

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.04.009

# 基于控制器局域网的悬浮控制器调试监测系统

曾颖丰

(中车株洲电力机车有限公司 磁浮系统研究所, 湖南 株洲 412001)

**摘要:** 为了实时监测磁浮列车的悬浮节点及实时追踪和调整悬浮系统中的悬浮电流、电压、垂直方向加速度等各项数据, 设计了一个基于CAN(控制器局域网)总线的悬浮控制器调试监测系统。该系统的上位机软件在Microsoft Visual Studio编程环境下, 采用模块化的设计思想, 运用C#语言编译实现, 上、下位机之间则采用CAN总线作为传输枢纽实现通信。经过半年的车辆运行测试, 该调试监测系统通信正常、工作稳定, 达到了预期功能设计要求。

**关键词:** 磁悬浮列车; CAN总线; 悬浮控制器; 调试监测系统

**中图分类号:** TP273; TM921.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2018)04-0055-06

## Magnetic Levitation Controller Debugging and Monitoring System Based on Controller Area Network

ZENG Yingfeng

(Maglev System Institute, CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412001, China)

**Abstract:** In order to achieve a real-time monitoring of the suspension nodes of the maglev train, as well as tracking and adjusting the suspended current, voltage and vertical acceleration of the suspension system, a design has thus been proposed of a magnetic levitation controller debugging and monitoring system based on controller area network. In the process of Microsoft Visual Studio programming, the software of the system applies modular design along with the implementation of C# language. The CAN bus has been used as the transmission hub to realize communication between the upper and the lower computers, thus achieving the communication between the upper and lower computers. After a half-year vehicle running test, the debugging and monitoring system is characterized with normal communication and stable work performance, thus achieving the expected functional design requirements.

**Keywords:** maglev train; controller area network bus; levitation controller; debugging and monitoring system

### 1 研究背景及意义

目前, 中国的磁悬浮交通产业正处于高速发展阶段。与传统的轮轨车辆相比, 磁悬浮列车通过电磁力实现列车与轨道之间的无接触的悬浮与导向, 再利用直线电机产生的电磁力牵引实现列车的直线行驶。

磁悬浮列车运行时, 车辆与轨道之间始终保持相对稳定的机械间隙, 因此, 具有列车运行平稳、无摩擦、加减速反应较快、转弯半径较小、能应对坡度较陡的路段及后期维护费用低等优点<sup>[1-2]</sup>, 是一种现代高科技轨道交通工具。

收稿日期: 2018-03-20

作者简介: 曾颖丰(1991-), 男, 湖南岳阳人, 中车株洲电力机车有限公司助理工程师, 主要研究方向为电子信息及控制理论, E-mail: 928092491@qq.com

根据悬浮力作用机理的不同,可以将磁悬浮列车分为如下两种:一种是电磁吸力悬浮(electromagnetic suspension, EMS)式列车,其磁悬浮技术(magnetic suspension technique)利用车辆两侧转向架上的电磁铁和铺设在轨道上的磁铁之间产生的吸引力使列车与轨道之间保持间隙;另一种是电动斥力悬浮(electro dynamic suspension, EDS),其利用电磁铁和轨道之间产生的排斥力使列车与轨道之间保持间隙,其对控制系统的要求相对较高些<sup>[3-4]</sup>。在国内外已有磁悬浮列车中,采用EMS技术的典型运行车辆有德国的TR(trans rapid)、韩国的Urban Maglev,以及日本的HSST(high speed surface transport)工程化车辆Linimo。而采用EDS技术的典型运行车辆有日本的实现了552 km/h载人运行速度的MLX01型超导磁悬浮列车。

国内关于磁悬浮列车的研发起步较晚,但研发速度较快,成效较为显著。2001年3月,中国和德国合作开发并开工建设了上海磁浮线,其正线长约30 km,车辆采用EMS技术,设计的最高运行速度为430 km/h,且已于2002年12月31日正式运营。它是迄今为止世界上第一条正式运营的采用EMS悬浮技术的高速磁浮列车线。2015年底,中车株洲电力机车有限公司联合国防科学技术大学、同济大学、西南交通大学3所高校,共同研制了长沙磁浮快线,这是湖南省构建国家中部空铁一体化综合交通枢纽,促进世界磁浮技术发展和实现磁浮技术工程化、产业化的重大自主创新项目,也是我国首条完全拥有自主知识产权的中低速磁浮商业运营示范线,还是当前世界上最长的中低速磁悬浮运营线。长沙磁浮快线是中低速磁浮轨道交通项目,连接长沙高铁南站与长沙黄花国际机场。该车采用三节编组,运行最高速度为100 km/h,每节车共有20套悬浮控制回路,采用独立解耦控制方式。

