

DOI: 10.7672/sgjs2025180130

陆上风电机组塔筒吊装施工监测技术

李 刚

(中电建新能源集团股份有限公司南方分公司,广东 广州 510800)

[摘要] 随着陆上风电机组的功率增大,塔筒高度随之增大,塔筒吊装施工难度也相应增大。以甘肃省酒泉市肃北县一处风电场建设为例,重点针对风电塔筒吊装施工过程中吊装平台地基承载力、塔筒辅助起重机抬吊卸车及主辅起重机安装校核计算进行分析,并针对塔筒吊装过程中主起重机吊装性能开展动态监测,有效保障风电塔筒吊装施工作业安全性和施工精度。

[关键词] 风电;塔筒;吊装;监测;验算;施工工艺

[中图分类号] TM614

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0130-06

Monitoring Technology for Tower Hoisting Construction of Onshore Wind Turbine

LI Gang

(Southern Branch of China Electric Power Construction New Energy Group Co., Ltd.,
Guangzhou, Guangdong 510800, China)

Abstract: With the increase of the power of the onshore wind turbine, the height of the tower increases, and the difficulty of the tower hoisting construction increases accordingly. Taking the construction of a wind farm in Subei County, Jiuquan City, Gansu Province as an example, this paper focuses on the foundation bearing capacity of the hoisting platform, the lifting and unloading of the tower auxiliary crane and the installation and checking calculation of the main and auxiliary cranes during the hoisting construction of the wind power tower. The dynamic monitoring of the hoisting performance of the main crane during the tower hoisting process is carried out, which effectively guarantees the safety and construction accuracy of the hoisting construction of the wind power tower.

Keywords: wind power; tower; hoisting; monitoring; checking calculation; construction

0 引言

在“双碳”目标政策支持下,为减少不可再生能源消耗从而避免对自然环境的污染,众多新能源基础设施投入建设,其中风力发电是可再生能源发电中除水电以外,技术最成熟、环境影响最小、度电成本较低的清洁能源发电方式,现在成为我国战略性新兴产业和国家能源转型的重要组成部分^[1]。截至2023年底,全国新增装机14 187台,累计装机超过19.5万台^[2]。为最大限度降低风电成本,高塔筒和长叶片的大兆瓦风电机组逐渐成为行业主流。而塔筒作为固定和支撑风电机组与风轮的主要设备,其尺寸通常>90m,单体质量>70t,受现场环境风

速、涡激振动、主导风向、吊装机械荷载性能等影响^[3],吊装施工精度控制面临较大挑战。

吊装现场监测可对塔筒吊装施工过程进行实时记录与长期监控,保证风电机组吊装施工全过程符合设计规范要求^[4]。鉴于此,本文基于甘肃省酒泉市肃北县某风电场基地建设项目,结合风电塔筒各工况分析其吊装荷载计算结果,并对塔筒吊装监测技术进行研究,确保风电机组吊装过程顺利进行,为后续风电塔筒施工与安装提供参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

酒泉肃北马鬃山饮马峡B区风电项目位于甘肃省酒泉市肃北县马鬃山镇饮马峡风电场基地,场址为戈壁小丘陵区,低山和残丘地貌,场内海拔1 700.000~1 900.000m。风场距桥湾收费站约

40km,距玉门市约 95km。项目拟采用 25 台单机容量为 4.0MW 的 DEW-4000MW-165m-100m 型风力发电机组,规划总装机容量为 100MW。

1.2 工程施工难点

风力发电机组部件包括机舱、轮毂、叶片及塔筒等,其中机舱、轮毂及塔筒质量分别约为 112,36,59t,风机部件具有尺寸大、质量大的特点,对风电机组吊装精度控制存在较大影响,且吊装作业过程中存在一定危险性。

