



“十三五”普通高等教育本科重点规划教材  
高电压与绝缘技术系列教材

High-Voltage Engineering

# 高电压工程基础

## (第二版)

唐 炬 主 编

关伟民 张 博 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科重点规划教材  
高电压与绝缘技术系列教材

# 高电压工程基础

## (第二版)

唐 炬 主 编  
关伟民 张 博 副主编  
司马文霞 关根志 主 审

(武汉大学)



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书主要阐述了高电压工程中的基础理论,包括高电压绝缘、高电压试验技术和电力系统过电压及保护等内容。同时介绍了一些实际应用举例,并适当反映现代高电压工程领域中的新技术,力求内容精简、加强基础、突出适用性和兼顾不同水平读者的需求。

本书主要为普通高等院校电气工程及其自动化专业本科学生学习高电压工程专业知识的教材,也可作为电气工程学科研究生和其他专业学生学习了解高电压技术基本知识的基础教材,同时可作为自修、函授和电力职工培训的教学参考书以及涉及高电压领域的工程技术人员工作指导书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高电压工程基础 / 唐炬主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2018. 9  
“十三五”普通高等教育本科重点规划教材 高电压与绝缘技术系列教材  
ISBN 978-7-5198-2408-2

I. ①高… II. ①唐… III. ①高电压—高等学校—教材 IV. ①TMS

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 212167 号

---

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 陈 硕 (010-63412532)

责任校对: 黄 蓓 朱丽芳

装帧设计: 郝晓燕

责任印制: 吴 迪

---

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2003 年 3 月第一版 2018 年 9 月第二版

印 次: 2018 年 9 月北京第四次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张: 17.25

字 数: 414 千字

定 价: 45.00 元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

# 前 言

为了适应新时代电气信息大类专业学生宽知识、厚基础的培养要求,在第一版教材基础上,同时结合最近十余年高电压技术的发展,对本书进行了全面修改与补充。通过对本书的学习,读者可对高电压绝缘的基础理论、高电压试验技术以及过电压和防雷等内容有系统的认识,并了解高电压技术的一些发展动向。

本书第一版于 2003 年出版,在武汉大学和三峡大学等高等院校作为本科教材及研究生参考书使用。在这十余年间,高电压与绝缘技术学科发生了深刻的变革,新的技术不断涌现,有关的 IEC 标准、国家标准和行业标准不断更新,因此有必要对本书内容进行大幅度的修订。在第二版的修订工作中,为紧密围绕高电压技术中的基础,剔除了高压电器的相关内容,并结合最新的高电压技术发展趋势,增补了大量内容。例如,在 SF<sub>6</sub> 气体的绝缘特性中增加了替代气体的相关知识;在液体电介质击穿电压的影响因素中新增了油流速率;在局部放电测量中新增了特高频法;在发电厂和变电站的防雷保护中新增了电子信息系统相关内容;新增了高电压工程中的数值计算内容等。同时,为了兼顾内容的完整性,增加了一些经典的知识点,如在电气设备绝缘特性测试中新增了变压器油的气相色谱分析;新增了冲击电流试验及测量相关内容等。

在第二版教材的修订工作中,唐炬担任主编,对全书进行统稿和把关,主要负责第 4 章和第 6 章,并进行全书的内容协调与补充和文字修改;副主编关伟民主要负责第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 8 章、第 10 章和第 11 章;副主编张博主要负责第 12~15 章和第 16 章;喻剑辉主要负责第 5 章、第 7 章和附录;蓝磊主要负责第 9 章;潘成协助编修第 3 章、第 4~7 章和第 14 章,并负责全书的图表编修和文字校稿。全部作者对本书许多章节都进行了交叉文字编修。在修订过程中,主要以编者多年来讲授高电压技术专业相关课程的讲稿和从事的科研工作经验为基础,同时参考了国内有关教材和专著,在此谨向这些参考文献的作者深致谢意。

本书由重庆大学司马文霞教授和武汉大学关根志教授负责主审,他们自始至终都对本书的修订工作给予了热情的关心和支持,并对本书给出了书面的修改与建议,为本书的质量把关付出了辛勤劳动。在此,表示衷心感谢!同时,本书能顺利完成第二版的修编,得到了第一版全体作者给予的大力支持和无私帮助,特向他们表示衷心的感谢!

