



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
国家精品课程教材

# 高电压技术

第2版

吴广宁 主编  
张冠军 刘刚 副主编



免费  
电子课件



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
国家精品课程教材

# 高 电 压 技 术

第 2 版

西南交通大学	吴广宁	主 编
西安交通大学	张冠军	副主编
华南理工大学	刘 刚	
吴文辉 周利军	高 波	
周 凯 李瑞芳	曹晓斌	参 编
高国强 张血琴		
严 璋 简克良		主 审



机械工业出版社

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，是国家精品课程“高电压技术”的配套教材。全书分为3篇，共9章，除了传统高电压技术内容如气体、液体和固体的绝缘特性以及过电压防护与绝缘配合等内容外，还编入了大量的高压试验与绝缘监测方面的内容，其中包括绝缘的预防性试验、电气绝缘的高电压试验、电气绝缘的在线监测等方面的基础知识，并介绍了特高压方面的最新发展。

本教材为国家精品课程教材，课程网址：<http://jpkc.swjtu.edu.cn/C14/hv.htm>。本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录<http://www.cmpedu.com>注册下载。

本书可以作为普通高等学校电气工程及其自动化专业和其他电类专业的教材，还可供电力、电工以及其他领域高电压与绝缘技术工作者参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高电压技术/吴广宁主编. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2014.3  
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-45179-2

I. ①高… II. ①吴… III. ①高电压—技术—高等学校—教材  
IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 303037 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: 王雅新 责任编辑: 王雅新

版式设计: 常天培 责任校对: 肖琳

封面设计: 张静 责任印制: 乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014年3月第2版第1次印刷

184mm × 260mm · 17.5 印张 · 429 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-45179-2

定价: 37.00 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

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

自本书第1版2007年出版以来，被国内许多高校选用作为教材。随着现代科技的发展，高电压技术领域的不断创新与进步，也为了满足读者的需求，作者对第1版进行了修订。本教材被教育部评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，也是国家精品课程教材，作者深感荣幸。

该版在第1版的基础上重新整理、改写与增减，内容更加丰富、有条理。本版保留了第1版的主要特色与体系，全书分为三篇：电介质的电气强度、电气绝缘与高电压试验、过电压防护与绝缘配合。此外，对于本教材中内容较为重要的知识点进行了标注，使学生有侧重地进行学习与思考。

本书由吴广宁任主编，张冠军、刘刚任副主编，吴文辉、高波、周凯、周利军、李瑞芳、曹晓斌、高国强、张血琴参与改编。本书的校对工作得到了张先怡、刘贤洵、崔运光、罗勋等同志的大力帮助，在此一并表示感谢。

此外，机械工业出版社的编辑做了大量的策划和审编工作，在此作者表示深切的谢意。

对本书的缺点及不足之处，恳请广大读者提出批评和指正。

编者

# 第1版前言

高电压技术是电工学科的一个重要分支，它涉及数学、物理、化学、材料等基础学科，主要研究高电压（强电场）下的各种电气物理问题。20世纪60年代以来，高电压技术一直不断吸收其他学科尤其是新科技领域的成果，促进自身发展，也促进了电力传输等科技领域的发展，显示出强大的活力。随着教学改革的不深入，现代化教学手段的普遍应用以及远程网络教育的开展，对教材建设也提出了新的要求，为此，我们编写了此教材。

在教材的编写过程中，力求做到深入浅出、通俗易懂，便于学生阅读和自学。在精选内容方面，力求适合普通高电压课程的需要，着重介绍本领域基础理论，对电介质的绝缘特性及其电气强度、电气绝缘与高电压实验、过电压防护与绝缘配合做了详细阐述，并对近年来高电压领域的新发展，尤其是超高压、特高压电网等方面的内容做了一定的介绍。每章附有习题与思考题，启发读者思考和帮助读者总结。

本书由吴广宁任主编，张冠军、刘刚任副主编，吴文辉、高波、周凯、周利军、李瑞芳参与编写。本书初稿的校对工作得到了苏黎、吴建东、李晓华、边姗姗等同志的大力帮助，在此一并表示感谢。

本书由西安交通大学严璋教授、西南交通大学简克良教授担任主审，他们为提高书稿质量付出了大量的精力和劳动，提出了不少宝贵的意见，在此向他们深表谢意。

本教材为国家精品课程教材，课程网址：<http://jpkc.swjtu.edu.cn/C14/hv.htm>。本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 <http://www.cmpedu.com> 注册下载。

