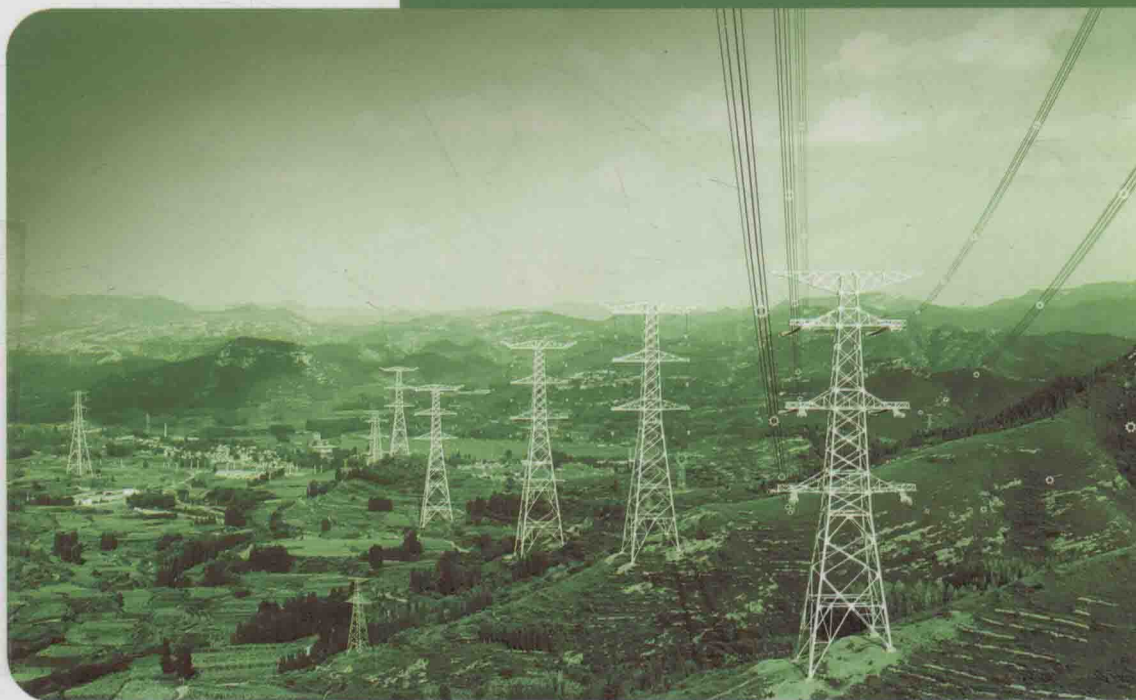


特高压

交流输电线路工程施工

TEGAOYA JIAOLIU SHUDIAN XIANLU GONGCHENG SHIGONG

国网山东省电力公司泰安供电公司 组编



淮外借



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压 交流输电线路工程施工

TEGAOYA JIAOLIU SHUDIAN XIANLU GONGCHENG SHIGONG

国网山东省电力公司泰安供电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

特高压交流输电线路工程施工/国网山东省电力公司泰安供电公司组编. —北京: 中国电力出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-5198-2108-1

I. ①特… II. ①国… III. ①特高压输电—输电线路—工程施工 ②特高压输电—输电线路—工程施工 IV. ①TM723

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 115605 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 周秋慧 (010-63412627)

责任校对: 王小鹏

装帧设计: 王英磊 张俊霞

责任印制: 邹树群

印 刷: 北京时捷印刷有限公司

版 次: 2018 年 7 月第一版

印 次: 2018 年 7 月北京第一次印刷

开 本: 710 毫米×980 毫米 16 开本

印 张: 16.25

字 数: 238 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 82.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

