

# 山地光伏无人机巡检应用效能及经验反馈

张学亮

中国水利水电第十四工程局有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18224

**[摘要]** 山地光伏电站因地形复杂、组件分布分散、环境恶劣等特点,传统人工巡检模式面临效率低下、安全风险高、缺陷检出率不足等瓶颈。无人机巡检凭借其机动性强、覆盖范围广、智能化程度高等优势,已成为山地光伏运维的核心技术手段。本文基于多地山地光伏电站无人机巡检实践案例,系统分析了无人机巡检在效率提升、成本控制、安全保障及缺陷检出等方面的核心应用效能;结合一线运维经验,总结了设备选型、航线规划、环境适配及团队建设等关键环节的实操经验,并针对应用中存在的极端天气适配、数据治理及协同运维等问题提出优化建议,为山地光伏电站智能化运维升级提供技术参考与实践指导。

**[关键词]** 山地光伏; 无人机巡检; 应用效能; 运维经验; 智能化升级

**中图分类号:** V279+.2 **文献标识码:** A

## Application Efficiency and Experience Feedback of Unmanned Aerial Vehicle Inspection in Mountainous Photovoltaic Power Plants

Xueliang Zhang

China Water Conservancy and Hydropower Fourteenth Engineering Bureau Co., Ltd.

**[Abstract]** Due to the complex terrain, scattered component distribution, and harsh environment of mountainous photovoltaic power plants, traditional manual inspection methods face bottlenecks such as low efficiency, high safety risks, and insufficient defect detection rates. Unmanned aerial vehicle (UAV) inspection, with its advantages of strong mobility, wide coverage, and high intelligence, has become a core technical means for the operation and maintenance of mountainous photovoltaic power plants. Based on practical cases of UAV inspection in multiple mountainous photovoltaic power plants, this paper systematically analyzes the core application efficiency of UAV inspection in terms of efficiency improvement, cost control, safety assurance, and defect detection. Combined with the operation and maintenance experience on the front line, it summarizes the practical experience in key links such as equipment selection, route planning, environmental adaptation, and team building, and proposes optimization suggestions for problems such as extreme weather adaptation, data governance, and collaborative operation and maintenance in the application, providing technical references and practical guidance for the intelligent operation and maintenance upgrade of mountainous photovoltaic power plants.

**[Key words]** Mountainous photovoltaic power plant; Unmanned aerial vehicle inspection; Application efficiency; Operation and maintenance experience; Intelligent upgrade

### 引言

随着“双碳”目标推进,光伏能源开发规模扩大,受土地约束,山地光伏电站占比逐年提升。与平原电站相比,山地光伏电站地形复杂、常遇极端天气,给运维巡检带来挑战。传统人工巡检劳动强度大、效率低、有安全风险,还难检出隐性缺陷,增加发电损失。

无人机技术为山地光伏巡检提供解决方案。搭载多种设备

及系统的无人机可突破限制,实现全方位、高精度巡检。河北承德、保定等地项目实践表明,无人机巡检可提升运维效率与质量,推动运维模式转型。本文结合案例剖析其应用效能,提炼经验并提出优化方向,为行业推广提供支撑。

### 1 山地光伏无人机巡检核心应用效能

#### 1.1 巡检效率跨越式提升

地形是制约山地光伏巡检效率的关键,人工巡检受坡度、植

被等影响, 每日仅能巡检约1000块组件, 大规模电站全面巡检需数月。无人机机动性强, 可无视地形障碍高速覆盖, 大幅缩短巡检周期。如河北保定一电站人工巡检需1个月, 无人机智能巡检仅需半天, 效率提升60倍以上; 内蒙古一电站无人机自主巡检效率较人工提升26倍。

此外, 无人机巡检可多设备协同覆盖, 避免人工重复作业。承德一电站通过“无人机+地面管控平台”模式, 实现全地形覆盖巡检, 单架次作业时间长、覆盖范围大, 解决了组件分散导致的巡检效率低问题。

### 1.2 运维成本显著降低

山地光伏无人机巡检通过减少人力投入、降低设备损耗及减少发电损失, 实现全链条成本节约。从人力成本来看, 无人机巡检可大幅缩减运维团队规模, 以100MW规模山地光伏电站为例, 传统人工巡检需配备2组4人团队, 而无人机巡检模式仅需1-2名操作人员即可完成全流程巡检, 人力成本降低70%以上。河北空天公司承德光伏项目数据显示, 采用无人机全场景巡检后, 电站年均运维支出节省35%, 显著提升了项目经济效益。

从间接成本来看, 无人机精准检出缺陷可减少发电损失与设备更换成本。光伏组件热斑、杂草遮挡等缺陷若未及时处理, 会导致组件发电效率下降, 甚至引发火灾。无人机搭载红外热成像仪可精准识别热斑等隐性缺陷, 结合AI算法实现缺陷分类与定位, 指导运维人员精准消缺。数据显示, 通过无人机巡检实现缺陷快速修复, 山地光伏电站可减少年发电损失3%-5%, 以40MW电站为例, 每年可减少发电损失约23万元, 同时延长组件使用寿命, 降低更换成本约6.4万元。

