

煤矿安全监控系统技术及智能化发展趋势

靳雷雷 毕明亮 胡洪祥 燕凯乐 翟海峰 李敏

内蒙古铎尖露天煤炭有限责任公司 内蒙古呼和浩特 010000

摘要: 煤矿安全监控系统正朝着智能化、网络化、集成化方向加速演进,已成为保障矿井安全生产的核心支撑。当前技术已从传统的“人盯设备”转向“系统管控”,通过融合物联网、大数据、人工智能等前沿技术,实现对环境、设备、人员的全方位实时监测与智能预警。煤矿安全监控系统不仅要实时监测瓦斯、一氧化碳等危险气体浓度,还需监控通风、供电和运输。智能化煤矿安全监控系统通过整合传感、传输和应用等多种技术,为煤矿生产提供更安全、高效的解决方案。

关键词: 煤矿安全监控; 系统架构; 智能化发展

煤矿安全监控系统的智能化发展标志着计算机技术与煤矿生产安全管理深度融合,智能化监控系统具有自我学习、实时分析和自动化控制特征,提升了煤矿安全管理效率。

一、核心技术构成与功能升级

1. 数据采集层

煤矿安全监控系统的核心技术构成正朝着智能化、集成化方向快速升级,数据采集层作为系统的“感知神经”,其技术演进直接决定了整个监控体系的灵敏度与可靠性。数据采集层:精准感知井下动态的“第一道防线”,数据采集层由各类传感器和智能终端设备构成,负责实时采集井下环境参数与设备运行状态。传统系统主要依赖催化燃烧式甲烷传感器,但存在易受粉尘干扰、零点漂移等问题。当前升级趋势聚焦于以下关键技术:多参数融合传感器:集成瓦斯、一氧化碳、温度、风速等多种检测功能于一体,减少设备冗余,提升布设效率。激光甲烷传感器广泛应用:采用激光吸收光谱技术,检测精度提升至 $\pm 0.05\%$,抗干扰能力强,显著降低误报警率。自诊断与即插即用功能:新系统支持设备自动识别、故障自检,并能提醒定期标校,减轻维护负担。低功耗与高防护设计:传感器普遍达到IP65及以上防护等级,适应潮湿、高尘、强电磁干扰环境。系统整体架构升级:从单一监测到智能闭环控制,现代煤矿安全监控系统已发展为四层架构体系,各层协同实现全面感知、高效传输、智能分析与快速响应:数据传输层,采用工业以太网、RS485、CAN总线或WaveMesh无线网络,构建井下“高速信息通道”。光纤环网的应用使数据传输稳

定性达99.9%,支持秒级巡检周期,远超旧系统30秒以上的延迟。数据处理层,引入边缘计算与AI算法,在分站端即可完成初步数据分析与逻辑判断。例如,通过机器学习模型预测顶板压力变化趋势,实现风险前置预警。部分系统已部署端服务器预处理机制,优化安全等级判定流程。应用层,实现远程监控、智能预警、联动控制等核心功能:支持五级预警机制,当瓦斯浓度超限时自动触发区域断电;与人员定位、应急广播系统联动,确保30秒内启动分级撤人程序;提供三维GIS可视化界面,直观展示井下安全态势^[1]。功能升级带来的实际效益,安全性显著增强:系统抗电磁干扰能力提升,误报警率大幅下降;顶板安全系数提高30%。运维效率提升:自诊断功能帮助提前发现设备隐患,减少突发故障;系统稳定性提升至15天以上无故障运行。

2. 数据传输层

煤矿安全监控系统的数据传输层是系统实现井下与地面信息互通的核心枢纽,承担着将传感器采集的数据稳定、可靠、高效地传送到地面监控中心的关键任务。随着技术发展,该层级已从早期模拟信号传输全面升级为全数字化传输架构,显著提升了抗干扰能力和系统响应速度。数据传输层的核心构成,传输网络类型,有线传输:主流采用工业以太网、RS485、CAN总线等技术,支持长距离、高带宽、低延迟的数据交互。其中工业以太网在“十三五”末成为强制推广方向,具备良好的扩展性和兼容性。无线传输:应用WaveMesh、Zigbee、Wi-Fi、RFID等无线通信技术,适用于移动设备监测和复杂巷道环境,增强布设灵活性。通信网络结构,树状

