



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）



普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）

SHUDIAN XIANLU JICHU

输电线路基础

（第三版）

赵先德 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）



普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）

SHUDIAN XIANLU JICHU

输电线路基础

（第三版）

主 编 赵先德
副主编 乐海洪
编 写 戴仁发
主 审 李恒景 后力群



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育），普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

全书共分为七章，主要内容包括输电线路的基本知识、导线应力弧垂分析、导线安装计算、杆塔受力分析、杆塔强度计算、杆塔基础、输电线路路径选择和杆塔定位，较全面地介绍了输电线路设计的基本知识。本书在理论知识够用的前提下，充实了实际应用知识的内容。

本书主要作为高职高专院校、中等职业技术学校相关专业课程的专业教材，也可作为电力行业的培训教材，还可供从事输配电工程设计、运行、管理等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

输电线路基础/赵先德主编. —3版. —北京：中国电力出版社，2011.12

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5123-2561-6

I. ①输... II. ①赵... III. ①输电线路—高等职业教育—教材 IV. ①TM726

中国版本图书馆CIP数据核字（2011）第281741号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006年5月第一版

2012年2月第三版 2012年2月北京第六次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 23印张 564千字

定价 39.80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

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标，符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求，具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学的适应性，符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色，符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学生学历教育教学用书，也可以作为职业资格和岗位技能培训教材。

随着我国电力事业的蓬勃发展，各级电压等级的输电线路不断兴建与竣工。目前，正在运行使用的输、配电线路电压等级已包括了 10、35、66、110、220、330、500、750、1000kV 九个级别，在我国经济建设中已发挥重要的作用。

输电线路工程尤其是超高压和特高压输电线路工程，是国家经济建设的生命线工程。不言而喻，架空输电线路的作用是极其重要的。

本书着重介绍了输电线路导线、杆塔和基础的受力分析方法及基本计算，输电线路路径和杆塔位选定的技术要求，并对导线安装的主要设计图样、杆塔的典型设计和基础的常用规格做了简单介绍。编写的主要依据和参考是现行的 GB 50545—2010《110~750kV 架空输电线路设计规范》、DL/T 5219—2005《架空送电线路基础设计技术规定》、DL/T 5122—2000《500kV 架空送电线路勘测技术规程》和 DL/T 5154—2002《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》，参考了专家编撰的部分专业书籍，并融合作者长期从事工程实践及教学经验的积累。

本书实践性很强，涉及的公式较多，计算量较大。因此，在编写过程中，本书内容坚持“针对性、实用性、适用性”的原则，在理论知识够用的前提下，充实了实际应用知识的内容；在注重讲清基本概念、基本原理、基本方法的同时，尽可能避免繁琐的数学公式推导和大篇幅的理论分析。

本书由江西电力职业技术学院赵先德主编并进行统稿工作，江西电力设计院乐海洪进行验证和校核工作，江西电力职业技术学院戴仁发参与编写。

本书由江西省电力公司超高压分公司李恒景、江西电力职业技术学院后力群主审，提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

本书在编写过程中，还得到了江西电力设计院诸位高级工程师的帮助，在此表示诚挚的谢意。由于编者水平有限，书中内容难免有疏漏或不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2011 年 12 月

目 录

前言

第一章 输电线路的基本知识	1
第一节 输电线路的概述	1
第二节 架空输电线路导线及导线型号	6
第三节 避雷线	14
第四节 输电线路金具	18
第五节 线路绝缘子和绝缘子串	61
第六节 杆塔及杆塔基础	67
第七节 架空输电线路的运行环境及要求	70
第八节 输电线路施工图	78
复习与思考题	81
第二章 导线应力弧垂分析	83
第一节 导线的比载	83
第二节 导线应力的概念及允许应力	87
第三节 悬点等高时导线弧垂、线长和应力的关系	89
第四节 小高差档距中导线弧垂、线长和应力的关系	95
第五节 水平档距和垂直档距	105
第六节 导线的状态方程式	112
第七节 临界档距	115
第八节 最大垂直弧垂气象条件的判定	120
第九节 导线应力、弧垂计算步骤	123
第十节 导线机械特性曲线	125
第十一节 避雷线最大使用应力的确定	129
复习与思考题	135
第三章 导线安装计算	138
第一节 导线的安装曲线	138
第二节 特殊耐张段的安装计算	141
第三节 邻档断线时交叉跨越限距的校验	151
第四节 导线的振动和舞动	155
第五节 特殊情况导线弧垂应力的分析	165
复习与思考题	168
第四章 杆塔受力分析	170
第一节 杆塔的分类与结构形式及用途	170
第二节 杆塔外形尺寸确定	179

