

山地风电机组运输与吊装难点及应对措施探讨

杨红宝

中国水利水电第四工程局有限公司 青海 西宁 810007

【摘要】：山地风电机组运输与吊装受地形、环境等多重因素制约，存在诸多突出难点，直接影响风电项目建设的安全性、效率与质量。明确山地风电机组运输与吊装的核心难点，针对性制定科学可行的应对措施，是保障山地风电项目顺利推进的关键。本文聚焦山地复杂场景，梳理运输与吊装各环节存在的具体难题，结合山地风电建设实际情况提出适配的解决路径，为山地风电机组运输与吊装作业的规范开展提供支撑，助力山地风电产业高质量发展。

【关键词】：山地风电机组；运输难点；吊装难点；应对措施

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.065

引言

山地区域风能资源丰富，是风电产业布局的重要领域，但复杂的山地环境给风电机组运输与吊装作业带来了极大挑战。风电机组部件体积庞大、结构特殊，山地地形起伏剧烈、道路条件恶劣，加之气候多变、地质不稳定等因素，导致运输与吊装过程中易出现通行受阻、作业安全风险偏高、进度滞后等问题。这些难题不仅增加了建设成本，还可能影响项目整体推进节奏，成为制约山地风电开发的重要瓶颈。深入梳理这些难点，探索切实可行的应对方法，破解山地风电机组运输与吊装的困境，对于推动山地风能资源高效开发、完善风电产业布局具有重要意义。

1 山地风电机组运输的核心难点

1.1 山地地形制约运输通行能力

山地地形起伏剧烈，坡度变化频繁，部分区域地势陡峭，导致风电机组运输车辆通行困难。山地道路多为临时修建的施工便道，路面狭窄且缺乏规范硬化处理，难以承受重型运输车辆及超大部件的荷载压力，易出现路面破损、塌陷等情况，影响运输作业的连续性。山道路路转弯密集，多为急弯、S形弯道，转弯半径有限，而风电机组叶片、塔筒等部件尺寸庞大，运输过程中难以灵活转向，易发生部件刮擦、车辆卡阻等问题，严重制约运输通行效率。部分山地区域存在山体遮挡、沟壑阻隔等情况，进一步增加了运输路线规划的难度，导致运输路径绕行距离增加，延长了运输周期。

1.2 环境因素增加运输安全风险

山地区域气候条件复杂多变，昼夜温差大，雨雪、暴雨、强风等极端天气频发，给风电机组运输带来诸多安全隐患。雨雪天气会导致路面湿滑，降低运输车辆制动性能，增加车辆溜滑、侧翻的风险；暴雨天气易引发山洪、泥石流、落石等地质灾害，破坏运输道路，导致运输作业被迫中断；强风天气则会严重影响超大部件的稳定性，尤其是叶片等细长部件，在运输过程中易受风力影响发生晃动，可能与周边山体、树木发生碰撞，造成部件损坏^[1]。山地高海拔区域空气稀薄，会导致运输车辆

动力性能下降，爬坡能力减弱，进一步增加运输过程中的安全风险和操作难度。

1.3 设备特性加剧运输作业难度

风电机组核心部件体积庞大、重量较重，且结构精密、易碎，对运输过程的稳定性和安全性要求极高。塔筒、机舱、叶片等关键部件外形特殊，叶片细长、塔筒笨重，运输过程中需要专用的特种运输车辆和固定装置，若固定不到位，易发生部件移位、碰撞，造成设备损坏。部分风电机组部件需要拆分运输，拆分与组装过程繁琐，不仅增加了运输环节，还对运输过程中的部件保护提出了更高要求。特种运输车辆车身庞大、轴距较长，在山地狭窄道路和复杂地形中操作灵活性不足，进一步加剧了运输作业的难度，对运输人员的操作技能也提出了极高要求。

2 山地风电机组吊装的核心难点

2.1 吊装场地条件先天不足

山地风电场机位多设置在山顶或陡坡区域，吊装场地狭窄且地形不规则，缺乏足够的作业空间，难以满足大型吊装设备的摆放和操作需求。部分吊装场地地势倾斜，需要进行场地平整处理，但山地地形复杂，平整作业难度大、成本高，且平整后仍可能存在地面承载力不足的问题，大型吊装设备摆放后易发生倾斜、沉降，严重威胁吊装作业安全。山地机位之间距离较远，吊装设备移动不便，每完成一台机组吊装，需要将吊装设备拆解后转运至下一个机位，重新组装调试，不仅繁琐，还大幅延缓了吊装进度。