结构：分站通过主干电缆逐级串联，结构简单但存在单点故障风险。环形结构：各分站形成闭环连接，具备链路冗余能力，一旦某段线路中断可自动切换路径，保障通信连续性。现场总线结构（如CAN）：支持多节点、双向串行通信，实现智能化设备直接接入，提升系统集成度与响应效率。安全与可靠性设计，系统需通过静电放电3级、电磁辐射2级等EMC抗干扰测试，确保在井下强电磁环境下稳定运行。传输电缆独立敷设，避免与动力电缆并行，减少信号干扰；同时采用屏蔽双绞线或光纤提升抗扰性能。支持数据加密与身份认证机制，依据《煤矿数据采集与传输技术要求》中的信息安全标准，防范数据篡改、泄露等网络威胁。功能升级的关键方向，传输全面数字化，实现从传感器到分站、再到中心站的全程数字信号传输，取代传统模拟量传输方式，消除因变频设备运行导致的信号畸变问题，提高数据准确性。多网融合与联动能力增强，推动安全监控系统与人员定位、应急广播、视频监控等系统在井下深度融合，构建“监测—预警—联动—处置”闭环。例如，瓦斯超限时可自动触发声光报警、切断电源并启动撤人程序。自诊断与智能维护，新增系统自诊断功能，可定期检测传感器标校状态、设备连接异常等问题，提前预警潜在故障，降低误报率和维护成本。巡检周期与响应速度优化，升级后系统巡检周期缩短至20秒以内，异地断电响应时间压缩至55秒内，大幅提升事故应对效率。支持大数据与远程可视化，数据传输层为上层平台提供高质量数据流，支撑三维GIS可视化展示、远程调度指挥及AI驱动的智能预警分析，助力矿井向智能化、无人化演进。

3. 数据处理层

核心技术构成：以数据处理为中心的多技术融合，煤矿安全监控系统的数据处理层并非孤立存在，而是依托于传感器技术、网络通信技术和数据分析技术共同构建的技术闭环：传感器技术：作为数据采集的“神经末梢”，负责将井下瓦斯浓度、一氧化碳、风速、温度、压力等物理化学量实时转化为电信号。近年来，激光甲烷传感器的应用显著提升了抗干扰能力和检测精度，减少了误报警现象。网络通信技术：支撑数据从井下到地面的高速稳定传输。系统普遍采用RS485、CAN总线或光纤混合组网，实现有线与无线、定点与巡检结合，保障数据传输的连续性和可靠性。数据处理与分析技术：数据处理层接收来自前端的数据流，进行清洗、校正、融合和智能分析。通过大数据算法和机器学习模型，系统

可对异常趋势进行预测预警，如瓦斯积聚趋势判断、设备故障预判等，推动监控由“被动响应”向“主动预防”转变。功能升级：从单一监控到智能预测预警一体化，随着《煤矿安全监控系统升级改造技术方案》的推进，数据处理层的功能实现了质的飞跃：多系统融合与信息共享，打破“信息孤岛”，实现与人员定位、应急广播、矿压监测、运输调度等系统的深度融合。数据统一汇聚至数据中心，形成全局视图，支持跨系统联动控制，例如瓦斯超限时自动启动断电、广播通知并锁定区域人员动向。智能化功能增强，引入自诊断、自评估功能，系统能定期检查传感器状态、标校周期、电源健康等，提前发现潜在故障点。支持三维GIS可视化展示，将抽象数据映射为直观的空间动态图谱，提升管理人员的情景感知能力。边缘计算与端侧预处理优化，为解决数据处理延迟问题，部分先进系统在井下端服务器进行环境信息预处理，计算安全等级后再上传，有效减轻中心负荷，提升响应速度。远程管理与决策支持，数据处理结果不仅用于现场控制，还通过B/S架构平台支持PC端、移动端访问，实现远程监控与调度指挥。系统生成日报、月报、趋势图、报警统计等报表，辅助管理层优化生产组织和安全投入。发展趋势：迈向全面智能化与平台化，未来煤矿安全监控的数据处理层将进一步深度融合物联网、人工智能和云计算技术，构建统一的智能化平台：实现全矿井数据的统一建模与语义解析（如采用OPC UA+RSM方法），解决异构系统互操作难题；发展基于深度学习的风险预测模型，提升对复杂灾害（如煤与瓦斯突出）的早期识别能力；推动标准化建设，提升系统兼容性与可扩展性，支撑煤矿整体数字化转型。

二、智能化发展趋势显著

1. 核心技术趋势：多技术深度融合

当前煤矿安全监控的智能化升级，主要依托以下几项关键技术的协同作用：AI视频智能识别，通过部署AI摄像机和视频分析系统，实现对人员行为、设备状态和环境风险的实时智能识别。例如，系统可自动识别未戴安全帽、区域入侵、违规操作等10类不安全行为，并即时触发语音报警。中国矿业大学研发的“慧眼神瞳”技术，已构建涵盖六大类118种场景的安全隐患识别模型，显著提升监管效率。物联网与工业互联网融合，利用传感器网络将井下瓦斯浓度、温度、湿度、设备运行状态等数据实时上传，结合工业互联网平台实现大规模数据处理与远程集中管控，形成“人一机一环”全域感知体

