

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



GAODIANYA JISHU

高电压技术

(第二版)

常美生 主 编



中国电力出版社

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

单片机原理与应用
可编程控制器的原理与应用
微机原理与接口技术
微机原理与接口技术
自动控制原理
自动控制原理
计算机控制技术
电工测量技术
电子技术
电力电子技术(第二版)
电机运行技术
电力系统分析
供用电网络及设备
发电厂电气设备及运行
发电厂电气主系统及运行
发电厂及变电所二次回路
变配电所二次系统(第二版)
电力系统自动装置原理
电力系统继电保护与自动化
电力系统继电保护及二次回路
电气运行
变电站综合自动化技术(第二版)
变电站综合自动化现场技术
供配电技术(第二版)
电气照明技术(第二版)
高电压技术
高电压技术(第二版)
安全用电
用电管理
电能计量(第二版)
电能计量
机电控制技术

任万强
屈虹
赵又新
马宏锋
刘保录
王艳华
杜卫华
张若愚
张杰
李雅轩
魏涤非
杜文学
羊本勇
王朗珠
郑国山
陈利
阎晓霞
丁书文
李彦梅
沈诗佳
胡永红
路文梅
丁书文
夏国明
夏国明
刘吉来
常美生
吴新辉
李珞新
王月志
祝小红
李成良

ISBN 978-7-5083-5219-0



9 787508 352190 >

定价: 23.00元

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



TM8/21

2007

GAODIANYA JISHU

高电压技术

(第二版)

主 编 常美生
编 写 张 玲
主 审 秦振纪



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（高职高专教育）。

全书分为10章，其主要内容包括：电介质的极化、电导和损耗，气体电介质的击穿特性，液体和固体电介质的击穿特性，电气设备的绝缘试验，线路和绕组的波过程，雷电和防雷设备，输电线路的防雷保护，发电厂和变电站的防雷保护，内部过电压，电力系统的绝缘配合。每章后附有习题，便于自学。

本书主要作为高职高专院校电力技术类专业的教材，也可作为函授和自考辅导教材及电力行业工程技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

高电压技术/常美生主编. —2版. —北京：中国电力出版社，2007

普通高等教育“十一五”规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5083-5219-0

I. 高... II. 常... 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（2007）第 021343 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>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004年8月第一版

2007年3月第二版 2007年3月北京第六次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14.75印张 359千字

印数 15001—18000册 定价 23.00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。

本书是从物理概念方面介绍电力系统中实用的高电压技术内容，注意吸收应用于现场的有关新技术和新方法，注重培养读者分析和解决实际问题的能力，以使读者掌握从事电力系统运行、检修和试验等工作所必备的高电压技术知识。本次修订对书中错误和不足进行了更正，并补充了部分内容。

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、三章阐述电介质在电压较高时的击穿特性；第四章介绍电气设备绝缘试验；第五章阐述波过程；第六、七、八章介绍雷电过电压；第九章介绍内部过电压；第十章叙述绝缘配合。每章附有适量的习题，供学习时参考。

本书绪论、第一～五章和第九章第六节由常美生编写，其余章节由张玲编写，全书由常美生统稿并担任主编。书稿完成后经太原理工大学秦振纪教授进行了仔细的审阅，并提出了许多宝贵意见，太原供电分公司王敬佩高工（教授级）、佛山供电分公司钟连宏博士在本书编写中也给予了大力的帮助，作者这里一并向他们致以深切的感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处一定不少，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
第一章 电介质的极化、电导和损耗	3
第一节 电介质的极化	3
第二节 电介质的电导	7
第三节 电介质的损耗	10
习 题	13
第二章 气体电介质的击穿特性	14
第一节 气隙中带电质点的产生和消失	14
第二节 均匀电场中气体的击穿过程	17
第三节 不均匀电场中气体的击穿过程	22
第四节 持续电压作用下空气的击穿电压	28
第五节 雷电冲击电压下空气的击穿电压	30
第六节 操作冲击电压下空气的击穿电压	33
第七节 提高气体间隙击穿场强的方法	35
第八节 沿面放电	38
第九节 大气条件对外绝缘放电电压的影响	44
习 题	46
第三章 液体和固体电介质的击穿特性	48
第一节 液体电介质的击穿特性	48
第二节 固体电介质的击穿特性	52
第三节 组合绝缘的击穿特性	54
第四节 电介质的老化	56
习 题	60
第四章 电气设备的绝缘试验	61
第一节 绝缘电阻和吸收比的测量	61
第二节 泄漏电流的测量	64
第三节 介质损失角正切的测量	65
第四节 局部放电的测量	70
第五节 工频耐压试验	73
第六节 感应耐压试验	79
第七节 直流耐压试验	80
第八节 冲击耐压试验	83
第九节 绝缘在线监测	89

