

极端天气条件风机吊装施工工期保障技术研究

王向利

天津红泰扬新能源有限公司, 天津 300000

[摘要] 风机吊装作业受到气象条件的影响很大, 极端天气造成的工期延误已经成为影响风电项目开发效率的主要瓶颈。从气象环境、施工装备、地基条件、施工组织四个方面系统分析了极端天气对风机吊装的影响机制, 整理出目前工程实践中形成的工期保证技术体系。用网格化预报模型准确找到吊装窗口期, 用钢板铺设和地基加固克服运输和站位的限制, 用单叶片吊装和设备加热拓展低温作业范围, 用工序动态调度和昼夜连续作业缩短有效工期, 可以明显提高极端天气条件下施工效率。以百里风区单台 40h 吊装纪录、桂林风电场有效工时占比由原来的 45% 提高到现在的 72% 等实践为例, 集成化、智能化的工期保障技术体系已经初步形成, 可以为类似工程提供借鉴。

[关键词] 极端天气; 风机吊装; 工期保障

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20207

中图分类号: TK81

文献标识码: A

Research on Construction Period Guarantee Technology for Wind Turbine Hoisting under Extreme Weather Conditions

WANG Xiangli

Tianjin Hongtaiyang New Energy Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract: The hoisting operation of wind turbines is greatly affected by meteorological conditions, and the delay in construction caused by extreme weather has become the main bottleneck affecting the development efficiency of wind power projects. A systematic analysis was conducted on the impact mechanism of extreme weather on wind turbine hoisting from four aspects: meteorological environment, construction equipment, foundation conditions, and construction organization, and a technical system for ensuring construction period formed in current engineering practice was summarized. Accurately finding the lifting window period using a grid forecasting model, overcoming transportation and station limitations through steel plate laying and foundation reinforcement, expanding the low-temperature operation range through single blade lifting and equipment heating, shortening the effective construction period through dynamic process scheduling and continuous day night operations, can significantly improve construction efficiency under extreme weather conditions. Taking the 40 hour lifting record of a single unit in the Baili wind zone and the increase in the effective working hours ratio of Guilin wind farm from 45% to 72% as examples, an integrated and intelligent construction period guarantee technology system has been preliminarily formed, which can provide reference for similar projects.

Keywords: extreme weather; fan hoisting; construction period guarantee

引言

风力发电属于清洁能源的重要组成, 装机规模不断加快。风机吊装属于风电项目建设的重要部分, 风机吊装的作业环境十分敏感, 会受到风速、温度、能见度等气象因素的影响。近些年来, 风电场开发渐渐向气候条件恶劣的区域拓展——新疆戈壁年均 7 级以上大风超过 120 天, 青藏高原海拔 3000 米以上地区年有效施工天数少于 150 天, 东北地区冬季严寒造成混凝土养护时间增长 2 倍以上。由于极端天气所造成的工期延误, 已经成为风电项目开发效

率以及成本控制的主要矛盾。从气象精准预报、设备适应性改造、施工组织模式优化等角度出发, 对风电项目建设工期保障技术研究进展及工程实践进行梳理, 对于提高风电项目建设效率有重大意义。

1 极端天气对风机吊装施工工期的保障影响因素分析

风机吊装施工工期受诸多因素交织影响, 可以分为气象环境制约、施工设备性能限制、地基承载能力限制和施工组织效能限制这四个方面。气象环境是最大的直接外在

制约因素。风速大于 10m/s 时机舱及轮毂吊装停止，风速大于 12m/s 时塔筒安装受限。新疆天山北麓项目所处的戈壁地区年均大于 120 天的 7 级以上大风，有效的作业时间被大大缩减。高海拔复杂山地气候多变，频繁降雨、起雾又把施工窗口期缩短了。施工装备在极端环境下性能衰减不能忽略。极寒环境下液压系统油液黏度变大，起重机动作缓慢；昼夜温差大于 20℃时，设备法兰盘收缩变形会降低百米高空精准对接的精度。低温环境下钢结构材料的脆性增大，吊装作业的安全风险也随之提高。地基状况对于大型起重设备的站位和行走来说，是有着实质性的限制作用。风电项目大多选在地质状况复杂的地段，有些机位处在林地之中，吊装平台的场地十分狭小。地基承载力不够时，千吨级履带吊不能安全就位，必须进行换填或者铺设钢板加固。施工组织效能决定着在有限窗口期里资源的利用效率。传统的等风停被动应对方式造成大量的有效工时被浪费，科学的动态调度和工序优化可以在相同的气象条件下大大提高作业效率。

