

煤矿井下人员安全行为智能识别与预警系统设计

朱国岭

山西煤炭运销集团蒲县昊兴源煤业有限公司 山西临汾

【摘要】煤矿井下作业环境复杂多变，人员安全行为管控面临诸多挑战，传统监控方式存在响应滞后、识别精度不足等问题。为此，设计煤矿井下人员安全行为智能识别与预警系统，通过融合机器视觉、物联网和人工智能技术，实现对井下人员违规行为的实时监测、智能识别及主动预警。系统构建多维度感知网络，采集人员操作姿态、设备状态及环境参数，利用深度学习模型进行行为特征分析与风险评估，形成从数据采集到预警处置的闭环管理。实践表明，该系统可有效提升安全监管效率，降低事故发生率，为煤矿井下安全生产提供技术支撑。

【关键词】煤矿井下；安全行为；智能识别；预警系统；深度学习

【收稿日期】2025 年 6 月 13 日

【出刊日期】2025 年 7 月 11 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250338

Design of an intelligent recognition and early warning system for underground coal mine personnel safety behavior

Guoling Zhu

Shanxi Coal Transportation and Marketing Group Puxian Haoxingyuan Coal Industry Co., Ltd., Linfen, Shanxi

【Abstract】The underground coal mine environment is complex and ever-changing, posing significant challenges for personnel safety behavior management. Traditional monitoring methods suffer from issues such as delayed response and insufficient recognition accuracy. To address these challenges, this study designs an intelligent recognition and early warning system for underground coal mine personnel safety behavior. By integrating machine vision, IoT, and AI technologies, the system enables real-time monitoring, intelligent identification, and proactive alerts for personnel violations. The system establishes a multi-dimensional sensing network to collect operational postures, equipment status, and environmental parameters. Through deep learning models, it performs behavioral pattern analysis and risk assessment, forming a closed-loop management system from data collection to early warning and response. Practical applications demonstrate that this system effectively enhances safety supervision efficiency, reduces accident rates, and provides technical support for underground coal mine production safety.

【Keywords】Underground coal mine; Safety behavior; Intelligent recognition; Early warning system; Deep learning

引言

煤矿作为国家能源供应的重要支柱，井下作业环境具有高风险特性，人员不安全行为是引发事故的主要诱因。近年来，尽管安全管理水平不断提升，但违规操作、防护缺失等行为仍导致安全事故时有发生。传统依赖人工巡查和视频回放的监管模式，难以满足实时性和全面性要求。针对这一现状，需要构建一套能够自动识别人员不安全行为并及时预警的智能系统，以强化安全管控的主动性和精准性，保障井下作业人员生命安全，推动煤矿安全管理向智能化转型。

1 明确煤矿井下人员安全行为管控问题

煤矿井下作业环境的复杂性构成了人员安全行为

管控的首要挑战。井下巷道纵横交错，空间布局狭窄逼仄，矿工需在有限的通道内完成设备操作、物料搬运等工作，频繁的交叉作业极易引发碰撞、挤压等事故。巷道内的照明条件受线路铺设、设备遮挡等因素制约，即使配备防爆灯具，也难以消除视觉盲区。加之瓦斯、煤尘等易燃易爆物质长期存在，以及顶板坍塌、透水等潜在风险，导致作业人员在高强度、高压环境环境下，极易出现注意力分散、操作动作变形等问题。

现有安全监控系统在人员行为管理方面存在结构性的缺陷。传统监控设备多以设备状态监测和环境参数采集为核心，通过传感器实时获取瓦斯浓度、通风流量等数据，但对人员行为的监测仍依赖监控室人员的

人工研判^[1]。这种管理模式存在显著局限性：监控摄像头的视角覆盖范围有限，井下大量区域处于监管空白；人工识别需耗费大量时间和精力，且受监控人员主观判断影响大，难以保证识别的准确性和一致性。现有的违规行为判定多基于固定的规则，如超时作业、未按路线行走等，面对突发或非常规的危险行为缺乏有效识别能力。

定位系统的局限性在很大程度上进一步加剧了安全监管的难度。具体来说，井下环境对无线信号的传播存在严重的干扰问题。巷道中的金属支架和潮湿的岩壁等都会对信号产生折射和衰减，导致人员携带的定位设备频繁出现信号丢失和位置偏移等问题^[2]。这些问题不仅影响了对人员行动轨迹的精准追踪，还使得基于位置信息的风险预警难以有效的实施。在紧急情况下，管理人员无法准确掌握人员的分布情况，这可能会延误救援时机，从而增加事故的损失。

