

高等学校教材

..... 专 科 适 用

电气绝缘试验

上海电力学院 蓝之达 主编



中国电力出版社

内 容 提 要

本书是按三年制“用电管理与监察”专业对电气设备绝缘与试验所需要的专业知识编写的。本书共分五章，第一章叙述电介质的基本性能；第二章叙述主要电气设备绝缘结构及其特点；第三章叙述电气设备试验的基本方法；第四章叙述主要电气设备的试验；第五章叙述大气过电压及其保护；最后为附录。

本书为“用电管理与监察”专业的教材，也可作为有关专业职工培训及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气绝缘试验/蓝之达主编. —北京: 中国电力出版社, 1997

高等学校教材 专科适用

ISBN 7-80125-229-2

I. 电… I. 蓝… III. 电气设备-绝缘试验
(电)-高等学校-教材 IV. TM855

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 14419 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 邮政编码 100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

1997年5月第一版 1997年5月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.375印张 301千字

印数 0001—1700册 定价 12.40元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据原能源部 1992 年 8 月审定的 1993~1995 年高校教材编审出版计划、电力工业部高等专科教学委员会审定的教材编写大纲编写的。

本书按三年制专科“用电管理与监察”专业对电气设备绝缘与试验所需要的专业知识与技能以及总结上海电力学院,本教研室 10 多年讲授本课程教学经验的基础上编写。本书共分五章。第一章叙述电介质的基本性能,如极化、电导、损耗、击穿,讲绝缘的共性;第二章叙述主要电气设备绝缘结构及其特点,讲绝缘的个性。第三章叙述电气设备试验的基本方法,讲试验的共性;第四章叙述主要电气设备的试验,讲试验的个性;第五章叙述大气过电压及其保护。

本书由蓝之达编写第二、五章,王自兴编写第一、三、四章。蓝之达任主编。本书由武汉水利电力大学关根志副教授主审,并提出了很多宝贵意见,在此表示深切的谢意。

限于我们的水平,书中难免出现错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1994 年 8 月

目 录

前 言

第一章 电介质的基本性能	1
第一节 电介质的极化	1
第二节 电介质的电导	5
第三节 电介质的损耗	7
第四节 电介质的击穿	9
第五节 电介质的其他性能	29
本章小结	32
复习思考题	33
第二章 电气设备绝缘	34
第一节 电力变压器的绝缘	34
第二节 互感器的绝缘	43
第三节 断路器的绝缘	48
第四节 电力电容器的绝缘	51
第五节 电力电缆的绝缘	55
第六节 绝缘子与套管	59
第七节 电机绝缘	66
本章小结	71
复习思考题	72
第三章 电气设备试验的基本方法	74
第一节 绝缘电阻与吸收比测量	74
第二节 泄漏电流与直流耐压试验	79
第三节 介质损耗角正切值测量	84
第四节 局部放电测量	89
第五节 交流耐压试验	91
第六节 三倍频感应耐压试验	99
第七节 绝缘油的电气性能试验	101
第八节 直流电阻测量	105
第九节 接地装置试验	108
本章小结	114
复习思考题	115
第四章 电气设备试验	117
第一节 电力变压器试验	117

第二节 互感器试验	133
第三节 油断路器试验	137
第四节 电力电容器的试验	146
第五节 电力电缆试验	148
第六节 阀型避雷器试验	152
第七节 交流电动机试验	159
本章小结	161
复习思考题	162
第五章 大气过电压及其保护	163
第一节 雷电的放电过程和电气参数	163
第二节 防雷设备	168
第三节 输电线路的防雷保护	185
第四节 发电厂和变电所的防雷保护	191
本章小结	201
复习思考题	202
附录 球间隙放电电压表	203

第一章 电介质的基本性能

电介质又称绝缘材料，简称绝缘。绝缘材料和导体是电气设备中不可缺少的两个基本组成部分。绝缘材料的主要作用是用来隔离带电的或不同电位的导体，使电流能按一定的方向在导体中流通。根据产品技术要求，绝缘材料在不同的电工产品中，还起着其他作用，例如散热、冷却、机械支撑固定、储能、灭弧、改善电位梯度、防潮、防霉以及保护导体等。绝缘承受着电、热、机械应力以及大气环境长期侵蚀的苛刻考验。

在电力系统中常常由于某一部分或某一电气设备的绝缘遭受破坏而引起事故，从而破坏电力系统工作的可靠性，给生产带来巨大损失。为了使电气设备能正常工作，保证电力系统安全可靠运行。必须对绝缘在电场作用下所发生的物理现象进行深入的研究，以便了解它们的电气性能，从而合理地选择和使用绝缘材料，以及按规程运行和进行预防性试验。

电介质在电场作用下将发生极化、电导、损耗和击穿等物理现象，一般可用四个物理量来表示，即相对介电系数 ϵ_r 、电导率 γ (或其倒数电阻率 ρ)、介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 和击穿电压 U_F 或 (击穿场强 E_F)。下面我们研究这些现象，讨论影响绝缘性能的各种因素以及可以采取的相应措施。在学习本章时，要着重掌握气体、液体、固体电介质的电气性能和击穿机理等基础理论。

第一节 电介质的极化

一、电介质极化的基本概念

根据电介质分子结构的不同，电介质可分为非极性电介质 (包括弱极性电介质) 和极性电介质两大类。对于非极性电介质，分子中正、负电荷的作用中心重合，对外不呈电性。而极性电介质分子的正、负电荷作用中心则保持一定的距离 (这种分子一般又称偶极分子)，单个分子对外即呈一定的电性，但由于热运动，电介质内众多极性分子的排列不规则，电性正负相消，故从整体来看，对外也不呈电性。

