



最新电力避雷器优化设计

与制作新技术及相关技术标准

实用手册

◎ 主编：江彬



科技出版社



定价：880.00元 (全三卷+1CD)

第二节 熄弧原理和避雷器的火花间隙

阀式避雷器中电弧的熄灭,是依靠火花间隙和非线性电阻片的配合作用在工频续流过零时实现的。避雷器动作后,额定电压下避雷器阻值远大于系统电抗,续流电流是电阻性的,它基本上与系统电压相位相同。续流过零时,电弧自然熄灭,火花间隙处于恢复状态,这时电极之间由于存在着大量自由电荷,绝缘强度很低。

火花间隙的恢复过程也就是它的去游离过程。如果在 5ms (工频 $\frac{1}{4}$ 周波) 内介质绝缘的恢复强度的上升速率始终超过恢复电压上升的速度,则电弧不再重燃,亦即避雷器成功地遮断了续流。反之,火花间隙将出现重燃,避雷器则因其电阻片无法承受连续几十毫秒(几个周波)的续流发出的热量而炸裂。图 3-7 示出了上述两种情况下恢复电压和恢复强度之间的关系。

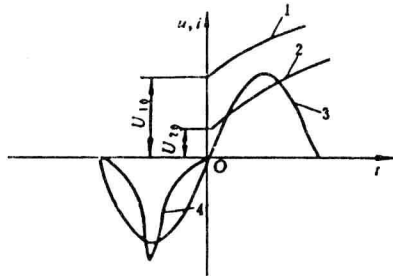


图 3-7 避雷器两端的恢复强度和恢复电压曲线

1- 间隙不重燃时的恢复强度,初始恢复强度为 U_{10} ;

2- 间隙重燃时的恢复强度,初始恢复强度为 U_{20} ; 3- 恢复电压(系统电压); 4- 工频续流

在某些情况下,由于系统的电抗很大,通过避雷器的续流滞后电压一个电角,电流过零时,工频电压不等于零。此时母线电压因对地电容与较大的电抗作用发生了过渡过程,使恢复电压波形上升的部位出现了高频振荡,这

时,对避雷器的恢复强度提出了更高的要求。

对应不同的动作负载,避雷器释放的能量大小不一样,这就需要应用不同结构的火花间隙来完成熄弧的工作。在熄弧过程中。非线性电阻片也起着很重要的作用。由于它的非线性,续流波形成为尖顶波,这使续流在过零之前就已经变得很小,因此,火花间隙中电荷密度比正弦波电流时大为减少,这对火花间隙的恢复极为有利。另一方面,电阻片的存在还限制了续流的幅值,使之不会超过火花间隙相应的遮断能力。

描述火花间隙或避雷器熄弧能力的参数是切断比 K_q ,其值愈小,表明熄弧能力愈强。

按照驱动电弧的动力而言,火花间隙可有磁吹和非磁吹两大类。按照电弧运动的方式来分,现代避雷器常用的火花间隙有以下几种类型:

- (1)电弧不动式间隙;
- (2)电弧自吹式间隙;
- (3)电弧旋转式间隙;
- (4)电弧拉长式间隙;
- (5)电弧分割式间隙。

电弧不动式间隙的典型结构是平板间隙,它又称阴极压降式间隙,如图 3-8 所示。间隙由上、下两片电极和圆环状的环氧云母板组成,两片电极中心的凸起部分形成一个近似均匀的电场,它是间隙的工作面。电极边缘的环状凸起与云母板接触部位之间存在的微小空气间隙构成了一个小电容器,云母板本身也可看做另一个电容器,这样相当于两个不同介质的电容器串联在一起。由于云母介电系数远比空气的大,小空气隙中的电场强度比平均值大许多倍,所以在达到放电电压之前,小空气隙即首先发生局部游离,此时产生的光电子照射了电极的工作面,提高了放电的稳定性,同时还降低了预放电时间很短时的放电电压,使火花间隙的伏-秒特性曲线趋于平坦。

