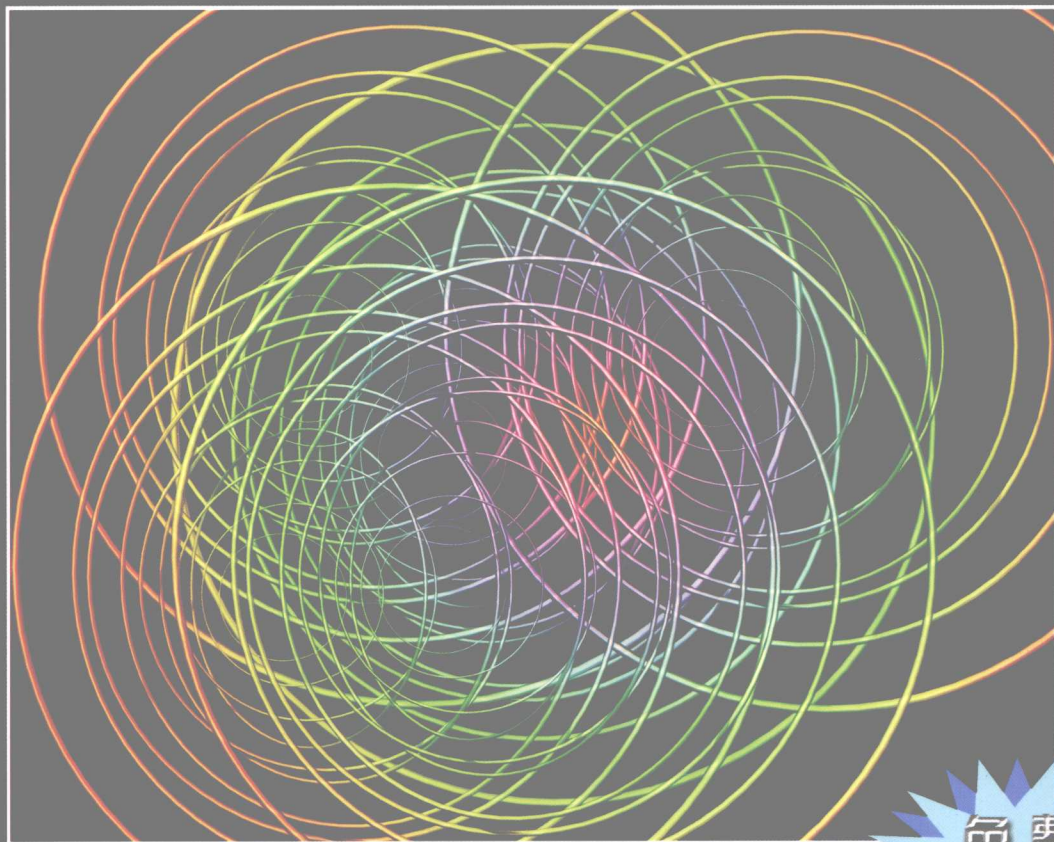




普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
国家精品课程教材

# 高电压技术

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



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
国家精品课程教材

# 高 电 压 技 术

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 参编  
严璋 简克良 主审



机 械 工 业 出 版 社

本书为普通高等教育“十一五”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索取，电子邮箱：[wbj@mail.machineinfo.gov.cn](mailto:wbj@mail.machineinfo.gov.cn)。

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. —北京：机械工业出版社，2007.5  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材·国家精品课程教材  
ISBN 978-7-111-21361-1

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

中国版本图书馆CIP数据核字（2007）第056994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：王保家 责任编辑：刘丽敏 版式设计：冉晓华  
责任校对：刘志文 封面设计：张静 责任印制：洪汉军  
北京汇林印务有限公司印刷  
2007年6月第1版第1次印刷  
184mm×260mm·17印张·391千字  
标准书号：ISBN 978-7-111-21361-1  
定价：23.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
销售服务热线电话：（010）68326294  
购书热线电话：（010）88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话：（010）88379727  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

