

煤矿安全监控系统优化与传感器精细化管理探析

高永金

中煤黄家沟（临县）煤业有限公司，中国·山西 吕梁 033000

摘要：煤矿安全监控系统优化与传感器精细化管理是保障矿井安全生产的核心任务。当前，煤矿安全监控系统存在诸多突出问题，如多系统间形成信息孤岛，数据无法共享，导致难以综合研判灾害情况；传感器布局存在盲区，无法全面感知采掘动态风险；传感器管理薄弱，标校不及时、维护不到位，致使数据漂移、误报频繁，严重制约了灾害预警的及时性与准确性。本文深入分析了监控系统在多系统融合、监测网络拓展、基础设施标准化等方面的优化实践。在多系统融合上，构建基于统一工业以太网及 OPC UA 等标准化协议的数据融合平台，打破信息壁垒；监测网络拓展至盲巷、密闭区等隐蔽空间，采用多点式无线传感器或分布式光纤测温测振系统实现全矿井覆盖；基础设施整治则聚焦传输线路、供电保障与安装工艺，确保系统可靠运行。重点探讨了传感器周期性标校、基于风险的动态布局调整、设备全生命周期管理等精细化策略。通过系统优化与精细化管理，显著增强了监测覆盖的全面性与数据可靠性，有效提升了应急联动响应速度与整体防控能力。这一系列探析为煤矿构建高效、智能的安全保障体系提供了切实可行的路径，对推动行业安全生产数字化转型具有积极意义。

关键词：煤矿安全；监控系统；传感器管理；系统优化；应急保障

Analysis on Optimization of Coal Mine Safety Monitoring System and Refined Management of Sensors

Gao Yongjin

China Coal Huangjiagou (Linxian) Coal Industry Co., Ltd., China Shanxi Lvliang 033000

Abstract: Optimization of coal mine safety monitoring systems and refined management of sensors constitute core tasks for ensuring safe production in coal mines. At present, prominent problems exist in coal mine safety monitoring systems, including information silos among multiple systems that hinder data sharing and comprehensive assessment of hazard conditions, blind zones in sensor layout that fail to fully perceive dynamic risks during mining and excavation activities, and inadequate sensor management such as untimely calibration and poor maintenance, which cause frequent data drift and false alarms and severely restrict the timeliness and accuracy of hazard earlywarning. This paper conducts an indepth analysis of optimization practices regarding multisystem integration, monitoring network expansion, and infrastructure standardization of monitoring systems. For multisystem integration, a data fusion platform based on standardized protocols such as unified industrial Ethernet and OPC UA is constructed to break information barriers. The monitoring network is extended to concealed spaces including blind roadways and sealed areas, and multipoint wireless sensors or distributed optical fiber temperature and vibration measurement systems are adopted to achieve fullmine coverage. Infrastructure renovation focuses on transmission lines, power supply guarantee and installation processes to ensure stable system operation. This paper emphatically discusses refined management strategies including periodic sensor calibration, riskbased dynamic layout adjustment, and fulllifecycle equipment management. System optimization and refined management significantly improve the comprehensiveness of monitoring coverage and data reliability, and effectively enhance emergency linkage response speed and overall preventioncontrol capacity. These explorations provide practical approaches for coal mines to build an efficient and intelligent safety guarantee system, and are of positive significance for advancing the digital transformation of safe production in the coal industry.

Keywords: Coal mine safety; Monitoring system; Sensor management; System optimization; Emergency support

0 引言

煤矿安全生产是国家能源能够稳定以及矿工生命能够安全的重要基石所在，安全监控的系统以及它的核心部分

也就是传感器网络是用来预防瓦斯爆炸这种情况、煤与瓦斯突出这种现象、火灾还有水害等重大灾害出现的第一道关键防线，其运行的效能直接关联着预警的准确性以及应

急处置的时效性^[1]。当前阶段,煤矿的安全监控系统面临着集成化的程度比较低的状态,子系统的信息处于孤立状态,很难进行综合的研判灾害情况;监测的网络覆盖存在着盲区或者布局并不合理,没办法全面地感知采掘的动态风险;传感器的管理比较薄弱,标校不够及时、维护并不到位导致数据出现漂移以及误报频繁发生,严重地削弱了系统的可信度。深入探析安全监控系统的整体优化路径与传感器的精细化管理策略,对于打破信息壁垒、实现灾害超前精准预警、构建快速有效的应急联动机制具有至关重要的现实意义,本研究旨在系统分析并提出切实可行的改进方案,以推动煤矿安全保障体系向智能化、高可靠性方向演进。

