

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENGJIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

高电压工程基础

关根志 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TM8
6782

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENGJIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

高电压工程基础

关根志 主编
严 璋 主审



A1018299



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十五”规划教材。

本书阐述有关高电压工程的基础知识,内容包括高电压绝缘及试验、电力系统过电压及保护和高压电器等共三篇十八章。着重介绍高电压工程中最基本的理论概念和一些具体应用,并适当反映现代高电压技术领域中的新发展,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要。

本书为高等学校电气工程及其自动化专业学生学习高电压技术专业知识的基礎教材,也可作为相关专业自修、函授和职工大学学生的自学教材或培训教材,以及作为中等专业学校电力专业学生的教学参考书和电力工部门及其他相关部门工程技术人员的工作参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高电压工程基础/关根志主编. —北京:中国电力出版社, 2003

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-1375-5

I. 高… II. 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(2003)第010324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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

2003年3月第一版 2003年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 20印张 456千字

印数 0001—3000册 定价 28.00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)

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材，这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课

程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222）

中国电力教育协会

二〇〇二年八月

前言

根据原国家教委提出的《面向 21 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知识的教材。

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~第四章并负责全书统稿、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；硕士研究生柴旭峰为书稿的文字输入和校对做了大量工作。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

序	
前言	
绪论	1

第一篇 高电压绝缘及试验

第一章 电介质的基本电气特性	3
第一节 电介质的极化	3
第二节 电介质的电导	8
第三节 电介质的损耗	10
第四节 电介质的击穿	14
小结	14
习题	15
第二章 气体放电的基本理论	16
第一节 气体中带电粒子的产生与消失	17
第二节 汤逊气体放电理论	19
第三节 流注放电理论	24
第四节 不均匀电场中气隙的放电特性	25
小结	27
习题	27
第三章 气体电介质的击穿特性	29
第一节 稳态电压下气隙的击穿特性	29
第二节 雷电冲击电压下气隙的击穿特性	32
第三节 操作冲击电压下气隙的击穿特性	35
第四节 大气条件对气隙击穿电压的影响	37
第五节 提高气隙击穿电压的方法	39
第六节 SF ₆ 气体的绝缘特性	42
第七节 电晕放电	44

第八节	沿面放电与污秽闪络	46
小结	.....	53
习题	.....	54
第四章	固体电介质和液体电介质的击穿特性	55
第一节	固体电介质的击穿机理	55
第二节	影响固体电介质击穿电压的因素	57
第三节	固体电介质的老化	58
第四节	液体电介质的击穿机理	62
第五节	影响液体电介质击穿电压的因素	64
第六节	组合绝缘的击穿特性	67
小结	.....	69
习题	.....	70
第五章	电气设备绝缘特性的测试	71
第一节	绝缘电阻和吸收比测量	71
第二节	直流泄漏电流的测量	75
第三节	介质损耗因数 ($\text{tg}\delta$) 的测量	76
第四节	局部放电的测量	81
小结	.....	82
习题	.....	83
第六章	电气设备绝缘的耐压试验及高电压测量	84
第一节	工频交流耐压试验	84
第二节	直流耐压试验	87
第三节	冲击耐压试验	91
第四节	稳态高电压的测量	94
第五节	冲击高电压的测量	98
小结	.....	102
习题	.....	102
第七章	电气设备绝缘在线监测与诊断系统	104
第一节	绝缘在线监测技术	104
第二节	设备运行状况的在线诊断系统	107
小结	.....	108
习题	.....	109

第二篇 电力系统过电压及保护

第八章 线路和绕组的波过程	110
第一节 波沿无损耗单导线线路的传播	110
第二节 行波的折射与反射	113
第三节 行波的多次折、反射	118
第四节 波沿平行多导线系统的传播	119
第五节 波的衰减和变形	122
第六节 单相变压器绕组中的波过程	123
第七节 旋转电机绕组中的波过程	129
小结	130
习题	131
第九章 雷电参数及防雷装置	132
第一节 雷电参数	132
第二节 避雷针和避雷线的保护范围	135
第三节 避雷器	138
第四节 接地装置	146
小结	149
习题	150
第十章 输电线路的防雷保护	151
第一节 输电线路的感应雷过电压	151
第二节 输电线路的直击雷过电压和耐雷水平	153
第三节 输电线路的防雷措施	157
小结	159
习题	160
第十一章 发电厂和变电站的防雷保护	161
第一节 发电厂和变电站的直击雷保护	161
第二节 变电站的进线保护	164
第三节 变压器中性点和配电变压器的保护	168
第四节 旋转电机的防雷保护	170
第五节 气体绝缘变电站的过电压保护	173

