

# 基于AI视觉识别的带式输送机异物检测与自动停机系统研究

郭鑫宇

平顶山天安煤业股份有限公司十矿 河南 平顶山 467013

**摘要:** 带式输送机是煤矿井下原煤运输核心装备,其安全稳定运行关乎矿井生产效率与人员安全。传统异物监测方式有响应滞后、误报漏报率高、无法全天候工作等缺陷,难满足智能化矿山对本质安全的要求。本文聚焦煤矿高危场景,探讨基于AI视觉识别技术的带式输送机异物智能检测与自动停机系统。先剖析煤矿带式输送机常见异物类型、危害及现有检测手段局限;接着阐述系统核心架构,涵盖前端感知、数据传输与后端智能决策层;再论述深度学习目标检测算法选型、模型优化及多模态信息融合的必要性;最后从多维度论证系统可行性等。研究表明,该系统能高精度、实时、自动识别危险异物并预警、紧急停机,提升本质安全水平,为构建下一代煤矿运输体系奠定技术基础。

**关键词:** 煤矿安全; 带式输送机; 异物检测; AI视觉识别; 自动停机

## 引言

煤炭是我国能源结构的关键,其安全生产关乎国家能源战略与公共安全。煤矿开采中,带式输送机是井下主运输核心设备,但高速长距离运行易因外部因素引入异物,引发安全事故,如金属锚杆卡入致皮带撕裂、大块矸石坠落损坏设备、人员卷入造成伤亡等,既造成经济损失,又威胁矿工生命。长期以来,煤矿对带式输送机异物防范主要靠人工巡检和简单机电保护装置。人工巡检受生理、环境等限制,存在盲区与时效问题;机电保护装置对随机异物入侵无能为力,缺乏主动感知与智能判别能力<sup>[1]</sup>。如今,新兴技术加速向传统产业渗透,国家政策推动煤矿智能化发展。在此背景下,引入AI视觉识别技术构建智能异物检测与自动停机系统,是解决安全痛点、实现煤矿智能化转型的关键,本文将研究其理论、技术路径与工程方案。

## 1 煤矿带式输送机异物类型、危害及现有检测技术分析

### 1.1 典型异物类型与危害机理

煤矿井下环境复杂,带式输送机运行中可能遭遇多种异物。刚性金属异物如锚杆等,硬度高、边缘锐利,卷入易刺穿皮带致钢丝绳芯断裂,引发灾难性纵向撕裂,修复成本高且伴火灾风险;大块非金属异物如矸石等,落入皮带可能砸坏设备、加剧磨损,有引燃风险;人员及肢体侵入会致碾压、绞伤等致命伤害;其他异常状态如皮带跑偏、起火冒烟等虽非异物,但也是事故前兆,需视觉系统关注。

### 1.2 现有检测技术的局限性

面对煤矿带式输送机复杂的异物威胁,传统检测手段存在诸多局限。人工巡检依赖经验,易疲劳疏忽,井下环境影响视觉,且无法7x24小时监控,对突发事件难预警;接触式传感器作用滞后,如纵向撕裂传感器只能事后报警,拉绳开关对无人区域异物无效;早期视频监控仅用于事后回溯,人工难长时间专注且难识别微小快速异物;基于规则的图像处理因煤矿环境复杂、光照不稳,算法鲁棒性差,误报漏报率高,实用性欠佳。

## 2 AI视觉识别系统总体架构设计

为有效应对煤矿带式输送机的异物检测挑战,本文提出一个分层、模块化的系统架构,确保从数据采集到决策执行的全流程高效、可靠、安全。该架构主要由三大核心层次构成:前端感知层、数据传输层和后端智能决策层。

### 2.1 前端感知层(数据采集与预处理)

前端感知层是整个系统的“眼睛”,部署于带式输送机的关键位置,如机头、机尾及人员易接近区域。其核心任务是在煤矿井下高湿、高粉尘、低照度的恶劣环境中获取清晰、稳定的图像。为此,必须选用高分辨率、高帧率、宽动态范围(WDR)的矿用本安型或隔爆型工业相机,并配备与之同步的专用照明系统,可采用红外补光实现全天候成像或白光补光以提供真实色彩信息<sup>[2]</sup>。所有设备均需具备防爆、防水、防尘(IP67以上)的坚固特性。为应对煤尘污染,相机必须集成带有自动雨刷或气幕的防护罩,确保光学窗口持续清晰。在条件