第十节 绝缘状态的综合分析和判断	94
习 题	96
第五章 线路和绕组中的波过程	98
第一节 无损单导线线路中的波过程	98
第二节 行波的折射和反射	102
第三节 行波通过串联电感和并联电容	108
第四节 行波的多次折、反射	111
第五节 无损平行多导线系统中的波过程	115
第六节 冲击电晕对线路波过程的影响	119
第七节 单相变压器绕组中的波过程	121
第八节 三相变压器绕组中的波过程	128
第九节 冲击电压在绕组间的传递	129
第十节 旋转电机绕组中的波过程	131
习 题	132
第六章 雷电及防雷设备	134
第一节 雷电的放电过程	134
第二节 雷电放电的计算模型和雷电参数	135
第三节 避雷针和避雷线的保护范围	138
第四节 避雷器	142
第五节 接地装置	149
习 题	153
第七章 输电线路的防雷保护	154
第一节 输电线路的感应雷过电压	154
第二节 输电线路的直击雷过电压和耐雷水平	156
第三节 输电线路的雷击跳闸率	162
第四节 输电线路的防雷措施	164
习 题	166
第八章 发电厂和变电站的防雷保护	167
第一节 发电厂、变电站的直击雷保护	167
第二节 变电站的入侵波保护	169
第三节 变电站的进线段保护	173
第四节 变压器防雷保护的几个具体问题	176
第五节 旋转电动机的防雷保护	178
第六节 气体绝缘变电站的防雷保护	181
习 题	184
第九章 内部过电压	186
第一节 空载线路的分闸过电压	186
第二节 空载线路的合闸过电压	190
第三节 切除空载变压器过电压	193

第四节	电弧接地过电压	195
第五节	工频电压升高	200
第六节	谐振过电压	203
习 题		207
第十章	电力系统的绝缘配合	208
第一节	中性点接地方式对绝缘水平的影响	208
第二节	绝缘配合的原则	209
第三节	绝缘配合的惯用法	210
第四节	绝缘配合的统计法	213
第五节	架空输电线路的绝缘配合	215
习 题		219
附录		220
附录 1	球隙放电电压表	220
附录 2	高压输变电设备的绝缘水平及耐受电压	223
附录 3	避雷器电气特性	225
参考文献		228

绪 论

一、高电压技术的研究对象

高电压技术研究的主要对象是电气装置的绝缘、绝缘的测试和电力系统的过电压等。

任何电气设备都会遇到绝缘问题,绝缘的作用就是将不同电位的导体分隔开。具有绝缘作用的材料称为电介质或绝缘材料,其主要特征是电阻率很大。电介质按状态可分为气体、液体和固体三类。空气是电气设备外绝缘的主要绝缘材料,固体和液体介质的组合或固体和气体介质的组合常用作电气设备的内绝缘。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,绝缘中会发生极化、电导和损耗现象,它们对绝缘的运行会产生重要的影响。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并设计合理的绝缘结构,这样才能保证电气装置的绝缘在一定的电压下安全可靠地运行。

研究电气装置绝缘的击穿特性需要进行各种电压的高压试验,电气设备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,因此高电压的产生及测量技术、绝缘测试技术也是高电压技术所研究的基本内容之一。

电气装置的绝缘在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电压。电力系统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。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。入侵波会对变电站设备的绝缘构成威胁。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,后者则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和防护措施是高电压技术的另一基本内容。

