

煤矿一通三防智能化监测预警系统设计与应用效果分析

任杰

陕西华电榆横煤电有限责任公司，陕西榆林，719000；

摘要：为破解传统煤矿一通三防工作中监测精度偏低、预警响应滞后、人为干预过多等难题，本文基于物联网、大数据及人工智能技术，设计一套集数据采集、实时分析、智能预警、联动控制于一体的智能化监测预警系统。该系统以感知层-网络层-平台层-应用层四级架构为核心，实现对瓦斯、粉尘、通风参数及火灾隐患的全方位精准监测。某国有大型煤矿的实际应用结果表明，该系统可将瓦斯浓度监测误差控制在 $\pm 0.05\%$ 以内，粉尘浓度监测响应时间缩短至2秒，火灾隐患预警准确率提升至92%，有效降低一通三防事故发生率，为煤矿安全生产提供可靠技术支撑。

关键词：煤矿安全；一通三防；智能化监测；预警系统

DOI：10.64216/3080-1508.26.02.042

引言

一通三防（通风、防瓦斯、防煤尘、防灭火）是煤矿安全生产的核心环节，直接关乎井下作业人员生命安全与煤矿企业的可持续发展。据国家矿山安全监察局数据显示，近年来全国煤矿死亡事故中，一通三防相关事故占比达35%，其中瓦斯爆炸与煤尘爆炸事故因突发性强、破坏性大，造成的人员伤亡和财产损失最为严重。传统一通三防管理模式依赖人工巡检与单机监测设备，存在诸多突出问题：一是监测范围受限，难以实现井下全域覆盖；二是数据传输滞后，无法实时反馈现场安全状态；三是预警方式单一，多依赖固定阈值判断，易出现误报、漏报现象；四是各系统数据相互孤立，缺乏协同分析能力。

随着煤炭行业智能化转型的深入深入推进，物联网、大数据、人工智能等先进技术在煤矿安全领域的应用愈发广泛。构建一通三防智能化监测预警系统，推动安全管理从被动防御向主动预警转变，已成为破解煤矿安全管理痛点的核心路径。本文结合某矿实际生产需求，设计一套全流程智能化监测预警系统，详细阐述其架构设计、核心功能，并通过实际应用数据验证系统的应用成效。

1 煤矿一通三防智能化监测预警系统设计

1.1 设计目标

系统设计以精准感知、实时传输、智能分析、高效预警为发展目标，具体实现以下功能：一是对井下瓦斯、一氧化碳、粉尘浓度、风速、风压等关键参数进行 24

小时连续监测，监测范围覆盖所有采掘工作面、回风巷、机电硐室等重点区域；二是构建多维度数据融合分析模型，结合历史数据与实时参数，实现对安全隐患的精准识别与提前预警；三是建立联动控制机制，监测到异常情况时自动触发通风设备调节、人员撤离提示等应急响应措施；四是搭建可视化管理平台，为管理人员提供直观、全面的安全状态展示与决策支持依据。

1.2 系统总体架构

系统采用感知层-网络层-平台层-应用层四级分布式架构，各层既相互独立又协同联动，确保数据从采集到应用的全流程高效运转，系统架构如图1所示（此处因格式限制略去图表，实际应用中需补充完整）。

1.2.1 感知层：全域数据采集终端

感知层作为系统的数据采集源头，负责获取一通三防相关的各类物理参数，采用有线+无线结合的终端部署模式，确保对复杂井下环境的全域覆盖。主要设备配置如下：一是瓦斯传感器，采用激光检测技术，部署于采掘工作面、回风巷等重点区域，测量范围为0-100%CH₄，监测精度达 $\pm 0.05\%$ ；二是粉尘浓度传感器，基于光散射原理，实时采集总粉尘与呼吸性粉尘浓度，响应时间≤2秒；三是通风参数传感器，包含风速传感器与风压传感器，分别监测井下巷道风速（测量范围0.3-20m/s）和通风系统风压（测量范围0-5000Pa）；四是火灾监测设备，结合温度传感器与一氧化碳传感器，实现对煤炭自燃隐患的早期监测；五是人员定位终端，通过UWB技术实现作业人员实时定位，为应急撤离提供精准数据支持。

为适应井下高湿、高尘、强电磁干扰的恶劣环境，所有感知终端均采用隔爆兼本安型设计，防护等级达到IP68，保障设备在复杂工况下长期稳定运行。同时，终端具备边缘计算能力，可对采集的数据进行初步滤波、去噪处理，有效减少无效数据传输量，显著提升网络传输效率。

