



普通高等教育“十五”国家级规划教材

清华大学精品课程配套教材

国家精品课程配套教材

清华大学电气工程系列教材

## 高电压工程(第2版)

# High Voltage Engineering (Second Edition)

梁曦东 周远翔 曾嵘 编著

Liang Xidong Zhou Yuanxiang Zeng Rong

谈克雄 陈昌渔 主审

Tan Kexiong Chen Changyu

清华大学出版社



普通高等教育“十五”国家级规划教材

清华大学精品课程配套教材

国家精品课程配套教材

清华大学电气工程系列教材

# 高电压工程 (第2版)

High Voltage Engineering  
(Second Edition)

梁曦东 周远翔 曾嵘 编著

Liang Xidong Zhou Yuanxiang Zeng Rong



清华大学出版社

## 内 容 简 介

本书介绍了高电压与绝缘技术领域的气体、固体及液体电介质的放电过程、绝缘特性,以及影响放电的多种因素;高电压、高场强下的绝缘特点,电气设备内绝缘与外绝缘的基本特性;多种高电压的产生方法、产生装置、测量方法和抗干扰措施;雷电与操作冲击过电压发生的原理、特点、防护措施,以及绝缘配合。

本书是为高等学校电气工程及其自动化专业编写的专业基础课教材,采用了最新的国家标准,也可供电力、电工及其他行业的高电压工作者参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

高电压工程/梁曦东,周远翔,曾嵘编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2015

清华大学电气工程系列教材

ISBN 978-7-302-39279-8

I. ①高… II. ①梁… ②周… ③曾… III. ①高电压—高等学校—教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 024414 号

责任编辑:庄红权

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17.75 彩 插:1 字 数:428千字

版 次:2003年9月第1版 2015年3月第2版 印 次:2015年3月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:39.80元

---

产品编号:061709-01

## 清华大学电气工程系列教材编委会

主 任 王赞基

编 委 邱阿瑞 梁曦东 夏 清  
袁建生 周双喜 谈克雄  
王祥珩

# 序

“电气工程”一词源自英文的“Electrical Engineering”。在汉语中，“电工程”念起来不顺口，因而便有“电机工程”、“电气工程”、“电力工程”或“电工”这样的名称。20世纪60年代以前多用“电机工程”这个词。现在国家学科目录上已经先后使用“电工”和“电气工程”作为一级学科名称。

大约在第二次世界大战之后出现了“电子工程”(Electronic Engineering)这个词。之后，随着科学技术的迅速发展，从原来的“电(机)工程”范畴里先后分划出“无线电电子学(电子工程)”“自动控制(自动化)”等专业，“电(机)工程”的含义变窄了。虽然“电(机、气)工程”的专业含义缩小到“电力工程”和“电工制造”的范围，但是科学技术的发展使得学科之间的交叉、融合更加密切，学科之间的界限更加模糊。“你中有我，我中有你”是当今学科或专业的重要特点。因此，虽然高等院校“电气工程”专业的教学主要定位于培养与电能的生产、输送、应用、测量、控制等相关科学和工程技术的专业人才，但是教学内容却应该有更宽广的范围。

清华大学电机系在1932年建系时，课程设置基本上仿效美国麻省理工学院电机工程系的模式。一年级学习工学院的共同必修课，如普通物理、微积分、英文、国文、画法几何、工程画、经济学概论等课程；二年级学习电工原理、电磁测量、静动力学、机件学、热机学、金工实习、微分方程及化学等课程；从三年级开始专业分组，电力组除继续学习电工原理、电工实验、测量外，还学习交流电路、交流电机、电照学、工程材料、热力工程、电力传输、配电工程、发电所、电机设计与制造以及动力厂设计等选修课程。西南联大时期加强了数学课程，更新了电工原理教材，增加了电磁学、应用电子学等主干课程和电声学、运算微积分等选修课程。抗战胜利之后又增设了一批如电子学及其实验，开关设备、电工材料、高压工程、电工数学、对称分量、汞弧整流器等选修课程。

1952年院系调整之后，开始了学习苏联教育模式的教学改革。电机系以莫斯科动力学院和列宁格勒工业大学为模式，按专业制定和修改教学计划及教学大纲。这段时期教学计划比较注重数学、物理、化学等基础课，注重电工基础、电机学、工业电子学、调节原理等技术基础课，同时还加强了实践环节，包括实验、实习和“真刀真枪”的毕业设计等。但是这个时