过电压和绝缘是矛盾的两个方面,也是高电压技术研究的核心内容。只有通过技术经济比较,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,才能保证电气设备的经济性和运行的可靠性。

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发展的一门新学科,输电电压等级不断提高的动力则来源于远距离、大容量输电。目前世界上交流输电的最高电压等级已达 1150kV,直流输电的最高电压等级达 $\pm 500\text{kV}$ 。我国在 20 世纪 80 年代初建成第一条 500kV 超高压输电线

路,现除西北电网外,各大电网都已形成以 500kV 输电线路为主干线的网架结构,国内目前正在积极研究 1000kV 级特高压输电技术。直流输电方面,我国也已在 20 世纪 80 年代末建成了 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路,下一步将建设 $\pm 800\text{kV}$ 的直流输电线路。

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以及新的绝缘检测方法的出现都赋予了高电压技术新的内容。

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,应掌握电介质在电场作用下的击穿特性、提高击穿电压的方法;掌握电气设备绝缘的测试原理和分析判断方法,并获得初步的试验技能;掌握电力系统过电压的产生机理和发展过程以及对过电压的防护措施。

第一章 电介质的极化、电导和损耗

电介质是指那些具有很高电阻率(通常为 $10^6 \sim 10^{19} \Omega \cdot \text{m}$)的材料。在电气设备中,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,其中气体电介质是电气设备外绝缘(即电气设备壳体外的绝缘)的主要绝缘材料;液体、固体电介质则主要用于电气设备的内绝缘(即封装在电气设备外壳内的绝缘)。在外加电压相对较低时,电介质内部要发生极化、电导和损耗过程,这些过程发展比较缓慢、稳定,所以一直被用来检测绝缘的状态。此外,这些过程对电介质的绝缘性能也会产生重要的影响;在外加电压相对较高时,电介质可能会丧失其绝缘性能转变为导体,即发生击穿现象。因此,讨论电介质在电场作用下的电气性能,对工程实际有重要意义。

本章首先讨论电介质的极化、电导和损耗过程。

第一节 电介质的极化

一、电介质的极性分类

从《物理学》中已知,由大小相等、符号相反、彼此相距为 d 的两电荷($+q$ 、 $-q$)所组成的系统称为偶极子。偶极子极性的方向和大小用偶极矩来表示。偶极矩的大小为正电荷(或负电荷)的电量 q 与正、负电荷间距离 d 的乘积,方向由负电荷指向正电荷。

电介质内分子间的结合力称为分子键,分子内相邻原子间的结合力称为化学键。根据原子结合成分子的方式的不同,电介质分子的化学键分为离子键和共价键两类。

分子的化学键类型,取决于构成分子的原子间电负性差异的大小。原子的电负性是指原子获得电子的能力。当电负性相差很大的原子相遇时,电负性小的原子(金属元素)的价电子将被电负性大的原子(非金属元素)所夺去,得到电子的原子形成负离子,失去电子的原子形成正离子,正、负离子通过静电引力结合成分子,这种化学键就称为离子键。当电负性相等或相差不大的两个或多个原子相互作用时,原子间则通过共用电子对结合成分子,这种化学键就称为共价键。

化学键的极性可用键矩(即化学键的偶极矩)来表示。离子键中,正、负离子形成一个很大的键矩,因此它是一种强极性键。共价键中,电负性相同的原子组成的共价键为非极性共价键,电负性不同的原子组成的共价键为极性共价键。由非极性共价键构成的分子是非极性分子。由极性共价键构成的分子,如果分子由一个极性共价键组成,则为极性分子;如果分子由两个或多个极性共价键组成,结构对称者为非极性分子,结构不对称者为极性分子。

分子由离子键构成的电介质称为离子结构的电介质。分子由共价键构成,且分子为非极性分子的电介质称为非极性电介质,分子为极性分子的电介质称为极性电介质。

二、电介质极化的概念和极化的种类

无论何种结构的电介质,在没有外电场作用时,其内部各个分子偶极矩的矢量和平均来说为零,电介质整体上对外没有极性。当外电场作用于电介质时,会在电介质沿电场方向的两端形成等量异号电荷,就像偶极子一样,对外呈现极性,这种现象称为电介质的极化。

