DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.01.019　　文章编号：1000-128X(2023)01-0144-06

高速磁浮交通运行控制系统综合仿真试验平台

王志伟，李靖兰，戚媛婧，方　凯
（湖南中车时代通信信号有限公司，湖南 长沙　410005）

摘　要：针对高速磁浮交通运行控制系统总体协同仿真试验和集成测试的需求，提出了通过数字化仿真和实物接口设备相结合的方式构建综合仿真试验平台的实现方案。按照高速磁浮交通系统特点、构成和基本原理，将磁浮列车动力学和运动学模型通过其目标线路模型所属分区属性与相应分区牵引系统模型进行车-地受力关联建模，以关联计算模型为核心扩展建立了包含车辆系统模型、车载运行控制接口、分区运行控制接口等在内的半实物仿真试验环境，接入被试运行控制系统设备，构成针对运行控制系统的闭环试验系统。同时，采用有线局域网组网形式实现车地无线通信仿真，为磁浮运行控制系统集成仿真试验提供网络互连测试环境。经实际项目的试验应用证明，该试验平台仿真功能完整、合理、有效，能够为高速磁浮运行控制系统提供功能全面、仿真程度高的测试和验证环境。

关键词：磁浮交通；运行控制；仿真；试验；磁浮列车
中图分类号：U237　　**文献标识码：**A

Integrated simulation test platform of operation control system for high-speed maglev transport

WANG Zhiwei, LI Jinglan, QI Yuanjing, FANG Kai

(Hunan CRRC Times Signal & Communication Co., Ltd., Changsha, Hunan 410005, China)

Abstract: This paper proposed an implementation solution to build an integrated simulation test platform by combining digital simulation with physical interface equipment according to the overall requirements of collaborative simulation test and integrated test of the operation control system for high-speed maglev transport. In consideration of the characteristics, composition and basic principles of high-speed maglev transport systems, the dynamics and kinematics model of maglev trains was associated with the traction system model of the corresponding partition of the target track model by the corresponding partition attributes into a vehicle-ground interaction correlation model. Taking this correlation calculation model as the core, a semi-physical simulation test environment was established, including a vehicle system model, on-board operation control interface and partition operation control interface, which was connected to the equipment of the tested operation control system to form a closed-loop test system. In addition, the vehicle-ground wireless communication was simulated by networking via wired LAN, which created an internetworking test environment for the integrated simulation test of the operation control system for maglev transport. The experimental application in the actual project proves that the test platform with complete, reasonable and effective simulation functions can provide a test and verification environment with all-around functions and high-degree simulation for the operation control system of high-speed maglev transport.

Keywords: maglev transport; operation control; simulation; test; maglev train

---

基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFB1200600）
通信作者：王志伟（1980—），男，硕士，高级工程师，主要从事轨道交通信号系统及其仿真测试系统研发工作；E-mail: wangzhiw@csrzic.com
引用格式：王志伟, 李靖兰, 戚媛婧, 等. 高速磁浮交通运行控制系统综合仿真试验平台[J]. 机车电传动, 2023(1): 144-149.
Citation: WANG Zhiwei, LI Jinglan, QI Yuanjing, et al. Integrated simulation test platform of operation control system for high-speed maglev transport [J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 144-149.

0　引言

我国经济的快速发展和国力的不断提升对更加快速、安全、舒适、便捷的出行提出了迫切需求[1]，高速磁浮交通作为一种能够达到600 km/h速度等级的地面交通方式，可填补高铁和航空运输之间的速度空白，极具市场潜力。

高速磁浮交通系统由线路、车辆、牵引控制及供电、运行控制及通信、测速定位共5个子系统构成[2]。其中，运行控制系统（Operation Control System, OCS）是关键组成部分，主要用于实现对列车运行的控制、安全防护、调度管理以及列车的自动运行等核心功能。该系统是典型的高安全完整性等级控制系统，在正式投入运营前需要根据运营场景说明书对其各项功能进行全面仿真，因此，根据高速磁浮电气系统原理和运行控制系统仿真试验需求，研究并实现一套综合仿真试验平台，以提供磁浮运行控制系统的功能测试和工程验证非常必要。

