

无人机航测技术在矿山生态修复中的应用研究

沈迅, 李建洪, 闫晓波, 合亚杰

云南省地质工程勘察有限公司, 云南 昆明 650051

DOI:10.61369/ETQM.2025070022

摘 要 : 本文系统探讨无人机航测技术在矿山生态修复中的应用, 分析其技术原理与优势, 阐述在矿山地形地貌测绘、生态环境监测、修复工程规划与效果评估等方面的具体应用。通过实际案例, 验证无人机航测技术在获取高精度数据、提升修复效率、降低成本等方面的显著成效。研究表明, 无人机航测技术能够为矿山生态修复提供全面、准确的基础数据, 有效支撑修复方案制定与实施, 对推动矿山生态修复工作的科学化、精准化具有重要意义。

关 键 词 : 无人机航测; 矿山生态修复; 地形测绘; 环境监测

Research on the Application of UAV Aerial Survey Technology in Mine Ecological Restoration

Shen Xun, Li Jianhong, Yan Xiaobo, He Yajie

Yunnan Geological Engineering Survey Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650051

Abstract : This paper systematically explores the application of unmanned aerial vehicle (UAV) aerial survey technology in mine ecological restoration, analyzes its technical principles and advantages, and expounds on its specific applications in mine topographic mapping, ecological environment monitoring, restoration project planning, and effect evaluation. Through practical cases, the significant effectiveness of UAV aerial survey technology in acquiring high-precision data, improving restoration efficiency, and reducing costs is verified. Research shows that UAV aerial survey technology can provide comprehensive and accurate basic data for mine ecological restoration, effectively supporting the development and implementation of restoration plans, and is of great significance for promoting the scientific and precise work of mine ecological restoration.

Keywords : UAV aerial survey; mine ecological restoration; topographic mapping; environmental monitoring

引言

随着我国工业化与城镇化进程加速, 矿山资源大规模开发引发的生态退化问题日益严峻, 采矿活动导致的植被破坏、水土流失、土地塌陷及环境污染等问题, 不仅威胁矿区生态平衡, 更对周边居民生产生活构成潜在风险, 矿山生态修复作为恢复矿区生态功能、促进可持续发展的关键举措, 亟需高效精准的技术手段支撑。传统测绘与监测技术在复杂矿山环境中暴露出数据获取效率低、覆盖范围有限、成本高昂等弊端, 难以满足生态修复动态化、精细化的需求^[1]。无人机航测技术凭借高机动性、高分辨率、低成本及灵活便捷的优势, 可快速获取矿山地形地貌、植被覆盖、地质结构等多维数据, 为生态修复方案设计、工程实施与效果评估提供数据基础。本文系统探讨无人机航测技术在矿山生态修复中的应用路径与实践价值, 旨在推动该技术在矿山生态修复领域的深度应用, 助力实现矿区生态环境的系统性治理与可持续恢复。

一、无人机航测技术概述

(一) 无人机航测技术原理

无人机航测技术以航空摄影测量理论为基础, 依托无人机平台搭载多种传感器, 实现对目标区域的高精度数据采集与处理, 其核心流程包括数据获取、数据处理和成果输出三个环节^[2]。在数据获取阶段, 无人机按照预设航线飞行, 搭载的高分辨率相机、多光谱相机或激光雷达 (LiDAR) 等传感器, 通过多角度、

多航次拍摄或扫描, 获取目标区域的影像数据或点云数据。其中, 光学相机利用摄影测量原理, 通过重叠拍摄获取立体像对; LiDAR则通过发射激光束并接收反射信号, 快速获取地表三维坐标信息。在数据处理环节, 利用专业软件 (如 Pix4D、Agisoft Metashape 等) 对采集的数据进行处理。针对影像数据, 通过特征点提取、图像匹配、空中三角测量等技术, 建立区域网平差模型, 确定像片外方位元素; 结合同名像点的空间交会, 生成数字高程模型 (DEM) 和数字正射影像 (DOM), 并通过三维重建