第三节	杆塔荷载	190
第四节	杆塔内力计算	208
	复习与思考题	221
第五章	杆塔强度计算	223
第一节	影响电杆强度的因素	223
第二节	环形截面普通钢筋混凝土构件允许荷载的确定	228
第三节	铁塔型式选择和结构要求	236
第四节	铁塔构件内力的计算	244
	复习与思考题	251
第六章	杆塔基础	253
第一节	概述	253
第二节	基础的上拔计算	261
第三节	基础的下压计算	274
第四节	倾覆类基础的计算	279
	复习与思考题	288
第七章	输电线路路径选择和杆塔定位	290
第一节	输电线路的路径选择	290
第二节	输电线路杆塔定位及有关规定	297
第三节	施工图设计阶段测量	306
第四节	3S 技术在输电线路勘测中的应用	327
	复习与思考题	335
附录		337
附录 A	产品型号与 IEC 代号对照表	337
附录 B	架空导线和钢绞线的规格和性能 (GB/T 1179—2008)	337
附录 C	镀锌钢绞线的规格与力学性能	349
附录 D	架空导线的弹性系数、线膨胀系数	352
附录 E	GB/T 7253—2005 标准与 GB/T 7253—1987 和 JB 9681—1999 典型盘形悬式绝缘子串元件型号对照	354
附录 F	我国部分地区大风时的空气密度 ρ	355
附录 G	导线力学计算公式	356
附录 H	承载力特征值	358
附录 I	混凝土及钢材强度	360
参考文献		361

第一章 输电线路的基本知识

第一节 输电线路的概述

电能是能量的一种表现形式。电能在现代社会里已成为国民经济发展和提高人民生活水平必不可少的二次能源。

电能有许多优点：首先，它可简便地转换为另一种形式的能量，满足人们的各种需求。例如，工厂里的电动机，就是将电能转换成机械能，推动各种机械设备；人们常用的电灯，是将电能转换成光能；空调、冰箱是将电能转换成冷、热能等。其次，电能经过高压输电线路，还可输送很长的距离，供给远方用电。电厂大部分建在动力资源所在地。例如，水力发电厂建在水力资源点，即集中在江河流域水位落差大的地方；火力发电厂大都集中在煤炭、石油和其他热源的产地；风力发电厂建在风力能量集中的偏僻旷野或海上。而大电力负荷中心，则多集中在工业区和城市。因而发电厂和负荷中心间往往相距很远，从而发生了电能输送的问题，产生了承担这一输送任务的输电线路。最后，电能与其他能源不同，它不能大规模储存。

输电线路是电力系统中实现电能远距离传输的一个重要环节，它包括架空线路和电缆线路。其任务是输送电能，是电力系统的动脉，其架设、运行状态直接决定电力系统的安全和效益。

一、电力系统组成和输电线路的分类

（一）电力系统组成

电力系统主要由五部分组成，即发电厂的发电机与升压变电站、输电线路、降压变电站、配电系统和用户，如图 1-1 所示。

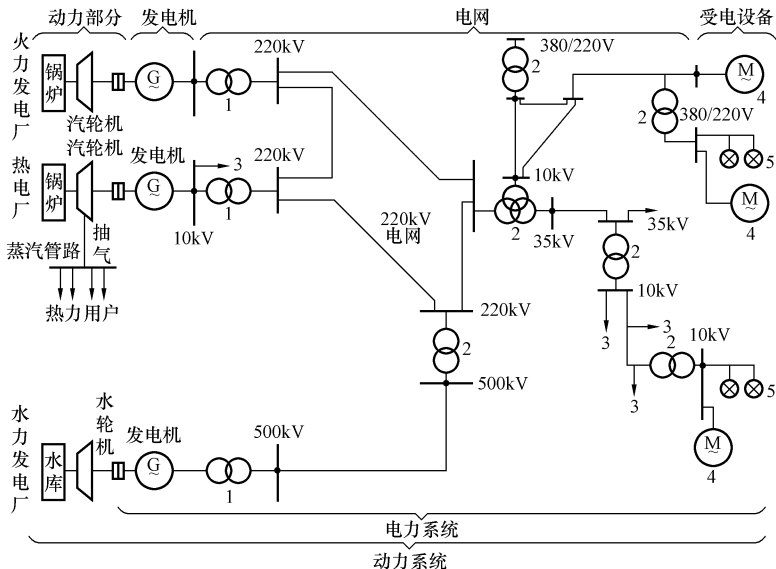


图 1-1 电力系统和电网示意图

1—升压变压器；2—降压变压器；3—负荷；4—电动机；5—电灯

发电厂的发电机所转换出的电能, 经过升压变压器、输电线路送到降压变电站降压后, 送到配电系统, 再由配电线路把电能分配到各用户, 这样一个整体称为电力系统。电力系统中除发电机和用电设备外的部分, 即输变电设备及各种不同电压等级的输电线路所组成的部分, 称为电力网, 简称电网。电力系统中再加上发电厂的动力部分所组成的整体, 称为动力系统。

1. 发电厂

发电厂的基本任务是把其他形式的能量转变为电能。发电厂按所用能量的不同, 可分为水力发电厂、火力发电厂和原子能发电厂, 另外还有太阳能、风力、地热、潮汐和沼气发电厂等。目前, 我国已形成的大型电力系统中, 主要以火力发电厂为主。发电厂的主要设备有发电机、汽轮机、水轮机和锅炉等。

2. 变电站

变电站(所)是转换和分配电能的场所。发电厂发出的电能通过升压变电站升压后由输电线路输出, 降压变电站(所)则将线路输送来的电能降压后分配至配电系统。变电站(所)主要由升(降)压变压器、断路器、互感器及二次设备构成。

3. 输电线路

输电线路是电力网的重要组成部分。交流输电线路的三相导线分别与两端变压器的三个绕组连接, 每相导线分别用字母 A、B、C 表示(或以黄、绿、红三种颜色表示), 线路每三相称为一回路或单回路。输电线路与换流站正、负极相连接, 并输送到另一个换流站的输电线路称为直流输电线路。总之, 将发电厂发出的电力输送到消费电能的地区(也称负荷中心), 或进行相邻电网之间的电力互送, 使其形成互联电网或统一电网, 保持发电和用电或两电网之间供需平衡的线路, 称为输电线路。