电介质的分子结构不同,极化的形式也不同。极化的基本形式有以下四种。

1. 电子式极化

图 1-1 所示为电子式极化的示意图。将原子中的电子用一个静止的负电荷替代,使其在远处所产生的电场保持不变,则该等效负电荷所处的位置即为电子的作用中心。无外电场时,正电荷的作用中心与负电荷的作用中心(即电子运动轨道中心)重合,原子对外不显极性,如图 1-1 (a) 所示。有外电场作用时,电子运动轨道发生了变形,并且与原子核间发生了相对位移,正电荷作用中心与负电荷作用中心不再重合,如图 1-1 (b) 所示。这种由电子发生相对位移形成的极化称为电子式极化。

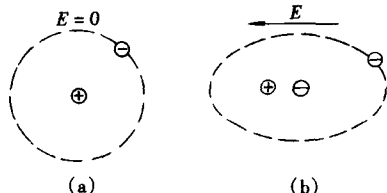


图 1-1 电子式极化示意图
(a) 极化前; (b) 极化后

电子式极化存在于一切电介质中。它的特点为:

- (1) 极化过程所需的时间极短,约 10^{-15} s。这就意味着,即使外加电场的交变频率很高,电子式极化也来得及完成。因而这种极化与频率无关。
- (2) 极化过程中没有能量损耗。这种极化在去掉外电场后,由于正、负电荷的相互吸引将自动回到原来的非极性状态,故没有能量损耗。
- (3) 温度对极化过程的影响很小。

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)的分子多属于离子结构。在无外电场作用时,介质内大量离子对的偶极矩互相抵消,故平均偶极矩为零,介质对外没有极性,如图 1-2 (a) 所示。在有外电场作用时,正、负离子沿电力线向相反方向发生偏移,使平均偶极矩不再为零,介质对外呈现出极性,如图 1-2 (b) 所示。这种由离子的位移造成的极化称为离子式极化。

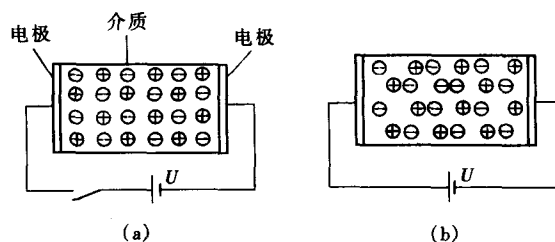


图 1-2 离子式极化示意图
(a) 极化前; (b) 极化后

离子式极化的特点为:

- (1) 极化过程所需的时间很短,约为 10^{-13} s,在一般使用的频率范围内,可以认为极化过程与频率无关。
- (2) 极化过程中没有能量损耗。
- (3) 温度对极化过程有影响。温度升高时,一方面离子间的结合力降低,使极化程度增大;另一方面离子的密度降低,又使极化程度降低。一般前者的影响大于后者,所以这种极化的极化程度随温度的升高而增大。

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, 整个介质对外不呈现极性, 如图 1-3 (a) 所示。在有电场作用时, 偶极子受电场力的作用发生转向, 并沿电场方向定向排列, 整个介质的偶极矩不再为零, 对外呈现出极性, 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。

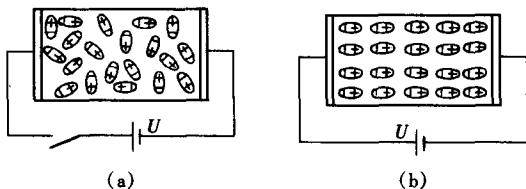


图 1-3 偶极子式极化示意图

(a) 无外电场时; (b) 有外电场时

偶极子式极化的特点为:

(1) 极化过程所需的时间较长, 约为 $10^{-10} \sim 10^{-2} \text{s}$, 故极化程度与外加电压的频率有较大关系。频率很高时, 由于偶极子的转向跟不上电场方向的变化, 因而极化减弱。

