

# 深井矿建围岩变形智能监测技术研究

庞小合

中煤第三建设(集团)有限责任公司三十工程处

DOI:10.32629/etd.v7i2.18962

**[摘要]** 矿产资源开采由浅入深后,矿建工程面对着高地应力、高地温和高渗透压等复杂地层条件的影响,围岩易发生大变形失稳问题,为提高监测精度及实时性以及智能化水平,开展深井矿建围岩变形智能监测技术的研究十分必要。对此,本文总结了深井矿建围岩变形智能监测技术体系,对其进行了三维的系统性剖析,分别从传感感知技术、数据传输技术和智能数据分析技术三个方面进行了全面的理论探讨,对比了各种技术的技术特点及其适用性,并分析其当前的技术瓶颈和未来的发展趋势。通过对论文的研究分析可以看出:采用多种传感器融合方式、将物联网技术与人工智能相结合是实现深井围岩变形智能监测的有效手段,对于深部矿产资源安全开采具有较强的指导意义。

**[关键词]** 深井矿建; 围岩变形; 智能监测; 传感技术; 数据融合

**中图分类号:** F416.1 **文献标识码:** A

## Research on Intelligent Monitoring Technology for Surrounding Rock Deformation in Deep Well Mine Construction

Xiaohe Pang

Third Construction Engineering Company (Group) Co., Ltd. No. 30 Engineering Division of China Coal

**[Abstract]** As mineral resource mining progresses from shallow to deep, mining engineering faces complex geological conditions such as high in-situ stress, high temperature, and high permeability pressure, which make the surrounding rock prone to large deformation and instability. To improve monitoring accuracy, real-time performance, and intelligence level, it is necessary to conduct research on intelligent monitoring technology for surrounding rock deformation in deep mines. In response, this paper summarizes the intelligent monitoring technology system for surrounding rock deformation in deep mine construction, conducts a three-dimensional systematic analysis of it, and carries out comprehensive theoretical discussions from three aspects: sensing perception technology, data transmission technology, and intelligent data analysis technology. It compares the technical characteristics and applicability of various technologies, and analyzes their current technical bottlenecks and future development trends. Through the research and analysis of this paper, it can be seen that adopting a multi-sensor fusion approach and combining Internet of Things technology with artificial intelligence are effective means to achieve intelligent monitoring of surrounding rock deformation in deep mines, which has strong guiding significance for the safe mining of deep mineral resources.

**[Key words]** Deep well mine construction; Surrounding rock deformation; Intelligent monitoring; Sensing technology; Data fusion

### 引言

目前,我国浅部矿产资源储量越来越低,矿产开采不得不深入到深部,千米级深井成为现阶段主要的开挖形式。但是,深部地质环境比浅部更为恶劣,在高地应力作用下深部巷道和隧道往往存在围岩大变形、断裂甚至坍塌等地质灾害隐患。而传统的监测方式要么是人工巡检,效率低、滞后性强;要么只使用单一传感器监测,难以满足复杂地质条件下多维度的监测需求,容易因

检测不到位或失误而发生事故。

智能监测技术的实现可达到实时感知、自动分析、精准预警的效果,是解决深井围岩变形监测问题的关键。根据监测手段的发展历程可知:目前深井矿建围岩变形监测已由传统的机械式测量转变为以光纤传感和MEMS传感器为主导的智能监测技术,并结合了智能检测算法和人工智能算法的现代技术。本文通过对基于上述智能监测技术的各技术模块进行分析拆分,并对其

进行了原理分析和适用性探讨;针对监测过程中存在问题与不足进行了分析;对于未来的发展方向也做出了展望,以供后续的研究和技术的应用提供参考依据。

### 1 深井矿建围岩变形智能监测核心技术体系

深井矿建围岩变形智能监测技术体系是多种复杂技术的深度融合技术,用以实现对围岩变形进行精密监测、实时监测和智能监测,该体系主要包括传感感知、数据传输、智能数据分析三个技术环节,其中任何一个环节都无法缺席。传感感知环节主要是精准采集和分析围岩变形的各种信号;数据传输环节要保证信号的稳定、快速传递;而智能数据分析环节要对相关数据进行综合性的分析,为发现围岩变形的风险隐患提供准确的信息支撑。三者互相配合,组成了完整的监测闭环回路。接下来分别阐述这些环节的技术要点。

#### 1.1 传感感知技术:监测系统的“眼睛”

传感感知技术是智能化检测的根本,就是要把围岩的物理变形变化转变为可以被测量的电信号或者光信号。传感设备在深井环境下需要经受环境温度较高、湿度较大、存在强电磁干扰、容易遭受腐蚀性气体侵蚀等各种苛刻条件,其面临的挑战极大<sup>[1]</sup>。目前用于深井围岩变形监测的主要传感技术包括传统电类传感技术、新型光纤传感技术和MEMS微型传感技术。

