

高原地区光伏组件安装效率提升技术研究

罗 刚 朱瑞卿 杨玉全 汤德平 梅瑞东
中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 615500

摘 要：本文以凉山州美姑县940MW光伏电站三标段工程为依托，结合该项目3100~3960m高海拔、中高山侵蚀剥蚀地貌、玄武岩地层、冬季冰雪覆盖等具体工况，分析在高原地区光伏组件安装过程中的核心痛点，从材料运输优化、基础施工提速、组件安装工艺创新、高海拔作业保障、不良地质适配等方面，提出针对性的效率提升技术措施，并通过工程实践验证其可行性与有效性。研究结果表明，所提出的综合技术措施可有效提高高原地区光伏组件安装效率，显著提升安装进度，降低施工成本，保障安装质量与作业安全，为同类高原地区光伏电站组件安装提供工程参考与技术支持。

关键词：高原地区；光伏组件；安装效率；材料运输；施工工艺

引言

随着新能源发展，光伏电站建设向高原地区拓展。凉山州美姑县年日照1790.7小时，太阳能资源丰富，但高海拔（3100~3960m）、低温、强紫外线、复杂地质及交通不便等因素，使传统安装技术难以适用，存在运输效率低、施工周期长、工序繁琐、人员效率下降等问题。当前国内研究多聚焦平原地区，高原专项研究较少，现有模块化或智能化安装技术未充分考虑高原特殊工况，难以直接应用^[1]。因此，结合美姑县940MW光伏电站三标段工程实际，亟需研发适配高原复杂环境的安装效率提升技术。本研究旨在解决材料运输、基础施工、组件安装及作业保障等环节的效率瓶颈，实现效率、质量与安全协同提升，不仅为该工程提供技术支撑，也为同类高原项目积累经验，推动高原光伏高效开发和产业高质量发展。

1 高原地区光伏组件安装核心痛点分析

1.1 材料运输效率低

场区地处中高山地，仅靠狭窄乡村道路连接外部，坡度大（5°~25°）、局部穿越冲沟，大型设备难以通行。高海拔导致车辆动力下降，雨季（年降水814.6mm）易泥泞滑坡，冬季冰雪覆盖致道路结冰；材料需多次转运，易损且返工成本高，严重制约进度。

1.2 基础施工难度大、周期长

设计采用钢筋混凝土灌注桩（1.8~2.2m），但地质复杂：上覆粉质粘土夹碎石及耕植土，遇雨水易塌孔；覆盖层厚度不均（0.2~1.5m），冲沟处松散堆积物多，需防滑塌。高原低温延缓混凝土凝结，养护周期延长，影响整体施工节奏。

1.3 组件安装工序繁琐、适配性差

强紫外线、低温、大风环境对安装工艺要求高。传统“逐块逐点”安装方式依赖大量高空人工，高海拔缺氧降低作业效率；地形起伏大，角度调整困难，定位偏差需反复修正；冬季组件结冰需除冰处理；微腐蚀性水土还需额外防腐，进一步拖慢进度。

1.4 高海拔作业保障不足、人员效率下降

场区海拔3100~3960m，氧气含量仅为平原60%~70%，易引发高原反应（头晕、乏力等），体力与操作速度下降；昼夜温差大（年均温12.4℃），厚重保暖服降低灵活性；强紫外线需额外防护；偏远地区医疗资源匮乏，高原反应难以及时处置，影响施工连续性。

1.5 不良地质限制布局

冲沟发育（宽1.2~3.5m、深1.0~3.0m，部分有常流水），组件需避让，造成安装点分散、转运距离增加；岩土混合边坡在暴雨或扰动下易发生浅层滑塌，需先防护后施工；节理裂隙发育、岩体破碎区域需评估稳定性，制约基础与组件布设效率。

2 高原地区光伏组件安装效率提升技术措施

2.1 材料运输优化技术，解决运输瓶颈

2.1.1 场内运输路线优化

结合地形与冲沟分布，避开陡坡、冲沟等危险路段，优先拓宽改造既有乡村道路，减少新建工程量；在5#地块冲沟密集区设置临时便桥；按安装分区布设多个临时材料堆放点，实现就近供应，减少长距离转运，缩短运输时间。

2.1.2 运输设备适配选型

选用小型自卸车、山地履带运输车等高动力、强防滑、适应窄路陡坡的小型设备，替代传统大型车辆；对车辆加装增压装置以应对高原动力衰减；冬季加装防滑

链、铺设防滑砂,保障冰雪路面运输安全与效率。

2.1.3 材料转运分级管理

实行“场外集中运输+场内分区转运”模式:大型车辆将材料运至场区入口集中堆场,再由小型设备分送至各安装点;光伏组件、支架等易损材料采用专用防护包装,减少碰撞损坏;按安装进度精准安排运输批次,避免积压,提升转运效率^[2]。

