

无人机倾斜摄影测绘在露天矿山生态修复中的应用

王应琪

中国地质工程集团有限公司 北京 100093

摘要：针对露天矿山生态修复传统测绘效率低、精度不足、复杂地形作业受限等问题，本文探究无人机倾斜摄影测绘技术的实践应用。依托多视角影像采集、空三加密与三维建模技术，建立标准化航测作业与数据处理体系，服务矿山修复勘查、施工监测与成效评估全流程。同时总结现场作业与数据处理难点，提出针对性优化方案。该技术可实现矿山生态修复数字化精准管控，为矿区生态治理提供高效可靠的技术支撑。

关键词：无人机倾斜摄影测绘；露天矿山生态修复；应用

引言：露天矿山开采造成地形破损、水土流失、边坡失稳等生态损伤，传统人工测绘方式作业难度大、数据更新滞后，难以适配精准修复的工程需求。无人机倾斜摄影测绘具备高精度、高效率、全视角采集的优势，可适应矿区复杂地形条件。本文结合三维建模与矿山修复规范，系统阐述其作业流程与应用场景，剖析现存技术短板并优化改进，为矿山生态修复数字化、精细化治理提供参考。

1 相关技术与理论基础

1.1 无人机倾斜摄影测绘技术原理

(1) 倾斜摄影测绘核心原理是通过在同一飞行平台上搭载多台传感器，从垂直、前视、后视、左视、右视五个不同角度同步采集地表影像。相较于仅获取正射影像的垂直摄影，该技术能同时记录地物顶面与侧面纹理信息，通过多视角影像融合与实景重构，实现全方位地形地貌信息的高精度提取。(2) 无人机航测系统主要由飞行平台（多旋翼或固定翼无人机）、五镜头倾斜相机、高精度定位导航系统（搭载RTK/PPK模块）、数据存储设备及地面控制站等核心硬件构成。各部件协同作业，保障了复杂矿区环境下的安全飞行与高质量数据获取。(3) 相较于传统测绘技术，其核心优势在于可低空穿行于高陡边坡等复杂地形，获取厘米级高分辨率影像；同时，其生成的真三维实景模型能为矿山地形重塑、土石方量计算及植被恢复设计提供精细化的数据支撑，大幅提升复杂工况下的作业效率与成果质量^[1]。

1.2 露天矿山生态修复核心理论与标准

(1) 矿山生态修复须遵循因地制宜、精准治理、生态优先、长效管护四项基本原则，即在充分调查矿区地质环境与生态本底的基础上，科学制定修复方案，将人工干预与自然恢复有机结合，确保修复成效持久稳定。(2) 露天矿山主要修复内容包括地形重塑（削坡减荷、

台阶整地）、植被恢复（适生植物筛选与配置）、水土保持（截排水工程与边坡防护）、地质灾害治理（不稳定边坡加固）以及土地复垦（损毁土地功能恢复）等核心模块。(3) 相关评价标准主要依据《矿山生态修复技术规范》《土地复垦质量控制标准》及《生态环境状况评价技术规范》等，对修复后的地形坡度、植被覆盖度、水土流失治理率及生物多样性等指标进行分级评估，以指导修复工程的验收与长期监测。

1.3 三维实景建模与数据处理技术

(1) 影像预处理技术主要针对无人机获取的原始影像进行降噪处理、镜头畸变校正以及无效影像（如过度曝光、云影遮挡影像）筛选剔除，以确保参与建模的数据源清晰、可靠，为后续高精度计算奠定基础。(2) 影像空三加密与匹配技术通过在矿区布设适量地面控制点，利用特征提取与多视匹配算法，解算每张影像的外方位元素，完成区域网平差计算，获取高精度的稀疏点云，解决矿山高差大、纹理相似区域的影像匹配难题。(3) 三维模型构建与优化技术基于空三成果，通过多视密集匹配生成稠密点云，进而构建三角网格与纹理映射，生成实景三维模型、DSM（数字表面模型）、DOM（数字正射影像）及DEM（数字高程模型）。通过模型简化与细节层次优化，在保证精度的同时提升渲染与存储效率。

2 无人机倾斜摄影测绘在露天矿山中数据采集与处理

2.1 露天矿山航测作业方案设计

(1) 测区概况与作业条件分析应系统查明露天矿山的地形起伏特征（如最大高差、平均坡度）、地貌类型（低山丘陵或高原）、矿区开采境界线及采场展布方向，同时详细调查生态破损区域（采坑、排土场、塌陷地）的空间分布与破损程度。此外，还需收集当地历史气象数据，评估可飞天气窗口（风力、能见度、日照角

