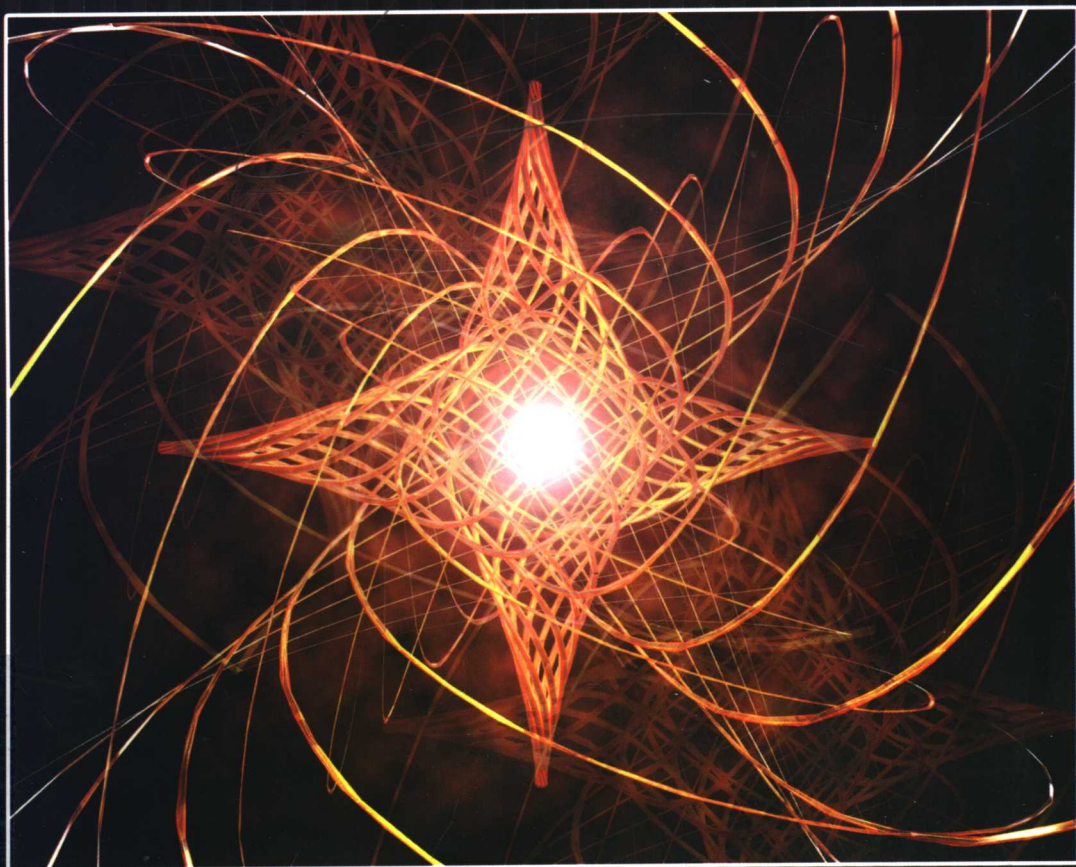




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高电压工程基础

施围 邱毓昌 张乔根 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TM8
14

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高电压工程基础

施 围 邱毓昌 张乔根 编著



机械工业出版社

本书介绍与高电压有关的电介质——气体、液体、固体的放电过程、发展机理及绝缘特性，分析影响这些特性的因素；交流、直流高电压和冲击高电压的产生方法、原理、基本装置以及它们的测量手段，相关绝缘的试验技术；电力系统过电压产生的物理过程及其防护措施和电力系统绝缘配合的基本概念；同时反映近年来高电压领域的新技术，以适应电力工业发展的需要。本书作者具有多年的教学经验，精选内容，删繁就简，既加强基础部分，又使其具有适用性，并兼顾不同水平读者的需求。

本书除可作为电气类专业课教材外，也可供大专、成人自学和电力、电工部门职工培训、电力管理工作及有关技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高电压工程基础/施围, 邱毓昌, 张乔根编著. —北京: 机械工业出版社, 2006.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-111-19015-7

I. 高… II. ①施…②邱…③张… III. 高电压—高等学校—教材 IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 038218 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 于苏华 版式设计: 张世琴 责任校对: 吴美英
封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2006 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·15.75 印张·384 千字
定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68326294
编辑热线电话 (010) 88379711
封面无防伪标均为盗版

前 言

“高电压技术”课程是由过去高电压技术专业的三门课：“高电压绝缘”、“高电压试验技术”、“电力系统过电压与绝缘配合”演变过来的，作为电力系统及其自动化专业的一门必修课，在我国已有 50 年的历史了。本教材的前身《高电压工程》于 1994 年出版，是按照 50 ~ 54 学时编写的。根据当时该课程定位在工程应用的概论课的特点，做到既突出基本概念适当反映高电压技术的新成就，又要减轻学生学习负担，使本教材易于阅读，同时兼顾了不同水平读者的要求。

10 多年来，随着教学改革的深入，专业知识面不断拓宽，同时高电压技术也有了很大的发展，IEC 标准、国家标准也发生了一系列变化，重新编写本教材是非常必要的。本教材更名为《高电压工程基础》，与原教材相比，增加了两章内容：第 1 章绪论：高压输电的必要性、我国电力工业的发展、电力工业对高电压技术发展的促进作用、新材料和新技术在高电压技术中的应用、高电压技术在其他领域的应用；第 14 章电力系统过电压计算：概述、单相电磁暂态过程的元件模型、多相电磁暂态过程的数学模型、开关元件与非线性元件模型、初始值的确定。重新编写了第 6 章及第 7 章，并对原来各章节内容作了全面修改与补充，如电力系统过电压部分的快速暂态过电压、新的测量方法等。

西安交通大学邱毓昌老师编写绪论和第 1 ~ 5 章（此部分的清样校对工作由郭洁老师完成），张乔根老师编写第 6、7 章，施围老师编写第 8 ~ 15 章。在编写过程中，编者既总结了多年高电压工程课程的教学经验，力求使本教材在基础理论、物理概念与高电压现象发展的机理等方面，简明扼要、深入浅出；又面向国家在高电压领域的科研、生产的主战场，增加了近年来该领域的新技术内容，与新的国家标准、法规保持一致，注意内容的实用性；同时还参阅了大量国内外文献资料。

