

风电建设项目安全管理核心挑战与优化路径

——基于高风险作业与复杂环境的视角

冯圣杰¹ 熊舒健² 康合壮² 崔 硕²

1. 华润新能源（仙桃）有限公司 湖北 仙桃 433000

2. 华润电力（仙桃）有限公司 湖北 仙桃 433000

【摘要】：在全球能源转型与“双碳”目标驱动下，风电产业进入规模化发展阶段，风电建设项目的安全管理成为保障工程顺利实施、推动行业可持续发展的关键环节。本文聚焦风电建设项目中高风险作业集中、施工环境复杂等核心特征，结合安全管理理论与行业实践，系统分析当前安全管理的现状与深层矛盾。通过梳理风电建设中高空作业、设备吊装、极端环境施工等典型风险场景，从管理体系、技术应用、人员素质、协同机制四个维度剖析安全管理的难点成因，并基于案例实证提出针对性的优化策略，包括风险动态评估体系构建、智能化安全监控技术集成、施工人员能力分级管理及多方协同责任机制完善等。研究旨在为风电建设项目提供更具操作性的安全管理方案，助力行业降低事故率、提升工程安全效能。

【关键词】：风电建设；安全管理；风险管控；复杂环境；高风险作业

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.076

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着清洁能源替代进程加速，全球风电装机容量持续增长，我国已成为风电大国，陆上风电向高海拔、山区延伸，海上风电向深远海拓展，项目建设难度与安全风险同步攀升。据国家能源局数据，2022-2024年全国风电建设项目共发生安全事故47起，其中吊装事故占比38%，高空坠落占比29%，造成直接经济损失超12亿元。事故不仅制约项目进度，更对行业声誉与社会信任度产生负面影响。因此，针对风电建设项目的安全管理进行系统性研究，既是响应《安全生产法》等法规要求的必然举措，也是推动风电产业高质量发展的现实需求。

1.2 国内外研究现状

国外对风电安全管理的研究起步较早，欧盟通过《可再生能源指令》明确风电项目安全评估标准，侧重风险预控与技术规范；美国OSHA（职业安全与健康管理局）针对风电施工制定了专项安全培训体系。国内研究多集中于具体风险治理，如王逸飞（2025）提出海上风电“环境-设备-人员”三维风险模型，李华等（2024）探讨了山区风电运输安全的路径优化。但现有研究对“高风险作业与复杂环境耦合下的系统性安全管理”关注不足，尤其缺乏对多方协同机制与动态风险评估的深度整合。

1.3 研究思路与方法

本文采用“理论分析-现状梳理-难点剖析-案例验证-策略提出”的研究框架，通过文献研究法梳理安全管理理论（如风险矩阵法、PDCA循环）；结合实地调研（选取5个典型风电项目，包括3个陆上山区项目、2个海上项目），收集施工日志、事故报告等一手数据；运用案例分析法，对2起重大安全事故

的成因与整改措施进行深度解构，最终形成可推广的优化路径。

2 风电建设项目安全管理的现状与特征

2.1 安全管理体系的构建与实践

当前风电建设项目普遍依据《建设工程安全生产管理条例》及行业标准（如NB/T 10096-2018《电力建设工程施工安全规程》）建立管理体系。以华电集团某风电项目为例，其构建的安全管理体系极具特色，在项目EPC总承包模式下，由建设单位统一组织，以总承包方为管理主体，负责总体策划与协调；施工承包商负责具体落实；监理单位负责监督管理；参建各方各自履行法定的安全责任；贯彻共同控制管理工程安全文明施工的原则，实现工程建设安全工作的“统一规划、统一组织、统一协调、统一监督”。在制度框架方面，涵盖施工组织设计审批、专项施工方案论证、安全技术交底等流程，且依托自主研发的“安全管理信息系统”实现制度数字化管理，系统可自动追踪各环节审批进度，逾期未处理事项会实时向相关负责人推送预警信息。应急管理上，制定台风、暴雨、设备故障等专项应急预案，定期开展桌面推演与现场演练，但预案针对性仍需提升（如海上风电对风暴潮的应急响应流程不完善等）。

2.2 安全培训与技术应用的进展

（1）培训体系：形成“三级安全教育”（公司级、项目级、班组级）基础上，结合岗位特点细分内容。如吊装工需通过“起重机械操作+风电设备特性”专项考核，考核内容包含针对风电塔筒吊装的特殊操作技巧；高空作业人员需定期进行体能与技能复测，复测项目增加了在模拟高空风载环境下的平衡能力测试。

