

第3篇 高电压技术

主编单位:

西安高压电器研究所

编写单位:

西安交通大学

沈阳变压器研究所

华中工学院

主 编:

马大地

编 写 人:

胡凤昌 秦澍麟 冯允平

严 璋 曲 岩 杨济三

招誉颐 潘炳宇 于恩广

黄奕庭



常 用 符 号 表

C ——电容	U ——电压
C_m ——热容量	U_a ——气体放电电压
c ——表面比电容	U_b ——液、固体击穿电压
D ——电位移	$U_{90\%}$ ——50% 放电电压
d ——距离	x ——电抗
E ——电场强度	z ——阻抗
f ——频率	α ——电子碰撞游离系数
H ——海拔高度	γ ——电导率; 表面游离系数
I, i ——电流	δ ——空气相对密度
K ——过电压倍数; 系数	ϵ ——介电常数
L ——电感	ϵ_r ——相对介电常数
N ——线圈匝数	ϵ_0 ——真空介电常数
P ——压力	η ——效率
P_{cs} ——概率	θ ——温升
Q ——品质因数	ρ ——电阻率
R ——电阻	σ ——标准偏差(真值)
r ——半径	φ ——电位
S ——距离	ω ——角频率
T ——时间; 时间常数	

第1章 概 述

1 高电压技术的主要内容

高电压技术主要是随着高电压大电网的建设和高压电气设备的研制而发展起来的。现代大型发电厂多建在动力资源丰富的江河流域和燃料产地,距负荷中心往往较远。为了经济合理地实现大功率输电,提高输电电压是一个重要途径。目前,国际上交流输电电压已达765千伏,直流输电电压已达 ± 533 千伏,110到275千伏输电线路也已经引入城市和工业中心的变电站。为了压缩变电站的占地面积,全封闭组合电器发展较快。在这些方面都提出了不少特殊的高电压技术问题。此外,其他技术领域应用高电压技术的也日渐增多。

高电压技术的主要内容有下述几个方面。

1.1 绝缘特性的研究

高压电气设备应能承受住某些高电压的作用。高电压的主要类型有交流工作电压、直流工作电压、雷电过电压和内部过电压。为此,就需要研究电介质在各种类型高电压下的绝缘特性、耐电强度和放电机理,以便合理解决电气设备和电力系统的绝缘结构问题。超高压输电线路及电气设备在工作电压下的绝缘老化、局部放电、电晕、无线电干扰、噪音、静电感应等高电压技术问题的研究,也很重要。为了耐受内部过电压,空气长间隙的操作波放电特性也必须着重研究。

1.2 过电压及其保护措施的研究

雷电过电压和内部过电压对输电系统的绝缘是个严重的威胁。因此,研究这些过电压的特性和规律,制订限制措施,以便经济合理地确定输电线路及电气设备的绝缘水平,是高电压技术的又一主要内容。此外,高建筑物、通讯线路、天线、飞机、轮船、油库等防雷问题也是高电压技术的一个方面。

1.3 高电压试验设备和高电压测量技术的研究

为了在试验室研究电介质和电气设备的绝缘特性,需要研制各种类型的高电压发生器,主要有工频电压试验设备、冲击电压发生器、操作波电压发生器、冲击电流发生器和直流电压发生器等。高电压测量装置和测量技术是正确进行高电压试验的基础,也必须不断研究改进。

1.4 试验方法的研究

为了合理地进行高压电气设备的绝缘特性试验,制订正确的试验方法很重要,例如介质损耗角正切($\tan \delta$)试验、耐压试验、局部放电试验、淋雨试验等。高压电气设备外绝缘的耐电强度,受到气压、温度、湿度、风沙、污秽、雨水、射线等因素的影响而发生变化,找出它们的规律性,制订出不同条件下外绝缘耐电强度的换算办法和等效的试验方法,也是高电压技术研究的重要内容。

1.5 高电压技术在其他技术领域的应用

随着科学技术的飞速发展,高电压技术的应用范围日益扩大。目前,在基本粒子加速器、可控热核反应、激光技术、电子束加工、静电除尘、静电喷漆、静电复印、医疗器械、冲击加工成型或破碎、毫微秒方波等方面,都利用高电压技术解决某些特殊问题。

2 高电压的类型和特点

工程上,通常把1000伏以上的电压称为高电压。常遇到的高电压类型有直流电压、工频交流电压、冲击电压(持续时间在微秒级的电压,包括雷电和矩形波电压)以及高频电压(包括电力系统的内部过电压)。

2.1 直流和工频交流高电压

交、直流输配电系统及大多数电气设备的长期工作电压均属此种类型。这种高电压不仅会使设备绝缘游离老化、以致逐渐损坏,还会产生无线电干扰。

由于静电感应,在高电压电场中的不接地导体会感应产生高电压;若在交流高压电场内有接地导体,则有感应电流经导体流入大地。这种感应电压或感应电流都会危及设备和人畜的安全。例如,在高压输电线下面,当地面场强达到3千伏/米时,如无屏蔽措施,人就开始有不适感觉;场强再高,人就会有麻电、皮肤刺痛等感觉;当场强到达14~15千伏/米时,人就有较强烈的生理反应,工作困难。感应电压或电流与输电线的电压等级、被感应物体的大小及其与输电线的距离有关,可以通过计算或实验来确定。

为了人身及设备安全,在紧邻高电压电场的工作地点设置接地的金属屏蔽网是消除静电感应的有效措施。运输工具采用导电橡胶轮胎等办法,也可减小静电感应对人身安全的威胁。

2.2 雷电高电压

2.2.1 雷电的基本特征

云层在上升气流等的作用下形成带电荷的云。附近地面由于静电感应带有异号电荷。当雷云某处的电场强度达到空气的击穿场强时,雷云对地或者云对云之间就产生雷闪。雷闪主放电的电流很大,并伴有巨声和强光。云与地间的雷闪中,负极性雷占绝大部分;雷电流从数千安到数百千安,其电流波形如图3-1-1所示。据统计,其波前时间多数为1.5~2

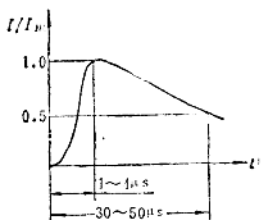


图3-1-1 雷电流波形图

微秒,平均波长时间约30微秒,大于50微秒的很少。雷电流陡度超过7.5千安/微秒的约占一半。雷击房屋、树木、杆塔、天线等物体时,雷电流可使该物体烧毁;雷电流通过物体和土壤时产生的电压降落就是雷击高电

压,它对波及范围内的物体及人畜会造成严重损伤。

2.2.2 电力系统中的雷电过电压

当雷云直接或间接对变电所或输电线路(如杆塔、导线、避雷针)放电而产生的冲击过电压统称雷电过电压,其幅值超过系统的额定电压。

a. 直击雷过电压 雷直击输电导线产生的过电压称直击雷过电压,它从着雷点沿导线向两侧传播,可能引起相间绝缘闪络,使邻相导线上出现波前很陡的过电压;电压行波进入变电站也可能损坏绝缘。

