

常用符号表

I ——电流	U_{af} ——工频放电电压
I_p ——冲击电流, 雷电冲击电流	U_{afi} ——工频放电电压下限
I_{pc} ——操作冲击电流	U_{afs} ——工频放电电压上限
I_{xu} ——设计工频续流	U_N ——灭弧电压, 最大允许工频电压
J ——火花间隙	U_p ——冲击电压, 雷电冲击电压
K_b ——保护比	U_{pc} ——操作冲击电压
K_j ——接地系数	U_{pf} ——冲击放电电压
K_q ——切断比	U_r ——冲击电流残压
R ——电阻, 线性电阻	U_{5kA} ——5kA冲击电流下的残压(例)
R_f ——非线性工作电阻片(阀片)	U_{xm} ——系统最大运行线电压
R_{fp} ——非线性并联电阻	U_{xu} ——设计工频续流下的残压
T ——波持续时间	$U_{\phi m}$ ——系统最大运用相电压
U ——电压	α ——非线性系数

第1章 概述

电气设备在运行中除承受工作电压外，还会遭到过电压的作用。由雷电引起的雷电过电压，或由开关操作引起的操作过电压，其数值远远超过工作电压，将使设备绝缘损伤，设备寿命缩短，或甚至造成停电事故。因此，必须采取各种措施来限制过电压。避雷器就是用来限制过电压的一种主要保护电器。避雷器通常接于导线和地之间，与被保护设备并联（参见图 28·1-1）。当过电压值达到规定的动作电压时，避雷器立即动作，释放过电压电荷，将过电压限制在一定水平，保护设备绝缘，使电网能够正常供电。

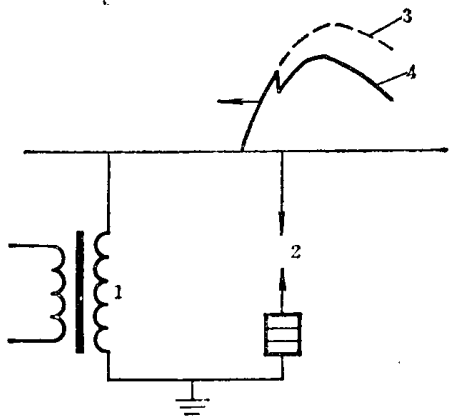


图28·1-1 避雷器与被保护设备联接示意图
1—被保护变压器 2—阀式避雷器 3—未被限制的过电压波 4—被限制的过电压波形

避雷器分为阀式和管式两大类。阀式避雷器最基本的元件是火花间隙（简称间隙）和非线性工作电阻片（简称阀片），它们串联叠装在密封的瓷套内（参见图 28·1-2）。阀式避雷器的保护性能良好。管式避雷器的灭弧间隙装在由产气材料制成的灭弧管内，与隔离间隙相串联，没有阀片。管式避雷器的保护性能比保护间隙好，但不如阀式避雷器。

阀式避雷器广泛用于交、直流系统，保护发、变电设备的绝缘。管式避雷器主要用于变电所、发电厂的进线保护和线路绝缘弱点的保护。保护性能有所改善的管式避雷器可用于保护配电变压器。

阀式避雷器依结构不同，又分为普通阀式和磁吹阀式二类。后者利用磁场驱动电弧来提高灭弧性能，从而具有较好的保护性能。

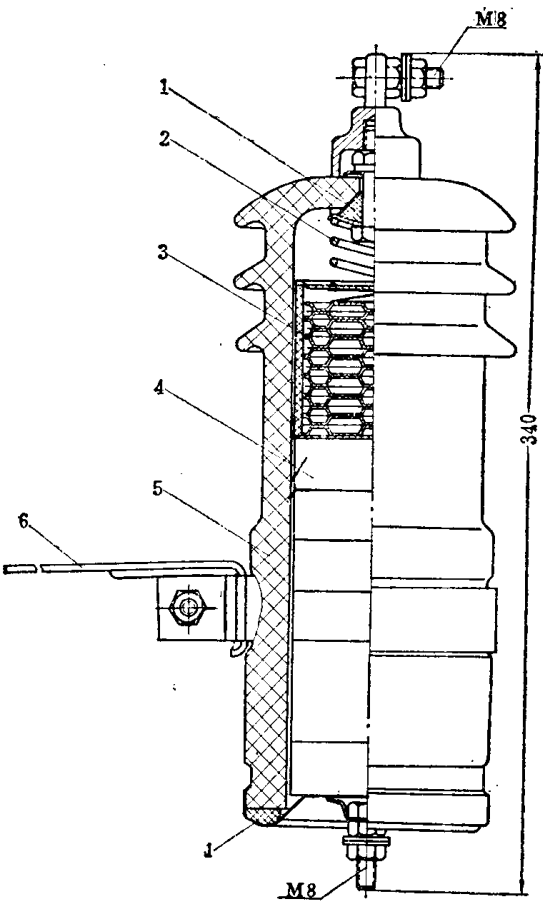


图28·1-2 阀式避雷器（FS3-10）
1—密封橡皮 2—压紧弹簧 3—间隙 4—阀片
5—瓷套 6—安装卡子

28-2 第28篇 避雷器

常用避雷器系列及其应用范围见表 28·1-1。

阀式避雷器的电气性能是输变电设备绝缘配合的基础。改善避雷器的电气性能,不仅可以提高输电系统的运行可靠性,而且可以降低设备绝缘水平,从而减轻设备重量,降低设备造价。输电电压等级越高,降低绝缘水平所带来的经济效益愈显著。因而,电力系统电压等级愈高,要求设备绝缘水平相对地降低愈多(参见图 28·1-3)。

表 28·1-1 常用避雷器系列及其应用范围

名 称	代 号	应 用 范 围
低压阀式避雷器	FS	用于低压网路保护交流电器、电表和配电变压器低压绕组
配电用普通阀式避雷器		用于 3~10 千伏交流配电系统,保护配电变压器和电缆头
电站用普通阀式避雷器	FZ	用于 3~220 千伏交流系统,保护电站设备绝缘
电站用磁吹阀式避雷器	FCZ	用于 35 千伏及以上的交流系统,保护电站设备绝缘。对于比较重要、需要限制操作过电压、雷电活动特别强烈或设备绝缘水平降低的电站,更为适合
全封闭磁吹避雷器	FB	用于保护 110 千伏及以上全封闭组合电器绝缘
保护旋转电机用磁吹阀式避雷器	FCD	保护性能较好(冲击放电电压较低),适用于保护交流旋转电机的绝缘
直流磁吹阀式避雷器	FCL	用于保护直流电气设备绝缘
纤维管式避雷器	GX	用于电站进线保护和线路绝缘弱点保护
	GS	用于保护配电变压器
无续流管式避雷器	GSW	可用于保护配电变压器

注: 避雷器号举例说明如下:

FCZ3-220JGY: FC 表示磁吹阀式避雷器, Z 表示电站用, 3 表示第三次改型, 220 表示额定电压 220 千伏, J 表示中性点直接接地系统, GY 表示高原地区用。

GX $\frac{35}{0.6-5}$: G 表示管式避雷器, X 表示线路用, 分子为额定电压 35 千伏, 分母为开断电流下限 0.6 千安、上限 5 千安。

随着电压等级的进一步提高, 阀式避雷器也须有相应的发展, 特别是 330 千伏以上超高压电力系统, 设备绝缘水平相对降低较多, 操作过电压问题比较突出, 它与雷电过电压已经同时成为绝缘配合中必须考虑的对象。这就对超高压避雷器提出越来越高的要求, 要求它既能限制雷电过电压, 又能限制操作过电压。因此, 提高超高压避雷器限制操作过电压的能力, 已经成为发展超高压电力系统所面临的一个迫切问题。

随着输电容量增大和输电距离增长, 交流输电系统中的稳定问题日益尖锐。由于高压远距离直流输电没有稳定问题, 输电线路投资也低很多, 因此, 直流输电越来越受到普遍重视。与此相应, 对高压直流避雷器提出了很高的要求, 已成为近年来各国避雷器制造者研究的重点之一。

阀式避雷器长期存在的一些比较棘手的问题, 如避雷器抗污秽问题、放电分散性问题等, 利用氧化锌非线性半导体电阻制成的无间隙避雷器, 可能得到比较满意的解决。与一般避雷器相比, 它的性能还有其他一些优点, 可用于交、直流系统, 已引起各方面的重视, 积极开展了研究工作。

