



普通高等教育“十五”国家级规划教材

清华大学电气工程系列教材

# 高电压工程

# High Voltage Engineering

梁曦东 陈昌渔 周远翔 编著

Liang Xidong Chen Changyu Zhou Yuanxiang



清华大学出版社



普通高等教育“十五”国家级规划教材

清华大学电气工程系列教材

# 高电压工程

# High Voltage Engineering

梁曦东 陈昌渔 周远翔 编著

Liang Xidong Chen Changyu Zhou Yuanxiang

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍了与高电压有关的气体、固体、液体介质的放电过程、绝缘特性以及电场结构、大气条件等影响放电的因素；高电压下的绝缘特点、绝缘方法以及沿面放电；交直流高电压与冲击高电压的产生方法、原理、基本装置以及对交直流高电压与冲击高电压的测量；雷电冲击过电压与操作冲击过电压的产生与防护等基本内容。

本书是为高等学校“电气工程”一级学科的专业基础课编写的教材，也可用作相关课程的教学参考书，并可供电力行业、电工设备制造行业以及其他领域中的高电压工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

高电压工程/梁曦东,陈昌渔,周远翔编著. —北京:清华大学出版社,2003  
(普通高等教育“十五”国家级规划教材 清华大学电气工程系列教材)  
ISBN 7-302-06951-4

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 061851 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

组稿编辑: 陈国新

文稿编辑: 马幸兆

印 刷 者: 北京国马印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印张: 16.5 字数: 377 千字

版 次: 2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06951-4/TM·43

印 数: 1~3000

定 价: 26.00 元

# 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  
王样珩

# 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。

大致是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”范畴里先后分出去了“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学系的模式。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、热力学、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，开始了学习前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个专业更宽广的领域。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

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章~第4章、第10章~第12章由梁曦东编写,第5章~第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

绪论	1
第 1 章 气体放电过程的分析	8
1.1 带电质点与气体放电	8
1.1.1 气体放电的主要形式	8
1.1.2 带电质点的产生	9
1.1.3 带电质点的消失	11
1.2 低气压下均匀电场自持放电的汤逊理论和巴申定律	12
1.2.1 汤逊理论	12
1.2.2 巴申定律与均匀电场击穿电压	16
1.2.3 汤逊放电理论的适用范围	18
1.3 高气压下均匀电场自持放电的流注理论	19
1.3.1 空间电荷对电场的畸变	19
1.3.2 流注的形成	20
1.3.3 均匀电场中的自持放电条件	21
1.3.4 流注理论对放电现象的解释	22
1.4 高气压下不均匀电场气体击穿的发展过程	23
1.4.1 电场不均匀程度的划分	23
1.4.2 极不均匀电场气体的电晕放电	23
1.4.3 极不均匀场的极性效应与长间隙放电	26
1.4.4 稍不均匀电场的自持放电条件与极性效应	31

<b>第 2 章 不同电压形式下空气的绝缘特性</b> .....	33
2.1 持续作用电压下空气的绝缘特性 .....	33
2.1.1 均匀电场中空气的绝缘特性 .....	33
2.1.2 稍不均匀电场中空气的绝缘特性 .....	33
2.1.3 极不均匀电场中空气的绝缘特性 .....	37
2.2 雷电冲击电压下空气的绝缘特性 .....	39
2.2.1 雷电冲击电压的形成与标准波形 .....	39
2.2.2 放电时延 .....	44
2.2.3 50%放电电压 .....	45
2.2.4 冲击系数与伏秒特性 .....	45
2.3 操作冲击电压下空气的绝缘特性 .....	49
2.3.1 操作冲击电压的形成与波形 .....	49
2.3.2 操作冲击放电电压的特点 .....	50
2.4 提高气体间隙击穿电压的措施 .....	52
2.4.1 电极形状的改进 .....	53
2.4.2 空间电荷的利用 .....	54
2.4.3 极不均匀场中屏障的采用 .....	55
2.4.4 固体绝缘覆盖层 .....	57
2.4.5 高气压的采用 .....	57
2.4.6 高真空的采用 .....	58
2.4.7 高电气强度气体 (SF <sub>6</sub> ) 的采用 .....	59
<b>第 3 章 高压外绝缘及沿面放电</b> .....	63
3.1 大气条件对空气间隙放电的影响 .....	63
3.1.1 大气状态对放电电压的影响 .....	63
3.1.2 海拔高度对放电电压的影响 .....	66
3.2 高压外绝缘及高压绝缘子 .....	67
3.2.1 外绝缘及其工作条件 .....	67
3.2.2 绝缘子的分类及基本要求 .....	68
3.3 绝缘子的沿面放电 .....	70
3.3.1 均匀电场中气体沿固体介质表面的放电 .....	71
3.3.2 极不均匀电场具有弱垂直分量时的沿面放电 .....	72
3.3.3 极不均匀电场具有强垂直分量时的沿面放电 .....	72
3.3.4 影响沿面闪络电压的因素 .....	74
3.4 绝缘子的污秽放电 .....	75
3.4.1 污闪及其过程 .....	76
3.4.2 绝缘子表面污秽度的评定 .....	78
3.4.3 绝缘子的污秽试验 .....	81

