

基于近距离通信的站台门控制新方案*

范楷^{1,2} 冯浩楠^{1,2} 段宏伟^{1,2} 王俊高^{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 // 第一作者, 助理研究员)

摘要 首先分析了基于通信的列车控制系统中现行车门与站台门联动方案存在的主要问题;其次,通过对所发现问题的分析,提出了基于近距离通信的全新解决方案;进而,结合联动运营场景和现场应用环境以及各种近距离通信技术的特性,对新方案的关键技术进行了选择,并完成了新方案装置的初步设计。通过理论分析得出,新方案不仅解决了现行方案中存在的所有问题,还在可靠性及实时性方面相比现行方案有较大的改善。最后,使用 CPN-Tools 工具,对新方案系统进行数学建模及状态空间分析。分析报告的结论验证了新方案系统的正确性。

关键词 车门站台门联动;基于通信的列车控制;射频识别技术;CPN 建模

中图分类号 U231.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.041

New Control Scheme of Platform Screen Door Based on Short-range Communication

FAN Kai, FENG Haonan, DUAN Hongwei, WANG Jungao

Abstract Firstly, the main problems existing in current train door and platform screen door linkage based on CBTC (communication based train control) system are analyzed. Secondly, through an analysis of above-mentioned problems, an innovative solution based on close-range communication is proposed. Thirdly, combined with the linkage operation scenario, the field application environment and characters of various close-range communication technologies, a key technology for the new scheme is selected and the preliminary design of which is completed. The theoretical analysis shows that the new scheme can not only solve all the problems existing in current schemes, but also improve greatly the reliability and real-time performance. Finally, mathematical modeling and state space analysis of the new scheme system are carried out by using the CPN (coloured petri nets) tools. The conclusions of the analysis has verified the correctness of the new scheme.

Key words train-platform door linkage; CBTC; radio frequency identification (RFID); CPN modeling

First-author's address Institute of Communication Signals, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., 100081, Beijing, China

目前,在城市轨道交通 CBTC(基于通信的列车控制)系统中,车门与站台门联动控制普遍依赖 VOBC(车载控制器)子系统与 CI(联锁)子系统在站台的无线通信,采用由 VOBC 向 CI 下达开/关门命令,并由 CI 负责执行的方案^[1-2]。经过实践,该方案(以下称为“现行方案”)有以下弊端和技术难题:

1) 信息传输通道过长,涉及的设备数量过多。其中任何一个设备出现故障都会使整个站台站台门无法正常联动,其故障影响范围极大^[3],故现行方案可靠性较差。

2) 信息传输借助 DCS(数据通信系统)进行。受外界干扰、网络时延、丢包率及吞吐量等网络性能的影响,在实际使用中有时会产生一定的通信延时,故现行方案实时性不佳。

3) 当前城市轨道交通信号系统正向 FAO(全自动运行)的方向发展,对车门与站台门的联动控制提出了对位隔离的新需求。对位隔离要求,当某一车门或站台门发生故障无法工作时,其对应的车门或站台门不应再在其他车门与站台门联动时开启。在现行方案的基础上,如果要实现这一新需求,则需增加大量新设备,势必进一步增加 CBTC 系统的复杂性、耦合性。

4) 在现行方案下,如线路增配列车,需要为 CI 同步增配相应的通信设施,不可避免地需对全线 CI 升级改造。而每次 CI 的改造都要经历室内测试、现场测试、现场预升级、现场正式升级及补充安全认证等一系列流程。其耗时长,投资高,耗费巨大的

* 中国铁道科学研究院青年项目(2019YJ079);中国铁道科学研究院通信信号研究所青年计划项目(2018HT05)

人力、物力。

为了解决现行方案的弊端及技术难题,本文提出一种基于近距离通信技术的车门与站台门控制新方案。

1 新方案的技术要求与设计思路

针对车门与站台门联动控制现行方案的弊端和技术难题,新方案需要满足以下技术要求:

- 1) 新方案应改变信息传输通道且尽量缩短通信信道长度,以增强系统可靠性及实时性;
- 2) 新方案应能满足车门与站台门的对位直接控制;
- 3) 新方案应能满足车门与站台门的对位隔离功能。

新方案的思路为,若能在每一组车门-站台门之间都设置一套相互独立的装置,从而建立一条独立的近距离通信信道,就可以依靠该通道来实现每一组车门-站台门之间的单独信息交互,进而实时可靠地完成车门与站台门的对位直接控制,完成联动开启及联动关闭。该思路从理论上满足了技术要求。

