



普通高等教育“十三五”规划教材

架空线路设计

(第二版)

主 编 王立舒 王艳君
副主编 王 俊 李 明



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

架空线路设计

(第二版)

主 编 王立舒 王艳君
副主编 王 俊 李 明
参 编 王润涛 魏东辉 王 慧 李东明 董德杰



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本教材包括架空线路基本知识、均匀荷载孤立档距导线力学基本计算、均匀荷载孤立档距导线力学应用计算、架空线路的振动和防振、架空输电线路杆塔定位及校验、电力线路的绝缘配合与防雷保护六部分。着重介绍了架空线路的相关概念、计算及分析方法，并附有必要的例题及习题。

本教材可供高等院校电气工程、农业电气化等专业本科、专科学生使用，也可以作为高职高专等院校及电力行业从事电力线路运行、安装、维护等专业人员的参考书，以及电气工程技术人员和电气技术爱好者参考与自学用书。

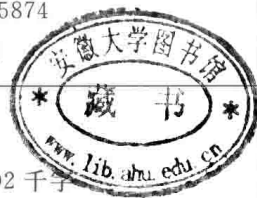
图书在版编目 (C I P) 数据

架空线路设计 / 王立舒, 王艳君主编. — 2版. —
北京: 中国水利水电出版社, 2017. 10
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-5994-3

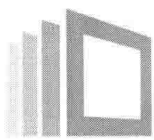
I. ①架… II. ①王… ②王… III. ①架空线路—设计—高等学校—教材 IV. ①TM726.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第262529号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 架空线路设计 (第二版) JIAKONG XIANLU SHEJI
作 者	主 编 王立舒 王艳君 副主编 王 俊 李 明 参 编 王润涛 魏东辉 王 慧 李东明 董德杰
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.5印张 202千字
版 次	2017年10月第1版 2017年10月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	24.00元



凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究



前言 QIANYAN

本教材是在全国高等农业院校电学科教材研究会组织编写的“21世纪电学科高等学校教材”《架空线路设计》基础上，参考了相关院校专家编写的架空电力线路有关教材内容，并结合国家电网最新考试大纲等内容以及电力专业规范而编写的。教材进一步贯彻落实了教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育的若干意见》的精神。

本教材在编写过程中，系统地总结和吸收了各院校教学改革的有益经验，注重理论的系统性和实用性，力求所学知识与当前电力线路特别是架空线路的实际相结合，加强学生的感性认识。编者保留并完善了第一版的部分内容，参考了其他同类型书籍的优点，对教学内容进行了科学的整合和取舍，系统地介绍了架空线路相关理论及内容。在本书的编写过程中我们对书中一些内容繁琐、计算复杂、理论性太强的内容进行了删减，增加了电力线路的绝缘配合与防雷保护，补充了导线振动与防振措施等新技术、新设备的内容。按照学生学习专业知识的认知规律，循序渐进，逐步深入。本教材参考学时为32学时。

参加本教材编写的单位有东北农业大学、河北农业大学、沈阳农业大学等院校。本教材由王立舒、王艳君担任主编，由王俊、李明担任副主编。本教材共六章，其中第一章至第三章由东北农业大学王立舒老师编写，第四章、第六章由河北农业大学王艳君老师编写，第五章由沈阳农业大学王俊老师编写。东北农业大学李明老师、王润涛老师、魏东辉老师，沈阳农业大学王慧老师，河北农业大学李东明老师，辽宁职业学院董德杰老师也参与了本书的编写及修订工作。全书由王立舒教授统稿。

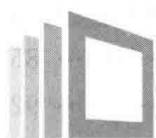
东北农业大学房俊龙教授担任本书主审，他在准备阶段和编写过程中提出了许多宝贵意见和建议。另外，本书在编写过程中参考了许多重要的书籍及文献，特别是参考了孟遂民老师编写的《架空输电线路设计》（第二版）、赵先德老师的教学课件《电力线路基础》以及国家电网考试培训等相关资料，同时也参考了许多电力线路相关教师的教材和教学课件内容，在此一并表示

感谢。

由于编者水平有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者多多批评指正，提出宝贵意见。

编者

2017年9月



前言

第一章 架空线路基本知识	1
第一节 输电技术发展及架空线路作用	1
第二节 架空线路的构成	10
第三节 导线的排列方式与换位	24
第四节 架空线路设计气象条件及换算	27
第五节 架空线路设计流程及路径选择	33
小结	36
习题	37
参考文献	37
第二章 均匀荷载孤立档距导线力学基本计算	38
第一节 导线的机械物理特性及比载	38
第二节 均匀荷载孤立档导线力学计算	44
第三节 悬挂点等高时导线的应力与弧垂	48
第四节 悬挂点不等高时导线的应力与弧垂	51
小结	53
习题	53
参考文献	54
第三章 均匀荷载孤立档距导线力学应用计算	55
第一节 导线的状态方程	55
第二节 临界档距及控制气象条件的判断	59
第三节 导线机械特性曲线	67
第四节 导线安装曲线	67
第五节 最大弧垂的计算及判断	70
小结	73
习题	74
参考文献	75
第四章 架空线路的振动和防振	76
第一节 架空线路的振动形式及其产生原因	76
第二节 微风振动的基本理论	78

