

3.3 年度运行验证

在投入运行的一年时间内,小机汽源系统在多个启停周期和深度调峰工况下表现出良好的稳定性与可靠性。真空建立时间由改造前的 45 分钟缩短至 37 分钟,效率提升约 18%,汽封切换次数减少约 60%,显著改善了启机过程的顺畅性。运行数据表明,小机汽源流量稳定维持在 9~14t/h 的需求区间内,未出现供汽不足或过载现象。深调至 180MW 负荷以下时,汽源仍保持平稳供给,有效降低了主汽母管扰动,主汽参数峰值波动下降约 30%。与此同时,凝结水温度波动幅度降低约 30%,启停过程中非计划疏放汽量明显减少,节能效果突出。年度运行还显示,整个改造系统无因汽源异常引发的非计划停机,可靠性显著提升。结合启停效率、能耗下降与安全性的改善,本次小机汽源改造在实际运行中达到了预期目标,不仅提升了机组的灵活性和经济性,也为类似机组的改造推广提供了强有力的数据支持和工程经验。

4 运行效果与评估

4.1 运行稳定性

小机汽源改造完成后,运行数据充分显示供汽品质和系统稳定性得到了显著提升。改造前,启机与深度调峰阶段小机汽源压力波动幅度大,常出现 $\pm 0.25\text{MPa}$ 的瞬态扰动,温度波动范围高达 80°C ,导致汽封系统频繁切换和喷射器抽吸能力不足。改造后,通过缓冲段和备用汽源的引入以及多级控制逻辑的实施,汽源压力稳定在 $0.98\sim 1.12\text{MPa}$,温度维持在 $350\sim 370^\circ\text{C}$,过热度稳定在 $25\sim 45\text{K}$,有效抑制了参数大幅波动。实测表明,真空建立时间从改造前的 45 分钟缩短至 37 分钟,效率提高 18%。与此同时,汽封切换次数减少了 60% 以上,喷射器抽吸裕度明显提升。年度运行数据还显示,改造后的机组全年未发生因小机汽源波动导致的非计划停机,运行可靠性大幅提高。总体来看,系统在启机、低负荷与深调等多种运行工况下均能保持平稳状态,显著增强了机组运行的安全性与稳定性。

4.2 经济性与灵活性

改造不仅提升了运行稳定性,还带来了明显的经济性与灵活性收益。改造前,汽源不稳造成启机过程中的非计划疏放汽量偏大,增加了能耗与启停热耗。改造后,压力和温度的稳定性使得启机效率显著提升,冷态启机时间缩短,深调阶段加热器热平衡波动减弱,凝结水温度波动幅度降低约 30%,有效减少了附加能耗。统计数据显示,启机过程中非计划疏放汽量较改造前下降约 20%,对应的热耗水平得到优化。深调运行中,机组在 $160\sim 200\text{MW}$ 负荷段保持稳定,主汽扰动峰值下降 $28\%\sim 35\%$,显著提高了电网调度下的运行适应性。此外,本次改造施工周期短、投资小,仅为机组

大修费用的 7% 左右,经济性突出。对于当前电力市场中频繁启停和深度调峰的运行模式而言,小机汽源的改造有效降低了运行成本,同时增强了机组对外部调度的快速响应能力,具有显著的灵活性优势。

4.3 应用价值

从工程实践角度看,本次小机汽源改造不仅解决了秦皇岛电厂机组在启停与深调运行中长期存在的汽源波动问题,还形成了一套具有可复制性的技术路径。改造方案以“主汽减温减压优化+缓冲段+备用汽源”为核心,结合分级联锁保护与智能控制逻辑,体现了投资低、周期短、风险小的特点,适用于同类型 300MW 级机组的推广应用。实际运行数据验证了改造的可行性和有效性,为行业提供了可靠的案例参考。特别是在新能源大规模并网、电网调节能力不足的背景下,该类改造可显著增强火电机组的启停效率与深调能力,从而提高其在电网中的支撑作用。更为重要的是,本次改造通过减少启停过程的热冲击和能耗损失,兼顾了经济性与安全性,契合当前火电机组灵活性改造与节能降耗的政策导向。因此,该实践不仅在技术层面具备推广价值,在行业发展与能源转型背景下也具有重要的战略意义。

5 结语

秦皇岛电厂 $2\times 300\text{MW}$ 机组小机汽源改造有效解决了启停与深调工况下供汽不稳的问题,实现了汽源压力和温度的稳定供给,真空建立时间明显缩短,汽封运行平稳可靠。改造不仅提高了启停效率和深调能力,还改善了机组的经济性和安全性。实践表明,该方案具备投资低、周期短、风险小的特点,为国内同类型机组的小机汽源优化提供了有力的工程参考。未来应结合数字化监测与智能控制,进一步优化小机汽源动态调节策略,确保机组在高比例新能源电网环境下保持长期安全、稳定、高效运行。