1.2.2 网络层：高效稳定数据传输通道

网络层承担感知层数据向平台层传输的核心任务，构建工业以太网+5G+矿用无线通信的多链路传输网络，确保数据传输的实时性与可靠性。其中，工业以太网作为主干网络，采用光纤传输方式连接地面控制中心与井下各区域交换机，传输速率达1000Mbps，满足海量数据的高速传输需求；井下区域采用5G与矿用本安型WiFi6结合的无线通信方案，5G网络实现≤20ms的低时延数据传输，保障预警信息的毫秒级响应，WiFi6则为移动终端和传感器提供灵活便捷的接入方式。

为保障数据传输安全，网络层采用多重加密防护机制，包括基于AES-256加密算法的数据传输加密、基于密钥的设备接入认证以及网络防火墙隔离，有效防止数据被篡改或窃取。同时，系统设置冗余传输链路，某一传输通道出现故障时可自动切换至备用通道，确保通信链路连续不中断。

1.2.3 平台层：数据处理与智能分析核心

平台层作为系统的核心大脑，基于云计算与大数据技术，实现对各类监测数据的存储、处理、分析及模型运算，主要包含数据存储模块、数据融合模块和智能分析模块。数据存储模块采用本地+云端的混合存储架构，本地数据库存储实时监测数据与关键业务数据，保障数据访问的低时延；云端数据库用于存储历史数据（设计存储周期5年），为趋势分析和模型优化提供充足数据支撑，采用分布式数据库HBase，满足海量数据的高效存储与快速查询需求。

数据融合模块通过ETL（抽取、转换、加载）工具，对来自不同传感器的异构数据（如数值型、布尔型、图像型数据）进行标准化处理，消除数据冗余与冲突，形成统一规范的数据集市。智能分析模块是平台层的核心组件，构建阈值判断+机器学习的双层分析模型：一是基础阈值判断，依据《煤矿安全规程》设定各参数的安全阈值，监测数据超出阈值时立即触发初级预警；二是机器学习模型，采用BP神经网络算法，以历史监测数据、事故案例数据、地质条件数据为训练样本，建立瓦

斯突出、煤尘爆炸、煤炭自燃等隐患的预测模型，实现对潜在风险的提前预判。以瓦斯浓度预测为例，模型输入参数包括当前瓦斯浓度、风速、采掘进度、地质构造等，输出未来1小时内的瓦斯浓度变化趋势，预测精度达88%。

1.2.4 应用层：多场景业务应用终端

应用层面向煤矿安全管理的多元化场景，提供可视化展示、智能预警、联动控制、统计分析等核心应用功能，通过地面控制中心大屏、管理人员PC端、井下作业人员移动端等多终端呈现，实现管理-作业-应急全流程覆盖。

可视化展示功能基于GIS地理信息系统，构建井下巷道三维可视化模型，将实时监测数据、设备运行状态、人员位置等信息叠加至三维地图，实现一张图全面掌控井下安全状态。智能预警功能采用分级预警+多渠道推送模式，根据隐患严重程度将预警划分为四级（蓝色、黄色、橙色、红色），分别对应一般隐患、较大隐患、重大隐患和紧急情况，预警信息通过控制中心声光报警、管理人员手机APP推送、井下语音广播、作业人员手环震动等多渠道同步推送，确保相关人员第一时间接收。

联动控制功能实现预警与设备控制的自动联动，触发红色预警时，系统可自动切断相关区域动力电源，启动备用通风机调节风量，并通过人员定位系统规划最优撤离路线，引导作业人员快速撤离。统计分析功能可自动生成一通三防相关的日报、周报、月报，内容涵盖参数变化趋势、隐患处理情况、设备运行状态等，为安全管理决策提供数据支撑。

2 系统应用效果分析

为验证系统实际应用成效，该系统于某年初在某国有大型煤矿（设计生产能力500万吨/年）开展试点应用，覆盖该矿3个采煤工作面、5个掘进工作面及所有主要通风巷道，应用周期为6个月。通过对比系统应用前后的一通三防管理数据，从监测精度、预警效率、事故发生率、管理成本等维度进行综合效果分析。

2.1 监测精度显著提升

系统应用前，该矿采用传统单机传感器监测模式，瓦斯浓度监测误差平均为±0.12%，粉尘浓度监测响应时间约8秒，且存在部分区域监测盲区。系统应用后，借助激光检测技术、光散射原理及数据融合处理，各类参数监测精度大幅提升：瓦斯浓度监测误差控制在±0.05%