雷击避雷线(架空地线)或杆塔时,雷电流在其波阻抗及接地电阻上产生电压降;当电压降过高时,会击穿它与导线间的绝缘;由此在导线上产生的过电压叫做反击过电压。这种过电压的波前很陡,幅值也很高,有可能再引起相邻线的绝缘闪络。雷电流流过接地体时,在其周围地面形成很高的电位梯度可能危及人畜。

在直击雷过电压中,以直击输电线的过电压为最高。

当雷电过电压使管式避雷器或保护间隙动作时,则导线上的过电压将从某幅值迅速降至零值附近;这种电压波叫冲击截波,如图3-1-2b所示,对电气设备绕组的纵绝缘威胁很大。

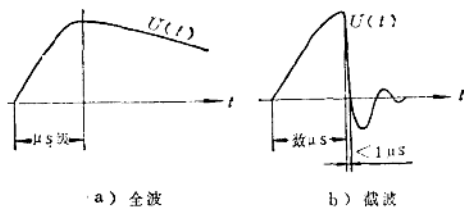


图3-1-2 冲击高电压波形图

b. 感应过电压 在雷闪先导阶段,在附近的杆塔、避雷线和经变压器中性点接地的输电导线上感应出异号的束缚电荷。如果输电线附近的地面遭到雷击,束缚电荷在雷闪主放电阶段突然变为自由电荷;它沿导线向两侧移动形成的过电压叫做感应过电压。这种过电压多数为正极性,波前时间约10微秒,其幅值在三相导线上基本相同,可能达到300~500千伏,并引起工作电压110千伏以下的设备绝

缘闪络。

雷电主放电通道周围磁场的迅速变化，会在邻近的输电导线上感应出过电压；但因落雷点紧靠线路地面的几率极小，这种过电压一般可不考虑。

2.2.3 冲击高电压

这种高电压是冲击电压发生器产生的，有全波和截波两种，其波形如图 3.1-2 所示。

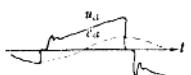
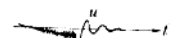
2.3 电力系统的内部过电压

电力系统由于正常操作、故障或其他原因从一

种状态过渡到另一种状态时，电磁能在系统内部发生振荡而引起的过电压，统称内部过电压。其中持续时间相当长而且无阻尼或弱阻尼的过电压叫做暂态过电压，这是持续的或有几个连续出现峰值的过电压，它对避雷器参数和系统绝缘水平的确定起着重要的作用。其中衰减很快、持续时间较短的过电压称为操作过电压，这类过电压常常起因于断路器的操作。内部过电压幅值与系统的最高运行相电压幅值之比，称为内部过电压倍数 (K)。

各种内部过电压的主要特征见表 3.1-1 所列。

表 3.1-1 内部过电压的特征

过电压名称	过电压倍数 K	持续时间	主要限制措施	典型波形
暂态过电压	单相故障接地	1.1~1.3	0.1~1 s	
	甩负荷	1.2~1.3	0.1~10 s	
	电弧接地	≤ 3.5		
操作过电压	线性谐振	≤ 3	0.1~100 s	
	空载线末端电压升高	≤ 1.4	0.1~100 s	
	铁磁谐振	≤ 3.5	~1 s	
	参数谐振	≤ 3		
操作过电压	开断电感性负荷	≤ 4	0.2~40 ms	
	合空载线	≤ 3	5~100 ms	
	重合空载线	≤ 3.5	5~100 ms	
	切断空载线	≤ 3.5	5~100 ms	

2-3-1 单相故障接地过电压

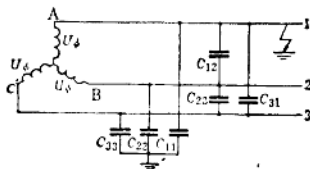
电力系统发生单相接地故障时, 零序电流在线路阻抗上产生压降而使健全相对地电压升高。这种现象就是单相故障接地过电压。它的过电压倍数与系统的零序阻抗及故障点的接地电阻有关。

2-3-2 甩负荷过电压

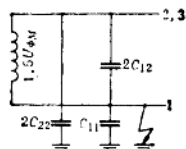
系统突然失去负荷时, 由于输电线路的电容电流对发电机有助磁作用和发电机转速增加, 使系统电压升高。这种现象就是甩负荷过电压。

2-3-3 电弧接地过电压

在中性点不直接接地的三相系统中, 若发生单相电弧接地故障 (见图 3-1-3), 流过故障点的电流是另外两相的对地电容电流; 由于电流值一般很小, 往往不能形成稳定电弧。产生最严重的过电压情况如下所述。故障相 (例如 A 相) 的相电压在最大时 (例如正峰值 $U_{\phi m}$) 发弧, B 和 C 相的对地电压要从 $-0.5U_{\phi m}$ 突变到 $-1.5U_{\phi m}$; 在过渡过程中, 有变压器和线路的电感与线路电容形成的高频振荡电流流过故障点; 若 B 和 C 的对地电压变到 $-1.5U_{\phi m}$ 时, 高频振荡电流恰好第一次过零而使故障点电弧熄灭, 则三相导线上的电荷在熄弧后将重新分布而使整个三相系统获得一个负直流电压; 半个工频周期后, A 相电压为 $-U_{\phi m}$ 与负直流电压之和, 若故



a) 三相系统原理图



b) 等值单相图

图 3-1-3 电弧接地原理图

C_{11} 、 C_{22} 、 C_{33} —导线对地电容

C_{12} 、 C_{23} 、 C_{31} —导线相间电容

U_{ϕ} —系统相电压

障点再次发生电弧接地, 则产生与前述相似的过程; 由于系统中留存上次的负电荷, 高频振荡电流加大, 于是这一次可以使整个系统获得更高的正直流电压。这样, 电弧时熄时现, 由于系统内电磁能的积聚, 在故障相和健全相都可能出现很高的过电压。

实际上, 故障相电弧接地不一定都在对地电压最大值时发生, 高频电流也不一定都在第一次过零时使故障点电流熄灭, 再加上导线和电弧本身消耗能量, 电弧接地过电压一般不超过 3~3.5 倍。

2-3-4 谐振过电压

在某些运行状态下, 系统的固有频率如果恰与电源频率相同, 电容和电感元件上就会出现过电压。这种现象称为谐振过电压。

a. 线性谐振过电压和电容效应 输电线路可用图 3-1-4 的 LC 串联回路来表示, 线性回路的固有频率 $f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$; 若满足电源频率 $f = f_n$,

条件就发生线性谐振, 谐振时 $I = \frac{e}{R}$; 由于 R 很小, I 值可能很大, 结果在电感和电容上出现很高过电压。这种现象叫做

线性谐振。在实际电路中, 只要回路的固有频率与电源频率接近, 电容和电感上的电压就会升高, 这种现象称为电容效应。在电力系统中, 当电源容量较小和空载线路较长时, 由于电容效应, 线路上的电压, 尤其是线路末端的电压, 就会高于电源电压。长线电容效应往往助长内部过电压幅值上升, 因此, 它对确定线路和变电所的绝缘水平有重要意义。

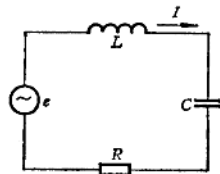


图 3-1-4 系统线性谐振等值回路

e—交流电源电压 (频率为 f)