为减少电能输送过程中的损耗, 根据输送距离和输送容量的大小, 输电线路采用各种不同的电压等级。目前, 我国采用的各种不同电压等级有 35、66、110、220、330、500、750、1000kV。在我国, 通常称 35~220kV 的线路为高压输电线路, 330~750kV 的线路称为超高压输电线路, 交流 1000kV、直流 ± 800 kV 及以上电压等级的线路称为特高压输电线路。

特高压输电包括特高压交流输电和特高压直流输电两种形式。特高压输电中, 交流为 1000kV, 直流为 ± 800 kV。根据我国未来电力流向和负荷中心分布的特点, 以及特高压交流输电和特高压直流输电的特点, 在我国特高压电网建设中, 将以 1000kV 交流特高压输电为主形成国家特高压骨干网架, 以实现各大区域电网的同步强联网; ± 800 kV 特高压直流输电, 则主要用于远距离、中间无落点、无电压支持的大功率输电工程。

特高压电网的系统特性主要反映在技术特点、输电能力和稳定性三个方面。1000kV 交流输电中间可落点, 输电容量大, 覆盖范围广, 节省线路走廊, 有功功率损耗与输送功率的比值小; 1000kV 交流输电的能力取决于各线路两端的短路容量比和输电线路距离, 输电稳定性取决于运行点的功角大小。 ± 800 kV 直流输电中间不落点, 可将大量电力直送大负荷中心, 输电容量大, 输电距离长, 节省线路走廊, 有功功率损耗与输送功率的比值较大。

4. 配电系统

配电的功能是在消费电能的地区接受输电网受端的电力, 然后进行再分配, 输送到城市、郊区、乡镇和农村, 并进一步分配和供给工业、农业、商业、居民以及特殊需要的用电

部门。担负分配电能任务的线路，称为配电线路。我国配电线路的电压等级有 380/220V、6、10、35、110、220kV，其中把 1kV 以下的线路称为低压配电线路，1~10kV 线路称为高压配电线路。

5. 用户

用户是指在供电企业管辖范围分界点以内的工矿企事业单位和居民，包括属用户所有的变电站、线路和各种用电设备。

(二) 输电线路的分类

1. 输电线路按结构分类

输电线路按结构不同可分为电缆线路和架空输电线路。架空输电线路（或称架空线路）和电缆线路相比，具有投资省、易于发现故障以及便于维修等特点。电缆线路不易受雷击、自然灾害及外力破坏，供电可靠性高，不影响城市美观，故在城网建设中的使用越来越多，但电缆的制造、施工、检查和处理事故较困难，工程造价也较高。架空线路显著的优点包括结构简单、施工周期短、建设费用低、技术要求低、检修维护方便和输送容量大等，因此远距离输电线路多采用架空输电线路。本书只介绍高压架空输电线路的基础知识。

2. 输电线路按电流性质分类

架空输电线路按电流性质不同又可分为交流输电线路和直流输电线路。交流电的电压、电流大小及方向随时间按正弦波变化。采用交流电是为了使发电机、变压器、电动机等具有高的能量转换效率，降低它们的制造成本。目前，电力系统绝大多数采用三相交流输电，随着交流输电容量的增大、线路距离的增长以及电网的复杂化，使系统稳定性问题日益突出。另外，高电压远距离交流输电线路感抗、容抗所引起的电压变化，需要装设大量的补偿设备，以解决无功补偿、稳定性、操作过电压等一系列问题。这就使得操作运行复杂化，投资增大。

直流电的电压、电流大小及方向不随时间变化。高压远距离直流输电线路不存在感抗、容抗的问题，与交流输电线路相比有着显著的优点，现在世界上已有许多条高压直流输电线路在运行。我国±500kV 直流输电线路已广泛运用在三峡电站外送、跨区域联网等项目中，目前正在建设±800kV 和±600kV 直流输电项目。

(1) 直流输电的基本原理。图 1-2 所示为一个最简单的直流输电系统，其中包括直流输电线路和两个换流站。两个换流站的直流端，分别接在直流输电线路的两端，交流端分别连接两个交流系统。换流站装有换流器，它的功用是实现交流电和直流电之间的转换。

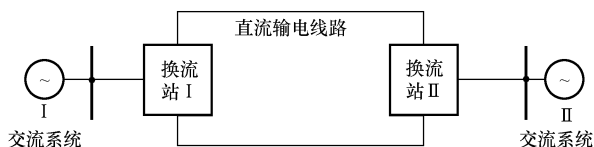


图 1-2 直流输电系统原理图

从交流系统 I 向交流系统 II 输电时，换流站 I 把交流系统 I（送电端）的三相交流电流转换成直流电流，通过直流输电线路送到换流站 II，换流站 II 再把直流电流转换成三相交流电流送入交流系统 II。由交流电转换成直流电和由直流电转换成交流电的过程分别称为整流和逆变。也就是说，在送端需将交流电转换成直流电（称为整流），而在受端又必须将直流电转换为交流电（称为逆变），然后才能送到受端交流系统中去。送端进行整流的场所称为整流站，受端进行逆变的场所称为逆变站，整流站和逆变站可统称为换流站。实现整流和逆变转换的装置分别称为整流器和逆变器，它们统称为换流器。

