

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



JIAKONG SHUDIAN
XIANLU SHEJI

架空输电 线路设计

孟遂民 孔 伟 编著

3-43



中国电力出版社

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

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI

JIAKONG SHUDIAN
XIANLU SHEJI

架空输电 线路设计

编著 孟遂民 孔 伟
主审 刘观起



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书共分十二章，主要内容包括架空输电线路基本知识、设计用气象条件、架空线的机械物理特性和比载、均布荷载下架空线的计算、气象条件变化时架空线的计算、均布荷载下架空线计算的进一步研究、非均布荷载下架空线的计算、连续档架空线的应力和弧垂、架空线的断线张力和不平衡张力、架空线的振动和防振、路径选择和杆塔定位、计算机在线路设计中的应用。

本书主要介绍了架空输电线路设计方面的有关知识，重点阐述了考虑刚度影响、滑轮悬挂等特殊情况架空线的计算，还介绍了优化换位方式、紧凑型线路以及输电线路 CAD 等方面的最新成果。

本书可作为高等学校相关专业课程的教材，也可供从事输电线路设计、运行、检修等有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

架空输电线路设计/孟遂民等编著. —北京: 中国电力出版社, 2007. 8

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5913 - 7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 103183 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 419 千字
印数 0001—3000 册 定价 27.60 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

为贯彻落实教育部《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改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书介绍了架空输电线路设计方面的有关知识和优化换位方式、紧凑型输电线路等内容,重点阐述了考虑刚度影响、滑轮悬挂等特殊情况下的架空线计算问题,对输电线路CAD也作了比较深入的讨论。相关内容曾作为教学讲义在三峡大学、东北电力大学、南京工程学院等学校使用多年,本次出版按照最新国家有关标准和有关研究成果进行了修订。

全书共分十二章。第一章介绍输电线路的基本知识、各组成部分的选用,架空线的排列方式、换位及其优化,紧凑型输电线路以及线路设计的一般内容和步骤。第二、三章介绍线路设计用气象条件和架空线的机械物理特性、安全系数的选取、比载的计算。第四章重点导出均布荷载下的架空线悬链线形式的有关公式,并以此为基础,导出了斜抛物线形式的有关公式,分析了斜抛物线和平抛物线形式有关公式的误差。第五章讲述架空线的状态方程式、临界档距和控制气象条件,研究作图法和列表法判定有效临界档距的原理和方法。第六章对均布荷载下架空线的计算进一步研究,论述刚性架空线的有关计算,给出架空线刚度的测试方法,论述架空线的初伸长及其与时间的关系,介绍常用的初伸长补偿方法,过牵引现象及其计算,水平档距和垂直档距,极大档距和允许档距以及极限档距,研究确定架空线放松系数的方法。第七章研究非均布荷载作用下的架空线计算问题,给出耐张串的比载、水平投影和垂直投影长度的计算公式,分析孤立档施工观测和竣工弧垂的计算特点,讲述判定孤立档控制条件的方法。第八章研究连续档架空线的有关计算,讲述代表档距法和精确算法,并就滑轮悬挂架空线的情况进行比较深入的分析研究,论述连续档架空地线应力的选配方法以及连续倾斜档的架线观测弧垂及线长的调整。第九章研究架空线的断线张力和不平衡张力,给出校验跨越限距时断线档的选取原则,讲述求解断线张力的解析法、图解法以及地线支持力的计算,介绍不均匀覆冰的计算特点。第十章研究架空线的振动和防振,重点讲述架空线振动的基本理论、微风振动的影响因素、微风振动的强度表示和测量方法、微风振动的防振设计。第十一章研究线路路径的选择,介绍对地距离和交叉跨越的有关规定,讲述弧垂曲线模板和杆塔定位方法,重点研究了杆塔定位的校验内容及其方法,并讲述了杆塔中心位移问题。第十二章研究计算机在输电线路设计中的应用,从数据库、3S技术、CAD技术的角度论述输电线路计算机辅助设计,介绍目前流行的三种输电线路CAD软件。