2 极端天气条件下风机吊装施工工期保障主要问题

2.1 气象环境不确定性对吊装计划的影响

气象不确定性是工期保证的第一个难题。风机吊装属于高空精密作业，高山风机吊装对风速、风力等气象条件要求极高。现行施工规范虽然规定了吊装作业的风速限制，但是气象条件的突然变化和局地性远远大于常规预报。沙尘暴一来，几十米高的沙墙如山般横亘，几十米的高空看不见了，不能吊装，地面设备的搬运也必须停止^[1]。高海拔山区雾起雾散无法预测，天气恶劣时无法进行施工，吊装进度和质量难以控制。过去施工全靠老师傅看天，等着风停的粗放模式，本质上就是把工期交付给了概率，在年均大风天数超过一半的地区，仅仅依靠经验来判断窗口期，有效工期预估的偏差可以达到 30%以上。由于存在不确定性，使得设备租赁周期无法确定，人员调配混乱，同时并网节点经常出现延误的情况。

2.2 吊装资源配置与施工组织协调存在的制约因素

极端天气之下，资源调配以及组织协调的不足被极大

凸显出来。道路通行条件首当其冲，持续降雨造成临时道路泥泞湿滑，重型运输车辆经常陷入通行困难，构件单件尺寸 76m、重量 84t 的超限运输路况变坏，运输时间成倍增加。大型起重设备在极端环境下进行部署和调度也会遇到复杂的约束，千吨级履带吊进退场费高达百万元，拆装转场时间长达 3~5 天，如果因为气象判断失误造成设备进场后不能作业，不仅会造成直接经济损失，还会占用后续机位施工窗口^[2]。每台风机要按照机位平台和作业环境来制订有针对性的吊装方案，但是极端天气频发的时候预设的方案很容易被气象突变打乱，缺少快速调整的弹性。传统的施工组织信息传递链条很长，气象预警企业调度施工执行环节衔接松散，天气变化到现场决策的时间滞后，常常造成宝贵的低风速窗口在等待中白白浪费掉。

3 极端天气条件下风机吊装施工工期保障关键技术

3.1 基于气象监测与预警的吊装窗口精准预测技术

准确的预测吊装窗口期是工期保证的前提。传统的气象预报空间尺度是以县为单位，时间分辨率是 6h，不能满足单个点位吊装决策的要求。目前工程实践中的技术突破主要集中在两个方面。

第一，多源数据融合的网格化预报模型的应用。该模型把预报的空间分辨率提高到公里级甚至百米级，时间分辨率也由原来的小时级变为分钟级。在桂林风电场项目中，市气象局第一次使用了多源数据融合的网格化预报模型，从而提高了预报的准确性。相关预警准确率达到 92%，给现场指挥提供可靠依据。

第二，4 小时精准预测+动态调度机制的形成。新疆百里风区项目团队依靠引进专业的气象大数据平台，创建起一个以 4 小时为周期的滚动预测体系，准确地把握住每一个稍纵即逝的黄金窗口期。通过全球潮汐数据、风速仪实时采集吊装窗口期，动态调节作业时间的气象预警、现场蹲守、设备监测三道防线，在戈壁极端环境下得到证实。以气象监测与预警为基础的吊装窗口精确预测技术价值，就是把施工决策由被动等待风停变为主动驾驭风行，使得有限的窗口期里工作安排有章可循。

