



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

沈诗佳 程 航 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 沈诗佳 程 航

编写 冯春祥 程 琳 边玉国 吴 宁

主审 常美生



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）。

本书主要内容包括电介质的电气性能、电气设备绝缘试验、高压电气设备绝缘结构及其绝缘试验、过电压及其防护、特高压输电系统的高电压技术等，重点介绍高电压技术中最基本的理论概念和工程应用中的关键问题，力求内容精简、加强基础、突出适用性，并适度反映现代高电压技术领域的新进展。

本书主要作为高职高专院校电力技术类相关专业的教材，也可作为成人函授和自考辅导教材，同时还可作为电力行业工程技术人员的培训教材和参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

高电压技术/沈诗佳，程航主编. —北京：中国电力出版社，
2011. 12

普通高等教育“十二五”规划教材·高职高专教育

ISBN 978-7-5123-2562-3

I. ①高… II. ①沈…②程… 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（2011）第 281742 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 2 月第一版 2012 年 2 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 25.5 印张 625 千字
定价 45.00 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

高电压技术是电工学科的一个重要分支，涉及数学、物理、化学、材料等基础学科，主要研究高电压（强电场）下的各种电气物理问题。本书是根据全国电力高等职业教育教材建设指导委员会审定的教材编写大纲编写。

编者根据高职高专教育培养目标的要求，在总结长期教学经验的基础上，参考了国内外大量教材和资料，力求做到深入浅出、通俗易懂，便于学生阅读和自学。在精选内容方面，充分吸收同类教材的经验并充分考虑高职高专教学的特点，力求适合高电压技术课程的需要，着重介绍本领域基础理论，简化数学分析，对电介质的电气性能、电气设备绝缘试验、高压电气设备绝缘结构及其绝缘试验、过电压及其防护等内容做了较为完整的阐述，并对近年来高电压领域的新发展——特高压输电系统的高电压技术做了一定的介绍。本书每章都配有教学要求、学习指导、思考题与习题，启发读者思考和帮助读者总结。限于篇幅，本书对电介质击穿的详细过程、电气设备的具体绝缘结构、高电压试验的实际操作等方面内容作了一定压缩，主要是为了腾出篇幅着重介绍有关的基础理论和基本物理概念，并适当兼顾工程应用中的关键问题。

本书共分为五篇二十章，其中第一至三、八章由兰州工业高等专科学校程航编写，第四至七章由兰州工业高等专科学校吴宁编写，第九至十二章由兰州工业高等专科学校边玉国编写，第十三、十四章由安徽电气工程职业技术学院冯春祥编写，第十五至十八章由安徽电气工程职业技术学院沈诗佳编写，第十九、二十章和附录由安徽电气工程职业技术学院程琳编写，全书由安徽电气工程职业技术学院沈诗佳统稿。

山西大学工程学院常美生教授担任本书主审，为提高书稿质量付出了大量精力，提出了很多宝贵意见和建议，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥和疏漏之处，恳请读者给予批评指正。

编 者

2011年10月于合肥

目 录

前言

第一篇 电介质的电气性能

第一章 电介质的极化、电导和损耗	1
第一节 电介质极化	1
第二节 电介质电导	5
第三节 电介质损耗	8
思考题与习题	9
第二章 气体电介质的放电	11
第一节 气体中带电质点的产生与消失	11
第二节 均匀电场和不均匀电场中气体的击穿	13
第三节 空气的击穿电压	18
第四节 提高气体间隙击穿电压的措施	26
第五节 气体中沿固体介质表面的放电	27
第六节 SF_6 气体特性	33
第七节 均匀及稍不均匀和极不均匀电场中 SF_6 气体的击穿	40
第八节 SF_6 气体的冲击击穿特性	42
第九节 SF_6 气体中沿固体介质表面的放电	44
思考题与习题	47
第三章 液体和固体电介质的绝缘性能	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	53
第三节 电介质的老化	56
第四节 组合绝缘	57
第五节 对电介质性能的全面要求	60
思考题与习题	63

