

无人机运输系统在山地光伏项目中的适用性研究

陈博轩 杨 坤 赵金鹏 李 享 余才东
中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 610041

摘要: 本文聚焦于安全维度,系统分析无人机运输系统在山地光伏项目中的适用性。通过梳理山地光伏项目运输环节的主要安全风险,构建无人机运输系统的安全风险识别框架,并从设备本体安全、运行环境安全、操作管理安全及应急响应能力四个层面进行深入剖析。研究发现,无人机运输系统在规避人员高危作业、减少道路施工扰动、提升应急响应速度等方面具有显著安全优势;但同时也面临恶劣气象适应性不足、空域冲突风险、电池热失控隐患及人为操作失误等新型安全挑战。基于此,本文提出涵盖技术标准完善、智能感知融合、数字孪生仿真、全生命周期管理及法规协同治理的综合性安全提升路径,旨在为山地光伏项目安全、高效、可持续建设提供理论支撑与实践指导。

关键词: 无人机运输; 山地光伏; 安全风险; 适用性分析; 智能运维; 应急管理

引言

在全球能源转型与“双碳”目标驱动下,山地光伏因光照资源丰富、土地成本低,成为我国新增光伏装机重要来源。但传统运输依赖施工便道、人力背运或小型索道,存在成本高、效率低、易诱发滑坡崩塌等地质灾害风险,且人员攀爬面临坠落、扭伤等职业健康威胁。工业级无人机运输系统以“点对点”“空中走廊”优势,可跨越复杂地形精准投送物资,理论上减少人员高风险暴露,提升项目安全水平。然而,其自身运行安全、环境影响及管理体系兼容性等新风险形态需关注。当前学界业界对无人机在大型能源基建项目,尤其是极端山地环境下的系统性安全适用性研究不足。本文以“安全”为核心,全面剖析无人机运输在山地光伏项目中的可行性、优势与挑战,提出风险管控策略,为规范化、规模化应用奠定安全基石。

1 山地光伏项目运输环节的传统安全风险

1.1 地质与地形风险

山地环境地质构造复杂,岩土体稳定性差。为修建运输便道而进行的大规模削坡、填方作业,会严重破坏原有的自然平衡,极易在降雨、地震等诱因下引发滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害。此类灾害具有突发性强、破坏力大的特点,是山地光伏项目施工期最致命的安全威胁之一。

1.2 人员作业风险

在无法通车或道路条件极差的区域,大量依赖人工背运。工人需在陡峭、湿滑、布满碎石的山坡上负重行走,极易发生滑倒、坠落事故。此外,长时间高强度的体力劳动也增加了肌肉骨骼损伤、中暑、失温等职业健康风险。据统计,在部分偏远山地光伏项目中,运输环

节的人身伤害事故占比高达40%以上。

1.3 道路交通安全风险

临时施工便道通常标准低、路况差、弯急坡陡,且缺乏完善的安防设施。重型运输车辆在狭窄、松软的道路上行驶,存在侧翻、溜车等重大交通安全隐患。同时,人车混行的局面进一步加剧了安全风险。

1.4 生态扰动风险

大规模的道路开挖不仅带来直接的安全隐患,还会造成严重的水土流失和生态破坏。被破坏的植被覆盖层失去固土功能,使得边坡在雨季更容易失稳,形成一种长期性的、间接的安全隐患。

综上所述,传统运输模式的安全风险呈现出“点多、面广、链长、后果严重”的特征,亟需一种能够从源头上规避或弱化这些风险的创新方案。

2 无人机运输系统在山地光伏项目中的安全优势分析

2.1 规避人员高危作业,降低人身伤害风险

这是无人机运输系统在山地光伏项目中最核心的安全价值。通过“机器换人”,可将施工人员从陡坡背运、悬崖边缘作业、湿滑山路驾驶等高风险场景中彻底解放出来。当前面向工业物流场景的重型无人机平台,如大疆推出的具备70公斤级有效载荷能力的定制化运输机型(例如基于Matrice系列架构开发的3wvdx-u70a型无人机),已能够单次运输多块标准尺寸(约1.8 m × 1.1 m)的光伏组件或整套支架系统,显著提升单次运输效率并减少飞行频次。这些无人机采用六旋翼或八旋翼冗余动力布局,即使在单个电机失效的情况下,仍能维持基本飞行姿态并执行安全返航程序,保障了任务的可靠性。人员只需在预设的、经过平整处理的卸货点进行接收和整理工作,极大地压缩了人员暴露于危险环境的时

间窗口，从源头上杜绝了大量坠落、扭伤等人身伤害事故^[1]。此外，结合RTK（实时动态定位）或PPK（后处理动态定位）技术，无人机可实现厘米级的精准定位投送，避免了因物资投放偏差导致人员二次攀爬寻找的风险。

