

基于数字孪生的井工煤矿“一通三防”动态预警系统构建研究

马宗利

呼图壁县西沟煤炭有限责任公司 新疆昌吉

【摘要】井工煤矿“一通三防”是保障安全生产的核心环节，传统预警系统存在数据滞后、模拟精度不足等问题。数字孪生技术通过构建物理矿井与虚拟矿井的实时映射，为动态预警提供了新方案。该系统整合通风、瓦斯、火灾、粉尘等多源监测数据，实现井下环境参数的实时仿真与趋势预测。借助虚拟仿真可模拟异常工况下的扩散路径与影响范围，提前触发预警并生成处置方案，既提升了预警响应速度，又增强了风险预判的准确性，为井工煤矿“一通三防”安全管理提供了智能化技术支撑。

【关键词】数字孪生；井工煤矿；一通三防；动态预警；安全管理

【收稿日期】2025 年 6 月 14 日

【出刊日期】2025 年 7 月 13 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250347

Research on construction of digital twin-based dynamic early warning system for "Yitong Sanfang" in underground coal mines

Zongli Ma

Hutubi County Xigou Coal Co., Ltd., Changji, Xinjiang

【Abstract】"Ventilation, fire prevention, gas control, and dust prevention" (Yitong Sanfang) in underground coal mines is a core link to ensure safe production. Traditional early warning systems have problems such as data lag and insufficient simulation accuracy. Digital twin technology provides a new solution for dynamic early warning by establishing real-time mapping between physical mines and virtual mines. The system integrates multi-source monitoring data such as ventilation, gas, fire, and dust to realize real-time simulation and trend prediction of underground environmental parameters. With the help of virtual simulation, it can simulate the diffusion path and influence range under abnormal working conditions, trigger early warning in advance and generate disposal plans. This not only improves the response speed of early warning but also enhances the accuracy of risk prediction, providing intelligent technical support for the safety management of "Yitong Sanfang" in underground coal mines.

【Keywords】Digital twin; Underground coal mine; Yitong Sanfang; Dynamic early warning; Safety management

引言

井工煤矿井下环境复杂多变，“一通三防”工作的疏漏可能引发灾难性后果。传统预警方式依赖孤立监测数据，难以全面捕捉环境动态变化，预警滞后与误判现象时有发生。数字孪生技术的出现，让矿井安全管理迎来变革契机。通过搭建与物理矿井同步运行的虚拟镜像，可实时感知井下通风状态、瓦斯浓度等关键参数，将分散的数据转化为可视化的动态场景，为“一通三防”动态预警搭建起精准、高效的技术桥梁，推动安全管理从被动应对向主动预防转变。

1 井工煤矿“一通三防”预警现存问题及技术瓶颈

1.1 多源监测数据采集与融合的局限性

井工煤矿“一通三防”监测依赖通风参数、瓦斯浓

度、粉尘含量等多类数据，但现有系统的数据采集存在明显短板。传感器部署受井下复杂环境制约，在高湿、高尘区域易出现灵敏度衰减，导致数据采集间隔拉长或精度下降。不同监测子系统采用独立的数据格式与传输协议，瓦斯监测系统与通风监控系统的数据难以直接互通，形成“信息孤岛”^[1]。数据融合过程中缺乏统一的时空校准机制，同一时刻不同区域的监测数据因传输延迟产生时间差，影响多参数关联分析的准确性，难以支撑对井下安全状态的整体研判。现有预警模型多基于静态阈值触发机制，难以应对井下动态变化的复杂工况。当瓦斯浓度因采掘面推进出现非线性波动时，固定阈值易导致误报或漏报。模型未充分纳入地质构造、开采进度等关联因素，无法识别因断层构造引

发的局部瓦斯异常积聚,或因工作面推进速度变化导致的通风系统失衡。对于多因素耦合风险,如瓦斯超限叠加粉尘浓度超标,模型缺乏层级化预警逻辑,仅能触发单一告警,难以呈现风险的叠加效应与演化趋势,限制了预警信息的决策价值。