2.2 吊装设备适配性存在局限

山地吊装作业对吊装设备的性能和适配性要求极高，但现有部分吊装设备难以完全适配山地复杂环境。大型吊装设备体型庞大、重量较重，运输至山地吊装场地难度大，且在狭窄、陡峭的场地中难以灵活调整位置，影响吊装精准度^[2]。部分吊装设备的爬坡能力、抗风性能不足，在山地陡坡区域和强风天气下无法正常作业，限制了吊装作业的开展。风电机组部件吊装高度高、重量大，对吊装设备的起吊能力、稳定性要求严格，

若吊装设备性能不达标,易出现起吊无力、设备晃动等问题,增加吊装安全风险,甚至导致吊装作业失败。

2.3 吊装作业协同难度较大

山地风电机组吊装是一项复杂的系统性作业,涉及吊装设备操作、部件转运、现场指挥等多个环节,需要各环节协同配合,任何一个环节出现问题,都会影响吊装作业的顺利推进。山地场地狭窄,吊装设备、运输车辆、作业人员的活动空间有限,易出现交叉作业冲突,增加协同作业难度。山地通信信号较差,现场指挥人员与设备操作人员、地面作业人员之间的沟通易出现延迟、不畅等情况,难以实现精准协同,可能导致操作失误,引发安全事故。吊装作业受天气影响较大,不同天气条件下需要调整作业流程和操作方式,进一步增加了各环节的协同难度。

3 山地风电机组运输难点的应对措施

3.1 优化运输路线与道路改造

结合山地地形特点和运输需求,全面勘察运输区域的地形、地质、道路等情况,科学规划运输路线,避开开度过大、转弯过急、地质不稳定的路段,选择坡度平缓、路况相对较好、绕行距离较短的路线,提升运输通行效率。对运输路线中的狭窄路段、急弯路段进行拓宽、改造,增大转弯半径,确保超大部件能够顺利通过;对路面进行硬化处理,增强路面承载力,避免路面破损、塌陷。针对山地沟壑、山体遮挡等问题,合理修建临时桥梁、隧道或绕行便道,保障运输路线的连续性。在运输路线沿线设置警示标志,安排专人巡查,及时清理路面障碍物,排查安全隐患。

3.2 强化环境应对与安全防护

提前收集山地区域气候、地质信息,建立天气、地质监测机制,实时掌握天气变化和地质状况,合理安排运输作业时间,避开雨雪、暴雨、强风等极端天气和地质灾害高发时段。针对不同天气条件制定专项应对方案,雨雪天气对运输路面进行防滑处理,配备防滑链、融雪设备等,提升车辆制动性能;暴雨天气提前做好排水准备,排查运输路线沿线地质隐患,避免山洪、泥石流等灾害影响运输作业^[3]。加强运输过程中的安全防护,对运输车辆进行定期检查维护,确保车辆性能良好;对部件进行规范固定,采用专用固定装置,防止部件移位、碰撞;运输过程中控制车速,保持安全车距,提升运输安全性。

3.3 优化设备运输与操作管理

根据风电机组部件的尺寸、重量特点,选用适配的特种运输车辆和固定装置,确保部件运输过程中的稳定性。对大型、细长部件进行合理拆分,拆分过程中做好部件保护,标注拆分位置和顺序,便于后续组装。加强运输人员培训,提升运输人员的操作技能和安全意识,使其熟悉山地运输特点和操作规范,能够灵活应对运输过程中的各类突发情况。建立完善的运

输管理制度,明确各环节责任,规范运输流程,对运输过程进行全程管控,及时发现并解决运输过程中出现的问题,确保设备安全、高效运输。

4 山地风电机组吊装难点的应对措施

4.1 科学规划吊装场地与平整

结合山地机位地形特点,科学规划吊装场地,合理确定吊装设备摆放位置、部件堆放区域和作业通道,确保吊装作业有足够的操作空间。对吊装场地进行详细勘察,检测地面承载力,根据吊装设备重量和作业需求,对场地进行平整、加固处理,采用铺设钢板、碎石等方式增强地面承载力,防止吊装设备倾斜、沉降。针对山顶、陡坡等特殊机位,优化场地平整方案,减少场地平整工程量,降低作业难度和成本。合理规划吊装设备转运路线,简化设备拆解、组装流程,减少设备转运时间,提升吊装进度。

4.2 选用适配吊装设备与调试

结合山地吊装场地狭窄、地势倾斜、地质复杂的实际条件,以及风电机组塔筒、机舱、叶片等部件的重量、尺寸等核心参数,科学选用爬坡能力强、抗风性能优良、操作灵活便捷的大型吊装设备,精准匹配山地复杂的作业环境,满足不同机位、不同部件的吊装作业需求。在吊装设备通过山地专用运输路线转运至作业场地后,立即组织专业技术人员对设备进行全面细致的调试和安全检查,重点检测设备的起吊能力、运行稳定性、制动系统性能及零部件衔接情况,杜绝设备带故障作业,确保每一项性能指标均达到吊装作业标准^[4]。针对山地强风频发、地形倾斜易导致设备晃动的问题,对吊装设备进行针对性改造,优化设备支撑结构、加固防风装置,进一步提升设备的抗风能力和运行稳定性。合理配备备用吊装设备及应急维修设备,提前制定设备故障应急处置方案,及时应对吊装过程中可能出现的设备故障等突发情况,保障吊装作业不受影响、顺利推进。