第三节	影响微风振动的主要因素	81
第四节	微风振动强度的表示方法	83
第五节	导线振动与舞动防护措施	85
小结	.....	92
习题	.....	93
参考文献	.....	93
第五章	架空输电线路杆塔定位及校验	94
第一节	杆塔的高度与选择	94
第二节	输电线路的杆塔定位	96
第三节	杆塔校验	99
小结	.....	109
习题	.....	109
参考文献	.....	109
第六章	电力线路的绝缘配合与防雷保护	110
第一节	架空电力线路绝缘子选择	110
第二节	杆塔头部的空气间隙距离	116
第三节	导线的线间距离	119
第四节	架空线路防雷保护	122
第五节	接地装置设计	127
小结	.....	129
习题	.....	130
参考文献	.....	130

架空线路基本知识

第一节 输电技术发展及架空线路作用

一、输电技术的发展

(一) 发展历史与现状

人们最早应用的是直流电，主要用于照明。1882年，爱迪生（Edison）建立了第一座商业化发电厂和直流电力网，能发660kW的电力。随后，社会对电力的需求量增大。由于对用户的电压不能太高，因此要输送一定的功率，就要加大电流。而电流越大，输电线路发热就越厉害，损失的功率就越多，同样损失在输电导线上的电压也大，离发电厂越远的用户得到的电压也就越低。直流输电的弊端，限制了电力的应用。

为了减少输电的电能损耗，只能提高输电电压。在发电厂端将电压升高，到用户端再把电压降下来，达到低损耗情况下的远距离送电。而直流输电改变电压困难，因此采用交流输电比较方便。1882年前后，英国的费朗蒂（Ferranti）改进了交流发电机，提出了交流高压输电的概念。1888年，伦敦泰晤士河畔的大型发电厂开始交流输电。同年，俄国科学家多利沃-多布罗沃利斯基（Dolivo - Dobrovolsky）制成第一台三相交流发电机。1891年，德国劳芬电厂安装了第一台三相100kV交流发电机，通过第一条三相交流输电线路送电到法兰克福，线路总长175km，电压为15.2kV。

自三相交流输电技术产生以来，输电技术朝着高电压、大容量、远距离的目标不断进步。1952年，瑞典首先建立了380kV输电线路，采用双分裂导线，距离960km。1956年，苏联建成400kV输电线路，1964年，美国建成500kV输电线路，1965年，加拿大建成765kV输电线路。20世纪70年代以来，欧、美各国对交流1000kV级特高压输电技术进行了大量研究，1985年，苏联建设了哈萨克斯坦火电基地向欧洲部分输电的1150kV输电工程（后因社会经济原因而终止），日本也在20世纪90年代初建成了1000kV线路。目前，俄、日的输电系统的电压等级已达到1150~1500kV。

在交流超高压输电技术发展的同时，高压直流输电技术也进入了工程实用阶段。1962年，苏联建成±400kV工业性实验线路，随后又建设±750kV长距离直流线路；1970年，美国第一条±400kV直流线路建成，1985年升压到±500kV；加拿大于1990年建成750kV级直流线路并向美国延伸。巴西伊泰普水电站用±600kV直流输电线路送出电能。欧洲、非洲、日本、印度、新西兰等国家和地区的直流线路也相继投入运行。2005年，我国±500kV电压等级的三峡至上海直流输电工程投入运行。2008年，±500kV电压等级的贵州—广东直流输电工程也投入运行。

此外，高自然功率的紧凑型线路以及灵活交流输电等多种多样输电新技术的研究也取

得了很大的进展，有的已进入工程实践。

在我国，1882年，上海建设了第一个低压12kW发电厂通过低压输电线路供电。1936年出现了万伏电压以上的输电线路，电网初步形成。1937年，日本帝国主义侵略我国，刚刚起步的我国电网遭受了严重的破坏。中华人民共和国成立后，我国电网建设进入了一个统一有序的发展阶段。1952年自主建设了110kV输电线路，逐步形成了京津唐110kV输电网。1954年建成了吉林丰满水电站—辽宁抚顺李石寨变电站的220kV输电线路，全长369km。1972年建成第一条330kV刘家峡水电站—关中的超高压线路，全长534km。随后330kV输电线路延伸到陕、甘、宁、青4个省（自治区），形成西北跨省联合电网。1981年第一条500kV——平（平顶山）武（武昌）线投入运行，该线路全长595km，启动了我国跨省、超高压电网建设的进程。2005年9月，由青海官亭—甘肃兰州东的“西北750kV输变电示范工程”投入运行，该线路是我国第一条世界上海拔最高的输电线路。2009年1月6日，“1000kV交流特高压试验示范工程”晋东南—南阳—荆门输电线路工程正式投入运行，该工程起自晋东南1000kV开关站，止于荆门1000kV变电站，全长约654km。我国成为当今世界商业化交流输电电压等级最高的国家。

