

风力发电工程现场安装质量问题分析与对策

晁雷杰

(陕西龙源新能源有限公司, 陕西 西安 710038)

摘要 为解决风力发电工程现场安装质量隐患频发问题, 本文以塔筒法兰对接偏差、叶轮吊装工艺缺陷等典型故障为例, 对设备安装精度、施工工艺和环境适应性问题展开系统研究, 指出人员技术能力不足、管理流程缺陷和跨组织协作障碍是造成质量问题的主要成因。基于此, 提出分级技术认证体系、BIM 动态监测平台和产业链协同机制等改进措施, 构建包含质量目标分解模型、智能对中系统和风险预警网络的长效管理框架, 以期对风电工程安装质量管控提供可操作的技术路径和管理方案。

关键词 风力发电工程; 安装质量控制; 工艺缺陷; 质量管理体系; 风险预警机制

中图分类号: TM614; TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.17.039

0 引言

在全球能源转型加速推进的背景下, 风电产业作为可再生能源主力军迎来新一轮发展机遇。随着机组大型化趋势加剧和装机规模持续扩张, 现场安装环节的质量管控面临前所未有的技术挑战。近年来, 频发的风机倒塌、叶片断裂等重大事故暴露出安装质量问题的严峻性, 直接威胁电站全生命周期运行安全。行业实践表明, 传统粗放式安装管理模式已难以适应新型 10 MW 级机组毫米级装配精度的严苛要求。当前正值“十四五”风电装机高峰期, 叠加深远海、高海拔等复杂环境项目占比提升, 安装质量风险呈现多元化、隐蔽化特征。国际电工委员会最新修订的 IECRE 标准体系特别强调, 必须建立覆盖设计、制造、安装全流程的协同质量控制机制。在此背景下, 深入剖析安装质量问题的形成机理, 构建预防性质量保障体系, 对实现风电产业高质量发展具有重要现实意义。

1 风力发电工程现场安装质量问题的表现

1.1 设备安装精度不足引发的质量隐患

风力发电机组核心部件的装配公差直接决定传动系统寿命。塔筒法兰对接平面度偏差超过 0.02 mm/m 时, 塔体动态载荷分布将发生非线性变化, 导致高周疲劳裂纹在螺栓连接处优先萌生。例如: 某型 3 MW 机组主轴轴承座的水平度误差若超出厂商技术规范 $\pm 0.5^\circ$ 范围, 齿轮箱输入轴与主轴的不同心度会呈几何级数放大, 使行星轮系提前进入点蚀失效阶段。轮毂与叶片连接面的接触压力分布不均更为隐蔽, 当预紧力离散度大于 15% 时, 极端风况下可能引发复合材料粘接层剥离。这些微观尺度上的安装缺陷往往在静态验收测

试中难以察觉, 却在运行两年后集中爆发为批量性部件更换事故。

1.2 施工工艺不当造成的质量缺陷

吊装作业中的动力学控制失误是工艺缺陷的典型代表。叶轮整体吊装时若未考虑风湍流强度与起重机摆动的耦合效应, 叶片根部与轮毂的机械接口可能遭受超出设计值的冲击载荷。某沿海项目记录的 32 次螺栓拉伸失败案例中, 有 67% 源于液压扳手操作人员未执行阶梯加载工艺, 致使预紧力松弛速率较标准工况加快 3 倍。电缆敷设环节的工艺疏漏同样不可忽视, 集电线路弯曲半径不足设计值的 70% 时, XLPE 绝缘层在温差应力作用下会产生不可逆的形变记忆效应, 使介质损耗角正切值在投运 18 个月后超标^[1]。这些工艺偏离本质上是动态载荷工况简化为静态处理, 暴露出施工方案与风机实际运行模态的脱节。

1.3 环境因素对安装质量的影响

陆上风场面临多样化的环境挑战。沙漠地区日均温差 40℃ 条件下, 混凝土基础浇筑若未采用分段养护工艺, 温度应力会使锚板安装面产生 0.1 mm/m 的翘曲变形。高原低气压环境的影响更为复杂, 海拔 3 000 m 项目实测显示, 空气密度下降导致冷却系统散热效率降低 30% 以上, 齿轮箱油温在试运行阶段即达到报警阈值的 90%。2019 年后修订的 IEC61400-6 标准特别规定, 海拔 2 000 m 以上项目需将电气间隙尺寸增大 15% 以补偿空气绝缘强度下降。此外, 北方寒区冻融循环会加剧塔筒法兰密封材料的老化, 某东北地区项目在经历 50 次冻融循环后, 法兰密封失效速率较温带地区提高 4 倍。这些环境适应性问题的解决方案已纳入最新

