

通信技术

真空管道超高速磁悬浮列车通信信号系统展望

刘振玉¹, 杨 凯¹, 樊 亮², 屈永正¹

(1. 湖南中车时代通信信号有限公司 北京分公司, 北京 100070; 2. 湖南中车时代通信信号有限公司, 湖南 长沙 410100)

摘 要: 真空管道超高速磁悬浮列车是一种新型轨道交通工具, 其信号系统分为中央控制系统、分区控制系统和车载控制系统 3 级。文章介绍了真空管道超高速磁悬浮列车信号系统在车载和分区控制子系统方面的新功能和实现关键点, 分析了在中央控制系统和通信系统层面如何对既有产品进行选用和改进, 最后展望真空管道超高速磁悬浮列车的应用前景。在现有技术支持下, 可以开展其通信信号系统的设计研发和实验室验证。

关键词: 超高速磁悬浮列车; 真空管道; 运行控制系统; 通信信号系统

中图分类号: U237

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)04-0103-06

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.04.017

Outlook of the Communication & Signaling System for Vacuum Pipeline Ultra High Speed Maglev Train

LIU Zhenyu¹, YANG Kai¹, FAN Liang², QU Yongzheng¹

(1. Beijing Division, Hunan CRRC Times Signal & Communication Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. Hunan CRRC Times Signal & Communication Co., Ltd., Changsha, Hunan 410100, China)

Abstract: Vacuum pipeline ultra high speed maglev train is a new railway transit technology. Its operation control system can be divided into three levels: centralized control system, zone control system and onboard control system. In this paper, new functions and key points of the onboard and zone control subsystems are proposed. In the aspect of central control system and communication system, the strategy on how to select and improve existing products is analyzed. Finally, application prospects of vacuum pipeline ultra-high-speed maglev train is proposed. With the support of the existing technologies, design and development of its communication & signaling system and the laboratory verification can be carried out.

Keywords: ultra high speed maglev train; vacuum pipeline; OCS (operation control system); communication & signaling system

0 引言

真空管道磁悬浮超高速飞行列车或称“真空管道超高速磁悬浮列车”, 是一种以“钢铁侠”埃隆·马斯克提出的“超级高铁”为原型、运行速度可以达到 1 000 km/h 以上的新型轨道交通列车, 其融合了管道

交通技术和轨道交通技术, 是下一代交通的发展趋势之一, 具有较好的发展前景。真空管道超高速磁悬浮列车的通信信号系统包括信号系统和通信系统。尽管此前并无真空管道超高速磁悬浮列车通信信号系统的专项研究, 但其信号系统(运行控制系统)仍可以参考高速磁悬浮系统进行设计, 分为中央控制系统、分区控制系统和车载控制系统 3 级。真空管道超高速磁悬浮列车通信系统包括地面有线通信子系统和车地双向无线通信子系统, 其中车地双向无线通信子系

收稿日期: 2020-09-14

作者简介: 刘振玉(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事铁路信号产品研发和列车控制系统设计工作。

基金项目: 湖南创新型省份建设专项(2019GK4015)

统是最重要组成部分。本文对真空管道超高速磁悬浮列车的通信信号系统进行系统设计和技术展望。

1 信号系统组成

信号系统作为安全相关系统，是本文阐述的重点。真空管道超高速磁悬浮列车信号系统方案不止一种，本文尝试从列车控制一体化的角度进行设计。

1.1 系统组成简介

真空管道超高速磁悬浮列车具有 3 级运行控制的信号系统体系结构，包括中央控制系统（centralized control system, CS），分区控制系统（decentralized control system, DCS）和车载控制系统，如图 1 所示。相比传统的基于通信的列车控制系统（communication based train control, CBTC）^[1]（图 2），真空管道超高速磁悬浮列车信号系统体系结构更接近于车车通信

系统的体系结构，尤其是其中央控制系统，它和列车自动监控（automatic train supervision, ATS）系统基本一致；其分区控制系统也被定义为类似对象控制器（object controller, OC）的单个一体化安全设备，设计之初采用联锁与列控一体化思路^[2]，不再区分联锁和区域控制中心（zone controller, ZC）。

