

海上风电场风机安装过程中安全风险管控

吴晓鹏 郭成成

上海勘测设计研究院有限公司 上海市 200080

摘 要：海上风机安装受复杂海域与气象条件影响，工序繁杂、多工种协同作业，安全风险具备动态性、耦合性特征。本文梳理海上风机安装核心施工流程，识别人员、设备、环境、管理四类核心风险，结合 LEC 法、模糊综合评价等多重方法开展风险分级评估，剖析各类风险成因与传导机制，针对性搭建人员、设备、环境管控措施及全维度安全保障体系，为海上风电安装施工安全管控提供实用参考。

关键词：海上风电场；风机安装过程；安全风险管控

引言：海上风电作为清洁低碳的新能源核心业态，开发规模持续扩大，风机安装施工安全是项目建设的核心重点。海上作业存在气象多变、水文复杂、高空吊装多、多船协同难度大等特点，相较于陆地施工安全风险更高、隐患更隐蔽、事故处置难度更大。为有效防范施工安全事故，精准管控各类安全隐患，本文系统开展风机安装全过程风险识别、评估分析，构建系统化风险管控策略与保障体系，筑牢海上风电施工安全防线。

1 海上风机安装施工特点及安全风险识别

1.1 海上风机安装核心施工流程

(1) 施工前期准备：包括海底地形及地质详勘、施工船舶及大型起重设备进场就位、海上运输路线规划与通航申报，以及专用工装、锚泊系统等辅助设施部署。(2) 基础施工与塔筒吊装施工流程：先完成钢管桩或导管架基础沉桩，随后进行基础顶法兰水平度精调，再分段吊装塔筒，逐段螺栓连接并施加设计预紧力。(3) 机舱、叶轮等核心部件吊装与对接施工流程：将机舱吊至塔筒顶部精准对接，紧固高强度螺栓；叶轮在甲板或专用平台上完成组装后整体起吊，与机舱主轴孔对接，并完成变桨、偏航等初步测试。(4) 设备调试与竣工验收施工流程：依次进行电气系统接线、通讯链路测试、静态及动态功能调试，最后组织联合验收，同步回收辅助设备并清场^[1]。

1.2 海上风机安装施工特殊风险因素

(1) 自然环境风险：台风突袭、短时强暴雨、大浪涌、海雾导致能见度骤降，以及季节性极端温差使结构材料产生附加应力，均可能造成作业中断或设备损坏。(2) 海域环境风险：强洋流与潮汐变化影响船舶定位稳定性，海底不明障碍物威胁锚泊安全，长期

高盐雾、强紫外线环境加剧钢结构及电气设备腐蚀速率。(3) 海上作业专属风险：高处作业人员坠落，大型构件水上吊装过程中偏摆或脱钩，多船协同作业存在碰撞或缆绳缠绕，且机舱、塔筒内部受限空间易积聚有害气体或缺氧。

1.3 全方位安全风险识别结果汇总

(1) 人员风险：作业人员操作不规范，特种作业持证不足或技能欠缺，安全意识薄弱，长时间轮班致疲劳累积，误操概率增加。(2) 设备风险：主吊机及钢丝绳等关键部件突发故障，叶片、法兰等核心件存在制造或运输缺陷，施工船舶动力或定位系统老化，安全带、检测仪等防护设备失效。(3) 管理风险：安全管理制度有漏洞，专职监管力量不足或巡查频次不够，应急预案未经实战演练且响应模糊，工序未按标准化执行。(4) 环境风险：突发恶劣天气预判不足，潮位、流速等水文条件意外突变，临近航道或渔区船舶通行频繁，构成通航干扰与碰撞风险。各类风险识别成果为后续制定防控措施提供依据。

2 海上风电风机安装过程安全风险分析与评估

2.1 安全风险评估方法选取

(1) 常用工程风险评估方法对比分析：目前常用方法包括 LEC 法、格雷厄姆-金尼法、FTA、ETA、AHP 及模糊综合评价等。LEC 法操作简便、直观高效，适用于现场快速初判，但主观性强，难以反映复杂系统耦合风险；FTA 与 ETA 擅长逻辑推导和事故链分析，但对数据要求高、建模工作量大；AHP 和模糊综合评价可处理多因素综合评估，但计算较复杂。单一方法难以全面覆盖海上风机安装的多源动态风险特征。(2) 适配海上风机安装工程的风险评估方法确定：结合该作业环境多变、

