

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANQI JUEYUAN YU GUODIANYA

电气绝缘与过电压

(第二版)

屠志健 张一尘 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



T/M 21/12(2)

DIANQI JUEYUAN YU GUODIANYA

电气绝缘与过电压

(第二版)

屠志健 张一尘 编

朱子述 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共分8章,主要包括电介质的极化、电导和损耗,电介质的击穿特性,线路和绕组中的波过程,雷电及防雷设备,输电线路的防雷保护,发电厂和变电所的防雷保护,内部过电压,电力系统的绝缘配合。为利于学生学习,每章都配有内容提要、内容小结和复习思考题与习题。

本书主要作为普通高等学校电气工程及其自动化专业和其他电类专业的教材,也可作为电力系统工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电气绝缘与过电压/屠志健,张一尘编. —2版. —北京:中国电力出版社,2009

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-9136-6

I. 电… II. ①屠…②张… III. ①电气绝缘-高等学校-教材②过电压-高等学校-教材 IV. TM21 TM86

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第120379号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005年8月第一版

2009年9月第二版 2009年9月北京第四次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11印张 266千字

定价18.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

本书是参照普通高等学校电气工程及其自动化专业“高电压技术”课程大纲中绝缘与过电压的内容要求,结合编者长期从事本课程教学与教学改革的经验编写的。

电气工程及其自动化专业是电气信息类的宽口径专业,“电气绝缘与过电压”是该专业必修的主要专业课程之一。从知识结构与内容衔接上看,应在“电路”、“电子技术”、“电机”、“电力系统分析”、“电气主系统”等专业基础课和专业课之后讲授。

本书编写时,按照既阐明基本概念、原理、方法,又结合应用实际的原则,在内容上突出概念、简化理论公式的推导,同时增加一些新技术与应用的介绍,并与最新的国家标准与行业标准相一致。本书编写时,力求讲义化,可使学生在听课时少记笔记,以便集中精力理解讲授的内容和便于增大每课时中讲授的信息量。

本书第四、五、六章由张一尘编写,其余各章由屠志健编写。全书由屠志健统稿。

本书承蒙上海交通大学朱子述教授审稿,朱教授为本书的编写及初稿修改提出了许多建设性的宝贵意见,特此表示衷心感谢。

限于编者水平,书中难免有不妥和疏漏之处,恳请读者对本书提出宝贵的批评和建议。

编 者

2009年5月于上海电力学院

目 录

前言

第1章 电介质的极化、电导和损耗	1
§ 1-1 电介质的基本概念	1
§ 1-2 电介质的极化	2
§ 1-3 电介质的电导	8
§ 1-4 电介质的损耗	10
复习思考题与习题	14
第2章 电介质的击穿特性	16
§ 2-1 气体放电的基本概念	16
§ 2-2 均匀电场中的气体放电	18
§ 2-3 不均匀电场中的气体放电	23
§ 2-4 雷电冲击电压下气体间隙的击穿特性	27
§ 2-5 操作冲击电压下气体间隙的击穿特性	31
§ 2-6 大气条件对空气间隙击穿电压的影响	33
§ 2-7 SF ₆ 气体的击穿特性	35
§ 2-8 提高气体间隙电气强度的方法	38
§ 2-9 气体中沿固体绝缘表面的放电	40
§ 2-10 液体电介质的击穿特性	46
§ 2-11 固体电介质的击穿特性	49
§ 2-12 液体与固体电介质的老化	51
复习思考题与习题	54
第3章 线路和绕组中的波过程	56
§ 3-1 波过程的基本概念	56
§ 3-2 行波的折射与反射	60
§ 3-3 行波通过串联电感和并联电容	65
§ 3-4 波在有限长线路段的多次折射和反射	68
§ 3-5 行波在平行多导线系统中的传播	72
§ 3-6 冲击电晕对线路上波过程的影响	76
§ 3-7 变压器绕组中的波过程	78
复习思考题与习题	86
第4章 雷电及防雷设备	87
§ 4-1 雷电放电及其电气参数	87
§ 4-2 避雷针和避雷线的保护范围	91

§ 4-3 避雷器	94
复习思考题与习题	103
第 5 章 输电线路的防雷保护	104
§ 5-1 输电线路上的雷电过电压及其防雷原则	104
§ 5-2 输电线路上的感应雷过电压	105
§ 5-3 输电线路上的直击雷过电压和耐雷水平	107
§ 5-4 输电线路的雷击跳闸率	112
§ 5-5 输电线路的防雷保护措施	115
复习思考题与习题	118
第 6 章 发电厂和变电所的防雷保护	119
§ 6-1 发电厂和变电所的直击雷防护	119
§ 6-2 发电厂和变电所的雷电侵入波防护	121
§ 6-3 变电所的进线段保护	130
§ 6-4 旋转电机的防雷保护	133
复习思考题与习题	137
第 7 章 内部过电压	138
§ 7-1 内部过电压基本概念和工频过电压	138
§ 7-2 谐振过电压	143
§ 7-3 空载线路的合闸过电压	149
§ 7-4 空载线路的分闸过电压	151
§ 7-5 中性点不接地系统中的电弧接地过电压	154
§ 7-6 切除空载变压器过电压	159
复习思考题与习题	162
第 8 章 电力系统的绝缘配合	164
§ 8-1 绝缘配合的基本概念和绝缘配合的原则	164
§ 8-2 绝缘水平的确定	166
复习思考题与习题	169
参考文献	170