本书第一、三、四章由东北电力大学孔伟编写，其余章节由三峡大学孟遂民编写，全书由孟遂民教授统稿，由华北电力大学刘观起主审。

由于编著者水平的局限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2007年春节

目 录

前言

第一章 架空输电线路基本知识	1
第一节 概述	1
第二节 导线和地线	3
第三节 绝缘子和绝缘子串	9
第四节 常用金具	17
第五节 杆塔	21
第六节 基础	23
第七节 接地装置	24
第八节 导线的排列方式与换位	25
第九节 紧凑型输电线路	27
第十节 架空输电线路设计的一般内容和步骤	30
练习题	33
第二章 设计用气象条件	34
第一节 主要的气象参数	34
第二节 气象参数值的选取	35
第三节 设计用气象条件的组合	43
练习题	45
第三章 架空线的机械物理特性和比载	46
第一节 架空线的机械物理特性	46
第二节 架空线的许用应力和安全系数	49
第三节 架空线的比载	50
练习题	55
第四章 均布荷载下架空线的计算	56
第一节 架空线悬链线方程的积分普遍形式	56
第二节 等高悬点架空线的弧垂、线长和应力	57
第三节 不等高悬点架空线的弧垂、线长和应力	60
第四节 架空线弧垂、线长和应力计算公式的简化	66
第五节 架空线的平均高度与平均应力	75
第六节 均布垂直比载和水平比载共同作用下架空线的计算	77
练习题	80
第五章 气象条件变化时架空线的计算	82
第一节 架空线的状态方程式	82

第二节	临界档距	88
第三节	最大弧垂的判定	93
第四节	应力弧垂曲线和安装曲线	95
练习题	.....	100
第六章	均布荷载下架空线计算的进一步研究	101
第一节	考虑刚度影响时架空线的计算	101
第二节	架空线的初伸长及其处理	109
第三节	架空线施工中的过牵引	112
第四节	线路设计中常用的几种档距	114
第五节	架空输电线路的改建	119
练习题	.....	121
第七章	非均布荷载下架空线的计算	122
第一节	架空线悬挂曲线方程的一般形式	122
第二节	非均布荷载下架空线的弧垂、张力和线长	123
第三节	孤立档架空线的弧垂和线长	126
第四节	孤立档架空线的状态方程式	132
第五节	孤立档的控制条件	136
第六节	非均布垂直荷载和水平荷载共同作用下架空线的计算	136
第七节	耐张绝缘子串的水平及垂直投影长度	138
第八节	孤立档架空线应力弧垂计算举例	141
练习题	.....	145
第八章	连续档架空线的应力和弧垂	147
第一节	连续档架空线应力的近似计算——代表档距法	147
第二节	连续档架空线应力的精确计算	151
第三节	采用滑轮线夹时连续档架空线的应力和弧垂	154
第四节	连续档架空地线的应力选配	163
第五节	连续倾斜档的架线观测弧垂及线长的调整	166
练习题	.....	168
第九章	架空线的断线张力和不平衡张力	169
第一节	概述	169
第二节	固定横担固定线夹下单导线的断线张力	170
第三节	分裂导线的断线张力	175
第四节	线路正常运行中的不平衡张力	176
第五节	地线的支持力	177
练习题	.....	180
第十章	架空线的振动和防振	181
第一节	架空线的振动形式及其产生原因	181
第二节	微风振动的基本理论	183

第三节	影响微风振动的主要因素	187
第四节	微风振动强度的表示方法	190
第五节	微风振动的防振设计	192
练习题		199
第十一章	路径选择和杆塔定位	200
第一节	输电线路的路径选择	200
第二节	对地距离和交叉跨越的有关规定	206
第三节	杆塔定位	210
第四节	杆塔定位校验	218
第五节	杆塔中心位移	228
练习题		229
第十二章	计算机在输电线路设计中的应用	231
第一节	数据库及其在线路设计中的应用	231
第二节	3S 技术及其在线路设计中的应用	234
第三节	输电线路计算机辅助设计	237
附录 A	常用架空导线和地线的规格和性能	245
附录 B	常用杆塔的结构型式和有关尺寸	259
附录 C	公路等级	265
附录 D	弱电线路等级	265
参考文献		266

第一章 架空输电线路基本知识

第一节 概 述

一、输电线路的任务

地球上的煤、石油和江河等动力资源的分布是自然决定的，通常远离电力负荷中心。火力发电厂可以建在能源基地，也可以建在负荷中心附近，这取决于远距离输电经济还是运送燃料经济。一座 300 万 kW 的燃煤发电厂，其年耗原煤 1500~2000 万 t，若将其建在负荷中心附近，所耗原煤的年运量将超过一条铁路专用线的年运输量，此外负荷中心往往是人口密集区，这么多原煤燃烧会产生严重的污染。因此从技术上、经济上和环境污染等方面比较，现代化的大型火力发电厂均应建在能源基地。水力发电厂则只能建在水力资源处。这些电厂发出的电能通过输电线路向负荷中心输送。

发电厂、输电线路、升降压变电站以及配电设备和用电设备构成电力系统。为了减少系统的备用容量，错开高峰负荷，实现跨区域跨流域调节，增强系统的稳定性，提高抗冲击负荷的能力，在电力系统之间采用高压输电线路进行联络（联网）。电力系统联网，既提高了系统的安全性、可靠性和稳定性，又可实现经济调度，使各种能源得到充分利用。起系统联络作用的输电线路，可进行电能的双向输送，实现系统间的电能交换和调节。