第二篇 电气设备绝缘试验

第四章 电气设备非破坏性试验	64
第一节 绝缘电阻和吸收比测量	64
第二节 泄漏电流的测量	68
第三节 介质损失角正切的测量	69

第四节 局部放电的测量	72
思考题与习题	74
第五章 电气设备绝缘耐压试验	75
第一节 工频耐压试验	75
第二节 直流耐压试验	80
第三节 感应耐压试验	84
思考题与习题	85
第六章 绝缘油的电气试验和气相色谱分析	86
第一节 绝缘油的电气试验	86
第二节 绝缘油的气相色谱分析	89
思考题与习题	93
第七章 绝缘在线监测	94
第一节 电流的在线监测	94
第二节 $\tan\delta$ 的在线监测	95
第三节 局部放电的在线监测	96
第四节 油中气体含量的在线监测	97
第五节 红外技术用于在线监测	98
第六节 绝缘状态的综合分析和判断	99
思考题与习题	99

第三篇 高压电气设备绝缘结构及其绝缘试验

第八章 高压绝缘子	100
第一节 绝缘子的性能要求和材料	100
第二节 各种绝缘子及其绝缘试验	102
第三节 大气条件和海拔高度对外绝缘放电电压的影响	113
思考题与习题	117
第九章 电力电容器和电力电缆绝缘	118
第一节 电力电容器绝缘及其试验	118
第二节 电力电缆绝缘及其试验	122
思考题与习题	127
第十章 高压套管和高压互感器绝缘	128
第一节 高压套管及其绝缘试验	128
第二节 高压互感器绝缘及其试验	132
思考题与习题	145
第十一章 电力变压器和高压电机绝缘	146
第一节 电力变压器绝缘及其试验	146
第二节 高压电机绝缘及其试验	161
思考题与习题	169

第四篇 过电压及其防护

第十二章 线路和绕组中的波过程	170
第一节 无损耗单导线线路中的波过程	170
第二节 行波的折射与反射	174
第三节 行波通过串联电感和并联电容	178
第四节 行波的多次折、反射	181
第五节 无损耗平行多导线系统中的波过程	183
第六节 冲击电晕对线路波过程的影响	186
第七节 变压器绕组中的波过程	188
第八节 旋转电机绕组中的波过程	196
思考题与习题	198
第十三章 雷电及防雷设备	199
第一节 雷电放电和雷电过电压	199
第二节 雷电放电的计算模型和雷电参数	202
第三节 避雷针和避雷线的保护范围	205
第四节 避雷器	215
思考题与习题	228
第十四章 架空输电线路的防雷保护	229
第一节 输电线路耐雷性能的若干指标	229
第二节 输电线路耐雷性能的分析计算	231
第三节 输电线路防雷措施	238
思考题与习题	242
第十五章 发电厂和变电站的防雷保护	243
第一节 概述	243
第二节 直击雷保护	244
第三节 阀式避雷器保护作用分析	249
第四节 变电站进线段保护	255
第五节 变电站防雷的几个具体问题	260
第六节 旋转电机的防雷保护	270
思考题与习题	277
第十六章 暂时过电压	278
第一节 概述	278
第二节 空载长线路的电容效应	280
第三节 接地故障引起的工频电压升高	283
第四节 甩负荷引起的工频电压升高	285
第五节 谐振过电压	288
第六节 暂时过电压保护	295

思考题与习题·····	300
第十七章 操作过电压 ·····	301
第一节 空载线路分闸过电压·····	301
第二节 空载线路合闸过电压·····	305
第三节 空载变压器分闸过电压·····	309
第四节 间歇电弧接地过电压·····	312
第五节 解列过电压·····	317
第六节 有关操作过电压若干总的概念与结论·····	318
思考题与习题·····	320
第十八章 电力系统绝缘配合 ·····	321
第一节 概述·····	321
第二节 绝缘配合的方法·····	327
第三节 电气设备绝缘水平的确定·····	329
第四节 架空输电线路绝缘水平的确定·····	331
思考题与习题·····	337

第五篇 特高压输电系统的高电压技术

第十九章 特高压交流输电中的高电压技术 ·····	338
第一节 超高压和特高压的特征·····	338
第二节 国内外特高压交流输电的发展·····	340
第三节 特高压交流输电的功能、特点与优点·····	342
第四节 特高压交流输电中的若干高电压技术问题·····	348
思考题与习题·····	359
第二十章 直流输电中的高电压技术 ·····	360
第一节 直流输电系统概述·····	360
第二节 直流输电工程的电磁环境影响·····	372
第三节 高压直流架空线路与电缆线路的绝缘·····	375
第四节 直流输电系统中的过电压及其保护·····	379
第五节 直流输电线路、换流站的绝缘配合·····	382
思考题与习题·····	388
 附录一 标准球隙放电电压表·····	 389
附录二 高压输变电设备的绝缘水平及耐受电压·····	393
附录三 阀式避雷器电气特性·····	396
附录四 DL/T 620—1997 规定的架空输电线路典型杆塔的耐雷水平和 雷击跳闸率数值·····	399
 参考文献·····	 400