2.1.4 季节运输管控

依据美姑县气候特点(雨季5-10月、冬季11月-次年3月)动态调整运输计划:雨季避开暴雨,提前做好排水防滑坡措施;冬季利用晴天运输,及时清冰除雪;恶劣天气暂停运输,防止安全事故与材料损失,确保高效安全作业。

2.2 基础施工提速技术,缩短施工周期

2.2.1 玄武岩地基快速成孔技术

针对高硬度玄武岩,采用液压冲击钻机替代传统设备,提升钻进效率;实施“分层钻孔、分段清孔”工艺,减少卡钻与塌孔;对中风化玄武岩埋深较大的点位,采用钻孔压浆增强孔壁稳定性,缩短成孔周期。

2.2.2 基础施工模块化优化

按光伏布局划分施工模块,各模块平行施工、交叉作业,压缩总工期;提前探测覆盖层厚度,分类制定开挖方案——冲沟区采用机械+人工协同开挖;松散地层(如耕植土、残坡积层)采取基坑支护,防范滑塌,减少延误。

2.2.3 低温环境混凝土施工优化

选用早强型混凝土并添加防冻剂,降低冰点、加速凝结;采用“保温棉被+塑料薄膜”双重覆膜养护,减少热量散失,养护周期缩短30%以上;优先在晴天中午气温较高时段浇筑,保障强度发展与施工质量。

2.2.4 桩基施工质量管控优化

基于玄武岩侧阻、端阻等岩土参数优化桩基设计,避免冗余工程量;引入智能监测设备,实时监控钻孔深度、孔径及混凝土浇筑量,确保一次成优;强化现场过程管控,及时处置异常,保障连续高效施工。

2.3 组件安装工艺创新,提升安装效率

2.3.1 模块化组件安装技术

采用“工厂预制、现场拼接”的模块化安装模式,在工厂将光伏组件与支架提前组装成模块化单元,运输至现场后,直接进行整体吊装安装,替代传统的逐块安装模式,将单块组件安装时间缩短50%以上;针对美姑县场区地形起伏较大的特点,设计可调节角度的模块化支架,现场根据地形快速调整组件安装角度,提高安装精

度,减少调整时间。

2.3.2 高空作业机械化优化

引入小型高空作业平台、履带式吊装设备,替代传统的脚手架高空作业,减少人工高空作业量,提高安装效率;针对山区地形狭窄的特点,选用小型可移动吊装设备,灵活调整作业位置,适配不同安装点位的施工需求;对组件吊装过程进行规范化操作,制定吊装流程,减少吊装等待时间,确保吊装安全与效率。

2.3.3 低温冰雪环境安装防护技术

冬季冰雪天气时,采用电加热除冰设备对组件表面进行除冰处理,替代传统的人工除冰,提高除冰效率,减少安装延误;在组件安装过程中,选用耐低温的密封胶与连接件,避免低温导致的材料脆化、密封失效;安装完成后,及时对组件表面进行清理,防止冰雪堆积影响后续发电效率,同时减少返工。

2.3.4 防腐工艺优化

针对场区水土微腐蚀性特点,优化组件支架防腐工艺,采用热镀锌+防腐涂层的双重防腐处理,在工厂提前完成防腐处理,现场仅需进行拼接安装,减少现场防腐施工时间;对支架连接部位,采用密封胶密封,防止腐蚀介质侵入,延长支架使用寿命,减少后期维护成本,同时提升安装效率^[3]。

2.4 高海拔作业保障技术,提升人员效率

2.4.1 高原适应性培训与筛选

对所有进场作业人员进行高原适应性培训,讲解高原反应预防知识、应急处理方法,提升作业人员的自我保护能力;在人员进场前,进行身体检查,筛选身体条件适宜高原作业的人员,避免因高原反应影响作业效率;定期组织作业人员进行健康检查,及时发现并处理高原反应症状。

2.4.2 作业环境优化

在施工现场设置临时供氧站,配备便携式氧气瓶,供作业人员随时吸氧,缓解高原反应;搭建临时保温棚,在冬季为作业人员提供温暖的休息环境,减少低温对作业人员的影响;在作业区域设置防晒棚,配备防晒用品,减少强紫外线照射对作业人员的伤害;合理安排作业时间,采用“分段作业、劳逸结合”的方式,避免作业人员过度疲劳,提升作业效率。

2.4.3 人员激励与管理

建立完善的人员激励机制,对高效完成安装任务的作业人员给予奖励,激发作业人员的工作积极性;合理配置作业人员,根据安装工序分工,明确各岗位人员职责,避免人力浪费;加强现场管理,规范作业人员操作