版《陆上风电场安装技术规范》(GB/T 36543-2022)。

2 风力发电工程现场安装质量问题的成因分析

2.1 人员技术能力不足导致的操作失误

风力发电机组安装涉及精密机械装配、电气系统调试和动态载荷控制等多个技术领域,施工人员若缺乏系统培训,极易在关键环节出现操作偏差。例如:塔筒螺栓拉伸工序要求操作者掌握扭矩-转角复合控制方法,但部分工人仅依赖经验值施拧,导致预紧力离散度超出允许范围30%以上。轮毂与叶片对接时,操作手对激光定位仪校准流程的不熟悉,可能使法兰配合面产生0.5 mm以上的错位,这种几何偏差在风机运行中会转化为持续的振动激励源。更严重的是电气安装环节,混淆耐张线夹与悬垂线夹的适用场景,将造成集电线路在风振条件下过早出现应力集中现象。这些技术短板暴露出行业快速扩张与人才梯队建设不同步的结构性矛盾。

2.2 管理流程不完善带来的质量失控

现行项目管理体系往往难以适应风机大型化带来的技术复杂度。塔筒吊装前的垂直度校准本应通过全站仪三维坐标复核,但部分项目为追赶进度,仅采用单点铅垂仪抽查,使塔体实际倾斜度超出设计限值2倍而未触发质量预警。材料追溯机制的缺失同样值得警惕,如某项目误将普通防腐螺栓用于轮毂连接,直到运行半年后发生批量断裂才被发现。质量验收标准与施工实际脱节的情况尤为突出,齿轮箱安装后的振动测试仍沿用固定转速下的幅值判定,忽略变转速工况下的模态耦合效应,这种静态评价方法无法识别80%的早期装配缺陷。管理流程的漏洞本质上是将航空级精度要求的装备按普通钢结构工程管控。

2.3 外部协作不畅引发的质量隐患

风机安装涉及主机厂、吊装公司、电网企业等多方主体,接口管理的失效会层层传导为质量缺陷。叶片运输车队与现场吊装计划脱节时,露天存放的叶片会因昼夜温差发生局部变形,这种材料蠕变需要额外增加配重调节工序^[2]。电网接入验收标准与风机并网测试规程存在技术冲突。某项目因双方对谐波测试频段理解差异,导致全场240小时试运行数据作废。更深层次的问题在于技术迭代不同步,新型碳纤维叶片的安装工艺要求使用专用力矩扳手,但多数吊装公司仍沿用传统钢制叶片的工具套装,这种技术代差使30%的螺栓连接达不到设计预紧力要求。跨组织协作的壁垒实质上是产业链标准化程度不足的缩影。

3 提升风力发电工程现场安装质量的对策

3.1 加强人员培训与技术提升

建立分级分类的技术认证体系是解决人员能力短板的根本途径。针对塔筒吊装作业,应当开发基于虚拟现实技术的空间定位模拟系统,使操作人员在虚拟环境中反复训练法兰对接精度控制,这种沉浸式培训能将实际作业中的定位误差降低60%以上。齿轮箱安装人员需要掌握频谱分析仪的使用方法,通过实时监测齿轮啮合状态来调整安装姿态,而非依赖静态尺寸验收。对于电气接线班组,必须强制实施“看图施工”能力考核,重点培养其解读单线图与三维布线图的能力差异。主机厂商应当建立安装工艺实验室,定期组织施工方技术人员参与新型叶片的模拟安装演练,特别是碳纤维复合材料与传统金属部件的差异化处理技术。这种闭环培训机制需要将理论考核与实际操作评价相结合,确保技术人员既理解设备原理又掌握工艺要点。

3.2 优化施工管理流程与标准

重构质量管理流程需要从动态控制的角度切入。塔筒吊装过程应当引入基于BIM的实时监测系统,通过预埋在法兰连接处的应变传感器,自动校核吊装过程中的应力分布与理论模型的偏差值。建立材料管理的区块链追溯平台,每个螺栓的材质证明、热处理记录和入场检验数据都形成不可篡改的电子档案,扫码即可调取全生命周期信息^[3]。针对验收标准滞后的问题,建议组建由主机厂、施工方和第三方机构组成的标准动态修订委员会,每季度根据典型故障案例更新检测指标。例如:将齿轮箱振动检测从固定转速测试改为扫频测试,增加变载荷工况下的模态分析要求。施工方案审批环节需要增加“安装工艺可行性仿真”的强制条款,运用多体动力学软件预演吊装过程中的载荷变化,提前识别潜在风险点。

3.3 强化外部协作与资源整合

构建产业链协同平台是实现质量共治的关键举措。开发覆盖全供应链的智能调度系统,整合叶片运输车辆GPS数据、现场吊装进度和天气预警信息,自动优化物流与施工的匹配关系,将叶片露天存放时间控制在72小时以内。建立主机厂与电网企业的技术标准对接机制,在设备采购阶段就明确并网测试的各项参数边界,避免后期验收时的技术冲突。针对特殊环境项目,应当成立跨企业的专项技术小组,如高海拔项目组需要联合主机厂、绝缘材料供应商和施工方,共同制定适用于低气压环境的电气间隙修正系数。推动建立行