1987年，我国自主设计、设备全部国产化的±500kV直流输电线路——葛（葛洲坝）上（上海）线单极建成投运，1990年实现双极运行，该线路长1045km，双极容量为120万kW，实现了华中—华东电网的区域直流联网，拉开了我国跨大区联网的序幕。2009年12月，云南—广东±800kV特高压直流输电工程单极投运，2010年6月实现双极运行，线路长1500km，输电容量达500万kW。2011年12月9日，世界最高海拔、高寒地区建设规模最大、施工难度最大的输变电工程——柴达木至拉萨±400kV直流输电工程投入试运行，线路长1038km，输送容量120万kW。2012年1月9日，±800kV锦屏至苏南特高压直流输电线路工程浙A标段线路主体工程全面完成。2015年，世界上首个五端柔性直流输电工程——浙江舟山柔性直流输电示范工程建成投运。我国目前是当今世界直流输电电压等级最高的国家。2016年1月11日，准东—皖南±1100kV特高压直流输电工程（简称准东—皖南工程）开工动员大会在京召开，标志着我国输电技术的进一步发展。

1990年以前，我国主要以220kV为地区主干网架；2000年后，除西北等电网外，基本以500kV为各省主网架。同时，交直流500kV线路成为跨省区输电的重要线路。

自20世纪90年代初起，我国开始研究并陆续建成了一些紧凑型输电线路。北京安定—河北廊坊的220kV紧凑型输电线路，是我国第一条紧凑型输电线路，全长23.6km，1994年建成投运。北京昌平至房山的500kV紧凑型输电线路，全长83km，1999年建成投运。2004年4月26日，江苏政平—宜兴500kV同塔双回紧凑型线路建成投运。

同塔多回路技术也得到普遍应用。德国在其高电压和超高压线路中，同塔四回为常规型线路。日本东京电力公司110kV级以上的线路多数为同塔四回，最多回路数为同塔并架八回。国内第一条同塔多回线路建于1990年，为蓟门至清河的220kV、110kV各二回的同塔四回线路。2007年，江苏利港电厂至梅里输电线路建成，为世界首条500kV同塔四回输电线路；同年，全国第一基同塔六回钢管塔（4×220kV+2×110kV）成功通过了测试。2015年，陕西750kV西安南输变电工程330kV西安南—长安输电线路就采用了同



塔四回输电方式。

除台湾地区外，目前全国已形成东北、华北、华中、华东、西北、南方等 6 个区域电网，实现了华中电网与华北、华东、西北、南方电网互联，华北电网与东北电网互联。

（二）发展趋势

1. 特高压交流输电

我国能源和电力负荷分布极不均衡，西部水力和煤炭资源丰富，用电则大多集中在东南沿海，客观上需要远距离、大容量、跨区域输电，大规模、大范围优化配置资源，“西电东送，南北互供”是必然选择。特高压交流输电具有以下优点：

（1）输送容量大。输电线路的输电能力与电压的平方成正比，1000kV 特高压交流线路的自然输送功率是 500kV 超高压交流线路的 4~5 倍；在采用同型杆塔条件下，单位走廊宽度输送容量约为 500kV 超高压交流线路的 2.5 倍。

（2）线路损耗小。输送相同功率时，电压越高，电流越小，线路的损耗就小。在导线总截面积和输送容量相同的情况下，1000kV 线路的电阻损耗约为 500kV 线路的 1/4。

（3）稳定性好。输电电压越高，从电源侧发电机端看去，电路的阻抗就越小，在输电系统中，输电线路和发电机之间同步运行的稳定性就越高。

（4）经济指标高。输送容量在 1000 万~1500 万 kW，输送距离 2000km 以上，用特高压输电比超高压输电要经济。当需要输送容量 1000 万 kW 时，采用 500kV 超高压输电需约十回线路，投资估计 370 亿元；而采用 1000kV 特高压输电，仅需二回线路，投资估计 240 亿元。

我国发展 1000kV 特高压交流输电，主要定位于更高一级电压等级的国家骨干网架建设和跨大区域的联网。

2. 特高压直流输电

直流输电与交流输电相比具有以下特点：

（1）输送功率相同时，线路造价低。直流输电采用两线制，与采用三线制三相交流输电相比，在输送同样功率时，考虑到趋肤效应和各种损耗，直流输电所用的线材几乎只有交流输电的一半。另外，直流输电的杆塔结构比同容量的三相交流输电简单，线路走廊占地面积也少，这些减少了大量的运输、安装费用。即使换流站的建设费用比变电站要高，在超过一定距离后，直流输电的总体造价还是更经济。直流输电线路与交流输电线路的总投资与线路距离的关系如图 1-1 所示。

（2）没有电容电流产生，线路损耗小。在一些特殊场合，必须用电缆输电，例如，城市中心地带采用地下电缆，海岛输电要用海底电缆。由于电缆芯线与大地之间构成同轴电容器，在交流高压输电线路中，空载电容电流非常大；而在直流输电线路中，由于电压波动很小，基本上没有电容电流加在电缆上。