2 新方案关键技术及其装置初步设计

2.1 关键技术

新方案的关键技术是合适的近距离通信技术。近距离通信技术方式多种多样,其中较为成熟的有蓝牙、Wi-Fi(无线相容认证)、红外线应答、可见光通信、RFID(射频识别)、NFC(近场通信)、微功率无线数传及交叉感应环线等技术。

城市轨道交通的应用环境及工作场景对近距离通信装置提出了以下要求:

- 1) 装置应能工作在强电磁干扰环境中。
- 2) 装置应能工作在多尘、高低温、多振动的环境中。
- 3) 要求通信建立速度快、延时低,以满足二门联动的实时性要求。
- 4) 要求硬件易实现、易维修、易更换,以保障其可靠性。
- 5) 为防止设备间的通信串扰,需将近距离通信的通信范围限制为 50 ~ 100 cm。

蓝牙、Wi-Fi、ZigBee(紫蜂)、无线 USB(通用串行总线)等技术的工作频率均为 2.4 GHz(2.4 ~ 2.483 GHz)的 ISM(工业、科学、医疗专用)频段,所以在传输数据时极易受到外部大功率干扰源的

电磁干扰^[4],不适宜工作在强电磁干扰环境当中。红外线应答器及可见光通信设备容易受到灰尘、异物等环境影响,大面积应用时的清理及维护工作量巨大^[5]。交叉感应环线装置体积过大且传输速率较低。微功率无线数传技术的典型工作频率(433 MHz)较高,不容易将通信距离限制在 50 ~ 100 cm。NFC 不大于 0.1 m 的通信距离,使其在列车停站误差较大时无法正常建立通信。可见这些技术都不合适。

经过研究发现,基于 RFID 的双向射频通信技术可以满足新方案近距离通信所提出的各种要求。而且,从应用环境等方面考虑,基于 ISO/IEC 15693 标准的 RFID 系统最能满足设计需求。故本文后续的设计将遵循该标准进行^[6]。

RFID 技术是一种基于电磁感应原理的近距离通信技术,其优点众多,目前在众多领域均得到了极为广泛的应用。在高速铁路及城市轨道交通信号系统中,发挥至关重要作用的应答器子系统就是 RFID 技术在轨道交通领域的典型应用。

与其他技术相比,基于 ISO/IEC 15693 标准的 RFID 双向射频通信技术具有以下优势:

- 1) 采用自身独有的工作频率(13.56 MHz)进行数据传输,可有效避免与现有的应答器等子系统相互干扰,抗干扰能力强。
- 2) 不受灰尘、高低温、震动、异物等环境影响,无需特殊维护。系统鲁棒性、可靠性较高。
- 3) 建立通信速度快、传输速率高、可双工工作,有效满足系统的实时性要求。
- 4) 具有定义完整的通信协议和数据编码校验机制,有效防止受到干扰时的误开门风险,保障系统安全性。
- 5) 通信距离在 1 m 以内,该距离适用于轨道交通车辆与站台设备间的车地通信,而又不会使两组车门-站台门之间发生串扰。

基于以上各条,新方案最终选择了基于 RFID 的双向射频通信技术作为近距离通信的技术实现手段^[7]。

2.2 站台门控制装置初步设计

2.2.1 装置的结构组成

1 节车厢的 4 组车门-站台门采用了 4 套独立的站台门控制装置。单车厢基于近距离通信的站台门控制装置结构如图 1 所示。

由图 1 可见,基于近距离通信的站台门控制装

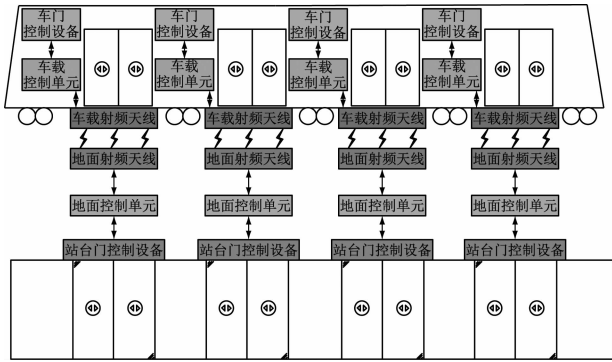


图1 基于近距离通信的站台门控制装置结构图

置可分为地面部分及车载部分。

地面部分包括地面射频天线与地面控制单元。地面射频天线与地面控制单元相连接,在其安装位置建立交变电磁场,通过电磁感应完成数据的收发。

地面射频天线的形状须适合轨道梁结构,便于安装部署和日常维护。

地面控制单元,一方面生成包括数据信息的通信报文,并进行调制、编码、放大后通过地面射频天线向外发送;另一方面接收地面射频天线接收到的车载射频天线产生的电磁场信号,解调后转换为报文数据帧,并与站台门进行电气接口从而对站台门下发相应控制命令。