第1章 电介质的极化、电导和损耗

本章提要

本章讨论电介质在非强电场下的特性。学习本章要求对电介质以及电介质的极化、电导、损耗、击穿的概念应着重予以理解,对表征这四个物理过程的物理量——介电系数 ϵ 、电导率 γ (或电阻率 ρ)、介质损失角正切 $\tan\delta$ 、击穿电场强度 E_F 和表征具体电介质绝缘特性的参数——绝缘电阻、泄漏电流、吸收比、极化指数以及电介质在直流电压作用下所发生的吸收现象应予以重点掌握。

§ 1-1 电介质的基本概念

根据导电的难易程度,物质可分为三类:容易导电的导体、不导电的绝缘体和介于导体与绝缘体之间的半导体。为了把不同电位导体间的电压(电位差)保持住,就要采用绝缘材料在不同电位导体之间进行电气上的隔离,这就是电气绝缘。用作电气绝缘的材料称为绝缘介质或电介质(Dielectrics)。

电介质按其化学性质可分为无机电介质(如电瓷、云母等)和有机电介质(如聚乙烯、环氧树脂等);按形态可分为气体电介质、液体电介质和固体电介质。使用最多的气体电介质是空气,例如架空输电线路各相导线对地以及各相导线之间,除了采用固体电介质(绝缘子)外,还利用了空气作为绝缘介质。 SF_6 气体作为一种绝缘性能优良的气体电介质被广泛用于断路器、气体绝缘封闭组合电器 GIS (Gas Insulated Switchgear) 中。在液体电介质中,使用最多是变压器油、电容器油和电缆油,除用作为绝缘介质外,液体电介质还兼作冷却(在油浸式电力变压器中)或灭弧(在油断路器中)介质。电气设备的绝缘材料,固体电介质用得最多,这是因为固体电介质除了用作绝缘外,还起到必须的支承带电导体作用。常用的固体电介质有绝缘纸、绝缘纸板、塑料薄膜、云母(都作设备内绝缘)、环氧树脂(用于干式变压器绝缘)、电瓷、(钢化)玻璃和合成材料如硅橡胶(用于外绝缘)。在实际应用中,常将不同形态的电介质组合起来使用,如油浸纸绝缘就是液体、固体电介质的组合。

当作用于电介质上的电压,更确切地说是当电介质中的电场强度增大到某个临界值时,流过电介质的电流就会急剧增大,说明此时电介质已失去绝缘性能而成为导体,电介质由绝缘状态突变为良好导电状态的过程称为击穿(Breakdown)。发生击穿时的临界电场强度(kV/cm)称为击穿场强或绝缘强度(其值与电介质的材料有关),发生击穿时的临界电压称为击穿电压(kV)(其值与电介质的材料及厚度有关)。固体电介质一旦击穿,将永久性丧失绝缘性能。而气体、液体电介质击穿后则只引起绝缘性能的暂时性失去,击穿后撤去电压,其绝缘性能能够自行恢复,例如 SF_6 断路器灭弧室内 SF_6 气体,在断路器分闸引起的电弧熄灭后,能自行恢复原来的绝缘性能。液体、固体电介质有一个不同于气体电介质的特点,就是在运行(即受电压作用)过程中会逐渐出现老化,使它们的物理、化学性能及各种

电气参数发生改变,从而影响电气绝缘强度与绝缘寿命。

本章讨论当作用电场强度不高(相对于击穿场强)时,在电介质中所进行的极化、电导、损耗这三个物理过程。电介质的击穿过程将在第2章中讨论。

§ 1-2 电介质的极化

一、极化的概念与电介质的相对介电系数

1. 电介质的极化(Polarization)

极化是电介质在电场(气体、液体、固体电介质加上电压后就存在电场)作用下发生物理过程的一种。此物理过程虽在电介质内部进行,但可通过此物理过程的外在表现来证实极化过程的存在。图1-1中两个平行平板电容器,它们的结构尺寸完全相同。图1-1(a)电容器极板间为真空,而图1-1(b)电容器极板间为固体电介质。实际表明,由于极间介质的不同,两者容量是不同的,而且尺寸结构相同的电容器,真空电容器的容量是最小的,即图1-1(b)电容器的容量要大于图1-1(a)电容器的容量。图1-1(a)中,在极板上施加直流电压 U 后,两极板上分别充上电荷量为 Q_0 的正、负电荷。此时

$$Q_0 = C_0 U \quad (1-1)$$

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (1-2)$$

式中 ϵ_0 ——真空的介电系数;

A ——金属极板的面积;

d ——极板间距离;

C_0 ——极板间为真空时的电容量。

然后,在极板间放入一块厚度与极板间距离相等的固体电介质,就成为图1-1(b)所示的电容器,此时电容器的电容量变为 C ,极板上的电荷量变成 Q ,有

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1-3)$$

$$Q = CU \quad (1-4)$$

式中 ϵ ——固体电介质的介电系数。

由于 $C > C_0$,而 U 不变,所以 $Q > Q_0$ 。这表明放入固体电介质后,极板上的电荷量有所增加。通过下面的分析可看出这是由于固体电介质在极板之间的电场作用下发生了极化所导致的。