1.2 与传统 CBTC 系统和基于车车通信的 CBTC 系统比较

与传统 CBTC 相比，真空管道超高速磁悬浮列车信号系统具有以下特点：

- （1）无人驾驶，自动化等级高；
- （2）牵引控制及供电设备被安装在地面，而非车载；
- （3）轨旁无轨道电路及应答器，也不涉及信号机和计轴系统。

传统 CBTC 列车和基于车车通信 CBTC 列车均

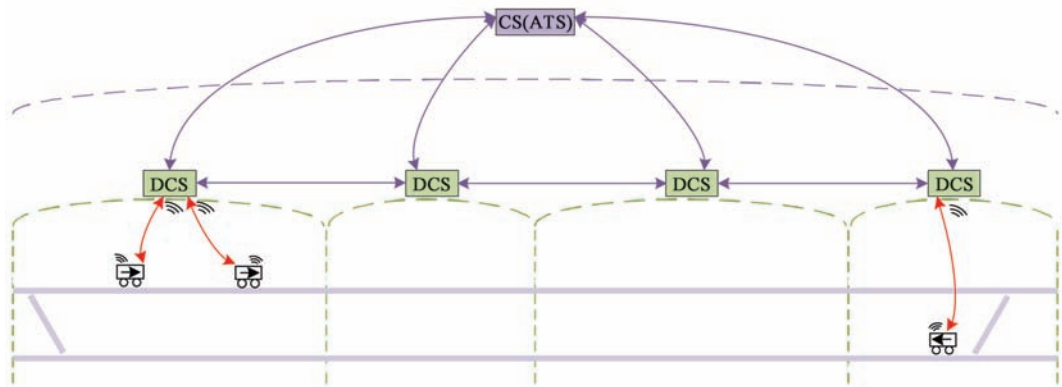


图 1 真空管道超高速磁悬浮列车信号系统架构
Fig. 1 Structure of the operation control system for vacuum pipeline ultra high speed maglev train

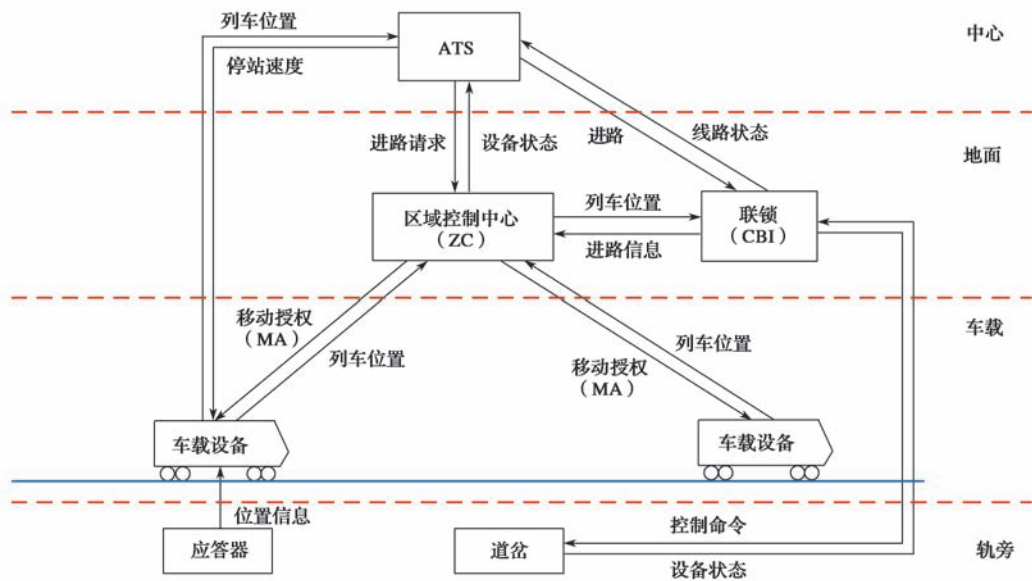


图 2 传统 CBTC 系统架构
Fig. 2 Typical structure of CBTC system

属于轮轨系统，驾驶模式为车载驾驶；而真空管道超高速磁悬浮列车属于高速磁浮系统，采用长定子直线同步电机，其牵引控制系统和供电系统均被部署在地面，驾驶模式为地面驾驶^[3]。与 CBTC 系统相比，真空管道超高速磁悬浮列车运行控制系统存在的差异主要在体系架构、车门及屏蔽门联动、牵引制动控制等方面^[4]，其牵引、供电系统与运行控制系统之间的联系更加紧密，因此可对分区控制系统进行一体化控制设计。在同为 GoA4 级^[5]的自动化等级下，真空管道超高速磁悬浮列车运行控制信号系统与传统 CBTC 系统和车车通信 CBTC 系统^[6-7]功能比较如表 1 所示。

