

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专升本系列教材

# 高电压工程

鲁铁成 关根志 编

为继续教育（函授）

**量身定做**



中国电力出版社  
www.cepp.com.cn

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专升本系列教材

# 高电压工程

---

鲁铁成 关根志 编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书为高等学校“电气工程及其自动化”专业继续教育(函授)专升本系列教材之一,其内容分高电压绝缘试验和电力系统过电压及保护两篇。在高电压绝缘试验篇中,着重阐明电介质性能及其放电机理的物理概念和高电压、大电流产生的方法及电气设备绝缘试验技术;在电力系统过电压及保护篇中,着重叙述波过程的物理概念和过电压的产生机理及其限制措施。

本书为电气工程及其自动化专业继续教育(函授)专升本课程教材,也可供电力工程类其他专业师生及从事电气工程工作的技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

高电压工程/鲁铁成,关根志编. —北京:中国电力出版社,2006

(电气工程及其自动化专业继续教育(函授)专升本系列教材)

ISBN 7-5083-4476-6

I. 高... II. ①鲁...②关... III. 高电压-高等学校-教材 IV. TM8

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第071563号

中国电力出版社出版、发行

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

北京铁成印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经销

\*

2006年9月第一版 2006年9月北京第一次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 16.25印张 365千字  
印数0001—3000册 定价26.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《电力电子技术》专业（函授）教师

## 参 编 学 校

华中科技大学

武汉大学

华北电力大学

东北电力大学

三峡大学

上海电力学院

长沙理工大学

武汉电力职业技术学院

电气与电子工程学院

电气工程学院

电气工程学院

电气工程学院

电气工程学院

电力与自动化工程学院

电气与信息工程学院

“电气工程及其自动化”专业继续教育(函授)系列教材

## 编 委 会

主 任：尹项根

副主任：陈柏超 熊 蕊 刘克兴

委 员：(按姓氏笔画排序)

丁坚勇	王义军	尹项根	关根志	刘克兴	齐 俊
朱 凌	陈 坚	何发斌	李天云	李裕能	严国志
应敏华	张元芳	张步涵	张丽静	张 哲	张新国
林碧英	赵 玲	聂宏展	殷小贡	袁兆强	梁文朝
程乃蕾	韩学军	鲁方武	鲁铁成	舒乃秋	谢自美
喻剑辉	曾克娥	曾祥君	辜承林	谭 琼	熊信银
熊 蕊	魏涤非				

## 编者按语

根据《中国教育改革与发展纲要》中“要大力发展成人高等教育”的精神，由华中科技大学电气与电子工程学院和武汉大学电气工程学院牵头，组织华北电力大学电气工程学院、东北电力学院（大学）电气工程学院、三峡大学电气工程学院、上海电力学院电力与自动化工程学院、长沙理工大学电气与信息工程学院、武汉电力职业技术学院等单位，成立了“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）教学工作协作组，于2003年11月在武汉，就国家在新形势下对人才的需求及“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的现状、特点和人才供需状况，对“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的教学计划、课程体系和使用教材现状进行了充分地研讨，制定了“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科和专升本两个层次的指导性教学计划。在此基础上研究了本专业的教材建设问题，大家一致认为函授教材要遵循自学和面授相结合、理论和实践相结合的原则，体现市场经济和科技发展对继续教育知识更新和理念更新的要求。针对目前“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科和专升本两个层次尚缺乏系统性教材的现状，决定组织各学院有经验的教授和专家编写这两个层次的教材。成们希望这两套系列教材能为规范本专业的教学内容和提高本专业的教学质量起到积极的推动作用。

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的教材建设，现在只是升头，需不断改进和完善。因此，在使用过程中敬请读者随对提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）教学工作协作组

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）系列教材编委会

2005年3月

## 前 言

本书是根据(全国)“电气工程及其自动化”专业(函授)教材研讨会制定的《电气工程及其自动化专业(函授)专升本和专科2个层次的指导性教学计划》系列教材编写计划而编写的,为电气工程及其自动化专业(函授专升本)学生学习《高电压工程》课程编写的教科书。