车载部分包括车载射频天线与车载控制单元。车载射频天线,与地面射频天线类似,也应具有数据收发能力。车载射频天线的形状及支架须适于车辆底部的安装和日常维护。车载控制单元,与地面控制单元类似,车载控制单元也需具备通信报文的调制解调能力,并将之借由车载射频天线进行收发。还需具备与车辆门控制设备的接口,利用该接口,一方面,将车门开/关门电信号转化为站台门开/关门命令数据帧,另一方面,在收到站台门故障状态信息后切断车门开门使能,使车门不在站台门故障时错误开启。

2.2.2 关键设计节点

地面及车载射频天线的设计主要是对结构尺寸的设计,需对磁感应强度、品质因数及带宽等参数综合考量。根据文献[8],本文采用一个由2 cm直径铜管制作的长20 cm、宽20 cm的方形天线,并胶注于天线盒内。该天线可使13.56 MHz工作频率的RFID设备满足50~100 cm的通信距离要求[5]。

每一个车载及地面控制单元都应具备独立生成通信报文的能力。为了使车载及地面控制单元

尽可能简单可靠,拟采用单片机为主要实现手段。

控制单元的控制部分选用功能相对强大、全面的ATmega2560 MCU芯片为核心进行设计,能完成通信报文的生成及逻辑处理,以及站台门的控制等功能。

控制单元的射频收发部分选用飞利浦公司的CLRC632为主芯片进行构建。该芯片支持13.56 MHz频段内ISO/IEC 14443和ISO/IEC 15693两种标准,能够识别出符合这两种标准的设备,且支持多种数字访问接口模式,非常适合于搭建射频收发模块。

地面部分及车载部分的模块架构图如图2及图3所示。

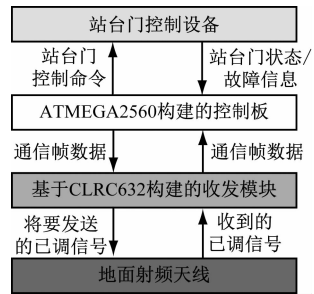


图2 地面部分架构图

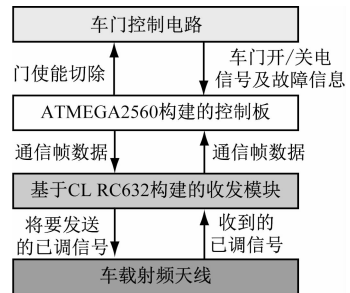


图3 车载部分架构图

新方案的站台门正常联动过程如图4所示。

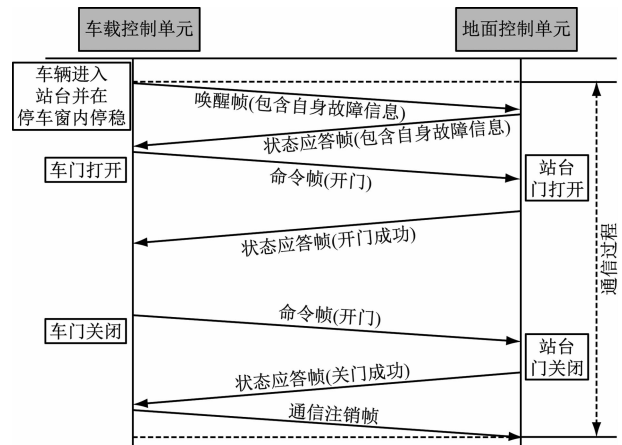


图4 车门与站台门联动过程示意图

从图 4 可以看出,整个通信过程中使用了 4 类通信帧:① 唤醒帧,由车载部分发送给地面部分,用于地面部分的唤醒,开启联动过程;② 状态应答帧,由地面部分发送给车载部分,用于告知站台门状态;③ 命令帧,由车载部分发送给地面部分,用于开关门命令;④ 注销帧,由车载部分发送给地面部分,用于结束通信过程。