高电压技术是电工学科的一个重要分支，它涉及到数学、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索取，电子邮箱：[wbj@mail.machineinfo.gov.cn](mailto:wbj@mail.machineinfo.gov.cn)。

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

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 ..... 11

1.1 气体放电的基本物理过程 ..... 11

1.1.1 带电质点的产生 ..... 11

1.1.2 带电质点的消失 ..... 15

1.1.3 电子崩与汤逊理论 ..... 16

1.1.4 巴申定律及其适用范围 ..... 20

1.1.5 不均匀电场中的气体放电 ..... 21

1.2 气体介质的电气强度 ..... 27

1.2.1 持续作用电压下的击穿 ..... 27

1.2.2 雷电冲击电压下的击穿 ..... 31

1.2.3 操作冲击电压下空气的绝缘特性 ..... 34

1.2.4 大气条件对气体击穿的影响 ..... 36

1.2.5 提高气体击穿电压的措施 ..... 37

1.3 固体绝缘表面的气体沿面放电 ..... 40

1.3.1 界面电场的分布 ..... 41

1.3.2 均匀电场中的沿面放电 ..... 41

1.3.3 极不均匀电场中的沿面放电 ..... 42

1.3.4 绝缘子的污秽放电 ..... 44

1.3.5 提高沿面放电电压的措施 ..... 48

习题与思考题 ..... 49

### 第 2 章 液体的绝缘特性与介质的

电气强度 ..... 50

2.1 液体电介质的极化与损耗 ..... 50

2.1.1 液体电介质的介电常数 ..... 50

2.1.2 液体电介质的损耗 ..... 52

2.2 液体电介质的电导 ..... 53

2.2.1 液体电介质的离子电导 ..... 53

2.2.2 液体电介质的电泳电导与  
华尔屯定律 ..... 55

2.2.3 液体电介质在强电场下的  
电导 ..... 55

2.3 液体电介质的击穿 ..... 56

2.3.1 高度纯净去气液体电介质的  
电击穿理论 ..... 56

2.3.2 含气纯净液体电介质的气泡  
击穿理论 ..... 58

2.3.3 工程纯液体电介质的杂质  
击穿 ..... 59

习题与思考题 ..... 60

### 第 3 章 固体的绝缘特性与介质的

电气强度 ..... 61

3.1 固体电介质的极化与损耗 ..... 61

3.1.1 固体电介质的介电常数 ..... 61

3.1.2 固体电介质的损耗 ..... 64

3.2 固体电介质的电导 ..... 66

3.2.1 固体电介质的离子电导 ..... 66

3.2.2 固体电介质的电子电导 ..... 67

3.2.3 固体电介质的表面电导 ..... 70

3.3 固体电介质的击穿 ..... 73

3.3.1 固体电介质的热击穿 ..... 74

3.3.2 固体电介质的电击穿 ..... 76

3.3.3 不均匀电介质的击穿 ..... 77

习题与思考题 ..... 80



## 第 2 篇 电气绝缘与高电压试验

<b>第 4 章 绝缘的预防性试验</b> ..... 83	5.1.1 工频高电压的产生..... 107
4.1 绝缘电阻、吸收比与泄漏电流的 测量..... 83	5.1.2 工频高电压的测量..... 110
4.1.1 绝缘电阻与吸收比的测量..... 84	5.1.3 绝缘的工频耐压试验..... 115
4.1.2 泄漏电流的测量..... 86	5.2 直流高电压试验..... 117
4.1.3 目前常用的绝缘电阻测试 方法..... 88	5.2.1 直流高电压的产生..... 117
4.2 介质损耗角正切的测量..... 88	5.2.2 直流工频高电压的测量..... 120
4.2.1 西林电桥测量法的基本原理..... 89	5.2.3 绝缘的直流耐压试验..... 122
4.2.2 西林电桥测量法的电磁干扰..... 90	5.3 冲击高电压试验..... 123
4.2.3 西林电桥测量法的其他影响 因素..... 92	5.3.1 冲击高电压的产生..... 123
4.3 局部放电的测量..... 92	5.3.2 冲击高电压的测量..... 127