本文基于高速磁浮交通运行控制系统的外部环境、构成方式和实现原理，通过构建磁浮目标线路、车辆系统、牵引控制及供电系统、测速定位系统的数字化模型，并以车辆线路运行模型为仿真试验场景主线，以车地无线通信仿真局域网和运行控制核心局域网为通信框架，使各数字化模型、半实物仿真接口设备和被测运行控制系统各子系统有序连接并运行，构建用于运行控制系统功能完整性测试试验的协同试验环境，支撑磁浮运行控制系统的集成试验。

1　高速磁浮运行控制系统构成与外部环境

高速磁浮交通系统构成复杂，其运行控制系统由中央控制系统（CCS）、分区控制系统（DCS）、车载控制系统（VCS）构成[3]，其中分区控制系统通过运行控制核心网与牵引系统连接，用于控制本分区的牵引控制系统、牵引供电系统和线路道岔系统，实现列车运行控制、进路和道岔防护、安全牵引切断的功能；车载控制系统通过硬线连接或网络连接方式与车辆电气系统、测速定位系统和车载无线电控制单元连接，实现列车运行控制、列车防护及安全定位；中央控制系统、分区控制系统、车载控制系统之间通过运行控制核心网、车地无线通信进行连接，实现与安全相关的数据流和控制流的传输。高速磁浮运行控制系统的构成及其外部环境如图1所示。

1.1　车辆环境

在磁浮列车运行的过程中，由列车测速定位系统提供相对位置信息和绝对位置信息，用于安全测速和定位；由车辆电气系统的设备（如车载控制单元BST和车载诊断网ODN）提供车辆各系统安全状态信息，如悬浮系统状态、导向系统状态、制动系统状态、车门状态、车载电网状态等作为列车控制依据；车载控制系统通过向车辆电气系统发出安全控制指令，控制列车进行涡流制动、车门锁闭、悬浮动作、受流器动作等。

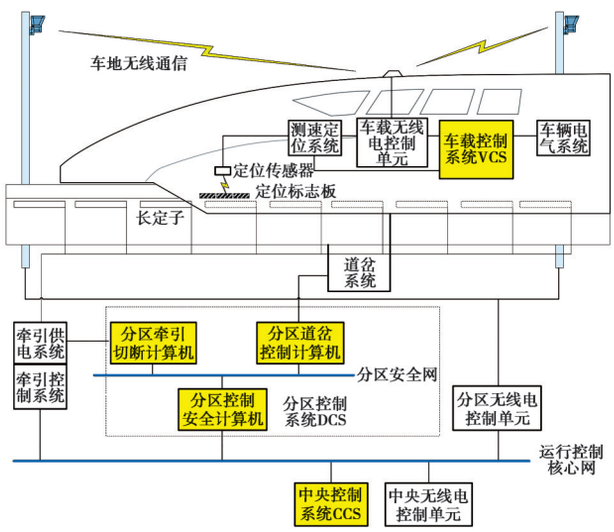


图1　高速磁浮运行控制系统构成及其外部环境

Fig.1　Composition and external environment of operation control system for high-speed maglev transport

1.2　地面环境

地面设置分区控制系统，与牵引控制系统连接并向其发出运行模式、运营数据、防护曲线、控制指令等信息，由牵引控制系统实现磁浮列车的牵引控制与自动运行，并将列车运行状态反馈给分区控制系统；牵引供电系统中的变流控制器和安全切断开关也受分区控制系统控制，在紧急或故障情况下执行牵引供电安全切断功能；道岔系统用于控制分区中的道岔设备，在分区控制系统的控制下实现道岔转动、锁闭和上下电，同时反馈道岔位置状态信息给分区控制系统。

