新一代煤矿智能安全监控系统研究与展望

王国法[1,2],郭清华[1,3],周如林[1,2],李　爽[4,5],张德胜[1,6],秦泽宇[1,2]
(1. 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室,北京　100013;2. 北京天玛智控科技股份有限公司,北京　101399;3. 中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆　400037;4. 中国矿业大学 经济管理学院,江苏 徐州　221116;5. 中国矿业大学 安全科学与应急管理研究院,江苏 徐州　221116;6. 煤炭科学技术研究院有限公司,北京　100013)

摘要: 传统安全监控系统采用“监测—报警—断电”的被动响应模式,难以满足煤矿智能化建设对主动预警与协同控制的需求. 本文在系统分析我国煤矿安全监测监控系统发展历程基础上,界定了新一代智能安全监控系统的内涵特征,提出了基于“云-边-端”架构的系统总体架构和技术路线:分别从“端”侧感知层,对传感器共性技术、气体激光检测、精准测风等技术研究现状,从“端-边”协同角度对矿用轨道式、无轨式及单兵巡检设备等巡检机器人在复杂井下环境中的适应性及关键技术,从“边”侧控制层对长距离全IP组网、通算控一体化技术,从“云”侧平台层对基于统一数据底座的灾害融合监控、多灾种复合监测预警等系统关键技术进展进行了研究. 通过现场工业性验证,所研究智能安全监控系统误报率显著降低(降27.3%),隐患主动识别能力与巡检智能化水平有效提升. 最后,对新一代煤矿智能安全监控系统的发展趋势进行了展望,指出未来应致力于制定统一的通信协议标准平台、研发煤矿安全垂直大模型,构建异构巡检机器人群体智能体系,最终形成矿井数智化精准防灾新范式,为全面提升煤矿本质安全水平提供理论和技术支撑.

关键词: 智能安全监控系统;“云-边-端”架构;智能感知;多灾种预警;通算控一体化;巡检机器人;大模型
中图分类号: TD 76　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)02-0271-17

Research and prospects of a new-generation intelligent safety monitoring system for coal mines

WANG Guofa[1,2], GUO Qinghua[1,3], ZHOU Rulin[1,2], LI Shuang[4,5], ZHANG Desheng[1,4], QIN Zeyu[1,2]
(1. State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Beijing 100013, China; 2. Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China; 3. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China; 4. School of Economics and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 5. Institute of Safety Science and Emergency Management Research, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 6. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Traditional safety monitoring system, which rely on a passive response mode of “monitor—alarm—power cut off”, fall short of the requirements for proactive early warning and collaborative control in the intelligent coal mine construction. On the basis of a systematic analysis of the development process of coal mine safety monitoring system in China, this paper defines the connota-

收稿日期: 2026-01-05　　**修回日期:** 2026-03-08　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20260006
基金项目: 国家自然科学基金项目(52304170,52404167);国家重点研发计划项目(2023YFC2907504)
第一作者: 王国法(1960—),男,山东省威海市人,中国工程院院士,博士生导师.
通信作者: 周如林(1985—),男,河北省沧州市人,研究员. E-mail: zhourl@tdmarco.com
引用格式: 王国法,郭清华,周如林,等.新一代煤矿智能安全监控系统研究与展望[J].中国矿业大学学报,2026,55(2):271-287.
WANG Guofa, GUO Qinghua, ZHOU Rulin, et al. Research and prospects of a new-generation intelligent safety monitoring system for coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 271-287.

tion of a new-generation intelligent safety monitoring system, and proposes an overall system architecture and a technical route based on "cloud-edge-end". In this paper, the research was conducted respectively on the following aspects: from an "end" side perception layer, technical research current states of sensor generic technologies, gas laser detection, precise wind measurement, etc.; from an "end-edge" collaboration perspective, the adaptability and key technologies of inspection robots such as rail-type, trackless-type, and individual mine inspection equipment under complex underground coal mines environments; from an "edge" side control layer, long-distance full-IP networking and communication-computation-control integrated technologies; and from a "cloud" side platform layer, the progress of system key technologies for disaster integration monitoring, multi-disaster composite monitoring and early warning based on a unified data foundation. By means of on-site industrial verification, a false alarm rate of the researched intelligent safety monitoring system was significantly reduced, and an ability to actively identify potential hazards and an intelligent level of inspection were effectively enhanced. Finally, the development trends of the new-generation coal mine intelligent safety monitoring system were prospected. It was indicated that in the future, efforts should be devoted to formulating a unified communication protocol standard platform, developing vertical large models for coal mine safety, constructing an intelligent system for heterogeneous inspection robot groups, and ultimately forming a new paradigm of digital and intelligent precise disaster prevention in mines, so as to provide theoretical and technical support for comprehensively improving the intrinsic safety level of coal mines.

Key words: intelligent safety monitoring system; "cloud-edge-end" architecture; intelligent sensing; multi-hazard early warning; communication-computation-control integrated technologies; inspection robot; large language model

我国煤炭资源赋存条件复杂,井工煤矿数量超过九成,平均开采深度已达到600 m以上,煤矿生产面临着煤与瓦斯突出、突水、发火、顶板冲击地压和煤尘等各类灾害隐患[1-5]. 有效监测各种风险隐患,提前预警控制致灾因素,防范事故发生,保障生产安全一直是煤矿的头等大事. 目前,我国煤矿均配备了煤矿安全监控系统,这是煤矿安全生产的重要保障系统,在防范和减少煤矿重特大事故发挥了重要的监控、预警作用,尤其是在防范瓦斯窒息、爆炸及突出事故方面,安全监控系统发挥着不可替代的重要作用[6-7].

2016年,国家发布实施《煤矿安全监控系统升级改造技术方案》5号文件,明确提出了包括传输数字化、增强抗电磁干扰能力、推广应用先进传感技术及装备等13项升级改造要求,推动了煤矿安全监控系统的全面升级和改造[8]. 2020年初,国家发展改革委、国家能源局等八部委联合发布了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的通知,提出到2035年各类煤矿基本实现智能化,建成智能感知、智能决策、自动执行的煤矿智能化体系[9]. 2024年,应急管理部、国家发展改革委等七部委联合印发了《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》的通知,要求2026年实现环境智能感知、系统智能联动、重大灾害风险智能预警[10].

然而,传统的安全监测监控系统采用"监测—报警—断电"被动响应模式,无法满足煤矿安全智能化"主动预警、协同控制"的建设需求[11]. 根据行业统计,传统催化燃烧式甲烷传感器在井下高湿、高尘环境中平均连续无故障运行时间不足30 d,年均误报率普遍高于15%;井下通信制式标准不统一,协议兼容率低于60%;隐患辨识仍严重依赖人工巡查,数智化协同处置能力薄弱. 这表明,现有技术体系已进入瓶颈期,亟待系统性重构.

1 新一代智能安全监控系统内涵及关键问题

1.1 亟待攻克的三大核心技术问题

针对现有监控系统在感知、通信、算力、决策、控制等方面存在的具体表现[12-13],本文进一步聚焦提炼出以下三大核心技术问题.

感知层:多维灾害前兆信息"测不全、测不准、辨不出". 传感器普遍缺乏自校准、自诊断、互操作能力,零误报目标尚未实现;瓦斯、火灾标志性气体等低浓度精准检测存在技术盲区;人的不安全行为、设备不安全状态仍高度依赖人工巡检.

边缘层：数据汇聚与实时控制“不通畅、算不动、控不精”. 井下“最后 1 km”通信协议“七国八制”，全 IP 本安传输尚未普及；边缘计算资源缺乏针对安全场景的动态优化策略，就地协同控制逻辑固化、响应滞后.

云平台：多源异构信息“融不深、模型泛化弱、决策靠经验”. 地质、监测、视频、人员定位等信息缺乏统一时空坐标，基于透明地质的灾害融合监测与预警尚处于起步阶段；风险判识与处置高度依赖专家经验，数智化辅助决策能力薄弱.

上述三大问题相互交织，新一代煤矿智能安全监控系统必须系统性破解相关技术瓶颈.

1.2　新一代智能安全监控系统内涵

区别于传统系统，新一代煤矿智能安全监控系统通过物联网、大数据、人工智能等技术深度融合，将实现全面感知、智能预警与自动化控制，其核心内涵如下：

监控对象拓展：从单一“环境参数”监测升级为“人-机-环-管”全要素感知.

监控范围延伸：从固定点离散监测演进为“固定传感器＋移动巡检装置”立体化覆盖.

功能范式跃迁：从被动响应（监测—报警—断电）跃升为主动预警（风险趋势预测、智能分析辨识、隐患早期锁定）＋协同控制（设备联动、应急指挥、系统自优化）.

系统定位重构：不再是独立封闭子系统，而是矿山安全领域核心业务的工业互联网开放式管控平台，其数据底座与平台完全统一，破除“信息烟囱”.