4.3.1 局部放电测量的基础..... 93	5.3.3 绝缘的冲击耐压试验..... 130
4.3.2 局部放电测量的脉冲电流法..... 95	习题与思考题..... 131
4.3.3 局部放电测量的非电检测法..... 95	<b>第 6 章 电气绝缘在线检测</b> ..... 132
4.4 绝缘油性能检测..... 96	6.1 变压器油中溶解气体的在线检测..... 133
4.4.1 绝缘油的电气试验..... 96	6.1.1 绝缘故障与油中溶解气体..... 133
4.4.2 油中溶解气体的气相色谱 分析..... 99	6.1.2 油中溶解气体的在线检测..... 134
4.4.3 绝缘油的高效液相色谱 分析..... 103	6.1.3 油中气体分析与故障诊断..... 138
习题与思考题..... 105	6.2 局部放电在线检测..... 142
<b>第 5 章 电气绝缘高电压试验</b> ..... 106	6.2.1 局部放电的在线检测系统..... 142
5.1 工频高电压试验..... 107	6.2.2 局部放电分析与故障诊断..... 147
	6.3 介质损耗角正切的在线检测..... 149
	6.3.1 高压电桥法..... 149
	6.3.2 相位差法..... 150
	6.3.3 全数字测量法..... 152
	习题与思考题..... 154

## 第 3 篇 过电压防护与绝缘配合

<b>第 7 章 输电线路和绕组中的   波过程</b> ..... 157	法则)..... 163
7.1 均匀无损单导线上的波过程..... 157	7.2.3 波的多次折射、反射..... 164
7.1.1 波传播的物理概念..... 157	7.3 波在多导线系统中的传播..... 165
7.1.2 波动方程及解..... 158	7.4 波在传播中的衰减与畸变..... 167
7.1.3 波速和波阻抗..... 159	7.4.1 线路电阻和绝缘电导的影响..... 167
7.1.4 前行波和反行波..... 160	7.4.2 冲击电晕的影响..... 168
7.2 行波的折射和反射..... 161	7.5 绕组中的波过程..... 169
7.2.1 线路末端的折射、反射..... 162	7.5.1 变压器绕组中的波过程..... 169
7.2.2 集中参数等效电路(彼德逊 法则)..... 163	7.5.2 旋转电机绕组中的波过程..... 174
	习题与思考题..... 175



<b>第8章 雷电过电压及其防护</b> .....	177	9.2.2 影响因素和降压措施	237
8.1 雷电放电和雷电过电压	177	9.3 切除空载变压器过电压	238
8.1.1 雷云的形成	178	9.3.1 发展过程	238
8.1.2 雷电放电过程	178	9.3.2 影响因素和限制措施	239
8.1.3 有关的雷电参数	180	9.4 断续电弧接地过电压	240
8.1.4 雷电过电压的形成	183	9.4.1 发展过程	240
8.2 防雷保护设备	186	9.4.2 防护措施	244
8.2.1 避雷针防雷原理及保护范围	186	9.5 绝缘配合	245
8.2.2 避雷线防雷原理及保护范围	189	9.5.1 绝缘配合的原则与方法	245
8.2.3 避雷器工作原理及常用种类	190	9.5.2 变电站电气设备绝缘水平的 确定	248
8.3 电力系统防雷保护	199	9.5.3 架空输电线路绝缘水平的 确定	253
8.3.1 输电线路的防雷保护	199	习题与思考题	256
8.3.2 发电厂和变电所的防雷 保护	210	<b>附录</b> .....	258
8.4 接地的基本概念及原理	225	附表1 普通阀式避雷器的电气特性	258
8.4.1 接地概念及分类	225	附表2 电站用磁吹阀式避雷器 (FCZ系列)的电气特性	259
8.4.2 接地电阻、接触电压和跨步 电压	225	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	259
8.4.3 接地和接零保护	229	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)	260
习题与思考题	231	<b>参考文献</b> .....	262
<b>第9章 操作过电压与绝缘配合</b> .....	232		
9.1 切除空载线路过电压	232		
9.1.1 产生原理	233		
9.1.2 影响因素和降压措施	233		
9.2 空载线路合闸过电压	235		
9.2.1 发展过程	235		