第一篇 电介质的电气性能

第一章 电介质的极化、电导和损耗

教学要求

了解绝缘材料的种类，掌握电介质极化及其分类，掌握电导、击穿、损耗的概念。



一、电气绝缘材料的分类

绝缘材料又称“电介质”。绝缘材料和导体是电气设备中常用的两种基本材料。绝缘材料的主要作用是用来隔离不同电位的导体，使电流能按一定的方向在导体里流通。另外，在不同的电气设备中，根据产品技术要求的需要，绝缘材料还起着散热、冷却、固定支撑、储能、灭弧、防潮、防霉、改善电位梯度及保护导体等作用；在电气设备中，绝缘材料承受着电、热、各种机械应力等方面的考验。

绝缘材料的品种很多，有不同的分类：按化学性质可分为无机绝缘材料、有机绝缘材料、混合绝缘材料，按形态可分为气体绝缘材料、液体绝缘材料、固体绝缘材料，按分子结构可分为非极性电介质、弱极性电介质、极性电介质。

绝缘材料的主要性能指标有绝缘强度、抗张强度、密度和膨胀系数。

二、电介质的电气性能

电介质在外加电场的作用下将会发生极化、电导、击穿和介质损耗等现象，这被称为电介质的电气特性。一般气体电介质的极化、电导和损耗都很微弱，可忽略不计，需要注意的是液体和固体电介质的这些电气特性。

第一节 电介质极化

一、极化的定义

电介质极化是指在外电场的作用下，发生束缚电荷的弹性位移、偶极子的转向或带电质点的移动，在电介质两端出现等量异号电荷而对外呈现电性的现象。

二、极化的形式

根据电介质的物质结构，电介质极化具有以下四种基本形式，即电子位移极化、离子位移极化、转向极化、空间电荷极化。现分别加以说明。

1. 电子位移极化

如图 1-1 所示，当不存在外电场时，原子中电子云的中心与原子核重合；在外加电场的作用下，电介质中的原子、分子或离子中的电子，其作用中心脱离原子核而形成感应电距

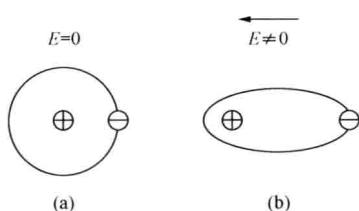


图 1-1 电子位移极化示意图
(a) 无外加电场; (b) 有外加电场

的过程, 称为电子位移极化, 简称电子式极化。

电子位移极化的特点为:

- (1) 存在于一切电介质中。
- (2) 极化过程中没有能量损失, 外电场消失, 感应电距也随之消失, 为弹性极化。
- (3) 极化过程所需的时间很短, 为 $10^{-14} \sim 10^{-11}$ s, 在各种频率的交变电场中均能发生。
- (4) 极化程度取决于电场强度, 与温度无关。

2. 离子位移极化

在由离子结合成的电介质内, 外电场的作用除促使各个离子内部产生电子位移极化外, 还产生正、负离子相对位移而形成的极化, 称为离子位移极化, 简称离子式极化, 如图 1-2 所示。固体无机化合物 (如云母、玻璃、陶瓷等) 在外加电场的作用下发生的极化为离子位移极化。

离子位移极化的特点为:

- (1) 存在于具有离子结构的电介质中。
- (2) 极化完成的时间很短, 为 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ s, 即一般情况下, 极化与频率无关。
- (3) 极化过程中没有能量损失, 外电场消失, 感应电距也随之消失, 为弹性极化。

- (4) 温度对极化有影响。

3. 转向极化

在外加电场的作用下, 由于极性电介质中偶极子的转向而形成的极化, 称为转向极化, 也叫偶极子式极化, 如图 1-3 所示。在极性电介质中, 组成电介质的分子是偶极子。就单个偶极子分子而言, 由于分子中正、负电荷的作用中心不重合, 即使没有外加电场, 就已具有偶极矩, 称为固有偶极矩。

