

列车车载轨行区障碍物主动检测系统及其应用研究

杨秀英¹ 吴鸣哲² 施裕斌² 李云³ 徐健³ 刘德伟³ 徐建勇³

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315100, 宁波; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司智慧运营分公司, 315100, 宁波; 3. 卡斯柯信号有限公司, 200071, 上海)

摘要 [目的]为解决现有被动式检测方法在检测轨行区侵限障碍物时的滞后性问题,给列车制动预留更多的反应时间,降低列车事故发生率,减轻事故后果,需研究列车车载轨行区障碍物主动式探测技术。[方法]通过多种传感器、多检测子任务组合同多个列车信号系统单元的联合,提出了一种主动检测轨行区是否有侵限障碍物的列车车载系统,并在平直轨行区内采用该系统对不同障碍物进行了试验,得到不同障碍物的有效识别距离。[结果及结论]该障碍物系统可为列车提供自主感知能力,在前方轨行区出现侵限障碍物时,能够及时发出报警信息或实施列车制动。

关键词 城市轨道交通; 轨行区; 障碍物检测; 主动检测; 列车制动

中图分类号 U216.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.057

Onboard Active Obstacle Detection System for the Area Directly Related to Train Running and Its Application

YANG Xiuying¹, WU Mingzhe², SHI Yubin², LI Yun³, XU Jian³, LIU Dewei³, XU Jianyong³

(1. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315100, Ningbo, China; 2. Intelligent Operation Branch, Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315100, Ningbo, China; 3. CASCO Signal Co., Ltd., 200071, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In order to solve the lag problem of current passive detection methods in detecting the obstacles in the area directly related to train running (hereinafter referred to as train running area or TRA), reserve more reaction time for train braking, reduce the incidence of train accidents, and mitigate the consequence of the train accidents, it is necessary to study the onboard active TRA obstacle detection technology.

[Method] Through uniting the combination of multiple sensors and detection sub-tasks with the train signal system units, an active onboard detection system is proposed to actively detect whether there are obstacles intruding in the TRA boundary. Through testing the above system in the straight TRA with different obstacles, the effective identification distances of the ob-

stacles are obtained. [Result & Conclusion] The above system can provide the train with autonomous perception ability, timely sending alarm messages or starting train braking when obstacles intruding in the boundary appear in the front TRA.

Key words urban rail transit; area directly related to train running; obstacle detection; active detection; train braking

近年来,轨行区障碍物侵限事故频发,引起了城市轨道交通业界的极大关注。传统的障碍物检测方式主要为被动式障碍物检测,该方式采用接触式障碍物检测装置,当障碍物与检测装置发生碰撞时,利用相关传感器的形变进行障碍物碰撞感知处理。该方式检测到障碍物时,已经无法避免事故的发生,也无法实现障碍物的远距离预警。因此,需研究一种主动式障碍物探测技术来检测侵入轨行区限界的障碍物,以降低障碍物侵限事故的发生率,确保行车安全。

随着城市轨道交通技术的快速发展,越来越多的城市轨道交通线路应用了FAO(全自动运行)模式。在列车运行过程中,FAO对列车的安全防护提出了非常高的要求。随着人工智能和自动驾驶技术的发展,自主障碍物探测技术在汽车领域已逐渐成熟,且在城市轨道交通领域有所应用。本文提出一种列车车载轨行区障碍物主动检测系统,该系统结合多源传感器信息进行感知处理,使列车能够主动感知到前方轨行区内的侵限障碍物,并及时发出报警信息或实施制动。

1 列车车载轨行区障碍物主动检测系统组成

列车车载轨行区障碍物检测主动系统采用主动式障碍物探测方式,在车头端安装多个传感器设备,通过多源传感器采集环境数据,并对数据进行相应的算法处理,即可获取前方轨行区内障碍物的探测结果。获知探测结果后,该系统及时与车载信

号系统、OCC(运营控制中心)调度等进行通信,输出报警信息或直接采取列车制动措施。

列车车载轨行区障碍物检测系统主要由传感器模块、算法模块、平台模块 3 个部分组成。

1.1 传感器模块

传感器模块主要包括列车上安装的照相机、激光雷达、毫米波雷达和惯导等传感器设备。选择传感器时,不仅要考虑线路防护要求及线路特征,还需要综合考虑列车驾驶室的安装位置、空间布局和传感器价格等因素。