流程,减少操作失误,提高作业效率。

2.4.4 医疗保障完善

在施工现场设置临时医疗点,配备专业医护人员与急救药品、设备,及时处理作业人员的高原反应与突发疾病;与附近医院建立应急联动机制,确保重症患者能够及时转运救治,保障作业人员人身安全,减少因人员健康问题导致的施工延误。

2.5 不良地质适配技术,突破安装布局限制

2.5.1 冲沟区域安装优化

对5#地块的6条主要冲沟,进行专项勘察,根据冲沟宽度、深度、流量等参数,优化光伏组件安装布局,避开冲沟核心区域,在冲沟两侧安全距离外布置安装点位;对小型冲沟,采用填埋夯实、截排水措施进行处理后,再布置光伏组件,减少冲沟对安装的影响;在冲沟周边安装截排水设施,防止暴雨冲刷导致冲沟扩大,保障组件安装安全与稳定性。

2.5.2 边坡防护与安装协同技术

针对场区小规模滑塌与水土流失问题,采用“先防护、后安装”的原则,对不稳定边坡采用锚喷、削坡等防护措施,确保边坡稳定后,再开展组件安装;在岩土混合边坡区域,优化基础设计,采用桩基基础穿越松散覆盖层,直达稳定基岩,提升基础稳定性;在安装过程中,避免破坏地表植被与边坡坡脚,减少水土流失,确保施工安全与效率^[4]。

2.5.3 节理裂隙区域安装适配

针对场区节理裂隙发育的特点,提前对节理裂隙分布进行探测,避开节理裂隙密集区域布置安装点位;对无法避开的区域,优化基础施工工艺,采用压浆加固措施,增强岩体稳定性,确保基础施工质量;在组件安装过程中,调整支架固定方式,适应岩体节理裂隙分布,提升组件安装的稳定性与效率。

3 工程实践与效果验证

3.1 工程实践概况

将高原光伏组件安装效率提升技术措施应用于凉山州美姑县940MW光伏电站三标段(装机容量380MW),场区海拔3100~3960m,属中高山地,以玄武岩为主,冲沟发育,冬季冰雪覆盖,地震烈度Ⅶ度。施工中系统优化材料运输、基础施工、组件安装、作业保障及不良地质适配,并与传统工艺对比,从效率、工期、成本等维度验证措施有效性。

3.2 效果验证结果

(1) 安装效率显著提升,材料运输效率提高40%以

上,转运时间缩短35%;基础施工采用玄武岩快速成孔与模块化工艺,桩基效率提升50%,周期缩短30%;组件安装采用模块化+机械化,单块安装时间由15分钟降至7分钟内,整体效率提升55%以上。(2) 施工工期大幅缩短,组件安装工期由原计划180天压缩至100天以内,缩短44%,确保按期交付,避免违约风险。(3) 施工成本有效降低,材料损耗率由5%降至1.5%以下;基础施工成本降低25%,人工成本减少30%;整体施工成本下降超28%,投资效益显著提升。(4) 质量与安全双重保障,组件安装偏差符合规范,质量合格率100%;高原作业保障措施使人员出勤率达98%以上,无重症高原反应或安全事故;不良地质适配技术有效防控冲沟、边坡滑塌等风险,保障工程稳定。

3.3 实践结论

所提技术措施切实解决了高原地区在运输、施工、安装、保障及地质适应等方面的效率瓶颈,显著提升效率、缩短工期、降低成本,同时确保质量与安全,具备良好的实用性与推广价值。

4 结语

本文以凉山州美姑县940MW光伏电站三标段工程为依托,针对高原高海拔、复杂地形、玄武岩地质及低温冰雪等特殊工况,系统分析了光伏组件安装中的核心痛点,并提出综合效率提升技术。研究表明:材料运输低效、基础施工困难、工序繁琐、人员高原反应及不良地质影响是制约效率的关键因素;通过运输路线优化、玄武岩快速成孔、模块化安装、机械化作业、高海拔作业保障及地质适配等措施,可显著提升效率。工程实践显示,组件安装效率提升55%以上,工期缩短44%,成本降低28%,质量合格率100%,且无安全事故,验证了技术的实用性与推广价值。未来可聚焦智能化安装(如无人机、机器人)、新型耐候材料研发、多工况差异化技术体系构建,以及绿色施工融合,进一步推动高原光伏高效、生态友好发展。

参考文献

- [1] 李建明,王磊,张庆华.高海拔地区光伏电站施工技术难点及对策[J].太阳能学报,2022,43(5):421-427.
- [2] 张宇,刘敏,陈强.高原复杂地形光伏组件模块化安装技术研究[J].电力建设,2021,42(8):98-104.
- [3] 王浩,李娟,赵伟.玄武岩地层光伏桩基快速施工技术[J].施工技术,2023,52(3):112-115.
- [4] 陈明,赵阳,李丽.高原高海拔地区光伏施工人员作业保障技术[J].安全与环境学报,2022,22(2):789-794.