真空管道超高速磁悬浮列车运行控制系统与车车通信系统不同之处在于，其相邻 DCS 之间通过地面安全网进行安全信息交互，且取消了车载系统和中央控制系统 CS 间的通信链路，车地通信只存在于车载设备和 DCS 设备之间，车与车之间不存在通信链路。相比已取消了信号机、计轴和有源应答器的车车通信系统，真空管道超高速磁悬浮列车运行控制系统的轨旁设备还可取消无源应答器，以进一步降低了成本，减轻了后期维护工作量。

2 车载控制系统

由于牵引、供电设备均被安装在地面，因此真空管道超高速磁悬浮列车的车载控制系统实际上取消了列车自动运行 (automatic train operation, ATO) 子系统，只需裁剪车载列车自动防护 (automatic train protection, ATP) 子系统。此时，车载 ATP 系统的功能也需要更加简化，甚至要弱于传统全自动驾驶 (fully automatic operation, FAO) 系统的车载 ATP，更是远远不如车车通信 CBTC 系统的车载 ATP 功能繁多复杂。

真空管道超高速磁悬浮列车的车载控制系统仅保留了列车测速测距、自主定位、速度监控，以及车门防护功能。由于实际牵引、供电和常用制动的控制都由分区控制系统承担，即便触发制动曲线，真空管道超高速磁悬浮列车的车载端也无法像传统 ATP 和 ATO 那样进行常用制动控制，因此车载端只保留一个用于判断脱离磁悬浮状态且紧急制动的接口。

在车载控制系统中，列车的位置信息和运行速度是实施车载控制的基础。在高速磁浮领域，文献 [8] 提出多种列车定位测速方案，如泄漏电缆、涡流传感、交叉感应环线以及齿槽检测等。

真空管道超高速磁悬浮列车运行控制系统可以选择通过检测长定子直线同步电机的齿槽方式来实现列车的定位测速^[9]。齿槽检测定位方法的优势在于：齿槽有明显的磁路差异，更加方便检测；检测结构简单，不需要在线路上增加设备；很少受环境影响，免于维护。检测过程中，可直接累计齿槽个数得到运行距离，再将齿槽计数值除以所经历的时间，即可求出列车速度。

考虑到干扰问题以及检测与处理过程中存在误差等实际情况，传统 CBTC 列车和车车通信 CBTC 列车均采用应答器进行绝对位置信息校正，通过相对位置与绝对位置信息相互校正来消除定位误差。但是运行速度若超过 1 000 km/h，传统应答器则无法顺利读取位置信息。真空管道超高速磁悬浮列车可以参考既有磁浮系统，利用车载读码器读取地面标志板二进制信息来进行绝对位置矫正^[9]，从而实现类似传统铁路信号的应答器校正的功能。

综上，在真空管道超高速磁悬浮列车信号系统的车载控制系统中，传统车载 ATP 的自主定位功能和测速测距功能可被整合在一个测速定位子系统中（图 3）。此外，真空管道超高速磁悬浮列车速度监

表 1 3 种信号系统功能比较
Tab.1 Function comparison among three signaling systems

子系统	真空管道超高速磁悬浮列车信号系统	车车通信 CBTC 系统	传统 CBTC（FAO）系统
车载控制系统	车载测速定位、速度监控、紧急制动、车门控制及防护等	车载 ATP 系统增加了移动授权计算、道岔驱动进路办理、前后列车通信链路维护等功能；ATO 与传统 CBTC 系统类似	车载 ATP 用于列车测速定位、曲线计算、退行及溜逸防护；ATO 用于列车发车、精准停车及车门控制等
分区控制系统	线路防护、道岔设备保护、线路区段封锁、MA 计算、车辆列表管理、曲线计算与监控、牵引供电控制以及紧急停车等传统车载功能	OC 作为所有轨旁设备的驱动采集分区设备，大大简化了原来联锁和 ZC 的功能，仅保留列车列表维护以及车地通信功能，屏蔽门和道岔的状态和动作管理由车载 ATP 承担	ZC 用于移动闭塞计算，维护临时限速；联锁用于区段封锁、进路控制、道岔防护、计轴信号机接入
中央控制系统	运行调度、时刻表编辑和维护诊断、临时限速等功能与传统 ATS 类似	与传统 ATS 类似，主要增加了按照联锁进路表发送列车进路给车载 ATP 的功能	ATS 用于运行调度、时刻表编辑、维护诊断及临时限速等

