风机叶片吊装施工安全风险分析与控制

李青龙

甘肃绿电电力运营有限公司　甘肃　兰州　730000

摘　要：风机叶片吊装是风电施工中风险最集中的环节，叶片超长、柔性大、受风敏感，加之野外复杂气象与高空高精度对位要求，事故频发。本文从自然环境、机械设备、人员操作、场地工序、安全管理五个维度系统识别叶片吊装安全风险，并从环境预判、设备运维、人员素养、现场管控四方面剖析风险成因，提出强化气象监测、规范设备运维、加强人员培训、优化现场管理、完善应急体系等控制对策。研究表明，叶片吊装安全需构建“环境预判—过程管控—应急兜底”三层防线，实现从被动应对向主动预防的转变。

关键词：风机叶片；吊装施工；安全风险；风险识别；风险控制；风电工程

引言：风机叶片吊装是风电施工的核心工序，当前主流叶片长度超 70m，海上风机叶片可达百米，构件超长、柔性大、受风面积广，施工安全挑战严峻。据统计，风机安装事故中约三至四成发生在叶片吊装阶段，一旦发生事故往往造成设备损毁、人员伤亡和工期延误。野外施工易遇突发阵风、湍流等恶劣气象，塔筒、机舱、叶片多工序立体交叉作业进一步放大风险。目前部分施工企业对叶片吊装风险认识不足，管控碎片化，未形成系统化防控体系。本文从风险识别、成因分析、控制对策三个层面展开，构建全过程安全风险管控框架。

1 风机叶片吊装施工概述

1.1 风机叶片施工特点

大型风机叶片采用玻璃钢复合材料，具有长度大、自重轻、柔性大、抗冲击性差、受风荷载敏感的特点，与普通吊装构件存在本质区别。当前陆上主流叶片长度普遍超过 70m，海上叶片可达 90m 以上，微小风力扰动即可引发叶片大幅度摆动与震颤。叶片表层材质脆弱，吊装中轻微碰撞即可造成表层开裂、胶层脱落、内部分层等损伤，影响服役寿命与运行安全。同时，叶片吊装属于高空高精度对位作业，可视条件有限、对位精度严苛，且施工多处于山地、丘陵、沿海露天场地，地形起伏大、施工平台受限，交叉作业、高空作业、起重作业叠加，整体施工风险远高于普通建筑工程。

1.2 主流吊装施工工艺流程

国内风场普遍采用单机单叶片吊装工艺，流程分为前期准备、地面组装、试吊、正式起吊、空中对位、螺栓紧固、吊具拆除七大环节。前期完成场地平整、吊车占位压实、风速监测、叶片检查与吊具调试；地面阶段安装叶片护具、吊带、限位装置，排查损伤与缺陷；试吊环节将叶片小幅起升离地，检验吊车受力、吊带平衡、制动性能与风速条件；正式起吊阶段匀速提升叶片，全程控制姿态规避摆动旋转；高空阶段配合主辅吊调整角度，精准对接轮毂法兰盘；完成螺栓对角紧固、扭矩复检后拆除吊具。整套工序环环相扣，任一环节疏漏均可能引发安全事故[1]。

1.3 吊装施工安全管控难点

叶片吊装安全管控难点集中在环境不确定性、构件特殊性、作业高危性与管理复杂性四方面。风场野外气象多变，瞬时阵风、湍流难以精准预判，风速超标是叶片摆动碰撞的主要诱因。叶片柔性大、惯性强，空中姿态难以精准控制，极易扭转、甩动、磕碰塔筒。高空作业人员操作空间狭小，对位偏差、配合失误易引发隐患。施工现场涉及起重、高空、指挥、监护多岗位协同，配合默契度要求高，调度与应急处置难度大。部分项目抢工期、压缩施工间隔，进一步放大吊装安全风险，增加隐患管控难度。

2 风机叶片吊装施工安全风险识别

2.1 自然环境风险

自然环境是叶片吊装不可控的核心风险源，涵盖风况、气象、地形三类。风况风险最为突出，规范要求吊装风速不得超过 10.8m/s，瞬时阵风、乱流会造成叶片无规律摆动、震颤、旋转，导致撞击塔筒、吊绳受力失衡，严重时引发吊车倾覆、叶片坠落。阴雨、大雾、沙尘降低可视度，影响指挥信号传递与对位精度，潮湿环境降低吊具摩擦力，增加打滑风险。山地风场山谷气流、狭管效应形成局部强风与乱流，预判难度大；冬季

