山地光伏工程支架安装关键施工技术

霍家豪[1] 李会[2] 曹重[3]
中冶武勘工程技术有限公司 湖北武汉 430080

【摘 要】在全球能源结构向低碳化转型的大背景下，太阳能光伏发电凭借清洁、可再生的优势，成为能源领域的重要发展方向。山地地区因地形开阔、光照资源丰富，成为光伏电站的重要布局区域。本文将围绕山地光伏工程支架安装的特点与难点，系统阐述地形勘察、基础施工、支架组装、安全管理等关键环节的施工技术，旨在为山地光伏工程支架安装提供科学的技术指导，助力我国光伏产业在山地领域的规模化、高质量发展。

【关键词】山地光伏工程；支架安装；关键施工技术

Key Construction Technologies for Mounting Support Structures in Mountainous Photovoltaic Projects

Huo Jiahao[1] Li Hui[2] Cao Zhong[3]
Zhongye Wukan Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430080

【Abstract】Against the backdrop of global energy transition toward low-carbon development, solar photovoltaic power generation has emerged as a pivotal direction in the energy sector due to its clean and renewable advantages. Mountainous regions, characterized by open terrain and abundant sunlight resources, have become critical sites for photovoltaic power station deployment. This paper systematically examines the key construction technologies involved in terrain surveying, foundation construction, support structure assembly, and safety management, focusing on the distinctive challenges and characteristics of mounting support structures in mountainous photovoltaic projects. The aim is to provide scientific technical guidance for such installations, thereby facilitating large-scale, high-quality development of China's photovoltaic industry in mountainous areas.

Keywords：Mountain photovoltaic engineering; Support structure installation; Key construction techniques

当前，山地光伏工程支架安装技术仍存在诸多短板。部分施工单位沿用平原地区的安装经验，未能充分考虑山地地形的特殊性，导致支架基础承载力不足、支架结构稳定性差等问题频发。同时，山地施工场地狭窄、交通不便，大型施工设备难以进场，传统的支架安装工艺效率低下，严重制约了山地光伏电站的建设进度。

一、山地光伏工程支架安装的特点与难点

1.地形条件复杂。山地地形起伏大，坡度、坡向变化多样，部分区域存在沟壑、陡坡等特殊地形，导致支架安装位置的选择和定位难度增加。同时，地形的不规则性使得支架基础施工和支架组装的标准化作业难以开展，需要根据实际地形进行个性化调整。

2.地质条件多样。山地地区地质条件复杂，涵盖岩石、砂土、黏土等多种地质类型，不同区域的土壤承载力、稳定性差异较大。这对支架基础的设计和施工提出了更高要求，若基础处理不当，易引发支架倾斜、沉降等问题，影响光伏电站的安全运行。

3.施工场地受限。山地光伏电站通常位于偏远山区，交通不便，施工材料和设备的运输难度大。此外，山地施工场地狭窄，大型施工机械的操作空间有限，增加了支架安装的施工难度和安全风险。

4.精度要求严格。光伏支架的安装精度直接关系到光伏组件的采光角度和发电效率。山地地形的起伏使得支架的水平度、垂直度调整难度加大，若安装精度不达标，会导致光伏组件接收的太阳辐射量减少，降低发电效率。

二、山地光伏工程支架安装关键施工技术

1.地形勘察与测量技术。（1）高精度地形测绘，高精度地形测绘是山地光伏支架安装的前置核心环节，需整合多种先进技术手段实现厘米级地形数据采集：无人机航测凭借效率优势，单日可完成 10~15 平方公里山地全域航拍覆盖，通过倾斜摄影测量技术生成空间分辨率 5 厘米的高精度数字高程模型（DEM）和数字正射影像图（DOM），可清晰识别 1° 及以上的微小地形起伏，准确呈现坡度变化、沟壑分布及地表障碍物特征，整体测绘效率较传统人工徒步测量提升

