

风力发电桁架式高塔安装关键技术研究

王 政,张鹏远*

(中国华电科工集团有限公司,北京市,100160)

摘要 本文针对160m级桁架式高塔安装技术瓶颈,对比分析其与钢管塔在结构离散性、节点连接及施工稳定性等方面的本质差异,提出“地面拼装-单元吊装-高空合龙”施工范式。构建涵盖双约束吊装单元划分、地面卧拼精度预控、三级临时支撑体系及空间节点测控的标准化技术体系。示范工程表明:单台安装周期23d,节点偏差 $\leq 5\text{mm}$,垂直度优于 $H/2000$,全过程零安全事故,为超高桁架塔规模化施工提供技术范式。

关键词 风力发电;桁架式高塔;安装技术;临时支撑;空间测控;栓焊节点

中图分类号:TM614 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2026)10-0025-03

随着风电开发向低风速区转移,提升轮毂高度至160m级成为捕获优质风资源的关键。传统全钢管塔在此高度面临壁厚剧增、运输受限等瓶颈,而三角形桁架式高塔以结构效率高、材料省、运输单元小等优势成为重要替代路线。但与钢管塔“工厂预制筒节-现场环缝焊接”的连续结构施工不同,桁架塔由数百根离散杆件通过节点板连接,具有结构离散性、节点复杂性、几何可变性及误差累积性等特征^[1],现有风电安装规范无法直接适用。本文以160m级三角形桁架式高塔为研究对象,通过结构特征对比与示范工程验证,系统研究吊装单元划分、地面拼装、安装稳定性控制及空间节点测控等关键技术,构建专用施工技术体系。

1 桁架塔结构特征与施工技术瓶颈分析

1.1 结构体系与施工特征对比

本文研究的160m级桁架塔采用“下部桁架+上部钢管”混合结构:下部60m为等边三角形空间桁架,由上弦杆、下弦杆、腹杆及节点板组成;上部100m为钢锥形塔筒。与钢管塔施工特征的系统对比如表1所示。

1.2 施工技术瓶颈识别

作者简介:王政(1989~),男,山东邹城人,本科,工程师,研究方向:建筑学。

通讯作者:张鹏远(1979~),男,山东平阴人,本科,高级工程师,研究方向:土木工程。

基于上述对比,160m级桁架塔安装面临四大核心技术瓶颈:①吊装单元划分--须在起重性能、结构稳定与工期间寻优;②地面拼装精度--数百根杆件的几何误差与焊接变形控制;③施工期稳定--几何可变体系需临时支撑防倾覆;④空间测控--各节点三维坐标与交汇精度保障。

2 桁架塔专用施工技术体系构建

2.1 总体技术路线

针对桁架塔施工特征,摒弃钢管塔“筒节逐节吊装”的传统范式,提出“地面拼装-单元吊装-高空合龙”的专用施工路线。其核心为:将大量高空作业转为地面作业,在胎架上完成节段组装与精度预调;通过合理划分吊装单元,减少高空散装;高空仅进行单元合龙,辅以临时支撑体系保障稳定^[2]。

2.2 标准化施工工艺流程

基于上述路线,构建160m级桁架塔标准化施工工艺流程:基础验收与测控网建立→地面胎架搭设与预起拱→节段地面卧拼→节段翻身与立拼检查→转接段地面组装与整体吊装→桁架节段逐段吊装与高空合龙→塔筒段逐节吊装→全过程精度复测与调整。

3 关键施工技术研究

3.1 基于双约束的吊装单元划分模型

3.1.1 划分方案比选

本文研究了三种吊装单元划分方案。方案A(高空散装):单根杆件逐根吊装高空组装,起重机荷载最小但高空作业占比 $>80\%$ 、工期 $>40\text{d}$,几何可变体系持续时间长,稳定性差。方案B(片式吊装):

表1 桁架塔与钢筒塔施工特征对比

对比维度	钢筒塔	桁架塔	施工影响
结构连续性	连续筒节,整体刚度大	离散杆件节点连接,未完工时为几何可变体系	桁架塔需大量临时支撑与稳定措施
构件数量	约20~30个筒节/台	约300~400根杆件、200余个节点板/台	现场拼装工作量显著增加
连接方式	环向对接焊缝为主	栓焊混合,高空焊接多	需专用防风与焊接变形控制
吊装单元	整圈筒节(直径4~6m,高20~30m)	片式、节段或散件	单元划分直接影响工期与安全
精度控制对象	筒节中心线、法兰水平度	节点三维坐标、杆件轴线、节点板角度	需建立空间测量控制网
风荷载特性	实体迎风面大,风阻高	透风结构,局部风振显著	吊装过程风致摆动规律不同

