

Design and Optimization of Special-Purpose Tower Crane for Large Tower of Transmission Line

Yongjun Xia, Jian Qin

China Electric Power Research Institute, Beijing
Email: xiayj@epri.sgcc.com.cn, qinjian@epri.sgcc.com.cn

Received: May 30th, 2015; accepted: Jun. 13th, 2015; published: Jun. 17th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Transmission line tower has the features of tower material weight, tower height high, difficulty in installation, high accuracy, complicated installation, complex construction environment and grave risk. Comprehensive consideration of weight, maneuverability, construction efficiency, site occupancy and other factors, to carry out professional design, the large special tower crane used for the large tower of transmission line is successfully developed. The special tower crane adopts the advanced technological scheme such as single jib, the top rotary structure, the assembling foundation, the balanced weight system, the chip standard section, the under jacking mechanism and the self-removal function. The special tower crane has the advantages of high efficiency, good safety, small space and personnel, etc. The special tower crane meets the need of the construction of the special high pressure engineering tower, and has been widely used in the construction of UHV power network.

Keywords

UHV Transmission Line, Tower Erection, Tower Crane, Single Jib, Design and Optimization

输电线路大型铁塔组立专用塔式起重机的设计与优化

夏拥军, 秦 剑

中国电力科学研究院，北京

Email: xiayj@epri.sgcc.com.cn, qinjian@epri.sgcc.com.cn

收稿日期：2015年5月30日；录用日期：2015年6月13日；发布日期：2015年6月17日

摘要

针对输电线路工程铁塔塔材重、塔身高、就位难度大、安装精度要求严、施工环境复杂、安全风险大的特点，综合考虑重量、可操控性、施工效率、场地占用等因素，开展专业化设计，研制成功输电线路组塔大型专用塔式起重机，采用单动臂上回转结构、装配式基础、平衡重系统、分片式标准节、下顶升机构、自拆卸施工等先进的技术方​​案，具有施工效率高、安全性好、场地和人员占用少等优点，满足了特高压工程铁塔的组立施工需要，已在特高压电网施工中得到广泛应用。

关键词

特高压输电线路，铁塔组立，塔式起重机，单动臂，设计与优化

1. 引言

铁塔组立施工是输电线路建设施工中工程量大、施工难度高、危险因素多的施工环节。目前国外主要使用组塔起重机、大型流动式起重机或直升机进行组塔施工，而国内组塔施工的主要设备是各种形式的抱杆。常规输电线路施工用抱杆(包括单抱杆、摇臂抱杆等)属轻小型简易起重设备，在施工中需要设置多道拉线，施工过程复杂，配合要求高，同时其质量参差不齐[1] [2]。随着输电线路电压等级的提高，铁塔的塔形尺寸显著增加，安装精度要求日趋提高，施工难度也越来越大，同时，国家对施工安全提出了更高要求，常规抱杆已无法满足组塔施工需要，迫切需要开发一种新型组塔设备。

2. 专用塔机特点

塔式起重机最早于二十世纪初出现在欧洲。经过一百余年的发展，塔式起重机的设计、制造、使用、维护等技术已相当成熟，涉及专业领域多、技术含量高、安全性好、操作灵活、就位精度高，各类塔式起重机已广泛应用于建筑、桥梁、火电等施工领域，成为现代起重施工的主力机械之一。

铁塔组立施工不同于一般的起重安装施工，常规塔式起重机并不适合于铁塔组立施工。

1) 常规塔式起重机立于建筑物一侧，通过刚性附着与建筑物相连，以保证塔式起重机在具有较高起升高度时的安全稳定。但输电线路铁塔柔性较大，塔式起重机如立于铁塔一侧，其对铁塔产生的附着力是铁塔如法承受的。因此，组塔设备必须立于铁塔中心，并与铁塔进行柔性附着。

2) 常规塔式起重机采用上顶升方式，即顶升机构位于塔身顶部，塔身增加或减少标准节均在塔身顶部完成，高空作业量大，对操作人员的要求高，不适于铁塔组立施工。

3) 常规塔式起重机作业周期长，一般使用现浇混凝土基础，费用高，不能重复利用，用后不易处理，达不到环保要求。输电线路铁塔一般位于野外，单基铁塔的组立周期约为4~7天，因此组塔设备需要频繁转场作业，且施工现场后要求恢复地貌。因此需要开发重量轻、安装方便、可重复使用的基础形式。

