

山地风电项目大件运输管控及施工质量控制对策研究

夏春磊

中国石化集团新星陕西新源科技有限公司 陕西 西安 710018

【摘要】：山地风电项目建设中，大件设备运输受地形复杂、道路条件受限及吊装衔接困难影响，施工质量控制易出现偏差与安全风险。针对运输路径规划不足、过程监测薄弱及质量管控体系不完善等问题，构建基于路线优化、全过程监测与分阶段质量验收的综合管控体系，通过强化运输组织调度、提升关键工序控制精度及完善质量追溯机制，实现运输效率提升与施工质量稳定可控，保障风电机组安装安全性与整体工程质量水平，提升山区施工协同与设备安装可靠性，降低运输与质量风险水平，提升工程整体稳定性。

【关键词】：山地风电；大件运输；施工质量控制；运输管控体系

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.020

引言

山地风电项目建设推进过程中，大型风电设备运输路径受山地地形切割、坡度变化及道路承载限制影响，运输组织难度显著增加。同时，风电机组大件构件在运输与吊装衔接过程中易受时序不匹配与环境变化影响，施工质量稳定性受到制约。当前运输管控与施工质量控制体系存在衔接不足、过程监测不连续及风险识别滞后等现象，影响整体工程安全推进。基于运输路径优化、车辆调度协同及质量验收分级控制思路，可实现运输过程可控化与施工质量稳定化提升。提升整体运行可靠性与安全水平。

1 山地大件运输路径组织与通行能力优化

1.1 地形约束下线路筛选方法

山地风电大件运输线路筛选需依托高精度数字高程模型与多源地理信息融合分析，对坡度梯度、转弯半径、纵横向起伏进行分级约束计算，形成多维适配评价体系。通过建立通行能力约束矩阵，将道路宽度、最小转弯半径、最大纵坡与设备外廓尺寸进行匹配校核，筛选满足运输安全阈值的可行通道。结合GIS空间叠加分析，对滑坡敏感区、断裂带及高风险边坡进行剔除处理，形成初始可达路径集合。进一步引入分层优化模型，对路径进行通行代价计算，综合考虑坡度变化频率与道路连续性，提升路径稳定性与连续通行能力。

1.2 桥涵与道路承载校核机制

大件运输对桥涵结构及道路承载性能提出高等级约束，需要构建基于结构力学响应的动态校核体系^[1]。针对桥梁荷载分布特征，对主梁弯矩、剪力及支座反力进行极限状态验算，并结合移动荷载影响系数进行修正处理。道路结构方面需建立分层路基承载能力评估模型，对基层压实度、面层抗剪强度及疲劳性能进行综合判定。通过车辆轴载谱与结构响应匹配分析，识别局部超载风险点并进行加固等级划分。结合实时检测数据反馈机制，对关键桥涵节点实施动态安全裕度更新，提高结构适应性。

1.3 运输时序与车辆编组调度

山地大件运输调度需构建基于时空约束的协同优化模型，对运输时序与车辆编组进行一体化控制。通过对道路通行窗口期进行分段划分，结合气象条件与施工占道情况，确定运输可执行时间区间。车辆编组依据设备重量等级、外形尺寸及运输稳定性要求进行分层配置，实现动力匹配与载荷均衡分布。运输过程采用节点化调度策略，对关键路段设置控制节点，强化会车避让与坡段通过顺序控制。通过构建多车辆协同调度机制，实现运输队列间动态调整，降低山地弯坡路段的运行冲突概率。引入路径实时反馈数据，对调度计划进行滚动修正，使运输节奏与道路承载状态保持动态匹配，提高整体运输连续性与组织稳定性。

2 大件设备装卸与吊装协同控制体系

2.1 生产厂家至山地发运衔接流程

生产厂家至山地发运环节需构建多节点联动的物流衔接体系，重点围绕设备出厂装载、在途运输组织及山地入口接驳形成连续作业链条。出厂装载阶段通过重型吊装设备与模块化装载平台协同完成构件装车，并依据构件尺寸与重心特征实施车辆配载优化设计，降低运输过程中的结构应力集中。车辆固定系统需满足多点约束与承载均匀性要求，确保运输固定点与车辆承载结构匹配。进入山地运输阶段后，接驳节点需进行车辆状态复核与路径信息同步更新，保障运输参数一致性。通过构建信息化调度平台，实现生产厂家与山地运输环节数据贯通，使物流衔接过程具备连续控制能力与状态可追溯性，从而减少发运过程中的组织延迟与信息断点。