限于编者水平,书中难免有不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2018 年 7 月

# 第一版前言

根据原国家教委提出的“面向二十一世纪高等教育教学内容与课程体系改革计划”，为加强学生的专业基础和工程综合素质培养、拓宽专业知识面、改革课程设置、优化教学内容，我们尝试着编写这本教科书，作为最新确定的电气信息类专业学生学习高电压技术专业的基础教材。

编写中，我们依据全国高等学校电力工程专业教学指导委员会制定的《高电压技术课程教学基本要求》和高压教学组讨论通过的教材编写大纲，并充分考虑电气信息类宽口径专业人才培养的需要，加强基础，力求知识结构的系统性和完整性，并强调知识的工程实际应用。书中着重阐述有关高电压工程的基础理论知识和基本物理概念。全书共三篇十八章，与以往的《高电压技术》教材相比，增加了“高压电器”一篇，试图使本书尽可能包容高电压工程中的基本知识。为方便学生自学，书中各章附有小结和习题。

本书编者均为武汉大学长期从事高电压技术专业教学和科研工作的教师，其中关根志编写第一~第四章并负责统一全稿、喻剑辉编写第五~第七章、张元芳编写第八~第十一章、鲁铁成编写第十二~第十五章、陈仕修编写第十六~第十八章。在编写过程中，主要以编者多年来讲授高电压技术专业相关课程的讲稿和从事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。在此，谨向这些参考文献的作者深致谢意。

本书由西安交通大学严璋教授担任主审，他自始至终都对本书的编写工作给予了热情的关心和支持，并为提高本书质量付出了大量精力和劳动，提出了不少指导性意见；清华大学关志成教授、上海交通大学黄镜明教授、华中科技大学姚宗干教授、文远芳教授和武汉大学解广润教授也都对本书的编写给予了热诚的支持和帮助；硕士研究生柴旭峥为书稿的文字输入和校对做了大量工作；中国电力出版社和栾广杰编辑为本书的出版给予了热情的支持并付出了辛劳。在此特向他们表示衷心的感谢。

书中难免有不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

编者

2002年8月

## 目 录

前言  
第一版前言

绪论 ..... 1

## 第1篇 高电压绝缘

第1章 电介质的基本电气特性 .....	3
1.1 电介质的极化 .....	3
1.2 电介质的电导 .....	8
1.3 电介质的损耗 .....	10
1.4 电介质的击穿 .....	13
小结 .....	13
习题 .....	14
第2章 气体放电的基本理论 .....	15
2.1 气体中带电粒子的产生与消失 .....	15
2.2 汤逊气体放电理论 .....	18
2.3 流注放电理论 .....	23
2.4 不均匀电场中气隙的放电特性 .....	26
小结 .....	28
习题 .....	28
第3章 气体电介质的击穿特性 .....	30
3.1 稳态电压下气隙的击穿特性 .....	30
3.2 雷电冲击电压下气隙的击穿特性 .....	33
3.3 操作冲击电压下气隙的击穿特性 .....	36
3.4 不同大气条件下气隙的击穿电压 .....	38
3.5 提高气隙击穿电压的方法 .....	40
3.6 SF <sub>6</sub> 气体特性 .....	42
3.7 电晕放电 .....	44
3.8 沿面放电与污秽闪络 .....	47
小结 .....	53
习题 .....	54
第4章 固体电介质和液体电介质的击穿特性 .....	55
4.1 固体电介质的击穿机理 .....	55

4.2	影响固体电介质击穿电压的因素	57
4.3	固体电介质的老化	58
4.4	液体电介质的击穿机理	61
4.5	影响液体电介质击穿电压的因素	63
4.6	组合绝缘的击穿特性	67
	小结	70
	习题	70

## 第2篇 高电压试验

<b>第5章</b>	<b>电气设备绝缘特性的测试</b>	71
5.1	绝缘电阻和吸收比测量	71
5.2	直流泄漏电流的测量	75
5.3	介质损耗角正切 ( $\tan\delta$ ) 的测量	76
5.4	局部放电的测量	80
5.5	变压器油中溶解气体分析	84
	小结	88
	习题	89
<b>第6章</b>	<b>高电压试验与测量技术</b>	90
6.1	工频交流高电压试验	90
6.2	直流高电压试验	93
6.3	冲击高电压试验	96
6.4	冲击大电流试验	99
6.5	稳态高电压的测量	102
6.6	冲击高电压的测量	106
6.7	冲击大电流测量	110
	小结	112
	习题	112
<b>第7章</b>	<b>电气设备绝缘在线监测与故障诊断及状态评价</b>	114
7.1	绝缘在线监测技术	114
7.2	绝缘故障诊断方法	117
7.3	电气设备绝缘状态评价	120
	小结	122
	习题	122