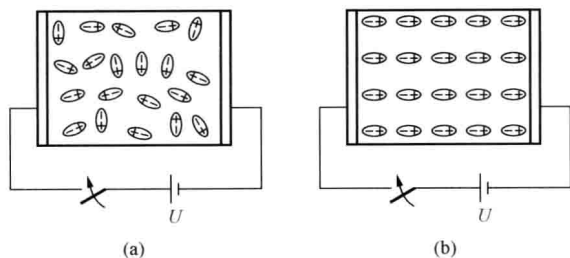


图 1-3 转向极化示意图
(a) 极化前; (b) 极化后

在没有外加电场的情况下, 由于分子不规则的热运动, 偶极子的排列无序, 因此, 宏观上对外不呈现电性。当有外电场时, 受电场力的作用, 偶极子有沿电场方向发生转向的趋势, 沿电场方向作规则排列。但是, 受分子热运动的干扰, 这种转向定向的排列, 只能达到某种程度, 而不能完全。蓖麻油、氯化联苯、松香、橡胶、胶木等极性电介质会发生转向极化。

转向极化的特点:

- (1) 存在于由偶极子组成的极性电介质中。
- (2) 极化需要的时间较长, 为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ s, 所以极化与频率有较大关系。频率很高时, 由于偶极子的转向跟不上电场方向的改变, 使极化渐弱。
- (3) 转向极化伴有能量损耗, 为非弹性极化。

(4) 温度对偶极子极化的影响很大。

4. 空间电荷极化

上述的三种极化都是带电质点的弹性位移或转向形成的，而空间电荷极化则是由带电质点（电子或正、负离子）的移动形成的。

在大多数绝缘结构中，电介质往往是层式结构（宏观或微观的），即使同一种电介质中，也可能存在某些晶格缺陷。电场的作用使带电质点在电介质中移动，可能被晶格缺陷捕获，或在两层电介质的界面上堆积，造成电荷在介质空间中新的分布，从而产生电矩。这种极化称为空间电荷极化。

夹层式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式极化过程。图 1-4 (a) 所示为双层介质示意图，图 1-4 (b) 所示为其等值电路。在开关闭合瞬间，两层介质的初始电压按电容成反比分配，即

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

到达稳态时，两层介质的电压按电导成反比分配，即

$$t \rightarrow \infty, \frac{U_1}{U_2} = \frac{G_2}{G_1} \quad (1-2)$$

一般情况下

$$\frac{C_1}{C_2} \neq \frac{G_1}{G_2} \quad (1-3)$$

所以， $t=0$ 与 $t \rightarrow \infty$ 时， $\frac{U_1}{U_2}$ 的值不相等。但 $U_1 + U_2 = U$ 是个常数，因此最后的电压分布不同于起始的电压分布，即合闸后，两层介质上的电压有一个重新分配的过程。设 $C_1 > C_2$ ， $G_1 < G_2$ ，则在 $t=0$ 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 逐渐减小， U_1 逐渐增大，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。

夹层式极化的特点：

(1) 夹层式极化存在于多层电介质中。在实际的电气设备中，电缆、电容器、旋转电机、变压器、互感器、电抗器的绕组绝缘等，都是由多层电介质组成的。

(2) 夹层式极化过程是很缓慢的。它的形成时间从几十分之一秒到几分钟，甚至有长达几小时的。因此，夹层式极化只有在低频时才有意义。

(3) 夹层式极化伴随着能量损耗。

三、电介质的相对介电系数

如图 1-5 所示为两个平行板电容器，它们的极板面积均为 A ，极板间距离都是 d 。图

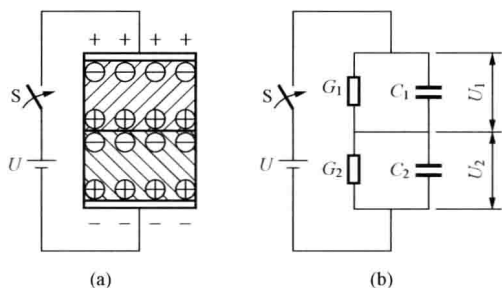


图 1-4 夹层式极化物理过程示意图

(a) 双层介质示意图；(b) 等值电路图

1-5 (a) 中的电容器极板间为真空, 而图1-5 (b) 中的电容器极板间为固体电介质。在图1-5 (a) 中的电容器极板上施加直流电压 U 以后极板上分别充有 $Q=Q_0$ 的正负电荷, 此时

