

基于多边联动的市域铁路周界防护系统研究及应用

夏生祥, 张宇辰, 郝顺

中车智能交通运营管理有限公司, 四川 成都 611730

DOI: 10.61369/TACS.2025100037

摘 要 : 为解决市域铁路周界防护中点多线长面广与传统防护感知单一、联动不足、处置滞后的矛盾, 本文提出基于多边联动的市域铁路周界防护系统方案, 深入研究多维感知技术融合与多边联动实现机制, 重点阐述毫米波雷达与视频融合、多光谱智能分析的技术原理, 建立信息共享与协同处置机制, 为市域铁路安全运营提供有效技术支撑。

关 键 词 : 市域铁路; 周界防护; 多边联动; 多维感知; 智能管控

Research and Application of Urban Rail Transit Perimeter Protection System Based on Multilateral Linkage

Xia Shengxiang, Zhang Yuchen, Hao Shun

CRRC Intelligent Transportation Operation and Management Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611730

Abstract : To address the contradiction between the characteristics of urban rail transit perimeter protection (i.e., multiple points, long lines, and wide coverage) and the limitations of traditional protection (i.e., single perception, insufficient linkage, and delayed disposal), this paper proposes an urban rail transit perimeter protection system scheme based on multilateral linkage. It conducts in-depth research on the integration of multi-dimensional perception technologies and the implementation mechanism of multilateral linkage, focusing on elaborating the technical principles of millimeter-wave radar and video fusion as well as multi-spectral intelligent analysis. An information sharing and collaborative disposal mechanism is established to provide effective technical support for the safe operation of urban rail transit.

Keywords : urban rail transit; perimeter protection; multilateral linkage; multi-dimensional perception; intelligent management and control

引言

近年来, 随着城市化进程的不断深入, 市域铁路作为连接城市中心与周边城镇的重要交通动脉, 其发展速度与运营规模显著增长, 在缓解城市交通压力、促进区域经济一体化以及保障居民便捷出行方面发挥着不可替代的关键作用, 其安全运营的重要性日益凸显。

市域铁路系统其线路通常绵延较长, 站点分布密集且运行环境复杂多变, 涉及地上、地下、高架等多重空间, 使得传统的防护手段难以完全满足日益严峻的安全需求。尤其是在广阔且相对开放环境下, 人员非法入侵、异物坠落、恶意破坏等事件时有发生, 这些安全隐患直接威胁到列车运行安全, 更可能导致大范围的运营中断、延误及巨大的经济损失。例如, 部分市域铁路线路穿越人口密集区, 人畜非法入侵现象频发, 给行车安全带来巨大隐患; 在轨道交通路基、低矮桥梁、U型槽、隧道口、以及公路跨越轨道交通线路等重点区域, 人员非法侵入轨道区间或泥石流、落石等进入行车区间的风险尤为突出。

为了应对上述挑战并弥补现有防护系统的不足, 本论文深入研究并提出了一种基于多边联动的市域铁路周界防护系统, 利用视频和雷达等多传感器融合技术, 通过结合视频监控在目标识别上的直观性与雷达传感器在全天候、远距离感知上的可靠性, 显著提高入侵检测能力并有效减少误报。

一、铁路周界防护研究现状分析

随着高速铁路与城市轨道交通规模迅速扩张, 周界安全事件频发, 促使在光纤传感、视频智能分析、雷达探测及多传感器融合等方向持续投入研发。技术路线正由“单点式、被动式”向

“网络化、智能预警”演进, 但复杂场景下的误报率、部署成本及环境适应性仍是主要瓶颈。

因分布式光纤具有长距离无源、抗电磁干扰等优势, 已成为铁路路基地段的首选传感手段, 胡祖翰^[6]提出基于矢量旋转滑动平均(MVRA)的相干衰落抑制方法, 通过复矢量旋转对齐与滑

动平均提升信噪比，MVRA 较 SERM、DPST 信噪比提升11.2 dB，扰动识别率由88%提高至92%。在视频监控技术研究方面，傅茶瑾等^[4]针对周界入侵识别适应于白天和夜晚场景，构建了基于YOLOv5的高速铁路周界图像智能识别模型，在5万标注样本上进行训练，晚上图像误报率为10%，漏报率为8.6%，白天图像误报率为4.5%，漏报率为3%。朱力强等^[5]基于现有目标检测算法难以处理铁路监控场景中入侵目标呈现显著尺度变化的状况，提出一种多输入双输出神经网络和基于自适应特征加权融合的目标多尺度特征感知算法，在多场景、多尺度铁路异物侵限数据集的检测精确率达91.1%。在雷达微波阵列方向，刘子畅等^[2]提出了一种基于微波阵列技术的周界安防系统，利用两条平行部署的探测线缆，形成自适应微波阵列，通过微波信号收发在空间构成传感探测场，智能传感非法入侵行为并定位入侵点。李航^[7]提出通融合卫星遥感、无人机巡检与地面传感器数据的空天地一体化监测体系，卫星遥感实现对线路周边大范围地质环境等情况的宏观监测，提前预判滑坡、泥石流等地质灾害风险。李一凡^[3]梳理高铁周界报警需求，提出振动光纤+视频联动架构，优化入侵特征提取与分级预警算法，现场测试误报率下降，为后续多传感器融合提供技术路线。曹志威^[8]提出车地协同下列车运行环境异物入侵智能检测方法，利用综合视频监控系统和车载前端巡检设备采集的视频图像数据，制作了适用于铁路场景的雾霾图像数据集，提高了图像去雾算法在铁路场景的泛化性。郭鹏跃^[10]提出基于运动分割的4D毫米波雷达目标检测算法、基于多帧判识的激光雷达目标检测算法以及改进注意力机制的图像检测算法，可实现30 cm³以上物体在大雨、雾条件下60 m范围内，以及暴雨、浓雾天气条件下30 m范围内的异物侵限监测，且能够实现零漏报。张睿思^[9]提出了一种基于自适应阈值欧几里得聚类（ATEC）的轨道异物检测方法，通过自适应阈值调整与特征优化策略，提高小尺度异物检测能力，并增强复杂轨道环境中的抗干扰性，在RFOID轨道异物数据集上，检测精度提升15.1%，误检率降低12.3%。