2.2 吊装设备匹配与作业窗口控制

吊装设备匹配需依据风电机组构件重量分布、起吊半径及作业高度要求构建多维适配模型，对起重机型号、臂长组合及配重系统进行精确选型。设备选型过程中引入稳定性系数与地基承载适配分析，确保吊装过程中整体力矩平衡处于安全区间。作业窗口控制需结合山地气象条件、风速波动及地形遮挡

效应进行动态划分,通过时间片段化管理实现吊装作业与环境条件的匹配优化。吊装过程实施分阶段控制策略,对起吊、旋转、对位及安装阶段进行独立参数约束,降低多工序叠加风险^[2]。通过实时监测系统对吊臂挠度、载荷变化及回转角速度进行连续采集,实现作业状态闭环反馈。引入作业窗口预测机制,使吊装计划具备动态调整能力,从而提升复杂环境下吊装作业的稳定性与精准性。

2.3 关键构件装卸安全防护措施

关键构件装卸安全防护需构建基于结构稳定性与过程控制的多层防护体系,对叶片、塔筒及机舱等核心部件实施差异化防护设计。装卸过程中通过应力分散支撑结构降低局部集中受力,避免构件变形或微损伤累积。吊点布置需依据结构力学特性进行优化设计,使受力路径保持均衡传递状态。运输固定阶段采用多重约束装置,包括柔性绑扎系统与刚性支撑组合结构,以增强抗振动与抗倾覆能力。环境防护方面结合风速扰动与地面不平整因素,对作业平台进行稳定性补偿调整。装卸过程引入状态监测传感系统,对位移、倾角及振动频率进行实时采集,实现异常状态快速识别与响应控制。通过构建全过程防护链条,使关键构件在多工序转换中保持结构完整性与几何稳定性,从而提升整体装卸安全水平。

3 施工质量过程控制与验收标准体系

3.1 关键工序质量控制要点

山地风电施工关键工序质量控制需围绕基础浇筑、塔筒对接及吊装定位等核心环节构建分级控制体系,对施工参数进行全过程约束管理。基础施工阶段重点控制混凝土配合比稳定性、分层振捣密实度及温度应力分布,避免结构内部缺陷累积。塔筒对接阶段需对法兰平面度、螺栓预紧力及同轴度偏差进行精确控制,使结构连接受力保持均匀状态。吊装定位环节通过空间坐标校准与姿态调整机制,降低安装偏移误差。施工过程引入多点检测与实时反馈机制,对关键参数实施动态修正控制。结合数字化测量技术,对施工误差进行闭环修正处理,使关键工序质量处于可控区间,从而提升整体结构一致性与长期稳定性能。

3.2 分阶段质量验收流程设计

分阶段质量验收流程需构建基于施工进度节点的分层控制体系,对基础施工、设备安装及系统调试实施递进式验收管理。基础阶段验收重点围绕承载性能、尺寸偏差及隐蔽工程质量进行综合评估,通过多维检测指标确保结构满足设计要求。设备安装阶段验收侧重连接精度、装配间隙及紧固状态,对关键连接节点进行逐项核验^[3]。系统调试阶段通过运行参数稳定性、振动响应及电气性能指标进行整体评估。各阶段验收结果需纳入统一质量数据库,实现数据连续记录与比对分析。通过建立分级审批机制,使验收过程具备逐层递进约束能力,并结

合动态调整机制对不合格项进行闭环整改,从而保障整体工程质量连续性与系统可靠性。

3.3 材料与构件质量追溯机制

材料与构件质量追溯机制需构建基于全生命周期管理的数字化追踪体系,对原材料采购、加工制造、运输存储及现场安装全过程进行信息绑定管理。通过唯一编码标识系统实现构件身份识别,使每一关键部件具备可追溯数据链路。质量检测数据在出厂阶段即进行结构化录入,包括力学性能、几何精度及表面质量指标,并在运输与安装阶段持续更新状态信息。存储环节通过环境监测数据记录温湿度变化及堆放状态,降低环境因素对材料性能的影响。现场安装阶段对关键连接数据进行实时采集并回传系统,实现全过程质量信息闭环管理。

4 全过程运输监测与信息反馈机制构建

4.1 运输状态实时监测技术应用

运输状态实时监测依托多源感知融合技术,对车辆位置、速度、姿态及载荷变化进行连续采集与动态更新,通过北斗定位与惯性测量单元组合实现高精度轨迹还原。构件关键部位布设应变与振动传感器,用于捕捉运输过程中的结构响应变化,识别异常受力状态。数据采集系统采用边缘计算架构,对原始信号进行实时滤波与特征提取,提高信息传输效率与可靠性。监测数据通过无线通信网络回传至控制中心,实现运输全过程可视化呈现。结合道路坡度与转弯半径信息,对车辆运行状态进行动态校核,使运输过程始终处于安全约束范围内,从而提升复杂山地环境下运输过程的可控性与稳定性。