1 煤矿安全监控系统的优化实践路径

1.1 多系统集成与功能融合升级

系统优化的核心为将安全监控系统、人员定位系统、应急广播系统、视频监控系统等系统存在的信息孤岛予以打破,其实践的路径是去构建一个基于统一工业以太网以及 OPC UA 等标准化协议的数据融合平台。这个平台会对各类子系统所具备的主干传输网络进行整合,在地面调度中心去部署综合数据服务器,针对不同协议的实时数据开展抽取、转换以及加载等操作,从而形成标准化的数据仓库。功能融合体现在以 GIS“一张图”为空间框架,将甲烷浓度、风速、设备开停状态、人员分布、视频画面等多维信息在统一时空坐标下进行叠加展示与智能关联分析。当安全监控系统监测到掘进工作面回风流甲烷浓度达到 0.8% 时,系统自动触发智能联动预案,在地图上精准定位受威胁区域的人员,自动调取相关区域的摄像头画面,实现监测、预警、指挥、撤人的一体化闭环管理,显著提升系统整体响应速度与决策智能化水平^[2]。

1.2 监测覆盖范围的拓展与精准布局

监测覆盖的拓展遵循“关键区域无盲区、重点环节全覆盖”原则,采掘工作面、主要进回风巷等固定区域维持高密度传感器部署的基础上,重点向地质异常带、盲巷、采空区封闭墙内等传统监测薄弱区域延伸。对于长度超过 6m 的盲巷,强制在巷道尽头、拐角处布置本安型无线甲烷传感器将数据中继至就近的分站,实现连续监测。对于永久密闭区域,在密闭墙外侧安装管束式气体采样装置,通过负压泵抽取墙内气样,输送至布置在安全地点的红外多气体分析仪进行实时分析,监测 CH_4 、 CO_2 、 O_2 及 CO 的浓度变化。采空区上部沿工作面走向每隔 100m 布置一个钻孔,埋入分布式光纤测温传感系统,该光纤作为传感

元件,通过解调设备接收其背向拉曼散射光信号,可获取沿光纤长度方向每 1m 空间分辨率、温度精度达 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的连续温度剖面,从而实时掌握采空区内部自然发火“三带”的演化动态。

精准布局的核心在于将传感器部署从经验驱动转变为基于矿井三维地质模型与多物理场数值模拟的预测性布设。综采工作面以采空区冒落岩石的孔隙率、渗透率为关键参数,模拟瓦斯在“三带”(冷却带、氧化带、窒息带)内的运移与积聚规律。根据模拟结果,在上隅角这个绝对高浓度区布置量程 0-4% CH_4 的激光甲烷传感器;在距上隅角 10-15m 的下隅角区域,由于可能存在涡流导致的局部积聚,增设一个催化式甲烷传感器作为冗余监测点;在回风巷距工作面 10m、20m、30m 处分别布置风速、甲烷和 CO 传感器,形成梯度监测,用于校验和判断污染物扩散稀释情况。对于快速掘进巷道,在掘进机截割部后方 5m 的司机操作位附近,安装基于光散射原理的连续粉尘浓度传感器,实时监测总粉尘浓度,数据用于评估除尘风机效率。在风筒出口下风侧 20m 处,布置具有自动调零和抗高湿干扰能力的智能甲烷传感器,其采样泵流量稳定在 $0.5\text{L}/\text{min}$ ^[3]。所有传感器位置均录入矿用 GIS 系统,当掘进进尺累计达到 500m 时,系统自动生成提示,由巡检人员将最前端的传感器前移,并通过红外遥控或蓝牙与分站完成地址重映射,确保监测焦点始终紧跟掘进头,实现对动态风险源的不间断追踪。

1.3 基础设施的标准化建设与整治

基础设施的标准化是系统可靠运行的物理基石,井下所有监控信号传输必须统一采用符合 MT 818 标准的矿用阻燃通信电缆, MHY32-1(2×2×0.8) 规格电缆内阻不得超过 $31\Omega/\text{km}$, 线对绞合节距需小于 30mm 以抑制串扰。电缆敷设严格执行分层、分侧原则,监控通信电缆与 660V 及以上动力电缆的平行间距必须大于 500mm,交叉时呈 90 度直角。所有电缆在穿过墙壁或楼板时,必须采用内壁光滑的镀锌钢管作为穿线管,管口用阻燃胶泥封堵,弯曲半径不小于电缆外径的 12 倍。接线盒必须选用防护等级不低于 IP54 的本安型产品,内部接线采用压接式冷压铜鼻子和绝缘护套,确保接触电阻小于 $5\text{m}\Omega$,并使用色谱严格区分电源、信号与接地线芯。主干通信线缆需额外套入直径 50mm 的阻燃 PVC 管或金属桥架内,在易受撞击的巷道段,桥架安装高度不低于 1.8m。

