

# 基于车路协同技术的自动驾驶有轨电车路口 通过优化技术

朱永辉<sup>1,2</sup> 梁 霄<sup>1,2</sup> 袁 魁<sup>1,2</sup>

(1. 上海富欣智能交通控制有限公司, 201203, 上海;

2. 上海中运量轨道交通系统工程技术研究中心, 201203, 上海//第一作者, 工程师)

**摘 要** 引入 V2X(车路协同)技术,提出基于该技术的自动驾驶有轨电车路口通过系统和方案。该方案可以改善有轨电车在通过平交路口时,依靠目视驾驶或视觉信号检测导致视距受限而降低有轨电车通过效率和舒适性的问题。实际运行线路测试验证了所提方案的有效性。

**关键词** 有轨电车;路口通过;自动驾驶;车路协同技术

**中图分类号** U482.19

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.10.046

## Optimization Technology of Tram Autonomous Driving through Crossing Based on V2X Technology

ZHU Yonghui, LIANG Xiao, YUAN Kui

**Abstract** V2X (vehicle to everything) technology is introduced, and the system and scheme of V2X-based tram autonomous driving through crossing is proposed. The scheme can solve the problem of reducing tram passing efficiency and riding comfort with limited viewing distance, which is caused by drive-on-sight and visual signal detection when the tram passing level crossing. The practically operating line has tested and verified the effectiveness of the proposed scheme.

**Key words** tram; passing crossing; autonomous driving; V2X (vehicle to everything) technology

**Author's address** Shanghai Fuxin Intelligent Transportation Solutions Co., Ltd., 201203, Shanghai, China

有轨电车是一种主要由驾驶员目视(信号)驾驶、运行于地面、路权开放或半独立、依靠电力驱动的大容量轨道交通制式<sup>[1]</sup>。其具有的路权不独立和目视驾驶的特点,决定了它在经过平交路口时,必须像汽车一样,通过观察信号机(专用或与公共交通共用)的状态来决定是否能够安全通过。由于各个路口信号控制相位的差异,加上有轨电车在接近路口时并不能自动获得路口信号机的状态,导致

其在通过路口前必须减速观察,随时准备停车,以避免误闯禁止信号。该运营特征降低了有轨电车作为大容量交通系统的运营效率,对有轨电车节能运行、乘客舒适度等亦有不良影响。近年来国内外开展的自动驾驶有轨电车试验中,部分采用了通过图像识别信号机来辅助路口通过的技术<sup>[2-3]</sup>,一定程度上缓解了上述矛盾,但其识别效果高度依赖图像传感器本身和处理技术,且在夜间和能见度较差的天气里检测效果急剧降低,无法满足有轨电车全天候运营需要。目前,智能网联汽车产业中蓬勃发展的 V2X(车路协同)技术,因其无线通信的远距离、高速率和低延迟的特点,为有轨电车在远距离获取信号机状态的基础上实现高效的路口通过提供了基础条件。

本文在综合分析当前有轨电车驾驶员常规目视驾驶、基于自主信号感知的自动驾驶有轨电车路口通过方案的基础上,引入基于 4G/5G(第四代移动通信技术/第五代移动通信技术)的 V2X 技术,提出基于 V2X 技术的有轨电车路口通过方案及相关技术,并在实际运行线路上进行测试以验证所提方案的有效性,供有轨电车和轨道交通行业相关技术人员参考。

## 1 有轨电车路口通过方案

### 1.1 信号优先

信号优先概念源于公共交通工具优先通行技术,包括实现公共交通工具在空间和时间通行权上的优先。空间优先可通过设置专用道或部分锯齿型优先进口道来实现;时间优先即信号优先,即利用先进的通信信息、控制、计算机等技术,通过智能化信号控制来实现优先通过。有轨电车的信号优先需在传统道路交通控制系统的基础上增加相应

功能,并结合有轨电车所属运营控制系统的控制信息,方可达到优先控制的目标。

有轨电车信号优先原理如图 1 所示。其核心可以概括为以下几点:

- 1) 选择性:有轨电车一般配置调度控制系统以提供实时的车辆信息,可根据载客或准点情况优先实施。
- 2) 有条件优先:全面考虑优先实施的条件,包括电车运营及道路交通情况,减少对其他交通参与体的影响,一般不采用强制优先、绝对优先。
- 3) 控制策略:针对有轨电车运营的具体环境和外部条件设计对应的控制算法和策略。在有轨电车运行控制系统侧,实现对优先请求和优先结果的执行;在道路交通侧,实现优先请求的响应,并按照一定优先策略给出优先结果,最终达到有轨电车优先的目的。

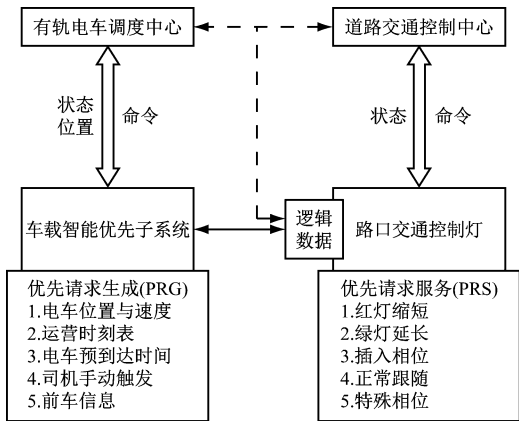


图 1 有轨电车信号优先原理

Fig. 1 Principle of tram signal priority

### 1.2 驾驶员目视驾驶通过方案

基于驾驶员目视驾驶的有轨电车信号优先是指根据既定的车辆位置和路口优先策略,以驾驶员目视为主要感测手段,来判断前方路口是否可以优先通过。此种方法是当前有轨电车最广泛使用的路口通过方式,驾驶员需综合考虑有轨电车的运行速度、信号优先触发位置,根据前方信号机的当前状态(灯色)等,通过经验判断是否通过,一般无法预先得知信号机状态的轮转周期或相位倒计时。该方案提供了一种基于有轨电车位置的优先方案,可提高有轨电车的路口通行效率。但同时该方案亦存在明显不足,如:

- 1) 当有轨电车触发优先信号时,前方道路侧信号灯(绿色通行灯)即将转换为禁止信号,驾驶员无

法得知绿灯的剩余时间,保守起见实施制动而无法有效通过路口。

- 2) 当有轨电车触发优先信号后,因天气或其他因素导致运行速度降低,驾驶员无法准确判断是否仍可以舒适控车方式通过路口,故实施制动。这在客观上浪费了一个允许通行相位,失去了信号优先的作用。

### 1.3 基于自主信号感知的通过方案

当有轨电车装备自动驾驶系统<sup>[5]</sup>后,有轨电车驾驶员的主要行车操作职责将转移给自动驾驶系统,其中包括对信号机的瞭望观察。故自动驾驶系统应采取技术措施,实现对行车前方信号机及其状态(灯色)的实时连续检测。类似汽车自动驾驶中的信号灯检测<sup>[6]</sup>,一种可行的方式是采用专用图像传感器(摄像机)对包含信号机的图像进行处理,从中检测出信号机及其状态,作为自动驾驶系统进行路口通过判定逻辑的依据之一,而相应的路口通过方案被称为基于自主信号感知的通过方案。图 2 是该方案的原理示意。该方案的主要优点包括:

- 1) 有轨电车自主检测和判断:通过车载图像传感器即可获取信号机信息,无需车外设备协助,车辆自主性高。
- 2) 信息丰富:图像中包含大量有轨电车行驶环境的信息,有利于结合信号机状态实现更复杂的行车逻辑。

该方案存在的主要问题如下:

- 1) 自动驾驶系统可靠性差:天气、光照、环境光源等均会对图像质量产生明显干扰,进而影响信号机的检测结果。
- 2) 故障容忍度低:目前广泛使用的基于人工智能的信号机识别方法,仅能识别经过训练的信号机状态。信号机发生故障时,因其故障原因不同,表现的状态亦不同,故对其进行预训练的难度较大。