本书编委会

- 主 编** 韩增永 (国网泰安供电公司)
- 副主编** 韩 暘 (国网技术学院)
- 王增君 (国网淄博供电公司)
- 李 霖 (国网潍坊供电公司)
- 编写人员** 刘建平 (山东送变电工程公司)
- 马海超 (新疆维吾尔自治区送变电工程公司)
- 王德友 (辽宁省送变电工程公司)
- 李 全 (山东诚信工程建设监理有限公司)
- 孙英哲 (山东诚信工程建设监理有限公司)
- 田维立 (四川电力送变电建设公司)
- 杜晓冬 (湖南省电网工程公司)
- 孙梓航 (国网山东经研院)
- 马 栋 (国网临朐县供电公司)
- 李金源 (国网淄博供电公司)
- 戴光烨 (国网济南市长清区供电公司)
- 冷佳伟 (国网沂源县供电公司)
- 王 亮 (北京送变电公司)
- 江 山 (国网泰安供电公司)
- 封新友 (安徽送变电工程公司)
- 王 超 (安徽送变电工程公司)
- 赵朋昌 (国网泰安供电公司)
- 程天华 (山东送变电工程公司)
- 主 审** 肖 锋 (国网交流建设分公司)

前言

特高压输电具有输送容量大、送电距离长、线路损耗低、占用土地少等诸多优点，是公认的世界较为先进的输电技术，也是构建全球能源互联网的主要载体。一条 1000kV 的特高压交流输电线路的输电能力是一条 500kV 超高压输电线路的 4 倍以上。因此，有“220kV 输电线路是县级公路，500kV 输电线路是省级公路，而特高压输电线路是电力高速公路”的说法。

本书在编写过程中择优选取参与特高压输电线路建设的专家作为编委会成员，全面总结了近年来特高压交流输变电线路的建设经验，确保了内容的真实性、可行性。全书共分 9 章，第 1 章是特高压交流输电线路工程概述，第 2、3 章介绍了特高压交流输电线路工程施工过程中使用的主要材料、机具；第 4 章主要介绍特高压交流输电线路工程采用的索道运输；第 5~7 章介绍了特高压交流输电线路工程中基础、组塔、架线的施工工序，这三章是本书的核心内容；第 8、9 章介绍了防雷接地和防护工程。本书适用于指导特高压交流输电线路工程建设，同时对 500、220kV 及以下输电线路工程建设有一定的指导意义。

本书在编写过程中得到了国网技术学院韩暘同志等的大力支持，凝聚了各位参编人员的心血，希望对读者有所帮助。

由于时间仓促，书中难免有不足或疏漏之处，敬请读者指正。

编者

2018 年 6 月

前 言

第 1 章 特高压交流输电线路工程概述	1
1.1 特高压跨区域输电的理论依据	1
1.2 特高压交流输电线路的发展现状	2
1.3 特高压交流输电线路施工特点	4
第 2 章 施工材料	8
2.1 基础施工材料	8
2.2 组塔施工材料	19
2.3 架线施工材料	19
第 3 章 施工机具	26
3.1 基础施工类机具	26
3.2 施工运输类机具	34
3.3 组塔施工类机具	38
3.4 架线施工类机具	42
3.5 通用机具	51
第 4 章 索道运输	55
4.1 概述	55
4.2 索道的构成	56

4.3	索道运输的分类	62
4.4	索道架设准备工作	65
4.5	索道布置规划及架设	68
4.6	索道试运行	77
4.7	索道运输过程	78
4.8	索道拆除	79
第 5	章 基础工程施工	81
5.1	线路测量	81
5.2	土石方工程(基坑开挖)	87
5.3	基础工程	100
5.4	基础的质量验收	138
第 6	章 铁塔组立施工	142
6.1	铁塔基础知识	142
6.2	铁塔组立常用的抱杆及典型吊装方法	147
第 7	章 架线与附件安装工程	177
7.1	架线施工概述	177
7.2	架线施工前的准备	178
7.3	跨越架搭设	180
7.4	张力架线施工	186
7.5	紧线施工	192
7.6	弧垂的观测与调整	197
7.7	架空线的连接	200
7.8	附件安装	207
7.9	复合光纤的架设	219
7.10	架线工程质量要求及评级	226
7.11	架线施工的安全措施	232
7.12	工程验收	236

