

城市有轨电车信号控制系统的设计*

齐志华^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 100081, 北京;

2. 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心, 100081, 北京//副研究员)

100081, Beijing, China

摘要 为了进一步提高城市有轨电车运行效率以及保障行车安全,以有轨电车信号控制系统为研究对象,结合故障-安全原则、冗余技术及分布式设计理念对该信号控制系统的架构和功能进行设计研究。分析了所划分的各功能子系统的架构及其功能模块,并给出了系统设计实现的主要特点。信号控制系统设计样机的测试验证结果表明,设计开发的有轨电车信号控制系统实现了各分布式子系统的功能及子系统间的协调控制,能够正确执行并高效控制道旁设备,保障和满足了有轨电车的行车安全与运营需要。

关键词 城市有轨电车; 信号控制系统; 结构设计; 功能子系统

中图分类号 U482.109

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.07.044

Research on the Design of Urban Tram Signal Control System

QI Zhihua

Abstract In order to further improve the operation efficiency and ensure the running safety of urban tram, the signal control system of urban tram is taken as the research object, and in combination with the fault-safety principle, redundancy technology and distributed design concept, the structure and function of the signal control system is designed. By analyzing the classified architecture and the function modules of each functional subsystem, the main features of the system are summarized. The test and verification of the control system design prototype shows that the urban tram signal control system designed and developed has realized the functions of each distributed subsystem and the coordinated control between the subsystems, therefore it can execute correctly and control efficiently the roadside equipment, meet the running safety and operation needs of urban tram.

Key words urban tram; signal control system; structure design; functional subsystem

Author's address Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd.,

信号控制系统对保障有轨电车安全运行^[1-4]和提高运输效率起到至关重要的作用。为缓解城市交通压力和充分发挥有轨电车社会价值,有必要以城市有轨电车信号控制系统为研究对象,针对其特有的城市道路使用方式和特点^[5-7],融合铁路、地铁、轻轨等信号系统开发积累的控制技术经验,对有轨电车信号控制系统及其子系统架构和功能进行分析设计。研究开发的成果能有效地适应城市的各种道路交通状况,提高城市道路交通的运输水平,并满足新时期城市交通运输发展对有轨电车信号控制系统提出的需求。

1 有轨电车信号控制系统结构组成

有轨电车信号控制系统采用分布控制方式,从层次上可分为控制中心设备层、专用网络通信层、轨旁设备层、道旁设备层及车载设备层^[8]。从系统功能上包括中心综合调度管理子系统、路径管理服务子系统、轨旁道岔控制子系统、轨旁平交路口控制子系统、车辆段/停车场控制子系统和车载控制子系统^[9]。系统基本结构如图1所示。

现根据图1给出的系统结构,分别从划分的各层次阐述子系统设计。

1.1 中心综合调度管理子系统设计

中心综合调度管理子系统是有轨电车信号控制系统的指挥中心^[10]。主要负责有轨电车时刻表编制和管理,显示运行线路、识别跟踪列车并实时显示车次号,下达有轨电车进路操作命令并记录操作数据,模拟演示及培训操作,以及与其他系统进行信息交互等。中心综合调度管理子系统的基本结构如图2所示。

* 国家自然科学基金项目(U1734211;U1534208)