限于水平，书中不妥和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

# 目 录

第2版前言

第1版前言

绪论 ..... 1

## 第1篇 电介质的电气强度

### 第1章 气体的绝缘特性与介质的

电气强度 ..... 9

1.1 气体放电的基本物理过程 ..... 9

1.1.1 带电质点的产生和消失 ..... 9

1.1.2 电子崩与汤逊理论 ..... 13

1.1.3 巴申定律及其适用范围 ..... 18

1.1.4 气体放电的流注理论 ..... 19

1.1.5 不均匀电场中的气体放电 ..... 20

1.2 气体介质的电气强度 ..... 26

1.2.1 持续作用电压下的击穿 ..... 26

1.2.2 雷电冲击电压下的击穿 ..... 30

1.2.3 操作冲击电压下空气的绝缘  
特性 ..... 33

1.2.4 大气条件对气体击穿的影响 ..... 35

1.2.5 提高气体击穿电压的措施 ..... 36

1.3 固体绝缘表面的气体沿面放电 ..... 38

1.3.1 界面电场的分布 ..... 39

1.3.2 均匀电场中的沿面放电 ..... 40

1.3.3 极不均匀电场中的沿面  
放电 ..... 41

1.3.4 绝缘子的污秽放电 ..... 43

1.3.5 提高沿面放电电压的措施 ..... 46

习题与思考题 ..... 47

### 第2章 固体的绝缘特性与介质的

电气强度 ..... 49

2.1 固体电介质的极化与损耗 ..... 49

2.1.1 固体电介质的极化 ..... 49

2.1.2 固体电介质的损耗 ..... 54

2.2 固体电介质的电导 ..... 58

2.2.1 固体电介质的离子电导 ..... 58

2.2.2 固体电介质的电子电导 ..... 59

2.2.3 固体电介质的表面电导 ..... 62

2.3 固体电介质的击穿 ..... 65

2.3.1 固体电介质的热击穿 ..... 66

2.3.2 固体电介质的电击穿 ..... 68

2.3.3 不均匀电介质的击穿 ..... 69

习题与思考题 ..... 71

### 第3章 液体的绝缘特性与介质的

电气强度 ..... 73

3.1 液体电介质的极化与损耗 ..... 73

3.1.1 液体电介质的极化 ..... 73

3.1.2 液体电介质的损耗 ..... 74

3.2 液体电介质的电导 ..... 75

3.2.1 液体电介质的离子电导 ..... 75

3.2.2 液体电介质的电泳电导与  
华尔屯定律 ..... 77

3.2.3 液体电介质在强电场下的  
电导 ..... 77

3.3 液体电介质的击穿 ..... 78

3.3.1 高度纯净去气液体电介质的  
电击穿理论 ..... 79

3.3.2 含气纯净液体电介质的气泡  
击穿理论 ..... 80

3.3.3 工程纯液体电介质的杂质  
击穿 ..... 81

习题与思考题 ..... 82

第2篇 电气绝缘与高电压试验

第4章 绝缘的预防性试验 ..... 85

4.1 绝缘电阻、吸收比与泄漏电流的测量 ..... 85

4.1.1 绝缘电阻与吸收比的测量 ..... 85

4.1.2 泄漏电流的测量 ..... 88

4.1.3 绝缘电阻的测量 ..... 89

4.2 介质损耗角正切的测量 ..... 90

4.2.1 西林电桥测量法的基本原理 ..... 90

4.2.2 西林电桥测量法的电磁干扰 ..... 92

4.2.3 西林电桥测量法的其他影响因素 ..... 93

4.3 局部放电的测量 ..... 94

4.3.1 局部放电测量的基础 ..... 94

4.3.2 局部放电测量的脉冲电流法 ..... 96

4.3.3 局部放电测量的非电检测法 ..... 96

4.4 绝缘油性能检测 ..... 97

4.4.1 绝缘油的电气试验 ..... 98

4.4.2 油中溶解气体的气相色谱分析 ..... 101

4.4.3 绝缘油的高效液相色谱分析 ..... 105

习题与思考题 ..... 106

第5章 电气绝缘高电压试验 ..... 108

5.1 工频高电压试验 ..... 108

5.1.1 工频高电压的产生 ..... 108

5.1.2 工频高电压的测量 ..... 112

5.1.3 绝缘的工频耐压试验 ..... 116

5.2 直流高电压试验 ..... 118

5.2.1 直流高电压的产生 ..... 118

5.2.2 直流高电压的测量 ..... 120

5.2.3 绝缘的直流耐压试验 ..... 122

5.3 冲击高电压试验 ..... 124