编写中,我们依据教材研讨会的会议精神,充分考虑进入WTO后对职业教育更新知识、更新教育理念的要求,函授教学的课程体系应具有适当的前瞻性,以适应新世纪人才培养的需要,加强基础,力求知识结构的系统性和完整性,并适当反映现代高电压工程领域中的新发展。

本书共分两篇十五章,系统介绍了各类电介质的电气性能与放电理论;电气设备绝缘试验技术;电力系统过电压产生和发展的基本物理过程;电力系统绝缘配合。这些都是从事电气工程设计、建设和运行的工程技术人员必备的基本知识。为方便学生自学,书中各章附有小结和习题。全书教学时数为56学时(学时分配:自学28学时、面授28学时)。

本书编者为武汉大学长期从事高电压工程专业教学和科研工作的教师,其中关根志编写第一~第七章、鲁铁成编写第八~第十五章并负责全书统稿。

在编写过程中,主要是以编者多年来讲授高电压技术课程的讲稿和从事相关的科研工作经验为基础,同时参考了国内外有关的教材和文献资料。此外,在大纲及书稿编写过程中,武汉大学张元芳教授、喻剑辉教授提出了不少宝贵意见。在此,谨向这些参考文献的作者和老师们致以深切的谢意。

本书由张元芳教授主审,提出了不少建设性的意见,为提高本书的质量付出了大量精力和劳动;上海电力学院的屠志刚老师也对本书的编写给予了热诚的支持;硕士研究生夏小飞、高炎辉为本书做了校对工作。在此特向他们表示衷心的感谢。

限于作者的水平和编写时间匆促,书中难免有差错之处,敬请使用本书的师生和读者批评指正。

编 者

2006年1月

# 目 录

编者按语  
前言

## 第一篇 高电压绝缘及试验

<b>第一章 电介质的基本电气特性</b> .....	1
第一节 电介质的极化.....	1
第二节 电介质的电导.....	5
第三节 电介质的损耗.....	7
第四节 电介质的击穿.....	10
习题.....	11
<b>第二章 气体放电的基本理论</b> .....	12
第一节 气体中带电粒子的产生与消失.....	12
第二节 汤逊气体放电理论.....	15
第三节 流注放电理论.....	20
第四节 不均匀电场中气隙的放电特性.....	21
第五节 电晕放电.....	23
第六节 沿面放电与污秽闪络.....	25
习题.....	33
<b>第三章 气体电介质的击穿特性</b> .....	34
第一节 稳态电压下气隙的击穿特性.....	34
第二节 雷电冲击电压下气隙的击穿特性.....	37
第三节 操作冲击电压下气隙的击穿特性.....	40
第四节 大气条件对气隙击穿电压的影响.....	42
第五节 提高气隙击穿电压的方法.....	44
第六节 SF <sub>6</sub> 气体的绝缘特性.....	47
习题.....	49
<b>第四章 固体电介质和液体电介质的击穿特性</b> .....	51
第一节 固体电介质的击穿机理.....	51
第二节 影响固体电介质击穿电压的因素.....	53
第三节 液体电介质的击穿机理.....	54
第四节 影响液体电介质击穿电压的因素.....	56
第五节 电介质的老化.....	59



第六节 组合绝缘的击穿特性 .....	63
习题 .....	66
<b>第五章 电气设备绝缘特性的测试</b> .....	<b>68</b>
第一节 绝缘电阻和吸收比的测量 .....	69
第二节 直流泄漏电流的测量 .....	71
第三节 介质损耗因数 ( $\tan\delta$ ) 的测量 .....	73
第四节 局部放电的测量 .....	77
习题 .....	80
<b>第六章 电气设备绝缘的耐压试验及高电压测量</b> .....	<b>81</b>
第一节 工频交流耐压试验 .....	81
第二节 直流耐压试验 .....	87
第三节 冲击耐压试验 .....	91
第四节 直流高电压和工频交流高电压的测量 .....	96
第五节 冲击高电压的测量 .....	99
第六节 高电压技术在其他方面的应用 .....	101
习题 .....	104
<b>第七章 电气设备绝缘在线监测</b> .....	<b>105</b>
第一节 绝缘在线监测技术 .....	105
第二节 专家系统在绝缘诊断中的应用 .....	107
习题 .....	109

