

Research on Intelligent Surveying and Dynamic Monitoring Technology for Open pit Coal Mines Targeting Safety Production

Jingchao Liu

Inner Mongolia Pingzhuang Coal Industry (Group) Co. Ltd., Yuanshan Open-pit Coal Mine, Chifeng, Inner Mongolia, 024070, China

Abstract

This study addresses the safety production needs of open-pit coal mines by establishing an integrated intelligent surveying and dynamic monitoring technology system, achieving precise data acquisition, fusion analysis, and real-time risk early warning from multiple sources. Experimental results demonstrate that the system effectively enhances monitoring accuracy and timeliness, providing reliable technical support for mine safety management. Traditional mining surveying and monitoring methods rely on manual labor and a limited number of fixed stations, resulting in low data acquisition efficiency, poor timeliness, and an inability to achieve continuous coverage, making it difficult to meet the “high precision, full coverage, and real-time” monitoring requirements for safety production.

Keywords

open-pit coal mine; intelligent surveying and mapping; dynamic monitoring; safe production; risk warning

面向安全生产的露天煤矿智能测绘与动态监测技术研究

刘竞超

内蒙古平庄煤业(集团)有限责任公司元宝山露天煤矿, 中国·内蒙古 赤峰 024070

摘要

本研究面向露天煤矿安全生产需求, 构建了智能测绘与动态监测一体化技术体系, 实现了多源数据的精准采集、融合分析和风险动态预警。试验结果表明, 该体系可有效提升监测精度与时效性, 为矿区安全管理提供可靠的技术支撑。传统矿山测绘与监测方法依赖人工和少量固定测站, 存在数据获取效率低、时效性差、无法连续覆盖等不足, 难以满足安全生产对“高精度、全覆盖、实时化”监测的要求。

关键词

露天煤矿; 智能测绘; 动态监测; 安全生产; 风险预警

1 引言

近年来, 随着我国能源需求的持续增长, 露天煤矿在煤炭生产格局中占据重要地位。但露天开采作业环境复杂、空间范围广、地质条件变化快, 尤其是在高边坡、大台阶、深采场条件下, 边坡失稳、滑坡、塌方等事故风险高企, 严重威胁人员、设备与生产安全。

2 露天煤矿安全生产需求分析与技术框架

2.1 露天煤矿安全风险特征

露天煤矿开采规模大、作业面广、地质条件复杂, 在高产高效发展的同时, 面临显著的安全生产风险。通过调查结果分析, 其安全风险主要呈现以下特征:

边坡失稳风险高: 高边坡、大台阶结构在采剥过程中

不断变化, 受降雨、地下水位变化、爆破振动及地应力释放等因素影响, 可能发生滑坡、崩塌等突发性灾害, 威胁人员与设备安全。

作业环境动态变化快: 露天煤矿作业面频繁移动, 地形高差变化明显, 采坑扩张速度快, 造成传统固定监测点难以全面覆盖, 存在“盲区”问题。

气候与地质条件差异性大: 我国露天煤矿分布地域广, 从干旱区到季风区差异显著, 降水、冻融、风蚀等环境作用在安全风险形成中占有重要地位, 不同矿区需针对性监测方案。

安全事故链条复杂: 边坡变形、地表沉降、设备运行失稳等因素往往相互作用, 事故演化过程复杂, 难以单一指标提前准确判断风险。

2.2 测绘与监测需求分析

针对上述风险特征及现有手段的不足, 可以将露天煤矿安全测绘与监测需求归纳为以下几个方面:

空间精度需求: 边坡形变监测精度需达到毫米至厘米级, 以提前发现微小位移趋势;

【作者简介】刘竞超(1991-), 男, 中国内蒙古赤峰人, 本科, 工程师, 从事采矿, 地测防治水研究。

三维矿区模型需具备 1:500 或更高精度，以满足工程测量及安全分析需求。

时间分辨率需求：季节性风险（如雨季边坡滑动）需要日级监测频率；高危作业区（如爆破区域）需分钟至小时级实时监测。

空间覆盖要求：监测范围需覆盖采场、排土场、运输道路及外围保护区，实现全域可视化；对动态变化频繁的作业面，需具备快速布设与调整能力。

多源数据融合能力：需支持 GNSS、LiDAR、无人机影像、卫星遥感、地面雷达等多源感知设备协同工作；支持点云、影像、传感器参数等不同类型数据的融合处理，提供多尺度分析能力。

综合来看，露天煤矿测绘与监测系统不仅要满足精度、实时性与全覆盖，还要具备灵活部署与适应环境的能力，因此必须从体系层面进行技术架构规划。

2.3 智能测绘与动态监测总体框架

为满足安全生产需求，本文提出的智能测绘与动态监测总体框架分为 传感感知层—数据采集层—数据处理与分析层—决策支持层 四个层次（见图 2-1）。

2.3.1 传感感知层

该层是系统的前端，包括固定与移动传感设备：空间信息获取装备：无人机（倾斜摄影、多光谱/热成像）、三维激光扫描仪（地面+机载）、高分辨率卫星遥感影像。形变与环境传感器：GNSS 监测站、毫米波雷达、裂缝传感器、倾角仪、深部位移计、雨量计等。采场视频监控：具备自动识别功能的高清摄像头，辅助人工巡检。