4) 常规塔式起重机的司机室一般安装在塔身顶部，起升机构和变幅机构均布置在位于回转机构以上的塔式起重机上部结构中，这就需要操作、维护人员登塔作业，不适合组塔施工。

5) 铁塔组立施工完成后，组塔设备需要通过已组立的铁塔顶部窗口、逐节降下拆除，这就要求组塔

设备上部结构必须收拢至较小的截面尺寸内，目前常规塔式起重机不具备此项功能。

综上所述，专用塔机应针对特高压输电线路铁塔组立施工的特点和要求创新研发设计，其应为立于铁塔中心、与铁塔进行柔性附着、采用上顶升方案和可重复利用式基础、单侧吊臂起吊、利用平衡臂平衡起重力矩、通过单吊臂俯仰及回转实现塔材就位的塔式起重机。

3. 专用塔机性能参数

皖电东送工程是我国首条同塔双回路特高压交流输电工程，西起安徽淮南，经皖南、浙北到达上海，线路全长 656 km，变电容量 2100 万千伏安，总投资 185 亿元。

皖电东送工程全线同塔双回路架设，采用钢管塔，其一般线路铁塔共计 1418 基，各类型铁塔占比如表 1 所示。

对全部铁塔进行了统计分析，其主要参数如表 2 所示。

对皖电东送工程铁塔分析后提出了专用塔机的主要性能参数要求。

3.1. 最大起重量

起重量是设计专用塔机的重要参数，其额定起重量由上横担的分段最大起重量及塔腿段单根塔材最大起重量中的大值确定。

根据统计分析，最大起重量在 3t 以下的铁塔共有 778 基，占总基数的 54.86%；最大起重量在 4 t 以下的铁塔共有 1192 基，占总基数的 84.06%；最大起重量在 5 t 以下的铁塔共有 1335 基，占总基数的 94.14%；最大起重量在 6.5 t 及以下的铁塔占总基数的 100%。

3.2. 最大起重力矩

当考虑铁塔塔腿段的吊装时，取铁塔根开对角线长度的一半加 1~2 m 余量后的值作为吊装塔腿段的工作幅度。结合吊装上横担的最大工作幅度，分析比较得出满足全塔吊装需要的最大起重量和工作幅度，进而计算出专用塔机起重力矩。

3.3. 专用塔机主要性能参数

为满足不同大小、不同型式铁塔的组立需要，提高专用塔机的施工针对性，采用系列化配置方案，确定研制两种型号的专用塔机，其主要性能参数见表 3。

4. 专用塔机技术方案

4.1. 基础

输电线路铁塔组立的工期较短，一般一基铁塔的组立时间约 4~7 天，因此专用塔机需要频繁转场施工。考虑到组塔施工的上述特点，专用塔机基础使用装配式基础方案。装配式基础由钢板焊接而成，内部成蜂窝状结构，主要用以承受专用塔机及吊重的重量。由于专用塔机可回转作业，塔身截面为正方形，因此基础也采用正方形结构，由 4 块或 16 块箱体状钢结构基础块拼接而成。对于不同型号的专用塔机，基础块的尺寸和厚度互不相同，从而达到最优化配置。基础块之间使用楔块连接，保证了基础块连接的紧密和受力的均匀传递，同时安装和拆卸快速方便。基础块具有体积小、重量轻(可由四人抬装)等优点，比较符合施工现场需要。

4.2. 塔身

为便于运输和存放，专用塔机标准节采用分片拼接形式，每个标准节可分拆为两个单片及若干腹杆，

Table 1. General line tower of Huainan to Shanghai project

表 1. 皖电东送工程一般线路铁塔

序号	铁塔类型	基数	占比
1	直线塔	1082	76.3%
2	耐张塔	54	3.8%
3	转角塔	258	18.2%
4	终端塔	6	0.4%
5	换位塔	18	1.3%

