

基于机器视觉的矿山人员违规操作智能安防监测

王 峰 范元明 单世环

浙江大华技术股份有限公司 浙江 杭州 310052

摘 要：矿山作业环境复杂、高危，人员违规操作（“三违”行为）是引发安全事故的核心诱因。传统依赖人工巡查的安全管理模式存在效率低下、覆盖不全、响应滞后等固有缺陷。本文聚焦于利用先进的机器视觉技术，构建一套智能化、全天候的矿山人员违规操作监测系统。文章首先系统梳理了矿山典型违规操作类型，包括个人防护装备缺失（如未佩戴安全帽、反光衣）、危险区域闯入、睡岗脱岗及高危行为（如井下吸烟）等。其次，深入剖析了以 YOLOv5、YOLOv8 为代表的深度学习目标检测算法在复杂矿山场景下的应用原理与优势，并探讨了多模态数据融合、小目标检测优化等关键技术挑战。在此基础上，设计了一套“云-边-端”协同的系统架构，通过在前端部署具备边缘计算能力的 AI 摄像机进行实时分析，在云端进行大数据汇聚、模型训练与综合决策，实现了从“看得见”到“看得懂”的跨越。最后，分析了系统实施的关键考量因素与挑战。

关键词：机器视觉；矿山安全；违规操作；YOLO；边缘计算；智能安防

引言：矿业是战略性产业，其安全生产备受关注。国家矿山安全监察局数据显示，我国矿山安全水平虽提升，但“三违”导致的事故占比仍高。工人未戴安全帽、擅自进入危险区、在岗睡觉脱岗、瓦斯区违规吸烟等违规行为，常成重大灾难导火索。长期以来，矿山安全管理靠制度约束、人工巡检和事后视频回溯，但井下环境复杂，人工监管成本高、效率低，有盲区和滞后性，传统监控录像只能事后取证，无法事前预警和事中干预。随着人工智能、计算机视觉技术发展，为破解难题带来机遇，机器视觉让监控系统能自动识别、分析并预警违规行为，颠覆传统安防模式，推动矿山向本质安全型、智能化转型。本文将系统探讨如何有效应用机器视觉技术监测矿山人员违规操作，为构建现代化矿山提供参考。

1 矿山典型人员违规操作类型分析

1.1 个人防护装备（PPE）缺失

这是最基础也最常见的违规行为。根据《中华人民共和国安全生产法》及《煤矿安全规程》，所有入井人员必须正确佩戴和使用劳动防护用品。在实际生产中，工人因嫌麻烦或疏忽而未佩戴安全帽、安全帽未系紧下颌带的情况屡见不鲜。在顶板稳定性差或存在高空坠物风险的区域，这种行为无异于将自己置于极度危险之中。同样，反光衣作为在低照度环境下确保人员可视性的关键装备，其缺失会大大增加被运输车辆或移动设备碰撞的风险。此外，自救器、便携式气体检测仪等关乎生命安全的装备若未随身携带或失效，一旦遭遇突发险

情，后果不堪设想。这些看似微小的防护缺失，构成了矿山安全的第一道也是最脆弱的防线。

1.2 危险区域非法闯入

矿山生产区域通常依据风险等级进行严格划分，部分区域因存在高压电、大型运转设备、爆破作业点或有毒有害气体聚集等高风险因素，被明确划定为禁止非授权人员进入的警戒区。然而，在实际操作中，人员为了图方便或心存侥幸，常常无视警示标识，擅自穿越警戒线。例如，皮带输送机运行期间，其两侧及下方属于绝对危险区，但仍有人员为抄近路而冒险穿越。又如，在综采工作面的液压支架移架过程中，其前方和相邻支架间的区域是严禁站人的，但违章作业者可能为了清理浮煤而违规进入^[1]。这类行为直接将个体暴露于高能量释放源面前，极易造成致命伤害。

1.3 岗位纪律违反

良好的岗位纪律是维系整个生产系统安全稳定运行的组织保障。在需要持续监控的岗位，如主通风机房、中央变电所、水泵房等，值班人员的在岗状态至关重要。睡岗行为意味着在关键时刻无人响应报警或进行应急处置，可能导致小隐患演变成大事故。脱岗则更为严重，它使得关键设备处于无人看管的状态，一旦发生故障，无法得到及时处理。此外，在岗期间玩手机、闲聊嬉戏等行为，虽然不直接构成物理伤害，但会严重分散操作人员的注意力，使其对周围环境变化的感知能力下降，从而增加误操作的概率，埋下安全隐患。

