

# 站台门间隙异物自动检测系统设计与实现<sup>\*</sup>

于庆广<sup>1</sup> 王 石<sup>1</sup> 高泊楠<sup>1</sup> 陈宇轩<sup>1</sup> 萧成博<sup>1</sup> 刘又齐<sup>1</sup>  
王玉瑾<sup>1</sup> 赵 明<sup>1</sup> 李 乐<sup>1</sup> 蔡冠之<sup>2</sup>

(1. 清华大学电机系, 100084, 北京; 2. 北京冠峰行安全技术有限公司, 100085, 北京)

**摘 要** [目的] 站台门间隙异物检测环节对地铁运营安全有影响, 故有必要研究一种新型的地铁站台门防夹检测系统, 使未来的 FAO (全自动运行) 系统更加安全与高效。[方法] 采用视频和激光雷达算法融合技术, 提出了结合视频图片识别和雷达点云数据的双重判据 AI 检测策略, 创新性地采用了 PointNet 算法架构来进行地铁站台门间隙异物的检测, 实现摄像头视频辅助激光雷达工作模式。若被检测间隙出现异物, 则报警和视频联动, 第一时间捕捉报警现场视频。利用多维深度学习方法, 降低误判概率。[结果及结论] 在系统设计中, 提出传感器交叉叠装分层安装方法, 实现间隙异物冗余检测功能; 通过交叉互检机制, 有效提高了检测装置的冗余性和可靠性; 使用 2D 传感器实现 3D 检测效果。所研制系统为地铁信号系统提供安全联锁信号, 提供报警信息给综合监控系统, 并推送手环报警信息给现场运行人员。使地铁站台门间隙异物检测更加准确可靠, 为地铁的全自动运行提供安全保障。

**关键词** 地铁站台门; 激光雷达和视频; 融合算法; 自动检测

中图分类号 U231.4; TP216.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.033

## Detection System Design and Implementation for Foreign Objects in Automatic Platform Door Gap

YU Qingguang<sup>1</sup>, WANG Shi<sup>1</sup>, GAO Bonan<sup>1</sup>, CHEN Yuxuan<sup>1</sup>, XIAO Chengbo<sup>1</sup>, LIU Youqi<sup>1</sup>, WANG Yujin<sup>1</sup>, ZHAO Ming<sup>1</sup>, LI Le<sup>1</sup>, CAI Guanzhi<sup>2</sup>

(1. Electrical Engineering Department, Tsinghua University, 100084, Beijing, China; 2. Beijing Guanfenghang Safety Technology Co., Ltd., 100085, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] The detection of foreign objects in platform door gap is critical to metro operational safety. Therefore, it is essential to develop a new anti-clamping detection system for metro platform door, enhancing the safety and efficiency of future FAO (fully automatic operation) systems.

[Method] Based on the video and LiDAR algorithm fusion technology, a dual-criterion AI detection strategy that combines video image recognition with LiDAR point cloud data is proposed. PointNet algorithm framework is innovatively adopted for the detection of foreign objects in metro platform door gap, implementing a camera video assisted LiDAR working mode. In the event of foreign object detection in door gap, the system triggers an alarm-video synergistic operation and initiates video capture of the incident site immediately. The use of multi-dimensional deep learning techniques reduces the probability of false alarms. [Result & Conclusion] In system design, a cross-stacking layered sensor installation method is proposed, enabling the redundant detection function of foreign objects in platform door gaps. The cross-verification mechanism significantly enhances the redundancy and reliability of the detection device, and using 2D sensors to achieve 3D detection effects. The developed system provides safety interlocking signals to metro signaling system, sends alarm information to the integrated monitoring system, pushing wristband alerts to on-site operation personnel. This system ensures more accurate and reliable detection of foreign objects in platform door gaps, offering safety support for FAO.

**Key words** platform door; LiDAR and video; fusion algorithm; automatic detection

FAO(全自动运行)系统,已成为新一代城市轨道交通系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>。与城市中其他交通工具相比,地铁具有运量大、速度快、占地少、节省用地等特点,能够避免城市地面拥挤,极大地缓解了城市交通压力。鉴于地铁相比传统城市交通方式具备多方面的优势,各个城市均在大力发展地铁<sup>[2]</sup>。随着地铁逐渐成为城市交通的关键角色,其运营安全不容忽视,而站台门在保障地铁运营安全中扮演着重要角色<sup>[3]</sup>。

站台门将站台和列车运行区域分隔,通过控制

<sup>\*</sup>北京市大学生创新创业训练计划项目(S202210003076)

