

# 多风地区风电机械化施工关键技术研究

吴杰, 莫方强

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 611730)

**摘要** 在双碳目标引领下, 我国风电开发持续向多风地区拓展, 大风环境下的机械化施工成为风电项目建设的核心难点。本文以国家电投额敏 50 万千瓦风电项目为例, 系统分析了多风环境对风电机械化施工的核心影响, 通过梳理项目施工面临的工期紧张、吊装风险高、作业窗口期短等核心难点, 从人员技能提升、起重设备优化、施工工艺创新、安全管控升级四个方面提出多风地区风电机械化施工关键技术体系。通过现场应用验证, 该技术体系可有效降低大风环境下的吊装作业风险, 缩短单台风机安装周期, 提升施工效率与作业安全性, 为同类多风地区风电工程建设提供技术参考与实践经验。

**关键词** 多风地区; 风电工程; 机械化施工; 吊装技术

**中图分类号**: TM614

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.037

## 0 引言

全球能源转型进程持续加快, 风能作为清洁可再生能源, 已成为各国能源结构调整的核心方向。我国西北多风地区风能资源储量丰富, 是国内风电规模化开发的重点区域。但多风地区普遍存在风速波动大、极端风况频发、有效作业窗口期短等问题, 给风电机械化施工尤其是核心的吊装作业带来极大挑战<sup>[1]</sup>。传统风电施工工艺与设备管理模式已难以适配多风地区的特殊施工环境, 易出现吊装作业风险高、施工效率低、工期管控难度大等问题<sup>[2]</sup>。基于此, 本文依托新疆额敏玛依塔斯风区风电项目, 开展多风地区风电机械化施工关键技术研究, 破解大风环境下风电施工的核心难点, 推动风电工程施工技术的优化升级。

## 1 工程概况与施工核心难点

本研究依托国家电投额敏 15 万千瓦储能配套 60 万千瓦风电二期 50 万千瓦风电 PC 总承包工程。项目风电场位于新疆九大风区之一的老风口玛依塔斯风区, 场址区海拔高度集中在 630 m 至 1 430 m 之间, 场区东西跨度 37 km, 南北跨度 15 km, 属山地丘陵地貌。项目新建风电装机规模 500 MW, 拟采用 50 台单机容量 10 MW 的风力发电机组, 轮毂中心高度 120 m, 配套建设 12.5 万千瓦 / 50 万千瓦时储能电站与 1 座 220 千伏升压汇集站。项目于 2025 年 4 月开工, 计划 2025 年 10 月 30 日具备并网条件, 总工期约 15 个月<sup>[3]</sup>。

项目施工面临两大核心难点。一是有效施工周期

短, 工期管控压力大。项目所处地区 11 月即进入冬季, 易出现大雪霜冻等极端气候, 低温环境会降低施工效率, 影响机械设备运行稳定性, 受冬季气候影响, 项目主体施工任务需在 7 个月内完成, 工期紧任务重。同时, 项目场址位于多风核心区, 大风天气频发, 吊装作业有效窗口期短, 进一步压缩了可施工时间, 给工期管控带来极大挑战。二是吊装作业安全风险高, 施工技术难度大。项目风机吊装采用额定起重重量不低于 1 200 t 的履带吊作为主吊, 风机吊装、履带吊组装与拆除均属于超危大工程范畴<sup>[4]</sup>。多风环境下, 大风会对吊物与吊装设备产生较大侧向力, 影响设备稳定性, 易引发吊物摆动、高空坠物等安全事故。同时, 风速的瞬间波动会干扰吊装指挥与设备操作, 大幅提升吊装作业的安全管控难度。

## 2 多风环境对风电机械化施工的核心影响

### 2.1 风载荷对吊装设备稳定性的影响

多风地区的风向与风速具有极强的瞬时波动性, 吊装作业过程中, 风载荷会直接作用于起重臂、吊物与设备主体, 形成侧向推力与倾覆力矩, 是影响吊装作业安全的核心动态载荷。风电吊装涉及的塔筒、机舱、叶片等大型部件迎风面积大、质心控制难度高, 在侧风与紊流脉动风作用下易产生大幅摆振与风致旋转, 不仅会直接影响高空构件的对接安装精度, 还会通过钢丝绳向设备主体传导冲击载荷, 加剧吊装系统的动载波动, 引发钢丝绳张力骤变、吊具受力失衡等问题。

**作者简介**: 吴杰 (1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程技术管理。

风载荷产生的倾覆力矩会随起重臂仰角、作业半径的增大而显著放大,当风速超出设备作业临界阈值,或遭遇突发强阵风时,倾覆力矩会快速突破设备自身抗倾覆稳定极限,极易引发设备失稳、倾覆等重大安全事故。同时,脉动风带来的循环交变载荷,会持续作用于起重臂铰点、回转支撑等关键受力结构,长期作业下易造成金属结构疲劳损伤、焊缝开裂,形成难以提前排查的隐性安全隐患。