期存在专业划分过细,工科内容过重等问题。

改革开放之后,教学改革进入一个新的时期。为了适应科学技术的发展和人才市场从计划分配到自主择业转变的需要,清华大学电机系在 20 世纪 80 年代末把原来的电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术、电机及其控制等专业合并成“宽口径”的“电气工程及其自动化”专业,并且开始了更深刻的课程体系的改革。首先,技术基础课的课程设置和内容得到大大的拓展。不但像电工基础、电子学、电机学这些传统的技术基础课的教学内容得到更新,课时有所压缩,而且像计算机系列课、控制理论、信号与系统等信息科学的基础课程以及电力电子技术系列课已经规定为本专业必修课程。此外,网络和通信基础、数字信号处理、现代电磁测量等也列入了选修课程。其次,专业课程设置分为专业基础课和专业课两类,初步完成了从“拼盘”到“重组”的改革,覆盖了比原先 3 个专业更广泛的领域。电力系统分析、高电压工程和电力传动与控制等成为专业基础课,另外,在专业课之外还有一组以扩大专业知识和介绍新技术、新进展为主的任选课程。

虽然在电气工程学科基础上新产生的一些研究方向先后形成独立的学科或专业,但是曾经作为第三次工业革命三大动力之一的电气工程,其内涵和外延都会随着科学技术和社会经济的发展而发展。大功率电力电子器件、高温超导线材、大规模互联电网、混沌动力学、生物电磁学等新事物的出现和发展等,正在为电气工程学科的发展开辟新的空间。教学计划既要有相对的稳定,又要与时俱进、不断有所改革。相比之下,教材的建设往往相对滞后。因此,清华大学电机系决定分批出版电气工程系列教材,这些教材既反映近 10 多年来广大教师积极进行教学改革已经取得的丰硕成果,也表明我们在教材建设上还要不断努力,为本专业和相关专业的教学提供优秀教材和教学参考书的决心。

这是一套关于电气工程学科的基本理论和应用技术的高等学校教材。主要读者对象为电气工程专业的本科生、研究生以及在本专业领域工作的科学工作者和工程技术人员。欢迎广大读者提出宝贵意见。

清华大学电气工程系列教材编委会

2003 年 8 月于清华园

# 前言

(第2版)

《高电压工程》(第1版)教材出版使用至今已经超过10年,这10年正是我国电力工业发展最快的阶段,装机容量、发电量跃居世界首位,发电量、用电量等指标的增长率甚至可以用空前绝后来形容。十年来我国的电压等级连续迈上新台阶,交流1000 kV和直流±800 kV特高压分别成为世界上目前投入商业运行的最高交、直流电压等级。电力工业的大发展,有力地支撑了国民经济的快速前行。

我国的电力工业正在快速走向世界前列,必然要求高校的人才培养能够适应这一变化;在超高压、特高压输变电工程中大量采用的新技术、新标准也应该及时在教学中有所体现。在大学的教学中,学科与行业的结合是各国面临的共同课题。近年来,每次国际大电网委员会(CIGRE)都安排有电气工程教育(electrical power engineering education, EPEE)的专题会议。在2012年8月CIGRE的EPEE专题会议上,笔者以清华大学电机系电气工程教育的课程体系为例,交流了我们的探索和体会;2014年8月CIGRE EPEE的主题更加明确表述为“*How to Bridge the Gap Between Industry and Universities*”。

这一问题可以从不同的角度进行思考、在不同的课程中进行尝试,需要在教学过程中结合不同的内容进行探索。大学的课程可划分为公共基础课、技术基础课、专业基础课和专业课四个层次,大体上对应着大学一年级到四年级的主要学习特点,反映着学生接受高等教育、掌握专业知识的层层递进的过程。“高电压工程”是本科生“电气工程及其自动化”大专业的主要专业基础课之一,我们对该课程的要求可以归纳为打下基础、掌握特点和了解行业三个方面。希望学生通过本课程的学习,能够对高电压与绝缘技术二级学科有全面的认识,大体掌握其学科基础、学科特点与主要内容,并对相关行业的技术发展、技术政策和技术标准有所认识、有所了解。

这10年来,融入行业前沿的高电压工程专业基础课课程改革先后获得清华大学和北京市教学成果一等奖,“高电压工程”课程先后荣获清华大学、北京市和国家精品课称号,教学效果连续多年受到同学们的广泛好评,这一点可以说是同学们对我们在教学上进行持续探索所给予的最大的鼓励。

