L_d + 110$ (kV) (峰值) (冲击电压波形 1.5/40)

$U_{1aw} = 2.72L_d + 8$ (kV) (有效值) (雨强 3mm/min)

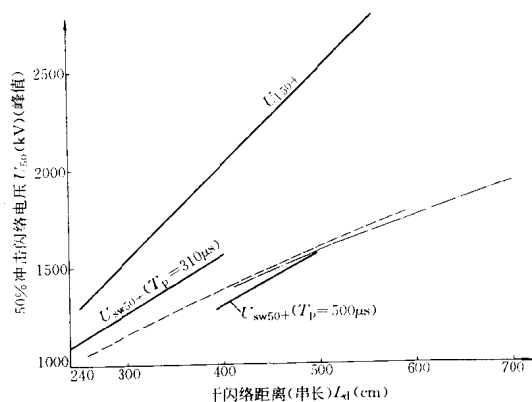


图 5.2-6 带均压环盘形绝缘子串的闪络电压曲线

$U_{150+} = 4.87L_d + 76$ (L_d 单位 cm, 1.5/40 冲击) U_{sw50+} ($T_p = 310\mu s$) (摘自参考文献 [10] 第 6 页, PI-330 型屏蔽环) U_{sw50+} ($T_p = 500\mu s$) (摘自参考文献 [11], 刘关线 330kV 椭圆形均压环) ---- U_{sw50+} ($T_p = 100 \sim 200\mu s$), (摘自参考文献 [12] 第 23 页, 250mm 盘形绝缘子) - · - · -

$U_{sw50+} = 1.2 \times 500L_d^{0.6}$ (L_d 单位 m, 120/4000 冲击)

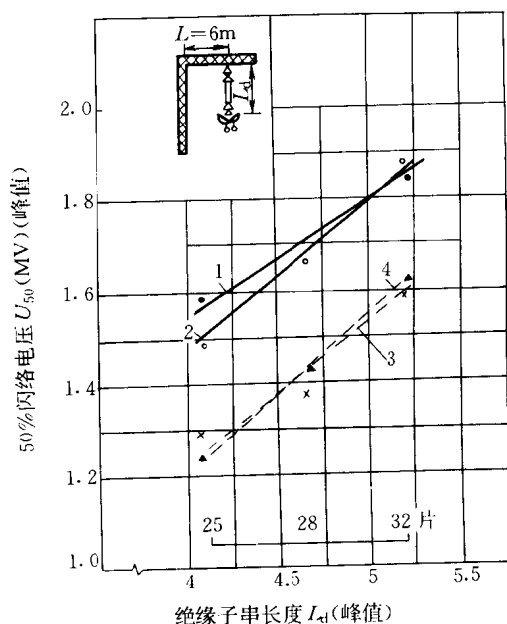


图 5.2-7 绝缘子串 XP-160 工频及操作冲击闪络电压曲线

1—+500/5000 冲击, 干 2—工频电压, 干

3—+500/5000 冲击, 湿 4—工频电压, 湿

(摘自参考文献 [11] 第 11 页, 湿试验时雨强为 3mm/min)