## 第3篇 电力系统过电压及保护

<b>第8章</b>	<b>线路和绕组的波过程</b>	123
8.1	波沿无损单导线线路的传播	123
8.2	行波的单次折射与反射	126
8.3	行波的多次折、反射	130

8.4	波沿平行多导线系统的传播 .....	131
8.5	波的衰减和变形 .....	134
8.6	变压器绕组中的波过程 .....	135
8.7	旋转电机绕组中的波过程 .....	141
	小结 .....	142
	习题 .....	143
<b>第9章</b>	<b>雷电参数及防雷装置 .....</b>	<b>144</b>
9.1	雷电参数 .....	144
9.2	避雷针和避雷线的保护范围 .....	146
9.3	避雷器 .....	151
9.4	接地装置 .....	160
	小结 .....	164
	习题 .....	165
<b>第10章</b>	<b>输电线路防雷保护 .....</b>	<b>166</b>
10.1	输电线路感应雷过电压 .....	166
10.2	输电线路直击雷过电压和耐雷水平 .....	168
10.3	输电线路防雷措施 .....	172
	小结 .....	174
	习题 .....	175
<b>第11章</b>	<b>发电厂和变电站防雷保护 .....</b>	<b>176</b>
11.1	发电厂和变电站的直击雷保护 .....	176
11.2	变电站雷电侵入波保护 .....	178
11.3	变压器中性点和配电变压器防雷保护 .....	182
11.4	旋转电机防雷保护 .....	184
11.5	气体绝缘变电站防雷保护 .....	187
11.6	变电站电子信息系统的防雷保护 .....	188
	小结 .....	194
	习题 .....	195
<b>第12章</b>	<b>电力系统工频过电压 .....</b>	<b>196</b>
12.1	空载长线路电容效应引起的工频过电压 .....	196
12.2	不对称短路引起的工频过电压 .....	199
12.3	甩负荷引起的工频过电压 .....	201
	小结 .....	202
	习题 .....	202
<b>第13章</b>	<b>电力系统谐振过电压 .....</b>	<b>203</b>
13.1	线性谐振过电压 .....	203
13.2	非线性谐振过电压 .....	204
13.3	参数谐振过电压 .....	206
13.4	其他谐振过电压 .....	209



小结 .....	215
习题 .....	215
<b>第 14 章 操作过电压</b> .....	216
14.1 操作过电压幅值的计算 .....	216
14.2 间歇性电弧接地过电压 .....	217
14.3 切除空载变压器过电压 .....	221
14.4 切除空载线路过电压 .....	223
14.5 合闸空载线路过电压 .....	225
14.6 GIS 中特快速瞬态过电压 .....	226
14.7 交流特高压电网操作过电压 .....	230
14.8 电力系统解列过电压 .....	232
小结 .....	234
习题 .....	234

## 第 4 篇 绝缘配合与数值计算

<b>第 15 章 电力系统绝缘配合</b> .....	237
15.1 绝缘配合的原则 .....	237
15.2 绝缘配合的方法 .....	238
15.3 输电线路绝缘水平的确定 .....	240
小结 .....	243
习题 .....	244
<b>第 16 章 高电压工程中的数值计算</b> .....	245
16.1 静电场数值计算 .....	245
16.2 接地数值计算 .....	251
16.3 电力系统过电压数值计算 .....	254
小结 .....	259
习题 .....	259
<b>附录 一球接地时的球隙放电电压表</b> .....	260
<b>参考文献</b> .....	263

## 绪 论

高电压技术的发展始于 20 世纪初，至今已成为电工学科的一个重要分支。随着电力工业的发展，高电压、大功率、远距离电能输送，极大地促进了高电压工程与技术的发展。当今世界已进入了特高压（UHV）输电的新时代，我国也已建成了直流  $\pm 800\text{kV}$ 、交流  $1000\text{kV}$  的特高压输电工程，并率先投入商业运行，现已形成西电东送、南北互供、全国联网的主干网架，装机容量和年发电量均居世界第一位，成为名副其实的世界电力强国。

