



普通高等教育
“十一五”国家级
规划教材



普通高等教育
电气工程与自动化类
“十一五”规划教材

PRINCIPLES OF
ELECTRICAL INSULATION TECHNOLOGY

电气绝缘技术基础

曹晓珑 钟力生 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

电气绝缘技术基础

主 编 曹晓珑 钟力生
参 编 徐 阳 刘 英 徐 曼
主 审 王寿泰 刘辅宜



机械工业出版社

本书是根据我国电气工程及其自动化专业大学本科教学改革的实践经验和
发展需求,在综合原电气绝缘与电缆技术专业多门课程内容的基础上编写而
成的。本书内容包括:电介质中的电场、电场作用下电介质的基本特性、
强场下的介电现象、介质的光导特性、生物与电磁场。本书着重论述现象
的物理概念。对于部分重要的结论,给出了简明的数学推演;结合工程实际
分析的需要,给出了一些重要参数的参考值。

本书可作为大学本科生教材,也可作为研究生及从事电工电子产品设计、
制造、试验以及电力系统设计、运行、维护技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气绝缘技术基础/曹晓珑,钟力生主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 12

普通高等教育“十一·五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-28659-2

I. 电… II. ①曹…②钟… III. 电气绝缘—高等学校—教材 IV. TM21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 239032 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华 版式设计:霍永明

封面设计:王洪流 责任校对:李秋荣 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2010 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15 印张·368 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-28659-2

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

全国高等学校电气工程与自动化系列教材 编审委员会

主任委员 汪樵生 浙江大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王兆安 西安交通大学

王孝武 合肥工业大学

田作华 上海交通大学

刘 丁 西安理工大学

陈伯时 上海大学

郑大钟 清华大学

赵光宙 浙江大学

赵 曜 四川大学

韩雪清 机械工业出版社

委 员 (按姓氏笔画排序)

戈宝军 哈尔滨理工大学

王钦若 广东工业大学

吴 刚 中国科技大学

张纯江 燕山大学

张晓华 哈尔滨工业大学

邹积岩 大连理工大学

陈庆伟 南京理工大学

夏长亮 天津大学

萧蕴诗 同济大学

韩 力 重庆大学

熊 蕊 华中科技大学

方 敏 合肥工业大学

白保东 沈阳工业大学

张化光 东北大学

张 波 华南理工大学

杨 耕 清华大学

陈 冲 福州大学

范 瑜 北京交通大学

章 兢 湖南大学

程 明 东南大学

雷银照 北京航空航天大学

序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度，改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同类型、不同层次的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教学委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这套教材基于“**加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新**”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

1. 适用性：结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法。注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

2. 示范性：力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

3. 创新性：在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

4. 权威性：本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富。组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、

资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有力保障。

此套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

此套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

汪植生 陈守时 郑大中

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书的基本内容已在多本优秀文献中进行过叙述，但新的时代背景和需求，会对教科书的编写提出新的要求。本书就是根据我国电气工程及其自动化专业大学本科教学改革的实践经验和需求，在综合原电气绝缘与电缆技术专业多门课程内容的基础上编写而成的。

从电磁场与物质相互作用的角度来看，电气绝缘技术的基本问题可分为两类：一类是涉及电介质中的电场；另一类是涉及电场中的电介质。本书的章节框架也据此而列。在各章中，着重论述了现象的物理概念，在简要叙述理论分析的同时，尽可能结合实际绝缘结构或现象进行讨论，以深化对理论和实际现象的认识；对于重要的结论，给出了简明的数学推演；结合工程实际分析的需要，也介绍了一些发展中的测试方法，给出了一些重要的参考数据，让学生能够贴近电气工程的实践学习这本教材。

改革开放30年来，我国的读者已经习惯于倾听不同的学术观点，并常以此为契机，开展新的学术研究。因此，本书对一些理论的叙述也注意介绍那些具有代表性的不同观点。电气与电子技术的发展，使电气绝缘理论的关注点也在发生着转移和变化。为此，本书对电气绝缘技术中常涉及的电介质的界面现象和表面放电、介质带电、光导介质、真空绝缘等，都作为独立的章节讨论。目前，传统电气科学与工程和生物科学与工程学科交叉正在形成，电气绝缘基础课程已经成为这两个学科交叉的一座桥梁。

