



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

GAODIANYA JISHU

高电压技术

伍家洁 苏 渊 主 编
杨启军 杨 溢 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

GAODIANYA JISHU

高电压技术

主 编	伍家洁	苏 渊		
副主编	杨启军	杨 溢		
编 写	牟平伟	刘 赟	李 媛	张 莉
主 审	张 红			



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

全书分三个学习情境，其主要内容包括绝缘介质电气性能及击穿过程、电气设备绝缘试验和电力系统过电压防护。本书从基本物理概念及物理过程入手，引入国家标准、行业标准和职业规范，适当介绍新技术、新方法，突出了以能力培养为核心的教学理念。

本书可作为高职高专院校电力技术类专业的教学用书，也可以作为发供电企业生产技能人员的培训参考书。

图书在版编目（CIP）数据

高电压技术/伍家洁，苏渊主编. —北京：中国电力出版社，2012.7

普通高等教育“十二五”规划教材·高职高专教育

ISBN 978-7-5123-3361-1

I. ①高… II. ①伍…②苏… III. ①高电压—技术—高等职业教育—教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 175695 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 283 千字

定价 22.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

高电压技术课程是一门专业性、实用性、理论性非常强的课程，具有理论与实践并重的特点。它既是电类专业的一门核心技能课程，也是取得电气试验员职业资格证书的必须对应课程。随着职业教育教学改革的不断深化和电力行业的发展，本书编者认为本课程应以工程应用为主，内容不宜过细过深，应着重于塑造读者的动手能力和解决实际问题的能力。

本书引入国家标准、行业标准和职业规范，力求使读者能掌握常用电介质的电气性能，熟悉电气设备绝缘预防性试验，并能根据试验数据作出绝缘性能的初步判断；同时能了解过电压产生原因，熟悉发电厂、变电站及线路的过电压保护装置的作用，能初步配置发电厂、变电站及线路的过电压保护装置。此外，为了帮助读者理解运用书中内容，本书附有工程案例和思考题，以供读者参考和选做。

本书学习情境1由重庆电力高等专科学校苏渊、刘赟编写，学习情境2由重庆电力高等专科学校杨启军、张莉编写，学习情境3由重庆电力高等专科学校伍家洁、李媛编写，重庆万州供电局杨溢、重庆电力公司电力科学研究院牟平伟为本书工学结合方面提出了宝贵的意见和建议，并协作编写部分子情境。全书由伍家洁统稿。

限于编者水平，书中难免存在一些疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

本书承蒙国网技术学院张红教授审稿，并提出了许多宝贵意见和建议，编者在此表示深切的谢意。

编 者

2012年6月

目 录

前言

学习情境 1 绝缘介质电气性能及击穿过程	1
子情境 1.1 绝缘材料的电气性能	1
1.1.1 电介质的极化	1
1.1.2 电介质的电导	6
1.1.3 电介质的损耗	8
子情境 1.2 气体绝缘材料及其击穿特性	10
1.2.1 六氟化硫气体	10
1.2.2 气体中带电质点的产生与消失	13
1.2.3 均匀电场中气体的击穿过程	15
1.2.4 不均匀电场中气体的击穿过程	20
1.2.5 冲击电压下气体的击穿过程	24
1.2.6 沿面放电	28
1.2.7 大气状态对气体击穿电压的影响	36
子情境 1.3 液体绝缘材料及其击穿特性	37
1.3.1 变压器油	38
1.3.2 液体电介质的击穿	41
子情境 1.4 固体绝缘材料及其击穿特性	45
1.4.1 云母	45
1.4.2 玻璃	47
1.4.3 陶瓷	49
1.4.4 合成树脂	50
1.4.5 固体电介质的击穿	52
1.4.6 电介质的老化	54
【工程案例 1】油浸变压器绝缘结构	57
思考题	60
学习情境 2 电气设备绝缘试验	62
子情境 2.1 绝缘预防性试验	62
子情境 2.2 绝缘电阻、吸收比和极化指数的测量	63
子情境 2.3 直流泄漏电流试验和直流耐压试验	68
子情境 2.4 介质损失角正切的测量	75

子情境 2.5 局部放电试验	82
子情境 2.6 交流耐压试验	87
子情境 2.7 冲击耐压试验	96
子情境 2.8 绝缘油气相色谱分析	102
【工程案例 2】 变压器高压试验作业指导书	111
思考题	117
学习情境 3 电力系统过电压防护	119
子情境 3.1 防雷设备认知	119
3.1.1 雷电的模型	119
3.1.2 避雷针、避雷线的保护范围	123
3.1.3 感应雷防护设备避雷器的认识	127
3.1.4 防雷接地装置的选择	131
3.1.5 防雷设备的检测试验	134
【工程案例 3】 无间隙金属氧化物避雷器试验作业指导书	138
子情境 3.2 发电厂和变电站的防雷保护	142
3.2.1 直击雷保护	142
3.2.2 变电站内避雷器的保护作用	144
3.2.3 变电站的进线段保护	147
3.2.4 变压器的防雷保护	149
3.2.5 配电变压器的防雷保护	151
3.2.6 气体绝缘变电站 (GIS) 的过电压保护	152
3.2.7 输电线路的防雷保护	153
子情境 3.3 电力系统过电压与绝缘配合	162
3.3.1 电力系统操作过电压	163
3.3.2 工频过电压	165
3.3.3 谐振过电压	166
3.3.4 绝缘配合的概念和原则	167
【工程案例 4】 35kV 变电站绝缘配合及过电压保护	168
思考题	172
附录 1 一球接地时, 球隙放电标准电压表 (I. E. C1960 年公布)	174
附录 2 氧化锌避雷器电气特性	178
附录 3 人工接地极工频接地电阻的计算	179
参考文献	181