本书的主要读者对象为电力系统及其自动化专业的大学本科生，也可作为电气类各专业和电子束离子束技术专业学生的高电压课教材，以及电力和电工部门高电压工作者阅读参考。

限于水平，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者
2006 年 3 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 高压输电的必要性	1
1.2 我国电力工业的发展	3
1.3 电力工业对高电压技术发展的促进作用	5
1.4 新材料和新技术在高电压技术中的应用	7
1.5 高电压技术在其他领域的应用	9
第 2 章 气体放电的基本物理过程	10
2.1 带电质点的产生与消失	10
2.1.1 气体中电子与正离子的产生	10
2.1.2 电极表面的电子逸出	12
2.1.3 气体中负离子的形成	13
2.1.4 带电质点的消失	14
2.2 放电的电子崩阶段	14
2.2.1 非自持放电和自持放电的不同特点	14
2.2.2 电子崩的形成	15
2.2.3 影响碰撞电离系数的因素	16
2.3 自持放电条件	17
2.3.1 pd 值较小时的情况	17
2.3.2 pd 值较大时的情况	18
2.3.3 电负性气体的情况	19
2.4 不均匀电场中气体放电的特点	20
2.4.1 稍不均匀电场和极不均匀电场的不同特点	20
2.4.2 极不均匀电场中的电晕放电	21
2.4.3 不均匀电场中放电的极性效应	23
习题	25
第 3 章 气体间隙的击穿强度	26
3.1 稳态电压下的击穿	26
3.1.1 均匀电场中的击穿	26
3.1.2 稍不均匀电场中的击穿	27
3.1.3 极不均匀电场中的击穿	28
3.2 雷电冲击电压下的击穿	29
3.2.1 冲击电压的标准波形	29
3.2.2 放电时延	30
3.2.3 50% 击穿电压及冲击系数	30
3.2.4 伏-秒特性	31
3.3 操作冲击电压下的击穿	33
3.3.1 操作冲击电压下击穿的 U 形曲线	33
3.3.2 操作冲击电压的推荐波形	33
3.3.3 长空气间隙在操作冲击电压下的击穿强度	34
3.4 大气密度和湿度对击穿的影响	34
3.4.1 大气校正因数	35
3.4.2 海拔的影响	36
3.5 SF_6 气体间隙中的击穿	36
3.5.1 均匀和稍不均匀电场中的击穿	36
3.5.2 极不均匀电场中的击穿	38
3.5.3 影响击穿场强的因素	39
3.5.4 快速暂态过电压下的击穿	41
3.6 提高气隙击穿电压的措施	42
3.6.1 改善电场分布的措施	42
3.6.2 削弱电离过程的措施	43
习题	45
第 4 章 气体中沿固体绝缘表面的放电	46
4.1 界面电场分布的典型情况	46
4.2 均匀电场中的沿面放电	46
4.3 极不均匀电场中的沿面放电	48
4.3.1 具有强垂直分量时的沿面放电	48
4.3.2 具有弱垂直分量时的沿面放电	49
4.4 受潮表面的沿面放电	51

4.4.1 表面凝露对沿面放电的影响	52	6.4 局部放电的测试	84
4.4.2 表面淋雨对沿面放电的影响	52	6.4.1 局部放电的检测回路	84
4.5 脏污绝缘表面的沿面放电	53	6.4.2 局部放电的测量 阻抗和测量仪器	85
4.5.1 污闪的发展过程	54	6.4.3 用超声波探测器 测量局部放电	85
4.5.2 影响污闪电压的因素	54	6.5 电压分布的测量	86
4.5.3 污秽等级的划分	55	6.6 绝缘油的电气试验 和气相色谱分析	87
4.5.4 防止污闪的措施	56	6.7 绝缘状态的在线监测	88
习题	57	6.7.1 $\text{tg}\delta$ 的在线监测	88
第 5 章 液体和固体介质的电气特性	58	6.7.2 局部放电的在线监测	89
5.1 电介质的极化、电导与损耗	58	6.7.3 油中气体含量的在线监测	91
5.1.1 电介质的极化	58	习题	91
5.1.2 电介质的电导	60	第 7 章 电气设备绝缘的高电压试验	92
5.1.3 电介质的能量损耗	61	7.1 交流高电压试验	92
5.2 液体介质的击穿	62	7.1.1 工频高电压的产生	92
5.2.1 影响液体介质击穿的因素	63	7.1.2 串联谐振交流高压的产生	95
5.2.2 减小杂质影响的措施	64	7.1.3 交流高压试验	96
5.3 固体介质的击穿	65	7.2 直流高电压试验	97
5.3.1 电击穿	65	7.2.1 直流高电压的产生	97
5.3.2 热击穿	66	7.2.2 直流高电压的试验	100
5.3.3 电化学击穿	67	7.3 冲击电压试验	101
5.4 组合绝缘的特性	70	7.3.1 冲击电压发生器与参数计算	101
5.4.1 油-屏障绝缘和油纸 绝缘的特点	70	7.3.2 截断波的产生方法	104
5.4.2 多介质系统中的电场	70	7.3.3 操作冲击电压的获得	105
5.4.3 电场调整的方法	71	7.3.4 陡波前冲击电压的产生	105
5.5 绝缘的老化	72	7.4 稳态高电压的测量	106
5.5.1 电介质的热老化	73	7.4.1 气体放电间隙	106
5.5.2 介质的电老化	73	7.4.2 静电电压表	108
5.5.3 机械力的影响	73	7.4.3 利用高压电容器的测量方法	108
5.5.4 环境的影响	74	7.4.4 高压分压器	109
习题	74	7.5 冲击电压的测量	111
第 6 章 电气设备绝缘的预防性试验	75	7.5.1 球间隙测量冲击电压的幅值	111
6.1 绝缘电阻的测试	75	7.5.2 冲击电压分压器	112
6.1.1 多层介质的吸收现象	75	7.6 光电与数字化测量技术	116
6.1.2 绝缘电阻和吸收比的测量	77	7.6.1 光电测量技术	116
6.2 泄漏电流的测量	78	7.6.2 数字化测量技术	117
6.3 介质损耗角正切值的测量	80	习题	118
6.3.1 西林电桥的基本原理	80	第 8 章 线路和绕组中的波过程	120
6.3.2 外界电磁场对电桥的干扰	82	8.1 波在单根均匀无损导线上的传播	120
6.3.3 影响 $\text{tg}\delta$ 测量结果的因素	82		
6.3.4 数字化测量方法	83		