Table 2. Main parameters of general line tower of Huainan to Shanghai project

表 2. 皖电东送工程一般线路铁塔主要参数

序号	塔型	最大全塔高度(m)	最大塔腿段重量(t)	吊装塔腿段最大工作幅度(m)	拆分后最大横担段重量(t)	吊装横担段最大工作幅度(m)	最大起重量(t)	最大工作幅度(m)
1	直线塔	141.5	3.8	22.0	5.4	22.0	5.5	22.0
2	耐张塔	110.0	3.2	19.0	3.07	18.0	3.2	19.0
3	转角塔	118.5	6.1	22.0	5.49	24.0	6.5	24.0
4	终端塔	104.0	4.3	22.0	5.8	23.0	6.0	23.0
5	换位塔	100.0	2.1	15.0	2.89	18.0	4.0	18.0

Table 3. Main parameters of special-purpose tower crane

表 3. 专用塔机主要性能参数表

参数	型号	
	SXD50	SXD160
最大工作幅度(m)	20.8	24.0
最大工作幅度处最大起重量(t)	2.5	6.5
额定起重力矩(t·m)	50.0	160.0
最大起升高度(m)	150.0	150.0

各腹杆与单片用销轴连接，拼装好的标准节之间用 10.9 级高强度螺栓组连接。每个标准节设计有竖直爬梯，每 4 个标准节设有一处休息平台，且标准节之间具有互换性。考虑到专用塔机材料利用率、加工制造成本、远距离运输、顶升加节与施工安装等因素，标准节的高度定为 3 m。

4.3. 吊臂

由于专用塔机的起重量相对较小，吊臂主要承受轴向压力，所受弯矩较小，使用三角形截面可以满足要求，同时加工制造简单，且在同等载荷状态下，三角形截面吊臂的重量轻于四边形截面吊臂。因此专用塔机吊臂截面型式采用三角形。

4.4. 平衡臂

皖电东送工程全线采用钢管塔，高度高、横担重，对于大型钢管塔，为减轻专用塔机自重、提高专用塔机组塔的经济性，采用平衡臂型式。与无平衡臂方案相比，有平衡臂的塔机塔顶弯矩更小，因此对塔身的承弯要求低，可以大大减小塔身的截面尺寸，从而使整机的重量降低，有利于控制专用塔机成本，方便运输、现场搬运、安装、拆除和使用。

4.5. 顶升方案

综合比较各种顶升方案，专用塔机采用液压式下顶升方案(如图 1 所示)，具有以下优点：

- 1) 液压方式平稳可靠，速度调节能力强；
- 2) 塔身标准节在地面引进组装，操作简单、安装方便、避免高空作业；
- 3) 附着框通过性好，组装在地面完成；
- 4) 占用场地少，征地费用低。

4.6. 机构布置

专用塔机设置有起升机构、变幅机构各一套。综合考虑输电工程铁塔组立施工特点及施工人员操作，专用塔机起升机构设置在地面，以方便操作人员监控和维护，变幅机构布置在回转平台上。

4.7. 自拆卸方案

在铁塔组立完成后，吊臂及平衡臂是专用塔机拆除的关键，在拆除时将吊臂和平衡臂全部仰起，使专用塔机的最大截面宽度不超过铁塔窗口尺寸，从而可将专用塔机标准节逐节拆除，如图 2 所示。

5. 专用塔机结构优化

为确保专用塔机使用安全，并尽可能降低自重，满足现场使用、装拆与频繁转场要求，使用 SAP 软件建立了专用塔机的整体结构有限元模型，计算载荷如下：

1) 自重载荷

结构自重根据单元截面积、长度及质量密度自动生成，根据实际工况考虑自重冲击系数 $\varphi_1 = 1.1$ 。

2) 起升载荷

起升载荷 P_Q 为专用塔机起重量，按不同工作幅度下的额定起重量计算。专用塔机用于输电线路铁塔安装，工作级别低，并采用变频调速，起升动载系数为 $\varphi_2 = 1.15$ 。

3) 风载荷

风载荷计算式如下：

$$P_w = CpA \quad (1)$$

式中： C ——风力系数。

p ——计算风压。皖电东送工程地处江浙、上海地区，部分线段所处环境属沿海地区，工作状态下计算风压为 $p = 250 \text{ N/m}^2$ (计算风速 20 m/s)，非工作状态下风压取 $p = 800 \text{ N/m}^2$ (计算风速 36 m/s)。