在外电场作用下，非极性物质与极性物质有着不同的性质；非极性电介质中分子内互相束缚的电荷在电场力的方向上发生微小的弹性位移，即正电荷沿电场方向位移，负电荷则逆电场方向位移。在极性电介质中，偶极分子受电场力作用而发生转向，顺着电场方向作有规则的排列。这样，原来对外不呈电性的电介质呈现了电性，在电介质两端出现了等量异号电荷，电介质在外电场作用下，发生的束缚电荷的弹性位移或偶极分子的转向，就称为电介质的极化现象。

图 1-1 为极化现象示意图，图中两块平行金属板组成一电容器，极板面积为 S ，极板间距离为 d ，在极板上施加直流电压 U 。先放在密闭容器内抽真空，这时两极板上分别充有正负电荷，设其电荷量为 Q_0 ，因此 $Q_0 = C_0 U$ ， C_0 为真空时平板电容器的电容量。然后在此极

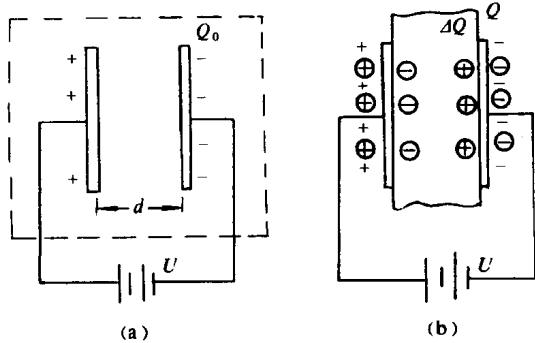


图 1-1 极化现象示意图
(a) 极板间为真空；(b) 极板间放入介质

板间放入一块厚度与极板间距离 d 相等的电介质。同样在外加电场作用下；使电介质表面出现与极板电荷异号的束缚电荷 ΔQ 。为保持电场强度不变（因施加电压 U 不变），必须从电源中吸取一部分电荷 ΔQ 。这样由于极板间电介质的加入，而使极板上的电荷从 Q_0 增大为 Q ，且 $Q = Q_0 + \Delta Q = CU$ ，此时由于电介质的放入，电容量由 C_0 增大至 C 。

以 ϵ_0 和 ϵ 分别表示真空的介电系数（为 $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{F/m}$ ）和电介质的介电系数，则

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_0} = \frac{CU}{C_0 U} = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon \frac{S}{d}}{\epsilon_0 \frac{S}{d}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r > 1$$

ϵ_r 称为电介质的相对介电系数。各种气体电介质的 ϵ_r 都接近于 1，而常用的液体、固体电介质的 ϵ_r 则不相同，一般在 2~7 范围内。电介质的相对介电系数与单位制的选择无关，因此为一无量纲的量。为了简便起见，“相对”二字往往省略，仅称介电系数。几种常用电介质的介电系数见表 1-1。

表 1-1 几种常用电介质的介电系数

材料类别	电介质名称	ϵ_r (工频、20℃)		
气体电介质 (标准大气条件)	氢	1.00027		
	氧	1.00055		
	二氧化碳	1.00096		
	空气	1.00059		
液体电介质	弱极性 变压器油 硅有机液体	2.2~2.5 2.2~2.8		
	极性 蓖麻油 氯化联苯	4.5 4.6~5.2		
	强极性 丙酮 酒精 水	22 33 81		
		固体电介质	中性或弱极性 石蜡 聚苯乙烯 聚四氟乙烯 松香 沥青	2.0~2.5 2.5~2.6 2.0~2.2 2.5~2.6 2.6~2.7
			极性 纤维素 胶木 聚氯乙烯	6.5 4.5 3.0~3.5
	离子性 云母 陶瓷		5~7 5.5~6.5	

介电系数在实际工程应用中具有特殊的意义，在选择电气设备绝缘材料时，一般应考虑它的 ϵ_r 值。例如，选择电容器的绝缘材料，一要注意电气强度，二要希望它的 ϵ_r 要大，这样可以使电容器的体积和重量减小；但其他绝缘结构则往往需要电介质的 ϵ_r 要小，如电缆绝缘 ϵ_r 的减小，可使电缆工作时的充电电流减小。

另外，在工程应用中，还可通过测量 ϵ_r 值判断电介质受潮的程度及所含气体的多少，从而了解电介质的绝缘性能。因为当水份浸入材料后，由于水份的介电系数大（在 80 左右），可使材料的 ϵ_r 增加。当电介质中含有气泡时，可以增加夹层式极化的作用，所以也将增加电介质的介电系数。

二、极化的基本形式

电介质极化的种类较多，但基本形式有四种：电子式极化、离子式极化、偶极式极化和夹层式极化。

（一）电子式极化

图 1-2 为电子式极化示意图，其中图 1-2 (a) 为极化前电介质的中性原子；图 1-2 (b) 为外电场极化后的原子。从图中可以看出电子的运行轨道发生了变形，产生了位移，其作用中心与正电荷不再重合，这种由电子的位移所形成的极化称作电子式极化。

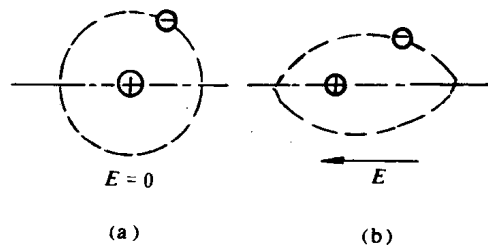


图 1-2. 电子式极化示意图
(a) 极化前；(b) 极化后

这种极化的特点有二：一是因电子质量极小而使极化进程所需的时间极短，约为 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ s，因而这种极化在各种频率的外电场作用下均能产生，也就是说 ϵ_r 不随频率的改变而变化；二是电子式极化具有弹性，在外电场去掉以后，由于正、负电荷的互相吸引力而自动回复到原来的中性状态，因而没有能量损耗。