综上所述,磁悬浮列车技术的应用可大致分为两大类,一是中低速磁悬浮列车技术,二是高速或超高速磁悬浮列车技术。中低速磁悬浮列车的特点让它适用于市区内部、城市群之间的短途客运。高速磁悬浮列车是目前技术条件下最为快速的公共地面交通工具,其时速能高达600 km/h,相对于其他传统轮轨车辆有着不可比拟的优势,主要适用于长距离、大客流量、大城市间的高速客运。

磁悬浮列车主要由悬浮系统、推进系统和导向系统三大部分组成。其运行过程中,车辆与轨道之间始终要保持相对稳定的机械间隙,其配备的悬浮系统正是为实现这一目标而特定存在的,此系统能够确保

列车安全稳定运行。同时,悬浮系统所监测到的各项列车运行实时数据,是技术人员判断列车运行故障的关键因素,所以必须要有相对应的监测软件来实现对悬浮系统中的悬浮电流、电压、垂直方向加速度等各项数据进行实时追踪和调整。为提高系统调试监测效率,本文设计了一个基于控制器局域网(controller area network, CAN)总线的悬浮控制器调试监测系统:一方面,通过上位机实时追踪悬浮间隙、垂直方向加速度、电磁铁反馈电流等关键数值,诊断列车运行是否故障;另一方面,可以根据这些数据的异常来对控制参数进行实时调整,以保证列车在整条线路上始终保持平稳运行。经过半年的车辆运行测试,该调试监测系统通信正常、工作稳定,可见实现了预期的功能设计要求。

## 2 CAN总线及其通信协议

### 2.1 CAN总线介绍

始于20世纪80年代的CAN总线,是目前市场上应用最广的现场总线之一,它是一种具有总线型拓扑结构的网络<sup>[5-6]</sup>。本系统设计中之所以选用CAN总线,主要是因为相较于其他通信总线,CAN总线具有如下优势:

- 1) 价格相对低廉;
- 2) 总线利用率较高;
- 3) 总线的数据传输距离满足本系统设计的10 m左右传输距离要求;
- 4) 总线的数据传输速率可高达1 Mbit/s,而本系统设计要求的传输速率定为250 kbit/s;
- 5) 总线11位的报文ID可以满足通信协议中不同数据帧的区别;
- 6) 发送的帧数据若受损,可以自动重发;
- 7) 节点在错误严重的情况下具有自动退出总线的功能;
- 8) 报文不包含源地址或目标地址,仅用标志符来指示功能信息、优先级信息。

### 2.2 CAN总线通信协议

通讯协议用于定义不同节点之间数据传递的方式,层的定义与开放式通信系统互联参考模型(open system interconnection, OSI)一致,节点之间相匹配的层才能互相进行通信。实际的通信发生在每一设备上相邻的两层之间,而设备只通过模型物理层的物理介质互连<sup>[7-8]</sup>。CAN的规范定义了模型的最下面两层:数据链路层和物理层。

表1展示了OSI开放式互连模型的各层名称及其主要功能。

表 1 OSI 开放系统互连模型结构与功能  
Table 1 Structure and function of OSI open system interconnection model

序号	名称	主要功能
7	应用层	最高层。主要为用户、软件、网络终端等之间用来进行信息交换。如 DeviceNet 等
6	表示层	将两个应用不同数据格式的系统信息转化为能共同理解的格式
5	会话层	依靠低层的通信功能来进行数据的有效传递
4	传输层	控制两通信节点之间数据传输。操作如：数据重发、数据错误修复等
3	网络层	规定了网络连接的建立、维持和拆除的协议。如：路由和寻址等
2	数据链路层	规定了在介质上传输的数据位的排列和组织。如：数据校验和帧结构等
1	物理层	规定通信介质的物理特性。如：电气特性和信号交换的解释等