学习情境1 绝缘介质电气性能及击穿过程

子情境1.1 绝缘材料的电气性能

在电力系统中,电介质主要起绝缘作用,即把不同电位的导体分隔开,使之在电气上不相连接。按状态不同可将电介质分为气体、液体和固体三类。在电场作用下电介质会产生许多物理现象,如极化、电导、游离、损耗和击穿放电等现象,正确理解和认识这些现象,对进行绝缘结构的合理设计、绝缘材料的合理利用以及对绝缘性能的准确评估有着非常重要的意义。

1.1.1 电介质的极化

【学习任务】 了解电介质在电场作用下的极化现象,熟悉各类电介质极化的特点,了解介电常数的物理意义及电介质极化在工程上的意义。

一、极化的概念和极化的形式

(一) 极化的概念

无论何种结构的电介质,在没有外电场作用时,内部的正、负电荷处于相对平衡状态,正、负电荷的作用中心互相重合,整体上对外没有极性。当有外电场作用时,均匀介质内部各处仍呈电中性,但在介质表面要出现异号电荷(靠近正极板的表面出现负电荷,靠近负极板的表面出现正电荷),这种电荷不能离开电介质到其他带电体,也不能在电介质内部自由移动,我们称之为束缚电荷。它不像导体中的自由电荷能用传导方法将其引走。因此,在外电场作用下,电介质表面出现束缚电荷的现象称为极化。充满电介质的电容器比真空电容器的电容大就是由于电介质的极化作用。

(二) 极化的形式

1. 电子式极化

任何电介质都是由原子组成,原子由带正电荷的原子核和带负电荷的外层电子组成。无外电场时,原子中的正、负电荷的电荷量相等,且正、负电荷作用中心重合,对外不显电性。而在外电场作用下,原子外层电子轨道相对于原子核产生位移,其正、负电荷作用中心不再重合,对外呈现出一个电偶极子的状态,如图1-1所示,这就是电子式极化。电子式极化存在于一切电介质中。

电子式极化的特点为极化过程所需的时间极短,约 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ s。极化程度与电源频率无关,与温度无关。此种极化是弹性的,去掉外电场,可立即恢复,无能量损耗。

2. 离子式极化

离子式极化发生于离子结构的电介质中。固体无机化合物(如云母、陶瓷、玻璃等)多属于离子结构。在无外

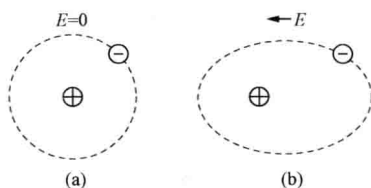


图1-1 电子式极化示意图

(a) 极化前; (b) 极化后

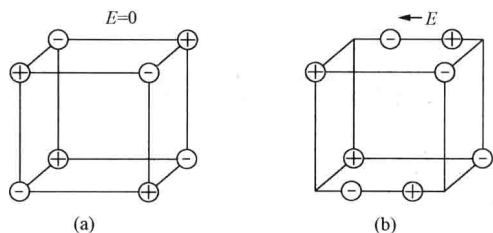


图 1-2 离子式极化示意图

(a) 极化前; (b) 极化后

电场作用时, 每个分子的正、负离子的作用中心是重合的, 故不呈现极性, 如图 1-2 (a) 所示。在外电场作用下, 正、负离子偏移其平衡位置, 正、负离子的作用中心不再重合, 从而使整个分子呈现极性, 如图 1-2 (b) 所示, 这种极化称为离子式极化。

离子式极化的特点为极化过程所需的时间极短, 约 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ s。极化程度与电源频率无关, 但随温度升高而略有增加。此种极化是

弹性的, 去掉外电场, 可立即恢复, 无能量损耗。

3. 偶极子式极化

偶极子是一种特殊的分子。没有外电场时, 它的正、负电荷的作用中心不相重合, 好像分子的一端带正电, 分子的另一端带负电, 从而形成一个永久性的偶极矩 (偶极矩是指正、负电荷中心间的距离 r 和电荷所带电量 q 的乘积)。具有这种永久性偶极矩的分子称为极性分子, 水分子就是典型的极性分子, 其他诸如蓖麻油、氯化联苯、橡胶、胶木和纤维素等都是常用的极性绝缘材料。

极性电介质的分子本身就是一个偶极子。在没有外电场作用时, 单个的偶极子虽然具有极性, 但各个偶极子处于不停的热运动中, 排列毫无规则, 对外的作用互相抵消, 整个介质对外不呈现极性, 如图 1-3 (a) 所示。在有外电场作用时, 偶极子受电场力的作用发生转向, 并沿电场方向定向排列, 整个介质对外呈现极性, 如图 1-3 (b) 所示。这种由偶极子转向造成的极化称为偶极子式极化。

由于偶极子分子每次转向都要克服分子间的摩擦力和吸引力, 在交流电压作用下, 每过半个周期就要换向一次, 因此由偶极子分子组成的电介质在工频交流电压作用下的极化损耗要远大于直流电压下的损耗。

偶极子式极化的特点为极化过程所需的时间较长, 约 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ s。极化程度与电源频率有关, 与温度有关。此种极化是非弹性的, 去掉外电场, 不能立即恢复, 有能量损耗。