本书共分9章，由西安交通大学曹晓珑、钟力生教授主编。其中，曹晓珑编写第1章电介质中的电场和第4章电介质的击穿；徐曼编写第3章电介质的电导和第6章电介质的界面与界面放电；刘英编写第2章电介质的极化与损耗和第7章电介质的带电；徐阳编写第5章局部放电；钟力生编写第8章光导电介质和第9章生物电介质。

本书由上海交通大学王寿泰教授和西安交通大学刘辅宜教授担任主审，他们对本书初稿提出了许多宝贵的意见，谨致以衷心的感谢。

由于本书涉及面广而我们水平有限，加之时间仓促，本书一定还存在不少错误和不妥之处，敬请广大读者予以批评指正。

编者
于西安

主要符号表

符号	定义	量纲
A	面积	m^2 (米 ²)
C	电容	F (法)
c	光在自由空间的传播速度	m/s
D	电通量密度	C/m^2 (库/米 ²)
E	电场强度	V/m (伏/米)
e	电子电荷	1.6×10^{-19} C (库)
F	力	N (牛)
f	频率	Hz (赫兹)
G	电导	S (西门子)
I, i	电流	A (安)
J	电流密度	A/m^2 (安/米 ²)
k	光波传播常数或波数, $k = 2\pi/\lambda$	m^{-1} (1/米)
L	电感, 自感	H (亨)
M	物质的量	mol (摩尔)
m	质量	kg (千克)
N_0	阿佛伽德罗常数	(6.02×10^{23})
n_0	载流子浓度	m^{-3} (米 ⁻³)
N_g	介质的群折射率	无
n	介质的折射率	无
P	压强; 功率	Pa (帕); W (瓦特)
Q, q	电荷量	C (库)
r	半径	m (米)
T	热力学温度	K (开尔文)
$\tan\delta$	介质损耗角正切	无
U	电压	V (伏)
u_0	势垒	J/mol (焦/摩尔)
V	光在介质中的传播相速度	m/s (米/秒)
V_g	光在介质中的传播群速度	m/s (米/秒)
v	速度; 光波频率	m/s (米/秒); Hz
W	能量	J (焦耳)
Z	电阻抗; 原子序数	Ω (欧); 无
α	电离系数; 极化率	无; $\text{F} \cdot \text{m}^2$ (法拉/米)
β	杨氏模量	Pa (帕)
γ	电导率	S/m (西门子/米)

(续)

符 号	定 义	量 纲
η	粘度;色散率	$N \cdot s/m^2$ (牛·秒/米 ²)
μ	迁移率;电偶极矩	$m^2/(V \cdot s)$ [米 ² /(伏·秒)];D(德拜)
ϵ_0	真空介电常数 8.85×10^{-12}	F/m(法/米)
ϵ	介电常数	F/m(法/米)
ϵ_r	相对介电常数	无
ϵ^*	复介电常数	F/m(法拉/米)
ϵ_r^*	相对复介电常数	无
λ	光波波长	m
σ	电荷面密度	C/m ² (库/米 ²)
ρ	电荷体密度	C/m ³ (库/米 ³)
ω	角频率	rad/s(弧度/秒)