8.1.1 单根输电线路的等效电路	120	10.3.2 有避雷线时直击雷过电压	168
8.1.2 波阻抗与波速	120	10.4 输电线路雷击跳闸率的计算	171
8.1.3 波动方程及其解	122	习题	173
8.1.4 前行波和反行波	123	第 11 章 发电厂和变电所的	
8.2 行波的折射与反射	124	防雷保护	174
8.2.1 折射系数和反射系数	124	11.1 发电厂和变电所的直击雷保护	174
8.2.2 彼德逊法则	126	11.1.1 装设避雷针(线)的原则	174
8.2.3 等效波法则	127	11.1.2 避雷针(线)的设计计算	174
8.3 行波通过串联电感与旁过并联电容	128	11.1.3 几个具体问题	175
8.3.1 直角波通过串联电感	128	11.2 发电厂和变电所的行波保护	176
8.3.2 直角波旁过并联电容	129	11.2.1 避雷器的保护作用	176
8.4 行波的多次折、反射	132	11.2.2 变电所的进线保护	179
8.5 行波在无损平行多		11.3 变电所防雷的几个具体问题	182
导线系统中的传播	134	11.3.1 三绕组变压器和自耦变压器	
8.6 冲击电晕对线路上波过程的影响	137	的防雷保护	182
8.7 变压器绕组中的波过程	138	11.3.2 变压器的中性点保护	183
8.7.1 单绕组中的波过程	138	11.3.3 配电变压器的防雷保护	184
8.7.2 三相绕组中的振荡过程	142	11.4 气体绝缘变电所的防雷保护	184
8.7.3 绕组间波的传递	143	11.4.1 GIS 变电所雷电过电压	
8.7.4 变压器的内部保护	143	保护的特点	185
8.8 旋转电机绕组中的波过程	144	11.4.2 GIS 变电所常用的	
习题	145	雷电保护接线	185
第 9 章 雷电及防雷装置	146	11.5 旋转电机的防雷	185
9.1 雷电放电的发展过程	146	11.5.1 旋转电机防雷保护的特点	186
9.2 雷电参数	147	11.5.2 直配电机的防雷保护	186
9.3 避雷针和避雷线	150	11.5.3 非直配电机的防雷保护	188
9.4 避雷器	152	习题	188
9.4.1 保护间隙	153	第 12 章 暂时过电压	189
9.4.2 管式避雷器	153	12.1 工频电压升高	189
9.4.3 阀式避雷器	153	12.1.1 超高压系统中工频	
9.5 防雷接地	159	电压升高的重要性	189
习题	162	12.1.2 工频电压升高的原因	190
第 10 章 输电线路的防雷保护	163	12.1.3 工频电压升高的限制措施	193
10.1 输电线路防雷的原则和措施	163	12.2 谐振过电压	195
10.2 线路感应雷过电压	164	12.2.1 谐振的类型	195
10.2.1 无避雷线时的感应		12.2.2 铁磁谐振过电压	196
雷过电压	165	习题	198
10.2.2 有避雷线时的感应		第 13 章 操作过电压	199
雷过电压	166	13.1 中性点不接地系统电弧	
10.3 输电线路的直击雷过电压	166		
10.3.1 无避雷线时直击雷过电压	166		

接地引起的过电压	199	14.1 概述	215
13.1.1 过电压发展的物理过程	199	14.2 单相电磁暂态过程的元件模型	217
13.1.2 限制过电压的措施	201	14.2.1 集中参数电路模型	217
13.2 合闸空载线路引起的过电压	202	14.2.2 分布参数电力模型——单相无损 线的 Bergeron 等效计算电路	219
13.2.1 产生过电压的物理过程	203	14.2.3 线路损耗近似的处理方法	223
13.2.2 影响过电压的因素	204	14.2.4 电源支路的模拟	223
13.2.3 限制过电压的措施	204	14.2.5 单相暂态等效计算 网络的形成及求解	224
13.3 切除空载线路引起的过电压	205	14.3 多相电磁暂态过程的数学模型	227
13.3.1 产生过电压的物理过程	205	14.4 开关元件与非线性元件模型	228
13.3.2 影响过电压的因素	206	14.5 初始值的确定	229
13.3.3 限制过电压的措施	206	习题	229
13.4 切除空载变压器产生的过电压	207	第 15 章 电力系统的绝缘配合	230
13.4.1 产生过电压的物理过程	207	15.1 绝缘配合的基本概念与方法	230
13.4.2 影响过电压的因素	208	15.1.1 绝缘配合的原则	230
13.4.3 限制过电压的措施	208	15.1.2 绝缘配合的方法	231
13.5 GIS 中快速暂态过电压 (VFTO)	209	15.2 输变电设备绝缘水平的确定	232
13.5.1 VFTO 产生的机理	209	15.3 输电线路绝缘水平的确定	237
13.5.2 VFTO 的特性	209	15.3.1 绝缘子片数的确定	237
13.5.3 VFTO 的影响因素	210	15.3.2 输电线路空气间隙的确定	238
13.5.4 VFTO 的危害	211	习题	240
13.5.5 VFTO 的防护	212	参考文献	241
13.5.6 GIS 的 VFTO 计算实例	212		
习题	214		
第 14 章 电力系统过电压计算	215		

第 1 章 绪 论

高电压技术是在 20 世纪初为实现高压输电而形成的一个电力工程分支学科，具有显著的工程应用特点。美国工程师皮克 (F.W. Peek) 在研究解决 110kV 输电线路电晕问题后于 1915 年出版了一本名为《高电压工程中的电介质现象》的专著，首次提出“高电压工程”(High Voltage Engineering) 这一术语，大概就是因为当时的高电压技术完全是为了解决高压输电工程中绝缘问题的。尽管其技术内涵已有了很大的发展，这一名称在西方发达国家一直沿用至今。例如该领域的大型系列国际会议的名称是国际高电压工程学术会议 (International Symposium on High Voltage Engineering)。该会议首次于 1972 年在德国慕尼黑召开时规模并不大，如今该会每两年召开一次，议题的广泛和参加会议的人数之多已远非第一、二届会议可比。尽管现今高电压技术的发展早已超出对高压输电的研究，但考虑到这一学科起源于高压输电工程的发展，目前仍与高压输电有着最密切的联系 (例如我国绝大部分高电压工作者仍在电力和电工制造部门工作)。本章先对高电压输电作一概述。