因此，输电线路的任务就是输送电能，并联络各发电厂、变电站使之并列运行，实现电力系统联网。高压输电线路是电力工业的大动脉，是电力系统的重要组成部分。

二、输电线路的分类

输送电能的线路通称为电力线路。电力线路分为输电线路和配电线路。由发电厂向电力负荷中心输送电能的线路以及电力系统之间的联络线路称为输（送）电线路。由电力负荷中心向各个电力用户分配电能的线路称为配电线路。

输电线路按电压等级分为高压、超高压和特高压线路。35~220kV 的线路为高压（HV）线路，330~750kV 的线路为超高压（EHV）线路，750kV 以上的是特高压线路。一般地说，输送电能容量越大，线路采用的电压等级就越高，相邻的电压等级通常相差 2~3 倍。目前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。采用超高压输电，可有效地减少线损，降低线路单位造价，少占耕地，使线路走廊得到充分利用。我国第一条世界上海拔最高的“西北 750kV 输变电示范工程”——青海官亭至甘肃兰州东 750kV 输变电工程，于 2005 年 9 月 26 日正式投入运行。“1000kV 交流特高压试验示范工程”——晋东南—南阳—荆门 1000kV 输电线路工程，于 2006 年 8 月 19 日开工建设。该工程起自晋东南 1000kV 变电站，经南阳 1000kV 开关站，止于荆门 1000kV 变电站，线路路径全长约 650.677km。

输电线路按架设方式分为架空线路和电缆线路。架空线路由于结构简单、施工简便、建设费用低、施工周期短、检修维护方便、技术要求较低等优点，得到广泛地使用。但是，线路设备长期露置在自然环境中，易受各种气象条件（如大风、覆冰雪、气温变化、雷击等）

的侵袭，化学气体的腐蚀以及外力的破坏，出现故障的几率较高。电缆线路受外界环境因素的影响小，但需用特殊加工的电力电缆，费用高，施工及运行检修的技术要求高，目前仅用于城市居民稠密区和跨海输电等特殊情况。

输电线路按输送电流的性质分为交流线路和直流线路，最常见的是三相交流线路。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较少，主要材料消耗低，线路的走廊宽度也较小；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步联系，能降低主干线及电力系统间的短路电流。随着换流技术的不断完善和换流站造价的降低，超高压直流输电有着广泛的应用前景。1987年9月我国建成了第一条 $\pm 500\text{kV}$ 超高压直流输电工程——葛（葛洲坝）上（上海）线。该工程全长1051km，每极采用 $4\times\text{LGJQ}-300$ 型导线，输送容量1200MW。云广 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程，于2006年12月19日开工建设，线路全长1438km，西起云南楚雄州禄丰县，东至广州增城市，额定输电容量达5000MW。

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。除架空地线外，单回路杆塔上仅有一回三相导线，双回路杆塔上有两回三相导线，多回路杆塔上有三回及以上三相导线。

输电线路按相导线之间的距离分为常规型线路和紧凑型线路。

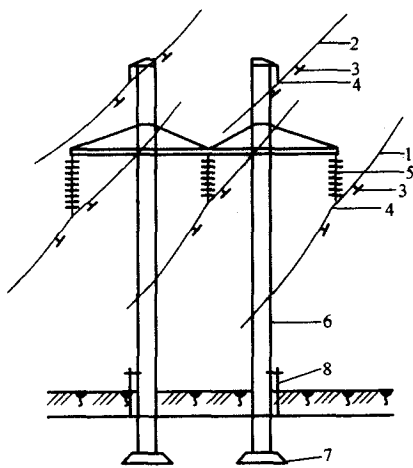


图 1-1 架空输电线路的组成

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

用，降低导线上的感应过电压。

3. 绝缘子

绝缘子用来支持或悬挂导线和地线，保证导线与杆塔间不发生闪络，保证地线与杆塔间的绝缘。绝缘子长期暴露在自然环境中，经受风雨冰霜及气温突变等恶劣气候的考验，有时还受到有害气体的污染，因此绝缘子必须具有足够的电气绝缘强度和机械强度，并应定期检修。

4. 线路金具

线路金具是输电线路所用金属部件（除杆塔螺栓外）的总称。线路金具种类繁多，用途各异，常用的有线夹、接续金具、连接金具、保护金具以及拉线金具等。线路金具通常承受

三、架空输电线路的组成

架空输电线路主要由导线、地线、绝缘子（串）、线路金具、杆塔和拉线、基础以及接地装置等部分组成，如图 1-1 所示。

1. 导线

导线用以传导电流，输送电能。它通过绝缘子悬挂在杆塔上。导线常年在大气中运行，长期受风、冰、雪和温度变化等气象条件的影响，承受着变化拉力的作用，同时还受到空气中污物的侵蚀。因此导线除应具有良好的导电性能外，还必须有足够的机械强度和防腐性能，并要质轻价廉。