参考文献

- [1] 吴朋. 火电厂自动化控制系统应用与研究[D]. 重庆大学, 2002.
- [2] 郭达飞. 新型电力市场下火电厂经济运行分析及策略研究[C]// 钢铁职业教育教学指导委员会, 中国钢铁工业协会. “2024 职业教育活动周——钢铁行业大工匠进校园”论文集(中册). 华电内蒙古能源有限公司包头发电分公司; 2024:129-131.
- [3] 史宏俊. DCS 控制系统在火电厂燃煤锅炉应用中的优化改造[C]// 中国电力设备管理协会. 全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(七). 新疆天富能源股份有限公司; 2024:301-303.
- [4] 陈阿小, 冉真真, 马双忱, 等. 火电厂碳捕集技术: 现状、应用与发展[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S1): 52-64.
- [5] 柳栓, 贾向虎, 刘江. 火电厂集控运行关键技术[J]. 中国科技信息, 2024, (15): 78-80.

Research on Construction Method and Quality Control Countermeasure of Mixed Tower Lifting in Wind Power Project

Sheng Yi

Wuling Power Co., Ltd., State Power Investment Corporation, Changsha, Hunan, 410029, China

Abstract

Wind power generation serves as a pivotal component in the clean energy ecosystem, with technological advancements and large-scale deployment progressing steadily. As wind turbines grow larger, traditional all-steel towers face challenges in cost-effectiveness and structural stability at elevated heights, leading to the emergence of hybrid tower structures combining concrete and steel. These structures feature a concrete base connected to an upper steel tower section, effectively leveraging the complementary strengths of both materials. This innovative design provides an ideal solution for achieving greater hub heights and better wind resource capture. Therefore, conducting in-depth research and standardizing installation methods for hybrid towers, while establishing a comprehensive quality control system throughout the process, holds critical practical significance for ensuring the overall safety of wind power projects and promoting the sustainable development of the industry.

Keywords

mixed tower crane lifting; construction method; quality control

风电工程项目混塔吊装施工方法与质量控制对策研究

易生

国家电力投资集团五凌电力有限公司, 中国 · 湖南 长沙 410029

摘要

风力发电是清洁能源体系里的关键构成部分, 其技术的进步以及规模化建设正变得越发深入。在风电机组大型化的行业趋势下, 传统的全钢塔筒在达到一定高度后, 其经济性与结构稳定性面临挑战, 混凝土与钢材结合的混塔结构应运而生。这种结构的下部采用混凝土段, 上部连接钢制塔段, 充分呈现出了两种材料的性能优势, 为达成更高轮毂高度、捕获更优质风资源给出了理想的解决办法。因此, 深入研究和规范混塔的吊装施工方法, 同时建立与之相匹配且贯穿始终的质量控制体系, 对于保障风电工程整体安全、推动行业持续健康发展有着极其关键的现实意义。

关键词

混塔吊装; 施工方法; 质量控制

1 引言

随着风电行业朝着更高轮毂高度以及更大单机容量的方向发展, 混塔渐渐变成支撑风电装备的关键结构。混塔吊装作业因为构件重量大、安装精度要求高、现场组对情况复杂, 成为整个风电工程项目中技术难度与安全风险集中的核心环节。本研究关注混塔结构的吊装施工整个过程, 包括从基础环校验、首段吊装定位到后续塔段逐节组对、预应力张拉等一系列关键技术流程。论文着重探讨在这个复杂作业过程中, 怎样借助精细化的工序控制、严格的质量检验方法以及全过程的安全监测措施, 来切实保障塔筒的垂直度、连接

质量与结构整体性, 为同类工程提供一套有效的施工管理与质量控制参考模式。

2 风电工程项目混塔吊装施工方法

2.1 分段吊装工艺

分段吊装工艺是整个混塔安装工程的起始环节, 其关键之处在于应对超大型构件吊装带来的难题。因为混凝土塔段单件重量以及尺寸远远超出常规运输和吊装的限度, 施工方不得不采用分阶段吊装的办法^[1]。现场一般会安排大吨位履带吊或者全地面起重机, 依照从下往上的严谨次序, 把预制的混凝土环形段或者平板片逐个提升到设计的标高位置。在这个过程中, 吊装方案的周全性十分关键, 这其中包括吊点的精准计算、吊索具的恰当选配以及构件在空中姿态的稳定把控。起重机操作团队要和地面信号指挥人员保持紧密协