1.1 高压输电的必要性

能源基地通常远离用电负荷中心，为此就需要远距离大容量输电。输电线路的传输容量主要受以下三个因素的制约。

(1) 线损与发热 不同截面的电缆和架空线都有其最大允许的载流量，电流过大会使线路能量损耗太大，导致导线温度过高而引发事故 (电缆温度过高会引起绝缘的热击穿；架空线温度过高会使杆塔之间线路弧垂过大甚至会引起线路接头的熔化)。例如 2003 年 8 月 14 日美国东部六个州和加拿大的两个省同时发生大面积、长时间的停电，就是由于一条线路过载而使弧垂增大触及树枝而引发的。所以要增大输电容量必须提高输电电压。

(2) 线路电压降 为保证用户侧的电压在合理的运行范围之内，对线路电压降必须有所限制。因此从这一点出发，也只有提高输电电压才能增大传输容量。

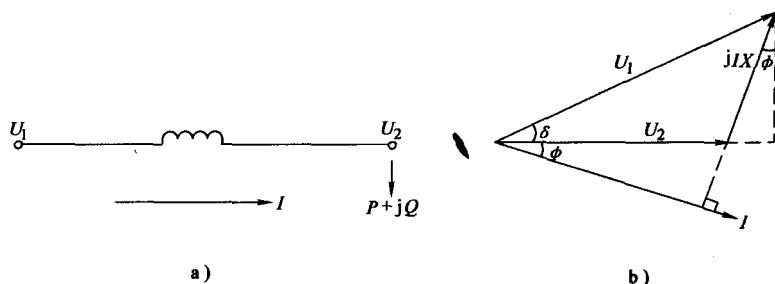


图 1-1 输电线简化等效电路和电压、电流相量图

a) 输电线简化等效电路 b) 电压、电流的相量图

P 、 Q —用户侧的有功和无功功率 ϕ —功率因数角 δ —功角

(3) 电力系统稳定 直流输电系统中不存在系统稳定问题；但对交流输电系统而言，电力系统稳定是保证系统安全运行的极为重要的问题。图 1-1 给出一条连接电源和负载的输电线路的简化等效电路和相量图。等效电路中忽略线路的电阻 R 而只画出感抗 X ，是因为对高压输电线路，通常 $R \ll X$ ；图中也未画出输电线路的等效对地电容，因为这并不影响电源电压 (U_1) 与负载电压 (U_2) 间的相量关系。

由图 1-1b 可见

$$IX \cos \phi = U_1 \sin \delta$$

等式两边乘以 U_2 后可写出

$$X \underbrace{U_2 I \cos \phi}_P = U_1 U_2 \sin \delta$$

即

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta \quad (1-1)$$

由于 U_1 与 U_2 均近似等于线路的标称电压 U_N ，式 (1-1) 可写作

$$P = \frac{U_N^2}{X} \sin \delta \quad (1-2)$$

或

$$P_{\max} = \frac{U_N^2}{X} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中， P_{\max} 是在静态稳定极限情况下（即 $\delta = 90^\circ$ ）输送功率的极限值。为保证电力系统安全运行，正常运行方式下的输送功率一般不大于 $0.85 P_{\max}$ 。

式 (1-3) 表明，要增大输送功率或增加传输距离 (X 正比于传输距离)，都必须提高输电电压。对于远距离输电线路而言，上述三种制约因素中，最重要的约束条件是保证电力系统的稳定。

通过上述分析可以看出，输电技术的百年发展史，实际上是依靠不断提高电压等级来增大输送容量和输电距离。图 1-2 给出近百年来全球交流输电电压等级发展的情况。

需要说明的是，图 1-2 中的 750kV 泛指 735kV、750kV 和 765kV 三种标称电压。735kV 线路是加拿大在 1965 年建成投运的，

最高运行电压为 765kV，目前尚无其他国家使用这一电压等级。750kV 线路是前苏联于 1967 年建成投运的，其最高运行电压为 787kV（即标称电压的 1.05 倍），该国后来还用这一电压等级与匈牙利、波兰、保加利亚、罗马尼亚等国联网。美国于 1969 年建成 765kV 线路，其最高运行电压为 800kV，这一电压等级后来也被其他国家采用。巴西、南非、委内瑞拉和韩国都已有 765kV 的输电线路。我国西北地区已投入运行的 750kV 线路的最高运行电压为 800kV，所以其绝缘水平实际上与国外 765kV 线路是相同的。

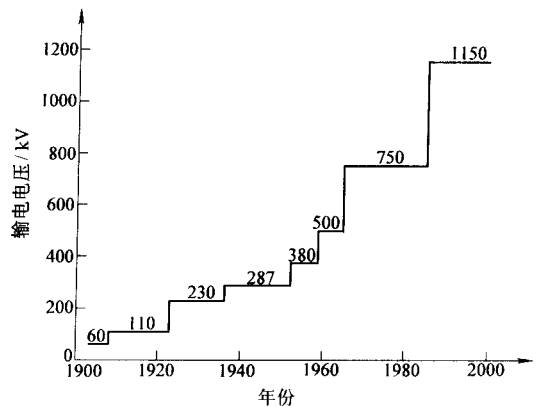


图 1-2 交流输电电压等级的发展

1.2 我国电力工业的发展

近半个世纪以来,我国电力工业发展很快,在最近的 20 余年内尤为如此。这一点可以从图 1-3 所示的我国发电装机容量增长的情况看出。至 2004 年底,我国发电装机容量为 440.7GW,是 1949 年的 238 倍,位居世界第二位。

我国是世界人口第一大国,尽管电力工业发展如此迅速,缺电情况依然很严重。目前我国的人均装机容量仅为 0.34kW,不到经济合作与开发组织(Organization for Economic Cooperation and Development,简称 OECD)成员国平均值的 1/5;与美国的差距更大,只有该国人均装机容量的 1/10 左右。为此我国电厂建设今后仍将高速发展,预计到 2020 年,我国发电装机容量将达 900~950GW。但即使到那时,我国的人均发电装机容量仍低于世界平均水平,可见我国电力工业的发展任重而道远。

