

无人机倾斜摄影测量技术在矿山生态修复工程中的应用

汪 强

中煤航测遥感集团有限公司 陕西 西安 710199

摘 要:传统矿山生态监测技术存在精度不足、覆盖范围有限、作业安全风险高等固有缺陷,难以满足现阶段矿山生态修复精细化管控与量化评估的行业标准。为弥补常规监测手段的技术短板,提升矿区生态动态监测精度与生态修复工程治理效能,本文以无人机倾斜摄影测量技术为研究载体,首先梳理矿山开采引发的生态损毁特征,对比传统生态监测技术的局限性;围绕矿山全域三维实景建模、破损边坡与塌陷扰动区精细化勘察、土石方量精准核算及地形时序动态监测、矿区植被覆盖度定量反演与生态修复成效追踪四大应用维度展开论述,可为矿山生态修复智能化、数字化监测体系构建提供理论依据与工程实践参考。

关键词:无人机;倾斜摄影测量;矿山;生态修复;动态监测

引言

矿产资源是工业体系建设和国土基础设施开发离不开的基础资源,长期以来给区域经济发展和产业结构升级撑着台面。国内生态文明建设政策不断落地,矿山生态修复已经被纳入国土空间生态修复和山水林田湖草沙一体化保护与修复工程的重点工作。当前行业对修复工程的前期勘察、施工过程动态管控、治理成效量化核验,要求越来越精细。无人机倾斜摄影测量技术能多视角采集影像、做全域三维建模、获取高分辨率地表信息,这些技术特性让它成了矿山生态监测数字化转型的核心技术路径,工程应用价值不小。

1 矿山生态损毁特征与传统监测技术局限性

1.1 矿产开采诱发的典型生态损毁特征

1.1.1 原生地形地貌结构性损毁

未受采掘扰动的矿区,地表经过长期自然侵蚀,形成了相对稳定的地形格局、土体结构和地表径流体系。矿山开挖、排土堆载、场地平整这些工程活动,直接把地表形态给改了——地表变得起伏紊乱,沟壑也开始发育,原来连续完整的地表结构被切碎了,汇水通道重新调整。水力侵蚀强度加大,土壤流失的风险明显上升,给区域水土流失和面源污染创造了条件。

1.1.2 人工边坡岩土失稳风险突出

采掘作业会挖出大量人工陡边坡和临空断面^[1]。这些坡面的坡度普遍超出自然稳定坡比,表层岩土裸露,土体松散。机械开挖和堆载扰动破坏了坡面岩土

内部的应力平衡。降雨往里渗,自重又一直压着,两边一合力,边坡的抗剪强度持续往下掉,表层剥落、局部滑塌这些问题就容易冒出来,是矿区地质灾害最集中的地方。

1.1.3 原生植被群落大面积退化

矿山工程前期清表作业直接清除地表原生植被;施工扬尘、土方碾压、排土堆积持续胁迫周边植被生境,造成植被群落大面积消亡。植被根系固土护坡功能丧失,区域生态系统物质循环与水土涵养链路断裂,场地自然恢复能力显著衰减,形成长期裸露损毁地块

1.1.4 水土流失与地表塌陷连锁灾害

采掘扰动之后,松散堆积的土体抗冲刷性能差了很多,再加上地形紊乱让径流冲刷更厉害,地表冲沟不断往外延伸,表层的耕作层和风化层土壤一直在流失。深部矿体开采又把地层应力平衡打破了,土体被掏空,地表沉降、地面塌陷就跟着来了,矿区整体场地稳定性进一步被破坏,复合型的生态地质灾害也跟着冒出来。

1.2 现有矿山生态监测技术作业模式

1.2.1 地面人工现场核查

人工实地踏勘是矿山生态监测最基础的手段。作业人员进矿区巡检,靠肉眼判断、纸质台账记录,统计裸露地块分布、边坡稳不稳、植被恢复怎么样、水土流失发展到什么程度这些生态指标。这套监测方式,结果很大程度上取决于作业人员的专业经验,主观性比较强。微地形形变、隐蔽区域的损毁这类细微问题很难发现,

监测成果的精度和客观性都没法保证。

1.2.2 常规全站仪、GNSS 定点测绘

定点测绘在矿区布置固定监测点位,利用常规全站仪、GNSS 设备采集高程、坡度、地形剖面等基础地理信息。通过多期测点数据对比,初步研判矿区地形变化,为修复工程成效核验提供量化参考。但该方式仅能获取离散点位数据,测点间存在数据空白区,难以完整反映矿区全域地形特征与生态损毁空间分布,监测空间覆盖完整性不足。