第 8 章 防雷接地工程	238
8.1 防雷接地装置的作用	238
8.2 接地装置的构成	238
8.3 输电线路防雷接地的措施	241
8.4 接地装置的施工要求	241
8.5 接地电阻的测量	242
第 9 章 防护工程	244
9.1 施工准备	244
9.2 施工顺序	244
9.3 挡土墙施工	245
9.4 排水沟施工	246
9.5 护坡施工	247
参考文献	248

特高压交流输电线路工程概述

1.1 特高压跨区域输电的理论依据

我国的输电线路电压等级是随着输送功率的增加逐步提升的。从输电线路输送电能的约束情况来看,输电线路的电能输送能力主要受到热极限、电压约束和稳定性约束的影响。

输电线路输送电能时,电压是一项重要的指标。在输送电能的过程中,线路首段和末端的电压会因为线路阻抗的存在产生一定的电压损失,这种电压损失不允许超过一定的限值,这就要求输电线路必须满足相应的电压约束。输电线路的功率计算公式如下

$$P_n = \frac{U_n^2}{Z_c} \quad (1-1)$$

式中 P_n ——输电线路输送的自然功率;

U_n ——输电线路的额定电压;

Z_c ——输电线路的波阻抗。

实践证明,当输电线路采用 220kV 电压等级时,该输电线路的自然功率标准值为 175kW;当输电线路的额定电压提升至 500kV 时,该输电线路的自然功率标准值为 900kW;当将输电线路的额定电压提升至 750kV 时,该输电线路的自然功率标准值为 2000kW。因此,提升输电线路的额定电压可大幅度提升输电线路的输送能力,这是特高压交流输电线路建设的理

论出发点。

1.2 特高压交流输电线路的发展现状

特高压输电线路分为直流线路和交流线路，应当说，特高压交流线路是一种适应传统电网模式的线路，两种输电方式均有各自的优势特点，目前，中国特高压线路按照交直流同步发展的模式规划建设，本书主要讨论特高压交流输电线路的相关知识。

我国特高压交流输电线路的电压等级为 1000kV。根据我国未来能源格局特点和配置要求，国家将以 1000kV 特高压交流输电线路构建特高压骨干网架，进而形成各大区域电网的同步联网。

截至 2017 年底，我国建成并投入运行特高压交流线路 8 条，均位于国家电网公司范围内，具体情况见表 1-1。

表 1-1 我国建成并投入运行的特高压交流线路

序号	工程名称	线路长度 (km)	变电容量 (万 kVA)
1	晋东南—南阳—荆门	654	1800
2	淮南—皖南—浙北—沪西	2×650	2100
3	浙北—浙中—浙南—福州	2×603	1800
4	淮南—南京—泰州—苏州—沪西	2×780	1200
5	锡盟—北京东—承德—济南	2×730	1500
6	蒙西—晋北—北京西—天津南	2×608	2400
7	榆横—晋中—石家庄—济南—潍坊	2×1048.5	1500
8	锡盟—胜利	2×240	600

目前，正在建设中的特高压交流输电线路工程有 3 项，具体情况见表 1-2。

表 1-2 我国正在建设的特高压交流输电线路工程

序号	工程名称
1	苏通 GIL 综合管廊工程
2	北京西—石家庄 1000kV 特高压交流输电变电工程
3	山东—河北特高压环网工程

根据国家电网公司特高压发展规划，“十三五”期间，特高压交流输电线路工程分三批建设。第一批特高压交流输电线路主要目的为治理东中部地区严重雾霾，满足西部、北部能源基地和西南水电基地电力外送需要，提高电网安全稳定水平。目前，该批工程已建成或处于建设过程中。第二批工程的建设旨在加快形成东部、西部同步电网，需要建设东北特高压环网，东北与华北、西北与西南、华北—华中与华东特高压交流联络通道，目前，部分工程已经开工建设，预计 2019~2020 年建成投产。第三批预计 2020 年以前开工建设，主要为东部电网内部网架加强工程、内蒙古特高压主网架、西部电网向西藏等地区的延伸工程等。“十三五”期间，我国计划建设的特高压交流线路工程情况见表 1-3。

