



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



高电压技术

■ 常美生 张小兰 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

中国电力出版社 CHINA ELECTRICITY PRESS



高电压技术

第2版 张松林 主编

中国电力出版社
CHINA ELECTRICITY PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高电压技术

常美生 张小兰 主编



高等教育出版社

内容提要

本书共分十章,主要介绍电介质的极化、电导和损耗过程及其在工程中的意义;电介质的击穿过程、击穿特性及提高击穿电压的方法;电气设备绝缘试验的基本项目和原理;电气设备的绝缘及试验方法;波过程的基本理论及其在分析过电压中的应用;防雷设备的工作原理及电气参数;电力系统中雷电过电压产生的物理过程及其保护原理;电力系统中的内部过电压及其防护措施;电力系统的绝缘配合的基本方法。

本书主要作为应用性、技能型各类院校发电厂及电力系统专业、供用电技术专业、电气技术专业、工业电气自动化专业、输变电工程技术专业等的教材,同时也可作为函授、自考和职业技能鉴定的辅导教材及电力行业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/常美生,张小兰主编. —北京:高等教育出版社,2006.11

ISBN 7-04-019509-7

I. 高... II. ①常...②张... III. 高电压-技术-高等学校:技术学校-教材 IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 122886 号

策划编辑 刘 洋 责任编辑 许海平 封面设计 李卫青 责任绘图 吴文信
版式设计 陆瑞红 责任校对 王 雨 责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 唐山市润丰印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 17.5
字 数 430 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2006 年 11 月第 1 版
印 次 2006 年 11 月第 1 次印刷
定 价 22.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19509-00

前 言

为适应教学改革的要求,书中内容以工程应用为主,兼顾各种岗位需求。除必要的数学公式外,主要从物理概念上介绍电力系统中实用的高电压技术知识,且各部分内容与相关国家标准和规程紧密结合,注重基本技能方面的训练,使学生掌握从事电力系统设计、运行,电气设备安装、检修和试验等工作所必备的高电压技术知识。

全书共分十章,第一章阐述电介质在电压相对较低时内部所发生的物理过程;第二、三章阐述电介质在高电压下的击穿特性;第四章介绍电气设备绝缘试验的原理;第五章介绍电气设备的绝缘及试验方法;第六章介绍线路和绕组中的波过程及其在分析过电压时的应用;第七章介绍防雷设备;第八章介绍电力系统的雷电过电压及其保护;第九章介绍电力系统的内部过电压及其防护;第十章叙述绝缘配合的基本知识。每章附有小结和习题,供学习时参考。

本书第一至第三章由张小兰编写,第四至第五章由张玲编写,绪论及第六至第十章由常美生编写。常美生、张小兰担任主编,由常美生负责统稿。本书经重庆电力科学试验研究院高级工程师白云庆审阅,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2006年4月

目 录

绪论	1	本章小结	54
		习题	54
第一章 电介质的极化、电导和损耗 ...	3	第四章 电气设备绝缘试验的	
第一节 电介质的极化	3	原理	55
第二节 电介质的电导	9	第一节 绝缘电阻和吸收比的测量	56
第三节 电介质的损耗	11	第二节 泄漏电流的测量	58
本章小结	13	第三节 介质损失角正切的测量	60
习题	13	第四节 局部放电的测量	66
第二章 气体电介质的击穿特性	15	第五节 变压器油中溶解气体的气相	
第一节 气隙中带电质点的产生与		色谱分析	70
消失	15	第六节 工频耐压试验	75
第二节 均匀电场中气体的击穿过程	18	第七节 直流耐压试验	81
第三节 不均匀电场中气体的击穿		第八节 冲击耐压试验	84
过程	22	本章小结	89
第四节 雷电冲击电压下空气的击穿		习题	89
电压	27	第五章 电气设备的绝缘及试验	
第五节 操作冲击电压下空气的击穿		方法	91
电压	30	第一节 电力变压器的绝缘与试验	91
第六节 提高气体间隙击穿电压的		第二节 互感器的绝缘与试验	96
方法	32	第三节 高压断路器的绝缘与试验	98
第七节 绝缘子的沿面放电	35	第四节 电力电缆的绝缘与试验	100
第八节 大气条件对外绝缘放电电压		第五节 电容器的绝缘与试验	102
的影响	41	第六节 发电机的绝缘与试验	105
本章小结	42	第七节 避雷器的试验	108
习题	43	本章小结	110
第三章 液体和固体电介质的击穿		习题	110
特性	44	第六章 线路和绕组中的波过程 ...	112
第一节 液体电介质的击穿特性	44	第一节 均匀无损单导线线路中的	
第二节 固体电介质的击穿特性	48	波过程	113
第三节 电介质的老化	51		