3.3 瓷横担和户外棒形支柱瓷绝缘子的闪络电压特性

3.3.1 工频湿闪络电压

普通伞裙的圆柱形绝缘子^①垂直安装时的工频湿闪络电压 U_{faw} 可按下式估算：

$$U_{faw} = 3L_g + E_{faw}L_w \quad \text{kV (有效值)} \quad (5.2-1)$$

式中 L_g 、 L_w ——湿闪络距离的空气间隙部分和潮湿表面部分长度 (cm)；

E_{faw} ——工频湿闪络电压 (有效值) 梯度 (kV/cm)。

上述计算公式 L_g 和 L_w 适用范围为 7~125cm。

E_{faw} 见图 5.2-8。

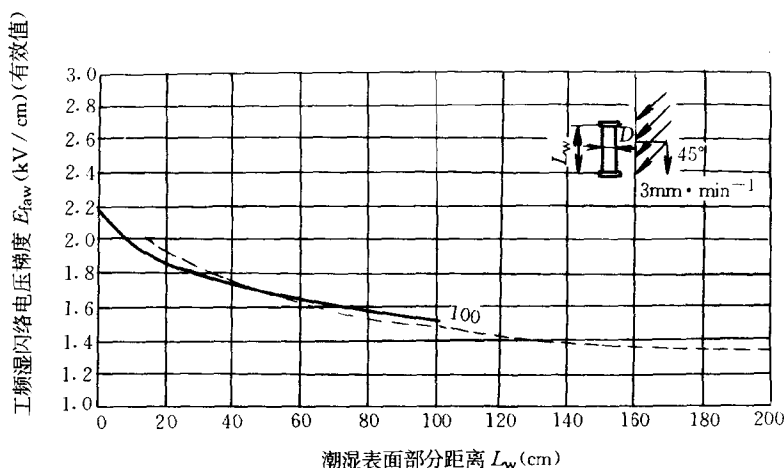


图 5.2-8 普通伞裙绝缘子垂直安装时工频湿闪络电压梯度 E_{faw}

——实测值 -----计算值

(摘自参考文献 [13] 第 977 页)

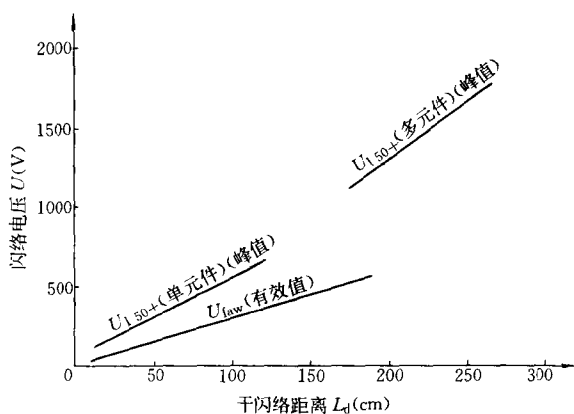


图 5.2-9 户外棒形支柱绝缘子的工频湿闪络和雷电冲击闪络电压曲线

$$U_{150+} = 5L_d + 55 \quad (\text{对单元件}) \quad (\text{kV}) \quad (\text{峰值})$$

(冲击电压波形 1.5/40)

$$U_{faw} = 2.92L_d + 7 \quad (\text{kV}) \quad (\text{有效值})$$

(雨强 3mm/min)

户外棒形支柱绝缘子伞裙设计时 p/s 常取 0.55~0.8, 以增大爬电距离, 此时湿闪络电压取决于 L_d , 见图 5.2-9。

带棱^②圆柱形绝缘子垂直安装时, 其工频湿闪络电压亦可按式 (5.2-1) 估算, 但此时 $L_g = 0$, $L_w = L_c$ (L_c —爬电距离)。带棱圆柱形绝缘子被淋雨时, 绝缘件表面全被淋湿, 而且雨水连成水流, 水流截面自上而下逐渐增大, 因此其湿闪络电压比伞裙绝缘子的低得多。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。

带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：

$$U_{faw} = 1.47L_c + 27 \quad (\text{kV}) \quad (\text{有效值}) \quad (5.2-2)$$

式中 L_c ——爬电距离 (cm)。

① 圆柱形绝缘子包括圆柱形和近似圆柱形的绝缘子, 如瓷横担和户外棒形支柱绝缘子, 以下同。

② 棱一般是指没有保护爬电距离部分的伞裙, 有保护爬电距离部分的称为伞 (裙)。

上式适用于爬电距离范围为20~180cm。水平安装湿试验时,绝缘件表面全被淋湿,但雨水不会连成水流,对湿闪络电压无影响,因此,水平安装时采用多棱绝缘子即可满足要求。

3.3.2 雷电和操作冲击闪络电压

无均压环户外棒形支柱绝缘子和瓷横担绝缘子的雷电冲击闪络电压,分别见图5-2-9和图5-2-10。带均压环的户外棒形支柱绝缘子的雷电冲击闪络电压和操作冲击湿闪络电压见图5-2-11。