2. 地线

地线又称避雷线，是悬挂在导线上方的一根或两根金属线，主要作用是防止雷电直击导线，同时在雷击杆塔时起分流作用，对导线起耦合和屏蔽作用，降低导线上的感应过电压。

较大的荷载,需要有足够的强度。与导线相连的金具,还必须具有良好的电气性能。金具质量的好坏,使用和安装是否正确,对安全送电有很大的影响。在设计线路时,应尽量选择标准金具。

5. 杆塔和拉线

杆塔用来支持导线、地线及其他附件,使导线以及地线之间彼此保持一定的安全距离,并保证导线对地面、交叉跨越物或其他建筑物等具有允许的安全距离。目前常用的杆塔有钢筋混凝土电杆和铁塔两种。在线路总投资中,杆塔部分约占40%,因此设计时应尽量做到杆塔结构简单、材料消耗量少、机械强度高、便于施工安装和维护。

拉线用来平衡杆塔的横向荷载和导线张力,减少杆塔根部的弯矩。使用拉线可减少杆塔材料的消耗量,降低线路的造价。

6. 杆塔基础

杆塔基础的作用是支承杆塔,传递杆塔所受荷载至大地。杆塔基础的型式很多,应根据所用杆塔的型式、沿线地形、工程地质、水文和施工运输等条件综合考虑确定。

7. 接地装置

接地装置的作用是导泄雷电流入地,保证线路具有一定的耐雷水平。

第二节 导线和地线

导线和地线通称架空线。

一、架空线的材料、种类和用途

1. 常用架空线的材料

铜是理想的导线材料,其导电性能和机械强度均好,但价格较贵,除特殊需要外,输电线路一般不使用。

铝质轻价廉,导电性能仅次于铜,但机械强度较低,仅用于两相邻杆塔间水平距离(档距)较小的10kV及以下线路。此外,铝的抗腐蚀性也较差,不易在污秽区使用。

铝合金的导电性能与铝相近,机械强度接近铜,价格却比铜低,并具有较好的抗腐性能,不足之处是铝合金受振动断股的现象比较严重,使其使用受到限制。随着断股问题的解决,铝合金将成为一种很有前途的导线材料。

钢具有较高的机械强度,且价格较低,但导电性能差。钢材料的架空线一般作为地线使用,作为导线使用仅用于跨越江河山谷的大档距及其他要求机械强度大的场合。为防腐蚀,钢线需要镀锌处理。

2. 常用架空线的结构及型号规格

输电线路用架空线基本都由多股圆线同心绞合而成,各种架空线的结构示于图1-4中。

现行国家标准 GB/T 1179—1999《圆线同心绞架空导线》,等效于国际电工委员会的 IEC 61089:1991。在该标准中,导线用型号、规格号、绞合结构及本标准编号表示。型号第一个字母均用J,表示同心绞合;单一导线在J后面为组成导线的单线代号,组合导线在J后面为外层线(或外包线)和内层线(或线芯)的代号,二者用“/”分开;在代号后可用字母F表示采用涂防腐油结构。规格号表示相当于硬拉圆铝线的导电截面积,单位为 mm^2 。绞合结构用构成导线的单线根数表示。单一导线直接用单线根数,组合导线采用前面

为外层线根数，后面为内层线根数，中间用“/”分开。绞线常用的单线有硬铝线(L)、高强度铝合金线(LHA1、LHA2)、镀锌钢线(G1A、G1B、G2A、G2B、G3A，其中1、2、3分别表示普通强度、高强度、特高强度镀锌钢线，A、B表示镀层厚度普通、加厚)、铝包钢线(LB1A、LB2B、LB2)。例如，JL/G1B-500-45/7表示由45根硬铝线和7根B级镀层普通强度镀锌钢线绞制成的钢芯铝绞线，硬铝线的截面积为 500mm^2 ，查得镀锌钢线的截面积为 34.6mm^2 。又如，JG1A-40-19表示由19根A级镀层普通强度镀锌钢线绞制成的镀锌钢绞线，相当于 40mm^2 硬铝线的导电性，查得钢绞线的面积为 271.1mm^2 。