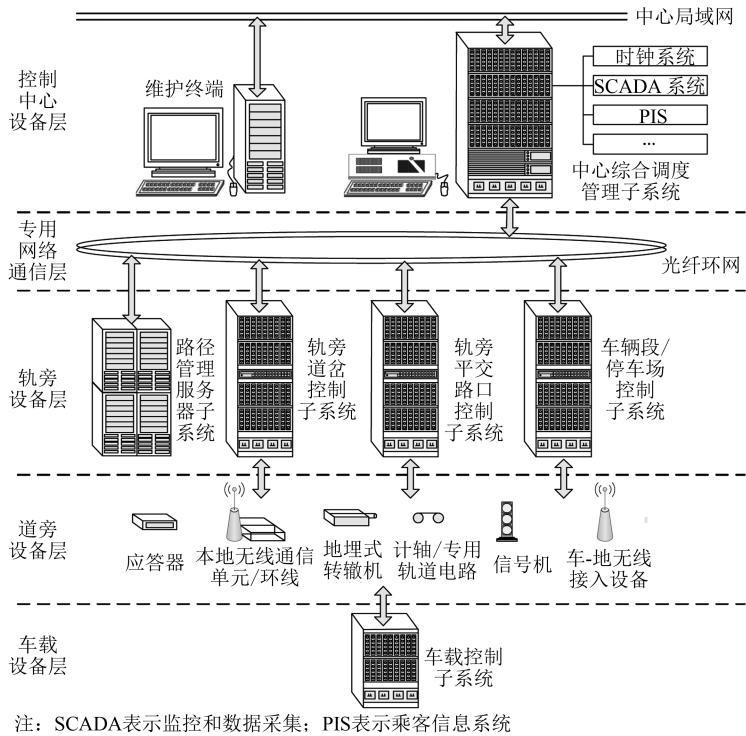


图 1 有轨电车信号控制系统结构图

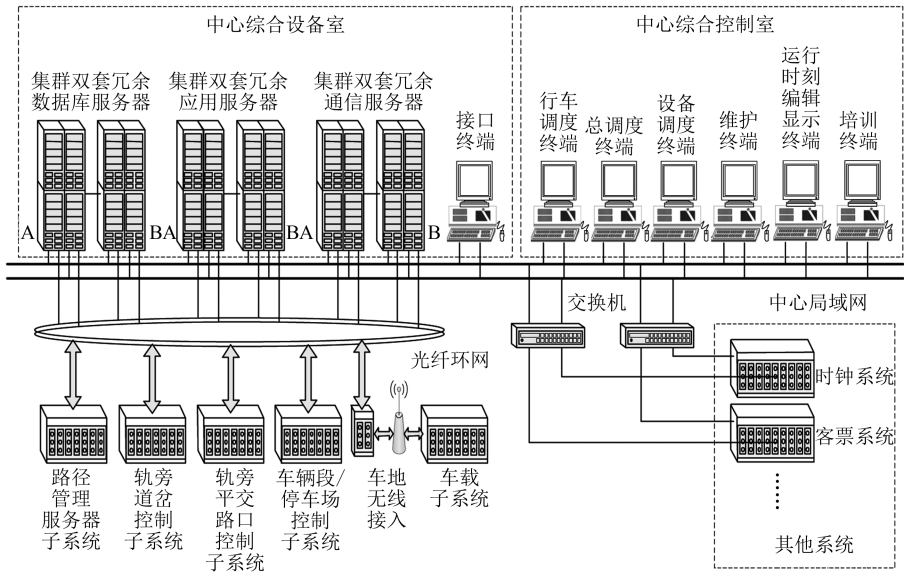


图 2 中心综合调度管理子系统结构图

根据图 2 所示的结构图,中心综合调度管理子系统设备分布在中心综合设备室和中心综合控制室。

1) 中心综合设备室主要用于集中布置运营调度数据库服务器、应用业务服务器、通信服务器、网络数据交换传输设备。各功能服务器采用双机热备冗余结构,以集群方式^[11]工作,当 1 台服务器或

其中的 1 个应用分区出现硬件、软件及受控应用故障,可被集群系统自动探索,并自动地将此主机或其中的一个应用分区上的应用切换至集群内的备机上,以保证服务器运行的连续性。此外,设备室还布置有维护终端、接口终端等设备,用于查看该子系统的运行和内外部接口状态情况。