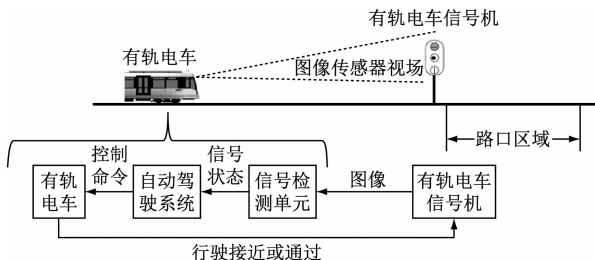


图 2 有轨电车基于自主信号感知的通过方案

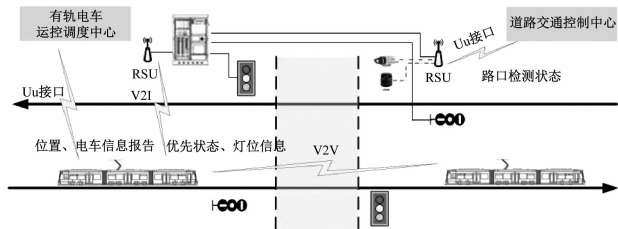
Fig. 2 Tram passing crossing scheme based on autonomous signal perception

因此,为确保实现连续、实时、可靠的信号机检测,需要考虑其他方案。

## 2 基于 V2X 技术的有轨电车路口场景协作

“车路协同”在道路工程学和交通工程学中指道路交通系统中“人-车-路-环境”四要素的耦合与协同。车路协同系统是智能运输系统(ITS)的重要组成部分之一<sup>[7]</sup>。随着 4G/5G 的发展应用,基于车联网的 V2X 技术应运而生。该技术通过专有短程通信(DSRC)和基于蜂窝移动通信系统的车联网(C-V2X)等主要通信手段<sup>[8]</sup>,将车辆同任何与其交互信息的对象连接起来,以构成更大规模的交通自动化系统,以承载单车难以完成的功能。

有轨电车运营通常采用独立路权或半独立路权。半独立路权是指在相邻路口之间采用独立路权,而在路口区域与其他社会车辆和行人共享路权。显然,在半独立路权情况下,受到共享路权的其他交通参与者制约,有轨电车行车效率将受到较大影响。通过引入 V2X 技术,将“人、车、路、云”等交通参与要素有机地联系在一起,扩大了有轨电车的感测范围,有助于实现智能交通管控,可进一步提高行车效率。基于 V2X 技术的有轨电车路口场景协作如图 3 所示。



注:V2V为车车通信;RSU为路侧单元;Uu为蜂窝网络通信;V2I为车辆与基础设施。

图3 基于 V2X 技术的有轨电车路口场景协作系统

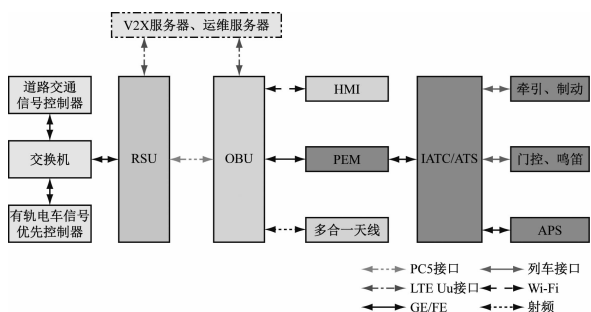
Fig. 3 Tram crossing scenario synergetic system based on V2X technology

## 3 基于 V2X 技术的自动驾驶有轨电车路口通过方案

### 3.1 系统设计

基于 V2X 技术的有轨电车自动驾驶路口通过方案及其系统(以下简称“本文所述系统”),如图 4 所示。该系统主要由车载、轨旁、V2X 通信链路 3 部分构成。车载部分包括自动控车规划模块 IATC/ATS(智能化列车控制/列车自动监控)、APS