平板间隙在灭弧过程中所需的初始恢复强度和足够快的恢复强度增长速度是依靠近阴极效应取得的。所谓近阴极效应,是指在灭弧期间间隙的

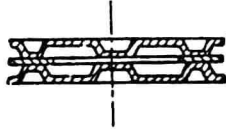


图 3-8 普通阀式避雷器的平板间隙

恢复强度仅由阴极附近的过程来决定的一种效应,这一效应的原理可用图 3-9 来说明。间隙击穿后,在电极之间产生电弧,电弧通道由大量的气体介质游离形成的正离子和电子组成。阳极附近堆积的电子形成阳极压降区,阴极附近堆积的正离子形成阴极压降区。由于正空间电荷到阴极的距离 d_1 很小,间隙两端只要有 $10 \sim 20V$ 电压即可形成 $300kV/cm$ 的场强,所以在燃弧期间足以维持冷阴极电子发射。续流过零以后,电压换向,电极间的正离子和电子分别流向新的阴极和阳极。由于正离子质量远比电子大,运动速度相对缓慢,所以当电子迅速进入新的阳极后,正离子仍位于离原来阴极不远的地方,即离开新阴极有一个较大的距离 $d_2, d_2 > d_1$ 。如果继续维持冷阴极发射,必须提高外施电压,由此可见,火花间隙获得了一个初始恢复强度。试验测定,在非线性电阻片的配合下,尖顶波的续流过零后,极间距离为 1 mm 的平板间隙的初始恢复强度约达 $700V$ 。如果改为线性电阻,对应的正弦波续流通过时,间隙的初始恢复强度仅为 $250V$ 。必须指出,这是在冷阴极条件下的数值,如果续流过大,电极有显著温升,则可能产生热电子发射,其恢复强度就大大下降了。

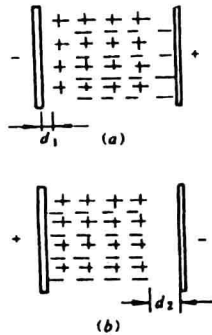


图 3-9 平板间隙的近阴极效应

(a)燃弧时;(b)续流过零后电压换向瞬间

平板间隙的电极通常用黄铜板冲制,因为黄铜比紫铜等其他材料具有更高的初始恢复强度和更好的耐腐蚀能力。电极的厚度与散热有关,材料太薄,散热较差,遮断工频续流后电极表面烧伤也较严重,这将使间隙的放电电压发生较大的变化。国产普通阀式避雷器的电极厚度在 0.6~0.8mm 之间。电极直径与间隙开断的续流值有关,直径较大,间隙的去游离效果也较好。例如 $\phi 56$ 平板间隙切断比为 1.8,可遮断的最大工频续流峰值为 100A,而 $\phi 52$ 平板间隙可切断续流的最大值不超过 80A。

利用流过电极的工频电流磁场作用在电弧上的电动力,使电弧向规定方向移动并且延伸的间隙称电弧自吹式间隙。它的基本原理可用图 3-10 来说明。当电流沿着图示的路径流动时,电弧受到的电动力 F 为 ab、cd 两段折线上电流的磁场对其作用力的合力。在实际的电极构造中,相当于 ab、cd 两段的长度是很短的, F 值不大,但它足以驱动电弧,使之在一较小的范围内移动并略微伸长。这样,电弧不会停留在起始点处烧伤电极,同时,还提高了间隙的初始恢复强度。这一电弧给避雷器在遮断工频续流时增加一个不大的电阻,对熄弧也是有益的,因此,这种间隙的灭弧能力比电弧不动式间隙好, K_q 可达 1.67。图 3-11 示出了国外配电型避雷器采用的两种常见的电弧自吹式间隙结构。

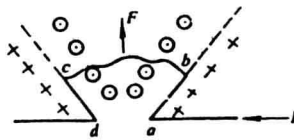


图 3-10 电弧自吹式间隙的原理

电弧旋转式间隙是借助外磁场的作用使电弧进行旋转运动的一种灭弧部件,其内、外电极按同心圆位置相对固定,故又称同心圆间隙。在垂直磁场作用下,电弧快速旋转可使弧道保持冷却,加强了去游离过程,提高了熄弧能力,因而这种间隙在遮断近千安的续流时,电极的损伤仍很轻微。由于紫铜电极比黄铜电极对电弧旋转的阻力小,因而电极一般选用厚度为 3 mm 的紫铜板制造。同心圆间隙的磁场由上、下两块永久磁钢或钕铁氧体等硬磁材料制做的磁铁产生。苏联早期的复合式磁吹避雷器曾大量采用同心圆

