



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

输电线路施工

汤晓青 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

输电线路施工

主编 汤晓青
编写 杨力 毛源
吴强 谭文强
主审 卢祥兵



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书共分5章,主要阐述架空输电线路工程施工中的典型施工工艺和施工计算方法,以及输电线路施工组织设计及施工成本、进度、质量、安全控制等施工管理的内容。全书采用现行的设计规程、验收规范和标准,突出高职教育特点:基于工作过程,以典型工作任务驱动模式实施课程开发,理论知识以“必需够用”为度,充实技能操作内容,既反映了输电线路职业岗位群的基础理论知识和技能知识,又介绍了近期特高压电网建设的新材料、新技术和新工艺。

本书可作为高职高专院校电力技术类输配电线路施工、运行和检修专业教材,也可作为送电线路架设工、输电线路运行工、输电线路检修工、配电线路运行工、配电线路检修工等岗位工作人员培训和自学教材,还可供输配电线路专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路施工/汤晓青主编. —北京:中国电力出版社,
2008

全国电力职业教育规划教材
ISBN 978-7-5083-6835-1

I. 输… II. 汤… III. 输电线路-工程施工-职业教育-
教材 IV. TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第034384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

*

2008年3月第一版 2008年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17.75印张 433千字

定价 28.00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

本书是高职高专教材，根据高职高专院校“输配电线路施工、运行和检修”专业的教学要求而编写。

本书共分5章。第1章绪论，主要阐述输电线路的电压等级划分、输电技术发展趋势、架空输电线路施工流程等。第2章基础施工，主要阐述架空输电线路基础工程中现浇混凝土基础施工、装配式基础施工、岩石基础施工等几种典型的基础施工工艺和施工计算方法。第3章杆塔组立，主要阐述架空输电线路杆塔工程中倒落式抱杆整体组立混凝土杆、内拉线抱杆分解组立铁塔等典型的杆塔组立施工工艺和施工计算方法。第4章架线施工，主要阐述架空输电线路架线工程中拖地展放、张力架线等典型架线施工工艺和施工计算方法。第5章输电线路施工组织与管理，主要阐述输电线路施工组织设计及施工成本、进度、质量、安全控制等施工管理的内容。

全书采用现行的设计规程、验收规范和标准，突出高职教育特色：基本工作过程，以典型工作任务驱动模式实施课程开发，理论知识以“必需够用”为度、充实技能操作内容，既反映了输电线路职业岗位群的基础理论知识和技能知识，又介绍了近期特高压电网建设的新材料、新技术、新工艺。

本书自1998年开始酝酿，编者曾历时7个月全程深入220kV铜自线Ⅱ回线路施工工地，曾实地考察500kV自渝线、500kV自蓉线（国内第一条500kV同塔双回线路）、500kV石雅崇线、750kV官兰线等多个线路施工工地，也曾实地考察了长江、黄河等多个大跨越工程，以及±500kV葛沪线和换流站。编者参与了多届全国电机工程学会输电线路施工技术分会年会，向全国的送变电公司技术管理人员学习施工技术及经验，查阅了包括“电力建设”在内的多种科技期刊及输配电线路专业相关书籍的参考资料。编者在本书编写前，根据高职高专教育的特点，依据现行国家、电力行业有关标准以及四川省电力公司生产人员岗位培训考核标准修订了三年制课程教学大纲，突出输配电线路专业涵盖的职业岗位群所必需的理论知识和技能的学习和训练。依据新编专业教学大纲，按国家电网公司的标准化作业要求编成本书。

本书由四川电力职业技术学院汤晓青主编，杨力、吴强、毛源及四川省电力公司谭文强参编，四川电力送变电建设公司卢祥兵主审。杨力编写了第2章，吴强编写了第3章，毛源编写了第4章，谭文强编写了第5章，汤晓青编写了第1章并完成全书统稿。本书技能训练部分的编写，得到了成都电业局李凯、曾炎、许其鹏、江洪良、韩先才等诸多同志的无私帮助，在此一并向他们表示感谢。

因编者知识、技能水平有限，书中尚有诸多不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2007年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力系统的构成及其功能	1
1.2 国内外电力系统电压等级划分	4
1.3 输电技术的发展趋势	6
1.4 输电线路施工的工艺流程	7
1.5 输电线路施工技术发展方向	13
1.6 技能训练——心肺复苏术	15
本章小结	20
练习题	21
第 2 章 基础施工	22
2.1 土力学基础知识及基础	23
2.2 现浇混凝土基础施工	30
2.3 装配式基础施工	61
2.4 岩石基础施工	64
2.5 技能训练——基础的分坑、操平和找正	72
2.6 技能训练——混凝土的搅拌、浇灌施工工艺	85
本章小结	87
练习题	87
第 3 章 杆塔组立	89
3.1 杆塔概述	89
3.2 工器具选择与使用	96
3.3 杆塔起立前的各项工作	113
3.4 输电线路杆塔整体起立	122
3.5 内拉线抱杆分解组塔	152
3.6 技能训练——登杆	167
3.7 技能训练——使用 GJ—35 型钢绞线制作拉线	169
3.8 技能训练——倒落式人字抱杆整立等径双杆	171
3.9 技能训练——内拉线分解组立铁塔	176
3.10 技能训练——输电线路杆塔接地电阻测量	184
本章小结	186
练习题	186