4.3 完善协同作业与流程管控

建立健全吊装作业协同机制,明确各环节作业人员的职责和操作规范,加强吊装设备操作、部件转运、现场指挥等环节的协同配合,避免交叉作业冲突。优化吊装作业流程,合理安排各环节作业顺序,简化作业流程,提升吊装效率。加强现场通信保障,配备专用通信设备,确保指挥人员与各作业环节人员沟通顺畅、指令清晰,实现精准协同操作。加强吊装作业全程管控,安排专人负责现场指挥和安全监护,实时排查吊装过程中的安全隐患,及时调整作业方式,确保吊装作业安全、有序开展。

5 山地风电机组运输与吊装作业的保障体系构建

5.1 建立健全作业管理制度

结合山地风电机组运输与吊装作业特点,建立健全完善的作业管理制度,明确作业流程、安全标准、责任分工等,规范运输与吊装作业行为。制定专项作业方案,针对不同山地地形、环境条件和设备特性,制定个性化的运输与吊装方案,确保作业有章可循。建立作业质量与安全考核机制,加强对作业人员、设备管理、流程执行等环节的考核,强化责任落实,提升作业质量和安全性。加强制度宣传和培训,确保所有作业人员熟悉制度要求,严格按照制度开展作业。

5.2 强化作业人员专业培训

加强对运输与吊装作业人员的专业培训,结合山地作业地形陡峭、道路狭窄、气候多变的核心难点,以及特种车辆操作、超大部件转运、高空吊装等具体操作要求,精准开展针对性的技能培训和安全教育,着力提升作业人员的实操操作技能、安全防范意识和突发情况应急处置能力。培训内容全面涵盖山地风电机组运输与吊装的操作规范、特种运输车辆及吊装设备的正确使用方法、日常维护技巧,山地作业中常见安全隐患的识别与排查方法,以及设备故障、极端天气、部件损坏等突发情况的应急处置流程和操作要点,确保作业人员能够熟练掌握各类相关技能,灵活应对作业过程中的各类突发情况^[5]。定期组织作业人员开展技能考核和应急演练,通过实操考核检验技能掌握程度,通过模拟山地复杂场景的应急演练检验应急处置能

力,及时发现并弥补作业人员的技能短板,持续提升队伍专业素养,打造一支专业过硬、效率突出、安全可控的运输与吊装作业队伍。

5.3 加强作业全过程监督管控

建立运输与吊装作业全过程监督管控机制,安排专业监督人员对作业全过程进行实时监督,重点排查作业流程、设备性能、安全防护等环节的隐患,及时制止不规范作业行为,确保作业严格按照方案和规范开展。加强对作业环境和地质状况的实时监测,及时掌握天气变化和地质动态,对可能影响作业安全的因素提前预警,采取针对性防控措施。建立作业隐患台账,对排查出的隐患明确整改责任人、整改措施和整改时限,确保隐患及时整改到位,全面保障山地风电机组运输与吊装作业的安全、高效推进。

6 结语

本文围绕山地风电机组运输与吊装难点及应对措施展开探讨,明确了山地风电机组运输与吊装在地形、环境、设备、协同等方面存在的核心难点,针对性提出了优化路线、强化防控、适配设备、完善协同等应对措施,并构建了涵盖制度、人员、监督的全方位保障体系。山地风电机组运输与吊装作业的顺利开展,是推动山地风电产业高质量发展的关键,唯有精准破解各类难点,严格落实应对措施,强化全过程管控,才能有效降低作业风险、提升作业效率、保障作业质量,为山地风能资源的高效开发利用提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 吕红志,龙见颖,谢艺,等.复杂高原山地风电机组吊装关键技术与风险预控[J].水电与新能源,2026,40(02):46-48+69.
- [2] 马俊,董联杰,卢永虎.复杂山地风电机组基础-塔筒耦合体系抗震性能分析与优化设计研究[J].中国设备工程,2026,(01):140-142.
- [3] 虞亚杰,叶霖晖.基于激光雷达的山地风电机组偏航控制策略研究[J].能源科技,2025,23(05):53-57.
- [4] 张少鹏.山地风电场集电系统降阻防雷与机组故障预测研究[D].西安理工大学,2025.
- [5] 冯兰杰,何永生,夏廷锁,等.复杂山地风场机组选型优化案例分析[J].云南电力技术,2024,52(04):60-63.