二、基于多边联动的市域铁路周界防护系统架构设计

以解决传统防护痛点为核心，秉持技术融合与协同联动的理念，构建三层融合多维感知的技术架构，形成从感知监测到处置反馈的全链条防护体系，通过感知层、网络层、应用层的深度融合，实现监测数据的全面采集、高效传输与智能应用，三层结构相互衔接、层层递进，共同保障系统的智能化运行。

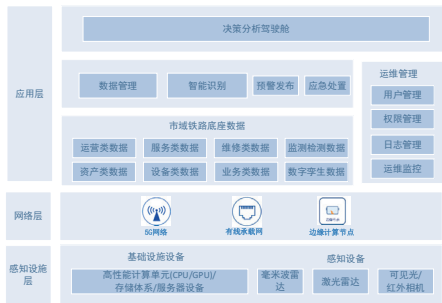


图1 系统架构设计图

（一）感知层

感知层作为数据采集的核心环节，打破传统单一感知模式，构建智能传感网络与天空地一体化监测体系，实现对周界异常情况的全面获取。根据市域铁路不同路段的环境特点，部署毫米波雷达、多光谱摄像机、红外等多种传感器，形成互补监测格局。

（二）网络层

网络层作为数据传输的关键纽带，构建5G/4G与光纤结合的混合传输网络，同时引入边缘计算技术，实现监测数据的实时传输与高效处理。混合传输网络根据数据类型与传输需求灵活选择传输方式，对于雷达探测数据、视频流等大容量实时数据，采用5G技术的高带宽、低时延特性进行传输；对于传感器状态信息、指令信号等小容量数据，采用4G技术确保传输的稳定性；光纤网络则作为核心骨干网络，承担各站点与指挥中心之间的大容量数据传输任务，保障数据传输的安全性与可靠性。

边缘计算技术的应用有效解决传统集中式处理模式下的数据传输压力大、响应滞后等问题，在前端部署边缘计算节点，对采集的传感器数据、视频数据进行初步处理，如过滤无效数据、提取目标特征等，仅将关键信息传输至后端平台，大幅减少数据传输量，提高数据处理效率，为后续快速响应奠定基础。

（三）应用层

应用层作为系统功能实现的核心载体，集成监测、预警、处置、反馈全流程管理功能的周界防护系统，通过AI算法赋能实现对监测数据的深度应用。应用层是用户与系统交互的界面，旨在提供直观、高效的实时监控、报警处理和系统管理功能。核心功能包括：设计用户友好的可视化管理平台，实现对周界态势、传感器状态的实时监控；建立智能报警机制和标准响应流程，确保异常事件及时通知安保人员；提供灵活的系统配置、数据查询和维护工具，以保证系统的可扩展性和可维护性；并采用多重安全防护措施，保障系统的网络安全，防止未经授权的访问和数据泄露。

三、多边联动关键核心技术研究是实现

核心技术与实现方案是系统落地应用的关键，通过多维感知技术融合突破传统监测瓶颈，借助多边联动实现机制打破资源壁垒，确保系统具备精准监测、快速响应、高效处置的核心能力，为市域铁路周界防护提供可靠技术保障。

（一）多维感知技术融合

毫米波雷达与视频融合技术是多维感知的核心组成部分，通过雷达远距离探测与视频精准识别的结合，实现对目标的全方位监测。两者融合通过特征匹配算法实现优势互补，雷达首先探测到目标并锁定其位置，将位置信息传输至视频系统，视频系统根据雷达提供的坐标自动转向目标区域并启动变焦功能，快速捕捉目标清晰画面。



图2 多维感知技术融合图

同时，特征匹配算法对雷达获取的目标运动特征与视频获取的目标图像特征进行融合分析，通过建立特征数据库，将实时采集的特征数据与数据库中的样本进行比对，实现目标的精准定位与轨迹跟踪。为确保融合效果，在实现过程中采用时间同步与空间校准技术，通过 GPS 授时实现雷达与视频设备的时间同步，避免数据采集时间差导致的目标定位偏差；通过现场标定建立雷达坐标与视频像素坐标的映射关系，实现空间位置的精准校准，确保雷达锁定的目标能够被视频系统快速捕获。