技术构建实景三维模型。对于 LiDAR 点云数据,需经过去噪、分类等预处理,分离地面点与非地面点,进而生成高精度的地形模型,最终,通过数据整合与分析,输出满足矿山生态修复需求的测绘成果。

（二）无人机航测技术的优势

无人机航测技术在矿山生态修复应用中展现出显著优势,首先,其具备高机动性与灵活性,可突破地形、交通限制,快速抵达传统手段难以触及的偏远矿区、陡峭边坡等区域,实现数据的高效采集。其次,数据获取具有高分辨率与高精度特性,搭载的厘米级甚至毫米级分辨率传感器,能够清晰捕捉矿山地表裂缝、植被分布、建筑物细节等信息,为生态修复提供精准的数据支撑。成本效益方面,相较于有人机航空摄影或卫星遥感,无人机航测设备投入与运营成本更低,且数据采集周期短、更新速度快,可按需多次测量,满足矿山生态修复动态监测需求。此外,无人机航测支持实时数据传输与处理,能够及时反馈现场信息,辅助修复方案的动态调整,显著提升工作效率与决策科学性。

二、无人机航测技术在矿山生态修复中的应用

（一）矿山地形地貌测绘

（1）高精度地形数据获取

无人机航测技术通过搭载激光雷达(LiDAR)或高分辨率光学相机,能够快速获取矿区区域高精度地形数据。激光雷达利用脉冲激光扫描技术,可穿透植被冠层直接获取地表信息,尤其适用于植被茂密的矿区区域^[5]。光学相机则通过多视角倾斜摄影,结合空中三角测量技术,生成厘米级精度的数字高程模型(DEM)和数字表面模型(DSM)。在某露天矿山测绘项目中,无人机航测获取的 DEM 高程精度达到 ± 5 厘米,完整呈现了采坑、废石堆、边坡等复杂地形的空间形态,为后续修复工程提供了精确的地形基础数据。

（2）地形动态变化监测

定期开展无人机航测可实现矿山地形的动态监测,通过对比不同时期的 DEM 数据,能够量化分析地形变化趋势,如采空区塌陷范围扩展、废石堆体积变化、边坡位移等。采用差分分析方法,可识别毫米级的地形起伏变化,及时发现潜在地质灾害隐患,例如,在某金属矿山监测中,无人机航测发现边坡局部区域在3个月内出现累计12厘米的位移,为采取应急加固措施提供了关键预警信息。

（二）矿山生态环境监测

（1）植被覆盖与生长状况监测

无人机搭载的多光谱相机可获取红、绿、蓝、近红外等波段影像,通过计算归一化植被指数(NDVI),能够定量评估植被覆盖度和健康状况。研究表明,NDVI值与植被生物量、叶面积指数具有显著相关性,可用于识别退化植被区域,指导植被恢复工程^[4]。在某煤矿生态修复项目中,利用无人机航测绘制的 NDVI 分布图,精准定位出植被覆盖率低于20%的重点修复区域,并通过动态监测验证了植被恢复效果,修复后 NDVI 值平均提升0.35。

（2）土壤与水体污染监测

高光谱遥感技术可探测土壤和水体中的污染物成分,无人机搭载的高光谱传感器能够捕捉数百个连续光谱波段,通过光谱特征分析识别重金属(如铅、镉)、油污等污染物。在某有色金属矿区,利用高光谱影像反演土壤重金属含量,定位出镉污染超标区域,为土壤修复方案制定提供了空间分布数据。此外,多光谱影像还可用于水体富营养化、矿坑水污染等问题的监测,通过水体反射光谱特征变化判断污染程度。

（3）地质灾害隐患监测

无人机航测通过三维建模和变形分析,可有效识别矿山地质灾害隐患,对边坡进行多期三维模型对比,能够量化分析裂缝扩展、坡面变形等特征;利用点云数据计算边坡坡度、坡向和稳定性系数,辅助开展灾害风险评估^[6]。在某露天矿边坡监测中,无人机航测发现一处潜在滑坡区域,其地形曲率变化异常,经实地核查确认后及时采取了削坡减载措施,避免了灾害发生。