1.2 系统协同响应与联动控制的滞后性

“一通三防”预警系统与井下控制设备的协同机制存在技术壁垒。预警信息生成后,需经人工确认方可触发通风机调整、风门开闭等控制操作,延长了应急响应时间^[2]。系统缺乏动态工况下的自动联动逻辑,当瓦斯浓度超标触发预警时,无法根据实时通风网络状态自主优化风量分配,仍依赖预设的固定控制策略。不同区域的预警系统独立运行,当某一采区出现瓦斯异常时,难以快速关联影响相邻区域的通风参数调整,形成协同防控盲区。深部开采与复杂地质构造加剧了预警技术的适配难度。在高地应力区域,巷道变形可能挤压传感器线路,导致监测信号中断,而传统有线传输方式难以快速恢复连接。冲击地压等地质灾害发生时,瞬时的气流扰动会引发瓦斯浓度骤升,现有预警算法因响应速度不足,无法捕捉这一突变过程,导致预警滞后^[3]。对于薄煤层、急倾斜煤层等特殊开采条件,现有监测设备的安装方式与监测范围难以适配,无法实现全区域覆盖,形成预警空白带。现有系统的预警信息呈现方式难以满足精准决策需求。数据以数值列表或简单曲线形式展示,缺乏对井下空间位置的关联标注,管理人员难以快速定位异常区域的具体位置及周边环境。

2 基于数字孪生的“一通三防”动态预警系统模型构建

2.1 数字孪生预警系统的整体架构设计

系统模型以物理矿井与虚拟镜像的实时交互为核心,构建“感知层-数据层-模型层-应用层”的四层架构。感知层部署多类型智能传感器,覆盖通风机、瓦斯探头、粉尘监测仪等设备,通过无线自组网技术实现井下环境参数与设备状态的全域采集。数据层采用分布式存储架构,整合异构监测数据并进行时空校准,建立统一的数据中台,支持多源数据的关联查询与快速调用^[4]。模型层包含矿井三维地质模型、通风网络仿真模型、瓦斯运移模型等核心组件,通过数字线程实现各模型的协同运算。应用层聚焦预警可视化与决策支持,提供风险态势图谱、异常预警弹窗、处置方案推荐等功能模块,形成“数据采集-模型仿真-预警推送-决策反馈”的闭环体系。虚拟镜像建模需实现对物理矿井的毫米级还原,涵盖地质构造、巷道布局、设备参数等全要素。

2.2 多源数据融合与实时交互机制

建立标准化的数据接口规范,实现不同监测系统的格式转换与协议兼容,消除“信息孤岛”。采用边缘计算技术在井下设置数据处理节点,对原始监测数据进行降噪、补遗与归一化处理,减少上传至云端的数据量^[5]。通过时间戳同步与空间坐标匹配,将通风参数、瓦斯浓度等数据精准关联至虚拟模型的对应位置,形成时空一致的数据集。构建数据孪生通道,使物理矿井的状态变化实时驱动虚拟镜像更新,同时将虚拟仿真生成的预警信息反向推送至井下控制系统,实现虚实双向交互。引入区块链技术保障数据传输的安全性与不可篡改性,确保融合数据的可靠性与可信度。预警模型采用深度学习与规则推理相结合的混合算法架构。基于历史事故案例与正常工况数据训练 LSTM 神经网络,使其能够识别瓦斯浓度、风速等参数的异常波动模式,预测未来一段时间内的参数变化趋势。将地质构造、开采工艺等约束条件转化为规则库,通过专家系统对神经网络的输出结果进行校验与修正,提升预警的准确性。

2.3 虚拟仿真与预案推演功能实现

利用虚拟镜像进行多场景仿真试验,模拟瓦斯泄漏、通风系统故障等异常工况,观察不同处置方案下的风险演化过程,优化应急预案。设计多因素耦合分析模块,量化瓦斯超限、通风不足、粉尘超标等风险因素的关联度,构建风险叠加评估模型,实现对复合风险的层级化预警^[6]。针对冲击地压等突发情况,模型具备快速响应机制,通过实时数据流的突变检测算法,在秒级时间内触发紧急告警,为应急处置争取时间。在虚拟空间中设置“数字沙盘”,支持管理人员通过拖拽操作调整通风机频率、风门开度等参数,实时查看对井下环境的影响,辅助制定最优调控策略。将应急预案转化为可执行的流程模型,当预警触发时,系统自动在虚拟镜像中推演预案执行效果,预测风险控制所需时间与可能达到的效果,为决策者提供参考。通过多次仿真推演积累处置经验,形成案例库,不断优化应急响应策略,提升预警系统的决策支持能力。