目 录

序	
前言	
绪言	1
第1章 电介质中的电场	3
1.1 电场的特性	3
1.1.1 电场特性的描述	3
1.1.2 界面上的电场	4
1.2 电场计算	6
1.2.1 严格解法	6
1.2.2 间接法	10
1.2.3 分离变量法	12
1.2.4 保角变换法	15
1.2.5 电容网络法	16
1.3 绘制场图	17
1.3.1 模型法	17
1.3.2 计算机模拟	20
1.3.3 场图的描制	21
第2章 电介质的极化与损耗	24
2.1 电介质极化的宏观表征参数	24
2.1.1 电介质的介电常数	24
2.1.2 电介质的复介电常数	24
2.2 极化的基本类型	24
2.2.1 电子位移极化	24
2.2.2 离子位移极化	26
2.2.3 热离子极化	27
2.2.4 偶极子极化	29
2.2.5 界面极化	31
2.3 介质损耗	33
2.3.1 概念	33
2.3.2 介质损耗角正切的等效 电路表示	34
2.3.3 介质损耗对绝缘性能的影响	35
2.4 介电谱	35
2.4.1 介电频谱	35
2.4.2 介电温谱	36
2.4.3 极化与损耗的一般规律	37
2.4.4 时域谱	38
2.5 高介材料与低介材料	41
2.5.1 高介材料	41
2.5.2 低介材料	43
第3章 电介质的电导	46
3.1 气体介质的电导	47
3.1.1 气体中的载流子	47
3.1.2 气体中离子的迁移率	48
3.1.3 气体的强场电导	50
3.2 液体介质的电导	50
3.2.1 液体介质的离子电导	51
3.2.2 液体介质的电泳电导与华尔敦 定律	54
3.2.3 液体介质在强电场下的电导	55
3.3 固体介质的电导	56
3.3.1 固体介质的离子电导	56
3.3.2 电介质的能带模型	60
3.3.3 固体介质的电子电导	64
3.3.4 固体介质的表面电导	66
3.4 电接触特性与空间电荷限制电流	68
3.4.1 场助热电子发射——肖特基 效应	68
3.4.2 场致发射——隧道效应电流	69
3.4.3 空间电荷限制电流	70
3.4.4 电子雪崩电流	72
3.4.5 界面势垒控制电流	72
第4章 电介质的击穿	74
4.1 真空中的击穿	74
4.1.1 真空绝缘	74
4.1.2 电子发射	74
4.1.3 场发射引起的击穿	75
4.1.4 粒子引起的击穿	76
4.1.5 实际中的真空绝缘	76
4.1.6 真空绝缘实例	77
4.2 气体电介质的击穿	78
4.2.1 低压气体	78

4.2.2 高压气体	82	系统	137
4.2.3 冲击电压下的击穿	87	5.3.6 局部放电的其他检测法及其测试系统	139
4.3 液体电介质的击穿	93	5.4 局部放电测量的抗干扰技术	139
4.3.1 液体电介质	93	5.4.1 干扰的分类	139
4.3.2 液体电介质的本征击穿	93	5.4.2 抗干扰的主要方法	139
4.3.3 液体绝缘材料的击穿	94	第6章 电介质的界面与界面放电	142
4.3.4 电力变压器用液体绝缘	95	6.1 界面处的电场	142
4.4 固体电介质的击穿	97	6.1.1 界面垂直于电场的情况	142
4.4.1 固体电介质的本征击穿	97	6.1.2 界面平行于电场的情况	144
4.4.2 固体电介质的热击穿	98	6.1.3 界面与电场成其他角度	146
4.4.3 无机电介质材料的电击穿	99	6.1.4 复合界面	147
4.4.4 聚合物绝缘材料的电击穿	107	6.2 界面电场的均匀化	147
4.5 击穿的统计分析	110	6.2.1 均匀电极	148
4.5.1 击穿实验数据的特点	110	6.2.2 电缆连接器	149
4.5.2 韦布尔分布	110	6.2.3 介电常数均压	150
4.5.3 逐级升压试验	112	6.2.4 电容均压	151
4.5.4 带下限的韦布尔分布	112	6.2.5 电阻均压	152
4.5.5 置信区间	113	6.3 沿面放电	153
4.5.6 应用	113	6.3.1 气体中绝缘子的沿面放电	153
第5章 局部放电	115	6.3.2 真空中的固体表面	154
5.1 局部放电物理	115	6.4 界面放电	159
5.1.1 局部放电的定义及产生原因	115	6.4.1 树枝化放电	159
5.1.2 局部放电的机理	116	6.4.2 复合绝缘子的界面放电	160
5.1.3 局部放电导致材料劣化的基本形式	116	6.5 半导体器件的表面保护	162
5.1.4 局部放电导致材料劣化的物理过程	117	6.5.1 半导体器件的表面电场	162
5.2 局部放电的表征	121	6.5.2 表面电场与表面空间电荷区的测量	165
5.2.1 工频电压下局部放电的过程	121	6.5.3 表面保护材料的带电	165
5.2.2 局部放电的表征参数	124	第7章 电介质的带电	167
5.2.3 影响局部放电特性的诸因素	128	7.1 表面电荷	167
5.2.4 直流电压下的局部放电	130	7.1.1 静电的影响	167
5.2.5 冲击与冲击叠加工频电压下的局部放电	130	7.1.2 静电的机理	167
5.3 局部放电的测量原理和方法	132	7.1.3 静电的利用与抑制	168
5.3.1 局部放电的脉冲电流法及其测试系统	132	7.2 空间电荷	168
5.3.2 脉冲电流法测量系统的性能	135	7.2.1 固体介质中空间电荷的形成	168
5.3.3 电磁波耦合法	136	7.2.2 空间电荷的影响	169
5.3.4 局部放电的校正	137	7.3 油流带电	169
5.3.5 局部放电的声测法及其测试		7.3.1 油流带电的机理	170
		7.3.2 油流带电的测量	171
		7.4 固体介质带电的测量	175