2 塔筒吊装工况验算

2.1 吊装平台承载力验算

主起重机在吊装运达机舱设备时质量最大,以此时主起重机状态作为验算基础。并取主起重机单侧履带板受力的极限状态为地基承载力验收依据。

机舱吊装时,勾头总重 121.53t,查询主起重机技术手册可知,主起重机基本质量为设备各部件质量之和(610t),主臂剩余臂架质量合计 78.6t。

为减少主起重机站位处场地的接地比压,在主起重机每侧履带板下铺设 3 块路基板(6m×3m),单块路基板重 5.5t。两侧路基板接地面积为 3×3×6×2=108m²。

吊装机舱时,主起重机总重为 121.53+610+78.6=810.13t。

由于作业过程中荷载不是平均分布,计算地基承载力时,不均匀荷载系数取值为 1.5,此时主起重机对地下压力为:

$$P = (mg/s) \times 1.5 = (810.13 + 6 \times 5.5) \times 1\,000 \times 9.8/108 \times 1.5 = 114\,759.36\text{Pa} \approx 115\text{kPa}$$

对主起重机站位位置压实后,采用轻型触探仪进行钎探,根据打入深度计算地基承载力。地基承载力计算公式 $R=(0.8N-2)\times 9.8$,其中 R 为地基允许承载力, N 为锤击次数(打入 30cm),解得当 R 为 115kPa 时 N 为 17 次。吊装施工方案采用当锤击 17 次、打入深度≤30cm 时,为地基承载力满足主吊对地基承载力要求验算依据。

经现场实际锤击试验,吊装地基承载力满足最大负重工况下风机吊装要求。

2.2 两机抬吊塔筒负荷率验算

本文主要针对 2 种情况(2 台辅助起重机抬吊卸车(1 台 SCC850A-6 型履带式起重机,1 台 STC800E5 型轮式起重机)、主辅起重机抬吊吊装最重段塔筒(1 台 SCC8000A 型履带式起重机,1 台 SCC850A-6 型履带式起重机))对塔筒抬吊进行验算。两机抬吊时,吊重总计算荷载 $Q_j = K_1K_2Q =$

$1.1\times 1.25Q$,其中 Q 为吊物与索具、吊具、钢丝绳自重总和。验算以最重段塔筒吊装为例,塔筒净重 60t。

2.2.1 辅助起重机抬吊卸车验算

吊索选用 2 根 25t×20m 扁平双眼吊带,重约 0.25t,2 台起重机钢丝绳总重考虑 1t,此时有:

$$Q_j = 1.1 \times 1.25 \times (60 + 0.25 \times 2 + 1) = 84.56\text{t}$$

SCC850A-6 型履带式起重机选择 6m 作业半径、12m 主臂、35.4t 配重施工工况,该工况下最大起重量 $Q_1 = 55\text{t}$;STC800E5 型轮式起重机选择 6m 作业半径、12.9m 主臂、支腿全伸、侧后方作业、25.2t 配重施工工况,该工况下最大起重量 $Q_2 = 59.5\text{t}$ 。

塔筒重心可近似按几何中心考虑,故重心位置为塔筒两端圆截面中心连线中间位置,吊点位于塔筒端面。两机抬吊卸车如图 1 所示。

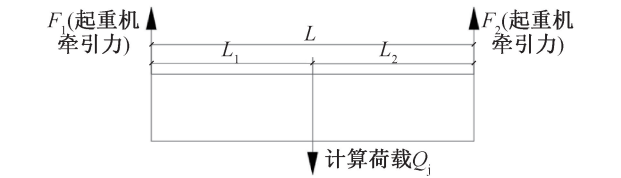


图 1 两机抬吊卸车($L_1=L_2$)

Fig. 1 Double cranes lifting and unloading truck ($L_1=L_2$)

依据规范要求分别对 2 台起重机负荷量分配进行校核计算。 $Q_j = 84.56\text{t} < (Q_1 + Q_2) \times 75\% = 85.88\text{t}$,满足规范要求。由图 1 可知, $F_1 = F_2 = Q_j/2 = 74.42/2 = 37.21\text{t}$, $F_1 = 37.21\text{t} < Q_1 \times 80\% = 55 \times 80\% = 44\text{t}$, $F_2 = 37.21\text{t} < Q_2 \times 80\% = 59.5 \times 80\% = 47.60\text{t}$,均满足规范要求。