CAN 总线收发的数据，有标准帧和扩展帧 2 种不同格式的帧数据。标准帧和扩展帧的不同之处为 ID 号的位数不同：含有 11 位 ID 号的帧为标准帧，而含有 29 位 ID 号的帧为扩展帧。在本文设计的系统中，所选用的数据帧格式均为标准帧格式。例如，报文的数据帧结构如表 2 所示。

表 2 CAN 2.0B 报文数据标准帧格式  
Table 2 Standard format for CAN 2.0B packet data

11 位标识符	RTR	数据长度 DLC (8 个字节)	数据段 (1~7 字节)	校验字节
---------	-----	------------------	--------------	------

本文所设计的通信协议中，定义了一个数据帧传输 8 个字节的有效数据。通过不同的 11 位 ID 号来表示数据是从上位机下传的控制参数数据，还是从下位机上传的列车运行数据，以及所有悬浮节点的编号和数据帧所包含信息类型等标识<sup>[1]</sup>。第 10 位和第 11 位两位 ID 号共同决定了数据的传输方向：00 表示上位机给下位机发送数据，其他都表示下位机给上位机上传数据。第 1~5 位 ID 号表示悬浮控制器的节点编码；第 6~9 位 ID 号表示数据包类型，包括参数包和命令包。RTR 位恒等于 0，数据长度字节表示传输的有效数据的字节长度，最多为 8 个字节，其中第 8 个字节为校验字节。

### 3 悬浮控制器调试监测系统的构建

#### 3.1 系统组成

以长沙中低速磁浮列车为例，其悬浮控制器网络结构由三节编组组成，每节车分别有 5 个悬浮架、20 个悬浮控制器，每个悬浮控制器控制 1 个悬浮节点，其控制器网络结构示意图如图 1 所示。

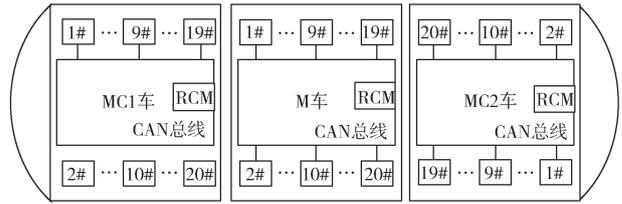


图 1 列车悬浮控制器网络结构图

Fig. 1 Magnetic levitation controller network structure diagram

整个悬浮控制器调试监测系统由上位机人机交互界面、CAN 总线以及悬浮控制器组成。在调试过程中，上位机通常为手提电脑，而 USB 接口是笔记本电脑常见的通用串行接口，所以系统内部之间通信采用的是双通道 USBCAN-2 总线分析仪，整个悬浮控制器调试监测系统的结构框图如图 2 所示。

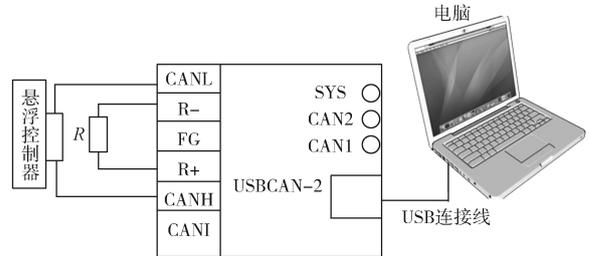


图 2 悬浮控制器调试监测系统框图

Fig. 2 Magnetic levitation controller debugging and monitoring system structure

#### 3.2 上位机功能与实现

悬浮控制器调试监测系统中的 USBCAN-2 总线分析仪为市场上的成熟技术，因此本文不再赘述。本设计中，上位机软件在 Microsoft Visual Studio 编程环境下，采用模块化的设计思想，运用 C# 高级语言编写，上位机的功能框图如图 3 所示。