本次修订,将原先高电压产生与测量的4章进行了适当的精简,修改、合并为第6章和

第7章,将一部分更详细的内容留待后续课程讲解;根据电力系统日益增多的新需求,以及多年来我们在教学中感到需要增强的内容,加强了电场分布与调控、电介质材料、直流高电压、SF<sub>6</sub>绝缘、接地、绝缘配合,改写了污秽绝缘放电、电介质的性能,新增了空间电荷、电场测量、色谱分析、断路器的开断与关合、特快速瞬态过电压等相关内容;为便于读者了解各国高电压实验室的基本情况,重写了附录B;为便于读者复习和整理,本次修订大大增加了习题,并在每章开头梳理了核心概念。由于十年来相关的国家标准、行业标准都经历了较大幅度的修订,本教材按照最新的标准对相关内容进行了必要的修改,电路图和符号也采用了最新国家标准的表述方式。

本教材有幸承蒙谈克雄教授和陈昌渔教授进行了认真的审阅。两位老教授不仅提出了很多宝贵的、有建设性的修改意见,并且提供了许多有价值的参考资料。博士后王家福、助理研究员庄池杰,以及研究生阎志鹏、仵超、高岩峰、黄建文、黄猛进行了大量的数据、图片、曲线的查证、编辑、校对工作,在此一并致以衷心的感谢。

本次改版,梁曦东负责修订了第0~3章、附录,编写了10.1节;周远翔负责修订了第4~7章;曾嵘负责修订了第8~10章,并与周远翔共同编写了7.12节。限于编者的水平,书中难免仍有不当之处,敬请广大读者批评指正。

梁曦东

2014年12月于清华园



# 前言

(第1版)

为适应科学技术的发展以及社会需求的变化,1989年清华大学电机系开始了拓宽专业口径的教学改革,将原电力系统、高压和电机3个专业合并成为一个宽口径的“电气工程及其自动化”大专业。为此,1990年将原先仅对高压专业本科生开设的“高电压绝缘”与“高电压试验技术”两门课程合并,推出了面向大专业全体学生的“电绝缘与测试技术”,关志成、陈昌渔编写了讲义。1994年进一步将“电力系统过电压”的有关内容也结合进来,改为“高电压工程”,梁曦东、关志成、陈昌渔于1995年编写了讲义,1998年、2002年对讲义又做了一些修订,至今已向10届学生授课。

以往的课程体系把课程分为公共基础课、技术基础课和专业课,把高电压领域的内容划分为多门课程,都定位在专业课上,追求专业掌握程度,从而造成内容过细,占用大量课时的局面,难以满足面向电气工程一级学科领域的学生既掌握基本概念并了解新技术,又减少学时的需要。

清华大学电机系进行教学改革时将课程分为公共基础课、技术基础课、专业基础课和专业课4个层次。公共基础课侧重于掌握数理化等基本内容;技术基础课侧重于掌握电类基本内容;专业基础课定位于掌握二级学科主要基础;专业课则要求掌握具体实用的技术内容。“高电压工程”作为“电气工程及其自动化”大专业的主要专业基础课之一,是学生掌握“高电压与绝缘技术”二级学科基础知识的主要渠道。另有若干门与高电压有关的专业课程供学生进一步选修。因此,本书力求把基本物理概念及物理过程介绍清楚,对新技术做适当介绍,对典型实用性数据进行必要的扩充,对电气设备设计及中间推导过程则大量删减,力求兼顾基本概念和实际应用两个方面,尽可能面向不同需求的读者,满足作为教材及教学参考书两方面的要求,也可按照不同教学学时的要求方便地选择教学内容。

我们对教学活动的理解是:教学活动应当是学生在教师的引导下主动探索知识的过程,而不是学生在教师的“灌输”下被动地“记住”某些知识的过程。不同的课程各有特点,我们力争使学生在学习某课程后能够掌握相应学科研究问题、解决问题的特有方式。在教学过程中我们结合新技术、新应用的研究成果及行业发展,设置了大量的项目训练内容,进一