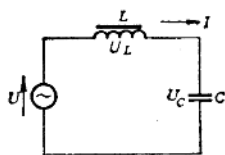
L—线路电感

C—线路电容

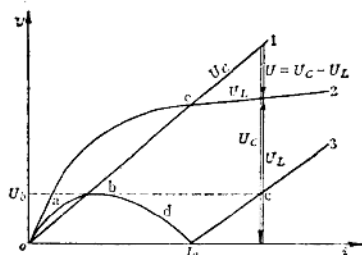
R—导线电阻

I—回路电流

b. 铁磁谐振过电压 图 3-1-5 a 中的 L 代表系统中的变压器、电压互感器等具有铁心的非线性电感, C 代表系统中的电容。在图 3-1-5 b 中, C 和 L 的伏安特性分别由曲线 1 和 2 表示; 曲线 3 是这两条曲线的差值 ($U = U_c - U_L$), 也就是整个回路的伏安特性曲线。当 $|U_L| = |U_c|$ 时, 曲线 1 和 2 交于谐振点 e, 电流为 I_0 ; 当 $|U_L| > |U_c|$ 时,



a) 非线性谐振等值回路



b) 元件伏安特性

图3-1-5 系统的非线性等值回路及其伏安特性

回路电流 I 小于 e 点对应的 I_0 值，回路呈电感性；当 $|U_L| < |U_C|$ 时， I 大于 I_0 ，回路呈电容性。如将电源电压逐渐上升，或由某些外界“激发”因素使电压上升，回路电流沿曲线 ob 上升（见曲线3）；当电压超过 b 点对应的 U_0 时，回路电流将跳到 C 点对应的值，与此相应，电容和电感上就突然产生过电压。这种过电压称为非线性铁磁谐振过电压。它有如下特点：

1) 谐振范围大，只要 $C > \frac{1}{\omega^2 L}$ ， L 和 C 在很大范围内都能谐振。除基波谐振外，尚可发生谐波谐振。

2) 谐振过电压的产生及其幅值大小受回路中的电阻损耗和电感元件的饱和效应影响较大。

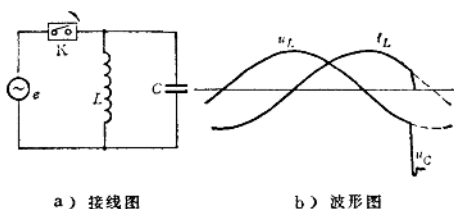
3) 谐振是突然发生或消失的。这种现象称为谐振的跃变。基波谐振发生后，电流的基波相位将发生 180° 的翻相，在三相系统中会引起相序改变。

c. 参数谐振过电压 有铁心的电感是非线性的，它的电感量因周期性变化会导致机械能直接变成电磁场能而造成非线性的参数谐振过电压。它的振荡频率不同于工频频率。发电机的同步自激过电压和异步自激过电压就属此类型。

2.3.5 开断电感性负荷的过电压

空载变压器、并联补偿电抗器、消弧线圈和大

型异步电机等在电网中都是电感性负荷。电感大和激磁电流小是这些电感性负荷的特点。从图 3-1-6 可见，用灭弧能力较强的断路器切除这种负荷时，电感电流在自然过零前被迫熄弧，电感 L 中的磁场储能以振荡形式突然转变成杂散电容 C 中的储能而产生过电压。断路器灭弧能力越强，过电压越高；电感负荷的杂散电容 C 越大，则过电压越低。



a) 接线图

b) 波形图

图3-1-6 开断电感性负荷原理图

e —电源电压 L —电感性负荷 C —电感负荷的杂散电容 K —开关 u_L, i_L —电感负荷的激磁电压和激磁电流 u_C —电感负荷上的过电压

2.3.6 合空载线路的过电压

忽略输电线路损耗时，合空载线路的

等值回路可以粗略地用图 3-1-7 表示。设电源电压在最大时

($t = 0$) 合闸，则线路上的电压（即 C 上 L —线路的电感 C —线路电容电压）如下式所示。

$$u = U_{SM}(\cos \omega t - \cos \omega_1 t) \quad (3-1-1)$$

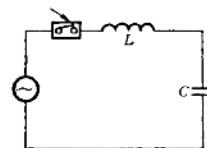
式中 U_{SM} ——合闸后线路上的稳态电压（峰值），由于暂态过电压和长线电容效应， U_{SM} 大约为相电压 $U_{\phi M}$ 的 $1 \sim 1.4$ 倍；

ω ——电源电压的角频率；

ω_1 ——回路的固有角频率 ($\omega_1 = \sqrt{\frac{3}{LC}}$)

分析 (3-1-1) 式表明，最高过电压可接近 $2U_{SM}$ 。合空载线路过电压的持续时间可达 $2 \sim 3$ 个周波，幅值也较高。在 330 千伏及以上系统中，往往作为选择系统绝缘水平的主要依据。

目前，很多线路采用自动重合闸。由于导线在重合之前可能具有异号残压，重合闸后可能产生 $3U_{\phi M}$ 的过电压。

图3-1-7 合空载线路等值回路
 L —线路的电感 C —线路电容

2.3.7 切断空载线路的过电压

切断空载线路时过电压的发展过程如图 3-1-8 所示。切断前, 线路上的电容电流 i_c 领先于工频电源电压 (U) 90° 。当 $t = t_1$ 时, 设 i_c 过零, 将线路和电源断开, 由于导线上的电荷无处可流, 将使导线维持在电位 $+U_{\phi M}$ 上不变。当电源电压变到 $-U_{\phi M}$ 时, 开关断口上的电压达到 $2U_{\phi M}$ 而可能重燃。重燃后, 导线上的电压将从起始值 $+U_{\phi M}$ 朝新的稳态值 $-U_{\phi M}$ 变化, 而其瞬态最大值将达到 $-3U_{\phi M}$ 。伴随瞬态过程的高频振荡电流 i_h 若在 $t = t_2$ 时过零而熄弧, 导线上就获得 $-3U_{\phi M}$ 的电压。

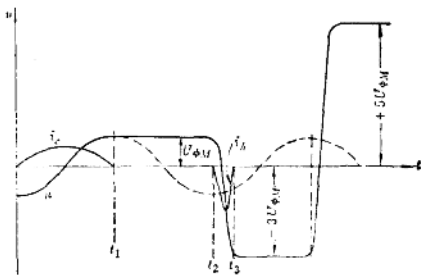


图 3-1-8 切断空载线路的过电压的发展过程

这种过程如果重复下去, 线路上将产生 $+5U_{\phi M}$ 甚至更高的过电压。但实际上, 断路器往往只发生一次重燃, 并且重燃不一定在工频电源电压达到最大值时发生, 同时, 线路电阻和电晕损耗都限制过电压的发展, 实测的最大过电压为 $U_{\phi M}$ 的 3~4 倍。

2.3.8 操作波电压

为了考核电气设备耐受操作过电压的能力, 在试验室内用操作波发生器产生操作波电压来模仿系统中出现的操作过电压。国际电工委员会规定的操作波标准波形是 250/2500 微秒。选择波前时间 250 微秒是考虑到它对设备考核较严。此外, 还推荐 100/2500 微秒、500/2500 微秒的波形和振荡波在某些场合下使用。