## 第二篇 电力系统过电压及保护

<b>第八章 线路和绕组中的波过程</b> .....	<b>110</b>
第一节 波沿均匀无损耗单导线线路的传播 .....	110
第二节 行波的折射与反射 .....	114
第三节 波通过串联电感和并联电容 .....	121
第四节 行波的多次折射与反射 (网格法) .....	123
第五节 线路波过程的数值计算方法 .....	126
第六节 波沿平行多导线系统的传播 .....	131
第七节 线路损耗对波过程的影响 .....	134
第八节 变压器绕组中的波过程 .....	138
第九节 旋转电机绕组中的波过程 .....	146
习题 .....	149
<b>第九章 雷电参数及防雷设施</b> .....	<b>150</b>
第一节 雷电参数 .....	150
第二节 避雷针和避雷线的保护范围 .....	153
第三节 避雷器 .....	156
第四节 接地装置 .....	161

习题 .....	166
<b>第十章 输电线路的防雷保护 .....</b>	<b>168</b>
第一节 输电线路的感应雷过电压 .....	169
第二节 输电线路的直击雷过电压 .....	171
第三节 输电线路的耐雷水平和雷击跳闸率 .....	175
第四节 输电线路的防雷措施 .....	181
习题 .....	183
<b>第十一章 发电厂和变电站的防雷保护 .....</b>	<b>184</b>
第一节 发电厂和变电站的直击雷保护 .....	184
第二节 变电站的侵入波防护 .....	186
第三节 变电站的进线段保护 .....	192
第四节 变电站防雷的几个具体问题 .....	195
第五节 旋转电机的防雷保护 .....	198
习题 .....	202
<b>第十二章 电力系统的工频过电压 .....</b>	<b>203</b>
第一节 空载长线路的电容效应 .....	204
第二节 不对称接地引起的工频电压升高 .....	209
第三节 甩负荷引起的工频电压升高 .....	211
习题 .....	213
<b>第十三章 电力系统的谐振过电压 .....</b>	<b>214</b>
第一节 线性谐振过电压 .....	215
第二节 基波铁磁谐振及其特点 .....	216
第三节 电力系统中常见的谐振过电压 .....	218
习题 .....	224
<b>第十四章 操作过电压 .....</b>	<b>226</b>
第一节 间歇电弧接地过电压 .....	227
第二节 空载变压器分闸过电压 .....	231
第三节 空载线路分闸过电压 .....	234
第四节 空载线路合闸过电压 .....	235
第五节 电网解列过电压 .....	237
习题 .....	239
<b>第十五章 电力系统绝缘配合 .....</b>	<b>241</b>
第一节 绝缘配合的原则 .....	241
第二节 输电线路和电气设备绝缘水平的确定 .....	242
习题 .....	246
附表 1 一球接地时, 球隙的工频交流、负极性冲击、 正负极性直流感电电压 (kV, 峰值) .....	247
附表 2 一球接地时, 正极性冲击放电电压 (kV, 峰值) .....	248
参考文献 .....	249

# 第一篇 高电压绝缘及试验

电气工程及其自动化专业  
继续教育(函授)专升本系列教材

· 高电压工程

## 第一章

### 电介质的基本电气特性

电介质就其形态而言,可分为气体电介质、固体电介质和液体电介质。电介质在高电压工程中被广泛地用于对不同电位的导体以及导体与地之间的隔离,使其保持各自的电位,这种作用称之为电气绝缘,因此电介质通常也被称为绝缘材料,或简称为绝缘。不同的电介质具有不同的电气特性,工程实际中为了获得更好的绝缘特性,或者为了达到更好的技术经济指标,常常将各种不同的电介质进行适当地组合,形成所谓的复合绝缘而加以利用,比如电力电容器中的油纸绝缘,电力变压器中采用的液体变压器油及固体电工纸、棉纱等构成的复合绝缘等等。

电介质在电压作用下所表现出来的电气特性,大体上可以概括为极化特性、电导特性、损耗特性和击穿特性,表示这些电气特性的基本物理参数是相对介电常数  $\epsilon_r$ 、电导率  $\gamma$ 、介质损耗因数  $\tan\delta$  和击穿电场强度  $E_b$ 。