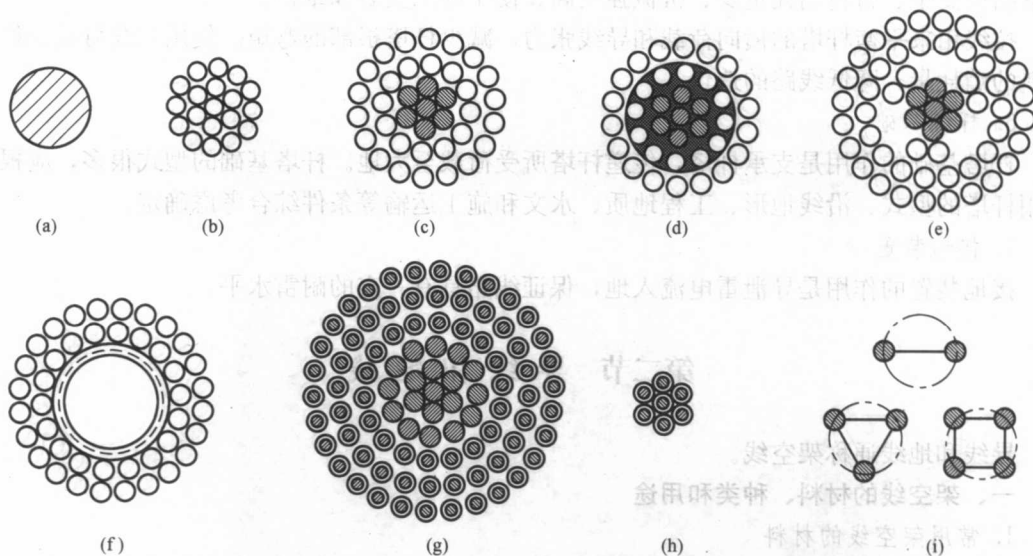


图 1-2 各种导线和地线的断面结构

- (a) 单股导线；(b) 单一金属绞线；(c) 钢芯铝绞线；(d) 防腐钢芯铝绞线；(e) 扩径钢芯铝绞线；
(f) 空心导线（腔中为蛇形管）；(g) 钢芯铝包钢绞线；(h) 铝包钢绞线；(i) 分裂导线

在 YB/T 5004-2001《镀锌钢绞线》中，钢绞线按断面结构分为 1×3 、 1×7 、 1×19 、 1×37 四种，按公称抗拉强度 1270、1370、1470MPa 和 1570MPa 分为四级，按钢丝锌层级别分为特 A、A、B 三级。结构 1×7 、直径 6.0mm、抗拉强度 1370MPa、A 级锌层的钢绞线标记为 $1\times 7-6.0-1370-A-YB/T 5004-2001$ 。

目前在架空输电线路中大量使用着按旧标准制造的架空线。在 GB1179-1983《铝绞线及钢芯铝绞线》中，架空线的型号规格由材料、结构和标称载流面积三部分组成。材料和结构以汉语拼音的第一个字母大写表示，载流面积以 mm^2 为单位表示。如标称截面为 120mm^2 的铝绞线表示为 LJ-120；标称截面铝 300mm^2 、钢 50mm^2 的钢芯铝绞线表示为 LGJ-300/50；标称截面铝 150mm^2 、钢 25mm^2 的防腐型钢芯铝绞线则表示为 LGJF-150/25。根据 GB9329-1988《铝合金绞线及钢芯铝合金绞线》，LHAJ-400 表示标称截面为 400mm^2 的热处理铝镁硅合金绞线；LHBGJ-400/50 表示标称截面为铝合金 400mm^2 、钢 50mm^2 的钢芯热处理铝镁硅稀土合金绞线。

在 GB1179-1974 中，按铝钢截面比的不同，将钢芯铝绞线分为正常型(LGJ)、加强型(LGJJ)和轻型(LGJQ)三种。

钢芯铝绞线的内芯为单股或多股镀锌钢绞线，外层为单层或多层的铝绞线。由于交流电的集肤效应，四周电阻率较小的铝部截面主要起载流作用，机械荷载则主要由芯部的钢线承受。因此钢芯铝绞线既有较高的导电率，又有较好的机械强度，成为目前最常用的导线品种。分裂导线使用普通型号的导线，安装间隔棒保持其间隔和形状，如图 1-2 (i) 所示。这相当于大大增加了导线的半径，其表面电位梯度小，临界电晕电压高，单位电抗小，导纳大，且无需专门制造，因此超高压输电线路中广泛采用了分裂导线，我国 220kV 和 330kV 线路多用二分裂导线，500kV 线路多用四分裂导线。常用架空线的有关数据示于附录 A。