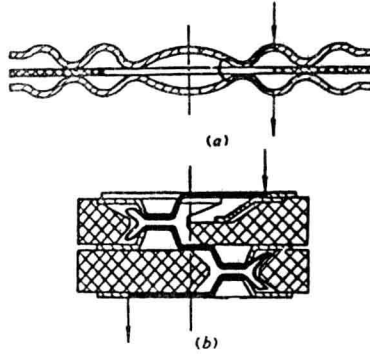


图 3-11 电弧自吹式间隙的典型结构

(a) Siemens 公司 3EA1 型避雷器的火花间隙；

(b) GE 公司 Alugard II 型配电避雷器的火花间隙

间隙来限制操作过电压,在我国,曾用于保护旋转电机的 FCD 型避雷器中,近年来已基本被淘汰。

电弧拉长式间隙是现代磁吹避雷器广泛采用的灭弧部件。其原理是借助续流流过与间隙串联的线圈时所产生的磁场,将工频电弧拉伸得很长,使之远离放电起始点,进入灭弧盒的狭缝中受到挤压和冷却。在一般的设计中,电弧最终拉伸的长度可达到它在放电点处初始长度的 100 倍左右。灭弧盒采用耐电弧、耐高压并具有一定机械强度的瓷质材料制成,书见的材料有云母玻璃、堇青石陶瓷、氧化铝多孔陶瓷或普通电瓷等。灭弧盒具有较高的导热系数,它吸收电弧中大量的热量,加强了去游离作用。这样,火花间隙获得了很高的弧压降。这一压降瞬间增大了避雷器的阻抗,明显地限制了工频续流的幅值,因此,电弧拉长式间隙又称限流间隙。与前述的几种间隙相比,限流间隙的灭弧能力和初始恢复强度都有极大的提高,有时,工频续流甚至能在过零前被遮断。

图 3-12 示出了几种典型的限流间隙及灭弧盒的构造。为便于电弧的拉伸和移动,电极形状设计为角型,这样它还具有一定的自吹效果。电极一般均用厚度为 3 mm 的紫铜板冲制,灭弧盒的直径在 50 ~ 100mm 之间。按照电极布置的情况来区分,灭弧盒可有单面间隙和双面间隙两种结构,后者在陶瓷盒的正、反两面均有灭弧齿并安装电极,提高了空间利用率,有利于

产品高度的降低。而按灭弧栅的形状来分,则有齿状和迷宫状两大类,前者电弧在狭缝平面上呈锯齿状拉长,后者电弧在狭缝面上呈波浪状拉长。狭缝宽度为 1~2 mm 的灭弧盒能够切断几百安的续流。当间隙用于专门限制具有很大能量的操作过电压的避雷器时,狭缝宽度约为 4~6mm。