IEC 15693 标准中定义的通信协议并不复杂,采用请求及响应的方式完成信息交互,其通信数据量较小,约为 4 ~ 17 B。通用请求格式和通用响应格式的帧结构如表 1 及表 2 所示。

表 1 通用请求格式的帧结构

SOF	标志	命令编码	参数	数据	CRC	EOF
8 bit	8 bit	8 bit	8 bit	64 bit	16 bit	8 bit

表 2 通用响应格式的帧结构

SOF	标志	参数	数据	CRC	EOF
8 bit	8 bit	8 bit	64 bit	16 bit	8 bit

3 新方案理论分析

3.1 技术问题的解决

新方案可以解决一些列现行方案的技术难题。

1) 新方案减除了 CI 原来的站台门控制功能,释放了 CI 的硬件运算资源及通信资源,大幅减少了 CI 内部通信参数的配置数量、通信数据的记录量及系统维护的工作量。

2) 新方案中,当设备发生故障时,由于各套控制装置独立,仅故障组的车门与站台门无法联动,不影响其他组的正常工作,可使故障影响范围降至最小。

3) 在新方案联动流程开始时的唤醒-应答环节中,车门与站台门需向对方告知自身的故障状态。因此一旦一方处于故障状态,则可立即结束联动流程。所以,新方案可以满足 FAO 系统对车门与站台门对位隔离的新需求。

3.2 可靠性及实时性理论分析

新方案在可靠性及实时性方面均较现行方案有一定改善。

3.2.1 可靠性分析

现行方案与新方案的开门命令信息通道图如图 5 及图 6 所示。

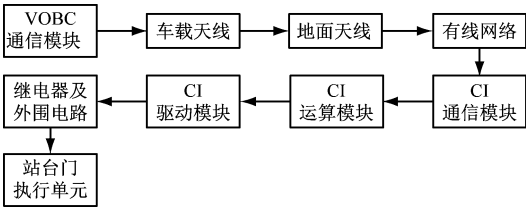


图 5 现行方案开门命令信息通道图

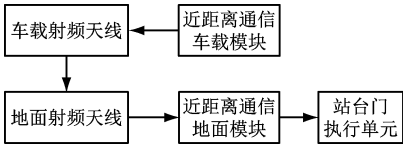


图 6 新方案开门命令信息通道图

当且仅当通信通道内所有的设备都能正常工作时,站台门联动系统才能正常工作。信息传输通道显然属于串联系统,其可靠性根据串联系统可靠性计算公式,有:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \tag{1}$$

式中:

$R_i(t)$ —— t 时第 i 台设备的可靠性, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

由图 5 及图 6 可见:① 现行方案信息传输通道过长,其设备传递环节多达 9 个,而新方案信息通道相对环节少得多;② 新方案的近距离通信车载模块及近距离通信地面模块均由成熟的 MCU 芯片及工业级元器件设计制作,且结构并不复杂,故各环节的可靠性指标不低于现行方案。

综合来看可靠性,新方案好于现行方案。

3.2.2 实时性分析

根据文献[9],车地无线通信容易受到智能手机热点等设备的同频段(2 422 MHz)信号干扰,引起数据包延时传输或数据堵塞。根据文献[10],目前的 DCS 中,随机延时和数据包丢失现象都是客观存在且时有发生^[10]。这是车门与站台门无法联动故障频发的通信方面原因,反映了现行联动方案在实时性方面存在的问题。

新方案基于 RFID 技术进行近距离信息交互,能在最大程度上缩短了通信信道;并且 ISO/IEC 15693 标准定义的通信速率为 26.69 kbit/s(上行)和 26.48 kbit/s(下行),而帧长度仅为 4 ~ 17 B(32 ~ 136 bit),足以保证通信的实时性。可见,新方案能充分满足列车进站触发站台门快速动作的实时性要求。

4 仿真及验证

本文对车门与站台门联动控制系统新方案采用 CPN (有色 Petri 网) 技术建立仿真模型, 进行验证。

4.1 时间有色 Petri 网及 CPN-Tools 软件

经典 Petri 网适合描述工作流程, 其由库所、变迁、有向弧级令牌等 4 种元素组成。Petri 网既可用图形化的方式描述系统的静态状态, 也可通过令牌的变化描述系统的动态。