监控分站与关键传感器必须接入两路独立电源,主

电源来自中央变电所，备用电源采用本质安全型专用蓄电池组，其容量需满足满载情况下持续供电不低于 8h 的要求，电池组需配有智能管理模块，实时监测单体电压、内阻与温度，并具备远程诊断功能。传感器供电电压的波动范围必须严格控制在标称值的 $\pm 10\%$ 以内，线路末端电压不低于 12.5V DC。在安装工艺上，甲烷传感器必须垂直悬挂，其进气口距顶板不大于 300mm，距巷道侧壁不小于 200mm，且与压风管、排水管的距离大于 0.5m，以避开局部气流干扰。分站和电源箱的安装基础需使用膨胀螺栓固定于实帮实底，安装平面倾斜度小于 5° ，并加装厚度不小于 10mm 的橡胶减震垫。所有设备的接地极为独立的局部接地极，采用面积不小于 0.6m^2 、厚度不小于 3mm 的镀锌钢板，垂直埋入巷道旁潮湿的泥土中，深度大于 1.5m，接地导线采用截面积不小于 25mm^2 的裸铜线，所有接地连接点涂抹导电膏，确保系统接地电阻实测值小于 1Ω ，从而有效泄放杂散电流，防止电磁干扰和电浪涌冲击。

2 传感器精细化管理的具体措施与成效

2.1 严格执行周期性标校与闭锁测试制度

传感器标校是保障监测数据准确的基石，必须建立并执行远超国标 AQ1029-2019 要求的强制性内控流程。对于甲烷传感器，现场标校严格使用浓度为 1.0% CH_4 、2.0% CH_4 的标准气体，在传感器正常监测状态下，通过标气袋和减压阀以 $200\text{mL}/\text{min}$ 的恒定流量进行标校。标校过程需记录传感器显示值的稳定性、响应时间和回零情况，线性误差必须控制在 $\pm 0.1\%$ CH_4 以内。闭锁测试是验证系统联动功能可靠性的关键，采用“超限闭锁”与“故障闭锁”双测试法。进行甲烷电闭锁测试时，在传感器位置通入 1.5% CH_4 的标准气体，持续 60s，系统必须在 30s 内切断监控区域及其回风巷内所有非本质安全型电气设备的电源并实现闭锁。局部通风机的 3.0 闭锁测试则模拟主备风机同时故障，验证瓦斯超限后对相关区域动力的切断逻辑^[4]。一氧化碳、温度、风速等传感器的标校同样需按照其物理特性选择对应量程的标准气体或校准装置。所有标校与测试数据必须实时上传至系统，形成不可篡改的电子档案，并与设备唯一编码绑定，实现数据溯源。

某项目 2025 年度关键传感器周期性标校与闭锁测试数据统计见表 1，制度得到严格执行，所有传感器标校合格率均高于 98.8%。甲烷传感器年度闭锁测试达 26 次，远超其 24 次的标校次数，高合格率与超规测试共同证明了精细化维护管理有效保障了监测数据的准确性与系统可靠性。

表 1 2025 年度关键传感器周期性标校与闭锁测试数据

统计				
传感器类型	标校周期(天)	年度标校总次数(次)	年度闭锁功能测试次数(次)	标校合格率(%)
甲烷(CH ₄)传感器	15	24	26	99.5
一氧化碳(CO)传感器	15	26	不适用	98.8
风速传感器	90	4	不适用	99.0

2.2 基于风险动态调整监测点布局

传感器布局核心是建立一套“风险评估 - 布局决策”模型，依据作业场所的风险等级权重、有害气体涌出预期及通风网络稳定性进行量化计算，确定监测点的必要性与优先级，监测点综合权重 W 可初步量化为：

$$W=R \times D+F$$

其中 R 代表固有风险等级， D 代表作业动态系数， F 代表该区域历史监测数据异常或故障频率的修正因子，依据此模型，新工作面安装时需在进、回风顺槽距切眼 30m、60m 处分别布置甲烷传感器，在上隅角增设一个用于监测采空区溢出瓦斯的专用传感器^[5]。

溜煤眼、煤仓等易产生 CO 和瓦斯积聚的场所，底部放煤口上方 1.5m 处和顶部呼吸孔下方 1m 处对角布置 CH_4 和 CO 传感器。进行探放水作业时，在钻场下风侧 5-10m 处必须增设激光甲烷传感器，实现钻孔内瓦斯逸出的超前高精度监测。工作面回撤时，监测点随设备回撤同步拆除，实现监测网络与生产布局的弹性匹配与全覆盖。