随着输电电压等级的不断提高，需要生产相应的优质高压电气设备，这就需要对各类绝缘介质的特性及其放电机理进行深入的研究，其中掌握气体放电机理是研究其他绝缘材料放电机理的基础。设备额定电压和容量的提高，使得对绝缘材料和绝缘结构的研究，以及对绝缘参数的测试技术成为很重要的研究内容。为研究各种绝缘材料的电气性能，就必须使用各种高电压和大电流发生装置以及对应的测试技术，高电压试验技术就成为高电压工程领域的重要研究手段。在高电压输电系统中，除了高电压设备之外，还面临着许多高电压工程课题，如高电压输电所面临的复杂环境、不对称故障及输电线路电晕对无线电通信的干扰、高压电磁场对周围环境和人体的影响，以及电力系统本身的电磁兼容问题、电力系统过电压及防护问题等。其中电力系统过电压是危害电力系统安全运行的主要因素之一。特别是随着输电电压等级的进一步提高，内部过电压已成为决定绝缘水平的主要因素。因此，研究电力系统中过电压产生的机理及限制措施，研究新型的限制过电压的方法和设备，已成为建设超高压及特高压电力系统所面临的重要课题。研究“绝缘”与“过电压”这对矛盾统一体是高电压技术永恒的主题。一方面，要求尽可能提高绝缘的抗电强度，如采用各种新技术、新材料、新工艺等；另一方面，要求尽可能将绝缘所要承受的过电压限制在绝缘强度以内，如采用各种措施限制过电压和采用各种新型过电压保护装置，由此使高电压技术领域的研究内容变得十分宽阔和极为丰富。

显然，电力工业的发展离不开高电压工程，电气工程类专业的学生在进入电力行业后，也必然会面对高电压工程方面的诸多生产实际问题。因此，希望学生通过本课程的学习，掌握高电压绝缘的基础理论知识；学会测试电气设备绝缘特性的基本原理和方法；弄清楚高电压和大电流发生装置及测量设备的工作原理；熟悉过电压产生的机理和防护措施；了解采用各种新材料、新工艺和新技术的电气设备的基本性能、原理与特点等。这些无疑将为学生在今后从事高电压工程与设备的设计与计算、安装与调试、运行与维护等方面工作提供良好的理论与技术基础，在面对生产实际所涉及的高电压工程技术问题时一展才华。

随着高电压技术与其他学科的相互交叉和渗透，不断汲取其他科技领域中的新成果，使高电压新技术不断出现，有力地促进了高电压工程技术的自身发展。例如， $\text{SF}_6$  气体绝缘的推广应用，使电气设备的绝缘状况发生了深刻的变化，并由此出现了气体绝缘变电站（GIS），大大提高了设备运行的安全可靠；合成绝缘子的出现使高压线路绝缘发生了根本性的变化，并为先进的紧凑型输电线路提供了技术支持；交联聚乙烯（XLPE）电缆使高电

压直接进入城区的负荷中心；氧化锌避雷器的广泛使用大大提高了电力系统的过电压保护水平；电磁暂态程序（EMTP）的开发和计算机仿真技术使电力系统过电压的计算成为可能；随机信号的处理和概率统计理论使绝缘配合设计达到最优化程度；传感技术、光纤技术、数字化技术和计算机技术的发展正在促进着绝缘在线监测与诊断技术的发展，使高压电气设备正在从传统的计划检修向先进的状态检修过渡；高电压技术的新进展、新方法也在其他诸多科学技术领域中得到广泛应用，并产生了一系列高新成果，如大功率脉冲技术、激光技术、核物理、生态与环境保护、生物医学、通信与数字技术保护、高压静电工业等，显示出强大的发展活力。又如，高电压在电极边缘处会形成高电场，而当绝缘膜极薄时，即使是在低电压下也容易形成高电场，所以在研发超大规模集成电路（ULSI）时也会遇到高电场下的层间绝缘问题。由此可见，高电压技术在一向被视为弱电的信息技术（Information Technology）中也是大有用武之地。因此，掌握高电压工程的基础知识，在众多高科技领域中都是大有可为的。