#### 第一节 电介质的极化

##### 一、电介质的极化

在外加电场的作用下,电介质中的正、负电荷将沿着电场方向作有限的位移或者转向,从而形成电矩,这种现象称为电介质的极化。

例如,图 1-1 所示的平行板电容器,当两极板间为真空时,在极板间施加直流电压  $U$ ,这时两极板上则分别充有正、负电荷,其电荷量为

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

式中:  $C_0$  为真空电容器的电容量。

如果在此极板间填充了其他电介质,这时在外加的直流电场作用下,电介质中的正、负电荷将沿电场的方向做有限的位移或转向,从而使电介质表面出现与极板电荷相反极性的束缚电荷,即电介质发生了极化。这时,由于外施的直流电压  $U$  不变,为保持极板间的电场强度不变,所以

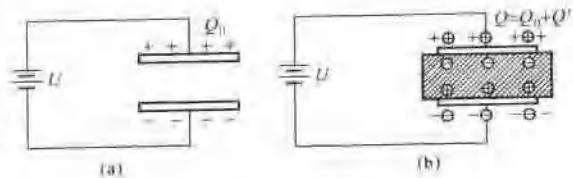


图 1-1 电介质的极化。  
(a) 极间为真空; (b) 极间放入介质

必须再从电源吸取一部分电荷  $Q'$  到极板上，以抵消束缚电荷的作用。由此可见，由于极板间电介质的加入及其极化，致使极板上的电荷量从  $Q_0$  增加到了  $Q$

$$Q = Q_0 + Q' = CU \quad (1-2)$$

式中： $C$  为加入电介质后两极板间的电容量。

显而易见，加入电介质后两极板间的电容量  $C$  比两极板间为真空时的电容量  $C_0$  增大了，其根本原因在于所加入的电介质产生了极化。可以想像，电介质极化愈强烈，则电容量的增大愈显著。

## 二、相对介电常数 $\epsilon_r$

相对介电常数  $\epsilon_r$  是表示电介质极化强度的一个物理参数。如上所述，平行板电容器两极板间真空时的电容量为  $C_0$ ，而加入电介质后两极板间的电容量由  $C_0$  增大为  $C$ ，则  $C$  与  $C_0$  的比值即为该电介质的相对介电常数  $\epsilon_r$ 。

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{\frac{\epsilon}{d}}{\frac{\epsilon_0}{d}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1-3)$$

式中： $\epsilon$  为填充电介质的介电常数； $\epsilon_0$  为真空的介电常数，( $8.86 \times 10^{-14} \text{F/cm}$ )； $s$  为极板面积， $\text{cm}^2$ ； $d$  为极间距离， $\text{cm}$ 。

工程上一般采用相对介电常数。可见，电介质的相对介电常数  $\epsilon_r$  愈大，电介质的极化特性则会愈强，由其构成的电容器的电容量也愈大。

显然，真空的相对介电常数  $\epsilon_r = 1$ ，而各种气体电介质的  $\epsilon_r$  都接近于 1，固体、液体电介质的  $\epsilon_r$  一般在 2~10 之间。几种常用电介质的相对介电常数列于表 1-1。

表 1-1 常用电介质的相对介电常数和电阻率

材料类别		名称	相对介电常数 $\epsilon_r$ (工频, 20℃)	体积电阻率 $\rho_v$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
气体介质 (标准大气条件)		空气	1.00058	
液体介质	弱极性	变压器油 硅有机液体	2.2 2.2~2.8	$10^{10} \sim 10^{13}$ $10^{12} \sim 10^{13}$
	极性	蓖麻油 氯化联苯	4.5 4.6~5.2	$10^{10} \sim 10^{11}$ $10^8 \sim 10^{10}$
	强极性	酒精 蒸馏水	33 81	$10^4 \sim 10^5$ $10^3 \sim 10^4$
固体介质	中性或弱极性	石蜡	2.0~2.5	$10^{14}$
		聚苯乙烯	2.5~2.6	$10^{15} \sim 10^{16}$
		聚四氟乙烯	2.0~2.2	$10^{15} \sim 10^{16}$
		松香	2.5~2.6	$10^{13} \sim 10^{14}$
		沥青	2.5~3.0	$10^{11} \sim 10^{14}$
极性	纤维素 胶木 聚氯乙烯	纤维素	6.5	$10^{12}$
		胶木	4.5	$10^{11} \sim 10^{12}$
		聚氯乙烯	3.0~3.5	$10^{13} \sim 10^{14}$
离子性	云母 电瓷	云母	5~7	$10^{13} \sim 10^{14}$
		电瓷	5.5~6.5	$10^{12} \sim 10^{13}$