在经典 Petri 网的基础上已发展了多种高级 Petri 网。其中, TCPN (时间有色 Petri 网) 是包含时间因素的 Petri 网, 可对系统在时间层次方面的性能进行分析。

基于 CPN 的 CPN-Tools 仿真软件, 使用标准元语言 (SML) 对模型进行定义和描述, 能使 CPN 更实用。CPN-Tools 提供的状态空间分析工具, 能有效分析系统状态迁移过程, 主要用于模型验证, 可分析模型中是否存在死锁及不可激活变迁 (即“死变迁”) 等情况, 分析模型的有界性、可达性和活性等连通性能, 进而验证模型的正确性和有效性, 并产生分析报告^[11]。

4.2 系统建模

新方案 CPN 模型的库所定义如表 3 所示, 变迁定义如表 4 所示。

表 3 新方案 CPN 模型的库所定义

库所	定义
Initial state	系统初始状态, 列车停稳
Train Door Close	列车门关闭状态
Train Door Open	列车门开启状态
PSD Close	站台门关闭状态
PSD Open	站台门开启状态
Vehicle Part	系统车载部分
Ground Part	系统地面部分
Train Door driving mechanism	车门驱动机构
PSD driving mechanism	站台门驱动机构

表 4 新方案 CPN 模型的变迁定义

变迁	定义
T1	列车停稳, 系统唤醒
T2	列车门开启
T3	站台门开启
T4	列车门关闭
T5	站台门关闭
T6	系统回到初始状态

按新方案, 使用 CPN Tools 进行建模, 如图 7 所示。

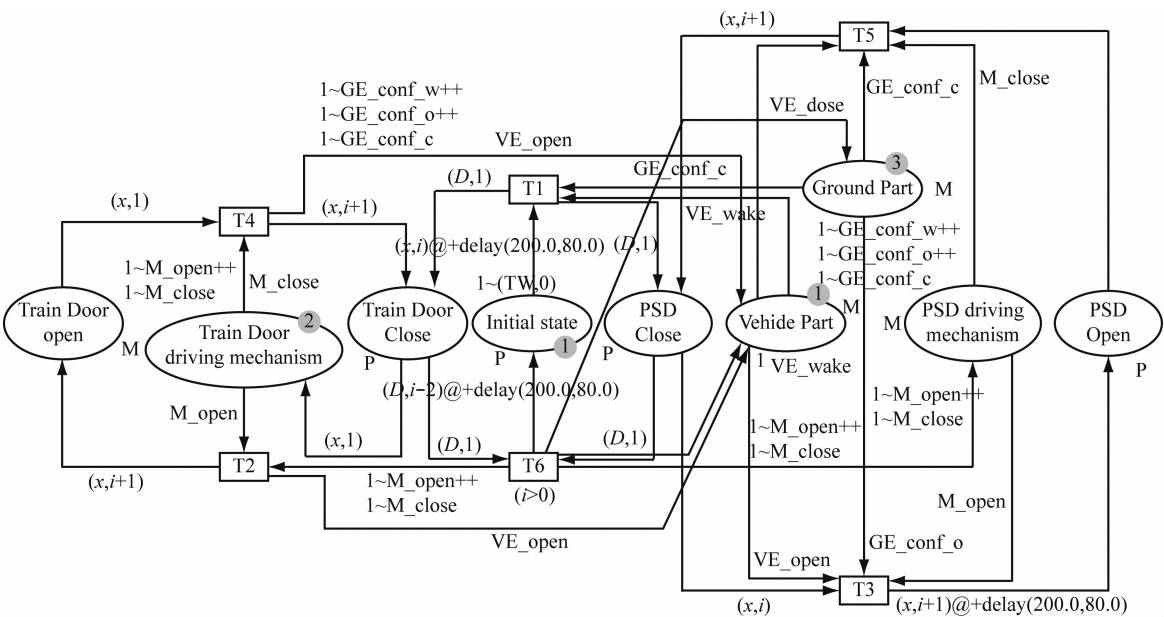


图 7 新方案的 CPN 建模

新方案 CPN 建模的颜色集及数据采集器定义如下所示:

▼ Declarations

▼ colset U = with TW | D;

▼ colset I = int;

▼ colset P = product U * I timed;