$$Q_0 = C_0 U \quad (1-4)$$

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1-5)$$

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。

若此极板间放入一块厚度与极板距离

相等的固体电介质, 则成为图1-5 (b) 所示的电容器, 此时电容器的电容量 C 为

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1-6)$$

式中 ϵ ——固体电介质的介电系数。

放入固体后, 极板上的电荷量变为 Q

$$Q = CU \quad (1-7)$$

由于 $C > C_0$, 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, 即

$$Q = Q_0 + \Delta Q = CU \quad (1-8)$$

这说明介质放入, 电容由 C_0 增大至 C 。

真空的介电系数 $\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, 以 ϵ 表示介质中的介电系数, 则

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_0} = \frac{CU}{C_0 U} = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon \frac{A}{d}}{\epsilon_0 \frac{A}{d}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r > 1 \quad (1-9)$$

ϵ_r 称为介质的相对介电系数, 表征电介质在电场作用下极化现象强弱的指标。其值由电介质本身的材料决定。气体分子间的距离很大, 密度很小, 极化率很小, 因此各种气体的 ϵ_r 都接近 1。常用液体、固体电介质的 ϵ_r 一般在 2~10 之间。各种电介质的 ϵ_r 与温度、电源频率的关系也各不相同。在工频电压下 20℃ 时, 一些常用电介质的 ϵ_r 见表 1-1。

表 1-1

常用电介质的介电系数和电导率

材料种类		名称	介电系数 ϵ_r (工频, 20℃)	电导率 (20℃, S/cm)
气体介质		空气	1.000 59	
液体介质	弱极性	变压器油	2.2	$10^{-15} \sim 10^{-12}$
		油硅有机油	2.2~2.8	$10^{-15} \sim 10^{-14}$
	极性	蓖麻油	4.5	$10^{-13} \sim 10^{-12}$
		氯化联苯	4.6~5.2	$10^{-12} \sim 10^{-10}$

续表

材料种类		名称	介电系数 ϵ_r (工频, 20℃)	电导率 (20℃, S/cm)
固体介质	中性	石蜡	1.9~2.2	10^{-16}
		聚乙烯苯	2.4~2.6	$10^{-18} \sim 10^{-17}$
		聚四氟乙烯	2	$10^{-18} \sim 10^{-17}$
	极性	松香	2.5~2.6	$10^{-16} \sim 10^{-15}$
		纤维素	6.5	10^{-14}
		胶木	4.5	$10^{-14} \sim 10^{-13}$
		聚氯乙烯	3.3	$10^{-16} \sim 10^{-15}$
		沥青	2.6~2.7	$10^{-16} \sim 10^{-15}$
	离子性	云母	5~7	$10^{-16} \sim 10^{-15}$
		电瓷	6~7	$10^{-15} \sim 10^{-14}$

四、电介质极化在工程中的应用

(1) 选择绝缘材料。例如，选择电容器中的绝缘材料时，选 ϵ_r 大的材料，这样电容器单位电容量的体积和质量都可减小。而选择其他电气设备绝缘材料时，一般希望 ϵ_r 小一些。如选用 ϵ_r 小一些的材料作交流电力电缆的绝缘可减小电缆工作时的充电电流以及因极化引起的发热损耗。

(2) 多种介质的合理配合。一般电气设备的绝缘是由几种电介质组合而成的。在交流及冲击电压作用下，多种电介质串联时，各电介质的电场强度与它们的介电系数成反比，结果是外加电压的大部分被 ϵ_r 小的材料承担，从而降低了整体的绝缘强度。因此在几种绝缘材料组合使用时，要注意各绝缘电介质的合理分配，以使各绝缘介质层中的电场强度均匀分配。

(3) 在绝缘预防性试验中判断绝缘状况。电气设备进行绝缘试验时，对于不同种类的电源，电气设备的耐受电压值是不同的。这主要是因为，各种试验电源的频率是不一样的，在不同频率的电压作用下，由于极化的方式不同而造成的。