（三）矿山生态修复工程规划

（1）修复区域科学划定

基于无人机航测获取的地形、植被、土壤等多维数据,结合生态敏感性分析,可科学划定修复区域,利用 GIS 空间分析技术,综合考虑坡度、高程、植被覆盖度等因素,确定植被恢复、土壤改良、地形整治的重点区域^[6]。例如,在某废弃矿山修复规划中,通过分析发现坡度大于30°的区域水土流失严重,优先规划为挡土墙和生态袋护坡工程实施区;而地势平缓、土壤肥力较好的区域则规划为植被种植区。

（2）工程方案优化设计

无人机生成的三维实景模型为修复工程设计提供了直观的可视化支持,设计人员可基于三维模型进行土方工程计算、植被种植布局优化、排水系统设计等^[7]。在某矿山复垦项目中,通过三维模型模拟不同坡度的地形改造方案,选择土方量最小且稳定性最佳的设计;同时,利用模型优化植被种植密度和种类配置,提升生态修复效果。此外,无人机航测数据还可用于施工进度模拟,提前预判工程难点,优化施工组织方案。

（四）矿山生态修复效果评估

（1）定量指标对比分析

通过对比修复前后的无人机航测数据,可计算多项定量评估指标,植被恢复方面,对比植被覆盖度、物种多样性指数等;土壤改良方面,分析土壤有机质含量、pH 值等参数变化;地形整治方面,评估地形平整度、水土流失量等指标^[8]。在某铁矿生态修复项目中,修复后植被覆盖度从18%提升至62%,土壤侵蚀模数由3500 t/(km²·a)降至800 t/(km²·a),定量数据直观反映了修复工程的成效。

（2）三维可视化动态评估

利用修复前后的三维实景模型进行可视化对比,可直观展示生态修复效果,通过模型叠加分析,能够清晰呈现地形变化、植被生长、设施建设等情况,引入时间序列三维模型,可动态展示生态修复的演变过程,为管理部门提供决策支持^[9]。此外,结合虚拟现实(VR)技术,可实现沉浸式效果评估,提升评估的直观

性和准确性，在某磷矿修复项目中，三维模型对比显示，修复后矿坑被成功改造成人工湿地，生态景观得到显著改善。

三、案例分析

（一）案例背景

某大型露天铜矿位于长江流域生态敏感区，历经30余年开采，形成了总面积达8.2平方公里的采空区、排土场及裸露边坡，矿区内植被覆盖率不足12%，土壤重金属（铜、锌、镉）污染严重，平均超标率达3-5倍；部分区域出现地面塌陷，最大沉降深度达3.5米，引发季节性水土流失，年侵蚀模数高达5200 t/(km² · a)，对周边农田及水系造成严重威胁。传统人工监测与卫星遥感手段难以满足复杂地形下高精度、高频次的生态修复需求，因此引入无人机航测技术开展全周期监测与评估。

（二）无人机航测技术应用过程

（1）数据采集方案设计

选用大疆 Matrice 300 RTK 无人机搭载五镜头倾斜摄影相机与 Riegl VUX - 1 UAV 激光雷达，针对不同区域制定差异化航测方案：对植被覆盖区采用120米低空飞行，地面分辨率达2厘米；裸露边坡及塌陷区采用80米超低空飞行，分辨率提升至1.5厘米。单次航测覆盖面积1.2平方公里，通过分区域、多架次作业实现全矿区覆盖，累计获取影像数据1.2万张、点云数据3.8亿个。

（2）数据处理与成果生成

利用 Agisoft Metashape 软件对影像数据进行空三加密与三维建模，生成精度达 ±3 厘米的实景三维模型；采用 TerraSolid 软件对激光雷达点云数据进行分类处理，提取地面点生成数字高程模型（DEM）。结合 GIS 平台，叠加土壤采样数据与多光谱影像，生成土壤重金属污染分布图、植被覆盖专题图等12类专题成果。