低温致吊具韧性下降、材质硬化，提升断裂概率。多重环境因素叠加，大幅增加吊装安全隐患。

2.2 机械设备与吊具风险

起重吊车长期野外作业，易出现液压系统渗漏、制动失灵、支腿沉降、力矩限制器失效等故障，超载、老化、维保不到位可致吊车倾覆、吊重失控。叶片专用吊带、卸扣、夹具长期使用易磨损、断丝、变形、锈蚀，未及时检测更换可致吊具断裂、叶片脱落。吊具安装不规范、受力不均、绑扎偏移，会造成叶片倾斜、扭转、重心偏移，引发空中姿态失控。风速监测设备失灵、通讯设备信号干扰、仪器数据偏差，会导致施工误判误操作，形成连锁安全风险[2]。

2.3 人员操作与协同风险

人为因素是叶片吊装事故的首要诱因。起重司机存在风速超标强行作业、急起急落、超载试探等违规行为，破坏受力平衡。指挥人员专业能力不足，手势、口令不规范，多岗位协同混乱，起吊、对位指令衔接失误，易引发碰撞。高空作业人员安全意识薄弱，存在未系安全带、违规探头、螺栓紧固不达标等问题。施工人员疲劳作业、抢工期侥幸心理、新员工经验不足、应急处置能力差，在突发阵风、设备异常时无法快速有效处置，进一步放大事故危害。

2.4 施工场地与工序风险

山地风场施工平台狭小、地基承载力不足，支腿铺垫不规范、压实度不足，吊装受力后易支腿下沉、车身倾斜，引发倾覆。现场物料堆放杂乱、未有效围挡，无关人员随意进出，易发生人员闯入、设备碰撞。部分项目简化试吊流程，未完成受力检测即正式起吊；工序衔接混乱，上道未验收即开展下道；多设备交叉作业、安全距离不足，易引发碰撞干涉。同时，施工前未开展专项安全技术交底，班组对风险要点、管控标准掌握不足，隐患常态化存在。

2.5 安全管理体系风险

安全管理漏洞是隐患长期存在的根本原因。部分单位安全制度流于形式，未制定大型叶片吊装专项安全方案与应急预案，管控无标准依据。安全巡查、隐患排查表面化，对违规作业、设备缺陷等问题整改不彻底，闭环管理缺失。安全培训内容笼统，未结合叶片吊装高危特性开展实操与应急演练，人员风险辨识能力薄弱。安全责任落实不到位，岗位职责模糊，监护人员脱岗漏岗频发。重进度轻安全的管理理念导致违规冒险作业常态化，应急物资配备不足、处置机制不健全，事故发生后无法快速止损。

3 风机叶片吊装主要安全风险成因分析

3.1 环境预判与监测机制不完善

气象监测体系不完善是环境风险失控的核心原因。多数施工现场仅依靠简易手持风速仪，监测点位单一、频次不足，难以捕捉瞬时阵风、局部乱流等突发气象变化。施工人员对山地狭管效应、山谷风等特殊气象规律认知不足，未结合地形制定差异化管控标准，仅凭经验判断作业条件，主观随意性强。同时，未建立气象预警停工机制，风速临近阈值时仍冒险施工，缺乏提前预判、主动停工的管控意识，导致环境类突发风险无法提前规避，极易引发叶片碰撞、设备失控等安全事故[3]。

3.2 设备运维与检验制度不规范

设备常态化运维与检测机制缺失是设备故障频发的主因。施工单位未建立设备全生命周期台账，日常检修、保养、校验落实不到位，老旧设备、磨损吊具超期服役普遍。部分项目为压缩成本，未定期开展设备专项检测，吊带磨损、卸扣锈蚀等隐患长期存在。设备进场验收流程简化，未严格核查工况与安全性能，不合格设备违规进场。同时，设备使用中未严格执行操作规程，长期超载加速老化，吊具绑扎、调试缺乏标准化流程，人为造成受力不均、性能下降，大幅提升设备失效风险。

3.3 人员素养与实操能力参差不齐

从业人员专业能力不足、安全意识薄弱是人为风险频发的关键。风电吊装行业人员流动性大，多数一线作业人员未接受系统叶片吊装专项培训，对受力特性、风险要点、操作规范认知不足。起重司机、指挥人员持证上岗率不达标，部分人员无证上岗、证件过期，面对复杂工况处置能力不足。安全技术交底流于形式，未针对当日工况、场地条件、气象特点开展针对性交底。绩效考核与安全约束机制不完善，违规作业成本低，人员侥幸心理严重，习惯性违章、冒险作业屡禁不止，人为风险难以根治。

3.4 现场管控与应急体系不健全

现场精细化管控缺失、应急体系不完善，导致隐患无法闭环治理、事故无法有效止损。项目未建立叶片吊装专项安全管控方案，施工流程与风险管控要求不明确，现场施工随意性大。安全监护制度落实不到位，高危作业时段专职监护缺失，无法及时制止违规作业。工序验收机制不规范，试吊、对位等关键工序未严格执行验收流程。多数项目未制定叶片碰撞、设备倾覆等专项应急预案，演练频次不足，应急物资配备不足，突发事