1.3　通信环境

运行控制系统的通信环境是一套分布式的信息传输网，由3个通信子系统构成，即运行控制核心网、分区安全网和车地无线通信网。运行控制核心网用于中央控制系统、分区控制系统以及牵引系统间的信息传输和交互；分区安全网用于传输分区内部的安全信息和指令；车地无线通信网用于构建车–地数据传输通道，实现车–地之间控制指令、运营数据、列车位置与状态等信息的传递，以38 GHz毫米波无线通信系统为例，其由中央无线电控制单元（CRCU）、分区无线电控制单元（DRCU）、车载无线电控制单元（MRCU）以及无线电基站、地面传输光纤等构成[4-5]。

2 高速磁浮运行控制系统对比分析

2.1 高速磁浮运行控制系统与传统轨道交通信号系统对比分析

为适应高速磁浮交通的运行特点，同时满足其安全、高效运营的需求，高速磁浮交通运行控制系统在系统构成、功能分配和实现技术等方面都与传统轨道交通信号系统存在差异。

表1在系统构成及功能分配方面列举并对比了典型传统轨道交通信号系统与高速磁浮运行控制系统。

表1 城轨CBTC信号系统、高速铁路信号系统与高速磁浮运行控制系统对比

Table1 Comparison of urban rail CBTC signal system, high-speed railway signal system and operation control system of high-speed maglev transport

对比项目	城轨CBTC信号系统	高速铁路信号系统	高速磁浮运行控制系统
车载列车运行控制	列车自动防护系统ATP/自动驾驶系统ATO：负责列车运行曲线计算、列车测速定位、安全防护、牵引切除、列车启停、列车自动驾驶、牵引制动控制、车门控制等	列车自动防护系统ATP：负责接收地面行车许可命令、速度模式曲线生成、列车定位、列车测速、列车安全防护等	车载控制系统VCS：负责列车休眠唤醒、列车登录、安全定位、速度曲线监控、安全悬浮控制、安全制动控制、车门安全监控、强制停车管理等
地面区段列车运行控制	联锁系统：负责进路控制、道岔防护、区段封锁与解封、站台门控制等； 区域控制器ZC：负责移动授权计算、移动闭塞安全防护等； 计轴系统：负责列车占用检测、列车定位等	联锁系统：负责进路选排与控制、信号机控制、道岔防护、区段封锁与解封等； 无线闭塞中心RBC：负责列车移动授权计算、行车许可生成、临时限速命令传输等； 轨道电路：负责列车占用检测、列车定位等	分区控制系统DCS：负责驾驶顺序控制、进路防护、道岔防护、危险点防护、安全牵引切断、分区交接防护、速度曲线计算与监控、运行计划与命令传递、牵引系统状态监控、列车管理等
行车调度控制	列车自动监控系统ATS：负责列车运行自动监控、运行调度、列车运行图编辑与自动调整等	调度集中控制系统CTC：负责列车运行图编辑、行车计划转化、调度命令下达等	中央控制系统CCS：负责列车运行计划制定与执行、列车自动运行指令生成、列车运行状态监控等
车地通信	采用WLAN无线局域网、波导管、点式应答器等	采用铁路GSM-R网络、点式应答器等	采用38 GHz无线通信或LTE无线通信、专用车地无线电控制单元设备等

通过以上对比分析可知高速磁浮运行控制系统与传统轮轨轨道交通信号系统的主要差异点包括[6-7]：

①传统轨道交通信号系统通过车载自动驾驶系统ATO来实现列车自动驾驶，而高速磁浮列车由于其牵引系统设置在地面分区，因此其车载控制系统无ATO相关功能。

②高速磁浮列车其安全牵引切断和速度曲线计算由地面分区控制系统实现，速度曲线监控与防护由分区控制系统和车载控制系统共同完成，而传统轮轨信号系统中列车安全牵引切断、速度曲线计算和监控防护均由车载ATP实现。

③因高速磁浮交通的数据传输实时性要求更高，车地无线通信采用低时延的38 GHz毫米波或LTE无线通信链路，并由专用无线电控制单元设备和沿线通信基站完成车地通信。

2.2 高速磁浮交通运行控制系统仿真试验环境的设计思路

由上分析可知，高速磁浮交通运行控制系统的运行环境与传统轨道交通信号系统有较大差异，其仿真试验平台的设计重点主要包括：

①通常在传统轨道交通运行控制系统仿真试验中由车辆仿真实现的牵引系统仿真建模、列车牵引制动特性建模和动力学仿真建模，在磁浮运行控制仿真试验中均由分区地面环境仿真来完成。