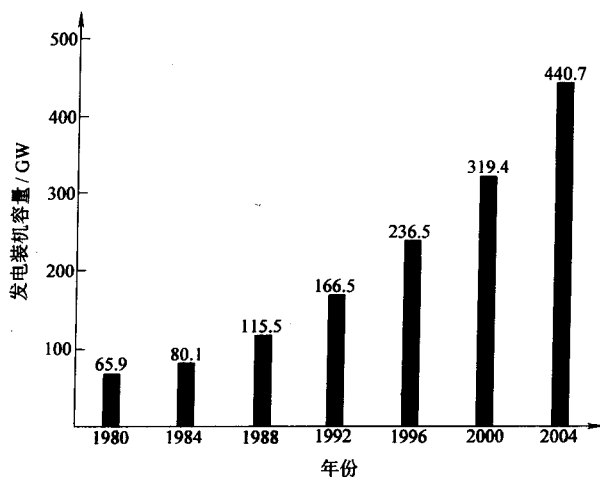


图 1-3 我国发电装机容量增长的情况

与发电设备容量迅速增长的情况相

比,我国高压输电技术的发展明显滞后。我国首条 220kV 输电线路于 1943 年在东北投入运行,1974 年在西北地区建成第一条 330kV 输电线路,1981 年在华中地区首次建成 500kV 线路,2005 年 9 月我国在的第一条 750kV 线路西北地区投运,1000kV 特高压试验线正在设计中。我国的超高压输电技术正在蓬勃发展。需要说明的是,330kV、500kV 与 750kV 都属于超高压(Extra High Voltage,简称为 EHV),只有 1000kV 及以上的交流电压才是特高压(Ultra High Voltage,简称为 UHV)。

表 1-1 是我国出版的《电机工程手册》给出的不同电压等级交流输电线路的一般输送容量及输电距离。由表可见,各级电压的输送容量与输电距离的范围均有一定的重叠,要通过具体的设计计算,经过综合技术经济比较后来选取输电电压等级。

表 1-1 我国交流输电线路的一般输送容量及输电距离

标称电压/kV	110	220	330	500	750
最高运行电压/kV	126	252	363	550	800
输送容量/MW	10~50	100~500	200~1000	500~1500	1000~2000
输电距离/km	150~50	300~100	600~200	1000~250	1500~500

我国高压输电技术的滞后可以从以下事实清楚地看出。

我国在建的装机容量为 18.2GW 的三峡水电站是全球最大的电站,但其输电电压却仅为交流 500kV 和直流 ± 500 kV,而 20 余年前建成的目前运行中最大的电站,即巴西的伊泰普水电站(装机容量为 12.6GW)的输电电压是交流 765kV 和直流 ± 600 kV。三峡水电站的输电电压过低致使电站出线回数过多,对其布置带来很多困难。另一个事实是 20 世纪 80 年代中期

前苏联已建成 1150kV 输电线路并已取得多年的运行经验；前苏联解体后输电容量大幅度减少，降压为 500kV 运行。日本在 20 世纪 90 年代也建成三条较短的 1000kV 输电线路，主要目的是为了压缩线路走廊以节省土地资源。但因为与之配套的大型核电机组的推迟投产，降压为 500kV 运行，计划于 2015 年前后升压至 1000kV 运行。美国早在 20 世纪 70 年代就已建有两项特高压输电线路，美国电力公司的试验线段的电压是 1500kV（作为已有的 765kV 线路的上一级输电电压），邦尼维尔电力公司的试验线段的电压是 1200kV（作为其已有的 500kV 线路的上一级输电电压），已作了很多研究工作，只是后来因其国情发生变化，暂无必要发展较远距离的大容量输电工程而中止了这一研究工作。

是否有必要远距离大容量输电，与发电的能源结构和能源分布有关。表 1-2 给出目前我国发电能源结构的情况，表中其他一栏包括风力发电、太阳能发电、地热发电和生物质发电等。

表 1-2 2004 年我国各类发电厂的装机容量

电厂类型	火电	水电	核电	其他	总计
装机容量/GW	324.9	108.26	6.84	0.7	440.7
占总装机量的百分比(%)	73.72	24.57	1.55	0.16	100

由表 1-2 可见，我国现今仍以燃煤火力发电为主，其次是水力发电；核电与风力发电所占的百分比很小。我国的发电能源结构与有些国家差别很大，例如法国的核电比例高达 80%，丹麦的风力发电比例约为 20%。我国发电能源结构特点反映出水力资源与煤炭资源丰富，而油、气资源不多的情况，所以今后我国的发展仍以燃煤火电与水电为主。据有关部门预测，到 2020 年，我国核电装机容量将上升到 3.87%，风力发电将上升到 2.15%，此时火电与水电的装机容量仍高于 93%。

我国煤炭资源主要集中在华北和西北地区，水能资源则主要集中在西南地区，例如即将建设的金沙江上的溪洛渡水电站和向家坝水电站的装机容量分别是 12.6GW 和 6GW（这两个相距不远的水电站的总装机容量将超过三峡水电站）。可见，进一步发展大容量远距离输电是我国电力系统发展的关键。由于历史的原因，我国电力系统在 220kV 以上有两种不同输电电压等级的系列，在西北地区是 330kV 和 750kV，而在全国其他地区不采用这两种电压等级而是采用 500kV 和近期正在研究开发的 1000kV 的特高压输电。

我国电力工业发展中另一个重要和关键的问题是要采取有效措施，减少火力发电厂 CO₂ 的排放量。2005 年 2 月 16 日，旨在限制全球温室气体排放总量以遏制全球气候变暖的《京都议定书》正式生效。我国是世界第二大 CO₂ 排放国，目前温室气体排放量占到发展中国家排放总量的 50%，是全球排放总量的 15%，所以减少 CO₂ 排放量的任务是巨大的。我国目前煤炭的 45% 用于发电，而美国则为 87% 以上。由于治理电力工业集中的污染源远较低效直接燃煤的分散源易于实现和更加经济，所以要解决我国燃煤污染并控制 CO₂ 排放量的基本出发点应使未来煤炭消费的 70% ~ 80% 用于发电，同时采用洁净煤发电技术以提高燃煤发电的效率并降低污染排放。

处于研究和发展阶段的洁净煤发电技术主要有：配备烟气脱硫和脱硝的超临界和超超临界发电技术，循环硫化床锅炉，增压硫化床联合循环，整体煤气化联合循环等。采用超临界和超超临界机组是在传统燃煤发电技术的基础上提高蒸汽压力和温度以获得较高的发电效率，因而与亚临界参数的机组相比，可以降低单位发电量的污染物排放量。目前这种机组的最大容量可