第 4 章 架线施工	188
4.1 导线及地线的展放	189
4.2 导线及地线的连接	202
4.3 紧线	208
4.4 弛度观测与计算	212
4.5 安装附件	221
4.6 张力架线	231
4.7 技能训练——钳压法导线接续操作	247
4.8 技能训练——LGJ—185 螺栓式耐张线夹的制作	248
4.9 技能训练——输电线路耐张杆上安装导线防振锤	249
4.10 技能训练——架设 110kV 输电线路导线 (6 档)	250
本章小结	252
练习题	253
第 5 章 输电线路施工组织与管理	255
5.1 输电线路施工组织设计	256
5.2 输电线路工程成本控制	258
5.3 输电线路工程进度控制	261
5.4 输电线路工程质量控制	264
5.5 输电线路工程安全控制	268
5.6 竣工验收	271
5.7 技能训练——竣工验收	274
本章小结	275
练习题	276
参考文献	277

绪 论

知识目标

- (1) 掌握建设输电网络的意义。
- (2) 了解输电线路电压等级的划分及输电技术的发展趋势。
- (3) 了解输配电线路的分类及输电线路的组成。
- (4) 了解输电线路施工的工艺流程及施工技术的发展方向。

技能目标

掌握触电急救技能——心肺复苏术 (CPR)。

1.1 电力系统的构成及其功能

1.1.1 电力系统的构成

电能从生产到消费一般要经过发电、输电、配电和用电四个环节。通常将发电厂、变电站(所)、电力线路及用户连接起来构成的整体,称为电力系统;将由电力线路及变电站(所)组成的网络称为电力网,如图 1-1 所示。

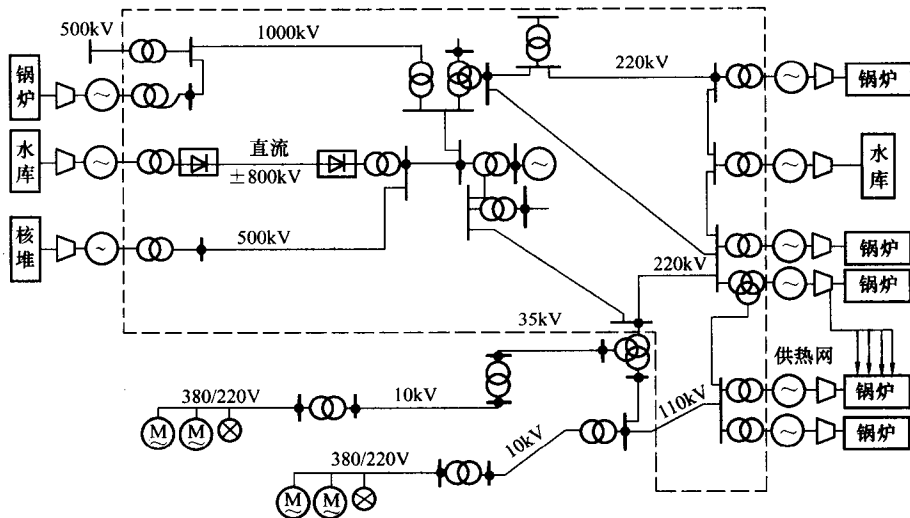


图 1-1 电力系统示意图 (虚线框内为电力网)

电力线路是电能输送的通道和载体。一般按其功能将电力线路划分为输电线路和配电线路。输电通常指将发电厂或发电基地(包括若干电厂)生产的电能输送到消费电能的地区(又称负荷中心),或者指将一个电网的电能输送到另一个电网,实现电网互联,构成互联电网。配电通常是指从降压变电站(所)将电能分配给各个用户。输电线路通常指 35kV 及以上电压等级的电力线路,而 35kV 以下电压等级的电力线路通常称为配电线路,前者构成输

电网络,后者构成配电网络。随着电力系统的发展,35kV的线路常作为配电网络的一部分,其杆塔主要采用钢筋混凝土单杆,只有个别35kV线路在输送容量、规模上接近110kV的线路,杆塔使用了钢筋混凝土双杆甚至铁塔,导线达到LGJ—150mm²以上。另外,我国东北地区因历史原因有63kV线路而没有35kV线路。与输电线路相比,配电线路的结构相对简单,施工组织相对容易,施工工艺相对简便。本书讨论的输电线路施工一般是指63kV以上的架空输电线路施工。

1.1.2 输电网络的功能

输电网络的主要功能是输送电能。输电线路及相关设备将电力系统联为一体,使系统中远处的发电容量可向任何负荷单位输送。如果电能输送不需要了,电力系统也就不再有存在的必要了。在20世纪60年代,美国联邦动力委员会对“输电”的重要意义作了一个简明的总结:输电的战略重要性比它在电的全部费用中平均所占的10%所表示的要大得多。“输电”的具体体现是在特定地区范围内将发电、输电和用电设备等电力设备互相连接构成一个完整的系统。从技术经济的角度,可以证明在某一地区进行适当的“系统互联”有如下好处:

(1) 更经济合理地开发一次能源,优化电能资源配置,实现水、火电资源的优势互补。联网后形成较大的、稳定的负荷需求,由此可以采用大容量发电机组来提供电能,从而降低系统运行成本,增加经济效益。可以在煤炭丰富的矿区建立超临界、超超临界汽轮发电机组,高效率、低成本的大型、特大容量坑口电厂向能源缺乏的区域送电;可以建设具有调节能力的大型水电厂,充分发挥水电和火电在电力系统中的互补作用。大容量、远距离的输电线路的存在,让远离负荷中心的电厂的电能能够传输到负荷中心,有利于水能、火电(坑口电厂)、风能、地热资源等通常地理位置较偏远的能源资源的充分开发和利用。

(2) 利用负荷的不同时性,可提高发电机组的利用率,减少总的装机容量。负荷的不同时性主要是指:①不同种类的负荷不同时用电;②同种类负荷的不同时用电;③不同经度地区因日照时间不同而不同时用电。