总之，可以认为电力是现代社会能量供给的基础，电能已与人类的生存、发展和文明进步密切相关，而高电压技术是其中的一个重要知识体系，是支撑电能应用的一根有力的支柱。随着核聚变发电、超导应用、电能储贮、IT 技术等高新技术的发展，高电压工程技术也必将与时俱进，发挥越来越重要、越广泛的作用，新的课题研究必然会对高电压工作者提出更高的技术要求。

此外，高电压技术是一门工程综合性和实践性很强的工程学科。大部分的高电压技术理论都是建立在试验研究的基础上。在工程应用和科学研究中，更是需要通过试验数据来解决问题和说明问题。因此，从某种意义上可以说，高电压技术是一门以实验为基础的科学。学习这门课程必须重视实践，注重提高学生的高电压实验技能和工程应用技能。为此，应围绕该课程内容适当开设若干教学实验，学生应尽可能独立完成这些实验，并在完成这些实验时掌握高电压试验的基本技能和试验安全技术。

# 第 1 篇 高 电 压 绝 缘

## 第 1 章 电介质的基本电气特性

在高电压工程中所用的各种电介质通常称为绝缘介质 (或绝缘材料)。绝缘的作用是将不同电位的导体以及导体与地之间分隔开来, 从而保持各自的电位。因此, 绝缘是电气设备的重要组成部分。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。在实际的电气设备中, 绝缘又往往是由各种不同的电介质组合而成。不同的电介质具有不同的电气特性, 其基本电气特性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参数是相对介电常数  $\epsilon_r$ 、电导率  $\gamma$ 、介质损耗角正切  $\tan\delta$  和击穿场强  $E_b$ 。

### 1.1 电介质的极化

#### 1.1.1 电介质的极化现象和相对介电常数

在外加电场作用下, 电介质中的正、负电荷将沿着电场方向做有限的位移或者转向, 形成电偶极矩, 这种现象称为电介质的极化。

如图 1-1 (a) 所示的平行板电容器, 当两极板之间为真空时, 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。

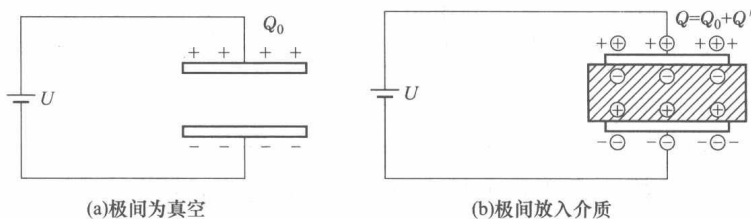


图 1-1 电介质的极化

然后在此极板间填充上其他电介质, 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, 如图 1-1 (b) 所示。由于外施的直流电压  $U$  不变, 所以为保持极板间的电场强度不变, 这时必须再从电源转移一部分电荷  $Q'$  到极板上, 以平衡束缚电荷的作用。由此可见, 由于极板间电介质的加入, 致使极板上的电荷量从  $Q_0$  增加到  $Q$ , 即

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

式中： $C$ 为加入电介质后两极板间的电容量。

显然，这时的电容量 $C$ 比两极板间为真空时的电容量 $C_0$ 增大了。 $C$ 与 $C_0$ 的比值称为该电介质的相对介电常数 $\epsilon_r$ ，即

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

式中： $\epsilon$ 为填充介质的介电常数； $\epsilon_0$ 为真空的介电常数， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 。

工程上一般采用相对介电常数，电介质的相对介电常数 $\epsilon_r$ 越大，电介质的极化特性越强，由其构成的电容器的电容量也越大，所以 $\epsilon_r$ 是表示电介质极化强度的一个物理参数。

真空的相对介质常数 $\epsilon_r = 1$ ，各种气体电介质的 $\epsilon_r$ 都接近于1，而固体、液体电介质的 $\epsilon_r$ 一般为2~10。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 (50Hz), 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	2.2	$10^{10} \sim 10^{13}$
		硅有机液体	2.2~2.8	$10^{12} \sim 10^{13}$
	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	$10^{13} \sim 10^{14}$
	极性	纤维素 胶木 聚氯乙烯	6.5 4.5 3.0~3.5	$10^{12}$ $10^{11} \sim 10^{12}$ $10^{13} \sim 10^{14}$
	离子性	云母 电瓷	5~7 5.5~6.5	$10^{13} \sim 10^{14}$ $10^{12} \sim 10^{13}$

