

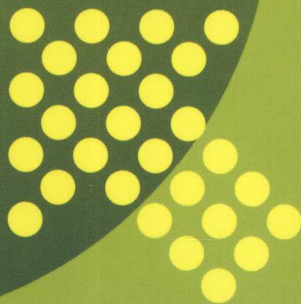
21世纪高等学校规划教材



JIAKONG SHUDIAN XIANLU SHEJI YUANLI

架空输电线路 设计原理

张忠亭 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

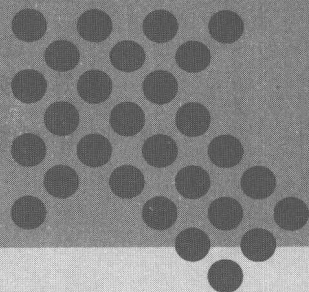
21世纪高等学校规划教材



JIAKONG SHUDIAN XIANLU SHEJI YUANLI

架空输电线路 设计原理

张忠亭 编
蒋兴良 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共 8 章, 主要内容包括: 绪论, 架空输电线路的结构, 均匀荷载下架空线路导线力学计算, 非均匀荷载下孤立挡导线力学计算, 导线振动与舞动, 架空输电线路路径选择及杆塔定位, 架空输电线路的绝缘配合, 杆塔荷载、杆塔选择及杆塔基础。本书除具有较强的理论性, 还注意引导学生注重有关国家标准及设计规范的应用。

本书可作为高等院校电气信息类相关专业的教学用书, 也可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

架空输电线路设计原理/张忠亭编. —北京: 中国电力出版社, 2010. 1

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-9784-9

I. ①架… II. ①张… III. ①架空线路: 输电线路—设计—高等学校—教材 IV. ①TM726: 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 217038 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 354 千字

定价 23.20 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

架空输电线路是电力系统的重要组成部分。改革开放 30 年来，特别是进入 21 世纪以来，我国电力工业一直在飞跃发展。我国电力工业的特点是由于能源资源分布远离电力用户（用电中心），因而呈现电能生产与电能用户的分离，这就必然需要与其发展相适应的输电线路工程。因此，加强这方面人才的培养力度，显得格外重要。

《架空输电线路设计原理》就是为适应这种需求由中国电力出版社组织编写的。编写本书的目的是满足高等学校相关专业人才培养及学科发展的需求。作为一本教材，读者对象主要是学生，也考虑到相关工程技术人员的参阅，因而在编写过程中，在向读者介绍输电线路设计的系统基础知识的同时，也尽可能地涉及本领域的理论和技术。

《架空输电线路设计原理》涉及电学、力学、气象、地质、建筑结构、工程学等许多学科领域知识，是一本知识综合性很强的教材。全书共分八章，第一章绪论，向读者简要介绍了输电线路的作用，架空输电线路的发展概况及架空输电线路设计的主要任务；第二章架空输电线路的结构，介绍了线路结构的整体概况及各部件的作用，让读者对线路结构的全貌有基本认识；第三章均匀荷载下架空线路导线力学计算和第四章非均布荷载下孤立挡导线力学计算，这两章阐述各种荷载条件下导线的力学特性和几何特征计算原理，这是架空线路关于力学、几何计算的主要内容；第五章导线振动与舞动，主要阐述了导线“风激”引起的“动态”力学问题及其预防措施；第六章架空输电线路路径选择及杆塔定位，这是输电线路设计中必须进行的开篇工作，主要阐述了线路路径选择应遵循的一些原则和具体的工作方法，以及如何正确进行杆塔定位；第七章架空输电线路的绝缘配合，讨论了架空线路杆塔塔头布置（尺寸）、绝缘子串选用等，绝缘配合是保证线路正常安全运行所必须的，是线路设计的主要内容之一；第八章杆塔荷载、杆塔选择及杆塔基础。通过本书的学习，学生可基本了解架空输电线路设计的主要内容、设计计算原理，掌握计算理论、公式和方法，同时本书也注意引导学生注重有关的国家标准及设计规范、规程等文件的应用，培养学生作为架空线路设计者应具备的知识。

本书是作者曾经多年进行架空输电线路教学的经验总结。在编写过程中，参考了其他作者的有关书籍和论文资料；重庆大学蒋兴良教授审阅了全书，并提出了很多宝贵意见，在此深表感谢！