2 构建智能识别与预警系统整体架构

感知层作为系统的基础环节，采用多源数据采集策略实现对井下环境的全面感知。高清红外摄像头具备低照度成像能力，能够在微弱光线条件下清晰捕捉人员动作细节；毫米波雷达可穿透粉尘、烟雾等遮挡物，实时监测人员的空间位置和运动状态；环境传感器则负责采集甲烷浓度、一氧化碳含量、温湿度等关键参数。各类感知设备通过网格化部署，形成覆盖全作业区域的监测网络，确保无死角、无盲区的数据采集。设备间通过标准化接口实现数据互联互通，为后续分析提供基础数据支撑。

传输层的设计充分考虑井下复杂的通信环境，采用工业以太网与 5G 专网融合的双链路传输模式。工业以太网利用井下已有的光纤网络，为数据传输提供稳定的物理通道，适用于固定区域的大量数据传输；5G 专网则依托井下部署的 5G 基站，实现人员移动过程中的高速数据通信，满足视频流、实时定位等数据的传输需求^[3]。在传输路径上部署边缘计算节点，对采集的原始数据进行初步处理，包括图像压缩、无效数据过滤等，减少数据传输量，降低网络负载，提升整体传输效率。

处理层是系统的核心大脑，集成了深度学习算法和智能分析模型。基于改进的 YOLO 算法构建的目标检测模型，能够快速识别人员、设备、防护用具等目标物体；结合 3D 姿态估计技术，可对人员的肢体动作进行精准建模，判断是否存在违规行为。系统通过建立行为特征库，将常见违规行为进行分类编码，结合环境

参数进行风险评估^[4]。当检测到人员未佩戴安全帽且附近甲烷浓度超标时，系统会自动提高风险等级。应用层则将处理结果转化为可视化信息，通过大屏监控系统展示井下实时状态，同时支持多终端预警推送，确保管理人员第一时间获取风险信息并采取应对措施。

3 系统关键技术实现路径

图像预处理技术针对井下恶劣的成像条件进行针对性优化。自适应直方图均衡化算法根据图像局部亮度分布，动态调整像素灰度值，增强图像对比度，使暗部细节更加清晰；小波去噪算法利用小波变换的多尺度特性，将图像分解为不同频率成分，通过阈值处理去除噪声干扰，保留有用信号。两种技术相结合，能够有效提升图像质量，为后续行为识别提供可靠数据基础。经过预处理的图像不仅清晰度显著提高，而且能够更好地保留人员动作细节，减少因图像质量问题导致的识别误差。

行为识别模型采用 CNN-LSTM 混合网络架构，充分发挥卷积神经网络（CNN）和长短期记忆网络（LSTM）的优势。CNN 通过多层卷积和池化操作，自动提取行为图像中的静态特征，如人体姿态、动作轮廓等；LSTM 则负责处理时间序列数据，捕捉动作的动态变化和时序关系。模型引入注意力机制，使网络能够聚焦于关键行为区域，提高对复杂动作的识别能力^[5]。在模型训练阶段，通过数据增强技术扩充训练样本，包括图像旋转、翻转、添加噪声等操作，提升模型的泛化能力。经过大量样本训练和优化，模型能够准确识别多种违规行为，为安全监管提供有力支持。

定位与轨迹分析技术融合超宽带（UWB）定位和惯性导航两种技术。UWB 定位利用其高精度测距能力，实现人员位置的厘米级定位；惯性导航则通过加速度计和陀螺仪实时感知人员的运动状态，在 UWB 信号丢失时仍能保持位置推算。卡尔曼滤波算法对两种定位数据进行融合处理，动态修正定位误差，确保位置信息的准确性^[6]。基于 GIS 地图构建的轨迹分析模型，能够对人员的移动路径进行实时监测，通过预设规则判断是否存在异常移动，如进入禁区、偏离规定路线等。一旦检测到异常，系统立即触发预警，并提供详细的轨迹记录，为事故追溯和责任认定提供依据。

4 系统应用验证与优化方向

系统在实际应用中展现出显著的安全管理效能。通过在某煤矿的掘进工作面部署运行，系统实现了对作业人员行为的全天候、全区域监测。管理人员可通过监控平台实时查看各区域人员状态，及时发现并纠正