2　总体架构：基于“云-边-端”的新一代煤矿智能安全监控系统

新一代“云-边-端”煤矿智能安全监控系统架构如图 1 所示. “端”是指系统中的终端感知设备，如各类传感器、断电仪、报警器、摄像头等，通过多模态检测技术实现灾害前兆特征立体化多模态精准感知. 边缘侧利用通算控一体化装置，集成轻量化的判识与预警模型，主要承载灾害监测信息井下一站式汇聚、重大风险与隐患本地判识、报（预）警就地控制. 云平台基于统一数字底座的微服务集群部署模式，主要承载瓦斯、水、火等灾害信息统一采集、一体化监测、数据智能分析、避灾路径辅助规划、预警集成、协同控制、故障模拟仿真等功能. 该系统通过将矿端部署的 AI 一体机与工业互联网云平台实时互联，完成数据脱敏、样本上传、模型训练调优剪裁与下载、数字孪生场景制作与安全受控设备全生命周期管理等任务.



图 1　新一代“云-边-端”煤矿智能安全监控系统总体架构

Fig. 1　Architecture of the new-generation “cloud-edge-end” intelligent safety monitoring system for coal mines

2.1 端设备

端设备层,也叫感知层,由大量感知环境、机电、人员等信息的传感器构成,如风速、风量、温度、物探等传感器,甲烷、一氧化碳、锚杆压力、钻孔应力、顶板离层环境等传感器,跑偏、堆煤、烟雾等传感器,煤仓料位计、水位计等传感器以及摄像头、广播终端、人员定位卡等设备.该层主要负责环境特征参数的多模精准感知与控制指令执行,需具备以下技术特性:

1)工作可靠性保障.传感器抗电磁干扰技术、电源波动内部保护技术、有效信号识别及滤波技术、故障自诊断技术等是保障传感器可靠、稳定运行的前提.

2)传感设备智能化.在保障传感器准确可靠的基础上,实现传感设备身份识别、精度自校准、故障自诊断、参数趋势判断、调校提醒、元件寿命记录等功能.

3)传感设备动态注册接入.具有接入类型识别及地址自动分配功能,即插即用,极大方便设备现场安装使用.

4)网络数据侦听.实现传感器间的数据交互与容错,以及对控制指令的快速响应,有效提高系统工作可靠性.

2.2 边缘侧

边缘数据中心是以井下区域协同控制为目标,构建生产场所信息化设备数据的统一采集、信息的统一传输,实现工作面、采区及全矿井主要灾害数据在控制层的深度融合及快速联动;当工作场所环境参数出现异常时实现就地协同控制,提升反应速度和控制可靠性.边缘数据中心应具备网络通信、计算、存储、分析、推理与控制能力.

网络传输层,采用工业以太环网与F5G相结合的方式,设计传输层网络平台,实现海量数据实时、可靠的高速传输.工业以太环网技术相对成熟,并在现场应用多年.F5G作为第5代固定传输网络已开始在煤矿使用,主要包括工业光环网头端设备(Optical Ring Head,ORH)、工业光环网终端设备(Optical Ring End,ORE)、无源光环网设备(Optical Ring Passive,ORP)(用于连接ORH和ORE,实现1个ORH工业光接口连接到多个ORE设备).

2.3 云平台

云平台,由煤矿安全融合监控系统终端、大数据存储计算服务等模块组成,负责全矿融合监视与全矿优化控制、全矿隐患识别模型的训练等任务.除了具备通用的实时监测、报表打印、报警处置、人机交互控制等功能外,还应具备如下技术特性:

在管理方面,宜实现安全精益管理:围绕语音识别、手写识别、自然语言处理、情景感知驱动技术等开展研究,实现调度管理信息便捷化录入与人机交互;基于工作流与移动互联技术,实现安全监测异常处置任务工单化、管控流程标准化、执行过程可视化、数据指标化.

在数据的融合分析利用方面,应实现基于数据驱动的异常识别与趋势预测.在应用层应基于音视频、物联网感知等安全监测大数据,构建成因机理与大数据分析互馈的柔性预警模型,实现监测点异常早期筛选、自动锁定、回溯分析与趋势预测.

在系统控制方面,应实现基于三层递阶安全协同控制:利用信息融合技术,构建监测点就地控制、区域协同控制、全矿优化控制为一体的三层递阶协同控制模型,负责云、边、端整个系统的协同控制分析、执行的统一调度,实现区域爆炸风险精细管控、分级分区超前断电、智能调风、通信联动、应急智能指挥等.

3 新一代智能安全监控系统关键技术研究

3.1 端设备智能感知技术

端设备层突破了传感器智能化共性技术、全激光气体浓度高精度检测、精准测风超声波流速检测、基于机器视觉的隐患与违章自动识别、智能物探等关键技术,并成功研制了一系列智能感知装置.

3.1.1 传感器智能化共性技术

针对当前传感器普遍缺乏自校准、自诊断、互操作等特性而难以实现“零误报”的现状[14-15],应通过对传感器智能化与物联网特性共性技术进行系统性整合与创新,推动传感器从单一感知单元向具备全链路智能的“传感智能体”跨越,系统架构如图2所示.智能化技术具有自校准、自诊断、自适应、智能组态、自推演与自学习等特性,使其能够对数字化的感知数据进行实时分析、计算,并实现自动调校、平衡、补偿与量程选择;物联网技术则涵盖自动描述、自动识别、自动组织、互操作与数据安全等特性,具备“即联即用”能力,可自动向系统报告其位置、功能与状态.通过共性技术的深度融合,传感器不仅能实现感知能力的提升,更能在系统层面完成自我描述、自主协同与闭环优化,从而真正支撑高可靠、自适应、可互操作的智

能感知系统.

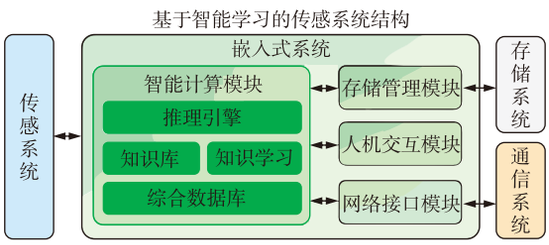


图 2　传感智能体架构

Fig. 2　Architecture of the sensing agent

3.1.2　全激光气体浓度高精度检测技术

全激光气体浓度高精度检测技术覆盖了近红外和中红外波段，涉及到 CH_4, C_2H_2, C_2H_4, O_2, CO_2, CO 等典型气体浓度的高精度检测. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)(如图 3 所示)，采用“测量光路＋参考光路”，实现了井下气体浓度全激光高精度检测和传感器的自校准. 通过谐波解调波形分析，识别自身故障、信号干扰等异常状况，保障传感器可靠运行，实现了近零误报. 激光甲烷传感器的测量分辨率为 1.0×10^{-6}，在近零点区域分辨率达到 0.1×10^{-6}，测量精度高达 ±3%；C_2H_2, C_2H_4 浓度分辨率为 0.1×10^{-6}，测量范围为 0～200.0×10^{-6}；激光 CO 传感器采用 4.6 μm 带间级联激光器(ICL)，分辨率达 1.0×10^{-6}，有效克服了井下柴油车尾气(NO_x)、氢气(H_2)等干扰；O_2 浓度实现了单光路自校准，分辨率为 0.1%，测量范围为 0～30%.

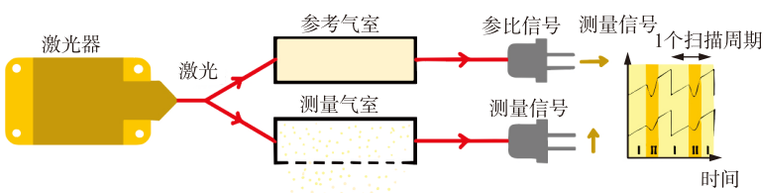
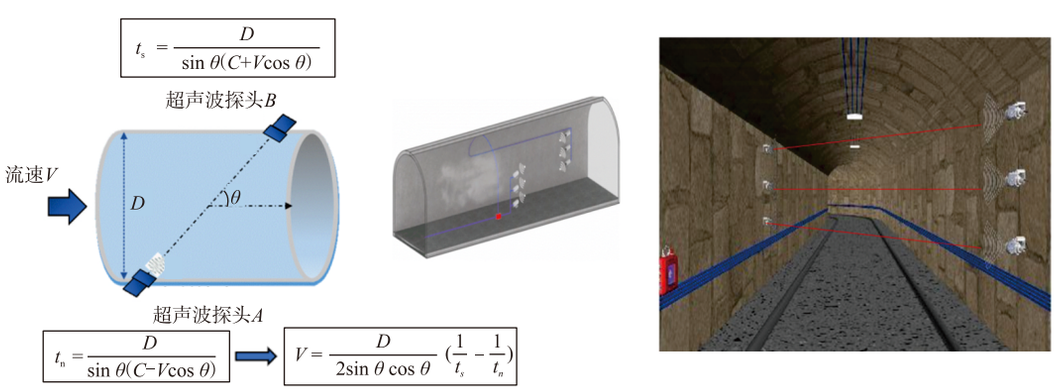


图 3　激光气体自校准原理

Fig 3　Principle of laser gas self-calibration

3.1.3　精准风速、风量测量技术

风速是影响和调控井下热动力灾害发生、发展与演化的一个关键参数[16]. 针对巷道低风速在线测量、断面风量测量不准确的难题，采用超声时差法原理实现点风速到线风速测量，根据同一时间的多条线风速实时计算断面风量，原理如图 4 所示.