(4) 极化损耗是介质损耗的重要组成部分，而介质损耗是介质绝缘劣化和热击穿的重要因素。

第二节 电 介 质 电 导

一、电介质电导的定义

电介质的基本功能是隔离不同电位的导体，它应是不导电的，但完全不导电的电介质是不存在的。在外加电场的作用下，电介质中的带电质点沿电场方向作定向移动而形成电流的现象，称为电介质的电导。表征电导大小的物理量是电导率 γ ，其倒数是电阻率 ρ 。

二、电介质电导的特性

(1) 离子式电导。电介质的电导与金属的电导有本质上的区别。气体电介质的电导是由游离出来的自由电子、正离子和负离子在电场作用下移动而造成的。液体和固体电介质中的

电导是由于电介质的基本物质及其中所含杂质分子的化学分解或热离解形成带电质点（电子、正离子、负离子），这些带电质点沿电场方向移动而造成的。它是离子式的电导，也就是电解式的电导。而金属导体的电导为电子式电导，即形成金属电导电流的带电离子为金属中的大量自由电子。

（2）温度的影响。电介质的电导随温度的升高而增大，且电介质的电导比金属导体小得多，其电阻率一般为 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ ；而金属的电导很大，其电阻率为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

三、各类电介质的电导

1. 气体电介质的电导

气体电介质的伏安特性如图 1-6 所示。当电压很小时，外界因素（宇宙线，地面上的

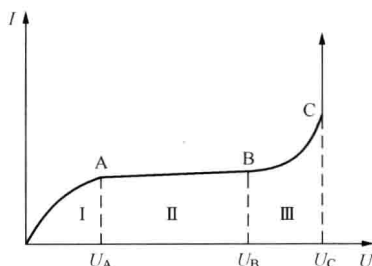


图 1-6 气体电介质的伏安特性

放射性辐射，太阳光中的紫外线等）作用下产生的离子在电场力的作用下，克服与气体介质分子碰撞的阻力而移动，电流与电压近似成正比例，如图 1-6 中 I 区所示。当电压进一步增大，外界因素所造成的离子几乎全部趋向电极时，电流趋于饱和，即电压升高，电流基本保持不变，如图 1-6 中 II 区所示。在该两区内气体的电导是极微小的。当电压超过 U_B 值时，如图 1-6 中 III 区所示，气体电介质中将发生撞击游离，从而使电流迅速增大，最后使气隙击穿，间隙内的气体变为电的良好导体。

2. 液体电介质的电导

液体电介质分中性（弱极性）液体电介质、极性液体电介质和强极性液体电介质。中性液体电介质本身分子的离解是极微弱的，其电导主要由离解性的杂质和悬浮于液体介质中的荷电粒子所引起。所以，其电导对杂质是非常敏感的。中性液体电介质处理得十分纯净后，其电导率可低至 10^{-18} S/cm 。

极性液体电介质的电导不仅由杂质所引起，而且与极性液体电介质本身的离解度有关。如其他条件相同，则极性液体介质的电导大于中性液体电介质的。极性液体电介质的介电常数愈大，则其电导也愈大。强极性液体电介质（如水、酒精），即使是高度净化的，其电导率仍很大，以致不能把它看作为电介质，而是离子式导电液。

3. 固体电介质的电导

具有中性（弱极性）分子的固体电介质的电导主要是由杂质离子引起的，只有当温度较高时，中性分子本身才可能发生分解，产生自由离子，形成电导。此外，外界因素（例如高能射线）的作用也可能使中性分子发生离解。

离子式结构的固体电介质（如 NaCl）的电导主要是由于离子在热运动影响下脱离晶格而移动的结果。

4. 固体电介质的表面电导

上面讲的是固体电介质的体积电导。固体电介质除了体积电导以外，还存在着表面电导。表面电导是由于介质表面吸附一些水分、尘埃或导电性的化学沉淀物而形成的，其中水分起着特别重要的作用。固体电介质吸附水分的能力与自身结构有关。在相同的工作条件下，亲水性介质（水分子与固体介质分子的附着力很强，如玻璃、陶瓷等）的表面电导要比