5.3.1 冲击高电压的产生 ..... 124

5.3.2 冲击高电压的测量 ..... 128

5.3.3 绝缘的冲击耐压试验 ..... 130

习题与思考题 ..... 131

第6章 电气绝缘在线检测 ..... 132

6.1 变压器油中溶解气体的在线检测 ..... 132

6.1.1 绝缘故障与油中溶解气体 ..... 132

6.1.2 油中溶解气体的在线检测 ..... 134

6.1.3 油中气体分析与故障诊断 ..... 137

6.2 局部放电在线检测 ..... 142

6.2.1 局部放电的在线检测系统 ..... 142

6.2.2 局部放电分析与故障诊断 ..... 146

6.3 介质损耗角正切的在线检测 ..... 148

6.3.1 高压电桥法 ..... 148

6.3.2 相位差法 ..... 149

6.3.3 全数字测量法 ..... 151

习题与思考题 ..... 153

第3篇 过电压防护与绝缘配合

第7章 输电线路和绕组中的

波过程 ..... 157

7.1 均匀无损单导线上的波过程 ..... 157

7.1.1 波传播的物理概念 ..... 157

7.1.2 波动方程及解 ..... 158

7.1.3 波速和波阻抗 ..... 159

7.1.4 前行波和反行波 ..... 160

7.2 行波的折射和反射 ..... 160

7.2.1 线路末端的折射、反射 ..... 161

7.2.2 集中参数等效电路(彼德逊

法则) ..... 162

7.2.3 波的多次折射、反射 ..... 168

7.3 波在多导线系统中的传播 ..... 169

7.4 波在传播中的衰减与畸变 ..... 173

7.4.1 线路电阻和绝缘电导的影响 ..... 173

7.4.2 冲击电晕的影响 ..... 174

7.5 绕组中的波过程 ..... 175

7.5.1 变压器绕组中的波过程 ..... 175

7.5.2 旋转电机绕组中的波过程 ..... 180

习题与思考题 ..... 181

第 8 章 雷电过电压及其防护 .....	182	9.3.1 发展过程 .....	241
8.1 雷电放电和雷电过电压 .....	182	9.3.2 影响因素和限制措施 .....	242
8.1.1 雷云的形成 .....	182	9.4 断续电弧接地过电压 .....	243
8.1.2 雷电放电过程 .....	183	9.4.1 发展过程 .....	243
8.1.3 雷电参数 .....	184	9.4.2 防护措施 .....	246
8.1.4 雷电过电压的形成 .....	187	9.5 工频电压升高 .....	247
8.2 防雷保护设备 .....	190	9.6 谐振过电压 .....	250
8.2.1 避雷针防雷原理及保护范围 .....	190	9.6.1 谐振过电压的类型 .....	250
8.2.2 避雷线防雷原理及保护范围 .....	193	9.6.2 铁磁谐振过电压 .....	251
8.2.3 避雷器工作原理及常用种类 .....	194	9.7 绝缘配合 .....	252
8.3 电力系统防雷保护 .....	203	9.7.1 绝缘配合的原则与方法 .....	252
8.3.1 输电线路的防雷保护 .....	203	9.7.2 变电站电气设备绝缘水平的 确定 .....	255
8.3.2 发电厂和变电所的防雷 保护 .....	214	9.7.3 架空输电线路绝缘水平的 确定 .....	260
8.4 接地的原理 .....	228	习题与思考题 .....	263
8.4.1 接地概念及分类 .....	228	附录 .....	265
8.4.2 接地电阻、接触电压和跨步 电压 .....	229	附表 1 普通阀式避雷器的电气特性 .....	265
8.4.3 接地和接零保护 .....	232	附表 2 电站用磁吹阀式避雷器 (FCZ 系列) 的电气特性 .....	266
习题与思考题 .....	234	附表 3 保护旋转电机用磁吹阀式 避雷器 (FCD 系列) 的 电气特性 .....	266
第 9 章 内部过电压与绝缘配合 .....	235	附表 4 典型交流无间隙金属氧化物 避雷器的电气特性 (GB 11032—2000) .....	267
9.1 切除空载线路过电压 .....	235	参考文献 .....	269
9.1.1 产生原理 .....	235		
9.1.2 影响因素和降压措施 .....	236		
9.2 空载线路合闸过电压 .....	237		
9.2.1 发展过程 .....	238		
9.2.2 影响因素和降压措施 .....	239		
9.3 切除空载变压器过电压 .....	240		