(2) 极化过程中有能量损耗。因偶极子在转向时要克服分子间的吸引力而消耗能量, 消耗掉的能量在偶极子复原时不可能收回, 故这种极化存在能量损耗。

(3) 温度对极化过程影响很大。温度升高时, 一方面电介质分子间的结合力减弱, 使极化程度增大; 另一方面分子热运动加剧, 妨碍偶极子沿电场方向转向, 使极化程度减小。电介质总体上的极化程度随温度的变化取决于这两个相反过程的相对强弱。

4. 空间电荷极化

上述的三种极化都是由电介质中束缚电荷的位移或转向形成的, 而空间电荷极化则是由电介质中自由离子的移动形成的。

夹层极化是最常见的一种空间电荷极化形式, 下面以平行板电极间的双层电介质为例来说明夹层极化过程。

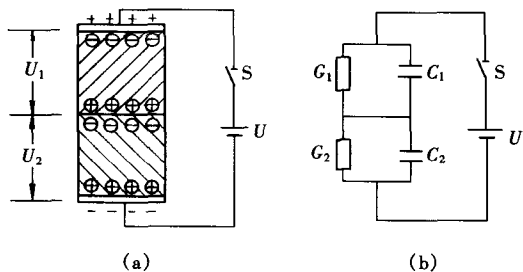


图 1-4 夹层极化物理过程示意图

(a) 示意图; (b) 电路分析图

如图 1-4 (a) 所示, 将直流电压 U 突然加在两平板电极上, 由图 1-4 (b) 的等值电路, 在开关 S 刚合闸瞬间 (相当于加很高频率的电压), 两层介质上的电压分配与各层电容成反比, 即

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow 0} = \frac{C_2}{C_1}$$

到达稳态时, 各层上分到的电压与各层的电导成反比, 即

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow \infty} = \frac{G_2}{G_1}$$

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

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow 0} \neq \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow \infty}$$

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, $U_1 < U_2$; 而在 $t \rightarrow \infty$ 时, $U_1 > U_2$ 。这样, 在 $t > 0$ 后, 随着时间的增大, U_2 逐渐下降, 因为 $U_1 + U_2 = U$ 为定值, 故 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 (比 C_1 和 C_2 的串联值大)。

由以上分析可知, 夹层电介质分界面上电荷的积聚是通过电介质的电导进行的, 因电介质的电导一般很小, 对应的时间常数很大, 故夹层极化过程非常缓慢, 夹层极化只在低频时才来得及完成。显然, 夹层极化过程中有能量损耗。

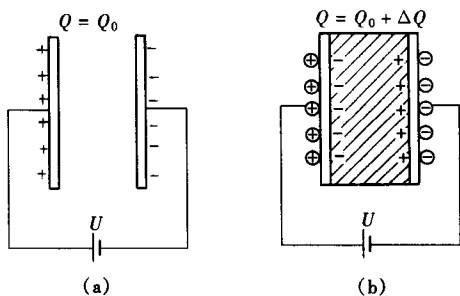


图 1-5 极化现象

(a) 电极间为真空; (b) 电极间充满介质

三、电介质的相对介电常数

如图 1-5 所示, 在两平板电极间施加直流电压 U , 当极间为真空时, 极板上的电荷量为 Q_0 , 当极间充满一块固体介质后, 极板上的电荷则增加为 $Q_0 + \Delta Q$ 。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极化电荷, 靠近正极板的表面上产生的是负电荷, 而靠近负极板的表面上产生的是正电荷。极化电荷产生的场强与外施电压产生的场强方向相反, 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, 在其他条件不变的情况下, 固体介质插入前后电场空间中的场强应保持不变。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。

两平板电极在真空中的电容量为

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

式中 S ——极板面积, 单位为 cm^2 ;

d ——极间距离, 单位为 cm ;