注：D 为巷道直径，m；C 为超声波速度，m/s；V 为巷道风速，m/s；t_s 为超声波顺流渡越时间，s；t_n 为超声波逆流渡越时间，s；θ 为声道与巷道轴线之间的夹角，(°).

图 4　超声波时差法流速测量原理及断面平均流速测量方法

Fig. 4　Principle of flow velocity measurement using the ultrasonic time-of-flight and method for measuring average cross-sectional flow velocity

基于超声时差技术研发的点式风速传感器，具有无惯性误差、动态精度高等特点，起动风速低至 0.02 m/s，测量上限高达 25 m/s. 基于“多声道超声时差”原理和“流场重构”算法，研发了全断面超声风速传感器，为智能通风风量监测提供了精准监测数据. 管道流量传感器，具有检测下限低(起动流速 0.02 m/s)、测量范围宽(量程比为 1∶600)、测量精度高(1 级)、无压损、适应性及稳定性好等优点.

3.1.4　机器视觉与隐患自动识别

矿山智能视觉识别系统融合了目标快速检

测、三维激光测量、多模态判识模型等技术，基于机器视觉的矿山隐患图像识别智能终端，实现了人的不安全行为、设备的不安全状态、环境的不安全因素等场景识别；同时开发并应用人员闯入识别、穿戴识别、片帮冒顶识别、大块异物识别、皮带啃边识别、密闭门启封识别等多种场景识别算法，准确率≥95%. 基于机器视觉隐患与违章自动判识，实现了57种“人-机-环”典型隐患场景的准确识别、报警及控制输出，系统架构如图5所示.

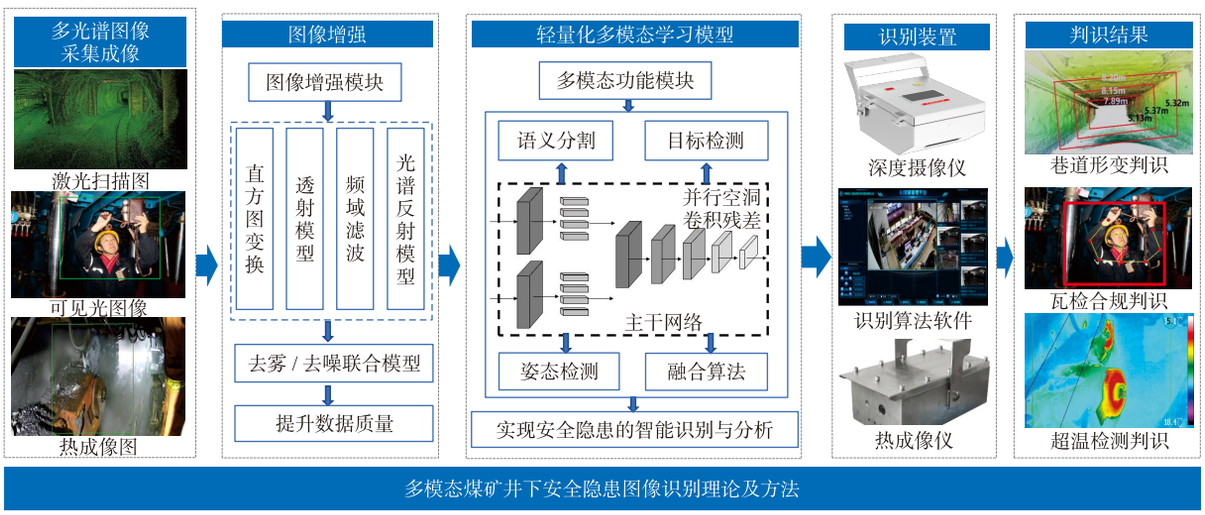


图5 基于机器视觉的多模态煤矿井下安全隐患图像识别方法

Fig. 5 A machine vision-based multimodal image recognition method for identifying safety hazards in underground coal mines

3.1.5 智能物探装备

地质条件的精细探查是基础环节，是安全开采的基础保障[17-18]. 智能物探集成了物联网与人工智能技术，通过多物理场协同感知与智能解译，实现对地质构造与灾害源的精准探测. 矿用隔爆兼本安型地震电法监测装置，支持36通道同步并行采集，可识别1 μV级微弱信号，实现对地层破裂与地下水运移的联动动态监测；矿用地质雷达探测装置，基于高频电磁波技术，具备强抗干扰与自适应算法，可实现煤岩界面的厘米级精度动态识别；矿用长钻孔多参数探测装置，融合钻孔雷达、瞬变电磁等多种方法，攻克了长距离探测与ns级高频信号采样技术，可实现地质构造与含水区的精细探测；矿用随掘无线地震监测系统，基于4G/5G/Wi-Fi通信与高精度同步技术，实现了掘进震动信号的实时无线采集与前方构造的超前解析. 整套装备体系如图6所示，为透明地质构建与灾害超前预警提供了关键技术支撑.

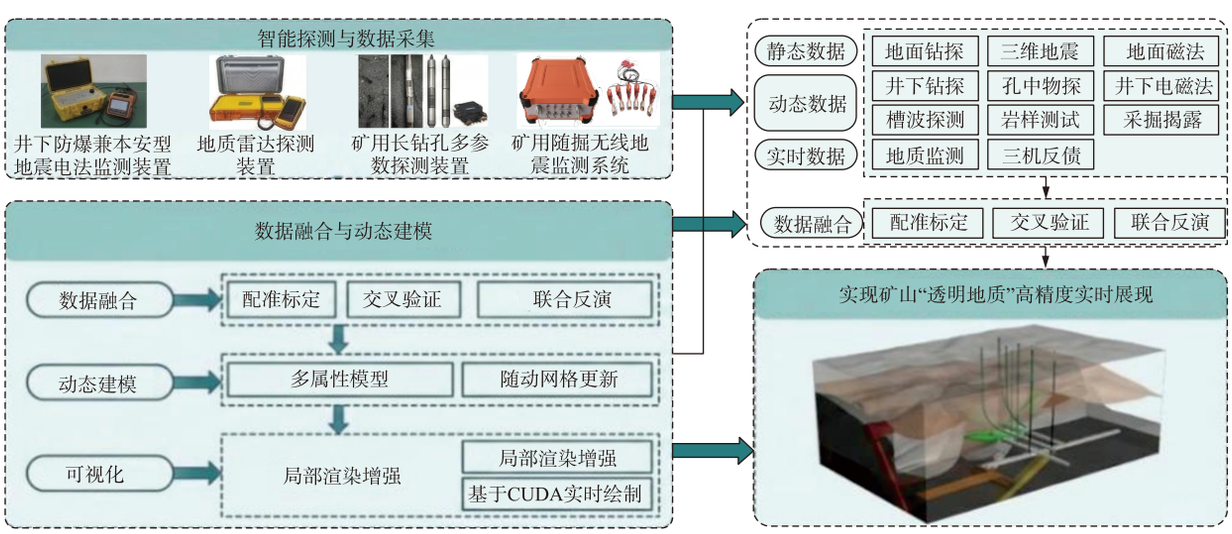


图6 物探装备技术架构

Fig. 6 Technical architecture of geophysical exploration equipment

3.2　“端-边”协同：智能巡检机器人

当前，矿用智能巡检设备正朝着集成化、智能化与协同化方向快速发展[19]. 煤矿智能安全综合巡检设备群架构如图 7 所示，在装备形态上，已形成以轨道式巡检设备、无轨巡检设备（轮履式、飞行巡检、足式巡检）和单兵巡检设备等为代表的多类型技术体系[20]. 这些设备普遍具备隔爆兼本安设计、复杂环境自主导航、多模态感知与边缘智能分析能力，可适应井下狭窄巷道、多障碍、粉尘浓度高及光照条件复杂等极端工况[21].



图 7　煤矿智能安全综合巡检设备群架构

Fig. 7　Architecture of the intelligent safety inspection equipment system for coal mines

3.2.1　矿用轨道式巡检设备

矿用轨道式巡检设备是一种面向煤矿井下掘进巷道、综采工作面、输送带运输、变电所、水泵房等较为固定的场所巡检任务的智能化巡检平台[22-25]，如图 8 和 9 所示. 系统集成惯性测量单元（IMU）、红外热成像、气体浓度监测、可见光视觉识别及振动状态检测等多模态传感单元，可对工作面及沿线环境参数变化、综采工作面直线度以及顶板支护结构完整性进行连续感知，为矿山智能化建设提供基础数据支撑[26-28].

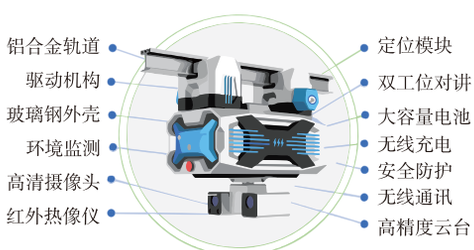


图 8　矿用挂轨巷道巡检机器人

Fig. 8　Track-mounted tunnel inspection robot



图 9　煤矿用轨道式工作面巡检机器人

Fig. 9　Rail-mounted face inspection robot

在系统研发过程中，重点突破了煤矿井下高粉尘、高湿度及强电磁干扰等极端环境条件下巡检机器人的稳定运行与高可靠性关键技术，实现了复杂动态掘进场景中的高精度环境感知、三维结构建模与多维度智能检测；通过梯度防爆结构优化设计、多物理场定向散热系统与高导热防爆材料体系的系统优化，重点突破了高能量密度锂电芯选型与成组优化技术、矿用隔爆型电池管理与动态功率优化控制技术、热失控主动防控与隔爆结构设计、动态功率优化控制、环境适应性强化与智能运维等关键技术，确保全场景高效稳定巡检.