(2) 直、交流输电比较。高压直流输电方式与高压交流输电方式相比,有明显的优越性。历史上仅仅由于技术的原因,才使得交流输电代替了直流输电。下面先就交流电和直流电的主要优缺点作出比较,从而说明它们各自在应用中的价值。

交流电的优点主要表现在发电和配电方面:利用建立在电磁感应原理基础上的交流发电机可以很经济方便地把机械能(水能、风能……)、化学能(石油、天然气……)等其他形式的能转化为电能;交流电源和交流变电站与同功率的直流电源和直流换流站相比,造价大为低廉;交流电可以方便地通过变压器升压和降压,这给配送电能带来极大的方便,这是交流电与直流电相比所具有的独特优势。

(3) 直流电在输电方面的主要优点如下:

1) 输送相同功率时,线路造价低。对于架空线路,交流输电通常采用3根导线,而直流单极只需1根,直流输电双极只需2根。对于电缆线路,直流输电的投资费用和运行费用都更为经济,这也是越来越多的大城市采用地下直流电缆线路的原因。

直流输电采用两线制,以大地或海水作回线,与采用三线制三相交流输电相比,在输电线截面积相同和电流密度相同的条件下,即使不考虑集肤效应,也可以输送相同的电功率,而输电线和绝缘材料可节约 $1/3$ 。

如果考虑到集肤效应和各种损耗(绝缘材料的介质损耗、磁感应的涡流损耗、架空线路的电晕损耗等),输送同样功率交流电所用导线截面积大于或等于直流输电所用导线截面积的1.33倍。因此,直流输电所用的线材几乎只有交流输电的一半。同时,直流输电杆塔结构也比同容量的三相交流输电杆塔结构简单,其线路走廊占地面积也少。

2) 在电缆输电线路中,直流输电线路没有电容电流产生,而交流输电线路存在电容电流,引起损耗。在一些特殊场合,必须用电缆线路输电。例如,高压输电线路经过大城市时,采用地下电缆线路;输电线路经过海峡时,要用海底电缆线路。如果用交流输电方式,除了有芯线的电阻损耗外,还有绝缘中的介质损耗以及铅包和铠装中的磁感应损耗等;而用直流输电方式,则基本上只有芯线的电阻损耗。

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,空载电容电流极为可观。一条200kV的电缆,每千米的电容约为 $0.2\mu\text{F}$,每千米需供给充电功率约 $3 \times 103\text{kW}$,在每千米输电线路,每年就要耗电 $2.6 \times 10^7\text{kW} \cdot \text{h}$ 。而在直流输电中,由于电压波动很小,基本上没有电容电流加在电缆上。

3) 直流输电时,其两侧交流系统不需同步运行,而交流输电必须同步运行。交流远距离输电时,电流的相位在交流输电系统的两端会产生显著的相位差;联网的各系统交流电的频率虽然规定统一为50Hz,但是实际上常产生波动。这两种因素引起交流系统不能同步运行,需要用复杂庞大的补偿系统和综合性很强的技术加以调整,否则就可能在设备中形成强大的循环电流而损坏设备,或造成不同步运行的停电事故。在技术不发达的国家,交流输电距离一般不超过300km;而直流输电线路实现电网互联时,其两端的交流电网可以用各自的频率和相位运行,不需进行同步调整。

4) 直流输电发生故障的损失比交流输电的小。两个交流系统若用交流线路互联,则当一侧系统发生短路时,另一侧要向故障一侧输送短路电流,因此使两侧系统原有断路器切断短路电流的能力受到威胁,需要更换断路器。而在直流输电中,由于采用晶闸管装置,电路功率能迅速、方便地进行调节,直流输电线路基本上不向发生短路的交流系

统输送短路电流，故障侧交流系统的短路电流与没有互联时一样，因此，不必更换两侧原有断路器及载流设备。

在直流输电线路中，各级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。但在交流输电线路中，任一相发生永久性故障，必须全线停电。

线路有功损耗小。直流线路没有感抗和容抗，也就没有无功损耗。而且由于直流架空线路具有“空间电荷”效应，即集肤效应，其电晕损耗和无线电干扰均比交流架空线路的要小。

另外提醒一下，在直流输电系统中，只有输电环节是直流电，发电系统和用电系统仍然是交流电。

直流输电的主要特点与其两端需要换流以及输送的是直流电这两个基本点有关。直流输电的发展与换流技术的发展特别是大功率电力电子技术的发展，有着密切的关系。目前绝大多数直流输电工程采用晶闸管换流，今后随着新型电力电子器件（如 IGBT、IGCT、碳化硅器件等）在直流输电中的应用将会明显地改善直流输电的运行性能。

二、架空输电线路的结构

为保证输电线路带电导线与地面之间保持一定距离，必须用杆塔来支撑导线，如图 1-3 所示。相邻两基杆塔中心线之间的水平距离 l 称为档距。相邻两基承力杆塔之间的几个档距组成一个耐张段，如图中 5 号~9 号杆塔为一个耐张段，该耐张段由四个档距组成。如果耐张段中只有一个档距则称为孤立档，如图中 9 号和 10 号杆塔之间。一条输电线路总是由多个耐张段组成的，其中包括孤立档。