电介质放入极板间,就要受到电场的作用,电介质原子或分子结构中的正、负电荷在电场力的作用下向两极分化、位移,但仍束缚于原子或分子结构中而不能成为自由电荷。其结果使介质靠近极板的两表面呈现出与极板上电荷相反的电极性,即靠近正极板的电介质表面呈现负的电极性,靠近负极板的电介质表面呈现正的电极

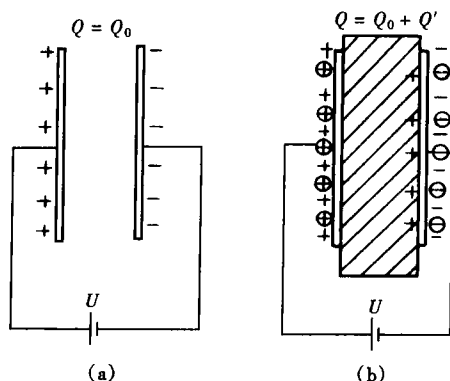


图 1-1 电介质的极化

(a) 极板间为真空; (b) 极板间为固体电介质

性, 这些仍保持在电介质内部的电荷称为束缚电荷 (极化电荷)。正由于电介质靠近极板两表面出现了束缚电荷, 根据异极性电荷相吸的规律, 就要从电源再吸取等量异极性电荷 Q' 到两极板上, 这就导致了 $Q=Q_0+Q'>Q_0$ 。所以, 极化是电介质在电场作用下沿电场方向的电介质两表面呈现电极性 (或出现束缚电荷) 的过程。

2. 相对介电系数 (Relative Dielectric Constant)

对于上述平板电容器, 放入的电介质材料不同, 电介质极化的强弱程度也不同, 极板上的电荷量 Q 也不同, 因此 Q/Q_0 就表征了在相同条件下不同电介质的不同极化程度, 即

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{CU}{C_0U} = \frac{C}{C_0} = \frac{\frac{\epsilon A}{d}}{\frac{\epsilon_0 A}{d}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r \quad (1-5)$$

式中 ϵ_r ——电介质的相对介电系数, 简称介电系数。

ϵ_r 是表征不同电介质在电场作用下极化程度的物理量, 其物理意义表示金属极板间放入电介质后电容量 (或极板上的电荷量) 为极板间真空时电容量 (或极板上的电荷量) 的倍数。

ϵ_r 值由电介质的材料所决定。气体分子间的间距很大、密度很小, 因此各种气体电介质的 ϵ_r 均接近于 1。常用的液体、固体介质的 ϵ_r 大多在 2~6 之间。不同电介质的 ϵ_r 值随温度、电源频率的变化规律一般是不同的。在工频电压下 20℃ 时, 一些常用电介质的介电系数见表 1-1。

表 1-1 常用电介质的介电系数和电导率

材 料	名 称	介电系数 ϵ_r (工频, 20℃)	电导率 γ (20℃, $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
气体介质	空 气	1.000 59	—
液体介质	弱极性	变压器油	$10^{-15} \sim 10^{-12}$
		硅有机油	$10^{-15} \sim 10^{-14}$
	极 性	蓖麻油	$10^{-13} \sim 10^{-12}$
		氯化联苯	$10^{-12} \sim 10^{-10}$
固体介质	中 性	石 蜡	10^{-16}
		聚 苯 乙 烯	$10^{-18} \sim 10^{-17}$
		聚四氟乙烯	$10^{-18} \sim 10^{-17}$
	极 性	松 香	$10^{-16} \sim 10^{-15}$
		纤 维 素	10^{-14}
		胶 木	$10^{-14} \sim 10^{-13}$
		聚氯乙烯	$10^{-16} \sim 10^{-15}$
		沥 青	$10^{-16} \sim 10^{-15}$
	离子性	云 母	$10^{-16} \sim 10^{-15}$
		电 瓷	$10^{-15} \sim 10^{-14}$

二、极化的基本形式

虽然极化的结果都是使电介质沿电场方向两表面呈现电的极性或者说是出现束缚电荷,

但由于不同电介质分子结构的不同,极化过程所表现的形式也不同。极化的基本形式有电子式极化、离子式极化、偶极子极化和夹层式极化四种。

1. 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(假设只有一个电子),图 1-2 (b) 为极化后的原子。从图中可看出电子的运动轨道发生了变形,并且有相对于原子核正电荷的位移。这样,负电荷的作用中心(椭圆的中心)与正电荷的作用中心不再重合,这种由电子轨道位移所形成的极化就称为电子式极化。

电子式极化的特点为:

(1) 极化所需时间极短。极化时间约为 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ s}$,这是由于电子质量极小的缘故。因此,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 不随频率而变化。

(2) 极化时没有能量损耗。这种极化具有弹性性质,即在外电场去掉后,由于正、负电荷的相互吸引而又自动恢复到原来的状态,所以在极化过程中无能量损耗。

(3) 温度对极化的影响极小。

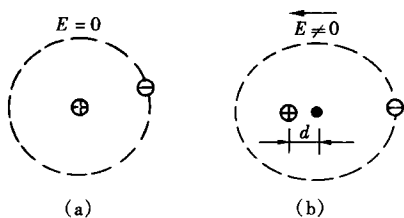


图 1-2 电子式极化示意图

(a) 极化前; (b) 极化后

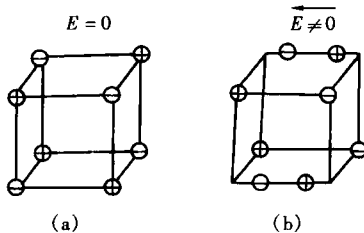


图 1-3 离子式极化示意图

(a) 极化前; (b) 极化后

2. 离子式极化

无机化合物(如云母、玻璃、陶瓷等)类固体电介质的分子结构多数属于离子式结构,其分子由正、负离子构成。在无外电场作用时,每个分子中正离子的作用中心(将所有正离子集中于此点时作用效果相同)与负离子的作用中心(将所有负离子集中于此点时作用效果相同)是重合的,故每个分子不呈现电的极性,如图 1-3 (a) 所示。在外电场 E 作用下,正、负离子作有限的位移,使两者的作用中心不再重合,如图 1-3 (b) 所示。这种由正、负离子相对位移所形成的极化就称为离子式极化。