3.5	提高沿面放电电压的方法	82
3.5.1	屏障	82
3.5.2	屏蔽	82
3.5.3	提高表面憎水性	82
3.5.4	消除绝缘体与电极接触面处的缝隙	83
3.5.5	改变绝缘体表面的电阻率	83
3.5.6	强制固体介质表面的电位分布	83
3.5.7	提高污闪电压的方法	84
<b>第4章</b>	<b>液体、固体电介质的电气性能</b>	<b>86</b>
4.1	液体、固体电介质的极化、电导与损耗	86
4.1.1	电介质物质结构的基本知识	86
4.1.2	电介质的极化及相对介电常数	87
4.1.3	电介质的电导、电阻及电导率、电阻率	89
4.1.4	电介质中的能量损耗及介质损失角正切	93
4.2	液体电介质的击穿	96
4.2.1	液体电介质的击穿理论	96
4.2.2	影响液体电介质击穿电压的因素	97
4.2.3	提高液体电介质击穿电压的方法	99
4.3	固体电介质的击穿	100
4.3.1	固体电介质的击穿过程	101
4.3.2	影响固体电介质击穿电压的主要因素	104
4.3.3	电介质的其他性能	104
4.4	组合绝缘的电气性能	106
4.4.1	组合绝缘的介电常数与介质损耗	106
4.4.2	组合绝缘的击穿特性	107
<b>第5章</b>	<b>绝缘监测和诊断</b>	<b>110</b>
5.1	绝缘监测和诊断的基本概念	110
5.2	绝缘电阻和泄漏电流的测量	112
5.2.1	测量绝缘电阻与吸收比的工作原理	112
5.2.2	测量绝缘电阻与吸收比的方法	114
5.2.3	泄漏电流的测量	114
5.3	介质损耗角正切的测量	116
5.3.1	西林电桥的基本原理	116
5.3.2	反接法的西林电桥	118
5.3.3	存在外界电磁场干扰时的测量	118
5.3.4	电流比较式电桥	120

5.4	局部放电的测量 .....	120
5.4.1	测量局部放电的几种方法 .....	120
5.4.2	局部放电的脉冲电流测量法 .....	121
5.4.3	脉冲电流法测 PD 的基本回路和检测阻抗 .....	123
5.4.4	脉冲电流法的测量仪器及其校正 .....	124
5.4.5	实施 PD 测量的其他技术问题 .....	125
5.5	耐压试验 .....	126
5.5.1	交流耐压试验 .....	127
5.5.2	直流耐压试验 .....	128
5.5.3	雷电冲击耐压试验 .....	128
5.5.4	操作冲击耐压试验 .....	128
5.6	各种预防性试验方法的特点总结 .....	130
5.7	绝缘的在线监测 .....	130
5.7.1	$\tan\delta$ 的在线监测 .....	131
5.7.2	局部放电的在线监测 .....	132
<b>第 6 章</b>	<b>稳态高电压试验设备 .....</b>	<b>135</b>
6.1	交流高电压试验设备 .....	135
6.1.1	交流高电压试验设备概述 .....	135
6.1.2	试验变压器的电压与容量 .....	137
6.1.3	串级高压试验变压器 .....	139
6.1.4	试验变压器容性试品上的电压升高 .....	142
6.1.5	高压串联谐振试验设备 .....	143
6.1.6	用高压试验变压器产生操作冲击波 .....	146
6.2	直流高电压试验设备 .....	149
6.2.1	直流高电压试验设备概述 .....	149
6.2.2	倍压直流与串级直流装置 .....	151
<b>第 7 章</b>	<b>稳态高电压的测量 .....</b>	<b>155</b>
7.1	稳态高电压测量概述 .....	155
7.2	测量球隙 .....	156
7.3	高压静电电压表 .....	159
7.4	交流峰值电压表 .....	161
7.4.1	利用电容电流整流测量电压峰值 .....	161
7.4.2	利用整流的充电电压测量电压峰值 .....	162
7.4.3	有源数字式峰值电压表 .....	163
7.5	高压交流分压器及充气标准电容器 .....	164
7.5.1	分压器的误差分析 .....	165