电介质的相对介电常数  $\epsilon_r$  在工程上具有重要的实用意义，例如：

(1) 在制造电容器时，要选择适当的电介质。为了追求一定体积的电容器具有较大的电容量，应选择  $\epsilon_r$  较大的电介质。

(2) 设计某些绝缘结构时，为了减小通过绝缘的电容电流及由极化引起的发热损耗，这时就不宜选择  $\epsilon_r$  太大的电介质。

(3) 在交流及冲击电压作用下，由于多层串联电介质中的电场强度分布与  $\epsilon_r$  成反比，因此可利用不同  $\epsilon_r$  的电介质适当组合来改善绝缘中的电场分布，使之尽可能趋于均匀，以充分利用电介质的绝缘强度，优化绝缘结构。

### 三、极化的基本形式

电介质的物质结构不同，其极化的形式亦不同。电介质极化的基本形式可分为以下几种。

#### 1. 电子式极化

组成一切电介质的基本粒子不外乎是原子、分子或离子。在外电场的作用下，介质原子中的电子运动轨道将相对于原子核发生弹性位移，如图 1-2 所示。这样一来，原子的正、负电荷作用中心不再重合，形成电矩。这个过程主要是由电子在电场作用下的位移所造成，故称为电子式极化。

电子式极化的特点：

(1) 电子式极化存在于一切电介质中。

(2) 由于电子异常轻小，完成极化所需的时间极短（约  $10^{-15}$  s），极化响应速度极快，通常相当于紫外线频率范围。它在各种频率的交变电场中均能发生，不随电源频率而变化。

(3) 电子式极化具有弹性。一旦外电场消失，依靠正、负电荷之间的吸引力，其作用中心立即重合而恢复成中性。

(4) 由于电子式极化所消耗的能量极小，可以忽略不计，因此称为“无损极化”。

#### 2. 离子式极化

在离子式结构的电介质（如云母、陶瓷等）中，无外加电场作用时，正、负离子的自然排列使正、负离子对之间的偶极矩相互抵消，故其平均偶极矩为零，对外不呈现电极性。当有外电场作用时，正、负离子沿电场方向产生相对位移，使平均偶极矩不再为零，电介质呈现极化，这种极化称之为离子式极化，如图 1-3 所示。

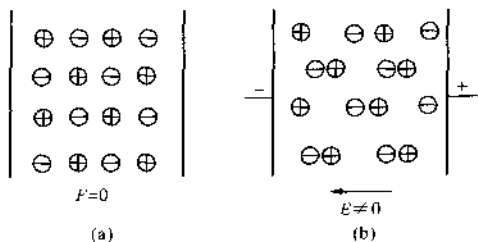


图 1-3 离子式极化

(a) 无外加电场；(b) 有外加电场

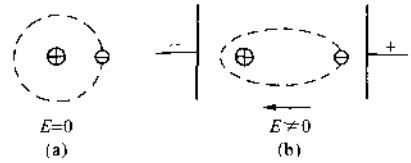


图 1-2 电子式极化

(a) 无外加电场；(b) 有外加电场

完成离子式极化所需的时间也很短，约  $10^{-13}$  s，其极化响应速度通常在红外线频率范围，亦可在各种频率的交变电场中发生。离子

式极化也具有弹性，亦属于无损极化。

### 3. 偶极子式极化

在极性分子结构的电介质（如胶木、橡胶、蓖麻油、氯化联苯等）中，其分子中的正、负电荷中心永不重合，每个极性分子都是偶极子，具有一定的电矩。但是，在没有外加电场作用时，由于这些偶极子因热运动而杂乱无章地排列，从而使其宏观电矩等于零，对外并不呈现电极性。当有外加电场作用时，原先排列杂乱的偶极子将沿电场方向转动，作较有规则的排列，从而对外显示出电极性，因此这种极化被称为偶极子式极化，或转向极化，如图 1-4 所示。