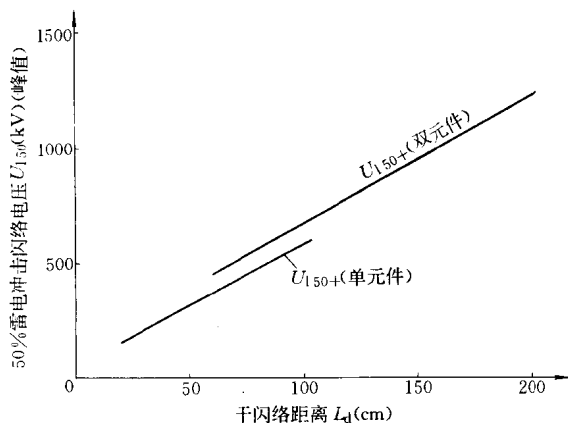


图5-2-10 瓷横担绝缘子的50%雷电冲击闪络电压曲线
 $U_{I50+}=5.34L_d+46$ (单元件) (kV) (峰值)
 $U_{I50+}=5.55L_d+117$ (双元件) (kV) (峰值)
 (本图冲击电压波形为1.5/40)

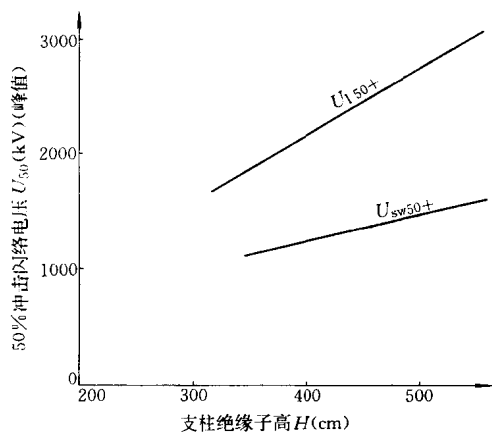


图5-2-11 带均压环的户外棒形支柱绝缘子的闪络电压曲线
 U_{I50+} —1.5/40冲击 U_{sw50+} — $T_p=500\mu s$ 操作冲击,底座安装面离地高2.5m,雨强3mm/min

3.4 户内支柱瓷绝缘子的闪络电压特性 (图5-2-12)

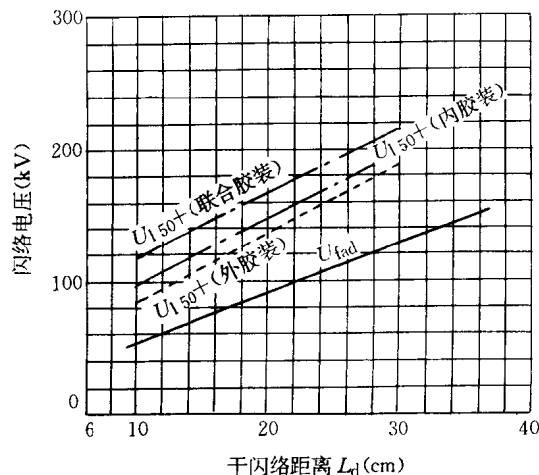


图5-2-12 户内支柱瓷绝缘子的闪络电压曲线
 $U_{Ind}=3.73L_d-16$ (kV) (有效值)
 $U_{I50+}=5L_d+66$ (联合胶装) (kV) (峰值)
 $U_{I50+}=5L_d+45$ (内胶装) (kV) (峰值)

3.5 空心瓷绝缘子的闪络电压特性

空心绝缘子的闪络电压曲线见图5-2-13和图5-2-14。图5-2-13适用于500kV及以下的空心绝缘子及套管的外绝缘。图5-2-14适用于超高压断路器用空心绝缘子,从该图可看出,负极性操作冲击湿闪络电压是决定性因素。

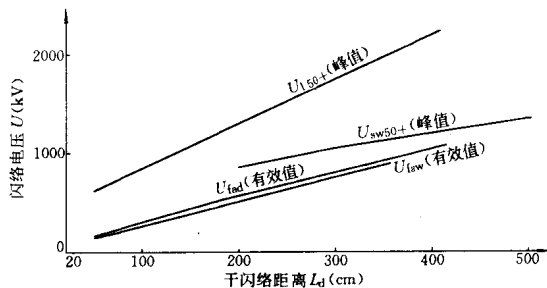


图5-2-13 空心绝缘子和套管绝缘套闪络电压曲线
 $U_{I50+}=5.2L_d+60$ (kV) (峰值)
 (摘自参考文献[14] 99页)