2) 中心综合控制室主要用于集中布置运营行

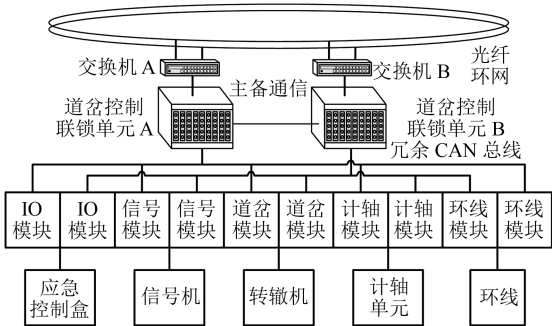
车调度终端、总调度终端、设备调度终端、维护终端、时刻表编辑显示终端、培训终端。各功能终端按照调度管理职责完成有轨电车的行车调度指挥、命令下达、编制并显示时刻表等工作。

1.2 路径管理服务器子系统设计

路径管理服务器子系统由双套冗余的高可靠性工业级服务器构成,主要用于辅助中心综合调度管理子系统进行调度管理与有轨电车运行规划。该子系统主要负责接收中心综合调度管理子系统下达的定义线路号的运行路径并进行规划与管理,将路径规划分解并下达到对应的轨旁道岔控制子系统,由该轨旁道岔控制子系统根据定义的线路号确定对应的路径方向并自行确定有轨电车的运行进路。

1.3 轨旁道岔控制子系统设计

轨旁道岔控制子系统是确保有轨电车行车安全和运营效率最为关键的子系统。该子系统主要负责检测有轨电车的接近,结合接收到的接近电车的线路号和通过环线判别的电车接近方向,为接近的有轨电车自动办理进路;接收车载控制子系统的进路遥控命令;满足人工现场手动控制道岔;接收路径管理服务器子系统的进路规划;控制有轨电车进路的信号开放、道岔防护、进路锁闭和解锁等;向接近的有轨电车发送对应路径的信号显示状态;向中心综合调度管理子系统上传道岔、信号机、轨道区段及进路的状态;满足设备自检及故障检测功能并实时向中心综合调度管理子系统上传状态信息。该子系统的基本结构如图 3 所示。



注: IO 表示输入输出; CAN 表示控制器局域网

图 3 轨旁道岔控制子系统结构图

根据图 3 所示的结构图,轨旁道岔控制子系统包括道岔控制联锁单元、IO 模块、信号模块、道岔模块、计轴模块、环线模块。

1) 道岔控制联锁单元是轨旁道岔控制子系统

的核心单元。通过该单元可实现包括进路排列、进路锁闭控制、进路解锁控制在内的核心逻辑处理^[12]。采用二乘二取二结构,每一系道岔控制联锁单元有主从两个独立的 CPU(中央处理器)构成,两个 CPU 独立进行逻辑运算,校核一致后对外输出。主备道岔控制联锁单元通过交换机分别连接到光纤环网实现与其他子系统通信,且各通过一路 CAN 总线连接到 IO 模块、信号模块、道岔模块、计轴模块、环线模块,以及通过单元间以太网交互运算信息。

2) IO 模块、信号模块、道岔模块、计轴模块按照故障-安全^[12]的原则进行设计。每类单模块采用二取二结构^[13],分别通过 CAN 总线受控于主备道岔控制联锁单元。双模块间采用背板总线进行信息交互实现双模块的二乘二取二结构^[14]。双模块对同一轨旁设备进行信息计算比对,完成驱动命令下达和状态信息采集工作,模块中任何故障不会导致模块错误输出或上传错误信息。IO 模块、计轴模块用于将采集的应急控制盒操作信息、计轴信息传递给道岔控制联锁单元进行逻辑运算;信号模块、道岔模块用于接收道岔控制联锁单元控制命令并输出至控制信号机、道岔,同时采集信号机、道岔状态并传递给道岔控制联锁单元进行逻辑运算。

3) 环线模块采用二取二结构进行设计。双模块间采用背板总线进行信息交互实现双模块的二乘二取二冗余模式。该模块主要通过敷设于线路的环线接收车载系统的控制命令,并将进路状态、现场设备状态等信息传递给车载系统。线路上的环线主要用于轨旁道岔控制子系统、轨旁平交路口控制子系统与车载控制子系统之间的信息传输。