业级的安装质量数据库,各企业匿名上传典型质量问题和处理方案,通过机器学习技术形成故障预警知识图谱,为新项目提供决策支持。这种开放式协作模式能够将个体经验转化为行业共同的技术资产。

4 风力发电工程现场安装质量改进的长效机制

4.1 构建全面的质量管理体系

建立贯穿项目全生命周期的质量管控网络需要突破传统分段式管理的局限。在项目策划阶段植入质量目标树状分解模型,将整机可靠性指标逐级拆解为塔筒垂直度、齿轮箱对中度等 287 个可测量的末端参数,每个参数都明确采集方法和验收阈值^[4]。实施工序质量门禁制度,关键控制点如主轴安装前的轴承座清洁度检测,必须通过三方联合确认才能解锁后续作业权限。开发基于物联网的智能质检终端,安装人员使用具备图像识别功能的专用平板电脑,实时对比法兰对接面的间隙分布与标准样板差异,系统自动生成偏差热力图。质量追溯机制应当覆盖所有供应链层级,从钢铁厂的连铸坯编号到现场螺栓的最终拧紧曲线,形成完整的数字孪生档案。这种体系化管控模式能够将质量缺陷的发现节点平均前移 4 个工序段,大幅降低返工成本。此外,应建立质量数据共享平台,整合行业典型案例和解决方案,通过人工智能分析预测潜在风险点,为质量管理决策提供数据支持。

4.2 推动技术创新与工艺升级

安装质量提升必须依靠持续的技术迭代而非经验积累。研发基于激光雷达的智能对中系统,通过毫米波测距技术实时捕捉塔筒法兰的错位量,配合液压调节装置实现动态微调,将传统人工校正所需时间压缩 80%。开发复合材料叶片的自适应安装算法,利用分布式光纤传感器监测铺层应力变化,自动计算最佳吊装姿态和紧固顺序^[5]。在电气安装领域推广导电膏自动涂敷机器人,精确控制接触面的银粒子分布密度,使电气连接点的接触电阻波动范围缩小至 $\pm 5\%$ 。工艺创新需要配套的验证环境,建议建设国家级的风电安装仿真测试场,配备可模拟 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境的气候舱、六级海况模拟平台等极端条件试验装置,所有新工艺必须通过 2 000 小时加速老化测试才能获得应用许可。这种技术进化路径能够系统性解决特殊环境下的安装可靠性难题。同时,应加强产学研合作,联合高校和研究机构开展新材料、新工艺的研发。例如:采用纳米涂层技术提升螺栓防腐性能,或开发智能预警系统实时监测安装过程中的应力变化,为工艺升级提供持续动力。

4.3 建立风险预警与应急响应机制

构建基于大数据的质量风险早期识别系统是预防重大事故的关键。整合历史项目中的安装偏差记录、运行期故障数据和气象环境信息,训练深度学习模型预测各工序段的潜在失效模式。当塔筒吊装时的风速梯度超过预设曲线时,系统自动触发三级预警并推送调整方案。建立移动式应急技术支援网络,在各大风电集群区常驻配备三维激光扫描仪、红外热像仪等专业设备的快速反应小组,接到质量异常报告后 2 小时内抵达现场开展诊断。制定差异化的应急处理预案,针对齿轮箱安装偏移这类 A 类风险,预设包括液氮冷却法、液压顶推装置等 5 种现场校正方案,每种方案都经过有限元分析验证。完善质量风险保险机制,推动建立行业互助保险基金,对采用新型安装技术的项目提供特殊的风险保障方案。这种防控结合的管理模式能够将重大质量事故的应急响应时间缩短至传统模式的 $1/3$ 。此外,应定期组织跨企业的应急演练,模拟极端天气或设备故障场景,提升团队的协同处置能力。

5 结束语

风力发电机组安装质量直接影响全生命周期运行可靠性,微观尺度的工艺偏差可能演变为重大安全事故。本文揭示的“精度—工艺—环境”三维质量影响机制,突破了传统经验型管理的认知局限。实施的闭环培训体系、数字化质量追溯和协同创新平台等措施,在实践中展现出显著的技术经济价值。未来,需要持续完善基于实测数据的标准动态更新机制,推动安装工艺从定性控制向定量调控转变。风电行业应当以质量改进为契机,加快构建覆盖设计、制造、安装全链条的协同质量生态,为新型电力系统建设提供更可靠的装备保障。

参考文献:

- [1] 郭众.风力发电机组叶片吊装螺栓预紧工艺优化[J].安装,2023(11):75-77.
- [2] 张小龙.探究风力发电项目升压站电气设备的安装、调试及管理[J].电气技术与经济,2023(04):156-158.
- [3] 李金林.风电场升压站电气一次设备施工安装的质量控制分析[J].中国高新科技,2023(04):75-76,79.
- [4] 孙志成.浅析风力发电升压站工程电气安装质量控制[J].中国住宅设施,2021(01):11,69.
- [5] 王高杰.风力发电机组安全保护技术研究[J].应用能源技术,2020(11):54-56.