（3）可实现不同频率交流系统之间的不同步联系，系统更稳定。远距离交流输电时，电流在交流输电系统的两端会产生显著的相位差。并网的各系统交流电的频率虽然规定统一为 50Hz，但实际上常产生波动。这两种因素引起交流系统需要用复杂庞大的补偿系统和综合性很强的技术，保证其同步运行，否则就可能在设备中形成强大的循环电流，损坏设备或造成不同步运行的停电事故。而直流输电线路互联时，两端的交流电网可以用各自

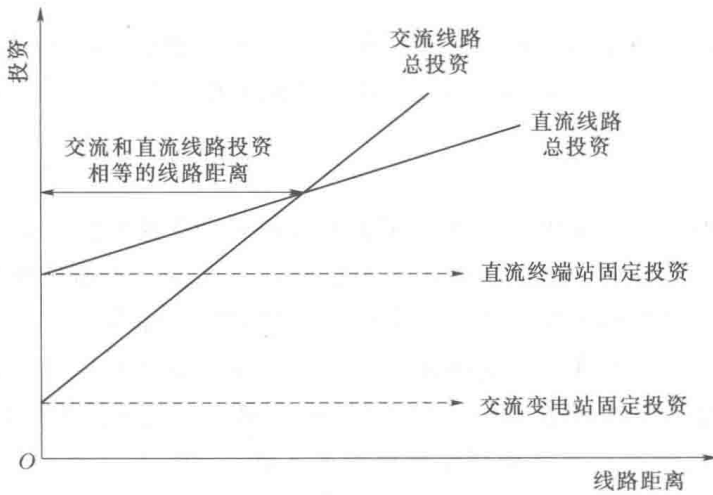


图 1-1 直流输电线路与交流输电线路的总投资与线路距离的关系

的频率和相位运行，不需进行同步调整。

(4) 输送功率调节方便，能限制系统的短路电流。两个交流系统用交流线路互连，当一侧系统发生短路时，另一侧要向故障侧输送短路电流，有可能超过原有断路器的遮断容量，这就要求更换大容量的设备，增加大容量的投资。若用直流输电将两个交流系统互联，由于采用可控硅装置，电路功率能迅速、方便地进行调节。直流输电线路向发生短路的交流系统输送的短路电流不大，故障侧交流系统的短路电流与没有互联时几乎一样。

(5) 输电可靠性高。在直流输电线路中，各极是独立调节和工作的，彼此没有影响。所以，当一极发生故障时，只需停运故障极，另一极仍可输送不少于一半功率的电能。利用该特点，直流输电线路可安排分期建设。而在交流输电线路中，任意一相发生永久性故障，必须全线停电。

(6) 直流换流站比交流变电站的设备多、结构复杂、造价高、损耗大、运行费用高。

(7) 直流输电工程在单极大地回路方式下运行时，入地电流会对附近的地下金属体造成一定腐蚀，窜入交流变压器的直流电流会使变压器的噪声增加。

(8) 直流输电线路的污秽比交流输电线路严重，变压不方便，换流器在整流和逆变过程中的谐波较大。

(9) 若要实现多端输电，技术比较复杂。

高压直流输电具有线路输电能力强、损耗小、两侧交流系统不需同步运行（详细论述可参考“高压直流输电与柔性交流输电”相关书籍）、发生故障时对电网造成的损失小等优点，特别适合用于长距离点对点大功率输电，而采用交流输电便于向多端输电。交流与直流输电相配合，将是现代电力传输系统的发展趋势。

3. 紧凑型输电

紧凑型输电是通过导线优化排列，缩小相间距离，增加分裂根数，降低电抗和增大电容，减少波阻抗，大幅度提高自然输送功率，有效压缩线路走廊的一项输电技术。

紧凑型输电线路主要具有如下特点：



(1) 结构紧凑, 线路走廊(架空输电线路的路径所占用的土地面积和空间区域)占地少。紧凑型输电线路, 为减小波阻抗(传输线无功发出量等于消耗量时的阻抗), 相间距离大幅度缩小; 采用封闭式铁塔, 杆塔尺寸缩小; 为限制导线风偏(架空输电线受风力的作用偏离其垂直位置的现象), 多采用V形绝缘子串悬挂导线, 必要时使用相间绝缘间隔棒。这些使得线路结构紧凑, 走廊减小, 减轻了对环境的影响和污染。如昌房(北京昌平—房山)500kV紧凑型输电线路走廊(图1-2)比常规线路缩小约18m。在线路走廊紧张的地区, 紧凑型输电线路具有很大的优越性。