2.2.2 主辅起重机抬吊安装验算

塔筒安装时,主起重机为 1 台 SCC8000A 型履带式起重机,辅助起重机为 1 台 SCC850A-6 型履带式起重机。抬吊时,所选吊索和起重机钢丝绳总重考虑与上述塔筒卸车验算保持一致,即计算荷载 $Q_j = 1.1\times 1.25\times (60+0.25\times 2+1) = 84.56\text{t}$ 。

SCC850A-6 型履带式起重机选择工况:6m 作业半径、12m 主臂、35.4t 配重进行计算,该工况下最大起重量(Q_1)为 55t。主辅起重机抬吊方法如图 2 所示。

力矩平衡原理如下:

$$F_1L_1 = F_2L_2 \tag{1}$$

$$L_1 = (L/2 - A\tan \beta)\cos \beta \tag{2}$$

$$L_2 = (B\tan \beta + L/2)\cos \beta \tag{3}$$

式中: L 为塔筒总长度; L_1, L_2 为重心位置到吊点的力臂长度; β 为塔筒抬升过程中的倾角; A, B 为塔筒顶面和底面半径。

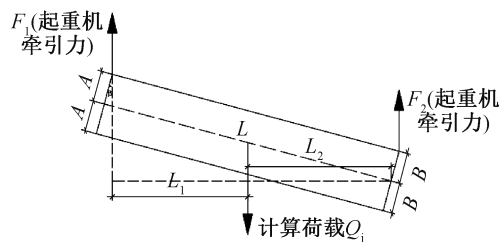


图 2 主辅起重机抬吊吊装

Fig. 2 Main and auxiliary cranes lifting hoisting

由分析可知,随着塔筒倾角增大, F_1 端提供的牵引力越大, F_2 端提供的牵引力越小,当塔筒水平时, F_2 端需提供的牵引力达到最大,此时对该位置的辅助起重机起重能力要求最高。

当塔筒达到水平状态时, $Q_j = 84.56t < (Q_1 + Q_2) \times 75\% = (169 + 55) \times 0.75 = 159.75t$,满足规范要求。

由图 2 可知, $F_1 = F_2 = Q_j / 2 = 84.56 / 2 = 42.28t$,
 $F_2 = 42.28t < Q_1 \times 80\% = 55 \times 80\% = 44t$,满足规范要求。

2.3 塔筒吊装施工关键技术

首段塔筒吊装前会先完成安装塔基电气柜、变流器和塔架通风系统等设备,然后进行二段塔筒吊装。

2.3.1 塔筒吊装准备

1) 检查塔筒基础,清洁基础法兰表面,检查锚栓数(基础法兰孔数)与塔筒底部法兰孔数吻合,确认锚栓螺纹无损伤、锚杆光滑无异物(混凝土飞溅物等)。

2) 检查基础上表面是否有划伤、划痕,并检查是否做好塔筒入口位置标记。在基础上表面的圆周上均布标 12 个测点,要求最高与最低测点高差 $\leq 2\text{mm}$,不允许外翻现象。

3) 检查基础上法兰平面度和弓形变形。①平面度最大允许变形,90°范围内为 0.5mm,总变形量为 1.5mm;②最大允许弓形变形,外侧为 0,内侧为 1mm;法兰面若有凸点应打磨平整。

