

城市轨道交通障碍物检测及列车控制技术

肖添文, 徐永能, 余辉敏

引用本文:

肖添文, 徐永能, 余辉敏. 城市轨道交通障碍物检测及列车控制技术[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 161-165.

您可能感兴趣的其他文章

1. [双线导鱼雷遥测信息辅助机动目标跟踪方法研究](#)

引用本文: 许兆鹏, 武志东, 王顺杰, 等. 双线导鱼雷遥测信息辅助机动目标跟踪方法研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 188-191+227.

2. [一种提高处理器运算能力的控制方法研究](#)

引用本文: 江帆, 张晨洁. 一种提高处理器运算能力的控制方法研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 239-243+254.

3. [基于无人机主动导航的电力线检测与定位](#)

引用本文: 吕晓丽, 姜航, 李文辉. 基于无人机主动导航的电力线检测与定位[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 210-214.

4. [某排爆机械手关节控制系统研究](#)

引用本文: 沙毅刚, 王强, 何晓晖, 等. 某排爆机械手关节控制系统研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 233-238.

5. [单兵火箭弹BTT自抗扰控制器设计与仿真](#)

引用本文: 董瑞超, 陈志华, 刘晓利, 等. 单兵火箭弹BTT自抗扰控制器设计与仿真[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 197-202.

城市轨道交通障碍物检测及列车控制技术

肖添文,徐永能,余辉敏

(南京理工大学,南京 210094)

摘要:针对列车在高密度行车条件下运行环境安全问题,本文采用基于轨道旁的障碍物检测装置对轨行区内的障碍物进行检测与判断;采用应答器和基站作为障碍物检测结果信息传递的媒介;车载预警及控制系统根据接收到的障碍物检测结果信息控制列车作出相应动作,保障列车运行安全。经仿真分析和实验,证实了此系统的可行性,且障碍物检测精度高,列车控制性能好,可为城市轨道交通运行提供安全保障。

关键词:城市轨道交通;障碍物检测;列车预警;列车控制

本文引用格式:肖添文,徐永能,余辉敏.城市轨道交通障碍物检测及列车控制技术[J].兵器装备工程学报,2020,41(10):161-165.

Citation format:XIAO Tianwen, XU Yongneng, YU Huimin. Research on Obstacle Detection and Train Control Technology for Urban Rail Transit[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2020,41(10):161-165.

中图分类号:U231.6

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2020)10-0161-05

Research on Obstacle Detection and Train Control Technology for Urban Rail Transit

XIAO Tianwen, XU Yongneng, YU Huimin

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For the safety problem of train operation environment, the trackside obstacle detection device was firstly used to detect and judge the obstacles in the track area. Then we used the transponder and the base station as the medium for information transmission of the obstacle detection result. The on-board warning and control system can control the train to make corresponding actions based on the received obstacle detection result information to ensure the safety of the train's operation. Through simulation analysis and experimental verification, the high accuracy of detection and good control performance of this system were verified, which can provide security for the operation of urban rail transit.

Key words: urban rail transit; obstacle detection; train warning; train control

据中国城市轨道交通协会数据统计分析,我国城市轨道交通(简称城轨)建设规模逐年扩大,运营里程和客运量不断增长。截至2019年底,我国的城市轨道交通建设运营总里程为6736.2公里,客运量高达237.1亿人次/年,成为部分中、大城市乘客出行的首选交通方式^[1]。但是由于城轨列车具有客运量较大,并且发车间隔较小的特点,因此容易引发

事故,此问题得到了人们的高度关注。城市轨道交通列车一旦发生意外事故,例如撞击障碍物致使的脱轨情况,不仅难以实施救援计划,而且还可能会导致该班次列车的经济损失和后续列车的延误,甚至还可能造成较为严重的人员伤亡,最终亦会影响乘客的出行^[2]。因此,使用障碍物检测装置实时监测列车的运行环境,并且采取相应的措施及时对列

收稿日期:2019-11-13;修回日期:2019-12-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1001801);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX19_0061)