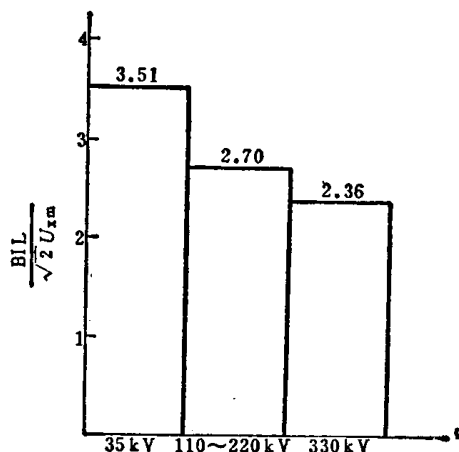


图 28·1-3 绝缘水平随电压等级升高而相对降低的趋势

BIL—基准冲击绝缘水平=设备的全波冲击耐受电压
 U_{xm} —系统最大线电压

第2章 交流阀式避雷器

1 阀式避雷器的动作原理

交流阀式避雷器（以下简称阀式避雷器）的基本动作原理可以用图 28·2-1 所示动作过程来说明。阀式避雷器的保护作用主要靠间隙和阀片相互配合来完成，非线性电阻使电压沿间隙分布均匀。图 28·2-1 a 为避雷器动作前后电压、电流的变化情况。

图 b~e 表示在各工作状态下的动作情况。平时避雷器在运行相电压作用下，间隙介质处于绝缘状态，只有电导电流流过非线性并联电阻（图 b）；当系统发生的过电压达到间隙的动作电压时，间隙动作，大的冲击电流通过阀片流入大地，释放过电压电荷。阀片在大的冲击电流下电阻变低，故冲击电流残压较低，与被保护设备的绝缘水平保持一定

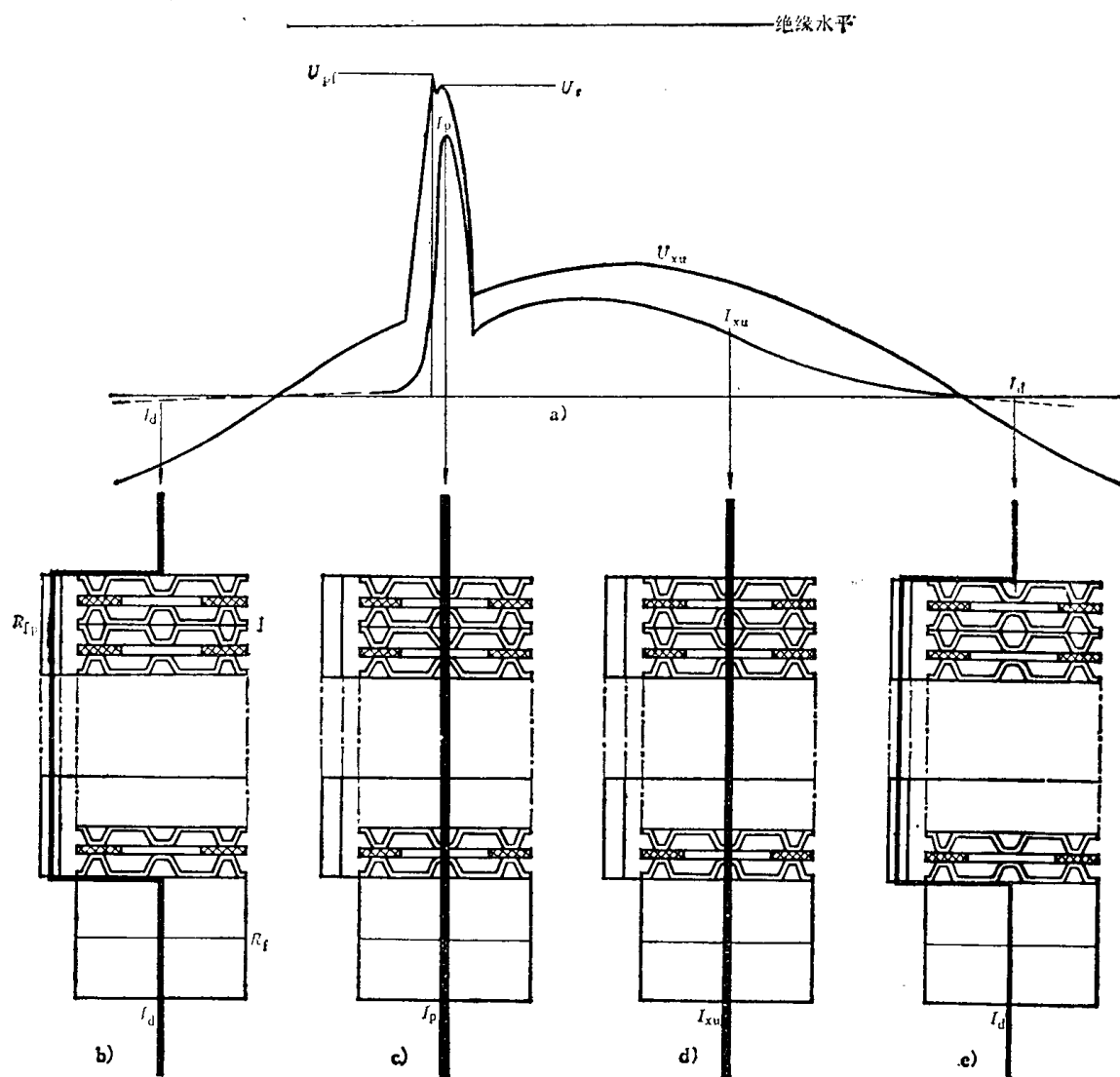


图28·2-1 交流阀式避雷器动作过程示意图

J—间隙 R_f —阀片 R_{fp} —非线性并联电阻 I_d —电导电流 U_{pl} —冲击放电电压 I_p —冲击电流
 $U_r—I_p$ 在 R_f 上的压降（冲击电流残压） I_{xu} —工频续流 U_{xu} — I_{xu} 在 R_f 上的压降

的裕度(图a)保护电气设备不致受到过电压的损坏;过电压过去后,在恢复电压下,阀片电阻又复增高,工频续流受到限制(图d);在工频续流第一次过零瞬间,间隙将工频续流切断,恢复到平时运行状态(图e),使电网能够正常供电。

2 阀式避雷器的性能

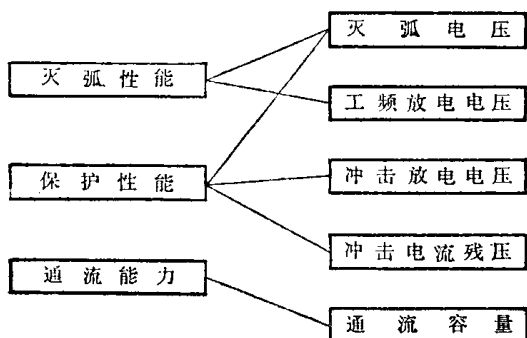
阀式避雷器的基本电气性能有:

保护性能——限制过电压,保护电气设备绝缘不受过电压损坏的性能;

灭弧性能——过电压引起避雷器动作后,间隙能迅速熄灭电弧而不中断系统正常输电的性能;

通流能力——避雷器动作过程中,耐受通过它的各种电流而不致损坏的能力。

表征这些性能的主要电气参数为:灭弧电压、工频放电电压、冲击放电电压、冲击电流残压以及通流容量。这些参数与避雷器基本电气性能之间的关系如下面方框图所示:



2.1 灭弧电压^①

避雷器能可靠灭弧的最大允许的工频电压称为灭弧电压。避雷器安装点的工频电压升高,在任何时候都不允许超过灭弧电压,否则避雷器将因不能灭弧而导致损坏。

应注意避雷器的灭弧电压与正常运行电压的区别。避雷器的正常运行电压是指系统最大运行相电压。避雷器不能经常在接近灭弧电压下运行,否则,内部电晕比较强烈,将引起工频放电电压严重下降和电极腐蚀,特性恶化。

^① 国际电工委员会(IEC)和许多国家把灭弧电压叫做“额定电压”,我国避雷器的额定电压是指安装避雷器的电力系统的额定电压。

a. 限制雷电过电压避雷器的灭弧电压 在确定限制雷电过电压避雷器的灭弧电压时,通常只考虑系统单相接地时非故障相对地工频电压升高,而不考虑空载线路的电容效应和突然失去负荷等引起的暂态过电压。因为它们和雷电过电压同时出现的机率极小,不能作为确定灭弧电压的依据。

单相接地时非故障相对地工频电压升高与系统的中性点接地方式有关。在中性点绝缘或中性点经消弧线圈接地的系统中,非故障相对地工频电压升高值不低于线电压。在中性点直接接地系统中,单相接地故障引起非故障相对地工频电压的升高,可以从图28·2-2所示接地系数求得(该图是在假定 $r_1=r_2=0$ 条件下获得)。当 $x_0/x_1 \leq 3$ 及 $r_0/x_1 \leq 1$ 时(直接接地系统通常在此范围内),称为有效接地系统,其非故障相对地工频电压升高不超过系统最大线电压(U_{xm})的75%。故限制雷电过电压避雷器的灭弧电压一般可按下列原则确定:

中性点非直接接地系统——不应低于系统最高运行线电压的100%;

中性点直接接地系统——等于系统最高运行线电压的80%。

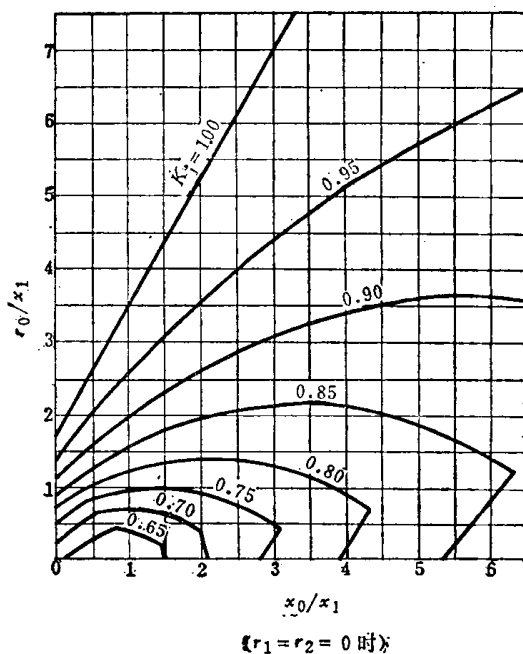


图28·2-2 直接接地系统的接地系数(接地系数 K_1 —非故障相的工频电压升高与同一地点最大线电压的比值)

x_0 —零序电抗 x_1 —正序电抗 r_0 —零序电阻
 r_1 —正序电阻 r_2 —负序电阻

b. 限制操作过电压避雷器的灭弧电压 在确定限制操作过电压避雷器的灭弧电压时,除了考虑单相接地故障引起的工频电压升高外,还必须考虑长线电容效应及突然甩负荷引起的暂态过电压,其值应按系统参数计算或通过模拟试验确定。在330千伏及以上的超高压电力网中,一般需采用并联电抗器和速动继电保护等措施,将暂态过电压限制到一定水平之下,以免将避雷器的灭弧电压提得过高。

应该特别指出,各电压等级的电力系统均应采取措施防止产生各种形式的谐振过电压。谐振过电压持续时间长,不能用避雷器限制。

c. 变压器中性点保护用避雷器的灭弧电压 在中性点接地系统中,为了继电保护整定方便和减少对通讯系统的干扰,须限制单相短路电流,常将部分变压器中性点不接地。当系统发生单相接地故障时,对于中性点不接地的变压器,其中性点稳态电压升高(U_{og})可用下式计算:

$$U_{og} = U_{\phi m} \frac{\frac{x_0}{x_1}}{2 + \frac{x_0}{x_1}} \quad (28 \cdot 2-1)$$

式中 $U_{\phi m}$ ——系统的最大运行相电压

在中性点直接接地系统中,一般 $x_0/x_1 \leq 3$,故 U_{og} 可达 $0.6 U_{\phi m}$,即不超过 $0.35 U_{xm}$ 。在这种系统中,应采取措施防止避雷器在谐振过电压下动作。在中性点不直接接地系统中,变压器中性点电压升高不超过最大相电压。

因此,在中性点不直接接地系统中,变压器中性点保护用避雷器的灭弧电压取 $1.0 U_{\phi m}$;在中性点直接接地系统中,对于中性点不接地的变压器,其中性点保护用避雷器的灭弧电压取 $0.4 U_{xm}$ 。

2.2 工频放电电压

加在避雷器两端使间隙发生放电的工频电压幅值除以 $\sqrt{2}$,称为工频放电电压,一般以平均值的 $\pm(7\sim 10)\%$ 规定为其上、下限。

a. 工频放电电压下限 规定工频放电电压下限,主要考虑保证避雷器能可靠地灭弧。对于各种结构的避雷器,均存在一个能够保证灭弧的工频放电电压下限与灭弧电压之间的比值(叫做切断比),一般大于1,它可以表征避雷器灭弧性能的好坏。切断比越接近1,灭弧性能越好。在确定工频放电电压下限时,应使其大于灭弧电压与避雷器实际达

到的切断比的乘积,以保证一定的裕度。

在确定限制雷电过电压避雷器的工频放电电压下限时,还应使之高于电力系统的操作过电压计算倍数(见表28·2-1)与最高运行相电压的乘积,以保证避雷器不会在操作过电压下动作。

表28·2-1 电力系统的操作过电压计算倍数

系统额定电压	系统接地情况	操作过电压计算倍数 (以 $U_{\phi m}$ 为基值)
35~60kV及以下	非直接接地	4.0
110~154kV	非直接接地	3.5
110~220kV	直接接地	3.0
330kV	直接接地	2.75

b. 工频放电电压上限 规定工频放电电压上限,主要是为了便于在生产中控制冲击放电电压。因为避雷器工频放电电压试验比冲击放电电压试验简单易行,而对于一定结构的避雷器,其冲击放电电压与工频放电电压幅值之间有一定的比例关系(称为冲击系数),故控制了工频放电电压上限,一般就可保证其冲击放电电压不超过规定值。

2.3 冲击放电电压

在避雷器两端施加给定波形的冲击电压波时,于放电前所达到的最高电压值称为冲击放电电压。

a. 冲击放电电压的有关规定 冲击放电电压有雷电冲击和操作冲击二种,其值分别根据它与基准冲击绝缘水平(BIL)和操作冲击绝缘水平(SIL)的配合要求来确定。限制雷电过电压避雷器仅规定雷电冲击放电电压。现行标准的规定为:

雷电冲击 $\ominus$: 1.5/40 微秒标准波 100%冲击放电电压;预放电时间(即放电前电压作用时间) 1.5~20 微秒冲击放电电压。

操作冲击 $\ominus$: 预放电时间 100~1000 微秒操作冲击放电电压。

标准一般只规定冲击放电电压的上限,但应设法尽量减少避雷器放电的分散性,不使放电电压过低,以免发生不必要的频繁动作。

b. 伏-秒特性 冲击放电电压与预放电时间的关系称为伏-秒特性(V-t特性),表示这个关系

$\ominus$ 国际电工委员会尚规定有波前冲击放电电压,波头陡度约为每12千伏灭弧电压增加100千伏/微秒,并以1200千伏/微秒为限。

$\ominus$ 国际电工委员会规定三组预放电时间为30~60, 150~300及1000~2000微秒的操作冲击放电电压。

的曲线称为伏-秒特性曲线。避雷器的伏-秒特性须低于被保护设备的规定的耐受电压(即BIL和SIL),且留有一定的裕度(参见图28·2-3)。

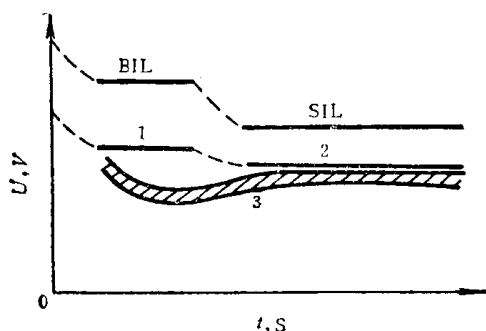


图28·2-3 避雷器伏-秒特性与被保护

设备绝缘水平的配合

BIL—基准冲击绝缘水平 SIL—操作冲击绝缘水平

1—避雷器冲击放电电压上限 2—避雷器操作冲击放电电压上限 3—伏-秒特性包络线

2·4 冲击电流残压

技术条件规定的冲击电流通过避雷器时，在阀片上产生的电压降，称为冲击电流残压(简称残压)。避雷器的冲击保护水平由残压和雷电冲击放电电压决定。残压一般规定等于或高于雷电冲击放电电压，故通常在估算冲击绝缘水平时以残压为依据。

a. 保护比 避雷器的保护水平，常用一定幅值的8/20微秒冲击电流残压与灭弧电压幅值之比(称为该电流下的保护比，一般大于1)来表征。保护比越低，确定该保护比的电流值越大时，避雷器的保护性能越好。

b. 冲击电流值 绝缘配合需要选用某一冲击电流下的残压作为依据。这个冲击电流值是根据流过避雷器的雷电流幅值出现的概率、被保护设备的重要程度、制造的可能性和成本以及运行经验等因素确定的。