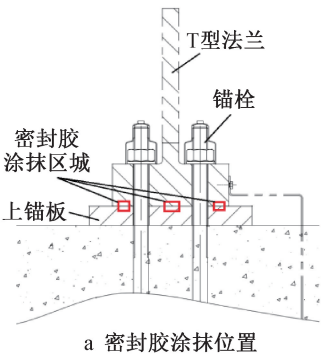
4) 确认基础平台和变流器、控制柜等已安装完毕并验收合格。

5) 使用清洗剂清理干净塔筒底段下法兰面、基础法兰表面和法兰孔,根据需要进行补漆。

6) 在基础法兰面上螺孔内外圈涂抹密封胶,如图 3 所示。

2.3.2 塔筒吊具安装

塔筒吊装使用专用吊具,上法兰安装 4 个专用吊耳,下法兰安装 2 个专用吊耳,均通过特制高强螺栓组件与塔筒法兰连接(根据法兰孔尺寸搭配相应



b 密封胶涂抹实际情况

图 3 塔筒底段与锚板涂抹密封胶

Fig. 3 Applying sealant to the bottom section of the tower and anchor plate

转换衬套)。为控制塔筒方向,每段塔筒起吊前需在下法兰端系 2 根牵引绳。在安装过程中,塔筒均需首先进行平吊和翻转,然后吊装到位。塔筒吊装使用 2 台起重机完成,主起重机吊装塔筒上法兰,辅助起重机吊装塔筒下法兰。塔筒吊具安装位置如图 4 所示。

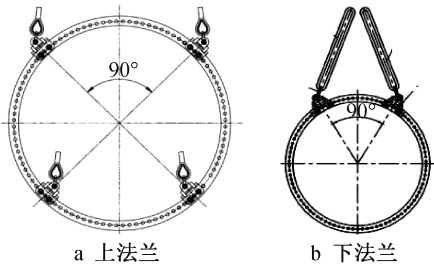


图 4 塔筒吊具安装位置

Fig. 4 Installation position of tower crane

2.3.3 首段塔筒吊装

用主起重机起吊塔筒上法兰,辅助起重机起吊塔筒下法兰。对塔筒底段进行抬吊翻身。2 台起重机协调工作,勿使法兰与地面接触,直至塔筒竖起,当下法兰面距地面约 300mm 时,拆卸下法兰吊具。在塔筒底段就位过程中,使用牵引绳控制塔筒底段位置,确保塔筒底段不会撞到塔基平台上的柜体,如图 5 所示。主起重机吊装塔筒底段慢慢接近塔基基础,将二者轴向基本对正。

缓慢下降塔筒底段直至安装人员能方便地旋转塔筒,初步找正塔筒底段和柔塔转接段的轴向位



图 5 塔筒底段安装

Fig. 5 Installation of tower bottom section

置,拆除牵引绳。然后继续缓慢下降塔筒底段,待塔筒法兰底面与基础法兰(锚栓)间距离为 30~50mm 时,调整塔筒位置,使塔筒底段的入口标记线与塔筒基础的入口位置标记线对齐,穿入螺栓或锚栓固定塔筒轴向位置。当所有锚栓(螺栓)全部穿入后,完全放下塔筒底段,直至两法兰面接触良好。再次确认塔筒底部平台缺口中心线(进门处)与塔筒入口中心线重合,且塔筒门与主风向呈 90°。

2.3.4 紧固螺栓

安装塔筒用的高强螺栓连接副由 1 个螺栓、螺母和 2 个垫片构成,必须使用统一供应商;垫片上的倒角必须朝向螺母和螺栓头,螺母打印标记端朝向连接副的外侧。柔塔转接段对准基础环后,穿入螺栓,安装螺母,然后用液压力矩扳手分 3 级(50%-75%-100%)呈 M 字形对称进行预紧。所有螺栓预紧完成后,用记号笔画防松标识线。塔筒螺栓紧固顺序如图 6 所示。

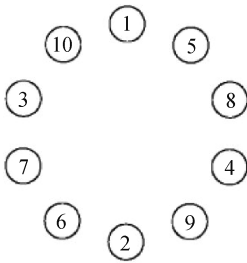


图 6 螺栓紧固顺序

Fig. 6 Bolt tightening sequence

待塔筒底段的连接螺栓全部以不小于 50% 的额定扭矩预紧后,拆卸塔筒吊具。在吊具拆除后继续对塔筒螺栓进行预紧,直到 100% 预紧力。螺母拧紧后,螺栓头部应露出 2~3 个螺距,否则必须更换螺栓。

2.3.5 安装其余各段塔筒

利用 800t 履带式起重机按以上各程序重复进行,完成塔筒 2~4 段的吊装作业。不同之处为:①塔筒各段间对接合拢所用液压工具规格不同;②除顶段塔筒上法兰外,其余各段塔筒上法兰均需

