

Practical Research on Monitoring and Early Warning Technology for Geological Hazards Induced by Coal Mining

Yuedong Zhang

Shaanxi Province 185 Coalfield Geology Co., Ltd., Yulin Shaanxi, 719000, Chian

Abstract

Deep coal mining continuously disturbs the dynamic equilibrium of overlying rock strata and groundwater systems, leading to a chain of geological hazards such as surface subsidence, water inrush, sandburst, and instability in goaf areas, which have become the primary bottleneck constraining safe production in mining regions. To address this engineering challenge, this study developed a three-dimensional monitoring system integrating microseismic monitoring, InSAR remote sensing, and deep multi-parameter sensing. Building upon this, the research advanced a machine learning-based water inrush risk assessment model and a dynamic early warning framework for goaf stability, achieving coordinated fusion and hierarchical early warning of multi-source heterogeneous data. Through engineering practice in typical mining areas, the system's on-site deployment scheme, operational stability, and early warning timeliness were systematically validated. The results demonstrate that this technical system can effectively capture precursor signals of disasters and compress early warning response time within acceptable engineering thresholds, providing a scalable technical pathway for proactive prevention and control of geological hazards in coal mines.

Keywords

Coal mining; Geological hazards; Microseismic monitoring; InSAR remote sensing; Machine learning early warning

煤炭开采诱发地质灾害监测与预警技术实践研究

张月东

陕西省一八五煤田地质有限公司, 中国·陕西 榆林 719000

摘要

煤炭资源的深部开采不断地扰动着覆岩结构和地下水系统的动态平衡, 由此产生的地表塌陷、突水溃砂、采空区失稳等地质灾害链已经成为制约矿区安全生产的主要瓶颈。围绕这一工程难题, 本研究构建了融合微震监测、InSAR遥感及深部多参数感知的立体化监测技术体系, 并在此基础上发展了机器学习的突水危险性评估模型与采空区稳定性动态预警指标框架, 实现了多源异构数据的协同融合与分级预警。依托典型矿区工程实践, 对系统现场部署方案、运行稳定性、预警时效进行了系统验证, 结果表明该技术体系可以有效地捕捉到灾害前兆信号, 并将预警响应时间压缩到可以接受的工程阈值以内, 为煤矿地质灾害的主动防控提供了一条可以推广的技术途径。

关键词

煤炭开采; 地质灾害; 微震监测; InSAR遥感; 机器学习预警

1 引言

地下采掘活动给岩体结构造成的累积损伤效应, 要比表面塌陷所表现出的要复杂得多。煤层回采时顶板垮落、底板突水、地表沉降三者之间存在跨尺度力学耦合关系, 演化路径受地质构造、采掘参数和水文地质条件三者交互作用所控制。传统的手工巡检、单一传感器布设方案无法穿透这样的多因素耦合的复杂性, 预警环节一直处在经验判断的粗放阶段, 滞后性明显。近些年来, 合成孔径雷达干涉测量技术

在毫米级地表形变捕捉方面所具备的能力, 加上分布式微震监测网络对于岩体破裂源定位精度的突破, 给灾害前兆识别打开了一扇新的技术之门。与此同时, 机器学习算法对于高维非线性映射关系的逼近优势, 也使传统经验公式不能解决的多参数耦合预警问题有了新的解决思路。因此, 把多源监测手段和智能预警模型进行深度整合, 在真实的矿区工程环境中完成技术验证, 就成了当前矿山安全领域急需回答的关键问题。

2 监测方法与技术体系构建

2.1 微震监测系统设计与优化

岩体在应力重分布时释放的弹性波信号中蕴含着破裂

【作者简介】张月东(1972—), 男, 中国陕西靖边人, 工程师, 从事煤田地质研究。

位置、能量大小、破坏方式等重要信息，微震监测就是依靠这种物理机制来对采场围岩损伤实施实时追踪。传感器阵列的空间布局直接影响到震源定位的精度，如果台站间距太稀疏，会导致到时拾取出现歧义，如果盲目加密又受巷道空间和经济成本的双重限制。为了解决这个矛盾，使用基于射线追踪反演的台站三维坐标迭代调整算法，使得P波初至到时残差收敛到工程允许范围内。深部高应力环境下电磁干扰、机械振动背景噪声频谱与微震事件存在部分重叠，常规带通滤波策略在这种情况下效果不好。短时窗能量比判据加上自适应阈值调节机制的加入，可以有效地抑制虚假触发事件的发生，使有效事件的识别率有了实质性的提高^[1]。

2.2 地表沉降 InSAR 遥感监测技术

时序 InSAR 技术依靠多景 SAR 影像的差分干涉处理，可以以面域的角度去表现地表形变场的时空演变规律，不同于点式监测手段对于空间覆盖的先天不足。矿区场景的特殊性是采动影响区形变梯度非常陡峭，相邻像元之间的相位差会超过模糊度约束，造成常规永久散射体方法大面积失相干。小基线集技术依靠创建时空基线约束下的干涉对组合网络，一定程度上减轻了这一难题，但是对沉降速率超出C波段半个波长周期的快速形变区域，相位解缠失败的风险依然存在。应对方案就是将升降轨数据联合计算，根据不同的观测几何对垂直分量和东西分量的敏感程度不同，分解出沉降盆地的三维形变矢量场。该过程对大气延迟的精细校正要求很高，对流层分层模型和气象再分析数据联合约束在这个环节是不可缺少的。