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，举例如下：

(1) 在制造电容器时，应选择适当的电介质。为了追求体积一定、电容量较大的电容器，应选择 $\epsilon_r$ 较大的电介质。

(2) 在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，这时则不宜选择 $\epsilon_r$ 太大的电介质。

(3) 在交流和冲击电压作用下，多层串联电介质中的电场分布与 $\epsilon_r$ 成反比。这是因为在多层串联介质中，电位移连续 $D_1 = D_2$ ，即 $\epsilon_0 \epsilon_{r1} E_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} E_2$ ，所以 $E_1/E_2 = \epsilon_{r2}/\epsilon_{r1}$ ，即电场分布与 $\epsilon_r$ 成反比。因此，可利用不同 $\epsilon_r$ 的电介质的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。比如，在电缆绝缘中，由

于电场沿径向分布不均匀,靠近电缆芯线处的电场最强,远离芯线处的电场较弱,因此,应使内层绝缘的 $\epsilon_r$ 大于外层绝缘的 $\epsilon_r$ ,这样就可以使电缆芯线周围绝缘中的电场分布趋于均匀。

### 1.1.2 极化的基本形式

电介质的物质结构不同,其极化形式亦不同。下面介绍电介质极化的几种基本形式。

#### 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。而原子则是由带正电荷的原子核和围绕核旋转的电子形成的所谓“电子云”构成。当不存在外加电场时,围绕原子核旋转的电子云的负电荷作用中心与原子核所带正电荷的作用中心相重合,如图1-2所示。由于其正、负电荷量相等,故此时电偶极矩为零,对外不显示电极性。当外加一电场 $E$ ,在电场力的作用下电子的轨道将相对于原子核产生位移,使原子中正、负电荷的作用中心不再重合,形成电偶极矩。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。

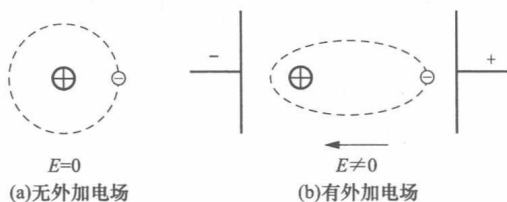


图1-2 电子式极化

电子式极化的特点:

(1) 电子式极化存在于所有电介质中。

(2) 由于电子异常轻小,因此电子式极化所需时间极短,约为 $10^{-15}$ s,其极化响应速度最快,通常相当于紫外线的频率范围。这种极化在各种频率的交变电场中均能发生,故 $\epsilon_r$ 不随频率而变化;同时温度对其的影响也极小。

(3) 电子式极化具有弹性。在去掉外电场作用时,依靠正负电荷之间的吸引力,其正、负电荷的作用中心即刻重合而恢复成中性。

(4) 由于电子式极化消耗的能量可以忽略不计,因此称为“无损极化”。

#### 2. 离子式极化

在离子式结构的电介质中,无外加电场作用时,由于正、负离子杂乱无章的排列,正负电荷的作用相互抵消,对外不呈现电极性。当有外电场作用时,则除了促使各个离子内部产生电子式极化之外,还将产生正、负离子的相对位移,使正、负离子按照电场的方向进行有序排列,形成极化,这种极化称为离子式极化,如图1-3所示。

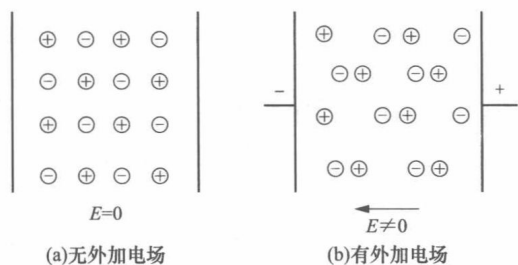


图1-3 离子式极化

形成离子式极化的时间也很短,约为 $10^{-13}$ s,其极化响应速度通常在红外线频率范围,也可在所有频率范围内发生;极化也是弹性的;消耗的能量亦可忽略不计,因此离子式极化也属于无损极化。