涂抹密封胶。塔筒各段的连接螺栓和工具可随塔筒一起吊运到结合面位置,但必须放置在可靠的箱体内存并固定好,不能影响塔筒吊装。塔筒各段吊装后需安装塔筒与塔筒间爬梯连接件、接地电缆、柔性连接器和母线槽连接段等零部件。

2.3.6 安装塔筒各段间附件

每段塔筒安装完成后随即安装与下段塔筒间的爬梯连接件、接地电缆、柔性连接器、母线槽连接段零部件。

塔筒接地分柔性连接器和接地线 2 种形式,柔性连接器安装时上下两端面间距 5mm,需打磨光滑并进行圆角处理,连接处要打磨光亮。每安装一段塔筒就必须安装该段与前一段间的柔性连接器,安装完成后才能进行下一段塔筒吊装。塔筒柔性连接器安装如图 7 所示。

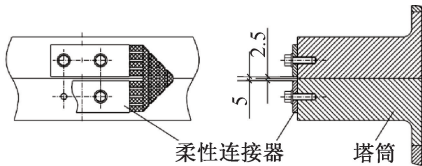


图 7 塔筒柔性连接器安装

Fig. 7 Installation of tower flexible connector

连接塔筒梯子并检查安全装置能否自由滑动,在适当位置重新调整安全导轨。滑轨间的安装接缝间隙应≤3mm,错位≤1mm。若对接的安全导轨间隙过大,必须补充间隙,防止安全装置脱落。由于安全导轨涉及人员工作安全,此项工作必须严格执行。

3 塔筒吊装监测技术

3.1 吊重监测

吊重监测的基本原理在于通过吊装设备上装配传感器,实现对吊装过程中质量、力矩、角度等关键参数的实时追踪与监控^[5-7]。这些传感器能精准捕捉实时数据,并将其传输至数据处理设备。随后,数据处理设备对这些数据进行深入分析与精确计算,从而获取吊装过程中的各项关键参数指标。

其中,吊重传感器作为核心部件,主要负责感知吊装过程中的质量、力矩、角度等关键参数。为确保数据准确性,这些传感器通常被安装在吊装设备的关键位置,如吊钩、起重臂等,以便能实时、准确捕获相关数据。吊重传感器如图 8 所示。

在获取数据后,利用计算机、服务器对采集到的数据进行深入分析与计算。通过这一过程,准确获取吊装过程中的各项参数指标,为吊装作业安全与质量提供有力保障。



图 8 吊重传感器
Fig. 8 Lifting weight sensor

施工现场在吊装过程中由于吊装角度、设备调整、吊装速度变化等因素影响会导致吊重数据在时间轴上存在明显波动,并在特定时间段内保持稳定。为探究塔筒吊重与吊装力矩关系,对首节塔筒吊装过程中起吊质量与设备起重臂间的关系进行分析,如图 9 所示。由图 9 可知,吊装过程中起吊力矩呈先减小后增大再到平稳的趋势,塔筒起吊初始力矩为 $90\,638.514\text{kN}\cdot\text{m}$,起吊 5min 内所测力矩减小至 $88\,120.777\text{kN}\cdot\text{m}$ 后迅速增大至 $92\,317.005\text{kN}\cdot\text{m}$ 。这是因为首节塔筒吊装采用主辅起重机抬吊吊装,在起吊之初由于惯性作用会产生“超重”现象造成力矩增大,然后主辅起重机协同运动减小主起重机所受荷载。在起吊 5min 后由主起重机负责将塔筒吊至预定位置,吊重传感器所测力矩趋于平稳。