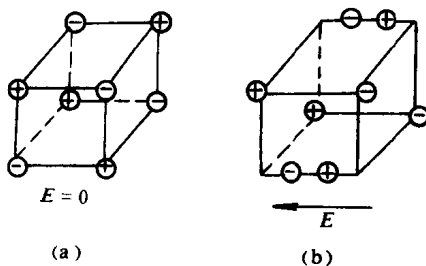


图 1-3 离子式极化
(a) 极化前；(b) 极化后

温度对电子式极化的影响极小。当温度升高时，电子与原子核的结合力减弱，极化性能略微加强；但随着温度升高，电介质膨胀，单位体积的质量减少，又使极化减弱。这两种相反影响，后者略强，故温度升高极化程度略有下降。

（二）离子式极化

固体无机化合物云母、陶瓷、玻璃等具有离子式结构。无外电场作用时，正、负离子的作用中心互相重合，故不显电性。在外电场作用下，除离子中的电子发生弹性位移（电子式极化）外，正、负离子间发生相对位移，正、负电荷的作用中心不再重合而形成电矩，对外呈现出电的极性来，如图 1-3 所示。这种异性离子间的相对位移称离子式极化，它也是一种弹性极化，不引起损耗，极化的过程也极短，约为 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ s，不随外施电压频率的变化而变化。

但温度对离子式极化的影响较大，温度升高时，离子间的结合力减弱，使极化程度增

加；而离子的密度随温度的升高而减小，又使极化降低。前者的影响较大，所以这种极化随温度的升高而增强， ϵ_r 具有正温度系数。

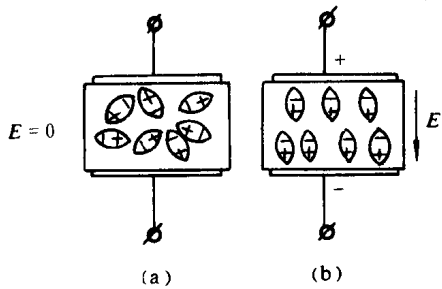


图 1-4 偶极式极化
(a) 未加电场；(b) 加电场后

(三) 偶极式极化

有些电介质由偶极分子组成，例如蓖麻油、氯化联苯、松香、橡胶、胶木、纤维素等，称为极性电介质。没有外电场的作用时，由于偶极子不停的热运动，排列混乱，对外不显示极性。在外电场作用下，偶极子受电场力的作用而发生转向，顺着电场方向作有规则的排列，见图 1-4 所示。对外显示出电的极性来，称为偶极式极化。这种极化由于偶极分子的转向，需要克服分子间的吸引力和摩擦力消耗电场能量。所需的

时间较长，约为 $10^{-12} \sim 10^{-2}$ s。故与外电场的频率有较大的关系，当频率很高时，偶极子来不及跟随外电场的变化而转动，极化将减弱。

温度对偶极式极化的影响很大。温度升高时分子间联系力削弱，极化加强，同时也使分子热运动加剧，妨碍了有规则的转动而使极化减弱，因前一因素占优势所以 ϵ_r 开始将随温度的升高而增加，以后热运动变得较强烈，使 ϵ_r 随温度上升而减小。图 1-5 为苏伏油（主要成分为五氯联苯）的 ϵ_r 与温度及频率的关系曲线。

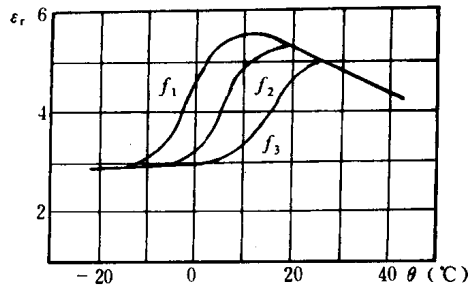


图 1-5 苏伏油（主要成分五氯联苯） ϵ_r 与温度及频率的关系曲线 ($f_1 < f_2 < f_3$)

(四) 夹层式极化

前述三种极化都是在单一均匀电介质中发生的。而高压电气设备的绝缘往往由几种不同的电介质组成复合电介质，它在外电场作用下，在两种不同电介质的分界面上出现极化，称夹层式极化。

夹层式极化过程特别缓慢，约需 $10^{-2} \sim 10^4$ s，且有能量损耗。现以平行板电极间的双层电介质为例来分析夹层式极化的物理过程，图 1-6 示出了夹层式极化及等值电路示意图，其中图 1-6 (a) 中双层电介质在电场作用下产生极化，在两层电介质的交界面处，假定电介质 I 积聚了正电荷，电介质 II 积聚了负电荷。由于两层电介质的材料不相同（或者是不均匀），它们的极化程度不一样，所以两层电介质的交界面处积聚的电荷量不相等。因而呈现出电的极性来，这种情况可用图 1-6 (b) 的等值电路来说明。其中 C_1 与 R_1 、 C_2 与 R_2 分别为电介质 I 和 II 的电容与绝缘电阻。当刀开关 K 合上瞬间，即突然对电介质加上直流电压 U 的瞬间 ($t=0$)，电介质上的电压由零即刻上升到 U ，相当于施加很高频率的电压，电流主要流过电容，对电容充电，而电阻相当于开路，于是双层电介质上的电压分布决定于电容量，与电容量成反比，即

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t=0} = \frac{C_2}{C_1} \quad (1-1)$$