#### 3. 偶极子式极化

在极性分子结构的电介质中,即使没有外加电场的作用,由于分子中正、负电荷的作用中心已不重合,就其单个分子而言,已具有偶极矩,因此这种极性分子也叫偶极子。但由于分子不规则的热运动,使各极性分子偶极矩的排列没有秩序,从宏观而言,对外并不呈现电极性。当有外电场作用时,偶极子受到电场力的作用而转向电场的方

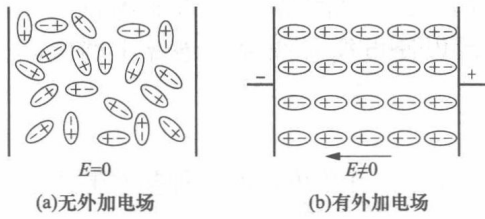
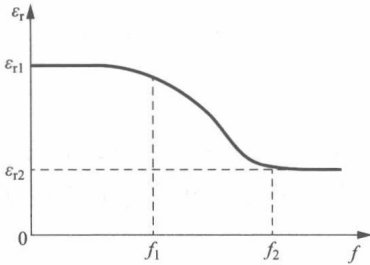
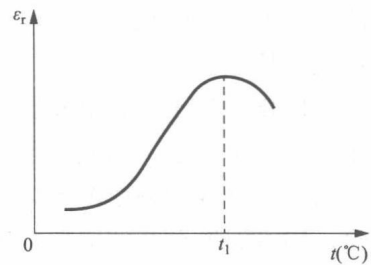


图 1-4 偶极子式极化

变电场中，偶极子式极化的完成都有可能跟不上电场的变化，因此，极性电介质的  $\epsilon_r$  会随电源的频率而改变，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。所以极性电介质的  $\epsilon_r$  最初随温度的升高而增大，当温度的升高使分子的热运动比较强烈时， $\epsilon_r$  又随温度的升高而减小。

图 1-5 极性电介质  $\epsilon_r$  与频率的关系图 1-6 极性介质  $\epsilon_r$  与温度的关系

顺便指出，人们使用微波炉加热食品就是通过食品中的水分子产生偶极子式极化吸收微波能量来实现的。

#### 4. 空间电荷极化

由于电介质中多少存在一些可迁徙的电子或离子，因而在电场作用下将发生这些带电质点的移动，并聚积在电极附近的介质界面上，形成宏观的空间电荷，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，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，这种极化难以发生。

#### 5. 夹层极化

夹层极化是在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。对于不均匀的或含有杂质的介质，或者受潮的介质，事实上也可以等价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。夹层极化的发生是由于各层电介质的介电常数与其电导率比值的不同所致，当加上直流电压后各层间的电场分布，将会出现从加压瞬时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交界面上出现宏观上的空间电荷堆积，形成所谓的夹层极化。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，且极化过程伴随有较大的能量损耗，所以也属于有损极化。

以双层介质为例，详细说明夹层极化的形成过程。图 1-7 (a) 为双层介质的示意图。图 1-7 (b) 为双层介质的等效电路， $C_1$ 、 $C_2$  分别为介质 I 和 II 的电容， $G_1$ 、 $G_2$  分别为其电导。当闭合开关 S 突然加上直流电压  $U$  的初瞬 ( $t \rightarrow 0$  时)，电压由零很快上升到  $U$ ，电导几乎相当于开路，这时两层介质上的电压按电容成反比分布，即

$$\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{t \rightarrow 0} = \frac{C_2}{C_1} \quad (1-4)$$

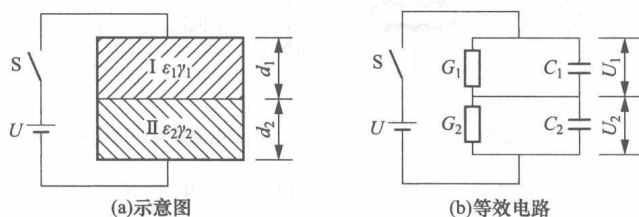


图 1-7 双层介质的极化

在  $t \rightarrow \infty$  时，电容相当于开路，电流全部从电导中流过，这时两层介质上的电压则按电导成反比分布，即

$$\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{t \rightarrow \infty} = \frac{G_2}{G_1} \quad (1-5)$$