憎水性介质（水分子与固体介质分子的附着力很小，水分不易在介质表面形成薄膜，而只能凝聚成小水滴，如石蜡、聚四氟乙烯、聚苯乙烯等）的表面电导大得多。一般中性介质的表面电导最小，极性介质次之，离子性介质最大。通过采取使介质表面洗净、光洁、烘干，或表面涂以石蜡、绝缘漆、有机硅等措施，可以降低介质表面电导。

四、影响电介质电导的因素

1. 温度

温度对固体电介质电导率的影响与对液体电介质电导率的影响是相似的，液体和固体电介质的电导率与温度的关系可以近似地表示为

$$\gamma = A \exp(-B/T)$$

式中 A 、 B ——常数；

T ——绝对温度；

γ ——电导率。

当温度变化的范围不大时，固体、液体电介质的电导率与温度的关系也可以写成

$$\gamma = \gamma_0 \exp[\alpha(\theta - \theta_0)]$$

式中 α ——常数；

θ ——电介质的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

γ_0 —— $\theta = \theta_0$ 时的电导率。

2. 电场强度

电场对固体、液体电介质的影响相似。在电场强度小于某定值时，固体、液体电介质的电导率与电场强度几乎无关；当电场强度大于某定值时，固体、液体电介质的电导率与电场强度的关系可近似地表示为

$$\gamma = \gamma_0 \exp[b(E - E_0)]$$

式中 γ_0 ——电导率与电场强度尚无关范围内的电导率；

E_0 ——电导率与电场强度尚无关时的最大电场强度；

b ——常数，由材料特性所决定。

3. 杂质

杂质对电导率的影响也是很大的。由于杂质中的离子数较多，因此当介质中的杂质增多时，其电导会明显增加。各类杂质中水分的影响最大，水是强极性的电介质，本身电导较大，而且水分能使介质中的另一些杂质（如盐类、酸类等物质）发生水解，从而大大增加介质的电导。所以，电气设备在运行中一定要注意防潮。

五、电介质电导在工程实际中的应用

(1) 串联的多层电介质，在直流电压作用下，各层电压分布与电导成反比。所以设计用于直流的电气设备时，要注意不同电导率的电介质材料的合理配合。

(2) 电导的倒数即为电介质的绝缘电阻。电气设备的绝缘电阻包括体电阻和表面绝缘电阻两部分。在绝缘检查性试验中，通过测量介质的绝缘电阻和泄漏电流来判断绝缘是否存在受潮或其他劣化现象。

(3) 注意环境温度对固体电介质表面电导的影响，注意亲水性材料的表面防水处理。

第三节 电 介 质 损 耗

一、介质损耗的基本概念

1. 介质损耗的定义

电介质在电场作用下,要发生极化过程和电导过程。极化过程有能量损耗;电导过程中,泄漏电流流过绝缘电阻也有能量损耗。这种在外加电压的作用下,电介质的能量损耗称为介质损耗。介质损耗过程伴随极化过程和电导过程。介质损耗产生的能量变成了热能,使电介质温度升高。若介质损耗过大,则电介质温度升得过高,将加速电介质的热分解与老化,最终可能导致电介质绝缘性能的完全失去。

2. 介质损耗的基本形式

(1) 电导损耗。电导损耗是由电介质中的泄漏电流引起的。气体、液体电介质和固体电介质中都存在电导损耗。电介质的电导损耗很小,但当介质受潮或温度升高时,电导损耗会急剧增大。

由于电介质中的泄漏电流与电源频率无关,所以电导损耗在交流、直流电压下都存在。

(2) 极化损耗。极化损耗为偶极子与空间电荷极化引起的损耗。在直流电压作用下,由于极化过程仅在电压施加后很短时间内存在,与电导损耗相比可忽略。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作周期性的正向极化和反向极化,极化始终存在于整个加压过程之中。在频率不太高时,极化损耗随频率升高而增大;当频率超过某一数值时,极化过程反而减弱,损耗减小。

(3) 游离损耗。游离损耗是由气体电介质在电场的作用下出现局部放电引起的。气体电介质及含有气泡的液体、固体电介质都存在这种形式的损耗。游离损耗仅在外加电压超过一定值时才出现,且随电压升高而急剧增大。

二、介质损耗的表征

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 既表征介质电导的特性,也表征介质损耗的特性。但在交流电压作用下,仅用电导率表征介质损耗就不全面了,为此需引入一个新的物理量来表征介质损耗的特性,这个物理量就是介电损耗因数 $\tan\delta$ 。

