

混塔式风电项目施工全过程管控要点

黎 龙

西北水利水电工程有限责任公司 陕西 西安 710000

摘要：随着风电产业向大容量高塔架方向快速发展，混塔式风机凭借优异的结构性能得到广泛应用，其施工全周期管控直接决定工程安全与机组长期运行稳定性。围绕项目施工全流程，系统梳理前期筹备、主体工程施工、竣工验收各阶段核心管控要点，覆盖技术、人员、设备、安全等多个维度，通过精细化管控体系的构建，实现工程质量、施工效率与安全保障的协同提升，为混塔式风电项目高质量建设提供实践参考。

关键词：混塔式风电；施工管控；质量控制；安全管控

引言：双碳目标驱动下，风电产业迎来规模化、高质量发展的全新机遇，混塔式风机融合混凝土塔架高刚度与钢塔架轻量化的双重优势，已成为高塔架风电项目的主流选型。但混塔施工工序交叉多、高空作业风险高、安装精度要求严苛，施工管控难度显著提升，前期筹备疏漏、过程管控不到位均可能引发结构失稳、质量缺陷等安全隐患，构建全周期精细化的施工管控体系，对保障项目建设成效具有至关重要的作用。

1 混塔式风电施工管控的核心重要性

混塔式风电施工管控聚焦施工全周期安全与质量协同优化，通过精细化作业流程设计降低结构失稳风险，提升塔架垂直度与连接节点可靠性，保障机组长期稳定运行。施工过程强调动态监测技术应用，实时采集混凝土浇筑温度、钢结构应力变化等关键参数，实现偏差预警与快速响应。同时注重资源高效配置，减少材料浪费与能源消耗，推动绿色施工理念落地。团队协作机制强化多工种协同作业能力，确保各环节无缝衔接，提升整体施工效率与工程品质，为可再生能源项目可持续发展奠定坚实技术基础^[1]。

2 混塔式风电项目施工前期筹备管控要点

2.1 施工图纸技术交底管控

施工图纸技术交底管控需深化设计意图与施工实践的融合路径，运用BIM技术构建三维可视化模型，精准呈现塔架结构参数、混凝土配比标准及钢筋布设路径，强化施工人员对复杂构造的立体认知。重点解析预应力锚固系统、悬挑结构工艺等关键节点的施工逻辑，预判高耸结构垂直度控制、大体积混凝土温控等潜在难点，提前制定偏差修正策略；交底过程强调双向互动机制，鼓励施工团队结合现场地质条件、气候特征反馈实际需求，动态调整施工方案细节。通过持续技术迭代与信息化质量追溯，确保施工流程与图纸设计高度契合，最终实现工程质

量精准控制、施工效率稳步提升及结构耐久性有效保障，为混塔式风电项目安全高效推进奠定坚实技术基础。

2.2 施工场地规划布置管控

施工场地规划布置管控需以功能分区科学化与动线设计高效化为导向，通过BIM模型模拟施工全流程，优化施工区、材料区、设备区及临时设施区的空间布局，实现资源集约利用与作业效率提升。重点结合地质勘测数据调整基础处理方案，如湿陷性黄土地基区域增设预制管桩或混凝土灌注桩复合地基，增强场地承载力；同步规划环形运输通道与垂直吊装路径，减少物料二次搬运与机械交叉干扰，降低安全风险。通过动态环境监测系统实时采集噪声、粉尘数据，配套设置隔音屏障与喷淋装置，保障施工环境符合环保标准；最终形成既满足施工效率又兼顾安全环保的场地规划方案，为混塔式风电项目顺利推进提供坚实场地保障，实现施工资源高效配置与工程品质全面提升^[2]。

2.3 施工物资设备进场管控

施工物资设备进场管控需构建全周期质量监控体系，从设备出厂检验、运输过程跟踪到现场验收实施闭环管理。采用高精度检测设备对塔吊、混凝土泵车等关键设备进行性能复测，确保起重能力、液压系统稳定性等参数符合施工要求；物流路径优化结合GIS系统分析，规划最短运输路线并避开交通拥堵时段，减少运输损耗与时间成本；现场存储区域按功能细分，设置防雨棚、防尘罩及消防设施，满足防火、防潮、防盗等安全标准。通过RFID标签与物联网传感器实现设备状态实时追踪，动态调整物流计划以应对突发状况；最终形成设备质量可靠、物流高效顺畅、存储安全规范的进场管控方案，为混塔式风电项目施工提供坚实物资保障，实现施工资源优化配置与工程品质持续提升。