度),为航测窗口期选择提供科学依据。(2)航测参数设置需根据矿山地形高差变化与成果精度要求,合理确定相对航高(一般100—150m)、航线敷设方式(仿地飞行可有效保持分辨率一致)、航向重叠度(不低于80%)、旁向重叠度(不低于70%)、五镜头倾斜相机拍摄角度(一般为45°)以及单架次预计飞行时长(需控制在电池续航安全裕度内),确保数据覆盖完整性^[2]。(3)像控点布设与测量应结合露天矿山高差悬殊、局部遮挡严重的复杂地形条件,采用“四周控制、内部加密、重点加强”的布设策略——在采坑底部、各级台阶平台及坡顶均匀布设标靶点,在变坡明显区域适当加密,利用网络RTK或PPK后差分方式实测各点三维坐标,以有效约束区域网平差,确保模型整体几何精度满足1:500或1:1000测图要求。

2.2 矿山实景数据采集实施

(1)前期设备调试与校验须在飞行作业前完成多旋翼或固定翼无人机的动力系统、飞控固件升级与指南针校准,同时完成五镜头倾斜相机的畸变参数标定与CMOS坏点检测,RTK/PPK模块的信号接收测试,并对遥控链路信号强度、电池电芯健康状态进行全面检查,及时排除螺旋桨损伤、电机异响等安全隐患。(2)分区影像采集作业可根据矿山开采区、排土场、工业场区等功能分区及破损程度的差异,制定差异化的分区采集方案——对边坡陡峭、纹理丰富的重点区域采用交叉航线或环绕航线进行补拍,对高差变化剧烈的深凹采坑适当降低飞行速度并增加曝光次数,确保各分区侧面纹理与顶部信息均能被完整捕获。(3)原始数据质量核查需在每个架次降落后随即开展,逐张检查影像的清晰度(是否存在运动模糊或对焦不准)、覆盖完整度(有无漏拍、航线偏离)、相邻影像间的航向与旁向重叠度是否满足要求,对不合格影像现场标记并安排补拍,做到“当日采集、当日质检、当日补飞”。

2.3 多源数据处理与成果输出

(1)批量影像数据预处理需借助专业软件对所有原始影像进行自动色阶与匀光处理以消除光照不均影响,采用高斯滤波进行降噪,依据相机畸变参数完成径向与切向畸变校正,剔除废片后统一转换为标准格式并建立规范的工程文件目录,为后续空三处理提供标准化输入。(2)三维模型与地理数据生成可通过Context Capture、Photo Scan等软件依次完成影像特征提取与匹配、稀疏点云空三加密、密集匹配生成稠密点云、不规则三角网构建以及纹理自动映射,最终生成矿区高分辨率三维实景模型,并同步输出DOM(数字正射影像)、

DSM(数字表面模型)及DEM(数字高程模型)等基础测绘成果^[3]。(3)数据精度校验与优化应提取不少于总像控点数量30%的实测点作为检核点,对三维模型上同名点位进行坐标量测,计算平面与高程中误差,对照《数字航空摄影测量测图规范》判定成果精度等级;针对模型局部存在变形拉花、水面破洞或纹理畸变等问题,通过点云编辑、孔洞填充与纹理重映射等手段进行精细修补,确保最终成果满足矿山生态修复工程应用要求。

3 无人机倾斜摄影测绘在露天矿山生态修复中的具体应用

3.1 修复前期:矿山生态现状精准勘查

(1)破损地貌精准识别。基于三维实景模型所具备的高分辨率纹理与高精度几何信息,能够直观解译露天矿山开采引发的各类生态破损特征,包括采场边坡的坍塌体范围及滑动后壁形态、地下采空区诱发的地表塌陷坑边界、降雨径流冲刷形成的侵蚀沟壑网络及其展布方向。通过模型三维量测工具可精确勾绘各破损单元的边界坐标与面积,为后续修复分区治理提供翔实的本底资料。(2)土石方工程量精准测算。依托DSM、DEM等时序高程数据与三维实景模型,采用格网法或TIN法进行填挖方计算,可精确获得各修复分区内需开挖削坡的土石方量、需回填整平的土方量以及各区域间的调运平衡关系。该测算结果精度远优于传统人工断面法,为修复方案中工程量清单编制与施工组织设计提供了可靠的数据基础^[4]。(3)地质灾害隐患排查。通过三维模型上边坡坡面裂缝展布、岩体结构面产状及坡脚松散堆积体形态的精细判读,结合高程剖面分析成果,可系统识别潜在的不稳定边坡滑移带、滑坡前缘剪出口迹象及泥石流物源区的松散物质储量,据此划分高中低风险等级管控范围,为修复施工期间的安全监测与防灾部署提供预警依据。