7.4.1 总电荷量的测量	175	第9章 生物电介质	207
7.4.2 面电荷密度的测量	176	9.1 生物体中的电磁现象	207
7.4.3 空间电荷的测量	180	9.2 生物材料各结构层次的介电特性	208
7.4.4 空间电荷的测量实例	191	9.2.1 生物体中水的介电特性	208
第8章 光导电介质	193	9.2.2 稀释电解质溶液的介电特性	209
8.1 光在均匀介质中的传播	193	9.2.3 生物大分子的介电特性	210
8.1.1 理想绝缘介质中的光场	193	9.2.4 细胞及细胞膜	214
8.1.2 介质对光传播的影响——折射率	194	9.2.5 生物组织的介电特性	215
8.1.3 群速度与群折射率	196	9.3 生物电磁效应	216
8.2 电介质的光频极化与色散	197	9.3.1 直流均匀场作用——细胞电泳	217
8.2.1 光频电子谐振极化	198	9.3.2 电流控制组织再生	218
8.2.2 光频离子谐振极化	199	9.3.3 交流非均匀场作用——介电电泳	220
8.2.3 电介质的光频色散	200	9.3.4 微波的热效应	222
8.3 电介质的光吸收与散射	201	9.4 低频高压电磁场的影响	224
8.3.1 介质的本征吸收	202	参考文献	226
8.3.2 介质的本征散射	203		
8.4 电介质的光子禁带效应	204		
8.5 电介质的电光效应	205		

绪 言

自从有了电，绝缘就相伴而生。电气绝缘技术研究的目的不外两个方面，一个是如何把现有的材料充分合理应用，另一个是如何开发出满足要求的新材料。

在 20 世纪 30 年代，电气设备的水平不高，绝缘似乎只起一种“静止和消极”的作用，并不占有重要地位。当时的电气绝缘设计还不过是一种粗略的估计而已。在 20 世纪 40 年代以后，由于高电压、高频和高温技术等各种新技术的发展，对电气设备提出了较高的要求，而这些要求中很多都是绝缘问题，以致绝缘变成了电气设备中最难处理的薄弱环节。到了 20 世纪的 50 年代，330~400kV 等级的输电线路出现后，在变压器、套管、电器和绝缘子领域提出了许多非常严重的绝缘问题。例如，一个高压变压器的套管，必须要求具有极高的耐电强度和很低的介质损耗，它的下部浸在 80℃ 以上的变压器油中，而上端又暴露在恶劣的大气条件下，还要求具有足够的机械强度以支持风荷作用下的引接线并抵抗短路电流的巨大电力，同时还要求能安全可靠地工作 30 年。电气产品的经济技术指标，电力系统运行的安全性和可靠性等各方面，几乎都取决于绝缘的可靠性。在这样的客观要求下，绝缘技术已经发展成为一门十分重要的学科。

从 20 世纪末到现在，输电线路的电压等级已达到交流 1000kV 和直流 ± 800 kV；单台发电机的容量达到 1000MW；电力电子变频技术要求电力绝缘的耐受频率提高到数千 Hz；核电、风电、航空航天工业等技术的发展把电气绝缘的使用条件正在推向极端。不仅如此，人们对电气设备的技术性、经济性和环境友好要求在决策中的权重排序也在发生着重要的变化。绿色环保以及可持续发展已成为人类的共同追求。绝缘技术学科背负着时代的要求正在进入一个新的发展阶段。

目前，电气绝缘领域内的研究方法包括三个方面。一个是理论上的分析或数学推导，得到的结论进一步用实验来验证。人们对绝缘理论的认识还是有限的，因此理论分析中所假设的条件和所获得的结论常常与实际情况不尽相同，以致工程实践上的意义不足。另一种研究方法是依靠试验得出若干实验规律，然后应用与工程实践。但是这种方法所得规律往往缺乏内在的联系和理论上的阐释，很难做出进一步的推断，因此在应用中有很大的局限性。随着计算机应用技术的发展，一种新的研究手段在电气绝缘技术领域得到应用，这就是计算机模拟方法。这种方法目前已经能够对绝缘中的电场、热场等场的问题用数值方法求解，也可以进行一些简单的材料微观结构与其宏观性能的关系的计算分析。这种方法尚处在发展阶段。这三种方法，各有长短，相辅相成。为此在学习这门课程时，必须逐步培养理论联系实际的能力和判断能力。只有具有这样一些能力，绝缘技术工作者才能正确处理绝缘技术中材料、结构、制造、运行等错综复杂的矛盾并做出最有利的决策；也只有这样，才能不断发展和充实绝缘技术基础这门课程。