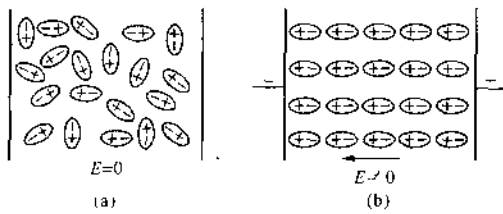


图 1-4 偶极子式极化

(a) 无外加电场；(b) 有外加电场

由于偶极子的结构尺寸远较电子或离子大，当其转向时需要克服分子间的吸引力而消耗能量，因此偶极子式极化属于有损极化，且极化时间较长，为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ s，通常认为其极化响应速度在微波以下。日常生活中使用微波炉加热食品就是利用食品中的水分产生偶极子式极化吸收微波能量来实现的。

因为偶极子式极化所需的时间较长，所以在频率不高，甚至在工频交变电场中偶极子式极化都有可能跟不上电场的变化而难以完成。因此，极性电介质的 $\epsilon_r$ 会随电源频率的变化而变化，频率增加， $\epsilon_r$ 减小，如图 1-5 所示。

温度对极性电介质的 $\epsilon_r$ 也有很大影响，其关系较为复杂，如图 1-6 所示。当温度升高时，由于分子间的联系力削弱，使极化加强；但同时由于分子的热运动加剧，又不利于偶极子沿电场方向进行有序排列，从而使极化减弱。因此，极性电介质的 $\epsilon_r$ 最初随温度升高而增大，当温度升高到使分子的热运动比较强烈之后， $\epsilon_r$ 又会随温度的继续升高而减小。

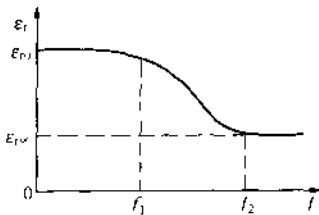


图 1-5 极性介质 $\epsilon_r$ 与频率的关系

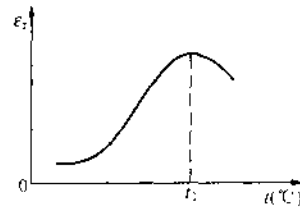


图 1-6 极性介质 $\epsilon_r$ 与温度的关系

### 4. 空间电荷极化

由于电介质中会存在一些可以迁徙的电子或离子，因而在电场作用下这些带电质点将

会发生移动，并聚积在电极附近的介质界面上，形成宏观的空间电荷积累，因此这种极化称为空间电荷极化。

空间电荷极化一般进行得比较缓慢，而且需要消耗能量，属于有损极化。在电场频率较低的交变电场中容易发生这种极化，而在高频电场中，由于带电质点来不及移动，这种极化就难以发生。

### 5. 夹层极化

夹层极化是多层电介质组成的复合绝缘中产生的一种特殊的空间电荷极化。在高电压工程中，许多电气设备的绝缘都是采用这种复合绝缘，如电缆、电容器、电机和变压器绕组等，在两层介质之间常夹有油层、胶层等形成多层介质结构。对于不均匀或者有杂质的介质，或者受潮的介质，事实上也可以等效为这种夹层介质来看待。夹层介质在电场作用下的极化称为夹层极化，其极化过程特别缓慢，所需时间由几秒到几十分钟，甚至更长，且极化过程中伴随有较大的能量损耗，所以也属于有损极化。

夹层极化的发生是由于各层电介质的介电常数不同，其电导率也不同，当加上电压后各层间的电场分布将会出现由加压初瞬按介电常数成反比分布，逐渐过渡到稳态时的按电导率成反比分布，由此在各层电介质中出现了一个电压重新分配的过程，最终导致在各层介质的界面上出现宏观上的空间电荷堆积，形成所谓的夹层极化。