流过避雷器的冲击电流值一般可用下式估算：

$$I_p = \frac{2U_p - U_r}{Z_b} \text{ kA} \quad (28·2-2)$$

式中 U_p ——进入变电所的雷电过电压幅值 kV

U_r ——雷电流在阀片上的残压 kV

Z_b ——线路波阻抗 Ω

根据国内外实测数据，流过220千伏及以下变电所内避雷器的雷电流，幅值超过5千安的概率一

般约为1%；配电系统由于没有避雷线保护，流过避雷器的雷电流常较大，超过5千安的概率一般约为3%；流过直配电机用避雷器的雷电流，由于通过电缆与架空线路连接，不会超过3千安；流过变压器中性点的雷电流不会超过1.5千安。

我国通常采用下列冲击电流下的残压作为绝缘配合的依据，冲击电流值为：

低压阀式避雷器	3千安
保护旋转电机用磁吹阀式避雷器	3千安
普通阀式避雷器(3~220千伏)	5千安
磁吹阀式避雷器(35~220千伏)	5千安
磁吹阀式避雷器(330千伏)	10千安
保护变压器中性点绝缘用阀式避雷器	1.5千安

以上冲击电流波形为8/20微秒。

2·5 通流容量

避雷器的通流容量是以规定波形和幅值的电流通过规定次数来表示的。

a. 通流容量的规定 我国避雷器标准规定的通流容量有：冲击通流容量 $\ominus$ 、工频半波通流容量和矩形波通流容量，分别表示阀片耐受雷电电流、工频续流和操作冲击电流的能力，规定见表28·2-2。雷电特别强烈地区用避雷器的冲击通流容量应特殊考虑。

工频半波通流容量一般等于或稍大于设计续流

表28·2-2 避雷器通流容量

产品系列	阀片类型及直径 mm	18/40 μ s 冲击通流容量 A	0.01 s 工频半波通流容量 A	2000 μ s 矩形波通流容量 A	通过次数 不少于
FS	低温, ϕ 55~60	5000	50	—	20
FZ	低温, ϕ 100	10000	80	—	20
FCD	高温, ϕ 80或低温, ϕ 150	10000	300 ^①	—	20
FCZ	高温, ϕ 100	10000	—	600	20
		15000 ^②		800 ^②	

① 可用2000 μ s、400A矩形波代替。

② 适用于额定电压330kV避雷器。

$\ominus$ 国际电工委员会避雷器推荐标准，对雷电冲击电流通流容量，规定用4/10 μ s冲击电流试验二次，电流幅值在额定电流为5000安时，为65千安；10000安时，为100千安。

值。冲击通流容量及矩形波通流容量应根据雷电或操作冲击电流幅值出现的概率进行综合技术经济分析后确定。

b. 操作冲击电流幅值的估算 操作冲击电流幅值出现的概率, 可根据电力系统实测统计数据或模拟试验确定, 也可用计算方法进行初步估算。对装在线路末端的避雷器, 当由避雷器动作开始至过电压达到幅值的时间小于 $2l_x/c$ 时, 流过避雷器的操作冲击电流幅值 I_{pc} 和持续时间 T , 可分别用下列二式估算:

$$I_{pc} = \frac{U_{pc} - U_{rc}}{Z} \times 10^3 \text{ A} \quad (28.2-3)$$

$$T = \frac{2l_x}{c} \times 10^6 \quad (28.2-4)$$

式中 U_{pc} ——无避雷器时在避雷器安装点的最大操作过电压幅值 kV

U_{rc} —— I_{pc} 流过时在避雷器上的残压(包括间隙电压降) kV

Z ——线路波阻抗, Ω , 其值为 $\frac{1}{3}(2Z_1 + Z_0)$, Z_1 和 Z_0 分别为线路正序和零序阻抗

l_x ——线路长度 km

c ——电磁波速度(对架空线路取 $c = 3 \times 10^5$ km/s)

I_{pc} 波形可近似地用矩形波来代替。式(28.2-3)也可用来估算合空载长线时流过避雷器的电流幅值。

避雷器在操作过电压下动作时的通流容量, 还可以用长线通流容量试验(参见第 3 章)考核之。

2.6 阀式避雷器的电气特性表

阀式避雷器的电气特性列于表 28.2-3~6(中性点保护专用避雷器在备注栏内注明, 与正常产品通用者未注出)。

表 28.2-3 普通阀式避雷器(FS 及 FZ 系列)电气特性

额定电压 kV (有效值)	灭弧电压 kV (有效值)	工频放电电压 (干燥及淋雨 状态) kV (有效值)		冲击放电电压 (预放电时间 1.5~20 μs) kV 不大于		冲击电流残压(波形 8/20μs) kV 不大于				备 <
-----------------------------	-----------------------------	--------------------------------------	--	--	--	-----------------------------	--	--	--	--

注: 1. 残压栏内加括号者为参考值。

2. 用额定电压 15、20 及 30 千伏避雷器元件组装更高电压等级避雷器时, 应保证整只避雷器符合要求。

表 28.2-4 低压阀式避雷器电气特性

额定电压 kV (有效值)	灭弧电压 kV (有效值)	工频放电电压 kV (有效值)		冲击放电电压 (预放电时间 1.5~20 μ s) kV	冲击电流残压 (波形 8/20 μ s, 3kA) kV
		不 小 于	不 大 于		
0.22	0.25	0.6	1.0	2.0	1.3
0.38	0.50	1.1	1.6	2.7	2.6

表28-2-5 电站用磁吹阀式避雷器（FCZ 系列）电气特性

额定电压 kV (有效值)	灭弧电压 kV (有效值)	工频放电电压 (干燥及淋雨状态) kV (有效值)		冲击放电电压 kV 不大于		冲击电流残压 (波形8/20μs) kV 不大于		备 注
		不小于	不大于	预放电时间 1.5~20μs 及 波形1.5/40μs	预放电时间 100~1000μs	5kA	10kA	
35	41	70	85	112	—	108	122	110kV变压器中性点保护专用
—	51	87	98	134	—	—②	—	
60	69	117	133	178	—	178	205	
110	100	170	195	260	285①	260	285	
110	126	255	290	345	—	332	365	
154	177	330	377	500	—	466	512	
220	200	340	390	520	570①	520	570	
330	290	510	580	780	820	740	820	

① 参考值。
② 1.5千安冲击电流残压为134千伏。

表28-2-6 保护旋转电机用磁吹阀式避雷器（FCD 系列）电气特性

额定电压 kV (有效值)	灭弧电压 kV (有效值)	工频放电电压 (干燥及淋雨状态) kV (有效值)		冲击放电电压 (预放电时间1.5~ 20μs 及波形 1.5/40μs) kV 不大于	冲击电流残压 (波形8/20μs) kV 不大于		备 注
		不小于	不大于		3kA	5kA	
—	2.3	4.5	5.7	6	6	6.4	电机中性点保护专用
3.15	3.8	7.5	9.5	9.5	9.5	10	电机中性点保护专用
—	4.6	9	11.4	12	12	12.8	
6.3	7.6	15	18	19	19	20	
10.5	12.7	25	30	31	31	33	
13.8	16.7	33	39	40	40	43	
15.75	19	37	44	45	45	49	

2.7 阀式避雷器的其他性能

a. 外绝缘电气强度 避雷器在过电压的作用下，除间隙外，任何部位都不允许发生放电。避雷器瓷套的外绝缘电气强度应符合《高压电气设备绝缘试验标准》（GB 311-64）的要求。避雷器瓷套表面污染，不仅会导致外绝缘污闪，也会导致避雷器放电电压下降、灭弧性能恶化，因此要求避雷器瓷套比其他高压电器有更强的抗污能力。

b. 机械强度 避雷器应能耐受下述机械负荷：

	普通阀式避雷器	磁吹阀式避雷器
风力 m/s	25	35
端部水平拉力 kgf	60kV及以下：30 110~220kV：20	60kV及以下：30 110~330kV：50

耐强烈地震的避雷器，其耐震动的技术要求尚无标准规定，国外多取水平加速度0.5g，垂直加速度0.25g。

c. 电导电流 带并联电阻的避雷器，其电导电流为规定直流电压（一般接近灭弧电压有效值）下的电流值，可用以衡量避雷器的并联电阻是否断裂和老化，内腔元件是否受潮等。

d. 防爆性能 有防爆装置的避雷器，在避雷器万一不能灭弧时，须能动作，以防止瓷套爆炸造成人身事故或损坏其他电气设备。

e. 密封性能 避雷器元件置于瓷套内必须可靠密封，以防湿气浸入或因漏气使内部空气密度发生变化。

3 阀式避雷器的火花间隙

火花间隙的作用是绝缘、放电和灭弧。对间隙的基本要求是：（1）伏-秒特性尽可能平坦，放电分散性小；（2）灭弧性能好，一般要求在续流第一次过零时灭弧；（3）特性稳定，经运输、运行和规定次数动作后仍保持应有的特性。