离子式极化的特点为:

(1) 极化过程极短。极化过程约为 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ s}$,故极化(或 ϵ_r 值)也不随作用电场频率的不同而变化。

(2) 极化过程中无能量损耗。这是因为这种极化也具有弹性性质。

(3) 温度对极化有影响。温度升高时,离子间的结合力减弱,使极化程度增加;而离子的密度又随温度的升高而减小,使极化程度降低。综合起来,前者影响大于后者,所以这种极化随温度升高而增强,即 ϵ_r 具有正的温度系数(ϵ_r 值随温度升高而增大)。

3. 偶极子式极化

有些电介质的分子,如蓖麻油、氯化联苯、松香、橡胶、胶木等,在无外电场作用时,其正、负电荷作用中心是不重合的,这些电介质称为极性电介质。组成这些极性电介质的每

一个分子就成为一个偶极子（两个电荷极）。没有外电场作用时，由于偶极子不停地热运动，排列混乱，如图 1-4 (a) 所示，故电介质靠电极的两表面不呈现电的极性。受外电场作用时，偶极子受到电场力的作用而发生转向，顺电场方向作有规则的排列，如图 1-4 (b) 所示，这样靠电极两表面就呈现出电的极性。这种由于极性电介质偶极子式分子的转向所形成的极化就称为偶极子式极化。

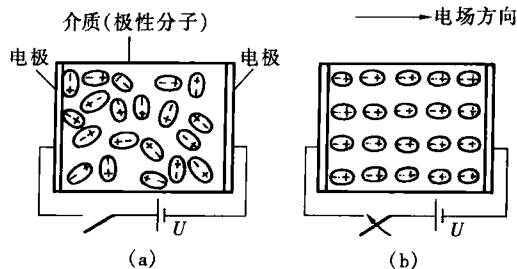


图 1-4 偶极子式极化示意图

(a) 无外电场时；(b) 有外电场时

偶极子式极化的特点为：

(1) 极化所需时间较长。约为 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ s，故极化与作用电场频率有较大关系。频率很高时，由于偶极子的转向跟不上电场方向的改变而极化减弱。

(2) 极化过程中有能量损耗。这种极化属非弹性性质，因偶极子在转向时要克服分子间的吸引力和摩擦力而要消耗能量。

(3) 温度对偶极子极化的影响很大。温度高时，分子热运动妨碍偶极子顺电场方向排列的作用明显，极化减弱；温度很低时，分子间联系紧密，偶极子转向困难，极化也减弱。以氯化联苯为例，其 ϵ_r 、 f 、 t 三者的关系如图 1-5 所示。

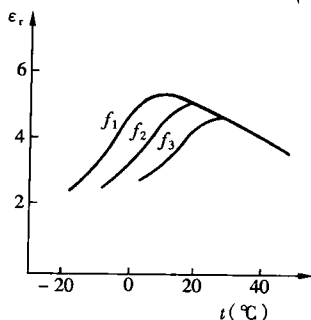
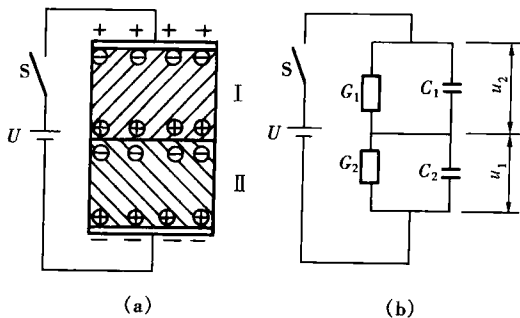
图 1-5 氯化联苯的 ϵ_r 与温度 t 的关系 ($f_1 < f_2 < f_3$)

图 1-6 夹层式极化物理过程示意图

(a) 示意图；(b) 电路分析图

4. 夹层式极化

在实际中，高压电气设备的绝缘常采用由几种不同电介质组成的复合绝缘。即便是采用单一电介质，由于密度的不均匀，也可以看成是由几种不同电介质组成，所以讨论这种夹层情况下的空间电荷极化更具现实意义。

下面以平行平板电极间的双层电介质为例来说明夹层式极化物理过程。如图 1-6 (a) 所示，当开关 S 合上，两种电介质在电场作用下都要发生极化。根据此电压的极性，在两电介质交界面的电介质 I 侧，积聚正束缚电荷，而在交界面的电介质 II 侧积聚负束缚电荷。在开关 S 合上瞬间，交界面两侧的束缚电荷量是相等的，因为此时电压按电容量分配。但暂态过程结束时，电压应按电导分配，此过程即夹层式极化过程。发生夹层式极化后，交界面两侧的束缚电荷量不相等。