ϵ_0 ——真空的介电常数, $1/36\pi \times 10^{-11} \text{ F/cm}$ 。

极间插入固体电介质后, 电容量增为

$$C = \frac{Q_0 + \Delta Q}{U} = \frac{\epsilon S}{d}$$

式中 ϵ ——固体介质的介电常数。

定义

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_0}$$

ϵ_r 称为电介质的相对介电常数。它是表征电介质在电场作用下极化程度的物理量。

ϵ_r 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, 因而一切气体的 ϵ_r 应用时都可看作 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℃)
液体介质	弱极性	变压器油	2.2~2.5
		硅有机油	2.2~2.8
	极 性	蓖麻油	4.5
	强极性	丙酮	22
		酒精	33
		纯水 (20℃)	81
固体介质	中性或弱极性	石蜡	2.0~2.5
		聚乙烯	2.25~2.35
		聚苯乙烯	2.45~3.1
		聚四氟乙烯	2.0~2.2
		松香	2.5~2.6
		沥青	2.6~2.7
	极 性	油浸纸	3.3
		酚醛树脂塑料	4~4.5
		聚氯乙烯	3.2~4.0
		聚甲基丙烯酸甲酯 (有机玻璃)	3.3~4.5
	离子性	云母	5~7
		电瓷	5.5~6.5
		钛酸钡	几千
		金红石	100

四、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之外, 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 ϵ_r 的配合。因为在交流和冲击电压下, 串联电介质中场强的分布与 ϵ_r 成反比, ϵ_r 小的介质中场强高, 其耐电强度也应高些。

(3) 应注意介质的极化损耗, 它是介质损耗的重要组成部分, 介质损耗对绝缘劣化和热击穿有较大的影响。

第二节 电 介 质 的 电 导

一、电介质电导的基本概念

从电介质的微观结构来看, 其内部虽存在大量的带电质点, 但这些带电质点往往是束缚电荷 (如电子被原子核紧密束缚, 正、负离子也紧密结合在一起), 它们不能在电介质内自由移动, 因而不能形成电导电流。电介质一般为什么具有一定的电导呢? 这是因为由于某种

原因,介质内常含有部分自由带电质点,正是它们在电场作用下的定向运动,才使电介质具有一定的导电性。电介质的电导与金属的电导不同,电介质导电靠的是介质内部少量的自由离子,而金属导电靠的是金属内部大量的自由电子。故电介质的电导是离子性电导,金属的电导是电子性电导。

表征电导强弱程度的物理量为电导率 γ ,其倒数为电阻率 ρ 。

二、气体电介质的电导

给某气体间隙上施加直流电压,回路电流与电压的关系如图1-6所示。在 $U < U_A$ 时,电流与电压基本符合欧姆定律,即电流基本上随电压的增大而线性增大。在 $U_A \leq U < U_B$ 时,电流呈饱和趋势,即电压升高,电流基本保持不变。在 $U_B \leq U < U_0$ 时,电流随电压的升高而迅速增大。当电压达到气隙的临界击穿电压 U_0 后,气体就转变为良导体状态。

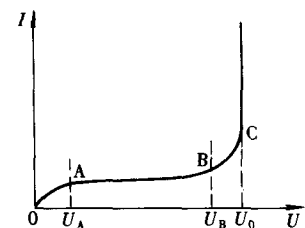


图 1-6 气体电介质中的电流和外施电压的关系

上述过程可解释为:气隙在无电压作用时,由于宇宙射线、地层射线等外界游离因素的作用,气隙中就含有一定数量的自由带电质点。在气隙上的电压从零开始增大时,带电质点运动的速度加快,单位时间内进入到电极的带电质点的数量增大,故电流也随之增大。在电压增大到 U_A 后,因单位时间内气隙中产生的带电质点在相同的时间内已全部落入电极,所以电压升高,电流基本不变。在电压超过 U_B 后,气隙中出现了新的游离过程,产生了更多的带电质点,故电流随电压的升高而迅速增大。当电压达到 U_0 时,气隙中出现了大量的带电质点,因而气体就转变成了良导体。

在电压 U 小于 U_B 时气隙中的场强较弱,称为低电场区。此时气体的电导实际上很小,在大多数情况下没有什么意义。只有在强电场中,具备了放电过程发展的条件时,气体才有显著的电导。