系统控制自动开启。它不仅确保了列车、乘客进出站时的绝对安全,还大幅减少了司机瞭望次数,减轻了司机的工作负担,同时有效减少了空气对流导致的站台冷热气的流失,降低了列车运行噪声对车站的影响,为乘客提供了舒适的候车环境,展现出节能、安全、环保、美观等功能。在站台门自动关闭过程中,必须依靠传感器检测确保不会夹到人或物体<sup>[4]</sup>。2022 年 1 月,上海某地铁发生了站台门夹人致伤亡的事故,且类似事故不断发生。

目前,地铁站台门除了传统的防夹挡板、倾斜护板和瞭望灯带等防夹设施外,主要依靠人工瞭望进行干预,这给工作人员带来了极大的工作强度。人工瞭望的滞后性常导致乘客或其携带物品被夹在门缝中的事故时有发生<sup>[5]</sup>。常见的站台门与列车车门间障碍物的检测方法主要有以下几种:站台门门驱动电机电流判别检测法;激光对射检测法;激光光栅检测法;单线激光雷达检测法;多线激光雷达检测法;机器视觉传感器检测法;激光测距仪检测法;红外摄像机检测法等。因此,如何提升站台门间隙异物检测可靠性,实现冗余检测,以提高运营效率,成为亟待解决的技术问题。本文针对上述问题,在硬件与软件两方面进行研究,旨在研发一种更加安全高效的 FAO 站台门间隙异物自动检测系统。

## 1 间隙异物检测系统

### 1.1 激光雷达 3D 检测

为了乘客的安全,站台都设置了站台门。地铁站台分界情况如图 1 所示,站台门与地铁列车门之间存在 20~30 cm 宽的间隙。在客运高峰期,这个间隙容易发生乘客被夹的情况,或者存在异物导致车门无法关闭的问题。图 1 中的 L1、L2、L3 是采用交叉叠装法分层安装的视频摄像头以及 3 个单线激光雷达发出的 3 束激光,它们共同实现 3D 全空间检测间隙异物的功能。本文所设计的站台门异物自动检测系统,能够检测到的异物的最小外形尺寸为 20 mm(长)×20 mm(宽)×20 mm(高)。

多线激光雷达检测法虽然能够检测站台门间隙的三维空间,然而,它存在价格昂贵、角频率和灵敏度相对较低(与单线激光雷达相比)的问题。此外,多线激光雷达对控制单元的信号处理能力要求更高,且相应的配套设备价格也更昂贵。因此,本文选择采用单线激光雷达来设计系统。

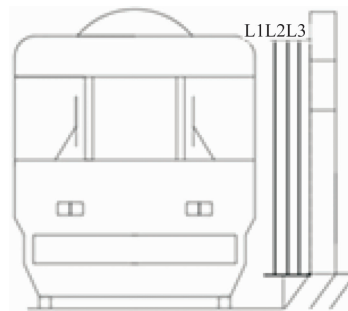


图 1 地铁站台分界图

Fig. 1 Diagram of metro station platform clearance

单线激光雷达的主要参数包括:发射源为红外激光,波长为 905 nm,水平角度分辨率至少为 0.18°。该激光雷达具备开关量输入点、开关量输出点,并支持 TCP 或 CAN 协议的点云输出总线。通过 PC 机的接口连接雷达总线,可以设定监测区域,且每组输入开关量定义的检测区可独立设定为 3 个区域。通过组合输入开关量,系统能够自动切换检测区,以适应不同宽度的地铁列车。

激光雷达在扫描整个间隙空间区域时,会计算极坐标下前方物体的距离,并判断设定区域内是否存在异物。一旦判断出有异物存在,系统会通过开关量输出区域发出报警信息。此外,输入开关量还可以用于设置雷达的检修状态;而输出开关量则能输出激光雷达自身的自检报警信息,如过温、过流、传感器灰尘遮挡等异常情况。

雷达在运行时,会生成被测物体的点云图。点云是在同一空间参考系下,表达目标空间分布和目标表面光谱特性的海量点集合。雷达系统通过扫描获取的数据包括位置、方位/角度、距离、时间、强度等信息,这些信息对于准确判断和分析站台门间隙的异物情况至关重要。