2.4 其他类型高电压

在某些技术领域内, 需要使用矩形波电压, 它的前沿和后沿时间都小到毫秒级。这种电压的产生和测量比微秒级的冲击电压要复杂得多。它的应用场合日益广泛, 值得研究。

电气设备试验中有时也使用中高频电压, 例如变压器在感应电压试验时承受的电压。在广播及电讯设备中, 则广泛应用高频高电压。

第2章 高压静电场

电气设备的绝缘, 应在保证安全运行的前提下作到经济合理。绝缘上的电场强度高往往往是绝缘损坏的原因。工程上, 分析解决高压电场问题的主要目的, 是在特定的电压和绝缘条件下, 如何使最高电场强度不超过规定值。

和超高频的电压变化速度比较, 绝大多数电气设备上的电压变化都很慢, 和电磁波的传播速度比较, 则电磁波在设备中的波过程可以忽略不计。因此, 绝大多数电气设备中的电场, 在任一瞬间都可看作“准静态”电场或近似地看作静电场 (参见本手册电工基础篇)。工程上还可以忽略某些次要因素以简化计算。

1 工程上常遇到的静电场问题

1.1 均匀电场与不均匀电场

电场强度的大小和方向在各处都相同的电场称为均匀电场, 如平板电容器极板中间部分的电场, 见图 3-2-1 a。其他情况, 统称不均匀电场。按不均匀程度的差别, 常分为稍不均匀电场和极不均匀电场。前者如球间隙距离不大于球半径的球隙电场, 见图 3-2-1 b; 后者如棒板间隙的电场, 见图 3-2-1 c。棒对棒间隙的电场是对称的不均匀场, 但比棒板间隙的电场要均匀些。图 3-2-1 d 是尖端效应产

生的不均匀电场。分析绝缘结构的击穿电压时,不仅要考虑绝缘距离,还要考虑电场不均匀程度的影响。间隙距离相同时,电场愈不均匀,击穿电压愈低。

电气设备中的电场多为不均匀场,为了提高绝缘结构的耐电强度,必须设法减小其不均匀度。

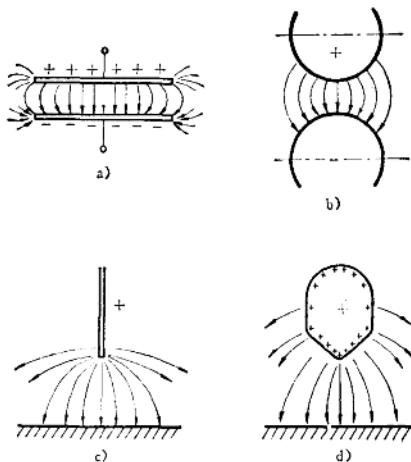


图3-2-1 均匀电场和不均匀电场

1.2 边缘效应与尖端效应

导体表面的电场强度,与其表面电荷密度成正比。在电极的边缘或尖端(见图3-2-1 a, d),由于曲率半径最小,表面电荷密度最大,电场强度最高,容易发生局部放电。这种现象称为边缘效应与尖端效应。所以,不论电极处于高电位还是接地,必须改善电极形状,避免曲率半径过小或出现尖角。

1.3 多层电介质中的电场分布

由不同介电常数(ϵ)的电介质组成多层绝缘时,因为分界面上不存在自由电荷,分界面上两侧的电场强度(E_1, E_2)会出现不连续的变化,他们的切线分量相等,但其法线分量(E_{1n}, E_{2n})与电位移的法线分量(D_n)保持 $D_n = \epsilon_1 E_{1n} = \epsilon_2 E_{2n}$ 的关系^①。可见,在分界面处,电场强度的大小和方向都发生突变(见图3-2-2); ϵ 大的电介质中, E 值小; ϵ 小的电介质中, E 值大。因此,在应用多层电介质绝缘时要注意:引入 ϵ 大的电介质会使 ϵ 小的电介质中的电场强度上升,因之有可能使 ϵ 小的电

介质遭到损伤。

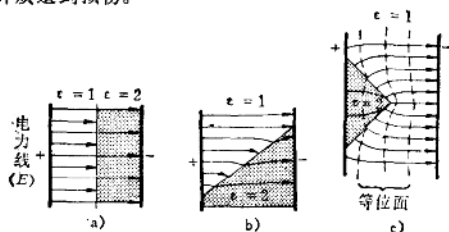


图3-2-2 平板电极间二层电介质中的电力线分布图
a—介质交界面与电力线垂直 b—介质交界面与电力线成角度 c—绝缘角状物对电场造成的畸变

1.4 静电感应

不接地的导体在电场中会具有一定电位,它随电场的变化而变化;这种现象叫静电感应。感应的强弱与电场的强弱及变化速度、被感应导体的大小及位置等因素有关。静电感应会引起各种问题,例如改变产品的某些特性、影响测量准确度、产生干扰信号、危及人身安全等。在高电压领域,它的影响尤为严重。利用屏蔽、接地等办法可以减小静电感应的影响。另一方面静电感应现象也可以用来解决一些生产上的问题,如静电复印、喷涂、除尘等等。

2 常用电介质的临界电场强度

电介质中的电场强度超过某一定值时,该介质就会部分(在不均匀电场中)或全部(在均匀电场中)地失去绝缘性能,这个数值叫做该介质的临界电场强度 E_c (简称临界场强)。它与电极形状、极距、散热等条件有关,在一定范围内变动。工程上在按照 E_c 值选取使用电压时,应注意使其有较大裕度。

常用电介质的临界场强如表3-2-1所列。

3 电场强度的计算

高压静电场的计算方法,可分为分析计算法和数值计算法两大类。分析计算法适用于电极表面可用简单数学函数表示的电场;准确计算很复杂时,还可以用近似计算以满足一般工程的需要。数值计算方法可以解决复杂的电场问题,准确度高;由于采

① 假定介电常数 ϵ_1 和 ϵ_2 是各向同性的。

表3-2-1 常用介质的临界场强

材料名称	相对介电常数 ϵ_r	临界场强① E_c kV/cm	说明
气体 (标准状态下)	空气	1.00058	25~30
	六氟化硫	1.002	≈80
	氮	1.006	25~30
	二氧化碳	1.00098	22~27
液体	变压器油	2.3~2.5	50~250
	硅油	2.6	100~200
	四氯化碳	2.2	≈600
固体	石蜡	2~2.5	100~150
	瓷	5.5~6.5	E_c 值因产品型号绝缘厚度及其制造工艺而有差别
	聚乙烯	2.2~2.4	200~300
	聚苯乙烯	2.5~2.6	200~300
	聚四氟乙烯	2~2.2	200~300
	聚氯乙烯	3~3.5	100~200
	有机玻璃	3~3.6	200~300
	环氧树脂浇铸品	3.8	200~300

① 在说明栏中未特别注明者均指有效值。

用电子计算机可以解决复杂繁重的计算工作量问题, 所以采用数值计算法日益广泛。

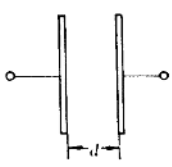
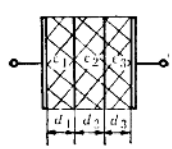
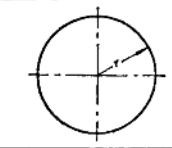
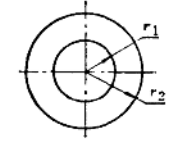
3.1 最大电场强度的分析计算法