工序紧密、风险耦合的特点,本文确定采用LEC法开展现场快速风险分级,为日常管控提供直观依据;引入基于模糊综合评价的量化模型,对各类风险因素多维综合打分,克服LEC主观偏差;同时借助故障树分析对高处坠落、起重伤害等典型重大事故进行逻辑溯源,明确关键致因节点。三种方法分层搭配、相互印证,形成“快速筛查—量化评级—深层归因”的递进式评估体系,提升评估结果的科学性和工程实用性。

2.2 各类风险等级量化分析

(1) 高风险因素:主要包括大型构件高空吊装坠落、起重设备或塔筒整体倾覆、多船交叉作业时船舶碰撞、以及台风突袭等极端天气引发的事故。此类风险发生概率虽相对较低,但一旦触发,往往造成人员群死群伤、重大财产损失及长时间工期延误,综合风险等级评定为I级,须纳入停工或专项方案审批管控。(2) 中风险因素:涵盖吊机液压系统局部渗漏、电气元器件瞬时故障、作业人员未正确佩戴安全带或操作步骤遗漏、常规风浪流条件下船舶小幅晃动对位偏差等。上述风险发生频率中等,事故后果局限于局部设备损坏或轻伤事故,整体风险等级评定为II级,可通过加强巡检、规范操作流程等措施予以控制^[2]。(3) 低风险因素:包括施工日志填写不完整、工具物料临时堆放不规范、防护手套或安全绳表层轻微磨损、非关键工序的日常作业小隐患等。此类风险对工程全局影响微弱,风险等级评定为III级,纳入日常安全行为观察和班组自主管理即可有效消除。

2.3 风险成因及影响机制分析

(1) 人为因素导致安全风险的核心成因与事故影响:核心成因集中于作业人员安全意识淡薄、专业技能培训不到位、现场沟通协调不畅以及连续高强度作业导致疲劳操作。人为失误往往直接引发吊点绑扎不牢、指挥信号误判、应急响应迟缓等问题,其影响不仅表现为单点事故,更可能通过连锁反应放大为系统性安全事件。(2) 设备与物料因素引发风险的传导机制:设备故障或物料缺陷首先表现为局部功能异常,如起重力矩限制器失灵、钢丝绳断丝超标、高强螺栓批次质量不达标等。若巡检未及时发现,异常状态将沿“单机故障—工序中断—工期延误—交叉作业冲突加剧”的路径逐级传导,最终可能导致整体安装作业面失控^[3]。(3) 环境与管理因素诱发风险的叠加效应分析:恶劣海况或突发气象灾害在降低作业窗口期可用率的同时,会迫使施工方压缩工期、赶抢进度,从而加大人员疲劳和设备超负荷运行概率。若此时现场安全管理机制不健全、监管

缺位,则自然环境压力与管理制度缺陷相互叠加,形成“环境施压—管理失效—人机负荷增加”的恶性循环,显著抬升重大事故的触发概率。上述分析为后续制定针对性风险防控策略奠定了清晰的逻辑基础。

3 海上风电风机安装过程安全风险管控策略与保障体系

3.1 人员安全风险管控措施

(1) 完善作业人员岗前培训与持证上岗制度:针对海上风机安装涉及起重、高空、焊接、电气等多类特种作业,制定分类培训大纲,明确理论考核与实操鉴定标准。所有入场人员须持有相应有效资质证书,并经过项目级、班组级三级安全教育,培训合格后方可上岗作业。同时建立人员资质动态台账,定期核查证书有效期,确保持证率100%。(2) 强化现场人员安全交底与动态监管:每日开工前由班组长组织当班安全技术交底,针对当日施工内容、气象海况、重点风险及防控要点逐项说明,确保全员知悉。作业过程中设置专职安全巡视员,对关键工序、交叉作业面实施旁站监督,及时纠正违规操作。引入执法记录仪或移动监控设备,实现作业行为可追溯。(3) 建立人员作业行为考核与奖惩机制:制定量化安全行为考核表,将个人防护用品佩戴、标准化操作执行、风险主动报告等纳入日常评分体系。实行月度安全绩效与薪酬挂钩制度,对连续无违章人员给予正向激励,对严重违章者执行停工再教育或退场处理,通过刚性约束与柔性激励相结合的方式强化人员安全意识。