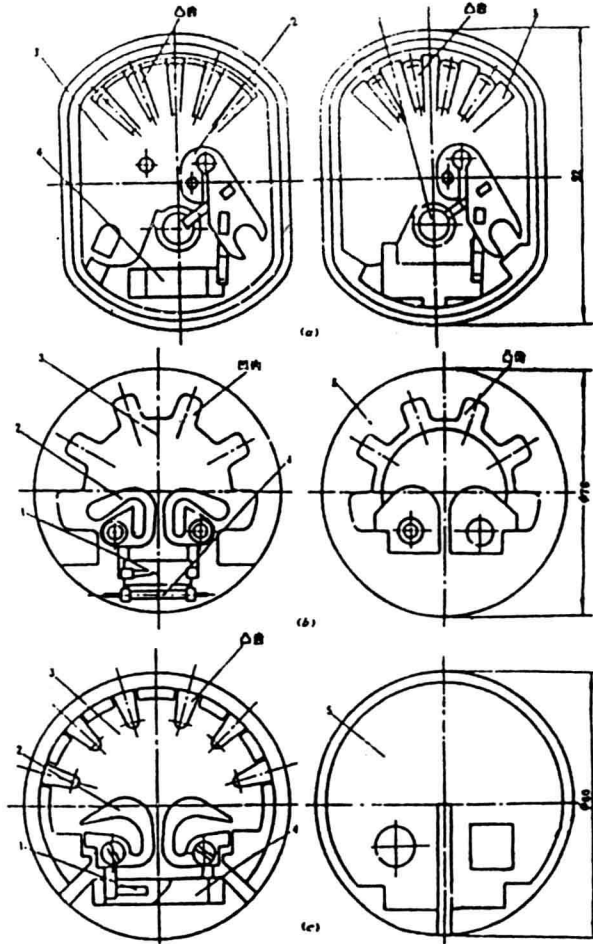


图 3-12 限流间隙的结构

(a)BBC 公司 HM 型磁吹避雷器的火花间隙;(b)GE 公司 Alugard II 型电站避雷器的火花间隙;

(c)国产 FCZ3 型磁吹避雷器的火花间隙

1- 离子照射装置;2- 电极;3- 灭弧盒;4- 分路电阻;5- 陶瓷盖

弧压降的大小是一个重要的技术数据,它对避雷器的灭弧能力和保护性能都有极大的影响。试验证实,在不同类型的灭弧盒中,狭缝宽度较窄,

瓷质材料较疏松,灭弧盒表面较粗糙,都使弧压降增高。对于既定的灭弧盒而言,弧压降大小的变化与续流幅值之间不存在简单的线性关系,必须经过实测才能确定。在设计良好的灭弧盒中,弧压降最大值可达 800 ~ 1600V,切断比在 1.35 ~ 1.6 之间。例如在国产 FCZ2、FCZ3 型磁吹避雷器中,所有限流间隙中弧压降总和约等于避雷器额定电压的 10% ~ 20%,进行设计时,一般选取 10% 计入产品的额定电压。

为改善间隙的放电特性、降低冲击系数以及均压的需要,灭弧盒中还附有均压电容器、分路电阻、离子照射装置和触发电极。

吹弧线圈是限流间隙的一个重要配件。单个线圈的匝数通常在 27 ~ 32 匝之间,选用 $\phi 0.8$ 左右的高强度漆包线绕制。线圈外部用电工布带环绕并浸渍清漆,具有很好的机械强度和足够的热稳定性能。为防止冲击电流损坏匝间绝缘,线圈两端并联保护间隙(又称辅助间隙)或非线性电阻,当冲击电流在线圈上的压降 $L \frac{di}{dt}$ 达到一定值时,保护间隙击穿或者非线性电阻阻值变小,使冲击电流大部分能量由并联支路通过。冲击电流通过后,保护间隙恢复到初始的绝缘状态或者非线性电阻又恢复到高阻状态,迫使工频续流必须流过线圈以便产生磁场将电弧拉伸。采用非线性电阻保护吹弧线圈时,避雷器的残压增加了百分之几,这在估价产品的保护水平时应予注意。

吹弧线圈与装有电极的灭弧盒构成间隙组。设计不同,选用的吹弧线圈与灭弧盒的数量、排列方式也不同,间隙组具有的额定电压也不同。做为示例,图 3-13 示出了两种国产磁吹避雷器中间隙组的等值电路。为防止在切断续流时,电弧被吹出灭弧盒外引起上、下相邻的火花间隙之间发生短路,有的设计中,间隙组用绝缘支架紧固,压紧灭弧盒不使之露出缝隙,或者用绝缘布带包紧再涂以环氧树脂处理,这两种固定方式如图 3-14 所示。

电弧分割式间隙是国外电站避雷器广泛采用的一种火花间隙,图 3-15 示出了这种间隙的结构图。在工作中,工频电弧依其自吹作用进入灭弧栅,继而被分割成许多短弧。续流过零时,由于这些灭弧栅组成的阴极上总的恢复强度决定了避雷器具有较高的灭弧能力。灭弧栅由导磁板和铜质辅