【作者简介】易生(1984-), 男, 本科, 工程师, 国家注册一级建造师, 从事风电、水电、光伏研究。

作,借助精细操作,保证重达数百吨的大型物体在起升、回转以及下落过程中一直处于平稳状态,达成与已安装结构的毫米级精确对接,为后续工序筑牢坚实基础。



图1 分段吊装工艺

2.2 高空组对技术

高空组对技术对于保障塔筒结构的整体性以及垂直度而言,是极为关键的一步,其操作的精准程度直接关系到结构在长期使用过程中的安全性。当起重机把待安装的塔段悬吊在预定的位置之后,作业人员就要马上着手进行对中以及调平方面的工作。他们一般会借助事先设置好的导向销、千斤顶或者专用的调平工装,针对构件展开微米级别的精细调整操作,以此来消除因为制造公差以及吊装变形而产生的微小偏差。组对质量的核心评判依据是环缝间隙的均匀程度,一种理想的组对状态指的是结合面各个地方的间隙相同、受力均匀,这样的状态为后续的预应力张拉以及高强度灌浆提供了良好的结构条件。

2.3 预应力张拉工艺

预应力张拉工艺对于混合塔筒其混凝土部分的结构性能起着关键作用,该工序借助张拉预埋于混凝土塔壁内的钢绞线,在结构中主动构建起强大的压应力,以此来抵御风机运行时所产生的巨大倾覆弯矩^[2]。张拉作业并非单纯的“拉紧”,而是一个依照严格技术规程的动态过程,施工人员运用大吨位千斤顶,依据设计规定的顺序,开展分级、同步、对称张拉。这般严谨的程序是为了保证数以千吨计的预压应力可均匀分布于整个混凝土塔身截面,防止局部应力集中致使结构受损。成功完成张拉后的钢绞线体系,好似给塔筒披上了一件无形的“预应力铠甲”,让其混凝土部分始终处于受压的有利状况,较大提升了结构的抗裂性、刚度以及疲劳寿命。

2.4 螺栓连接施工

螺栓连接施工针对混塔结构,上部钢塔段以及连接节点,给予了可靠的机械连接保障。所采用的高强度螺栓连接副,其安装质量对动态荷载在钢结构之间的有效传递起着决定性作用。施工作业需严格依照“初拧”和“终拧”的两步法原则,借助扭矩控制法或者转角法等方式,保证每颗螺栓

可达到设计预紧力。工人们运用经过定期校准的专用扭矩扳手,依照从中心向四周、对称施拧的顺序开展操作,这样能使法兰结合面压力分布均匀,所有螺栓共同协作,一起形成一个刚劲且耐久的连接节点。严谨执行这一道工序,是保证塔筒在风机持续运行振动时,连接节点始终维持紧固、不出现松脱的技术关键。

2.5 测量定位控制

测量定位控制犹如工程的“视觉神经”,为每一步高空作业提供着不可或缺的空间数据支持。从首段混凝土塔筒开始安装就位,直至最顶端机舱完成最终吊装,测量工程师需持续运用高精度全站仪、激光铅垂仪以及GNSS接收机等设备,对塔筒的中心坐标、垂直度、扭转角以及顶面标高进行全过程、多测回的实时监测与反馈^[3]。任何微小的安装偏差都要在后续段吊装前及时被识别、分析并加以纠正,这是一个动态的“测量-反馈-调整”闭环控制过程,其根本以便有效抑制误差的累积效应,保证百米高塔的顶部法兰中心最终可精确地对准设计位置,其偏差被严格限制在毫米级的容许范围内。这项贯穿始终的测量保障工作,是实现风机传动链最终精准对中、保障整机平稳高效运行必不可少的前提条件。

3 风电工程项目混塔吊装施工质量控制对策

3.1 建立全过程监控体系

构建覆盖整个过程的监控体系是实施质量控制的基础,该体系要求把质量管理工作从传统的结果验收往前延伸到源头管控。在混凝土塔段预制阶段,质量监控要同步介入,对原材料配比、模具精度、预应力管道定位以及养护条件进行驻厂监督,保证出厂构件的内在品质和几何尺寸都达到标准。随着构件运到现场,监控重点马上转向吊装作业,依靠对起重机工况、吊索具配置以及吊装路径的全程监督,保证数百吨重物在高空移动时绝对安全。当施工进入高空组对与预应力张拉等关键工序时,监控体系更要发挥其“眼睛”的作用,利用数字化采集设备实时记录组对精度、张拉力和伸长量等核心参数,形成完整的数据链条。这种贯穿始终的监督方式就像一张密不透风的质量防护网,可及时捕捉并纠正各个环节的细微偏差,有效防止质量缺陷的累积与传导。