4) 应急控制盒为行车轨旁应急使用设备。当车地通信环线发生故障时,有轨电车驾驶员在信号机前停车,下车操作应急控制盒完成应急排列进路。应急控制盒悬挂于信号机机柱并具备防雨功能,且满足 IP55 防护等级,每个路口方向放置一个。应急控制盒通过专用钥匙打开,内设自复按钮。当按钮成功按下时,IO 模块采集到该信息后点亮相应指示灯,并将此信息传递给道岔控制联锁单元。

1.4 轨旁平交路口控制子系统设计

轨旁平交路口控制子系统是配合轨旁道岔控制子系统用以保障有轨电车行车安全、提高行车效率、降低行车延误的重要子系统^[15]。该子系统主要负责根据有轨电车接近信息接受接近电车的通过

请求;结合有轨电车接近信息及采集路口交通信号灯状态向城市公路信号灯控制系统发送电车优先通过请求;检测路口占用情况,向城市公路信号灯控制系统发送禁止通行命令;控制有轨电车路口专用信号机显示,向有轨电车发送路口专用信号机的允许/禁止通行状态。该子系统的基本结构如图 4 所示。

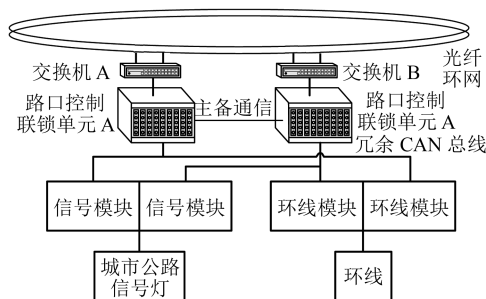


图4 轨旁平交路口控制子系统结构图

根据图 4 所示的结构图,轨旁平交路口控制子系统包括路口控制联锁单元、信号模块和环线模块。

1) 路口控制联锁单元是轨旁平交路口控制子系统的核心单元。通过该单元可实现包括接受电车接近请求、路权协商等在内的核心逻辑处理。该单元采用二乘二取二结构,每一系路口控制联锁单元有主从两个独立的 CPU 构成,两个 CPU 独立进行逻辑运算,校核一致后对外输出。主备路口控制联锁单元通过交换机分别连接到光纤环网实现与其他子系统通信,且各通过一路 CAN 总线连接到信号模块、环线模块,以及通过单元间以太网交互运算信息。

2) 轨旁平交路口控制子系统的信号模块同样按照故障-安全的原则进行设计。单模块采用二取二结构,分别通过 CAN 总线受控于主备路口控制联锁单元。双模块间采用背板总线进行信息交互以实现双模块的二乘二取二结构。双模块同时接收平交路口控制联锁单元的控制命令,进行信息校核并形成统一的命令,输出至与城市公路交通信号控制系统结合的继电器组合来控制城市公路信号灯,同时采集城市公路信号灯状态,并通过冗余 CAN 总线传递给路口控制联锁单元进行逻辑运算。

3) 轨旁平交路口控制子系统的环线模块设计与轨旁道岔控制子系统的环线模块设计一致。

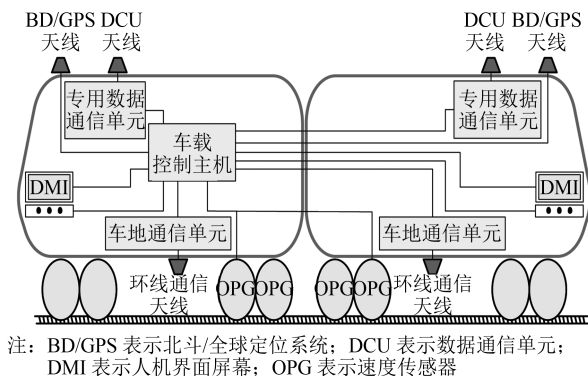
1.5 车辆段/停车场控制子系统设计

城市有轨电车车辆段/停车场主要用于电车车辆的出库运行和入库停放、整编、检修及清洁等。

因此车辆段/停车场采用目前在铁路、地铁中广泛应用的主流二乘二取二架构的计算机联锁系统作为车辆段/停车场控制子系统,主要负责完成车辆段/停车场内信号机、道岔、进路的控制。