火花间隙为固定的短间隙，气隙长度为零点几到几毫米，其灭弧介质一般为干燥的空气或氮。与长间隙相比，短间隙伏-秒特性较平坦，放电分散性较小。阀式避雷器将多个短间隙串联使用，可充分利用交流短弧所特有的近阴极效应灭弧。

火花间隙有非磁吹和磁吹两大类；其结构可按电弧是否运动和运动方式的不同，分为电弧不动式、电弧旋转式、电弧拉长式（又称限流式）及电弧自吹式等类型。

3.1 间隙的灭弧原理

当作用于避雷器的过电压使间隙放电时，气体介质被冲击电流强烈游离。在工频续流过零瞬间，电弧暂时熄灭，间隙内气体介质开始恢复其绝缘能力。与此同时，间隙处于系统恢复电压作用之下。恢复电压可能以接近工频正弦波的速度上升，或者具有振荡特性，以很陡的速度上升（当系统电压与避雷器电流间产生相位差或电流被提前切断时）。如果间隙介质绝缘强度的恢复速度超过恢复电压的增长速度，如图 28·2-4 中曲线 E_{jh} 所示，则电弧

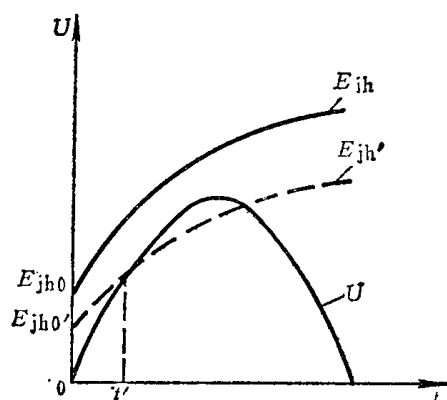


图28·2-4 工频电流过零后间隙灭弧或重燃的条件
 E_{jh} , E'_{jh} ——间隙介质绝缘恢复强度
 E_{jh0} , E'_{jh0} ——间隙介质绝缘初始恢复强度
 U ——系统恢复电压

不再重燃；反之，如果间隙介质绝缘强度的恢复速度低于恢复电压的增长速度，如曲线 E'_{jh} 所示，则电弧在 t' 时重燃。因此，为保证灭弧，避雷器间隙不仅需要足够高的初始恢复强度，还需要有足够快的介质绝缘恢复速度。间隙的初始恢复强度和恢复强度增长速度，取决于间隙介质的游离程度和电弧接近灭弧时储存在间隙中的热能，以及电弧熄灭后的去游离和冷却速度。避雷器主要利用短间隙的近阴极效应以及加强去游离和加速电弧冷却等措施，来获得较高的初始恢复强度和恢复强度增长速度。

3.2 提高间隙灭弧性能的措施

提高间隙灭弧性能的具体措施主要有：

- （1）采用灭弧栅，将电弧分割成若干短弧；
- （2）使电弧迅速运动，离开放电点，并加速冷却，如利用磁场或高压气体驱动电弧；
- （3）采用介质绝缘强度恢复速度高的气体，如 SF_6 ，作为灭弧介质；
- （4）使电弧与器壁紧密接触，如将电弧挤入灭弧盒狭缝；
- （5）采用高导热性及多孔性材料制造灭弧盒；
- （6）造成间隙中游离气体与外界气体迅速交换的条件。

研究间隙的灭弧性能，验证各种措施对提高灭弧性能的效果，一般可利用由振荡回路、冲击电流发生器、斜角波发生器组成的合成回路，以测定间隙的介质绝缘恢复强度特性。试验火花间隙在操作过电压作用下的灭弧能力时，上述合成回路中的振荡回路应能产生多个连续半波电流，或将振荡回路代以矩形波发生装置或模拟长线释放装置。

3.3 火花间隙的类型和特点（表28·2-7）

表28·2-7 火花间隙的类型和特点

间隙类型	特 点	简 图	结 构 与 性 能	使用系列
电弧不动式（平板间隙）	间隙击穿后，电弧不移动，主要利用间隙的近阴极效应灭弧		电极工作面为平面，电极采用黄铜板材。黄铜比紫铜、铁等有较高的初始绝缘恢复强度和较好的耐腐蚀性。电极和云母片接触部位产生电晕照射，使伏-秒特性较平坦，分散性小。 I_{xu} 为100安（幅值）时，单间隙的切断比（ K_q ）约为1.8	普通阀式避雷器

(续)

间隙类型	特 点	简 图	结 构 与 性 能	使用系列
电弧旋转式 (同心圆间隙)	电弧在外磁场作用下, 沿圆形间隙旋转, 使弧道冷却快, 加速去游离过程, 电极不易烧伤, 因而间隙灭弧能力得以提高	1—磁铁 2—内电极 3—外电极 4—电弧	间隙可由圆盘和圆环构成圆形间隙 (也可为平板间隙)。磁场须垂直于电弧。电极一般采用紫铜板材, 因为紫铜对电弧运动的阻力较小。圆形间隙用于限制雷电过电压时, 内电极直径约30~40mm, 紫铜板厚度约为3mm, 绝缘垫可用电工纸板。工频续流数百安 (幅值) 时, 单间隙的 K_q 可达1.3	磁吹阀式避雷器
电弧拉长式 (又称限流式)	电弧被磁场驱动, 拉长进入灭弧狭缝, 受到挤压、冷却。狭缝中电弧有较高的电位梯度, 其电弧压降起限制工频续流值和持续时间的作用, 可提高间隙的灭弧能力, 并能代替部分阀片, 降低冲击电流残压, 改善保护性能	1—线圈 2—灭弧盒 3—电极 4—电弧 ϕ—磁力线	1. 电极多为羊角形, 灭弧盒周边可制成齿状或迷宫状。前者电弧在狭缝平面上, 呈锯齿状拉长; 后者电弧在狭缝垂直面上, 呈波浪状拉长 2. 多孔性材料的电弧压降较高, 一个间隙可达千伏 (幅值); 致密性材料 (陶瓷与云母玻璃) 的电弧压降较低, 一个间隙约数百伏 (幅值) 现有致密性材料灭弧盒产品系列, 在工频续流450安 (幅值) 时, 单间隙的 K_q 约1.4~1.5 3. 一般采用线圈产生磁场, 可实现单向吹弧。线圈用并联羊角间隙或阀片保护, 参数配合应使冲击电流通过并联保护间隙或阀片, 而工频续流则通过线圈 4. 专门限制操作过电压避雷器用的限流间隙, 要求有较好的长持续时间 (2~3个半波) 的通流能力, 并能限制本身产生过电压	磁吹阀式避雷器
电弧自吹式	利用间隙本身结构, 使工频续流通路自己产生磁场, 驱动电弧离开建弧点, 向指定方向移动。这样, 建弧点烧伤程度可减轻, 间隙工频续流可提高, 灭弧能力可增强	1—绝缘垫 2—电极 3—电弧 (箭头代表电流方向)	电弧移动可有几种情况: 在特殊的灭弧盒内将电弧拉长, 在电极间的空腔内移动, 或电弧被灭弧栅分割成若干短弧等。电弧自吹式间隙的灭弧性能及切断比均优于同尺寸的电弧不动式间隙	可用于普通阀式避雷器

4 阀式避雷器的非线性元件

阀式避雷器用非线性元件——阀片和并联电阻, 都是半导体非线性电阻, 一般由碳化硅和结合剂制成, 其电阻随外加电压的升高而降低。非线性

电阻的伏-安特性可用下式表示:

$$U = AI^a \quad (28 \cdot 2-5)$$

式中 I ——流过电阻的电流

U ——电流在电阻上的压降 (残压)

A ——与工艺和材料有关的常数

α ——非线性系数

非线性系数 α 是非线性电阻的重要参数, 表征非线性的好坏, 其值介于 0 与 1 之间, 愈小则非线性愈显著。

α 是 U 的函数, 实际应用中, 在一定电流范围内近似地将其看作常数, 可计算如下:

$$\alpha = \frac{\lg \frac{U_2}{U_1}}{\lg \frac{I_2}{I_1}} \quad (28-2-6)$$

式中 U_1, U_2 ——与电流 I_1, I_2 相对应的残压。

4.1 阀片

阀片多为圆饼形, 如避雷器整体结构需要, 也可制成半圆、椭圆等形状。阀片两端面喷金属 (铝或铜) 构成电极, 侧面涂绝缘釉以防止闪络。

按照材料配方和烧成温度, 阀片分为低温阀片和高温阀片两种。当直径相同时, 高温阀片的通流容量远大于低温阀片, 但 α 值稍差。

4.1.1 阀片的伏-安特性

a. 阀片非线性系数对冲击电流残压 U_r 和工频续流 I_{xu} 的影响 阀片的 α 对 U_r 和 I_{xu} 的影响可以用图 28-2-5 来说明。在灭弧电压 U_N 等于 290 千伏, 10 千安残压 $U_r = 820$ 千伏的情况下, 由图可知:

如 U_r 保持 820 千伏不变, 而 α 改变时, 工频续流 I_{xu} 变化如下:

当 $\alpha = 1$ 时 (即线性电阻), $I_{xu2} = 5000$ 安;

当 $\alpha = 0.24$ 时, $I_{xu3} = 550$ 安;

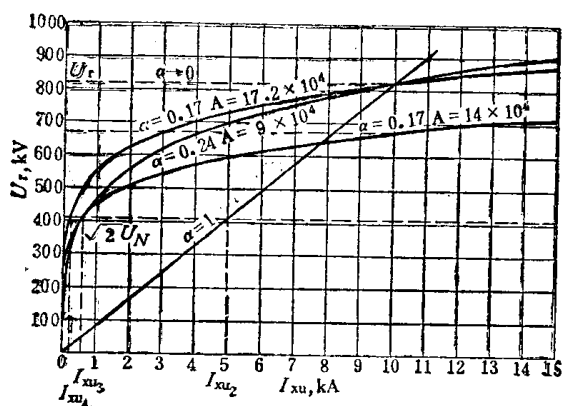


图28-2-5 阀片非线性系数 α 对冲击电流残压和工频续流的影响

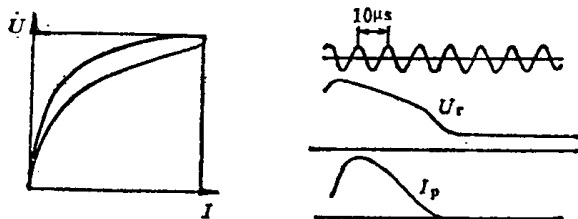
当 $\alpha = 0.17$ 时, $I_{xu4} = 170$ 安;

当 $\alpha \rightarrow 0$ 时 (即作为一种极限情况), $I_{xu1} = 0$ 。

如 I_{xu} 保持为 550 安 (即等于 I_{xu3}), α 由 0.24 减少到 0.17 时, U_r 由 820 千伏降到 670 千伏。

由上可见, 当 α 变小时, 或者使工频续流变小 (残压维持不变), 或者使残压降低 (工频续流不变)。也就是说, 从避雷器性能来看, α 愈小愈好 (但 α 减小常伴随通流容量下降, 二者是互相矛盾的, 须注意)。

b. 动态伏-安特性 以一定波形和幅值的冲击电流通过阀片, 用高速示波器摄取的伏-安特性曲线示波图叫做动态伏-安特性。在大的冲击电流下, 伏-安特性有回线 (图 28-2-6 a), 残压幅值超前冲击电流幅值 (图 28-2-6 b), 因此, 测量残压时, 应按图 28-2-6 a 所示方法读取残压值 (U_r) 和电流值 (I_p)。



a) 动态伏-安特性回线

b) 残压幅值超前电流幅值

图28-2-6 动态伏-安特性

c. 静态伏-安特性 以同样波形、不同幅值的冲击电流通过阀片, 分别测得残压与电流的关系曲线, 叫做静态伏-安特性曲线。图 28-2-7 是以双对数坐标表示的阀片静态伏-安特性曲线典型示例。在避雷器工作电流范围内 (约几十安~20 千安), 曲线由不同斜率的二段直线所组成, 二直线的交点叫做拐点, 其前后直线的斜率分别为 α_1 和 α_2 , α_1 大于 α_2 。 $\phi 100$ 高、低温阀片的 α 值范围见表 28-2-8。

d. 温度对伏-安特性的影响 阀片具有负的电阻温度系数, 当温度由 16°C 到 100°C 时, 高、低温阀片的残压约降低 7%。

e. 冲击电流的波头陡度对伏-安特性的影响 冲击电流的波头变短, 阀片的残压略有增加, 例如 $\phi 100$ 高、低温阀片, 当波头由 8 微秒变为 3 微秒时, 5 千安残压约增加 3~4%。

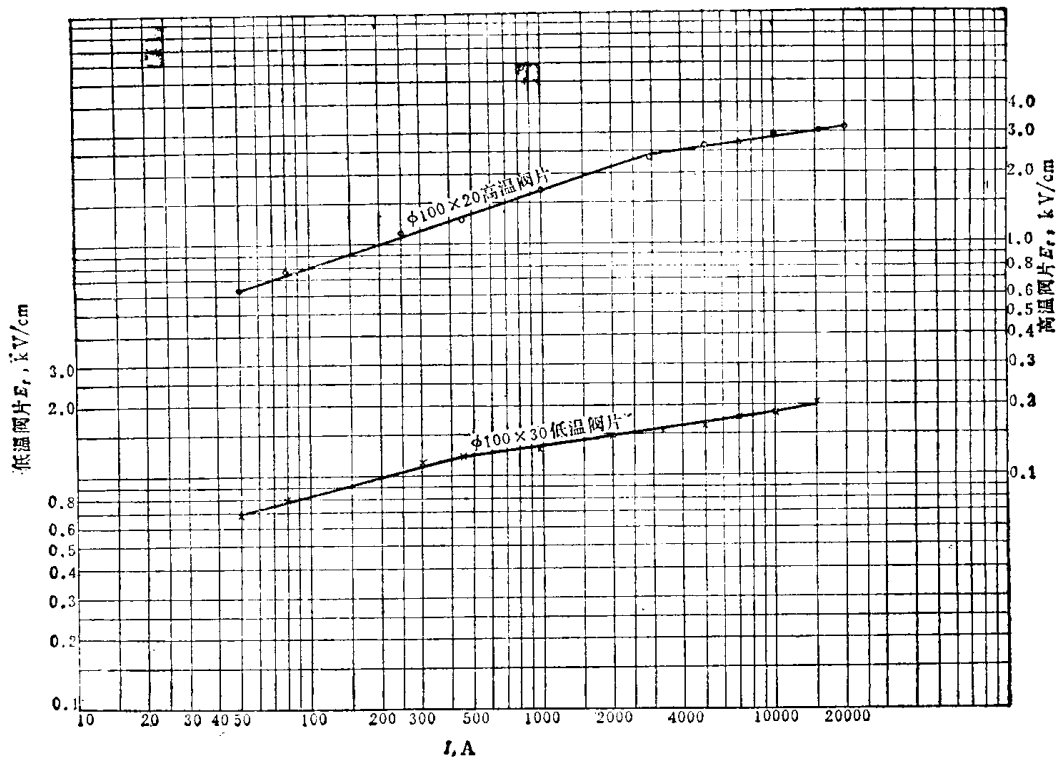


图28-2-7 高、低温阀片的静态伏安特性
 E_r —残压梯度

表28-2-8 高、低温阀片的 α 值范围

阀片类别	拐点前 α_1	拐点后 α_2	电流范围 A	α 平均值
高温阀片 ($\phi 100$)	0.33~0.36	0.15~0.16	450~5000	0.25~0.28
			450~10000	0.23~0.26
低温阀片 ($\phi 100$)	0.26~0.28	0.13~0.16	80~5000	0.17~0.19

4.1.2 阀片的通流容量

阀片的通流容量主要取决于电流沿阀片截面分布和电压接点分布的均匀性。提高阀片通流容量的重要途径是：尽可能提高碳化硅颗粒接触的紧密程度，减少接点串中接触点伏-安特性的分散性和减少电流的趋肤效应。

由于碳化硅颗粒接触点的特性具有很大的分散性，阀片中各接触点所承受的电压和通过的电流也有很大的差别。阀片在通流过程中逐步破坏。阀片能耐受通过电流的次数 (n)，随着电流幅值 (I) 的增加而迅速下降。可以用下面经验公式表示：

$$nI^K = \text{常数} \quad (28-2-7)$$

式中 K ——与电流波长和阀片配方以及工艺有关的系数

作为示例，表 28-2-9 列出了几个工厂测得的系数 K 值。图 28-2-8 为用双对数坐标表示的通过电流幅值与通流次数之间的关系。

表28-2-9 高、低温阀片的 K 值

阀片类别	电流波形	K 值
$\phi 60$ 低温阀片	18/40 微秒冲击波	3.09
$\phi 55$ 低温阀片	0.01 秒工频半波	6.9
$\phi 100$ 低温阀片	18/40 微秒冲击波	4.08
$\phi 100$ 高温阀片	2000 微秒矩形波	4.15

4.1.3 阀片的老化和吸潮

避雷器长期运行、多次动作后就会老化，一般表现为残压升高。根据多年来对续流遮断试验后阀片残压变化的统计，低温阀片残压增高一般在 6% 以下，不超过 10%；高温阀片残压变化较少，一般不超过 5%。