控功能和车门控制功能与传统 CBTC 列车的几乎没有区别，本文不再赘述。

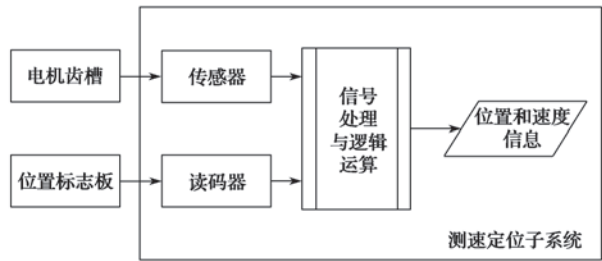


图 3 真空管道超高速磁悬浮列车的车载测速定位子系统

Fig. 3 Location and speed detection system of vacuum pipeline ultra high speed maglev train

针对传统 CBTC 列车和车车通信 CBTC 列车，国内厂商对车载设备的普遍设计方式是车头和车尾分别设置两套车载设备，同时只有一套设备进行控车作业；在折返换端场景下，通过首尾通信切换控制端车载设备。在真空管道超高速磁悬浮列车车载控制系统中，由于车载应答器传输模块（balise transmission module, BTM）被取消，其牵引和制动控制也从车上被转移到地面，因此车辆换端时间大大缩短；同时，由于采用 GoA4 级全自动无人折返方式，因此无须司机折返跑，减少了人工耗时。在方案设计时，有充分的条件和理由在一列车上只部署一套车载设备，列车换端时不需要再切换车载控制设备，只需要切换相应的首尾端人机界面单元（driver machine interface, DMI）进行显示。真空管道超高速磁悬浮列车车载控制系统布置示意图如图 4 所示。

由于减少了一套车载控制设备，这种部署带来的成本优势显而易见；同时，由于首尾都有车载子系统的装置，因此列车的完整性数据可以从监控内部设备通信状态获取。在进行重联或拖挂时，

属于不同列车的车载设备可以通过重联信号线进行协商，从而自动修改车长参数，决定主控车载设备归属；同时结合车地通信交互，执行正常的控车作业。

3 分区控制系统

真空管道超高速磁悬浮列车运行控制系统地面信号系统包括 DCS 和 CS。DCS 不仅需要完成以往联锁列控一体化的功能，还要承担 ATO 的核心功能。如表 2 所示，DCS 系统的主要 SIL4 安全等级功能包括线路防护及进路管理、轨旁设备采集驱动（磁浮的变轨速度慢）、道岔及侧冲防护（磁浮道岔设备昂贵）、移动授权计算、列车区段粗定位（类似轨道电路，磁浮的原理决定了地面设备是知晓列车区段位置的）、临时限速下达以及牵引供电管理；主要 SIL2 安全等级功能即为原车载 ATO 功能，包括列车启停、按照时刻表行车、车门控制及跳停扣车等。

表 2 DCS 系统功能模块

Tab. 2 Function modules of decentralized control system

功能模块类别	安全等级	源自传统 CBTC 设备类别
线路防护及进路管理	SIL4	地面联锁
轨旁设备采集驱动	SIL4	地面联锁
道岔及侧冲防护	SIL4	地面联锁
移动授权计算	SIL4	地面 ZC
临时限速下达	SIL4	地面 ZC
牵引供电管理	-	非信号系统范畴，原来属于车载网络控制系统
自动驾驶	SIL2	车载 ATO
车门控制	SIL2	车载 ATO