由于各区域电网的用电构成、负荷特性、电力消费习惯存在一定的差异,各电网的年负荷曲线、周负荷曲线和日负荷曲线不相同,使得各电网高峰用电负荷可能不出现在同一时间,相互错开。这样互联电网总的日高峰负荷、周高峰负荷和年高峰负荷不是各电网高峰负荷的线性相加,使得互联电网总的高峰负荷比各电网高峰负荷之和低。互联电网总的日负荷曲线、周负荷曲线、年负荷曲线与各被联电网的相应负荷曲线相比,峰谷差减少。因此,在整个电网相同运行容量下,可向用户提供更多的电力,从而提高发电机组的利用率。换句话说,在满足同样负荷水平条件下,整个电网可减少装机容量。充分利用负荷的不同时性,在一个较大的地区范围内所需要准备的发电备用设备容量就可以适当减少。

(3) 检修和紧急事故备用互助支援、减少备用发电容量。为了确保电力系统的安全运行和向用户连续不间断地供电,电力系统无论大小都必须既有运行备用、检修备用,又有事故备用。电网互联以后,满足同样负荷水平的发电容量水平将减少。整个系统备用容量一般按期望的尖峰负荷的一定百分比安排。另外,整个系统内单一元件故障的容量不会因联网而增加。这样,整个系统备用容量可相应减少。对各被联电网来说,它可享受到整个系统的备用容量,因而减少了本身的备用容量。由于各区域电网可享受备用发电容量,因此在出现事故时可以最有效地利用现有的发电容量,进行紧急事故的相互支援,从而减少用于备用的安装容量。

(4) 提高电网运行的可靠性和供电质量。由于互联后整个系统容量加大，系统的备用容量较大，备用机组增多，单个元件，如机组、线路故障对系统的影响相对变小。电网互联可提供紧急事故支援，因而整个电网的可靠性得到提高，安全性更有保证。另一方面，一个电网的个别元件故障如不及时隔离和消除，也有可能产生连锁反应，波及互联的其他电网，造成严重的大面积停电。但是，充裕的电网输电能力和合理的互联电网结构，以及互联电网自动化水平的提高，可以把电网故障的连锁反应降低到最小限度，从而可以避免发生大面积的停电事故。

由于互联后整个系统容量加大，因此系统内负荷的变动对整个系统容量来说相对变小，引起系统电压和频率的波动将减小，从而可保证更高的供电频率和电压质量。

总之，“系统互联”是使最有效地利用任何地区或区域内的电力设备和能源成为可能的协调手段，这就是“输电”的意义。

1.1.3 输电的通路

输电的通路由电力线路、变配电设备构成。其中，输电线路是主要的组成部分，输电线路按其结构可分为架空电力线路和电力电缆线路两类。架空电力线路与电力电缆线路相比较，造价约为其十分之一，且检修方便，尽管其大部分结构因裸露在大气环境中，易受外力、冰、风、雷击等环境因素的影响或损害，但仍然广泛地用于电力系统中。电力电缆线路多埋设于地面以下的电缆沟、隧道内或水面下，因其造价太高，不易检修和维护，所以主要用于城市供电系统或跨海峡、湖泊的电力输送，如美国的东海岸间电力输送及我国的舟山群岛到大陆间的电力输送，其他地方应用较少。本书主要讨论架空输电线路的施工。

如图 1-2 所示，架空输电线路由多个耐张段组成，孤立档是特殊的耐张段。耐张段两端杆塔为耐张杆塔，中间为直线杆塔；孤立档只有一档，且两端为耐张杆塔。

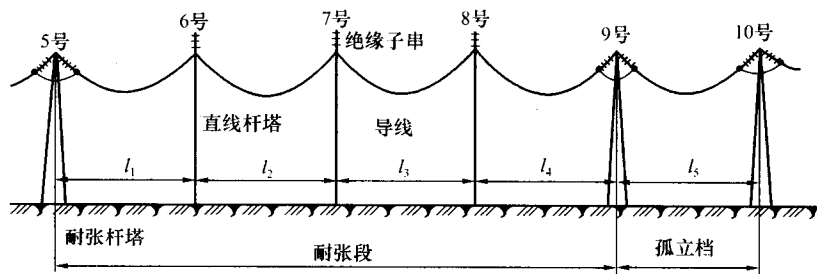


图 1-2 架空电力线路的组成

构成架空电力线路的主要部件有导线、避雷线、金具、绝缘子、杆塔、拉线和基础、接地装置等，如图 1-3 和图 1-4 所示。架空电力线路中的导线一般采用钢芯铝绞线，特殊情况下也采用铝包钢绞线等其他线型。避雷线一般采用镀锌钢绞线，近年来在超高压及以上的输电线路中，为增加信息传输通道而将避雷线中的一根改为架空复合光缆。绝缘子一般采用瓷质或玻璃绝缘子，少量电力线路采用复合绝缘子。架空电力线路杆塔有钢筋混凝土电杆、铁塔及特殊塔型。架空电力线路中钢筋混凝土单杆用量较少，一般采用钢筋混凝土双杆，如图 1-3 所示。架空电力线路中主要塔型为铁塔，一般有猫头塔、酒杯塔、干字塔、羊角塔等，在平原地区也采用拉线猫头塔（拉猫塔）、拉线 V 形塔（拉 V 塔）、拉线门形塔（拉门塔）等拉线铁塔。基础除了拉线杆塔的底盘、拉盘外，主要有直柱式基础、斜柱式基础两大类。