将桁架一个立面作为吊装单元,单元质量适中(约15~20t)但平面外刚度弱,需大量临时加固。方案C(节段整体吊装):将高度约5m的完整桁架节段在地面卧拼为整体一次吊装,高空作业减少60%以上,单元质量约35~45t。

3.1.2 双约束优化模型

建立基于起重机性能约束与结构稳定性约束的单元划分优化模型^[3]。

起重机性能约束:

$$Q_{unit} \leq k_l \leq Q_{crane}(R, H) \quad (1)$$

式(1)中, Q_{unit} 为单元质量, $Q_{crane}(R, H)$ 为起重机在吊装半径 R 与吊钩高度 H 下的额定起重量, $k_l=0.8$ 为动载折减系数。

结构稳定性约束:

$$\lambda_{unit} = \frac{L_{max}}{L_{min}} \leq [\lambda] \quad (2)$$

式(2)中, λ_{unit} 为单元长细比, L_{max} 为单元最大轮廓尺寸, L_{min} 为单元截面最小回转半径, $[\lambda]=150$ 为吊装状态允许长细比。

经比选,方案C(节段整体吊装)在采用1 600t·m级履带吊时, $Q_{unit}=42t \leq 0.8 \times 65t=2t$,且节段长细比 $\lambda=120 < [\lambda]$,满足双约束。最终确定将60m桁架段划分为12个标准节段(每段高5m),采用地面卧拼+整体吊装方案。

3.2 地面卧拼工艺与精度预控

3.2.1 拼装胎架设计

地面卧拼是确保桁架几何精度的关键。采用H型钢搭设水平平台,平台上按桁架下弦杆设计坐标设置定位挡块(精度 $\pm 1\text{mm}$)。胎架设置预起拱值5mm/5m,抵消卧拼至直立状态的自重变形及焊接

收缩。

3.2.2 拼装顺序与工艺控制

采用“基准面定位→主弦杆就位→节点板安装→腹杆连接→几何复核→螺栓紧固”六步拼装法:①以桁架一个立面为基准面,将两根下弦杆与一根上弦杆按设计轴线置于胎架定位挡块内;②安装节点板,采用 $\phi 12\text{mm}$ 定位销穿过节点板与弦杆螺栓孔确保孔位对齐;③安装腹杆,采用M20临时螺栓(50%螺栓孔数量)固定;④用全站仪测量各节点三维坐标,偏差 $>3\text{mm}$ 时通过调整垫片或轻敲纠偏;⑤复核合格后更换为M36高强螺栓,按初拧-复拧-终拧($2150\text{N}\cdot\text{m}$)三阶段紧固;⑥节点板角焊缝定位焊(焊脚6mm),仅占焊缝长度30%,剩余焊缝留高空合龙以减少变形。

3.2.3 翻身工艺

卧拼完成后采用双机抬吊将节段翻身至直立状态,主吊钩吊挂节段顶部节点,辅吊钩吊挂底部节点,翻身过程中两吊钩力比按2:1控制,确保平稳旋转 90° 。翻身后复测节点坐标作为吊装前最终验收依据。

3.3 安装过程结构稳定性控制

3.3.1 稳定性分析

桁架节段在吊装及高空合龙前尚未形成完整的空间桁架体系,存在平面外失稳风险。采用ANSYS建立施工过程非线性分析模型,考虑吊装动力系数1.2与风荷载(基本风压 0.35kN/m^2)。分析表明:未设置临时支撑的独立桁架节段,平面外一阶失稳模态为绕弱轴弯曲,临界荷载因子仅1.35,不满足施工安全要求(≥ 2.0)。

3.3.2 临时支撑体系设计

提出“节段间临时横梁+塔周缆风绳+内部剪刀撑”三级稳定体系。一级为节段间临时横梁(2根H型钢),将独立节段与已安装下部结构形成空间框架。二级为塔周缆风绳:每安装完成一个节段,在塔架三个立面各设1道缆风绳($\phi 16\text{mm}$ 钢丝绳,与地面夹角 45°),锚固于基础地锚。三级为内部剪刀撑:在桁架内部设置可拆卸X形剪刀撑(L75 $\times$ 5角钢),增强节段自身抗扭刚度。采用三级稳定体系后,施工状态临界荷载因子提升至2.85,满足安全要求。