3.2.2　矿用无轨巡检设备

无轨巡检设备主要包括轮式巡检机器人、飞行机器人和足式机器人，如图 10 和 11 所示. 轮式和足式巡检机器人主要面向井下巷道、变电所及其它重要场所的智能化巡检[29-30]. 飞行机器人作为智慧矿山与应急救援体系中的前沿装备，旨在解决井下复杂环境中人员安全风险高、巡检效率低及灾后响应慢等核心难题[31]. 研究重点突破了多源异构感知信息融合技术，综合利用激光雷达、视觉、惯性测量单元及环境传感器等多模态数据，通过时空对齐、特征互补与不确定性建模，提高了环境感知的完整性与鲁棒性；同时，针对粉尘遮挡、特征退化及巷道几何结构单一等典型问题，开展了抗退化定位与建图（SLAM）算法研究，增强了系统在特征稀疏、重复结构及局部遮挡条件下的持续定位能力与地图一致性[32]. 面向煤矿井下

防爆安全要求，需重点解决电机防爆性能与散热效率之间的工程矛盾，通过优化防爆结构设计、系统轻量化设计、热管理路径与能效配置，实现电驱动系统在满足隔爆兼本质安全标准前提下的高效散热与稳定运行，为煤矿无轨巡检装置的长期可靠运行与规模化应用奠定关键技术基础.

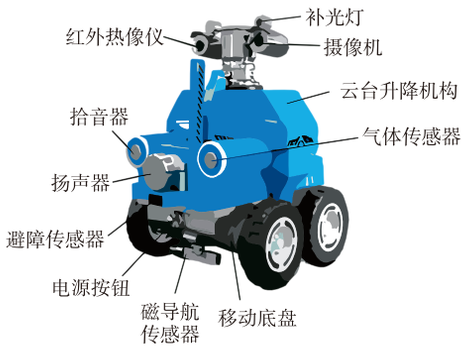


图 10 轮式巡检机器人本体

Fig. 10 The body of the wheeled inspection robot

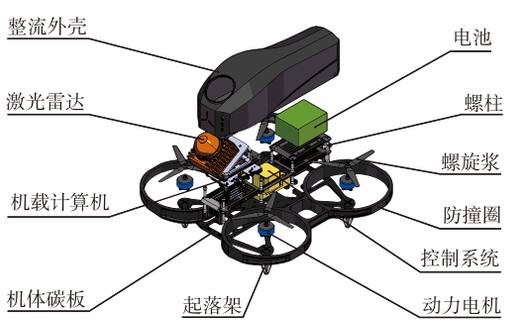


图 11 煤矿井下飞行巡检机器人

Fig. 11 Aerial inspection robot for underground coal mine

3.2.3 单兵巡检设备

单兵巡检设备包含本安型信息矿灯、矿用本安型手表和头盔等，是一种针对井下人员健康体征和环境参数的综合监测设备.

在终端装备层面，针对单兵巡检硬件重点开展了可穿戴设备轻量化与低功耗关键技术研究，系统集成热释电红外测温、光电容积描记(PPG)脉搏波监测以及陀螺仪与惯性定位等多种传感技术，研制了矿用智能健康监测手环、智能手机和智能头盔，实现了对多维生理指标的综合感知与连续监测，系统架构如图 12 所示.

在系统集成与应用层面，单兵巡检应用软件通过多模块集成与多路数据融合技术，实现了井下人员生命体征数据与其所在区域环境监测数据的协同采集与融合传输. 单兵巡检预警平台系统构建了面向“人-机-环”协同感知的数据融合分析与风险判识预警机制，实现了井下作业人员安全状态的立体化、多维度与智能化管控.



图 12 井下人员体征监测系统架构

Fig. 12 Architecture of the underground personnel vital signs monitoring system

3.3 边缘侧智能汇聚与控制

边缘侧主要承接了端设备的发现与接入，IP 化点对点、点对多高速数据交互，多业务设备的一网承载，节点异构网络安全管理，多目标路由自适应流量控制、拥塞控制，多终端协同联动逻辑处理，多节点网络拓扑自动构建等业务功能. 边缘侧突破了“通信最后 1 km”的技术瓶颈，构建了长距离全 IP 本安传感网，形成了井下通算控一体化技术等.

3.3.1 长距离全 IP 本安传感网构建技术

基于轻量级 IP 协议栈、精确时钟同步协议(IEEE 1588)和“光-电-无线”融合传输、本安大功率供电等技术，构建有线为主、无线为辅的井下本安智能传感网，实现传感器全 IP 化通信组网，将工业互联网下沉到端设备，解决设备互操作与时间同步难题，如图 13 和 14 所示.

全 IP 本安传感网有线传输采用研发的单纤收发一体的低功耗 IP 光通信模块、光电复合缆及光电混装连接器，实现端设备供电与光信号共缆传输，解决电信号长距离传输易受干扰及不能 IP 寻址的难题. 开展不等比分光通信技术研究，使该传输网络实现了光纤总线通信，节点数量不低于 16 个；开发轻量级 IP 协议栈，采用时分复用、虚拟 IP 等技术完成终端轻量化 IP 部署，实现了光纤总线端设备全 IP 接入、IP 自动分配、IP 路由、点到点通信、网络数据收发等功能，通信速率达 2 Mbit/s. 全 IP 本安传感网无线传输采用软件无线电和智能天线阵列技术，通过软件配置动态管理发射频谱、自动匹配传输协议，调整天线阵列波束指向，实现频谱自适应敏捷组网，解决不同制式无线信号快速接入问题。

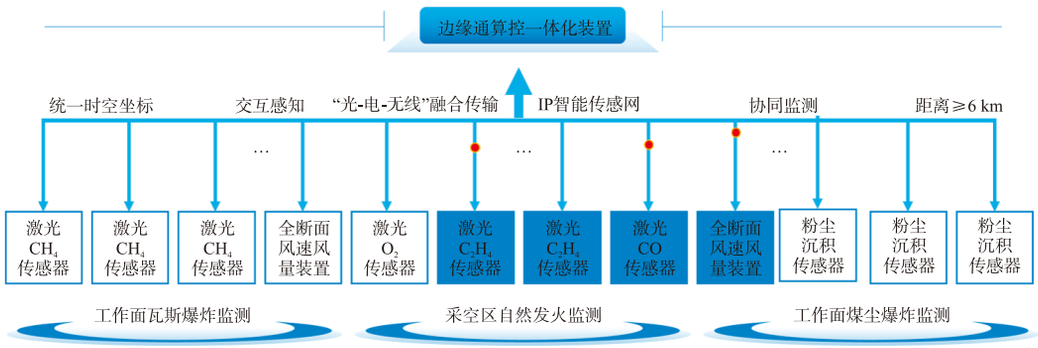


图 13　IP本安智能传感网构建技术

Fig. 13　Technology for constructing an IP-based intrinsically safe intelligent sensor network

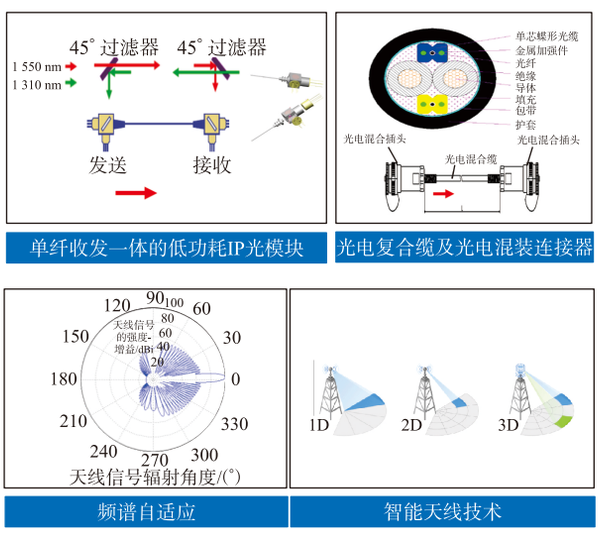


图 14　“光-电-无线”融合传输技术

Fig. 14　“Optical-electrical-wireless” converged transmission technology

3.3.2　井下通算控一体化技术

通过井下“人-机-环”信息并发采集及承载分区域存储技术，数据处理中心可对不同接口及协议数据进行规划、转换、存储、标识处理，生成规范数据结构，实现多业务信息数据的实时采集及分区存储，且本地控制响应时间≤1 s，远程控制响应时间≤2 s. 井下通算控一体化技术，对业务数据进行多因素综合分析，对已发生或潜在危险按照联动预案通知执行机构进行综合控制，应急联动控制响应时间≤4 s. 边缘多业务融合调度技术采用了业务融合调度和抢占执行算法，提高了设备数据信源集成效率，降低了边缘数据周转时间和等待时间，减少了协同管控的响应时间，完善了分布式控制元触发输出的一致性，规范了通信协议标准化并统一了端类设备的数据采集，实现了瓦斯、人员、广播、供电、信息发布5种业务数据融合分析及跨区域协同功能，如图15所示.