详细内容见各相关章节，此处不再赘述。

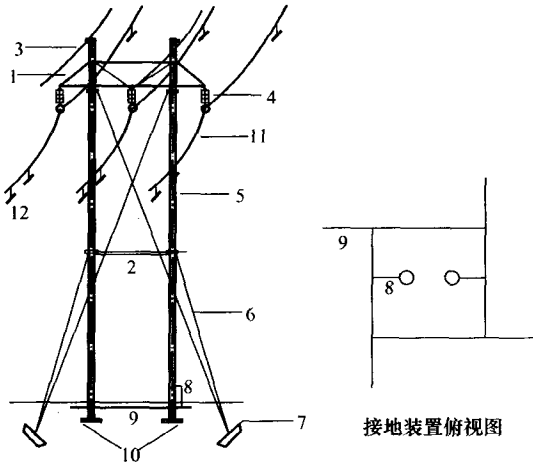


图 1-3 架空电力线路的组成元件（双杆）

- 1—横担；2—横梁；3—避雷线；4—绝缘子；
5—混凝土杆；6—拉线；7—拉线盘；8—接地引下线；
9—接地装置；10—底盘；11—导线；12—防振锤

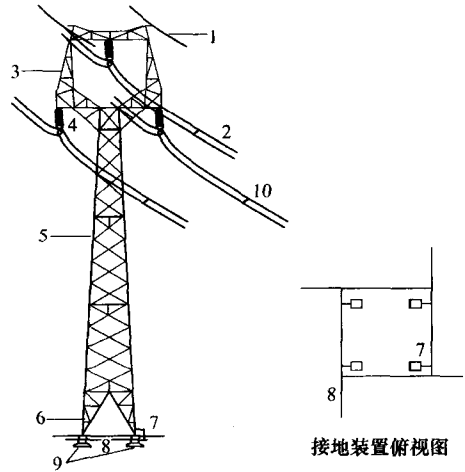


图 1-4 架空电力线路的组成元件（猫头塔）

- 1—避雷线；2—双分裂导线；3—塔头；
4—绝缘子；5—塔身；6—塔腿；7—接地引下线；
8—接地装置；9—基础；10—间隔棒

1.2 国内外电力系统电压等级划分

输电电压一般分高压、超高压和特高压。国际上，高压（HV）通常指 35~220kV 的电压；超高压（EHV）通常指 330kV 及以上、1000kV 以下的电压；特高压（UHV）指 1000kV 及以上的电压。高压直流（HVDC）通常指的是 ± 600 kV 及以下的直流输电电压， ± 600 kV 以上的电压称为特高压直流（UHVDC）。在我国，输配电线路的电压等级有 0.4、10、35、63、110、220、330、500、750kV 等，其中，0.4~63kV 属于配电电压等级，0.4kV（220/380V）用于照明及动力用电，6000V 用于高压电机，10、35、63kV 主要用于配电系统，27.5kV 用于电气机车。我国东北地区曾经在解放前后有过 154kV 的非标准电压等级，后被升压改造为 220kV，330kV 仅限于我国西北地区，是限制发展电压等级，目前我国 ± 800 kV 直流电压输电、1000kV 交流电压输电工程均已开工建设。

1. 高压（HV）

高压是指 110~220kV 的电压等级，110、220kV 用于省网或区域网络干线。我国第一条自行架设的 220kV 交流输电线路是淞-东-李线，架设于 1953~1954 年，是我国电力系统建设史上的一个里程碑。

2. 超高压（EHV）

超高压是指 330~750kV 的电压等级，330kV 在我国的应用主要在西北地区，我国第一条 330kV 交流输电线路是 1972 年建设的刘-天-关线，全长 534km；我国第一条 500kV 交流输电线路是 1981 年建设的平-武线，全长 595km，它的建成，是我国电力系统建设史上的又

一个里程碑,标志着我国电力建设水平达到了一个新的高度;1985~1987年,我国建成第一条 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路葛-沪线,全长1045km;2005年,我国建成第一条 750kV 交流输电线路官-兰线,全长140km。近三十年来,我国超高压输电网络建设得到长足发展,超高压输电线路里程数大量增加,已经发展到一定的水平。但是也要看到,我国目前仍未能实现全国联网,电力资源要在全中国范围内合理地调度,超高压等级网络还需要进一步的发展。

国外超高压等级的输电网络的出现于20世纪60年代,如当时的美国、前苏联、加拿大等国,目前这些国家的超高压等级网络已经处于高度完善的阶段。如美国的 330kV 的网络已有近40000km, 500kV 线路有近30000km;加拿大、美国已有的 750kV 等级的输电线路分别长约10000km和3000km。

3. 特高压(UHV)

特高压是指 750kV 以上的电压等级,南非、委内瑞拉等国家已采用 800kV 电压等级;前苏联在20世纪80年代初期建成从西伯利亚到乌拉尔的 1150kV 的交流输电线路及从埃基巴图兹到俄罗斯中部的全世界第一条 $\pm 750\text{kV}$ 直流输电线路,也是目前世界上投入运行的最高的交流和直流电压等级。特高压输电指的是正在开发的 1000kV 交流电压和 $\pm 800\text{kV}$ 直流电压输电工程和技术。特高压电网指的是以 1000kV 输电网为骨干网架,超高压输电网和高压输电网以及特高压直流输电、高压直流输电和配电网构成的分层、分区、结构清晰的现代化大电网。

超高压和特高压等级输电线路的建设体现了一个国家的电力建设水平,我国在这一方面与世界上的其他国家相比较,还有一定的差距,体现在超高压等级的输电线路还不够多,而特高压等级的输电线路在我国还没有。究其原因,与我国电力系统建设的整体水平不高、输电技术的基础研究不够有很大的关系,而西方国家及前苏联的超高压及特高压等级输电系统之所以发展得那么快,是由它们在20世纪60~70年代分别在马萨诸塞州(美国)、莫斯科(前苏联)附近建立了超高压及特高压实验基地,大力开展输电技术基础研究而获得了必要的技术支持,以及这些国家的经济发展和电力系统自身发展的需要所决定的。