2.3 深部位移与应力场多参数融合感知

只依靠地表或者浅层信息来推断深部灾变过程，存在不能忽略的信息衰减和传递路径歧义性。深部多点位移计沿钻孔轴向安装之后，可以逐层记录覆岩各分层的离层发展和压缩变形情况，其数据曲线的突变常常比地表沉降早出现数天甚至数周，具有较强的前兆指示作用。位移数据和它互补的是钻孔应力计记录的采动应力重分布路径，特别是支承压峰值前移速率和煤壁前方塑性区扩展范围的关系。将位移、应力、微震三种数据在统一的时间基准和空间坐标系下进行配准融合，需要解决采样频率相差很大的同步化问题，微震数据的采样率在千赫兹量级，位移和应力的采集间隔一般以分钟计。多尺度时间窗特征提取策略在这里起到关键作用，使用不同的时间分辨率信号特征分层耦合，形成了源、场、效完整的多参数感知框架^[2]。

3 地质灾害预警模型研究

3.1 基于机器学习的突水危险性评估模型

底板突水是深部煤层开采中最具突发性的灾害类型之一，底板突水的发生与隔水层厚度、水压、断层导水性以及采动破坏深度等很多因素的非线性交互作用有关。传统的突水系数法把复杂的问题简化成单一比值的阈值判据，物理意

义虽然直观，但是不能反映各个影响因子之间的协同和拮抗效应。梯度提升决策树算法通过逐轮迭代地拟合前一轮残差，在保持模型可解释性的同时，对特征间的高阶交互关系有较强的捕捉能力。模型训练需要用到的样本构建又是另一个关键步骤，突水事件属于小概率灾害，正负样本严重不平衡会导致分类器偏向多数类。合成少数类过采样方法与代价敏感学习策略的联合运用在一定程度上校正了这种偏倚，使模型对高危区域的召回率得到改善^[3]。特征重要性排序的结果揭示出一个值得关注的现象：采动破坏深度这一动态变量的贡献度显著高于隔水层原始厚度等静态地质参数，暗示着突水风险评估必须将开采扰动的实时演化纳入考量。

3.2 采空区稳定性动态预警指标体系

采空区失稳过程不是单一指标的线性累积，而是多物理场耦合演化到临界状态附近所产生的一种突变。因此预警指标的选择不能停留在单参数阈值的简单叠加上。微震事件中，单纯事件频次的增加并不一定意味着失稳，有些工况下高频低能的微震活动是应力逐渐释放的表现，而不是灾变的前兆，真正有预警意义的是能量指数和 Schmidt 数的共同偏移趋势。地表形变指标也同样要动态化处理，沉降速率加速度的变化比绝对沉降量对于临界状态的识别更敏感。不同的地质条件下指标权重分配差异很大，硬性统一的指标体系反而会降低预警的区域适用性。基于层次分析法和熵权法的组合赋权方法在此给出了一种折中的方案，主观经验和客观数据各自所占的比重是一定的，使得指标体系在不同的矿区之间移植的成本降低。

3.3 多源监测数据融合预警方法

微震、InSAR、深部位移这三种监测数据分别代表了岩体破裂过程的源信息、远场响应和近场变形，信息冗余度和互补性并存。把它们简单地拼接成一个高维的特征向量，送入分类器，会带来维度灾难的风险，也忽略了不同数据源之间物理关联的先验约束。证据理论框架对于异源信息融合问题有独特的优势，各个数据源独立产生的基本概率赋值函数用 Dempster 组合规则合成，冲突证据的处理策略决定融合结果的鲁棒性。当不同的监测子系统对于灾害状态的判断出现较大的差异时，直接合成会产生违反直觉的悖论结果。引入冲突系数的预判机制，在出现高冲突时用加权平均融合的方式来规避^[4]。融合之后的综合预警指数在时间序列上比任何一个单源指标都要平滑，前兆特征更加明显，说明多源融合提高了信噪比。

3.4 预警阈值优化与分级响应机制

阈值的设定本质上就是一种风险决策问题，过低的阈值虽然可以减少漏报，但是会消耗应急资源的响应弹性，过高的阈值则会在关键时刻错过预警窗口。受试者操作特征曲线分析，给阈值优化赋予了在漏报率和误报率之间寻找最佳折中的量化手段。在此基础上叠加不同的灾害后果等级的经济损失函数，可以把阈值的选择从纯统计问题转化为风险期

望最小化问题,使最终确定的阈值既考虑了技术性能又考虑了经济理性。分级响应机制按预警等级递进,启动加密监测、人员撤离到停产处置的阶梯式应急预案。等级划分的边界不是静态固定的,随着监测数据的不断积累和模型的在线更新,阈值会周期性地自适应性修正,动态校准机制保证预警系统在矿区开采条件渐变背景下的长期有效性。