系。5G+边缘计算赋能低延时响应，借助5G通信和边缘计算设备，关键数据可在井下本地快速处理，减少传输延迟，确保紧急情况下的毫秒级响应。便携式本安型图像处理摄像机已在多个矿井部署，实现“云-边-端”协同的智能预警架构。大数据与智能预警系统，基于历史数据和机器学习算法，系统可预测潜在事故风险，如瓦斯突出、顶板塌陷等，推动安全管理由被动应对转向主动预防。

2. 系统化建设：迈向全面协同运行

根据《煤矿智能化发展蓝皮书》，我国正推动煤矿从“局部智能”向“系统智能”跃迁^[1]。智能通风系统：根据井下环境动态调节风量风速，保障空气质量；智能运输系统：对带式输送机的运量、带速、滚筒温度等参数进行远程监控与自动调控；综合管控平台：集成地质保障、采掘、供电、排水等多个子系统，实现“一张图”精准调度。

三、未来重点发展方向

煤矿安全监控系统的智能化未来将朝着更精准、更高效、更协同的方向深度演进，核心在于从“被动响应”转向“主动预测”与“闭环防控”。

1. 多模态融合感知与全域风险识别

通过整合视频监控、环境传感器、设备运行数据、地质信息等多源异构数据，构建矿井“数据画像”，实现对瓦斯、水害、顶板压力、火灾等灾害因素的三维透明化建模。AI系统可基于深度学习算法，自动识别潜在风险模式，如异常温升、气体浓度变化趋势、岩层位移等，提前预警隐性风险，突破传统人工巡检的局限性。

2. AI大模型与垂直场景深度融合

未来将推动通用人工智能大模型与煤矿专业场景结合，打造“煤矿专用AI模型”。这类模型不仅能理解监控画面中的人员行为（如未戴安全帽、违规穿越）、设备状态（如皮带跑偏、支架失稳），还能结合历史事故库进行推理，提供处置建议。例如，“煤矿视觉AI一体化管控平台”已实现96%以上的识别准确率，在低光照、高粉尘环境下仍能稳定运行，成为“24小时AI哨兵”。

3. 智能预警与自动闭环控制联动

新一代系统不再局限于“发现即报警”，而是打通

“感知—分析—决策—执行”全链路。一旦AI识别出危险行为或设备异常，可自动触发应急机制，如切断电源、启动喷雾降尘、调度救援路径等，实现风险处置的自动化与最优化。这种“智防”模式显著提升了响应速度和处置效率，真正实现从“人防”到“技防”再到“智控”的跃迁。

4. “云-边-端”协同架构支撑实时性需求

为应对井下复杂环境下的低延迟要求，系统采用“边缘计算+云端训练”的协同架构。前端摄像头内置AI芯片，实现本地快速识别；边缘服务器处理区域级数据融合；云端则负责模型迭代优化与全局调度，确保关键指令传输延迟低于200毫秒。这一架构已在国家能源集团、山东能源等大型煤企落地应用，支撑起“智能生产一张图”的精准调度。

5. 构建标准化、可复制的智能管控体系

当前行业正由“单点智能”向“系统智慧”升级，推动建立统一的技术规范与标准体系。目标是实现不同厂商系统间的互联互通，打破“信息孤岛”，形成覆盖开拓、采掘、运输、通风等全流程的智能化协同运行机制。例如，中国煤科常州研究院推出的“智能煤流运输管控系统”已在200多座煤矿部署，形成可推广的“煤科样板”。

6. 持续迭代与自主学习能力增强

智能化系统将建立反馈机制，收集实际运行中的误报、漏报案例，持续优化算法模型。同时跟踪最新AI进展，引入自监督学习、小样本学习等新技术，降低对标注数据的依赖，提升系统在新场景下的适应能力。

总之，煤矿安全监控系统的智能化升级不仅是技术变革，更是安全管理理念的革新。它正在重塑煤矿生产方式，推动行业向本质安全、高效低碳迈进。

参考文献

- [1] 王鹏. 煤矿安全监控系统智能化现状及发展[J]. 能源与节能, 2023, (2): 153-155.
- [2] 牛嘉. 煤矿安全监控系统智能化现状及发展[J]. 能源与节能, 2022, (1): 138-139.