1.6 车载控制子系统设计

车载控制子系统是控制有轨电车行驶的核心子系统。该子系统主要负责获取电车速度值和位置信息并将数据发送给中心综合调度管理子系统;接收电车驾驶员输入的命令信息;通过敷设于线路的环线接收中心综合调度管理子系统下达的运营计划及进路信息,与轨旁道岔控制、平交路口控制子系统信息进行信息交互,完成进路自动控制;具备人工模式轨旁道岔遥控控制和路口优先模式设置功能;能显示电车运行线路状态、线路号、当前位置、到站、路口等信息;显示并记录系统运行日志、报警信息等。该子系统的基本结构如图 5 所示。



注: BD/GPS 表示北斗/全球定位系统; DCU 表示数据通信单元; DMI 表示人机界面屏幕; OPG 表示速度传感器

图5 车载控制子系统结构图

根据图 5 所示的结构图,车载控制子系统采用单端主机配置方式,在电车两端驾驶室设置 DMI 及辅助设备,彼此通过贯通通信网络连接进行信息交互。该子系统包括车载控制主机、车地通信单元及环线通信天线、DCU 及天线、OPG、DMI、BD/GPS 天线等设备。

车载控制主机包括主控/运营调度逻辑处理模块、OPG 模块、BD/GPS 模块、DCU 接口、车地通信单元接口、DMI 接口等。其中,主控/运营调度逻辑处理模块采用二乘二取二结构,其他模块采用双套冗余结构。主控/运营调度逻辑处理模块主要用于车载控制逻辑运算以及与其他子系统进行信息交互处理;OPG 模块和 BD/GPS 模块主要用于有轨电车的速度值和位置信息的运算处理^[16];DCU 接口主要用于连接车载控制主机与 DCU 单元,并将获取的电车速度值和位置信息发送给中心综合调度管

理子系统;车地通信单元接口主要用于连接车载控制主机与车地通信单元,并传输线路计划、进路控制、进路号等信息;DMI 接口主要用于连接屏幕并输出进路、设备等内容信息。

2 有轨电车信号控制系统设计分析

通过城市有轨电车信号控制系统的设计研究,可以分析得到系统的主要特点。

1) 在系统优势方面,借鉴成熟的铁路、城市轨道交通信号控制系统设计理念,通过分层次的系统架构和分布式的控制方式,使得系统能够适应城市多种公路交通网络环境,通过集成化、自动化的系统功能操作,使得系统能够有效提高交通运输效率 and 经济效益。此外,模块化且紧凑简单的系统结构设计,还使得系统具备成本低、经济性好、道旁设备支持在线更换且平均故障修复时间 $\leq 30\text{ min}$ 的易升级维护优势。

2) 在关键技术方面,依据故障-安全设计原则,采用二乘二取二结构设计并通过多重比对校核运算处理,使得系统能够更准确有效地输出控制命令。此外,广泛地采用了冗余技术,从中心局域网、光纤环网、联锁单元到道旁设备控制模块等均融入了冗余设计,任何单点故障不影响系统正常运行,使得系统具备高可靠性、可用性和安全性^[17],能够有效保障有轨电车运行安全。

3) 在系统设计创新方面,设计开发的路径管理服务器子系统能够将中心综合调度管理子系统下达的电车运行计划和路径规划根据道路交通情况进行有效分解,并发送至对应的轨旁道岔控制子系统,有效地降低了轨旁道岔控制子系统的任务负担,提高了系统运行效率。此外,系统的道旁设备控制模块化^[18]设计为系统扩容、升级提供了可扩展空间。

