

新型矿山测绘技术在工程地质中的应用研究

赵志东

包钢(集团)三合明矿业有限责任公司 内蒙古 包头 014511

摘要: 矿山工程地质条件复杂多变,地质灾害频发,传统测绘手段在精度、效率和空间覆盖度上难以满足现代矿山安全高效开采的需求。无人机倾斜摄影测量、三维激光扫描、合成孔径雷达干涉测量、高密度电法勘探及微震监测等新型矿山测绘技术的快速发展,为工程地质勘察、灾害监测与预警提供了全新的技术手段。本文系统梳理了上述新型技术的原理与特点,深入分析了其在矿山地质灾害识别与监测、岩体结构定量表征、矿区水文地质探测及采空区调查等工程地质关键领域中的应用路径;并从多源数据融合、三维地质建模与智能预警平台建设等方面,提出了技术深化应用的策略建议,旨在为矿山工程地质问题的精准诊断与科学决策提供技术参考。

关键词: 矿山测绘; 工程地质; 三维激光扫描; 无人机摄影测量

引言

矿山工程地质是保障矿山安全生产的核心基础学科,其研究对象涵盖矿区岩体结构、地质构造、水文地质条件以及开采扰动引发的各类地质灾害等。随着我国矿山开采深度不断加大、开采强度持续提高,矿区工程地质条件日趋复杂,高陡边坡稳定性、采空区塌陷、岩爆与冲击地压、突水等地质灾害问题日益突出,对测绘技术的精度、时效性和信息维度提出了更高要求。传统矿山测绘主要依赖全站仪、水准仪和常规GPS等手段,以单点测量和断面测绘为主,获取的信息量有限、空间覆盖度低、时效性差,难以满足复杂工程地质条件下大范围、高精度、动态化监测的需求。近年来,无人机遥感、三维激光扫描、地基干涉雷达、微震监测等新型测绘技术的迅猛发展,为矿山工程地质工作提供了从“点线面”到“时空体”的全新数据获取能力。这些技术能够在短时间内获取高分辨率的地形地貌数据、高精度的三维空间信息和连续的时间序列监测成果,极大地拓展了工程地质调查与分析的广度和深度。本文系统阐述新型矿山测绘技术体系及其在工程地质中的适用场景与应用路径,探讨多技术协同与数据融合的方法策略,以期推动矿山工程地质工作的技术升级。

1 新型矿山测绘技术体系及其工程地质适用性

1.1 无人机倾斜摄影测量技术

无人机倾斜摄影测量是近年来发展最为迅速的遥感测绘手段之一,它通过在无人机平台上搭载多镜头(通常为五镜头)倾斜摄影相机,从垂直和多个倾斜角度同步采集影像数据,经空中三角测量和密集匹配处理后,生成高精度实景三维模型和数字正射影像。该技术的主要优势在于:作业不受地形通行条件限制,可快速获取

矿区大范围的高分辨率地表影像(地面分辨率可达厘米级);三维模型具有真实纹理信息,直观性强;数据采集效率高,数平方公里的矿区可在单次飞行中完成^[1]。在工程地质应用中,无人机倾斜摄影能够为边坡结构面产状统计、地表裂缝分布调查、排土场和尾矿库变形监测等提供高精度的基础空间数据,其三维模型更是矿区工程地质解译和地质灾害判读的重要载体。

1.2 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术通过发射激光脉冲并接收反射信号,以非接触方式快速获取目标表面高密度三维点云数据。按搭载平台可分为地面三维激光扫描(架站式)和移动式扫描(车载、机载)。地面三维激光扫描精度高(毫米级)、点云密度大,适用于边坡精细建模、洞室围岩变形监测和结构面识别;机载激光雷达(LiDAR)则具有植被穿透能力,可获取植被覆盖下的真实地表高程,对于植被茂密矿区的工程地质填图具有独特优势。在矿山工程地质中,三维激光扫描最突出的应用价值在于:能够将传统依靠地质罗盘和皮尺进行的零星结构面量测,升级为基于海量点云数据的全面统计和定量分析,极大提高了岩体结构信息的代表性和可靠性。

1.3 合成孔径雷达干涉测量技术

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)及其衍生技术(如差分干涉测量D-InSAR、时序InSAR)利用星载或地基雷达系统获取地表反射的相位信息,通过干涉处理提取地表微小形变信息。星载InSAR具有大范围、周期性观测的优势,能够追溯历史形变,适用于矿区大尺度地表沉降和边坡缓慢变形的普查;地基合成孔径雷达(GB-InSAR)则架设在矿区现场,可实现连续、高频率(分钟级)的形变监测,精度可达亚毫米级,是露天矿边坡和