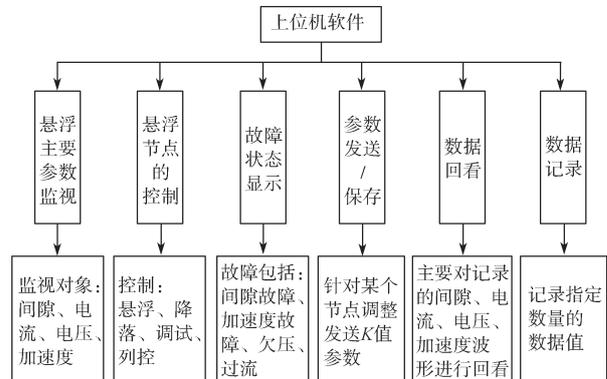


图 3 上位机软件功能框图

Fig. 3 Function block diagram of the host computer software

由图 3 可知，整个上位机软件的实现，充分利用了 C# 类封装的优势，采用功能模块化的设计思想，主要包括悬浮主要参数监控、悬浮节点控制、故障状

态显示、参数发送与保存、数据回看和数据记录共6个功能模块。并运用C#语言将系统各部分的功能都封装到类当中，不同类之间通过引用命名空间的方式互相调用。

实现上位机功能的具体设计步骤如下：

1) 设计总体系统架构，即总体的解决方案，亦即根据设计目标确定需要设计的主要功能模块，根据磁浮列车需要掌握的运行信息，确定为包括参数监控、故障状态显示等6个功能模块。

2) 将各功能模块的程序分成几个相对独立的子项目，并且在子项目中定义不同具体的类，以实现各个类的功能；如针对悬浮主要参数监视模块，根据需要对监控的对象将其分为间隙、电流、电压、垂直方向加速度等类；于悬浮节点控制模块，根据需要的内容将其分为悬浮控制、降落控制、调试和列空控制等类；根据故障可能发生的原因，将故障状态显示模块分为间隙故障、加速度故障、欠压故障、过流故障等类；根据监测需要，将数据回看模块分为记录间隙数据回看、电流数据回看、电压数据回看、加速度波形回看等类。

3) 采用自下而上的方式，对各具体类的程序代码进行编写、调试，然后将调试好的类模块集成到子项目当中，再将子项目组装成整个悬浮控制器调试监测系统<sup>[9-10]</sup>。

以上所述由类模块到系统的设计方法，主要是为了降低程序的复杂度，使软件设计的整体结构更加简洁、有条理，并方便后续的调试与维护管理等工作。

可见，上位机可通过CAN总线跟悬浮控制器中电路板上的DSP芯片进行通讯，将硬件电路上悬浮控制的主要参数值（包括悬浮节点间隙、电压、电流、加速度、接触器状态等）、故障状态值（包括间隙故障、加速度故障、过流、欠压等），按通信协议解析，以数值或图表的形式显示在电脑屏幕上，供操作者查看或分析。还可以对20个悬浮节点进行控制，让悬浮控制器按照通信协议中的位数据定义来针对悬浮节点实现悬浮、降落、列控、调试、烧写等操作。

### 3.3 主要流程及运行

#### 3.3.1 悬浮主要参数监视流程

悬浮主要参数监视流程主要用于实时监测各悬浮节点的间隙、电流、电压等，以实现悬浮主要参数监视模块功能，其具体流程如图4所示。

悬浮主要参数监视流程运行的具体步骤如下：

1) 系统初始化，界面控件初始化，控制对象实例化和CAN盒参数初始化。

2) 进入程序、显示操作界面，主要含列表显示框、

勾选显示波形和打开CAN等操作提示框。

3) 打开CAN盒，创建新线程，读取CAN数据，即上传的列车运行数据。

4) 从每帧数据中区分出悬浮节点编号和该节点的数据字节，并存入相应的控制对象实例数组中。

5) 列表显示框实时显示各项悬浮监测变量，主要显示S、I、U、a、LVS、KM1、KM2等数据，数据刷新间隔时间为100ms，刷新后即列表显示最新的变量信息；

6) 勾选出需图形化显示的相应节点的变量，主要包括S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、a<sub>1</sub>、a<sub>2</sub>等波形，刷新周期为1000ms，刷新后即可在二维图中勾画变量图形。