步拓宽了课程范围,使学生及时掌握前沿知识,开阔思路与眼界,把握行业背景及发展方向,并启发和培养学生从事科学研究的兴趣与能力。

本书绪论、第 1~4 章、第 10~12 章由梁曦东编写,第 5~9 章由陈昌渔编写,周远翔参加了大部分章节的修改与讨论。

限于编者水平,书中难免不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2003 年 3 月于清华园

# 目 录

<b>第 0 章 绪论</b> .....	1
0.1 高压输电的发展 .....	1
0.1.1 高压输电的出现与电压等级的提高.....	1
0.1.2 交流特高压输电.....	2
0.1.3 远距离大容量直流输电.....	2
0.1.4 节约输电走廊与环境友好的输电方式.....	3
0.1.5 基于大容量电力电子技术的交直流输电.....	4
0.2 中国电力工业的现状与展望 .....	4
0.2.1 发电量与装机容量.....	4
0.2.2 电压等级、电网结构与输电线路 .....	4
0.2.3 电源结构与可再生能源发电.....	5
0.2.4 输变电装备.....	6
0.2.5 电网建设与长期缺电.....	6
0.2.6 中国电力工业的展望.....	7
0.3 高电压、高场强下的特殊问题.....	9
0.4 高电压下的特殊现象及其应用.....	10
<b>第 1 章 气体放电过程的分析</b> .....	12
1.1 带电质点与气体放电.....	12
1.1.1 气体放电的主要形式 .....	12
1.1.2 带电质点的产生 .....	13
1.1.3 带电质点的消失 .....	15
1.2 低气压下均匀电场自持放电的汤逊理论和巴申定律.....	16
1.2.1 汤逊理论 .....	16
1.2.2 巴申定律与均匀电场击穿电压 .....	20
1.2.3 汤逊放电理论的适用范围 .....	22

1.3	高气压下均匀电场自持放电的流注理论	23
1.3.1	空间电荷对电场的畸变	23
1.3.2	流注的形成	24
1.3.3	均匀电场中的自持放电条件	25
1.3.4	流注理论对放电现象的解释	26
1.4	高气压下不均匀电场气体击穿的发展过程	27
1.4.1	电场不均匀程度的划分	27
1.4.2	极不均匀电场气体的电晕放电	27
1.4.3	极不均匀电场的极性效应	31
1.4.4	长间隙击穿过程	33
1.4.5	稍不均匀电场的自持放电条件与极性效应	35
	练习题	36
<b>第2章</b>	<b>不同电压形式下空气的绝缘特性</b>	<b>38</b>
2.1	电场分布的分析与电场调整	38
2.1.1	电场的分布与典型电极结构	39
2.1.2	电场分布的数值计算	41
2.1.3	电极表面局部电场的调整	42
2.2	持续作用电压下空气的绝缘特性	45
2.2.1	均匀电场中空气间隙的绝缘特性	45
2.2.2	稍不均匀电场中空气间隙的绝缘特性	45
2.2.3	极不均匀电场中空气间隙的绝缘特性	47
2.3	雷电冲击电压下空气的绝缘特性	50
2.3.1	雷电冲击电压的形成与标准波形	50
2.3.2	放电时延	55
2.3.3	50%放电电压	55
2.3.4	冲击系数与伏秒特性	56
2.4	操作冲击电压下空气的绝缘特性	59
2.4.1	操作冲击电压的形成与波形	59
2.4.2	操作冲击放电电压的特点	60
2.5	提高气体间隙击穿电压的措施	63
2.5.1	改进电极形状	64
2.5.2	利用空间电荷	64
2.5.3	极不均匀场中屏障的采用	65
2.5.4	固体绝缘覆盖层	67
2.5.5	高气压的采用	67
2.5.6	高真空的采用	68
2.5.7	高电气强度气体 SF <sub>6</sub> 的采用	69
	练习题	76