现在,我国各省电力系统都基本实现了省内电网联网。在东北地区、华北地区、华中地区、华东地区、华南地区(现南方电力联营公司——中央和广东、广西、贵州、云南四省区联合办电)及西北地区都分别实现了跨大区输电网络的连接,在网内基本实现了电力资源的合理调度。随着葛洲坝电厂和葛-沪线的建设,实现了华中与华东地区的联网;东北的绥中电厂建成后实现了东北与华北地区联网;下一步,随着三峡电站的建设,将逐步实现华中地区与西南地区的水能资源电力基地连接,实现西北地区的煤炭资源电力基地与西南地区的水能资源电力基地的连接,最终实现全国联网,从而实现西南、西北地区的富余的水电、火电资源向经济相对发达的华中、华东、华南地区输送,以满足区域间能源的合理配置,这一切都需要远距离、大容量输送电能,所以超高压及特高压等级的输电线路在我国的应用前景是十分广阔的。我国在引进国外输电技术的同时,还需要加强国内输电技术的应用开发,即加强对超高压及特高压等级的输电技术的开发应用,在跨省(区) 500kV 电网之上逐步形成以实现远距离、大规模、低损耗输电为特征的特高压骨干电网,在输电技术上逐步赶上并超过世界上的先进国家。

1.3 输电技术的发展趋势

1875年,在法国巴黎建成了世界上第一座火力发电厂,标志着世界电力时代的开端。与世界有电的历史几乎同步,1879年,中国上海公共租界点亮了第一盏电灯,随后1882年在上海创办了中国第一家公用电业公司——上海电气公司,从此中国翻开了电力工业历史的第一页。1891年,德国劳芬电厂建设成世界上第一台三相交流发电机,并通过第一条13.8kV输电线将电力输送到远方用电地区,使电力既用于照明,又用于电力拖动,开创了大功率、远距离输电的历史。从19世纪70年代至今,电力的广泛运用,电力需求的不断增加,推动着电力技术日益向高电压、大机组、大电网发展。与此同时,输电技术也经历了从直流输电到交流输电,再到交流输电与直流输电并存的几个阶段。最早进入商业化应用的是直流发电机技术,直流发电机发出的电能形式为直流,因此采用了直流输电技术,但直流电存在升压困难的缺点,不利于电能的远距离、大容量的传输。随着交流发电机技术的商业化应用,尤其是变压器技术的应用,解决了交流电升压的问题,交流输电技术在相当长的时期内成为电力系统中唯一的输电技术。直到20世纪50年代,随着高电压、大容量换流设备的出现,且直流输电技术在输电能力、不增加系统短路容量等方面优于交流输电技术,而且逐渐出现了交流输电与直流输电共存的局面。随着电力理论研究的不断积淀,以及一个多世纪的电力建设实践证明,输电技术的发展有以下两个方面的趋势。

1. 输电电压等级有进一步提高的趋势

首先,据国内外多年来对输电技术基础研究得出的结论,交流输电电压等级从技术上讲无明显的上限,美国已经实验过2000kV及以上的电压等级的输电技术;其次,这也是电力规模经济性,即远距离、大容量输送电能的实际需求所决定的,输电电压愈高,输送的电能容量和距离愈大。不同电压等级的交流输电线路的输送容量与输送距离对比见表1-1。

表 1-1 不同电压等级的交流输电线路的输送容量与输送距离对比

电压等级 (kV)	35	110	220	500		750~1150
输送容量 (MW)	10~20	30~60	200~250	800	1200	2000~2500
输送距离 (km)	≤50	≤100	200~300	1000	600	—

从电网建设发展史来看,电网经历了从中压电网、高压电网到超高压电网,再到特高压电网的发展历程。理论上,输电线路的输电能力与输电电压的平方成正比,输电电压提高一倍,输送功率的能力将提高4倍。电网的发展历史表明,各国在选择更高一级电压时,通常使相邻两个输电电压之比等于2,多数是大于2,这样可使输电网的输送能力提升4倍以上。实践证明,以这样的电压级差构成的电网才可能经济合理,并适宜于电网的发展和服务区域的扩大。特高压交流输电技术的实际应用已日臻成熟,尽管尚有一些问题需解决,但技术问题已不是发展特高压输电的限制性因素。特高压输电工程的规划和建设主要取决于大容量输电和用电负荷增长的需求。

2. 直流输电技术将得到更为广泛的应用

从世界范围来看,直流输电线路还较少,其原因是交直流换流设备较昂贵,高压直流开关技术尚不够成熟,限制了直流输电技术的应用。但是,应用直流输电有交流输电所不能比

拟的优点,具体体现在以下几个方面:

(1) 直流输电线路不存在感抗,只有电阻。交流及直流输电线路功率计算式为

$$\begin{cases} \dot{S}_e = \frac{\dot{U}^2}{R + jX} \\ S_e = \frac{U^2}{R} \end{cases} \quad (1-1)$$

可以看出,直流输电线路没有电抗,存在着将电能以更大容量、更远距离输送出去的可能性。如从埃基巴图兹到俄罗斯中部的 $\pm 750\text{kV}$ 直流输电线路的输送距离是2414公里,输送容量就达到了6000MW。

(2) 直流输电的投资较交流输电要少,运行方式更灵活。直流输电线路占用的线路走廊较交流输电线路小,因为交流系统有A、B、C三相,而直流系统只有正负两极,线路走廊相对较窄,所用的杆塔及基础因受力较小等原因可选择较小的形式。直流输电可选择正负极、正极-大地、负极-大地等多种运行方式,运行方式灵活,而交流输电一般不能缺相运行,还需要尽量保持三相功率平衡。