4. 夹层式极化

前面所讲的三种极化均是在单一电介质中发生的。但在高压设备中, 常应用多种介质绝缘, 如电缆、电容器、电机和变压器等, 两层介质中常夹有油层、胶层等, 这时在介质的分界面上会产生“夹层极化”现象。

以平行板电极间的双层电介质为例说明夹层极化过程。图 1-4 (a) 为夹层式极化实验电路, 图 1-4 (b) 为其等值电路, 在开关 S 刚合闸瞬间 (相当于施加很高频率的电压), 等值电路中电容支路的容抗远小于电导支路的电阻, 电导支路相当于断开, 两层介质上的电压分配与各层电容成反比, 即

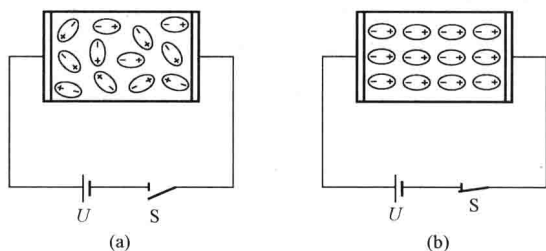


图 1-3 偶极子式极化示意图

(a) 极化前; (b) 极化后

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow 0} = \frac{\frac{1}{\omega C_1}}{\frac{1}{\omega C_2}} = \frac{C_2}{C_1} \quad (1-1)$$

到达稳态时, 等值电路中电容支路相当于开路, 两层介质上的电压分配与各层电导成反比, 即

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow \infty} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{1}{G_1}}{\frac{1}{G_2}} = \frac{G_2}{G_1} \quad (1-2)$$

一般来说, 对两层不同的介质, $\frac{C_2}{C_1} \neq \frac{G_2}{G_1}$, 即

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow 0} \neq \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow \infty} \quad (1-3)$$

所以合闸后, 两层介质上的电压有一个重新分配的过程, 即 C_1 、 C_2 上的电荷要重新分配。设 $C_1 > C_2$ 、 $G_1 < G_2$, 则在 $t \rightarrow 0$ 时, $U_1 < U_2$; 在 $t \rightarrow \infty$ 时, $U_1 > U_2$ 。这样, 在 $t > 0$ 后, 随着时间的增大, U_2 逐渐下降, U_1 逐渐升高, 即 C_2 上的一部分电荷要经 G_2 放掉, 而 C_1 则要经过 G_2 从电源再吸收一部分电荷 (称为吸收电荷), 结果使两层介质的分界面上出现了不等量的异号电荷, 从而显示出电的极性来 (分界面上正电荷比负电荷多, 呈现正极性, 否则呈现负极性)。这种使夹层电介质分界面上出现电荷积聚的过程称为夹层式极化。由于夹层极化中有吸收电荷, 故夹层极化相当于增大了整个电介质的等值电容。

极化时夹层界面上电荷的堆积是通过介质的电导完成的。由于一般电介质的绝缘电阻很大, 故这种极化过程是很缓慢的 (由电容充电的时间常数 $T=RC$ 决定), 其完成时间从几秒到几十分钟, 甚至长达几小时。因此, 夹层极化只有在直流电压下或低频电压作用下, 才能呈现出来, 而且极化时伴随有能量损耗。当绝缘受潮时, 由于电导增大, 极化完成时间将大大下降。如果吸收过程缓慢, 那么在去掉外加电压后, 电介质内部的吸收电荷被释放出来也同样缓慢。对使用过的大电容设备, 应将两电极短接并彻底放电, 以免有吸收电荷释放出来, 危及人身安全。

夹层式极化的特点为极化过程缓慢, 是非弹性的, 有能量损耗。

【实例分析】 为帮助理解夹层极化过程, 现以实际数据进行分析。

设图 1-4 (b) 中 $C_1=1F$, $C_2=2F$, $G_1=2S$, $G_2=1S$, $U=3V$, 为了说明的简便, 全部参数均采用基本单位。

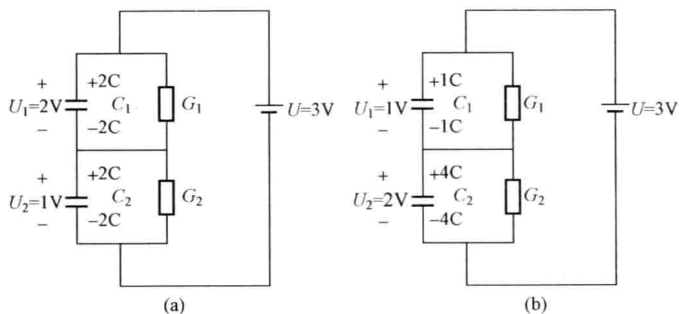


图 1-5 双层介质中电荷和电位分布

(a) 合闸初瞬时; (b) 稳态时

基本单位。

合闸初瞬, 根据式 (1-1) 可得 $U_1=2V$, $U_2=1V$, $Q_1=U_1C_1=2C$, $Q_2=U_2C_2=2C$, 如图 1-5 (a) 所示;

稳态时, 根据式 (1-2) 可得 $U_1=1V$, $U_2=2V$, 则 $Q_1=U_1C_1=1C$, $Q_2=U_2C_2=4C$, 如图 1-5 (b) 所示; 分界面上堆积的电荷为 $(+4-1)C=+3C$ 。