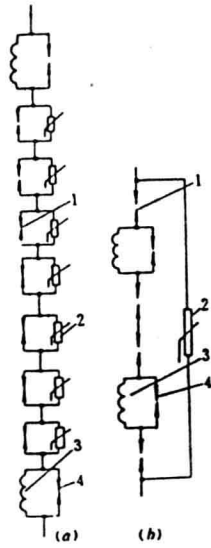
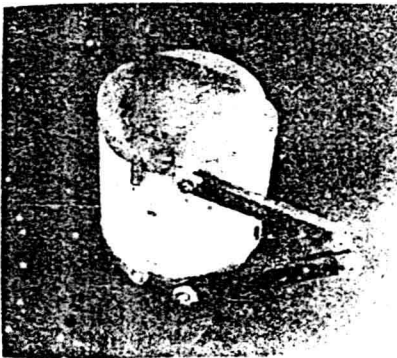
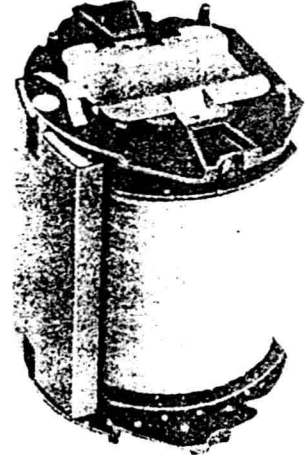


图 3-13 间隙组的等值电路图

(a)FCZ3 型磁吹避雷器的间隙组;(b)FCZ2 型磁吹避雷器的间隙组
1 - 灭弧间隙;2 - 分路电阻;3 - 吹弧线圈;4 - 辅助间隙



(a)



(b)

图 3-14 间隙组的固定方式

(a)FCZ3 型鞋吹避雷器的间隙组;(b)BBC 公司 HM 型磁吹避雷器的间隙组

助板交错布置构成,导磁材料的存在减少了磁阻,增强了吹弧效果,辅助板的作用是吸收电弧热量,促其冷却。间隙旁边设置一个 200pF 左右的陶瓷电容器,在较高电压下,电容器缺口气隙的空气首先游离,产生电晕,照射电

极工作面,稳定了放电电压,这种间隙的切断比约为 1.5。

基于气体放电固有的特性,火花间隙的工频放电电压和固定陡度的冲击放电电压的概率密度服从于正态分布,其数学表达式如下

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-5)$$

其中, $-\infty < x < +\infty$, μ 为数学期望,此处为避雷器放电电压中概率密度最大的一个数值,亦即平均值,均方差 σ 是衡量每次测量值与平均值之间偏差程度的参数,计算方法如下

$$\sigma = \sqrt{(U_x - U_{av})^2} \quad (3-6)$$

式中的 U_x 是某次试验时的放电电压测量值, U_{av} 为全部试验的平均值。

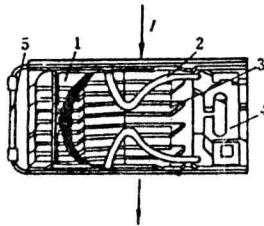


图 3-15 电弧分割式间隙

1-导磁板;2-电极;3-辅助板;4-陶瓷电容器(离子照射装置);5-分路电阻

大量研究试验指出,电极工作面的光洁度和照射作用对间隙放电电压的影响很显著。制造良好和具有照射条件的火花间隙,它们的放电电压分散性很小。在工频电压下,均方差 σ 为平均放电电压的 1.5% ~ 3%;而在一定陡度的冲击电压下,其值为 1% ~ 3%。