3. 常用架空线的用途及技术特性比较

常用架空线的用途及技术特性比较，如表 1-1 所示。

表 1-1 常用架空线的用途及技术特性比较

用途	类别	强度	载流量	防腐	允许运行温度	耐振能力	相同载流量单价
普通线路导线	铝合金绞线	一般	高	高	一般	一般	一般
	钢芯铝绞线	一般	较高	一般	一般	一般	一般
	防腐型钢芯铝绞线	一般	较高	高	一般	一般	一般
	铝包钢芯铝绞线	一般	较高	高	一般	一般	一般
	铝合金芯铝绞线	一般	高	高	一般	一般	一般
普通线路地线	钢绞线	高	—	一般	—	高	—
	复合光纤地线 (OPGW)	较高	—	高	—	一般	—
大跨越导线	钢芯铝绞线 (大钢比)	较高	较高	一般	一般	一般	较高
	高强度钢芯铝合金绞线	高	较高	一般	一般	一般	高
	铝包钢芯铝合金绞线	高	较高	高	一般	一般	高
	防腐型高强度钢芯铝合金绞线	高	较高	高	一般	一般	高
	高强度钢芯耐热铝合金绞线	高	高	一般	高	一般	高
	防腐型高强度钢芯耐热铝合金绞线	高	高	高	高	一般	高
	铝包钢绞线 (高导电率)	高	一般	高	一般	一般	较高
大跨越地线	铝包钢绞线	高	—	高	—	高	—
	钢绞线	高	—	一般	—	高	—
	复合光纤地线 (OPGW)	较高	—	高	—	一般	—
重覆冰线路	钢芯铝绞线 (中钢比)	较高	较高	一般	一般	一般	一般
	钢芯铝合金绞线	较高	较高	一般	一般	一般	较高
重污染线路	防腐型钢芯铝绞线	较高	较高	高	一般	一般	一般
	铝包钢芯铝绞线	一般	较高	高	一般	一般	一般
扩容改造线路导线	铝合金绞线	一般	高	高	一般	一般	一般
	钢芯耐热铝合金绞线	一般	高	一般	高	一般	较高

二、导线截面的选择

导线截面的选择应从其电气性能和经济性能两方面考虑，保证安全经济地输送电能。一

般先按经济电流密度初选导线截面，再按允许电压损失、发热、电晕等条件校验。大跨越的导线截面宜按允许载流量选择，并应通过技术经济比较确定。

1. 按经济电流密度选择

输电线路的总投资可分为与导线截面无关和有关两类费用。勘测设计、房屋搬迁、青苗赔偿和土地征用等费用，可看作与导线截面无关。导线截面越大，价格越高，杆塔及基础费用随之增大，线路建设费用也就越高。线路的投资总费用可表示为

$$Z_1 = (F_0 + aA)L$$

式中 F_0 ——与导线截面无关的线路单位长度费用；

a ——与导线截面相关的线路单位长度单位截面的费用；

A ——导线的截面积；

L ——线路长度。

线路的年运行费用包括折旧费、检修维护费和管理费等，可用占总投资的百分比 b 表示为

$$Z_2 = bZ_1 = b(F_0 + aA)L$$

若不考虑电晕损失，线路的年电能损耗费用可用下式计算

$$Z_3 = 3I_{\max}^2 \tau C \frac{\rho L}{A}$$

式中 τ ——最大负荷损耗小时数，可依据每年最大负荷利用小时数和功率因数，查表 1-2 得到；

I_{\max} ——线路输送的最大电流；

C ——单位电价；

ρ ——导线的电阻率。

表 1-2 年最大负荷损耗小时数

功率因数	年最大负荷利用小时数 (h)								
	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000
0.8	2000	2350	2750	3150	3600	4100	4650	5250	5950
0.85	1800	2150	2600	3000	3500	4000	4600	5200	5900
0.9	1600	2000	2400	2900	3400	3950	4500	5100	5800
0.95	1400	1800	2200	2700	3200	3750	4350	5000	5700
1.0	1250	1000	2000	2500	3000	3600	4200	4850	5600

若投资回收年限为 n ，则经济分析的年计算费用为

$$Z = \frac{Z_1}{n} + Z_2 + Z_3 = (1 + nb)(F_0 + aA) \frac{L}{n} + 3I_{\max}^2 \tau C \frac{\rho L}{A}$$

令 $\frac{\partial Z}{\partial A} = 0$ ，可得到导线的经济截面为

$$A_n = I_{\max} \sqrt{\frac{3n\rho\tau C}{a(1+nb)}} \quad (1-1)$$

经济电流密度为

$$J_n = \frac{I_{\max}}{A_n} = \sqrt{\frac{a(1+nb)}{3n\rho\tau C}} \quad (1-2)$$

我国的经济电流密度可按表 1-3 选取, 则

$$A_n = \frac{I_{\max}}{J_n} \quad (1-3)$$

利用上式计算时, I_{\max} 一般应根据 5~10 年的电力系统发展规划, 进行必要的负荷预测和潮流计算确定。

表 1-3 经济电流密度值 单位: A/mm²

导线材料	年最大负荷利用小时数 (h)		
	3000 以下	3000~5000	5000 以上
裸铜导线和母线	3.0	2.25	1.75
裸铝导线和母线	1.65	1.15	0.9