# 绪论

## 1. 高电压技术的发展

(1) 高电压技术的出现以及发展 在电工科学研究的领域内,对高电压现象的关注由来已久。通常所说的高电压,一般是针对某些极端条件下的电磁现象,并没有在电压数值上划分一个确定界限。而高电压技术的基本任务则是研究高电压的获得以及在高电压下介质及其系统的特性和应用。

直到20世纪初高电压才逐渐成为一门独立的科学分支,“高电压工程”这一术语,始于美国工程师皮克(F. W. Peek)于1915年出版的《高电压工程中的电介质现象》一书。当时的高电压技术,主要是为了解决高压输电工程中的绝缘问题。随着电力系统输送容量的增大,电压水平的提高,以及相关物理学科的迅速发展,高电压技术在20世纪初的几十年发展得十分迅速。自20世纪60年代以来,随着超高压、特高压(UHV)输电技术及装备的发展,高电压技术已经产生许多新的分支,扩大了其应用领域,成为了电工学科中十分重要的一支。

高电压技术的研究范围,主要是两部分:一部分是如何根据需要人为地获得预期的高电压;另一部分是如何确定由于随机干扰因素而引起的外部电压的特性及其变化规律,从而采取相应的措施。其中,前者是高电压技术中的核心内容,这是因为在电力系统中,在大容量、远距离电力输送要求越来越高的情况下,几十万伏的高电压和可靠的绝缘系统是支撑其实现的必备技术条件。从电力建设上看,提高了输电电压,输变电设备绝缘部分占总造价的比重也相应提高。为了使电力系统在安全的基础上运行更加经济,就必须使可能出现的过电压峰值、所采取的过电压限制措施以及绝缘所能承受的能力三者相平衡。另外,在各种新兴领域,比如航空航天、材料科学等与高电压技术形成交叉的领域,随着技术的发展对高电压的要求也越来越高。因此,高电压技术在电力事业和多种新兴学科领域的研究中都占有十分重要的地位,其研究价值和意义是显而易见的。

(2) 高压输电技术的发展 高电压技术主要是随着电力系统输电电压的提高而迅速发展的。由于升高电压等级可以提高电力系统的输送能力,降低线路损耗,增加传输距离,还可以降低电网传输单位容量的造价。因此,电力系统总是在安全与经济效益的平衡下采用较高等级的电压。输电电压一般分为高压、超高压(SHV)和特高压。目前国际上高压一般指交流35~220kV的电压;超高压一般指交流330~1000kV的电压;特高压一般指交流1000kV及以上的电压。而高压直流(HVDC)通常指的是 $\pm 600$ kV及以下的直流输电电压,

$\pm 600\text{kV}$  以上的则称为特高压直流(UHVDC)。

世界上最早于1890年在英国建成了一条长达45km的10kV输电线路,随后于1891年在德国建成了一条170km的15kV三相输电线路。在早期的高压输电中,由于变压器不能用于直流输电系统,所以交流输电发展得更加迅速。国际上于20世纪60年代就开始了特高压输电的研究。在1985年前苏联首先建成了一条长达1228km的交流1150kV输电线路,除此之外,美、意、日、法、巴西等国家也很早就在这方面开始了研究。日本于20世纪90年代也建成了一条长300km的1000kV特高压输电线路。

与交流高压输电的发展相比,直流高压输电的发展就要晚得多。从1954年世界上第一条工业性直流输电线路投入运行以来,连同1954年以前的直流工程,大致可以把直流输电的发展分为三个阶段:

1) 1954年以前——试验阶段。这一阶段为直流输电的初始阶段。其主要代表工程为1945年德国的爱尔巴—柏林工程、瑞典的脱罗里赫坦—密里路特工程以及1950年前苏联的卡希拉—莫斯科工程。其特点是:①直流输电工程参数较低。输电电压仅为几十千伏,输送容量小,输送距离短。②换流装置采用的都是低参数的汞弧阀。③发展速度较慢。主要是由于20世纪50年代初期交流系统的超高压输电正处于发展的上升时期,是当时的主要发展潮流。而当时的直流设备制造水平也较低,可靠性有限。

2) 1954年至1972年——发展阶段。1954年瑞典建成了从本土通往戈特兰岛的世界第一条工业性直流输电线路,这是世界上首次在直流输电工程中采用大功率汞弧阀,标志着直流输电技术进入发展阶段。其特点是:①直流输电设备的制造技术有了很大提高,直流输电开始进入工业实用阶段;②直流输电的应用开始具有如水下输电、远距离大功率输电等多种目的;③虽然换流装置仍然采用汞弧阀,但是技术参数已经有了很大提高,质量得到大幅改善;④由于汞弧阀制造技术复杂、价格昂贵、故障率高以及运行维护不便,直流输电技术的发展受到了限制。