表 1-3 “十三五”期间我国计划建设的特高压交流线路工程

序号	工程名称	线路长度 (km)	变电容量 (万 kVA)
1	蒙西—湘南，荆门—武汉，长沙—南昌交流工程	2×2189	1500
2	胜利—锡盟—张北—赣州，南阳—驻马店，晋东南—东明—枣庄，湘南—赣州交流工程	2×3408	4400
3	山东—河北特高压环网工程	2×582	1200
4	南京—徐州—连云港—泰州交流工程	2×735	1200
5	巴塘—雅安—重庆—绵阳—德格，雅安—阿坝交流工程	2×1970	3600
6	呼盟—大庆西—哈尔滨—长春东—沈阳东—营口，大庆西—白城—扎鲁特—赤峰—锦州—营口，扎鲁特—沈阳东交流工程	2×3770	6900
7	枣庄—徐州，临沂—连云港，驻马店—淮南，武汉—皖南，南昌—浙南，赣州—厦门—福州交流工程	2×2091	2300

1.3 特高压交流输电线路施工特点

1.3.1 特高压交流输电线路基础施工特点

特高压交流输电线路适用于远距离大容量输电，由于远距离输电沿途水文及地理情况较为复杂，且采用空气绝缘，因此，与特高压相关的构件、基础等尺寸较大。相较于一般线路的基础，特高压线路基础存在以下特征：

(1) 基础尺寸大。特高压交流输电线路要求空气绝缘间隙大，为此，特高压交流输电线路的铁塔尺寸相应增加、高度也大幅增加，反映到铁塔根部，表现为铁塔根开尺寸增大。由于特高压交流输电线路往往采用数目更多的分裂导线，且导线的截面尺寸较大，所以导地线及铁塔的质量大幅增加。为承担线路增大的荷载，特高压交流输电线路的基础尺寸（深度及幅度）大幅增加，基础的混凝土方量随之增大，施工过程往往涉及大体积混凝土的浇筑施工作业，也提高了对模板支护、降水等施工技术及安全的要求。

(2) 基础型式多样化。特高压交流输电线路较长，往往要经过不同地区，这些地区或是山区、或存在冻土层、或是水稻田、或是土壤承载力薄弱的地带，这使得特高压交流输电线路的基础型式呈现多样化。

基于不同的水文、地质、气候条件，结合铁塔承担负载的情况，设计不同的线路基础。通常情况下，特高压交流输电线路基础设计情况见表 1-4。

表 1-4 特高压交流输电线路基础设计情况

水文、地质特点	适用基础型式
山区岩石地带	岩石掏挖和岩石嵌固基础
平原或丘陵地带	板式基础或台阶基础
软弱地质或地下水位较高	灌注桩基础或板式基础
山区或丘陵地带的特殊设计	高低腿基础
水稻田、陡地、盐田等特殊环境下的设计	防腐或基础主柱加高等设计
保证基础稳定的特殊设计	排水沟、护坡、防洪墙、挡土墙的话特殊设计
其他特殊要求	对应的专门设计措施

不同的基础具有不同的施工方法，从施工管理的角度出发，对应人员、机械、材料、工法、环境等各个方面也具有不同特征。如目前采用的对振动具有吸收作用的灌注桩基础在施工过程中往往需要大量的机械设备，工法的控制也相对要更加专业一些。