## 第二节 电介质的电导

### 一、吸收现象

如图 1-7 (a) 所示，当 S2 处于开断状态，合上 S1，将直流电压  $U$  加到面体电介质上时，通过介质的电流将随时间而衰减，最终达到某一稳定值，其电流随时间的变化曲线如图 1-7 (b) 所示，这种现象称为吸收现象。

吸收现象的产生是由于电介质的极化所引起，无损极化产生电流  $i_c$ ，有损极化产生电流  $i_a$ 。显然，无损极化随即完成，所以  $i_c$  即刻衰减到零；有损极化完成的时间较长，所以  $i_a$  较为缓慢地衰减到零，这部分电流称为吸收电流。

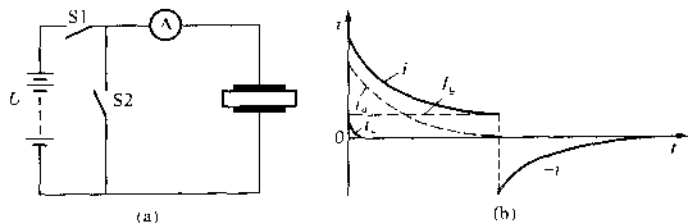


图 1-7 直流电压下流过电介质的电流  
(a) 实验电路；(b) 电流随时间的变化曲线

不随时间变化的稳定电流  $I_g$  称为电介质的电导电流或泄漏电流。因此，通过电介质的电流由三部分组成，即

$$i = i_c + i_a + I_g \quad (1-4)$$

需要指出，吸收电流是可逆的，即在图 1-7 (a) 的电路中，如打开 S1，除去外加电压，并将 S2 合上，使电介质两端的极板短路，这时会有与吸收电流变化规律相同的电流

反向流过，如图 1-7 (b) 所示。

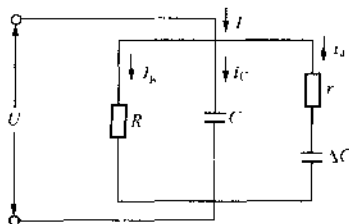


图 1-8 电介质的等值电路

根据上述分析，可画出电介质的三支路并联等值电路，如图 1-8 所示。其中含有电阻  $R$  的支路代表电导电流支路，含有电容  $C$  的支路代表无损极化引起的瞬时充电电流支路，而含有电阻  $r$  和电容  $\Delta C$  串联的支路则代表有损极化引起的吸收电流支路。

吸收现象在绝缘试验中对判断绝缘性能很有用。因为当绝缘受潮时，其电导大大增加，电导电流也大大增加，而吸收电流的变化相对较小，且会通过电导很快衰减。据此，工程上通过测量加上直流电压后  $t = 15s$  和  $t = 60s$  时流过介质的电流之比来反映吸收现象的强弱。此比值称为绝缘的吸收比  $K$

$$K = \frac{I_{15s}}{I_{60s}} = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} \quad (1-5)$$

实践表明，良好的绝缘一般  $K \geq 1.3$ ，当绝缘受潮或劣化时  $K$  值减小。此外，在对吸收现象较显著的绝缘试验中，如电缆、电容器等设备，要特别注意由吸收电流累积起来的所谓“吸收电荷”对人身和设备安全的威胁。

## 二、电介质的电导

理想的绝缘应该是不导电的，但实际上绝对不导电的介质是不存在的。所有的绝缘材料都存在极弱的导电性，即有一定的电导，表示电导特性的物理量是电导率  $\gamma$ ，它的倒数是电阻率  $\rho$ 。

电工绝缘材料的  $\rho$  一般为  $10^8 \sim 10^{20} \Omega \cdot m$ ；导体的  $\rho$  为  $10^{-8} \sim 10^{-4} \Omega \cdot m$ ；介乎二者之间的材料为半导体。可见绝缘与导体只是相对而言，二者之间并无确切的界线，只是人为的划分而已。几种常用电介质的电阻率列于表 1-1。