第二节 行波的折射和反射	118	第六节 变电站的进线段保护	207
第三节 串联电感和并联电容对行波的影响	124	第七节 变压器的防雷保护	210
第四节 行波的多次折、反射	127	第八节 旋转电机的防雷保护	213
第五节 无损平行多导线系统中的波过程	132	本章小结	218
第六节 冲击电晕对线路波过程的影响	136	习题	218
第七节 单相变压器绕组中的波过程 ..	138	第九章 内部过电压及其防护	220
第八节 三相变压器绕组中的波过程 ..	146	第一节 空载线路的分闸过电压	221
第九节 冲击电压在绕组间的传递	148	第二节 空载线路的合闸过电压	225
第十节 旋转电机绕组中的波过程	150	第三节 切除空载变压器过电压	228
本章小结	151	第四节 电弧接地过电压	231
习题	152	第五节 工频电压升高	238
第七章 雷电及防雷设备	154	第六节 谐振过电压	242
第一节 雷电的放电过程	154	本章小结	247
第二节 雷电放电的计算模型和雷电参数	156	习题	247
第三节 避雷针和避雷线的保护范围 ..	160	第十章 电力系统的绝缘配合	249
第四节 避雷器	165	第一节 绝缘配合的基本概念	249
第五节 防雷接地	175	第二节 中性点接地方式对绝缘水平的影响	251
本章小结	181	第三节 绝缘配合的惯用法	252
习题	182	第四节 绝缘配合的统计法	255
第八章 雷电过电压及其保护	183	第五节 架空输电线路的绝缘配合	257
第一节 输电线路的感应雷过电压	184	本章小结	261
第二节 输电线路的直击雷过电压	186	习题	262
第三节 输电线路耐雷性能的指标及防雷措施	193	附录	263
第四节 发电厂、变电站的直击雷保护	198	附录 1 球隙放电电压表	263
第五节 变电站的入侵波保护	200	附录 2 高压输变电设备的绝缘水平及耐受电压	266
		附录 3 避雷器电气特性	270
		参考文献	273

绪 论

一、高电压技术的研究对象

高电压技术研究的对象主要是电力系统中的绝缘和过电压问题。

所谓绝缘,就是将不同电位的导体分隔开,从而使其保持各自的电位。具有绝缘作用的材料称为电介质或绝缘材料。按状态电介质可分为气体、液体和固体三类。与导体不同,电介质在正常情况下的导电能力极其微弱,电阻率很大,一般在 $10^6 \Omega/\text{m}$ 以上。

电力系统中的绝缘包括输电线路的绝缘和变电站电气设备的绝缘两大部分。电气设备的绝缘又分内绝缘和外绝缘两部分。电气设备外壳内的绝缘称为内绝缘,内绝缘通常由固体和液体介质的组合或固体和气体介质的组合构成,其电气强度基本上不受大气条件的影响,但其电气性能在运行过程中会逐渐劣化,表现出明显的老化现象。电气设备外壳外的绝缘称为外绝缘,外绝缘主要由空气间隙和绝缘子表面构成,其电气强度不仅与大气条件有关,还会受到恶劣天气情况的影响,如户外绝缘子的电气强度在表面污秽和雨、雾等的共同作用下会显著降低。