20 世纪 90 年代，我国高等教育进行了又一次较大幅度的专业目录调整。原来的电机与电器、发电厂与电力系统、工业企业自动化、高电压技术、电工材料与电气绝缘技术等专业，合并成为一个电气工程及其自动化专业。人才培养的目标从专才型转向通才型。课程教材作为教学的重要构成要素之一，也应与之紧密配合，调整内容，适应需求。不仅如此，近

近年来人们对绝缘基础认识的着眼点也发生了不小的改变，比如，对绝缘材料的研究，现在更加注重从材料学而不只是化学的角度来认识。通过“电气绝缘技术基础”课程的学习，学生可以了解电气绝缘技术研究的一些基本内容；掌握绝缘中电场的基本特性、分布规律和计算的主要方法；掌握电场作用下的绝缘或电介质的基本性能和表征方法；掌握强电场作用下绝缘或电介质的现象和行为；明确光频下介质的光导特性；了解电磁场与生物电介质相互作用的概念。

本书共分9章，第1章是电介质中的电场，第2章是电介质的极化与损耗，第3章是电介质的电导，第4章是电介质的击穿，第5章是局部放电，第6章是电介质的界面与界面放电，第7章是电介质的带电，第8章是光导电介质，第9章是生物电介质。全书内容基本反映了当前对电气绝缘技术基础认识的水平。随着理论的深入和实践的发展，以及环境友好和可持续发展的要求，电气绝缘技术将面临崭新的发展时期，本书在这些发展趋势上也想尽可能地提供一些启示。

第 1 章 电介质中的电场

1.1 电场的特性

1.1.1 电场特性的描述

对于不受变化磁场影响的静电场，可用三个算子来描述其场特性。

第一

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (1-1)$$

或者

$$\text{rot} \mathbf{E} = 0 \quad (1-2)$$

积分形式为

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0 \quad (1-3)$$

式 (1-1) ~ 式 (1-3) 表示出这样的事实：场中一点 x 处的电位 U_x 与到达点 x 的路径无关。这与电磁场不同，沿着变化磁场的环路积分会导致电位升高。

第二

$$\mathbf{E} = -\nabla U \quad (1-4)$$

或

$$\mathbf{E} = -\text{grad} U \quad (1-5)$$

即场中任意一点的 \mathbf{E} 都指向电位 U 的最大衰减方向，其大小等于单位长度上电位 U 的减小。

第三

$$\nabla \mathbf{D} = \rho \quad (1-6)$$

或

$$\text{div} \mathbf{D} = \rho \quad (1-7)$$

式中， \mathbf{D} 为电通量密度， $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ ； ε 为介电常数（电容率）， $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ， ε_0 为真空介电常数（真空电容率）， $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ， ε_r 为相对介电常数（相对电容率）； ρ 为空间电荷密度。

其积分形式

$$\iint D_n dA = q \quad (1-8)$$

D_n 的面积分等于该面所包封的电荷量。如果 $q = 0$ ，进出该包封面空间的电场线是相同的。如果 $q \neq 0$ ，在电荷 q 上就会有电场线增加。作为一个实例，下面来看如图 1-1 所示的带电电极表面的情形。

图 1-1 中， \mathbf{D} 在表面积 A 上引起了表面电荷 q/A ，即

$$\begin{aligned} q &= DA \\ &= \varepsilon EA \end{aligned}$$

故

$$E = \frac{1}{\varepsilon} \frac{q}{A}$$

如果空气 ($\varepsilon_r = 1$) 中的电场强度, 简称场强, $E = 1 \text{ kV/mm}$, 此时电极上的面电荷量约为 $9 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 。

第二与第三算子结合就有

$$\nabla^2 U = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1-9)$$

这就是泊松 (Poisson's) 方程。若空间电荷为零, 即

$$\nabla^2 U = 0 \quad (1-10)$$

这即是拉普拉斯 (Laplace) 方程, 高电压工程中的许多电场都可用该方程描述。在直角坐标系中, 该方程可表示为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1-11)$$

