

# 基于图像目标检测的调机机车智能障碍物识别与预警系统

安鑫 刘晶 刘文才 王彬鉴 刘斌

北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 北京 100070

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15730

**[摘 要]** 铁路调机作业环境复杂多变, 人工瞭望方式易受视觉盲区、天气干扰及人员疲劳等因素影响, 导致碰撞事故频发, 严重威胁作业安全与铁路运输效率。为降低安全隐患、减轻司机工作强度, 本论文设计了基于计算机图像处理与目标检测的智能障碍物识别预警系统。该系统通过在调机机车上部署的高清摄像头, 实时检测前方环境的行人、车量、异物等, 结合障碍物距离、运动趋势等信息生成多级预警信号, 并可进一步通过接口干预机车调机系统的行进速度与制动指令。该系统有望为铁路调机作业提升复杂场景下的风险预判能力, 降低人为操作失误导致的事故率, 为铁路运输安全生产提供智能化技术支撑。

**[关键词]** 铁路调机作业; 障碍物识别; 目标检测; 计算机视觉

**Abstract:** The operational safety and railway transportation efficiency for shunting locomotive is highly threatened by the complex environment, weather condition, visual blinds, personal fatigue, and so on. To avoid potential accidents and reduce the workload of locomotive drivers, this paper designs an obstacle recognition system responsible for foreign object detection and early warning. The system detects persons, vehicles, foreign objects, etc. in the front of the locomotive through high-definition cameras and intelligent object detection algorithm, generates multi-level early warning signals together with information such as obstacle distance and movement trends, and can further intervene the speed and braking commands of the locomotive system through dedicated interfaces. The system is expected to enhance the risk prediction capability in complex railway shunting scenarios, improve the safety of shunting operations, and provide intelligent support for railway transportation system.

**Keywords:** Railway Shunting Operations; Obstacle Recognition; Object Detection; Computer Vision

## 1. 引言

铁路调机作为铁路运输系统的关键环节, 承担着列车编组、解体、转线等核心作业, 其作业环境具有空间狭窄、设备密集、人员流动性大等显著特点。在调机作业过程中, 司机需持续瞭望前方轨道及周边区域, 及时发现行人、停留车辆、散落工具等障碍物, 以此判断行车安全并采取制动措施。<sup>[1]</sup>然而, 人工瞭望模式存在难以克服的固有缺陷: 一方面, 调机作业常伴随频繁转向、倒车等操作, 司机视线易被车厢、站台、货堆等遮挡形成视觉盲区, 对近距离突发障碍物的响应滞后性显著; 另一方面, 长时间重复性作业易导致司机疲劳, 在复杂光照(如强光、逆光、夜间)或恶劣天气(如下雨、大雾)条件下, 障碍物识别准确率大幅下降<sup>[2]</sup>。

据铁路安全监管部门统计, 全国铁路调车作业事故中, 因瞭望不及时引发的碰撞事故时有发生, 其中不乏涉及人员伤亡, 直接造成经济损失。这些数据表明, 传统人工瞭望模式已难以满足现代铁路运输对安全性、高效性的要求, 亟需引入智能化技术提升调机作业的风险防控能力<sup>[5]</sup>。基于此,

开发智能瞭望预警系统, 替代部分人工瞭望, 有望弥补人工操作的短板, 对于保障铁路职工人身安全、减少设备损坏、提高调车作业效率具有重要的现实意义, 同时也是铁路行业向智能化、无人化转型的关键技术支撑。

从工业场景到民用领域, 计算机视觉目标检测技术凭借其非接触式感知、信息获取全面等优势, 已在自动驾驶汽车的道路障碍物识别<sup>[7]</sup>、工业生产线的产品缺陷检测<sup>[8]</sup>、安防监控的异常行为预警<sup>[9]</sup>等场景中实现规模化应用。另一方面, Faster R-CNN<sup>[10]</sup>、SSD<sup>[11]</sup>和 YOLO<sup>[12]</sup>等目标检测算法在学术界持续迭代优化, 不断突破精度与速度的平衡瓶颈。其中, YOLO 系列算法凭借单向检测架构的优势, 在保证较高检测精度的同时, 展现出毫秒级的实时响应能力, 尤其适用于对时间敏感性要求严苛的动态场景<sup>[13]</sup>。而在铁路调机作业场景中, 调机作业区域往往涉及编组站、货场、站台等复杂场景, 目标类型多样(如作业人员、停留机车、散落工具)且动态性强<sup>[14]</sup>, 具有高实时性特性的 YOLO 检测算法可对机车附近物体和障碍物进行动态识别, 并将检测结