3) 1972年到现在——推广阶段。1972年,晶闸管阀(可控硅阀)在加拿大的伊尔河直流输电工程中得到应用,这是世界上首次采用更先进晶闸管阀取代原先的汞弧阀。20世纪70年代以后,微机控制和保护、光电传输技术、水冷技术和氧化锌避雷器等新技术在直流输电工程中得到广泛应用,从而使直流输电技术进入推广阶段。这一阶段的特点是:①晶闸管阀在世界范围内的直流输电工程中得到广泛应用;②开始大力建设超高压直流输电工程;③单回线路的输电能力比前阶段有很大提高。

(3) 我国高电压技术的发展 我国高电压技术的发展和电力工业的发展是紧密联系的。在1949年新中国成立以前,电力工业发展缓慢,输电线路建设迟缓,输电电压因具体工程不同而不同,没有标准,输电电压等级繁多。从1908年建成的石龙坝水电站——昆明的22kV线路,到1943年建成的镜泊湖水电站——延边的110kV线路,中间出现过的电压等级有33kV、44kV、66kV以及154kV等。直到新中国成立以后,才逐渐形成了经济合理的电压等级系列。之后我国输电电压等级经历了从中压到高压再到超高压的发展阶段,目前正在大力发展特高压输电技术与设备。

我国的交流高压输电技术发展较早。1952年我国以自己的技术力量开始自主建设110kV输电线路,并形成京津唐110kV输电网。1954年建成丰满—李石寨220kV输电线路,接下来的几年形成了220kV东北骨干输电网架。1972年建成由我国自行设计和施工的

330kV 刘家峡—关中输电线路，并逐渐形成西北电网 330kV 骨干输电网架。1981 年建成第一条 500kV 姚孟—武昌输电线路，并开始形成华中电网 500kV 骨干输电网架，从此我国进入 500kV 输电工程发展期。在逐渐形成 330kV 区域和 500kV 区域骨干输电网架的同时，我国于 20 世纪 80 年代初开始了更高电压等级的论证。在此基础上，国家明确提出了 500kV 以上输电线路的输电电压为 1000kV，330kV 以上输电线路的输电电压为 750kV。并且于 20 世纪 80~90 年代针对输电工程的需要，继续进行了 1000kV 特高压输电和 750kV 超高压输电的基础研究和可行性研究，并建立特高压试验线段，进一步对特高压技术进行试验研究。20 世纪 90 年代后期已经形成以 500kV 为骨干输电网架的华中、华东、华北、东北、南方等大区电网。2005 年建成世界上海拔最高、当时我国运行电压等级最高的 750kV 西北电网输电工程。2009 年，1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程正式投运，这是世界上正在运行的电压等级最高、技术水平最高的输变电工程，标志着我国在远距离、大容量、低损耗的特高压核心技术和设备国产化上取得重大突破，整体技术和设备达到了国际领先水平。

我国的直流高压输电技术起步较晚，但发展速度很快。到 2012 年，我国已有 16 个直流输电工程投入运行，代表性工程如表 0-1 所示。其中灵宝与高岭输电工程都为背靠背直流输电工程，所谓背靠背直流输电系统是指整流站设备和逆变站设备通常装在一个换流站内，输电线路长度为零的直流输电系统。这些直流输电工程在我国西电东送和全国大区联网工程中发挥了重要作用。标志着我国已成为世界上直流输电容量最大，直流输电电压最高、电压等级最全和发展速度最快的国家。目前一般认为高压直流输电适用于以下范围：①长距离、大功率的电力输送，在超过交、直流输电等价距离时最为合适；②海底电缆送电；③交、直流并联输电系统中提高系统稳定性（因为 HVDC 可以进行快速的功率调节）；④实现两个不同额定功率或者相同频率电网之间非同步运行的连接；⑤通过地下电缆向用电密度高的城市供电；⑥为开发新电源提供配套技术。

表 0-1 代表性高压直流输电工程

工程名称	电压/kV	投运年份	意义
舟山直流输电工程	± 100	1987	我国首个直流输电工程
葛洲坝—上海	± 500	1989	我国首个实现远距离直流输电并实现华中与华东直联网的直流输电工程
三峡水电站—惠州	± 500	2004	实现华中与华南直联电网
灵宝（背靠背工程）	± 120	2005	全部采用国产设备，并实现华中与西北直联电网
高岭（背靠背工程）	± 125	2008	世界上容量最大的背靠背换流站，并实现华北与东北直联电网
宝鸡—德阳	± 500	2010	打通西北与华中（四川）电力大通道
向家坝—上海	± 800	2010	我国首个自主研发、设计、建设、运行的特高压直流输电示范工程
锦屏—江苏苏南	± 800	2012	代表当前直流输电技术的最高水平

