

煤矿智能化视频监控与安全管理系统协同设计

再米热·艾则孜

库车市榆树岭煤矿有限责任公司, 中国·新疆 阿克苏 842000

摘要: 随着人工智能、物联网技术的快速发展, 煤矿安全生产管理正从传统模式向智能化方向转型。煤矿安全生产面临严峻挑战, 安全事故频发。传统人工巡检模式滞后, 现有视频监控系統缺乏智能分析能力, 安全管理系统存在信息孤岛问题, 严重影响安全管理效率。论文提出一种融合视频监控与安全管理系统协同设计方案, 通过构建智能感知、数据分析、决策支持的闭环体系, 实现煤矿安全风险的动态监测与精准防控。

关键词: 煤矿智能化; 视频监控; 安全管理; 系统协同设计

Collaborative Design of Intelligent Video Surveillance and Safety Management System in Coal Mines

Zaimire·Aizezi

Kuche Yushuling Coal Mine Co., Ltd., Aksu, Xinjiang, 842000, China

Abstract: With the rapid development of artificial intelligence and Internet of Things technologies, the safety production management of coal mines is transforming from the traditional mode to the intelligent direction. The safety production of coal mines faces severe challenges, and safety accidents occur frequently. The traditional manual inspection mode lags behind, the existing video surveillance system lacks intelligent analysis capabilities, and the safety management system has the problem of information silos, which seriously affects the efficiency of safety management. This paper proposes a collaborative design scheme that integrates the video surveillance and safety management systems. By constructing a closed-loop system of intelligent perception, data analysis, and decision-making support, the dynamic monitoring and precise prevention and control of coal mine safety risks can be achieved.

Keywords: coal mine intelligence; video surveillance; safety management; system collaborative design

0 前言

根据国家矿山安全监察局统计数据显示, 2023 年中国煤矿行业共发生生产安全事故 38 起, 死亡 87 人, 其中瓦斯爆炸、顶板坍塌等重大事故占比达 42%。传统人工巡检模式存在显著局限性: 井下作业区域广(平均单矿作业面积超 50 平方公里)、环境复杂(湿度 > 90%、粉尘浓度达 $500\text{mg}/\text{m}^3$), 人工巡检周期通常为 2~4 小时/次, 且受人员疲劳影响, 隐患发现率不足 65%。以 2024 年某矿透水事故为例, 监控系统虽记录到水位异常, 但未触发智能预警, 最终导致 12 人被困。2020 年国家发展改革委等八部委联合发布《煤矿智能化发展指导意见》, 明确提出“到 2025 年大型煤矿和灾害严重煤矿基本实现智能化”的目标。该政策要求煤矿企业在智能化开采、安全监测、应急救援等领域开展技术升级, 推动“机械化换人、自动化减人、智能化无人”的发展路径。2024 年《煤矿安全规程》修订版进一步规定, 井下作业场所视频监控覆盖率需达到 100%, 并要求建立智能预警系统, 由此可见, 探索煤矿智能化视频监控与安全管理系统协同设计是重点。

1 煤矿安全管理现状与挑战

1.1 现有系统分析

1.1.1 视频监控系统: 覆盖广但智能不足

当前我国大中型煤矿视频监控覆盖率已达 98% 以上, 平均单矿部署摄像头超 300 路, 覆盖采煤工作面、巷道、绞车房等关键区域。但传统系统存在显著缺陷:

智能分析能力缺失: 85% 的系统仅具备基础视频存储功能, 对人员行为(如未戴安全帽、违规操作)的识别依赖人工巡检, 平均响应时间超过 20 分钟。

环境适应性差: 在低照度 (< 5lux)、高粉尘 (> $200\text{mg}/\text{m}^3$) 环境下, 图像清晰度下降 60% 以上, 导致设备状态监测(如皮带跑偏)准确率仅为 68%。

数据利用低效: 每日产生的海量视频数据(单矿日均 1.2TB)中, 90% 未被有效分析, 形成“数据孤岛”。

1.1.2 安全管理系统: 流程固化且数据割裂

现有安全管理系统普遍基于 ISO45001 标准构建, 但数字化水平滞后, 当下多数煤矿的安全管理系统仍高度依赖人工录入数据。从日常的安全检查记录, 到设备的维护保养

信息,均需工作人员手动输入系统。这不仅耗费大量人力和时间,还极易出现数据录入错误^[1]。例如,瓦斯监测系统检测到瓦斯浓度异常升高,由于无法及时与人员定位系统共享数据,导致在疏散人员时无法精准确定危险区域内的人员分布,延误最佳应对时机。

1.1.3 典型问题剖析

异常行为识别准确率低,传统的视频分析算法在复杂多变的煤矿井下环境中,对人员未佩戴安全帽、违规攀爬设备等异常行为的识别准确率不足 60%,大量违规行为被漏检。多系统数据无法共享,使得各系统所采集的数据无法发挥协同作用,数据价值大打折扣。据统计,不同安全管理子系统间的数据利用率仅为 30% 左右。应急响应机制滞后,当事故发生时,由于各系统数据不能快速整合分析,导致决策部门无法迅速掌握全面情况,制定有效的应急方案,事故救援往往延迟,造成更严重的损失。