### 1.3 作业安全风险大幅降低

山地光伏电站巡检面临的安全风险主要包括地形风险(陡坡、滑坡)、环境风险(野生动物、极端天气)及设备风险(高空作业触电), 传统人工巡检安全事故发生率较高。无人机巡检通过“无人化作业”模式, 从根本上规避了人员直接暴露于风险环境中的隐患。承德200MW山区光伏电站采用无人机巡检后, 人员安全事故率降低90%以上; 在风机巡检场景中, 传统人工高空吊篮作业需1-2个工作日且存在坠落风险, 而无人机仅需15分钟即可完成单台风机叶片巡检, 全程无需人员高空作业。

此外, 无人机可在极端天气前开展预防性巡检, 提前排查组件松动、线路破损等隐患, 降低极端天气引发的设备故障与安全事故。在暴雨、暴雪等天气过后, 无人机可快速升空巡检, 评估灾害损失, 为应急抢修提供精准数据支撑, 避免人员在灾后危险环境中作业。

### 1.4 缺陷检出精度与全面性提升

山地光伏组件的缺陷类型复杂, 包括显性缺陷(鸟粪遮挡、组件破裂、边框腐蚀)与隐性缺陷(热斑、旁路二极管故障、接线盒异常), 传统人工巡检依赖肉眼观察, 难以精准识别隐性缺陷, 且存在巡检盲区。无人机通过搭载高清可见光相机与红外热成像仪, 结合AI图像识别技术, 实现缺陷的全方位、高精度检出。

可见光相机可清晰捕捉组件表面的细微破损、污渍及植被遮挡, 分辨率可达厘米级别; 红外热成像仪通过温度差异直观呈现组件热分布, 精准识别热斑等隐性缺陷, 检出准确率达98%以上。山东日照丘陵地带90MW光伏电站通过无人机巡检发现, 虽然热斑缺陷组件占比仅0.21%, 但表面附着鸟粪等污渍的组件占比相对较高, 运维团队据此调整清扫计划, 有效预防了热斑形成; 内蒙古风电场无人机巡检可精准识别风机叶片裂纹、风蚀等14种缺陷, 准确率达95%以上。同时, 无人机搭载RTK模块可实现缺陷位置的厘米级定位, 生成含缺陷位置、类型、严重程度的详细报告, 为精准消缺提供数据支撑。

## 2 山地光伏无人机巡检一线应用经验

### 2.1 设备选型: 适配山地复杂场景

山地光伏场景对无人机的稳定性、续航能力及负载兼容性要求较高, 设备选型需遵循“场景适配、性能优先”原则。一是优先选择工业级多旋翼无人机, 其抗风能力强(建议抗风等级 $\geq 6$ 级), 可适应山地复杂气流环境, 且悬停稳定性好, 便于精准拍摄; 二是关注续航能力, 选择续航时间4小时以上的机型, 搭配备用电池, 满足大规模电站的连续巡检需求; 三是合理配置负载设备, 常规巡检需搭载高清可见光相机与红外热成像仪, 针对大面积电站可增加激光雷达模块, 提升地形测绘与障碍规避能力; 四是选择支持RTK定位与自主避障功能的机型, RTK定位可实现缺陷位置精准定位, 自主避障功能可有效规避山地植被、杆塔等障碍物, 保障飞行安全。

此外, 建议配备地面管控平台与无人机机场, 实现巡检全流程自动化。大疆机场3及Matrice系列无人机已在1000余座新能源电站应用, 适配暴雪、沙尘等极端天气及高原、山地等特殊环境, 值班人员通过管控平台即可下发巡检任务, 无人机自主起飞、巡检、返航并生成报告, 全流程无需人工干预, 尤其适合偏远山地光伏电站的无人化运维。

### 2.2 航线规划: 兼顾效率与全覆盖

科学的航线规划是保障巡检效率与全覆盖的核心, 需结合山地地形、组件分布及设备参数制定个性化方案。一是采用“分区规划、逐片覆盖”模式, 根据山地光伏电站的地形分区与组件排布, 将电站划分为多个巡检单元, 每个单元规划独立航线, 避免漏检与重复巡检; 二是优化飞行参数, 飞行高度建议距组件表面3-5米, 飞行速度控制在5-8m/s, 确保图像清晰度与拍摄覆盖率, 相邻航线重叠率设置为30%-50%, 避免出现巡检盲区; 三是结合地形调整飞行模式, 在陡坡区域采用“斜向飞行”模式, 确保组件表面完全纳入拍摄范围, 在植被茂密区域适当提升飞行高度, 开启避障功能; 四是利用专业航线规划软件, 导入电站CAD图纸与地形数据, 自动生成最优航线, 支持批量任务下发与航线复用, 提升规划效率。