夹层式极化的过程可用图 1-6 (b) 所示的等值电路作具体解释。在等值电路中， C_1 、

C_2 与 G_1 、 G_2 分别为介质 I、介质 II 的等值电容与等值电导, 为了说明简便起见, 全部参数只标数值, 略去单位。设

$$C_1 = 1, C_2 = 2, G_1 = 2, G_2 = 1, U = 3$$

开关 S 在 $t=0$ 时合上, 作用在两电介质上的总电压突然从零升至 U , 这相当于施加一频率很高的电压, 故此时两电介质上的电压按电容分压 (由于容抗远小于电阻), 即

$$\frac{u_1}{u_2} \Big|_{t=0^+} = \frac{C_2}{C_1} = 2 \quad (1-6)$$

由于 $u_1 + u_2 = U = 3$, 所以

$$u_1 \Big|_{t=0^+} = 2, u_2 \Big|_{t=0^+} = 1$$

此时两等值电容上电荷分别为

$$Q_1 \Big|_{t=0^+} = C_1 U_1 = 2, Q_2 \Big|_{t=0^+} = C_2 U_2 = 2$$

等值总电容为

$$C \Big|_{t=0^+} = \frac{Q}{U} = \frac{2}{3} \quad (1-7)$$

这表明加压瞬间, 两电介质分界面两侧的正、负束缚电荷相当, 分界面上并不呈现电的极性。

之后, 出现夹层式极化过程。当夹层式极化过程结束, 即图 1-6 (b) 的等值电路合闸后达到稳态 (理论上为 $t \rightarrow \infty$), 此时两介质上的电压按电导分压 (由于电流全流过电导), 即

$$\frac{u_1}{u_2} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{G_2}{G_1} = \frac{1}{2} \quad (1-8)$$

由于 $u_1 + u_2 = U = 3$, 所以

$$u_1 \Big|_{t \rightarrow \infty} = 1, u_2 \Big|_{t \rightarrow \infty} = 2$$

此时两等值电容上电荷分别为

$$Q_1 \Big|_{t \rightarrow \infty} = C_1 U_1 = 1, Q_2 \Big|_{t \rightarrow \infty} = C_2 U_2 = 4$$

等值总电容为

$$C \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{Q}{U} = \frac{4}{3} \quad (1-9)$$

由此可见, 由于夹层式极化, 使两电介质分界面两侧的正、负束缚电荷不相等 (在此例中夹层分界面上呈现三个正电荷的电极性) 以及等值电容增大。

对于这个具体例子, 夹层式极化过程就是 C_1 上电压从 2 降至 1, C_2 上电压从 1 升至 2 的过程。而使这种电压升与降的充、放电过程都是通过 G_1 、 G_2 进行的。由于电介质的电导非常小 (电阻非常大), 则对应的时间常数非常大, 所以夹层极化过程非常缓慢, 一般为几秒到几十分钟, 甚至有长达几小时的, 因此, 这种极化只有在作用电场频率不太高时才有意义。显然, 夹层式极化过程中有能量损耗。

既然分界面上电荷的积聚过程是缓慢的, 那么一旦作用电压撤去后此电荷的释放过程也将是缓慢的, 为此, 具有夹层绝缘的设备断开电源后, 应短接进行彻底放电, 以免残余电压危及人身安全。对于大容量电容器, 退出运行后要短接也是因为此原因。

三、极化过程中电介质的等值电路

电子式极化和离子式极化都属于无损极化，极化过程所需时间极短，所以发生这种极化过程时电介质可以用一纯电容 C_0 来等值，如图 1-7 (a) 所示。偶极子式极化和夹层式极化都属有损极化，而且完成极化过程需要一定的时间，所以发生这种极化过程时电介质就要用 r_a 与 C_a 相串联的电路来等值，如图 1-7 (b) 所示，其中 r_a 反映了极化过程中的能量损耗，而 $r_a C_a$ 则反映了极化过程时间的长短。

实际情况中，电气设备的绝缘常采用几种电介质的组合，即相当于夹层电介质的情况。即便是采用单种电介质而且出现电子式或离子式的极化，由于介质均匀程度的不同，或由于含有一些杂质（如气泡）等因素；在极化时也或多或少存在损耗，这样在极化过程中，电介质一般就都采用如图 1-7 (c) 所示的电路来等值。

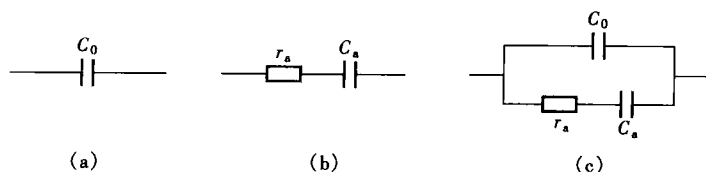


图 1-7 极化时电介质的等值电路

(a) 无损极化时；(b) 有损极化时；

(c) 兼有无损、有损极化时

根据此等值电路，通过电路分析可知：在直流电压作用下，经过一定时间后极化过程就结束；而在交流电压作用下，极化过程随电压极性的周期性改变而反复进行（交替进行正向极化与反向极化）。