2.2 减少道路依赖，消除地质灾害诱因

无人机采用空中航线，几乎不需要修建或仅需极少的地面辅助设施（如起降坪）。这从根本上避免了因大规模土方工程对山体稳定性的破坏。具体而言，传统方案为运送一块组件可能需要开挖数十甚至上百立方米的土石方来修筑便道，而无人机方案则将此扰动降至近乎为零。项目对自然地貌的干预降至最低，有效保护了原有的植被根系和土壤结构，维持了边坡的自然稳定性，从而消除了诱发滑坡、崩塌等地质灾害的最大人为诱因。这种“轻足迹”（Light-footprint）的建设模式，不仅提升了短期施工安全，也为电站长达25年的运营周期提供了长期的地质安全保障。

2.3 提升应急响应与救援效率

在山地项目中，一旦发生人员受伤或关键设备（如逆变器）故障，传统的地面救援往往因道路不通而延误时机。配备有医疗急救包或关键备件无人机，可以作为快速响应单元。例如，搭载热成像相机的无人机可在夜间或浓雾中快速定位失联人员；而具备自动空投装置的机型，则能在不降落的情况下，精准释放急救物资。整个过程可在5-10分钟内完成，远快于地面徒步或车辆绕行所需的一小时以上。这种分钟级的响应能力，对于处理高原反应、蛇虫咬伤、心脏骤停等紧急情况至关重要，显著提升了项目整体的应急安全保障能力。

2.4 实现精准投送，减少二次搬运风险

传统模式下，物资通常只能运送到山脚或某个中转点，再由人工进行二次甚至三次搬运至最终安装位。每一次搬运都是一个潜在的风险点。无人机则可以利用其三维空间机动性，直接飞抵光伏阵列的每一个安装基座旁。通过预先导入的BIM（建筑信息模型）或GIS（地理信息系统）坐标，无人机能够自动规划最优路径，并在指定坐标点上方悬停，通过电磁释放或绳索缓降等方式，将物资平稳放置于地面^[2]。这种“门到门”的精准投送，最大限度地减少了中间环节，从而降低了因多次搬运导致的物资损坏（如光伏板隐裂）和人员操作风险。

3 无人机运输系统面临的安全挑战与风险

尽管优势明显，但无人机在山地复杂环境下的应用也面临着一系列不容忽视的安全挑战。

3.1 恶劣气象条件下的适应性风险

山地气候多变，常伴有强风、乱流、浓雾、雨雪、雷电等恶劣天气。强风和乱流会严重影响无人机的飞行稳定性，可能导致失控或偏离航线；浓雾和雨雪会降低能见度，干扰视觉定位系统，并可能影响电池性能；雷电则对电子设备构成致命威胁。目前，大多数工业级无人机的气象适应能力仍有局限，如何确保其在复杂山地气象下的全天候、高可靠运行，是一个巨大的技术挑战。

3.2 空域安全与冲突风险

随着低空经济的发展，低空空域日益繁忙。山地光伏项目区域可能与通用航空、军用空域、其他无人机作业区存在重叠。若缺乏统一、高效的低空交通管理系统（UTM），极易发生无人机之间或无人机与有人机之间的碰撞事故^[3]。此外，无人机在山区飞行时，GPS信号可能因地形遮挡而失锁，依赖视觉或惯性导航又易受环境干扰，增加了迷航、撞山的风险。

3.3 设备本体与能源安全风险

山地运输对无人机的载重、续航能力要求极高，通常需要大功率电机和大容量电池。高负荷运行下，电机过热、电调故障的风险增加。更为关键的是锂电池的安全问题：在高温、高湿或物理冲击下，锂电池可能发生热失控，引发火灾甚至爆炸。一旦满载电池的无人机在空中起火坠落，不仅会造成财产损失，还可能引燃山林，酿成重大次生灾害。

3.4 人为操作与管理风险

无人机的飞行安全高度依赖于飞手的操作技能和任务规划的科学性。经验不足的飞手在复杂环境下容易误判形势，做出错误决策。不合理的航线规划（如过于贴近山体、穿越高压线走廊）也会埋下安全隐患。此外，缺乏健全的管理制度，如未严格执行飞行前检查、超视距飞行监管缺失、数据记录与回溯机制不完善等，都会放大系统性风险。