输电线路的绝缘和电气设备的外绝缘均属自恢复绝缘,即空气间隙击穿或绝缘子闪络后,一经切断电源短时间内可恢复绝缘性能。电气设备的内绝缘大多属于非自恢复绝缘,即一旦发生击穿,即使去除外加电压,绝缘性能也无法恢复。

绝缘在运行过程中要承受各种电压的作用,在电压相对较低时,绝缘(主要是内绝缘)中会发生极化、电导和损耗现象,它们对绝缘的电气性能会产生重要的影响。当作用到绝缘上的电压超过临界值时,绝缘会失去绝缘能力而转变为导体,即发生击穿或闪络现象。因此,需要研究各种电介质在电压作用下的电气物理性能,特别是其在高电压作用下的击穿特性,以选择合适的电介质和设计合理的绝缘结构。

对空气间隙或绝缘子来说,由于空气是自恢复绝缘,故其电气强度可用击穿电压或闪络电压来衡量;对电气设备来说,由于其内绝缘为非自恢复绝缘,故其电气强度只能用耐受电压来表示。研究绝缘的击穿或耐受电压特性需要进行各种高压试验,运行过程中绝缘中出现的缺陷也需要通过高压试验才能检出,因此高压试验设备、试验方法以及测量技术在高电压技术中占有格外重要的地位,也是高电压技术所研究的基本内容之一。

电气设备的绝缘在设备运行过程中不仅要受到工作电压的持续作用,还会受到各种过电压的作用。所谓过电压是指超过设备最大运行电压的那些电压。电力系统中的过电压来自两个方面,其一是由雷电放电引起的,称为雷电过电压或大气过电压。雷电过电压又可分为直击雷过电压和感应雷过电压两种,前者由雷击输电线路或发电厂、变电站的配电装置所引起,后者则由雷击这些设备附近的地面或其他物体所引起。输电线路上的直击雷电的过电压主要靠避雷线来保护,发电厂、变电站的直击雷过电压主要靠避雷针来保护。雷击输电线路时产生的直击雷过电压不仅会危害线路的绝缘,还会沿线路向变电站传播,称为入侵波。入侵波到达变电站后,会对变电站设备的绝缘构成严重威胁,限制这种过电压的主要措施是在变电站的母线上装设避雷器并

设法减小通过避雷器的雷电流。另一类过电压来源于电网本身,是由于系统中开关的操作、事故或参数配合不当而引起的,称为内部过电压。内部过电压又可分为操作过电压和暂时过电压两类。操作过电压是由于开关操作或事故时,电网中的电场能量和磁场能量发生相互转化而引起的,它存在的时间相对较短。暂时过电压包括工频电压升高和谐振过电压,前者由长线路的电容效应或单相接地、发电机突然甩负荷所引起,后者由电感和电容参数配合不当所引起。暂时过电压具有稳态的性质,它存在的时间相对较长。过电压对绝缘的危害极大,是影响电气设备安全运行的主要因素之一。研究过电压的产生过程、防护措施与防护设备是高电压技术研究的另一基本内容。

为保证电气设备绝缘运行的可靠性,必须处理好设备绝缘水平和系统过电压之间的关系。二者之间的协调配合称为绝缘配合,它也是高电压技术研究的核心内容。只有通过比较,使电气设备的绝缘水平和系统中的过电压水平相互协调配合,才能保证电气设备经济实用和运行的可靠。