3 有轨电车信号控制系统设计验证

根据对城市有轨电车信号控制系统设计的研究,研制了该系统的样机。系统样机的 EMC(电磁兼容)测试结果^[19]表明:系统的静电放电、射频电磁场辐射、浪涌及脉冲磁场等性能指标满足设计要求,完全具备实际应用条件。

此外,对样机进行了系统设计功能验证。由于有轨电车车辆段/停车场采用主流二乘二取二架构的计算机联锁系统,其成熟的联锁控制关系能够保

证车辆段/停车场的系统正确运行。这里仅需验证有轨电车在正线运行时的系统控制功能情况。

对有轨电车在正线的运行情况进行了验证。验证采用中心自动排路、中心人工手动排路、车载遥控排路 3 种方式,覆盖了各子系统的设计功能。3 种方式验证中各子系统的信息传递如图 6 所示。

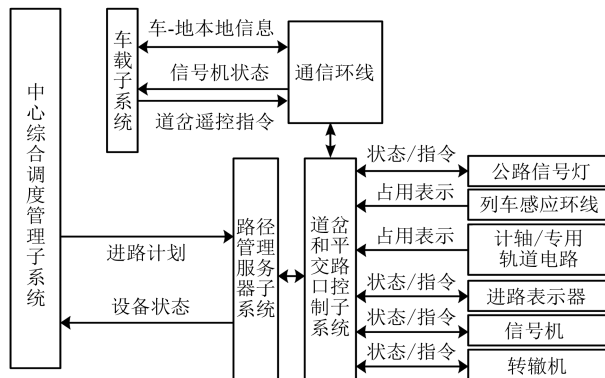


图6 各子系统信息传递图

3 种方式的系统设计功能验证结果^[19]表明:设计开发的有轨电车信号控制系统能够实现各子系统间功能协调一致,能够正确执行并控制道旁转辙机、信号机动作,能够实现有轨电车运行的进路锁闭和解锁操作,能够保障有轨电车安全运行,已达到系统的设计目的。

4 结语

城市有轨电车信号控制系统的研究设计,借鉴了我国铁路、地铁等信号系统的冗余、故障-安全等相关技术,实现了信号控制系统的各种功能,达到了预期的目的和效果,能够保障和满足有轨电车的运行安全与运营需要。在新时期我国大力推进绿色发展和建设交通强国的战略部署下,本研究设计的城市有轨电车信号控制系统能够更加灵活地适应城市各种交通状况,提高城市道路交通运输水平,推动城市经济建设和发展,具有良好的经济性和应用前景。

参考文献

- [1] 王兴举,范胜楠,周杨,等.京津冀轨道交通一体化发展对策[J].铁道运输与经济,2016(11): 83.
- [2] 郑伟.现代有轨电车信号系统方案与关键技术研究[J].铁道通信信号,2016(3): 78.
- [3] 巫伟军.有轨电车系统特点及应用前景研究[J].铁道标准设计,2007(8): 122.

(下转第 206 页)

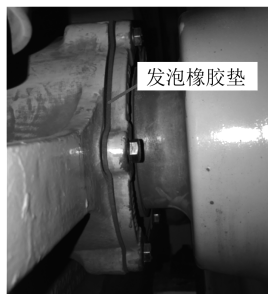


图5 发泡橡胶垫安装效果图

1.2 定位销强度分析

轴承密封罩上的定位销尺寸为 $10\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的长方体,原结构采用 3 条焊缝的焊接结构(见图 6),经测试,该焊接方案的定位销能够承受最大 6.7 kN 作用力。为了加强定位块强度,将 3 条焊缝改为 4 条焊缝并进行 Tig(非熔化极惰性气体保护电弧焊)重熔焊接。对 15 个 4 条边焊缝的定位销进行强度测试。结果表明,改进后的定位块能承受 17.7 kN 作用力,改进焊接方式的定位销强度比原方案定位销强度增加近 3 倍。

