

风电场建设中的施工质量管控策略研究

刘春程

大唐黑龙江新能源开发有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8597

[摘要] 在可再生能源产业高速发展的背景下，风电场建设规模持续扩张，施工质量直接影响机组运行安全性与发电效益。本文针对风电场施工环境复杂、技术标准严苛的特性，系统剖析基础施工、机电安装、电气调试等关键环节的质量管控难点，揭示混凝土强度不足、设备安装偏差、电气系统故障等常见问题的成因。结合 PDCA 循环管理理论与工程实践经验，提出“前期规划标准化、过程控制精细化、验收管理规范化、运维反馈闭环化”的全流程管控体系，涵盖大体积混凝土温控技术、高精度安装定位方法、多维度电气调试方案及质量通病靶向防治措施。研究成果可为风电场建设质量提升提供技术支撑，助力风电产业高质量发展。

[关键词] 风电场；施工质量；管控策略；PDCA 循环；质量通病防治

Research on Construction Quality Control Strategies in Wind Farm Construction

Liu Chuncheng

Datang Heilongjiang New Energy Development Co., Ltd.

[Abstract] Against the backdrop of rapid development in the renewable energy industry, the scale of wind farm construction continues to expand, and the construction quality directly affects the safety of unit operation and power generation efficiency. This article focuses on the complex construction environment and strict technical standards of wind farms. It systematically analyzes the quality control difficulties in key links such as foundation construction, mechanical and electrical installation, and electrical commissioning, revealing the causes of common problems such as insufficient concrete strength, equipment installation deviation, and electrical system failures. Based on the PDCA cycle management theory and engineering practice experience, a full process control system is proposed, which includes standardized pre planning, refined process control, standardized acceptance management, and closed-loop operation and maintenance feedback. This system covers temperature control technology for large volume concrete, high-precision installation and positioning methods, multi-dimensional electrical commissioning plans, and targeted prevention and control measures for common quality problems. The research results can provide technical support for improving the quality of wind farm construction and help promote the high-quality development of the wind power industry.

[Key words] wind farm; Construction quality; Control strategy; PDCA cycle; Prevention and control of common quality problems

一、引言

(一) 研究背景

在“双碳”目标引领下，风力发电作为清洁能源核心形式，已成为我国能源结构转型的重要支柱。截至 2024 年，我国风电装机容量突破 4 亿千瓦，建设区域逐步从平原向高海拔山地、沿海滩涂等复杂区域拓展。复杂的地理环境、高精密度的设备要求及多专业交叉作业特点，导致施工质量隐患频发，基础沉降、塔筒倾斜等问题不仅增加运维成本，更威胁机组运行

安全。因此，构建科学完善的施工质量管控体系成为风电工程领域的迫切需求。

(二) 研究现状

现有研究多聚焦单一施工环节的质量控制，如高珊提出的高海拔山区风机基础温控措施，豆丁网研究团队阐述的机电安装关键技术，缺乏对施工全流程的系统性管控研究。部分项目因忽视前期规划与后期验收的衔接，导致质量问题反复出现。基于此，本文结合多案例实践，构建全周期质量管控框架，弥

补现有研究的不足。

(三) 研究内容与方法

本文采用文献分析法梳理行业规范与研究成果,以和顺县 20 万千瓦风电项目为实践案例,运用 PDCA 循环理论,从计划(Plan)、执行(Do)、检查(Check)、处理(Act)四个维度构建管控策略。

二、风电场施工质量管控的核心难点

(一) 施工环境的复杂性制约

风电场多选址于偏远区域,高海拔山区面临低温、强风等极端天气,沿海项目受高湿度、盐雾腐蚀影响显著。以四川省凉山州喜德县玛果梁子风电场为例,山地地形增加设备运输难度,基础施工需应对不均质岩层,导致混凝土浇筑易出现离析现象。环境因素不仅提升施工难度,更对质量控制提出特殊要求。

(二) 关键环节的技术瓶颈

1. 基础施工难点:大体积混凝土浇筑的水化热控制是核心难题,温控不当易产生温度裂缝,影响基础承载能力。基础锚板及锚栓安装精度直接关系风机稳定性,偏差超过 2mm 可能引发机组振动。

2. 机电安装难点:塔筒分节吊装需控制垂直度偏差在 1% 以内,叶片高空安装需应对瞬时风速变化,机舱与塔筒同心度要求达 0.5mm 级别。某沿海风电场因叶片安装倾角偏差 3°,导致发电效率下降 12%。

3. 电气系统难点:电缆敷设的绝缘防护、变压器调试参数匹配及接地系统电阻控制,需多专业协同作业,任一环节失误均可能引发系统故障。

(三) 质量管控体系的不完善性

部分项目存在“重进度、轻质量”倾向,施工组织设计缺乏针对性,质量责任划分模糊。如某项目未严格执行“三检制”,导致电气接线错误未及时发现,投运后引发设备烧毁事故。此外,信息化管控手段应用不足,难以实现质量问题的实时追踪与闭环处理。