7.5.2	高压电容分压器的实现	166
7.5.3	高压标准电容器及集中式分压器	167
7.6	高压直流分压器	168
<b>第8章</b>	<b>冲击高电压及大电流的产生</b>	<b>172</b>
8.1	冲击电压发生器的基本原理	172
8.2	冲击电压发生器放电回路的分析	174
8.2.1	基本回路的分析	174
8.2.2	放电回路的近似计算	175
8.2.3	考虑回路电感的近似计算	177
8.3	冲击电压发生器放电回路计算举例	177
8.4	冲击大电流的产生	179
8.4.1	冲击电流发生器的功用与电流波形的规定	179
8.4.2	冲击电流发生器的基本原理	179
8.4.3	冲击电流发生器的结构	182
<b>第9章</b>	<b>冲击高电压的测量</b>	<b>184</b>
9.1	球隙放电法测量冲击电压	184
9.2	测量冲击电压的分压器	186
9.2.1	电阻分压器	186
9.2.2	电容分压器	189
9.2.3	阻尼式电容分压器	191
9.2.4	微分积分测量系统	192
9.2.5	对冲击电压测量系统响应特性的要求	194
9.3	利用光纤传输技术测量冲击高电压	195
9.3.1	应用 AM-IM 方式的实例	195
9.3.2	FM-IM 方式的应用例	195
9.3.3	采用数字脉冲调制的测压系统	196
9.3.4	利用电光效应测量冲击电压	196
9.4	测量冲击高电压的示波器	197
9.4.1	高压电子示波器	197
9.4.2	数字存储示波器和数字记录仪	198
9.5	用作测量高电压的弱电仪器的抗干扰措施	203
<b>第10章</b>	<b>传输线的波过程</b>	<b>207</b>
10.1	波阻抗	207
10.2	波的折射、反射与衰减、变形	209
10.2.1	末端开路时的折反射	210

10.2.2	末端短路时的折反射 .....	211
10.2.3	末端接集中负载时的折反射 .....	211
10.2.4	波的衰减与变形 .....	213
10.3	通过并联电容与串联电感的波过程 .....	214
10.3.1	彼德逊法则 .....	214
10.3.2	通过并联电容的波过程 .....	214
10.3.3	通过串联电感的波过程 .....	215
<b>第 11 章</b>	<b>雷电过电压及其防护 .....</b>	<b>217</b>
11.1	雷电参数 .....	217
11.1.1	雷电流的波形和极性 .....	217
11.1.2	雷电流的幅值、陡度、波头和波长 .....	217
11.1.3	雷暴日、雷电小时及落雷密度 .....	218
11.2	防雷保护的基本措施 .....	219
11.2.1	避雷针 .....	220
11.2.2	避雷线 .....	221
11.2.3	避雷器 .....	221
11.2.4	接地装置 .....	223
11.3	架空输电线路的雷电过电压 .....	224
11.3.1	架空输电线路雷电过电压概述 .....	224
11.3.2	感应过电压 .....	225
11.3.3	雷击导线过电压 .....	226
11.3.4	雷击塔顶过电压 .....	226
11.3.5	雷击跳闸率 .....	227
11.4	发电厂、变电站的雷电过电压及其防护 .....	228
11.4.1	直击雷过电压的防护 .....	228
11.4.2	侵入波过电压的防护 .....	229
11.4.3	气体绝缘变电站的过电压防护 .....	229
<b>第 12 章</b>	<b>操作过电压及其防护 .....</b>	<b>231</b>
12.1	空载线路合闸过电压 .....	232
12.1.1	正常空载线路合闸过电压 .....	232
12.1.2	重合闸过电压 .....	233
12.1.3	空载线路合闸过电压的影响因素及限制措施 .....	234
12.2	切除空载线路过电压 .....	234
12.3	切除空载变压器过电压 .....	235
12.4	操作过电压的限制措施 .....	236
12.4.1	利用断路器并联电阻限制分合闸过电压 .....	236

---

12.4.2 利用避雷器限制操作过电压 .....	238
12.5 绝缘配合的基本概念与基本方法 .....	238
12.5.1 绝缘配合的原则 .....	238
12.5.2 绝缘配合的基本方法 .....	239
12.5.3 架空输电线路绝缘水平的确定 .....	241
<b>附录 A 国家标准及有关设备参数表 .....</b>	<b>243</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>247</b>

# 绪论

## 1. 高压输电的发展过程

### (1) 高压输电的出现与电压等级的提高

1890年在英国出现了从 Deptford 到伦敦长达 45 km 的 10 kV 输电线路,1891年在德国出现了从 Lauffen 到法兰克福长达 170 km 的 15 kV 三相输电线路。100年来世界上的输电电压提高了 100 倍。表 1 给出了各电压等级在国际上首次出现的时间。

表 1 交流输电各电压等级首次出现的时间

电压等级 / kV	10	50	110	220	287	380	525	735	1150
首次出现年份	1890	1907	1912	1926	1936	1952	1959	1965	1985