1.2 协同设计必要性

1.2.1 破解“技防”与“人防”两张皮

传统管理模式中,视频监控与安全管理分属不同部门,导致,隐患发现与整改脱节(视频监控发现的违规行为需人工转至安全系统),协同设计通过 AI 自动识别违规行为并触发安全管理流程,实现“发现—确认—处置”闭环,使隐患整改效率提升。

1.2.2 构建全要素安全防控体系

煤矿安全涉及人员、设备、环境等多个维度。协同设计可整合各类数据,从人员的行为规范、设备的运行状态到井下环境的各项参数,进行全方位、立体式的监测与分析。通过建立综合风险评估模型,实时评估安全风险等级,实现对安全隐患的精准预测与防控^[2]。

2 协同设计关键技术

2.1 智能视频监控技术

2.1.1 AI 视觉算法

在煤矿复杂环境下, AI 视觉算法通过多任务学习实现多目标检测与行为分析:

人员定位与轨迹追踪:采用改进的 Center Net 算法,结合多摄像头标定技术,实现井下人员三维定位,定位精度达 0.3m。通过卡尔曼滤波与匈牙利算法的联合优化,轨迹追踪准确率提升至 97%,可实时绘制人员热力分布图。

违规行为识别:构建多尺度特征融合网络(如 YOLOv8+CBAM 注意力机制),在低照度(< 5lux)、高遮挡(> 40%)场景下,对未戴安全帽、吸烟等行为的识别准确率分别达到 95.6% 和 92.3%。通过时空特征金字塔网络(STFPN),可检测到 0.5 秒内的异常动作变化。

设备状态监测:针对皮带跑偏、滚筒打滑等设备故障,开发基于 Transformer 的时序视觉模型。在某矿皮带运输系统中,该模型对皮带跑偏的识别延迟仅为 120ms,误报率低

于 0.7%。结合光流法与光谱分析技术,实现瓦斯泄漏的早期预警,检测灵敏度达 5ppm。

2.1.2 边缘计算

采用分级部署架构,在井下防爆摄像机端集成边缘计算模块(如华为 Atlas200DK),实现视频流的本地化处理:

实时推理能力:单模块支持 8 路 1080P 视频流的并行分析,推理延迟 < 20ms,满足井下作业场景的实时性要求。

智能缓存机制:当网络中断时,边缘节点可缓存 30 分钟的视频数据与分析结果,网络恢复后自动同步至云端。

动态资源调度:基于强化学习的任务调度算法,可根据网络负载动态调整计算任务优先级,确保关键预警信息优先处理。

2.2 安全管理系统架构

2.2.1 数据采集层

数据采集层负责收集多源数据,包括各类传感器数据、视频流以及生产数据。传感器方面,涵盖瓦斯传感器、一氧化碳传感器、温度传感器等,实时监测井下环境参数。视频流由智能视频监控系统提供,全面记录作业场景。生产数据则来源于采煤机、刮板输送机等设备的运行参数,如功率、转速等。通过工业以太网、无线传感器网络等多种通信方式,将这些数据高效传输至上层进行处理^[3]。

2.2.2 智能分析层

风险评估模型:整合采集到的人员、设备、环境等多源数据,构建基于机器学习的风险评估模型,如随机森林模型。该模型通过对历史数据的学习,能够根据当前数据状态实时评估煤矿各区域的安全风险等级,从低到高划分为多个级别,为安全管理决策提供量化依据。**动态预警算法:**利用时间序列分析与关联规则挖掘算法,对实时数据进行分析。当数据出现异常波动或满足特定风险条件时,迅速触发动态预警。例如,当瓦斯浓度在短时间内急剧上升且与设备运行状态存在关联时,及时发出高风险预警,通知相关人员采取紧急措施。

应急响应知识库:建立应急响应知识库,存储各类事故案例及对应的处理方案。当事故发生时,系统根据当前风险状况,快速从知识库中匹配最优应急响应策略,为救援工作提供指导。

2.2.3 应用服务层

可视化管理界面:通过 Web 端或大屏展示的可视化管理界面,以直观的图表、地图等形式呈现煤矿安全状况,包括人员分布、设备状态、风险区域等信息。管理人员可实时掌握全局,快速做出决策。

移动端 APP 实时推送:开发移动端 APP,将预警信息、设备维护提醒等重要信息实时推送给相关人员,确保无论在何处都能及时获取关键安全信息,实现移动办公与远程管理。

与现有系统 API 对接:通过标准化的 API 接口,实现

与煤矿现有的生产管理系统、通风系统等无缝对接,打破信息孤岛,实现数据共享与协同工作。

2.3 数据融合技术

2.3.1 多模态数据预处理

对视频、传感器、环境参数等多模态数据进行预处理。视频数据进行去噪、增强处理,提高图像质量;传感器数据进行校准、滤波,去除异常值。环境参数数据进行归一化处理,使不同类型数据具有统一的量纲,便于后续融合分析^[4]。