作者简介:肖添文(1995—),女,硕士研究生,主要从事障碍物检测、交通规划研究,E-mail:496812820@qq.com。

通讯作者:徐永能(1972—),男,副教授,硕士生导师,主要从事交通规划、设备状态评估、城市轨道交通运输研究,E-mail:x780906yn@163.com。

车进行预警或者控制十分重要。

为保障列车运营安全,应加强对列车运行环境的实时监测和列车控制技术的研究,实现对轨道区域内障碍物的精确检测与判断,从而进行列车预警与控制。其中本文所研究的障碍物检测技术主要是用于针对具有较强的突发性障碍物侵限事件,并且凭借非接触式障碍物检测技术快速响应和准确度较高的优点,及时对运行环境中可能存在的危险因素进行检测^[3]。列车预警及控制技术是通过应答器和基站传递的障碍物检测与判断结果信息,根据危险等级自动选择控车模式的一种应用技术,该技术主要用于保证列车安全平稳通过障碍物所在的区域。两种技术融合,共同保障城市轨道交通列车运行安全,提高乘客出行安全性和舒适性。

本文所研究的城市轨道交通的障碍物检测技术及列车控制技术主要是以提高列车运行的安全技术水平和乘客的乘车体验为目的,采用最新的科技信息技术,最终为城轨行业提供运行环境的快速和精确检测服务^[4]。本研究主要从安全角度出发,着重解决障碍物侵入轨道线路的检测、列车的紧急运行控制等问题,从而提高城市轨道交通运行的安全水平和乘客的旅程满意度^[5]。

1 障碍物检测及列车控制技术研究现状

障碍物检测技术和列车控制技术作为保证行车安全的重要技术,在许多国家铁路行车系统中均有一定研究与应用。

在障碍物检测技术研究方面,现已有许多较为完善的研究方法。Ryuta等^[6]通过单目视觉图像检测铁路沿线的障碍物,并使用模拟场景来验证该方法的可靠性。Jaehyun Han等^[7]提出了使用测距传感器来检测运行环境边界和界限内障碍物的方法,同时采用特殊手段验证了此方法的可用性。黄如林等^[8]提出了以时空特征向量为基础的障碍物检测方法,主要用于检测动态障碍物,具有较强的可行性。曲越^[9]采用多技术融合检测,对视频图像和激光雷达进行了研究,并且提出并验证了该融合算法。但上述障碍物检测方法未同时对静态障碍物和动态障碍物进行检测,也未阐明障碍物检测结果信息传输方式,使得检测精度和信息传输效率均有待进一步研究与提高。

在列车预警及控制技术研究方面,现阶段也有诸多研究成果。Li Sihui等^[10]考虑了驾驶员的反应时间和速度、无线通信的延迟时间、安全保护距离等各个因素,计算了可以避免列车与障碍物碰撞的时间,同时开发了列车的碰撞预警系统(TCEWS)。Allbrecht等^[11]通过找到最优的速度切换点,生成了对应的列车速度控制曲线,此曲线可以为驾驶员提供有关于列车节能驾驶的策略和控制建议。吴攀^[12]从列车的运行安全的角度出发,重点研究了列车的接近预警系统,并且通过列车与列车之间的直接通信方式,实现了列车的接近预警功能。陈思捷^[13]通过分析列车的制动系统结构和制动原理,构建该列车相应的制动模型,此模型可以为司机的控

车提供较为精准的控制曲线。但上述列车预警及控制技术主要是为司机提供预警,未实现主动控车行为,当司机反应过慢应急不及时时,很可能会危及行车安全,因此应进一步加强应急情况下列车自动制动技术的研究。

通过对国内外研究成果的分析,可以看出,有关城市轨道交通障碍物检测技术、列车预警及控制技术的方法很多,也较为完善,但却均未将它们进行融合,未根据检测结果有效控制列车采取主动安全行为。因此,本文着重研究了城市轨道交通的全套列车安全保障技术,该技术主要包括列车运行环境的障碍物检测技术和列车的预警及控制技术。通过对各技术的融合,克服了单一技术的缺点,使得应急反应更灵敏,从而提高城市轨道交通运行的可靠性和安全性。

2 模型方法

城市轨道交通的障碍物检测技术和列车控制技术主要原理是通过设置于轨道旁的障碍物检测装置对列车的运行环境进行实时地检测,并且判断所检测到的山体滑坡、落石、行人等对列车运行的影响程度,通过应答器和轨道旁基站将检测结果信息传递给临近列车,车载预警及控制系统自动判断制动位置和控制制动信号,从而保障行车安全。

