

# 基于多模态数据融合的智慧矿山建设

朱丕凯<sup>1,2</sup>

1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039

2. 煤矿灾害防控国家重点实验室, 重庆 400037

DOI:10.61369/ERA.2025120012

**摘要**：针对非煤矿山数字化建设中存在的数据壁垒与信息孤岛问题, 本研究通过对多模态数据进行分类整合与融合处理, 构建了基于“数据共享、三线设计、协同办公”模式的非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台。该平台面向企业、监管部门及社会第三方用户开发。通过在“矿山安全在线”系统的实际应用表明, 平台有效提升了安全监管效能, 强化了企业安全管理水平。

**关键词**：多模态数据; 三线设计; 风险监测防控; 数字化决策

## Intelligent Mine Construction Based on Multimodal Data Fusion

Zhu Pikai<sup>1,2</sup>

1. Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400039

2. National Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037

**Abstract**：Addressing the issues of data barriers and information silos in the digitalization of non-coal mines, this study constructs a risk monitoring, prevention and control, and digital decision-making platform for non-coal mines based on a model of “data sharing, three-line design, and collaborative office” by classifying, integrating, and fusing multimodal data. The platform is developed for enterprise, regulatory, and third-party social users. Its practical application in the “Mine Safety Online” system demonstrates that the platform effectively enhances the efficiency of safety supervision and strengthens the level of enterprise safety management.

**Keywords**：multimodal data; three-line design; risk monitoring and prevention; digital decision-making

## 引言

随着智能时代的来临, 煤矿智能化技术持续发展[1-3]。然而, 非煤地下矿山因开采工艺和洗选技术存在差异, 其智慧矿山的建设情况也有所不同。当前, 非煤矿山在智慧化转型过程中面临着地质条件复杂、生产流程多样、设备类型繁多等独特挑战, 如何有效整合各类数据资源, 实现矿山生产全流程的智能感知、精准决策与高效协同, 成为推动其智慧矿山建设的核心课题[4-5]。多模态数据融合技术作为打破数据壁垒、提升信息利用价值的关键手段, 为解决这一课题提供了全新的思路与方法, 其通过将来自传感器、设备、人员、环境等不同来源、不同格式的多模态数据进行有机结合与深度分析, 能够为非煤地下矿山构建更为全面、立体的智慧化管理体系奠定坚实基础。

然而智慧矿山建设中存在标准不统一等现象。造成了信心孤岛, 政府监管及矿山安全管理数据的打通成了难题。如何将多模态的数据统一标准, 形成数据共享、三线设计、协同办公的新模式。

## 一、多模态数据融合分析

非煤矿山包含露天矿山、地下矿山、尾矿库。受文章篇幅所限本节以地下矿山为例对多模态数据进行分析。

### (一) 基础类数据

基础类数据主要反映矿山固有风险和基础安全管理状况的集

合。包括固有风险、机构人员、设备信息、图件信息、安全管理、应急管理等基本要素组成。此类数据要素对于有效管理和控制风险、提高生产效率和维护安全是至关重要的。这些要素共同构成了标准化管理的基础, 帮助组织实现高效、安全和可持续的运营。智慧矿山基础类数据类型、内容及其作用见表1。

表1 智慧矿山基础类数据分析应用

数据类型	数据内容	数据作用
固有风险	包括开拓方式、采矿方法、开采深度、单班最大作业人数、地质条件等	根据固有风险数据对矿井固有风险进行评估
设备信息	提升系统、通风系统、排水系统、供电系统、供水及防灭火系统、压风系统、通信联络系统、监测监控系统、人员定位系统	根据设备设施配备情况对矿井机械化水平进行评估
图件信息	总平面布置图、地质地形图、开拓系统图、中段平面图、通风系统图等	图纸能随用随调，同时对图纸更新情况进行监管
机构人员	“五职”矿长配备、安全生产管理人员、技术管理人员、特种作业人员持证	对矿山机构及人员配备情况进行监督
安全管理	主要负责人履责、安全风险管控、安全生产投入、全员安全生产责任制、外包单位管理	对矿山安全管理基本状况进行评估
应急管理	应急预案、应急物资、应急队伍、应急专家、事故管理	事前预防、事中控制、事后总结

## (二) 安全管理类数据

基础信息中所述安全管理类数据主要为静态数据，本节所述安全管理类数据则聚焦于现场管理中的动态数据，并以双重预防机制为核心内容。具体而言，这类数据贯穿于矿山日常安全管理的全流程，实时记录和反映安全风险管控与隐患排查治理的实际状态与效果。其核心构成包括：风险分级管控、隐患排查治理、安全监管与执法、安全教育培训等要素。智慧矿山安全管理类数据类型、内容及其作用见表2。