20 倍以上。全站仪针对 1%~2%的支架安装点位做精细化补测，点位坐标定位误差严格控制在 ± 3 毫米以内，为单根支架的精准布设提供依据。GNSS 技术采用北斗+GPS 双系统多星联合定位，可实现全天候、大范围地形数据采集，单机日均采集点位数据超 1000 个，三维坐标采集误差控制在 ± 1 厘米以内，大幅提升整体测绘的效率与精度。（2）地质勘察与分析，地质勘察需实现施工区域 100%全覆盖，每平方公里布置不少于 15 个勘察点位，结合钻孔取样、原位测试等方法，全面掌握不同区域的地质参数。钻孔取样针对不同地质单元分层钻探取芯，取芯率要求不低于 90%，通过室内试验精准分析土壤分层结构、颗粒级配及物理力学性质，准确划分岩石、砂土、黏土等地层类型。原位测试包含静力触探、标准贯入试验等，每 5000 平方米至少布置 1 组原位测试点，直接获取土壤承载力、压缩模量、抗剪强度等核心参数，测量误差控制在 5%以内，为差异化基础设计提供准确的地质依据，避免因地质参数偏差导致基础沉降变形。

2.支架基础施工技术。（1）灌注桩基础施工，灌注桩基础适用于地质条件较差、土壤承载力不足 100kPa 的山地区域，各项施工参数均需严格匹配设计要求：首先根据支架荷载与地质承载力计算确定桩参数，山地光伏灌注桩常规桩径为 400~600 毫米，桩长需穿透全部软弱土层，进入下层稳定持力层深度不小于 50 厘米，桩间距按支架排布设置为 3~6 米。钻孔施工选用适配山地转场的小型旋挖钻机，钻进过程中每米垂直度偏差控制在 1%以内，孔径偏差不超过 ± 20 毫米。钻孔完成后 1 小时内完成清孔，孔底残渣厚度控制在 5 厘米以内，随后下入预先加工的钢筋笼，主筋间距偏差控制在 ± 10 毫米，箍筋间距偏差不超过 ± 20 毫米，保护层厚度偏差≤ ± 10 毫米，保障桩体抗拉强度满足设计要求。混凝土浇筑采用导管法连续浇筑，导管埋入混凝土深度保持在 2~6 米，浇筑充盈系数控制在 1.05~1.2 之间，确保混凝土均匀密实，断桩、缩径等质量问题发生率控制在 1%以内。成型后的灌注桩基础单桩竖向承载力可达 150~500kN，可通过桩侧摩擦力和桩端端承力将支架荷载传递到深层稳定地层，年沉降量控制在 2 毫米以内，能有效抵御山地复杂地质条件下的沉降变形。（2）独立基础施工，独立基础适用于地形坡度小于 5° 、土壤承载力不低于 120kPa 的相对平整山地区域，施工流程简便，工期较短：首先完成场地平整，清除地表植被、大块碎石障碍物，施工区域平整度偏差控制在 ± 5 厘米以内。按设计尺寸开挖基坑，常规独立基础尺寸为 800 × 800 × 1000 毫米，基坑深度偏差控制在 ± 50 毫米，开挖过程中预留 10~20 厘米保护层人工清底，避免扰动基底原状土，防止基坑坍塌。基坑开挖完成后检测基底承载力，若承载力低于设计值 10%以上，采用级配砂石换填加固，换填分层夯实，每层厚度不超过 300 毫米，压实度要求不低于 93%，加固后承载力可提升 30%以上。随后绑扎钢筋骨架，主筋直径多采用 12~16 毫米，受力钢筋间距偏差控制在 ± 10 毫米，确保基础抗弯、抗剪承载力满足要求。最后浇筑 C25–C30 混凝土，采用插入式振捣器分层振捣，振捣间距不超过 40 厘米，确保混凝土密实度，气泡发生率控制在 3%以内。独立基础施工成本较灌注桩基础降低 40%~50%，单基础施工周期仅需 2~3 天，适用于山地光伏小规模安装或地形规整区域，可快速完成基础施工，整体项目工期可缩短 15%以上。（3）条形基础施工，条形基础适用于地形坡度小于 15° 、光伏组件成排整齐布置的山地区域，可将整排支架的荷载均匀传递至地基，提升整体稳定性：施工前按照设计坐标放线定位，基础走向偏差控制在 ± 10 毫米以内，基坑宽度和深度按照设计要求开挖，埋深需超过当地冻土层深度（一般不小于 80 厘米），保障基础抗冻稳定性。基坑开挖完成后清理基底，采用打夯机分层夯实，基底压实度要求不低于 94%，承载力较原土提升 20%以上。随后绑扎钢筋网片，受力钢筋直径一般为 10~14 毫米，间距偏差控制在 ± 10 毫米，基础配筋率不低于 0.15%，保证整体结构强度达标。混凝土采用连续浇筑工艺，单次浇筑长度不超过 20 米，避免产生不必要的施工缝，浇筑振捣完成后，精准预埋支架安装螺栓，螺栓中心位置偏差控制在 ± 2 毫米以内，螺栓标高偏差≤ ± 1 毫米，确保后续支架安装精度达标。条形基础可适应不超过 15° 的地形坡度，通过微调基础顶面倾斜角度，可将支架顶面水平误差控制在 ± 1° 以内，为光伏组件提供稳定支撑，整体基础沉降差不超过 5 毫米，使用寿命可达 25 年以上。