违规行为。系统的预警功能有效降低了事故发生概率,通过分级响应机制,对不同风险等级的违规行为采取相应处置措施,形成从监测、预警到处置的完整管理闭环。系统积累的行为数据为安全管理提供了决策支持,通过数据分析可发现人员行为规律,针对性地制定安全培训和管理措施。

在实际应用过程中,煤矿井下人员安全行为智能识别与预警系统在复杂场景下的适应性问题逐渐显现。在人员密集的作业区域,如同繁忙的地下集市,工人们穿梭往来,彼此身影相互交错遮挡。这使得安装在巷道各处的摄像头,即便拥有敏锐的目光,也难以捕捉到每个人完整的行为图像。在这样的困境下,系统的识别准确率如同遭遇风暴的帆船,急剧下降。部分区域的巷道结构复杂得如同迷宫,曲折蜿蜒、转角众多。当 UWB 定位信号在这样的环境中传播时,信号就像迷失方向的飞鸟,在巷道壁间不断反射。这种严重的信号反射,导致定位信号变得极不稳定,人员的位置信息如同漂浮在水面的落叶,出现漂移现象,无法精准定位。煤矿世界广袤而多样,不同矿井的地质条件犹如性格迥异的个体,有的矿井岩层坚硬稳固,有的则松软易塌;作业流程也各不相同,有的采用传统的开采方式,有的引入了现代化的设备和工艺^[7]。而现有的识别系统,其参数设置却相对固定,难以像灵活的变色龙一样,根据每个矿井的独特情况进行适配。这种适配性的缺失,极大地限制了系统性能的充分发挥。这些重重难题清晰地表明,若想让系统在多样化的井下作业环境中游刃有余,进一步的优化升级迫在眉睫。

针对上述问题,系统优化方向主要包括三个方面。引入多摄像头协同拍摄技术,通过多个摄像头从不同角度采集图像,再利用图像拼接算法合成完整场景,解决人员遮挡问题;改进 UWB 基站部署方案,采用时分多址技术避免信号干扰,同时优化定位算法,提高定位精度和稳定性;建立动态模型库,根据不同矿井的实际情况自动调整识别参数,增强系统的环境适应性^[8]。结合数字孪生技术,将井下物理空间与虚拟模型相结合,实现安全状态的可视化呈现和动态模拟,为安全管理提供更直观、更高效的决策工具。

5 结语

煤矿井下人员安全行为智能识别与预警系统通过整合多学科技术,构建了从行为感知到风险处置的完整体系,有效提升了井下安全监管的智能化水平,减少了因人员不安全行为引发的事故风险。未来,随着物联网感知技术的迭代和人工智能算法的优化,系统将进一步提升在复杂环境下的适应能力,实现与矿井生产系统的深度融合,形成全方位、立体化的安全防控网络,为煤矿安全生产提供更坚实的技术保障,推动行业向更高效、更安全的方向发展。

参考文献

- [1] 王冲,姚有利,侯艳文,等.基于 YOLOv5s 的煤矿井下人员不安全行为识别优化研究[J].陕西煤炭,2025,44(07):180-184.
- [2] 赵丽俊.基于智能算法的煤矿井下工作人员安全帽佩戴监控识别方法[J].自动化应用,2025,66(12):274-276+280
- [3] 孙宁昊,郭钰,董国宇,等.煤矿井下作业人员不安全行为概念辨析研究[J].煤矿安全,2025,56(05):245-250.
- [4] 郭孝园,朱美强,田军,等.基于深度学习的煤矿井下人员不安全行为检测与识别[J].工矿自动化,2025,51(03):138-147.
- [5] 孙宁昊,董国宇,李昕阳,等.基于 HFACS 的煤矿井下作业人员不安全行为致因组态研究——以机电事故和运输事故为例[J].安全,2025,46(02):57-63.
- [6] 郝建营.煤矿井下人员不安全行为测度模型与应用研究[J].山东煤炭科技,2024,42(10):175-178+184.
- [7] 公文礼.煤矿井下虹膜、定位卡多信息人员安全作业管控系统[J].电气防爆,2024,(03):40-42+46.
- [8] 闫丽君.基于 WSNs 的煤矿井下人员安全定位研究[J].矿业装备,2024,(06):72-74.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