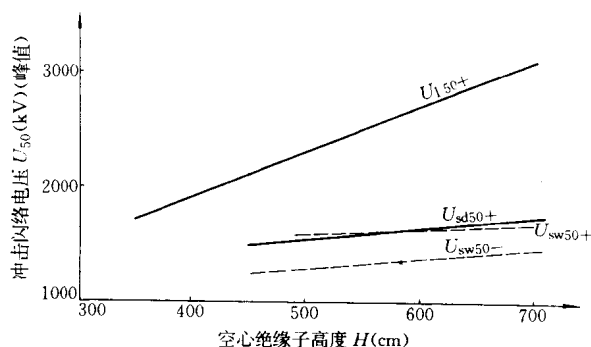


图 5·2-14 断路器空心绝缘子冲击闪络电压曲线
(摘自参考文献 [15] 低罐空气断路器部分。冲击电压波形：
雷电冲击 1.5/40，操作冲击 500/5000，雨强：3mm/min)

3·6 复合长棒形绝缘子外绝缘闪络电压特性

复合长棒形绝缘子外绝缘闪络电压特性见图 5·2-15~图 5·2-17。

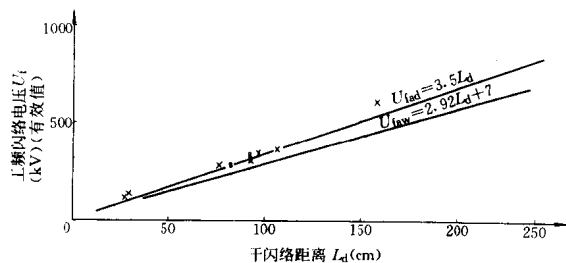


图 5·2-15 复合绝缘子工频闪络电压曲线
工频闪络电压实测点：○—西安电瓷所 ×—德国 Hermsdorf
联合陶瓷厂 (摘自参考文献 [16] 131 页)

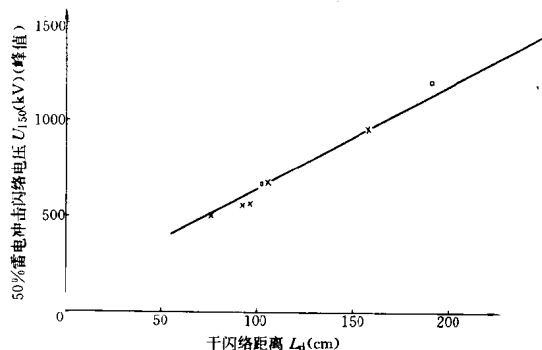


图 5·2-16 复合绝缘子 50% 雷电冲击闪络电压曲线
曲线：摘自参考文献 [17] 877 页图 8
实测点：□—武汉高压研究所 (摘自参考文献 [18]
47 页) ×—德国 Hermsdorf 联合陶瓷厂，正极性
(摘自参考文献 [16] 131 页)

从上述曲线图可以看出，长棒形复合绝缘子外绝缘的闪络电压特性是与瓷绝缘子相类似的（耐污性能例外），至少工频干闪络、雷电冲击和操作冲击闪络特性是这样的。

为了使沿轴向的电压分布变得较均匀，在两端附件处应装上适当的电压递减装置，如防晕环。根据国际上的运行经验，至少 220kV 级线路侧应装上防晕环。可参考文献 [23] 提出的复合长棒形绝缘子的屏蔽附件的最佳尺寸，该文认为采用双环屏蔽附件效果比单环屏蔽附件好得多。