绝缘结构中的电场分布常常是相当复杂的。为了检查电介质中的最大电场强度是否超过临界场强, 也为了选择电极形状和绝缘结构, 工程上常需要算出电介质中的最大电场强度。为此目的, 计算时常采用形状简单的电极代替实际的电极, 并引进某些校正系数。取代电极时, 须保持最大场强点附近的电场基本不变。

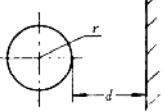
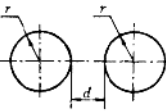
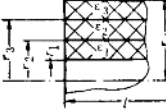
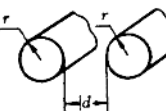
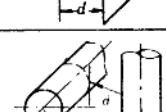
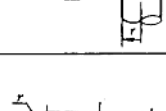
3.1.1 最大场强计算式

常见典型电场的最大场强计算式列于表3-2-2。其中 U 指电极间的电压 (千伏), 长度 (d 、 d_1 、 d_2 、 d_3 、 r 、 r_1 、 r_2 、 R 、 l 、 H 、 D) 的单位一律用厘米, 介电常数 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_r \times 8.86 \times 10^{-12}$ 法/厘米, ϵ_r 是相对介电常数。

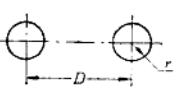
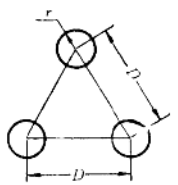
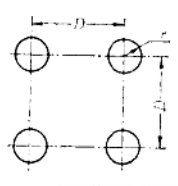
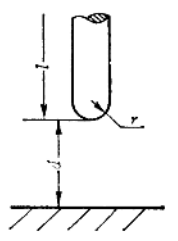
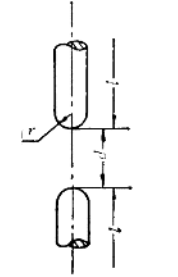
表3-2-2 最大场强计算式

电极形状	最大电场强度 E_{max} kV/cm	电 容 C F	应用场合 (例)	备 注
1 板对板 	$\frac{U}{d}$	$\frac{\epsilon S}{d}$	平板电容器	S 为单块平板面积 (cm^2), $d \ll S$, 不考虑边缘效应; ϵ_{min} 指 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 中最小的一个值
2 板对板 (多层介质, 以3层为例) 	$\frac{U}{\epsilon_{min} \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d_3}{\epsilon_3} \right)}$	$\frac{S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d_3}{\epsilon_3}}$	多层电介质组成的平板电容	
3 孤立球 	$\frac{U}{r}$	$4\pi \epsilon r$	高压设备顶罩	
4 同心球 	$\frac{U r_2}{r_1(r_2 - r_1)}$	外球接地 $\frac{4\pi \epsilon r_1 r_2}{r_2 - r_1}$ 内球接地 $\frac{4\pi \epsilon r_1^2}{r_2 - r_1}$	充气式标准电容器的端部	

(续)

电 极 形 状	最大电场强度 $E_{\max}$ kV/cm	电 容 F	应用场合 (例)	备 注
5 球对板 	$\frac{9U(r+d)}{10dr}$	$\frac{4\pi\epsilon d}{\left(\frac{2d}{r}-3\right)+\sqrt{\left(\frac{2d}{r}+1\right)^2+8}}$	变压器 套管防晕 罩①	
6 球对球 	$\frac{9U\left(r+\frac{d}{2}\right)}{10dr}$	$\frac{4\pi\epsilon d}{\left(\frac{d}{r}-3\right)+\sqrt{\left(\frac{d}{r}+1\right)^2+8}}$	球隙	
7 同轴圆筒 	$\frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$	$\frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$	全封闭 设备母线	$l \gg r$
8 同轴圆筒 (多层介 质, 以 3 层为例) 	见表注②	$\frac{2\pi\epsilon l}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\epsilon_1} + \dots + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{\epsilon_3}}$	电力电 缆	$(\epsilon_1 r_1)_{\min}$ 指 $\epsilon_1 r_1, \epsilon_2 r_2, \epsilon_3 r_3$ 中最小的一个值
9 平行圆柱 	$\frac{9U}{20r \ln \frac{r+d/2}{r}}$	$\frac{\pi\epsilon l}{\ln \left[\frac{d}{2r} - \sqrt{\left(\frac{d}{2r}\right)^2 - 1} \right]} - 1$	选平行 导线直径	l 为圆柱长度
10 圆柱与 平面平行 	$\frac{9U}{10r \ln \frac{r+d}{r}}$	$\frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left[\frac{d}{r} - \sqrt{\left(\frac{d}{r}\right)^2 - 1} \right]} - 1$	选高压 引线	l 为圆柱长度
11 垂直圆柱 	$\frac{U}{2r \ln \frac{r+d/2}{r}} \cdot \frac{9}{10}$	—	计算穿 墙导线直 径	
12 孤立圆环 	$\frac{U\left(1+\frac{r}{2R} \ln \frac{8R}{r}\right)}{r \ln \frac{8R}{r}}$	$\frac{4\pi^2\epsilon R}{\ln \frac{8R}{r}}$	设备屏 蔽环	

(续)

电 极 形 状	最大电场强度 $E_{\max}$ kV/cm	电 容 C F	应用场合 (例)	备 注
13 双分裂导线 	$\frac{U \left(1 + 2 \frac{r}{D} - 2 \frac{r^2}{D^2} \right)}{r \ln \frac{(2H)^2}{rD}}$	$\frac{4\pi\epsilon}{\ln \frac{(2H)^2}{rD}}$	分裂导线	H —离地高度, $H \gg D$, $D > 10R$, C —单位长度的电容
14 三分裂导线 	$\frac{U \left(1 + 2\sqrt{3} \frac{r}{D} - 2 \frac{r^2}{D^2} \right)}{r \ln \frac{(2H)^3}{D^2 r}}$	$\frac{6\pi\epsilon}{\ln \frac{(2H)^3}{D^2 r}}$	分裂导线	H —离地高度, $H \gg D$, $D > 10R$, C —单位长度的电容
15 四分裂导线 	$\frac{U \left(1 + 3\sqrt{2} \frac{r}{D} - \frac{r^2}{D^2} \right)}{r \ln \frac{(2H)^4}{\sqrt{2} r D^3}}$	$\frac{8\pi\epsilon}{\ln \frac{(2H)^4}{\sqrt{2} r D^3}}$	分裂导线	H —离地高度, $H \gg D$, $D > 10R$, C —单位长度的电容
16 棒对板 	$\frac{U \cos \theta_1}{d \sin \theta_1 \ln \left(\frac{1}{\tan \frac{\theta}{2}} \right)}$	$\frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{l}{r} \sqrt{\frac{4d+l}{4d+3l}}}$	保护间隙	$\theta_1 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{2r}{d}}$
17 棒对棒 	$\frac{U (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{d \sin \theta_1 \ln \left[\frac{\tan \frac{\theta_2}{2}}{\tan \frac{\theta_1}{2}} \right]}$	$\frac{\pi\epsilon l}{\ln \frac{l}{r} \sqrt{\frac{4d+l}{4d+3l}}}$	保护间隙	$\theta_1 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{2r}{d}}$ $\theta_2 = \pi - \theta_1$