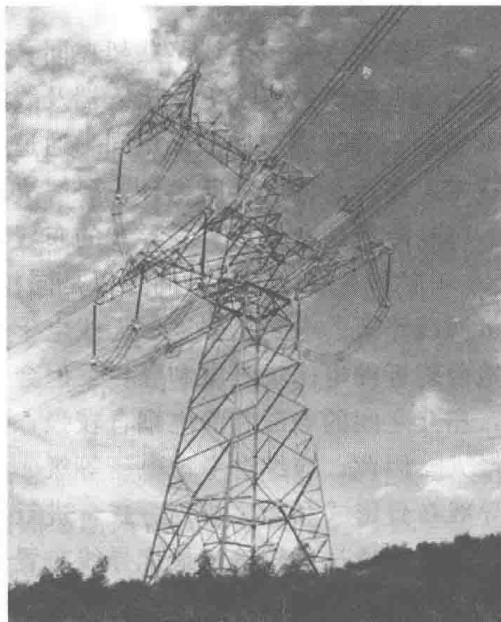


图1-2 昌房500kV紧凑型输电线路

(2) 自然输送功率增大。输电线路相间距离的减小对线路波阻抗和自然功率有明显的影响。当大幅度减小相间距离, 改变传统布置为

紧凑布置时, 线路波阻抗明显降低, 导线的表面强度、电荷分布趋向均匀一致, 最大工作场强可尽量接近允许场强, 自然输送功率大幅度提高。如220kV安廊线(北京安定—河北廊坊大屯)自然输送功率比常规路线提高了60%, 500kV昌房线自然输送功率比常规线路提高了34.4%。

(3) 综合成本低。紧凑型线路虽因采用V形绝缘子串、相间绝缘间隔棒以及特殊型式的杆塔等, 使投资增大, 但由于线路走廊窄降低了占地费用, 自然输送功率大充分发挥了输送能力, 从而使得线路的综合成本降低。与常规线路相比, 500kV昌房线紧凑型线路的输送单位自然功率造价降低约21.2%, 220kV安廊线紧凑型线路降低约为29.6%。因此, 在长距离输电工程中, 紧凑型输电线路可取得更大的经济效益。

(4) 由于子导线之间的相互影响, 将导致导线表面平均场强增高, 电晕损失以及对无线电干扰都较大。与常规线路相比, 紧凑型线路电晕损失高1.7~3.8倍, 大雨下无线电干扰水平高1~10dB。

(5) 带电作业的要求提高。紧凑型线路由于结构紧凑, 相间距离较小, 带电作业必须详尽考虑杆塔的结构, 分析带电作业间距, 并提出更高的带电作业要求。

紧凑型与常规型输电线路的自然输送功率和走廊宽度的比较见表1-1。

表1-1 紧凑型与常规型输电线路的自然输送功率和走廊宽度的比较

电压等级 /kV	常规输电线路		紧凑型输电线路	
	功率/MW	走廊宽度/m	功率/MW	走廊宽度/m
220	180(100%)	26~38	300(167%)	17~29
330	370(100%)	38~45	550(149%)	24~33
500	1000(100%)	45~60	1370(137%)	28~43

4. 多回路输电

多回路输电将多条线路共架在同一个杆塔上，以提高单位线路走廊的输送能力。在电厂出线端、换流站或变电站出入端及线路走廊狭窄、土地有限等情况下，不同送电方向或者不同电压等级线路局部采用同一通道架设的同塔多回路输电，是解决线路走廊问题的有效技术。多回路输电线路设计主要解决以下问题：

(1) 导线的布置形式。导线的布置可采用水平、垂直和三角排列，杆塔的横担可以是3层、4层和6层等，回路间可以是同相序、逆相序或异相序布置。与单回线路相比，同塔多回线路下的电磁场强度、无线电干扰、噪声都有所增大。提高杆塔的高度虽然可以降低地面附近的电磁场强度和噪声，但会导致耐雷水平的下降。同塔多回线路的导线间距较小，相互之间的电磁和静电耦合较强，会使线路参数的不对称加大，造成线路的不平衡电流增大。因此，应综合考虑电压等级、回路数量、所处地理环境、气象条件的情况，对各种导线布置形式和相序排列方式，进行工频电磁场、无线电干扰、噪声、不平衡电流等的计算分析，通过比较确定最优导线布置形式。

(2) 耐雷水平和防雷措施。由于同塔多回线路的杆塔相对比较高，遭受雷击的可能性增大。若遭雷击后多回线路同时跳闸，则后果更严重，因此，应提高同塔多回路的耐雷水平。在进行塔头布置时，尽可能减少横担层数，降低塔高，减少雷击次数；减小地线保护角，降低绕击率；考虑加挂耦合地线，加装消雷器等防雷措施；采用平衡高绝缘（即线路采用负的保护角，并在条件允许的条件下尽量提高绝缘程度），提高总体耐雷水平；同层横担不同回路导线，采用不同类型绝缘子（串），即采用差异化绝缘（根据线路沿线的过电压水平、污染情况、海拔高度等因素的不同，对线路进行差异化的、科学合理的绝缘配合设计），降低同时跳闸率。

(3) 塔型规划与设计。多回路铁塔导地线根数多，所受荷载大；导线截面、电压等级的不同组合，其荷载差异也很大，使铁塔在选型、断面选择、节点构造等方面的难度加大。通常多回路铁塔主材用单角钢已不能满足要求，需采用拼合角钢（双拼或四拼）或钢管。钢管断面中心轴对称，风阻系数较小，使得多回路钢管塔的应用越来越广。