4 综合性安全提升路径与对策建议

为最大化无人机运输系统的安全效益，并有效管控其衍生风险，必须采取系统性的、全链条的治理策略。

4.1 完善技术标准与准入机制

国家及行业层面应加快制定针对山地能源基建场景的无人机运输专用技术标准。标准应明确要求无人机必须具备IP54及以上防护等级以应对山地雨雾环境；抗风能力不低于12m/s（6级风）；电池系统需通过UN38.3、IEC62133等国际安全认证，并强制集成电池健康状态（SOH）实时监测与预警模块。建立严格的设备准入和定期检测认证制度，确保投入使用的无人机系统具备足够的安全裕度。

4.2 构建智能感知与融合导航系统

推动无人机搭载多源传感器融合技术,构建不依赖单一GPS信号的鲁棒导航能力。具体可采用“GNSS+LiDAR+视觉惯性里程计(VIO)”的紧耦合SLAM(即时定位与地图构建)架构。其中,LiDAR用于生成高精度的实时点云地图,实现对高压线、树木、岩石等障碍物的厘米级探测;VIO则在GNSS信号短暂丢失时(如穿越峡谷),利用摄像头和IMU(惯性测量单元)数据维持高精度的位姿估计。通过机载AI芯片(如NVIDIA Jetson系列)运行边缘计算算法,实现毫秒级的自主避障决策,大幅提升在复杂山地环境下的自主飞行安全性。

4.3 应用数字孪生与仿真预演技术

在项目规划阶段,利用无人机搭载倾斜摄影相机进行全域航测,结合激光雷达扫描数据,构建厘米级精度的实景三维模型(DigitalTwin)。在此虚拟环境中,集成气象历史数据、电磁环境数据和空域限制信息,对所有拟定的运输航线进行蒙特卡洛仿真和CFD(计算流体力学)风场模拟。通过反复的压力测试,提前识别潜在的碰撞点、信号盲区、强乱流区域和雷击高风险区,并动态优化航线规划。这种“先模拟、后飞行”的模式,能将大部分风险扼杀在萌芽状态。

4.4 强化全生命周期安全管理

建立覆盖“采购-部署-运行-维护-退役”全过程的安全管理体系。实施飞行任务的全流程数字化管理,包括:

4.4.1 电子化的飞行计划审批

通过云端平台提交包含航线、载荷、气象预测的飞行任务书。

4.4.2 实时的飞行状态监控

地面站持续接收无人机回传的遥测数据(Telemetry),包括位置、高度、速度、电池电压、电机温度、链路质量等数百项参数。

4.4.3 完整的飞行数据记录

所有飞行数据均加密存储于机载“黑匣子”及云端服务器,支持事后事故回溯与分析。

4.4.4 标准化的维护保养规程

依据基于状态的维护(CBM)理念,根据电机磨损、桨叶形变、电池循环次数等数据,自动生成维护工单^[4]。同时,大力推广使用具备多重冗余(如双飞控计算机、双IMU、双电池并联系统、4G/5G+图传双链路)

和多重失效保护机制(如低电量自动返航、失控自动返航、进入禁飞区自动悬停、严重故障触发降落伞)的高端机型。

4.5 推动法规协同与空域协同治理

呼吁并配合民航、军方及地方政府,共同探索适用于山地光伏等特定场景的低空空域分类划设和动态管理机制。推动建立区域性UTM(无人交通管理系统)平台,该平台应具备UOM(无人机综合管理)功能,实现对所有合法无人机的统一注册、电子围栏设定、实时监控(RemoteID)和动态调度。通过API接口,UTM平台可与光伏项目的智慧工地管理系统无缝对接,实现空域申请、任务派发、飞行监控的一体化闭环管理。从根本上解决空域冲突问题,并为未来的超视距(BVLOS)规模化应用铺平道路。

5 结语

无人机运输系统为山地光伏项目运输环节破“安全困境”提供新路径。其核心价值在于“去人化”“去路化”,规避人员高危作业和地质灾害诱因,提升本质安全水平,且在应急响应和精准投送上有优势,构筑新防线。但技术革新带来风险形态转换,无人机在恶劣气象适应性、空域、能源安全及人为操作等方面有新挑战,不能视其为万能方案,应秉持“技术赋能、体系治理”理念。未来,山地光伏项目安全建设是综合性系统工程,需融合先进无人机技术、智能感知网络等多要素,通过多维度、全链条协同发力,释放无人机运输系统安全潜能,支撑我国新能源产业高质量发展。

参考文献

- [1]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.
- [2]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.
- [3]马少真.浅谈无人机在山地光伏发电项目施工物料运输中的应用[J].红水河,2023,42(04):65-68.
- [4]高瑞,肖文,王斌,等.浅析无人机在山地光伏项目中的广泛应用[C]//中国电力技术市场协会城市电网专业委员会,国网(苏州)城市能源研究院.2024(第二届)城市电网技术创新会议论文集.华能荆门热电有限责任公司,2024:19-22.