二、介电常数

电介质的介电常数也称为电容率, 是描述电介质极化程度的

物理量。介电常数大，则电介质发生极化时出现的电荷量多，反之，则电荷量少。

介电常数分为以下三类。

(1) 真空介电常数 ϵ_0 ，定义为 $1/(\mu_0 c^2)$ ，其中 μ_0 为真空磁导率， c 为光在真空中的速度。

(2) 绝对介电常数，定义为电通量密度 D 除以电场强度 E 。其 SI 单位为 F/m，常用 $\mu\text{F}/\text{m}$ 、 nF/m 、 pF/m 。

(3) 相对介电常数 ϵ_r ，定义为 ϵ/ϵ_0 ，其中 ϵ_0 为真空介电常数，是无量纲量。

下面以平板电容器为例进一步说明介电常数的物理意义。

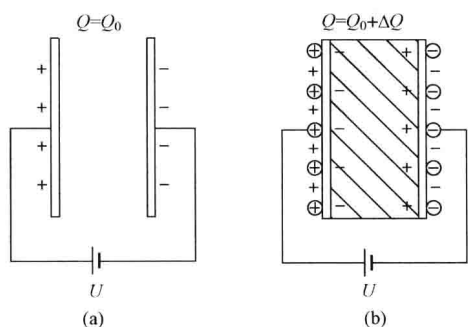


图 1-6 极化现象

(a) 极板间为真空；(b) 极板间放入介质

如图 1-6 (a) 所示的平行板电容器，极板面积为 S ，距离为 d ，极板间所加电压为直流电压 U 。当极板间为真空时，电压 U 对真空电容器充电，极板上出现电荷 Q_0 。此时电容器的电容值 C_0 为

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} = \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad (1-4)$$

式中 S ——极板面积， cm^2 ；

d ——极间距离， cm ；

ϵ_0 ——真空的介电常数， $8.86 \times 10^{-14} \text{F}/\text{cm}$ 。

当极板间放入一块固体介质后，极板上的电荷则增加为 $Q_0 + \Delta Q$ ，如图 1-6 (b) 所示。这种现象是由电介质的极化造成的。在电场作用下，电介质发生极化，在沿电场方向的两个表面上产生异号电荷，所产生的电场与外施电压产生的电场方向相反，如果极板上的电荷保持不变，电场空间中的场强将减小。事实上，固体介质放入前后，由于外加电压 U 不变，极板间的总电场 E 将保持不变， $E = \frac{U}{d}$ 。因此，为维持电场恒定，极板上的电荷必然会增加，增加的电荷用以抵消极化电荷所产生的反电场。此时电容器的电容值 C 为

$$C = \frac{Q_0 + \Delta Q}{U} = \frac{\epsilon S}{d} \quad (1-5)$$

式中 ϵ ——固体介质的介电常数。

相对介电常数 ϵ_r 定义为

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_0} \quad (1-6)$$

介电常数是表征电介质在电场作用下极化程度的物理量。

1. 气体电介质的相对介电常数（见表 1-1）

气体物质分子间的距离很大，它的密度很小，因此，气体的极化率很小，一切气体的相对介电常数都接近于 1。

表 1-1

气体电介质的相对介电常数

气体名称	He	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₄	空气	SF ₆
ϵ_r	1.000072	1.00027	1.00055	1.0006	1.00095	1.00096	1.00138	1.00059	1.002

2. 液体电介质的相对介电常数（见表1-2）

中性液体电介质（如石油、苯、四氯化碳、硅油等）的相对介电常数不大，其值在1.8~2.8范围内。

极性液体电介质通常具有较大的相对介电常数，这类电介质的缺点就是在交变电场中的介质损耗较大，故高压绝缘中很少应用。

表1-2 液体电介质的相对介电常数

液体名称	变压器油	硅有机油	蓖麻油	酒精	蒸馏水
ϵ_r	2.2	2.4	4.2	33	81

3. 固体电介质的相对介电常数（见表1-3）

中性固体电介质（如石蜡、聚乙烯、聚丙烯等）只具有电子式极化和离子式极化，其相对介电常数较小；极性固体电介质（如树脂、纤维、橡胶、聚氯乙烯）的分子具有极性，所以这类介质的相对介电常数都较大。

表1-3 固体电介质的相对介电常数

材料类别		名称	相对介电常数 ϵ_r (工频, 20℃)
固体介质	中性或弱极性	石蜡	1.9~2.2
		聚苯乙烯	2.4~2.6
		聚四氟乙烯	2
	极性	松香	2.5~2.6
		沥青	2.6~2.7
		聚氯乙烯	3.3
		环氧树脂	4.1
		胶木(酚醛树脂)	4.5
		纤维素	6.5
	离子性	云母	5~7
		电瓷	5.5~6.5

三、电介质极化在工程上的意义

(1) 选择电介质时，除应注意电气强度等要求外，还应注意 ϵ_r 的大小。如用作电容器的绝缘介质，希望 ϵ_r 大些，这样可使电容器单位容量的体积和质量减小。用作其他电气设备的绝缘介质，则希望 ϵ_r 小些。如电缆绝缘介质的 ϵ_r 越小，则工作时的充电电流的极化损耗就越小。

(2) 几种绝缘介质组合在一起使用（高压电气设备的绝缘常是这种情况）时，应注意各种材料 ϵ_r 的配合。因为在串联电介质中电场强度是不同的，与绝缘材料的 ϵ_r 成反比，即 $\frac{E_1}{\epsilon_1} = \frac{E_2}{\epsilon_2}$ ，即在 ϵ_r 小的介质中电场强度高，其耐电强度也应高些，否则会降低整体材料的绝缘能力。如果绝缘中存在气泡，由于气体的 ϵ_r 是最小的，所以气泡将承受较大的电场强度，首