① 应用举例: 计算250kV变压器套管端部伞罩($\phi 25\text{cm}$, 球心离端1.25m)的表面场强; 即 $r = 12.5\text{cm}$, $d = 112.5\text{cm}$,

$$U = 250\text{kV (有效值)}, E_{\max} = \frac{9U(d+r)}{10dr} = 20\text{kV/cm (有效值)} = 28.2\text{kV/cm (最大值)} < 30\text{kV/cm (最大值)}.$$

$$\textcircled{2} \quad (\epsilon_i r_i)_{\min} \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{r_4}{r_3} \right)$$

3.1.2 最大场强的计算曲线

最大场强也可由不均匀系数 f 和平均场强 E_{av} 求得。

$$E_{max} = E_{av} f = \frac{U}{d} f \quad \text{kV/cm} \quad (3.2-1)$$

式中 U ——极间电压 kV

d ——极间最小距离 cm

一些典型电场的均匀系数 f 如图 3.2-3 所示。图 3.2-4 给出几种典型电极的单位长度电容值曲线。球型电极的电容等于 $\epsilon_r C r$ (r 是球的半径, cm); 圆柱型电极的电容等于 $\epsilon_r C l$ (l 是圆柱的长度, cm)。

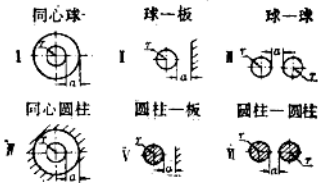
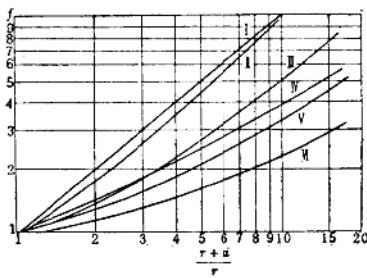


图 3.2-3 不均匀系数曲线

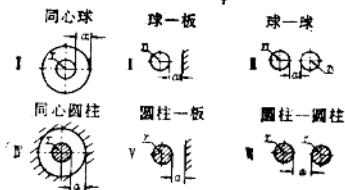
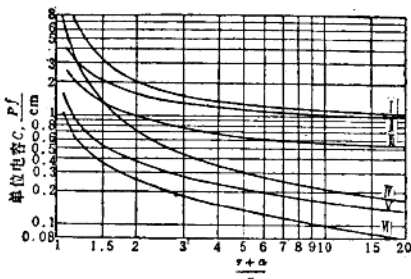


图 3.2-4 单位长度电容值曲线

3.2 静电场的数值计算法

数值计算法分网格结点电位法和电荷分布法两类。

3.2.1 网格结点电位法

将电场空间划成适当网格, 空间结点的电位为未知数, 边界上的结点电位为已知数, 根据电场的拉普拉斯方程建立结点电位方程组。解方程, 就得到空间各点的电位, 接着可求出各点的电场强度。

建立方程组的方法分有限差分法和有限单元法。有限差分法的原理是将电场的偏微分方程对于二维场(例如 $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$)变换成近似的线性差分方程组; 然后, 用迭代法或逐次近似的算术方法解此方程组, 就可求得网格结点的电位。

以图 3.2-5 计算变压器线圈端部电场为例说明有限差分法。这是把三维场近似化作二维场处理的例。选出计算区域见图 3.2-5b, 再将它划成等距正交网格如图 3.2-5c 所示。网格结点 $x_1 \sim x_{39}$ 的电位 $\phi_{x1} \sim \phi_{x39}$ 为未知数, 边界上 1~36 各点的电位 $\phi_1 \sim \phi_{36}$ 为已知值。本例中, 任意一点的电位可以认为是近邻四点电位的平均值, 例如 $\phi_{x1} = \frac{1}{4}(\phi_{x2} + \phi_{x10} + \phi_{36} + \phi_2)$; 按照这种关系, 在本例共可列出 39 个方程式, 解方程组就得到 $\phi_{x1} \sim \phi_{x39}$ 各个值。图 3.2-5a 的虚线就是计算得到的等位线。

边界条件给定的原始电位数据关系到计算结果的准确度, 必须慎重确定。例如图 3.2-5 中 H~K 段上各点的电位, 近似可按同轴圆筒算出。

网格划分的疏密程度要适当, 应在保证计算精度的前提下, 尽可能减少计算工作量。

有限单元法描述数学模型时, 选择的结点及坐

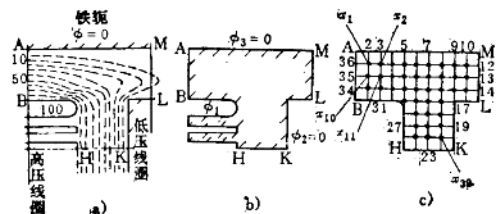


图 3.2-5 有限差分法举例

a) 变压器线圈端部等电位线 b) 计算区域 c) 计算网格

标系统比有限差分法有更大的任意性。求解时,对位能函数用变分原理进行计算。由于有限单元法的物理直观性较好,边界条件更接近实际情况,近年来得到较广泛的应用。

网格结点电位法的方程式不算复杂,但方程式数量多(数百直至上万),适用于电极形状复杂、电介质不均匀、研究有限范围内电场的场合;例如计算变压器及电缆内部的电场。

3.2.2 电荷分布法

电荷分布法分表面电荷法和等值电荷法。

表面电荷法是将电极表面电荷划分成若干个小单元,它们在边界各点上共同产生的电位为已知值;利用这个关系建立方程组,解之就得到各个小单元电荷的电荷量,即得到电极的表面电荷分布。然后,将各小单元电荷在电场空间产生的电场强度迭加起来,就得到所需点的电场强度。

等值电荷法,在空间配置若干个假想电荷。配置时,决定假想电荷的个数,决定各个假想的电荷符号和它的位置(位置按需要可选在电极内部或外部甚至大地内部),只留下各个假想电荷的电荷量为未知数。认为这些假想电荷共同产生的电场和原电场完全相同,因此,它们在边界上共同产生的电位为已知数;利用这种关系可以建立方程组。解方程组,就求得各个假想电荷的电荷量。接着,根据已知的假想电荷,就可求出空间任一点的电位及电场强度。需要指出,假想电荷的配置是否适当,除镜像法和某些对称特性可以利用外,还要取决于计算人员的实践经验。