此外,超、特高压输电的无线电干扰、对生物的影响等都是高电压技术研究的课题。

二、高电压技术的发展现状

高电压技术是随着输电电压的提高而不断发展的一门新学科,输电电压等级的不断提高源于远距离、大容量输电。目前,世界上交流输电的最高电压已达 $1\,150\text{ kV}$,直流输电的最高电压达 $\pm 600\text{ kV}$ 。我国在 20 世纪 80 年代初建成第一条 500 kV 超高压输电线路,现除西北电网外,各大电网都已形成以 500 kV 输电线路为主干线的网架结构。目前根据西电东送和加强全国联网等的要求,特高压输电技术已纳入我国《国家中长期科学和技术规划纲要》,并且确定交流输电电压等级为 $1\,000\text{ kV}$ 。直流输电方面,我国也已在 20 世纪 80 年代末投产了葛洲坝至南桥 $\pm 500\text{ kV}$ 直流输电线路,之后又建设投产了三峡至广东、贵州至广东等多个 $\pm 500\text{ kV}$ 直流输电工程,未来已确定建设 $\pm 800\text{ kV}$ 的直流特高压输电工程。

输电电压等级的不断提高,既给高电压技术提出了许多有待进一步研究的现实问题,也使高电压技术的理论和实践不断完善和发展。新的绝缘材料和绝缘结构的采用、过电压保护措施和保护电器的改进都赋予了高电压技术新的内容。其他学科在高电压技术中的应用,如电子计算机应用于计算电力系统的暂态过程和变电所的波过程,微电子和计算机技术应用于电气设备的绝缘监测等,也丰富了高电压技术的内容。同时高电压技术在电工以外的领域也得到了广泛的应用,如高电压技术在粒子加速器、大功率脉冲发生器、静电喷涂、静电复印等方面的应用。

三、“高电压技术”课程的特点和要求

高电压技术是一门实践性很强的学科,其中有些内容因是用微观或半微观的概念来说明宏观的现象,故比较抽象;还有些内容则因理论和计算不很完善,所以一些规律性的东西常需用试验数据或经验公式来表达。学习中要充分注意这些特点,重点掌握分析和解决问题的基本思路和方法。绝缘试验和过电压保护等内容还应结合国家标准和规程进行学习。

通过对高电压技术课程的学习,应掌握电介质在各种电压作用下的击穿特性以及提高电介质击穿电压的基本方法;掌握电气设备绝缘的测试原理、测试方法及测试结果的分析判断方法,并获得初步的试验技能;了解电力系统过电压的产生机理和发展过程以及过电压防护措施的基本原理。

第一章 电介质的极化、电导和损耗



要求

熟悉电介质在电场作用下的极化、电导和损耗等物理现象以及它们在工程上的合理应用。



知识点

- 电介质的极化、电导和损耗的概念
- 各类电介质的极化、电导和损耗的特点
- 相对介电常数 ϵ_r
- 电介质的等值电路
- 电介质损失角正切 $\tan \delta$
- 电介质极化、电导和损耗在工程上的意义



重点和难点

- 相对介电常数 ϵ_r
- 电介质损失角正切 $\tan \delta$
- 电介质的极化、电导和损耗在工程上的意义

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。按状态电介质可分为气体、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、损耗和击穿放电等。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。

第一节 电介质的极化

一、极化的概念和极化的形式

1. 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,整体上对外没有极性。当有外电场作用时,正、负电荷受电场力的作用,其相对位置发生变化。尽管内部正、负电荷仍相互抵消,但正、负电荷相对位置发生了变化,电介质的表面出现电荷(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),这种现象称为电介质的极化。

2. 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。这种由于电子发生相对位移而发生的极化称为电子式极化。



图 1-1 电子式极化示意图

(a) 极化前;(b) 极化后

电子式极化的特点是:极化过程所需的时间极短,约 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ s;极化是弹性的,去掉外电场,可立即恢复原状态,无能量损耗;极化过程与电源频率、温度无关。

(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。在无外电场作用时,电介质内大量分子的正、负离子的作用中心是重合的,故对外不呈现极性,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,使电介质内正、负离子的作用中心分离,电介质对外呈现极性,如图 1-2(b)所示,这种极化称为离子式极化。



图 1-2 离子式极化示意图

(a) 极化前;(b) 极化后

离子式极化的特点为:极化过程所需的时间很短,约 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ s;极化是弹性的,无能量损耗;极化程度与电源频率无关,但随温度升高而略有增加。

(3) 偶极子式极化

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,整个电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,整个电介质对外呈现极性,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。



图 1-3 偶极子式极化示意图

(a) 极化前; (b) 极化后

偶极子式极化的特点为:极化过程所需的时间较长,约 $10^{-10} \sim 10^{-2} \text{ s}$;极化是非弹性的,去掉外电场,不能恢复到极化前的状态,有能量损耗;极化程度与电源频率、温度有关。

【课堂讨论】由偶极子分子构成的电介质在工频交流电压作用下的极化过程与直流电压作用下的极化过程是否相同?