（2）技术赋能：智能化技术逐步渗透，例如：

某山区风电项目采用 UWB（超宽带）定位技术对高空作业人员实时轨迹监控，当进入危险区域时，终端设备会发出声光报警，同时在监控中心显示具体位置信息；

应用 BIM+GIS 技术模拟山区风电设备运输路径，提前识别道路坡度、转弯半径等风险点，某项目通过该技术优化运输路线，使设备运输时间缩短 15%；

海上风电项目引入高精度气象预警系统，可提前 48 小时预测风速、浪高，辅助决策是否暂停作业，某项目凭借该系统成功规避 3 次台风影响。

2.3 行业安全管理的阶段性特征

（1）从“被动应对”向“主动预控”转型：数企业已将安全管理节点从施工阶段前移至勘察设计阶段，如某企业通过三维地质建模评估选址安全风险，在云南某风电项目中，提前发现一处潜在滑坡区域，及时调整风机选址，避免后期重大安全隐患；

（2）从“人工监控”向“智能防控”升级：头部企业的智能化投入占安全成本比例达 30%以上，但中小型企业仍依赖传统管理模式；

（3）从“单一项目管理”向“全产业链协同”延伸：设备供应商开始参与施工安全方案制定，如某风机设备厂家为其提供的风机配套专用吊装工具，并派技术人员到现场指导操作，降低因设备不匹配导致的安全风险。

3 风电建设项目安全管理的核心难点与成因分析

3.1 复杂环境与高风险作业的耦合风险

（1）自然环境的不确定性：

陆上山区项目面临“三多”问题：强风天气多（风速瞬时可达 10 级以上）、地质灾害多（滑坡、滚石）、运输路线多临崖路段（占比超 40%），如四川某山区风电项目，施工道路临崖路段占比达 45%，设备运输事故率较平原地区高 2.3 倍；

海上风电受“三因素”制约：潮汐变化导致施工平台晃动（最大振幅达 1.5 米）、盐雾腐蚀加速设备老化（如吊装索具寿命缩短 30%）、台风季窗口期短（年均有效施工天数仅 180 天左右），倒逼抢工期而忽视安全。

（2）高风险作业的叠加效应：

风机吊装（单件重量超 100 吨）需同步控制起吊角度、风速、地面承载力，任何参数失衡都可能引发倾覆；

（3）高空作业（塔筒高度达 80-120 米）面临“高空坠落+物体打击”双重风险，且作业面狭窄（塔筒内部直径仅 3-4 米），应急逃生难度大；

（4）电气安装涉及高压电缆接驳（电压等级达 35kV），若绝缘层破损或操作失误，易引发触电或火灾。

3.2 施工人员与管理协同的结构性矛盾

（1）人员素质的“短板效应”：一线施工人员中，农民工占比超 70%，初中及以下学历占 62%，对复杂设备操作规程的理解能力有限；人员流动性大（年均周转率达 40%），导致安全培训效果难以持续，重复违规率高（如未系安全带、擅自拆除安全防护设施）。某施工队半年内人员更换率达 50%，安全违规行为复发率较稳定队伍高 3 倍。

（2）多方协同的“壁垒效应”：参建单位目标差异：施工单位追求进度，监理单位侧重合规，设备供应商关注设备保护，易出现“安全责任推诿”。如吊装事故中，施工方称设备超重，供应商称操作不当；信息传递不畅：传统纸质交底单易丢失，各单位数据不互通（如监理发现的隐患未及时同步至施工班组），导致隐患整改滞后。

3.3 安全技术应用的局限性

（1）技术适配性不足：部分智能设备在极端环境下失效，如山区暴雨导致 UWB 定位信号中断，海上盐雾腐蚀监控摄像头镜头；

（2）成本与效益的平衡难题：一套完整的风电吊装监控系统（含应力传感器、倾角仪、数据平台）成本约 50 万元，中小型项目难以承担，导致技术应用覆盖率不足 30%；

（3）人机协同能力弱：操作人员对新技术的掌握不足，如某项目因监控系统报警阈值设置错误，未能及时发现吊装索具超载，最终导致设备损坏。

4 风电建设项目安全管理的优化策略

4.1 构建动态化风险评估与分级管控体系

（1）全周期风险识别：前期阶段：采用“GIS+无人机航拍”绘制施工区域三维地形模型，结合历史气象数据（近 10 年风速、降水）生成“环境风险热力图”；施工阶段：建立“作业风险数据库”，对吊装、高空作业等活动进行“作业条件危险性评价（LEC 法）”，根据风险值（D 值）分为“红、黄、蓝”三级，红色风险需制定专项方案并经专家论证。

（2）动态响应机制：设立“安全风险预警中心”，实时接收环境监测数据（风速 $\geq 10\text{m/s}$ 时自动预警）、设备运行参数（如吊装力矩偏差超 5%时停机）；

（3）推行“风险告知卡”制度，针对高风险作业，在现场张贴包含“风险点、管控措施、应急处置”的可视化卡片，确保全员知晓。

4.2 强化高风险作业的标准化与智能化管控

（1）作业流程标准化：制定《风电建设高风险作业安全规程》，明确吊装“十不吊”（如信号不明不吊、斜拉歪吊不吊）、高空作业“五必须”（必须系安全带、必须设监护等）；推广“模块化施工”，将塔筒内部电气安装等高空作业转移至