受作者水平所限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2008 年 12 月

目 录

前言	
第一章 绪论	1
第一节 架空输电线路及其作用.....	1
第二节 架空输电线路的发展.....	3
第三节 架空输电线路设计的主要任务.....	6
第二章 架空输电线路的结构	8
第一节 架空线路的导线和避雷线(架空地线).....	8
第二节 线路绝缘子(绝缘子串)与线路金具.....	16
第三节 杆塔和杆塔基础.....	27
第三章 均匀荷载下架空线路导线力学计算	40
第一节 架空线路导线比载及其运行条件.....	40
第二节 均匀荷载孤立挡导线力学计算.....	54
第三节 均匀荷载孤立挡导线的状态方程式及应用.....	67
第四节 均匀荷载连续挡导线力学计算.....	79
第四章 非均布荷载下孤立挡导线力学计算	102
第一节 绝缘子串的机械荷载及比载.....	102
第二节 非均布荷载孤立挡导线的悬垂曲线方程、应力和弧垂的基本关系.....	104
第三节 非均布荷载条件下孤立挡导线状态方程及控制条件判别.....	109
第四节 非均布荷载孤立挡导线弧垂简化计算.....	111
第五节 有风偏时非均布荷载孤立挡导线弧垂与线长计算.....	119
第五章 导线振动与舞动	121
第一节 概述.....	121
第二节 导线的振动与防振.....	122
第三节 相分裂导线的次挡距振荡及其防护.....	132
第四节 导线舞动及其防护.....	136
第六章 架空输电线路路径选择及杆塔定位	141
第一节 概述.....	141
第二节 架空输电线路的路径选择.....	141
第三节 输电线路的杆塔定位.....	144
第四节 定位校验.....	150
第七章 架空输电线路的绝缘配合	158
第一节 概述.....	158
第二节 架空线路绝缘子选择.....	161
第三节 杆塔头部的空气间隙距离.....	165

第四节 挡距中央的绝缘配合.....	170
第八章 杆塔荷载、杆塔选择及杆塔基础.....	176
第一节 杆塔的设计挡距和设计条件.....	176
第二节 杆塔荷载计算和校验.....	180
第三节 线路杆塔基础与地基承载力.....	187
第四节 杆塔基础稳定性校验.....	198
附录 A 常见导线机械特性.....	211
附录 B 常见导线（避雷线）规格和性能.....	213
附录 C 高压架空线路污秽分级标准及典型气象区.....	225
参考文献.....	226

第一章 绪 论

第一节 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，而电能用户一般都集中在大城市、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，但这要付出高昂的燃料运费，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关键的重要作用。

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最简单的电力系统，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 1000kV 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已超过 30 000MW，华东和华中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 50 000MW 的大型互联电力系统，已建成的总装机容量达 18 200MW 的三峡水电枢纽工程将把华中、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，不仅使系统可安装大型机组、建大型电厂，而且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 及以上的

是特高压线路。一般地说，输送电容量越大，线路采用的电压等级越高。我国输电线路的电压等级有 35、(66)、110、(154)、220、330、500、750、1000kV，其中 66、154kV 新建线路不再使用。目前，我国已形成了以 500kV 超高压输电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 个独立省 (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 ——三相交流输电线路电压，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

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

式中 R_l ——一相导线电阻， 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 ——一相导线长度，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减小，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 1-1 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 1-1 架空输电线路额定电压与输送功率和输送距离的关系

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	0.1~1.0	1~3	220	100~500	100~300
6	0.1~1.2	4~15	330	200~800	200~600
10	0.2~2.0	6~20	500	100~1500	250~850
35	2.0~10.0	20~50	750	2000~2500	500 以上
110	10.0~50.0	50~150			

架空输电线路按输送电流的性质可分为交流线路和直流线路，我国较常用的为交流线路，近些年直流输电线路也有很大的发展。与交流线路相比，在输送相同功率的情况下，直

流线路需要的投资少，主要材料消耗低，线路走廊宽度也较小，作为两个电力系统的联络线，改变传送方向迅速方便，可以实现相同频率甚至不同频率交流系统之间的不同频率联系，能降低主干线及电力系统间的短路电流。1987年，我国建成了第一条 $\pm 500\text{kV}$ 超高压直流输电工程——葛（葛洲坝）上（上海）线，全长 1051km ，输送容量为 1200MW ，随着换流技术的不断完善和换流站建设造价的降低，超高压直流输电有着广泛的应用前景。

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 架空输电线路的发展

输电技术是伴随着城市的发展和工业的出现，以及发电厂远离用电负荷中心而兴起的，现代大型发电厂倾向于建在能源（一次能源）基地，不可避免地造成了电源（二次能源）远离消费中心的局面，这就促成了输电技术的发展。特别是架空输电线路，由于它的造价低廉、维护方便，随着电力工业的发展而不断得到发展。

架空输电线路按电压等级分为高压、超高压和特高压线路。发电厂和整个电力系统容量的增大，以及互联网系统的建立，使得输电线路功率增大，同时也使得这些线路的长度增加。这些都导致架空输电线路的额定电压也在不断提高。