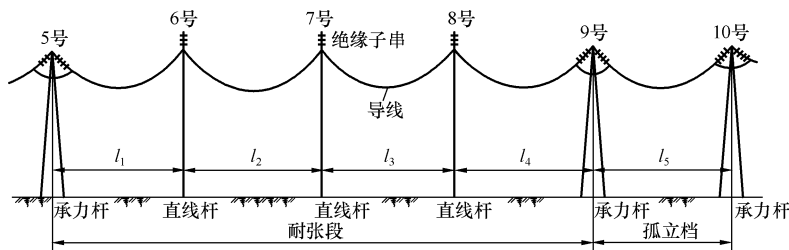


图 1-3 输电线路的组成

架空输电线路杆塔的组成元件主要有导线、避雷线、金具、绝缘子、杆塔、拉线和基础，如图 1-4 所示。

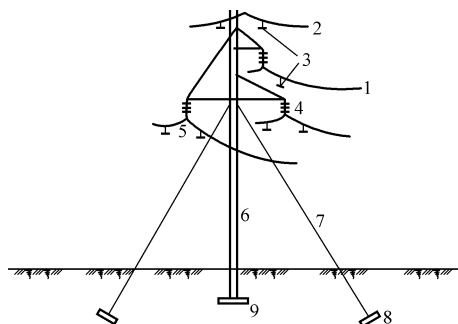


图 1-4 输电线路杆塔的组成元件

1—导线；2—避雷线；3—防振锤；4—绝缘子；5—线夹；
6—杆塔；7—拉线；8—拉线盘；9—底盘

第二节 架空输电线路导线及导线型号

一、架空输电线路导线

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、电视等信号的干扰，多采用相分裂导线，即每相采用两根、三根、四根或更多根导线。我国第一条 330kV 刘家峡水电厂一天水一关中超高压输电线路采用了双分裂导线。我国第一条 750kV 青海官亭—甘肃兰州东的超高压输电线路采用的是六分裂导线。我国第一条晋东南—南阳—荆门 1000kV 输电线路示范工程采用 $8 \times \text{LGJ-500/35}$ 型钢芯铝绞线，猕猴保护区拟采用 $8 \times \text{LGJ-630/45}$ 型或扩径导线方案。目前，我国在 500kV 输电线路中推荐采用四分裂导线。

导线按材料性质可分铜线、铝线、铝合金线、铝包钢线、铜包钢线和钢线等。架空输电线路经常使用的多股绞线是用上述材料扭绞制成的绞线，如铜绞线、铝绞线、钢绞线、铝合金绞线、铝包钢绞线、铜包钢绞线及不同材料构成的复合绞线，如钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线、钢芯铝包钢绞线、钢芯铜包钢绞线及光纤复合钢铝混绞线等。下面介绍上述导线材料制成的单股和多股导线的性能和用途。

(一) 铜线、青铜线和铜包钢线

1. 铜线

在各种导电金属中，铜是仅次于银的良好导体。软铜的电阻率在各种铜材中最低，在 20°C 时的直流电阻率为 $0.017\ 241\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；其电导率为 $58.0\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$ ，常将此定为 100% IACS (软铜相对电导率)，以衡量其他线材的相对电导率。硬拉铜线电导率为 97% IACS，但比软铜的抗拉强度高，远比铝、钢线材的抗腐蚀性能好，早期广泛应用于架空输电线路（如我国东北早期建设的线路）。随着工业的发展，铜在其他方面有着不可代替的需求，促使其价格上升。从线路建设与传输的整体经济性考虑，现已广泛用铝线和钢芯铝绞线替代了纯铜绞线，仅在发电、变电设备的连接中采用抗拉强度较低的软铜绞线。

2. 青铜线

青铜线也称铜合金线，根据所含少量其他金属的成分不同又分镉青铜线、磷青铜线以及铍青铜线等。其特点是抗拉强度高，主要用于重要大跨越档内。

3. 铜包钢线

为了充分利用铜的良好导电性，同时又要增大其抗拉强度，可在钢丝的表面熔镀上一层铜导体，制成铜包钢线，其绞线常用于重要大跨越档内，我国东北跨越松花江线路的个别大跨越档中就采用过这种导线。

硬铜线、青铜线、铜包钢线单股化学成分及材料性能示于表 1-1 中。

表 1-1 铜类电线单股化学成分及材料性能

线材名称	化学成分	20℃时的直流电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	20℃时的直流电导率 (%IACS)	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (MPa)	弹性系数 (MPa)	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)
硬铜线	Cu-1 号铜，含铜 ≥ 0.995 ，杂质锡、铍、铁、锌等 ≤ 0.005	0.017 77	97	8.94	390	128 000	17.0

续表

线材名称	化学成分	20℃时的直流电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	20℃时的直流电导率 (%IACS)	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (MPa)	弹性系数 (MPa)	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}/\text{C}$)
青铜线	Cu-1号铜分别加入适量的镉、磷、铍等	0.02~0.05	80~35	8.94	700~1000	128 000	18.0
铜包钢线	优质碳素钢丝外包Cu-1号铜	0.028~0.046	60~40	8.1~8.5	600~900		

(二) 硬铝线、铝合金线及铝包钢线

1. 硬铝线

铝也是良好的导体，软铝电导率约为软铜的62%。由于铝的密度比铜的小且价格低廉，从总的输电经济性看铝优于铜，从而得到广泛应用。架空输电线路中采用的导线均是硬拉铝线，虽然其抗拉强度高于软铝线，但是纯铝绞线仍仅适用于小档距的低压配电线路中。对于较大档距的高压线路，常使用抗拉强度较高的钢芯铝绞线。