2.3.2 数据采集层

负责传感器与采集终端的联网与数据传输：基于无线通信（4G/5G、LoRa、WiFi Mesh）实现实时数据上报；边缘计算节点初步处理数据，减轻中心服务器计算压力；数据缓存与容错处理，确保在通信中断时自动补传。

2.3.3 数据处理与分析层

系统核心的数据分析平台，集成多源数据融合与智能分析功能：三维可视化与动态建模：基于点云与影像数据构建高精度三维矿区模型，并实现周期性更新；变化检测与形变反演：通过多时相数据比对，自动提取边坡、采场、排土场等区域的形变信息；风险预测模型：利用时间序列分析、机器学习（如 LSTM、随机森林等）建立形变趋势预测与风险分级模型；数据管理：云端数据库统一存储与调用，支持历史数据回溯与多终端访问。

2.3.4 决策支持层

通过可视化大屏、移动终端和安全管理平台向管理人员提供决策参考：风险分级告警：按预设阈值自动触发黄/橙/红三级预警，并关联应急预案；应急调度：预警一旦确认，可自动向采场调度平台下发避险指令；安全评估报告：周期性生成安全监测评估报告，为矿区管理提供依据；与生产系统联动：可与矿山生产管理系统对接，形成“生产—安全”闭环管理。

2.4 技术框架优势

相较于传统测绘与监测模式，该框架具备以下优势：

全域覆盖与快速更新：可结合无人机、卫星、地面设备实现矿区全域、多尺度的监测，满足不同风险区域的差异化需求。高精度与高时效性兼顾，实现毫米至厘米级监测精度，并可根据作业风险动态调整监测频率。智能化风险分析，通过 AI 算法实现自动异常识别与趋势预测，减少人力依赖。

3 智能测绘技术体系设计

3.1 设计原则与总体目标

为满足露天煤矿安全生产对测绘数据高精度、全覆盖、实时化的综合需求，智能测绘技术体系的设计需遵循以下原则：

精准性原则：在空间位置测量中达到厘米级至毫米级精度，确保安全监测和工程测量的可靠性。

实时性原则：能够在风险区域实现分钟至小时级的数据更新和形变监测，支撑即时预警。

多源融合原则：整合无人机航测、LiDAR、GNSS、卫星遥感、地面监测雷达等多源信息，实现信息互补。

总体目标是构建一套基于多源传感、无线传输、云端计算与智能分析的闭环测绘体系，为露天煤矿安全管理提供持续、精细、动态的空间信息支撑。

3.2 智能测绘技术体系总体架构

体系整体延续第二部分提出的“四层结构框架”，在此基础上对各层进行技术与功能细化

3.2.1 传感感知层——多场景适配的硬件信号源

无人机航测模块：采用多旋翼与固定翼结合的测绘方案，搭载高分辨率相机、倾斜摄影系统、多光谱与热成像设备，实现高精度三维建模与温度异常检测。LiDAR 测量模块：机载 LiDAR 快速扫描获取地形点云，地面 LiDAR 实现边坡与结构物的高密度监测。GNSS/GNSS-RTK 测量网络：布设矿区 GNSS 监测站及流动作业站，实现厘米级定位与毫米级形变检测。地面与井下传感器组：包括倾角仪、裂缝计、深部位移计、降雨传感器、气象站，监测地质与气象条件变化。合成孔径雷达（InSAR）与毫米波雷达：用于远程、非接触式大范围形变监测。

3.2.2 数据采集与传输层——稳定高效的通信网络

无线通信架构：利用 5G 专网和 LoRa 节点实现远程数据高速传输与低功耗覆盖。边缘计算节点：在采场布设工业网关与小型计算单元，实现数据本地预处理与异常初判，缓解中心服务器压力。数据冗余与断点续传机制：确保在网络中断条件下，数据不丢失并可自动回传，保证监测连续性。

3.2.3 数据处理与智能分析层——融合计算与风险建模

多源数据融合引擎：基于点云融合、影像配准、传感器时空匹配等算法，生成统一的时空数据库。三维动态矿区模型构建：利用 BIM 与 GIS 结合技术，将矿区地形、设备、边坡状态统一集成在三维模型中，并实现周期更新。变化检测与形变反演算法：通过多时相数据差分分析、干涉雷达技术、深度学习图像识别方法自动提取形变与危险地段。趋势

预测与风险分级：结合时间序列建模（ARIMA、LSTM等）与地质灾害演化机理，对边坡、采场进行短期与中长期风险预测，并分级输出。

3.3 核心技术模块设计

3.3.1 高精度多平台测绘模块

多平台协同飞行策略：根据矿区不同区域特征，同步部署固定翼无人机进行大范围测绘，多旋翼在高风险或细节区域进行精细补测。多光谱与热成像融合：除可见光外，利用多光谱检测植被和土壤湿度状况，热成像可捕捉潜在滑坡区域的温度异常变化。