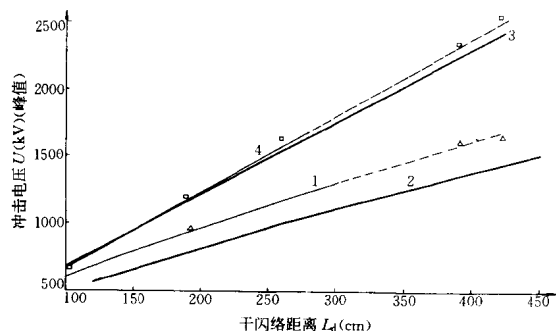


图 5·2-17 复合绝缘子的雷电和操作冲击电压曲线
曲线 1: U_{ad50+} , 250/2500 冲击，长棒形瓷绝缘子 LF75/16 和 LS75/21 (摘自参考文献 [19] 389 页)
2: U_{sw50} , 250/2500 冲击，复合绝缘子 (摘自参考文献 [20] 475 页)
3: U_{150+} , 1.2/50 冲击，长棒形瓷绝缘子 (摘自参考文献 [21] 22 页)
4: U_{w1} , 1.2/50 冲击，长棒形瓷和玻璃绝缘子，(摘自参考文献 [22] 11 页图曲线 (b))
武汉高压研究所实测点 (摘自参考文献 [18] 47 页):
□— U_{150} , 1.2/50 冲击
△— U_{sw50} , 250/2500 冲击

4 瓷或玻璃绝缘子的工频击穿电压特性

对于 B 型绝缘子，由于其存在着沿固体绝缘材料内部击穿的可能性，因此一般要求沿固体绝缘材料内部击穿的电压应比沿外部空气闪络的电压高。例如，对于 35kV 及以下的电站支柱瓷绝缘子以及穿墙瓷套管，其额定工频击穿电压一般为其额定工频耐受电压的 1.75 倍。

根据国内一些工厂生产的绝缘子的抽样试验数据所得的经验曲线见图 5·2-18。图中击穿距离 δ 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 5·2-19。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。由两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 δ 系指各层瓷件厚度的和(其每层瓷件厚度一般不超过 1.5~2.5cm)。对于盘形悬式绝缘子,图 5·2-19 中击穿距离常指绝缘件顶部厚度。

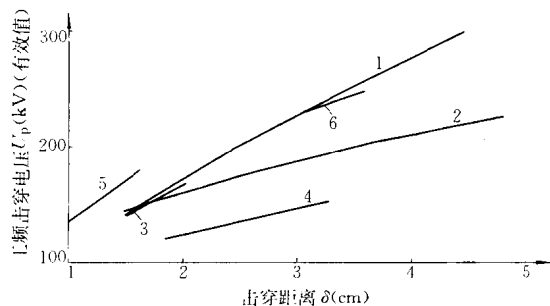


图 5·2-18 绝缘子工频击穿电压曲线

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 6—带均压层纯瓷穿墙套管

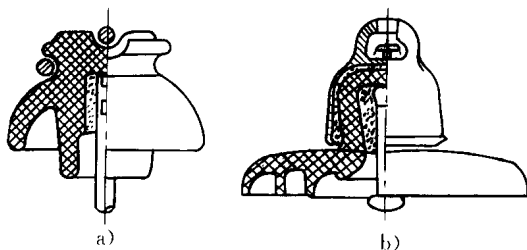


图 5·2-19 绝缘子易击穿部位示例

a) 针式绝缘子 b) 盘形悬式绝缘子

绝缘子工频击穿电压分散性比闪络电压分散性大得多,其工频击穿电压计算值见表 5·2-6。

表 5·2-6 工频击穿电压计算值与额定击穿电压的关系 (额定击穿电压为 100%)

击穿电压测量值分布 标准偏差 σ (%)	工频击穿电压计算值 (%)	裕度 (%)
11	120~125	20~25

第3章 绝缘子的结构设计

绝缘子是由绝缘件和金属附件通过适当的连接方法构成的。绝缘子的结构设计主要就是整体结构的设计和绝缘部件、金属部件以及它们间的连接结构的设计。

1 绝缘部件

1.1 材料选择和形状尺寸设计

1. 材料选择 应考虑绝缘子的运行条件和机械负荷大小选取适当的绝缘材料。例如,一般运行条件下的交流绝缘子应根据机械强度选取硅质瓷、铝质瓷或相应的玻璃绝缘材料;高强度悬式绝缘子还要考虑耐电弧问题。直流绝缘子应选择直流电压下不易老化的材料。有机材料绝缘子,特别是使用于六氟化硫(SF_6)绝缘气体中时,要求其机械强度高并能耐受 SF_6 及其分解产物的作用,形状尺寸能适应于强电场下工作,即要求其能制成较复杂的形状且尺寸要小,因此要选用环氧树脂材料。对于复合绝缘子,要考虑户外条件下耐气候和耐电老化问题等。绝缘材料性能参见