另外，电线制造标准中规定硬铝线的电阻率不得大于 $0.028\ 264\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ （即电导率不小于61%IACS）。我国生产的铝材由于含硅杂质较高，即使采用AL ∞ 特一级高纯度电工铝材，若不再进行纯化，其电导率也难以达到要求。目前广泛采用AL ∞ 或AL0铝加入少量稀土元素（Re），可以除去铝中的非金属杂质、细化晶粒，使其电阻率降至软铝的水平（ $0.028\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ），同时也改善了铝的机械和抗腐蚀性能。这种铝线常称为稀土铝线，符合我国硬铝线标准。

2. 铝合金线

为提高铝线的抗拉强度，在纯铝（如国产AL ∞ 或AL0）中加入少量的镁、硅元素或镁、硅、稀土元素，经特殊热处理制成铝、镁、硅或铝、镁、硅、稀土合金线。用这种铝合金单丝可绞制成纯铝合金绞线、钢芯铝合金绞线和光纤复合架空地线（OPGW）等。

普通铝及铝合金线的长期容许线温规定为70℃。为了增加载流量、提高线温，同时又不使其抗拉强度下降，在铝中加入少量锆（Zr）和稀土元素，可将铝合金的再结晶温度提高到300℃以上，并能使晶粒细化，依此法生产出的耐热铝合金线，其电导率和抗拉强度与硬铝线的相近，但线温可提高到150~230℃。目前国外广泛采用这种铝合金线绞成的耐热钢芯铝绞线，以增大输送容量。

3. 包钢线

在钢丝表面包一层纯铝，在铝处于半熔状态时压铸冷拔形成不同铝层厚度的具有高抗拉强度、良导电性能的铝包钢丝。常用此法制成铝包钢绞线、铝包钢芯铝绞线或铝包钢芯铝合金绞线和OPGW线中加强机械强度的导体。

铝线类单丝的化学成分及材料性能如表1-2中所示。

表 1-2 硬铝线、铝合金线和铝包钢线单丝化学成分及材料性能

线材名称	化学成分	20℃时的直流电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	20℃时的直流电导率 (%IACS)	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (MPa)	破断时的延伸率 (%)	弹性系数 (MPa)	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}/\text{C}$)
硬铝线	AL ∞ 或AL0号铝再净化，使杂质含量：铁 $\leq 0.2\%$ 、硅 $\leq 0.08\%$ 、铜 $\leq 0.01\%$	0.028 264	61	2.7	160~190	1.5~2.0	61 800	23.0

续表

线材名称	化学成分	20℃时的直流电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	20℃时的直流电导率 (%IACS)	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (MPa)	破断时的延伸率 (%)	弹性系数 (MPa)	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}/\text{C}$)
铝镁硅高强度铝合金线	AL ∞ 或AL0加镁约0.6%、硅约0.6%或另加稀土元素约0.1%	0.0328	52.5	2.7	294	4.0	63 700	23.0
铝包钢线	优质碳素钢丝表面包8%~25%铝包钢线标称半径厚的纯铝层	0.085~0.043	20~40	6.6~4.5	1340~680	1.5 (铝层)		

(三) 钢线

钢线的导电性能很差且随交流电流的增大而下降, 抗腐蚀性能也较差, 但其抗拉强度高且价格低廉。用低碳钢制成的镀锌低强度软钢线(常称镀锌铁线)可用于农村小负荷配电线路的导线, 其电导率为13%IACS。硬拉高碳钢线抗拉强度很高, 其电导率更低, 其镀锌钢丝可制成镀锌钢绞线用作架空地线, 也曾用双绞结构大截面的镀锌钢绞线作为大跨越导线。

钢线的化学成分及材料性能列于表1-3中。

表 1-3 钢线的化学成分及材料性能

线材名称	化学成分	20℃时的直流电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	20℃时的直流电导率 (%IACS)	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (MPa)	破断时的延伸率 (%)	弹性系数 (MPa)	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}/\text{C}$)
软钢线	低碳素钢	0.133	13.0	7.80	600~700	≥ 4	196 000	12.0
硬钢线	高碳素钢	0.1916	9.0	7.80	1200~1600	2~4	196 000	12.0

影响线材性能的因素分为以下两个:

(1) 线材纯度。线材的纯度对其性能影响很大, 纯度低会使其电导率下降。铝线材的纯度低时, 其杂质又会破坏表面的氧化膜而加速电化和化学腐蚀。钢最易受腐蚀, 因此钢线必须表面镀锌防腐, 而钢线中若含硫、磷、铬等杂质多时会使材料变脆、变硬且难以牢固镀锌。

(2) 线材的电阻率。当线材构成的绞线流过交流电且线温高于20℃时, 其平均电阻率要比表1-1~表1-3中所列的直流电阻率增大。当通过交流电流时, 由于集肤作用使电流密度不均, 相当于有效截面减少而使电阻增大。特别是钢线磁性材料, 集肤效应中涉及的磁导率 μ 又是电流的函数, 因此钢线的电阻又与交流电流有关。当用线材单丝构成绞线时, 因其层股长度比较后的轴向长度增大, 也使平均电阻率(或电阻)变大。冷拔后的硬线材比软线材电阻率增大。