1. 电介质的等效电路及介质损耗的计算公式

电介质两端加以交流电压 $\dot{U}$ 时,就有电流 $\dot{I}$ 流过介质。 $\dot{I}$ 由三个电流分量组成。

$$\dot{I} = \dot{I}_c + \dot{I}_g + \dot{I}_a$$

式中 $\dot{I}_g$ ——电导过程中的电流,与 $\dot{U}$ 同相位;

$\dot{I}_c$ 、 $\dot{I}_a$ ——无损极化和有损极化时的电流。

对应的等效电路如图 1-7 (a) 所示,此等效电路可进一步简化成如图 1-7 (b) 所示的等效电路。此并联等效电路的相量图如图 1-7 (c) 所示,其中 δ 为功率因数角的余角。由相量图可见,介质损耗功率越大, I_R 越大, δ 角也越大,因此 δ 角称为介质损失角。

对此并联等效电路,可写出介质损耗功率的计算公式

$$P = UI_R = UIC_p \tan\delta = U^2 \omega C_p \tan\delta$$

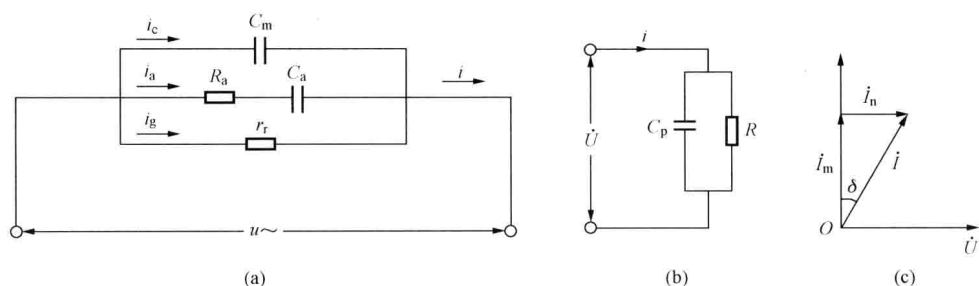


图 1-7 交流电压下电介质的等效电路及相量图

(a)、(b) 等效电路图；(c) 相量图

对于串联等效电路，同样可以推出损耗功率的计算公式

$$P = U^2 \omega C_S \tan \delta$$

2. $\tan \delta$ 值的意义

从介质损耗功率的计算公式看，如果用 P 来表征介质损耗的程度是不方便的，因 P 值与试验电压 U 的大小、试验电压的角频率 ω 、电介质等值电容量 C_P （或 C_S ）以及 $\tan \delta$ 有关。若在试验电压、频率、电介质尺寸一定的情况下，介质损耗功率仅取决于 $\tan \delta$ 。换句话说， $\tan \delta$ 是与电压、频率、绝缘尺寸无关的量，仅取决于电介质的损耗特性。所以 $\tan \delta$ 是表征介质损耗程度的物理量，与 ϵ_r 、 γ 相当，这样，可以通过实验测量电介质的 $\tan \delta$ 值，并以此来判断介质损耗的程度。

3. 影响 $\tan \delta$ 的因素

影响 $\tan \delta$ 的因素主要有温度、频率和电压。



极化、电导、损耗、击穿是电介质的基本特性，与之相对应的物理参数分别是相对介电系数 ϵ_r 、电导率 γ 、介电损耗因数 $\tan \delta$ 和击穿电压 U_b ，它们的大小可用来综合判断电介质的绝缘性能。

电介质的极化分为电子式极化、离子式极化、转向极化和空间电荷极化，其中电子式极化和离子式极化为无损极化，而转向极化和空间电荷极化为有损极化。电介质的电导与金属的电导有着本质的区别。电介质的电导是离子性的，数值很小，具有正的温度系数，而金属的电导是电子性的，数值很大，具有负的温度系数。电介质的损耗包括电导损耗、极化损耗和游离损耗三种形式，直流电压下电介质的损耗仅为电导损耗，而交流电压下电介质的损耗既有电导损耗，又有极化损耗，当电压超过一定数值时，还会出现游离损耗。

思考题与习题

1. 电介质的极化形式中，哪些存在能量损耗？哪些不存在能量损耗？
2. 某些容量较大的设备如电容器、长电缆等经直流高压试验后其接地放电时间要求长达 5~10min，为什么？