到 2011 年，我国发电设备装机容量已达 10.56 亿 kW，位居世界第二位，发电量为 46928 亿 kW·h，位居世界第一位。自 1980 年起我国发电量的平均年增长率超过 10%，远超同期世界总发电量增长率。尽管如此，由于我国电能分布极不均匀，某些区域的缺电情况仍然十分严重。

目前世界上最高的交、直流输电电压等级已经分别达到了 1150kV 和 ± 800kV。就我国

绝大多数电网来说, 高压电网指的是 110kV 和 220kV 电网; 超高压电网指的是 330kV、500kV 和 750kV 电网; 特高压电网指的是以 1000kV 输电网为骨干网架, 超高压输电网和高压输电网以及特高压直流输电、高压直流输电和配电网构成的层次结构清晰的现代化大电网。由于我国幅原辽阔, 一次能源分布不平均, 能源与重要负荷中心距离很远, 因此我国的送电格局是“西电东送”和“北电南送”以及全国大区电网互联。基于大规模、远距离输电的考虑, 发展特高压输电技术与设备对我国经济建设有着十分重大的意义, 因此必须认真开展更高电压等级特别是特高压输电技术的研究。预计到 2018 年, 国家电网公司将建成“三纵三横”特高压交流和 11 回特高压直流工程, 西电东送规模将达到 2 亿 kW。届时, 我国将形成以特高压为骨干网架, 蒙电外送、疆电外送和西南水电外送的资源优化配置格局。大煤电、大水电和清洁能源基地建设将得到有力支持, 能源资源将实现在全国范围内高效配置。这对于构建科学的能源综合运输体系, 保障我国能源和电力供给具有重大意义。

## 2. 高电压下典型现象与研究简述

(1) 电介质的电气强度 电介质电气强度的相关知识以电介质物理学为理论基础, 电介质物理主要是研究介质内部束缚电荷在电和光的作用下的电极化过程, 阐明其电极化规律与介质结构的关系, 也研究电介质绝缘材料的电击穿过程及其原理。在高电压技术领域, 则进一步研究气体放电的基本物理过程和沿面放电, 固体和液体电介质的极化、电导、损耗与击穿等方面的性能。

通过全面深刻地理解和掌握电介质电气强度的相关知识, 才能设计出严谨、高效并且符合实际情况的电气绝缘与高电压试验, 进一步完善电介质电气强度的理论知识; 才能制定出正确、安全并且兼顾技术经济性的过电压防护与绝缘配合方案, 并应用于工程实践中。目前对于电介质电气强度的研究还不是很完善, 尤其是对于气体电介质的电气强度的研究。所以, 必须通过借助数学、物理、化学以及材料等学科的知识来解决目前电介质电气强度方面的问题, 这对于高电压技术学科的发展具有重大的意义。

(2) 电气绝缘与试验 在高电压技术研究领域内, 不论是要获得高电压, 还是研究高电压下系统特性或者在随机干扰下电压的变化规律, 都离不开绝缘的支撑。不论是绝缘材料还是绝缘结构, 对于高电压的实现都有着非常重要的意义。没有可靠的绝缘, 就很难获得高电压; 没有可靠的绝缘系统, 整个电气系统在高电压环境下的安全运行就得不到保证。

因此, 对于电气绝缘的研究就非常重要。而介质放电等相关理论还不是很完善, 所以电气绝缘试验在高电压技术中起着非常重要的作用。绝缘试验一般分为离线与在线两种。离线试验包括预防性试验与各种高电压试验。预防性试验主要是对各种电气设备绝缘进行定期检查, 从而及早发现绝缘缺陷, 及时更换修复。而高电压试验则是通过实验室内产生的高电压来模拟各种冲击电压与交、直流高压, 从而考察电气设备绝缘的耐压能力。在线试验通常指电力设备运行状态下的绝缘在线检测。在线检测可以弥补离线试验的一些缺点, 有效地防止电力设备绝缘故障的发生, 而且经济效益显著。随着传感器技术、自动控制技术以及数字信号处理等技术的进步, 在线检测将会得到更加广泛的应用与发展。