（二）多边联动实现机制

多边联动实现机制通过建立信息共享与协同处置两大核心机制，打破部门间信息壁垒与资源壁垒，实现各方资源的高效整合与协同运作，确保异常事件得到快速处置。信息共享机制以统一数据标准与接口为基础，构建跨部门、跨系统的信息共享平台，实现监测数据、预警信息、处置情况等信息的实时共享。

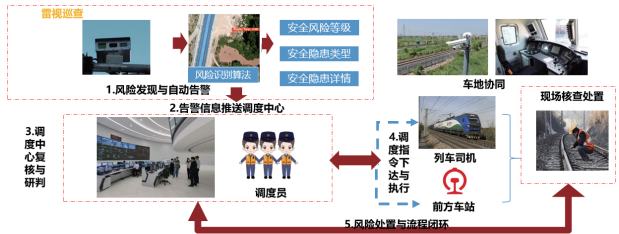


图3 多边联动实现机制

技术联动作为多边联动的支撑保障，通过系统内部设备间联动与跨系统跨部门联动，构建小闭环与大闭环双重联动机制。小闭环指系统内部设备间的自动联动，当某一传感器监测到异常情况时，系统自动触发联动流程，如振动光纤探测到入侵信号后，自动指令附近的毫米波雷达聚焦监测区域，同时控制多光谱摄像机转向目标位置并启动录像，语音告警设备同步发出警告，实现

事件的自动初步处置，减少人工干预时间；大闭环指跨系统跨部门的联动，通过统一数据接口与信息共享平台，实现数据互通，当发生重大异常事件时，系统自动将预警信息推送至相关部门系统，相关部门根据职责快速响应，形成从监测预警到现场处置、后期反馈的完整应急响应链。

（三）场景应用实现

平台采用模块化设计整合数据管理、目标识别、预警发布、应急处置等多个功能模块，实现对各类监测数据的集中管理与统一展示。平台集成的 AI 算法通过大量样本训练不断优化，具备入侵目标自动识别、分类与轨迹跟踪能力，可准确区分人员、车辆、动物等不同目标，同时根据目标行为特征判断是否存在入侵风险。当监测到异常情况时，平台自动触发预警机制，通过声光告警、短信通知、平台弹窗等多种方式向相关人员发送预警信息，同时展示异常位置、目标类型、实时画面等关键信息。

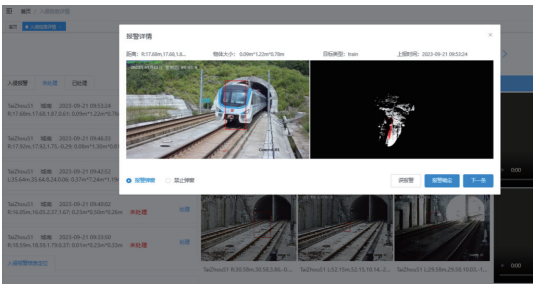


图4 系统应用界面

四、结语

本文详细阐述了基于多边联动的市域铁路周界防护系统的研究背景和国内外研究现状。通过对当前市域铁路安全运营面临的挑战进行分析，可以看出周界安全防护是保障铁路系统安全的关键环节。近年来发生的周界安全事故案例表明，现有防护技术在复杂环境和极端天气条件下仍存在局限性。本文构建的多边联动市域铁路周界防护系统，通过技术架构与联动架构，融合多维感知及协同处置等核心技术，实现精准监测与快速响应。应用验证其有效性，为市域铁路防护提供支撑，为提升市域铁路周界防护水平提供一种新的解决方案。

参考文献

[1] 周家梁. 基于振动光纤及视频分析技术的铁路周界监控系统[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(4): 52-55.
[2] 刘子畅, 王军锋, 吕大勇. 基于微波阵列技术的高铁周界安防系统应用研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019(2): 37-41.
[3] 李一凡. 高速铁路周界入侵报警系统关键技术研究及应用[J]. 铁道通信信号, 2017, 53(7): 53-55.
[4] 傅茶瑾, 史天运等. 基于深度学习的京张高速铁路周界图像智能识别系统构建研究[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(5): 64-72.
[5] 朱力强, 许力之, 赵文钰, 等. 铁路周界入侵目标多尺度特征感知算法[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(01): 215-226.
[6] 胡祖翰, 钱恒, 石先明, 等. 相干衰落抑制 Φ -OTDR 的分布式光纤周界安防技术[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(03): 564-571.
[7] 李航. 铁路环境安全感知与预警系统的设计与实现[D]. 北京交通大学, 2024.
[8] 曹志威. 车地协同下列车运行环境异物入侵智能检测方法研究[D]. 北京交通大学, 2024.
[9] 郭鹏跃, 马祯, 张万鹏, 等. 基于多源感知数据融合的铁路异物入侵识别方法[J]. 中国铁路, 2024, (10): 123-130.
[10] 张睿思. 基于激光雷达的轨道异物入侵检测应用研究[D]. 电子科技大学, 2024.