表2 智慧矿山安全管理类数据分析应用

数据类型	数据内容	数据作用
风险分级管控	包括风险辨识、风险评估、风险分级管控、管控措施落实及风险状态变化等信息等	用于追踪风险从识别到管控的全过程，对超期、未落实或新出现的重大风险进行预警
隐患排查治理	涵盖排查计划、排查清单、排查频次、隐患等级判定、隐患治理督查督办等数据	风险管控措施落地执行的关键体现，确保隐患从发现到消除的完整轨迹的闭环管理
监察监管执法	记录安全检查、专项督查、执法处罚、闭环管理等信息	反映外部监管与内部自律执行力
安全教育培训	涉及培训计划、内容、记录、效果考核、特种作业人员复训及安全活动参与情况	反映人员安全素质提升的动态过程

## (三) 感知类数据

感知类数据主要用于实时监测地下矿山井下空气质量、风速、风压、设备运行状态、地下水文、地压及地表沉降等关键参数，同时可实现相关设备的远程集中控制。其具体应用涵盖井下空气质量监测、通风系统监控、智能视频（AI）监控、排水系统监控、地压与地表沉降监测以及供电系统监控等子系统。智慧矿山感知类数据类型、内容及其作用见表3。

表3 智慧矿山感知类数据分析应用

数据类型	数据内容	数据作用
井下空气质量监测	对一氧化碳、二氧化氮、硫化氢、二氧化硫、烟雾、氧气及氢气等进行监测	自动检测毒害气体浓度，并在超标时触发声光报警
通风系统监控	对主要回风巷及硐室的风速、风量监测与通风机运行状态的监控	优化风流分布以预防中毒窒息风险

智能视频（AI）监控	提升人员的井口信号房、提升机房、井口、马头门等场所进行监控，并能智能分析	视觉技术识别人员违规行为或设备异常状态，提升安全巡检效率
排水系统监控	对排水系统水泵开停、水仓水位、涌水量、排水量、流速等参数进行监测	异常情况下（如水位超限、设备故障）自动或远程启动应急响应机制
地压与地表沉降监测	对地压与地表沉降的变形、应力等参数进行监测	捕捉岩体位移，预警冒顶事故
人员定位系统	实时追踪井下人员位置、身份信息、运动轨迹及停留时长，设置区域禁入/滞留告警	精确掌握井下人员分布，实现高效应急救援
供电系统监控	智能防越级跳闸保护、备火灾自动监测与报警、电气设备运行状态参数的在线监测	监控电压电流波动，保障设备稳定运行，对电量和能耗统计分析

## (四) 多模态数据融合

上述多源异构数据呈分散分布态势，如何借助边缘侧装置实现多模态数据的感知、监测、预警及决策管控，构成本研究的关键目标。具体而言，多模态数据融合旨在构建一个统一的智能分析融合平台，其核心在于打破基础类数据、安全管理类数据与感知类数据之间的壁垒，实现跨模态信息的深度集成与协同分析。

在技术路径层面，第一阶段需利用边缘计算装置对来源各异、格式多样的异构数据进行预处理。此过程涵盖数据的实时采集、格式标准化转换、时间戳对齐以及基础层面的数据降噪与特征提取。边缘侧处理不仅可显著减轻中心平台的传输负载，更能满足井下环境监测与控制对低延时的严格要求。随后，融合平台对预处理后的多模态数据流进行关联与汇聚。典型应用场景包括：将感知类数据（如井下CO、NO2监测值、人员位置信息、主要通风机运行状态）与安全管理类数据（如、隐患排查记录、员工教育培训信息）进行时空关联，以动态评估特定作业区域或设备的安全态势。同时，基础类数据（如固有风险等级、设备信息、图件信息）为感知数据和安全态势动态提供了关键的背景信息与评估基准，显著提升了预警与决策的精准性与可追溯性。在此基础上，平台运用数据挖掘、机器学习（如深度学习、强化学习）等智能算法，对融合后的多维多源数据进行深度分析。该分析不仅能够实现对单一系统（如通风、排水）运行状态的智能诊断与预测性维护，更能揭示跨系统、跨流程的潜在关联风险。可优化应急逃生路径规划与救援调度策略。最终，融合分析结果驱动智能决策与管控闭环的形成。平台能够基于实时融合数据自动生成预警信息（如气体超标、设备异常），并通过可视化界面或移动终端推送至相关管理人员。更为重要的是，平台可基于预设规则或模型推理，生成初步的管控建议（如调整通风参数、暂停特定区域作业、启动应急预案），并追踪管控指令的执行反，从而形成“感知-分析-预警-决策-管控-反馈”的完整智能闭环，显著增强矿山生产全流程的协同管理效能与风险响应效率。

## 二、非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台

### (一) 融合平台功能设计

该平台是充分运用物联网、人工智能、数字孪生等技术，建设政府、矿山企业及第三方机构、专家等共享的，集日常管理、

监测预警、调度指挥和辅助决策一体化的，对安全风险隐患实施有效管控的“智治大脑”。采用“政府端+企业端+社会端”三线设计开发，共用平台。通过“三张清单”梳理出数据需求模型图。如图1所示。