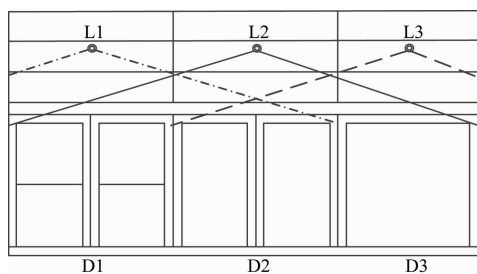
### 1.2 视频冗余检测

视频冗余异物检测结构图如图 2 所示。图 2 中,只要有一组视频摄像头或雷达检测器(如 L2)正常工作,就可以实现 D1、D2、D3 三门的异物检测;若三组视频摄像头或雷达检测器同时正常工作,则 D1、D2、D3 每个门都有 3 组检测信号交叉覆盖,极大提高异物检测的可靠性。

视频摄像头设有 300 个预置点,这些预置点设置在可观察各个站台门激光雷达检测区域的角度。当激光雷达检测到异物时,控制器会传达命令给摄像头,使摄像头联动对应预置点进行拍照。摄像头的实时视频同时记录在 NVR(网络硬盘录像机)上,

并通过路由器网络传至服务器进行视频算法分析,以辅助雷达判断异物。

单独的雷达判据虽然足够灵敏,但尚不足以满足工程应用需要。例如,站台门处夹住的纸张、树叶等不影响人身安全和列车运行安全的物体,也可能导致开关量跳变,从而使系统发出报警并紧急制动,影响地铁列车的正常运行。经过综合考量,最终加入了视频识别算法实现冗余判断,使得判断更加准确。



注: D1 为安全门; D2 为滑动门; D3 为固定门。

图 2 视频冗余异物检测结构图

Fig. 2 Diagram of video redundant foreign object detection structure

### 1.3 控制器系统组成

异物自动检测控制器系统结构图如图 3 所示。该系统由激光雷达单元、视频单元、控制器、服务器、路由器、声光报警单元、显示单元以及 FAO 安全回路联锁单元组成,各部分功能简述如下:

1) 激光雷达单元是控制器系统的重要检测环节,它通过发射红外激光并接收被测物体反射的信号,来判断是否存在异物。

2) 视频单元负责输入检测到的摄像头视频信息。

3) 控制器作为控制器系统的核心逻辑控制单元,实现所有的控制功能。

4) 服务器作为数据服务器,存储历史数据和报警数据,并生成相关报表。同时,它还提供网络云服务器功能和数据推送功能(注意:原文中将网络服务器和服务端混为一谈,这里假设这些功能是由同一台服务器提供的)。

5) 路由器实现路由和网关功能,为系统提供网络和网关服务。

6) 声光报警单元在系统自检发现故障或检测到异物时,进行声光报警显示。

7) 显示单元主要指位于端门的显示系统,它与服务器显示同步信息。

8) FAO 安全回路联锁单元接收安全回路闭锁信号和站台门开关门信号,并输出联锁信号给 FAO 系统。

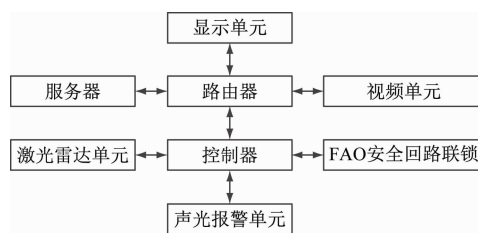


图 3 控制器系统结构图

Fig. 3 Diagram of controller system structure

### 1.4 小程序报警推送

图 3 中的服务器还具备专门的外网小程序推送功能。该小程序集成了网络访问控制等能力,经过严格的网络安全验证后,服务器能够利用此功能将运行数据和报警数据实时推送给小程序,从而实现对本地的或远程监控。此外,服务器还具备将系统运行状态及检测到的异物报警信息推送至运行人员手环的功能,这一创新设计极大地提升了系统运行和维护的可视化水平。

## 2 激光雷达和视频融合检测算法

### 2.1 点云融合算法

点云是在同一空间参考系下,表达目标空间分布和目标表面特性的海量点集合。由于点云数据的不规则性,大多数情况下这些数据会被转换成规则的 3D 网格,但这会导致数据体变得庞大,并增加运算和处理的成本。斯坦福大学的 Charles 及其研究团队设计出了一种直接处理点云数据的新神经网络——PointNet。该神经网络能够很好地保持输入点云的排列不变性,为对象分类、部分分割和场景语义解析提供了一个统一的框架。PointNet 能够同时学习全局和局部特征,提供了一种以 3D 识别为主的简单、高效且有效的方法。即使在数据损失率较高的情况下,PointNet 也能保持较高的准确率。例如,当数据损失率达到 50% 时,该网络的准确率仅下降 2%,显示出其强大的抗输入扰动和损坏能力。