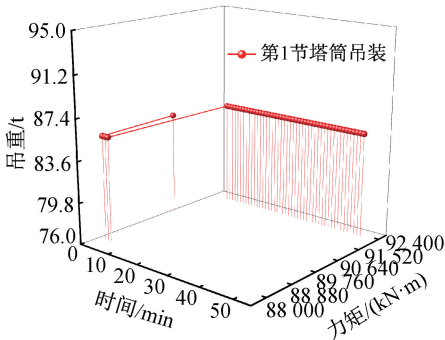


图 9 主起重机吊重-力矩关系
Fig. 9 Lifting weight-torque relationship for main crane

吊重和力矩间存在一定的正相关性,即随着吊重增加,力矩也相应增加。操作员必须实时监控,确保吊装作业平稳进行。通过实时监测吊装过程中的各项参数,展示第 1 节塔筒吊装过程中吊重与力矩成正比变化的关系,通过该传感器监测吊重和力矩变化可有效避免超载、超力矩等危险情况发生,从而确保吊装作业安全进行。

3.2 倾角监测

风电塔筒体积大、质量大,在吊装过程中易因风力、吊装设备操作不当等因素出现倾斜,此外塔筒自重会对地基产生较大压力。如果地基出现不均匀沉降,会导致塔筒倾斜。为实时掌握塔筒的倾

斜状态,避免因倾斜过大导致塔筒与周围设备或结构发生碰撞,甚至发生倾覆事故,对塔筒主起重机进行倾角测量,每个起重机支腿均安装倾角传感器。倾角传感器同时配置支模测斜探头,其采样精度为 0.01° ,分辨率为 0.001° ,采样频率和输出速率均为 5Hz,倾角传感器如图 10 所示^[8]。



图 10 倾角传感器
Fig. 10 Inclination sensor

DEW-4000MW-165m-100m 型风力发电机组塔身由 4 节塔筒组成,其中首节塔筒质量最大。为验证塔筒吊装过程中起重机稳定性,选取首节塔筒吊装过程中主起重机倾角时程变化关系进行分析,如图 11 所示。

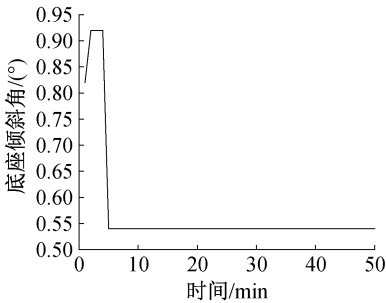


图 11 主起重机底座倾角时程变化
Fig. 11 Time history change of main crane base inclination angle

由图 11 可看到,吊装初始时主起重机受到塔筒惯性作用影响,其支腿底座倾角出现小幅度增大,主起重机倾角增大至 0.95° 。随着吊装工作进行,主起重机的倾角回落至 0.5° 并在较小范围内波动,主起重机的倾角在一个较小范围内波动,可见吊装工况符合吊装验算结果,塔筒吊装无倾斜风险。

3.3 高度监测

塔筒吊装时,高度监测可实时对比吊装高度与预定高度,及时发现并纠正偏差,确保塔筒能准确安装到位。这对于后续风电机组正常运行和整体结构稳定性至关重要。高度传感器采用卷扬机同步量程方法的原理^[9],通过测量卷扬机转动量程,间接获取吊缆释放长度,以实现塔筒吊装高度变化的高精度测量。为探究吊装过程中塔筒高度变

化趋势,在主起重机卷扬机轮盘上设置高度传感器,如图 12 所示。

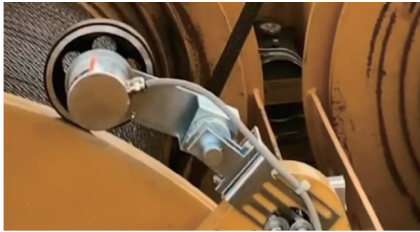


图 12 主起重机吊钩高度监测

Fig. 12 Main crane hook height monitoring

主起重机吊钩高度变化趋势如图 13 所示。由图 13 可知,在初期快速上升阶段(0~10min)吊钩高度有较明显上升趋势,吊钩高度从约 31.69m 迅速增加到 31.73m。这表明吊装操作在开始时吊钩高度快速增加,吊装物体刚开始离地。