2. 按电压损耗校验

在不考虑线路电压损耗的横分量时, 线路电压、输送功率、功率因数、电压损耗百分数、导线电阻率以及线路长度与导线截面的关系, 可用下式表示

$$\delta = \frac{P_m L}{U_N^2} (R + X_0 \operatorname{tg}\varphi) \quad (1-4)$$

式中 δ ——线路允许的电压损耗百分比;

P_m ——线路输送的最大功率, MW;

U_N ——线路额定电压, kV;

L ——线路长度, m;

R ——单位长度导线电阻, Ω/m ;

X_0 ——单位长度线路电抗, 可取 $0.4 \times 10^{-3} \Omega/m$;

$\operatorname{tg}\varphi$ ——负荷功率因数角的正切。

3. 按导线允许载流量校验

控制导线允许载流量的主要依据是导线的最高工作允许温度, 该温度主要由导线长期运行后的强度损失和连接金具的发热而定。工作温度越高, 运行时间越长, 导线的强度损失越大。根据运行经验, 导线的最高工作允许温度对钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线可采用 $+70^\circ\text{C}$, 大跨越可采用 $+90^\circ\text{C}$; 钢芯铝包钢绞线 (铝包钢绞线) 可采用 $+80^\circ\text{C}$, 大跨越可采用 $+100^\circ\text{C}$, 也可由试验决定; 镀锌钢绞线采用 $+125^\circ\text{C}$ 。气象条件为最高气温月的最高平均气温, 风速 0.5m/s (大跨越因线路较高, 取 0.6m/s), 太阳辐射功率密度 0.1W/cm^2 。导线允许载流量可用下式计算

$$I = \sqrt{(W_R + W_F - W_S)/R_t} \quad (1-5)$$

式中 I ——导线的允许载流量, A;

W_R ——单位长度导线的辐射散热功率, W/m;

W_F ——单位长度导线的对流散热功率, W/m;

W_S ——单位长度导线的日照吸热功率, W/m;

R_t ——允许温度 t 时单位长度导线的交流电阻, Ω/m 。

4. 按电晕条件校验

超高压输电线路的导线表面电场强度很高, 以至超过周围空气的放电强度, 使空气电离形成局部放电, 这种现象称为电晕。电晕可引起无线电干扰、可听噪声、导线振动等, 还会产生有功功率损耗。导线的电晕随外加电压的升高而出现、加剧。导线表面开始发生局部放电时的电压, 称为起始电晕电压。导线表面全面发生电晕时的电压, 称为临界电晕电压, 相应的电场强度称为临界电晕场强。导线的临界电晕场强, 与其直径、表面状况及大气条件等

有关。清洁绞线在晴天的临界电晕场强为

$$E_j = 3.03m\delta^n \left(1 + \frac{0.298}{\sqrt{r}}\right) \quad (\text{MV/m}) \quad (1-6)$$

式中 m ——导线表面状况系数，表面洁净绞线取 0.966，伤痕且松股绞线取 0.81；

δ ——相对空气密度；

n ——空气密度指数，一般可取 0.66~0.72；

r ——导线半径，cm。

导线表面的电场强度不宜大于临界电晕场强的 80%~85%，年平均电晕损失不宜大于线路电阻有功损失的 20%。在海拔不超过 1000m 的地区，如导线直径不小于表 1-4 所列数值，一般不必验算电晕。

表 1-4 可不验算电晕的导线最小外径 (海拔不超过 1000m)

标称电压 (kV)	110	220	330		500		
导线外径 (mm)	9.6	21.6	33.6	2×21.6	2×36.24	3×26.82	4×21.6

三、地线的选择

1. 地线架设的一般规定

输电线路是否架设地线，应根据线路电压等级、负荷性质和系统运行方式，并结合当地已有线路的运行经验、地区雷电活动的强弱、地形地貌特点及土壤电阻率高低等来决定。在计算耐雷水平后，通过技术经济比较，采用合理的防雷方式。

110kV 输电线路宜沿全线架设地线，在年平均雷暴日数不超过 15 日或运行经验证明雷电活动轻微的地区，可不架设地线。无地线的输电线路，宜在变电站或发电厂的进线段架设 1~2km 的地线。在年平均雷暴日数超过 15 日的地区的 220~330kV 输电线路，应沿全线架设地线，山区宜采用双地线。500kV 输电线路应沿全线架设双地线。