果发送至机车自动控制系统与之联动, 实现智能预警、自动制动等功能, 有望突破传统人工瞭望的局限, 构建更智能、更可靠的安全防护体系。

本文将构建基于 YOLO 检测算法的调机机车智能障碍物识别系统, 论文分为以下几个部分: 第一部分为引言; 第二部分介绍系统各功能模块; 第三部分为系统部署和测试验证; 第四部分为结论和展望。

## 11. 调机机车障碍物识别与预警系统的功能组成

如图 1 所示, 障碍物识别预警系统通过摄像头监控机车前方环境, 并将实时图像进行预处理后, 输入训练好的 YOLOv8 网络中进行推理运算完成目标检测和障碍物识别。最后, 经过障碍物类别及其在图像中的位置进行风险判定, 对机车司机发出报警信息, 并在必要时与机车自动制动系统规划制动和速度曲线, 实现减速和安全停车等。



图1 调机智能障碍物识别与预警系统功能模块

(1) 图像采集: 摄像头作为系统的图像采集单元, 如同机车的“眼睛”, 以合适位置和角度部署于机车特定位置, 负责捕捉机车前方轨道及周边环境的实时画面。其部署位置需由需要检测的区域确定, 通常安装在机车前端驾驶室瞭望窗上方或机车前方位置, 且在必要时在机车前后左右等多个位置均安装, 以确保机车前进方向和周围方向的视场覆盖, 完整捕捉机车前进方向轨道延伸段、道岔区、站场作业区域等场景。在硬件选型上, 应选用具备宽动态范围 (HDR)、低照度增强 (LIE) 技术的工业级摄像头, 支持在强光直射 (正午阳光照射轨道)、弱光 (如夜间调车作业)、逆光 (机车驶向

朝阳方向) 及雨雾、沙尘等复杂气象条件下, 持续输出稳定帧率的清晰图像 (清晰度不低于 1080 p, 帧率不低于 30fps), 作为感知系统的信息源为系统提供稳定的高质量视觉图像数据。

(2) 图像预处理: 考虑铁路调机作业场景下图像数据所存在的复杂干扰, 可应用图像预处理技术作为衔接图像采集与智能识别算法的环节, 对所采集的图像数据进行初步优化, 以提高目标检测算法的预测准确度以及智能识别系统的鲁棒性。由于机车运行时的机械振动及机电部件运转时所产生的强磁场环境, 会使摄像头采集的图像产生模糊

拖影和高斯噪声等;而早晚时段的光照变化、隧道内外的光线突变,会造成图像亮度不均、对比度失衡。针对上述现象,采用预处理模块基于计算机视觉图像处理算法,依次对采集图像执行多维度处理:首先,结合轨道区域的先验知识,通过透视变换校正因摄像头安装角度导致的图像畸变,还原轨道及障碍物的真实几何形态;其次,运用自适应中值滤波算法,根据噪声密度动态调整滤波核大小,有效去除图像中的随机噪声,同时最大程度保留边缘细节,解决振动模糊与电磁噪声问题;最后,采用对比度受限的自适应直方图均衡化(CLAHE)技术,对图像分块进行直方图均衡化,在增强局部对比度的同时避免整体过曝,适配不同光照条件下的图像质量提升。经预处理后,图像数据可在清晰度、噪声水平、光照均匀性及几何准确性上得到优化,为YOLO推理模块提供稳定高质的输入数据,保障后续目标检测的精度与可靠性。