1.3.2 特高压交流输电线路铁塔施工特点

输电线路杆塔主要包括角钢塔和钢管塔。相对于一般输电线路，特高压交流输电线路大多采用钢管塔，塔高基本都在 100m 以上，跨越塔高度能达到 200m 以上。

根据特高压交流输电线路电气绝缘距离要求，特高压输电线路铁塔具有高度高、根开大、塔材重、承受荷载重等特点，故特高压交流输电线路的铁塔组立施工难度更大。一般情况下，特高压交流输电线路的铁塔组立形式主要有内悬浮抱杆组塔、落地通天抱杆组塔。

内悬浮抱杆组塔是一种传统组塔施工方法，主要包括内悬浮外拉线组塔施工和内悬浮内拉线组塔施工。其中，内悬浮外拉线组塔施工的主要特点在于施工过程中抱杆的稳定性较好，能吊装更重的构件，但对施工地形有一定要求。

落地通天抱杆组塔是一种具有安全、高效、自动化集成控制高的组塔施工方法。近年来，在特高压交流输电线路双回铁塔和大跨越铁塔的组塔施工中应用广泛，实际应用效果好。根据施工中作业臂能否垂直上下移动可以分为平臂抱杆和摇臂抱杆，根据施工中两侧臂能否同时起吊又可以分为单臂起吊和双臂同时起吊。在起吊臂作业范围内，可以实现全立体空间吊装，吊装高度通过调整抱杆标准节的数量来调节。抱杆的稳定通过附着拉线实现，这一优点使得落地通天抱杆特别适合组装塔身较高的铁塔。落地通天抱杆可以借助于智能监控、限位装置、过载保护等系统，实现安全吊装作业，相较悬浮抱杆更具安全性。

1.3.3 特高压交流输电线路架线施工特点

目前，特高压工程架线施工全面采用张力架线施工技术。特高压交流输电线路具有同相分裂子导线数量多、导线截面大等特点，这给特高压交流输电线路的张力架线施工带来了一些新的变化。

1. 同相分裂导线数量多

相较于其他输电线路，特高压交流输电线路导线往往通过增加分裂子导线的数目降低导线阻抗。目前，国内设计的特高压交流输电线路每相导线多采用八分裂导线，各子导线空间呈正八边形分布。子导线数量的增加给施工过程中带来以下主要变化：

(1) 施工过程中工器具的数量大大增加。由于子导线数量增加，每一相导线在施工过程中必然需要更多的工器具。如必须通过增加牵引机、张力机等设备数量来完成导线的张力展放。

(2) 张力架线过程的同步展放形式多样化。较多的子导线使得特高压交流输电线路的张力架线变得复杂。为实现一相导线的同步展放，必须采用多台牵、张设备。如，实现一相八分裂导线的展放，根据设备的具体情况，可以采用（4×“一牵二”）、（1×“一牵二”+1×“一牵六”）、（2×“一牵四”）等多种方式实现。重要的是，要实现同相导线的同步展放，必须进行牵、张设备的同步控制。在实际应用中，多采用集成的智能控制系统来实现不同牵张机之间的协调控制，各设备间通过协调控制可以实现同步牵张，同时各设备又可以独自操作，整个系统具有较大的灵活性。

(3) 平衡挂线及附件安装等过程更复杂。较多的子导线数量使得平衡挂线及附件安装的工器具数量大幅度增加，同时，高处作业过程也因同等空间内具有较多的子导线而变得更加复杂。在施工中，必须充分考虑较多子导线带来的变化，合理编制施工技术方案，有效控制施工安全与质量。

(4) 弛度的质量控制变得更加复杂。在输电线路施工中，弛度的控制至关重要，对建成后输电线路的安全运行具有重要影响。特高压交流输电线路较多的子导线无疑给施工中弛度的控制带来了较为不利的影响，同时，特高压交流输电线路的档距较大，使得这种影响进一步放大，在施工过程中，必须加强对导线特性及不断调整的弛度控制，以提升线路弛度标准。