一、国外输电线路的发展概况

早在20世纪30年代，美国就已建设了胡佛顿——洛杉矶的 287kV 线路。1952年瑞典建设了卡尔斯帕伦盖特——赫尔辛堡第一条 380kV 线路。而到了1953年美国开始建设 $330\sim 345\text{kV}$ 架空线路。1956年，前苏联古比雪夫——莫斯科的两条 400kV 单回路建成投入运行，线路长分别为 812km 和 890km ；1959~1961年居世界第一位的两条 500kV 单回路：伏尔加格勒（斯大林格勒）——莫斯科线路投入运行，线路长度约各为 1000km 。1964~1967年期间，美国、加拿大和日本各自的第一条 500kV 线路建成投运。1965~1966年加拿大修了首条 735kV 的麦尼夸根——蒙特利尔架空线路；1967年前苏联首条 750kV 工业性试验线路科纳科夫——莫斯科线路投入营运；1969年美国第一条 765kV 线路建成，长度为 110km ，成为当时世界上最高输电电压。1985年，前苏联北哈萨克斯埃基巴斯图兹火电厂至科克契塔夫的 1150kV 特高压输电线路投入运行，开创了交流输电最高电压的记录。图1-1为前苏联1960~1980年代超高压输电线路增长的情况。与此同时，在欧洲、美国、加拿大、日本及其他国家，也在大力发展超高压电网。在欧洲西部，建立了 400kV 电压的网络，它不仅用来保证在各个国家范围内输送电能，而且可用来保证不同国家系统间的联系，从而达到既能节约投资，又能增加对用户供电的可靠性。20世纪80年代初，法国开始向 735kV 电压过渡的研究和设计工作，其中设计的新双回路 400kV 线路将来可以升压到 750kV 。在英、德、瑞士和意大利也在进行建立 750kV 网络的研究。在埃及阿斯旺——开罗的两回路 500kV 输电线路也在20世纪80年代初投入运行，线路长各为 800km 。日本在1973年开始运行 500kV 输电工程，在东京周围建立了采用双回路杆塔的 500kV 环形线路，1985年7月首条特高压 1200kV 线路投入营运。图1-2为日本输电电压提升过程。此外在一些发展中国家如赞比亚、扎伊尔（ 330kV ）、南非（ $270\sim 300\text{kV}$ ）、澳大利亚（ 275 、 330

及 500kV)，南美的巴西（330kV 及 500kV）、墨西哥（100kV）、阿根廷（500kV）等在 20 世纪 80 年代都建设了超高压等级的输电线路。表 1-2 为 20 世纪 80 年代初世界各国架空输电线路的长度统计。

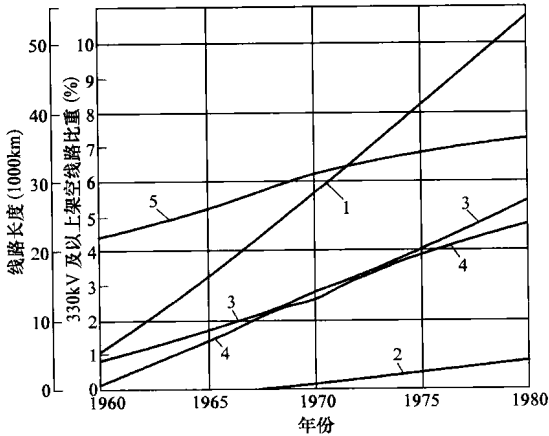


图 1-1 前苏联超高压输电线路长度的增长情况
1—330kV 及以上架空输电线路；2—750kV 架空输电线路；
3—400~500kV 架空输电线路；4—330kV 架空输电
线路；5—330kV 及以上架空输电线路与 35kV
及以上所有架空输电线路的长度之比

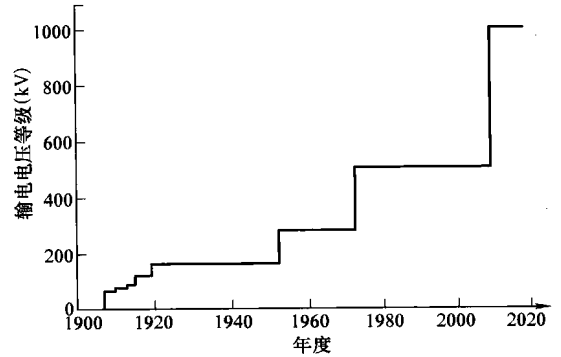


图 1-2 日本输电电压等级的提升过程

表 1-2 世界各国架空输电线路长度一览

国 名	线路总长度 (km)	国 名	线路总长度 (km)	国 名	线路总长度 (km)
315~345kV 线路					
巴 西	6200	丹 麦	550	瑞 典	8500
加 拿 大	10 000	西 班 牙	5900	南斯拉夫	2800
中 国	540	意 大 利	4400	500kV 线路	
苏 联	22 400	印 度	1500	巴 西	3100
美 国	50 400	墨 西 哥	3700	埃 及	1600
380~400kV 线路					
奥 地 利	600	荷 兰	900	加 拿 大	5000
英 国	9300	挪 威	600	苏 联	23 200
保加利亚	600	葡 萄 牙	450	美 国	24 000
巴 西	3200	苏 联	550	日 本	2500
匈 牙 利	900	土 耳 其	3400	750~800kV 线路	
民主德国	3400	芬 兰	3000	匈 牙 利	270
希 腊	900	法 国	8200	加 拿 大	6100
		西 德	7300	苏 联	1950
		瑞 士	1100	美 国	2500