2.4 施工人员技术能力管控

施工人员技术能力管控需聚焦专业技能精准匹配与持续优化,通过标准化评估体系筛选具备高空作业、精密安装及应急处理能力的施工人员,确保团队能力与混塔施工需求高度契合。重点开展混塔结构施工工艺、垂直度控制及安全操作规范培训,结合模拟施工场景强化实操技能,通过动态追踪机制定期评估施工人员技能水平,及时调整培训内容以适应施工进度变化。采用智能穿戴设备实时监测高空作业状态,结合生物识别技术验证操作权限,提升施工安全系数,通过技能竞赛与经验分享会促进技术交流,激发施工人员创新潜能,最终实现施工效率与工程质量的的双重提升,为混塔式风电项目安全高效推进提供坚实人力保障,推动施工团队整体技术能力持续进阶。

3 混塔式风电项目主体工程施工管控要点

3.1 风机基础工程施工管控

风机基础工程施工管控需强化结构稳定性与施工精度双重控制,通过精准控制基坑开挖尺寸、深度及边坡坡度,避免超挖或欠挖影响地基承载力。混凝土浇筑环节需动态调整配合比,结合环境温湿度优化坍落度,确保混凝土密实度均匀且强度达标,减少裂缝产生,钢筋绑扎需严格遵循设计规范,重点检查锚固长度、间距及连接节点可靠性,提升基础抗拉拔与抗剪切能力。同步实施动态监测,实时采集混凝土温度、沉降量等数据,预判潜在变形风险并及时调整施工参数,通过标准化操作与信息化管理手段,保障基础施工各环节精准可控,最终实现工程安全性与耐久性的双重提升,为风机塔架提供稳固支撑,确保长期运行稳定。

3.2 混凝土塔段预制施工管控

混凝土塔段预制施工管控需强化全流程精细化控制,从模板制作到构件养护实施全周期质量追溯。采用高强度钢模配合精密加工工艺,确保塔段几何尺寸偏差控制在毫米级以内,减少拼装间隙误差;混凝土配比结合骨料级配优化与外加剂适配,提升和易性与抗裂性能,适应不同温湿度环境下的浇筑需求。振捣工艺采用变频振捣器,根据混凝土坍落度动态调整振捣频率与时间,避免过振或漏振导致内部缺陷;养护阶段运用智能温控湿控系统,模拟自然环境条件延长养护周期,促进混凝土强度均匀增长。通过三维扫描技术复核构件几何形态,结合应力应变监测预判潜在变形风险,实现预制塔段高品质输出与工程整体性能优化,为混塔式风电项目长期稳定运行奠定坚实基础^[3]。

3.3 钢混塔段连接施工管控

钢混塔段连接施工管控需以毫米级精度与结构可靠

性为核心,通过激光测距仪与全站仪联合校准塔段对接面几何参数,确保垂直度、水平度偏差严格控制在设计允许范围内。螺栓紧固采用智能扭矩控制系统,分阶段施加预紧力并实时记录数据,避免因扭矩不均引发结构应力集中。焊接工艺结合母材特性选用匹配焊材,通过控制焊接电流、速度及层间温度,减少热输入导致的变形与裂纹风险;同步实施超声波探伤、磁粉检测等无损检测手段,实时监控焊缝内部质量,确保连接部位承载力与耐久性达标。通过动态监测系统追踪连接部位应力应变变化,预判潜在风险并及时调整施工参数,最终实现钢混塔段安全可靠连接与工程整体性能优化,为风机长期稳定运行提供坚实保障。

3.4 塔架安装精度管控

塔架安装精度管控需以毫米级精度为核心,通过多维度技术手段实现全流程精准控制。安装前采用三维扫描技术对塔段端面进行高精度测量,确保对接面几何参数符合设计要求,减少拼装间隙误差;安装过程中运用激光跟踪仪实时监测塔架垂直度与水平度,动态调整吊装姿态,避免施工偏差导致结构变形。螺栓紧固采用智能扭矩控制系统,分阶段施加预紧力并记录数据,确保各节点受力均匀;同步实施动态应力监测,追踪塔架关键部位应力变化,预判潜在风险并及时调整施工参数。通过标准化操作流程与信息化质量追溯机制,实现安装过程可追溯、质量可控制,最终保障塔架结构稳定性与运行安全性,为风机长期高效运行奠定坚实基础。