<b>第3章 高压外绝缘及沿面放电</b> .....	77
3.1 大气条件对空气间隙放电的影响 .....	77
3.1.1 大气状态对放电电压的影响 .....	77
3.1.2 海拔高度对放电电压的影响 .....	81
3.2 高压外绝缘及高压绝缘子 .....	82
3.2.1 外绝缘及其工作条件 .....	82
3.2.2 绝缘子的分类及基本要求 .....	83
3.3 绝缘子的沿面放电 .....	86
3.3.1 均匀电场中气体沿固体电介质表面的放电 .....	87
3.3.2 极不均匀电场具有弱垂直分量时的沿面放电 .....	87
3.3.3 极不均匀电场具有强垂直分量时的沿面放电 .....	87
3.3.4 沿面闪络电压的影响因素与提高措施 .....	90
3.4 绝缘子的雨中放电 .....	93
3.4.1 绝缘子的淋雨闪络 .....	93
3.4.2 绝缘子的人工淋雨试验方法 .....	94
3.4.3 提高绝缘子湿闪电压的措施 .....	94
3.5 绝缘子的污秽放电 .....	95
3.5.1 绝缘子污秽闪络的特点 .....	95
3.5.2 从积污到污闪 .....	96
3.5.3 绝缘子的污秽试验与污闪特性 .....	97
3.5.4 污秽地区绝缘子的配置 .....	102
3.5.5 绝缘子的覆冰闪络 .....	103
3.5.6 提高瓷和玻璃绝缘子污闪电压的方法 .....	104
3.5.7 硅橡胶复合绝缘子及有机外绝缘 .....	104
练习题 .....	106
<b>第4章 液体、固体电介质的电气性能</b> .....	108
4.1 电介质电气性能的基本概念 .....	108
4.1.1 电介质物质结构基本知识 .....	108
4.1.2 电介质电气性能的划分 .....	109
4.1.3 常见液体和固体电介质的电气性能参数 .....	110
4.2 液体、固体电介质的极化、电导与损耗 .....	111
4.2.1 电介质的极化及相对介电常数 .....	111
4.2.2 电介质的电导、电阻及电导率、电阻率 .....	114
4.2.3 电介质中的能量损耗及电介质损耗角正切 .....	118
4.3 液体电介质的击穿 .....	120
4.3.1 液体电介质的击穿理论 .....	120
4.3.2 影响液体电介质击穿电压的因素 .....	122
4.3.3 提高液体电介质击穿电压的方法 .....	124
4.4 固体电介质的击穿 .....	125
4.4.1 固体电介质的击穿过程 .....	125

4.4.2	影响固体电介质击穿电压的主要因素	128
4.5	电介质中的空间电荷	129
4.6	组合绝缘	130
4.6.1	组合绝缘中的电场分布与调整	130
4.6.2	组合绝缘的电气性能	132
4.7	电介质的其他性能	134
	练习题	136
<b>第5章</b>	<b>绝缘检测和诊断</b>	<b>138</b>
5.1	基本概念	138
5.2	绝缘电阻与泄漏电流的测量	140
5.2.1	工作原理	140
5.2.2	测量绝缘电阻与吸收比的方法	141
5.2.3	泄漏电流的测量	142
5.3	电介质损耗角正切的测量	143
5.3.1	西林电桥基本原理	144
5.3.2	反接法的西林电桥	145
5.3.3	存在外界电磁场干扰时的测量	145
5.4	局部放电的测量	147
5.4.1	测量局部放电的几种方法	147
5.4.2	测量局部放电的脉冲电流法	147
5.4.3	脉冲电流法的基本回路和检测阻抗	149
5.4.4	脉冲电流法的测量仪器及其校订	151
5.4.5	实施 PD 测量的其他技术问题	152
5.5	绝缘油中溶解气体的色谱分析	153
5.6	耐压试验	155
5.6.1	交流耐压试验	155
5.6.2	直流耐压试验	156
5.6.3	雷电冲击耐压试验	156
5.6.4	操作冲击耐压试验	157
5.7	各种预防性试验方法的特点总结	158
5.8	绝缘的在线监测	158
5.8.1	$\tan\delta$ 的在线监测	159
5.8.2	局部放电的在线监测	159
	练习题	159
<b>第6章</b>	<b>高电压和冲击大电流的产生</b>	<b>161</b>
6.1	交流高电压的产生	161
6.1.1	概述	161
6.1.2	试验变压器的电压与容量	163
6.1.3	串级高压试验变压器	166