三、基于 PDCA 循环的全流程质量管控策略

(一) 计划阶段(Plan):构建标准化管控框架

1. 前期勘察与方案设计:联合地质勘察单位开展土壤承载力测试,结合风资源数据优化机组布局,规避湍流影响。高海拔项目专项设计混凝土防冻配方,沿海项目强化防腐涂层选型与施工工艺。

2. 质量目标与责任划分:依据《风力发电工程施工质量验收规程》,明确基础强度、安装精度等关键指标,建立“建设单位统筹、施工单位主责、监理单位监督”的三级责任体系,签订质量责任书。

3. 资源配置规划:配备经校准的全站仪、激光测距仪等精密设备,组建具备风电施工资质的专业团队,开展高海拔作业、

高空吊装等专项技能培训。

(二) 执行阶段(Do):实施精细化过程控制

1. 基础施工质量控制:采用“分层浇筑+冷却管布设”技术控制大体积混凝土温度,浇筑温度不超过 28℃,内外温差控制在 25℃ 以内。锚板安装采用可调式支架,通过水准仪实时监测,偏差超标立即整改。基础养护采用塑料薄膜覆盖+洒水养护模式,养护期不少于 14 天。

2. 机电安装质量控制:塔筒吊装前清理法兰面油污,采用扭矩扳手按对角线顺序紧固螺栓,每节吊装后检测垂直度。叶片安装选择风速 $\leq 8\text{m/s}$ 的时段,利用液压顶升系统微调角度,确保与轮毂精准对接。机舱吊装采用履带式起重机,通过 GPS 定位系统实现毫米级对接。

3. 电气系统质量控制:电缆敷设前进行绝缘电阻测试,敷设路径避开尖锐物体,接头采用热缩套管密封。变压器调试时逐项校验变比、绝缘电阻等参数,确保接地系统电阻值 $\leq 4\Omega$ 。

(三) 检查阶段(Check):建立多维度验收机制

1. 过程巡检与专项检测:监理单位每日开展现场巡检,重点核查混凝土坍落度、螺栓扭矩等关键参数。委托第三方检测机构对基础混凝土强度进行回弹法检测,对电气设备进行耐压试验。

2. 隐蔽工程验收:基础钢筋绑扎、电缆沟防腐等隐蔽工程需留存完整影像资料,验收合格后方可进入下一道工序。某项目因基础钢筋保护层厚度不足未通过验收,经整改后避免后期锈蚀风险。

3. 信息化质量追踪:搭建质量管控平台,录入施工数据与检测报告,通过二维码实现“一机一档”管理,质量问题实时推送责任人整改。

(四) 处理阶段(Act):形成闭环管理机制

1. 质量问题整改:对检查发现的问题分类处置,一般问题 24 小时内整改,重大问题制定专项方案。如某项目发现塔筒垂直度偏差 1.2%,立即暂停吊装,采用千斤顶调整后重新检测验收。

2. 经验总结与标准优化:每季度召开质量分析会,梳理共性问题,优化管控标准。如针对防腐涂层脱落问题,将施工环境相对湿度控制标准优化为 $\leq 85\%$ 。

3. 运维反馈联动:建立施工与运维信息对接机制,将机组运行中的振动异常、发电效率波动等问题追溯至施工环节,优化后续项目管控策略。

四、质量通病的靶向防治措施

(一) 基础施工通病防治

混凝土强度不足防治:严格控制砂石含泥量 $\leq 3\%$,选用强制式搅拌机确保原材料配比均匀。每 50m³ 制作一组混凝土试块,在标准养护条件下进行强度检测,依据检测结果动态调整施工参数。基础沉降不均防治:根据地质条件优化地基处理工

艺,软土地基采用换填法或桩基础加固,提高地基承载能力与稳定性。

(二) 设备安装通病防治

制定标准化安装手册时,应采用图文并茂的形式,针对塔筒吊装、叶片对接等工序,不仅详细描述操作流程,还需附上关键节点的三维示意图与常见错误案例分析,使安装人员能更直观理解。验收标准需细化到具体数值指标,如塔筒垂直度偏差不得超过 0.15%,法兰面间隙小于 0.5mm 等。加强现场技术指导,除安排经验丰富的技术人员驻场外,还应建立技术交底动态机制,定期组织技术培训,针对新出现的安装问题及时讲解。对安装人员的实操考核,除基础操作外,还需设置模拟突发故障场景,测试其应急处理能力,考核合格后方可上岗。引入三维激光扫描技术,在设备安装过程中,以每分钟 10 次的频率实时采集数据,将监测到的设备安装精度与设计模型进行毫米级对比分析,一旦偏差超过预设阈值,系统立即发出警报,并生成调整方案,现场技术人员据此及时调整偏差。