(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,如电缆、电容器、电机和变压器等,常应用多种电介质绝缘,这时在电介质的分界面上会产生“夹层式极化”现象。

以平行板电极间的双层电介质为例说明夹层式极化过程。图 1-4(a)所示为夹层式极化实验电路,图 1-4(b)所示为其等值电路,在开关 S 刚闭合瞬间(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,两层电介质上的电压分配与各层电容成反比,即

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

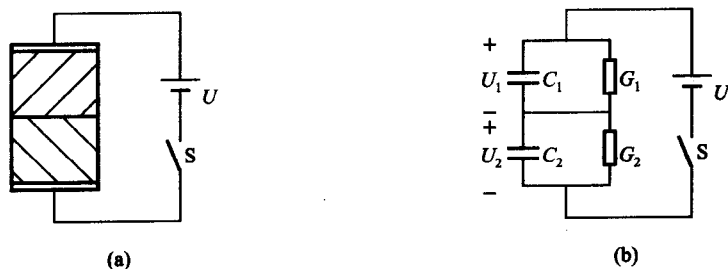


图 1-4 夹层式极化物理过程示意图

(a) 示意图; (b) 等值电路

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

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

一般来说,对两层不同的电介质, $\frac{C_2}{C_1} \neq \frac{G_2}{G_1}$,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,两层电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),结果使两层电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。由于夹层式极化中有吸收电荷,故夹层式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电介质的电导完成的。由于一般绝缘的电导数值很小,故这种极化过程是很缓慢的,其完成时间从几秒到几十分钟,甚至长达几小时。因此,夹层式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。当绝缘介质受潮时,由于电导增大,极化完成时间将减小。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。因此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:极化过程缓慢,是非弹性的,有能量损耗。

【实例分析】为帮助理解夹层式极化过程,现以实际数据进行分析。

设图 1-4(b) 中 $C_1 = 1\text{F}$, $C_2 = 2\text{F}$, $G_1 = 2\text{S}$, $G_2 = 1\text{S}$, $U = 3\text{V}$ 。为了说明的简便,全部参数均用基本单位,而实际应用中多为倍数或约数单位。

合闸初瞬,根据式(1-1)可得,则 $U_1 = 2\text{V}$, $U_2 = 1\text{V}$, $Q_1 = U_1 C_1 = 2\text{C}$, $Q_2 = U_2 C_2 = 2\text{C}$,如图 1-5(a) 所示。

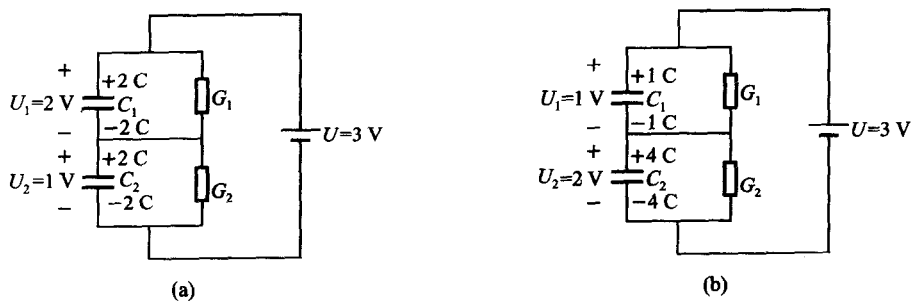


图 1-5 双层介质中电荷和电位分布

(a) 合闸初瞬时; (b) 稳态时

稳态时,根据式(1-2)可得, $U_1 = 1\text{V}$, $U_2 = 2\text{V}$, 则 $Q_1 = U_1 C_1 = 1\text{C}$, $Q_2 = U_2 C_2 = 4\text{C}$, 如图 1-5(b) 所示。分界面上堆积的电荷为 $(+4 - 1)\text{C} = +3\text{C}$ 。