2.3 设备全生命周期管理与更新保障

精细化管理的闭环体现于设备从入库、投用、运行、维护到报废的全生命周期受控，其中入库环节所有传感器必须具备有效的计量检定证书，并在库房进行 72h 的通电老化测试，记录其零点漂移和灵敏度，不合格品立即返厂。安装投用前为每一台设备建立唯一的电子身份证，记录其型号、出厂编号、测量范围、精度等级、生产日期、检定日期、投用日期、安装位置历史等信息。运行阶段，系统自动追踪每台传感器的累计工作时间、标校记录、报警次数和故障历史。当传感器累计运行时间达到其额定寿命的 80% 或最近三次标校数据呈现趋势性漂移时，系统自动预警，提示进入重点关注或预备更换状态。

3 系统联动与应急保障能力的提升

3.1 应急联动机制的建设与应用

应急联动机制（图 1）的核心是将安全监控系统的预警信号自动、精准、强制地转化为现场控制指令，当系统监测到采掘工作面回风流中甲烷浓度达到 0.8% CH_4 的预警

阈值时，联动策略立即启动。策略第一步是声光报警，在井下受威胁区域及地面调度中心同步触发高频声光警示。第二步是自动控制，系统在 30s 内执行断电指令，切断该工作面及回风巷内所有非本质安全型电气设备的电源，断电范围依据电气控制图精确界定，避免越级断电。第三步是人员疏散引导，系统自动激活应急广播系统，在受影响区域的广播分站循环播放预录的定向撤离语音指令，向该区域作业人员的标识卡发送震动与文字撤离提示。第四步是辅助决策支持，系统自动将报警点周边的视频监控画面弹出至调度大屏，并将相关区域的通风机状态、风门开关状态、压风自救装置状态等信息集成展示。

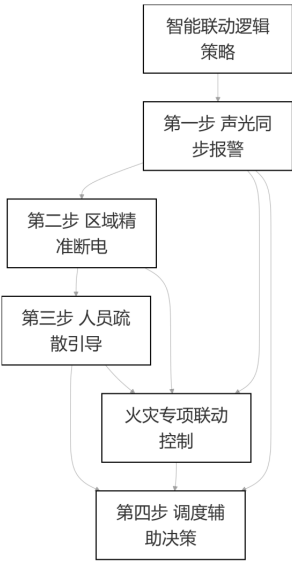


图 1 智能联动逻辑策略

3.2 运维人员技能培训与队伍建设

培训体系需超越基础操作，聚焦于深层故障诊断、系统配置与应急处置实战。培训内容涵盖硬件与软件两个维度，硬件层面要求运维人员掌握各类传感器的内部结构与电学 / 催化燃烧原理，能够使用标准气样、万用表、示波器进行精度校准与电路板级故障定位，软件层面人员必须精通监控组态软件的编程逻辑，能够独立完成监测点的增删、报警阈值的修改、联动控制逻辑的编辑与测试。实

战演练采用“黑箱故障注入”方式，在培训系统中模拟设置传感器断线、分站通信中断、监测数值突变、网络风暴等故障场景，要求人员在规定时间内完成从故障现象判断、排查路径规划到最终修复的全流程操作。每月进行一次无预告的综合性应急演练，模拟真实超限报警，考核从调度员到现场巡检工整个链条的响应合规性与操作熟练度。

4 结语

本研究系统探析煤矿安全监控系统的集成优化与传感器精细化管理的具体实践，得出构建起一个统一的数据平台以及多系统融合的架构，并且实施监测网络动态且精准的布局以及基础设施标准化的整治，能够从根本上提升系统所具备的整体性以及可靠性；严格去执行周期性标校以及智能联动测试这样的核心质量控制流程，建立起基于风险量化评估的传感器动态部署的策略，是实现气体浓度等关键参数准确且连续感知的一项技术保障；配套设备全生命周期的管理以及高强度实战化运维团队技能的建设，共同构成系统稳定且有效运行的长效支撑体系，为预防瓦斯超限等重大风险、提升矿井本质安全水平提供切实可行的完整技术路径以及管理方案。

参考文献：

[1] 邱俊峰. 煤矿通风安全监测监控系统设计及应用[J]. 凿岩机械气动工具, 2026, 52(04): 196-198.

[2] 王永刚, 刘雄, 王东亮等. 瓦斯巡检机器人与煤矿安全监控系统的融合[J]. 煤矿安全, 2026, 57(03): 165-175.

[3] 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(02): 271-287.

[4] 宋洁. 煤矿安全监控系统数字化升级的关键技术研究[J]. 能源与节能, 2026(02): 185-187.

[5] 杨定超, 何云文. 煤矿安全监控设备全生命周期管理系统研究与应用[J]. 煤炭技术, 2026, 45(02): 179-184.

作者简介：高永金（1987.10-），男，汉族，山西石楼人，本科，中煤黄家沟（临县）煤业有限公司，初级职称，研究方向：煤矿安全监控系统优化与传感器精细化管理探析。