(3) 在电力系统中增加直流输电线路,不会增加系统的短路容量。

(4) 因为直流输电线路通过换流站与交流电力系统连接,所以容易实现大容量系统间的非同期运行和不同频率系统间的联网运行。

(5) 接入交流电力系统的直流输电线路对交流系统的振荡能起到阻尼作用。

(6) 直流输电线路可提高并列运行的交流输电线路的输送容量。

(7) 直流输电线路稳定性高,便于调度管理,不需电抗补偿,便于增容。

直流输电除了换流设备投资高、高压直流开关技术尚不成熟的缺点外,还存在直流输电线路需要消耗较多的电容无功功率,晶闸管元件过载能力较低,灭弧困难等方面的问题,需要通过进一步加强新技术、新材料的研究和应用予以解决。总之,随着科学技术的进一步发展,并开发出质优价廉的换流设备和适用的直流开关技术,直流输电将在电力系统中得到广泛应用。

1.4 输电线路施工的工艺流程

架空电力线路由基础、杆塔、导线、避雷线、金具、绝缘子、接地装置等构成。输电线路的建设工作分为三个阶段,即准备工作、施工安装、启动验收。

准备工作包括施工前的设计资料的消化,施工组织设计,施工方案设计,施工人员、材料、机械的调配等。设计资料的消化是其他一切工作的前提,要求充分领会设计人员的设计意图,精确把握设计资料中的数据;施工组织设计指对施工工期、资金、人员、材料、机械、技术安全措施等进行全面的组织安排;施工方案设计是指对特定的工程施工对象的特定施工工艺进行设计,如针对某一段线路工程的特定工序(如基础、杆塔、架线等)进行施工工艺方案设计,要求结合工程实际情况进行分析、计算,进行多种施工方案的经济、技术的对比分析,提出具体的技术及安全措施,还包括人员、机械、材料的使用及工期安排等内容;最后进行施工人员、机械、材料的调配,准备进入施工安装阶段。

施工安装是将输电线路的各个组成部分按设计图纸的要求进行安装作业,包括土石方、基础、杆塔、架线、接地装置等五个工序,通常将这五个工序又综合成三大基本工序,即基

础、杆塔、架线。这也是本课程学习的重点。

启动验收是对线路工程建设完毕后的输电线路进行带电、升压运行试验，同时完成查漏、补缺的工作，即检查输电线路的缺陷并针对问题进行作业，使输电线路工程在正式投运前达到设计要求的电气和机械强度指标。

下面介绍输电线路工程施工的基本工序。

1.4.1 基础工程

1. 基础的作用

基础是架空电力线路的重要组成部分，因为架空输电线路裸露在大气环境条件下，所以要求基础在外力、风、冰、雷击等外界环境因素作用下，稳定地支持杆塔及导线、避雷线系统。基础的形式多种多样，根据不同的分类标准有现浇基础、预制基础，混凝土杆基础、铁塔基础，分开式基础、整体基础，自立式基础、拉线式基础，立柱台阶式基础、桩式基础、主角钢插入式基础等。

2. 基础工程施工工序

基础工程施工中耗用大量劳动力，同时对整个工程工期、经济效益有着重大影响，其投资占线路总体投资的15%~30%，工期占整个工程工期的30%~50%。下面以立柱台阶式现浇混凝土基础为例来说明基础工程施工的基本工序，具体介绍如下：

(1) 复测线路。复测线路是施工队进入线路施工工地后的第一道工序，其目的是在工地现场复查、校核设计图纸上的塔位桩（如直线桩、转角桩）、方向桩等桩的位置，检查现场埋设的桩是否偏移或丢失；检查档距、转角度数是否与图纸相符合；检查桩位间、档距中的凸出点、控制点、危险断面点的高度及与相邻桩的距离；检查交叉跨越处的被跨越物的高度等。检查结果要求做记录，与图纸不相符的应与设计人员会商解决办法。复测线路的工具经纬仪、塔尺、软尺、水准仪、对讲机、旗帜等。复测线路的方法有分中法、测回法、视距法等。

(2) 降基面。降基面是当基础位于斜坡或水田等地方时，在没有平整坚实的施工基面的情况下而进行施工基面处理的施工工序。如图1-5所示，当杆塔桩位于斜坡地形时，需对斜坡以塔位桩为中心进行降基面开挖。在基础尺寸较大或斜坡坡度大的情况下，常需要开挖较多的土石方，因而容易造成大面积的植被破坏及水土流失。近年来，在斜坡上通常不再使用各腿以施工基面为平面的基础形式，而代之以高低腿式基础，如图1-6所示，以减少土石方的开挖量。对水田等软弱土层较薄的，应将上层的软土开挖掉；若软弱土层较厚、土石方开挖量较大，则应考虑改为桩式基础。降基面施工方法有人力开挖、机械开挖、爆破作业等。

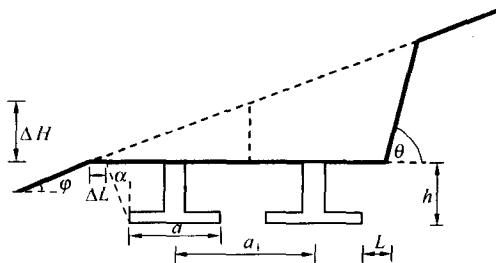


图 1-5 降基面施工示意图

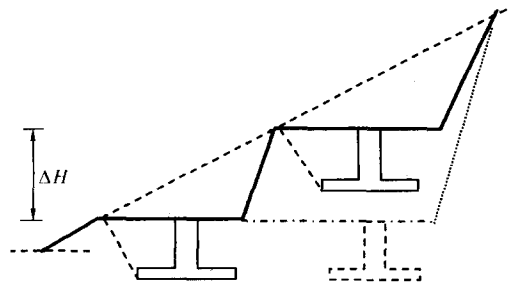


图 1-6 高低腿式基础示意图
降基面施工示意图

图 1-5 所示降基面高度的计算公式为

$$\Delta H = \left(h \tan \alpha + \frac{a + a_1}{2} \right) \tan \varphi \quad (1-2)$$