3.2 修复中期:施工过程动态监测

(1)修复施工进度动态追踪。在修复施工全周期内按固定时间间隔(如每月或每季度)组织无人机倾斜摄影复测,将不同期次获取的三维模型与DEM数据进行叠加对比,定量提取地形重塑的推进面积、削坡分级治理的完成层位、大面积土方平整的区域进展等关键指标,生成可视化的施工进度图谱,辅助项目管理团队实时掌握总体推进态势。(2)施工质量实时管控。将各期施工中实景模型与修复设计图纸(包含设计边界线、各级边坡坡度、台阶宽度与平台标高)导入统一平台进行空间套合与断面叠置分析,快速核查实际施工边界是否超挖或欠挖、坡面是否满足设计倾角要求、整平标高是否控制在允许误差区间内。发现偏差后及时生成整改通知并

定位问题区域,实现施工质量的闭环管理。(3)施工期生态环境动态监控。利用航测获取的高分辨率正射影像与DSM数据,提取施工裸露地面积及其时空变化、临时堆土场的扰动范围、施工扬尘覆盖区域等环境敏感指标,结合现场水保监测点位数据,辅助施工方动态调整洒水降尘频次与临时截排水沟布设方案,有效降低施工期水土流失与扬尘污染。

3.3 修复后期:生态效果定量评估

(1)植被恢复效果评估。基于修复后航测影像的高分辨率纹理与色彩信息,采用面向对象分类或植被指数法提取矿区植被覆盖度、复绿面积、优势植物群落空间分布等定量指标,与修复前本底及阶段性目标值进行逐项比对,客观判定各修复分区复绿效果是否达到规划验收标准。(2)地形地貌修复效果评价。将修复后DEM与前期本底DEM及设计地形进行差值计算,获得全区域高程变化分布图与填挖平衡精度统计量;提取修复后各台阶坡度、坡向及微地形起伏度,综合分析地形重建后边坡整体稳定性、地表平整度及地貌恢复与周边自然景观的协调完整性^[5]。(3)生态修复综合效益分析。从生态效益(植被覆盖度增量、土壤侵蚀模数削减率、生物多样性改善程度)、经济效益(复垦土地可利用价值、地质灾害规避减少的直接经济损失)、管理效益(基于三维数据的全周期信息化管理能力、多部门协同决策效率提升)三个维度,系统量化评估无人机倾斜摄影测绘技术支撑下的生态修复综合价值。

3.4 应用难点与优化对策

(1)复杂矿山场景作业难点。露天矿山高陡边坡在影像采集时易产生大面积阴影遮挡,且侧面纹理难以完整捕获,导致模型局部拉花;深凹采坑区域GNSS信号遮挡严重,影响像控点联测精度与RTK定位稳定性;矿区局部气候多变,大风、扬尘等不利条件频繁干扰飞行窗口,影响数据采集连续性与一致性。(2)数据处理效率短板。单次矿区航测可获得数千至上万张高分辨

率影像,海量数据的空三计算与密集点云匹配耗时数天甚至数周,且矿山地形高差大、纹理重复性高导致模型拼接错位与几何畸变频发,模型精细化修补需大量人工介入,难以满足修复施工期高频复测的快速响应需求。

(3)针对性优化对策。一是采用“多时段航测组合”策略,选择日照角度最佳窗口(如上午9:00—11:00)作业,配合补光或HDR曝光模式减轻阴影影响;二是引入GPU并行计算与分布式处理架构加速空三与建模进程,优化重复纹理区域的特征匹配算法参数;三是实施“分区独立建模+整体融合”方案降低单次计算压力,配合人机协同处理——批量自动建模后由技术人员针对性修复关键区域模型漏洞,以此兼顾处理效率与成果精度。

结束语

本文系统阐述无人机倾斜摄影测绘的技术原理与数据处理方法,完整落地于露天矿山生态修复全流程应用,有效解决传统治理模式精准度不足、动态管控薄弱等痛点。同时梳理了复杂矿区作业、海量数据处理等核心难题并给出优化方案。该技术大幅提升矿山修复的数字化、精细化水平,兼具生态与经济价值。未来可结合智能算法与实时建模技术,进一步提升矿山生态修复智能化监测与评估能力。

参考文献

- [1]孙康平,穆哲,王纪珍.无人机倾斜摄影测绘在露天矿山生态修复中的应用[J].现代矿业,2025,41(06):229-232.
- [2]王雪峰,刘奔,李磊.无人机倾斜摄影测绘在矿山生态修复中的应用[J].露天采矿技术,2023,38(06):29-32.
- [3]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(03):242-248.
- [4]高晴晴.无人机倾斜摄影技术在矿山测绘中的应用思考[J].中国金属通报,2024,26(08):219-221.
- [5]李红伟,王登,李侃.矿山测绘中无人机倾斜摄影技术的应用[J].世界有色金属,2023,8(19):19-21.