PointNet 通过学习关键点的方式,从全局特征中筛选出影响全局特征的关键点集合,并基于不影响全局特征的关键点集合生成一个上限形状。这样,任何位于关键点集合和上限点集合之间的点都将产生相同的分类结果,否则将被忽略。因此,PointNet



神经网络能够有效地分析图像中的点云数据。

在分析激光雷达和摄像头输出的点云数据时,系统会记录这些数据,并更新分析机制的数据库。当控制器系统对检测对象进行判定时,PointNet 算法架构会捕捉点云数据的特征并进行分类。如果再次检测到相同的障碍物,系统将不会发出警报并继续正常运行。

## 2.2 图片差异算法

### 2.2.1 均方差 MSE 方法

在研究图片的相似性时,均方差 MSE 是一种常用的度量方法。它通过将图像中每个对应像素点之间的差的平方求和,然后除以像素的总数来计算。MSE 方法的计算速度快,但其主要缺点在于全局应用时可能无法准确估计图像间的感知差异。MSE 的值为 0 表示两幅图像完全相似,值越大则表示相似度越小。具体来说,MSE 值随着像素强度之间平均差的增加而增大。

### 2.2.2 结构相似性指数 SSIM 方法

尽管 MSE 方法的实现非常简单,但在评估图像相似性时,像素强度之间的较大差异并不一定意味着图像内容有显著差异。为了解决这个问题,引入了结构相似性指数函数 SSIM。与 MSE 不同,SSIM 不仅考虑像素值的变化,还考虑了图像结构的变化信息,从而能够更准确地反映图像间的感知相似性。

## 2.3 视频摄像头和激光雷达融合判断

通过激光雷达的扫描,系统控制器接收到障碍物的开关量信号。同时,摄像头也进行了拍摄与成像,并通过点云融合技术进行成像与分析。最终,控制器借助 MSE 算法和 SSIM 算法的辅助,对激光雷达和摄像头的信息进行综合处理,并通过逻辑判断融合算法,确定是否存在障碍物,并输出相应的控制信号。

为了更好地适应实际需求,实现异物检测系统的智能化分析,本系统会在雷达输出数据的同时进行记录。当工作人员判定某次检测为误判时,系统将会更新分析机制的数据库,以提高后续检测的准确性。

PointNet 架构被用于实现对点云数据的特征捕捉和分类。当系统再次检测到相同的物体时,能够识别并避免重复发出警报,确保系统正常运行。

图 4 展示了激光雷达和视频摄像头融合判据的流程图。激光雷达接收到从目标反射回来的信号,并与发射信号进行比较和处理,从而获得目标的距

离、方位、高度、速度、姿态甚至形状等相关信息数据,进而实现对目标的探测、跟踪和识别。激光雷达采集被测区域的点云数据,而摄像头则采集该区域的视频数据。通过获取被测区域的表征量,并进行深度学习和算法融合,系统能够实现特征匹配,并输出最终的匹配结果。

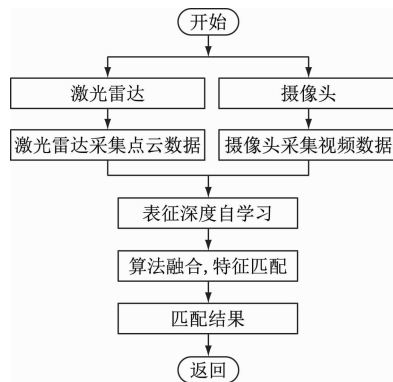


图 4 激光雷达和视频摄像头融合判据流程图

Fig. 4 Flow chart of LiDAR and video camera fusion criterion

## 3 测试与试运行

### 3.1 试验样机功能测试

试验样机的功能侧视图如图 5 所示。在图 5 中,被测试的控制器系统是一个放置在桌上的电箱,而激光雷达和视频摄像头则布置在桌面的相应位置。此外,图中还展示了水平布置的白色 PV(聚氯乙烯)管,该管带有距离刻度;以及垂直布置的直径 10 mm 的黑色 PV 管,该管用于模拟反射率为 10% 的被测物体。