# 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行为和应用。

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十分迅速。自 20 世纪 60 年代以来，受高压、特高压 (UHV) 输电发展的推动，高电压技术已经产生了许多新的分支，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、远距离的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35~220kV的电压;超高压一般指330~1000kV的电压;特高压一般指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, $\pm 600$ 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电压下,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——试验性阶段。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。而且当时的直流设备制造水平也较低,可靠性有限。

2) 1954年~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,标志着直流输电进入了发展阶段。其主要特点是: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,但是参数已经有了很大提高,质量得到大幅改善。

3) 1972年到现在——高速发展阶段。1972年,晶闸管阀(俗称可控硅阀)在加拿大的伊尔河直流输电工程中得到采用,这是世界上首次采用更先进晶闸管阀取代原先的汞弧阀,从而使得直流输电进入了高速发展阶段。这一阶段的特点是:①晶闸管阀在世界范围内的直流工程中得到广泛应用;②大力建设超高压的直流输电工程;③单回线路的输电能力比前阶段有了很大提高。



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。

(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，输电建设迟缓，输电电压因具体工程不同而不同，没有具体标准，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。直到新中国建立以后，我国才逐渐形成了经济合理的电压等级系列。1952 年我国以自己的技术力量开始自主建设 110kV 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，在接下来几年形成了 220kV 东北骨干输电网。1972 年建成 330kV 刘家峡—关中输电线路，并逐渐形成西北电网 330kV 骨干网架。1981 年建成 500kV 姚孟—武昌输电线路，开始形成华中电网 500kV 骨干网架。1989 年建成  $\pm 500$ kV 葛洲坝—上海超高压直流输电线路，实现了华中、华东两大区的直联联网。

到 2002 年，我国发电设备装机容量已达  $3.53 \times 10^8$  kW，发电量达到  $1.6 \times 10^{12}$  kW·h，均位居世界第二位。自 1980 年起我国发电量的平均年增长率达到了 9%，远远超过同期世界总发电量增长率。尽管如此，我国的缺电情况仍然十分严重。目前，我国的人均装机容量仅有 0.34kW，仅为美国的十分之一。

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 600kV。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；特高压输电指的是正在开发的 1000kV 交流电压和  $\pm 800$ kV 直流电压输电工程和技术，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。由于我国幅员辽阔，一次能源分布不平均，动力资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”。而且由于送电距离的原因，发展 1000kV 及以上特高压输电技术对我国有着十分重大的意义。

## 2. 高电压下典型现象与研究简述

(1) 电介质的极化、电导与损耗 用来将不同电位的导体分隔开，使之在电气上不连接，没有电流通过的材料称为绝缘材料或者电介质。这些材料通常被认为是不导电的。而这些材料在电场作用下，会产生极化、电导、损耗等物理现象。

1) 电介质的极化。通常电介质显中性，但是如果其处于电场中，则电荷质点将顺着电场方向产生位移，这种现象称为电介质的极化。极化时电介质内部电荷总和为零，但会产生一个与外施电场方向相反的内部电场。

介质相对于真空的相对介电常数为



$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (0-1)$$

式中  $\varepsilon$ ——介质的介电常数；

$\varepsilon_0$ ——真空的介电常数。

由式 (0-1) 可知，相对介电常数是由电介质材料的性质决定的，是电介质的重要性能指标。比如对于平板电容器，它表明极板间加入某种绝缘材料后电容量增大的倍数。

几种常见电介质的相对介电常数见表 0-1。

表 0-1 几种常见电介质的相对介电常数

材料类别		名称	相对介电常数 $\varepsilon_r$ (工频, 20℃)
气体介质 (标准大气条件)		空气	1.00059
液体介质	弱极性	变压器油	2.2
	极性	蓖麻油	4.0
固体介质	中性	石蜡	1.9~2.2
		聚苯乙烯	2.4~2.6
	极性	松香	2.5~2.6
		聚氯乙烯	3.3
		纤维素	6.5
	离子性	云母	5~7
		陶瓷	6~7