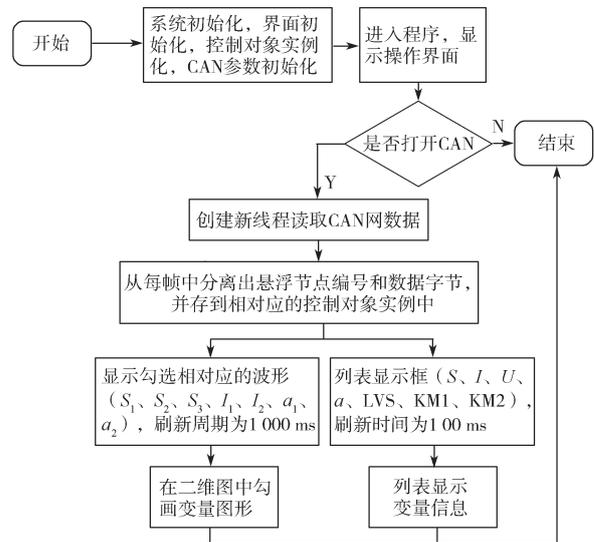


图4 主要悬浮参数监视流程图

Fig. 4 A flow chart of levitation parameter monitoring

#### 3.3.2 悬浮节点控制流程

所设计的悬浮节点控制流程如图5所示。

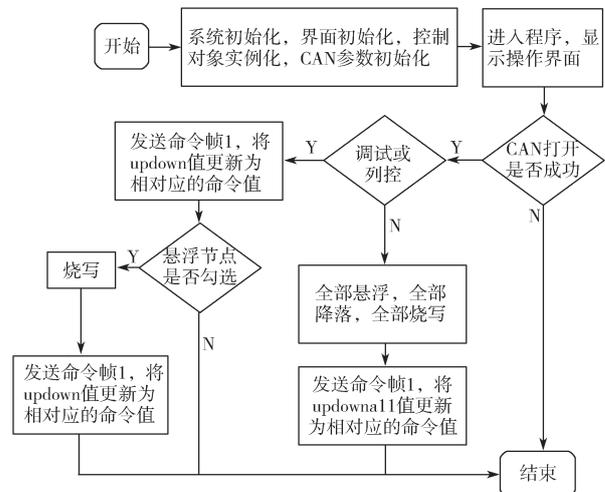


图5 悬浮节点控制流程图

Fig. 5 A flow chart of levitation node controlling

悬浮节点控制流程主要用于给下位机发送指令，

以控制悬浮节点的运行状态。

悬浮节点控制流程的主要运行步骤如下：

- 1) 系统初始化，界面控件初始化，控制对象实例化，CAN 盒参数初始化；
- 2) 进入程序，显示操作界面；
- 3) 根据点击按钮的不同发送不同数据给下位机，如 16 个  $K$  值参数、各种悬浮指令等。

### 3.3.3 数据回看流程

数据回看流程主要用于读取指定时间节点数据，方便操作人员查看任一时刻列车运行数据，并通过比较这些数据判断列车运行状态。所设计的数据回看流程具体如图 6 所示。

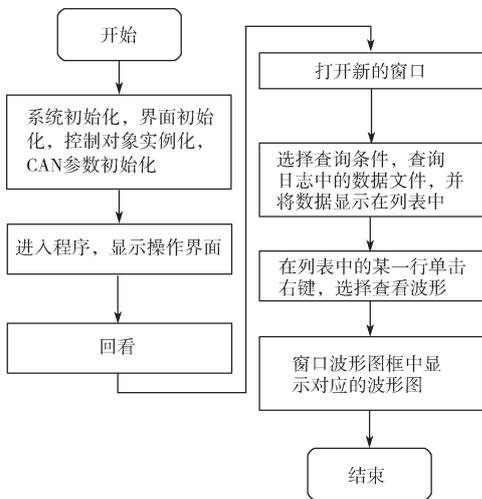


图 6 数据回看流程图

Fig. 6 A flow chart of data review

数据回看流程的运行主要分为以下几步：

- 1) 进行系统初始化，界面控件初始化，控制对象实例化，CAN 盒参数初始化等操作；
- 2) 进入程序，显示操作界面；
- 3) 点击操作界面的回看按钮；
- 4) 打开新的窗口；
- 5) 选择查询条件，查询日志中的数据文件，并将数据显示在列表中；
- 6) 可以选择列表中的某一行，单击右键，查看该条件下的二维波形图。

## 4 运行测试

为了验证设计的合理性，将设计的悬浮控制器调试监控系统运用于长沙的中低速磁悬浮列车上进行运行测试。经过半年时间的车辆运行测试，发现该调试监测系统通信正常、工作稳定，达到了预期的功能设计要求。