1.2.3 中低分辨率卫星遥感监测

卫星遥感技术主要用在区域尺度的矿山生态宏观研判上。借助公开卫星影像时序数据,反演大范围土地利用类型和植被覆盖度变化趋势,适合省、市级全域矿山生态状况的宏观摸底。但卫星成像分辨率有限,矿区局部的细微生态损毁、边坡小型滑塌、零星裸露地块难以识别,难以满足矿山修复精细化核查的精度要求。

1.3 传统监测技术综合短板

1.3.1 作业成本高、监测时效性不足

矿山开采损毁的区域,普遍面积大、地形起伏剧烈、沟谷纵横交错。人工现场测绘得逐点布置监测点位、在野外采集数据、回室内整理计算,人力物力投得多,作业周期也长,没法快速完成矿区全域生态损毁的摸底。矿山阶段性修复验收和常态化动态核查的时效要求,靠这套老办法根本赶不上^[2]。

1.3.2 数据离散化,量化评估误差显著

传统测绘只能拿到离散的点位数据,靠有限的点位插值去推演全域地形和生态状况。地表的微形变、局部的土壤流失、植被恢复的差异化特征,都没法完整捕捉到。点状抽样的数据模式,让监测成果的整体性和真实性打了折扣。土方量核算、边坡稳定性定量评价、修复成效量化评估这类高精度工作,计算出来的结果偏差不小。

1.3.3 野外作业安全隐患突出,监测覆盖存在盲区

矿山损毁区域边坡岩土松散、滑塌风险高,地下采空区衍生隐蔽塌陷隐患,场地岩土稳定性差,轻微扰动即可诱发地质险情。长期人工进场作业使测绘人员持续处于高危作业环境,人身安全无法保障;高危区域无法布设监测点位,进一步造成监测范围缺失、地表信息采集不完整。

2 无人机倾斜摄影测量技术在矿山生态修复工程中的应用体系

2.1 矿区全域三维实景模型构建与地形可视化表达

2.1.1 多视角全域地表高分辨率影像采集

无人机倾斜摄影测量系统搭载多组倾斜、垂直摄影相机,可从垂直、前、后、左、右多视角同步采集矿区地表影像,完整覆盖人工陡边坡、深部塌陷坑、沟谷洼地、高陡崖壁等常规测绘设备难以抵达区域,完整获取地表纹理、地形起伏、地貌结构精细化影像数据,保障外业数据采集空间完整性^[3]。采集影像经空中三角测量、多视影像匹配、三维网格构建、纹理映射标准化处理流程,生成与现场实体空间形态、地表纹理高度匹配的实景三维模型。

2.1.2 全域损毁地貌高精度数字化还原

三维实景模型可精准还原采掘扰动后的矿区整体地貌形态,清晰呈现破损边坡、塌陷坑、排土堆、平整作业区的空间位置、几何形态与规模特征,矿区全域高差变化和地形结构差异一目了然,有效弥补了传统测绘数据不连续、细节易丢失的不足。技术人员依托三维模型可整体掌握矿区地貌格局,准确定位各类生态损毁点位,量化分析损毁区域的分布范围和发育程度。

2.1.3 标准化空间数据库构建,支撑时序对比分析

三维实景建模技术将离散测绘数值转化为可视化立体数字场景,完整保留地表毫米级微地形形变特征,为后续边坡分析、土方核算、植被反演等生态监测工作提供统一、高精度基础空间数据。模型可数字化归档存储,完整留存各施工阶段矿区地貌基准数据,为多周期地形演变、生态修复时序对比分析提供标准化数据载体。

2.2 破损边坡、塌陷区及扰动地块精细化勘查

2.2.1 人工损毁边坡病害定量识别与稳定性评价

破损边坡为矿山生态损毁与地质灾害高发区域,亦是生态复绿、边坡加固工程核心管控对象。依托无人机多视角高分辨率影像,可精准识别坡面岩土剥离、表层裂缝、局部滑塌、空洞等细微病害;结合三维模型提取边坡坡度、坡高、破损面积、临空面范围等定量参数,全面评价边坡整体稳定状态,为边坡锚固、喷播复绿等修复工程设计提供精细化基础数据。

2.2.2 隐蔽塌陷区全域边界提取与形变分级

地表塌陷区地形杂乱、隐蔽隐患多发,人工进场勘查安全风险极高,且易出现漏测、误判问题。无人机非接触式航测作业无需人员进入高危塌陷场地,可完整采集塌陷区域全域影像,自动勾勒塌陷边界轮廓,还原塌