四、相对介电系数在工程应用上的意义

1. 选择合适介电系数值的电气设备绝缘材料

选择电容器的绝缘材料时，要选 ϵ 值大一些的材料，这样所制造电容器单位电容量的电容器质量和大小尺寸就可以减小。而选择一般电气设备绝缘材料时，一般选 ϵ 值小一些的材料。例如：采用 ϵ 值小的绝缘材料作交流电力电缆的绝缘可减小充电电流以及可降低因极化引起的发热损耗；在电机定子绕组出槽口以及套管等场合，选用 ϵ 值小的绝缘材料则不易出现沿这些绝缘介质表面的放电。

2. 采用组合绝缘时选择介电系数合理搭配的绝缘材料

通常高压电气设备的绝缘常由几种绝缘介质组合而成。在交流电压作用下，多层串联电介质中的电场强度与介电系数成反比，因此要注意各电介质 ϵ 值的合理搭配，以使各电介质中的电场强度比较合理。例如，若固体电介质中存在气泡，由于 $\frac{E_{气}}{E_{固}} = \frac{\epsilon_{固}}{\epsilon_{气}}$ ，使气泡中的电场强度可达数倍于固体电介质中的场强而导致在气泡中出现放电（局部放电）现象。再例如，因电缆绝缘中越靠近线芯地方的电场强度越大，所以电缆绝缘采用多层不同绝缘材料时，选用 ϵ 值大的内层绝缘（相比于外层绝缘）就可以改善电场分布的不均匀程度。

3. 通过测量 ϵ 值来判断绝缘材料的受潮情况及含气泡的多少

ϵ 很大（ ϵ 值为 80）的水分侵入绝缘材料后，可使其 ϵ 值增大。同样绝缘介质中有气泡时，由于夹层极化的缘故而介电系数也增大。

§ 1-3 电介质的电导

一、电介质电导 (Conduction) 的概念与电导率 (Conductivity)

电介质的基本功能是将不同电位的导体分隔开, 它应是不导电的, 但这种不导电并非绝对不导电, 而只是导电性能非常差。电介质加上电压后也会有微小的电流流过, 这是因为在电介质内部还是存在数量很少的带电粒子, 这些带电粒子在电场 (由所加电压引起) 作用下就会不同程度地作定向迁移而形成微小的传导电流 (电导性电流), 这就是电介质的电导过程。电介质绝缘性能与电导性能的表现刚好相反, 导电性能越差则绝缘性能越好。

表征不同电介质电导过程进行程度强弱的物理量是电导率 γ (或其倒数为电阻率 ρ), 单位为 $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (或 $\Omega \cdot \text{cm}$)。电介质的电阻率一般达 $10^{10} \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$, 而导体的电阻率在 $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下, 可见两者差别之大。气体电介质在正常情况下的电导过程是极其微弱的而常被忽略不计。而液、固体电介质的电导过程则不能忽略, 而且受各种因素影响很大。常用液、固体电介质的电导率见表 1-1。

与导体的导电过程相比, 在电介质电导过程中所流过的电导电流是非常小的, 一般以 μA (10^{-6}A) 为单位来计量, 此电导电流称为泄漏电流 (Leakage Current) (以比喻电流非常之小)。泄漏电流可以通过在电介质上加直流电压后直接测量 (交流电压作用下所测电流中还包括极化电流)。泄漏电流所对应的电阻称为绝缘电阻, 这样, 直流电压、泄漏电流、绝缘电阻三者符合欧姆定律。电气设备绝缘的绝缘电阻是很大的, 一般以 $\text{M}\Omega$ ($10^6 \Omega$) 为单位来计量。显然, 在电导过程中电介质可用其绝缘电阻来等值。

二、电介质电导的特性

1. 离子性电导

电介质的电导过程与导体的导电过程之间的差别不仅在于形成的电导电流 (这取决于带电粒子数量的多少) 差别很大, 而且电导的本质也是截然不同的。电介质中形成电导电流的带电粒子主要是少量离子, 所以电介质电导为离子性电导。而金属导体的电导性质为电子性电导, 即形成电导电流的带电粒子为金属中的大量自由电子。

2. 温度的影响

电介质电导与温度有密切的关系。温度越高, 离子的热运动越剧烈, 就越容易改变原有受束缚的状态, 因而在电场作用下作定向移动的离子数量和速度都会增加, 使电导随温度升高而增大。电导增大的规律近似于指数规律。温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的电导率和电阻率分别为

$$\gamma_t = \gamma_{20} e^{\alpha(t-20)} \quad (1-10)$$

$$\rho_t = \rho_{20} e^{-\alpha(t-20)} \quad (1-11)$$

式中 γ_{20} 、 ρ_{20} —— 20°C 时的电导率和电阻率;

α ——绝缘材料的温度系数。

三、电介质在直流电压作用下的吸收现象 (Absorption Phenomenon)

一固体电介质加上直流电压 U , 如图 1-8 (a) 所示, 然后观察开关 S_1 合上之后流过电介质电流 i (此电流可测) 的变化情况。结果观察到电流 i 从大变到小, 随时间衰减, 最终稳定于某一数值, 此现象就称为吸收现象。将此电流画成曲线如图 1-8 (b) 所示。电流 i 的曲线也称为吸收曲线。这里的所谓“吸收”是一种比喻的说法, 初看起来似乎有一部分电流