（3）动态监测体系构建

建立季度性航测监测机制，在关键修复节点（如植被种植期、工程措施施工期）加密监测频率。通过前后两期三维模型叠加分析，量化评估地形变化、植被恢复等指标；利用时间序列点云数据构建边坡稳定性预警模型，设置位移阈值为5厘米/季度，

实时推送风险预警信息。

（三）应用效果分析

（1）地形测绘与灾害预警成效

无人机航测精确还原了矿区三维地形，识别出32处潜在塌陷隐患区与15处高风险边坡，较传统人工测绘效率提升数倍。基于航测数据构建的边坡稳定性模型成功预警2次小规模滑坡，提前72小时发出警报，避免了人员伤亡与设备损失。

（2）生态修复量化评估

经两年修复，航测数据显示植被覆盖度从12%提升至48%，土壤侵蚀模数下降68%；通过多光谱影像分析，植被生物量增加2.3倍，重金属污染区域面积缩减42%。三维模型对比直观呈现了排土场复垦为梯田、采空区改造为人工湖的全过程，为验收提供可视化依据。

（3）成本与效率优势

项目实施期间，无人机航测较有人机测绘成本降低73%，数据获取周期从15天缩短至3天。通过动态监测减少修复工程设计变更4次，节约直接成本数百万元，同时避免了因数据滞后导致的重复施工问题，综合效益显著。该案例验证了无人机航测技术在复杂矿山生态修复中数据采集、方案优化与效果评估的全流程应用价值。

四、结束语

本研究系统论证了无人机航测技术在矿山生态修复中的应用价值，通过对其技术原理、应用优势及典型案例的分析，证实该技术可实现矿山地形地貌高精度测绘、生态环境动态监测、修复工程科学规划及效果量化评估，显著提升生态修复工作的精准性与效率。实际案例表明，无人机航测技术能够有效弥补传统手段的不足，在降低成本、缩短周期、增强预警能力等方面优势显著。未来仍需进一步推动无人机航测与物联网、人工智能技术的交叉融合，研发高适应性传感器与智能分析算法，完善标准化作业流程与评估体系，以实现矿山生态修复从数据采集到决策支持的全链条智能化升级，为矿区生态环境可持续发展提供更强有力的技术支撑^[10]。

参考文献

- [1] 王少辉, 周小雨, 刘润胜. 无人机航测技术在河南驻马店市废弃矿山生态修复勘査设计中的应用 [J]. 矿产勘査, 2020, 11(10): 2309-2316.
- [2] 张健雄, 伍雅晴. 无人机航测技术在矿山生态修复调查中的应用 [J]. 世界有色金属, 2021(12): 194-195.
- [3] 杨文佳, 郭昊原, 李纯刚, 等. 无人机技术在矿山生态修复调查中的应用 [J]. 地质学刊, 2020, 44(4): 429-433.
- [4] 宋城, 纪伏春. 无人机航测及三维实景建模在露天矿综合治理生态修复的应用 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2021(9): 2263-2264.
- [5] 张启慧, 王程松, 卫石印, 等. 基于 ArcGIS 的三维航测成果在露天采坑生态修复与矿山生产中的应用研究 [J]. 山东国土资源, 2022, 38(10): 42-47.
- [6] 张秉鹏. 无人机航测技术与 GIS 系统在矿山修复领域的应用 [J]. 山西焦煤科技, 2024, 48(7): 47-50.
- [7] 垢元培, 张鸽. 航测点云数据在矿山修复工程量复核中的研究与应用 [J]. 金属矿山, 2024(8): 191-196.
- [8] 雷志龙. 基于无人机倾斜摄影测量的矿山生态修复效果评价研究 [J]. 科技资讯, 2025, 23(5): 193-195.
- [9] 姜庆丰, 刘德成, 曹琛, 等. 废弃矿山生态环境修复中无人机倾斜摄影技术应用研究 [J]. 化工矿产地质, 2024, 46(3): 242-248.
- [10] 马华坤. 无人机倾斜摄影测量技术在矿山生态修复中的应用 [J]. 海峡科技与产业, 2023, 36(9): 41-43.