先气泡处发生局部放电,使整体材料的绝缘能力降低。以变压器油中的气泡为例有 $\frac{\epsilon_{\text{油}}}{\epsilon_{\text{泡}}} = \frac{E_{\text{泡}}}{E_{\text{油}}}$,所以 $E_{\text{泡}} = E_{\text{油}} \times \frac{\epsilon_{\text{油}}}{\epsilon_{\text{泡}}} = E_{\text{油}} \times \frac{2.2}{1.0058} \approx 2.2E_{\text{油}}$,即气泡中的场强为油中场强的2.2倍,而气体的击穿场强比液体低,所以气泡先击穿。

(3) 材料的介质损耗与极化形式有关,而介质损耗是影响绝缘劣化和热击穿的一个重要因素。如极性介质的 ϵ_r 大,往往其损耗也大。

(4) 在绝缘试验中,夹层极化现象可用来判断绝缘受潮情况。例如,水分侵入电介质后,使材料的介电常数增大,同时水分能增强夹层式极化作用,因此通过测量材料的相对介电常数,就能判断电介质受潮程度。在使用电容器等大容量设备时,须特别注意吸收电荷对人身安全的威胁。

1.1.2 电介质的电导

【学习任务】 了解电介质在电场作用下的电导概念,理解电介质的绝缘电阻和泄漏电流的概念,熟悉各类电介质电导的特点,了解电介质电导在工程上的意义。

一、电介质电导的概念

任何电介质都不是理想的绝缘体,在它们内部总有一些带电质点(主要是正、负离子)存在。在外电场作用下,这些带电质点作定向运动,形成电流,电介质在电场作用下产生的这种现象称为电介质的电导。电介质的电导可以用电导率 γ 表示,其与电介质的电阻率 ρ 成反比,即 $\rho = \frac{1}{\gamma}$ 。电介质电导(绝缘电阻之倒数)与金属电导不同,它比金属电导小得多,且为离子性的(金属电导是电子电导),其值大小与温度有关。温度越高,参与导电的离子越多,电导增大,绝缘电阻减小,所以电介质的绝缘电阻具有负的温度系数(金属电阻具有正的温度系数)。绝缘电阻随温度进行修正的公式可参见国标 GB 50150—2006《电气设备交接试验标准》。

二、电介质的等值电路和绝缘电阻

在图 1-7 (a) 所示电路中加直流电压,流过介质的电流 i 如图 1-7 (b) 所示,电流 i 由 3 部分组成,即 $i = i_c + i_a + i_{\infty}$ 。电流 i 随时间逐渐衰减,最后达到某个稳定值,这个现象称为吸收现象。根据电流 i 各分量的特点,可得介质等值电路如图 1-7 (c) 所示。

图 1-7 中 C_0 为反映真空和无损极化所形成的电容,流过的电流为 i_c , i_c 称为电容电流,该支路电流存在的时间很短,很快衰减到零; C_a 为反映有损极化形成的电容; R_a 为反映有损极化的等效电阻,流过的电流为 i_a , i_a 称为吸收电流,该支路电流存在的时间较长; R_{∞} 为介质的绝缘电阻,流过的电流为 i_{∞} , i_{∞} 称为泄漏电流,是不随时间变化的恒定电流,电介质绝缘良好时,其数值非常小,为微安级。

电介质中流过的泄漏电流所对应的电阻称为介质的绝缘电阻,可表示为

$$R_{\infty} = \frac{U}{I_{\infty}} \quad (1-7)$$

由于电介质的吸收现象,试验中实际所测的绝缘电阻随时间变化的曲线如图 1-8 所示。介质绝缘电阻的大小决定了介质中泄漏电流的大小。泄漏电流大,将引起介质发热,加

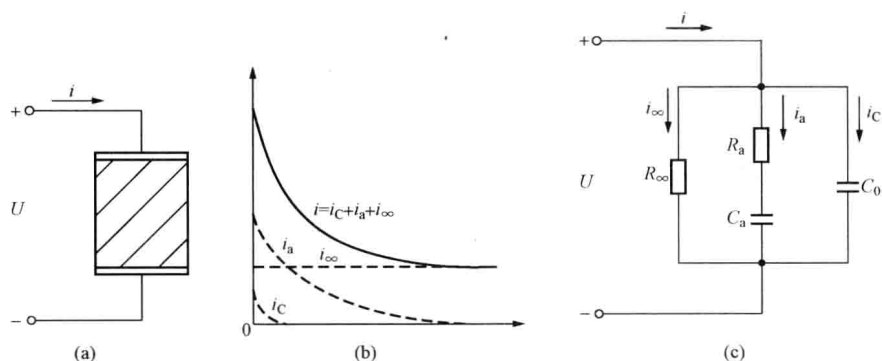


图 1-7 电介质中的电流及其等值电路

(a) 在介质上施加直流电压; (b) 直流电压下流过介质的电流; (c) 介质的等值电路

快介质的老化。固体介质的绝缘电阻包括体积绝缘电阻和表面绝缘电阻, 是它们两者并联的总阻值, 即

$$R_{\infty} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-8)$$

式中 R_1 ——体积绝缘电阻;

R_2 ——表面绝缘电阻。

三、各类电介质电导的特点

1. 气体电介质的电导

气体介质只要工作在场强低于其击穿场强时, 其电导是很微小的, 为 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ (S/cm), 故是良好的绝缘体, 气体电导主要是电子电导。