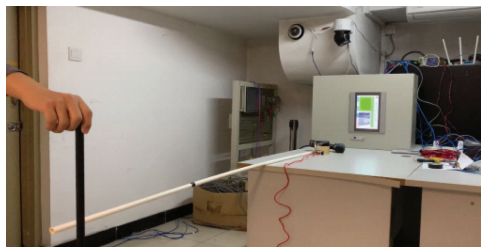


图 5 试验样机功能测试实景图

Fig. 5 Photo of experimental prototype functional test

改变周围照度等环境参数,移动黑色 PV 管远离或靠近激光雷达和摄像头,可以获得控制器系统的报警出现时间,从而获得控制器系统的测量距离和测量精度。当检测到所设置的区域内有异物,控制器系统会发出报警,显示界面上的报警区域显示

红色,报警消失则红色消失。控制器系统测量数据和报警信息,都保存在服务器数据库,随时可以在显示屏单元和移动终端小程序里显示。旁路功能测试:若发现某个激光雷达由于本身故障或误判等原因,发出报警信息,可在显示屏单元或移动终端上将该激光雷达传感器设置为“旁路”,屏蔽相应的激光雷达;也可通过激光雷达的开关量输入状态设置“旁路”当前激光雷达。正常工作的激光雷达显示绿色;报警状态的激光雷达显示红色;旁路状态的激光雷达显示黄色;本身自检故障的激光雷达显示蓝色。

### 3.2 工业样机试运行

本文所研制的系统在天津地铁站进行了测试,并且达到了预期的效果。FAO 异物检测的工业样机功能测试图如图 6 所示。图 6 中为激光雷达和视频监控摄像头安装位置,即图中左上角圆圈标注的位置。

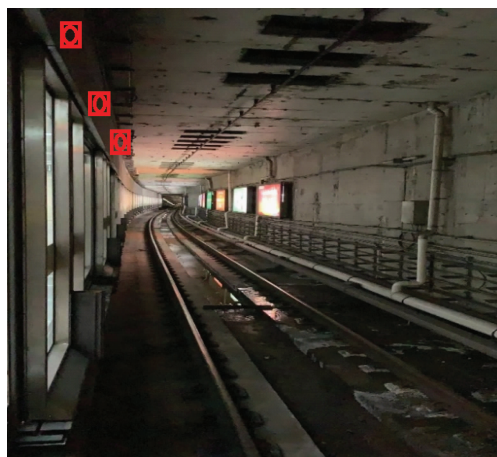


图 6 工业样机功能测试实景图

Fig. 6 Photo of industrial prototype functional test

FAO 异物检测的工业样机试运行小程序页面如图 7 所示。图 7 中,页面左上“tsinghua”标识当前用户账号;页面上半部分显示激光雷达的状态信息:当检测到所设置的区域内有异物时,在“异物检测”区域显示红色;报警消失则红色消失。控制器系统测量数据和报警信息均保存在服务器数据库中,用户可以随时在显示屏单元和移动终端小程序里查看这些信息。旁路功能测试:若发现某个激光雷达由于本身故障或误判等原因发出报警信息,用户可在显示屏单元或移动终端上将该激光雷达设置为“旁路”状态,以屏蔽其报警功能;同时,也可通过改变激光雷达的开关量输入状态来设置“旁路”模式,从而实现当前激光雷达的临时停用。