(智能感知单元)及 OBU(车载单元),以实现有轨电车的运营规划,并根据 APS 的目标授权进行实时运行控制。有轨电车在通过路口的过程中,OBU 实时传输来自于 RSU 前方信号机轮转相位及相位剩余时间。自动控车规划模块根据有轨电车的运行速度及其与前方信号机的距离,结合信号灯状态及剩余轮转时间,输出控车命令,实现舒适控车。轨旁部分则主要是行进路口信号灯和有轨电车信号灯的状态检测,即将 SPaT(信号相位和定时消息)信息发送至 RSU。根据实际使用需要,RSU 亦可预留与维护中央服务器和感知设备的接口。V2X 通信链路部分主要是 RSU 与 OBU 基于 PC5(直通通信)的空口通信,同时亦可预留 RSU、OBU 与 V2X 服务器或智能化维护中心的 Uu 接口。



注:HMI为人机接口;PEM为感知扩展模块;GE/FE为快速以太网/千兆以太网。

图4 基于 V2X 技术的有轨电车自动驾驶路口通过方案

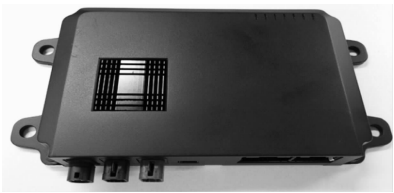
Fig. 4 Scheme of tram autonomous driving through crossing based on V2X technology

### 3.2 车载设备

车载设备包含 OBU、显示界面、多合一天线、IATC/ATS 及 APS。OBU 及多合一天线实物如图 5 所示,其 Uu 接口上行和下行带宽分别为 200 Mbit/s 和 1 Gbit/s,PC5 接口带宽为 20 Mbit/s,通信时延小于 5 ms,通信范围不小于 300 m。本文所述系统中,将 OBU 安装在客室,多合一天线安装在有轨电车挡风玻璃下方无遮挡处,显示界面与 OBU 的自建无线网络互联,实时显示有轨电车的位置以及获取前方的信号灯信息。IATC/ATS 包含车载控制单元、速度和加速度传感器、感知单元及感知传感器等(见图 6)。IATC/ATS 一体化车载控制规划设备安装在客室,感知传感器组合安装在有轨电车的驾驶室前方,可实现有轨电车根据规划线路自动运行,并可由感知模块实时获取前方障碍物信息,从而实现有轨电车的自动、安全、舒适运行。



a) 天线



b) 主控单元

图 5 OBU 设备

Fig. 5 OBU device

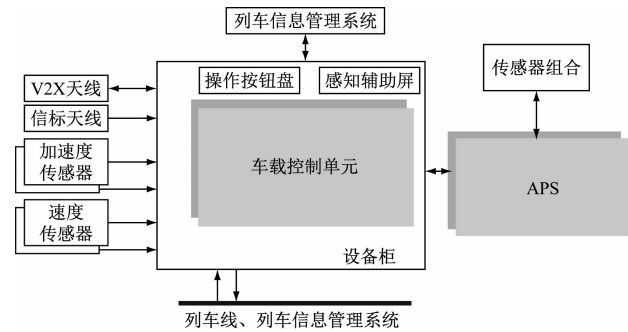


图 6 IATC 和 APS 互联图

Fig. 6 Diagram of IATC and APS interoperation

3.3 轨旁设备

RSU 为本文所述系统的路侧单元,负责接收交通信号机/应用服务器下发的路况信息等实时交通信息,并与既有道路信号控制柜及有轨电车信号优先控制柜互联,见图 7。从道路信号控制柜获取 SPaT 数据,即交通灯的相位与时序消息,同时进行有轨电车信号优先控制柜信号灯信息采集以获取信号灯实时相位信息,对这两部分信息进行融合校验。RSU 可通过短距离直连通信接口 PC5、蜂窝网络接口 Uu 的传输信息。本文所述系统实际采用的是 PC5 链路,预留 Uu 接口链路。