1.4 高危行为

此类行为具有极高的即时危险性和不可逆的后果。其中，井下吸烟是最典型的红线行为。在可能存在瓦斯、煤尘等易燃易爆物质的封闭环境中，一个微小的火星就足以引发毁灭性的爆炸或火灾，历史上因此造成的惨痛教训不胜数。不安全站位同样是高发的高危行为，例如在吊装作业的重物下方停留、在矿车运行轨道上行走或坐卧、靠近正在运转的破碎机或球磨机等。这些行为都源于对潜在动能或势能危害的严重低估。此外，违章操作设备，如无证上岗、不按规程启停设备、徒手清理运转中的设备等，都是将自身置于机械伤害的直接威胁之下。

2 机器视觉核心技术与算法选型

2.1 深度学习目标检测算法：YOLO 系列

在众多目标检测算法中，YOLO (You Only Look Once) 系列因其卓越的速度与精度平衡，成为工业视觉领域的首选。它将目标检测视为一个单一的回归问题，能在一次网络推断中同时预测多个边界框和类别概率，非常适合需要实时响应的安防场景。YOLOv5 作为一款成熟稳定的工业级框架，在速度和精度上取得了良好平衡，其模块化设计便于工程部署和定制化开发，已被广泛应用于早期的矿山安全帽、工服识别等任务。而作为 YOLO 系列的最新迭代，YOLOv8 在骨干网络、颈部网络和检测头等多个方面进行了全面优化。它引入了更先进的无锚框检测机制和更精细的正负样本匹配策略，显著提升了对小目标（如远距离的人）和遮挡目标的检测能力^[2]。在粉尘弥漫、光照不均的矿山环境中，YOLOv8 凭借其更强的特征提取能力和鲁棒性，展现出超越前代模型的性能，能够更可靠地完成复杂场景下的违规行为识别任务。

2.2 关键技术挑战与应对策略

2.2.1 复杂环境干扰

井下普遍存在低照度、高粉尘、水雾、设备遮挡等问题，严重影响图像质量。应对策略包括：采用宽动态范围（WDR）和低照度性能优异的工业级摄像机；在算法层面，通过数据增强（如模拟粉尘、雾气效果）来提升模型的泛化能力；利用红外或热成像等多光谱信息进行补充。

2.2.2 小目标与密集目标检测

在广角监控画面中，远处的人员可能仅占几十个像素，属于典型的小目标。YOLOv8 通过改进的特征金字塔网络（FPN）和路径聚合网络（PAN），加强了浅层特

征（包含更多细节）与深层特征（包含更多语义）的融合，有效提升了小目标的召回率。

2.2.3 行为理解的深化

从静态的目标检测（如“是否戴安全帽”）到动态的行为理解（如“是否在睡觉”、“是否在吸烟”），需要引入姿态估计（Pose Estimation）和时序行为分析技术。例如，通过分析人体关键点序列，可以判断一个人的姿态是“站立”还是“趴卧”，从而识别睡岗行为。

3 智能安防监测系统架构设计

3.1 “云-边-端”协同架构

为解决海量视频数据传输带宽压力和实时性要求之间的矛盾，业界普遍采用“云-边-端”三级协同架构。

3.1.1 端（感知层）

由部署在井口、主巷道、采掘面、机电硐室等关键位置的 AI 智能摄像机构成。这些摄像机内置高性能 AI 芯片（如华为昇腾、英伟达 Jetson 系列），能够在本地完成视频采集、预处理和初步的违规行为识别，实现毫秒级的本地告警（如触发声光报警器、联动设备急停）。

3.1.2 边（计算层）

在井下或地面机房部署边缘计算服务器集群。它负责汇聚多个前端摄像机的数据，执行更复杂的分析任务（如多目标跟踪、跨摄像头行为关联分析），并对前端模型进行轻量化更新和管理^[3]。边缘计算大幅减少了上传至云端的数据量，降低了网络负载。

3.1.3 云（平台层）

在数据中心或私有云上构建统一的智能安防管理平台。平台负责全局数据的存储、可视化展示、历史记录查询、深度学习模型的集中训练与迭代优化、以及与其他矿山信息系统（如人员定位、环境监测）的集成。管理人员可通过 Web 或移动端 APP，随时随地掌握全矿安全态势。