1.2 算法模块

算法模块主要负责传感器数据的处理,包括基于深度学习的视觉图像数据处理、激光雷达点云数据处理、毫米波雷达数据处理及惯导数据处理等。

障碍物检测中的多传感器数据融合处理分前融合和后融合 2 种方式,其中:前融合指将多个传感器采集的数据进行融合后,再统一经过算法处理,

得到最终的风险感知结果;后融合指先将多个传感器(或传感器组)数据分别进行算法处理,得到各自的障碍物探测结果后,再将多个结果进行融合,得到最终的风险感知结果。

本文采用后融合的处理方式。将传感器分为 2 组,1 组为照相机组,另 1 组为雷达组(包括激光雷达、毫米波雷达、惯导等)。分别对这 2 组设备的数据进行算法处理,然后根据不同的安全等级及线路要求对计算结果进行融合。

图 1 为照相机组传感器数据处理算法示意图。照相机组传感器的数据处理算法主要包括轨行区识别、道岔与进路识别、信号机色灯识别、轨行区障碍物识别等方面。其中,轨行区识别、道岔与进路识别、轨行区障碍物识别使用神经网络模型,需要对大量的现场数据进行训练,以形成识别模型;信号机色灯识别则采用深度学习、传统图像处理 2 种方式。

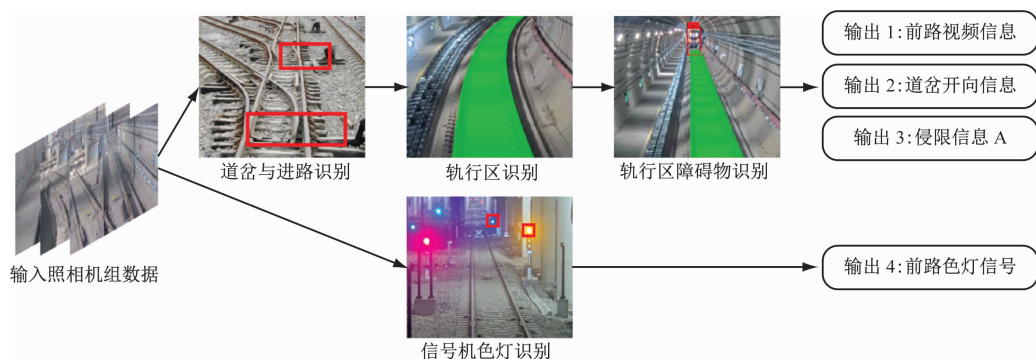


图 1 照相机组传感器数据处理算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of camera group sensor data processing algorithm

照相机组传感器数据的输出结果为列车前方轨行区内的侵限信息 A、道岔开向信息、前路信号机色灯识别信息,以及包含这些信息的前路视频数据(即照相机组采集到的列车运行方向前方轨道上的视频数据)。侵限信息 A 主要包括障碍物的数量、位置、大小和类别等信息。

雷达组传感器以激光雷达为主,毫米波雷达和惯导可灵活搭配使用,其中:数据经毫米波雷达处理后可获得较准确的列车运行速度;数据经惯导设备处理后可获取列车的三维姿态。图 2 为雷达组传感器数据处理算法示意图,主要包括 2 个部分:①对激光雷达数据进行点云配准,构建离线点云地图,其中可以选用相应的毫米波雷达和惯导数据分别作为每一帧点云数据列车速度值和姿态角的初

始值;②在线使用时,实时加载已经构建好的离线点云地图,并将其与当前实时采集到的点云数据进行匹配,从而得到该组点云数据在离线点云地图中的位置,并从地图中获得当前位置下的轨行区,然后对轨行区内是否有侵限的障碍物进行判断。点云障碍物识别可采用点云滤波、点云聚类、地面分割等处理技术。

雷达组传感器数据的输出结果为离线点云地图、列车实时位置和速度信息、前方轨行区侵限信息 B。侵限信息 B 主要包括障碍物数量、大小、位置、障碍物与列车头部的距离等信息。将照相机组传感器数据输出结果与雷达组传感器数据输出结果进行融合,其融合处理流程如图 3 所示。