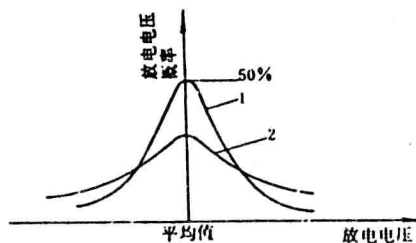


图 3-16 火花间隙放电电压正态分布曲线

1-间隙的分散性小;2-间隙的分散性大

图 3-16 定性地示出了平均放电电压相同但分散性不同的两个间隙的放电电压正态分布曲线。

第三节 电压分布与放电特性的调整

避雷器的电压等级愈高,内部串联的火花间隙也愈多,这些火花间隙的等值电路可用图 3-17 来表示。当避雷器顶端施加工频电压或冲击电压时,由于电极对地杂散电容的分流作用, $i = i_1 + i_2$ 、 $i_1 = i_3 + i_4$ 、……,流经各个间隙的电流逐渐减少,因而出现了各个火花间隙上电压降都不相同的现象。

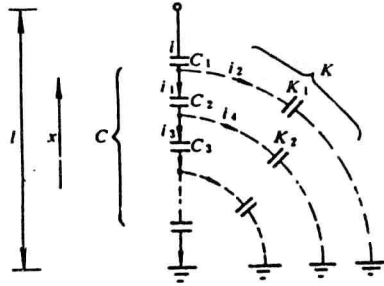


图 3-17 火花间隙组的等值电路

首先分析工频电压作用时的情况。将避雷器串联火花间隙处理成分布参数回路,设 C 为串联间隙的总电容, X 为避雷器对地总杂散电容。当电容链高度等于 1 时,单位长度分布的串联电容和杂散电容分别为

$$C_1 = Cl \quad (3-7)$$

$$K_1 = \frac{K}{l} \quad (3-8)$$

单位长度上的电压和电流分布情况可用下面微分方程来表示

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du}{dx} = \frac{I}{j\omega C_1} \end{array} \right. \quad (3-9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI}{dx} = Uj\omega K_1 \end{array} \right. \quad (3-10)$$

式(3-9)两边对 dx 微分后再将式(3-10)代入,其结果得

$$\frac{d^2U}{dx^2} - \frac{K_1}{C_1}U = \frac{d^2U}{dx^2} - \frac{K_C}{l^2}U = 0 \quad (3-11)$$

考虑边界条件, X 等于 0 时 U_x 等于 0, X 等于 1 时 U_x 等于施加在避雷器顶端的工频电压 U_0 ,解得各点对地电压

$$U_x = U_0 \frac{\text{sh} \frac{X}{l} \sqrt{\frac{K}{C}}}{\text{sh} \sqrt{\frac{K}{C}}} \quad (3-12)$$

根据式(3-12),图 3-18 定性地示出了避雷器工频电压分布的曲线。显然,假如没有杂散电容的分流作用,火花间隙上电压分布将是线性的,如图 3-18 中虚线所示。计算得出,杂散电容愈大,曲线愈低垂,电压分布愈不均匀。

对于冲击电压分布的研究,可以采用相似的方法来解释。将冲击电压 u_t 取代式(3-11)中的 U ,设总的串联电容 C 和杂散电容 K 对应冲击电压波头等效频率呈现的容抗分别用 Z_C 和 Z_K 来表示,则求得各点冲击电压分布规律为

$$u_x = u_{t0} \frac{\text{sh} \frac{X}{l} \sqrt{\frac{Z_C}{Z_K}}}{\text{sh} \sqrt{\frac{Z_C}{Z_K}}} = u_{t0} \frac{\text{sh} \frac{X}{l} \sqrt{\frac{K}{C}}}{\text{sh} \sqrt{\frac{K}{C}}} \quad (3-13)$$

比较式(3-13)和式(3-12),可见其幅值的分布规律和工频电压作用时是一样的。

由图 3-18 中的曲线还可看出,靠近避雷器顶端的几个间隙承受着很大的电压梯度。当避雷器由几个放电电压相等的间隙组成时,即使施加在避雷器上的电压不高,顶端附近几个间隙上分布的电压梯度也能够达到足