(3) 过电压防护与绝缘配合 绝缘配合是高电压技术的一个核心问题, 是指在综合考虑电力系统中可能出现的各种作用电压、保护装置特性以及设备绝缘特性的情况下, 最终确

定电气设备的绝缘水平。之所以说绝缘配合非常重要，是因为在电力系统运行中，经常会出现各种冲击电压，比如雷电过电压、操作过电压等。在这些过电压的冲击下，电气设备的绝缘很容易因发生闪络而损坏，从而造成停电事故。

而随着输电电压等级越来越高，高压设备上的工作电压也越来越高，因此设备造价也会水涨船高。在高压设备昂贵的造价中，设备本身的绝缘占了相当一部分比例。如果在制造设备的过程中，按照各种过电压完全不加防护而只由设备本身绝缘承受这一标准来制造，则设备的性价比将变得非常低以至于没有实际工程应用价值。因此，对于电气设备采取一定的过电压保护措施非常重要，这样才能更好地解决电气设备的绝缘配合问题。

### 3. 高电压技术发展前景

(1) 新材料新技术的应用 材料学科是发展最快的领域之一，很多材料的功能及性能正以前所未有的速度不断得到改进提高，新材料不断涌现。相比较而言，电工领域是一个较为成熟的学科领域。然而，新材料在此领域的应用，却有可能带来革命性的变化。有机硅橡胶材料在外绝缘领域的应用就是一个突出的实例。众所周知，高压输电线路的绝缘子曾是电瓷一统天下，尽管电瓷材料有耐老化性能好、绝缘性能良好等优点，但是也具有易破碎、抗拉强度低、笨重、生产耗能高等先天弱点。特别是耐污闪性能不好，极大地威胁着电力系统运行的安全性能。硅橡胶等有机材料由于重量轻、易加工，耐污闪性能好，已成功地在线路外绝缘上得到推广应用。以硅橡胶材料为伞裙护套、环氧玻璃纤维引拔棒为芯棒的线路悬式合成绝缘子，目前我国线路绝缘子市场其份额超过三分之一，而且有进一步发展壮大之势；已在线运行的 80 余万只线路合成绝缘子经受住多年恶劣气候条件的严峻考验，事实表明其耐污闪能力明显高于电瓷绝缘子和玻璃绝缘子，已成为一项行之有效的防污闪技术措施，在防止污闪事故发生，保障电力系统安全运行方面发挥了显著作用，受到电力运行部门的欢迎。可以预计，硅橡胶材料也将在变电站外绝缘，如棒型支持绝缘子、绝缘套管等方面得到推广应用。

可以预计，高温超导材料、新型磁性材料、新型合金及新型绝缘材料将会在高电压电工设备上得到及时而迅速的推广应用。在新技术方面，以信息科学为代表的高新技术将是高电压技术学科发展的又一动力。新型传感技术、信息的采集和处理、网络技术、自动化技术、纳米技术、现代通信技术、微电子技术等将在高电压技术领域获得广泛应用，并在推动高电压学科进步上发挥显著作用。

#### (2) 与其他学科的交叉渗透

1) 在轨道交通领域的应用。随着电力技术的发展和经济建设的需要，电气化轨道交通系统逐步向高速和大功率牵引的方向发展。由于牵引供电系统绝缘水平低，容易发生雷击跳闸事故，造成运输中断，威胁沿线设备和检修人员的安全，所以借鉴高电压技术领域中的输电线路防雷与接地的相关知识和方法解决轨道交通领域的类似问题已成为目前的研究热点之一。

2) 在环保领域的应用。随着经济的发展，世界各国越来越认识到环境保护的重要性。目前国际上都在尝试采用高压窄脉冲电晕放电来处理烟气脱硫脱硝除尘、汽车尾气处理以及污水处理问题。此外，通过高压脉冲产生的高浓度臭氧和大量活性自由基，能有效地杀毒灭

菌。通过高电压技术人工模拟闪电，能够在无氧状态下，用强带电粒子流将有毒废弃物分解成简单无毒分子。

3) 在生物医学领域的应用。研究表明，静电场或脉冲电磁场对于促进骨折愈合效果明显。通过营造适当的电磁场环境，对于促进骨细胞生长有着较好的效果。而且在某些医疗诊断仪器或者治疗仪器上，高电压技术往往是其核心的技术之一。因此，电磁环境学已经成为目前的热点研究问题之一。