3.2 系统工作流程

（1）数据采集：AI 摄像机持续采集现场高清视频流。（2）边缘推理：视频流在摄像机或就近的边缘节点上，由预训练好的 YOLOv8 等模型进行实时分析。（3）事件触发：一旦检测到预设的违规行为（如未戴安全帽），系统立即生成结构化告警信息，包括时间、地点、抓拍图片、视频片段及违规类型。（4）分级响应：本地设备触发声光报警，提醒现场人员；同时，告警信息通过 5G 或工业环网上传至云端平台。（5）云端处置：平台接收告警后，可自动推送通知给相关安全员或

管理人员，并记录在案，用于后续的统计分析、考核追责和安全培训。

4 系统实施的关键考量因素与挑战

尽管基于机器视觉的智能安防系统前景广阔，但在其规划、部署与运维的全过程中，仍需审慎应对一系列现实挑战，以确保系统能够真正落地并发挥长效价值。

4.1 数据隐私与伦理问题

系统持续采集和分析员工的视频影像，不可避免地触及个人隐私边界。如何在保障安全生产与尊重员工隐私权之间取得平衡，是项目成功的关键前提。这要求企业必须建立透明、合规的数据治理政策，明确告知员工监控的目的、范围和数据使用方式，并采取必要的技术措施，如对非违规时段的原始视频进行匿名化处理或定期自动删除，仅保留结构化的告警事件数据。同时，应避免将系统用于过度监控或惩罚性管理，而应将其定位为辅助员工养成安全习惯、共同营造安全文化的技术工具。

4.2 模型的泛化能力与持续进化

矿山环境千差万别，不同矿区、不同作业面的光照、粉尘、背景乃至工人的着装风格都可能存在差异。在一个矿井训练出的完美模型，直接迁移到另一个矿井可能会出现性能骤降。因此，系统必须具备强大的在线学习和自适应能力。这依赖于一个高效的数据闭环：系统在运行中不断收集新的、带有标注的样本（尤其是那些被漏检或误检的困难样本），并定期将这些数据上传至云端，用于增量训练和模型微调^[4]。经过优化的新模型再通过 OTA（空中下载）方式下发至各个边缘节点，从而实现模型的持续迭代和性能提升。

4.3 系统的可靠性与鲁棒性

矿山井下是极端恶劣的工业环境，高温、高湿、强电磁干扰、剧烈震动等因素都可能影响电子设备的稳定运行。因此，从前端的 AI 摄像机到边缘服务器，都必须选用符合矿用本安或隔爆认证的工业级硬件，确保在严苛条件下 7x24 小时不间断工作。同时，网络通信的稳定性也至关重要，应采用冗余的工业环网或 5G 专网，保证

告警信息能够及时、无丢失地上报。

4.4 人机协同的管理模式

技术永远无法完全替代人，智能系统应当被视为安全管理人员的“超级助手”。它解放了人力，使其从繁重的盯屏工作中解脱出来，转而专注于更高价值的决策、培训和文化建设。成功的实施必然伴随着管理流程的再造，需要建立清晰的告警响应 SOP（标准作业程序），明确从告警触发到现场处置再到事后复盘的完整链条，并将系统数据深度融入企业的安全绩效考核体系，形成“技术驱动、管理闭环、文化引领”的良性循环。

5 结语

基于机器视觉的矿山人员违规操作智能安防监测，代表了未来矿山安全管理的发展方向。通过深度融合先进的深度学习算法与“云-边-端”协同架构，该系统可克服传统模式的局限性，实现了对“三违”行为的精准、实时、自动化监管，为矿山的安全生产构筑了一道坚实的技术防线。展望未来，该领域仍有广阔的发展空间。一方面，算法将持续进化，通过引入 Transformer、自监督学习等前沿技术，进一步提升在极端恶劣环境下的识别准确率和对复杂交互行为的理解能力。另一方面，系统将更加开放和智能，与数字孪生、元宇宙等技术结合，构建一个虚实融合的沉浸式安全管控平台，实现从被动防御到主动预测、从单点监控到全局协同的更高阶智慧安全管理。

参考文献

- [1] 王新华, 张国栋, 刘小源, 等. 智能化矿山建设视域下的井下人员监测设计研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(04): 87-91.
- [2] 王全乐, 张演义, 姜艳民, 等. 基于超像素分割与三维空间的智慧站场人员违规行为全方位跟踪监测方法 [J]. 计算技术与自动化, 2025, 44(01): 70-74.
- [3] 甘培潮. 基于图像压缩编码的分级预警安防监测技术研究 [J]. 工业控制计算机, 2026, 39(01): 25-26+29.
- [4] 胡胜, 胡歆敏, 李莎莎, 等. 基于 GAF-HorNet 的 Φ -OTDR 周界安防监测研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(09): 251-260.