(四) 多股线

导线从结构上分为单股线 and 多股线。多股线分为多股实芯绞线、扩径绞线、自阻尼型绞线和紧缩型绞线等。

1. 多股实芯绞线

多股实芯绞线广泛应用于输电线路, 如铝(或铝合金)绞线、钢绞线和钢芯铝绞线等。多股绞线同截面的单股线相比, 柔性好、易弯曲, 从而可减轻因曲折或振动所产生的

弯曲应力，各股强度上的缺陷点不会集中于同一断面，使整体强度保持均匀。

绞线的扭绞方式通常用同心分层扭绞（单绞），相邻层间扭绞方向相反，如图 1-5 (a) 所示。当股丝数目特别多时，为提高结构的稳定性和电线柔性，有时将电线做成双绞，即由许多按单绞构成的线束，再按单绞制成整条电线，如图 1-5 (b) 所示。著名的意大利 Messina 海峡 3650m 的大跨越导线就是采用这种双绞结构。

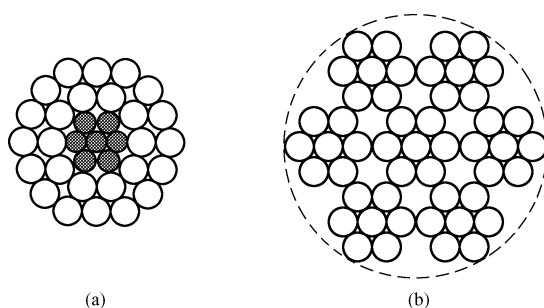


图 1-5 单绞和双绞实芯绞线截面外形图

(a) 单绞；(b) 双绞

2. 扩径绞线

所谓扩径绞线，就是在相同的导电截面下所构成的绞线外径比实芯绞线的外径增大的导线。这种绞线又分空芯型、支撑芯型、填充型和层间支撑型等多种。其用途主要为增大导线外径，以减少高压线路和变电站母线的电晕和无线电干扰。在 20 世纪初、中期美国的高压线路上常采用扩径导线，我国在 330kV 高海拔地区线路上和变电站母线上也采用过扩径导线。

(1) 空芯型导线。空芯型导线的外形图如图 1-6 所示。它的每股导体制成带扣的拱形断面，各股相扣连而成圆管形并扭绞制成。为保证扣连的强度和抗拉要求，该导线需用铜材加工，其加工制造工艺复杂，使其难以广泛应用。

(2) 工形支撑芯型导线。该种导线的截面外形图如图 1-7 所示。支撑芯架通常用“工”形或“U”形铜或铝材料拧成螺旋管作为非受力绕线支架，其上的内层绕钢线股，外层依次绕铝线股。国内生产厂也有用镀锌金属软管作支撑的扩径绞线，用于电厂或变电站的母线上。

(3) 填充型导线。该种线芯为钢绞线，外面绕两层浸渍过、不水溶的细纸绳或塑料绳，其中每层混入两股铝线以保证横断面的稳定性，较外层或表面层缠绕铝股。其截面外形图同实芯绞线，如图 1-5 (a) 所示。

(4) 层间支撑型导线。该种导线与填充型相似，只是不加填充料，而是在钢芯与铝股层间缠绕 1~2 层每层 4 根（或更多）的拱形或圆形铝线股作支撑层，外面再密布铝线股，其截面外形图如图 1-8 所示。国内高海拔地区、部分 330kV 线路上曾采用过这种单层拱形支撑型扩径导线。

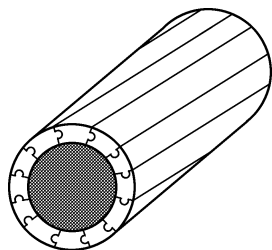


图 1-6 空芯型导线外形图

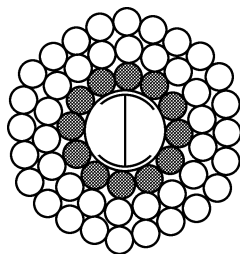


图 1-7 工形支撑芯导线截面外形图

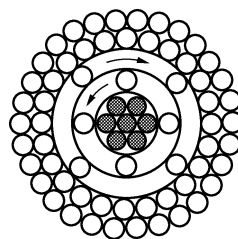


图 1-8 层间支撑型导线截面外形图

3. 自阻尼型导线

从防振的目的出发, 专门制造的一种对微风振动有很大阻尼作用的导线, 称自阻尼型导线, 又称防振导线。加拿大、挪威等国已使用, 认为使用它可以提高运行应力而不必加防振措施, 已引起各国的重视。

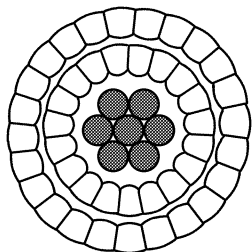


图 1-9 自阻尼型导线
截面外形图

其阻尼作用为一般绞线的 3~15 倍, 因此可以不必采取其他防振措施, 并可提高导线的平均运行应力, 常用于线路大跨越档。

自阻尼型导线的结构有多种, 常用的结构形式 (国内生产的) 是在铝线层之间及铝线层与钢芯之间保持 0.3~3mm 的间隙, 铝线股呈拱形断面以保持层体和间隙的稳定性。其截面外形图如图 1-9 所示。它利用各层的固有频率不同, 振动时产生动态干扰和层间的摩擦、碰击耗能, 起到消振作用。