在制造电容器时，耐电强度相同的情况下，往往选用  $\varepsilon_r$  大的绝缘材料作为极板间绝缘物质，可以减小单位电容器的体积和重量；在制造电缆时，则往往选用  $\varepsilon_r$  小的绝缘材料作为缆芯和外包之间的绝缘物质，从而减小充电电流。而当绝缘结构采取了一种以上的绝缘材料时，也要注意各种材料相对介电常数的配合，否则反而会使整体绝缘性能下降。

2) 电介质的电导。在介质中加上直流电压以后，流过介质中的电流可以分为三个部分：①纯电容电流分量，其由电极间几何电容及介质中的无损极化决定，存在时间短；②吸收电流，由介质的有损极化决定，存在时间较长、衰减较慢；③电导电流，也称为泄漏电流，不随时间变化且与绝缘电阻值相对应。在这里与泄漏电流相对应的电阻称为介质的绝缘电阻，其倒数就是绝缘电导。绝缘介质的电导决定泄漏电流的大小，如果电导过大，则泄漏电流增大以致引起介质发热加速绝缘老化。因此，一种绝缘介质的绝缘电导的大小某种程度上可以反映其性能优劣。

3) 电介质的损耗。处于电场中的绝缘介质，必然会存在一定的能量损耗，而这些由极化、电导等所引起的损耗就称为介质损耗。

介质损耗来源于两个方面：①由介质电导形成的漏电流在交变电压下具有有功电流的性质，由它所引起的功率损耗称为介质电导损耗；②由介质中与时间有关的各种极化过程所引起的损耗。介质中的各种极化的建立过程都需要一定的时间，当外加电场变化频率增高以致与某种极化建立过程所需要的时间可比时，这种极化就变得逐渐来不及建



立而呈现滞后效应，因而产生损耗，叫做松弛损耗。以上两种损耗在外电路上表现为通过介质的电流不再是理想的电容电流，其超前相位角不再是 $\frac{\pi}{2}$ 而是 $\frac{\pi}{2} - \delta$ ，在这里 $\delta$ 就是这种介质的电流相对于理想电容电流相位角的滞后角，称为损耗角。

工程上常用 $\tan \delta$ 来判断绝缘介质的品质情况， $\tan \delta$ 称为损耗因数和品质因数，用百分数表示。 $\tan \delta$ 与 $\varepsilon_r$ 一样均取决于材料性质，而与材料尺寸等无关。

(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，获得高电压就十分困难；没有可靠的绝缘系统，在高电压下，整个电气系统的运行就不能得到保证。

因此，对于电气绝缘的研究就非常重要。而由于介质放电等相关理论还不是很完善，因此，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定期进行检查，从而及早发现绝缘缺陷，及时修复或更换。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，并且随着信息技术等各种技术的进步，将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，因此设备造价也水涨船高。在高压设备昂贵的造价中，设备本身的绝缘结构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结构承受这一标准来制造，则设备的性价比将变得非常之低以致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) 更高电压等级的应用 我国输电电压经历了中压、高压到超高压的发展阶段，目前正在向特高压的方向发展。为实现西电东送，北电南送，以及全国大区电网互联的战略发展布局，例如，金沙江水电基地大规模开发后将向中部电网送电，内蒙古呼盟大型火电基地将向东北负荷中心送电。迫使我们必须认真开展更高一级电压特别是特高压输电的深入研究。为适应远距离大功率输电的需要，国家电网公司组织科研力量追踪世