2. 液体电介质的电导

液体介质中形成电导电流的带电质点主要有两种: 一是构成液体的基本分子和杂质离解而成带电质点, 构成离子电导; 二是液体中的胶体质点 (如变压器油中悬浮的小水滴) 吸附电荷后变成带电质点, 形成电泳电导。中性和弱极性液体, 在纯净时电导很小, 而当含有杂质和水分时, 其电导显著增加, 绝缘性能下降, 其电导主要由杂质分子构成。极性和强极性液体介质, 其分解作用很强, 离子数多, 电导很大, 一般情况下不能作绝缘材料。可见, 液体的分子结构、极性强弱、纯净程度、介质温度等对电导影响很大, 各种液体电介质的电导可能相差悬殊, 工程上常用的变压器油、漆和树脂等都属于弱极性。

杂质和水分对液体电介质的绝缘有很大危害, 电气设备在运行中一定要注意防潮, 可以采用过滤、吸附、干燥等措施除去液体电介质中的水分和杂质。

3. 固体电介质的电导

固体电介质产生电导的机理和规律与液体类似, 只是固体电介质没有电泳电导。离子电导很大程度取决于介质中所含杂质, 特别是对中性及弱极性介质, 杂质离子起主要作用。

固体介质除体积电导以外, 还存在表面电导。固体电介质的表面电导主要是由附着于介质表面的水分和其他污物引起的。介质表面极薄的一层水膜就能造成明显的电导。如果除水分外, 介质表面还有尘埃等污秽物质, 则因污秽中所含的盐类电介质溶于水后形成大量的自

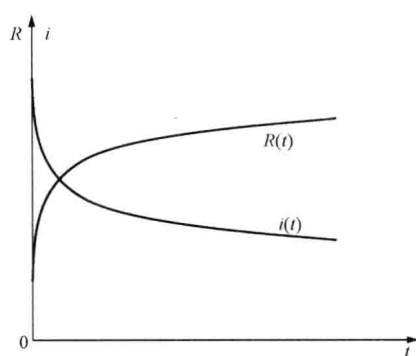


图 1-8 绝缘电阻随时间的变化

由离子,将使表面电导显著增大。

固体电介质的表面电导与介质的特性有关。容易吸收水分的电介质称为亲水性介质,水分可以在其表面形成连续水膜,如玻璃、陶瓷就属此类。不易吸收水分的介质称为憎水性介质,水分只能在其表面形成不连续的水珠,不能形成连续水膜,如石蜡、硅有机物就属此类。显然憎水性介质的表面电导通常要比亲水性介质的要小。

采取使介质表面洁净、干燥或涂敷石蜡、有机硅、绝缘漆等措施,可以降低固体电介质的电导。

四、电介质电导在工程上的意义

(1) 在高压设备绝缘预防性试验中,一般都要测量绝缘电阻和泄漏电流,以判断设备绝缘是否受潮或有其他劣化现象。测量绝缘电阻和测量泄漏电流从试验本质讲是相同的,测量绝缘电阻,就是测量介质在直流电压作用下的泄漏电流。对于干燥、完整良好的绝缘,其泄漏电流很小,绝缘电阻值很高;而受潮、含有杂质或存在贯穿性损伤后,极化作用加强,泄漏电流增大,绝缘电阻显著下降。

(2) 电介质的电导对电气设备的运行有重要影响。电导产生的能量损耗使设备发热,为限制设备的温度升高,有时必须降低设备的工作电流。在一定的条件下,电导损耗还可能导致介质发生热击穿。

(3) 注意环境湿度对固体绝缘的影响,有时需作表面防潮处理,如在胶布(或纸)筒外表面刷环氧漆,绝缘子表面涂硅有机物或地蜡等。

1.1.3 电介质的损耗

【学习任务】 了解电介质在电场作用下的损耗类型,理解介质损失角正切值的意义,熟悉各类电介质损耗的特点,了解介质损失角正切值在工程上的意义。

一、电介质损耗的概念

电介质在电压作用下有能量损耗。一种是电导引起的损耗;另一种是由有损极化引起的损耗。在直流电压下,由于无周期性极化过程,因此,当外加电压低于发生局部放电电压时,介质中损耗仍由电导引起,此时用绝缘电阻这一物理量就足以表达,而在交流电压下,除了电导损耗外,还由于存在周期性极化引起的能量损耗,因此,需引入介质损失角正切 $\tan\delta$ 这一新的物理量来表示。

二、介质损失角正切 $\tan\delta$

电介质在电场作用下的等值电路如图 1-9 (a) 所示。该等值电路适用于直流电压,也适用于交流电压。图 1-9 (a) 可简化为图 1-9 (b)。

在介质两端施加交流电压 $\dot{U}$, 由于介质中有损耗, 电流 $\dot{I}$ 不是纯电容电流, 可分为有功电流 $\dot{I}_R$ 和无功电流 $\dot{I}_C$ 两个分量, 相量关系如图 1-9 (c) 所示, 即