其他形式的自阻尼型导线多是在股层间介入软金属或高滞后作用的非金属材料, 以提高自阻尼作用。

另外, 国内外新兴一种小弧垂钢芯铝绞线, 其中钢芯采用高强度钢丝, 铝股采用软态或半硬态铝线, 架线时预加较大张力拉出铝股使之塑性伸长、松弛, 架线后铝股基本不受张力。因此, 它能消耗较多振动能量, 并提高铝股的耐振性能; 同时可提高线温, 增加传输容量。

4. 紧缩型导线

紧缩型导线是将圆线同心绞线通过特殊的模压而成。其使外层线股挤成扇状, 整根导线有一光滑的圆柱形表面。经压缩减小了空隙和外径, 不仅使风、冰荷载减少, 还有利于阻止导线的舞动, 但易产生微风振动。其截面外形图如图 1-10 所示。

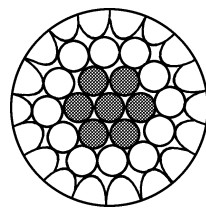


图 1-10 紧缩型导线
截面外形图

国外生产的铝合金线, 机电性能良好。如日本生产的 1 号铝合金线抗拉强度为 308.7MPa, 美国生产的 6201 铝合金线抗拉强度为 313.6~333.2MPa, 均大于我国生产的钢芯铝绞线的抗拉强度。

国外大跨越档中, 要求导线具有特高抗拉强度, 采用过硅铜线、镀锌钢线、铝包钢线等; 线路经过海边及污秽地区, 为提高导线的抗腐蚀能力, 延长使用寿命, 制造了各种防腐蚀导线, 例如镀铝钢线、钢芯涂防腐油等。北欧一些国家生产钢芯铝绞线时, 钢芯就涂以凡士林进行防腐蚀保护。意大利跨越麦西拿海峡的导线涂有防腐剂。美国用镀铝钢线作导线钢芯。

5. 光滑导线

光滑导线的外径较普通导线略小, 可减少导线承受的风和冰荷载; 表面光滑可减少导线舞动现象。因而在欧洲、美国、日本都已得到应用。

6. 分裂导线

分裂导线一般每相两根为水平排列、三根为正三角形或两上一下倒三角形排列、四根为正方形排列、六根为鼓形排列、八分裂圆形排列, 如图 1-11 所示。

分裂导线在超高压线路得到广泛使用。它除具有表面电位梯度小、临界电晕电压高的特性外, 还有以下优点: 单位电抗小, 其电气效果与缩短线路长度相同; 单位导纳大, 等于增

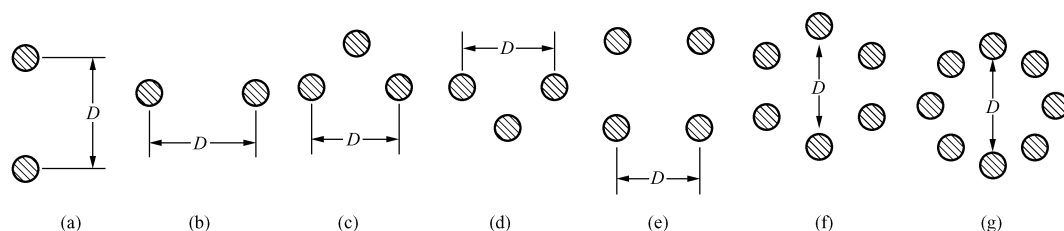


图 1-11 分裂导线示意图

(a) 双分裂垂直排列；(b) 双分裂水平排列；(c) 三分裂正三角形排列；(d) 三分裂倒三角形排列；
(e) 四分裂正方形排列；(f) 六分裂鼓形排列；(g) 八分裂圆形排列

加了无功补偿；用普通标号导线组成，制造较方便。分裂导线装间隔棒可减少导线振动，实测表明双分裂导线比单根导线减小振幅 50%，减少振动次数 20%，四、六、八分裂导线减少得更大。

(五) 常见的导线种类、用途以及选用原则（见表 1-4）

表 1-4 导线的种类、用途及选用原则

线材名称	品 种	型号	导线结构概况	用途及选用原则
硬铝线	硬圆铝单线		用硬拉铝制成的单股线	输电线路不许使用
	铝绞线	JL	用圆铝单线多股绞制的统线	对 35kV 架空线路铝绞线截面积不小于 35mm ² ，对 35kV 以下线路其截面积不小于 25mm ²
钢芯铝绞线	铝钢截面比 $m=1.7\sim 21$	JL/G1A	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，为导电部分	对普通强度钢芯，铝钢截面比 m 在 12 以上的常称特轻型，用于变电站母线及小档距低压线路。 m 在 6.5~12 的常称轻型，用于一般平丘地区的高压线路。 m 在 5~6.5 的常称正常型，用于山区及大档距线路。 m 在 4~5.0 的常称加强型，用于重冰区及大跨越地段。 m 在 1.72 以下的常称特强型，多作为良导体架空地线。另有钢芯稀土铝绞线 LXGJ，与 LGJ 型结构尺寸相同，其电导率、延伸率、耐腐蚀性优于 LGJ 型
防腐型钢芯铝绞线	轻防腐 中防腐 重防腐	JL/G1AF	结构形式及机械、电气性能与普通钢芯铝绞线相同 轻防腐型——仅在钢芯上涂防腐剂 中防腐型——仅在钢芯及内层铝线上涂防腐剂 室防腐型——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