地面预制,减少高空作业时长(可降低高空作业风险40%)。

(2) 智能技术深度应用:试点“数字孪生”技术,构建风机吊装虚拟仿真场景,模拟不同风速、角度下的作业状态,优化施工方案;为高空作业人员配备“智能安全装备”(如带定位与报警功能的安全鞋、可监测生命体征的安全带),实现“人员状态-环境参数-设备运行”的联动监控。

4.3 完善人员能力提升与激励约束机制

(1) 分层分类培训:基础层(农民工):采用“图文+短视频”形式培训安全常识,重点考核“保命条款”(如高空作业禁忌);技能层(吊装工、电工):开展“理论+实操+应急演练”培训,通过VR模拟事故场景(如塔筒坠落)提升应急处置能力;管理层:培训风险评估、协同管理技能,考核安全投入与事故率等指标。(2) 人员管控创新:建立“施工人员电子档案”,记录培训记录、违规次数、技能等级,实行“星级管理”(五星级工人可优先参与高风险作业);(3) 推行“安全积分制”,将积分与工资挂钩(1分=100元),积分清零者暂停作业并重新培训。

4.4 搭建多方协同的安全管理平台

(1) 组织协同机制:成立“项目安全委员会”,由建设单位牵头,每周召开“安全协调会”,采用“问题清单+闭环管理”模式(明确整改责任人与时限);引入第三方安全监理,独立开展风险评估与隐患排查,直接向建设单位汇报(避免受施工单位干预)。

(2) 信息协同平台:开发“风电建设安全管理APP”,实现隐患上报、整改反馈、安全交底的线上化,关键信息自动同步至各参建单位;建立“安全信用档案”,将参建单位的安全表现与市场准入挂钩(如事故率超标的单位限制参与后续项目投标)。

5 案例实证:某海上风电项目安全管理优化实践

5.1 项目背景与初始问题

该项目位于广东沿海,规划装机容量500MW,包含50台风机及配套海缆工程。建设初期存在三大问题:台风季(6-10月)施工频繁中断,为赶工期多次违规作业(如风速达12m/s

时仍进行吊装);参建单位(施工、监理、设备商)各执一词,某风机基础浇筑质量问题因责任不清导致整改延误;高空作业违规率高(月均发现22起未系安全带行为)。

5.2 优化措施与实施效果

风险评估升级:引入“台风路径预测系统”,提前72小时发布停工预警,调整施工计划(非台风季增加夜班作业,台风季集中开展地面预制);协同机制完善:成立安全委员会,制定《多方责任划分清单》(明确设备到场验收由供应商与监理共同签字),通过APP实现隐患闭环管理(整改及时率从65%提升至98%);人员管理强化:开展“海上风电安全特训营”,采用VR模拟高空坠落后果,违规率下降至月均5起;技术赋能:为每台吊装设备安装“智能监控终端”,实时上传力矩、角度数据,半年内拦截3次过载风险。

5.3 实践启示

该项目通过优化管理,实现“零死亡、零重大设备事故”,工期提前15天,验证了动态风险评估、多方协同与技术赋能的有效性。其经验表明,安全管理需“软硬结合”——既要有制度约束,也要有技术支撑,更要注重人员意识的提升。

6 结论与展望

6.1 研究结论

风电建设项目的安全管理需突破“复杂环境-高风险作业-人员素质-多方协同”的多重约束,通过构建动态风险评估体系、强化高风险作业标准化、提升人员能力与技术适配性、完善多方协同机制,可有效降低事故率。案例表明,针对性的优化策略能显著提升安全管理效能,实现“安全与进度”的双赢。

6.2 未来展望

智能化深度融合:探索AI算法在风险预测中的应用(如基于历史数据预测吊装事故概率),开发适用于极端环境的耐候性监控设备;全生命周期延伸:将安全管理从施工阶段拓展至运维阶段(如风机运行中的结构疲劳监测),构建“建设-运维”一体化安全体系;行业标准完善:推动制定《海上风电建设安全规程》《风电施工人员技能等级标准》等,统一安全管理尺度。

参考文献:

- [1] 国家能源局.风电项目建设安全管理办法(2023 修订版)[Z].2023.
- [2] 王逸飞,张明.海上风电工程安全风险评估与防控[M].北京:中国电力出版社,2025.
- [3] 李华,刘军.山区风电设备运输路径优化与安全控制[J].中国安全科学学报,2024,34(2):12-18.
- [4] 欧盟委员会.Renewable Energy Directive(2018/2001/EU)[S].2018.
- [5] OSHA.Wind Energy Work Safety Guidelines[Z].2022.
- [6] 中国电建集团.风电建设项目安全管理信息系统技术规范[Q/CEC 123-2023][S].2023.