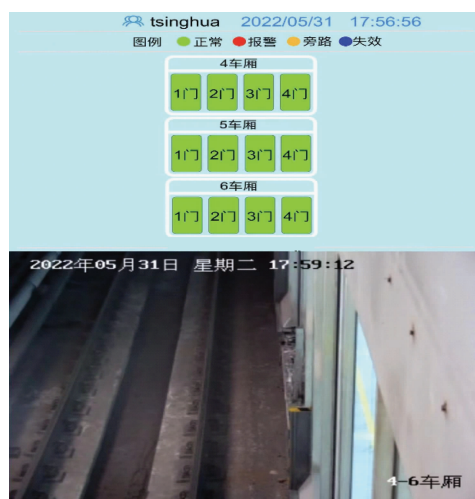


图 7 工业样机试运行小程序页面

Fig. 7 Mini-program page interface of industrial prototype trial operation

图 7 中,正常工作的激光雷达显示绿色,报警状态的激光雷达显示红色,旁路状态的激光雷达显示黄色,本身自检故障的激光雷达显示蓝色。页面下半部分显示摄像头视频,若被检测间隙出现异物,则报警和视频联动,第一时间捕捉报警现场视频,摄像头云台联动到激光雷达报警区域。激光雷达的检测频率可达 10 Hz 甚至更快。值得注意的是,在天津地铁站进行测试的 FAO 激光雷达检测系统,其异物检测速度相较于传统的红外检测系统有了极大的提高。在实际测验中,系统对被检测异物设置了 0.3 ~ 0.5 s 的检测时间,并判断异物至少 3 次;信号传输时间在 1.0 s 之内,检测和信号传输的总时间不超过 2 s,地铁列车站台门间隙异物检测时间将会缩短约 8 s。所测试的地铁线沿途共 18 个站点,地铁列车每次循环大约节省 3 min。在对于异物检测率进行测试时,试验对反光率为 10% 的黑色棒状异物逐渐减小尺寸,在 16 mm 左右时依然可以稳定地进行检测与报警,完全达到设计需求。

### 3.3 小程序报警推送测试

本系统云端服务器实时将系统状态和报警信息数据推送给运行人员佩戴的手环,实现系统状态的可视化。手环上可显示报警名称、报警状态、报警点名称、报警时间、当前数值和报警 ID。此外,小程序推送的信息也极大地方便了现场运行人员和维护人员在移动终端上查看系统状态、历史报警信息和实时报警信息。

## 4 结语

本文设计并实现了一个快速可靠的地铁站台门异物检测系统,该 FAO 系统提供了列车进站/离站的安全联锁指令。在检测系统的开发过程中,本研究进行了硬件和软件两大方向的创新。具体而言,采用了激光雷达和摄像头点云融合算法,并辅以 PointNet 等新型算法,对地铁站台门间隙的异物进行了有效检测。此外,还创新性地提出了传感器交叉叠装分层安装的方法,实现了站台门间隙异物的冗余检测功能,通过交叉互检提高了检测装置的可靠性。特别值得一提的是,通过使用 2D 激光雷达传感器实现了 3D 检测效果。在天津市地铁站的实际测试中,试运行结果表明,该系统在地铁站台门间隙黑色异物反射率为 10% 时,检测分辨力可达到 16 mm,为地铁的全自动驾驶提供了坚实的安全保障。

## 参考文献

- [1] 刘实秋. 重庆市郊铁路璧铜线采用 FAO 系统必要性分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(6): 63.  
LIU Shiqiu. Analysis of necessity of using FAO system for Bishan-Tongliang Line of Chongqing suburban railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(6): 63.
  - [2] LIU H. Introduction of the train unmanned driving system[M]// Unmanned Driving Systems for Smart Trains. Amsterdam: Elsevier, 2021: 1.
  - [3] NAYAK R, PATI U C, DAS S K. A comprehensive review on deep learning-based methods for video anomaly detection[J]. Image and Vision Computing, 2021, 106: 104078.
  - [4] 胡寅川. 基于图像识别的站台间隙异物探测方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.  
HU Yinchuan. Research on detection method of foreign bodies in platform gaps based on image recognition[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
  - [5] 孔德龙, 蒲凡. 基于深度残差神经网络的地铁站台门与列车门间异物自动检测方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 66.  
KONG Delong, PU Fan. Research on automatic detection method of foreign objects between platform screen door and train door based on deep residual neural network[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 66.
- 收稿日期:2022-09-02 修回日期:2023-12-20 出版日期:2024-10-10  
Received:2022-09-02 Revised:2023-12-20 Published:2024-10-10  
· 通信作者:于庆广,副教授,yuqingguang@163.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 192 页)
- LIU Ping, CHENG Xiaoqing, QIN Yong, et al. Reliability analysis of sliding door system based on fuzzy fault tree [C]//Proceedings of China Intelligent Automation Academic Conference. Hangzhou: Intelligent Automation Professional Committee of China Automation Society, 2013:315.
  - [6] 刘爱明. 轨道车辆门系统可靠性设计技术的研究与应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.  
LIU Aiming. Research and application of reliability design technology for rail vehicle door system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
  - [7] 杜洁. 基于故障树技术的铁路信号设备故障诊断专家系统的实现方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.  
DU Jie. Research on the implementation method of railway signal equipment fault diagnosis expert system based on fault tree technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
  - [8] 高翔. 地铁门控系统的故障树诊断方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.  
GAO Xiang. Research on fault tree diagnosis method of underground iron gate control system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- 收稿日期:2022-07-04 修回日期:2022-10-24 出版日期:2024-10-10  
Received:2022-07-04 Revised:2022-10-24 Published:2024-10-10  
· 第一作者:丁思畅,本科生,1979224911@qq.com  
通信作者:严俊,正高级工程师,yanjun@shmtro.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