式中 ΔH ——降基面高度；
 h ——基础埋深；
 a ——基础底盘宽度；
 a_1 ——基础根开；
 α ——土壤上拔角；
 φ ——斜坡坡度。

图 1-5 中, ΔL 是边坡为防止水土流失而预留的安全距离, 设计确定; L 是为防止山坡上侧滚石直接撞击杆塔基础, 或出现滑坡时将塔位掩埋而预留的安全距离, 取决于斜坡的坡度, 一般取 2~3m。

(3) 分坑。施工基面平整后, 根据设计要求的塔位中心桩、方向桩和该塔位的基础类型的尺寸数据要求将基础坑的位置大小确定在塔位地面上。工具有木桩、经纬仪、铁钉、软尺等。

(4) 基础坑开挖。使用人力、机械、爆破等作业方式按分坑确定的杆塔基础的位置、大小进行开挖。按土质的不同可分为土坑、岩石坑、泥水流沙坑开挖等。

(5) 运输基础材料。即用人力、汽车、索道等方式运输基础施工所需的石、沙、钢筋、水泥等材料。

(6) 浇制基础。这一道工序又包括操平、扎筋、支模、浇制混凝土等子工序。

1) 操平。操平是基坑开挖好后, 在浇制施工前, 对基坑进行处理的一道工序, 将经纬仪架设在塔位中心桩上, 把塔尺放到坑内以检查基坑的尺寸; 还包括对坑底、壁的进一步的仔细修整, 若坑底有积水、松散的土石, 则需将其清除。

2) 扎筋。输电线路基础有配钢筋和不配钢筋两种, 一般立柱台阶式基础的立柱部分是配钢筋的(是主要的荷载传递的载体), 底板则不一定配钢筋。扎筋是指将基础内部钢筋按设计要求用细铁丝(20~22号)绑扎起来, 绑扎的位置在底板全部的钢筋交叉点上, 方法是主柱和梁的箍筋转角与钢筋的交接点均应扎牢, 钢筋与箍筋平直部分的相交点可成梅花式交错扎牢。在扎筋过程中或完成后进行支模工序。

3) 支模。支模是指按基础的尺寸在基础坑里组装模板, 包括支模板和找正两步。现浇混凝土基础是依靠模板成型的, 模板按材料可分为木模板、钢模板和竹胶模板。木模板的材料为木板, 其造价低但使用寿命短。钢模板的材料为薄钢板, 其使用寿命长, 但造价高、重量大, 单块面积小、组装速度慢; 模板棱角易变形, 导致漏浆、蜂窝麻面及狗洞、表面不平整、凸肚等, 影响混凝土基础质量; 且钢模板的维修保养工作量大, 增加了施工成本。由于木模板、钢模板在用于基础浇制过程中暴露出了诸多不足之处, 加之近年来超高压输电线路及正在开工建设的特高压输电线路工程中的基础尺寸加大, 需要采用大面积模板, 因此输变电施工行业开始采用多种不同材料的大面积模板来加以替代。竹胶模板即其中一种, 竹胶模板是用竹和酚醛类胶材料加工而成的新型模板。竹胶模板比木模板硬度高, 承受力强, 吸水率低, 复用次数多, 与木模板相比, 几乎无膨胀和收缩; 竹胶模板比钢模板重量轻, 单模面积大, 施工方便。上述几种模板中, 竹胶模板的使用成本最低。因为竹是速生植物, 使用竹

胶模板对保护环境、保护森林有重要意义,所以竹胶模板被中国建设部在“九五”期间作为一种新型模板推广应用。在使用过程中,竹胶模板存在易变形的问题,经研究证实,竹胶模板的变形主要是由于竹胶模板含水率增加而弹性模量明显降低造成的,在使用中注意控制模板含水率并加强模板的支撑即可很好地解决这一问题。

支模板可以在扎筋的过程中同时进行,如底板筋绑扎好后即可支底板部分的模板,接下来绑扎立柱钢筋,支立柱部分的模板;也可等钢筋绑扎完成后在钢筋的外面支模板。最后用经纬仪和垂球来找正模板的位置。

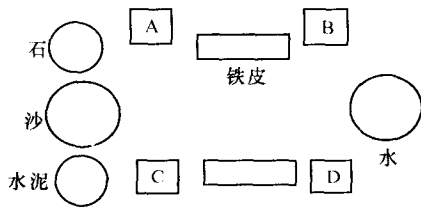


图 1-7 人工搅拌混凝土现场布置示意图

4) 浇制。混凝土的浇制是指按设计要求的混凝土标号,确定混凝土配合比并称量材料(石、沙、水泥、水),然后进行适当的搅拌成为混凝土,并浇入模板,同时进行适当的振捣。搅拌的方式有人工搅拌和机械搅拌两种,人工搅拌混凝土现场布置示意图如图 1-7 所示;机械搅拌则用搅拌机,将搅拌好的

混凝土运输到塔位上进行基础浇制。目前市面上可以买到容量从 250L 起的便携式混凝土搅拌机。浇捣混凝土前应在模板上涂刷脱模剂(废机油等),浇灌和振捣是混凝土浇制施工的关键,直接影响到混凝土基础的强度和密实性。

(7) 养护。混凝土的养护是保证混凝土质量的最后一个环节,主要通过控制混凝土的湿度和温度来保障混凝土中水泥的水化作用的顺利进行,混凝土能够在预定的时间段内达到设计要求的强度值。在夏季和冬季这两个季节中应特别重视混凝土的养护工作。