由图 3 可知:前路的实时视频、信号机色灯检测

结果、列车的实时速度与位置、离线点云地图等信息可以直接输出;而雷达组传感器的侵限障碍物检测结果需要与照相机组传感器的道岔开向检测结果相融合,进而对雷达组检测到的列车前方进路的

障碍物做进一步的确认,然后将照相机组传感器检测到的障碍物信息与图像检测出的侵限障碍物信息做“或”运算,对信息进行融合。融合后的侵限信息包括障碍物的数量、位置、大小、距离和类别等。

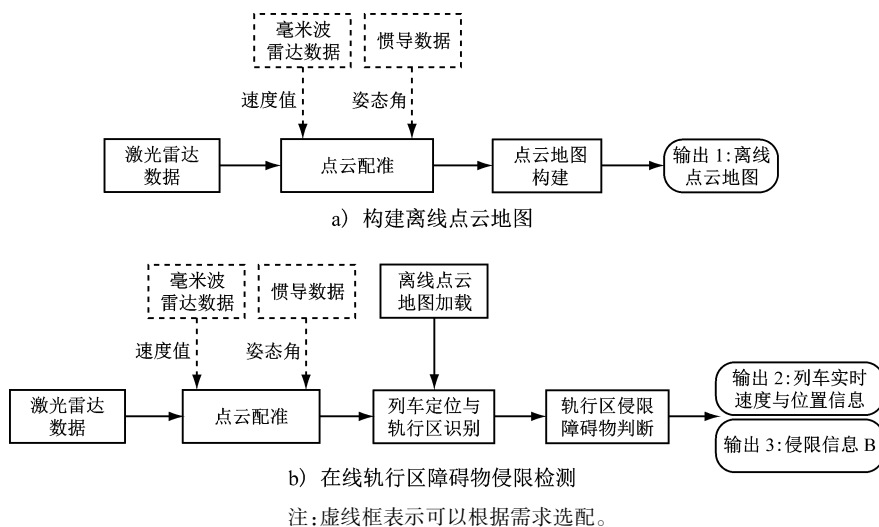


图2 雷达组传感器数据处理算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radar group sensor data processing algorithm

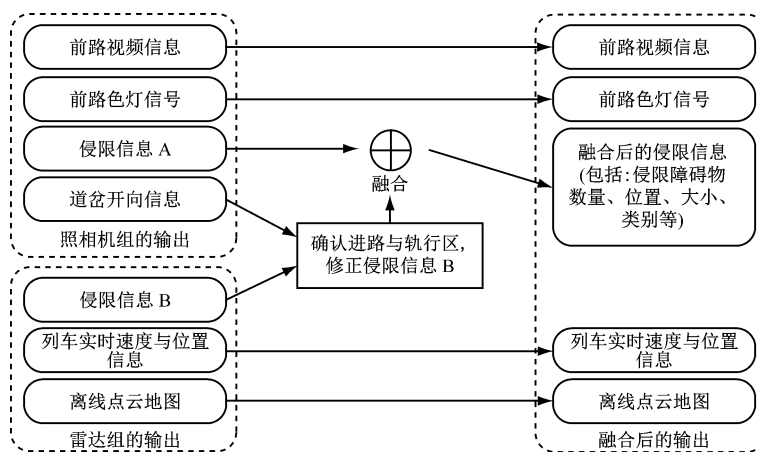


图3 照相机组和雷达组传感器输出结果融合处理流程

Fig. 3 Fusion processing flow of output results from camera and radar group sensors

1.3 平台模块

平台模块主要负责监测机器内存、时间、温度、电压等参数是否正常,控制整个车载障碍物检测系统的工作模式,管理所有模块通信数据的输入/输出。平台模块主要由高性能主机组成,可根据不同的运营管理要求选择不同的高性能主机型号及架构。