做到 1000MW 等级, 供电效率可达 45% (亚临界机组的供电效率不到 40%)。与其他洁净煤发电技术相比, 超临界和超超临界发电在技术上最为成熟和易行, 但由于这种技术仍是传统的煤燃烧过程, 无法在燃烧过程中处理各种污染物, 而只是靠对尾部烟气处理来控制污染物排放, 因此从技术上看是不够彻底的。上述洁

净煤发电技术中最理想的是整体煤气化联合循环 (Integrated Gasification Combined Cycle, 简称为 IGCC)。联合循环是指燃气-蒸汽联合循环发电, 以克服蒸汽轮机循环和燃气轮机循环各自的局限性, 因而其热效率高于二者单独使用的情况。图 1-4 给出联合循环发电的热力系统示意图, 图中 1—2—3—4 是燃气轮机内压缩、燃烧和膨胀做功的过程; 4—5 是燃气轮机排气在余热锅炉中对给水进行加热的过程; 6—7—8—9—10 是给水吸热转化为过热蒸汽后在汽轮机中膨胀做功的过程; 10—11 是汽轮机排汽在凝汽器中凝结放热的过程。

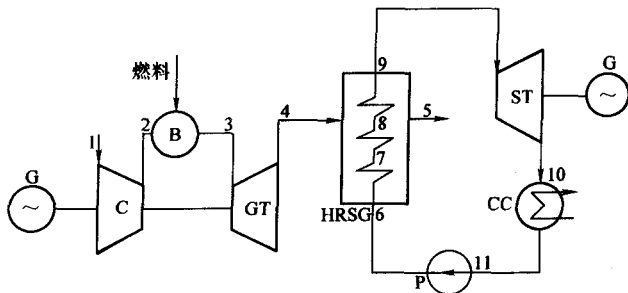


图 1-4 联合循环发电的热力系统示意图
C—压气机 B—燃烧室 GT—燃气轮机 HRSG—余热锅炉
ST—汽轮机 CC—凝汽器 P—给水泵 G—发电机

图 1-4 给出的是以天然气或油为燃料的燃气-蒸汽联合循环, 对于以煤为燃料的 IGCC 则还要增添气化炉和煤气净化设备, 即将煤在气化炉中气化成为中热值或低热值的粗煤气, 再经过净化设备除去其中的灰粉、硫化物、氮化物等有害物质后才送到燃气轮机中去。

随着新的清洁可再生能源在发电技术中应用的发展 (如风力发电、燃料电池和太阳能光伏发电等), 以及发电设备制造技术的进步 (如微型燃气涡轮发电机等), 近年来分布发电技术得到了迅速的发展。与传统的高压远距离输电系统的大型电站相比, 分布式发电的主要优点是: 投资少 (不需要高压输电系统、基础设施的投资大大减少)、建设快、运行费用低 (线路损耗远比传统的电力系统低)、供电可靠 (电力系统中高压输电设备及线路的事故常是影响供电可靠性的一个重要因素)。分布式发电设备对采用高压远距离输电的大型电厂具有很好的互补性, 但分布式发电设备的容量仅为兆瓦级, 不可能取代传统的高电压大容量的远距离输电。

1.3 电力工业对高电压技术发展的促进作用

百年来高电压技术有了很大的发展, 今后仍会继续不断地有更大的发展。促使高电压技术发展的因素很多, 本节讨论电力工业的发展对高电压技术的促进作用。

1. 新的更高电压等级的应用

系统采用新的更高电压等级对高电压技术的发展有直接的促进作用, 因为电压等级提高后常常会出现一些新问题, 需要采取新的技术来解决。以高电压技术发展初期解决线路电晕为例, 对于配电网使用的中压等级 (Medium Voltage, 简称为 MV) 而言, 电晕并不是什么需要专门研究解决的问题, 但对于高压输电线路来说, 这是一个需要解决的关键技术问题。随着输电电压的进一步提高, 人们对输电线路电晕的危害有一个认识的发展过程, 即从初期仅关注能量损耗, 其后才认识到电晕的电磁干扰问题, 再发展到要解决电晕的可听噪声问题,

这三者中后者往往是进行线路绝缘设计时最重要的制约因素。以日本东京电力公司建成的 1000kV 线路为例, 必须采用 8 根截面为 810mm^2 的钢芯铝绞线构成分裂间距为 40cm 的正八边形的 8 分裂导线, 才能将线路电晕的噪声水平降至 500kV 线路的水平, 即 50dB。再以电力系统过电压防护为例, 也可看出不同电压等级有不同的主要问题: 对配电线路而言, 雷电过电压常是决定线路绝缘水平的主要因素; 但对超高压和特高压输电线路而言, 则操作过电压和工频过电压是更为重要的因素。

除电压等级的影响外, 不同输电方式的应用, 也是对高电压技术发展的促进因素, 下面以紧凑型输电、灵活交流输电、直流和轻型直流输电为例, 作一简要的讨论。

2. 紧凑型输电技术

紧凑型输电线路的特点是取消常规线路杆塔的相间接地构架而将三相线路置于同一塔窗中, 使导线相间距离显著减小。因此, 与常规线路相比, 紧凑型输电线路的电感减小, 电容增大, 即线路的波阻抗减小, 从而增大了输电线路的自然功率, 也就是说可以有效地提高线路的输送能力。紧凑型输电的另一个显著优点是线路走廊减小, 因而占地减少。我国第一条紧凑型输电线路是北京昌平到房山的 500kV 线路, 全长 83km, 于 1999 年 11 月投入运行。该线路与常规水平排列的 500kV 线路相比, 线路走廊从 24.6m 减小到 6.7m, 自然功率提高了 34%。由于相间距离减小, 紧凑型线路的地面电场强度下降, 超过 4kV/m 的地面宽度从常规线路的 48m 减小到 16m。显然对紧凑型输电线路的绝缘设计要作细致的研究。以上述线路为例, 对导线结构的不同方案进行比较后选用 6 根截面为 240mm^2 的 6 分裂导线, 而相同的常规 500kV 线路采用的是 4 根截面为 400mm^2 的 4 分裂导线。