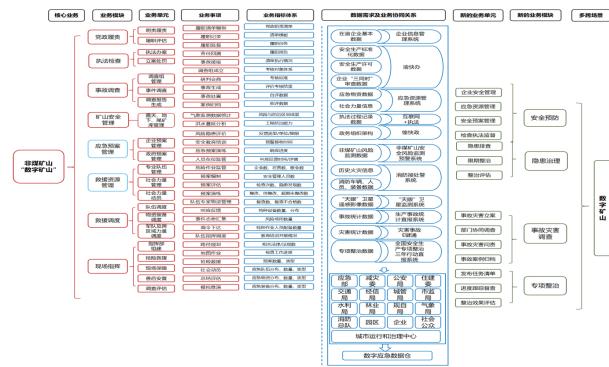


图1 数据需求模型图

基于数据需求模型图，非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台总体按照“1（总驾驶舱）+2（监管端、企业端、社会端）+N（各个系统的基础模块）+X（各个场景运用：各种智慧管理、监测预警子场景等）”的思路设计。监管端包含行政许可、监管执法、应急管理、事故救援、履职管理、企业动态安全监管等模块。企业端包含基础信息、风险分级管控、隐患排查治理、教育培训、危险作业、监测预警、应急管理、履职管理等模块，企业端核心业务如图2所示。社会端包括服务平台、专家服务、举报奖励、告知警示、安全培训、第三方合作等模块。



图2 非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台核心业务

## （二）融合平台整体架构设计

多模态数据融合平台采用分层架构设计，以支撑非煤矿山复杂环境下的数据集成与智能决策。整体架构自上而下分为数据采集层、边缘处理层、平台核心层及应用服务层，确保数据从感知到管控的全链路高效协同。

数据采集层通过前置采集装置实现多源异构数据的实时汇聚；该层支持标准化协议接入，并嵌入数据清洗模块，初步滤除噪声与异常值，为后续处理奠定基础。边缘处理层部署于井下关键节点或近场数据中心，利用边缘计算网关执行低延时预处理任务，包括数据格式统一化、时间戳对齐、特征提取及本地化预警（如气体超标阈值触发）；平台核心层构建于云端或私有数据中心，负责多模态数据的深度融合（风险评估动态预警模型）与智能分析；核心算法包括深度学习模型和关联规则挖掘，动态关联基础类静态数据、安全管理类动态记录及感知类实时流，生成跨模态风险图谱（如区域安全态势评分）。应用服务层提供可视化决策支持系统，实现预警信息推送（移动端告警）、智能决策建议及管控闭环追踪。同时，平台架构融入区块链技术确保数据不可

篡改，支持监管机构远程审计，形成“数据驱动-智能预警-协同管控”的一体化运行机制。平台企业端架构如图3所示。

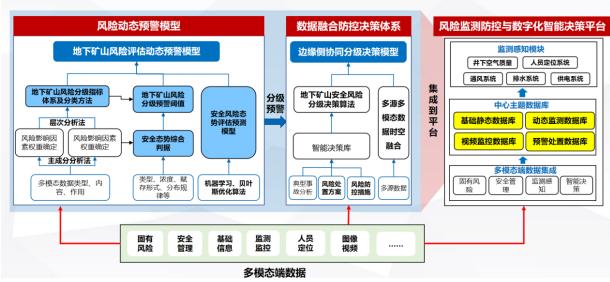


图3 非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台架构

## 三、现场应用

目前，该平台已全面部署应用于重庆市“矿山安全在线”市级监管平台建设，显著提升了区域矿山安全管理效能。在企业端部署层面，540座大型矿山企业已完成平台部署并稳定运行，系统功能覆盖就、开采、运输等核心生产环节。该平台有效消除了监管部门与企业间的信息壁垒，实现了监测数据的实时共享与业务协同。平台核心功能高效体现为以下三个方面：一是依托实时采集的基础数据，在可视化地图上实现安全风险“一图统览”；二是构建隐患从识别至整改的全程闭环管理机制；三是基于智能系统将调度指令精准推送至关键岗位；四是通过综合指挥大屏全景化呈现决策支持信息。上述功能体系全面强化了安全生产响应的时效性与监管效能。监管端与企业端数字大屏部署形态如图4所示。



图4 监管端、企业端数字大屏

## 四、结语

课题基于非煤矿山政府监管、企业安全管理、社会共治的难点，通过“三线设计、数据共享”的方式，打破数据壁垒。通过

“三张清单”的设计，搭建了政企共用的非煤矿山风险监测防控与数字化决策平台。通过示范应用，成果技术先进、运行可靠，可为智慧矿山建设提供支撑。

## 参考文献

- [1] 吴晓春. 煤矿智能识别监测预警平台研究及应用 [J]. 中国煤炭, 2024, 50(3):97 – 102.
- [2] 李文凯. 浅谈煤炭生产的智能监控创新应用 [J]. 新疆钢铁, 2024(2):182 – 184.
- [3] 李国民, 章鳌, 贺耀宜, 等. 智能矿井多元监控数据关键技术研究 [J]. 工矿自动化, 2022, 48(8):127 – 130,146.
- [4] 王启健, 于涛. 黄金智慧矿山大数据分析平台研究与开发 [J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(6):25 – 31.
- [5] 贺耀宜, 高文, 杨耀, 等. 智能矿山多元监控信息融与联动研究 [J]. 工矿自动化, 2022, 48(11):11 – 19.