排土场滑坡预警的有力工具。在工程地质领域, InSAR技术的核心贡献在于将传统的地表变形监测从“点监测”拓展为“面监测”, 使工程地质人员能够从空间连续的角度审视矿区地表的动态变化规律。

1.4 微震监测与地球物理探测技术

微震监测技术通过高灵敏度传感器阵列接收开采活动诱导的岩体微破裂信号, 经定位和震源机制反演, 圈定岩体损伤区域和应力集中区。该技术是深部矿山岩爆和冲击地压预警的主要手段, 其所获取的微震事件空间分布和能量释放信息, 可直接用于工程地质力学模型的动态校正^[2]。高密度电法和瞬变电磁法等地球物理探测技术, 则利用岩土体电性差异探测地下地质结构、含水层分布及采空区范围, 为矿区水文地质调查和隐蔽致灾因素普查提供重要的物探依据。

1.5 技术体系的集成与协同

上述新型测绘技术各有优势和适用范围, 单一技术难以覆盖矿山工程地质的全部需求。构建集成化的技术体系是关键——以星载InSAR进行大范围形变普查, 识别潜在风险区; 以无人机倾斜摄影和机载LiDAR进行重点区域的高分辨率地形与影像采集; 以地面三维激光扫描对关键结构面进行精细量测和建模; 以地基雷达和微震监测进行实时动态预警。多技术协同形成的“天-空-地-深”立体观测网络, 能够为矿山工程地质分析提供从宏观到微观、从静态到动态、从地表到深部的多层次信息支撑。

2 新型测绘技术在矿山工程地质中的典型应用场景

2.1 矿山地质灾害识别、监测与预警

矿山地质灾害(边坡滑坡、崩塌、采空区塌陷、泥石流等)的早期识别和持续监测是工程地质的核心任务。新型测绘技术在其中的应用路径包括: 利用无人机倾斜摄影获取的高分辨率影像和三维模型, 工程地质人员可以在室内进行全面的地质灾害隐患解译, 识别微地貌变化、裂缝分布和变形迹象, 实现“室内先行解译、现场重点验证”的工作模式变革; 利用时序InSAR技术对矿区进行定期形变反演, 识别年变形速率异常区域, 圈定潜在滑坡体和沉降漏斗范围; 对于已识别的重点高风险边坡, 架设GB-InSAR或三维激光扫描仪进行连续监测, 实时获取变形速率和累积位移量, 结合降雨和爆破振动等触发因素, 建立多参数综合预警模型。以边坡稳定分析为例, 通过三维激光扫描获取的边坡点云数据可以构建高精度数字高程模型, 结合地质结构面信息进行极限平衡分析和数值模拟, 其分析结果的可靠性远高于基于稀疏剖面的传统方法。

2.2 岩体结构面的高精度采集与定量表征

岩体结构面(节理、裂隙、层理、断层面等)的产状、间距、迹长和粗糙度是评价岩体质量和稳定性的基本参数。传统的人工接触式测量法受制于高陡边坡的可达性, 样本量有限且存在选择偏差。三维激光扫描技术从根本上改变了这一局面: 扫描获取的高密度点云数据提供了边坡表面的完整几何信息, 通过点云处理软件可提取每个结构面的产状(倾向、倾角), 进行全坡面的结构面统计分组, 生成产状等密度图和玫瑰花图, 分析优势结构面组与边坡临空面的空间关系, 从而准确判定可能发生的破坏模式^[3]。对于地下矿山硐室, 三维激光扫描可快速获取巷道和采场围岩的结构面信息, 为支护设计和围岩稳定性分级提供翔实的数据基础。无人机摄影测量生成的密集匹配点云和三维模型也能起到类似作用, 且在更广的空间尺度上具有效率优势。

2.3 矿区水文地质与采空区调查

水文地质条件是影响矿山工程地质评价的重要因素。新型测绘技术在其中的贡献主要体现在: 无人机搭载热红外传感器可探测地表水体温度异常, 间接推断地下水的补给和排泄区域; 高密度电法和瞬变电磁法勘探数据可与地表地形点云融合, 建立地下含水层和隔水层的三维空间分布模型; 在采空区调查方面, 星载InSAR可用于大面积采空区地表沉陷的历史回溯和现状监测, 而三维激光扫描配合slam技术可进入可通达的采空区进行内部空间扫描, 精确获取采空区的边界形态和顶板变形情况。这些信息对于评估采空区稳定性、设计治理方案和预测地表残余变形具有不可替代的价值。