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_C \quad (1-9)$$

由图 1-9 (d) 所示的功率三角形可见, 介质的有功损耗为

$$P = Q \tan\delta = U^2 \omega C \tan\delta \quad (1-10)$$

用有功功率 P 来表示介质品质好坏是不方便的, 因为从式 (1-10) 中可以看出, P 值

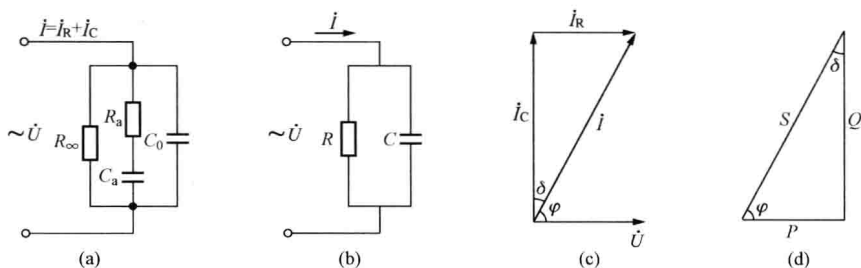


图 1-9 交流电压下电介质的等值电路和相量图

(a) 交流电压下电介质的等值电路; (b) 简化等值电路; (c) 相量图; (d) 功率三角形

与试验电压的平方和电源频率成正比, 与试品容量等因素有关, 不同试品之间难以进行比较。而当外加电压和频率一定时, 试品为同一类且容量相差不大时, 电容 C 可近似看成相同, 此时, 有功损耗 P 与 $\tan\delta$ 成正比, 故对同类试品绝缘的优劣, 可直接用介质损失角正切 $\tan\delta$ (δ 为介质损失角, 它是功率因数角 φ 的余角) 来判断介质的品质。介质损失角正切值 $\tan\delta$ 如同 ϵ_r 一样, 是仅取决于材料的特性, 而与材料尺寸无关的物理量。从图 1-9 (c) 中可得

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{U}{R}}{U\omega C} = \frac{1}{\omega CR} \quad (1-11)$$

如以一块放置于平行板电极中的矩形材料为例, 其横截面积为 A , 厚度为 d , 则 $C = \epsilon \frac{A}{d}$, $R = \rho \frac{d}{A}$, 因此得

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{\omega \epsilon \frac{A}{d} \rho \frac{d}{A}} = \frac{1}{\omega \epsilon \rho}$$

式中 ϵ 和 ρ 都由材料特性决定, 说明 $\tan\delta$ 的确是材料尺寸无关的物理量。

【实例分析】 设平行平板电极间为真空时电容为 $0.1\mu\text{F}$ 。现放入 $\epsilon_r = 3.18$ 的固体介质, 加上工频 5kV 电压后, 介质损失有 25W , 试计算放入的固体介质的 $\tan\delta$ 。

解: 根据式 (1-6) 可得放入固体介质后的电容

$$C = \epsilon_r C_0 = 3.18 \times 0.1(\mu\text{F}) = 3.18 \times 10^{-7}(\text{F})$$

把已知数据代入式 (1-10) 得

$$25 = (5 \times 10^3)^2 \times 2\pi \times 50 \times 3.18 \times 10^{-7} \times \tan\delta$$

$$\tan\delta = 1\% (\text{工程中 } \tan\delta \text{ 常用百分数表示})$$

三、各类电介质损耗的特点

1. 气体电介质的损耗

气体电介质的相对介电常数 ϵ_r 接近 1, 极化率极小, 气体电介质的损耗就是电导损耗。当电场强度小于使气体分子游离所需值时, 气体介质的电导是极小的, 所以气体介质的损耗也是极小的。正因为如此, 常用气体介质的电容器作为标准电容器。

但在强电场下气体易游离, 例如在不均匀电场中出现局部放电时, 气体间隙的介质损耗将明显增加。若固体介质中含有气泡, 气泡内的局部放电也会使介质损耗增加。

2. 液体和固体电介质的损耗

非极性或弱极性的液体或固体, 以及结构较紧密的离子性介质, 它们的极化形式主要是

电子式极化和离子式极化,没有极化损耗,这类介质的损耗主要由电导决定, $\tan\delta$ 较小,约 10^{-4} 数量级,且介质损耗大小随温度的升高而升高。例如变压器油在 20°C 时, $\tan\delta$ 不大于 0.5% , 70°C 时, $\tan\delta$ 不大于 2.5% 。聚乙烯、聚苯乙烯、硅橡胶、云母等也属于这类介质,是优良的绝缘材料,能用于高频或精密的设备中。

偶极性固体和液体介质以及结构不紧密的离子性固体介质除具有电导损耗外,还有极化损耗, $\tan\delta$ 较大。这类介质的损耗和温度、频率等因素有较复杂的关系。在电力系统中电源频率固定为 50Hz ,一般频率只有很小变化,可视为对 $\tan\delta$ 无影响。纸、聚氯乙烯、玻璃、陶瓷等属于这类介质,见表 1-4。

表 1-4 工频电压下 20°C 时某些液体和固体电介质的 $\tan\delta$ 值

电介质	$\tan\delta$ (%)	电介质	$\tan\delta$ (%)
变压器油	0.05~0.5	聚乙烯	0.01~0.02
蓖麻油	1~3	交联聚乙烯	0.02~0.05
沥青云母带	0.2~1	聚苯乙烯	0.01~0.03
电瓷	2~5	聚四氟乙烯	<0.02
油浸电缆纸	0.5~8	聚氯乙烯	5~10
环氧树脂	0.2~1	酚醛树脂	1~10

四、电介质损耗在工程上的意义

(1) 作为绝缘介质,希望其 $\tan\delta$ 越小越好。因此,选择绝缘介质时,必须注意材料的 $\tan\delta$ 。 $\tan\delta$ 越大,介质的损耗也越大,交流电压下发热也越严重。这不仅使介质容易劣化,严重时还可能导致热击穿。