(3) 基于YOLO的推理:该模块主要负责对预处理后的图像进行实时目标检测推理运算,快速输出障碍物的类别、位置及置信度,是实现系统障碍物智能识别的核心组成部分。以YOLOv8算法为例,使用铁路调车作业场景内的数据集对预训练模型二次训练后,可以针对性地对调车作业场景内的各类障碍物进行有效识别。该模块的推理流程大致如下:首先,将预处理后的图像调整为YOLO算法所需的输入尺寸(如 $640 \times 640$ ),并进行归一化处理,转化为网络可识别的张量;接着,借助特征提取网络将图像数据经卷积运算后转换为不同尺度的特征图,这些特征分别对应不同大小目标的检测对象;随后,特征融合层对多尺度特征进行融合增强,再由检测头输出包含目标边界框、类别概率和置信度的预测结果;最后,通过非极大值抑制算法过滤掉冗余的检测框,保留置信度符合设定阈值的目标,作为最终的检测结果作为网络输出。该模块可部署在边缘计算平台或嵌入式设备运行,可保证单帧图像推理时间在要求范围内,满足调车作业目标检测的实时性要求,为后续的风险评估等环节提供及时、准确的障碍物信息。

(4) 障碍物识别与风险判定:该模块将YOLO算法输出的目标检测推理结果进行分类与信息整合,并进行风险程度判断。根据YOLO算法所识别到物体的类别标签(行人、车厢、杂物)、边界框坐标(用于确定目标在图像中的具体位置)以及置信度数值信息,依据预设的障碍物分类标准,对目标类别进行二次校验,排除因误检产生的低置信度目标。随后,结合障碍物边界框的大小和位置,结合摄像头的参数对障碍物进行其与机车的横向、纵向距离估计;最后,基于上述障

碍物及距离信息,结合机车的运行状态(当前速度、行驶方向、加速度)、调度与信号等,对障碍物可能带来的碰撞风险进行量化评估与等级划分。

(5) 警报预警与自动制动:根据障碍物检测与风险判定结果,通过分级响应机制实现对调车作业的安全干预,作为系统的执行终端实现智能障碍物识别与机车响应的联动控制。该模块的核心功能分为警报触发与制动控制两部分。当接收到风险判定模块传来的低风险信号时,模块仅在系统后台记录障碍物信息及风险评估结果,不发出外部警报,避免对正常作业造成干扰;若判定为中风险,模块立即启动声光报警装置:通过驾驶室内的蜂鸣器发出间歇式提示音,同时点亮警示灯,提醒司机注意前方障碍物,并在显示屏上同步标注障碍物的位置与类型,辅助司机做出人工干预决策;当检测到高风险信号时,除触发高强度声光报警(持续蜂鸣+红色警示灯闪烁)外,模块将自动介入机车制动控制系统,规划制动-速度曲线,并在必要时触发列车紧急制动功能,以实现感知到系统响应的完整闭环。此外,为避免错误制动对作业效率的影响,系统设置了更高级别的人工干预权限,即驾驶室人员可通过驾驶室内的紧急解除按钮暂时屏蔽自动制动指令,兼顾安全性与操作灵活性。

### 11.1. 系统部署与初步工程应用

为实现调车机车对前方障碍物的识别与预警功能,将系统硬件及软件算法在机车本体上进行部署,具体如图2所示。高清摄像头作为图像采集的核心设备,被安装于调车机车前端驾驶室瞭望窗上方的专用支架上,其安装位置及角度经多次调试后确定,能保证摄像头具有 $120^\circ$ 的水平视场角,可覆盖轨道中心线两侧的关键区域,同时能避免机车行驶过程中因振动、颠簸对摄像头采集视角造成过大影响,确保其可稳定捕捉机车前方轨道及周边环境图像,为感知算法提供稳定的图像数据。

系统软件运行于安装在机车驾驶室内部的边缘计算单元上,主要负责接收摄像头的实时图像数据、运行图像预处理算法、针对图像数据进行推理和目标检测,并将检测结果用于风险判定与紧急制动。软件启动后,首先完成摄像头驱动加载、预处理算法参数初始化、YOLO模型加载等初始化任务,随后进入主循环程序:摄像头采集的原始图像通过数据传输链路发送至障碍物识别软件系统,原始数据经图像预处理模块处理后,输入至YOLOv8模型进行推理和目标检测,检测结果传送至风险判定模块进行分析,最终根据风险等级生成相应的预警或制动指令,并通过CAN总线与机车中控系统进行通信执行相应动作。