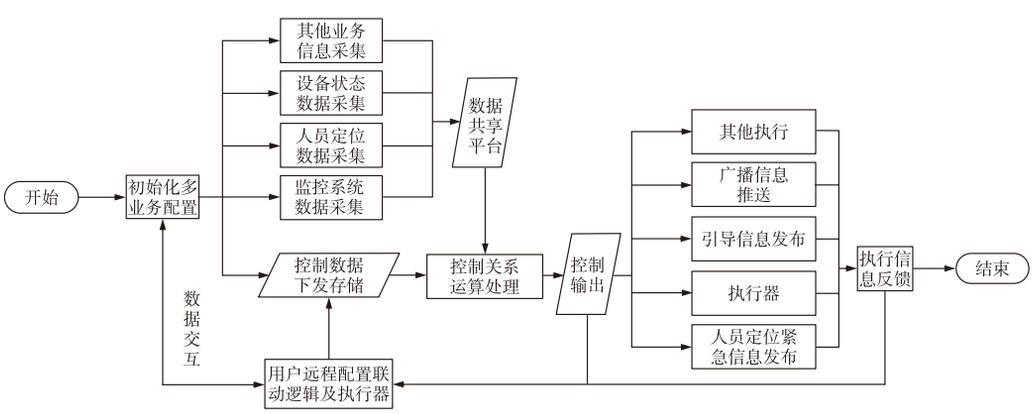


图 15　井下通算控多业务协同控制逻辑

Fig. 15　Control logic for the “communication-computing-control” multiple services coordination

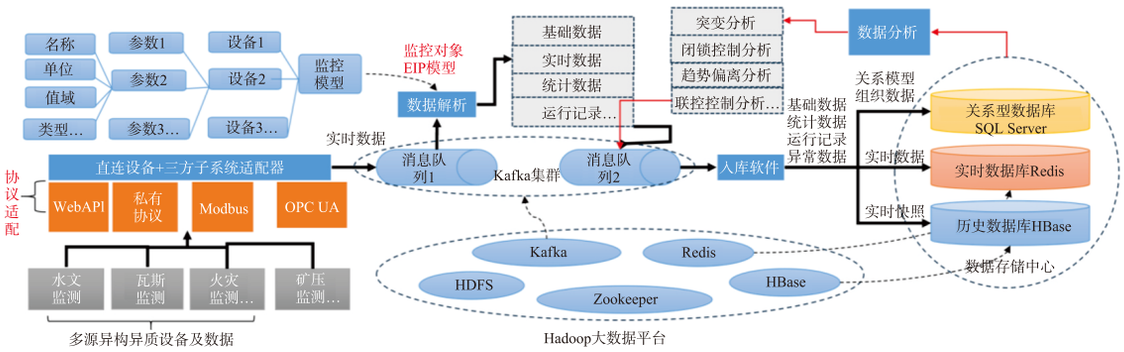
3.4　云平台智能决策与协同管控

国内已初步实现了对煤矿各类灾害的监测报警或预警，但不具备分析、决策能力[33-35]. 云平台目前开发了基于统一数字底座的灾害融合监控预警[36]、多灾种复合监测预警模型以及风险事件数字化协同处置方法等模块.

3.4.1　基于统一数字底座的灾害融合监控预警

统一数字底座构建如图16所示. 针对安全数据多源异构，地质、监测、预警与处置信息割裂，研究了基于统一信息模型的数据采集、解析和治理

技术，构建了统一数字底座，打通了“透明地质-监测预警-协同联动”数据链，实现了基于统一数字底座的多灾害信息融合监测，实现了“一次采集、一数一源、一源多用、授权共享”.



注：WebAPI：网页应用程序接口；Modbus：串行通讯协议；OPC UA：开放式平台通信统一架构；Kafka：分布式流处理平台；HDFS：分布式文件系统；Zookeeper：分布式应用程序协调服务.

图 16 统一数字底座构建

Fig. 16 Building a unified digital foundation

基于数据驱动的作业场所安全态势量化评价，利用机器学习算法实现监测异常自动判识与预测. 全面融合灾害防治过程管理、隐患排查、灾害预警指标与模型、人员违章等数据，按照“人-机-环-管”维度实现“全矿井-采区-作业场所”风险量化评价，实现不同区域安全状况的横向对比与纵向溯源分析.

“云-边-端”系统已经实现了安全监测参数异常自动识别与预测. 从数据形态角度采用滑动时间窗建立了数据特征图谱，进行异常自动识别与预测；实现了瓦斯浓度变化、采空区发火倾向、顶板离层变化、皮带温升等突变、趋势偏离、多窗口微小波动异常自动筛选、锁定、回溯分析及趋势预测.

基于 100 余座煤矿采掘数据、监测预警等信息，中煤科工集团重庆研究院有限公司提出了基于中性参照对象精细网格化的安全态势动态评价方法，如图 17 所示，采用逼近理想解算法（TOPSIS），形成了 15 类专业、11 种典型作业场景的评价模型，初步解决了不同采掘条件安全风险横向量化对比与纵向溯源分析难的问题.

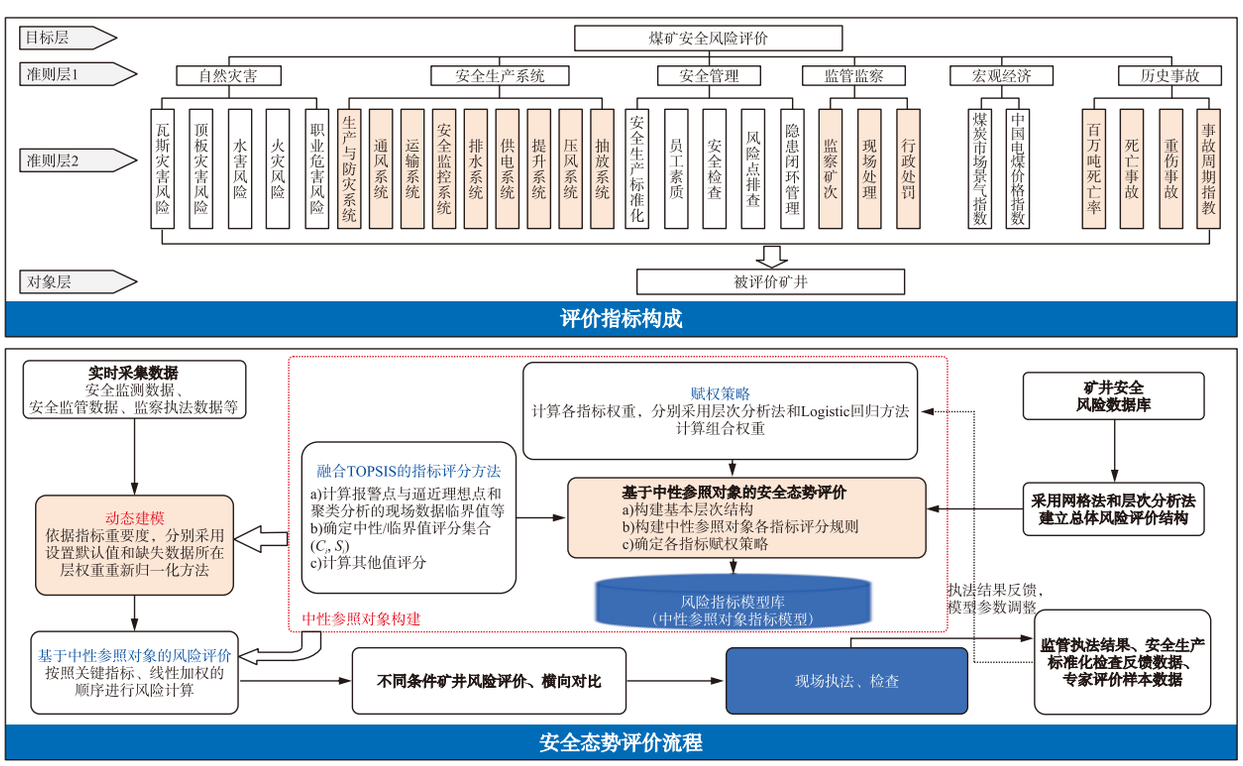


图 17 全矿井安全态势量化评价方法

Fig. 17 Method for the quantitative assessment of the safety status of the entire mine

3.4.2　多灾种复合监测预警模型

复合多灾种耦合灾害的发生受多物理场、多参数耦合作用控制，其内在致灾机理呈现显著的关联性与系统性特征[37-38]. 以事故成因机理为指引，需研发瓦斯、水、火等灾害的预警指标与模型，探索链生灾害融合预警体系[39-40]；基于机器学习算法实现监测异常自动识别与预测，融合灾害防治过程管理、隐患排查等数据，构建“全矿井-采区-作业场所”三级安全态势量化评价模型，以实现风险的横向对比与纵向溯源，如图 18 所示.