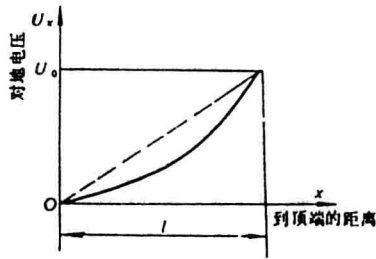


图 3-18 间隙组上电压分布曲线

以使它们击穿的数值,于是外施电压又全部作用在其余的间隙上,从而加大了这些间隙承受的电压梯度,最终全部发生击穿。所以, n 个放电电压相同的火花间隙组成的避雷器,其工频或者冲击放电电压都小于单个间隙放电电压值的 n 倍。换言之,间隙组的放电电压总低于各个间隙放电电压的算术和,在这种情况下,避雷器额定电压也低于各个单间隙额定电压的总和。如果不改善上述的电压分布状况,运行中的避雷器往往在不大的工频电压升高或操作冲击波出现时发生误动作,缩短了避雷器的寿命甚至会发生爆炸。

为克服上述缺点,配电避雷器通常采用厚壁瓷套或增加一个内套管的办法减少对地杂散电容。有的制造厂在间隙组的上方即电压梯度高的部位布置1~2个放电电压高的间隙,还有的制造厂将平板电极中央工作面直径制成大小不一的两种规格,使极间电容不等(即不等容间隙)。避雷器顶端附近布置几个直径大的间隙,人为地改变电压分布的规律。

进一步改善的措施是增设分路电阻。设计分路电阻的阻值远比间隙组的容抗值小,这样可以强制改善工频电压或接近工频的操作过电压沿火花间隙组的分布状况,提高了避雷器在这两种电压作用时的放电值。我国FZ型普通阀式避雷器采用的间隙组结构如图3-19所示。每组内有2片分路电阻片串联,技术数据为:用直流试验电压 $4000 \pm 50V$ 测试时,电导电流在 $400 \sim 600\mu A$ 之间。这种电阻的热容量很小,因此,避雷器进行工频放电电压试验时,应控制施加在试品上的电压超过避雷器额定电压以后的作用时间不给予0.2s。近几年来,国内许多制造厂经过改进工艺,已达到了IEC标准要求的不低于5s的技术要求。由于具有分路电阻的间隙组电压分布较

均匀,所以这种避雷器的冲击系数和恢复强度也比无分路电阻的避雷器优越。在一些高压和超高压磁吹避雷器中,为获得更理想的电压分布,往往采用分路电阻和电容器并联的阻容均压结构。在冲击电压波头的等效频率作用下,电容器的容抗比分路电阻阻抗小,它能有效地控制冲击电压的分布。因而,这种避雷器在 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 间的电压分布是很理想的。图 3-20 示出了采用阻容均压结构的避雷器典型的伏—秒特性曲线。电阻、电容参数选择适当,伏—秒特性曲线比较平坦;设计不当,往往形成类似烟斗的形状。并联电容的容量一般选择在 $100 \sim 1000\text{pF}$ 之间,当容量较小时,伏—秒特性曲线凹陷部位处于预放电时间短的区间;容量增大,凹陷部位向时间坐标的右方移动。适当选取几种容量不等的电容器装在不同的间隙组上,可以获得与被保护设备 BIL 和 BSL 配合良好的伏—秒特性曲线,如图 3-20 中的曲线 1 所示。

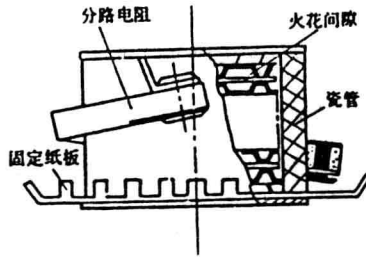


图 3-19 FZ 型避雷器间隙组

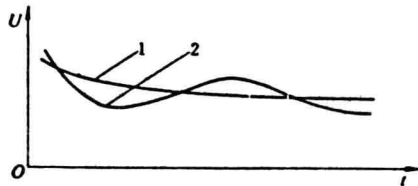


图 3-20 高压避雷器伏—秒特性曲线

1-设计良好的伏—秒特性曲线;2-烟斗状的伏—秒特性曲线

均压电容常为高压陶瓷电容器或聚氯乙烯电容器,早期设计的磁吹避雷器,曾采取在瓷碗(做为固定间隙组用)底部端面喷铝的办法使之兼做均压电容。

在避雷器顶端安装均压环也是改善工频放电电压的常见措施。均压环