(8) 撤模及回填。当混凝土的强度达到 2.5MPa 时,可进行基础的撤模工序,将模板从基础外表面撤下。撤模后应按《110~500kV 架空送电线路施工及验收规范》的要求立即回填,并在基础外露部分加盖树枝或草皮,定期浇水养护。

基础施工结束后,在预定的工期进行强度检测。当基础强度满足组立杆塔的要求时(整体组立杆塔要求基础强度达到 100% 混凝土设计强度 R_{28} ,分解组立杆塔要求基础强度达到 70% R_{28} 即可),进入组立杆塔施工工序。

1.4.2 杆塔工程

1. 杆塔的作用

杆塔的作用是稳定地支持导线、避雷线,使导线、避雷线与地面(水面)及导线、避雷线之间保持足够的电气安全距离。

2. 杆塔工程施工工序

杆塔工程占工程总投资的 20%~50%,用工量(工日数)占整个工程的 25%~35%,工期占整个工程工期的 30%~40%,其施工工期的控制和施工质量的好坏对整个工程的顺利完成有较大的影响。杆塔施工的具体工序如下:

(1) 准备工作。准备工作包括验收杆塔基础尺寸、质量,运输杆塔材,组立杆塔施工准备等。验收杆塔基础尺寸、质量的工作包括检查基础正、侧面根开,底脚螺栓的位置,混凝土的强度等。运输杆塔材的工作包括将杆塔材料从材料站或卸料站运输到塔位上去。运输的方式有人力运输、汽车运输、船舶运输、索道运输等。因为铁塔的运输采用分散运输的方式,所以要求不多,主要是注意在运输过程中不要漏运和扭曲塔材;运输混凝土杆时,应小心谨慎,混凝土杆组装前为标准杆段,有 3、4、5、6、9m 等长度,其单件重量大(如 $\phi 400$

等径杆 6m 杆段的质量约为 0.9t) 且易损坏, 在山地或丘陵地区用人工运输时应注意安全; 多段同车或船运输时, 要注意与车、船的重心配合和防振处理并牢固绑扎, 严禁相互碰撞、急剧坠落和不正确支吊, 防止产生裂缝或使原有裂缝扩大, 甚至震断混凝土杆。组立杆塔施工准备的工作包括按施工设计方案布置起立杆塔的施工机具等。

(2) 排杆连接。混凝土杆一般采用整体组立, 混凝土杆的排杆连接是指将运送到杆位的混凝土杆段加上横担、叉梁、抱箍等组装成为设计要求的混凝土杆。首先检查运到塔位上的混凝土杆段的型号、规格并对混凝土杆段进外观质量检查, 看有无麻面、蜂窝、露筋、裂纹等。若都符合要求, 则进行排杆, 按设计要求的杆型选择合适的混凝土杆段, 在塔位附近的地面上, 按施工方案的要求将其排列在一个平面上(用沙包或土袋垫平)。混凝土杆段的连接方式有焊接、螺栓连接、射钉连接、爆炸压接等, 焊接分电焊和气焊, 输电线路施工中最常用的连接方式是气焊。

输电线路的铁塔一般采用分解组立。对铁塔而言, 这个阶段是将运送到塔位上的塔材分段清理出来, 分角、分片、分段组装, 准备实施铁塔组立。

(3) 组立杆塔。组立杆塔是指将混凝土杆或铁塔组装并起立于杆塔基础上。杆塔组立方法有整体组立和分解组立两种, 混凝土杆常用整体组立, 铁塔则常用分解组立。每一类组立方法又有使用多种工具、形式多样的组立方法, 将在后面具体介绍。

(4) 校正及固定杆塔。校正及固定杆塔是指对组立好的铁塔或混凝土杆进行检查、校正及固定作业。对铁塔主要是检查螺栓的紧固程度、塔材安装是否有错误及铁塔的挠度、整基扭转处理等; 对混凝土杆主要是检查横担、叉梁、抱箍及永久拉线的安装是否正确; 螺栓是否紧固及混凝土杆的挠度、整基扭转处理等。

(5) 撤除及转移组立杆塔机具。当杆塔组立结束后, 撤除并转移组立杆塔工器具至下一杆塔位, 进行新杆塔的组立施工, 直至全线杆塔组立完毕。

一个或多个耐张段的杆塔组立完毕后, 即可准备进行导线、避雷线架设, 即架线工程施工。

1.4.3 架线工程

在架线工程施工中, 首先是机具、材料的运输, 其次是导线、避雷线的展放, 接下来是紧线和附件安装。整个工序工期短, 耗费人工较少, 使用机具种类多, 高处作业量大, 作业技术性较强。架线工程施工工序有下面四道工序。

1. 运输机具、材料

大型放线施工机具和导线、避雷线线盘一般用大型牵引车拖到施工场地, 小型紧线施工机具及导线、避雷线也可用汽车、人力运输等方式运送到施工现场, 人力运输导线、避雷线时通常用“回大龙”的方式进行。

2. 展放导线、避雷线

导线、避雷线展放的方式有拖地展放和张力放线两种。拖地展放, 是将导线、避雷线用人力或机械在地面上拖过进行展放作业, 故导线、避雷线磨损较严重, 施工较慢, 其优点是施工机具和工艺简单, 对施工人员要求不高, 适用于电压等级 220kV 及以下的输电线路的架线施工。张力放线, 是用牵引机和张力机配合将导线展放到整个施工段中, 施工过程中导线、避雷线不与地面及跨越架接触, 导线、避雷线磨损小, 施工效率高, 施工人员作业条件较好, 其缺点是施工机具较复杂, 运输牵、张机械较麻烦, 施工组织、工艺较复杂, 对作业