(2) 在电气设备绝缘预防性试验中, $\tan\delta$ 的测量是一个基本项目。当绝缘受潮时 $\tan\delta$ 会增大,绝缘中存在气隙或大量气泡时在高电压下 $\tan\delta$ 也会显著增大,因此通过测量 $\tan\delta$ 和 $\tan\delta=F(U)$ 的关系曲线可以对绝缘状态加以判断。

子情境 1.2 气体绝缘材料及其击穿特性

气体电介质在电力系统中的应用十分广泛,架空输电线路和配电装置母线的相与相间及相与地间就是利用空气来绝缘的。而在全封闭组合电器中,则是以 SF_6 气体来绝缘。正常情况下气体的电导率很小,气体为优良的绝缘体。但在系统中产生过电压而使气体间隙上的电压超过某一临界值时,气隙会发生击穿现象,气体由绝缘状态转变为良导电状态,从而引起事故。研究气体电介质的击穿特性可合理确定气体的间隙距离,保证电力系统安全运行。

1.2.1 六氟化硫气体

【学习任务】 了解 SF_6 气体的物理、化学和电气性质,熟悉 SF_6 气体使用时的注意事项。

在电力工业中, SF_6 气体作为一种气体绝缘介质,具有优异的绝缘和灭弧性能,到目前为止,还没有一种介质或混合介质有如此良好的性能从而完全取代它。 SF_6 气体分子结构示

意图如图1-10所示。

SF_6 气体已有百年历史，它是法国两位化学家 Moissan 和 Lebeau 于 1900 年合成的，1947 年提供商用。当前， SF_6 气体主要用于电力工业中。 SF_6 气体用于 4 种类型的电气设备作为绝缘或灭弧，这 4 种类型的电气设备分别是 SF_6 断路器及 SF_6 负荷开关设备、 SF_6 绝缘输电管线、 SF_6 变压器及 GIS（气体绝缘组合电器）。从用气量讲，80% 用于高中压开关设备。

一、 SF_6 气体的性质

1. SF_6 气体的物理性质

常态下，纯净的 SF_6 气体为无色、无味、无毒、不燃的惰性气体。

SF_6 气体的密度大约是空气的 5 倍。 SF_6 气体如有泄漏必将沉积于低洼处，如电缆沟。在浓度过大时会出现使人窒息的危险，设计户内通风装置时要考虑到这一情况。另外， SF_6 气体通过对流能与空气混合，但速度很慢。气体一旦混合后就形成了 SF_6 气体和空气的混合气体，不会再次分离。

SF_6 气体容易液化，液化温度与压力有关，压力升高液化温度也增高，如在常压（0.1MPa）下，液化温度为零下 63.8℃；在 1.2MPa 压力下，0℃ 时液化。为此在 SF_6 断路器中， SF_6 气体都不采用过高的压力，以使其保持气态。单压式 SF_6 断路器灭弧室气体压力为 0.3~0.6MPa，断路器还装有加热器，根据温度和压力确定投入时间，防止气体液化。而便于运输和储存， SF_6 气体通常加压充入降温至 -80℃ 左右的钢瓶中，以液态形式存在。在使用时减压放出，呈气态充入电气设备中。

2. SF_6 气体的化学性质

一般来说 SF_6 化学性质非常稳定，在空气中不燃烧，不助燃。在 150℃ 下不与水、酸、碱、卤素及绝缘材料作用，在 500℃ 以下不分解，但温度超过 600℃ 时， SF_6 气体将产生部分热分解。尽管 SF_6 气体本身无毒，但其在电弧作用下的分解物如 SF_4 （四氟化硫）， S_2F_2 （氟化硫）， SOF_2 （氟化亚硫）， SO_2F_2 （二氟化硫酸）， SOF_4 （四氟亚硫酸酐）和 HF （氢氟酸）等，它们都有强烈的腐蚀性和毒性。当工作人员接近 SF_6 电气设备闻到有刺鼻性的气味时，应立即设法防止吸入气体并迅速离开。室内 SF_6 气体开关泄漏时，除应采取戴防毒面具、穿防护服等防护措施外，还应开启风机通风 15min 后方可进入室内。室外接近可能泄漏 SF_6 气体的设备时要谨慎，尽量选择从“上风”处接近设备。

另外， SF_6 又是在化学上极其稳定的一种气体，它在大气中的寿命约为 3200 年。特别是 SF_6 具有很强的吸收红外辐射的能力，也就是说， SF_6 是一种有很强温室效应的气体，如以 100 年为基线，其潜在的温室效应作用为 CO_2 的 2.39 万倍。加之目前排放到大气中的 SF_6 气体，正以每年 8.7% 的速率在增长。应当指出， SF_6 的温室效应以往并非没有发现，只不过由于现存于地球大气中的 SF_6 气体的浓度非常低，故认为它的影响较小，未给予认真的考虑之故。这里说的往大气中的排放并不是指电气设备运行时的自然泄漏量，这种泄漏量每年还不到 1/1000，完全可忽略不计。这里所指的泄漏量主要是指产品在制造、安装、现场调试以及检修时的排放量。

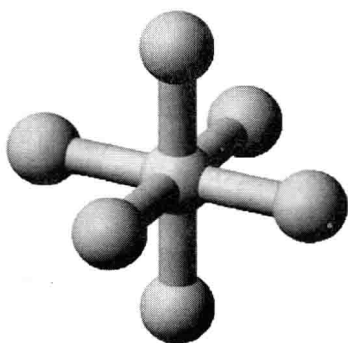


图 1-10 SF_6 气体分子结构示意图