2.1 轨道旁障碍物检测装置

轨道旁障碍物检测装置主要采用摄像机和激光雷达融合技术,其中摄像机主要用于对障碍物进行轮廓描绘和形状定型,激光雷达主要用于对障碍物进行高度信息确定和定位,二者融合使用,更加能准确检测出障碍物的形状信息和位置信息,并根据障碍物危险等级采取系统自动响应模式或人工响应模式控制列车运行,从而保障列车运行安全。

在二者融合使用时,关键是坐标系的融合标定与转换,可采用世界坐标系作为转换桥梁,找到二者的相互关系。激光雷达扫描点在世界坐标系下的坐标点 (X', Y', Z') 为:

$$\begin{cases} X' = R \cos \omega \sin \alpha \\ Y' = R \cos \omega \cos \alpha \\ Z' = R \sin \omega \end{cases} \quad (1)$$

其中: R 表示激光雷达的扫描点到中心点的距离; α 表示激光与雷达正向的水平夹角; ω 表示发射的激光与水平面的垂直角度; Y' 轴为激光雷达所指的方向,一般为列车前进方向, Z' 轴为列车垂直向上方向; X' 轴为满足右手定则的另一方向。

而世界坐标系下的点 (X', Y', Z') 在相机坐标系下可表示为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: R 为摄像机坐标系与世界坐标系二者之间的旋转矩阵关系; T 则表示旋转后的俩坐标系之间的平移关系。

2.2 障碍物检测技术

1) 检测方法

通过对国内外障碍物检测技术的优缺点和适用性能进行对比分析,最终发现视频检测技术的成本较低,检测的效果较好,并且非常容易实现^[14],因此本研究亦采用此种技术进行障碍物检测,且辅以激光雷达进行测距定位,从而提高检测精度。基于视频检测的算法较为成熟和完善,主要包括:时间差分法、背景消减法、帧差法、光流法、平均背景模型法等^[15],它们有相应的优点和缺点:时间差分法运算速度极快,但是存在“空洞”现象;背景消减法可以用于检测运动的目标物体,并且检测的准确度较高,实现方法简单,但是对明暗变化等相对敏感;帧差法的检测速度也较快,实现方法较为简单,对明暗变化不敏感,但存在“空洞”和“双影”现象;光流法可以携带所检测物体的运动信息,且检测效率较高,但是方法实现较为复杂,计算量较大,实时性差;平均背景模型法将每一帧图像的累加平均值作为背景图像,提高了背景图像的精度,但仅可检测位移较为明显的物体。

通过对各图像处理方法的对比,结合本文所研究的城市轨道交通的特点,选择隧道作为研究对象,选用帧差法作为图像检测方法,对城市轨道交通障碍物侵入进行实时检测与判断,从而保障运营安全。基于视频检测的方法如下:采用背景帧差法,根据安装在轨道旁的障碍物检测装置采集到的信息,得到该帧图像的差值图像 $id(x', y', i)$ ^[16]:

$$id(x', y', i) = f(x', y', i) - b(x, y, i_0) \quad (3)$$

其中: $b(x, y, i_0)$ 为隧道内轨道旁障碍物检测装置初始视频图像,即背景图像; $f(x', y', i)$ 为当前的视频图像; (x, y) 为图像位置坐标; i 为图像帧数; i_0 为初始图像帧数,一般取值为0。

通过设置图像阈值 T ,可以得到二值化的差值图像^[17]:

$$bid(x', y', i) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } |id(x', y', i)| \geq T \\ 0, & \text{如果 } |id(x', y', i)| < T \end{cases} \quad (4)$$

本研究将隧道内轨道旁各图像采集模块正常情况下的监控视角图像作为初始背景图像,将监控视频中的图像与该背景图像实时进行帧差处理,并且对差异区域标红和进行二值化处理。通过二值化后的图像信息,与轨道旁信息处理模块中储存的信息比对,判断出障碍物对列车运行的影响程度。

2) 障碍物检测原理俯视图

信息处理模块主要完成障碍物的信息处理和安全距离的估算,其距离计算原理如下:

在直线区段, A 为隧道内的障碍物检测装置,包括图像采集模块和信息处理模块, B 为障碍物俯视图, C 为应答器, E 为列车车头。直线区段的俯视图如图1。

根据图中关系,障碍物 B 到列车车头 E 的距离 S 计算如下:

$$d = |r \cos \theta| \quad (5)$$

$$D = |R \cos \alpha| \quad (6)$$

$$S = m - n - D = m - n - |R \cos \alpha| \quad (7)$$

其中: d 为检测装置 A 与障碍物 B 的最近距离到列车前进方向水平线的投影; r 为检测装置 A 到障碍物 B 的最近距离; θ

为检测装置 A 到障碍物最近距离 r 与列车前进方向水平线的夹角的弧度值; D 为检测装置 A 与障碍物 B 的最远距离到列车前进方向水平线的投影; R 为检测装置 A 到障碍物 B 的最远距离; α 为检测装置 A 到障碍物最远距离 R 与列车前进方向水平线的夹角的弧度值; m 为检测装置 A 到特定应答器 C 的水平距离; n 为应答器 C 到列车车头 E 的距离。

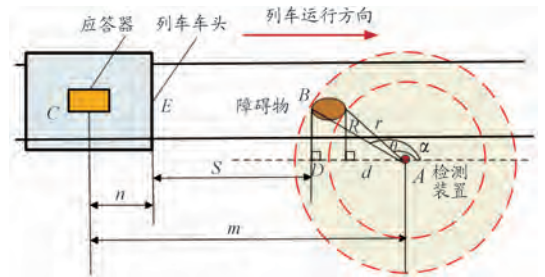


图1 直线区段俯视图

在曲线区段, F 为障碍物检测装置 A 到轨道中心线的垂足。曲线区段的俯视图如图2。

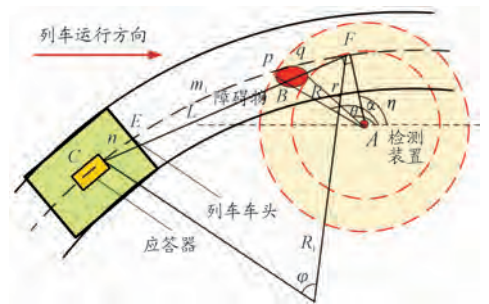


图2 曲线区段俯视图

障碍物 B 到列车车头 E 的距离 S 计算如下:

$$q = |r \sin(\theta - \eta)| \quad (8)$$

$$p = |R \sin(\alpha - \eta)| \quad (9)$$

$$L = 2R_1 \sin(\varphi/2) \quad (10)$$

$$k = 1/R_1 \quad (11)$$

$$m_1 = \varphi R_1 \quad (12)$$

$$S = m_1 - n - p \quad (13)$$

由式(8)~式(13)可得:

$$S = \frac{2}{k} \arcsin \frac{kL}{2} - n - |R \sin(\alpha - \eta)| \quad (14)$$

其中: q 为垂足 F 到 r 延长线与轨道中心线交点的距离; η 为检测装置 A 到轨道垂线与列车前进方向水平线的夹角的弧度值; p 为垂足 F 到 R 延长线与轨道中心线交点的距离; L 为垂足 F 到应答器 C 的直线距离; R_1 为轨道曲率圆半径; φ 为垂足 F 与应答器 C 形成的曲率圆圆心角弧度值; k 为轨道曲率; m_1 为垂足 F 到应答器 C 的弧线距离。

假设列车行驶速度为 v ,则已知列车运行速度 v 和到达障碍物 B 的距离 S ,可采用目标-距离模式曲线进行速度控制,使列车到达障碍物时能处于安全状态,待清除障碍物后

再继续运行。

3) 信息传递

轨道旁障碍物检测装置实时检测轨道区域内的障碍物情况,并判断此障碍物对列车运行是否存在影响,同时将障碍物检测结果信息传递给相应应答器。当列车经过该应答器时,读取存储的障碍物信息,并通过基站传递给相邻列车,列车根据接收到的信息进行预警及控制。而基站间采用 GSM-R/GPS 网络进行通信,共同保证障碍物的精确检测与信息传递,为列车运行控制提供依据。障碍物信息传递的示意图如图 3。