3.支架组装与安装技术。（1）模块化组装技术，模块化组装技术是提升山地光伏支架安装效率的核心手段，从源头减少现场作业难度：工厂预制阶段，按照设计将支架拆分为立柱、横梁、斜撑、连接件等百余个标准化模块，采用自动化切割、冲孔生产线加工，模块尺寸公差控制在 ± 0.5 毫米以内，互换率达到 100%，不存在非标构件适配问题。预制完成后直接打包运输至施工现场，现场仅需拼接固定，可减少 80%以上的现场切割、焊接等加工环节，现场施工劳动强度降低约 50%，单兆瓦支架组装时间较传统现场加工缩短 40%以上。针对山地起伏地形，标准化模块可实现 50 厘米范围内的自由调节，能适配任意坡度的施工点位，材料利用率提升至 98%，较传统现场加工减少 10%~15%的材料浪费。（2）高精度定位与调整技术，高精度定位与调整技术是保障光伏组件发电效率的核心，可将采光误差控制在极小范围：定位阶段采用全站仪+GNSS RTK 联合定位，双设备复核安装点位的三维坐标，最终点位偏差控制在 ± 2 毫米以内。初步固定支架后，通过激光水平仪检测支架整体水平度，

采用可调节底座微调支撑高度，水平度偏差控制在 1‰以内；用垂直度检测仪校核立柱垂直度，偏差不超过 0.5°；最终通过电动推杆对支架倾角进行精细化调整，组件采光倾角偏差控制在 ±0.1° 以内，相比人工调整可提升 2%~3%的年发电量。针对山地高差起伏的情况，支撑腿可实现最高 50 厘米的独立高度调节，满足不同坡度地形下倾角统一要求，同批次支架倾角一致性达到 99.5%以上。（3）吊装与固定技术，吊装与固定技术直接决定支架安装的安全性和长期稳定性，需严格匹配山地场景参数：吊装前根据支架模块重量选型，1 吨以上的整排支架模块采用 25 吨级山地履带起重机吊装，100~1000 公斤的中型构件采用小型卷扬机吊运，100 公斤以下小型部件可采用无人机吊装辅助，实现精准送料；吊装前对吊点、钢丝绳做 1.5 倍额定荷载的拉力试验，合格后方可作业，同时划定吊装半径 3 倍范围的禁入区，全程由持证指挥人员统一信号指挥。固定环节，螺栓连接按照设计扭矩紧固，M12 螺栓扭矩控制在 35N·m，M16 螺栓控制在 80N·m，紧固后采用扭矩扳手逐一复检，漏紧、扭矩不合格率控制在 1%以内；陡坡区域坡度每增加 5°，加装 1 组锚杆固定，坡度超过 30° 时额外增加斜向支撑，支架抗滑移能力提升 60%以上，可抵御 10 级大风的荷载冲击。