图2 调机机车系统部署

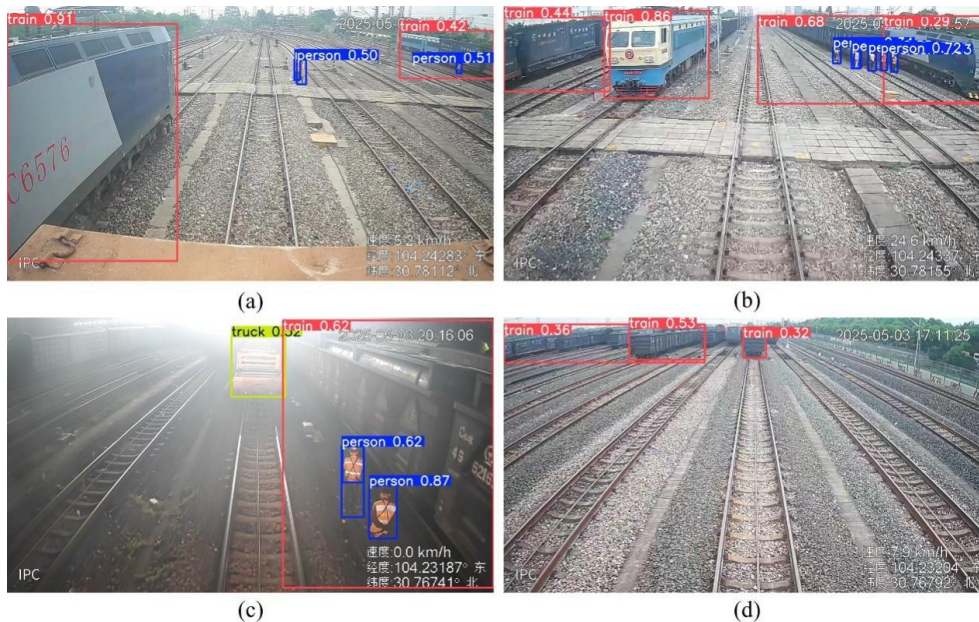


图3 基于图像的调机作业场景内目标检测结果

将该系统部署于中国铁路成都局集团有限公司成都北编组站的调机机车上,进行了为期三个月的初步工程应用测试。测试期间,系统运行稳定,能够对调机作业过程中常见的障碍物进行有效识别与响应,包括轨道前方的作业人员、停留的机车、车辆等,并通过边界框对其再图像中的位置进行标记,同时在画面中显示障碍物的类别及置信度,部分监控画面的目标检测结果如图3所示。初步测试结果表明,该系统在调机作业场景下的障碍物识别准确率平均达到99%以上,

系统完成一次识别动作的响应时间可控制在100 ms以内。在预警响应方面,系统根据识别到障碍物再图像中的位置和大小进行风险等级判定,并对中风险和高风险情况分别采取预警报警。试验测试期间共触发15次涉及行车安全的预警报警,作为危险防范的预警系统,能够满足调机作业的安全需求,拥有巨大的推广和应用空间。

在初步工程应用过程中,系统暴露出两方面较为突出的问题:

(1) 距离信息判断准确性不足: 当前系统主要依据目标在图像中的像素尺寸估算目标距离, 易受光照变化、摄像头角度偏移、障碍物实际大小不均等因素的影响, 距离判断误差较大, 尤其对远距离目标的距离估算偏差较大, 难以满足精准风险评估对距离参数的要求, 可能影响预警等级判定的准确性。

(2) 对各类火车车厢的识别泛化能力较弱: 由于调机作业场景中涉及的车厢类型多样 (如货运敞车、棚车、油罐车等), 且部分车厢存在外观磨损、装载货物等情况, 现使用的 YOLOv8 模型对非典型外观车厢的识别准确率较低, 尤其对老旧车厢、特殊用途车厢的漏检率较高, 无法全面识别调机作业中可能遇到的各类车厢并引发误判。