4 混塔式风电项目收尾阶段施工管控要点

4.1 风机主机与叶片吊装管控

风机主机与叶片吊装管控需强化全流程协同与动态风险防控。吊装前实施设备状态深度核查,包括主机重量分布、叶片几何尺寸及吊具承载能力匹配性验证,确保设备参数符合吊装方案要求。环境因素方面,采用风速风向仪、温湿度传感器实时采集数据,结合气象预测动态调整作业窗口,避免风速超限或温度骤变引发吊装失控;吊装过程运用双机协同定位系统与激光跟踪仪,精准控制主机与叶片空间姿态,确保对接角度偏差 $\leq 2\text{mm}$,垂直度偏差 $\leq 0.1^\circ$;同步实施吊索具应力监测与结构变形预警,通过智能传感器实时反馈受力数据,预判过载风险并自动触发保护机制。通过标准化操作手册与数字化质量追溯平台,实现吊装参数可记录、过程可追溯、责任可界定,最终保障主机与叶片精准就位且结构安全可靠,为项目收尾阶段提供坚实技术支撑^[4]。

4.2 电气系统安装调试管控

混塔式风电项目收尾阶段电气系统安装调试管控需

聚焦设备精度与系统协同性。发电机、变压器及电缆等核心设备安装位置需严格匹配设计参数,偏差超过2mm可能引发接触电阻异常或散热失效,影响电能转换效率。系统调试应遵循“单机-联调-满负荷”递进流程,先完成发电机空载特性测试、变压器变比较验等单机功能验证,再开展电网同步、功率因数调节等联调试验,确保各设备参数匹配、通信协议兼容。调试全程需实时监测电流谐波、电压波动等关键指标,通过频谱分析识别潜在谐振风险,及时调整滤波装置参数;安全防护措施需同步到位,如接地电阻控制在 4Ω 以下、过电压保护装置响应时间不超过20毫秒,保障人员操作安全与设备长期稳定运行。调试数据需形成完整记录,通过趋势分析预判设备寿命,为后续运维提供依据。

4.3 收尾阶段全流程安全风险管控

混塔式风电项目收尾阶段施工全过程安全风险管控需贯穿设计、施工、调试全周期。高空作业区需配置双绳防护系统,作业人员安全带锚固点强度需达2吨以上,防止坠落冲击造成伤害;起重吊装区域应设置电子围栏,当吊物接近混塔边缘时自动触发警报并暂停作业,避免碰撞风险。电气作业区需实施绝缘检测常态化,每两小时对临时电缆绝缘层进行红外热成像扫描,及时发现局部放电或过热隐患。结构稳定性监测需采用光纤光栅传感器实时采集混塔应变数据,结合有限元模型分析应力分布,当局部应力超过设计值80%时自动预警并启动应急加固流程。安全培训需采用VR模拟系统,通过沉浸式场景训练提升作业人员对高空坠落、物体打击等风险的应急处置能力,培训记录需与个人安全档案关联,作为后续作业资格审核依据,形成闭环管理机制。

4.4 工程竣工收尾质量管控

工程竣工收尾质量管控需聚焦细节精度与全流程可追溯性。混凝土表面平整度需通过激光扫描仪检测,确

保偏差不超过3mm,避免因表面缺陷引发应力集中;钢筋保护层厚度需采用电磁感应仪复测,实测值与设计值偏差控制在5%以内,保障结构耐久性。隐蔽工程验收需结合三维激光扫描与BIM模型比对,识别预埋件位置偏差、焊缝质量缺陷等问题,通过数字孪生技术生成修复方案并跟踪实施效果。资料归档需实现电子化与结构化,施工日志、检测报告、变更记录等文件需按时间-部位-类型三维编码,支持快速检索与趋势分析;质量追溯链需贯穿材料进场、施工过程、竣工验收全环节,每个环节设置唯一标识码,通过区块链技术确保数据不可篡改,为后续运维提供可信数据支撑,形成从施工到运维的质量闭环管理体系^[5]。

结束语:混塔式风电项目施工管控是一项覆盖全周期、多维度的系统性工作,需贯穿前期筹备、主体施工、竣工收尾的完整建设流程。通过对技术、人员、设备、安全等核心要素的精细化管控,可有效化解施工全过程的各类风险,保障塔架结构稳定性与工程建设质量。完善的施工管控体系,不仅能提升项目建设效率与经济效益,更为风电产业高塔架技术的规模化推广与高质量发展筑牢了坚实基础。

参考文献

- [1]朱叶沁.山地风电风机基础土建施工与质量管理研究[J].工程技术研究,2024,9(16):145-147.
- [2]邹元杰.探究风力发电工程项目的施工现场管理[J].电气技术与经济,2024,(08):312-314.
- [3]曾亮宏.风电项目施工质量控制策略分析[J].大众标准化,2024,(23):41-43.
- [4]罗滢.风电项目风机基础施工管控要点分析[J].人民珠江,2022,43(S2):46-49.
- [5]张敏.风电工程竣工验收阶段质量管控优化路径[J].中国电力,2022,55(3):102-108.