4) 在新能源领域的应用。由于目前广泛采用的如石油、煤、天然气等一次能源储量有限，因此开发新能源已经成为能源领域亟待解决的问题。而受控核聚变、太阳能发电、风力发电以及燃料电池等新能源技术要得到飞跃发展，属于高电压技术范畴的大能量脉冲电源技术、等离子控制技术等关键技术必须取得突破性进展。

5) 在材料领域的应用。在材料领域，目前世界上许多实验室正在研究用等离子聚合的方法制作具有特殊功能的薄膜。通过等离子聚合所形成的薄膜，具有机械强度高、耐热性好、耐化学侵蚀性强的优点。而介电常数非常大的等离子聚合膜可以用于集成电路芯片制造，电导率较高的等离子聚合膜可以用作防静电的绝缘保护膜。通过低温等离子技术研制新型半导体材料，不论在制作还是在具体应用中，都与高电压技术有着非常紧密的联系。

# 第 1 篇

## 电介质的电气强度

电介质在电气设备中是作为绝缘材料使用的，按其物质形态，可分为气体介质、液体介质和固体介质。在实际应用中，对高压电气设备绝缘的要求是多方面的，单一电介质往往难以满足要求，因此实际的绝缘结构由多种介质组合而成。电气设备的外绝缘一般由气体介质和固体介质联合组成，而设备的内绝缘则往往由固体介质和液体介质联合组成。液体介质和固体介质的电气特性大致相似又各有特点，而它们与气体介质都有很大的差别，主要表现在气体介质的极化、电导和损耗都很微弱。

电介质的电气特性，主要表现为它们在电场作用下的导电性能、介电性能和电气强度。在电场的作用下，电介质中出现的电气现象可分为两大类：

1) 在弱电场的作用下（当电场强度比击穿场强小得多时），主要是极化、电导、介质损耗等。

2) 在强电场的作用下（当电场强度等于或大于放电起始场强或击穿场强时），主要有放电、闪络、击穿等。

本篇介绍气体放电的基本物理过程、气体介质的电气强度及沿面放电。对于液体介质和固体介质则主要介绍极化、电导、损耗和击穿等。





## 第 1 章

# 气体的绝缘特性与介质的电气强度

## 1.1 气体放电的基本物理过程

高压电气设备中的绝缘介质有气体、液体、固体以及其复合介质。由于气体绝缘介质不存在老化的问题，而且在击穿后有完全的绝缘自恢复特性，再加上其成本非常低廉，因此气体成为了在实际应用中最常见的绝缘介质。架空输电线路的绝缘就是靠空气间隙和空气与固体介质的复合绝缘来实现的。

气体击穿过程的理论研究虽然还不完善，但是相对于其他几种绝缘来说最为完整。因此，高电压绝缘的论述一般都由气体绝缘开始。

### 1.1.1 带电质点的产生和消失

气体放电是对气体中流通电流的各种形式的统称。正常状态下，没有受到外电离因素影响的中性气体分子是不导电的。由于空气中会存在一些来自于空间的辐射（比如宇宙射线或者大地中一些放射性物质的辐射），气体会发生微弱的电离而产生少量的带电质点，一般大气中每立方厘米存在大约 500 ~ 1000 对正、负带电质点。这个带电质点数量相对于大气分子密度而言非常少，因而正常状态下气体的电导很小，所以空气还是性能优良的绝缘体。只有在出现大量带电质点的情况下，气体才会丧失绝缘性能。因此在论述气体放电过程之前，首先要了解气体中带电质点是如何产生与消失的。

#### 1. 气体中电子与正离子的产生

电离是指电子脱离原子核的束缚而形成自由电子和正离子的过程。电离所需的能量称为电离能  $W_i$ ，单位是 eV，有时也可以用电离电位差  $U_i$  表示， $U_i = W_i/e$  ( $e$  为电子的电荷量)。电离方式可分为热电离、光电离和碰撞电离。电离的过程可以是一次完成，也可以是先激励再电离的分级电离方式。

(1) 热电离 由气体的热状态而引起的电离，称为热电离。热电离的本质主要是由于气体分子高速运动碰撞引起的电离（或者是光电离）。由于气体的热能，在高速运动中的高能分子会导致碰撞电离，而在这个过程中产生的电子也处于热运动中，也有可能继续由于热运动碰撞造成电离；另外，高热状态下的气体通过热辐射发出的光子数量多、能量大，因此也容易与气体分子发生光电离。

在室温下热电离的概率是极低的，只有在电弧放电产生的高温条件下才会有明显的热电离过程。图 1-1 表示不同温度下空气和  $SF_6$  气体的热电离程度（即单位体积内电离质点数与