在杆塔上，地线对边导线的保护角，500kV 输电线路宜采用 10°~15°，330kV 线路及 220kV 双地线线路宜采用 20°左右，山区 110kV 单地线线路宜采用 25°左右。两根地线之间的距离，不应超过地线与导线间垂直距离的 5 倍。

在气温 +15℃、无风的气象条件下，档距中央导线与地线之间的距离 D 应满足

$$D \geq 0.012l + 1 \quad (\text{m}) \quad (1-7)$$

式中 l ——档距，m。

2. 地线的选择

地线应满足电气和机械使用条件的要求，可选用镀锌钢绞线或复合型绞线。当地线选用镀锌钢绞线时，其与导线的配合不宜小于表 1-5 的规定，重冰区、严重污秽区可提高一、二级或选用防腐型架空线。当地线兼用于减少潜供电流、降低工频过电压、改善对通信设施的干扰影响、作为高频载波通道等时，可采用良导体架空线，其截面积应满足综合利用的载流要求。当利用地线进行光纤通信时，可选用 OPGW 型复合光纤电缆。

电力系统发生单相接地故障时，地线要通过返回电流，由此产生的温升不应超过其允许值，以免机械强度明显下降。校验短路热稳定时的地线允许温度，钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线可采用 +200℃，钢芯铝包钢绞线、铝包钢绞线可采用 +300℃，镀锌钢绞线可采用 +400℃；环境温度为最高气温月的日最高气温的月平均值。地线的短路热稳定允许电流可

按下式计算

$$I = \sqrt{\frac{C}{0.24\alpha_0 R_0 T} \ln \frac{\alpha_0(t_2 - 20) + 1}{\alpha_0(t_1 - 20) + 1}} \quad (1-8)$$

式中 I ——地线的短路热稳定允许电流, A;

C ——载流部分的热容量, cal/°C/cm;

α_0 ——载流部 20°C 时的电阻温度系数, 1/°C;

R_0 ——载流部 20°C 时的电阻, Ω /cm;

T ——短路热稳定的计算时间, s;

t_1 ——环境温度, °C;

t_2 ——地线的短路热稳定允许温度, °C。

表 1-5 地线采用镀锌钢绞线时与导线的配合

导线型号	LGJ-185/30 及以下	LGJ-185/45~LGJ-400/50	LGJ-400 65 及以上
镀锌钢绞线 最小标称截面 (mm ²)	35	50	70

注 500kV 线路的地线采用镀锌钢绞线时, 标称截面不应小于 70mm²。

当地线仅用于防雷时, 可逐基杆塔接地, 以提高防雷的可靠性。但逐基杆塔接地会产生较大的附加电能损失, 如一条长 200~300km 的 220kV 输电线路的附加电耗每年可达几十万千瓦·时, 一条长 3000km 的 500kV 线路则高达数百万千瓦·时。

当地线有综合利用时, 可采用绝缘地线。绝缘地线利用一只带有放电间隙的无裙绝缘子与杆塔隔开, 雷击时利用放电间隙击穿接地, 因此绝缘地线具有与一般地线同样的防雷效果。安装时必须对放电间隙进行整定, 使其在雷击前的先导阶段能够预先建弧, 在雷击过后能够及时切断间隙中的工频电弧恢复正常运行状态, 在线路重合闸成功时不致重燃; 在线路发生短路事故时, 间隙也能被击穿, 并保证短路事故消除后, 间隙能熄弧恢复正常。放电间隙值应根据地线上感应电压的续流熄弧条件和继电保护的動作条件确定, 一般为 10~40mm。还应当注意, 绝缘地线上往往感应有较高的对地电压, 在导线和地线都不换位时, 330、500kV 线路绝缘地线的感应电压可分别达到 23kV 和 50kV 左右。因此绝缘地线的线路必须进行适当地换位, 对其的任何操作都应按带电作业考虑。

输电线路的电磁感应对附近通信线路有一定影响, 当对重要通信线路的影响超过规定标准时, 为加强对通信线路的保护, 可以考虑与地线配合架设屏蔽地线。屏蔽地线需要使用良导电线材, 目前多用 LGJ-95/55 钢芯铝绞线。

复合光纤地线现多采用 OPGW 型复合光缆。复合光缆的外层铝合金绞线起防雷保护和屏蔽作用, 芯部的光导纤维起通信作用。复合光纤地线可根据工程实际需要向生产厂家定制。

第三节 绝缘子和绝缘子串

一、常用绝缘子

架空输电线路常用的绝缘子有针式绝缘子、悬式绝缘子、横担绝缘子、棒形绝缘子和复