▼ colset M = with M_open | M_close

| VE_wake | VE_open | M_close

```
|GE_conf_w|GE_conf_o|GE_conf_c timed;  
▼var x:U;  
▼var i:I;  
▼fun delay(x,y) = round( normal( x,y) )  
▼Monitors  
▼Time delay  
▼Type:Date Collection  
▼Nodes ordered by pages  
▼Predicate  
▼Observer  
▼Init function  
▼Stop
```

模型中,延时函数 Delay() 函数表示通信造成的状态迁移耗时,可用以描述模型的时间特性。

4.3 仿真验证结论

利用 CPN Tools 的状态空间分析工具,对新方案的 CPN 建模进行分析。分析报告截屏如图 8 所示。

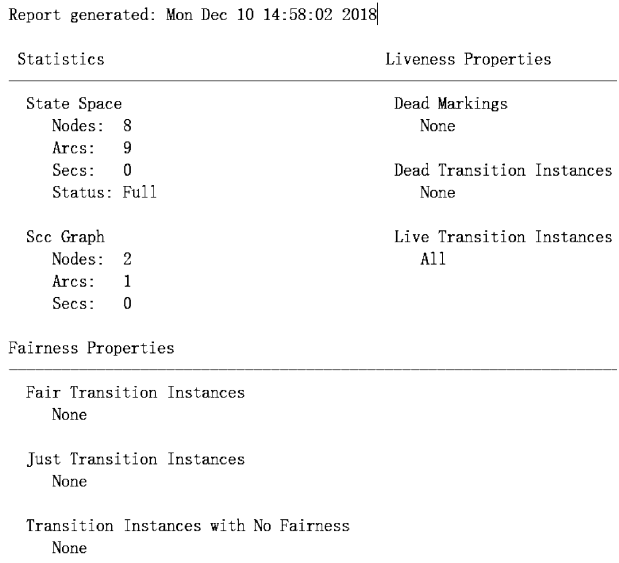


图 8 CPN-Tools 状态空间分析报告截屏图

由分析报告可知,新方案的 CPN 建模,不存在死锁/死变迁,且模型有界,具备可达性和活性,成功验证了新方案的正确性。

5 结语

本文分析了站台门控制系统现行方案存在的问题,提出了一种基于近距离通信技术的新方案。经理论分析,新方案不但可以解决现行方案当中存在的所有问题,还在可靠性及实时性方面具备一定的优越性。使用 CPN-Tools 软件,对新方案的站台门控制系统进行了有效的建模及验证。

由于 RFID 技术及单片机技术均已十分完善,因而新方案的技术基础较为完善,具备可行性。

目前新方案的研究还处于室内研究设计及仿真验证阶段,后续将开展装置的硬件实现和调试工作,以及针对装置安装的现场调研工作,最终将投入使用。

参考文献

[1] 张爽,罗育立,隋鹏. 信号与站台门联动系统在地铁中的应用研究[J]. 铁道通信信号,2011,47(8): 51.

[2] 郜洪民,段晨宁,尹逊政. 城轨交通 CBTC 关键技术:列车自动防护车载(ATP)子系统[J]. 现代城市轨道交通,2011(5):7.

[3] 王晓燕. 无人驾驶系统中屏蔽门和列车车门故障应对探讨[J]. 铁路通信信号工程技术,2017,14(1): 66.

[4] 丁龙刚. 基于 RFID、Wi-Fi、蓝牙、ZigBee 的物联网电磁兼容和干扰协调研究[J]. 物联网技术,2011(4):27.

[5] 周巧莲,沈拓. 基于红外线通信的双向查询应答器设计分析[J]. 城市轨道交通研究,2009(12):8.

[6] 赵慧. 基于 RFID 的定点停车系统的设计与实现[D]. 北京:北京交通大学,2015.

[7] 张贵艳. 基于 ISO15693 协议的远距离 RFID 读写器的研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2010.

[8] 于兴晗,李君. 基于 MF RC632 射频识别读写器芯片的专用读卡器设计及实现[J]. 电子技术应用,2007,33(3): 125.

[9] 周鹏飞. 移动闭塞信号系统车地无线通信干扰问题分析及解决方案[D]. 天津:天津大学,2015.

[10] 杨良丰. 基于 IEEE802.11g 的 CBTC 车地通信网络性能的分析与优化[D]. 上海:上海工程技术大学,2015.

[11] 刘江. 基于 CPN Tools 研究综述[J]. 信息技术与信息化,2015(3):38.

(收稿日期:2018-10-15)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》
投稿网址:tougao. umt1998. com