电荷分布法的方程式较繁,但方程式的数目较少(100以下),适用于电极形状有一定对称性,电介质均匀,且电场延伸广的场合,例如计算穿墙引线的电场。

4 静电场的模拟研究

在复杂的绝缘结构设计中,可以用模拟方法研究静电场。模拟的原理是利用电流场和静电场的相似性,以适当造型得到的便于测量的电流场,代替难于测量的静电场。

模拟方法有电解槽法和导电纸法两种,都只能研究二度场。静电场都是三度场,但是许多实际静电场不随某一个(甚至二个)坐标变化;因此,在适当

的面上,它是二度场,可以用模拟方法研究。对于某些不适于直接模拟造型的静电场,可以将它适当变换(例如保角变换)后再模拟造型;通过变换可使造型简化,提高准确度。

4.1 电解槽法

电解槽法采用适当的模拟电极、电解液和槽底结构造成和电场相似的电流场;在模拟电极上加上电压后,用探针在电解液内测定电位分布。组成部分及测试系统见图3-2-9。图3-2-6就是用电解槽法测得的电位分布图。

4.1.1 电解槽的组成部分

a. 槽 槽底需用绝缘材料。槽的大小视研究对象而定。如果模拟孤立电极的电场,则槽的长和宽应比电极尺寸大20倍以上;如果模拟两个电极间的电场,则大6倍左右。

b. 电解液 可以采用硫酸铜溶液(0.5~0.033克分子浓度)、自来水或蒸馏水。

c. 模拟电极 电极材料可用铂、黄铜或石墨化的黄铜。应注意,选用的电极材料与采用的电解液应不发生化学作用。

4.1.2 单一电介质中电场的模拟

下面用例说明模拟方法。

a. 平板电极间电场的模拟 按选定的比例用金属板做成平板模拟电极,垂直插在电解液中;平板间距离也按比例决定。采用平底槽。见图3-2-7a。

b. 轴对称旋转电场的模拟 同轴圆筒间电场就是轴对称旋转场。如果内外圆筒足够长,则它中部电力线为辐射形,其模拟如图3-2-7b所示,内外圆电极按选定的比例分别决定其直径,垂直插在电

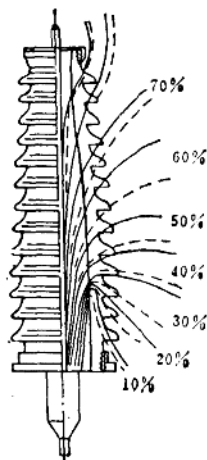


图3-2-6 110千伏电缆套管的电位分布图
实线——淋雨状态下
虚线——干燥状态下

解液中, 采用平底槽。在同轴圆筒的端部, 不论内外圆筒长度相等与否, 在任一通过轴心的纵切面上的电场都相同; 这个切面上的电场模拟如图 3.2-7 c 所示。图中 K 为模拟比例。模拟电极垂直插入电解液中时, 取槽底倾斜角 $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$; 角度过小则液层太浅会引起误差; 角度大于 20° 是可以的, 但相应要求将模拟电极做成圆弧形而增加麻烦 (参见图 3.2-8 c)。

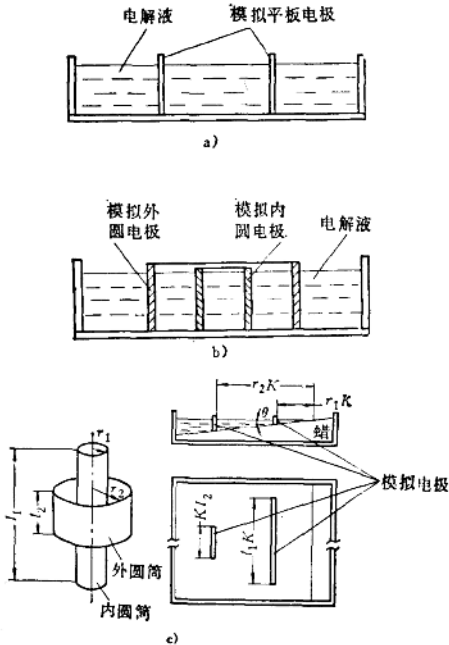


图 3-2-7 单一电介质中电场的模拟(例)

4.1.3 多层电介质中电场的模拟

模拟电介质的不同介电常数 $\epsilon_1, \epsilon_2 \dots \epsilon_m$ 的方法有二: 一是采用不同电导率 $\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_m$ 的电解液, 使 $\gamma_1 : \gamma_2 : \dots : \gamma_m = \epsilon_1 : \epsilon_2 : \dots : \epsilon_m$; 另一方法是用同一电解液, 但用电解液深度 h 来区别, 使 $h_1 : h_2 : \dots : h_m = \epsilon_1 : \epsilon_2 : \dots : \epsilon_m$ 。采用前一方法时, 不同电解液的交界面用塑料薄膜带隔开, 在带上每隔适当距离, 夹一 Π 形金属小夹子, 以保持两侧电流的连续性。采用后一方法时, 在液深分界处插一些导电针, 以矫正电流线的流向; 这方法较简单, 但在液深交界面处会产生某些畸变。图 3.2-8 中 a 是采用不同电导率的电解液, 模拟多层电介质平板电极间

的电场。b 是采用不同液深, 模拟多层电介质平板电极间的电场。c 是利用不同倾斜角, 模拟多层电介质轴旋转电场的通过轴心的纵切面上的电场; 其模拟条件是 $\theta_1 : \theta_2 : \dots : \theta_m = \epsilon_1 : \epsilon_2 : \dots : \epsilon_m$ 。倾斜角小于 20° 时, 液深交界面可采用垂直平面; 如果倾斜角大于 20° , 则该交界面应采用圆弧形, 如图 3.2-8 c) 所示。

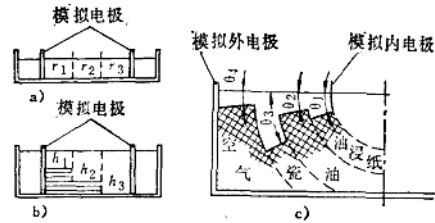


图 3-2-8 多层电介质中电场的模拟

4.1.4 电解槽的测试系统

见图 3.2-9 a, 将电位器动点置于一定位置, 在槽内移动探针, 找到指示仪器读数为零的点, 该点的电位和电位器动点电位相同。把找到的各点连起来, 就得到一条等电位线。将电位器动点移到另一点, 可以测得另一条等电位线。按此进行, 可以测得一族等电位线。按图 3.2-9 a 接线, 电位器动点接地, 可以避免探针引线对地电容的影响。

还可以采用图 3.2-9 b 接线。采用倒相高倍 (10000 以上) 放大器, 可以使探针电位经常接近零电位; 与此相应, 当探针测点的电位器动点电位相同, 指示仪器读数为近似零点。