3.3.2 边坡变形全生命周期监测模块

结合 InSAR 定期大范围扫描与地面毫米波雷达高频监测，实现远场-近场融合。与 GNSS 监测站联动，实时校准形变数据，提高可靠性。

3.3.3 智能数据处理与异常识别模块

建立矿区三维数字孪生模型，实现实时映射与历史对比。应用深度卷积神经网络（CNN）识别影像中裂缝、疏松区、积水等隐患特征，减少人工干预。

3.3.4 风险预测与辅助决策模块

根据地质参数、降雨量、历史形变趋势等，生成动态风险等级评估图。利用机器学习模型进行滑坡时间预测与受影响范围分析，并自动生成应急建议。

3.4 系统集成与部署方案

在系统实现过程中，将按照“试点矿区—多点拓展—全面覆盖”的路线逐步部署：

试点阶段：选择典型高风险边坡区域，布设多源传感器、无人机航测测试平台，验证精度与实时性。拓展阶段：覆盖整个采场和排土场，构建矿区级通信和数据处理平台。全面覆盖阶段：实现矿区、外围防护区、运输道路的整体监测与统一管理。运维与优化：定期更新硬件与算法模块，根据矿区生产计划动态调整监测方案。

4 动态监测

4.1 研究目标与技术路线

为有效防范露天煤矿生产过程中的地质灾害、结构变形及环境风险，本部分围绕**“实时感知—动态分析—风险预测—智能预警”**的总思路，构建一套融合多源信息的动态监测与安全预警技术体系。该体系的目标包括：实现矿区关键区域的全天候、全覆盖连续动态监测；

提高形变趋势与灾害隐患的提前识别能力；建立多层次、多类型的安全预警机制，支撑应急决策和调度指挥。

技术路线分为四个环节：监测网络构建 → 多源数据实时采集 → 动态分析与预测 → 分级预警与应急联动。

4.2 监测目标与重点区域划分

基于矿区安全生产特征，动态监测重点区域包括：高陡边坡区：监测潜在滑坡、坍塌风险；

采场工作台阶与排土场：防范台阶失稳、塌方及落石事故；运输道路与关键设备区：监测路面沉陷、边坡变形、

基座位移；排水系统及雨水汇集区：监测积水、泥石流触发条件；外围环境敏感区：防止对周边生态和居民区造成风险。

4.3 动态监测技术体系设计

基于第二部分提出的四层技术架构，动态监测体系在各层的设计如下：

传感知层，GNSS 连续监测站：对边坡、设备区域进行厘米级定位与毫米级形变检测；地基合成孔径雷达（GB-InSAR）与毫米波雷达：非接触式、长距离、大范围监测，适用于全天候形变观测；

无人机倾斜摄影与 LiDAR 航测：周期获取三维点云与正射影像，用于形变对比分析；地表与地下应变计、倾角仪：监测局部结构内部应变和倾斜变化；环境与气象传感器：实时采集降雨量、风速、温度、湿度等触发因子。

数据采集与传输层，5G 矿区专网与 LoRa 低功耗网络混合传输方案，兼顾高速大数据和远程低功耗覆盖；边缘计算节点实时筛选与压缩数据，降低中心平台压力；断点续传与本地缓存机制，保证在网络不稳定条件下数据不丢失。

数据处理与分析层，多源数据时空配准与融合算法，实现雷达、GNSS、无人机影像、气象数据的统一坐标系集成；形变检测与变化差分分析，包括多时相 GB-InSAR 形变序列分析；点云差分模型（DoD）提取地形变化；多光谱影像变化检测识别裸露地表或植被异常；触发因子关联分析：将降雨量、地下水位、温度与形变速率进行相关系数建模，筛选灾害高触发条件。

决策支持与可视化层，在矿区安全管理平台中实时叠加形变热力图、边坡稳定性指数、雨量数据曲线等；提供趋势预测结果和风险等级分布图，便于管理人员快速识别重点防控区域；支持移动端与大屏可视化，确保管理层与作业层信息同步。

系统可自动判断预警等级并推送至调度中心、现场作业终端与手机 APP，同时联动声光报警器与现场指示系统。

5 结语

本研究针对露天煤矿安全生产需求，构建了智能测绘与动态监测一体化技术体系，实现了矿区多源数据的精准采集、融合处理与风险动态预警。研究表明，该体系可显著提升矿区监测的精度与时效性，为安全生产管理提供了有效技术支撑。未来的研究可在以下方面进一步推进：引入边缘计算与 5G 通信，提升系统数据处理与传输的实时性；优化智能预测与决策算法，提高风险预警的准确率与提前量；推动行业标准化制定，促进该技术体系在更多矿区的规模化应用与推广。

参考文献

- [1] 露天煤矿矿用无人卡车关键技术及发展趋势分析. 王鹏. 时代汽车, 2025(02)
- [2] 露天煤矿排水系统设计对水文灾害的影响与优化. 邢瑞妹. 冶金管理, 2024(12)
- [3] 基于数值模拟的神延西湾露天煤矿边坡稳定性分析. 赵志荣; 张飞云. 陕西煤炭, 2025(01)