表 1 传统天气预报和多源数据融合网格化精准预报模型关键指标对比

对比指标	传统天气预报	多源数据融合网格化精准预报模型
空间分辨率	县级行政区（数十公里级）	公里级至百米级
时间分辨率	6h	1h 滚动更新
预报时效	24~72h 趋势预报	4h 精准预测+动态修正
可输出的吊装决策信息	区域级风速范围，仅作趋势判断	单机位点逐小时风速、阵风、降水概率
对吊装施工的指导方式	宏观参考，现场自行判断	直接输出工序可施工/不可施工判定
工程验证准确率	—	≥92%（桂林风电场项目）

3.2 风机吊装施工动态组织与资源协同调度技术

获取窗口期预报信息之后,怎样把信息变成施工效率,取决于施工组织的动态响应能力。工序适配性指标体系的创建属于重要环节。桂林气象服务团队开发出与风机吊装各个环节相适应的工序匹配性指标体系,使气象信息可以直接对应到具体的施工决策上。该体系把风速、温度、降水概率这些气象参数转变成各个工序的可施工或者不可施工判定,一线人员不需要自行解读气象数据,可以直接根据指标来做出调度决策。

资源协同调度的精细程度会直接影响到窗口期的利用率。金山海上风电项目团队从源头控制风机部件的供应情况,委派专人专盯部件流转,提前根据各部件供应情况,科学调配现场船机施工计划,将运输计划精确到小时,保证叶片、塔筒运输船和安装平台船高效配合,缩短等货时间 35.5h。陆上风电也适用这样的逻辑,依靠运输计划和吊装计划的精准对接来消除由于设备等货造成的时间浪费。10 台千吨主吊在夜色里划出光的轨迹的昼夜连续作业模式,其实质就是把有限窗口期的利用推向极致。夜间风速一般比白天小,利用夜间低风速窗口集中吊装,白天进行设备拆装倒运和调试消缺,实现人歇机不停。

3.3 极端天气条件下大型起重设备安全控制技术

极端环境下设备安全控制技术从两个方面入手,即设备本体适应性改造和吊装工艺创新。设备加热和保温装置是极寒环境的基本保证。施工机械加装保温套,防止液压系统在低温下失效;封闭空间,用蒸汽养护保证混凝土在负温下达到设计强度^[3]。拌制混凝土所用的材料均保持正温,搅拌站散装水泥罐用保温材料包裹,该做法在黑龙江、内蒙古等严寒地区已经作为标准配置使用。

吊装工艺创新就是扩大可作业风速的范围。常规叶片吊装风速不能超过 8m/s,但是整体吊装加单叶片吊装的组合方式可以克服这个限制。开阔场地采用整体吊装,机位受限的采用单叶片吊装。单叶片吊装受风面积大大减小,在高风速下可以安全作业,适合于林地、山地等平台面积受限的机位。黑龙江七台河项目对没有传统履带吊安装条件的涉林机位,采用徐工 XGL3300-220S 动臂塔吊单叶片吊装方案,验证了该工艺在复杂地形中应用的效果。

地基承载力保证为设备安全打下了基础。雨季施工时先对地基进行反复碾压夯实,再分层铺设厚钢板和钢排,用多层结构共同分散千吨级吊车的接地压力。吊车支撑处要铺设路基箱,增大接地面积来分散起重荷载,防止地面下沉。

3.4 数字化平台支撑下吊装施工全过程工期保障技术

数字化技术正在改变极端天气下工期管理的方式。

5G+AI 智慧安防系统做到了穿透沙尘的无死角监控,智能摄像头可以穿透沙尘把电子眼带进黑暗的沙尘世界里,在沙尘暴中也能远程看到现场情况。每台风机都按照主吊站位、行车路线量身定做一份一机一方案,吊装站位和工具摆放都要经过模拟推演。该种预制化方案大大缩减了现场决策的时间,使得施工准备同窗口期的到来实现无缝对接。一项目一专班的定制化服务模式,本质上就是把数字化平台支撑的协同机制制度化。每一个专班都全程对接企业及施工方,及时掌握施工动态,将作业窗口信息点对点推送给一线负责人,从根本上消除了传统模式下信息逐级传递造成的时耗。气象企业施工三方协同联动机制依靠定期会商、数据共享来创建起气象预警企业调度施工执行的快速响应链条,把从预报发出到现场调整的时间缩短到小时级。