与上述以交流运行的输电线路发展的同时，在许多国家还在进行建设直流输电线路的工作。1962 年，前苏联建设了伏尔加格勒（斯大林格勒）——顿巴斯的第一条 800(±400) kV 超高压直流输电工业性试验线路，长 473km，设计输送功率为 720MW。此后接着又建设

了埃斯基巴斯图兹——俄罗斯中部长 2414km 的 1500(±750) kV 超远距离直流输电工程,其输电线路的输送功率达 6000MW。1970 年,美国新建了第一条 800(±400) kV 直流超高压架空线路,其长度约为 1410km,输送功率达 1440MW。1977 年美国又一条电压为 500(±250) kV 的直流输电线路投入运行,其额定电流为 1000A,线路长度为 739km,而该地区另一条 ±400kV、额定电流 2500A 也相继投入运行,美国当时在建的直流输电线路有 5 条,还有几条在设计中。在加拿大,到 20 世纪 80 年代初,有 5 条直流架空输电线路投入运行。

在超高压输电电路上,为了保证必要的电气强度,不得不采用很大的线间距离和很大的对杆塔接地部分的绝缘间隙,这样随着电力生产的发展,输电容量的逐步增大,对于常规的输电线路结构,在输电线路建设中,线路走廊所需的费用越来越高,如何减少占地面积,降低单位容量的线路造价、提高输电线路的传输能力,是输电线路工程发展中面临的新问题。自 20 世纪 70 年代以来,在美国、巴西、法国、日本、前苏联等国家出现了结构紧凑化型的输电线路。例如,美国在 20 世纪 70 年代采用了相间绝缘间隔棒,138kV 线路相间距离只有 1.5m。前苏联的 110kV 线路亦采用相间间隔棒,相间距离从 4.0~4.5m 缩减为 1.5m。随后,这种技术又应用到更高电压和超高压线路上。紧凑型架空送电线路是通过导线优化排列,将三相导线置于同一塔窗内,三相导线间无接地构件,达到提高自然输送功率,减少线路走廊宽度,提高单位走廊容量的架空输电线路。各个国家研究和建设紧凑型送电线路的着重点不同,俄罗斯研究紧凑型输电线路的目的是提高自然输送功率;美国的研究目的是解决线路走廊问题;巴西的研究目的既解决走廊问题,又为提高自然输送功率;南非研究紧凑型输电线路的目的则是降低工程造价,世界各国都在积极开展这方面的研究。我国于 2005 年 2 月正式颁布了中华人民共和国电力行业标准《220kV~500kV 紧凑型架空送电线路设计技术规定》(DL/T 5217—2005)。因此,紧凑型输电线路是输电线路的又一发展方向。

二、我国架空输电线路的发展

我国电力工业的发展经历了一个曲折的过程。1882 年,在我国上海南京路建成了中国第一座发电厂,可以说中国电力与世界电力几乎是同时起步的(世界第一座火力发电厂于 1875 年建于法国),但遗憾的是由于封建统治和外国列强的侵略,使我国的电力工业在此后长达近 70 年的时间里发展极为缓慢,技术也十分落后。到 1949 年全国解放时,全国发电设备装机容量只有 1850MW。新中国成立使我国电力工业得到飞速的发展,截至 2000 年,全国装机容量已达 316GW,年发电量 1.3×10^{12} kWh,到 2005 年我国电力装机总容量已突破 500GW。

随着水电厂、火电厂建设及电能生产的发展,我国输电线路工程也不断发展。1950 年前,我国只有输电电压等级为 35~110kV 的线路。1950 年后,随着国民经济的发展以及工农业生产对电能需求的增加,输电电压等级提升到 220kV,这一情况维持了近 20 年。20 世纪 70 年代以来,为满足大容量长距离的送电需求,系统运行的电压等级不断提高。1964 年国家正式提出在我国西北地区建设中国第一条 330kV 刘家峡——天水——关中输电线路(简称刘天关线路),该工程 1970 年 5 月全面开工,1972 年 6 月正式投入运行,线路全长 534km,开始了我国输电电压等级迈向超高压的第一步;1981 年建成了从河南省平顶山姚孟电厂至湖北省武昌凤凰山变电所的第一条 500kV 超高压交流输电线路,使我国成为当时世界上 8 个拥有 500kV 输电线路的国家之一。1989 年建成第 1 回 ±500kV 直流线路。2005