小结	175
习题	176
第十二章 电力系统工频电压升高	177
第一节 空载长线路的电容效应	178
第二节 不对称短路引起的工频电压升高	181
第三节 甩负荷引起的工频电压升高	183
小结	185
习题	185
第十三章 谐振过电压	186
第一节 线性谐振过电压	187
第二节 基波铁磁谐振及其特点	188
第三节 电力系统常见的谐振过电压	190
小结	196
习题	196
第十四章 操作过电压	198
第一节 间歇电弧接地过电压	199
第二节 空载变压器分闸过电压	204
第三节 空载线路分闸过电压	206
第四节 空载线路合闸过电压	208
小结	210
习题	210
第十五章 电力系统绝缘配合	212
第一节 绝缘配合的原则	212
第二节 线路与电气设备绝缘水平的确定	213
小结	217
习题	217

第三篇 高压电器

第十六章 基础知识	218
第一节 高压电器概述	218

第二节	电动力	224
第三节	发热	229
第四节	电接触	231
第五节	开关电弧	237
第六节	直流电弧	240
第七节	交流电弧的开断	244
	小结	246
	习题	246
第十七章 高压断路器		248
第一节	油断路器灭弧室的工作原理	248
第二节	油断路器	252
第三节	SF ₆ 气体中的电弧	255
第四节	SF ₆ 断路器	258
第五节	真空电弧	261
第六节	真空断路器	267
第七节	操动机构	271
第八节	负荷开关——熔断器组合电器	277
	小结	282
	习题	283
第十八章 高压互感器		284
第一节	电压互感器的误差	284
第二节	电压互感器的结构	287
第三节	电容式电压互感器	289
第四节	电流互感器的特点	291
第五节	电流互感器的误差	292
第六节	电流互感器的结构	297
第七节	光电传感器	299
	小结	302
	习题	302
附录	一球接地时, 球隙放电电压表	303
参考文献		305

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、远距离输电极大地促进了高电压技术的发展。当今世界已进入了超高压(EHV)乃至特高压(UHV)输电的新时代, 我国也已建成了以500kV超高压输电线路为骨干的各大区域电网, 并着力发展500kV超高压交、直流混合电力网, 以推进全国电力系统的联网。随着举世瞩目的“三峡工程”的建设和竣工(2009年), 1000kV级的特高压输电技术也必将会在我国出现。我国现在已成为装机容量和年发电量均居世界第二位的电力大国, 不久的将来我国也必将会成为世界电力强国。

随着输电电压等级的提高, 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, 其中对气体放电机理的研究是研究其他绝缘材料放电机理的基础。设备额定电压的提高使得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课题。为研究各种绝缘材料的电气性能就必须使用各种高电压发生装置并采用相应的测试技术, 因此高电压试验技术就成为研究高电压工程的重要手段。在高电压输电系统中除高电压设备之外, 还面临着许多高电压技术课题。如高压输电的电晕; 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装置, 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”这对矛盾是高电压技术的一个永恒的主题。人们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把绝缘所要承受的过电压限制到绝缘的耐压强度以内, 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技术, 电气工程类专业的学生在电力系统中工作也必然会面对高电压工程方面的诸多生产实际问题。因此, 我们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; 了解产生高电压、大电流的方法和装置; 熟悉过电压产生的机理和防护措施; 弄清楚各种高压电气设备, 特别是采用各种新材料、新工艺、新技术的电气设备的基本性能、原理和特点等等, 这将无疑会为他们在现代电力系统中从事高电压工程的设计与计算、安装与调试及设备运行的维护与维修等方面的工作提供一个良好的工程技术基础, 使他们在面对生产实际中的高电压工程问题时一展才华。

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: SF₆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,以至于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。金属氧化物避雷器(MOA)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内部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(VLSI)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,我们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,它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、电能存储、IT技术等高新技术的发展,高电压工程也必将与时俱进,发挥愈来愈重要、愈广泛的作用,新的研究课题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,高电压技术是一门实验科学。学习这门课程必须重视实践,注意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。

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，绝缘是电气设备结构中的重要组成部分。电介质就其形态而言，可分为气体电介质、液体电介质和固体电介质。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 ϵ_r 、电导率 γ 、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作有限的位移或者转向，形成电矩，这种现象称为电介质的极化。

如图 1-1 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。

如果在此极板间填充以其他电介质，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作有限的位移或转向，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。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，致使极板上的电荷量从 Q_0 增加到 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。显然这时的电容量 C 比两极板间为真空时的