5. 灵活交流输电

灵活交流输电（Flexible AC Transmission System, FACTS）又称柔性交流输电技术，是基于电力电子技术，对交流输电系统实施灵活、快速调节控制的一种交流输电的方式。它由美国 N. G. Hingorani 于 1986 年提出，是现代电力电子技术与电力系统相结合的产物。其主要思想是：采用具有独立或综合功能的电力电子装置，对输电系统的主要参数（如电压、相位差、电抗等）进行灵活快速的适时控制，以期实现较大范围地控制潮流，使输送功率合理分配；保证输电容量接近输电线路的热稳定极限，在控制区域内传输更多的功率，减少发电机的热备用；依靠限制电路和设备故障的影响来防止线路串级跳闸，阻尼电力系统振荡，大幅度提高系统的稳定性和可靠性；降低功率损耗和发电成本。目前已成功应用或正在研发的 FACTS 装置有十几种，主要有：

(1) 静止无功补偿器（SVC）。SVC 使用晶闸管，快速调整并联电抗器的大小及投切电容器组，维护系统电压水平，消除电压闪变、平息系统振荡等。SVC 可以静态或动态地使电压保持在一定范围内，从而提高电力系统的稳定性。



(2) 静止调相器 (Statcon)。Statcon 由三相逆变器构成, 整个装置的无功功率大小或极性均由通过它的电流来调整, 其整体功能类似于同步调相机, 可视为 SVC 的改进装置。但其调节无功的能力比 SVC 强, 因为 Statcon 的输出无功取决于输出端的电流和电压乘积, 而 SVC 的无功量由电压平方除以阻抗决定。因此, 在发生事故、电压降低的情况下, Statcon 比 SVC 可提供更大的无功支持能力, 具有一定的事故过载能力。

(3) 超导蓄能器 (SMES)。SMES 由电力电子器件 (SCR 或 GTO 等) 控制的一个大容量超导蓄能线圈组成, 放电/充电的效率在 95% 以上, 造价昂贵。作为蓄能器, SMES 可快速提供几秒的备用电力, 瞬时产生同步或阻尼功率以提高输电的静态和暂态稳定性, 提高远距离输电的输送能力, 延长发电设备寿命, 提供无功功率以改进电压稳定性, 提高电压质量等。

(4) 固态断路器 (SSCB)。采用晶闸管型的断路器, 只能在交流第一次过零时断开, 其开断延时将达几毫秒。如果采用电力电子元件的固态断路器, 则电流可瞬时被切断, 效果将大为提高。美国生产的 SSCB 样机, 已达到 15kV、600A, 可在 $4\mu\text{s}$ 内完成开断。

(5) 可控串联电容补偿 (TCSC)。TCSC 具有潮流控制、阻尼线路功率振荡、提高暂态稳定性、抑制次同步振荡等功能。TCSC 可以连续改变线路电抗, 因此可用来进行潮流控制, 改变电网中的潮流分布。由于系统阻尼不足或由于系统大扰动引起低频功率振荡时, TCSC 可以阻尼线路功率振荡。在系统受到大的冲击时, TCSC 可迅速调整晶闸管的触发角, 改变串联电容的补偿度, 提高系统的暂态稳定性。当系统发生次同步振荡 (SSR) 时, TCSC 可迅速调整串联电容器容抗至最小值, 呈现出感抗, 从而对 SSR 起到很强的阻尼作用。

随着电力电子技术的飞速发展, 灵活交流输电技术的发展前景不可估量。

6. 分频输电

分频输电系统 (Fractional Frequency Transmission System, FFTS) 利用较低的频率 (如 50/3Hz) 传输电能, 可提高系统输送能力。众所周知, 交流输电系统的输送功率与电压的平方成正比, 与系统的电抗成反比; 系统的电抗与频率成正比。FFTS 是西安交通大学 1994 年针对水电的远距离输送提出的。由于水电机组转速很低, 适合发出频率较低的电能, 而输送低频电能时, 其线路阻抗与频率成比例地下降, 可大幅度提高线路输送容量。FFTS 的关键问题是大容量变频技术。分析研究表明, FFTS 具有以下特点:

(1) 提高输电容量。频率降低为工频的 $1/3$ 时, 输电线路的输送容量大致可提高 3 倍, 接近输电线路的热极限, 从而可充分发挥线路的输能作用。常规 500kV 交流系统在距离为 1000km 时, 输送功率不超过 800MW, 而同样条件下 FFTS 的输送功率可达 1800MW。

(2) 长距离输送电能时, 有明显的经济效益。对 500kV 电压水平, 当输送距离大于 650km 时, 与常规交流输电系统相比, 分频输电的经济效益好。

(3) 运行性能指标好。降低频率, 对于输电系统的各项运行指标如末端空载电压、末端补偿容量、压波功率等有显著改善, 系统的暂态稳定性提高。

(4) 更适合于水电、风电等可再生能源发电的输送。由于水电、风电等发电机组的转速较低, 发出的电力频率较低, 采用分频输电, 可使发电机组及其输电系统都能运行在各