### 2.3 环境适配: 应对复杂气候与地形

山地气候与地形复杂, 需针对性制定环境适配策略。一是合理选择巡检时段, 避开暴雨、大风、高温等极端天气, 选择清晨或傍晚光线充足、气流稳定的时段巡检, 提升拍摄效果; 夏季高

温时段避免正午巡检,防止红外热成像仪受环境温度影响导致缺陷误判;冬季冰雪天气后,需先清理起降点积雪,检查电池低温性能,必要时配备电池保温设备。二是处理地形与植被干扰,提前清理起降点周边植被,确保起降安全;对于密集植被覆盖区域,采用“低空绕行+定点拍摄”模式,重点排查植被遮挡组件问题;在滑坡、塌方风险区域,优先采用无人机巡检,避免人员进入危险区域。三是建立环境预警机制,结合当地气象数据与地形监测数据,提前预判极端天气与地质灾害风险,调整巡检计划,必要时开展预防性巡检。

#### 2.4 团队建设: 强化技能与管理

专业的运维团队是无人机巡检高效开展的保障,需强化人员技能培训与管理制度建设。一是组建复合型团队,团队成员需具备无人机飞行操作、图像识别、设备维护及光伏专业知识,定期开展技能培训,内容包括飞行安全规范、航线规划技巧、缺陷识别标准及应急处理流程;中广核(湖北)新能源检修中心通过3年实践,主导编写了国内首本新能源行业无人机巡检技术应用教材,为团队培训提供了系统支撑。二是建立严格的飞行安全管理制度,明确飞行权限审批、起降点管理、电池维护等规范,定期开展设备检修与校准,确保设备性能稳定;三是搭建数据管理体系,安排专人负责巡检数据的整理、分析与归档,建立缺陷数据库,跟踪缺陷整改情况,形成“巡检-识别-消缺-复核”的闭环管理。

### 3 应用中存在的问题与优化建议

#### 3.1 核心问题分析

一是极端天气适配能力不足,在强暴雨、暴雪、浓雾及强阵风等极端天气下,无人机飞行稳定性受限,甚至无法起飞,导致巡检中断;二是数据治理压力大,大规模电站巡检会产生海量图像与视频数据,人工筛选与分析耗时较长,AI算法对部分复杂缺陷(如轻微热斑、隐蔽接线盒故障)的识别准确率仍需提升;三是协同运维机制不完善,无人机巡检数据与电站运维管理系统尚未完全打通,数据共享与业务协同存在障碍,影响消缺效率;四是高海拔山地适配难题,在海拔3000米以上区域,空气稀薄导致无人机动力下降、续航缩短,且低温环境对电池性能影响显著。

#### 3.2 优化建议

针对上述问题,结合技术发展趋势与实践经验,提出以下优化建议:一是提升设备极端环境适配能力,研发抗风等级更高、低温性能更好的专用无人机,配备加热电池与防雾相机,增强极端天气下的飞行稳定性;二是优化AI算法与数据处理流程,通过海量缺陷数据训练算法模型,提升复杂缺陷识别准确率,搭建智能化数据处理平台,实现数据自动筛选、分析与报告生成,减少人工干预;三是构建协同运维体系,推动无人机巡检系统与电站ERP、CMMS等管理系统对接,实现巡检数据、缺陷信息与运维工单的无缝衔接,提升闭环管理效率;四是针对高海拔山地,优化无人机动力系统与电池配置,采用高原专用机型,同时调整飞行参数,降低高海拔环境对巡检效能的影响;五是加强行业交流与标准制定,推广优秀应用案例与技术方,推动建立山地光伏无人机巡检技术标准与操作规范,提升行业整体应用水平。

### 4 结论

无人机巡检凭借效率高、成本低、安全可靠、精度高等优势,已成为破解山地光伏运维难题的核心技术手段,其应用可实现巡检效率提升26-60倍,人力成本降低70%以上,缺陷检出准确率达95%以上,显著提升山地光伏电站的运维质量与经济效益。一线实践表明,科学的设备选型、航线规划、环境适配及团队建设是保障效能发挥的关键。

#### 【参考文献】

- [1]徐狄柯.山地集中式光伏电站无人机巡检路径规划与优化[J].电力设备管理,2025,(22):110-112.
- [2]蒋梦月,宋健,白艳芳.山地光伏电站无人机巡检三维建模与缺陷定位探究[J].黑龙江科学,2025,16(22):104-106.
- [3]廖重阳,令狐克阳,胡广会.无人机吊装运输在高海拔地区山地光伏施工中的运用[J].科技与创新,2025,(20):226-229.
- [4]王雅鹏.无人机倾斜摄影与三维激光扫描技术在山地光伏装置虚拟安装设计中的应用[J].测绘通报,2025(9):177-180.
- [5]顾豫阳,张轩,李岩,等.无人机在山地光伏发电项目施工材料运输中的应用[J].工程建设与设计,2025,(12):99-101.

#### 作者简介:

张学亮(1990--),男,汉族,甘肃武威人,大学本科,中国水利水电第十四工程局有限公司,工程师,研究方向: 新能源工程。