②由牵引系统仿真模型来实现ATO功能仿真，并完成分区牵引系统各设备与分区控制系统间的接口模拟。

③开展车地无线通信仿真系统设计，搭建通信仿真环境，并根据特定的通信协议和功能分配，模拟中央、分区和车载控制系统相应的无线电控制单元设备的通信握手、列车注册、分区切换以及数据分发等功能。

3 综合仿真试验平台总体设计

3.1 实现原理

对运行控制系统功能进行全面的综合仿真试验，需要根据磁浮交通运行原理，建立相应的运行特性、逻辑及接口仿真模型，开发相应的测试接口设备，构建包含牵引系统、车辆系统、线路系统、通信系统等仿真环境的综合仿真试验平台。

为实现车辆环境仿真，需要对车辆系统进行数字化建模，主要包括车载控制单元建模、测速定位系统建模、车辆电气系统建模（涡流制动系统、车门系统、悬浮导向系统等的建模）、车载诊断系统建模等；同时开发相应的车载控制系统接口设备，可在运行上述车辆系统数字化模型的同时，将数字化模型的虚拟信号转化为被测车载运行控制系统实物设备可识别的实际信号。

分区地面环境仿真的重点是目标线路数字化建模、列车运行建模和分区牵引系统仿真建模。目标试验线路仿真模型的建立主要包括线路特征（如坡度、曲线）、道岔系统和线路设施建模；因牵引系统设置于地面，列车直线电机转子所受到的牵引力和制动力与各牵引分区的牵引系统存在强耦合关系，因此将列车动力学和运动学建模、列车群管理列入分区地面环境仿真的范畴；牵引系统仿真建模时，保留对其接口、ATO逻辑功能和安全牵引切断接口的仿真，对牵引系统内部控制环节（如牵引电流控制、定子段换步控制和定子段开关站相关逻辑控制）的仿真进行简化；开发分区控制系统接口设备以实现虚拟信号向实际信号的转化。

运行控制系统的通信环境基于以太网交换机的组网实现，其中，运行控制核心网、分区安全网采用一台交换机组网。车地无线通信通过设置车地无线通信仿真网交换机来构建有线局域网络环境，实现对车地无线通信网络环境的模拟；构建无线电控制单元仿真模型，与被测的中央、分区和车载运行控制系统一同接入至该车地无线通信仿真网，实现车–地间通信数据的接收、分发以及无线电控制和状态监测等。

3.2　实现方案

考虑功能验证覆盖性要求、系统设备运行特点和试验成本，运行控制系统仿真试验环境划分为2部分。

3.2.1　运行支撑与接口仿真环境

以磁浮运行控制系统运行环境仿真软件为核心，建立磁浮交通相关设施和系统的仿真逻辑模型，通过外围接口设备及软件系统与被试的运行控制系统设备连接，构成运行控制系统各子系统的运行试验接口环境，实现方案如图2所示。由图2可见，运行支撑与接口仿真环境由运行环境仿真、车载控制系统接口、分区控制系统接口和线路场景显示操作构成，分析如下：

①运行环境仿真：构建线路及设施模型（包括线路区段、停车区、车站站台、牵引分区、定位标志板等）、道岔模型，根据磁浮列车参数生成磁浮列车动力学/运动学模型，并与相应分区牵引系统仿真模型建立受力关联，所受牵引/电磁制动力由分区牵引系统模型中的ATO仿真模块运算得出，其悬浮、受流以及涡流制动指令由车载控制系统经接口转换给出；同时，其运算得出的列车位置/速度信息经车载控制系统接口提