3 数字孪生预警系统的优化路径

3.1 多物理场耦合模型的精度提升

针对虚拟镜像与物理矿井的仿真偏差,需强化多物理场耦合模型的迭代优化。基于现场实测数据与仿真结果的对比分析,建立误差反馈机制,通过调整气流场计算的湍流模型参数、瓦斯扩散的传质系数等,缩小虚拟仿真与实际工况的偏差。引入地质力学参数动态

修正模块,将巷道变形、岩层移动等地质变化实时纳入通风网络模型,使虚拟镜像能够精准复现因地质条件改变引发的通风系统阻力分布变化。采用自适应网格划分技术,在瓦斯易积聚区域加密计算网格,提高局部流场的仿真精度,确保对低浓度瓦斯异常区的准确识别^[7]。为解决井下数据传输延迟与算力不足的问题,构建边缘节点与云端协同的分层处理架构。在井下关键区域部署具备边缘计算能力的智能网关,实现监测数据的实时预处理,包括异常值剔除、特征参数提取与本地快速预警,减少上传至云端的数据量。云端平台聚焦全局数据融合与深度分析,通过联邦学习技术整合各边缘节点的模型参数,训练适用于全矿井的通用预警模型,同时保留各区域的个性化参数配置。建立动态算力分配机制,根据井下工况复杂度自动调整边缘节点与云端的计算任务划分,在突发状况下优先保障边缘节点的实时处理能力。

3.2 预警-控制闭环联动机制的完善

打破预警系统与控制设备的交互壁垒,构建基于数字孪生的自动联动控制体系。将通风机、风门等设备的控制逻辑转化为虚拟镜像中的可执行模块,当预警系统检测到瓦斯浓度超标时,在虚拟空间中模拟不同控制策略的执行效果,自动筛选出最优调控方案并生成控制指令,经安全校验后直接下发至现场设备^[8]。建立控制效果的虚拟验证机制,通过对比调控前后虚拟镜像与物理矿井的参数变化,评估控制策略的有效性,若未达到预期效果则触发二次优化,形成“预警-决策-控制-验证”的闭环流程。设置分级预警的沉浸式提示模块,当触发紧急预警时,自动切换至全屏风险扩散模拟界面,强化警示效果。针对井下复杂环境对系统稳定性的影响,需构建多维度的鲁棒性保障体系。在感知层采用异构传感器冗余部署方案,当某一类型传感器失效时,系统自动切换至备用传感器数据并触发故障告警,确保监测数据的连续性。开发网络自愈模块,当井下无线传输网络出现局部中断时,自动启用 Mesh 自组网路由切换功能,维持数据传输的完整性。通过数字孪生平台模拟传感器故障、网络中断等极端场景,训练系

统的应急响应能力,使其在异常工况下仍能保持核心预警功能的稳定运行,提升系统的抗干扰能力。

4 结语

基于数字孪生的井工煤矿“一通三防”动态预警系统,有效弥补了传统预警的不足。通过构建精准模型并优化应用路径,实现了井下环境的实时监测与动态预警,提升了安全管理的预见性和精准性。该系统为井工煤矿“一通三防”工作提供了全新技术支撑,对保障煤矿安全生产、推动智能化转型具有重要意义,为类似高危行业的安全预警体系建设提供了参考。

参考文献

- [1] 全鹏,郁鹏,赵莉,等.智能化井工煤矿技术开发科技成果价值评估方法研究[J].煤炭经济研究,2024,44(04):20-26.
- [2] 张学亮,郭建利,刘芳彬,等.数字煤炭背景下井工煤矿智能化管控模式及效益[J].煤炭经济研究,2024,44(04):33-39.
- [3] 郭佐宁,牛虎明,习晓,等.智能化井工煤矿运行与维护管理标准框架[J].智能矿山,2024,5(03):32-38.
- [4] 陈晓晶.井工煤矿运输系统智能化技术现状及发展趋势[J].工矿自动化,2022,48(06):6-14+35.
- [5] 罗会.井工煤矿“四化”建设助力产业发展的探索及研究[J].当代化工研究,2021,(14):69-70.
- [6] 黄慧.矿井安全管理现状及对策探析[J].内蒙古煤炭经济,2025,(13):97-99.
- [7] 徐玉晨,罗瑾,周蕊.提升安全管理效能推进矿井安全高效发展[J].内蒙古煤炭经济,2025,(01):106-108.
- [8] 张鹏,吕帅.基于安全文化的现代化矿井安全管理新途径[J].内蒙古煤炭经济,2024,(24):118-120.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