二、介电常数

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, 单位为 cm^2 ;

d ——极板间距离, 单位为 cm ;

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

当极板间充满一块固体电介质后, 极板上的电荷增加为 $Q_0 + \Delta Q$, 如图 1-6(b) 所示。这种现象是由固体电介质的极化造成的。在电场作用下, 固体电介质发生极化, 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, 电场空间中的电场强度(场强)将减小。事实上, 固体电介质插入前后, 由于外加电压 U 不变, 极板间的总电场 E 将保持不变, 即 $E = \frac{U}{d}$ 。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

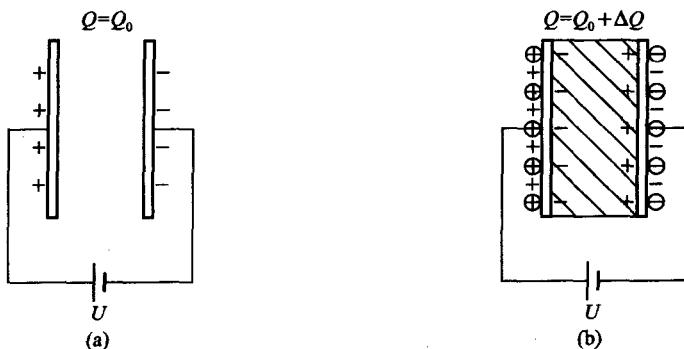


图 1-6 极化现象

(a) 极板间为真空; (b) 极板间放入介质

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

式中 ϵ ——固体介质的介电常数。

相对介电常数 ϵ_r 定义为

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

它是表征电介质在电场作用下极化程度的物理量。

相对介电常数 ϵ_r 的值由电介质的材料决定, 并且与温度、频率等因素有关。气体电介质因密度很小, 极化程度很弱, 因而所有气体的 ϵ_r 应用时都可看做 1。在工频电压下、温度为 20°C 时, 常用的液体、固体电介质的 ϵ_r 大多在 2~6 之间, 如表 1-1 所示。

表 1-1 常用电介质的介电常数

材料类别		名称	相对介电常数 ϵ_r (工频, 20 °C)	电导率 (20 °C) / ($\Omega \cdot \text{cm}$) ⁻¹
气体 (标准大气条件)		空气	1.000 59	—
液体电介质	弱极性	变压器油	2.2	$10^{-12} \sim 10^{-15}$
		硅有机油	2.2 ~ 2.8	$10^{-14} \sim 10^{-15}$
	极性	蓖麻油	4.5	$10^{-10} \sim 10^{-12}$
	强极性	水	81	10^{-7}
固体电介质	中性或弱极性	石蜡	1.9 ~ 2.2	10^{-16}
		聚苯乙烯	2.4 ~ 2.6	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
		聚四氟乙烯	2	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
	极性	松香	2.5 ~ 2.6	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		沥青	2.6 ~ 2.7	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		聚氯乙烯	3.3	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		胶木	4.5	$10^{-13} \sim 10^{-14}$
		纤维素	6.5	10^{-14}
	离子性	云母	5 ~ 7	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		陶瓷	5.5 ~ 6.5	$10^{-15} \sim 10^{-16}$

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(一般用电介质所能耐受的电压来衡量)等要求外,还应注意 ϵ_r 的大小。如用做电容器的绝缘介质时,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;用做电缆的绝缘介质时,则希望 ϵ_r 小些,因为电缆绝缘介质的 ϵ_r 越小,则工作时的充电电流和极化损耗就越小。