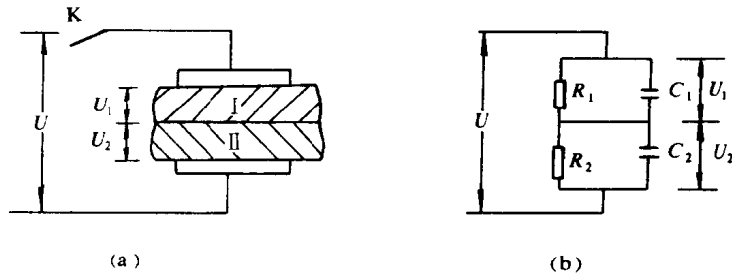


图 1-6 夹层式极化及等值电路

(a) 双层电介质; (b) 等值电路

当刀开关 K 合上后 ($t \rightarrow \infty$), 电容充电完毕, 不再有电容电流, 相当于电容开路, 电流全部在电阻中流过, 双层电介质上的电压分布决定于电阻值, 与电阻值成正比, 即

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1-2)$$

一般 $\frac{C_2}{C_1} \neq \frac{R_1}{R_2}$, 所以 $\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t=0} \neq \frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow \infty}$, 可见最终的电压分布不同于初始的电压分布。但 $U_1 + U_2 = U$ 是个定值, 因此在双层电介质中每层的电压有一个重新分配的过程。假如 $C_2 > C_1$ 、 $R_2 > R_1$, 则 K 合上瞬间 $U_{1(t=0)} > U_{2(t=0)}$, 而稳定后 $U_{1(t \rightarrow \infty)} < U_{2(t \rightarrow \infty)}$ 。即电介质 I 初始的电压高, 以后逐渐下降, 而电介质 II 初始电压低, 以后逐渐上升, 在这种电压重新分配的过程中, C_1 在初瞬时加上的部分电荷通过 R_1 放掉, 而 C_2 将从电源再吸收一部分电荷, 称为吸收电荷。这样, 在交界面处发生了电荷的移动, 使电介质内部形成了电流。这一极化形式就是夹层式极化。由于夹层式极化对电容的充、放电过程都要经过电阻, 整个过程不但比电子式、离子式、偶极式极化进行得缓慢, 而且要消耗能量。

第二节 电介质的电导

电介质作绝缘材料用, 总希望它不导电, 但完全绝缘的电介质是没有的。电介质不可能是理想的绝缘体, 其中总存在一些联系较弱的带电质点, 主要是正、负离子, 在电场作用下作有规律的运动, 我们把这种现象称为电介质的电导。表征电导大小的物理量是电导率 γ , 它的倒数是电阻率 ρ 。绝缘材料的电阻率一般为 $10^{10} \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$, 而导体的电阻率为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$, 半导体的电阻率为 $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 。可见电介质的电导比导体小得多, 并且是离子性的, 这和导体的自由电子电导的机理不一样。当温度升得愈高时, 参加导电的电介质本身的及杂质的离子增多, 电导电流近似按指数规律增大, 电介质电导具有正的温度系数, 即电介质电阻的温度系数是负的, 而导体电阻的温度系数是正的。 $t^\circ\text{C}$ 时的电导率和电阻率为

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \gamma_0 e^{\alpha t} \\ \rho &= \rho_0 e^{\beta t} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 γ_0 、 ρ_0 —— 0°C 时的电导率和电阻率;

γ 、 ρ —— $t^\circ\text{C}$ 时的电导率和电阻率;

α 、 β ——电导和电阻的温度系数。

电介质电导的另一特点是与所加电压的作用时间有关，通常在接近击穿时，介质中流过的电流增加很快，电导显著增加，绝缘电阻剧烈下降。

让我们考察电介质在直流电压作用下电流流通的情况。从实验中观察到电路中流过的电流 i 很微弱，并随时间逐渐衰减，见图 1-7 吸收电流曲线所示，我们把电流 i 分解为几个分量 $i = i_c + i_a + i_\infty$ 。其中 i_c 为电容电流，是由加压初始电子式极化与离子式极化过程，即无损极化引起的电流。存在时间极短，可以认为是瞬时完成的。 i_a 为吸收电流，是由夹层式极化和偶极式极化等（主要是不均匀电介质中的夹层极化）有损极化所引起的电流， i_a 曲线和时间轴所包围的面积即为吸收电荷。吸收电流存在的时间达数分钟至数十分钟。 i_∞ 为泄漏电流，亦称传导电流，它与电介质绝缘电阻的关系，服从欧姆定律，不随时间变化。

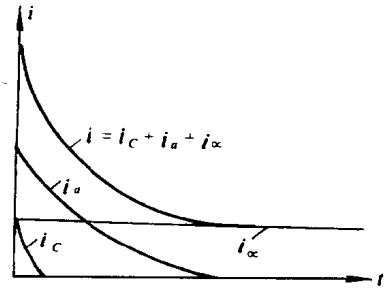


图 1-7 吸收电流曲线

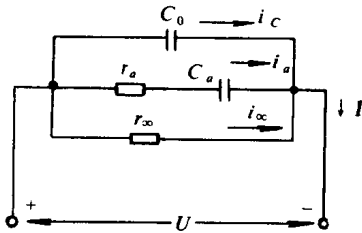


图 1-8 电介质的等值电路

由此可作出在直流电压 U 作用下电介质的等值电路，如图 1-8 所示。其中 C_0 代表无损极化的纯电容支路，通过电流 i_c ； r_a 、 C_a 代表有损极化电流支路，通过电流 i_a ； r_∞ 代表泄漏支路，通过电流 i_∞ 。它们的合成电流为介质电流 i 。经过一段时间，极化过程结束， i 的稳态电流就等于泄漏电流 i_∞ 。与 i 的稳态电流值 i_∞ 相对应的电阻，称为绝缘电阻，并且满足欧姆定律。