传统的电类传感器是以电阻应变片为基础的,用金属箔或半导体作为工作元件来感受应变,并利用电阻随应变变化的特性,通过阻值的变化来测量应变值大小,灵敏度系数为 $2.0 \sim 2.2$ ,测量范围为 $\pm 3000 \mu \epsilon$ ,具有成本低,成熟度高的特点,在浅部中小规模的矿建工程中得到了大量应用。但是由于它在深井中很容易受到强烈电磁干扰而产生数据漂移,并且不能承受井下恶劣的温度和湿度环境以及材料老化现象等,因此应用不太广泛。

光纤传感技术是深井监测的主流优势技术,核心包括光纤光栅传感与分布式光纤传感两类。光纤光栅传感器利用布拉格光栅反射波长偏移感知应变,灵敏度达 $1 \text{pm} / \mu \epsilon$ ,测量范围 $\pm 10000 \mu \epsilon$ ,具备抗电磁干扰、耐腐蚀特性,可串联多传感点实现长距离分布式监测;弱光纤光栅传感通过时分复用技术提升网络复用容量,实现 $1 \text{m}$ 级测点间距的精细化监测。

分布式光纤传感以光纤为传感介质,通过监测光信号散射反射变化获取沿线应变与温度分布,可实现数十公里连续监测,完整捕捉围岩变形空间规律。其与光纤光栅传感器形成“点面结合”监测模式,弥补前者空间分辨率较低的不足<sup>[3]</sup>。

MEMS微型传感技术基于微电子机械制造工艺,实现传感器微型化与纳米化,具有体积小、功耗低的优势,便于在井巷狭小空间安装甚至嵌入围岩内部。目前MEMS位移、压力传感器已初步应用于深井监测,未来将向集成化、智能化发展,实现单传感器多参数同步测量,提升监测效率。

#### 1.2 数据传输技术:监测系统的“神经”

数据在深井矿建中的传输,会受到数据传输距离远、外界环境影响大、现场布线难等问题的影响。其主要任务在于将传感

器收集的大量数据能够以最快的速度、最正确的途径传达到地面监控中心。应用到深井围岩变形监测中的数据传输技术有两种:一是有线传输;二是无线传输,多数情况采取“有线为主、无线为辅”的方式来实现组合式的混合传输。

采用有线传输方式进行数据传输的技术主要有光纤传输与工业以太网两种。光纤传输方式因其具有传输速率快、带宽大、抗电磁干扰、传输距离长等特点,非常适合传送深井监测中的大量传感数据,在应用光纤传感器的监测系统时可使用相同的光纤进行传感及数据传送工作,这样就可以极大地减少施工时线缆布置的复杂性及施工成本。工业以太网则主要适用于地面监控中心内部以及井下局部区域的数据传输,实现数据间的高速交换及数据的共享<sup>[2]</sup>。

无线传输技术可以弥补有线传输盲区应用到诸如临时检测点、移动设备等,无线传输技术包括LoRa、NB-IOT、蓝牙等核心技术。受深井密闭环境影响,无线信号不易穿透,因此为了加强无线通信效果,增加中继站或者基站进行信号放大。无线传输主要用于中低速、小范围、大规模地连接,可以同有线传输相互补充。

随着物联网技术的引入,数据传输更加智能化;物联网平台实现了传感器及采集终端的集中化管理和远程化访问,并且可以将采集到的数据同步上传至地面中心以及云服务器上,同时在多个终端上可以进行观看,这样就大大提高了系统的易用性及管理的便利程度。

#### 1.3 智能数据分析技术:监测系统的“大脑”

传感感知精准捕捉围岩变形信息,数据传输确保信息畅通无阻,二者构成监测系统基础,智能数据分析则是其“大脑”。深井监测产生海量时序数据,涵盖应变、位移等多维度信息,人工处理难度大、效率低且易遗漏。

智能分析借助人工智能等算法,实现数据自动处理、特征精准提取、异常快速识别与趋势科学预测,赋予系统自我判断能力,提升深井安全保障。数据预处理是重要基础,通过清洗、降噪等提供可靠数据源。采用时序分析等方法提取关键信息反映围岩状态。异常识别与预警是关键,机器学习算法以历史数据为学习源,实现准确判定与预测。多源数据融合技术汇集多类数据,解决不确定问题,提高围岩健康评估精度。