如果是均匀的单一介质，即  $C_1 = C_2$ ， $G_1 = G_2$ ，则  $\frac{C_2}{C_1} = \frac{G_2}{G_1}$ ，所以  $\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{t \rightarrow 0} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{t \rightarrow \infty}$ 。也就是说，对均匀介质来说，加上电压后不存在电荷重新分配的过程。

一般来说， $\frac{C_2}{C_1} \neq \frac{G_2}{G_1}$ ，所以  $\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{t \rightarrow 0} \neq \left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{t \rightarrow \infty}$ ，这就是说，在两层介质之间有一个电压重新分配的过程。例如，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  $t$  的增大， $U_2$  逐渐下降，而  $U_1$  逐渐升高（因为  $U_1 + U_2 = U$ ， $U$  为电源电压，是一定值）。在这种电压重新分配过程中， $C_2$  上初瞬时获得的部分电荷将通过电导  $G_2$  放掉。为了保持介质上所加的电压仍为电源电压，所以  $C_1$  必须通过  $G_2$  从电源再吸收一部分电荷，这部分电荷称为吸收电荷。这就是夹层介质的分界面上电荷的重新分配过程，即夹层极化过程。应该指出，多层介质的吸收电荷的过程进行得非常缓慢，其时间常数为

$$\tau = \frac{C_1 + C_2}{G_1 + G_2} \quad (1-6)$$

由于介质的电导很小，所以时间常数  $\tau$  很大。当绝缘受潮或劣化时，电导增大， $\tau$  就会大大下降。利用这一特点，人们采用一种称为吸收比测量的试验来检验绝缘是否受潮或严重劣化。



## 1.2 电介质的电导

### 1.2.1 吸收现象

如图 1-8 (a) 所示, 当 S2 处于断开状态, 合上 S1 直流电压  $U$  加在固体电介质时, 通过介质中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 1-8 (b) 所示, 这种现象称为吸收现象。

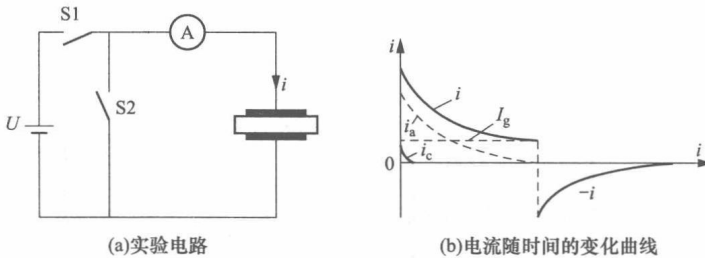


图 1-8 直流电压下流过电介质的电流

吸收现象是由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  $i_a$ , 如图 1-8 (b) 所示。显然, 无损极化迅速完成, 所以  $i_c$  即刻衰减到零; 而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。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

$$i = i_c + i_a + I_g \quad (1-7)$$

尚须指出, 吸收电流是可逆的, 即在图 1-8 (a) 的电路中, 如断开 S1, 除去外加电压, 并将 S2 闭合上, 使电介质两侧的极板短路, 这时会有与吸收电流变化规律相同的电流  $-i$  反向流过, 如图 1-8 (b) 所示。

根据上述分析, 可画出电介质的三支路并联等效电路, 如图 1-9 所示。图中含有电阻  $R$  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。

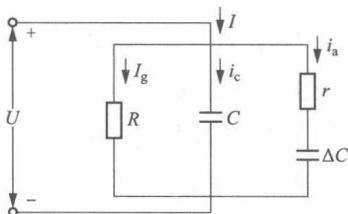


图 1-9 电介质的等效电路

吸收现象在绝缘试验中对判断绝缘介质是否受潮很有用。因为当绝缘受潮时, 其电导大大增加, 电导电流  $I_g$  也大大增加, 而吸收电流  $i_a$  的变化相对较小, 且通过  $r$  很快衰减。据此, 工程上通过测量加上直流电压后  $t=15s$  和  $t=60s$  时流过绝缘介质的电流  $I$  之比来反映吸收现象的强弱, 此比值即为介质的吸收比  $K$ , 其表达式为

$$K = \frac{I_{15s}}{I_{60s}} = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} \quad (1-8)$$

对良好的绝缘, 一般  $K \geq 1.3$ , 当绝缘受潮或劣化时  $K$  值变小。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聚积起来的所谓“吸收电荷”对人身和设备安全的威胁。

### 1.2.2 电介质的电导率

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