允许时,可在前端部署边缘计算网关,执行图像压缩、去噪等本地预处理,以减轻后端负担。

### 2.2 数据传输层(高速可靠通信)

从前端采集的海量高清视频流需通过高速可靠的通信网络传输至后端。矿用工业以太网构成了系统的骨干,通常采用千兆或万兆光纤环网,提供高带宽、低延迟且具备高冗余性的传输通道。所有前端设备通过符合煤矿安全标准的矿用交换机接入此环网。对于布线困难的区域,可辅以符合安全标准的无线Mesh网络,确保信号全覆盖。数据传输采用RTSP、ONVIF等标准协议,并集成加密与认证机制,保障视频数据在传输过程中的安全性与完整性。

### 2.3 后端智能决策层(AI分析与控制)

后端智能决策层是系统的“大脑”,负责核心的AI推理、逻辑判断与指令下发。它由部署于地面或井下安全硐室的高性能服务器集群构成,搭载GPU/TPU加速卡,为深度学习模型提供强大算力。核心是AI视觉识别引擎,内嵌经专门训练的深度学习目标检测模型,对视频流进行毫秒级实时推理,输出异物的类别、位置与置信度。这些结果需经由智能告警与决策逻辑模块综合研判,依据预设的安全规则库(如高置信度识别到锚杆或人体侵入即判定为一级紧急事件)做出最终决策<sup>[3]</sup>。确认危险后,系统通过OPC UA、Modbus TCP等工业协议,与输送机PLC或集控系统无缝对接,毫秒级发送停机指令,并同步触发声光报警、推送告警信息及保存事发视频。为便于管理,系统配备人机交互(HMI)平台,提供直观的可视化界面,实现对各监测点状态、识别结果及历史告警的远程监控与管理。

## 3 核心AI算法模型研究与优化

AI视觉识别引擎的性能优劣,关键在于其核心算法模型的选择与优化。针对煤矿带式输送机场景的特殊性,需进行针对性的研究与定制。

### 3.1 深度学习目标检测算法选型

近年来,基于深度学习的目标检测算法取得了巨大成功,主流算法可分为两阶段(Two-stage)和单阶段(One-stage)两类。两阶段算法,如Faster R-CNN,以其高精度著称,但其计算复杂度高、推理速度慢,对于需要毫秒级响应的煤矿安全场景而言,其延迟往往难以满足实时性要求。相比之下,单阶段算法,如YOLO系列和SSD,在速度和精度之间取得了更为良好的平衡。其中,YOLO(You Only Look Once)系列算法因其卓越的实时性能而备受工业界青睐。从YOLOv3到最新的YOLOv8/v9,其网络架构不断演进,在保持高速的同时,检测精

度也得到了显著提升。综合考虑煤矿场景对实时性和精度的双重需求,以及YOLO系列完善的开源生态和易于部署的特性,本系统应优先选用最新一代的YOLO算法(如YOLOv8)作为基础模型,这为其在复杂井下环境中的高效、准确运行奠定了坚实的算法基础。

### 3.2 面向煤矿场景的模型优化策略

通用的目标检测模型在煤矿这种极端环境下直接应用效果不佳,必须通过一系列精心设计的优化策略,才能提升模型的鲁棒性和泛化能力。首要任务是构建一个高质量、场景化的数据集,这是模型成功的基石。这要求在真实或高度仿真的煤矿环境中,系统性地采集涵盖各种工况(不同光照、不同煤质、不同皮带速度、不同粉尘浓度)下,包含所有目标异物(锚杆、大块矸石、人体等)的海量图像,并对每张图像进行精确标注,形成高质量的训练、验证和测试集。在此基础上,大规模的数据增强技术是必不可少的,通过对原始数据集进行随机亮度/对比度调整、添加噪声、模拟运动模糊、随机遮挡,乃至使用生成对抗网络(GAN)合成极端场景样本,可以极大地丰富训练数据的多样性,使模型学会在各种干扰下依然能准确识别目标。此外,为了适应实际部署的硬件限制,必须对训练好的大型模型进行压缩。模型剪枝可以移除网络中冗余的神经元或通道,而量化则能将模型权重从32位浮点数转换为8位整数甚至更低,这两种技术都能在可控的精度损失范围内,大幅减小模型体积、降低内存占用、并显著提升推理速度<sup>[4]</sup>。最后,为了进一步提升模型对关键区域的关注度,可以在网络架构中融入注意力机制,如CBAM或SE Block,引导网络自动聚焦于皮带表面等与任务最相关的区域,有效抑制巷道墙壁、支架等复杂背景的干扰,从而增强对小目标异物的检测能力。