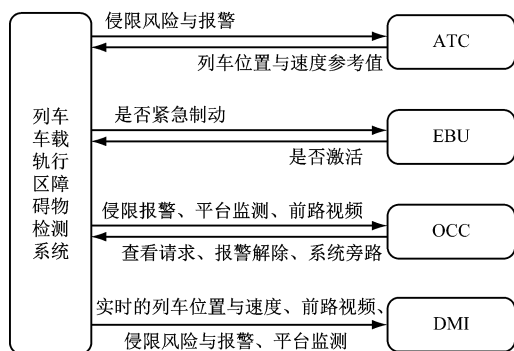
对于FAO列车,一般要求系统安全达到SIL4

(安全完整性等级4)等级。组合故障安全架构是实现功能安全的重要的系统架构,其中以“二取二”架构最为常见。“二取二”架构下,独立运行的2个运算通道同时执行运算,只有在2个通道计算结果相同的情况下,才认为该计算结果安全可靠,否则将输出安全侧的计算结果。因此,对于安全等级要求为SIL4的FAO列车,建议选择双异构主机。而对于有司机驾驶的ATO列车,其安全等级要求为

SIL0(安全完整性等级0),建议选用单通道高性能主机。

2 列车车载轨行区障碍物主动检测系统与列车信号系统联动

图4为列车车载轨行区障碍物主动检测系统与列车信号系统多个单元联动的示意图。



注:ATC—列车自动控制;EBU—紧急制动单元;DMI—人机界面。

图4 列车车载轨行区障碍物主动检测系统与列车信号系统多个单元联动示意图

Fig.4 Schematic diagram of the linkage between the onboard active obstacle detection system in the track area and the linkage of multiple units in the signal system

2.1 与 ATC 交互

ATC 将列车定位信息和列车速度信息发送给列车车载轨行区障碍物主动检测系统,以辅助障碍物检测系统进行列车定位计算。列车车载轨行区障碍物主动检测系统将是否有障碍物侵限、障碍物的位置、障碍物与列车的距离等信息反馈给 ATC。在 ATC 正常工作的情况下,由 ATC 决定是否触发列车制动。

2.2 与 EBU 交互

EBU 发送列车激活端信息给列车车载轨行区障碍物主动检测系统,障碍物检测系统在列车上电后先进入非激活端,再根据 EBU 的信息转换为正常工作模式。在 ATC 非正常工作的情况下,障碍物检测系统若发现侵限障碍物,且障碍物与列车的距离小于系统预先设定的距离阈值,障碍物检测系统将直接发送列车制动指令给 EBU。

2.3 与 DMI 交互

对于 FAO 列车,其 DMI 仅供调试和维修工作人员使用,DMI 的日常状态为盖板盖好状态。对于有司机驾驶的 ATO 列车,其 DMI 可向司机提供声光报警信息。列车车载轨行区障碍物主动检测系

统给 DMI 发送的信息主要包括:是否有障碍物侵限,最近的侵限障碍物与列车的距离,列车定位、列车运行速度,以及平台模块中的 CPU(中央处理器)温度、电压等。

2.4 与 OCC 调度交互

如图4所示,OCC 调度向列车车载轨行区障碍物主动检测系统发送查看请求,障碍物检测系统将感知结果及工作状态传送给 OCC 调度。当障碍物检测系统感知到前方轨行区存在侵限障碍物时,主动向 OCC 调度发送感知结果及工作状态,并进行报警。当列车前方障碍物清除后,OCC 调度解除该报警。在恶劣天气情况下,障碍物检测系统的性能可能受到严重影响,此时 OCC 调度会给障碍物检测系统发送旁路指令,以避免障碍物系统频繁发布误报警信息。

3 列车车载轨行区障碍物主动检测系统的应用试验

列车车载轨行区障碍物主动检测系统在城市轨道交通运营场景中进行了大量的应用试验。试验时,主要测试的障碍物为列车(C型车)、行人、小障碍物(一般为箱子)。在平直轨行区内,试验得到不同障碍物的识别距离如表1所示。

表1 平直轨行区内不同障碍物的识别距离

Tab.1 Identification distance of different obstacles in the straight train running area

障碍物类型	障碍物宽度/ mm	障碍物高度/ mm	有效识别 距离/m
列车(C型车)	2 600	3 250	300
行人	400	1 500	120
箱子	300	300	100

4 结语

本文提出了一种列车车载轨行区障碍物主动检测系统。通过对激光雷达、毫米波雷达、惯导、照相机等传感器的数据进行融合处理,能够及时得到列车前方轨行区内障碍物侵限信息。此外,该系统与列车信号系统的多个单元紧密联合,从而可以在有障碍物侵限时及时报警并引导列车制动,为列车提供了主动安全的能力。当然,由于目前传感器的有效识别距离受限,该障碍物检测系统的防护距离