需要指出的是，电介质的电导与金属导体的电导有着本质的区别。

气体电介质的电导是由游离出来的电子、正离子和负离子等在电场作用下移动所造成；液体和固体电介质的电导是由这些介质中所含杂质分子的化学分解或热分解形成的带电质点（主要是正、负离子）在电场作用下的移动所造成。因此，电介质的电导主要是离子式电导；而金属的电导是金属导体中的自由电子在电场作用下的定向流动所造成，所以是电子式电导。

此外，电介质的电导随温度的升高近似于指数规律增加，即其电阻率随温度的升高而下降，这恰恰与金属导电的情况相反。这是因为，当温度升高时，电介质中参与导电的离子数因热分解而增加；同时，温度的升高会使分子间的相互作用力减小及离子的热运动改变了原有受束缚的状态，从而有利于离子的迁移，所以使电介质的电导率增加。电介质的电导率与温度的关系如式 (1-6) 所示：

$$\gamma = Ae^{-\frac{B}{T}} \quad (1-6)$$

式中： $A$ 、 $B$  为常数； $T$  为绝对温度。



在高电压工程中,测试绝缘的电导特性时常常用电阻来表示,称为绝缘电阻。由于吸收现象的存在,在外加直流电压  $U$  作用下,介质中流过的电流  $i$  随时间而衰减,因此介质的电阻  $R = \frac{U}{i}$  则随时间而增加,最后达到某一稳定值  $R = \frac{U}{I}$ ,  $I$  称为介质的泄漏电流。人们把电流达到稳定的泄漏电流  $I$  时的电阻作为电介质的绝缘电阻。一般情况下,加在绝缘上的直流电压大约经过 60s,泄漏电流即可达到稳定值,因此常用  $R_{60s}$  的值作为电介质的绝缘电阻值。

需要指出,在直流电压作用下流过电介质的泄漏电流  $I$ ,它包括通过介质本体的泄漏电流  $I_V$  和通过介质表面的泄漏电流  $I_S$ ,即  $I = I_V + I_S$ 。因此,所测介质的绝缘电阻  $R$  常常是其体积电阻  $R_V$  和表面电阻  $R_S$  相并联的等值电阻,即

$$R = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S} \quad (1-7)$$

由于介质的表面电阻取决于表面吸附的水分和脏污,受外界条件的影响较大,因此,为消除或减小介质表面状况对所测绝缘电阻的影响,一般应在测试之前首先对介质表面进行清洗处理,并保持干燥,必要时还应对表面泄漏电流采取屏蔽措施。

讨论电介质的电导特性在工程实际中有重要意义。

(1) 在绝缘预防性试验中,通过测量绝缘电阻和泄漏电流来反映绝缘的电导特性,用以判断绝缘是否受潮或存在其他劣化现象。

(2) 串联多层电介质的绝缘结构,在直流电压下的稳态电压分布与各层介质的电导成反比,因此设计用于直流电压下的设备绝缘时,应注意对所用不同电导率的电介质进行适当搭配,使电场分布合理,绝缘材料得到充分利用。同时,电介质的电导会随温度升高而增加,这对正确使用和分析绝缘状况有指导意义。

(3) 表面电阻对绝缘电阻的影响,使人们注意到如何合理地利用表面电阻。当为了减小表面泄漏电流时,应设法提高表面电阻,如对表面进行清洁、干燥处理或涂敷憎水性涂料等;当为了减小表面某一部分的电场强度时,则需要减小该处的表面电阻,如在高压套管法兰附近涂半导体釉,高压电机定子绕组露出槽口的部分涂半导体漆等,这样处理都是为了减小这些部位的电场强度,以消除电晕。

### 第三节 电介质的损耗

#### 一、电介质损耗的基本概念

电介质在电压作用下会产生能量损耗,其中有由电导引起的所谓电导损耗,也有由某种形式的极化所引起的所谓极化损耗。电介质的能量损耗简称为介质损耗。同一介质在不同类型的电压作用下,其损耗也不同。

在直流电压下,由于介质中没有周期性的极化过程,而一次性极化所损耗的能量可以忽略不计,所以电介质的损耗就只有电导引起的损耗,这时用电介质的电导率或泄漏电流值即可表达其损耗特性。因此,在直流电压下通常不需要再引入介质损耗因数这一特定概