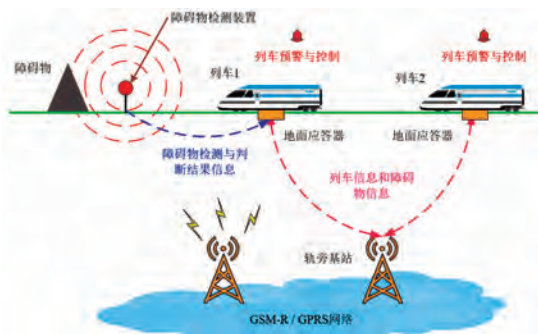


图 3 障碍物信息传递示意图

2.3 列车预警及控制技术

当安装在轨道旁的障碍物检测装置检测到轨道的特定区域内存在障碍物,并且该障碍物可能会威胁行车安全时,系统会自动进行预警鸣响^[18]。根据障碍物的大小、形状和高度值,设置不同的预警等级,当危险等级较低时,可采取预警的方式提醒列车司机前方运行区段存在障碍物,并发送给司机相应视频图像和障碍物信息;当危险等级较高时,表明该障碍物的存在直接影响列车运行,严重威胁行车安全,可采用制动系统直接制动的方式控制列车运行,从而保障行车安全。

列车预警及控制系统结构如图 4 所示,其部件功能如下:

- 1) AC220V 电源开关:为该列车预警及控制系统供电。
- 2) 系统正常运行表示灯:系统内各部件的工作正常,信息的传输和接收信号正常时,点亮绿色。
- 3) 制动警告表示灯及蜂鸣器:当接收到运行环境存在异常信息并危及行车安全时,点亮红色,同时开启蜂鸣。
- 4) 紧急制动表示灯及报警蜂鸣器:当检测到自动制动信号控制输出失常或制动执行失败时,点亮红色,并开启蜂鸣器。
- 5) 系统位置设定开关:用于对系统的位置进行设定。
- 6) 障碍物检测装置:安装于轨道旁的图像采集模块和图像处理模块,可实时检测轨道区段内的障碍物情况,并判断障碍物对列车运行是否存在影响。
- 7) 列车定位系统接口:与车载定位装置相连接,获取列车的定位信息。

8) 车载显示器接口:用于和车载显示器相连,显示列车的制动信号和路况信息等。

9) 自动制动执行器:用于在紧急情况下的列车自动制动。

10) 手动制动操作台:用于在自动制动失败的情况下,开启人工手动制动操作。

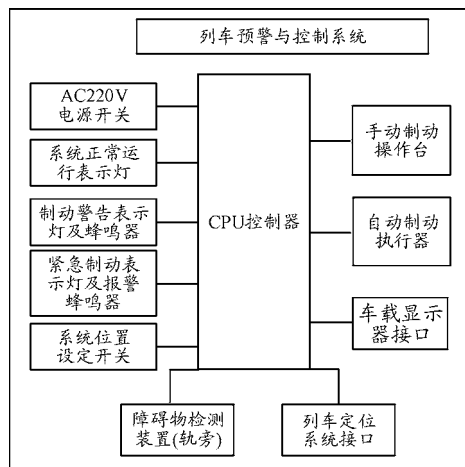


图 4 列车预警及控制系统结构框图

3 实例仿真

将上述方法进行仿真,基于图像检测技术,利用某地铁提供的人工拍摄视频图像,视频内容为某工人拎着工具箱检修,检修结束后将工具箱遗忘在隧道内。利用 MATLAB 仿真对采集到的实时视频进行障碍物检测,将每一帧视频作为目标视频图像,识别出的结果与二值化图像代表障碍物的检测结果。而在命令行窗口则会输出该帧图像的一些基本检测信息,例如该帧时间、障碍物最远距离所对应的角度、该角度余弦值、最远距离、障碍物到列车车头的距离、是否存在障碍物、是否影响列车运行、列车经过该障碍物时是否正常运行、是否应采取应急及控制措施、采用哪套应急方案等。MATLAB 的仿真结果如图 5 所示。



图 5 MATLAB 仿真结果界面

通过 MATLAB 仿真结果,可以看出,该障碍物检测算法能精确识别出遗忘在隧道内的工具箱,且能输出相应的障碍物信息,与实验时实际障碍物所测得的情况相同,并可通过

设置一定阈值,判断对列车运行是否存在危险,并将检测结果传递给相应应答器。当列车途经该应答器时,实现信息的传输,读取最新障碍物信息,并通过基站传递给后续列车,便于列车根据危险等级作出相应控制措施。