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,应注意各种材料的 ϵ_r 的配合。因为在串联电介质中,电场强度与电介质的 ϵ_r 成反比,即在 ϵ_r 小的电介质中电场强度高,其电气强度也应高些,否则会降低整体材料的绝缘能力。如果绝缘材料中存在气泡,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。气泡处最容易发生局部放电,使整体材料的绝缘能力降低。

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

④ 在绝缘预防性试验中,夹层式极化现象可用来判断绝缘介质的受潮情况。在使用电容器等大容量设备时,需特别注意吸收电荷对人身安全的威胁。

第二节 电介质的电导

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,这些带电质点做定向运动,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。电介质电导与温度有密切的关系,温度越高,电导越大,这一特性恰与金属电导相反。

二、电介质的等值电路和绝缘电阻

在图 1-7(a) 所示电路中加入直流电压,流过电介质的电流 i 如图 1-7(b) 所示,电流 i 由三部分组成,即 $i = i_c + i_a + i_\infty$ 。根据电流 i 各分量的特点,可得电介质等值电路如图 1-7(c) 所示,图中 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 ,该支路电流存在的时间很短,很快衰减到 0; 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 ,该支路电流存在的时间较长; R_∞ 为电介质的绝缘电阻,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。因此,绝缘电阻 R_∞ 可表示为:

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

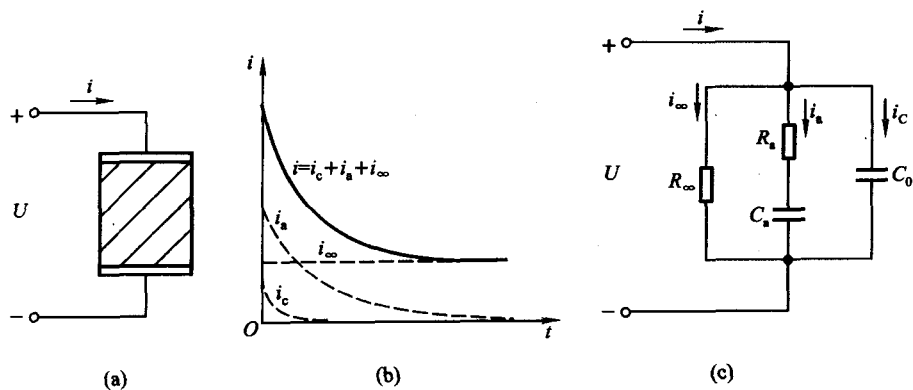


图 1-7 电介质中的电流及其等值电路

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

电介质绝缘电阻的大小决定了电介质中泄漏电流的大小。泄漏电流大,将引起电介质发热,加快电介质的老化。固体电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。

【课堂讨论】测量高压电气设备的绝缘电阻时,为什么加直流电压而不加交流电压?为什么还需同时记录温度?

三、各类电介质电导的特点

1. 气体电介质的电导

气体电介质只要工作在场强低于其击穿场强时,其电导率是很微小的,为 $10^{-15} \sim 10^{-16} (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$, 故是良好的绝缘体,气体的电导主要是电子电导。

2. 液体电介质的电导

液体电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的分子游离形成带电质点,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,其电导主要由杂质离子构成。极性和强极性液体电介质,其分解作用很强,离子数多,电导很大,一般情况下,不能用做绝缘材料。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电介质。表1-1中列出了几种常用电介质的电导率。

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。离子电导很大程度上取决于电介质中含有的杂质,特别是在中性及弱极性电介质中,杂质离子起主要作用。

固体电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电介质表面的水分和其他污物引起的。电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,则因污秽物质中所含的盐类电介质溶于水后形成大量的自由离子,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电介质,水分可以在其表面形成连续水膜,如玻璃、陶瓷就属此类。不易吸收水分的电介质称为憎水性电介质,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。显然憎水性电介质的表面电导通常要比亲水性电介质的小。

采取使电介质表面洁净、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表面电导。