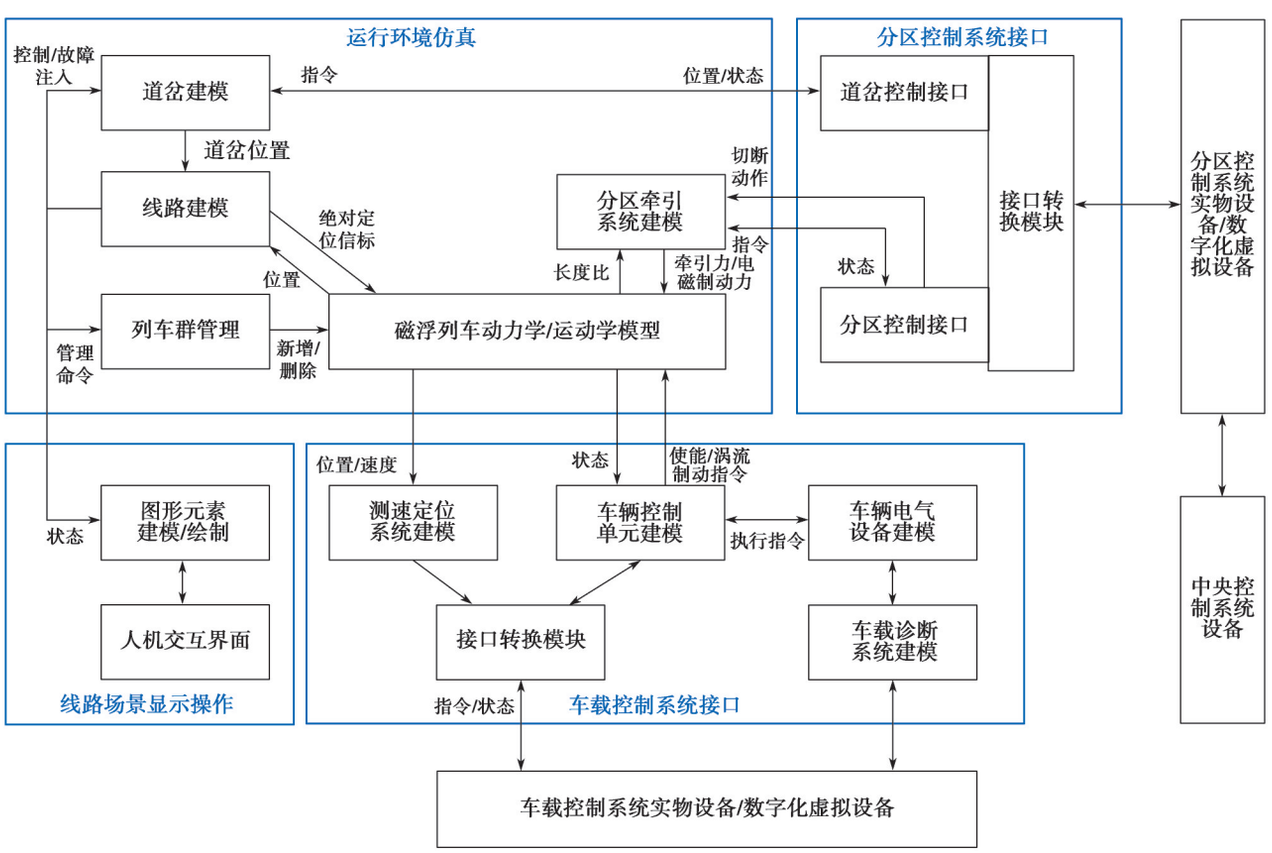


图2　运行支撑与接口仿真环境设计方案

Fig. 2　Design scheme of simulation environment for operation support and interface

供至车载控制系统。

②车载控制系统接口：建立磁浮列车系统模型，并将其作为车载控制系统的受控接口向列车动力学模型发出控制指令，反馈测速定位数据，使试验闭环；提供车辆模型人机交互界面，进行状态监视和故障注入；实现接口转换模块与车载控制系统实物设备间的实际信号传输。

③分区控制系统接口：建立道岔控制转换接口和分区控制转换接口，根据道岔的位置状态和控制指令的点位，对被试分区控制系统与牵引系统模型间的指令/状态信息、牵引切断指令信息等进行转换，并实现与分区控制系统实物设备间的实际信号传输。