针对上述不足, 下一步将从以下方面进行系统升级:

(1) 优化距离测算途径: 引入双目视觉技术或雷达测距传感器, 将之布置在机车前端, 通过数据的融合间接或直接获取目标障碍物与机车的实际距离, 以进一步提升碰撞风险评估的精准度。

(2) 增强车厢识别能力: 扩充车厢样本数据集, 收集涵盖不同类型、不同状态 (新造、老旧、特殊涂装) 的火车车厢图像, 采用迁移学习方法进一步训练现有 YOLOv8 模型, 进一步优化模型对车厢特征的提取能力。

(3) 完善系统联动机制: 基于距离数据和识别结果, 进一步完善风险判定机制, 细化预警等级划分标准, 加强障碍物识别与机车运动控制系统的联动, 针对不同距离、不同类型的障碍物, 制定更精准的制动策略, 确保在触发紧急制动时, 既能有效避免碰撞, 又能减少对调机作业效率的影响。

#### IV. 结论与展望

本文围绕铁路调机作业场景下的障碍物识别与安全预警需求, 开展了基于计算机视觉目标检测算法的调机机车障碍物识别预警系统研发工作, 设计了包含图像采集、数据预处理、基于 YOLOv8 的目标检测识别推理、风险判定及警报与自动制动的完整系统架构。通过模块化设计, 明确了各环节的功能定位与协同机制, 为系统的工程实现提供了清晰的技术框架形成了“采集 - 检测 - 评估 - 响应”的闭环控制回路, 并将所设计的系统部署在调车机车上开展了初步工程应用测试。实验结果表明, 系统在调机作业场景下对常见障碍物的识别准确率平均达 99%, 响应时间控制在 100 ms 以内, 能够有效识别作业人员、停留车厢等障碍物并触发相应预警或制动操作, 为调机作业安全提供了技术支撑。

目前, 系统虽实现了障碍物智能识别与制动联动控制功能, 但在实际应用中仍存在距离信息判断不准、车厢识别泛化能力不足等问题。在未来工作中, 需进一步完善距离测算方案以提升距离判断精度、扩充车厢样本数据以结增强对各类

类车厢的识别能力。在功能拓展方面, 可将系统与站场综合调度系统、综合自动化系统进行数据交互, 实现多机车协同预警, 并可进一步在更多类型的调机机车上进行试点应用, 积累运行数据, 持续优化系统性能, 为系统的规模化推广提供保障, 以进一步实现调机机车智能化技术水平。

#### [参考文献]

[1] 李海鹰, 张超. 铁路站场及枢纽[M]. 北京, 中国铁道出版社有限公司, 2020: 1.

[2] 孟甲元, 基于 5G 通信的调车作业安全防护技术研究[J]. 北京, 铁道通信信号[J]. 北京, 2021 (6): 33-38

[3] 佟立本, 铁道概论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.

[4] Marti E, De Miguel M A, Garcia F, et al. A review of Sensor Technologies for Perception in Automated Driving[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2019, 11 (4): 94-108.

[5] Koch C, Georgieva K, Kasireddy V, et al. A review on Computer Vision based Defect Detection and Condition Assessment of Concrete and Asphalt Civil Infrastructure[J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29 (2): 196-210.

[6] Maan S, Tyagi A, Kumar S, et al. Security and Surveillance using Computer Vision[J]. International Journal of Computer Applications, 2020, 176: 30-35.

[7] Girshick R. Fast R-CNN[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2015: 1440-1448.

[8] Liu W, Anguelov D, Erhan D, et al. SSD: Single Shot Multibox Detector[C]//European Conference on Computer Vision. Cham: Springer International Publishing, 2016: 21-37.

[9] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You Only Look Once: Unified, Real-time Object Detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016: 779-788.

[10] Jiang P, Ergu D, Liu F, et al. A Review of Yolo Algorithm Developments[J]. Procedia Computer Science, 2022, 199: 1066-1073.

[11] 晋云功. 基于 YOLOv8 算法的轨道信号灯检测研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21 (9): 92-98

[12] 边毅, 李爱琦. 基于计算机视觉技术的新一代 AFC 检票机研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21 (12): 97-101.