(下转第 325 页)

参考文献

- [1] 罗仁, 曾京. 列车系统蛇行运动稳定性分析及其与单车模型比较[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 184.
LUO Ren, ZENG Jing. Hunting stability analysis of train system and comparison with single vehicle model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 184.
- [2] 邬平波, 曾京. 确定车辆系统线性和非线性临界速度的新方法[J]. 铁道车辆, 2000, 38(5): 1.
WU Pingbo, ZENG Jing. A new method to determine linear and non linear critical speed of the vehicle system[J]. Rolling Stock, 2000, 38(5): 1.
- [3] 陈恩利, 杨绍普. 两系非线性悬挂车辆的运行稳定性与分叉[J]. 应用力学学报, 1995, 12(3): 92.
CHEN Enli, YANG Shaopu. Running stability and bifurcation of two-train nonlinear suspension vehicle[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1995, 12(3): 92.
- [4] 孟姝, 黄海, 王伯铭. 悬挂式单轨车辆的倒T形辙叉道岔通过性能[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(1): 106.
MENG Shu, HUANG Hai, WANG Bomeng. Passing performance

- of inverted T-shaped frog turnouts for suspended monorail vehicles[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(1): 106.
- [5] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 蛇行运动对铁道车辆平稳性的影响[J]. 振动工程学报, 2008, 21(6): 639.
CHI Maoru, ZHANG Weihua, ZENG Jing, et al. Influence of hunting motion on ride quality of railway vehicle[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(6): 639.
- [6] 朱舟. 悬挂式轨道梁与道岔梁间锁定补偿机构[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(1): 247.
ZHU Zhou. Integrated locking compensation mechanism between suspended track beams and turnout beams[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(1): 247.

· 收稿日期:2024-03-03 修回日期:2024-04-05 出版日期:2024-09-10
Received:2024-03-03 Revised:2024-04-05 Published:2024-09-10
· 通信作者:许国杰, 工程师, guojie.xu@epnskytrain.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第320页)

还有较大提升空间。相信随着传感器技术的发展, 该障碍物检测系统的功能会持续完善。此外, 该障碍物检测系统中基于复杂算法的计算结果是否具有可靠性和有效性, 是否能够通过安全功能验证, 也是后续研究的要点。

参考文献

- [1] 戎志立, 于苡健. 城市城市轨道交通主动障碍物检测预警防护系统研究[J]. 工程建设与设计, 2022(10): 113.
RONG Zhili, YU Yijian. Research on active obstacle detection early warning protection system for rail transit[J]. Construction & Design for Engineering, 2022(10): 113.
- [2] 何秉高, 孙向阳, 史丽娟, 等. 基于激光雷达与机器视觉融合的城市轨道交通障碍物检测方法研究[J]. 轻工科技, 2019, 35(9): 80.
HE Binggao, SUN Xiangyang, SHI Lijuan, et al. Research on rail transit obstacle detection method based on laser radar and machine vision fusion[J]. Light Industry Science and Technology, 2019, 35(9): 80.
- [3] 邓远志, 林森. 基于改进的 LeNet-5 城市轨道交通障碍物识别方法[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(1): 63.

- DENG Yuanzhi, LIN Miao. Rail obstacles recognition based on an improved LeNet-5[J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(1): 63.
- [4] 张九高. 城市城市轨道交通全自动列车障碍物检测装置技术分析[J]. 隧道与城市轨道交通, 2021(增刊1): 48.
ZHANG Jiugao. Technical analysis of automatic train obstacle detection device for urban rail transit[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S1): 48.
- [5] 肖阳俊, 李拥军, 李金波, 等. 一种多技术融合的全自动无人驾驶轨道障碍物检测系统设计[J]. 城市城市轨道交通研究, 2019, 22(1): 111.
XIAO Yangjun, LI Yongjun, LI Jinbo, et al. Design of track obstacle detection system for full automatic UTO with multi-technology fusion[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(1): 111.

· 收稿日期:2024-02-27 修回日期:2024-06-27 出版日期:2024-09-10
Received:2024-02-27 Revised:2024-06-27 Published:2024-09-10
· 第一作者:杨秀英, 工程师, yangxiuy@nbmetro.com
通信作者:徐健, 高级工程师, xujian@casco.com.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license