低温阀片吸潮后残压增加（吸潮 2% 左右，冲击电流残压增高 4% 左右），烘干后不能完全复原，通流容量也下降。因此，严重受潮的低温阀片不能继续使用。高温阀片不易受潮，吸潮后残压及通流容量变化不大，干燥后特性即恢复。

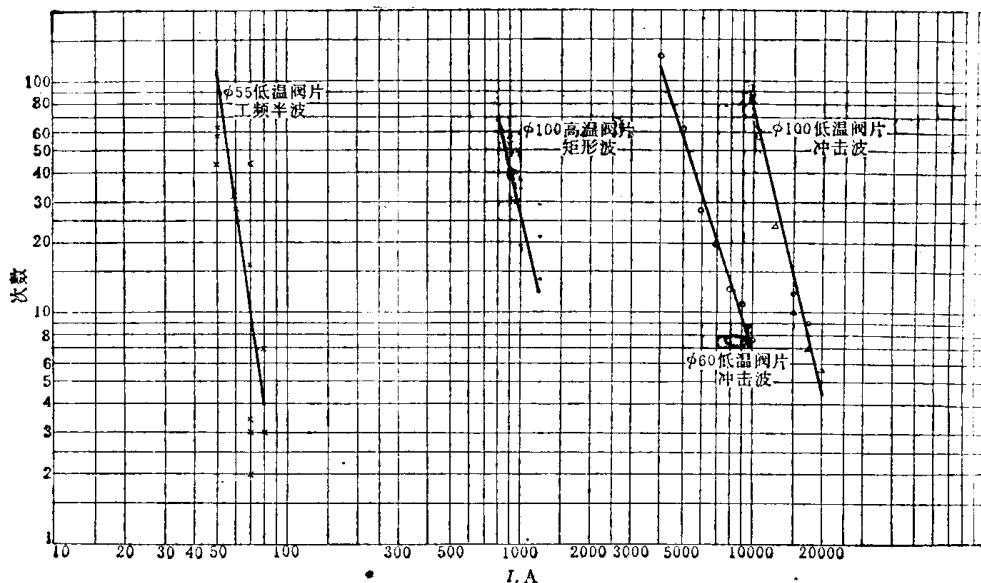
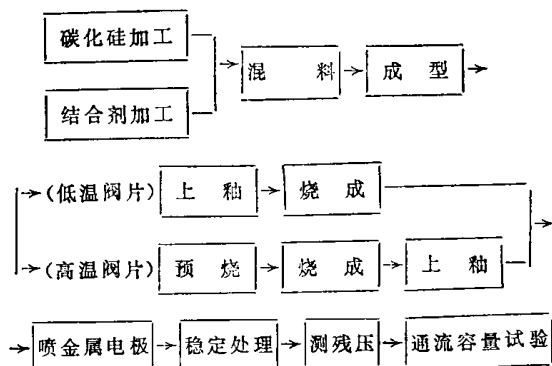


图28-2-8 高、低温阀片通过电流的幅值与通过次数的关系

4.1.4 阀片制造

a. 工艺流程:



b. 碳化硅 碳化硅 (SiC) 是制造阀片的主要原料, 其性能对阀片的质量有决定性影响。一般采用黑色电工碳化硅。为改善非线性, 在冶炼碳化硅的配合料中须加入 2~3% 氧化铝 (如碳素材料采用无烟煤, 则无烟煤灰分中的氧化铝即可满足配方需要)。

制造高、低温阀片, 选用碳化硅不完全相同。高温阀片宜选用粗链状、黑色、有光泽的晶块, 一般称之为正常型碳化硅, 其电阻系数较高, 非线性较好。低温阀片宜选用具有鳞状石墨般颜色、有光泽的细长针状结晶, 一般叫作轻微碳过量型碳化硅, 其电阻系数较低, 非线性较差。凡是硅过量的

碳化硅 (外观为灰黑、无光泽、片状结晶), 或由于冶炼后过早浇水冷却而被氧化的碳化硅 (呈现彩虹颜色), 都将导致通流容量下降, 不宜采用。

c. 制造工艺及其对质量的影响 (见表 28-2-10)

4.2 非线性并联电阻

非线性并联电阻并联于多个火花间隙上, 主要使工频电压沿间隙均匀分布, 改善避雷器的灭弧性能。由于它具有非线性, 在接近灭弧电压时, 流过的电流较大, 能较好地起控制电压分布的作用; 在正常运行电压下, 流过的电流很小, 不会超过它的热容量容许值。

非线性并联电阻的配方及工艺与高温阀片基本相同。现有产品所采用的非线性并联电阻为弧形或长条形片状结构 (图 28-2-9)。

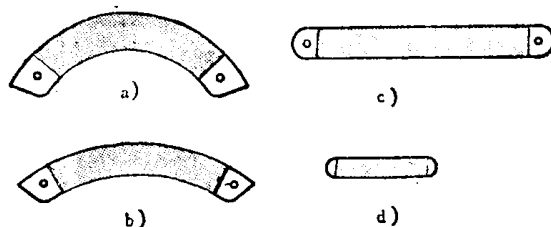


图28-2-9 非线性并联电阻外形图

a—FZ系列用 b—FCZ1, FCZ2系列用
c—FCZ3系列用 d—限流间隙单元用

表28·2-10 阀片制造工艺及其
对质量的影响

项目	工艺要求要点	工艺对阀片质量的影响
碳化硅加工	碳化硅加工处理后, 要求: 含铁量 $<1\%$ 含碳量 $<0.5\%$	碳化硅粉末中混入杂质(特别是铁屑一类导电杂质), 将显著影响通流容量下降
碳化硅粒度	碳化硅粉末粒度组成应根据碳化硅粉末的电阻率来确定, 测定碳化硅粉末的电位梯度可有助于正确确定粒度 一般应增加粒度组成的中间部分, 减少最粗和最细部分的比例	一般情况下, 粒度细则残压增高, α 值变小, 通流容量降低
结合剂	低温阀片结合剂用水玻璃($m\text{SiO}_2 \cdot n\text{Na}_2\text{O}$)的模数(SiO_2 和 Na_2O 分子数之比)为2.7~3.0, 比重1.40~1.45	水玻璃的模数和比重影响水玻璃的粘性, 对低温阀片的通流容量的影响很大
成型	成型水分 成型压力 低温阀片 5~6% 400~500 kgf/cm ² 高温阀片 6~7% 550~650 kgf/cm ² 高温阀片因碳化硅颗粒较细, 须避免空气夹层 为减少趋肤效应, 可采用分层成型, 加强边缘压制及端面作成凹型等工艺措施	成型料太干, 压力不够, 压出之产品结构松弛, 通流容量降低
烧成	低温阀片烧成温度一般为280~360℃, 升温速度每小时40℃左右, 要求电炉温度分布较为均匀。 高温阀片一般在氢或其他保护气氛中烧成, 烧成温度应高于结合剂烧成温度	高温阀片在高温烧成过程中, 由于碳化硅表面与结合剂及炉内气体发生反应, 以及结合剂烧成时的收缩压力等综合作用, 会使碳化硅表面状态和接触状态发生很大变化, 故烧成温度对高温阀片性能影响很大。当烧成温度在烧成温度附近变化时, 一般随温度升高, 残压降低, α 值增大, 通流容量增加

非线性并联电阻的主要性能如下:

(1) 在1毫安以内其非线性系数 α 为0.28~0.40。

(2) 环境温度升高时, 并联电阻的电导电流增大。其电流温度系数, 在正温下约为0.35~0.50%/℃; 在负温下约为0.25~0.35%/℃。

(3) 长期运行后非线性并联电阻老化, 一般表现为阻值增加, 电导电流下降。主要原因是由于电晕、臭氧及电阻发热等的作用, 引起碳化硅接点氧化膜增厚所致。为减缓电阻老化, 必须使之充分烧结, 并用大冲击电流进行稳定处理。

(4) 最大许用表面负荷推荐为0.15瓦/厘米²。

4.3 氧化锌非线性电阻材料

近年来国内外都在研究发展金属氧化物非线性电阻材料。以ZnO为基体, 附加少量 Bi_2O_3 、 MnO_2 、 Sb_2O_3 、 Co_2O_3 、 Cr_2O_3 等制成的非线性电阻片, 具有比碳化硅非线性电阻片好得多的非线性, 在0.1~1毫安范围内, 非线性指数 β 为50~80, 其单位面积冲击通流容量比碳化硅电阻片高得多, 长波通流容量高于碳化硅电阻片。

ZnO电阻片在低压交、直流系统上已广泛应用(一般叫作压敏电阻)。国外已用它制成高压无间隙避雷器, 在系统中试运行。由于没有间隙, 可避免间隙带来的许多问题(例如避雷器瓷套表面积污和淋雨, 对电压分布及放电电压的影响; 放电电压的分散性等), 且具有比较平坦的保护特性。