陷区立体几何形态。通过多期模型差分分析,可划分完全塌陷区、局部沉降区、潜在塌陷隐患区,定量判别塌陷发育规模与形变特征,消除传统人工勘查的数据遗漏问题^[4]。

2.2.3 全域采掘扰动地块精细化分类核查

针对矿山大面积工程扰动区域,倾斜摄影测量可完成全域覆盖勘查。基于航测影像对扰动地块地表状态进行数字化建档,划分裸露土体范围、水力侵蚀强度及地貌扰动等级,实现各扰动区域损毁程度的分级识别,为修复工程分区治理方案编制提供基础数据。

2.3 土石方量精准核算与地形时序动态监测

2.3.1 高密度点云地形数据全域覆盖采集

无人机航测能快速拿到矿区完整的地表三维坐标信息,生成高密度、高精度的地表点云模型。跟传统离散测点测绘比,点云数据能把陡坡、洼地、零散扰动地块这些复杂地形区域都覆盖到,没有数据空白区间,场地原始的起伏形态能完整还原回来,土石方量核算的整体精度从数据源头上就有了保障。

2.3.2 修复工程土石方自动量化计算

将三维点云地形数据与修复工程设计基准面导入专业测绘解算软件,系统可自动划分开挖区与回填区边界,分区统计土方开挖、回填体量,输出全域土方总量核算结果。整套流程基于数字模型运算,消除了人工估算带来的主观偏差,为修复工程概算、土方转运调度、竣工工程量核验提供数据依据。

2.3.3 多期地形差分实现场地地形变动态计量

矿山生态修复工程施工周期长,随着工程推进,场地地貌一直在变。分阶段做无人机航测,建立多时序的三维地形基准模型。把不同周期的模型叠起来做差分分析,就能精准识别出场地平整、土方堆载、地表沉降引起的地形高差变化,各施工阶段的地形改造体量能算出来,工程进度和地貌演变也能动态跟踪。

2.4 矿区植被覆盖度定量反演与生态修复成效追踪

2.4.1 全域植被覆盖信息高精度解译

无人机航测能拿到厘米级的地表高清影像,植被覆盖区和裸露土体分得清清楚楚,植被的空间分布和生长形态也能看清楚。靠影像的光谱和纹理特征,做植被信息的自动化解译,全域定量反演出矿区植被覆盖度指标。传统人工抽样统计覆盖面不够、代表性差的老问题

被甩开了,监测结果跟场地的真实生态状况对得上。

2.4.2 植被修复差异化区域精准识别

数字化植被信息解译走标准化算法流程,能定量区分植被长势等级、植株疏密分布,精准定位植被成片缺失、成活率偏低、修复成效不达标的薄弱地块^[5]。技术人员拿到解译结果,可以对各分区治理成效做评价,针对性地调整复绿苗木品种和养护方案,生态修复管控的精准度就能提上来。

2.4.3 长时序植被动态监测与治理成效客观评估

修复工程整个周期里,分时段做航摄,攒下多时序的植被覆盖度数据。把各期的植被指标放在一起对比分析,矿区的植被覆盖整体增长趋势就能看出来了,各阶段生态治理成效也能客观地量化出来。这套持续动态监测体系,能全程跟进植被群落的演替过程,植被退化、裸土复现这类生态反弹问题,也能及时发现,给修复工程的运维管控提供数据依据。

3 结语

相较于传统人工踏勘、定点测绘、卫星遥感等监测手段,无人机倾斜摄影测量技术具备作业机动高效、空间全域覆盖、成果数字化多元、支持长时序动态对比等核心技术优势,可贯穿矿山生态修复前期勘查设计、施工过程管控、竣工成效核验全流程,适配矿山生态治理各环节数字化质控需求。伴随无人机航测硬件设备性能迭代、三维建模与影像解译算法持续优化,无人机倾斜摄影测量技术的数据精度、分析维度将进一步提升,在矿山地质环境监测、生态修复数字化管控、国土空间生态评价领域的应用场景将持续拓展,为全国矿山生态修复工程标准化、智能化发展提供核心技术支撑。

参考文献

- [1] 孙菲,焦希锋.无人机倾斜摄影测量技术在矿山生态修复中的应用[J].能源与环境,2026,(2):149-152.
- [2] 李红柳.无人机倾斜摄影测量技术在矿山测绘中的应用探究[J].智能建筑与智慧城市,2026,(3):49-51.
- [3] 蔡银霞.无人机倾斜摄影技术在有色金属矿山测绘中的应用[J].中国金属通报,2026,(1):126-128.
- [4] 文光.基于倾斜摄影测量的矿山地质环境恢复效果评估[J].中国金属通报,2026,(2):201-203.
- [5] 陈达常.基于无人机倾斜摄影测量的露天矿山动态监测与应用探究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026,(1):047-050.