## 2.2 风况波动对施工安全与效率的影响

多风地区阵风频发,风速与风向的无规律变化,会给吊装作业的精准操作带来极大干扰。吊装过程中突发的阵风,易导致吊物位置偏移,造成塔筒法兰对接错位、叶片安装精度不达标等问题,需要反复调整作业,大幅降低施工效率。同时,大风天气会造成沙尘飞扬,降低现场能见度,干扰指挥人员与操作人员的视线沟通,易引发指令传递错误,进而导致操作失误,引发安全事故。此外,当风速超出规范允许的作业阈值时,必须停止吊装作业,频繁的启停会严重打乱施工节奏,延长单台风机的安装周期。

## 2.3 极端气候对施工设备与人员作业的影响

多风地区常伴随高温、低温、沙尘等极端气候,与大风环境形成耦合效应,进一步影响机械化施工的正常开展。高温环境会导致吊装设备金属结构热膨胀,润滑油黏度降低,影响设备运行精度与稳定性,同时易造成施工人员中暑,导致反应与判断能力下降,引发操作失误。低温与大雪天气会造成设备油路冻结、金属结构脆性增加,大幅提升设备故障概率,同时施工人员行动迟缓,应急处置能力下降,进一步放大作业风险。沙尘天气会造成设备精密部件磨损、控制系统故障,缩短设备使用寿命,也会给现场作业人员的职业健康带来威胁。

## 2.4 多风环境对施工工期管控的影响

多风地区风电施工的有效作业窗口期,直接受大风天气的制约。项目所处的玛依塔斯风区年均风速达10 m/s,8级以上大风天气占比高,符合吊装作业安全要求的窗口期短且分布零散。传统施工模式未对风况进行精细化预判,无法高效利用零散的作业窗口期,易造成施工资源闲置,工期延误。同时,大风环境引发的设备故障、施工返工、安全整改等问题,会进一步打乱施工计划,增加工期管控的不确定性。此外,项目跨冬季施工,低温与大风的叠加效应,会导致部分工序无法正常开展,进一步加剧工期管控压力<sup>[5]</sup>。

## 3 多风地区风电机械化施工关键技术优化

### 3.1 基于VR模拟的吊装作业人员技能提升技术

多风地区风电吊装作业受瞬时阵风、侧风突变等极端风况影响显著,吊装操作人员的应急处置能力,直接决定了大风环境下作业的安全与效率。传统岗前培训多以理论讲解和现场跟岗为主,难以还原强风环境下的各类突发工况,操作人员无法系统性开展应急处置实操训练,面对风况突变和设备故障时极易出现操作失误。针对这一难点,项目依托新疆玛依塔斯风区的实际施工环境,研发适配多风地区风电吊装的VR模拟训练系统。系统采集项目所在区域近五年的逐时气象数据,梳理不同季节、时段的风速风向变化规律,同时汇总风电吊装过程中起重设备故障、吊物摆动失控等高频突发场景,结合虚拟现实技术1:1还原1200 t履带吊吊装10 MW风机的全流程操作场景,全面覆盖强风、阵风、旋转风等各类复杂风况,邀请行业内资深吊装操作手与风电施工专家全程参与系统优化,确保场景设置、操作逻辑与现场施工完全贴合。

为保障训练效果,项目基于VR系统搭建了阶梯式实操培训体系,按照基础操作、复杂风况适配、突发故障应急处置三个阶段,为吊装操作人员制定系统化训练计划,每阶段设置对应的实操考核标准,考核通过后方可进入下一阶段训练,确保操作人员全面掌握大风环境下的吊装操作技巧与应急处置流程。该系统在项目现场全面投用后,累计完成42名吊装操作人员的系统化培训与考核,现场实测数据显示,经过VR系统专项训练的操作人员,在风速10 m/s以上的强风工况下,吊装操作失误率从原先的12%降至5%,面对突发风况和设备故障时的应急处置响应时间缩短至50 ms,大幅降低了人为操作失误引发的吊装安全风险,同时缩短了操作人员的现场岗前适应周期,为多风地区风电吊装作业的人员技能标准化培训提供了成熟的实践路径。

### 3.2 起重设备智能化优化与适配技术

多风地区风电吊装作业中,起重设备的稳定性直接决定作业安全。传统固定配重模式无法适配风速、风向的瞬时变化,易出现起重臂振动过大、吊物摆动失控等问题,尤其在玛依塔斯风区这类强风频发区域,常规设备配置方案的适配性严重不足。针对这一问题,项目研发了起重设备配重智能化选择系统,系统持续采集施工现场风速、风向、气温等实时气象数据,通过数理统计分析挖掘当地风况的日变化与季节变化规

律,同时结合有限元力学分析软件,搭建不同吊装工况下的多维度受力模拟计算模型。系统以施工安全、作业效率与成本控制为核心约束条件,通过智能优化算法,为塔筒、机舱、叶片等不同构件的吊装场景,匹配动态化的配重配置方案,实现配重参数与实时风况的精准适配。