4 结果与讨论

本研究中使用的障碍物检测方法可用于保障在高密度行车条件下的行车安全,能精确检测出障碍物,可实现预期功能。但目前的障碍物检测技术由于检测精度和算法的缺陷,仅能检测落石、行人、工具箱等大型的障碍物,而对于小型的障碍物,检测则较为困难。且障碍物检测实验次数少,检测对象有限,对颜色不鲜明或者体积较小的物体未进行实验,可能还存在一些检测偏差。同时,检测算法的精度还需要进一步提高,这可能对检测结果存在一定的影响。后期将对障碍物检测范围扩大研究,并提高检测算法精度,使得小型障碍物和色彩与背景相差不大的障碍物均能被检测出。同时亦会增加仿真和实验的次数,避免因特殊原因而导致的实验偶然性,使得最终的实验结果更具说服力,保证列车的高安全性能。

5 结论

在轨道旁安装障碍物检测装置,实时监测运营环境,并判断障碍物对列车运行是否存在影响,同时通过应答器和轨道旁基站传递检测信息;在列车上安装预警及控制系统,通过接收到的障碍物检测信息,自动控制列车实现相应应急预案,对保障行车安全起到了重要作用。本技术所包含的障碍物检测、危险警示和自动控车均能实现预期功能,减少了人员损伤以及社会资源的浪费,提高了城市轨道交通公司运营的安全水平。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2019 年度统计和分析报告[R], 2020.
- [2] DALAPATI P, PADHY A, MISHRA B, et al. Real-time collision handling in railway transport network: an agent-based modeling and simulation approach[J]. *Transportation Letters*, 2017; 1 - 11.
- [3] Kang Y, Iranitalab A, Khatkhat A. Modeling railroad trespassing crash frequency using a mixed-effects negative binomial model[J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2018; 1 - 11.
- [4] JIANG W, CHEN S, CAI B, et al. A multi-sensor positioning method based train localization system for Low Density Line [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018; 1 - 1.
- [5] KIM S, SONG W J, KIM S H. Double Weight-Based SAR and Infrared Sensor Fusion for Automatic Ground Target Recognition with Deep Learning[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 72.
- [6] NAKASONE Ryuta, NAGAMINE Nozomi. Frontal Obstacle Detection Using Background Subtraction and Frame Registration[J]. *IEEE Railway Technical Research Institute*, 2017, 58(4): 298 - 302.
- [7] HAN J, KIM D, LEE M, et al. Enhanced Road Boundary and Obstacle Detection Using a Downward-Looking LIDAR Sensor[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(3): 971 - 985.
- [8] 黄如林, 梁华为, 陈佳佳, 等. 基于激光雷达的无人驾驶汽车动态障碍物检测、跟踪与识别方法[J]. *机器人*, 2016, 38(04): 437 - 443.
- [9] 曲越. 城轨列车非接触式障碍物检测系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [10] LI S H, CAI B G, LIU J, et al. Collision risk analysis based train collision early warning strategy[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 112: 94 - 104.
- [11] ALBRECHT A R, HOWLETT P G, PUDNEY P J, et al. Energy-efficient train control: From local convexity to global optimization and uniqueness[J]. *Automatica*, 2013, 49(10): 3072 - 3078.
- [12] 吴攀. 地铁列车接近预警系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [13] 陈思捷. 适用于重载列车运行控制系统控车曲线研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [14] 徐丙立, 邵小耀, 饶毅. 基于深度图像的无人车障碍探测与绕行算法[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(9): 120 - 124.
- [15] 鲁永杰. 基于机器视觉的列车前方障碍物检测方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [16] 李志煊. 改进型的 LBP 算法及其在运动目标检测中的应用[D]. 广州: 中山大学, 2009.
- [17] BHARATI S P, WU Y, SUI Y, et al. Real-time Obstacle Detection and Tracking for Sense-and-Avoid Mechanism in UAVs[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2018; 1 - 1.
- [18] WANG J, WANG J, ROBERTS C, et al. A novel train control approach to avoid rear-end collision based on geese migration principle[J]. *Safety Science*, 2017, 91: 373 - 380.

科学编辑 吴新焯 博士(厦门大学副教授)

责任编辑 杨梅梅