3. 灵活交流输电技术

灵活交流输电系统 (Flexible AC Transmission System, 简称为 FACTS) 是指装有电力电子型或其他静止型控制器以加强系统可控性和增大传输能力的交流输电系统。FACTS 的概念是 20 世纪 80 年代末提出来的, 但实际上有的 FACTS 装置, 例如静止无功补偿器 (Static Var Compensator, 简称为 SVC) 早已在电力系统中得到应用, 例如我国 1981 年投入运行的第一条 500kV 输电线路末端的武汉凤凰山变电站中已装有 SVC。SVC 中既装有用来提高功率因数的并联电容器以保证重载时用户端的电压不致太低, 又装有并联电抗器以降低线路轻载或空载时长线末端出现的工频过电压。图 1-5 给出带固定并联电容器组和以晶闸管控制的电抗器的静止无功补偿器原理图。可见 SVC 的电抗可从电容性到电感性按需要调节 (通过母线电压的高低来调节), 从而使 SVC 安装点的电压保持在一定的范围内。与高电压技术关系较密切的其他 FACTS 装置还有用于串联补偿线路的晶闸管控制的串联电容器 (Thyristor Controlled Series Capacitor, 简称为 TCSC) 等。显然装有这些 FACTS 装置的电力系统的过电压与常规的系统是不同的。

4. 高压直流与轻型高压直流输电

高压直流 (HVDC) 在远距离输电工程中有很大的优势, 因为它不像交流输电系统有系统稳定的问题。图 1-6 表明, 当输电距离超过某一等价距离时, 高压直流输电比高压交

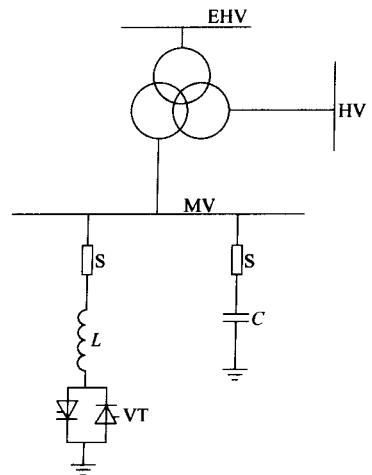


图 1-5 静止无功补偿器原理图

流输电更为经济。

高压直流除了在远距离输电方面的优势外，还有其他的特殊用途，如用作两个交流电力系统的互联和实现海底电缆输电等。

高压直流输电在近 30 余年来的发展，与大功率电力电子器件的迅速发展是分不开的，首先是 20 世纪 70 年代初实现了用大功率晶闸管阀取代过去的汞弧阀，其后在阀的冷却、安装和控制方面又有不断的改进，使当前高压直流输电与早期相比已有显著的不同。近年来换流阀的研制又有新进展，即在输电电压不太高的情况下采用大功率的绝缘栅双极型晶体管（IGBT）的电压控制型换流阀进行直流输电，这比采用晶闸管的相控换流器在技术上和经济上均有很大改进。采用这种新的换流技术的换流站不需要换流变压器，因此造价低，可以用于距离较短、输送容量不大的情况，故被称之为轻型直流输电（HVDC Light）。例如瑞典于 1997 年投运的第一条 $\pm 10\text{kV}$ 的试验性轻型直流输电线路，长仅 10km，输送容量仅 3MW。其后该国于 1999 年投运了一条 70km 长的 $\pm 80\text{kV}$ 线路，输送容量为 50MW。目前澳大利亚、丹麦和美国等国都有 HVDC Light 的线路在运行。

显然，直流输电系统中的绝缘技术和过电压防护技术不同于交流输电系统，所以高压直流输电的发展对高电压技术的进步是有促进作用的。

1.4 新材料和新技术在高电压技术中的应用

新材料和其他领域的新技术在高电压技术中的应用，也是高电压技术发展的重要促进因素。此外对环境保护的进一步要求也促使高电压技术不断向前发展。

1. 新材料的应用

使用不同材料常会使电气设备的结构与性能发生很大的变化。以避雷器为例，20 世纪 70 年代以前的阀式避雷器使用碳化硅非线性电阻片（在避雷器行业，非线性电阻片被称为阀片），因此必须装有与之串联的灭弧间隙。自氧化锌阀片用于避雷器后，因其电阻非线性远优于碳化硅阀片而不必再串联灭弧间隙。所以氧化锌避雷器（阀片的材料除氧化锌外还有少量的其他金属氧化物，故标准术语为金属氧化物避雷器）的特性参数与已被淘汰的碳化硅阀式避雷器是不同的。在功能方面这二者也有明显的不同，氧化锌避雷器不仅在限制雷电过电压时性能更佳，而且可以对碳化硅阀式避雷器无法限制的操作过电压进行限制。这样的例子不少，例如正在逐步取代油纸电缆的交联聚乙烯电缆也是如此。在配电系统，交联聚乙烯电缆已取代了过去的粘性浸渍的油纸电缆，而且在输电系统中逐步取代了过去的充油电缆，目前国外 500kV 的交联聚乙烯电缆已取得运行经验。由于交联聚乙烯电缆的制造与敷设比油纸电缆简单，因此其应用日益广泛。近年来国外有的公司已开始将其用于绕制发电机定子绕组和变压器绕组。采用传统的云母绝缘时，大型发电机的额定电压无法超过 30kV，而采用交联聚乙烯电缆制作电机绕组则已有额定电压为 136kV 的高压发电机问世，可以省去升压变

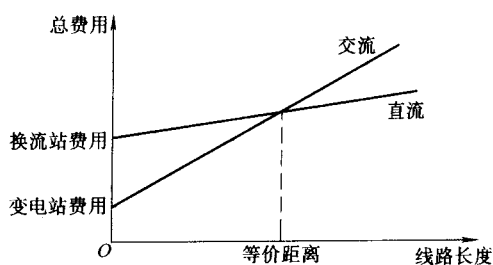


图 1-6 交直流输电系统的费用与输电距离的关系

压器和额定电流很大的发电机断路器，这不仅可以节省电站设备费用，而且对土方开挖工程费用极为昂贵的水电站具有很大的经济效益。可见新材料的应用对高电压工程有很大的促进作用。

2. 新技术的应用

其他领域的新技术也会促使高电压技术的进步。例如在电力系统中采用超导技术可增加输送容量，降低损耗。为此近年来国外都在研制超导电力设备如超导电缆、超导变压器、超导电机、超导故障电流限制器等，不少已投入试运行。以超导电缆为例，其绝缘结构设计可采用两种不同方案。一种是在导体与绝缘之间设置隔热层，使导体处于液氮冷却的低温（77K）而绝缘则仍采用常温的介质材料，这种方案较易实现，目前已有研制品在试运行。另一种方案则是导体与绝缘均处于低温，不需要隔热层并可使介质损耗减小。表 1-3 给出美国同一电压等级（115kV）和同样外部尺寸（使超导电缆可敷设在增容前原有的 20.3cm 的管道中）的两种不同设计的超导电缆与常规电缆的比较。由表 1-3 可见，采用低温介质的超导电缆的性能优于采用常温介质的超导电缆，但要研制低温介质超导电缆就必须研究开发可长期运行在液氮温度的绝缘材料。