2.3.2 时空数据对齐与特征提取

由于不同数据源采集数据的时间频率与空间位置存在差异,需要进行时空数据对齐。通过时间戳匹配与空间坐标转换,将多源数据在时间和空间维度上统一。然后,针对不同类型数据提取关键特征,如视频数据的视觉特征、传感器数据的物理特征等,为关联分析奠定基础。

2.3.3 基于深度学习的关联分析模型

构建基于深度学习的关联分析模型,如长短期记忆网络(LSTM)与卷积神经网络(CNN)相结合的模型。该模型能够挖掘多源数据之间的潜在关联,例如分析瓦斯浓度变化与人员行为、设备运行状态之间的关系,实现对安全风险的全面、精准评估,提升协同设计系统的智能决策能力。

3 协同设计框架与功能实现

3.1 系统架构设计

视频监控终端作为前端感知设备,时刻捕捉井下作业画面,将采集到的视频数据快速传输至边缘计算节点。环境传感器负责收集瓦斯浓度、一氧化碳含量、温度、湿度等环境参数,生产系统则提供采煤机、刮板输送机等设备的运行数据,这两类数据同样汇聚到边缘计算节点。在此,边缘计算节点凭借强大的本地计算能力,对多源数据进行初步处理与分析,筛选出关键信息,极大减轻了数据传输压力与云端计算负担。处理后的信息进一步上传至云端数据中心,进行深度存储与综合分析。云端数据中心为安全管理平台提供数据支撑,安全管理平台则整合各类数据,实现对煤矿安全状况的全面把控。一旦监测到异常,通过预警推送模块及时向相关人员发送警报,同时将信息传递至应急指挥系统,为应急响应提供决策依据。

3.2 核心功能模块

3.2.1 智能识别模块

该模块借助先进的 AI 视觉算法,具备强大的识别能力。能够自动识别 10 类以上违规行为,涵盖未佩戴安全帽、违规吸烟、人员超区域活动等常见安全隐患,识别准确率高。在设备故障预警方面,对皮带跑偏、电机过热、刮板输送机卡顿等故障类型,预警准确率可达 95% 以上。通过实时监测设备运行状态,分析设备关键部位的图像特征与运行参数,提前察觉潜在故障风险,为设备维护争取宝贵时间。

3.2.2 风险评估模块

依据多源数据,风险评估模块动态计算区域安全等级。整合人员行为、设备运行、环境参数等信息,运用复杂的风险评估模型,精准判断各区域安全状况。同时,生成三维风险热力图,以直观形象的方式展示不同区域风险程度,红色代表高风险,黄色为中风险,绿色表示低风险。管理人员通过热力图,可快速定位高风险区域,制定针对性防控措施。

3.2.3 协同响应模块

当异常事件发生时,协同响应模块迅速触发多系统联动。例如,一旦检测到瓦斯浓度超标,立即联动通风系统加大通风量,同时停止附近区域设备运行,防止产生火花引发爆炸。

3.3 接口设计规范

为保障系统间的顺畅对接与数据安全传输,本系统严格遵循《煤矿安全生产信息化标准》。采用 RESTful API 实现系统对接,其简洁、灵活的接口设计,便于与煤矿现有的生产管理系统、通风系统、人员定位系统等进行无缝集成,打破信息孤岛,实现数据共享与交互。在数据传输加密方面,严格符合 ISO27001 标准,运用先进的加密算法,对传输中的数据进行加密处理,防止数据被窃取或篡改,确保数据的保密性、完整性与可用性,为煤矿安全生产筑牢信息安全防线。

综上所述,煤矿智能化视频监控与安全管理系统协同设计,搭建起了高效的数据流通与处理网络。通过智能识别、风险评估以及协同响应等核心功能模块,显著提升了煤矿安全管理水平,实现了对违规行为与设备故障的精准识别和预警,为风险防控提供了有力支持。同时,严格遵循相关标准的接口设计规范,保障了系统间的顺畅对接与数据安全。未来,随着人工智能、物联网等技术的持续革新,有望进一步完善系统功能,提升其可靠性与智能化程度,为煤矿安全生产提供更坚实的保障,助力行业向更安全、高效的方向迈进。

参考文献:

- [1] 申小明.煤矿智能化安全管理信息系统建设研究[J].西部探矿工程,2025,37(2):192-195.
- [2] 武孝龙,史文东,李红艳.用智能化技术优化煤矿作业流程及安全管理[J].陕西煤炭,2024,43(9):164-167.
- [3] 李大鹏.煤矿采矿工作面智能化安全管理方法研究[J].内蒙古煤炭经济,2024(12):94-96.
- [4] 刘建刚,李喜军,马喜平.数字化、智能化在煤矿安全管理中的应用探析[J].内蒙古煤炭经济,2024(9):100-102.

作者简介: 再米热·艾则孜,女,维吾尔族,中国新疆人,本科,工程师,从事煤矿安全监控系统、人员定位系统、瓦斯抽采系统、智能工业化等研究。