[图 1-8 (b) 中 I'] 被电介质“吸收”掉了。

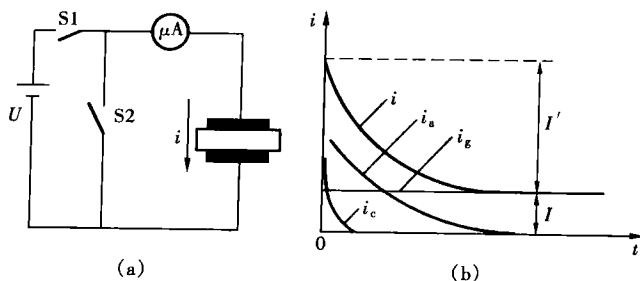


图 1-8 直流电压下流过电介质的电流及测量

(a) 电路示意图; (b) 电流曲线图

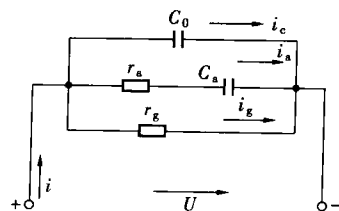


图 1-9 直流电压下电介质的等值电路

根据电介质在电压作用下发生的极化过程和电导过程, 就不难解释为什么会出现吸收现象。在直流电压作用下, 电介质要发生极化、电导过程, 过程中电介质的等值电路如图 1-9 所示。显然, 流过电介质的电流 i 由三个分量组成, 即

$$i = i_c + i_a + i_g \quad (1-12)$$

式中 i_c ——纯电容电流, 它存在时间极短, 很快衰减至零。

i_a ——有损极化所对应的电流, 即夹层式极化和偶极子式极化的电流, 它随时间衰减, 被称为吸收电流。吸收电流衰减的快慢程度取决于介质的材料及结构等因素, 对于不是很大设备的绝缘, 一般 1min 都衰减至零或早已衰减至零 (这要取决于设备绝缘等值电容量的大小)。对于大型设备 (如大型变压器、发电机) 的绝缘, 衰减时间可达 10min。

i_g ——泄漏电流, 它不随时间变化。

将上述三个电流分量 i_c 、 i_a 、 i_g 在每个时刻叠加起来就得到流过电介质的电流 i , 根据叠加结果可以看到电流是从大到小随时间衰减, 最终稳定于某个数值 (即泄漏电流值), 以上分析就说明了为什么会出现吸收现象。

根据上述分析可以看到: 加上直流电压后, 经过一定时间 (一般小于 1min), 极化过程就结束, 此时仅存在电导过程, 流过电介质的电流就等于泄漏电流, 所对应的电阻就是绝缘电阻, 这就是工程应用上测量泄漏电流和绝缘电阻的基本原理。

四、固体电介质的体积绝缘电阻与表面绝缘电阻

对于固体电介质, 测泄漏电流 (或绝缘电阻) 时若不采取特别措施, 像图 1-8 (a) 那样, 那么测到的泄漏电流 (或绝缘电阻) 实际上还包括表面泄漏电流 (或表面绝缘电阻), 即所测泄漏电流 (或绝缘电阻) 为流过电介质内部的泄漏电流与流过电介质表面泄漏电流之和 (或体积绝缘电阻与表面绝缘电阻的并联值)。因此当电介质表面脏污或受潮时, 由于表面泄漏电流的影响使得所测到的泄漏电流偏大 (或绝缘电阻偏小), 这就不能根据所测泄漏电流值 (或绝缘电阻值) 来正确判断电介质内在绝缘性能的好坏, 为此, 在测量中要采取措施消除表面泄漏所造成的影响。

五、电介质电导和吸收现象在工程应用上的意义

(1) 根据绝缘电阻或泄漏电流值的变化判断绝缘良好与否。比如, 若绝缘存在整体性的受潮、脏污或贯通性集中缺陷, 则泄漏电流会明显增大, 绝缘电阻会明显下降。由于泄漏电

流和绝缘电阻值还与绝缘材料、形状、尺寸等诸多因素有关,因此不能根据它们的具体数值的大小来判断绝缘性能的好坏,而只能与该绝缘的过去测量值(如出厂试验测量值、历次试验测量值)作比较来判断绝缘良好与否。

(2) 利用吸收现象,测绝缘的吸收比,来判断等值电容量较大设备绝缘的良好与否。吸收比 K 定义为加电压后 60s 时的绝缘电阻值与 15s 时绝缘电阻值之比,即

$$K = \frac{R_{60''}}{R_{15''}} \quad (1-13)$$

K 又可表示成

$$K = \frac{U/i_{60''}}{U/i_{15''}} = \frac{i_{15''}}{i_{60''}} \quad (1-14)$$

式中 $i_{15''}$, $R_{15''}$ ——加压 15s 时的电流和相应的绝缘电阻;

$i_{60''}$, $R_{60''}$ ——加压 60s 时的电流和相应的绝缘电阻。

若绝缘良好, i_g 很小, i 衰减很多后才达到稳定值 i_g , 这样 $i_{15''}$ 与 $i_{60''}$ 之比较大(一般 $K \geq 1.3$), 而若绝缘劣化或有缺陷, 则 i_g 较大, i 衰减不多就达到稳定值 i_g , 这样 $i_{15''}$ 与 $i_{60''}$ 之比就接近于 1, 因此我们就可根据所测到吸收比 K 值的大小来判断绝缘性能的好坏。对于等值电容量更大的设备绝缘, 由于加压后 1min 时, 吸收电流分量 i_a 远没有衰减至零, 所以要根据极化指数 PI 的大小来进行判断

$$PI = \frac{R_{10'}}{R_{1'}} \quad (1-15)$$

式中 $R_{10'}$ ——加压 10min 时对应的绝缘电阻;