(三) 电气系统通病防治

电气设计审核环节,专业工程师需结合风电场的地形地貌、气候条件等实际情况,对设备选型进行综合评估,确保所选设备不仅与发电容量、输电要求匹配,还能适应风电场复杂的运行环境。在施工过程中实施的“双检制”,两名施工人员需分别从不同角度对线路进行核查,一人采用万用表等工具检测接线正确性,另一人使用扭矩扳手检查接线端子的牢固性,并做好详细检查记录。调试阶段开展 72 小时全负荷试运行,通过关键部位的红外测温仪与绝缘监测装置,实时采集数据上传监控系统。一旦设备温度异常或绝缘电阻值不达标,系统自动停机并向运维人员发送预警,便于快速排查处理故障。

(四) 防腐处理通病防治

选用符合 GB/T 18593《热喷涂 金属和其他无机覆盖层 操作中的安全要求》标准的高性能防腐涂料,优先采用环氧富锌底漆、聚氨酯面漆等配套体系。施工前采用高压水枪预冲洗去除表面浮尘,使用专用脱脂剂配合钢丝刷彻底清除基材表面油污,通过抛丸除锈设备将金属表面锈蚀等级处理至 Sa2.5 级(近乎出白级),粗糙度控制在 40-75 μm 。严格把控施工环境温度湿度,要求温度保持在 5-35℃、相对湿度低于 85%,在雨雾天气或基材表面结露时暂停作业。采用磁性测厚仪对涂层进行多点检测,按每 10 m^2 不少于 5 个检测点的频率,确保涂层总厚度不低于 200 μm 且均匀性误差 $\leq 15\%$ 。涂层完全固化(7 天养护期)后,使用划格器进行附着力测试,在 1mm \times 1mm 网格区域内,要求剥落面积不超过 5%,粘结强度达到 ISO 2409 标准规定的 0 级或 1 级要求。

五、案例应用效果

以和顺县 20 万千瓦风电项目为例,该项目在实施本文提出的施工质量管控策略时,通过建立覆盖全流程的质量监督体

系,对基础浇筑环节采用智能振捣监测系统,结合 BIM 技术进行施工模拟优化浇筑方案,使基础混凝土合格率从 89% 提升至 98%。在机电安装阶段,引入三维激光扫描技术进行毫米级精度校准,配合标准化安装流程,将设备安装精度偏差严格控制在规定允许范围内。电气系统调试环节,依托数字化调试平台实现全系统联动测试,最终实现一次性通过率 100% 的优异成绩。

项目投运后的实际运行数据进一步验证了管控策略的显著成效。通过强化设备安装质量管控和精细化调试,机组年平均故障次数从 2.3 次大幅降至 0.5 次,设备稳定性显著提升。同时,得益于机电系统安装精度优化和电气系统高效运行,机组发电效率提升 6.2%,年发电量增加约 1200 万千瓦时。据测算,项目全生命周期运维成本降低约 15%,有效提升了项目经济性和投资回报率,充分展现了该管控策略在实际工程中的有效性与实用性。

六、结论与展望

本文基于 PDCA 循环理论,构建了风电场施工全流程质量管控体系,针对基础施工、机电安装、电气调试等关键环节的质量难点,提出了针对性管控措施与质量通病防治方案。案例应用表明,该策略能有效提升施工质量与机组运行稳定性。

未来,随着海上风电向深远海域拓展、漂浮式风电技术逐步成熟,施工质量管控需进一步突破传统模式。建议深度融合 BIM 技术与物联网监测体系,构建基于数字孪生的施工质量管控平台,通过 BIM 模型模拟复杂结构施工,利用物联网传感器实现关键工序毫米级位移、微振等多维度实时监测,结合 AI 算法实现质量隐患智能预警。同时,针对漂浮式风电基础水下施工、柔性电缆连接等新型技术难点,加快制定专项质量控制标准,推动施工质量管控向数字化、智能化、标准化方向升级。

[参考文献]

- [1]刁曙光,王宇帆,曹冲,等.预埋基础辅助风机吊装在 Maziling 风电场工程中的应用[J].红水河,2019,38(2):37-40.
- [2]高珊.高海拔山区风电机组基础施工质量控制[J].珠江,2022,43(S02):35-38.
- [3]吴世明.高海拔山区风电工程施工组织[J].水利水电工程,2021,52(S02):128-131.
- [4]中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [5]李广代.风与风能[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [6]佚名.风电场机电安装工程的施工技术与质量控制探析[EB/OL].https://www.docin.com/touch_new/preview_new.do?id=4793276613,2025-01-01.
- [7]佚名.风电项目工程质量通病防治措施[EB/OL].<https://m.renrendoc.com/paper/372031414.html>,2024-12-21.