界上有关特高压输电技术的发展动态。国网武汉高压研究院已建立 1000kV 以上电压等级的试验线段,开展了高一电压等级的研究,我国已有了特高压的技术储备和初步实验条件。很多专家学者对我国特高压输电究竟采用多高电压为宜的问题展开了讨论,发表了很多积极的建议。

一般认为,输电线路的输电能力与输电电压的平方成正比,输电电压提高一倍,则输电能力能够提高 4 倍。在输电电压发展史上,选择更高一级电压的时候,通常使相邻两个电压等级之比大于或者等于 2,这样构成的输电系统经济性较高,结构也较为合理。

我国在逐渐形成 330kV 区域和 500kV 区域输电骨干网架的同时,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 500kV 以上的输电电压为 1000kV 特高压,330kV 以上的输电电压为 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 超高压输电的可行性研究和特高压输电的基础研究,建立了特高压试验线,进一步对特高压技术进行试验研究。

(2) 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,电工学科是一个较为成熟的领域。然而,新材料在此领域的应用,却有可能带来革命性变化。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等很多优点,但是易破碎、抗拉强度低、笨重、生产耗能高等是电瓷(及玻璃)材料先天的弱点,特别是耐污闪性能不好,已成为电力系统安全运行的一大隐患。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,目前我国电力线路绝缘子市场上已占三分之一天下,而且有进一步发展壮大之趋势;已在线运行的 80 余万只线路合成绝缘子经受住了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或玻璃绝缘子,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发展的又一动力。新型传感技术、信息的采集和处理技术、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。

### (3) 与其他学科交叉渗透

1) 在环境保护领域的应用。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。我国也将环境保护提高到了基本国策的认识高度,并投入巨额资金进行环境保护和治理。而高电压技术在这一领域也有着日新月异的应用。

在烟气的脱硫、脱硝、除尘问题方面,在烟气排放前,可以通过高压窄脉冲电晕放电对烟气进行处理,以达到较好的脱硫、脱硝效果。这是由于上升前沿陡、脉冲窄的高压放电可以产生 5~20eV 的高能电子,打断周围气体分子的化学键生成氧化性极强的



自由原子、自由基等活性物质，同时达到脱硫、脱硝的效果。并且在氨注入的条件下，还可以生成化肥。目前日、美、意、俄等国均开展了对此方法的研究，并且意大利和日本已经建成了工业试验装置进行工业性实验。我国对此也在积极研究中。

在处理汽车尾气方面，国际上也在尝试用高压脉冲放电产生非平衡态等离子体来处理。通过放电等离子体产生的物理化学作用，加上催化剂本身的作用，能够得到比单一使用催化剂处理更好的效果，经济性也大为提高。

在污水处理方面，传统的处理方法对很多废水中的难降解成分处理效率仍然不高。如果采用水中高压脉冲放电的方法，对废水中的多种难降解物质能够达到较好的降解效果。因此，应用前景也非常广阔。

此外，通过高压脉冲放电产生的各种带电粒子和中性粒子发生的复杂反应，能够产生高浓度的臭氧和大量的活性自由基，在杀毒灭菌方面也有显著的效果。而通过高电压技术人工模拟闪电，能够在无氧状态下，用强带电粒子流破坏有毒废弃物，将其分解成简单分子，并在冷却中和后形成高稳定性的玻璃体物质或者有价金属等，此技术对于处理固体废弃物中的有害物质效果显著。

2) 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，目前电磁环境学已经成为研究热点之一。

3) 在新能源领域的应用。由于目前广泛采用的一次能源，如石油、煤、天然气等储量有限，对新能源的开发已经成为能源领域迫在眉睫的问题。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的进步将会起到关键的作用。

4) 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，在结构上、性能上都有与常规薄膜所不同的新特性。比如等离子聚合膜的交联度可以很高，致密性好，因此具有机械强度高、耐热性好、耐化学侵蚀性强等优点。有的等离子聚合膜的介电常数非常大，可以用于集成电路芯片制造；有的等离子聚合膜的电导率较高，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。