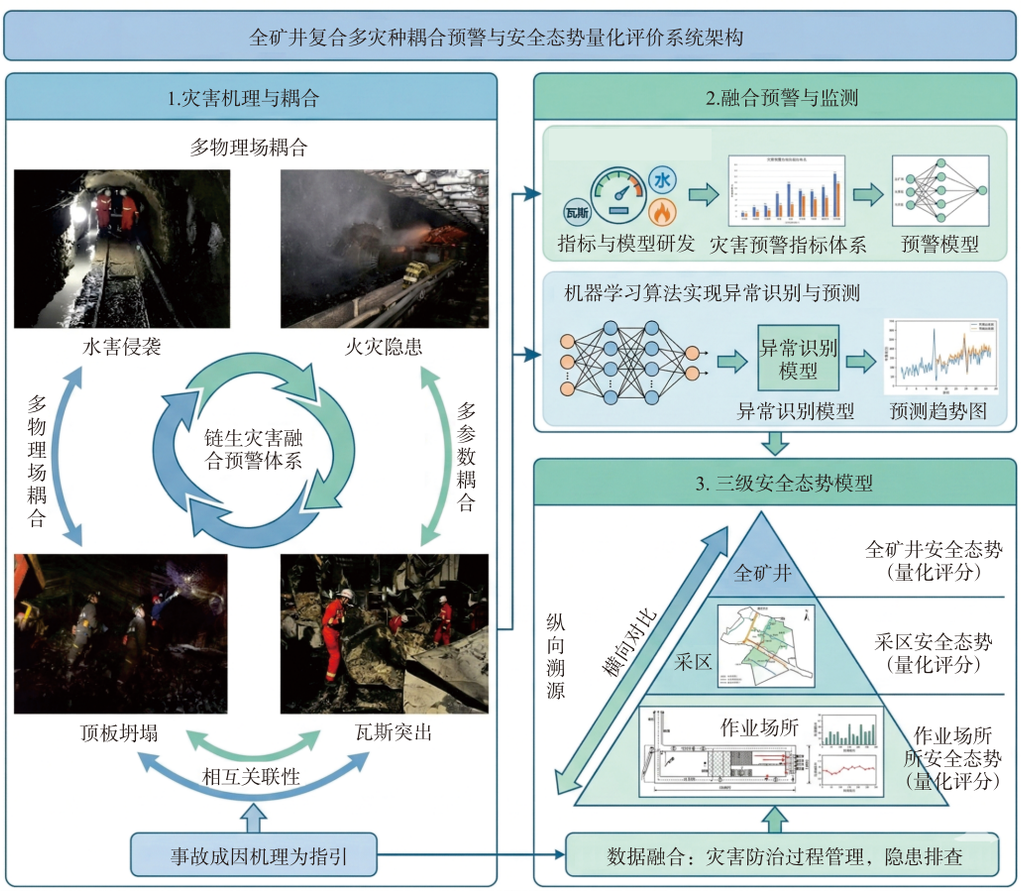


图 18　多灾种复合监测预警模型

Fig. 18　Multi-hazard integrated monitoring and early warning model

3.4.3　风险事件数字化协同处置方法研究

针对风险判识与处置高度依赖专家经验、数智化协同处置能力不足等问题[41-42]，需研究基于深度学习、知识图谱与数字孪生的典型风险事件自动判识、趋势预测、灾害仿真、避灾规划、溯源分析与协同处置技术，建立云边端协同管控模型，实现风险隐患智能分析决策.

“云-边-端”系统建立处置策略库，构建了监测点就地控制、边缘协同控制、全矿云平台优化控制为一体的三层递阶协同控制模型，根据预警结果，实现了井上、下风险预警信息同步发布、分级分区断电、通信联动、自动排水、一键撤人、通风设施自动控制，现场实测闭环控制时间小于 5 s.

4　工程应用验证

目前，新一代煤矿智能安全监控系统已实现灾害一体化监控与预警，基于微服务架构，形成了基于统一时空坐标的数字底座，集成了主要灾害预警指标与模型；以空间（行政区域、井田地质、井巷工程、工作场所）和专业（瓦斯、水、火、矿压、粉尘、通风、地质）2 条主线，研发了具备透明地质、安全监测、机器人瓦斯自动巡检、灾害预警、智能通风、模拟仿真、避灾规划、协同控制等功能为一体的安全数智化监管平台，实现了数据同步、指标融合、功能集成、流程衔接、界面统一，从 2024 年 6 月开始，相关系统已经在国家能源集团、山东能源集团等所属的煤矿进行示范应用，如图 19 所示.



图 19 新一代“云-边-端”智能安全监控系统示范应用

Fig. 19 Demonstration of a new-generation “cloud-edge-end” intelligent safety monitoring system

在煤矿安全监测监控方面，该系统配置了智能瓦斯传感器、一氧化碳传感器共计 30 台，以及采空区火灾多参数在线监测装备、瓦斯探头遮移识别装置、瓦斯抽采钻场自动监钻装置、瓦检作业合规性判识装置、边缘数据中心控制装置及矿用隔爆兼本安型控馈一体装置各 1 套. 工程应用表明，灾害气体全光智能化检测技术的测量精度达到±3%，长期稳定性超过 180 d，煤矿监控值班效率提升近 50%，系统误报率降低 27.3%，安全风险预警准确率达到 95% 以上.

在隐蔽致灾因素精准防控方面，系统综合应用高精度三维地震、随采随掘地震监测、孔中瞬变电磁等多元探测手段，实现了对断层、陷落柱、导水裂隙带等隐蔽致灾体的精准识别与动态管控. 工程实践表明，上述多源探测技术的协同应用使隐蔽致灾因素综合识别准确率达到 85% 以上，探测响应时效提升至 2 h 以内. 同步构建的“煤矿透明地质隐蔽致灾因素动态探查及管理平台”实现了全要素隐蔽致灾数据的集成管理，通过探测数据与三维地质模型的实时联动更新，推动了隐蔽致灾因素管控模式由传统的“静态普查”向“动态探查—智能判识—闭环管理”的系统性转变，显著提升了复杂地质条件下灾害的主动防控能力.

在基于“云-边-端”协同的智能预警技术方面，采用“工业以太环网＋光分支网络/无线网络”方式构建系统，骨干网络速率≥1 000 Mbit/s，分支网络速率≥10 Mbit/s，具备全光网络高速可靠承载与网络自愈、区域信息自主交互与协同控制等功能. 系统的物理检测点容量大于 1.0×10^6，接入矿方现有瓦斯、水、火、顶板、粉尘等子系统数据，最大巡检周期为 1 s，控制时延＜200 ms，且设备标准协议公开. 同时，智能穿戴设备实现了人员健康状态与环境多参数的融合感知，预警响应时间不超过 2 s；创新研发的全断面风速传感器实现了从“点式测风”向“全断面测风”的技术革新，智能通风系统测风准确性达 98% 以上，实现了按需供风的快速响应.

新一代系统在感知准确性、响应实时性、系统开放性及减人增效 4 个维度实现了代际跨越，形成了具备“传感智能化、结点互联化、判识自动化、云边协同化、管控一体化”特征的新一代煤矿安全智能监控系统.

5 新一代煤矿智能安全监控系统展望

5.1 安全监控系统通信协议标准研究

需重点研究设备身份认证机制、“云-边-端”三层通信协议、数据交换共享标准、时间同步方式等协议集，制定支撑“云-边-端”安全监控系统技术架构的行业统一标准（见图 20），实现授权设备或系统无缝接入.

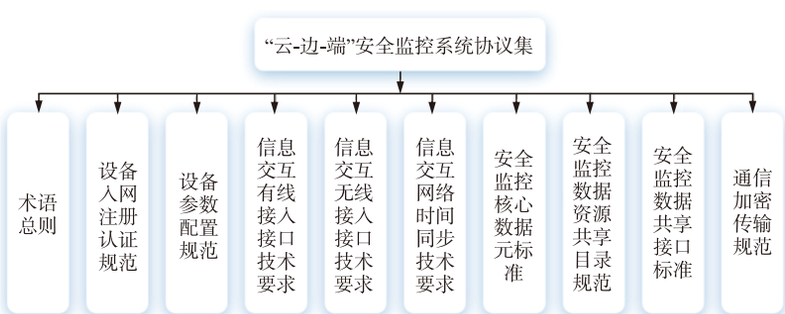


图 20 安全监控系统通信协议标准

Fig. 20 Communication protocol standards for safety monitoring systems

5.2 煤矿安全垂直大模型研发

针对通用大语言模型能力不断提升与煤矿行业垂直大模型缺失的突出矛盾，需基于深度求索 DeepSeek-R1、阿里千问 QwQ-32B 等开源大模

型，构建煤矿领域多模态语料知识库[43]. 利用知识蒸馏和模型微调技术压缩模型体积、提升推理速度，研发煤矿安全垂直大模型（见图 21）并实现矿端轻量化部署，为煤矿安全领域知识智能问答、防灾方案 AI 辅助编审、安全文档智能检索、AI 查数查图等智能化应用场景提供技术支撑.