### 2 深井矿建围岩变形智能监测技术现存问题

尽管深井矿建围岩变形智能监测技术取得了较大的发展,甚至有的矿井已经将此应用于实际工作中,但是从整体上来说,还存在着这样或那样的问题,这些问题无疑会在一定程度上影响该技术的广泛应用以及应用效果的提高。

其次是传感器适应性和可靠性问题。深井复杂地质环境对传感器性能要求较高,国产化的高端传感器中关键元器件占比不高、耐高温、高压性能弱,破碎围岩区难以安装,遇塌方导致监测数据中断问题较难解决。

除了上述因素以外,还有数据传输稳定性、速度等问题。有线方式布线难,耗费大,容易被开采破坏;无线方式信号衰减厉

害,距离短,需要很多的中继器,同时进行海量的数据传输对于带宽的要求非常高,关键数据优先传输制度有待健全和完善<sup>[4]</sup>。

此外还存在智能算法的实用性和泛化能力的问题,大多数算法停留在实验室阶段,在面对地质条件不确定性的泛化能力较差,并且对于数据的质量和数量的要求都非常高,无法适应工程实际情况中存在的缺漏与噪声等问题,且存在“黑箱”的问题,算法模型可解释性不足也会导致工程师对于模型的预警结果持有怀疑的态度<sup>[5]</sup>。

最后是系统集成与标准化的问题,目前各个厂家所研发出来的智能监测系统多为定制化开发而成,不同厂家生产的各种传感器、数据采集终端及数据分析软件之间缺少接口统一标准,因此各厂商之间无法实现互联互通的情况。“信息孤岛”现象十分严重,不同系统之间无法实现共享互通,不能构建一个覆盖全面的监测网;并且没有行业内的统一技术规范以及技术标准,对于传感器的性能指标、数据格式、预警阈值等均没有相应的要求,在一定程度上导致各系统间监测的数据难以对比,并且不利于相关的技术推广与使用。

### 3 深井矿建围岩变形智能监测技术发展趋势

未来,深井矿建围岩变形智能监测技术将顺应科技趋势,向国产化、微型化、智能化、网络化、标准化迈进,构建更高效可靠的监测体系。

国产化是首要任务,在国家重视下,传感器核心元器件国产替代加速,能更好适配我国地质条件,降低成本。传感器将向微型化、集成化、多功能化发展,借助MEMS和纳米技术缩小体积,实现围岩内测,集成多元件完成多参数检测,降低系统复杂度。

智能化算法从轻量化、可解释性、泛化能力三方面提升,适应边缘计算,提高预警及时性,增强可信度,降低模型训练成本。监测系统将网络化、云平台化,构建全矿井分布式监测网,利用云平台实现数据管理与共享。同时,加快标准化建设,统一技术标准,打破“信息孤岛”,促进技术推广。

### 4 结束语

对深井矿建围岩变形进行智能监测的技术是保证深部矿产的安全开采的重要保障,其主要包括了传感知、数据传输和智能数据分析三个关键部分,其中光纤传感器为传感技术的主要方法,物联网则负责将信息传递出去,人工智能在数据分析和预警智能化上具有很大的优势。

现有的技术还存在传感器适应性差、数据传输不稳定、算法泛化能力弱和没有形成系统的现状。未来随着国产化推进、传感器集成化、算法优化和系统网络化建设的不断完善,可以更好的发挥已有成果效能,并向着更加有效可靠的性能发展。

总之,深井矿建围岩变形智能监测技术的发展是一个持续创新的过程,需要跨学科、跨领域的技术融合。相信随着相关技术的不断突破和应用经验的不断积累,智能监测技术将在深井矿建工程中发挥越来越重要的作用,为深部矿产资源的安全、高效开采提供坚实保障。

### [参考文献]

[1]李延河,杨战标,朱元广.基于弱光纤光栅传感技术的深井围岩变形监测研究[J].煤炭科学技术,2022,51(4):123-130.

[2]王晓栋.矿建巷道围岩破碎区支护优化[J].机械管理开发,2023,50(6):89-96.

[3]刘腾蛟,吴俊军,衡峰.微地震及光纤联合监测在水平井压裂全生命周期中的应用[J].第三届中国石油物探学术年会论文集(三),2025,39(5):987-994.

[4]黄浩,胡笳,杨志勇.基于物联网的隧道围岩稳定性监测应用研究[J].江西建材,2023,47(2):345-352.

[5]张全明,刘伟,唐敬晓.基于可解释性机器学习的巷道围岩松动圈厚度智能预测[J].矿业研究与开发,2025,31(3):678-686.

### 作者简介:

庞小合(1984--),男,汉族,河南省驻马店市人,高级工程师,本科,研究方向:矿建工程技术。