对于固体电介质，既有通过绝缘体本身内部的泄漏电流，还有通过绝缘表面的泄漏电流，两者分别用体积电阻 r_i (Ω) 及表面电阻 r_b (Ω) 来表示，所以绝缘电阻是它们的并联值，即

$$r_\infty = \frac{r_i r_b}{r_i + r_b} \quad (1-4)$$

体积电阻 r_i 与材料的几何尺寸有关，计算同导体电阻一样，即

$$r_i = \rho_i \frac{d}{S} \quad (1-5)$$

式中 ρ_i ——固体电介质体积电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)；

d ——电介质长度 (cm)；

S ——电介质横截面积 (cm^2)。

表面电阻 r_b 与材料尺寸的关系为

$$r_b = \rho_b \frac{d}{L}$$

式中 ρ_b ——固体电介质表面电阻率 (Ω)；

d ——电介质长度 (cm)；

L ——表面周长 (cm)。

上述各物理量参见图 1-9 固体电介质的体积电阻

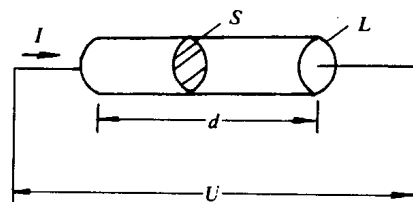


图 1-9 固体电介质的体积电阻与表面电阻计算示意图

与表面电阻计算示意图。

表面电阻率 ρ_b 主要决定于电介质表面吸附水份的能力和水份的分布情况。中性和弱极性电介质表面，水的附着力小于水分子的内聚力，吸附的水份成分散的水滴不形成连续的水膜，如图 1-10 (a) 所示。因此这些材料的表面受潮时，水份的影响较小，所以将电瓷表面涂上瓷釉以提高污闪电压，除

此之外，一般还要涂以硅油、石蜡等。如果水的附着力大于水分子的内聚力，吸附的水份润湿整个表面形成连续水膜，如图 1-10 (b) 所示。而且水膜中总有些污物、盐类，这样更促使表面电阻下降。所以纸、布纤维组成的绝缘都要干燥浸油，或浸漆、胶、蜡，并加以密封防潮。

由上可知，对固体介质施加直流电压测得的绝缘电阻是体积电阻 r_v 与表面电阻 r_b 的并联值。当天气干燥、表面干净时，表面电阻很大，测得的基本上是体积电阻 r_v 。当天气潮湿、表面污秽时，表面电阻可能显著降低，如不采取措施，测得的基本上是表面电阻 r_b 。因此在测量绝缘电阻与泄漏电流时，特别是被试品绝缘电阻较高，亦即泄漏电流较小时，在接线和测量上要特别注意。尽可能减小表面电阻对所测绝缘电阻的影响，比如试验时应使试品表面清洁、干燥，或加屏蔽措施等。

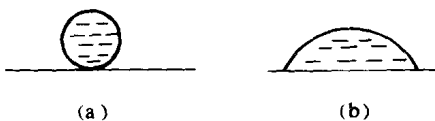


图 1-10 表面吸附水份的两种类型
(a) 在憎水性电介质表面不形成连续水膜；
(b) 在亲水性电介质表面形成连续水膜

第三节 电介质的损耗

电介质在电压作用下都将产生能量损耗，称电介质损耗。如果电介质损耗很大，由电能转变为热能，使电介质温度升高，逐渐发热老化（发脆、分解等），如果温度不断上升，甚至将电介质熔化、烧焦，丧失绝缘性能导致热击穿。因此，电介质损耗的大小是衡量绝缘性能的一项重要指标。按物理性质，电介质损耗通常可分为三种形式。第一种是电介质电导引起的能量损耗。泄漏电流在电介质中流过将引起发热，在直流、交流电压下都会产生，电导损耗相对于后面二种损耗而言是很小的。第二种是电介质极化引起的损耗。偶极式极化、复合电介质的夹层式极化等有损极化过程，在直流电压下离子沿电场方向作一次有限位移，消耗能量很小。在交流电压下，由于周期性极化过程，带电质点按交变电场进行往复的有限位移和重新排列，需要反复克服分子间的内摩擦造成较大的能量损耗，因此偶极式极化损耗只有在交流电压下才呈现，并随着电源频率的增加而增加。夹层式极化所引起的电荷重新分配过程，在交流电压下反复进行，也要消耗能量。第三种是由游离、电晕等局部放电引起的损耗。在常用的固体绝缘中，往往不可避免地会存在气泡、间隙等薄弱部位，在电压作用下，其中的电场强度超过临界场强，出现局部放电，引起能量损耗。

在直流电压下，当外施电压低于局部放电的电压时，电介质损耗仅有第一种电导损耗。在交流电压下，除电导损耗外，还有由于周期性极化引起的能量损耗。为了表示损耗的大小，又方便测试，需引入一个新的物理量。让我们分析一下图 1-11 所示的电介质的等值电路及相量图。