④线路场景显示操作：加载线路、道岔及设施图形数据文件，接收列车状态信息，建立列车、线路、道岔及其他设施图形元素模型并实时绘制图形，同时提供人机交互界面，实现列车群管理与控制、线路道岔与其他设施的人工控制和故障注入模拟，使试验过程更加直观、高效。

3.2.2 车地无线通信仿真环境

设置车地无线通信仿真设备，部署各类无线电控制单元仿真软件，采用有线网络组网的形式构建运行控制系统试验的车地无线通信仿真环境，实现方案如图3所示。

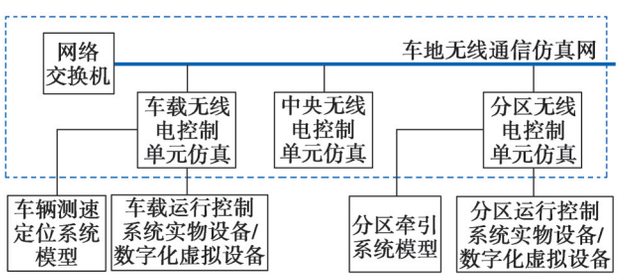


图3 车地无线通信仿真环境设计方案

Fig. 3 Design scheme of simulation environment for vehicle-ground wireless communication

根据实际线路牵引分区划分和磁浮虚拟列车群配置，设置若干无线电控制仿真计算机，通过网线接入网络交换机，组网构成车地无线通信仿真网络环境：

①设置车载无线电控制单元仿真，与车载控制系统设备连接，传输当前列车运行控制指令和列车位置信息；与测速定位系统模型连接，传输其发出的定位信息。

②设置分区无线电控制单元仿真，与分区控制系统设备连接，传输当前分区内列车运行控制指令和位置信息；与牵引系统模型连接，传输牵引分区内列车的定位信息。

③分区无线电控制单元仿真与相应分区内的车载无线电控制单元仿真用来实现模拟的车地双向无线通信，接收并执行本分区的被试分区运行控制系统发出的控制指令（如分区切换指令等）。

4 综合仿真试验平台技术验证

4.1 平台技术验证与应用

高速磁浮运行控制系统的综合仿真试验平台建设完成后即投入自主磁浮交通运行控制技术研究验证中，使用该平台先后构建了“上海磁浮列车示范运营线”“四方665 m高速磁浮试验线”“同济大学国家磁浮中心高速磁浮试验线”等高速磁浮运行控制系统仿真试验环境，开展了高速磁浮运行控制系统集成仿真测试应用。

以上海磁浮列车示范运营线为例，其正线总长度30 km，共设2个车站、1个维修中心[8]，全线共设8组道岔，分为5个牵引供电分区，划分42个停车区，另外设置223组定位标志板，使用本文仿真试验平台以该试验运营线为目标搭建了仿真测试环境。

该仿真试验环境使用了全套半实物仿真试验平台的设备，整套系统环境包含多台服务器、高性能工控机/工作站、运行控制系统实物机柜、专用仿真测试接口设备机柜、大屏幕显示设备、网络通信设备等，其中部分仿真设备的人机界面如图4所示。

运行情况表明，该仿真试验平台满足完整的磁浮运行控制功能集成测试要求，且各项仿真结果如列车运行速度曲线、列车最小运营间隔、总体响应时间等与上海磁浮示范线实际运行情况相近。

基于该综合仿真试验环境共实现了142个运行控制系统关键测试场景，执行测试用例640余个，发现并处理了多处缺陷，基本覆盖了运行控制系统功能试验需求，在磁浮运行控制系统集成仿真试验中发挥了重要作用。

4.2 平台改进方向

受技术和成本限制，该综合仿真试验平台还需改进，因此为提升整体仿真试验能力，提出以下优化思路：

①扩大陪试用半实物设备的应用范围，将原有的无线电控制单元仿真机替代为无线电控制单元实物并进行组网，同时建立38 GHz毫米波或LTE无线链路仿真模型，叠加通信时延、抖动等技术参数约束与干扰条件，使得仿真试验平台具备运行控制系统响应时间这一关键性能指标的测试能力。