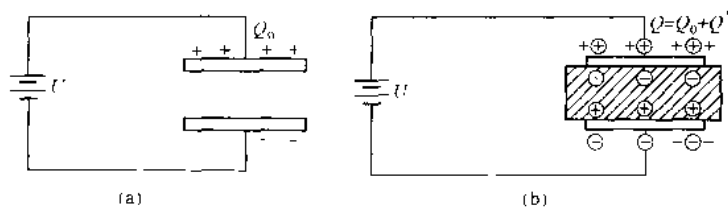


图 1-1 电介质的极化

(a) 极间为真空; (b) 极间放入介质

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 ϵ_r 。

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

式中, ϵ 为填充介质的介电常数, ϵ_0 为真空的介电常数 ($8.86 \times 10^{-14} \text{F/cm}$)。工程上一般采用相对介电常数, 电介质的相对介电常数 ϵ_r 愈大, 电介质的极化特性愈强, 由其构成的电容器的电容量也愈大, 所以 ϵ_r 是表示电介质极化强度的一个物理参数。

真空的相对介电常数 $\epsilon_r = 1$, 各种气体电介质的 ϵ_r 都接近于 1, 而液体、固体电介质的 ϵ_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 ϵ_r [工频 (50Hz), 20℃]	体积电阻率 ρ_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	4.5	$10^{10} \sim 10^{11}$
		氯化联苯	4.6~5.2	$10^8 \sim 10^{10}$
强极性	酒精	33	$10^4 \sim 10^5$	
	蒸馏水	81	$10^3 \sim 10^8$	
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	6.5	10^{12}
		胶木	4.5	$10^{11} \sim 10^{12}$
	离子性	聚氯乙烯	3.0~3.5	$10^{13} \sim 10^{14}$
云母 陶瓷		5~7 5.5~6.5	$10^{13} \sim 10^{14}$ $10^{12} \sim 10^{11}$	

电介质的相对介电常数 ϵ_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。为了追求一定体积的电容器具有较大的电容量, 应选择 ϵ_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 ϵ_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分布与 ϵ_r 成反比, 所以可利用不同 ϵ_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, 利用不同介电常数的电介质作为电缆绝缘, 应使内层绝缘的 ϵ_r 大于外层绝缘的 ϵ_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。

二、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。电介质极化的基本形式有以下几种:

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。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的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

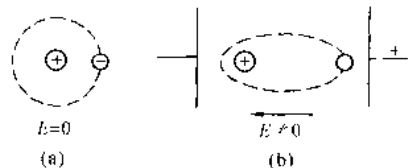


图 1-2 电子式极化

(a) 无外加电场; (b) 有外加电场

下将使电子的轨道相对于原子核产生位移, 从而使原子中正、负电荷的作用中心不再重合, 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) 电子式极化存在于所有电介质中。

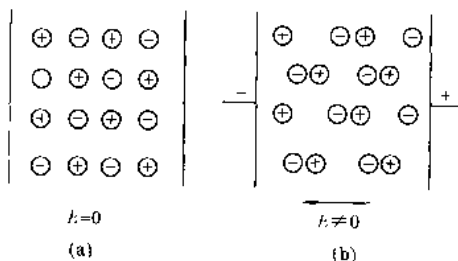


图 1-3 离子式极化

(a) 无外加电场; (b) 有外加电场

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

(2) 由于电子异常轻小, 因此电子式极化所需时间极短, 约 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。它在各种频率的交变电场中均能发生, 故 ϵ_r 不随频率而变化, 同时温度对这种极化的影响也极小。

(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, 因此称之为“无损极化”。

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。

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，亦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。

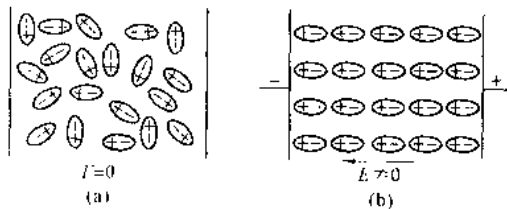


图 1-4 偶极子式极化

(a) 无外加电场；(b) 有外加电场

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向，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。

这种极化由于偶极子的结构尺寸远较电子或离子大，当转向时需要克服分子间的吸引力而消耗能量，因此属于有损极化，且极化时间较长，约为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ s，通常认为其极化响应速度在微波以下。所以，在频率不高，甚至在工频交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 ϵ_r 会随电源的频率而改变，频率增加， ϵ_r 减小，如图 1-5 所示。

温度对极性电介质的 ϵ_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 ϵ_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， ϵ_r 又随温度的升高而减小。

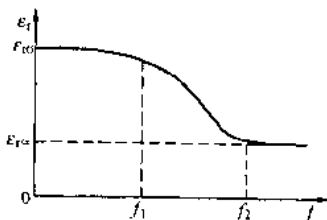


图 1-5 极性介质 ϵ_r 与频率的关系

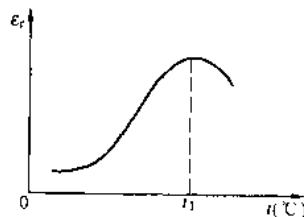


图 1-6 极性介质 ϵ_r 与温度的关系

顺便指出，我们能用微波炉加热食品就是由于食品中的水分子产生偶极子式极化吸收微波能量所致。

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