年9月，第1回750kV交流线路在西北电网建成投入运行，2008年四川—上海±800kV

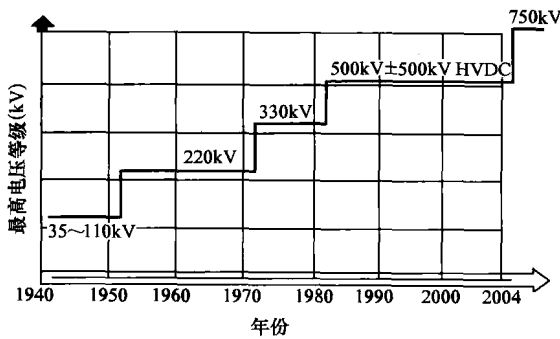


图 1-3 我国最高电压等级增长曲线

特高压直流输电示范工程正式动工，拉开了我国特高压电网建设大幕。图 1-3 为我国最高电压等级增长曲线。目前，我国已形成了 6 个跨省的大型区域电网。到 2000 年底，全国 110kV 及以上输电线路总长达 39.8 万 km，其中 220kV 线路总长 13.2 万 km，330kV 线路总长达 0.78 万 km，500kV 线路总长 2.17 万 km，形成了华北、东北、华东、华中、西北和南方电网，为了实现能源资源优化配置，在六大

区域电网的基础上逐步进行全国互联网。1989 年投运的±500kV 葛沪直流输电工程，实现了华中—华东电网的互联，拉开了跨大区联网的序幕。2001 年华北与东北电网通过 500kV 线路实现了第一个跨大区交流联网；2002 年川电东送工程实现了川渝与华中联网。2003 年 9 月，华中—华北联网工程投入，形成了由东北、华北、华中（含川渝）区域电网构成的交流同步电网，2004 年华中电网通过三峡至广东直流工程与南方电网相联；2005 年 3 月山东电网联入华北；2005 年 6 月华中—西北通过灵室直流背靠背相联。目前全国除新疆、西藏、海南和台湾省外，全国将近 80% 的发电机组和用电负荷运行在全国交、直流联合电网中，初步形成全国联网的基本框架。已建成的晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压示范工程，将推进我国特高压输电技术的迅速发展，预示着我国输电技术迈向更高的水平。

第三节 架空输电线路设计的主要任务

现代电力系统是一个由电能生产、输送与分配、消费、控制等子系统构成的不可分割的大系统。电能的生产子系统即电源系统，是由各类发电厂构成的；电能的消费子系统，是由和发电容量相适应的各种特性的用电负荷组成的。而输电线路则承担着由电源子系统向电能消费子系统进行电能传输、交换、调节和分配的重任，是电力系统重要的不可缺少的组成部分，是现代电力系统的主动脉。

在输电线路工程建设中，一般都优先采用架空输电线路，只是在城区，线路走廊拥挤地段，对环境保护有特殊要求的地区，或跨越大的水域（如江、湖、海等）不能采用架空线路时，才采用电缆线路。架空输电线路工程涉及电气、力学、机械、结构工程、基础工程、水文气象等许多学科领域的知识，工程建设中还会牵涉到军事、交通、航运、邮电通信、农林水利、工矿企业、城市规划等行业和部门。因此，架空输电线路是一种综合性工程，架空输电线路设计是一项综合性很强的工作，架空输电线路设计正确与否，不仅决定着线路工程建设本身的技术经济的合理性，也对电力系统的运行可靠性、经济性起着关键的作用。

一般说来，架空输电线路设计应包括的内容有：①线路的电气部分设计计算，包括变电所和所有电气装置、开关设备、控制系统等设计和选择；②线路的机械力学计算；③线路绝缘配合；④杆塔设计；⑤杆塔基础设计计算等。关于输电线路电气部分的设计计算，读者可

阅读有关电气设计的专门书籍，而杆塔设计的部分陈祥和先生在他的《输电杆塔及基础设计》一书中作了详尽的阐述。因此，《架空线路设计原理》作为一本教材，其主要内容是承接在线路电气部分设计计算之后线路结构设计的主要工作，其内容主要包括以下几方面。

1. 线路路径选择

架空输电线路的终端是发电厂和大型变电所，在远距离输电线路上还将建立中间开关站，选择线路路径，应做好充分的调查研究，综合考虑运行、施工、交通条件和路径长度等因素，做好与相关单位和部门的妥商，需拟定若干方案并对其作初步的技术经济比较，确定出最优方案。