自较合理的频率下，提高整个电力系统的运行指标，获得较大的经济效益。我国水力资源十分丰富，大多集中在中西部地区，而电力负荷多在东部沿海，输电距离一般都达到1000~2500km，因此分频输电的研究对我国更具有现实意义。

二、架空输电线路及其作用

架空输电线路是一种由导线（避雷线）利用绝缘子（或绝缘子串）和线路金具悬挂或支撑固定在杆塔上的电力线路，它是电力系统的主要组成部分之一。输电线路是电力系统中电能传输、交换、调节和分配的主要环节，电力线路分为架空线路和电缆线路，因为和电缆线路相比，架空线路具有建造费用低、施工周期短、维护方便等优点，所以架空线路得到更广泛的应用。

发电厂、变电所、配电和用电设备，通过输电线路连接构成电力系统，电力系统中发电厂的位置，取决于能源分布、运输条件和电力用户的分布情况等。通常发电所需要的一次能源（能源资源）产地和电能用户往往不在同一地区，水能资源集中在河流水位落差较大的偏远山区的高山峡谷，燃料资源集中在煤炭产地的矿区，而电能用户一般集中在大城市、大工业区，与一次能源产地相距甚远。例如，水力发电厂只能建在河流水位落差大的峡谷地区，而火力发电厂虽然可以建在远离矿区的电力负荷中心附近，但这要付出昂贵的燃料运输费用，也会给电力负荷中心所在的城市地区带来严重的环境污染。举例来说，建设一座3000MW的火力发电厂，年耗煤量约1500万~2000万t，若将发电厂建在负荷中心，其年耗煤量超过一条铁路专线年运输量。这显然无论从技术经济上还是从环境保护方面考虑均是不可取的。因此，大容量的火力发电厂也应尽可能地建在远离城市的矿区。为了将这些分散的、处于偏远地区的水电厂、火电厂或其他形式的发电厂生产的电能输送到远方的电力负荷中心，为了使这些发电厂能够连接起来并列运行以及提高供电的可靠性和经济性，高压架空输电线路在实现这种大容量、远距离输送电能方面发挥了极其重要的作用。

发电厂、输电线路、电能用户组成为实现电力生产与消费平衡的简单的电力系统，但简单的电力系统满足不了经济、可靠与运行灵活的要求。随着电力工业的发展，简单的或孤立的地区电力系统将发展为区域性电力系统，并进一步发展为跨区域的互联电力系统。当前火电厂单机容量已从几万千瓦、几十万千瓦发展到上百万千瓦，交流输电电压已从几十千伏、几百千伏发展到1000千伏以上。我国单机容量为300~600MW的机组已成为电力系统中的主力发电机组，区域性电力系统主网电压已达500kV。东北、华北、华东和华中电力系统装机容量均以超过30000MW，华中和华东两大区域电力系统已通过±500kV直流输电线路连接成交直流混合的容量逾50000MW的大型互联电力系统，已建成的总装机容量达18200MW的三峡水利枢纽工程将把华中、华东、西南等几个大区域电力系统连接成总容量超过亿千瓦的互联电力系统。因此，架空输电线路的作用是在实施远距离输送电能的同时，还可以实现电力系统间联网，在电网之间进行电能传输、交换、调节和分配，不仅使系统可以安装大型机组，建大型电厂，还可以减少系统备用容量以降低成本，调峰、错峰增加系统稳定性，提高供电能力和供电质量，使得电力网络中电力设备发挥最大的效能。

输电线路按电压等级分为高压、超高压和特高压线路。我国的电压标准以系统额定电压表

示, 35~220kV 的线路为高压线路; 330~500kV 的线路为超高压线路, 750kV 以上的线路为特高压线路。一般地说, 输送电能容量越大, 线路采用的电压等级越高。我国输电线路的电压等级有 35kV、(66)kV、110kV、(154)kV、220kV、330kV、500kV、750kV、1000kV, 其中, 66kV、154kV 新建线路不再使用。目前, 我国已形成了以 500kV 超高压线路为骨干网架的南方、东北、西北 (330kV)、华北、华中、华东等 6 大跨省区域电网以及山东、福建、海南、新疆、西藏和台湾等 6 个省 (自治区) 电网。

选择输送的电压等级, 主要取决于输送的功率和输送的距离。从输送电能的角度来看, 三相交流输电线路传输的有功功率为

$$P = \sqrt{3}UI \cos\varphi \quad (1-1)$$

式中 U ——三相交流输电电压, kV;

I ——线路电流, kA;

P ——传输的有功功率, MW;

$\cos\varphi$ ——负载功率因数。

三相导线中的损耗可表示为

$$\Delta P = 3I^2 R_1 = 3 \left(\frac{P}{\sqrt{3}U \cos\varphi} \right)^2 \rho \frac{l}{A} = \frac{P^2 \rho l}{u^2 \cos^2 \varphi a} \quad (1-2)$$

式中 R_1 ——相导线电阻, Ω ;

ΔP ——三相线路的功率损耗, MW;