1.1.2 界面上的电场

在两种介质的界面处, 电场的分布与在均匀的统一介质中不同, 这对绝缘结构的设计是很重要的。电场在边界发生的改变可运用拉普拉斯场的算子来推出。

1. 电场强度与界面平行

应用算子

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

或

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0$$

现在在介电常数分别为 ε_1 和 ε_2 的两种电介质构成的界面处, 设取一无限小的闭合回线, 如图 1-2 所示。闭环积分成为

$$E_{1t} \Delta x - E_{2t} \Delta x = 0$$

因此

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (1-12)$$

这就是说电场强度的切向分量是连续的。

2. 电场强度垂直于界面

应用算子

$$\nabla D = \rho$$

或

$$\iint D_n dA = 0$$

设有一无限小封闭面包围了这两种介质的一处界面, 如图 1-3 所示。由表面积分得到

$$D_{n1} dA - D_{n2} dA = 0$$

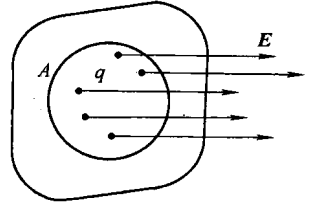


图 1-1 带电电极表面上形成的电荷量正比于局部处的电场强度: $q/A = \varepsilon E$

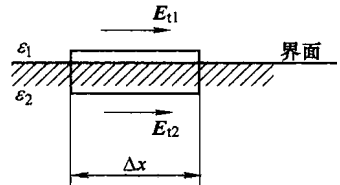


图 1-2 界面处的电场: 两侧切向分量相等

于是

$$D_{n1} = D_{n2} \quad (1-13)$$

这表明电通量密度的法向分量是连续的。

由于 $D = \epsilon E$ ，故有

$$\frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (1-14)$$

电场强度的法向分量反比于所在介质的介电常数。

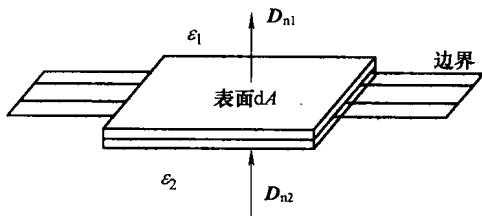


图 1-3 界面处的电场：法向分量的改变反比于介电常数

3. 电场强度与界面成任意方向

对比通过切向分量和法向分量推导出结论，如图 1-4 所示。

设一电场 E 的电场线与法向夹角为 α_1 ，则

$$\tan \alpha_1 = \frac{G_1}{F_1}$$

在界面的另一侧

$$\tan \alpha_2 = \frac{G_2}{F_2}$$

式中

$$G_2 = G_1, \quad F_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} F_1$$

由此

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (1-15)$$

这就是电场线的折射定律。

由于等电位线垂直于电场线，因此它们也发生折射。同样可以应用该折射定律，但这时的角度应从界面量起，如图 1-5 所示。如果 $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ， ϵ_1 中的等位线就会折向界面。

当气体中的等位线进入其他介质时，就发生这种情形。一般地说高介电常数的介质在界面处会将等位线推开。低介电常数介质的例子有空气 ($\epsilon_r = 1$) 或油 ($\epsilon_r = 2.2$)。高介电常数介质可以是环氧树脂 ($\epsilon_r = 4.5$) 等。高介电常数材料在界面处，或将等位线推向低介电常数材

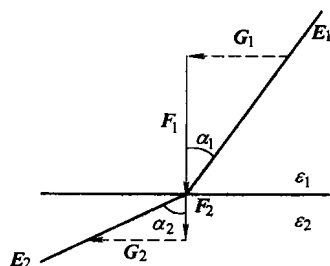


图 1-4 界面处的电场：电场线按

$$\tan \alpha_2 = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \tan \alpha_1 \text{ 发生折射}$$

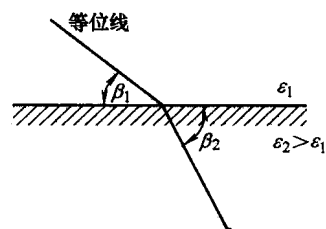


图 1-5 界面处的电场：等位线按

$$\tan \beta_2 = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \tan \beta_1 \text{ 折射}$$