$R_{1'}$ ——加压 1min 时对应的绝缘电阻。

(3) 利用电导率取得合理的电压分布。直流电压下多层绝缘介质的电压分布与电导成反比, 这在设计直流设备时, 要注意各层电介质电导率的合理搭配, 使绝缘材料尽可能得到合理的电压分配; 直流电压下多个电容器串联使用时, 如果它们的绝缘电阻有较大的差异, 就应在每个电容器上并联均压电阻, 以防止电压分布不均匀引起电容器绝缘的击穿。

(4) 降低表面电阻率来提高沿面闪络电压。对于绝缘电阻来讲, 通常是希望阻值高一些, 但也并非一定如此, 例如高压套管法兰附近的绝缘表面涂了半导体釉, 以及高压电机定子绕组出槽口部分的绝缘表面涂半导体漆来减小其表面绝缘电阻, 则可降低这些部位表面的电场强度, 以消除电晕, 提高沿面闪络电压。

§ 1-4 电介质的损耗

一、电介质损耗 (Dielectric Loss) 的概念

1. 介质损耗

电介质在电场作用下(加电压后), 要发生极化过程和电导过程, 有损极化过程中有能量损耗; 电导过程中, 电导性泄漏电流流过绝缘电阻当然有能量损耗。电介质出现能量或功率损耗的过程称为介质损耗。显然, 介质损耗过程随极化过程和电导过程同时进行, 换句话说, 由于极化、电导过程的存在才有损耗过程。电介质损耗掉的能量(电能)毫无例外地都转变成了热能, 使电介质温度升高。若介质损耗过大, 则电介质温度将升得过高, 这将加速电介质的热分解与老化, 最终可能导致绝缘性能的完全失去, 所以研究介质损耗有十分重要

的现实意义。

2. 介质损耗的基本形式

电介质的损耗包括下列三种形式的损耗：

(1) 电导损耗。它是由泄漏电流流过电介质而引起的。

(2) 极化损耗。它是由有损极化引起的。

(3) 游离损耗。它主要是指气体间隙的电晕放电以及液固体电介质内部气泡中的局部放电所引起的附加损耗。

由于气体电介质的极化、电导过程很微弱，所以气体电介质的介质损耗是极小的，在工程应用中可略去不计，但当出现电晕放电时，游离损耗就不能忽略了，这种情况在高压输电线路上是常见的，称为电晕损耗。液体、固体电介质在运行过程中的介质损耗不能忽略，介质损耗会引起电介质发热，使电介质逐渐出现老化，使它们的物理、化学性能及各种电气性能发生改变，从而影响到绝缘的电气强度和寿命，这是液、固体电介质不同于气体电介质的又一个特点。

在直流电压作用下，液、固体电介质的电导损耗始终存在，而极化损耗仅在电压施加后很短时间内存在，所以与电导损耗相比可忽略不计。而在交流电压作用下，由于电介质随交流电压极性的周期性改变而做周期性的正向极化与反向极化，极化过程引起的极化损耗便不能忽略。

二、介质损失角正切 $\tan\delta$ (Dissipation Factor)

由上述分析可见，在直流电压作用下，介质损耗主要为电导损耗，因此，电导率 γ 或电阻率 ρ 既表示介质电导的特性，同时也表征了介质损耗的特性。但在交流电压作用下，三种形式的损耗都存在，为此需引入一个新的物理量来表征介质损耗的特性，这个物理量就是 $\tan\delta$ 。

1. 交流电压下的介质损耗功率

电介质在交流电压作用下，极化过程和电导过程始终进行，所以电介质的等值电路如图 1-7 (a) 所示。该电路可以进一步简化成由 R 、 C_p 并联或由 r 、 C_s 串联的等值电路，如图 1-10 (b)、(c) 所示。对于并联等值电路，画出对应的相量图如图 1-10 (d) 所示。令功率因数角 φ 的余角为 δ 角，从相量图可看出 δ 角越大则 I_R 越大，介质损耗功率也越大，所以 δ 角就称为介质损失角。

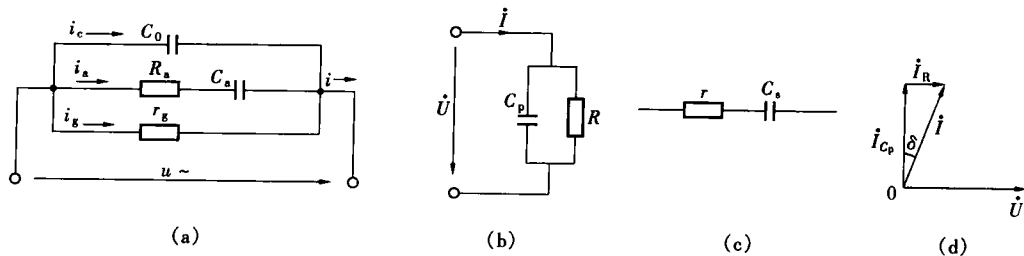


图 1-10 交流电压下电介质的等值电路及相量图

(a) 等值电路图；(b)、(c) 并联及串联等值电路；(d) 并联电路相量图

对于并联等值电路，介质损耗功率 P 为

$$P = UI_R = UIC_p \tan\delta = U^2 \omega C_p \tan\delta \quad (1-16)$$