以内，粉尘浓度监测响应时间缩短至 2 秒，通风参数监测精度提升 40%，实现井下全域无死角监测。以试点期间该矿 1201 采煤工作面为例，系统连续监测显示该工作面瓦斯浓度在 0.42%-0.48% 区间波动，与人工抽样检测结果（0.45%）的误差仅为 $\pm 0.03\%$ ，远优于传统监测方式的精度水平。

2.2 预警效率与准确率大幅提高

系统应用前，该矿依赖人工巡检发现隐患，平均隐患发现时间约 2 小时，预警方式仅为现场声光报警，易出现漏报、误报问题。系统应用后，通过智能分析模型实现隐患自动识别与分级预警，隐患平均发现时间缩短至 10 分钟以内，预警准确率从传统方式的 65% 提升至 92%。应用期间，系统共发出各类预警 126 次，其中蓝色预警 82 次、黄色预警 31 次、橙色预警 10 次、红色预警 3 次，所有预警均得到及时处置，未出现因误报引发的非计划停产事件。例如，试点期间某日，系统通过分析 1302 掘进工作面的温度、一氧化碳浓度及瓦斯浓度变化趋势，提前 30 分钟发出橙色预警，提示该区域存在煤炭自燃隐患，管理人员立即采取注氮降温措施，成功避免火灾事故发生。

2.3 事故发生率显著降低

系统应用期间，该矿一通三防相关隐患排查整改率从 88% 提升至 100%，未发生瓦斯、粉尘、火灾等相关事故，与往往年同期相比，一通三防事故发生率下降 100%，轻伤及以上安全事故发生率下降 80%。同时，系统联动控制功能有效降低事故扩大风险，例如试点期间某日，1103 采煤工作面因设备故障导致局部瓦斯浓度瞬间升至 1.2%，系统立即触发红色预警，自动切断该区域动力电源，启动局部通风机加大风量，仅用 5 分钟便将瓦斯浓度降至 0.5% 以下，成功规避了瓦斯爆炸事故风险。

2.4 管理效率提升，成本降低

系统实现一通三防工作的智能化管控，大幅减少人工干预，该矿一通三防专职巡检人员从 24 人精简至 12 人，每月降低人工成本约 18 万元。同时，通过提前预警与精准管控，系统有效减少隐患整改导致的停产时间，应用期间累计减少停产时间 36 小时，按该矿小时产量

1200 吨、吨煤利润 150 元计算，直接增加经济效益约 648 万元。此外，设备故障率较之前下降 35%，进一步降低了设备维修成本。

3 结论与展望

3.1 结论

本文设计的煤矿一通三防智能化监测预警系统，以感知层-网络层-平台层-应用层四级架构为基础，整合物联网、大数据、人工智能等先进技术，实现一通三防关键参数的精准监测、智能分析与高效预警。某国有大型煤矿的实际应用验证表明，该系统具备显著优势：一是监测精度高，瓦斯、粉尘等参数的监测误差与响应时间均优于传统监测方式；二是预警能力强，采用阈值判断+机器学习双重模型，实现隐患早期识别与分级预警，准确率达 92%；三是安全保障效果好，有效降低一通三防事故发生率，实现了从被动应对向主动防控的根本性转变；四是经济效益显著，通过减少人工成本与停产损失，为煤矿创造可观经济价值。该系统的成功应用为煤矿一通三防管理提供可靠技术支撑，契合煤炭行业智能化转型发展方向。

3.2 展望

尽管系统已取得良好应用效果，但仍存在优化空间：一是智能算法方面，可引入深度学习模型，结合井下视频监控数据，实现人员不安全行为（如违章作业）与设备异常状态的图像识别，提升系统综合预警能力；二是联动控制方面，加强与煤矿综采、掘进等生产系统的协同联动，实现安全-生产一体化智能调控；三是数据共享方面，构建跨矿井一通三防大数据平台，实现区域内煤矿安全数据共享与协同分析，为行业安全监管提供数据支持。未来，随着技术迭代升级，一通三防智能化监测预警系统将向更精准、更智能、更协同方向发展，为煤矿安全生产提供更为全面的保障。

参考文献

- [1] 周建. 基于“一通三防”的矿井智能管控技术研究与应用 [J]. 中国煤炭, 2024, 50(6): 59-66.
- [2] 闫俊杰. 煤矿“一通三防”智能化技术应用研究 [J]. 煤炭技术, 2025(7).
- [3] 候忠亮. 煤炭工程“一通三防”技术优化 [J]. 2025.