2. 架空输电线路导线力学计算

(1) 确定线路设计的气象条件，导线所受的荷载计算。

(2) 导线（避雷线）弧垂应力计算，包括悬垂曲线的方程、状态方程及其求解、断线张力计算、避雷线支持力计算。

(3) 导线（避雷线）振荡及其防治措施。

3. 输电线路的绝缘配合

(1) 绝缘子及绝缘子串选择与计算。

(2) 杆塔塔头间隙尺寸的确定。

(3) 挡距中央的绝缘配合。

4. 杆塔及其基础选择及其稳定性试验

(1) 杆塔荷载及杆塔选择。

(2) 杆塔基础选型及其稳定性校验。

架空线路设计是一项综合性很强的工作，所涉及的专业知识面广，不仅涉及电力、力学、结构工程、基础工程等方面，往往还需要工程勘测、水文气象等资料及沿线路相关部门的协调配合。因此，架空输电线路设计人员不仅要掌握本专业的专门知识，而且还要了解相关专业的知识，熟悉国家有关方针政策及相关部门的特殊要求。

第二章 架空输电线路的结构

架空输电线路由导线、避雷线、杆塔、绝缘子（绝缘子串）和金具等主要元件构成，它们在线路中的作用分别是：①导线，传导电流、输送电能；②避雷线或称架空地线，将雷电流引入大地以保护线路绝缘免遭雷击；③杆塔，支持导线和避雷线，并使导线和导线间、导线和杆塔间、导线和避雷线间以及导线和大地间保持一定的安全距离；④绝缘子（绝缘子串），使导线和杆塔间保持绝缘状态；⑤金具，支持、接续、保护导线和避雷线、连接和保护绝缘子（绝缘子串），图 2-1 为架空线路示意图。

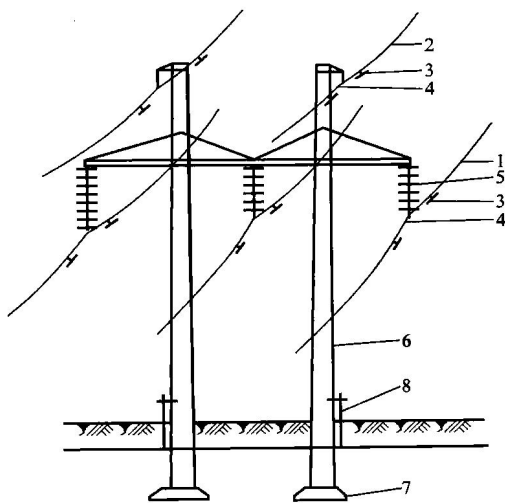


图 2-1 架空线路的组成元件

1—导线；2—避雷线；3—防振锤；4—线夹；
5—绝缘子；6—杆塔；7—基础；8—接地装置

第一节 架空线路的导线和避雷线（架空地线）

一、架空线路的导线

导线是架空输电线路的主体，担负着传输电能的作用，导线架设在杆塔上，它在阳光、风、雨、冰雪、雷电和大气温度变化等自然条件和重力场作用下运行，同时还会受到周围大气环境所含化学物质的侵蚀。因此，架空输电线路的导线应满足如下要求：①具有良好的导电性能；②要能承受机械力的作用，必须具有足够高的机械强度，而且为了便于施工，导线应坚韧、有柔性；③架空导线在大气环境中运行，应能承受大气环境中具有侵蚀性物质的作用，应具有一定的抗氧化、抗腐蚀能力；④应价格低廉、质量较轻。

1. 导线材料

架空线路导线的材料有铝、铝合金、钢和铜等。

铝导线：铝有较好的导电性能， 20°C 时它的电阻率为 $0.028\ 364\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ 。但铝的机械强度较低，导线用电工圆铝线的抗拉强度为 $159\sim 188\text{MPa}$ ，因而导线不能拉得太紧，挡内没张紧的导线将使弧垂加大，要求杆塔增高，从而使线路投资增加。铝线表面有密实的氧化膜，能防止铝线继续氧化。但是，它耐受酸、碱、盐侵蚀能力较差。因此，铝线适用于小挡距线路，不宜用于沿海及大气中含酸、碱、盐较浓的环境中。

铝合金导线：铝合金是铝中加入少量镁、硅、铁等金属制成的，它具有铝材质量轻的优点，而且它也具备较高的机械强度，其抗拉强度为 294MPa ，约为纯铝材的 $1.5\sim 2.0$ 倍。但它的电阻率比铝材略高， 20°C 时电阻率为 $0.0328\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ，且耐振性能差，抗化学腐蚀能力和铝材相近，这种材料的导线目前已在推广应用。