4.2 异常识别与预警响应流程

异常识别机制基于多参数融合分析模型,对运输过程中的速度突变、姿态偏移及载荷波动进行实时判别,通过阈值约束与机器学习算法结合实现异常状态识别^[4]。系统对关键参数建立动态基线模型,使正常运行状态具备自适应更新能力。当监测数据偏离安全区间时,预警模块自动触发分级响应机制,将风险等级划分为提示、警戒及紧急处置三个层级。响应流程包括路径调整建议、车辆减速控制及临时停运指令,实现风险逐级消减。预警信息通过多终端同步推送至调度中心与现场控制单元,确保信息传递的时效性与一致性,从而提升运输过程中的风险处置效率与安全保障能力。

4.3 数据共享与调度协同平台

数据共享与调度协同平台基于统一数据架构构建,实现运输监测数据、路径信息及施工调度信息的多源融合与实时交互。平台采用分布式数据处理机制,对大规模运输数据进行并行计算与结构化存储,提升信息处理效率。调度模块依据实时路况与车辆状态信息进行动态优化计算,实现运输任务的智能分配与路径重构。信息共享机制通过标准化接口实现跨系统数据互通,使运输、吊装及施工环节形成协同联动结构。平台引

入可视化决策支持系统,对关键节点运行状态进行动态展示,为调度优化提供数据支撑,从而提升整体运输组织效率与协同控制水平。

5 山地风电项目安全运行与综合效能提升路径

5.1 运输与施工协同管理优化

运输与施工协同管理需构建基于全流程时序耦合的控制体系,对运输到场节奏与施工安装进度进行动态匹配。通过建立统一调度模型,将运输计划、吊装计划及基础施工进度纳入同一时间轴约束框架,实现多工序并行协调。关键设备到场时间与吊装窗口进行精准对接,减少等待与滞后现象。施工现场设置缓冲调度节点,对突发运输偏差进行柔性调整。信息系统对运输状态与施工进度进行双向反馈,使资源调配具备实时修正能力。通过强化路径控制与作业衔接精度,使运输链与施工链形成闭环运行结构,从而提升整体组织效率与工程连续性。

5.2 风险分级管控与资源配置

风险分级管控体系需基于山地风电项目复杂环境特征构建多维风险识别模型,对地质条件、气象变化及设备状态进行综合评估^[5]。风险等级划分依据影响范围与发生概率设定差异化控制策略,高风险区域实施重点监控与资源优先配置。资源配置机制采用动态调度方式,将机械设备、人员及应急物资按风险等级进行梯度分布,确保关键节点具备快速响应能力。通

过建立风险数据库,对历史异常数据进行关联分析,提高风险预测精度。控制策略与资源配置联动运行,使风险处置从被动响应转向主动预防,从而提升整体安全保障能力与系统稳定性。

5.3 整体效率与稳定性提升机制

整体效率与稳定性提升机制需依托多系统协同优化架构,对运输、吊装及施工全过程进行一体化调控。通过构建流程优化模型,对关键作业节点进行时序压缩与资源重组,提高工序衔接效率。稳定性控制方面引入多源数据融合分析,对设备运行状态与环境扰动进行实时评估,形成动态调整机制。调度策略采用自适应优化方法,使运输节奏与施工负荷保持均衡状态。信息反馈机制支持多层级联动修正,使系统具备持续优化能力。通过强化全过程协同控制与动态平衡机制,实现工程运行效率与结构稳定性的同步提升。

6 结语

山地风电大件运输与施工质量协同控制体系在路径优化、装卸衔接、过程监测及质量追溯等多维机制支撑下逐步形成闭环管理结构。多源数据融合与分级控制策略强化了复杂地形条件下的运行适配能力,使运输组织与施工质量控制呈现动态协同特征,工程安全性与执行稳定性得到同步增强,整体建设效率与系统可靠性进一步提升。

参考文献:

- [1] 肖欣,王志强,刘嘉晨.复杂山地风电工程建设管控要点与关键技术[J].水电与新能源,2024,38(10):1-4.
- [2] 仇戈,赵佳虹,丛鲁兹,等.基于专用工装的山地风电叶片运输车组稳定性研究[J].西华大学学报(自然科学版),2024,43(5):36-46.
- [3] 蒋思瑶.浅谈山地风电场大件运输和风机吊装技术[J].水电站机电技术,2024,47(6):126-129.
- [4] 朱赛,向悦慈,金彪,等.山地风电场“水陆联运”大件运输方案研究[J].水电与新能源,2024,38(2):58-61.
- [5] 张晓辉,何俊杰,陈小龙.山地风电工程全过程项目管理策划研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(1):62-64.