2.4 深部矿山工程地质动力灾害监测

对于深部开采矿山, 岩爆、冲击地压和矿震等动力灾害是工程地质安全的核心威胁。微震监测系统作为新型测绘感知手段的重要组成, 其技术要点在于: 通过在井下和地表布设高灵敏度检波器网络, 实时采集岩体破裂产生的弹性波信号, 经定位算法确定震源空间位置和时间, 计算释放能量和视应力等震源参数。工程地质人员根据微震事件的时空分布规律(如事件丛集区、b值变化趋势、能量释放率), 可以识别应力集中区和潜在破裂面, 判别围岩的损伤演化阶段。这一动态信息与地质构造和开采工艺参数相结合, 能够有效指导卸压爆破、合理确定回采顺序和支护参数, 从而主动调控工程地质风险。

3 技术深化应用的关键策略

3.1 多源数据的空间基准统一与融合处理

新型矿山测绘技术产生的数据类型多样(影像、点

云、雷达相位、波形记录等),坐标参考系和精度各异。要使这些数据在工程地质分析中发挥叠加优势,首先必须建立统一的矿区空间基准框架——利用连续运行参考站(CORS)构建高精度控制网,将所有测量成果纳入同一坐标系统和高程基准。在此基础上,发展多源数据的融合处理流程:将无人机影像纹理映射到三维激光点云,生成具有真实色彩和精细几何的三维模型;将InSAR形变场与三维地形模型叠加,可视化显示变形区与地形、地质构造的对应关系;将微震事件定位结果与地质建模成果耦合,在三维地质模型中动态展示岩体损伤演化过程^[4]。统一的时空基准和信息融合平台是将数据转化为工程地质认知的关键桥梁。

3.2 三维地质建模与动态更新机制

基于新型测绘技术获取的海量数据,构建矿区的三维地质模型是深化工程地质应用的重要方向。在勘察阶段,利用地表地形点云、地质填图数据和钻孔数据建立初始地质模型,包含地层界面、断层构造和岩体质量分区。在开采过程中,通过持续获取的巷道激光扫描数据、微震监测数据和地表变形数据,对地质模型进行动态修正和更新,使模型从静态的地质概化表示演变为随开采过程演化的动态数字孪生体。这种动态三维地质模型不仅服务于当前的工程地质分析,还为后续开采活动提供了可追溯、可预测的数字底座。

3.3 智能化解译与预警平台建设

海量测绘数据的价值需要依靠智能算法充分释放。利用深度学习算法对无人机影像中的裂缝、塌陷坑、滑坡边界等工程地质要素进行自动识别和分类,可大幅提高地质灾害解译的效率;基于时序形变数据的异常检测算法能够自动识别变形加速事件,减少人工分析的工作量和主观偏差;将微震事件、应力监测和变形监测数据集成至统一预警平台,建立多指标综合预警模型,实现从单参数阈值报警到多参数综合研判的升级。预警平台还应具备空间可视化展示和自动信息推送功能,确保预警信息能够及时、准确地传达至工程决策和生产调度环节。

3.4 全生命周期工程地质信息管理

矿山工程地质工作贯穿于规划、建设、生产、闭坑和生态修复的全生命周期。新型测绘技术所获取的数据应是这一全生命周期的重要资产。应建立矿区工程地质信息数据库,统一存储和管理各类原始测绘数据、解译成果、监测序列和分析报告,制定数据标准化采集、归档和共享制度。全生命周期信息管理不仅保证了数据的可追溯性,更为矿山的安全生产、地质灾害防治和闭坑后的土地复垦与地质环境恢复提供了完整的数据支撑,具有长远的综合利用价值。

4 结语

新型矿山测绘技术正深刻重塑工程地质工作。无人机摄影测量、三维激光扫描、InSAR、地基雷达及微震监测等技术,分别实现了地质填图空中化、岩体结构连续统计、地表变形全覆盖感知及深部灾害预警,显著提升了效率与精度。本文系统梳理了这些技术在地质灾害监测、岩体结构表征、水文调查及动力灾害预警中的应用路径,并提出了多源数据融合、三维建模、智能预警等深化策略。当前,该技术体系尚处快速发展期,存在标准不成熟、接口未统一及人员技能待加强等问题。未来,随着硬件成本降低、算法智能化及标准健全,新型测绘技术将深度融入矿山全流程,为提升矿山本质安全水平和科学决策能力提供坚实支撑。

参考文献

- [1]李德仁,龚健雅,邵振峰.从数字矿山到智慧矿山:矿山测绘技术发展历程与展望[J].测绘学报,2022,51(7):1327-1337.
- [2]刘先林,张继贤,王瑞幺.无人机倾斜摄影测量技术在工程地质调查中的应用现状[J].遥感学报,2023,27(8):1876-1888.
- [3]张祖勋,张剑清,詹总谦.三维激光扫描点云处理与岩体结构面识别方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(11):1789-1801.
- [4]王超,张红,刘智.InSAR技术在矿区地表沉降监测中的应用进展与挑战[J].中国科学:地球科学,2023,53(9):2012-2026.