6.1.4	试验变压器容性试品上的电压升高	168
6.1.5	高压串联谐振试验设备	169
6.2	直流高电压的产生	171
6.2.1	半波整流直流装置	172
6.2.2	直流输出电压和纹波因数	172
6.2.3	限流电阻与硅堆选择	173
6.2.4	倍压直流与串级直流装置	174
6.3	冲击高电压的产生	176
6.3.1	冲击电压发生器基本原理	176
6.3.2	放电回路的近似计算	178
6.3.3	考虑回路电感的近似计算	180
6.3.4	冲击电压发生器放电回路计算举例	181
6.3.5	用高压变压器产生操作冲击电压	181
6.4	冲击大电流的产生	182
6.4.1	冲击电流发生器的功用与电流波形的规定	182
6.4.2	冲击电流发生器的基本原理	183
6.4.3	冲击电流发生器的结构	185
	练习题	185
<b>第7章</b>	<b>高电压的测量</b>	<b>188</b>
7.1	高电压测量基本概念	188
7.1.1	概论	188
7.1.2	高电压测量系统	188
7.1.3	交直流高电压的测量	189
7.1.4	冲击高电压的测量	190
7.2	球隙放电法测量高电压	191
7.2.1	测量球隙	191
7.2.2	球隙法测量交直流高电压	192
7.2.3	球隙法测量冲击高电压	193
7.2.4	球隙法测量高电压的优缺点	194
7.3	高压静电电压表	195
7.4	分压器	195
7.4.1	分压器的作用和要求	195
7.4.2	分压器原理与分类	196
7.5	电阻分压器	197
7.5.1	高压直流电阻分压器	197
7.5.2	高压交流电阻分压器	200
7.5.3	测量冲击电压的电阻分压器	200
7.6	高压电容分压器	203
7.6.1	电容分压器的构成	203

7.6.2	高压交流电容分压器	205
7.6.3	测量冲击电压的电容分压器	206
7.7	阻尼式电容分压器	207
7.8	微分积分测量系统	208
7.9	对冲击电压测量系统响应特性的要求	209
7.10	测量冲击高电压的示波器	209
7.11	利用光电技术测量高电压	210
7.12	高电压电场测量	211
7.13	高电压测量系统中弱电仪器的抗干扰措施	212
7.13.1	电磁干扰来源	212
7.13.2	干扰抑制措施	214
	练习题	215
<b>第8章</b>	<b>传输线的波过程</b>	217
8.1	波阻抗	217
8.2	波的折射、反射与衰减、变形	220
8.2.1	末端开路时的折反射	221
8.2.2	末端短路时的折反射	221
8.2.3	末端接集中负载时的折反射	221
8.2.4	波的衰减与变形	223
8.3	通过并联电容与串联电感的波过程	224
8.3.1	彼德逊法则	224
8.3.2	通过并联电容的波过程	224
8.3.3	通过串联电感的波过程	225
	练习题	225
<b>第9章</b>	<b>雷电过电压及其防护</b>	227
9.1	雷电参数	227
9.1.1	雷电流的波形和极性	227
9.1.2	雷电流的幅值、陡度、波前、波长	227
9.1.3	雷暴日、雷电小时及落雷密度	228
9.1.4	雷电定位系统对雷电的测量	229
9.2	防雷保护的基本措施	229
9.2.1	避雷针	230
9.2.2	避雷线	231
9.2.3	避雷器	232
9.2.4	接地装置	235
9.3	架空输电线路的雷电过电压	237
9.3.1	概述	237
9.3.2	感应过电压	238
9.3.3	雷击导线过电压	239



9.3.4	雷击塔顶过电压	239
9.3.5	雷击跳闸率	240
9.4	发电厂、变电站的雷电过电压及其防护	241
9.4.1	直击雷过电压防护	241
9.4.2	侵入波过电压防护	242
9.4.3	气体绝缘变电站的过电压防护	242
	练习题	243
<b>第 10 章</b>	<b>操作过电压与绝缘配合</b>	<b>244</b>
10.1	高压断路器的分合闸	245
10.1.1	高压开关的功能与分类	245
10.1.2	断路器的开断与熄灭电弧	245
10.1.3	断路器的关合与预击穿	246
10.1.4	高压断路器的重合闸	247
10.2	空载线路合闸过电压	247
10.2.1	正常空载线路合闸过电压	248
10.2.2	重合闸过电压	248
10.2.3	空载线路合闸过电压的影响因素及限制措施	249
10.3	切除空载线路过电压	250
10.4	特快速瞬态过电压	251
10.5	操作过电压的限制措施	252
10.5.1	利用断路器并联电阻限制分合闸过电压	252
10.5.2	利用避雷器限制操作过电压	253
10.6	绝缘配合的基本概念与基本方法	254
10.6.1	工频过电压对绝缘配合的影响	254
10.6.2	绝缘配合的原则	255
10.6.3	绝缘配合的基本方法	257
10.6.4	架空输电线路绝缘水平的确定	258
10.6.5	直流系统的绝缘配合	259
	练习题	259
<b>附录 A</b>	<b>电力设备的耐受电压值</b>	<b>260</b>
<b>附录 B</b>	<b>国内外部分高电压实验室参数表</b>	<b>262</b>
	<b>主要参考文献</b>	<b>264</b>