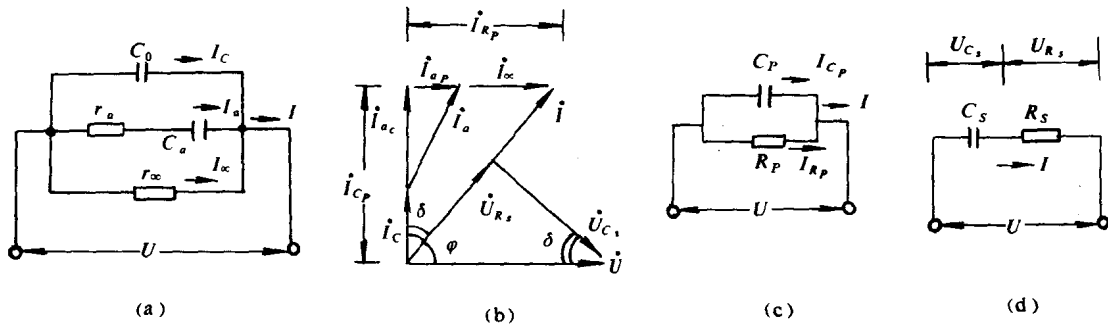


图 1-11 交流下电介质的等值电路及相量图

(a) 交流下电介质的等值电路；(b) 相量图；
(c) 简化并联电路；(d) 简化串联电路

图 1-11 (a) 与图 1-8 相同，为电介质的等值电路。不仅适用于直流，也适用于交流。图 1-11 (b) 为交流电压下电压、电流相量图。这里将 I_a 分解成 I_{a_c} 和 I_{a_p} 后，进一步把电路简化为图 1-11 (c)，电流 I 包含有功分量 I_{R_p} 和无功分量 I_{C_p} ，这样介质损耗为

$$P = UI \cos \varphi = UI_{R_p} = UI_{C_p} \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta \quad (1-7)$$

从式 (1-7) 可见 P 与外加电压 U 及其角频率 ω 以及试品尺寸等因素有关。不同试品间难以互相比较，故以电介质损耗 P 表示电介质的好坏既不方便又不明确，所以改用介质损耗角正切值—— $\operatorname{tg} \delta$ 来判断电介质的品质，其中 δ 角为功率因数角 φ 的余角。因此 $\operatorname{tg} \delta$ 值足以反应绝缘的损耗特性。

由图 1-11 (b) 可得

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_{R_p}}{I_{C_p}} = \frac{U/R_p}{\omega C_p U} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (1-8)$$

如将图 1-11 (c) 并联电路转变为图 1-11 (d) 串联电路，则

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_{R_s}}{U_{C_s}} = \frac{IR_s}{I/\omega C_s} = \omega C_s R_s \quad (1-9)$$

而

$$\begin{aligned} P &= UI \cos \varphi = IU_{R_s} = I^2 R_s = \frac{U^2 R_s}{R_s^2 + \left(\frac{1}{\omega C_s}\right)^2} \\ &= \frac{U^2 R_s}{\left(\frac{1}{\omega C_s}\right)^2 [1 + (\omega C_s R_s)^2]} = \frac{U^2 \omega^2 C_s^2 R_s}{1 + (\omega C_s R_s)^2} \\ &= \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \end{aligned} \quad (1-10)$$

由于按上述两种并联、串联等值电路来计算电介质损耗是相同的，所以式 (1-7) 与式 (1-10) 相等、式 (1-8) 与式 (1-9) 相等。由此可求得两种等值电路参数间的关系

$$C_s = (1 + \operatorname{tg}^2 \delta) C_p$$

$$R_s = \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} R_p$$

由于绝缘材料的 $\operatorname{tg} \delta$ 一般较小, $1 + \operatorname{tg}^2 \delta \approx 1$ 。故 $C_s \approx C_p$; $R_s \approx \operatorname{tg}^2 \delta R_p$ 。所以电介质损耗在两种等值电路中都可使用同一公式计算

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (1-11)$$

当电介质在高电压或高频场合使用, 损耗 P 会显著增大, 引起温度上升, $\operatorname{tg} \delta$ 值往往随之增大。可见影响 $\operatorname{tg} \delta$ 值的因素有温度、频率和电压等。

测量电介质损耗角正切 $\operatorname{tg} \delta$ 值能十分灵敏地反映绝缘整体受潮、劣化, 但当仅一小部分受潮、劣化, 即局部有缺陷时, 测得的 $\operatorname{tg} \delta$ 值增加不太明显, 甚至不反映。例如图 1-12 所示的一胶木棒, 电容为 C , 不受潮时电介质损耗角正切值为 $\operatorname{tg} \delta_1$, 则测得损耗为

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_1 \quad (1-12)$$

若表面受潮, 受潮部分的电容为 C_2 , 电介质损耗角正切值为 $\operatorname{tg} \delta_2$; 而内部未变仍为 $\operatorname{tg} \delta_1$, 其电容为 C_1 , 并且满足 $C_1 + C_2 = C$ 。则整体损耗为内部与表面损耗之和, 即

$$U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta' = U^2 \omega C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + U^2 \omega C_2 \operatorname{tg} \delta_2 \quad (1-13)$$

式中 $\operatorname{tg} \delta'$ —— 表面受潮后, 测得的整体电介质损耗角正切值。

将式 (1-13) 简化, 我们可以得出

$$\operatorname{tg} \delta' = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C} \quad (1-14)$$

若受潮部分仅占总体的很小一部分, 即 $\frac{C_2}{C} \ll 1$, 则 $\operatorname{tg} \delta' = \operatorname{tg} \delta_1$ 。可见此时测得的 $\operatorname{tg} \delta'$ 比原来未受潮时没有增加, 所以说 $\operatorname{tg} \delta$ 值对局部受潮、劣化不灵敏。因此若发现有可疑时, 应进行分解试验, 解体后分别测出各部件的 $\operatorname{tg} \delta$ 值, 以发现局部缺陷。