3.2 设备与施工安全风险管控措施

(1) 施工船舶、吊装设备常态化检修与运维管理:建立主要设备“一机一档”管理制度,编制定期检修保养计划,涵盖主吊机钢丝绳、卷扬系统、力矩限制器、定位锚机等关键部件。每航次作业前实施开机自检与空载试运行,每月开展一次全面专业维保,对发现隐患实行“发现—登记—整改—验收”闭环管理,确保设备始终处于良好技术状态。(2) 风机零部件进场质检与吊装全过程质控:对所有进场塔筒段、机舱、叶片、高强螺栓等进行外观检测、尺寸复验及材质证明文件核查,关键部件委托第三方检测机构抽样测试。吊装过程中执行工序交接检制度,上一工序未经验收合格不得转入下一工序,重点管控螺栓紧固力矩、法兰面清洁度、密封胶填充等关键质量指标^[4]。(3) 优化吊装施工工艺,规范标准化作业流程:结合不同机型与海域条件,编制分项吊装作业指导书,明确各工序站位规划、起重参数、吊具选型及指挥信号规则。推广模块化组装与整体起吊工艺,减

少高空对接频次；建立标准作业票制度，每项吊装作业须经风险评估、审批许可方可实施，实现工艺操作的规范化与程序化。

3.3 环境风险预判与防控措施

(1) 搭建海上气象、水文实时监测预警系统：在施工海域布设小型气象站与波浪浮标，实时采集风速、风向、波高、潮位、流速等关键数据，接入岸基指挥中心。同时对接当地海洋预报台与气象部门，获取中期天气预报与台风路径推演信息，建立“日预报+临前预警”两级信息推送机制，确保施工决策基于可靠环境数据。(2) 制定恶劣天气停工避险与应急处置预案：根据风机安装作业耐受极限，分风速、波高等指标设定黄、橙、红三级预警阈值，对应制定停工、锚泊避风、撤场返航等分级响应措施。每季度组织一次桌面推演或实地演练，检验预案可操作性，确保所有船舶与人员明确各自撤离路线与通讯频点。(3) 优化施工窗口期规划，规避高风险海域作业时段：综合历史水文统计与年度气象预测，划定每月最佳作业窗口时段，合理安排大型吊装等高危工序在窗口期内集中实施。对于潮流湍急、通航密集的海域区段，主动避开急流时段与通航高峰重叠期，从源头降低环境耦合风险^[5]。

3.4 安全管理保障体系构建

(1) 健全海上风电安装安全管理制度与规范标准：依据《海上风电安全规程》《起重机械安全管理办法》等上位法规，编制项目部层级安全管理制度汇编，涵盖风险辨识、隐患排查、变更管理、事故报告等全流程规定。定期复审并动态修订制度，确保体系完整、权责清晰、执行有据。(2) 完善现场安全监督管理体系，落实全员安全责任：建立项目经理总负责、专职安全工程师统筹、班组设兼职安全员的三级监管架构，逐级签订责任书，将安全指标纳入绩效考核。实施日常巡查、周联合检查、月综合考评，推行安全观察卡与隐患随手拍，鼓励全员参与隐患上报，形成“人人管安全”的现场氛

围。(3) 搭建应急救援体系，配齐应急物资与救援队伍：编制综合应急预案及火灾、落水、人员受伤、船舶失控等专项处置方案。在施工母船及作业平台配置急救站、救生筏、灭火系统、通信定位等应急物资，与周边海事局、救助飞行队及定点医院签订联动救援协议，确保事故后30分钟内启动协同救援。(4) 引入智能化监测技术，实现风险动态管控：在起重设备安装力矩、倾角、风速等监测终端，在塔筒及基础结构布设应变与振动监测节点，数据通过物联网平台汇集至数字化指挥中心。利用大数据建立风险预警模型，对超限数据自动报警并推送责任人，推动风险管控从周期性检查向实时动态感知转变，提升安全管理主动性与精准性。

结束语

本文全面完成海上风机安装施工全流程安全风险识别、分级评估及成因分析，针对性制定多维度风险管控措施，搭建标准化、智能化的安全管理保障体系。通过分层管控高、中、低各类风险，打通风险预判、现场管控、应急处置全链条，有效破解海上风电施工风险耦合难题。未来可结合智能化监测技术持续优化管控模式，进一步提升海上风机安装施工安全管控的精细化、智能化水平。

参考文献

- [1] 李达, 孙涛, 易丛. 深远海风电施工安装安全风险辨识与管控体系研究 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(02): 108-122.
- [2] 王炳忠, 张磊, 刘钊. 海上风电机组吊装施工典型安全风险及防控技术 [J]. 电力建设, 2024, 45(07): 62-69.
- [3] 陈刚, 周宇航. 近海复杂海况下风机安装施工安全风险动态管控研究 [J]. 水电能源科学, 2023, 41(09): 187-191.
- [4] 赵鑫, 李建峰. 海上风电工程高空吊装作业安全隐患溯源与治理对策 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22(08): 112-118.
- [5] 吴佳伟. 海上风电场风机安装施工安全风险精细化管控策略 [J]. 可再生能源, 2025, 33(05): 78-83.