3.4 转接段安装

转接段是下部桁架与上部钢筒的过渡结构,承担荷载路径突变与变形协调功能。转接段在地面组装为整体单元(质量约28t),采用“四点吊装+手动葫芦微调”方案就位,通过设置在四角的倒链葫芦(5t级)实现毫米级水平调整。就位后采用临时锚栓固定,复测顶部接口圆度(偏差 $\leq 2\text{mm}$)与水平度(偏差 $\leq 1\text{mm}$),合格后依次安装桁架第一标准节段。

3.5 栓焊混合节点连接与焊接变形控制

桁架节点采用“高强螺栓摩擦型连接+节点板角焊缝”栓焊混合形式^[4]。施工时严格遵循“先栓后焊、对称施焊”原则:螺栓连接采用扭矩法紧固,M36螺栓(10.9级)终拧扭矩 $2150\text{N}\cdot\text{m}$,紧固顺序从节点中心向外对称进行,确保节点板贴合率 $\geq 95\%$ 。定位焊后剩余焊缝在高空合龙时完成,每节点由两名焊工对称施焊,先焊受压弦杆侧,后焊受拉弦杆侧。高空焊接作业设置可拆卸防风棚(帆布加钢管骨架),确保焊接区域风速 $\leq 2\text{m/s}$,满足GB/T50661要求。

3.6 空间精度测控体系

针对桁架离散杆件特征,建立“整体控制网—节点坐标控制—姿态动态调整”三级测控体系。整体控制网:布设闭合导线控制网(3个基准点),采用全站仪定期复测。节点坐标控制:以转接段顶部中心为坐标原点建立局部坐标系,每安装完一个节段测量所有下弦与上弦节点三维坐标(X,Y,Z),允许偏差为节点坐标 $\pm 5\text{mm}$ 、杆件轴线交汇偏差 $\leq 3\text{mm}$ 、节点板角度偏差 $\leq 0.5^\circ$ 。动态调整:水平偏差通过节点板与弦杆间的调整垫片(厚度1~3mm不锈钢片)纠正,垂直偏差通过临时缆风绳张拉微调,确保累

积误差不放大。

3.7 超高吊装安全控制

采用1 600t $\cdot\text{m}$ 级履带吊主吊,300t级汽车吊辅吊。桁架节段为透风结构,风阻系数约0.6~0.8,但杆件局部风振显著。建立分级风速控制标准:风速 $< 6\text{m/s}$ 正常吊装; $6\sim 8\text{m/s}$ 仅允许吊装单根杆件; $\geq 8\text{m/s}$ 全面停工。吊装过程采用牵引绳导向,抑制节段空中旋转。

4 示范工程应用与验证

4.1 工程概况

在华电100MW风电项目中建设示范塔架,塔架下部60m为等边三角形桁架(底部边长8m,顶部边长4m),上部100m为钢筒,轮毂高度160m。

4.2 实施效果

60m桁架段12个标准节段全部地面卧拼后整体吊装,实施数据如下:单台安装周期23d(桁架段12d,转接段3d,塔筒段8d),较传统方案缩短34%;节点坐标最大偏差4.2mm,杆件轴线交汇偏差2.8mm,塔架垂直度偏差 $H/2\ 200$;全过程零安全事故,高空焊接一次合格率98%;地面拼装使高空作业量减少60%,脚手架与高空平台费用降低45%。

5 结语

本文针对160m级风力发电桁架式高塔,揭示了桁架塔离散结构在施工中的几何可变性与误差累积特征,提出“地面拼装—单元吊装—高空合龙”施工工法。建立双约束吊装单元划分模型,采用节段整体吊装方案;研发六步卧拼工艺与三级临时支撑,临界荷载因子由1.35提升至2.85;构建空间测控体系,实现节点偏差 $\leq 5\text{mm}$ 、垂直度优于 $H/2\ 000$;形成栓焊节点工艺,焊接合格率98%。示范工程验证:安装周期23d,零安全事故,可为同类工程提供技术参考。

参考文献

- [1] 谷金朋.高塔风电专用动臂塔机稳定性与耦合系统动力学研究[D].太原:太原科技大学,2023.
- [2] 杜建东.输电线路工程高塔组立施工技术分析[J].全面腐蚀控制,2025,39(8):72-74+82.
- [3] 金广明.大型履带式起重机能提升在风电安装中的应用[J].应用能源技术,2026,(4):175-177.
- [4] 马志贵,冀伟,武维宏.摩擦型高强螺栓连接抗剪滑移行为研究[J].公路交通科技,2024,41(7):101-109.