三、山地光伏工程支架安装质量控制

1.施工前质量控制。施工前的质量控制是保障山地光伏支架安装质量的首要环节，需从图纸、材料设备、人员三个维度构建全面的预控体系。在图纸审核方面，要组织设计、施工、地质等多领域专业人员开展联合会审，重点核查支架基础形式与山地地形的适配性、支架结构布局与坡向采光需求的匹配度，以及地质条件对基础承载力的支撑能力。材料设备检验环节需严格遵循国家及行业标准，对支架钢材、基础混凝土、螺栓连接件等关键材料进行抽样检测，核查其强度、耐腐蚀性、尺寸精度等指标是否满足设计要求。对于吊装设备、测量仪器等施工设备，要提前进行校准调试，确保其性能稳定、精度达标，避免因设备误差影响安装质量。同时，建立材料设备溯源机制，记录每批次材料的产地、规格、检测报告，保障材料质量可追溯。人员培训与技术交底是施工前质量控制的核心。针对山地施工的特殊性，需对施工人员开展专项技术培训，涵盖山地地形测量、基础施工工艺、支架组装技巧、安全防护措施等内容。技术交底要以图文结合、现场演示的方式，明确每道工序的操作要点、质量标准及验收要求，确保施工人员熟悉山地施工的难点与重点，掌握应对复杂地形的施工方法，从源头减少人为失误对安装质量的影响。

2.施工过程质量控制。施工过程中的质量控制需建立“全员参与、全程管控”的动态管理机制，通过工序报验、旁站监督、抽样检测等方式，确保每一个施工环节符合质量标准。首先，要构建分级质量检查制度，由施工班组进行自检、项目部进行复检、监理单位进行终检，每道工序必须经检验合格后方可进入下一环节。对于支架基础施工，重点检查基坑开挖深度、基础混凝土强度、预埋件位置精度等；在支架组装阶段，需核查杆件连接牢固性、螺栓扭矩值、支架结构平整度等；支架安装完成后，要严格测量支架的水平度、垂直度及倾斜角度，确保误差控制在设计允许范围内。针对山地施工的不确定性，需加强关键工序的旁站监督。例如，在陡坡区域进行基础浇筑时，监理人员需全程旁站，监督混凝土浇筑过程，防止因地形倾斜导致混凝土离析、基础成型不规则；在支架吊装作业中，要重点监控吊装角度、绳索受力状态，避免因操作不当引发支架变形或安全事故。对于施工过程中发现的质量问题，要建立“问题台账–原因分析–整改落实–复查验证”的闭环管理流程。针对不同类型的质量问题，组织技术人员分析根源，制定针对性整改方案，明确整改责任人与时限。整改完成后，需重新进行质量检验，确保问题彻底解决，避免遗留隐患影响光伏电站的长期运行。

综上所述，山地光伏工程支架安装是一项复杂的系统工程，涉及地形勘察、基础施工、支架组装、安全管理等多个环节。针对山地地形复杂、地质条件多样等特点，采用高精度地形勘察与测量技术、合理的支架基础施工技术、模块化组装与高精度定位安装技术以及完善的施工安全管理技术，能够有效提高支架安装的质量和效率，确保光伏电站的稳定性和发电效率。

参考文献

[1]李军磊.山地光伏电站支架基础施工技术研究[J].中国电力,2023,56(8):123–129.
[2]刘强明.复杂地形光伏支架安装精度控制技术[J].太阳能学报,2022,43(10):45–51.
[3]张东丽.山地光伏支架抗风设计与施工技术[J].建筑结构,2021,51(12):89–94.
[4]王军艳.灌注桩基础在山地光伏工程中的应用研究[J].岩土工程学报,2020,42(S1):112–115.