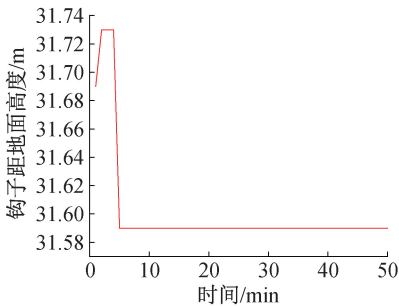


图 13 首段塔筒吊装过程中吊钩高度变化趋势

Fig. 13 The change trend of hook height during the hoisting process of the first tower

在吊装 10~40min,吊钩高度趋于平稳,无显著变化,说明该阶段吊装过程稳定,设备在吊装过程中达到平衡状态,吊钩高度保持在相对稳定范围内,操作员能有效控制吊装物体上升并保持稳定。

当后期出现轻微波动时,表明吊装过程中细微调整或外部环境因素影响(如风速、设备微小误差等)导致吊钩高度略有波动。这种轻微波动通常正常,但仍需实时监控,确保吊钩高度不超出安全范围。

4 结语

塔筒作为风电机组的核心组成部分,其重要性不言而喻。本文基于甘肃省酒泉市肃北县某风电场基地建设项目中风力发电机组的实际施工经验,针对风机部件尺寸大、质量大的特点,对风电塔筒吊装作业过程中吊装平台地基承载力、塔筒辅助起重机的装卸车及主辅起重机安装校核计算进行深入分析,并针对塔筒吊装主起重机吊装性能开展动

态监测,有效确保了风电塔筒吊装施工精度与施工作业安全性,其研究结论可为类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 施鹏飞. 中国风电产业发展现状和展望[C]//国际清洁能源论坛(澳门)论文集,2018.
SHI P F. Development status and prospect of China's wind power industry [C]//International Clean Energy Forum (Macao) Papers, 2018.

[2] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2023 年中国风电吊装容量统计简报[J]. 风能,2024(5):52-67.
Wind Energy Committee of China Renewable Energy Society. Statistical brief report on wind power hoisting capacity in China in 2023[J]. Wind energy,2024(5):52-67.

[3] 王岳峰. 风电机组现场安装技术分析[J]. 机械工程与自动化,2023(1):187-189.
WANG Y F. Technical analysis of wind turbine on-site installation [J]. Mechanical engineering & automation,2023(1):187-189.

[4] 孟欣,许川川. 风电机组混合塔筒施工关键技术[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(S1):170-173.
MENG X,XU C C. Key technology of hybrid tower construction for wind turbine [J]. Engineering journal of Wuhan University, 2021,54(S1):170-173.

[5] 肖厚全,高汇川,裴绍军. 风电机组混塔施工技术与管理[J]. 风能,2024(1):84-89.
XIAO H Q,GAO H C,PEI S J. Construction technology and risk control of wind turbine mixed tower[J]. Wind energy,2024(1):84-89.

[6] 张彪,朱勇,李俊难,等. 陆上风电建设项目安全高效施工的关键问题[J]. 建筑施工,2022,44(5):1109-1111.
ZHANG B,ZHU Y,LI J N,et al. Key issues of safe and efficient construction of onshore wind power construction projects [J]. Building construction,2022,44(5):1109-1111.

[7] 新疆金风科技股份有限公司,北京金风科创风电设备有限公司,内蒙古恒利大型设备安装工程有限公司,等. 风力发电机组 吊装安全技术规程:GB/T 37898—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
Xinjiang Goldwind Technology Co., Ltd., Beijing Goldwind Kechuang Wind Power Equipment Co., Ltd., Inner Mongolia Hengli Large Equipment Installation Engineering Co., Ltd., et al. Wind turbines—safety technical regulation for hoisting: GB/T 37898—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China,2019.

[8] 焦玉亮,周刘俊. 风机设备吊装技术研究[J]. 中国高科技,2024(6):123-125.
JIAO Y L,ZHOU L J. Research on hoisting technology for wind turbine equipment [J]. China high and new technology, 2024(6):123-125.

[9] 李艳鹏,李连川. 电厂建设中大型设备的吊装技术分析[J]. 机电信息,2020(36):76-77.
LI Y P,LI L C. Analysis on hoisting technology of large equipment in power plant construction [J]. Mechanical and electrical information,2020(36):76-77.