4 工程实践与系统应用

4.1 监测系统现场部署与数据采集

实验室环境下表现良好的监测方案,在遇到真实的矿井条件时往往会遇到意料之外的工程问题。传感器的安装工艺要适应高湿、高温、粉尘弥漫的恶劣环境,密封防护等级和长期运行稳定性之间的矛盾在深部巷道中更加明显。数据传输链路的可靠性也是一个不能忽视的薄弱环节,矿井巷道复杂的拓扑结构对无线信号的衰减远大于地面场景,光纤通信虽然在带宽方面具有绝对优势,但是存在采动变形造成断缆的风险。冗余链路设计同断点自愈算法结合起来,在实践中已经被证明是保证数据完整性的一种方法。现场采集的原始数据在入库之前要经过异常值剔除、缺失值插补、时间戳校准等预处理过程,任何一个环节的疏忽都会给下游的预警模型造成系统性偏差^[5]。

4.2 典型矿区预警案例分析

在某深部矿区的回采过程中,微震监测网络记录下一段约两周时间的异常活跃期,事件频次和累积能量释放曲线都呈上升趋势。几乎在同一时间窗内,InSAR观测到的采动影响区边缘的地表形变速率就超过了历史基线。多源融合预警系统因此把预警等级由蓝色调高到橙色。需要指出的是,在上述两种信号出现之前大约三天,深部位移数据就表现出覆岩关键层离层量急剧增加,这个时间差正好符合“深部前兆先于浅部响应”的理论预判。预警信号发出之后,矿方启动了对应的应急预案,采取了限员作业和加密监测相结合的措施。之后大约一周,采空区覆岩发生可控范围内的整体运动,由于预警及时没有造成人员伤亡和重大设备损失。该案例时间序列完整地表现出前兆捕捉、等级研判、响应执行、灾变验证的闭环链条。

4.3 系统运行稳定性与可靠性验证

任何预警系统的工程价值最终要接受长时间运行检验的检验。对连续运行时间大于一个完整回采周期的系统,数据完整率、模型预测准确率、预警信号的及时性作为主要的评价指标进行跟踪。传感器的在线率因为井下恶劣环境的不断侵蚀而出现缓慢衰减的情况,定期维护加上备用传感器热切换策略,把衰减控制在不会影响到整体监测覆盖度的范围之内。预警模型在运行初期性能随着训练样本的增加而不断

改善,越用越准的特性是由在线学习机制对模型参数的逐步优化所导致的。系统在两次由于井下爆破作业造成的强干扰事件中出现误报,事后分析发现干扰信号的频谱特征与真实灾害前兆有一定的相似性,后来引入爆破时间标签的辅助判据基本消除了此类误触发。

4.4 监测预警效果评价与优化建议

从综合工程实践结果来看,立体化监测和智能预警技术组合在捕捉灾害前兆信号方面,比传统方案的能力边界要大得多,预警响应时间的缩短给矿方争取到了宝贵的应急处置窗口。但是仍然存在一些技术瓶颈,限制了系统性能的进一步提高。InSAR监测在重访周期上存在固有限制,在重访周期上,星载和地基雷达的协同部署可以部分弥补这一缺陷。机器学习模型的可解释性问题也不能忽视,黑箱特性使预警结果不能得到一线工程人员充分的信任,可解释人工智能方法的引入是提高人机协同效率的必要途径。预警阈值的跨矿区迁移能力还有待提高,不同的地质条件下阈值标定目前仍然需要大量的现场数据积累,发展基于迁移学习的小样本阈值快速适配方法具有重要的工程实用价值。

5 结语

煤炭开采诱发的地质灾害链牵涉岩体破裂、水力传导、地表响应等诸多物理过程的耦合发展,其监测和预警技术的发展要冲破单一手段、单一模型的束缚,迈向多源感知与智能研判的深度整合。本文建立的技术体系在微震定位精度提高、InSAR形变场解算优化、多参数融合预警等方面取得有工程验证的进展。工程实践证明,预警系统实际效果的好坏,除了算法本身理论性能的影响之外,还会受到传感器可靠性、数据传输稳定性、人机交互效率等工程实现层面的约束。为了适应更深、更复杂地质条件下开采的要求,耐久性提高、预警模型自适应进化、跨矿区知识迁移能力突破都会成为以后的研究重点。

参考文献

- [1] 晋康平,李豪阳.煤炭开采区域地质灾害风险的应对[J].新疆钢铁,2025(1):195-197.
- [2] 姬广强.基于自动化技术的煤炭开采水文地质灾害预警系统构建[J].自动化博览,2025,42(7):86-89.
- [3] 富钢.煤炭开采地质灾害预测与防控技术研究[J].煤炭新视界,2025(1):178-179.
- [4] 李伟.煤炭开采引发的地质灾害及治理对策研究[J].煤炭新视界,2025(2):91-93.
- [5] 王双明,孙强,胡鑫,耿济世,侯恩科,王生全,周书涛,师庆民,袁士豪,陈凯,宋世杰.煤炭开采地质体复合损害与减损保障[J].煤田地质与勘探,2025,53(1):1-11.