### 3.3 多模态信息融合的必要性

尽管RGB视觉信息已经非常强大,但在煤矿极端条件下(如浓雾、全黑、强反光),单一模态仍可能存在失效的风险。为构建一个更加坚不可摧的可靠系统,引入多模态信息进行融合是一种必然趋势。红外热成像技术能够有效穿透粉尘和黑暗,通过检测物体的温度差异来识别人体或因摩擦过热的设备部件,这与可见光图像形成了完美的互补。同时,通过双目立体视觉或ToF(飞行时间)相机获取场景的深度图,可以精确判断异物与皮带之间的三维空间距离,有效区分前景的危险异物和背景的静态干扰,这对于准确评估大块矸石的体积和潜在威胁尤为关键。通过设计先进的多模态融合网络,将不同物理特性的传感器信息在特征层面或决策层面进行

深度融合，可以构建一个感知能力更强、适应性更广的智能系统，从而显著提升其在各种极端工况下的整体鲁棒性和可靠性，为煤矿安全提供双重乃至多重保障。

#### 4 系统功能实现与安全冗余设计

一个成功的工程系统，不仅要有先进的技术内核，更要有周全的功能设计和严格的安全保障。

##### 4.1 核心功能实现

本系统的核心功能围绕着“感知-决策-执行-追溯”这一闭环展开。系统对从前端传来的视频流进行逐帧分析，实时框选出检测到的异物，并清晰标注其类别和置信度，为后续决策提供依据。为了避免因误报而导致不必要的生产中断，系统建立了分级告警机制，根据异物的危害等级采取不同的响应策略。例如，对于人体侵入等一级告警，系统将毫不犹豫地直接触发自动停机；而对于疑似锚杆等二级告警，则可先发出预警，由地面调度员通过视频复核后再决定是否执行停机操作，以此在保障安全与维持生产之间取得最佳平衡。一旦确认存在一级风险，系统将通过与输送机控制系统的深度集成，在数百毫秒内完成停机指令的发送与执行，确保在最短时间内消除危险。为了便于事故调查和责任认定，系统会自动保存告警事件发生前后的完整视频录像、关键截图及详细的AI分析日志，形成完整的事件证据链。此外，系统还支持远程运维与诊断功能，维护人员可以远程查看系统状态、在线更新AI模型、灵活调整参数配置，极大地降低了现场维护的成本和难度。

##### 4.2 安全冗余与可靠性设计

煤矿安全无小事，任何智能化系统都不能以牺牲安全性为代价，因此必须将安全冗余与可靠性设计置于首位。在硬件层面，关键节点如AI推理服务器、核心网络交换机等，应采用双机热备或N+1冗余配置，确保任何一个单点发生故障时，系统整体仍能无缝、持续地运行。在软件层面，AI引擎必须内置完善的异常处理和容错机制，当模型推理失败或输出置信度过低时，系统不应盲目执行停机动作，而是应降级为预警模式，并立即通知维护人员介入处理，防止因系统自身故障引发新的安全

问题。最为关键的是，自动停机指令的最终执行回路，必须是一个独立于主AI系统和网络通信的硬接线安全回路（Safety Relay）。这意味着，即使AI系统崩溃、网络中断，传统的急停按钮、拉绳开关等物理保护装置依然能够直接切断设备电源，形成一道不可逾越的安全底线。最后，所有部署在井下的设备，从相机到交换机，都必须严格遵循国家相关法规，取得矿用产品安全标志（MA/KA认证），并在设计上充分满足防爆、防火、抗电磁干扰等一系列强制性安全要求，确保系统从内到外都经得起煤矿严苛环境的考验。

#### 5 结语

本文系统研究了基于AI视觉识别的带式输送机异物检测与自动停机系统在煤矿场景的应用，深入剖析安全痛点后，提出集前端感知、高速传输、智能决策于一体的完整技术架构，强调针对恶劣环境对AI模型定制化训练优化的重要性，论证多模态信息融合提升系统鲁棒性的价值，还从工程实践角度阐述核心功能实现路径与安全冗余设计理念。该系统将被动响应转为主动预防，实现“零时差”感知处置危险异物，避免财产损失，构筑矿工生命安全防线，践行安全生产理念。展望未来，随着AI技术发展，该系统空间广阔，可探索自监督或弱监督学习方法减少对海量标注数据依赖，与数字孪生平台深度融合，实现从单点智能到全局协同跨越，为构建下一代智能化煤矿提供支撑，成为煤矿迈向本质安全新时代的关键驱动力。

#### 参考文献

- [1]张国鸣,王文龙,于福军,等.面向煤矿带式输送机场景的视觉识别和分类方案[J].智能矿山,2025,6(12):86-89.
- [2]于永波.复杂场景下矿井带式输送机异物与撕裂检测研究方法研究[D].河南工业大学,2025.
- [3]郑松涛.基于深度学习的矿用带式输送机异物检测与定位研究[D].山西大同大学,2025.
- [4]闫禄.带式输送机异物检测系统开发与试验研究[J].自动化应用,2024,65(15):227-229.