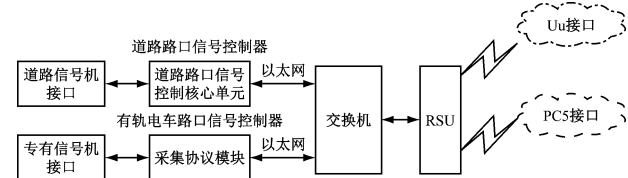


图 7 RSU 路侧设备互联图

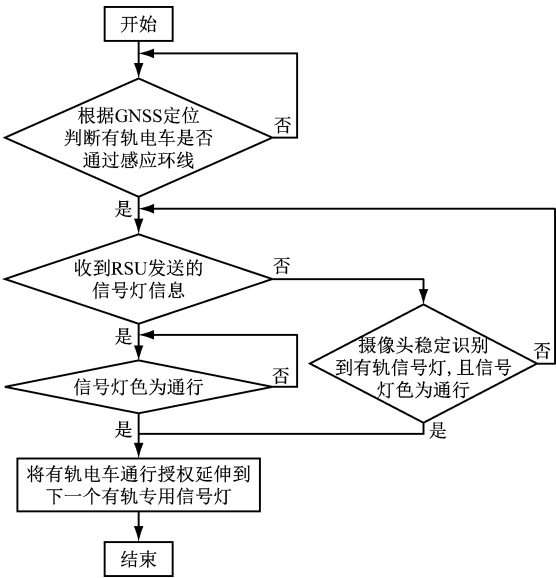
Fig. 7 Diagram of RSU roadside device interoperation

3.4 车地通信链路

本文所述系统中的车地通信采用 PC5 接口,通信距离不小于 300 m。RSU 实时传送路侧的信号冲突相位信息至 OBU,包含轮转相位、冲突相位、相位轮转时间等信息。

3.5 基于 V2X 技术的自动驾驶有轨电车通过策略

在常规有轨电车系统建设中,一般在进入路口前一段距离(约 200 m)的正线区段,布置用于路口优先的感应环线。当信号系统开启路口优先模式,有轨电车通过感应环线时,其专用信号灯会根据道路交通信号灯的相位情况切换和保持灯色。若不开启路口优先,则有轨电车专用信号灯跟随道路交通信号灯相位变换来切换灯色。当应用 V2X 技术优化通过方案时,有轨电车能够更早且稳定地获取路口信号灯的灯色。当有轨电车运行到 RSU 的通信覆盖范围内(以 RSU 为中心,半径为 500 m)时,车载设备即可接收到来自 RSU 包含的有轨电车专用信号灯灯色等信息的数据包。考虑到有轨电车自动驾驶系统同时具备自主信号感知和 V2X 特性,与之相应的开启和关闭 V2X 后的有轨电车路口通过策略分别如图 8 和图 9 所示。



注:GNSS 为全球导航卫星系统。

图 8 有轨电车路口通过策略(开启 V2X)

Fig. 8 Strategy of tram passing crossing (V2X enabled)

4 有轨电车在轨测试与结果分析

为验证所提出的路口通过方案的实际效果,上海富欣智能交通控制有限公司于 2020 年 12 月在淮

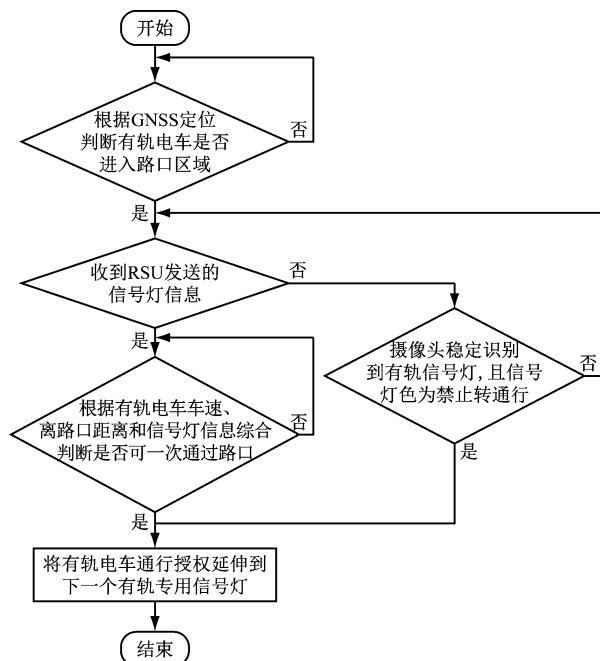


图 9 有轨电车路口通过策略(关闭 V2X)