4 极端天气条件下风机吊装施工工期保障优化措施

4.1 建立全过程气象风险预控机制

工期保障要从项目策划阶段就考虑气象风险。施工组织设计编制时要根据历史气象数据统计各类极端天气发生频率和季节性分布规律,据此预测有效作业天数,合理确定工期目标。施工期间创建气象预警分级响应制度,根据不同的风、沙尘暴、暴雨、寒潮等天气情况,提前制订出不同的停工、撤离、设备防护、复工方案。把气象风险预控纳入到项目管理考核体系中去,设置气象专员岗位,专职做气象信息的追踪分析和预警发布工作。

4.2 优化吊装施工组织与应急管理体系

动态施工组织属于应对气象不确定性的重要手段。应建立窗口期调度制度,根据气象预报来确定各个机位的施工优先次序,把资源集中投向窗口期最确定的机位上。应急管理体系要涵盖设备故障、道路中断、突发气象变化等常见情况,事先决定好备用的吊装方案和应急物资的储备。借鉴 1+1+1 新型吊装方式的思路,在不同的机位条件下准备多种吊装方案,根据实际情况选择合适的吊装方式。建立跨标段、跨项目设备和人员应急调配机制,当某一个区域受到恶劣天气影响而停工的时候,另一个区域具备了作业条件时,可以迅速地完成任务的转移和再配置。

4.3 强化施工装备与人员保障能力建设

装备适应性改造属于项目前期投资预算的一部分。对极寒地区设置设备加热装置、保温套件,对风沙地区设置防风沙密封件、空气过滤系统。大型起重设备选型时,除了考虑额定起重重量之外,还要把抗风能力、低温启动性能、地基适应性等综合评价指标考虑进去。在人员保障上,创

建起极端环境作业的专项培训和激励机制。给施工人员配备防风沙、防寒保暖的装备，合理安排轮班作业时间，防止疲劳作业。培养具有当地气象规律、能快速做出决策的一线指挥人员，提高现场应对突发天气的自主决策能力。

4.4 推进智能化技术在风机吊装工期管理中的应用

智能化技术应该由辅助工具变成工期管理的中心支持。提高多源数据融合预报模型对吊装窗口的预测精度，由原来的公里级向单机位级迈进。推广智能吊索系统，自动调节拉力参数，在风况突然变化的时候立刻做出反应。创建项目级数字化工期管理平台，把气象数据、设备状况、物料存货、人员排班等信息纳入其中，从而达成工期进度的实时监测以及动态推演。利用历史施工数据训练工期预测模型，在给定气象预报条件的基础上预估各个工序的完成时间，给调度决策提供量化的依据。

5 结语

极端天气条件下风机吊装工期保证，是气象、装备、材料、管理等多学科共同参与的工程。从影响因素、主要问题、关键技术、优化措施四个方面进行系统的整理。经过研究得知，精准气象预报技术使得吊装窗口由被动等待

变为主动捕捉，施工动态组织和资源协同调度使窗口期利用率得到大幅度提高——桂林风电场项目作业有效工时占比由原来的 45%提高到现在的 72%，天山北麓项目在年均120天以上的大风戈壁区域完成了109台风机的吊装，百里风区项目单台 7.5MW 机组只用了 40h 就吊装完毕，这些工程实践证明了技术体系的可行性。目前集成化、智能化的工期保证技术体系已经基本形成，但是气象预报的空间分辨率还有待提高，智能化调度系统在工程应用上的验证还需要更多的实验来证实，有关研究应该从这些方面继续深化。

[参考文献]

- [1]张泽华.复杂山地大型风电工程施工关键技术[J].人民珠江,2025,46(2):43-45.
- [2]王超,董鹤.风电安装船 50000 kN 吊机筒体浮态吊装技术[J].江苏船舶,2024,41(1):45-48.
- [3]怀宝玉,石惠刚,郑风军.突发风况环境超高重型风机吊装技术研究与应用[J].安装,2024(1):120-121.

作者简介：王向利（1987—），女，汉族，河南省洛阳人，工程师，黄淮学院毕业，现就职于天津红泰扬新能源有限公司，从事工程管理工作。