基础卷(一)第6篇第8章11节。选择一般材料标准中给出的材料强度时应该注意到,该标准中给出的机械强度值是小试样上的值,而材料强度值是随直径增大而下降的,参见本章3节。

2. 形状尺寸设计 绝缘子闪络距离、击穿距离以及电极布置按本篇第2章确定。瓷件伞棱、卡台等设计参见本章1.2节~1.4节以及本篇第6章4.1节。应选取合理的绝缘件受力部位的形状尺寸,使绝缘件尽可能处于受压状态,尽量避免或减少应力集中。

3. 瓷件设计的工艺性 瓷件一般应是回转体;内孔尽可能为直孔;尽可能避免不便于加工的槽、孔结构;各部位厚薄变化应尽可能均匀,避免尖锐边缘,特别是法兰内部瓷件端面的尖端应倒角,以改善其机械强度(见表5·3-6图);应避免细长结构,瓷件高度对主体直径之比最好不大于5;选择瓷件装烧部位应注意重心平稳,且考虑该处不上釉对绝缘子性能影响不大等。大瓷套壁厚一般为25~60mm,小型瓷套可为10~15mm。

1.2 普通伞棱规格和爬电距离计算

1. 伞棱规格 瓷横担绝缘子、棒形支柱瓷绝缘子、套管和空心绝缘子等圆柱形瓷绝缘子的普通伞和棱的规格尺寸见表 5·3-1 和表 5·3-2。

2. 爬电距离计算 等主体直径和等伞棱外径的

普通伞棱绝缘子，其爬电距离 L_c 可按下式计算：

$$L_c = nv + h \quad (\text{mm}) \quad (5\cdot3-1)$$

式中 n ——伞或棱数（个）；

v ——一个伞或一个棱净增加的爬电距离， $v =$

$s - \delta$ ， v 、 s 、 δ 见表 5·3-1 和表 5·3-2；

h ——绝缘子两电极间直线距离（mm）。

表 5·3-1 普通伞的规格尺寸 (mm)

	I 放大												
	规定: $r_2 = 2r_3$ $h_1 = r_3$												
p	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 5·3-2 棱的规格尺寸 (mm)

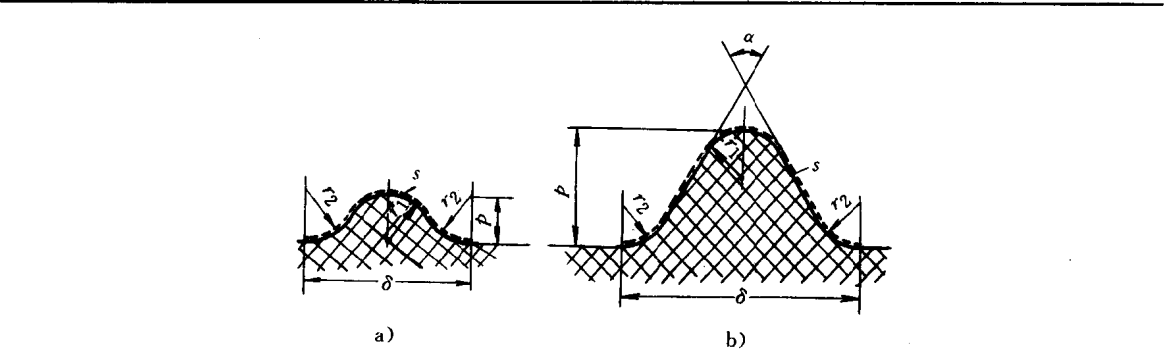


图	a				b							
	—				20°			30°				
p	4	5	6	6	15	20	25	15	20	25	30	35
r_1	4	5	6	6	4	5	5	4	5	5	5	5
r_2	4	5	6	7	5	6	6	5	6	6	8	8
v	2.90	3.62	4.35	4.15	20.10	27.36	35.76	18.96	25.73	33.40	40.17	47.84