2. 导线截面更大

为降低单根子导线的阻抗，提升线路输送电能的能力，特高压交流输电线路往往采用大截面导线，目前多采用截面为 630mm^2 的导线。导线截面的增加

带来了导线线径和导线单位质量的增加，为此，施工过程中，必须进一步提高各种工器具、设备的规格和承载力。工器具和设备的质量和体积随之增大，高空作业更加困难，同时，大截面导线压接质量的控制也是一项难题。

3. “三跨”施工难度大

特高压交流输电线路输电距离较长，在线路走廊内，不可避免地要跨越高速公路、高铁或已建成的输电线路。与传统线路相比，高压和超高压输电线路高度较高。在跨越超高压同塔双回输电线路和通航河流时，其高度往往给特高压交流输电线路的跨越施工带来极大的挑战。跨越施工，主要考虑安全目标的实现，从实际施工经验来看，多采用落地钢管跨越架或格构式钢梁跨越架+“封网”的跨越方法，安全性较高。跨越一般带电线路的施工，往往采取停电并设置防护网的施工方法，一方面，停电施工大大降低了跨越施工的安全风险，另一方面，搭设防护网可以充分利用特高压交流输电线路铁塔较高的优势。



第2章



施 工 材 料

2.1 基础施工材料

特高压交流输电线路建设首道大工序为基础施工，基础成品的质量取决于施工技术，也取决于基础原材料的质量。在基础施工过程中，原材料的质量要求是质量控制的首要工作。近年来，由于机械化施工的推广，商品混凝土在基础施工中的应用越来越广泛。无论现场搅拌的自制混凝土还是商品混凝土，混凝土的质量控制就是从原材料控制开始的。

基础施工过程涉及的材料有水泥、沙子、石头、钢筋、地脚螺栓等，进场前均需要对原材料进行检验，具备相应资质的检验机构出具材料合格证明文件才可以进入施工现场。施工现场需对混凝土现场检验其坍落度，符合要求方可进行浇制，浇制现场需按要求留存试块，按设计要求做同条件养护或标准条件养护，养护时间达到要求后对试块进行试验，如试块未达到标准，则现场基础需要返工浇制。

2.1.1 水泥

水泥，学术名称为粉状水硬性无机胶凝材料，加水搅拌后成浆体，能在空气中硬化或者在水中更好的硬化，并能把砂、石等材料牢固地胶结在一起。水泥成品如图 2-1 所示。

GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》对硅酸盐水泥的体积安定性、凝结时间、细度及胶砂强度、碱含量等提出了具体的技术要求。水泥体积安定性、凝

结时间的测定均是以标准稠度的水泥净浆为基础。所谓水泥净浆的标准稠度是以水泥净浆达到标准规定的稠度时所需拌合水量占水泥质量的百分数表示。硅酸盐水泥标准稠度用水量一般为 24%~30%。



图 2-1 水泥成品

1. 体积安定性

水泥的体积安定性是指水泥在凝结硬化过程中体积变化的均匀性。采用的试验方法为试饼法或雷氏法检验。在两种试验方法产生的结果不同时，以雷氏法为准。

试饼法是将标准稠度的水泥净浆做成试饼经恒沸 3h 后，用肉眼观察未出现裂纹，用直尺检查没有弯曲现象，则判定该水泥的体积安定性合格，反之为不合格。

雷氏法是测定水泥浆在雷氏夹中硬化沸煮后的膨胀值，当两个试件沸煮后的膨胀值平均值不大于 5.0mm 时，即判定该水泥体积安定性合格，反之，则为不合格。

水泥体积安定性不良是由于其熟料矿物组成中含有过多的游离氧化钙或游离氧化镁，以及水泥粉磨时所掺石膏超量。熟料中所含游离氧化钙或游离氧化镁都是在高温下生成，属于过烧氧化物，水化很慢，主要在水泥凝结硬化以后才慢慢开始水化，水化时产生体积膨胀，从而引起不均匀的体积变化，导致硬