图 21　煤矿安全垂直大模型

Fig. 21　Domain-specific large models for coal mine safety

5.3　多元异构巡检机器人群体智能协同

针对单一类型巡检设备作业存在感知视角有限、任务执行效率低的技术瓶颈，未来系统应支持挂轨式、轮履式、足式、飞行机器人、人形机器人异构编队[44]，基于强化学习算法，构建基于机器人集群剩余电量、位置、感知载荷动态分配巡检区域的自主任务分配机制；攻关多机器人分布式 SLAM 信息融合协同建图与目标搜索技术，显著提升井下动态环境适应性和协同效率；通过构建 5G 确定性网络，保障协同控制指令的超可靠低时延传输. 通过上述技术的集成与突破，推动煤矿巡检从单点自动化迈向群体智能化，如图 22 所示.

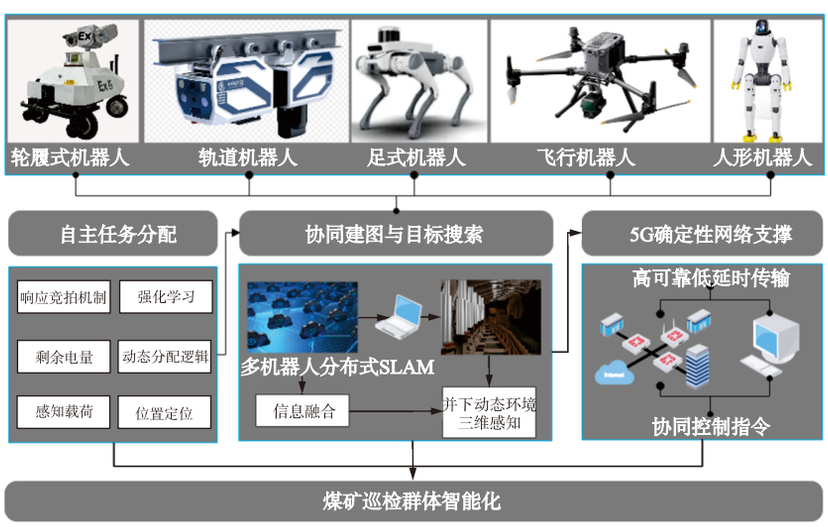


图 22　巡检机器人集群控制架构

Fig. 22　Control architecture for a fleet of inspection robots

6 结 论

1)针对传统煤矿安全监控系统在感知精度、通信互操作与智能决策等方面的系统性瓶颈,界定了新一代智能安全监控系统的内涵特征,明确了其从“监测—报警—断电”被动响应向“主动预警—协同控制—自优化演进”范式跃迁的技术路径,提出了基于“云-边-端”三层架构、融入矿山综合管控平台统一数字底座的系统总体方案.

2)围绕“云-边-端”三层协同,系统攻克了基于TDLAS的全激光气体高精度检测、超声时差法全断面风速重构、机器视觉多模态隐患识别等端侧核心技术;构建了长距离全IP本安传感网与通算控一体化边缘调度机制,闭环控制时间小于5 s;建立了基于统一数字底座的多灾种融合预警体系与TOPSIS安全态势量化评价模型.

3)工程示范验证表明,系统误报率降低27.3%,安全风险预警准确率达到95%以上,监控值班效率提升近50%;隐蔽致灾因素综合识别准确率超过85%,探测响应时效提升至2 h以内;推动了监控系统从“监测报警”向“分析预警”的模式升级,验证了技术体系的先进性与工程可行性.

4)面向未来,系统仍需在统一通信协议标准与设备身份认证、煤矿安全垂直大模型矿端轻量化部署、多元异构巡检机器人群体智能协同3个方向持续深化,推动形成“主动感知-因果诊断-精准控制-共生演进”的矿井数智化精准防灾新范式.

参考文献:

[1] 周 斌,杨兆龙,李树刚,等.真三维应力状态下不同地应力条件对煤与瓦斯突出两相流动力学特征的影响[J].中国矿业大学学报,2025,54(5):1053-1065.
ZHOU Bin, YANG Zhaolong, LI Shugang, et al. Effects of different geo-stress on two-phase flow dynamics of coal-gas out-bursts in true triaxial stress state [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(5): 1053-1065.

[2] 王家臣,杨胜利,李良晖.急倾斜煤层水平分段综放顶板“倾倒-滑塌”破坏模式[J].中国矿业大学学报,2018,47(6):1175-1184.
WANG Jiachen, YANG Shengli, LI Lianghui. Toppling-slumping failure mode in horizontal sublevel top-coal caving face in steeply-inclined seam [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(6): 1175-1184.

[3] 王兆会,王家臣,杨胜利,等.采动应力旋转的内涵、原理、表征与工程应用[J/OL].煤炭学报,1-16[2025-12-23]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0832.
WANG Zhaohui, WANG Jiachen, YANG Shengli, et al. The definition, principle, characterization and application of mining-induced stress rotation [J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-16 [2025-12-23]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0832.

[4] 王 凯,孙加智,杜 锋,等.深部煤岩瓦斯复合动力灾害中围岩与煤层的能量互馈机制[J].中国矿业大学学报,2025,54(6):1242-1260.
WANG Kai, SUN Jiazhi, DU Feng, et al. Energy mutual feedback mechanism between surrounding rock and coal seam indeep coal-gas compound dyname disasters [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(6):1242-1260.

[5] LI Q, YANG S L, YUE H, et al. Study on caving characteristics of roof and floor and law of ground pressure behavior in near-vertical coal seams mining: A three-dimensional similarity simulation experiment [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 59(2): 2155-2188.

[6] 王国法,庞义辉,李 爽,等.基于煤矿时空多源信息感知的智能安控闭环体系[J].矿业安全与环保,2022,49(4):1-11.
WANG Guofa, PANG Yihui, LI Shuang, et al. Intelligent safety closed-loop management and control system based on multi-source information perception in coal mine [J]. Mining Safety Environmental Protection, 2022, 49(4): 1-11.

[7] 樊 荣,许 金. 煤矿安全智能管控技术现状及发展趋势[J].智能矿山,2021,2(1):55-58.
FAN Rong, XU Jin. Current status and development trends of intelligent control technology for coal mine safety [J]. Journal of Intelligent Mine, 2021, 2(1): 55-58.

[8] 国家煤矿安监局.关于印发《煤矿安全监控系统升级改造技术方案》的通知:煤安监函〔2016〕5号[EB/OL].(2016-12-29)[2025-10-10]. https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/agwzlfl/tz_01/201701/t20170103_235131.shtml
National Mine Safety Administration. Notice on the issuance of the “Technical plan for the upgrading and modernisation of coal mine safety monitoring systems”: Coal safety supervision letter [2016] No. 5 [EB/OL].(2016-12-29)[2025-10-10]. https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/agwzlfl/tz_01/201701/t20170103_235131.shtml

[9] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.关于印发

《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的通知：发改能源〔2020〕283 号［EB/OL］.（2020-02-25）［2025-11-10］. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/05/content_5487081.htm
National Development and Reform Commission. Notice on the issuance of the "Guiding opinions on accelerating the development of intelligent coal mines": NDRC energy［2020］No. 283［EB/OL］.（2020-02-25）［2025-11-10］. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/05/content_5487081.htm

［10］ 中华人民共和国应急管理部. 关于印发《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》的通知：矿安〔2024〕42号［EB/OL］.（2024-04-24）［2025-11-10］. https://www.mem.gov.cn:10443/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202404/t20240430_486617.shtml
Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. Notice on the issuance of the "Guiding opinions on deepening the development of intelligent mining to promote safe mining operations": Mine safety［2024］No. 42［EB/OL］.（2024-04-24）［2025-11-10］. https://www.mem.gov.cn:10443/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202404/t20240430_486617.shtml

［11］ 汪丛笑. 煤矿安全监控系统升级改造及关键技术研究［J］. 工矿自动化，2017，43(2)：1-6.
WANG Congxiao. Research on upgrading of coal mine safety monitoring and control system and its key technologies［J］. Journal of Mine Automation，2017，43(2)：1-6.

［12］ 邓　飞. 煤矿安全监控系统研究现状与展望［J］. 矿业安全与环保，2025，52(1)：14-19.
DENG Fei. Research status and prospects of coal mine safety monitoring system［J］. Mining Safety Environmental Protection，2025，52(1)：14-19.

［13］ 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨［J］. 煤炭科学技术，2022，50(1)：1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems［J］. Coal Science and Technology，2022，50(1)：1-27.

［14］ 邓　军，李　鑫，王　凯，等. 矿井火灾智能监测预警技术近20年研究进展及展望［J］. 煤炭科学技术，2024，52(1)：154-177.
DENG Jun，LI Xin，WANG Kai，et al. Research progress and prospect of mine fire intelligent monitoring and early warning technology in recent 20 years［J］. Coal Science and Technology，2024，52(1)：154-177.

［15］ 梁运涛，田富超，冯文彬，等. 我国煤矿气体检测技术研究进展［J］. 煤炭学报，2021，46(6)：1701-1714.
LIANG Yuntao，TIAN Fuchao，FENG Wenbin，et al. Research progress of coal mine gas detection technology in China［J］. Journal of China Coal Society，2021，46(6)：1701-1714.