ρ ——导线电阻率, $\Omega\text{mm}^2/\text{km}$;

l ——相导线长度, km;

A ——导线截面积, mm^2 。

由式 (1-1) 和式 (1-2) 可知, 当输送功率一定时, 线路的电压等级越高, 线路中通过的电流就越小, 所用导线的截面积就可以越小, 用于导线的投资可以减少, 而且线路中的功率损耗、电能损耗也都会相应降低。因此, 大容量、远距离输送电能要采用高压输电。但是, 电压越高, 要求线路的绝缘水平也越高, 除去线路杆塔投资增大, 输电走廊加宽外, 所需的变压器、电力设备等的投资也要增加, 因此输电线路电压等级的选择, 过高或过低都不合理。科学的方法是根据输送功率和输送距离, 结合电力系统运行和发展的实际需要以及电力设备的制造水平, 通过对若干方案的计算结果进行充分的技术经济的分析比较来确定。表 1-2 给出了架空输电线路的额定电压与输送功率和合理输送距离的关系, 可供选择电压等级时参考。

表 1-2 架空输电线路的额定电压与输送功率和合理输送距离的关系

线路电压/kV	输送功率/MW	输送距离/km	线路电压/kV	输送功率/MW	输送距离/km
3	0.1~1	1~3	220	100~500	100~300
6	0.1~1.2	4~15	330	200~800	200~600
10	0.2~2	6~20	500	100~1500	250~850
35	2~10	20~50	750	2000~2500	500 以上
110	10~50	50~150			

输电线路按杆塔上的回路数目分为单回路、双回路和多回路线路，单回路杆塔仅一回三相线路，双回路杆塔有两回三相导线，多回路杆塔上有三回及以上的三相导线。除此以外，紧凑型线路也得到较快的发展和应用。

第二节 架空线路的构成

架空输电线路的组成元件主要有导线、架空地线（或称避雷线，简称地线）、金具、绝缘子、杆塔、拉线和基础，如图 1-3 所示。

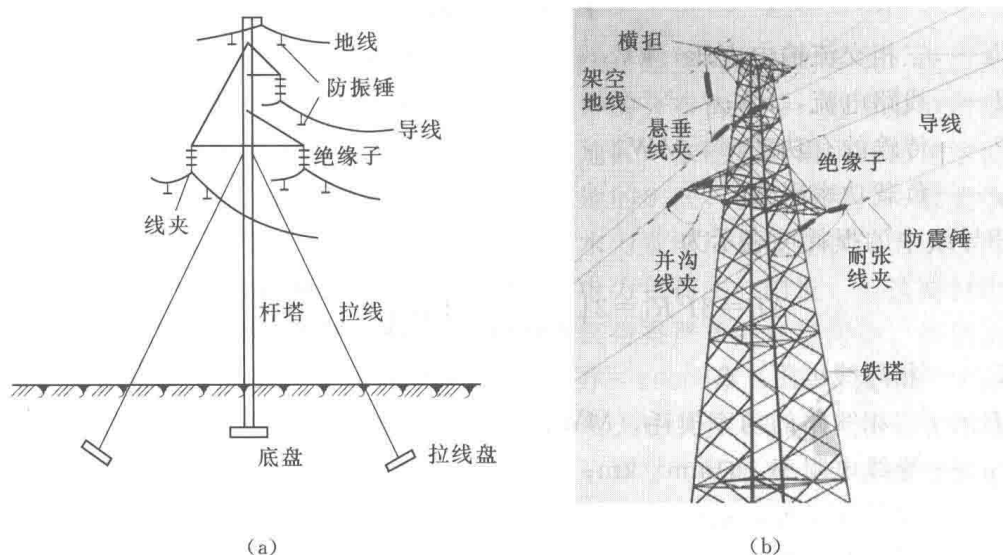


图 1-3 架空输电线路的组成元件

(a) 架空线路组成示意图；(b) 架空线路实物图

导线用来传输电流、输送电能。一般输电线路每相采用单根导线，对于超高压大容量输电线路，为了减小电晕以降低电能损耗，并减小对无线电、电视等的干扰，多采用相分裂导线，即每相采用两根、三根、四根或更多根子导线，子导线间距用间隔棒控制。

地线悬挂于杆塔顶部，并在每基杆塔上均通过接地线与接地体相连接。当雷云放电雷击线路时，因地线位于导线的上方，雷首先击中地线，并借以将雷电流通过接地体泄入大地，从而减少雷击导线的概率，保护线路绝缘免遭雷电过电压的破坏，起到防雷保护作用，保证线路安全运行。

杆塔用来支持导线和地线及其附件，并使导线、地线、杆塔之间，以及导线和地面及交叉跨越物或其他建筑物之间保持一定的安全距离。

绝缘子是线路绝缘的主要元件，用来支承或悬吊导线使之与杆塔绝缘，保证线路具有可靠的电气绝缘强度。

金具在架空线路中起着支持、固定、接续、保护导线和地线及紧固拉线的作用。

杆塔基础是将杆塔固定在地面上，以保证杆塔不发生倾斜、倒塌、下沉等的设施。