故后响应迟缓、处置不当，造成事故扩大化，加剧人员与经济损失。

4 风机叶片吊装施工安全风险控制对策

4.1 强化气象环境监测，严控环境作业条件

建立全方位气象监测与作业管控机制。布设固定式气象监测站，搭配移动式手持设备，实现多点位、全天候风速、风向、湍流、温湿度实时监测，自动记录数据并生成预警。结合山地、沿海风场地形特征，梳理局部强风、乱流高发时段与区域，制定差异化作业标准，严禁阵风超标、大雾、暴雨、沙尘天气吊装。建立分级预警停工机制，风速接近阈值时提前停工、平稳落地叶片，杜绝冒险作业。每日施工前开展气象专项研判，结合当日天气、地形风况制定计划，从源头规避环境风险。

4.2 规范设备运维管理，保障硬件设备可靠运行

构建设备全生命周期管控体系。严格落实设备进场验收，对吊车、吊具、监测设备进行全方位性能检测。建立常态化运维台账，定期对液压系统、制动系统、力矩保护装置检修校准，对吊带、卸扣、夹具每日检查、定期更换，及时淘汰不合格吊具。规范吊具安装与绑扎标准，根据叶片尺寸确定绑扎点位，保证受力均匀、重心稳定。定期校准风速仪、对讲机等设备，保障数据精准、信号稳定。严格执行操作规程，严禁超载、超速、违规操作，保障设备全程稳定运行[4]。

4.3 加强人员培训管控，规范现场操作行为

严格落实全员持证上岗制度，无证人员严禁参与吊装作业。建立常态化专项培训机制，围绕操作规范、风险识别、协同配合、应急处置开展培训，结合事故案例警示教育。每日施工前开展针对性安全技术交底，结合当日工况、气象、场地明确施工要点与管控措施。规范现场操作，严禁急起急落、强行对位、风速超标作业，高空作业必须规范佩戴防护用具。建立违章考核问责机制，对违规操作、脱岗失职严肃追责，提升多岗位协同作业精度。

4.4 优化现场施工管理，规范工序流程管控

施工前期平整压实吊装平台，规范支腿铺垫，检测地基承载力。划分标准化作业区域，设置围挡警示，严禁无关人员进入吊装半径。严格执行试吊验收，正式起吊前完成小幅试吊，检测设备受力、吊具状态、叶片姿态，验收合格后正式施工。规范工序衔接，落实上道验收、下道施工制度。优化现场调度，合理排布工序，规避多设备交叉作业。落实专职安全监护，高危作业全程专人监护，实时排查隐患，实现动态清零。

4.5 完善安全管理制度，健全应急处置体系

制定专项安全施工方案与风险管控细则，明确岗位职责，压实安全责任。建立常态化隐患排查机制，每日吊装前排查、每周专项检查，实现闭环管理。摒弃重进度轻安全理念，严禁抢工期、冒险作业，合理排布施工计划。完善专项应急预案，针对叶片碰撞、吊具断裂、吊车倾覆等事故制定处置流程，定期开展实战演练，提升应急处置能力[5]。配齐救援工具、防护物资、应急设备，确保突发事故快速响应、有效处置，最大限度降低损失。

结束语

风机叶片吊装施工安全风险类型多样、耦合性强、突发性高，单一环节管控难以实现本质安全。本文系统识别了五类核心风险源，从环境预判、设备运维、人员素养、现场管控四方面剖析风险成因，构建了覆盖吊装全过程的系统化风险控制体系。研究表明，叶片吊装安全的本质是高风险工序的系统化管控，关键在于从“人机环管”四要素协同发力，形成事前预控、事中监控、事后应急的全链条闭环。施工单位应将控制措施制度化、常态化，切实提升叶片吊装施工的本质安全水平。

参考文献

[1] 徐翔, 柴全银, 高鹏, 等.6MW 陆上风机叶轮吊装施工技术研究 [J]. 水电与新能源,2023,37(2):34-37.

[2] 周国兴, 孙焕锋, 雷传, 等. 海上风电 7.5MW 风机叶片吊装施工技术研究 [J]. 水电与新能源,2022,36(10):24-27.

[3] 唐路成. 超长大直径叶轮风机单叶片吊装施工技术 [J]. 科学技术创新，2023(6)：225-228.

[4] 吴官宏, 库玉博. 浅谈陆上风电场风机吊装施工技术 [J]. 水利水电施工，2025(5)：117-119.

[5] 龚欢, 叶兆艺, 卫洪英, 等. 吊装状态下风机叶片受力特性数值模拟研究 [J]. 科技通报,2024,40(6):20-24.