随着经济的发展,国民经济各行业对能源的需求日益迫切,国际能源机构预测,从近几年到 2025 年全球能源需求将增加近一倍。电力工业作为能源工业的主力而受到极大的重视,在发达国家的能源消费比例中,电能占一多半。除火力发电、水力发电外,又发展了核能发电、太阳能发电、风力发电、海洋能发电、地热发电等多种新能源形式。但不管哪种发电形式都离不开电力的传输,离不开高压输电。

促使输电电压等级提高的直接动力就是对电力需求的激增。因为线路的输送容量  $P$  与交流输送电压  $U$  的二次方成正比,即  $P=U^2/Z$ ,其中  $Z$  为线路波阻抗。对架空线,各电压等级下的波阻抗和输送容量见表 2。电缆的波阻抗只有几十欧姆,因此在同样电压等级下,电缆线路比架空线路可以输送大得多的功率。但是电缆太贵,而且出故障后查找与修复起来都很困难,因此目前国际上仍以架空线为主要的输电方式。

表 2 交流输电各电压等级下输电线路的波阻抗与输送容量

系统电压 $U/kV$	220	330	500	750	1000	2000
波阻抗 / $\Omega$	400	303	278	256	250	250
输送容量 $P/ MW$	121	360	900	2200	4000	16000

除了大容量输电需要高压输电以外,促使电压等级提高的另一个因素是电力的远距离输送,当发电中心远离用电中心时,高压输电就不可避免了。巨型水电站、巨型坑口电



站群往往都远离城市,远离负荷中心,如长江、黄河的水电,山西、内蒙的火电等。核电站也不会建在市中心,巨型空间太阳能地面接收站更是建在荒无人烟的地方才好。

### (2) 特高压输电的出现与展望

在高压输电行业中,习惯上称 100 kV 以下为高压,100 kV~1000 kV 为超高压,1000 kV 及以上为特高压。20 世纪 60 年代后期国际上就开始了特高压输电的研究。前苏联于 1985 年率先建成了 1228 km 长的交流 1150 kV 特高压线路,可送负荷 5500 MW,1985 年开始部分投运,后因负载过小而降压至 500 kV 运行。日本也于 20 世纪 90 年代建成了 300 km 长的 1000 kV 特高压线路,但至今仍运行在 500 kV。美、意、法等国,包括巴西等也早已开始了特高压的研究。前苏联曾有人建议在 2020 年左右建设 1800 kV~2000 kV 线路,以送出西西伯利亚的巨大能源,并有人建议与北美联网,实现东西半球调峰。

各国发展特高压输电的原因不尽相同,俄罗斯是远距离、大容量两方面因素兼有,日本、意大利发展特高压,除大容量输电外,很关键的一点是为了减少电站出线回数,压缩线路走廊,节省土地资源。但是百万伏级的特高压输电毕竟有许多未解决的技术困难,因此国际上目前实际投入工业运行的最高电压只有 750 kV 等级的输电线路。加、美、俄、巴西、南非等国已有多年的实际运行经验,韩国也独立地建成了 750 kV 输电线路。中国一向号称幅员辽阔,实际上很多地方也已出现走廊紧张的问题了。目前,西北电网已经开始建设额定电压 750 kV,最高电压 800 kV 的输电线路。另外,我国百万伏级的特高压输电等级也已经论证了许多年。

### (3) 直流输电、紧凑型输电及灵活输电

直流电压因为不能利用变压器,所以交流输电最先得得到迅速发展。20 世纪 50 年代中期以来,随着各方面技术的进步,直流输电的优越性逐步得到体现,许多国家又逐步开始发展直流输电。我国多条远距离的西电东送线路即为直流输电线路。从输电的角度说,直流输电几乎没有距离的限制,也可用直流电缆在水下、地下输电,因此在远距离输电上很有发展前景,但存在几大难题,例如换流站设备昂贵,尚未造出性能满意的直流断路器,直流瓷绝缘子及钢化玻璃绝缘子耐污性能差等。各直流电压等级下的输送容量见表 3。我国近几年围绕三峡工程修建的几条  $\pm 500$  kV 线路采用的就是 3000 A 电流,每条线路的输送容量达 3000 MW。

表 3 直流输电电压与输送容量

电压 $\pm U$ /kV	$\pm 400$	$\pm 500$	$\pm 600$	$\pm 700$	$\pm 800$
双极容量 $P$ /MW	500~1000	1000~3000	2500~4000	4000~6000	6000~9000
电流 $I$ /A	600~1250	1000~3000	2100~3300	2150~4300	2800~5600

为了节省线路走廊资源,有时只好采取同塔双回,甚至同塔四回的超高压输电线路。虽然每回线路输送的功率并没有提高,但每条线路走廊的输送容量却大大提高。但是同塔多回线路也带来系统可靠性在一定程度上降低的问题。

高自然功率的紧凑型线路是靠三相同塔窗来大大缩小相间距离,增大每相分裂导线