［16］ 林柏泉，李庆钊，周　延. 煤矿采空区瓦斯与煤自燃复合热动力灾害多场演化研究进展［J］. 煤炭学报，2021，46(6)：1715-1726.
LIN Baiquan，LI Qingzhao，ZHOU Yan. Research advances about multi-field evolution of coupled thermodynamic disasters in coal mine goaf［J］. Journal of China Coal Society，2021，46(6)：1715-1726.

［17］ 袁　亮，张平松. 煤炭精准开采透明地质条件的重构与思考［J］. 煤炭学报，2020，45(7)：2346-2356.
YUAN Liang，ZHANG Pingsong. Framework and thinking of transparent geological conditions for precise mining of coal［J］. Journal of China Coal Society，2020，45(7)：2346-2356.

［18］ 李天斌，许韦豪，马春驰，等. 基于深度学习的隧道微震监测及岩爆预警技术与系统研究［J］. 岩石力学与工程学报，2024，43(5)：1041-1063.
LI Tianbin，XU Weihao，MA Chunchi，et al. Research of technology and system of tunnel microseismic monitoring and rockburst early warning based on deep learning［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(5)：1041-1063.

［19］ 胡而已，葛世荣. 煤矿机器人研发进展与趋势分析［J］. 智能矿山，2021，2(1)：59-74.
HU Eryi，GE Shirong. China mining robot research progress and trend analysis［J］. Journal of Intelligent Mine，2021，2(1)：59-74.

［20］ KONIECZNA-FUŁAWKA M，KOVAL A，NIKOLAKOPOULOS G，et al. Autonomous mobile inspection robots in deep underground mining：The current state of the art and future perspectives［J］. Sensors，2025，25(12)：3598.

［21］ HUANG Z H，GE S R，HE Y H，et al. Research on the intelligent system architecture and control strategy of mining robot crowds［J］. Energies，2024，17(8)：1834.

［22］ 姜效星. 煤矿井下变电所挂轨式巡检机器人设计与实现［J］. 机械工程与自动化，2024(1)：170-172.
JIANG Xiaoxing. Design and implementation of rail mounted inspection robot for underground coal mine substation［J］. Mechanical Engineering & Automation，2024(1)：170-172.

［23］ 朱明亮，苏士龙，陈　骋. 煤矿用双机驱动型吊轨式巡检机器人设计［J］. 煤炭技术，2022，41(6)：202-205.
ZHU Mingliang，SU Shilong，CHEN Cheng. De-

sign of double machine driven hanging rail inspection robot for coal mine [J]. Coal Technology, 2022, 41(6):202-205.

[24] 赵林涛,王舒雨.带式输送机巡检机器人行走结构设计[J].机械管理开发,2026,41(1):141-143.
ZHAO Lintao, WANG Shuyu. Design of walking mechanism for belt conveyor inspection robot [J]. Mechanical Management and Development, 2026, 41(1): 141-143.

[25] 岳少鹏.煤矿带式输送机巡检机器人设计探究[J].机械管理开发,2025,40(4):133-135.
YUE Shaopeng. Design of coal mine belt conveyor inspection robot [J]. Mechanical Management and Development, 2025, 40(4): 133-135.

[26] 任 伟.基于SLAM和虚拟现实的综采工作面巡检系统[J].工矿自动化,2023,49(5):59-65.
REN Wei. A fully mechanized working face inspection system based on SLAM and virtual reality[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(5): 59-65.

[27] 黄西平,杨 飞.综采工作面巡检机器人自主定位方法[J].工矿自动化,2023,49(4):86-91.
HUANG Xiping, YANG Fei. Autonomous positioning method for inspection robots in fully mechanized working face[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(4): 86-91.

[28] 杨学军,王然风,王怀法,等.基于运动过程还原法的液压支架巡检机器人位姿检测[J]. 太原理工大学学报,2020,51(2):162-170.
YANG Xuejun, WANG Ranfeng, WANG Huaifa , et al. Pose measurement of detection robot in hydraulic supports based on the motion process restoration method [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(2): 162-170.

[29] 张 磊,伍章鹏,郑 漫.轮履复合巡检机器人行走机构的设计及动态仿真分析[J].太原学院学报(自然科学版),2024,42(4):38-44.
ZHANG Lei, WU Zhangpeng, ZHENG Man. Design and dynamic simulation analysis of walking mechanism of wheel-track composite inspection robots [J]. Journal of Taiyuan University (Natural Science Edition), 2024, 42(4): 38-44.

[30] 王江华,郭 琦,王延圣.煤矿井下巷道全方位巡检轮式机器人设计分析[J].中国设备工程,2025(20):133-135.
WANG Jianghua, GUO Qi, WANG Yansheng. Design and analysis of an omnidirectional inspection wheeled robot for underground coal mine roadways [J]. China Plant Engineering, 2025(20): 133-135.

[31] 王 岩,马宏伟,赵思远.煤矿井下飞行机器人建模与仿真[J].西安科技大学学报,2020,40(5):805-812.
WANG Yan, MA Hongwei, ZHAO Siyuan. Modeling and simulation of flying robot in underground coal mine [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(5): 805-812.

[32] 邱硕涵,谭章禄,蔡晓梅.基于D_Star算法的巡检机器人路径规划优化研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(5):1011-1018.
QIU Shuohan, TAN Zhanglu, CAI Xiaomei. Research on path planning optimization of inspection robot based on D_Stara lgorithm [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(5): 1011-1018.

[33] 王恩元,刘晓斐,何学秋,等.煤岩动力灾害声电协同监测技术及预警应用[J].中国矿业大学学报,2018,47(5):942-948.
WANG Enyuan, LIU Xiaofei, HE Xueqiu, et al. Acoustic emission and electromagnetic radiation synchronized monitoring technology and early-warning application for coal and rock dynamic disaster [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 942-948.

[34] 王恩元,李忠辉,李保林,等.煤矿瓦斯灾害风险隐患大数据监测预警云平台与应用[J].煤炭科学技术,2022, 50(1): 142-150.
WANG Enyuan, LI Zhonghui, LI Baolin, et al. Big data monitoring and early warning cloud platform for coal mine gas disaster risk and potential danger and its application [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 142-150.

[35] 丁 震,李浩荡,张庆华.煤矿灾害智能预警架构及关键技术研究[J].工矿自动化,2023,49(4):15-22.
DING Zhen, LI Haodang, ZHANG Qinghua. Research on intelligent hazard early warning architecture and key technologies for coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(4): 15-22.

[36] 何 桥.基于统一数字底座的煤矿灾害融合管控平台[J].工矿自动化,2024,50(11):109-117.
HE Qiao. Coal mine disaster integration management and control platform based on unified digital base [J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(11): 109-117.

[37] 姜福兴,杨光宇,魏全德,等.煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望[J].煤炭学报,2018,43(2):333-339.
JIANG Fuxing, YANG Guangyu, WEI Quande, et al. Study and prospect on coal mine composite dynamic disaster real-time prewarning platform [J].

Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 333-339.

[38] 邱　浩，李宏杰，李　文，等. 煤矿水害智能预警系统关键架构及模型研究[J]. 煤炭科学技术，2023，51(7)：197-206.
QIU Hao, LI Hongjie, LI Wen, et al. Research on key architecture and model of coal mine water hazard intelligent early warning system [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 197-206.

[39] 张　帆，葛世荣. 矿山数字孪生构建方法与演化机理[J]. 煤炭学报，2023，48(1)：510-522.
ZHANG Fan, GE Shirong. Construction method and evolution mechanism of mine digital twins [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 510-522.

[40] 何生全，何学秋，宋大钊，等. 冲击地压多参量集成预警模型及智能判识云平台[J]. 中国矿业大学学报，2022，51(5)：850-862.
HE Shengquan, HE Xueqiu, SONG Dazhao, et al. Multi-parameter integrated early warning model and an intelligent identification cloud platform of rockburst [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(5): 850-862.

[41] 齐庆杰，刘文岗，李首滨，等. 煤矿事故隐患消除科技支撑对策研究[J]. 煤炭科学技术，2021，49(4)：20-27.
QI Qingjie, LIU Wengang, LI Shoubin, et al. Study on scientific and technological support countermeasures to eliminate hidden dangers of coal mine accidents [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 20-27.

[42] 贺叔滢，郑文培，田　野，等. 基于遗传算法优化Apriori算法的LNG接收站隐患文本数据关联规则挖掘及预警研究[J]. 中国安全生产科学技术，2025，21(7)：114-119.
HE Shuying, ZHENG Wenpei, TIAN Ye, et al. Research on association rule mining and early warning of hidden danger text data of LNG receiving terminals based on genetic algorithm-optimized apriori algorithm [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(7): 114-119.

[43] 王启飞，赵逸涵，刘　帅，等. 煤矿事故大数据驱动的风险治理模式研究综述[J]. 中国安全科学学报，2024，34(7)：28-37.
WANG Qifei, ZHAO Yihan, LIU Shuai, et al. A review on risk management driven by big data in coal mine accidents [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(7): 28-37.

[44] LINDQVIST B, KARLSSON S, KOVAL A, et al. Multimodality robotic systems: Integrated combined legged-aerial mobility for subterranean search-and-rescue [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 154: 104134.

（责任编辑　沈春妮　仝　腾）