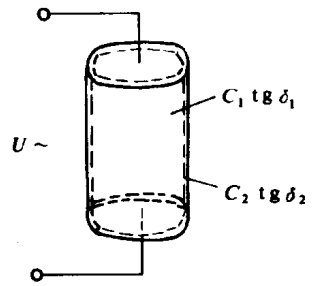


图 1-12 胶木棒表面受潮

第四节 电介质的击穿

在电介质上施加电压后, 电介质中流过不大的泄漏电流。当作用电压超过某一临界值时, 电介质中电流剧增, 发生破裂或分解, 以至丧失其固有的绝缘性能而呈导电性能, 这种现象称为电介质的击穿。发生击穿时的临界电压值称为击穿电压 U_F , 击穿时的电场强度称为击穿场强 E_F 。均匀电场中 $U_F = E_F d$, 这里 d 为电介质的厚度。

在不均匀电场中, 场强大处, 首先达到电介质的耐电强度, 产生局部放电、局部击穿和电晕。但整个绝缘不一定马上击穿, 所以整个绝缘结构的击穿电压往往大于其局部放电或起始电晕电压。

一、气体电介质的击穿

气体在电压作用下发生导通电流的现象称为气体放电。

气体在电力系统中是一种应用得非常广泛的绝缘材料, 如架空输电线、母线、隔离开

关的断口处等均是依靠空气作为绝缘的。有些设备虽然不完全依靠空气作绝缘，但空气包围在它的外部，构成外绝缘的一部分，如变压器、断路器、绝缘子、套管等处于空气中的绝缘材料。在液体或固体绝缘内部或多或少总含有一定的气体杂质，由这些杂质的放电则会引起电介质的损耗。所以首先要了解气体中的放电过程。下面介绍两个放电理论：汤逊电子崩放电理论和流注放电理论。前者理论上比较完整，适用于低气压、小间隙的均匀电场；后者定性地解释了大气压力下，一般间隙的放电成因，难于进行理论计算，在工程上，常用实验手段得出定量的结果。

(一) 气体放电现象

处于正常状态并没有受到外部能量作用的气体是完全不导电的。由于来自空中的紫外线、宇宙射线以及地球内部辐射线的作用，气体中总存在少量的带电的电子和正离子。每立方厘米的大气中约含有 3×10^{19} 个分子，其中带电的电子和正离子约为 500 对。它们在电场作用下沿电场方向运动，形成电导电流。所以气体并不是理想的绝缘介质。但当电场较弱时，带电质点极少，气体的电导非常小，仍可看作优良的绝缘体。

当气体间隙上的电压超过某临界值时，通过气体的电流突然剧增，使气体失去绝缘性能，还常常伴随发光发声产生臭氧 (O_3) 等现象。这种由绝缘状态变为良好导电状态的过程称为击穿。发生击穿的最低电压称为气体的击穿电压或放电电压，与其对应的场强称为击穿场强。一旦所加的电压解除后，气体电介质能自动恢复绝缘性能。

人们多年来对气体放电进行了大量的观察和研究，积累了丰富的资料。大致分成以下几种主要放电形式。

1. 火花放电

在气体间隙的两端，电压升高到一定值时，气体突然发生明亮的火花，火花向对面电极伸展出细光束。在电源功率不大时，这种火花会瞬时熄灭，接着又突然发生。

2. 辉光放电

当外施电压增加一定值后，通过气体的电流明显增加，但电流密度较小，两电极间整个气体间隙忽然出现发光现象，这种放电形式称为辉光放电，例如霓虹灯管。

3. 电晕放电

当电极的曲率半径很小、电场很不均匀时，随外施电压的升高，电极尖端附近出现暗蓝色的放电微光，并发出啾啾声，如维持电压不变，放电局限在较小范围内，成为局部放电。这时气体间隙的大部分尚未丧失绝缘性能，放电电流极小，仍能耐受电压的作用。高压输电线及各种高压设备的电极尖端，常常发生这种电晕放电现象。

4. 电弧放电

气体间隙发生火花放电后，当两极的电源功率足够大时，贯穿两电极间出现非常明亮的连续弧光，形成电弧放电，此时电弧的温度极高。

(二) 带电质点的产生和消失

如上所述，气体间隙在外施电压作用下产生放电，说明气体中产生大量带电质点。若将电压除去，气体能恢复其耐电性能，说明气体中的带电质点会消失。下面分析气体中带电质点如何产生又如何消失。

1. 带电质点的产生

气体原子是由带正电荷的核和带负电荷的电子构成。正常情况下，电子受原子核吸引，沿不同半径的轨道围绕着核旋转。在外电场作用下，电子从正常轨道跳到离原子核较远、半径较大的外层轨道上，这一过程称为激发。如电子跳离足够远，以至完全脱离原子核的吸引力，成为“自由电子”，原子因失去电子而成为正离子，这一过程称为游离，游离产生的自由电子和正离子均称为带电质点。

由于外界能量不同，存在以下四种游离形式。

(1) 碰撞游离 在电场作用下，带电质点（如电子、离子等）被加速而获得能量，当能量累积到一定数值后，与中性原子碰撞，造成中性原子的游离，称为碰撞游离。碰撞游离是气体中产生带电质点的重要来源。因为电子的体积和质量都较离子小，在气体中运动时不会发生过多的碰撞，而容易积聚动能，故电子较离子更容易造成碰撞游离。把电子或离子二次相邻碰撞间走过的路程称为自由行程，在自由行程内，电子积聚的能量大于离子，电子的游离能力强，所以自由行程的大小可表明运动质点游离能力的强弱。