图 7 所示为运行期间上位机软件系统降落操作界

面截图。

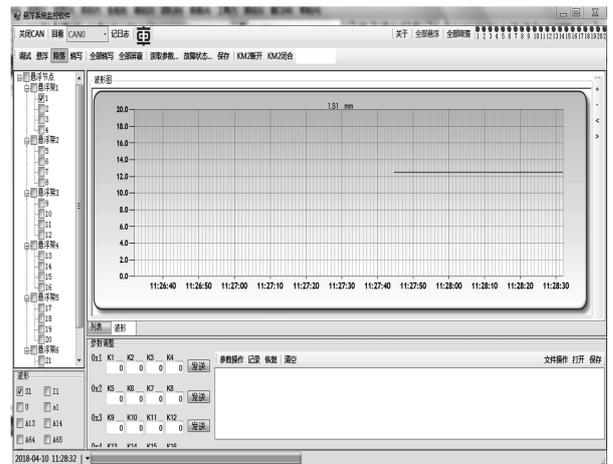


图 7 上位机软件界面

Fig. 7 An interface of the host computer software

由图 7 可看出，调试监测系统通信正常，系统处于稳定工作状态下。从界面显示还可看出，操作者可查看或分析悬浮控制的主要参数值，包括悬浮节点间隙、电压值、电流值、加速度值、接触器状态等，还可以对 20 个悬浮节点进行控制，让悬浮控制器按照通信协议中的位数据定义来针对悬浮节点实现悬浮、降落、列控、调试、烧写等操作。操作者也可以通过上位机对 DSP 芯片中控制悬浮节点的参数  $K$  值进行修改，使电磁铁达到稳定悬浮的目的。

## 5 结语

本文针对悬浮控制器工作在强电环境下的复杂性和特殊性，设计了基于 CAN 总线的悬浮控制器调试监测系统，解决了列车运行过程中无法用示波器监测相关数据的问题，并在实际的列车运行线路中实现了对悬浮控制器的监测与调试<sup>[1]</sup>。技术人员通过该调试监测系统可以实时监测磁悬浮列车运行情况，并对突发故障进行及时发现和应对，同时根据磁悬浮列车的运行平稳程度对悬浮控制器参数  $K$  值进行实时调整，大大降低了悬浮控制器这一关系到列车运行平稳度的关键部件现场调试难度。

### 参考文献：

[1] 杨 巍. 高速磁浮列车悬浮导向车载和远程监控系统研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.  
 YANG Wei. Research on Train and Remote Monitoring Technology for Levitation and Guidance System of High-Speed Maglev Train[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.

[2] 齐 然, 罗 京. 中低速磁浮列车悬浮控制系统研究

- [J]. 电力机车与城轨车辆, 2016, 39(3): 29-32.
- QI Ran, LUO Jing. Suspension Control System Research for Middle-Low Maglev Trains[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2016, 39(3): 29-32.
- [3] 宋立. 基于CAN总线的车身网络监测系统的设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- SONG Li. Design of Monitoring System for In-Vehicle Body Network Based on CAN BUS[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [4] 李明耀. 磁浮列车悬浮监控系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- LI Mingyao. Research on Suspension Monitoring System of Maglev Train[D]. Chengdou: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [5] 习成. 基于CAN总线的乘用车信息通信系统试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- XI Cheng. Experimental Study of Telematics System Based on CAN Bus[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [6] 肖雪峰, 肖伸平, 彭琼林. 基于uC/OS-II操作系统纯电动汽车锂电池管理系统[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(5): 72-76.
- XIAO Xuefeng, XIAO Shenping, PENG Qionglin. Lithium Battery Management System for Pure Electric Vehicle Based on uC/OS-II Operating System[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(5): 72-76.
- [7] 赵春霞. EMS型高速磁浮列车导向动力学研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- ZHAO Chunxia. Research on Guidance Dynamics of EMS High-Speed Maglev Train[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [8] 赵海涛. 中低速磁悬浮列车制动系统性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- ZHAO Haitao. Study on Braking System of Mid-Low Speed Maglev Train[D]. Chengdou: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [9] 王辉, 钟晓波, 沈钢. 一种新型磁悬浮线路设计方案及悬浮控制方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 1112-1118.
- WANG Hui, ZHONG Xiaobo, SHEN Gang. A New Maglev Line System Design and Control Strategy[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2013, 41(7): 1112-1118.
- [10] 张振霖. 磁浮列车悬浮系统的预测控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- ZHANG Zhenlin. Research on Model Predictive Control of Maglev Levitation System[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [11] GOTTZEIN E, MEISINGER R, MILLER L. The Magnetic Wheel in the Suspension of High-Speed Ground Transportation Vehicles[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 1980, 29(1): 17-22.

(责任编辑: 廖友媛)