Fig. 9 Strategy of tram passing crossing (V2X disabled)

安现代有轨电车经营有限公司和中车株洲电力机车有限公司等单位的支持下,基于江苏省交通厅科研课题《现代有轨电车自动驾驶技术研究》和淮安有轨电车 1 号线(以下简称“1 号线”)的车辆和线路条件,选取 1 辆试验用有轨电车部署自动驾驶系统和 V2X 车载设备,并在此基础上选取 1 号线正线的连续 3 个信号机防护路口,布设与信号机联动的 V2X 地面设备。有轨电车处于自动驾驶模式时,分别采用本文所述的基于自主信号感知和 V2X 技术的路口通过方案进行路口信号灯的检测测试。

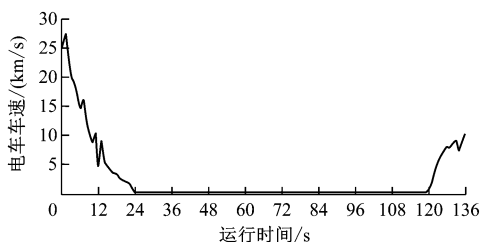
选取试验段中的 2 个路口(路口一(K9+400—K9+500),路口三(K9+900—K10+010))及其前、后方总长共计 100 m 的区域(路口二因距离第 1 个路口较近,受第 1 个路口通过情况的影响较大,不满足试验独立性要求,故未选取),对应的时间-速度关系如图 10。由图 10 可见:

1) 当仅使用自主信号感知作为路口通过判断条件时,有轨电车在两个路口都必须停车等待(速度为 0)。一方面是由于有轨电车无法从信号灯检测相机获取允许灯色的倒计时,为了避免误闯信号,无论路口是允许灯色还是禁止灯色,都必须先在路口前停车,等待下一次转为允许灯色时方可通过;另一方面,现有技术条件并不能保证 100% 检测出路口信号灯及其灯色(特别是夜晚等困难场景下),为安全起见亦会停车等绿灯开放后通过。上

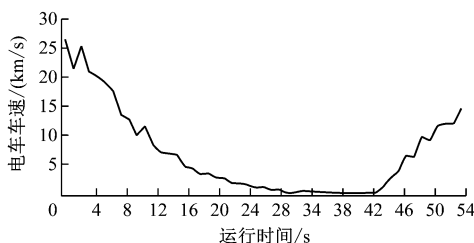
述两方面因素导致有轨电车通过路口的总时间大大拉长(最长可达到单次信号相位的两倍)。

2) 应用 V2X 技术进行信号机检测后,有轨电车可以根据路口允许信号的倒计时情况动态确定是否通过,以及通过的时速(需要同时满足路口限速条件),达到直接通过(如路口三)或显著缩短停车等待时间(如路口一)的效果。

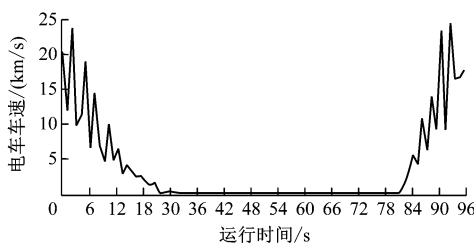
3) 与传统的驾驶员目视行车通过路口方式相比,基于自主信号感知的有轨电车路口通过方案可以改善驾驶员在路口的注意力强度。但因驾驶员无法获取路口信号的倒计时信息,从效率上而言改善空间不大。而基于 V2X 技术的有轨电车路口通过方案使列车能够直接获取路口信号的倒计时信