(2) 光游离 光辐射引起气体分子发生的游离过程称为光游离。光辐射是以不连续的光子形式发出的能量，当光子的能量等于或大于气体分子的游离能时就可能引起光游离。游离能力较强的是 χ 、 α 、 β 、 γ 射线和宇宙线等短波射线，紫外线也有一定的游离能力。普通可见光一般不能。

(3) 热游离 气体在热状态下引起的游离过程称为热游离。常温下，由于气体粒子的热运动所具有的能量远低于气体的游离能，因此不产生热游离。只有在数千摄氏度的高温下才能导致气体的热游离。

以上三种游离都是在空间产生的，所以统称空间游离。

(4) 表面游离 电子从金属表面或电极上发射出来，称表面游离。使金属发射电子所需要的能量叫逸出功，逸出功的大小与金属种类及其表面状态有关。使金属表面产生游离，一般有正离子碰撞阴极、短波光线照射、强电场发射、热电子发射等。

2. 带电质点的消失

在气体放电时，既有游离，带电质点不断产生、不断运动的过程，同时存在着相反的带电质点不断消失的过程。带电质点的消失主要有三种形式。

(1) 在电场作用下带电质点的定向运动 带电质点在外电场作用下，将逐渐地定向往一个电极运动，进入电极形成电流。

(2) 带电质点的扩散 气体中的带电质点处于不规则的热运动之中，如果在不同区域存在着带电质点浓度差，则它们总要从高浓度区域不断向低浓度区域运动，使浓度均匀，这种现象称为带电质点的扩散。当空气间隙发生放电，并去掉电源后，放电间隙中高浓度的带电质点迅速向周围扩散，使间隙恢复原来的绝缘状态。带电质点的扩散与气体的状态有关，气体压力越低或温度越高，扩散过程就越强。电子质量远小于离子质量，电子的热运动速度很高，热运动中受到的碰撞较少，因此，电子的扩散比离子强得多。

(3) 带电质点的复合 正离子与电子或负离子相遇，发生电荷的传递而中和，还原为中性分子的过程称为复合。带电质点在复合过程中会以光辐射（光子）的形式释放能量，这

种光能又有可能使中性粒子发生光游离。复合进行的快慢决定于带电质点的浓度，浓度越高带电质点越多，相遇的机会也就越大，复合就进行得越快。但并不是异号带电质点每次相遇都能进行复合，参加复合的异号带电质点相互接近复合需要一定的时间，质点间相对速度越大，相互作用时间越短，复合的可能性就越小。气体中电子的运动速度比离子大得多，所以正、负离子的复合要比正离子与电子的复合容易得多。负离子的形成是因为原子或分子对电子有较大的亲和力，电子被吸引而附着于原子或分子上，形成了负离子。

(三) 气体放电的基本理论

1. 电子崩理论

20 世纪初，汤逊对均匀电场、低气压、短间隙条件下的实验结果，提出了电子崩理论和定量计算公式，解释了气体放电发展过程和击穿条件，尽管有其局限性，但为气体放电的研究奠定了基础。

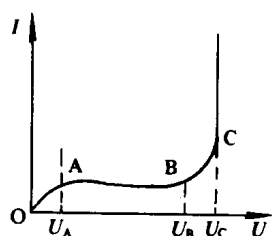


图 1-13 直流电压下均匀气隙中电流与电压的关系

我们在平行板电极间施加直流电压，造成一均匀电场。当电压逐渐升高时，气体间隙中电流与极间电压的关系如图 1-13 所示。在空气中由于宇宙射线和地层放射性物质射线的作用总是存在有少量带电粒子，当间隙上电压从零起逐渐升高时，这些带电粒子沿着电场方向运动，运动速度随电压升高而加大，间隙中的微弱电流逐渐增大，如图 1-13 中 OA 段。在电场中迅速移动的带电粒子主要是电子，而正、负离子由于质量比电子大得多，因而运动速度小得多，可看作相对静止不动。当电压超过 U_A 时，由于外界游离作用在间隙中产生的电子数基本上不变化，即使电压升高，电流也不会增大，如图中 AB 段所示。当电压超过 U_B 时，由于极间电场已足以使电子在向阳极运动的过程中加速，而具有足够的动能与气体中性粒子碰撞引起碰撞游离，被碰撞游离出来的新电子在强电场加速下又产生新的碰撞游离，这种现象愈演愈烈，电子数急剧增加，电流就迅速增大直至击穿，见图 1-13 中 BC 段。这种如同山顶上滚雪球引起雪崩一样的现象称为电子崩，图 1-14 描绘了原始电子崩形成示意图。

下面求证电子崩的发展规律。以 α 表示电子的空间碰撞游离系数，表示一个电子在电场力作用下由阴极向阳极运动过程中，单位行程所发生的碰撞游离数。 α 与气体的性质、相对密度及电场强度有关。

如图 1-15 所示，有 n_0 个电子从阴极出发向阳极运动，行经距离 x 时，由于碰撞游离而

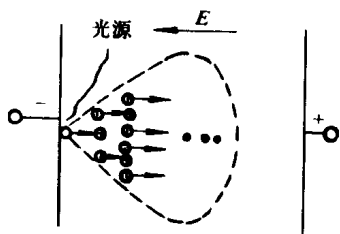


图 1-14 原始电子崩形成示意图

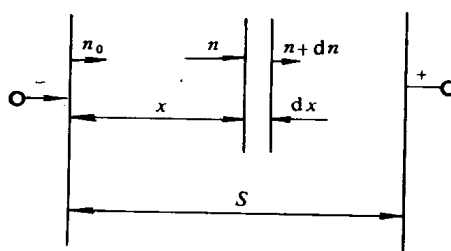


图 1-15 放电间隙中的电子崩电子数的计算