在智能化配重系统的基础上,项目还针对多风环境完成了起重设备的全方位适配优化。通过风洞试验与现场吊装实测数据,优化了 1 200 t 履带吊的吊臂作业角度与伸臂长度组合,降低设备迎风面的风载荷敏感度,同时对设备液压阻尼系统进行升级改造,通过自适应阻尼调节实时抵消风致振动。现场应用数据显示,优化后的起重设备在 10 m/s 侧风工况下,起重臂振动幅值降低 60%,旋转风引发的吊钩偏移量预测误差控制在 3 cm 以内,设备抗风稳性与吊装对接精度大幅提升,既拓宽了吊装作业的风速适配范围,也从设备层面筑牢了多风环境下的吊装安全防线。

### 3.3 塔筒分段式吊装与预组装修施工工艺创新

针对传统整体吊装工艺高空作业量大、对作业窗口期要求高的问题,创新塔筒三段式吊装施工工艺。将 120 m 高的塔筒拆分为 3 段,单段长度控制在 40 m 以内,将传统的高空整体吊装分解为分段接力吊装,大幅降低单次吊装的迎风面积与风载荷影响,可适配更宽范围的风速工况,有效提升吊装作业的时间利用率。同时,优化塔筒附件安装工艺,制定爬梯、平台、电缆等附件的地面预组装修标准化流程,明确预组装修工艺节点与质量控制要求,在地面完成塔筒段附件的全部安装工作,减少 70% 以上的高空作业量,既降低了大风环境下高空作业的安全风险,也大幅缩短了高空作业时间。创新采用夜间低风速窗口期施工策略,利用 22:00 至次日 6:00 的低风速时段开展吊装作业,将单日有效作业时间增加 4 小时,进一步提升了吊装作业效率。通过工艺优化,单台风机的安装周期从 10 天缩短至 8 天,缩短幅度达 20%,塔筒法兰对接错位误差控制在 0.5 mm 以内,实现了施工效率与安装质量的双重提升。

### 3.4 多风环境施工全流程安全管控技术

构建多风地区风电吊装施工全流程安全风险管控体系,形成覆盖事前预判、事中管控、事后应急的全链条安全管理机制。事前阶段,建立精细化的风况监测与预判体系,在安装现场地面与起重设备上布设多台风速仪,实时监测地面与高空风速,同时对接当地气象部门与专业气象观测机构,精准预判天气变化走

向,提前规划吊装作业窗口期。针对风机吊装、履带吊拆装等超危大工程,编制专项施工方案与应急预案,通过专家论证后严格执行,施工前开展全员技术交底与安全培训。事中阶段,严格执行吊装作业风速管控标准,当风速超出规范允许值时,立即停止吊装作业,做好设备与部件的固定防护。施工过程中安排专职安全员全程旁站,对吊装作业全流程进行监督管控,及时纠正违规操作,消除安全隐患。事后阶段,完善应急处置机制,针对起重设备故障、吊具损坏、突发大风等紧急情况,制定专项应急处置预案,定期开展应急演练,确保突发状况下能够快速响应、有效处置,全面筑牢多风环境下风电施工的安全防线。

## 4 结束语

多风地区是我国风电资源开发的核心阵地,破解大风环境下风电机械化施工的技术难题,对推动风电行业高质量发展具有重要意义。本文依托新疆额敏风电项目,系统分析了多风环境对风电机械化施工的核心影响,针对项目施工的核心难点,从人员技能提升、起重设备优化、施工工艺创新、安全管控升级四个方面,构建了多风地区风电机械化施工关键技术体系。现场应用结果表明,该技术体系可有效降低大风环境下吊装作业的安全风险,提升操作人员的应急处置能力,缩短单台风机安装周期,提高施工效率与安装质量,取得了良好的经济效益与安全效益。本次研究形成的成套技术,可为我国西北、华北等多风地区的风电工程建设提供成熟的技术参考与实践借鉴。随着风电单机容量的持续提升,塔筒高度与吊装重量不断增加,还需进一步结合智能化、数字化技术,深化风场精细化预报、吊装设备自适应控制等方面的研究,持续完善多风地区风电机械化施工技术体系,助力我国风电产业的可持续发展。

## 参考文献:

- [1] 李进光.基于振动分析的风电设备故障诊断技术[J].科学技术创新,2025(23):29-32.
- [2] 王秀文,冀卫东,齐涛.风电塔架非标附件焊缝等效疲劳等级评估方法[J].风能,2025(11):84-90.
- [3] 韩志,陈英华.一种风电叶片打磨机器人系统设计[J].中国科技信息,2025(22):114-117.
- [4] 杜稼原.基于风资源计算的风电机组发电效率优化研究[J].电气技术与经济,2025(10):367-369.
- [5] 董璐,尹维,吴祥顺,等.风电机组轴承在用润滑脂理化性能与摩擦学性能研究[J].润滑与密封,2025,50(10):182-188.