A ——构件实体迎风面积。

4) 水平力

考虑吊重在受风和惯性力作用下产生 4° 的偏摆，则水平力：

$$P_H = P_Q \tan(4^\circ) \quad (2)$$

专用塔机计算模型如图 3 所示。

对专用塔机进行了力学计算，其吊臂最大应力 153 MPa，出现在幅度 2 m、吊重 4 t 工况下的吊臂根部主弦杆上，小于许用应力 257 MPa；塔身最大应力 112 MPa，出现在幅度 2 m、吊重 4 t 工况下的塔身底部标准节的主弦杆上，也小于许用应力 257 MPa，其他部件应力也满足设计要求[3] [4]。

6. 工程应用

专用塔机在皖电东送工程一般线路 14 标段、20 标段等工程中应用(如图 4 所示)，相比抱杆组塔具有



Figure 1. The under jacking mechanism
图 1. 下顶升机构



Figure 2. The self-removal function
图 2. 自拆卸功能

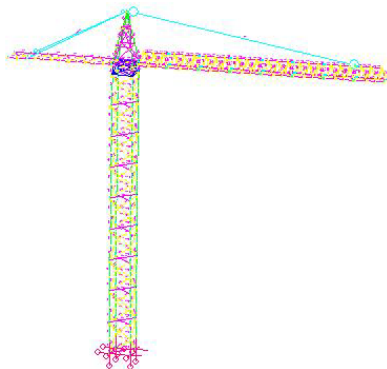


Figure 3. Finite element modele
图 3. 有限元模型



Figure 4. Erect tower of special-purpose tower crane
图 4. 专用塔机组塔

如下优点:

- 1) 专用塔机为单动臂上回转结构,具有受力简单、空间利用率高、操控简便、变幅灵活、穿绳方便、辅助工作少、吊装杆件无需对称布置、场地占用小等优点。
 - 2) 专用塔机单侧起吊,对场地的要求少、节约了施工场地占用。其起吊和提升系统占用场地小,且不影响其他地面施工,适用于山地、丘陵等狭小的组塔施工场地作业。
 - 3) 专用塔机使用分块式装配式基础,具有可重复利用、安装方便、对地基的地耐力要求较低、经济灵活、对环境破坏小等优点,适用范围广,满足了铁塔组立施工周期短,专用塔机需要频繁转场的要求,同时增加了专用塔机使用的灵活性、节约了施工成本、保护了环境。
 - 4) 专用塔机安装顶升机构,扩大了专用塔机的垂直吊装能力,提高了施工效率,简化了专用塔机的安装和拆卸。专用塔机采用的下顶升方案,由于顶升作业在地面完成,塔身顶起后在地面直接引入标准节(一次顶升过程可引入多个标准节),施工安全性高,操作方便,对操作人员的要求低,便于维护,且操作人员更容易掌握,利于推广普及。
 - 5) 专用塔机具有自拆卸功能,在铁塔组立完成后,将专用塔机吊臂和平衡臂收拢至塔头,使专用塔机的最大截面宽度小于铁塔窗口尺寸,即可将专用塔机逐节拆除
- 综上所述,专用塔机组塔效率高、安全性好,使用效果良好,得到了施工单位的普遍认可。

7. 结论

专用塔机采用分片式标准节、装配式基础,比流动式起重机具有更好的适应性,单动臂结构、下顶升机构较双摇(平)臂抱杆吊装灵活,效率高,整体技术已达国际领先水平。国家电网公司施工装备租赁公司先期采购了30套专用塔式起重机,已在特高压工程中得到广泛应用。

基金项目

国家电网公司科技项目资助,《特高压大型组塔装备的优化技术研究》,5442GC20140019。

参考文献 (References)

- [1] 李玉,任强,李家建(2012)1000 kV特高压输电线路组塔施工大截面抱杆的使用. *山西电力*, **11**, 9-13.
- [2] 戚柏林,戚竞波(2014)悬浮抱杆分段吊装输电线路钢管杆的工艺与实施. *浙江电力*, **4**, 60-63.
- [3] 中国电力出版社(2004)输电线路施工机具设计、试验基本要求. 中国标准: DL/T 875.
- [4] 中国标准出版社(1992)塔式起重机设计规范. 中国标准: GB/T 13752.