5 阀式避雷器总体设计

阀式避雷器总体设计的依据为: (1) 从绝缘配合观点对避雷器提出的电气特性要求, 如灭弧电压、工频放电电压、残压及通流容量等; (2) 避雷器使用环境条件, 如海拔高度、环境温度、最大风速、地震烈度及端子上导线水平拉力等; (3) 主要元件在生产中实际达到的技术水平, 如间隙的灭弧性能、阀片的伏-安特性和通流能力以及零部件加工工艺加工条件等。

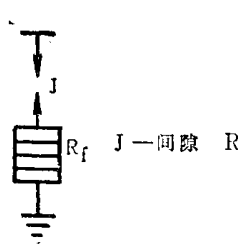
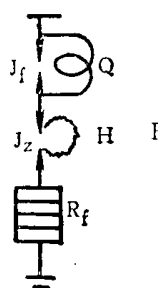
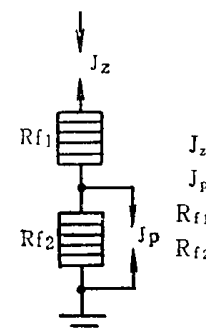
阀式避雷器总体设计, 除应满足技术条件规定的全部特性要求外, 并须考虑运输后和运行中特性的稳定性及制造与使用、维护的方便。

$$\ominus \beta = 1/\alpha。$$

阀式避雷器总体设计,往往不能仅靠计算完成,而需根据初步设计制成样品,经反复试验和调整特性,才能修改完成最终的设计。

5.1 间隙与阀片的特性配合及电气计算 (表28·2-11)

表28·2-11 间隙与阀片的配合方式与电气计算

配合方式	一般型	限流型	复合型
原理图	 J—间隙 R_f—阀片	 J_z—主间隙 R_f—阀片 J_f—辅助间隙 Q—线圈 H—电弧	 J_z—主间隙 J_p—并联间隙 R_{f1}—阀片组1 R_{f2}—阀片组2
特点	阀片满足冲击电流残压、通流容量及限制工频续流的要求;间隙满足切断续流及放电特性的要求 限制雷电过电压避雷器多采用此配合方式	阀片主要满足通流容量及冲击电流残压的要求;间隙满足切断续流及放电特性的要求;间隙与阀片共同限制工频续流 降低保护水平的限制雷电过电压避雷器及限制雷电与操作过电压避雷器多采用此配合方式	在雷电过电压工作状态下:J_p击穿,R_{f2}短路,避雷器的残压被限制在所要求的水平。由J_z、J_p及R_{f1}完成避雷器的保护作用 在操作过电压工作状态下:J_p不击穿,R_{f1}与R_{f2}共同吸收操作过电压能量及限制工频续流,故其操作过电压工作状态下的灭弧电压可较高 限制雷电与操作过电压避雷器多采用此配合方式
确定间隙与阀片的类型	1.根据技术条件规定的冲击或矩形波通流容量,初选阀片类型及直径,使阀片的通流容量(参见表28·2-2)大于或等于技术条件的规定值 2.根据阀片的工频通流容量(参见表28·2-2)初选I_{xu},使阀片的工频通流容量大于或等于I_{xu} 3.根据技术条件规定的I_p、U_N及初步选定的I_{xu}和阀片的α值(参见表28·2-8)核算冲击电流残压: $U'_r = \left(\frac{I_p}{I_{xu}} \right)^\alpha U_N \times \sqrt{2}$ 如U'_r ≤ U_r①,则可采用一般型配合方式(U'_r——计算所得残压) 4.根据I_{xu}及技术条件规定的U_{afi}和U_N (即K_q = $\frac{U_{afi}}{U_N}$),选定非限流式间隙结构,使单间隙切断比(参见表28·2-7)小于技术条件要求的避雷器切断比K_q②	1.阀片的通流容量与技术条件要求的通流容量及I_{xu}的关系,同左栏 2.如U'_r > U_r,则须选用限流式间隙,并使单间隙在切断I_{xu}时的切断比小于技术条件要求的避雷器切断比	当技术条件要求的通流容量较高,冲击电流残压较低,操作过电压工作状态下的灭弧电压较高,采用限流型亦难满足要求时,可采用复合型配合方式。复合型结构中,可采用非限流式间隙,亦可采用限流式间隙 阀片的冲击、矩形波及工频通流容量均应分别大于或等于技术条件的规定值及I_{xu}值

(续)

配合方式	一般型	限流型	复合型
阀片数 N_f	$N_f \geq \frac{\sqrt{2} U_N}{E_{xu} h}$ 式中 E_{xu} ——阀片在设计续流下的电位梯度 kV/cm (参见图 28·2-7) h ——单片阀片厚度 cm	$N_f \leq \frac{U_r}{E_{rp} h}$ 式中 E_{rp} ——阀片在技术条件规定的冲击电流下的电位梯度 kV/cm (参见图 28·2-7)	$N_f \geq \frac{\sqrt{2} U_N'}{E_{xu} h}$ $N_{f1} \leq \frac{U_r}{E_{rp} h}$ $N_{f2} = N_f - N_{f1}$ 式中 U_N' ——复合型避雷器在操作过电压工作状态下的灭弧电压 kV N_{f1}, N_{f2} ——分别为 R_{f1}, R_{f2} 的数量
间隙数 N_j	$N_j \geq \frac{U_{af} K}{u_{af}}$ 式中 U_{af} ——避雷器工频放电电压平均值 kV u_{af} ——单间隙工频放电电压平均值 kV K ——考虑单间隙至整只避雷器工频放电电压降低的系数 (约 1.1~1.3), 与产品结构及电压等级有关, 由试验确定		同左栏, 且并联间隙的放电特性须满足: a. 避雷器在操作过电压下动作时, 并联间隙不放电 b. 避雷器在雷电过电压下动作时, 并联间隙放电
核算	1. 核算 U_r , 须满足下式: $N_f h E_{rp} \leq U_r$ 2. 核算单间隙承担的灭弧电压 u_N : $u_N = \frac{U_N}{N_j}$ u_N 须不大于许用值 (可参阅表 28·2-14 “每个间隙平均承担的灭弧电压”栏, 或通过试验确定)	1. 核算阀片的 U_{xu} 及间隙的电弧压降, 须满足: $N_f h E_{xu} + N_j u_{hy} \geq \sqrt{2} U_N$ 或 $N_f h E_{xu} \geq \sqrt{2} U_N (1 - K_{hy})$ 式中 u_{hy} ——单间隙在设计续流下的电弧压降 K_{hy} ——间隙电弧压降承担避雷器灭弧电压的百分数, 一般取 $K_{hy} \approx 0.15$ 2. 核算 u_N : 同左栏	1. 核算操作冲击残压, 须满足下式: $N_f h E'_{rp} \leq U'_r$ 式中 U'_r ——技术条件规定的避雷器在操作冲击电流下的残压 kV E'_{rp} ——阀片在操作冲击电流下的电位梯度 kV/cm (参见图 28·2-7) 2. 核算雷电过电压工作状态下的 U_{xu} , 须满足下式: $N_{f1} h E_{xu} \geq \sqrt{2} U_N$ 3. 核算 u_N : 同左栏

- ① 当 $U'_r > U_r$ 时, 由式 $U'_r = \left(\frac{I_p}{I_{xu}} \right)^\alpha U_N \times \sqrt{2}$ 可看出, 减小 α 或增大 I_{xu} 均可降低 U'_r , 故可重选阀片 (采用非线性较好的阀片或增大其通流容量) 重新进行计算。如仍不能满足要求时, 则采用限流型配合方式。
- ② 如切断比不能满足要求, 则需采取措施调节整体特性, 降低切断比 (参见表 28·2-12)。
- ③ 本计算是按无限流式间隙考虑的, 如果采用限流式间隙, 则计算时须计入间隙的电弧压降。

5.2 放电电压的控制措施

火花间隙对地和对污秽瓷套的杂散电容, 影响避雷器内部元件上的电压分布, 故需要对放电特性加以控制, 以满足技术条件的要求。此外, 当单间隙的恢复强度不足以保证避雷器灭弧性能时, 可采用接入点火间隙等办法来提高多间隙的恢复强度。常用的措施见表 28·2-12, 可根据需要采用一种或同时采用几种。

5.3 整体结构

阀式避雷器的间隙、阀片等元件, 叠装固定在密封的单节或多节瓷套内, 高、低压端分别由瓷套两端的金属附件引出。避雷器外形多为单柱 (电压等级较高的避雷器, 为了降低高度, 外形也有多柱的)。为了提高冲击放电电压, 有的装有均压环。过于细高的, 装设绝缘拉杆, 以增加机械强度。凡座装的避雷器均设置绝缘底座, 以便安装动作记录