2 车辆轴承定位销断裂问题解决措施

根据分析可以确定:由于轴承外圈施加的轴向夹紧力不足而使轴承外圈与轴箱之间发生了转动,这是导致轴承定位销断裂的主要原因;定位销焊接

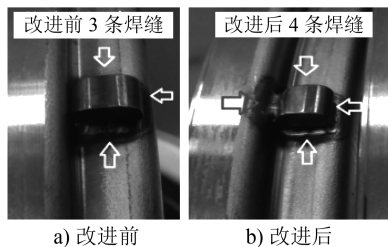


图6 定位销焊接方式改进前后方案

强度不足是导致轴承定位销断裂的另一因素。根据试验结果的对比分析可知:将轴箱后盖密封垫材质由丁腈橡胶改为泡沫橡胶能够从根本上解决轴承外圈轴向夹紧力不足的问题;优化定位销焊接质量能够进一步提高定位销强度,从而能够防止轴承外圈相对于轴箱发生转动。改进后的方案经过装车验证及批量整改后,未再发生一起定位销断裂事故。因此采用本文提出的改进方案可解决车辆轴承定位销断裂问题。

参考文献

- [1] 严隽堯.车辆工程[M].3版.北京:中国铁道出版社,2007.
- [2] 濮良贵,纪名刚.机械设计[M].7版.北京:高等教育出版社,2001.
- [3] 梁云,夏春晶.高速客车转向架轴箱轴承选型设计[J].铁道机车与动车,2015(7):2.

(收稿日期:2019-01-13)

(上接第 203 页)

- [4] 韩志彬,李芾,黄运华.我国有轨电车的发展现状与应用前景[J].机电转动,2018(2):7.
- [5] 钱广民,温兆鹏.现代有轨电车系统发展展望与思考[J].现代城市轨道交通,2016(5):74.
- [6] 刘新平.新型有轨电车信号系统方案研究[J].城市轨道交通研究,2012(5):50.
- [7] 张海军.对我国现代有轨电车发展应用的思考[J].城市轨道交通研究,2015(7):119.
- [8] 肖宝弟,王珩,徐意,等.现代有轨电车信号系统方案与自主化策略研究[J].现代城市轨道交通,2014(2):1.
- [9] 中国铁道科学研究院通信信号研究所.城市有轨电车信号控制系统研究报告[R].北京:中国铁道科学研究院通信信号研究所,2016:2.
- [10] 唐世军,张雪松,白雪.有轨电车综合调度系统建设方案研究[J].铁路计算机应用,2016(1):55.
- [11] 吴汶麒.城市轨道交通信号与通信系统[M].北京:中国铁道出版社,1998:30.
- [12] 中国铁路总公司.计算机联锁系统[M].北京:中国铁道出版

社,2015:5.

- [13] 王成志,张锐.基于“二取二”结构的有轨电车正线道岔控制模块的研究[J].铁路计算机应用,2017(9):54.
- [14] 赵晓春,陈光武.现代有轨电车正线道岔控制系统的研究[J].城市轨道交通研究,2017(3):100.
- [15] 代磊磊,何广进,刘东波,等.基于信息实时交互的现代有轨电车信号优先控制研究[J].城市轨道交通研究,2018(1):87.
- [16] 孙永梅,王富章.基于 GPS/DR 的现代有轨电车定位方法研究[J].铁道标准设计,2016(9):137.
- [17] 薛洪峰.现代有轨电车信号控制关键技术研究[D].北京:北京交通大学,2013:15.
- [18] 张志恒,李丽兰.现代有轨电车全电子道岔模块设计[J].电子技术与软件工程,2014(4):142.
- [19] 中国铁道科学研究院通信信号研究所.城市有轨电车信号控制系统测试报告[R].北京:中国铁道科学研究院通信信号研究所,2016:15.

(收稿日期:2018-08-20)