铜导线：铜的导电性能很好， 20°C 时电阻率为 $0.0177\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ，机械强度较高，其抗拉强度为 380MPa ，并具有很强的抗氧化和抗腐蚀能力，从导电性能和机械强度等方面看，是理想的导线材料，但是铜是稀有的贵重有色金属，在各方面有广泛用途，架空线路已基本不采用铜导线。

钢导线：钢的导电性能较差，且它的电阻值具有非线性特性， 20°C 时低碳钢电阻率约为 $0.132\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ，差不多是铝材的 5 倍。钢的机械性能好，钢丝的抗拉强度不小于 1310MPa ，约为铝的 10 倍。但是，钢抗氧化、抗腐蚀能力很差。在一般使用场合常进行表面镀锌或采取其他防锈防腐措施。钢导线一般用于大跨越挡等要求导线机械强度很高的场所，也可用作避雷线。

2. 导线的结构和型号规格

架空线路一般都是采用裸导线敷设的。裸导线的结构型式可以分为以下三种：①单股线；②单一金属多股绞线；③复金属多股绞线，由两种金属股线绞成或由两种金属做成复合股线绞成，架空线路导线的各种结构如图 2-2 所示。多股绞线比单股绞线有很多优点，如多股绞线比单股的机械强度高、柔韧性好、可靠性高、导线制造和施工都方便。因而，架空线路特别是高压架空线路一般采用多股绞线，而不使用单股导线。导线结构类型及用途如表 2-1 所示。导线型号由导线的材料、结构和载流部分截面面积两部分组成，前一部分

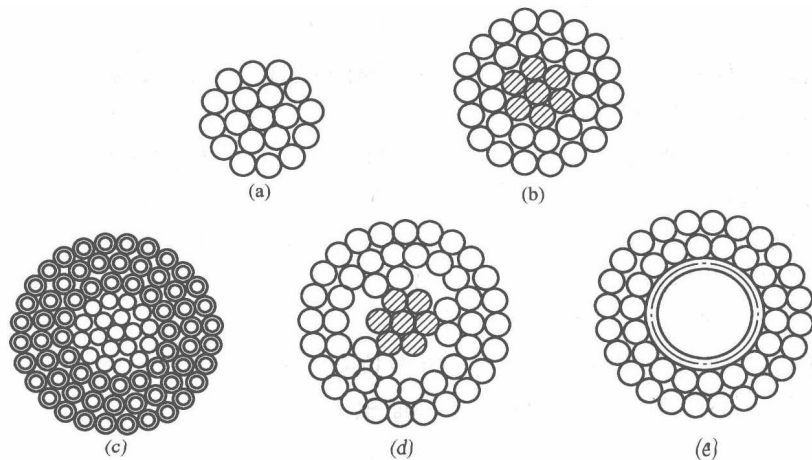


图 2-2 多股绞线、扩径钢芯铝绞线及空芯导线的结构

(a) 单金属多股绞线；(b) 钢芯铝绞线；(c) 钢芯铝包钢绞线；(d) 扩径钢芯铝绞线；(e) 空芯导线

表 2-1 导线的结构种类及选用

导线种类	品 种	型号	导线结构概况	用途及选用原则
硬铝线	铝绞线	LJ	用圆截面多股绞制而成	对 35kV 架空线路, 铝绞线截面面积一般不小于 35mm ² , 对 35kV 以下线路不小于 25mm ²
钢芯铝绞线	钢芯铝绞线 轻型钢芯铝绞线 加强型钢芯铝绞线	LGJ LGJQ LGJJ	内层(或芯线)为单股或多股镀锌钢绞线, 主要承担张力, 外层为单层或多层硬铝绞线, 为主要导电部分	铝钢比在 5 以上的钢芯铝绞线, 用于一般地区; 铝钢比小于 5 的钢芯铝绞线用于重冰区或大跨越地段
防腐型钢芯铝绞线	轻防腐型 中防腐型 重防腐型	LGJF	结构型式及机械、电气性能与普通钢芯铝绞线相同, ①轻防腐型仅在钢芯上涂防腐剂; ②中防腐型仅在钢芯及内层铝线上涂防腐剂; ③重防腐型在钢芯和内外层铝线均涂防腐剂	用于沿海及有腐蚀性气体的地区, ①质量增加 2%; ②及③质量增加 5%
铝合金绞线	铝合金绞线 钢芯铝合金绞线	LH _A J LH _B J LH _A GJ LH _B GJ LH _A GJF ₁ LH _A GJF ₂ LH _B GJF ₁ LH _B GJF ₂	以铝、镁、硅合金控制的圆单线或用多股做成的绞线, 抗拉强度接近铜线, 导电率及质量接近铝线	抗拉强度高, 可减少弧垂, 降低线路造价
铝包钢绞线	铝包钢线	LBGJ	以单股钢线为芯, 外面包铝层, 做成单股及多股绞线	线路大跨越及地线通信使用
扩径导线及空芯导线	扩径导线 及空芯导线		人为地扩大导线外径或者空芯, 但又不增加导线载流部分的截面积, 空芯导线内腔为蛇形管	用于高压和超高压线路, 为了减少电晕以降低损耗和对无线电信号干扰, 在实际工程中使用较少