三、液体电介质的电导

在纯净液体介质中放入平行板电极,回路电流与外施电压 U 的关系如图1-7所示。与气体类似,该关系曲线也可分为a、b、c三个区域。其中a、b为低电场区,c为高电场区。区域a中,电压和电流基本服从欧姆定律,液体介质的电导率就是在此范围内定义的。区域b中,电流有饱和趋势但不太明显。这是因为液体的密度远大于气体,正、负离子相遇的机会多,复合的概率大,不可能所有的离子都运动到电极,而电压增高时复合的概率减少,因而电流有所增大。区域c中,液体分子发生了游离,电导迅速增大。

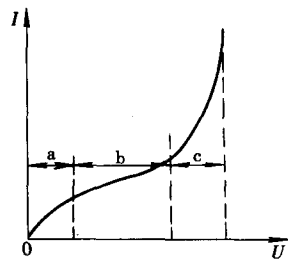


图 1-7 液体电介质中的电流和外施电压的关系

低电场下液体电介质具有一定的电导的原因有两个:一是液体本身的分子和所含的杂质的分子(杂质是不可能完全除去的)离解为离子,形成离子电导;二是液体中的胶体质点(如变压器油中悬浮的小水滴)吸附电荷后变为带电质点,形成电泳电导。

中性液体介质本身的分子不易发生离解,其离子主要来源于杂质分子的离解。极性液体介质除杂质外本身的分子也易离解,所以在其他条件相同的情况下,极性液体的电导率比中性液体的要大。某些强极性液体(如水、乙醇),即使经过高度净化,其电导率仍然很大,

故不能作为电气设备的绝缘材料。

影响液体介质电导的主要因素除前述的电场强度外还有温度和杂质。温度对液体介质电导的影响表现在两方面：一是温度升高时液体介质本身的分子和所含的杂质的分子的离解度增大，从而使液体中自由离子的数量增加；二是温度升高时液体的粘度（即分子间的结合力）减小，离子在电场作用下移动时的阻力减小，从而使离子运动的速度加快。由此可见，这两方面的影响都使液体介质的电导随温度的升高而增大。杂质是液体电介质中带电质点的重要来源，液体中的杂质含量增大时，将使液体介质的电导明显增大。

四、固体电介质的电导

固体电介质的电导分为体积电导和表面电导两种，它们分别表示固体电介质的内部和表面在电场中传导电流的能力。

中性或弱极性固体电介质的体积电导主要由杂质离解所引起。只有在温度较高或有外界因素（如高能射线）作用时，其本身的分子才可能发生离解。极性固体电介质的体积电导除由杂质分子离解引起外，本身的分子离解为自由离子也是形成电导的主要因素。离子式结构的固体电介质的体积电导则主要由离子在热运动影响下脱离晶格移动所形成。

影响固体电介质体积电导的因素主要有电场强度、温度和杂质。与液体介质类似，场强较低时，加在固体介质上的电压与流过的电流服从欧姆定律；场强较高时，电流将随电压的升高而迅速增大。与气体、液体介质相比，流过固体介质的电流不存在饱和区，这主要是因为固体介质发生碰撞游离的场强高，在发生游离前阴极就能发射电子，形成电子电导。温度和杂质对固体介质体积电导的影响与液体类似，温度升高时，体积电导按指数规律增大。杂质含量增大时，体积电导也会明显增大，如纸板的含水量增为百分之几时，固体介质的体积电导将增大 3~4 个数量级。

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。如果除水分外表面还有尘埃等污秽物质，则因污秽物中所含的盐类电解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小。

五、电介质电导在工程上的意义

(1) 电介质电导的倒数即为介质的绝缘电阻。电气设备的绝缘电阻包括体绝缘电阻和表面绝缘电阻两部分，通常所说的绝缘电阻一般指体绝缘电阻。通过测量绝缘电阻，可判断绝缘是否受潮或有其他劣化现象。

(2) 多层介质串联时在直流电压下各层的稳态电压分布与各层介质的电导成反比，故对直流设备应注意电导率的合理配合。

(3) 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。