3.2 完善质量检验标准

完善的质量检验标准给全过程监控提供了清晰的技术依据以及判定准则,此类标准要兼顾行业规范和项目特殊性。鉴于混塔结构的特点,质量检验标准要针对混凝土塔筒的几何尺寸、表面裂缝宽度、法兰平面度等指标给出具体规定,同时也要明确钢绞线张拉控制值、高强螺栓扭矩系数等关键工艺参数。而且标准体系要细化至每个施工环节的操作规程与验收要求,像规定环缝组对的最大允许间隙、预应力张拉的分级加载程序等^[4]。这些详细的技术规定为施工人员和检验人员提供了统一的工作标尺,极大程度减少了因个人

理解差异造成的质量波动，让质量判断基于客观、量化的基础之上。

3.3 强化施工人员培训

即便再完善的标准体系，也得依靠专业人员去执行，强化施工人员培训是提升质量软实力的根本办法。混塔施工有特殊性，这要求作业人员要掌握常规的吊装技能，又要精通预应力张拉、高强螺栓紧固等专项技术。培训内容应囊括设备操作原理、工艺标准理解、质量控制要点以及常见问题处置等多个方面，借助理论讲授、模拟操作和现场实训相结合的多种方式，让每个岗位人员可以明白自身工作对最终质量的影响。张拉工、扭矩扳手操作人员等关键岗位，要实行严格的考核认证制度，保证其与岗位要求相符的专业技能。一支训练有素的施工团队是工程质量最可靠的保障，他们的专业素养直接影响各项质量措施在现场的最终落实效果。



图2 施工人员培训现场

3.4 严格设备材料验收

所有上层质量管理举措均是以合格的设备以及材料作为基础而构建起来的，严格把控进场验收这一关卡乃是保证工程质量的物质方面的前提条件。在这一环节当中要坚守“零缺陷”入场的原则，构建起分级分类的检验机制。对于混凝土塔段而言，除了要核查其出厂合格证明之外，还需要

开展现场尺寸的复核以及外观质量的检查工作，重点留意预应力锚垫板的定位精度以及表面裂缝状况。对于高强螺栓连接副来说，要依照规定的批次进行扭矩系数或者紧固轴力的见证取样复验，以此保证其力学性能契合设计要求^[5]。预应力体系的关键材料，涉及钢绞线、锚具以及夹片，同样需要实施严格的第三方检测。这一坚固的质量屏障可切实有效地阻止不合格品进入施工环节之中，从根源上杜绝因材料设备存在缺陷而引发的系统性质量风险。

4 结语

总之，混塔吊装施工是一项集大型设备操作、精密测量控制与复杂结构工程于一体的综合性技术，应注意施工要点。施工方法的可靠性体现在对每一道工序的精细化管理上，从基础的水平度复核，到每一段塔筒的精准就位与临时固定，直至预应力体系的精准建立，每一个环节都直接关系到最终产品的质量。质量控制的成效则依赖于健全的管理体系，这包括严格的原材料与构件入场检验、实时的安装精度监测以及规范完整的张拉过程记录。展望未来，随着模块化施工、数字化监控等新技术的进一步应用，混塔吊装技术与质量管理水平有望得到持续提升，从而为构建更高效、更安全的风电基础设施奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 马海鹏, 梁会森, 徐景阳, 陈吟颖, 赵斌. 兆瓦级风电项目基于轮毂高度方案的限电率差异性研究[J]. 节能技术, 2025, 43 (04): 354-358.
- [2] 黄赐荣, 张栋梁, 付坤, 李天昊, 何澜, 章家炜. 装配式风电混塔胶黏接缝的内聚力本构模型及塔筒承载力研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44 (04): 71-81.
- [3] 张宇豪, 吴香国, 张明熠, 高朝利, 周瑞权, 李博洋. 横向拼接缝胶结缺陷对混塔极限状态受力特性的影响分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2024, (10): 27-33.
- [4] 喻文超, 罗国甘, 黄声富, 冯成. 基于光纤传感的混塔结构风机安全监测系统的应用[J]. 中国设备工程, 2024, (S1): 60-67.
- [5] 韦洁, 彭莎, 韦妮采. 超风电塔筒竖向体外预应力施工难题及解决方案研究[J]. 企业科技与发展, 2024, (01): 102-105.