表 1-3 低温介质超导电缆与常温介质超导电缆的特性比较

	常规电缆	常温介质超导电缆	低温介质超导电缆
传输容量/MVA	220	500	1000
线路损耗(%)	100	100	67

光电技术的应用，使传统的电磁式电流互感器和电压互感器有了新的发展。例如光电式电流互感器用空气芯的罗戈夫斯基线圈取得反映一次侧电流的信号后，在高电位端将电信号转换为光信号，通过光纤输送到处于地电位的接收回路再进行光电转换后供计量仪器和保护之用。可见使用光电式电流互感器解决了用于超高压系统的电磁式电流互感器的绝缘难题。另一种磁光式电流传感器则是根据法拉第磁光效应的原理工作的，即利用法拉第晶体中光的偏振面在外加磁场作用下产生旋转的现象，来测定磁场强度亦即产生磁场的电流大小。国外此种电流传感器已在 345kV 变电站中应用。根据泡克尔斯（Pockels）效应原理工作的光电式电压传感器也已研制成功，此处不作介绍。

再以绝缘诊断技术为例，近 20 年来电气设备绝缘在线诊断技术的迅速发展，在很大程度上得益于传感器技术、光纤技术和信息技术的应用，目前广泛应用于绝缘诊断技术的模糊逻辑、分形几何、小波变换、神经网络、专家系统等实际上都是首先在其他领域中发展起来的。

3. 环境保护的要求

环境保护的要求对工程技术发展的影响是显而易见的。例如在 20 世纪 70 年代初世界各国禁用对人体有害的聚氯联苯（Polychlorinated Biphenyl，简称 PCB）后，美国就在变压器中用硅有机液体取代 PCB。我国在禁用 PCB 前，将其用作电力电容器的浸渍剂，目前主要用二芳基乙烷和单/双苄基甲苯来代替。又如用于气体绝缘开关装置（Gas-insulated Switchgear，简称 GIS）的 SF₆ 气体是《京都议定书》中列出的第 6 种温室气体，为此目前制造厂和电力部门都在采取措施减少 SF₆ 气体的泄漏。由于尚无更好的绝缘气体可取代 SF₆ 气体，因此在 SF₆ 气体用量较大的气体绝缘管道输电线中，今后将采用 N₂/SF₆ 混合气体（N₂ 占 80% 左右，

SF₆ 气体仅占 20%左右以减少 SF₆ 气体的用量,从而减少 SF₆ 的泄漏);对于 GIS 则可采用混合式布置结构,即将母线仍与常规变电站一样用空气绝缘,而其他元件则用 SF₆ 气体绝缘。此外使 GIS 进一步小型化和加强密封以减小年漏气率也是有效的措施。

1.5 高电压技术在其他领域的应用

经过百年的发展,高电压技术已逐步形成一个独立的学科,除了用来解决高压输电工程中的一些关键技术问题外,它还在其他领域得到广泛的应用,举例如下。

(1) 脉冲功率技术 早期的脉冲功率技术主要用来模拟核武器辐射效应。经过近 40 年的发展,它的研究内容和应用范围日益广泛,已形成一个新兴的技术领域。脉冲功率装置中有很多高电压技术问题,例如 Marx 发生器就是高电压技术中早已广泛应用的多级冲击电压发生器,气体放电开关的设计也是高电压工作者熟知的技术内容。此外,高电压与强电流脉冲的测量也是传统高电压技术中的基本内容。

(2) 电磁兼容 很多技术领域中共有电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, 简称 EMC) 的要求,例如在 1984 年召开的我国第一届 EMC 学术会议,是由中国通信学会、中国电子学会、中国电机工程学会和中国铁道学会共同主办的。有些国家对电磁兼容的要求已用法律形式加以规定,因此 EMC 已形成一个相对独立的技术领域。由于高电压工作者熟悉消除电磁干扰的基本措施:屏蔽、接地、滤波,所以不少大学的高电压技术专业已将 EMC 作为研究方向之一。

(3) 静电技术 静电已形成一个专门的技术领域,例如不少国家有静电学会,国际上有专门的静电杂志和静电学术会议。不管是静电应用还是静电灾害的防治,都是高电压工作者十分熟悉的。例如 20 世纪 30 年代初,美国麻省理工学院的高电压实验室主任 Van de Graff 教授研制出的用绝缘皮带将电荷传送到上部高压电极的高压静电发生器(常被称为 Van de Graff 发生器),常用于研究核物理的实验室。静电技术在工业中应用很广,如静电除尘、静电喷涂和静电植绒等都是静电应用的例子,而解决超高压输电线路下的静电感应以保障人身安全的问题则属于静电防治的范畴。

(4) 放电的应用 多种放电形式在工程中获得应用。例如现代电光源很多是利用气体或金属蒸气中放电来实现的。又如介质阻挡放电已广泛应用于臭氧的合成、材料的表面改性和杀灭细菌,脉冲电晕放电用于烟气的脱硫、脱硝也正在研究中。此外,液体介质中冲击大电流放电产生的液电效应可用于油井解堵和岩石粉碎。

(5) 脉冲电场的应用 脉冲电场可导致细胞电穿孔,选用适当的场强(1~8kV/cm)时,细胞膜形成的小孔为可逆性电击穿,即经过一定时间细胞膜重新愈合,膜屏障功能恢复;若场强过高(15~30kV/cm)则细胞膜出现不可逆性电击穿导致细胞死亡。可逆性电击穿用于克隆技术,即在细胞膜愈合前从细胞小孔中注入所需克隆基因的 DNA。不可逆性电击穿用于食品工业中的灭菌,研究表明对牛奶和饮料采用这种灭菌方法的效果优于高温灭菌的方法,也优于采用放电的灭菌方法。

高电压技术在其他领域中的应用相当广泛,这里不再一一列举。因为本教材主要是为电力和电工制造类专业的本科生编写的,课程内容宜围绕高压输电工程中的有关基本技术问题,即高电压设备的绝缘,电力系统中的过电压及其防护,以及高电压测量与试验技术。