用汉语拼音第一个字母大写表示: T 表示铜、L 表示铝、J 表示多股绞线或加强、H 表示合金、G 表示钢、B 表示包、F 表示防腐, 拼音字母横线后的数字表示标称截面积 (mm²)。导线的规格是按载流部分的标称面积来区分的。我国常用的标称截面积系列主要有 16、25、35、50、70、95、120、150、185、210、240、300、400、500、630、800mm² 等。例如, 标称截面积为 240mm² 的铝绞线表示为 LJ-240 (GB 1179—1983); 标称截面积为铝 300mm²、钢 50mm² 的钢芯铝绞线表示为 LGJ-300/50 (GB 1179—1983), 括号中的 GB 1179—1983 表示符合中华人民共和国国家标准 1179—1983。常用铝绞线、钢芯铝绞线以及铝合金绞线、钢芯铝合金绞线和铝包钢绞线规格参见附录 B。

3. 导线的机械物理性能

(1) 导线的综合瞬时破坏应力 σ_P 。是指导线拉断破坏时断面上的平均应力, 其数值为导线的综合瞬时破坏拉断力除以导线的综合截面面积, 即

$$\sigma_P = \frac{T_P}{A} \quad (2-1)$$

式中 σ_P ——导线的综合瞬时破坏拉应力, MPa;

T_P ——导线的综合瞬时拉断力, kN;

A ——导线的综合截面面积, mm^2 。

常用导线的综合瞬时拉断力见附录 A。

非标准的钢芯铝绞线, 可用试验来测定它的综合瞬时破坏拉断力, 也可按式 (2-2) 计算导线的拉断力

$$T_P = an_1\sigma_1A_1 + n_g\sigma_{1\%}A_g \quad (2-2)$$

式中 a ——铝线的强度损失系数, 37 股及以下的铝绞线取 0.95, 37 股以上的铝绞线取 0.90, 各种钢绞线取 1.0;

n_1 、 n_g ——分别为铝线和钢线的根数;

A_1 、 A_g ——分别为单根铝线和单根钢线的截面积, mm^2 ;

σ_1 ——铝线绞前抗拉强度最小值, MPa, 国产导线见 GB 3955—1983;

$\sigma_{1\%}$ ——钢丝伸长率为 1% 的应力, MPa, 国产导线见 GB 3428—1982。

(2) 导线的弹性系数 E 。单一材料均匀截面构件在轴向外力 T 的作用下, 产生相应的轴向伸长 Δl , 这时材料的正应力 $\sigma = \frac{T}{A}$ (A 为构件截面积), 相应的材料的轴向相对伸长率 (轴向应变) $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ (l 为构件的初始长度)。根据材料力学中的虎克定律: 单质材料均匀截面杆件, 在轴向外力作用下, 轴向应变和轴向应力成正比, 则有

$$\frac{\epsilon}{\sigma} = \frac{1}{E} \quad \text{或} \quad \sigma = \epsilon E \quad (2-3)$$

于是有

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{Tl}{A\Delta l} \quad (2-4)$$

式中 E ——材料的弹性系数, 亦称弹性模量, MPa。

单一材料制成的导线的弹性系数, 就是材料的弹性系数。标准型复合导线的弹性系数, 可由实验确定, 其数值见附录 A。对非标准型复合导线可用公式计算得出, 下面以钢芯铝绞线为例, 说明其计算方法。

设钢芯铝绞线弹性系数为 E , 综合假想拉应力为 σ_0 , 则根据式 (2-4) 有

$$\sigma_0 = \epsilon E_0$$

设导线截面积为 A , 则作用于导线的外力为

$$T_0 = \sigma_0 A = \epsilon E_0 A$$

设导线截面上铝和钢的截面积分别为 A_1 和 A_g , 铝部和钢部拉应力分别为 σ_1 和 σ_g , 则铝部和钢部所受的总拉力分别为

$$T_1 = \sigma_1 A_1 = \epsilon_1 E_1 A_1$$

$$T_g = \sigma_g A_g = \epsilon_g E_g A_g$$

由于导线在外力作用下铝部和钢部的轴向应变一致, 即导线只能发生一个统一的变形, 因而

$$\epsilon_1 = \epsilon_g = \epsilon$$

并且钢、铝两部作用力之和应等于导线的受外力 T_0 , 即

$$T_g + T_1 = T_0$$

则

$$\epsilon E_g A_g + \epsilon E_1 A_1 = \epsilon E_0 A$$