探针应垂直插入电解液, 插入深度 1 毫米左右, 测试时应保持不变。

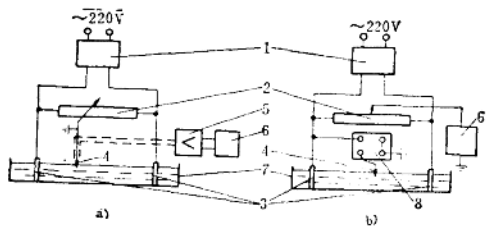


图 3-2-9 电解槽测试系统图

1—电源(音频振荡器) 2—电位器 3—模拟电极
 4—探针 5—放大器 6—指示仪器 7—电解槽
 8—倒相高倍放大器

a. 电源 通常采用1~2千赫的音频振荡器,输出电压20~30伏。50赫电源亦可使用,但极化效应较大,会增大误差。

b. 探针 可用铂丝或黄铜丝制作,也可用削尖的硬铅笔心。为了减小对电流场的影响,针头直径应小到0.1~0.3毫米。

c. 放大器 因为探针接触电阻大,放大器的交流输入阻抗应大于 10^8 欧。

d. 指示仪器 电源采用音频振荡器时,指示仪器可用耳机或示波器。图3-2-9 b中的指示仪器为相敏检波器。使用50赫兹电源时,亦可用振动检波计。

4.2 导电纸法

利用石墨导电纸可以模拟平面场,纸面就代表被模拟电场的某一平面。采用金属薄膜剪成平面场上的电极形状,贴在纸面上,就构成模拟电极。电源也可采用直流电压。测试系统和电解槽法相同(电源若采用直流电压,放大器和指示仪器应适应直流要求)。测试时,将导电纸平铺在绝缘台上,模拟电极上加电压后,在纸面上产生电压降,探针的针点碰到纸面上某点,就测得该点的电位。

模拟多层电介质中电场时,可按介电常数的比例,调配导电纸层数(即 ϵ 大者用的层数多)来模拟各种电介质。

导电纸法造型方便,但不能直接模拟轴对称旋转场的通过轴心的纵切面上的电场。另外,石墨导电纸的电导有各向异性的缺点,将引入附加误差;用电解液浸渍导电纸,可以减少这一缺点的影响。

5 静电场实测

工程上,常常实测电气设备的电场分布,以配合其他研究结果进行综合分析。实测时,应该尽量减小测量装置对原电场的畸变;试品本身电容很小时,更应注意。

5.1 小球隙法测量电压分布

小球隙法既简便又有一定准确度,常用于多断口断路器、绝缘子串、高压硅串等的电压分布测量。

用小球隙法测量悬式绝缘子串上的电压分布,见图3-2-10。绝缘子串由 K 个绝缘子组成,小球隙的放电电压调整为 ΔU 。将小球隙接在第 i 个绝缘子

上,当绝缘子串上的电压升到 U_i 时使小球隙击穿。依此类推,对每个绝缘子作同样试验,做 K 个试验后就可算得第 m 个绝缘子上的电压百分比为

$$P_m = \frac{100}{K \sum_{i=1}^K \frac{1}{U_i}} \%$$

小球直径按放电电压选择,一般不大于20毫米。

如果试品带非线性元件或者试品在运行中要求测定电压分布,则试品上的外加电压须为定值;为了测量试品上某一段的电压,必须调变小球隙距离,使之

刚好击穿,然后测得小球隙的击穿电压,即为该段所承受的电压。

小球隙在不同电位上的击穿电压会有差别,原电场也会受到小球隙一定程度的畸变,这些都是测量误差的因素。

5.2 平衡法(探针法)测量电压分布

此法用于探针伸入方便的场合,例如测量电机线棒槽口绝缘表面的电压分布,见图3-2-11。

在线棒的 A 处绕一细铜丝,将探针与之接触即可测得该处电位。为了避免测量仪器引入附加电容而畸变原电场,可用两反相交流电压(U_1 和 U_2 相

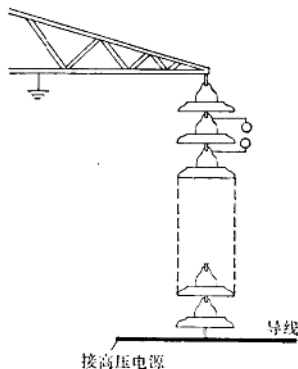


图3-2-10 小球隙法测量电压分布

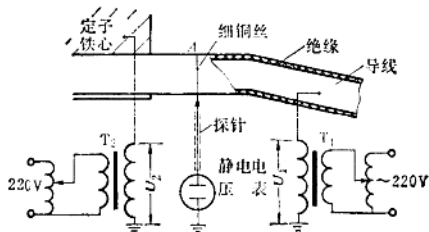


图3-2-11 平衡法测量电机线棒槽口绝缘表面的电压分布

角差 180°) 分别加于定子铁心和导线上; 调节 U_1 与 U_2 , 使指示仪表 (图中为静电电压表) 指示为零, 表明此时没有电容电流流过仪表。然后, 按 $|U_2| / (|U_1| + |U_2|)$ 求得 A 点电位相对值。

仪表有时不能指零 (只能指某最小值), 其原因多半是 A 点两侧等值阻容的比例不相同; 如在 U_1 (或 U_2) 的前面加一移相器, 可以使仪表指零。

测试时, 探针要细, 引线尽可能短, 以便减少对原电场的畸变; 引线在垂直位置时最好, 并且要屏蔽 (见图3-2-11)。

5.3 电容充电法 (习称“抓”电压法)
测量电压分布

图3-2-12 b 所示的测量装置由高压硅堆 D 和电容器 C 组成, 加屏蔽, 露出四个头 (1、2、3、4), 装在绝缘杆上, 可以带电操作。试品上加交流电压 U 后 (图3-2-12 a), 使测量装置的1、2端与试品的 AB 端相碰 (1碰 A , 2碰 B), 于是 AB 端的电压通过 D 向 C 充电。 C 上电压一旦充满, 测量装置对试品原电压分布就无影响, 这时 C 上电压等于 AB 端的电压峰值。接着, 使测量装置脱离 AB 端, 并立即使 3、4 端去和接地的静电电压表相碰, 其读数就是试品 AB 端的电压峰值。由于电容器 C 和静电电压表的绝缘都很高, C 上电压在操作时间内 (几秒钟) 下降很小, 所得读数有一定准确度。

电容 C 的电容量一般选在 $0.01 \sim 0.1$ 微法之

间, 要选泄漏电流尽量小的电容器。整个测量装置的体积要尽量小, 并应屏蔽良好, 以减小寄生电容 (图3-2-12中的 C_p 和 C_p') 的影响。

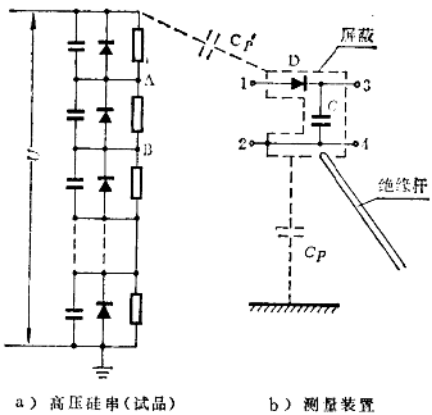


图3-2-12 电容充电法测量高压硅堆上的反向电压分布

6 电场的调整

工程上常遇到的绝缘结构中的电场多是不均匀电场。在局部场强很高的部位会出现局部放电, 也可能导致整个绝缘击穿。因此, 需要采取措施改善电场分布, 降低局部的过高场强, 从而提高整个绝缘结构的击穿电压。调整电场的常用方法见表3-2-3。

表3-2-3 调整电场的常用方法举例

调整方法	应用场合举例	具体措施	调整前后比较	
			调整前	调整后
改变电极外形	试验变压器高压端	增大曲率半径, 使表面场强降低。 $r_2 > r_1$		
	高压电缆芯或扩径导线	不变截面面积而增大外径。 $S_2 = S_1, r_2 > r_1$		