②优化仿真模型，改进列车动力学模型算法，进一步提高磁浮车辆模型运行数据仿真的真实性和有效性，从而为验证运营间隔、运行防护能力等性能指标提供技术手段和测试分析依据。

③引入自动化测试管理系统，实现对各被测子系统和仿真系统模型的控制，并以此为基础结合测试脚本的应用实现系统级自动化测试，提高平台集成仿真试验的效率。



图4　运行控制综合仿真试验平台部分人机界面

Fig. 4　Partial man-machine interface of integrated simulation test system for operation contral

5　结语

本文对高速磁浮交通运行控制系统的外部环境特点、构成和原理进行了分析，提出了数字化仿真与实物设备相结合的综合仿真试验平台总体方案，并对该系统方案的设计原理、实现方法和试验应用进行了阐述。项目验证情况证明，该平台可用于开展高速磁浮运行控制系统协同运行试验，进行高速磁浮运行控制系统运营能力优化研究和工程验证试验。另外，该平台的适应性好，可以通过调整参数、模型重构替代等扩展方式，方便地适配中速磁浮（速度等级160~250 km/h）[9]运行控制系统的功能试验和验证，对于提高中、高速磁浮交通运行控制系统研发试验和工程化验证试验的试验场景覆盖度和工作效率具有重要意义。

参考文献：

[1] 李京文, 宗刚. 高速磁浮交通系统在长大干线的适用性研究[M]. 北京: 知识产权出版社, 2014.
LI Jingwen, ZONG Gang. Research on the applicability of high-speed maglev transportation system in long trunk line [M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2014.

[2] 魏庆朝, 孔永健, 时瑾. 磁浮铁路系统与技术[M]. 2版. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
WEI Qingchao, KONG Yongjian, SHI Jin. System and technology for maglev transit[M]. 2nd ed. Beijing: Science and technology of China Press, 2010.

[3] 杨光, 唐祯敏. 高速磁浮列车运行控制系统体系结构研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 68-72.
YANG Guang, TANG Zhenmin. Study on the operation control system framework for high-speed MAGLEV train[J]. China Railway Science, 2006, 27(6): 68-72.

[4] 汤丹. 浅析38G无线电系统在上海磁浮示范运营线中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(10): 69-72.
TANG Dan. 38G radio system in Shanghai maglev demonstration line[J]. Urban Mass Transit, 2006, 9(10): 69-72.

[5] 田恺, 晏锐, 万鹏. 高速磁浮无线通信技术研究现状及发展[J]. 机车电传动, 2020(6): 25-29.
TIAN Kai, YAN Rui, WAN Peng. Research status and development of high-speed maglev wireless communication technology[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(6): 25-29.

[6] 吴卫平, 胡剑, 高原. 高速磁浮运行控制系统与城轨信号系统CBTC的对比分析[J]. 控制与信息技术, 2018(3): 56-59.
WU Weiping, HU Jian, GAO Yuan. Comparative analysis of the operation control system for high-speed maglev and the CBTC signal system for metro[J]. Control and Information Technology, 2018(3): 56-59.

[7] 郭进, 张亚东. 中国高速铁路信号系统分析与思考[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(5): 90-94.
GUO Jin, ZHANG Yadong. Study and consideration on Chinese high speed railway signal system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(5): 90-94.

[8] 吴祥明. 高速磁浮上海示范线的建设[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002(7): 814-818.
WU Xiangming. Construction of Shanghai maglev demonstration line[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002(7): 814-818.

[9] 龚俊虎, 谢海林, 鄢巨平, 等. 全速度谱系磁浮交通的技术发展与应用前景[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(9): 61-64.
GONG Junhu, XIE Hailin, YAN Juping, et al. Development and application prospect of full-speed spectrum maglev transportation technology[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(9): 61-64.

收稿日期：2021-05-10
修回日期：2022-08-28