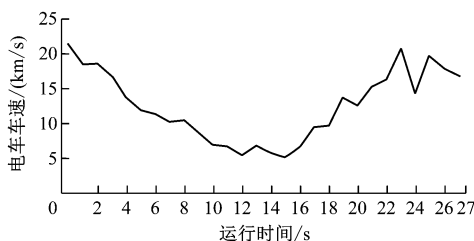
a) 路口一(未使用 V2X)



b) 路口一(使用 V2X)



c) 路口三(未使用 V2X)



d) 路口三(使用 V2X)

图 10 有轨电车在轨测试数据

Fig. 10 Test data of tram on rail

息,如能够与司控台人机界面等设备联动,即使不装备自动驾驶系统,也可以辅助驾驶员判断路口通过时机和车速,可提高路口行车效率,同时改善乘客的乘坐舒适感。

## 5 结语

本文在综合分析当前有轨电车驾驶员常规目视驾驶,以及基于自主信号感知的自动驾驶有轨电车路口通过方案的基础上,引入 V2X 技术,提出基于 V2X 技术的有轨电车路口通过方案,并在实际运行线路上进行了测试,以体现所提方案的有效性。测试结果表明,本文提出的基于 V2X 技术的自动驾驶有轨电车路口通过方案,能够显著缩短有轨电车在路口的等待时间(最长可缩短一半时间)或实现不停车一次性通过,从而提高了有轨电车的控制效率,改善了乘客的乘坐体验。

## 参考文献

- [1] 秦国栋,苗彦英,张素燕. 有轨电车的发展历程与思考[J]. 城市轨道交通, 2013(7): 6.  
QIN Guodong, MIAO Yanying, ZHANG Suyan. A review on streetcar development [J]. Urban Transport of China, 2013 (7): 6.
- [2] PALMER A W, SEMA A, MARTENS W, et al. The autonomous siemens tram[C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Rhodes: IEEE, 2020.
- [3] 张勇,王磊,杨峥岭,等. 基于多传感融合的有轨电车在途障碍物检测方法研究[J]. 现代城市轨道交通,2021(2): 22.  
ZHANG Yong, WANG Lei, YANG Zhengling, et al. A multi-sensor fusion based tram obstacle detection method[J]. Modern Ur-

ban Rail Transit, 2021(2):22.

- [4] 易晖,李国龙. 现代有轨电车信号优先系统及关键技术[J]. 交通与港航,2017(2): 59.  
YI Hui, LI Guolong. The modern tram signal priority system and key technology industry and countermeasures[J]. Communication & Shipping, 2017(2): 59.
- [5] 梁霄,李国龙,朱永辉,等. 有轨电车自动驾驶系统的设计与实践[C]//江苏省科学技术学会,江苏省综合交通运输学会. 第29届海峡两岸都市交通学术研讨会论文集. 南京:东南大学出版社,2021: 258.  
LIANG Xiao, LI Guolong, ZHU Yonghui, et al. Design and practice of autonomous driving system for tram [C] // Jiangsu CAST, Jiangsu Provincial Comprehensive Transportation Association. Proceedings of the 29 th Workshop of Urban Transportation for Cross-Strait. Nanjing: Southeast University Press, 2021: 258.
- [6] 谷明琴,蔡自兴,黄振威,等. 城市环境中箭头型交通信号灯的实时识别算法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013(4): 1403.  
GU Mingqin, CAI Zixing, HUANG Zhenwei, et al. Real-time arrow traffic light recognition in urban scenes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013(4):1403.
- [7] 全国智能运输系统标准化技术委员会. 智能运输系统 体系结构 服务: GB/T 20607—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 11.  
National Technical Committee on Intelligent Transport Systems of Standardization Administration of China. Intelligent transport systems—architecture—services; GB/T 20607—2006 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2006:11.
- [8] 刘宗巍,匡旭,赵福全. V2X 关键技术应用与发展综述[J]. 电讯技术,2019(1): 117.  
LIU Zongwei, KUANG Xu, ZHAO Fuquan. A survey on applications and development of V2X key technologies[J]. Telecommunication Engineering, 2019(1): 117.

(收稿日期:2021-11-16)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com