以车门联动控制场景为例，DCS 设备可以直接控制站台屏蔽门，而车门开闭的执行单元由车载系统承担。实际的进站停车开门逻辑在 DCS 设备中的

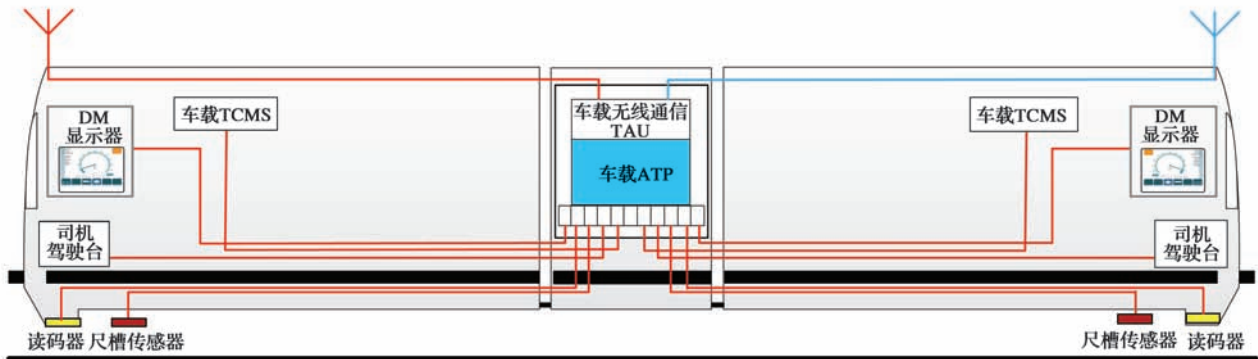


图 4 真空管道超高速磁悬浮列车车载控制系统布置示意图

Fig. 4 On-board control system of vacuum pipeline ultra high speed maglev train

过程如下：中央控制系统提前向分区控制系统发出门控计划；车载控制系统向分区控制系统报告停稳信息；分区控制系统判断满足停准、停稳等条件后，同时向车载控制系统和站台屏蔽门系统发送开门指令^[3]。同样，关门联动也遵照类似的逻辑。这与传统 CBTC 及车车通信 CBTC 的车门联动控制场景有较大区别。

对于高速磁浮系统，整个运行区间会被划分为多个供电分区。在一个供电分区下，只允许一列磁浮列车运行；当分区被任一列车占用时，后续列车将不允许进入^[4]。因此，真空管道超高速磁悬浮列车通常采用准移动闭塞进行追踪。之所以将列车控制和联锁系统整合为 DCS 设备，不仅仅是由于轨旁设备的减少降低了联锁的实现难度，同等性能的安全计算机平台可以支持移动授权（MA）计算这一传统列控设备的逻辑功能整合进入联锁设备。同时也可减少设备维护量，避免设备间通信异常而影响系统可靠性降低的问题。此外，DCS 系统对于新增牵引供电系统控制功能的整合，引入了显而易见的好处——区段列车占用情况更加便于 DCS 设备进行检测，因此取消了计轴或轨道电路等传统区段占用检测轨旁设备。理论上，这更加易于解决原来 ZC 对于区间非通信列车的计算和防护问题。

由于真空管道超高速磁悬浮列车速度超高，在平均运行速度下其单车紧急制动距离也会达到公里级，因此其站间距势必相对稀疏，故被定位为小密度、大间隔、低运力的“轨道+管道”交通。DCS 设备的间距不仅取决于列车站间距，更取决于轨旁设备的设计、安装和沿轨道布置线缆的成本。一般情况下，推荐的 DCS 设备部署密度也不会比每两台设备间隔 10 km 更为稀疏，其中轨旁设备的信号部分主要是道岔（因为取消了计轴和应答器、信号机），牵引供电部分主要是供电分区的规划和部署。

对于受 DCS 设备控制的列车自动化控制等级，可以只考虑联锁级别（固定闭塞）和 CBTC 级别（准移动追踪），不设计点式级别。实际上，从设计之初，真空管道超高速磁悬浮列车就不是以通勤为主要目的，而是以应急运输为主要目的。对于突发的大容量同目的地运输需要，其完全可以通过重联列车来实现瞬时运力的提高。因此，在实际运营中，联锁级别相比 CBTC 级别并不会明显降低整套系统的运营效率。综合考虑，实际运营中可能将更多地应用联锁级别的运行等级。这种情况下，一旦车地通信异常断开，对于列车授权行驶速度的影响也会相对

较小。

4 中央控制系统

中央控制系统^[3]具有 ATO 功能，与传统 ATS 具有较大差异，其基于既有产品进行开发修改难度较大。该中央控制系统和传统 ATS 的功能区别并不大，可以通过在传统 ATS 设备基础上进行升级优化而实现，但对外接口区别明显。传统 ATO 存在 ATS 与车辆之间的双向通信，所以每辆车都要和 ATS 通信以获得运行计划；真空管道超高速磁悬浮列车 ATO 存在于地面 DCS 中，且相邻 DCS 之间会通过地面有线传输链路进行通信，实际上 ATS 只需要将所有车的运行计划广播给所有的 DCS 即可，哪怕某一个 DCS 和 ATS 之间的链路中断，其也可通过相邻 DCS 获得列车的运行计划。

文献 [10] 创新性提出了“管-控-电一体化”优化框架，针对高速磁浮特点，兼顾节能因素，可以进行一体化设计并迭代优化运行图，直到获得最优运行图以及区间操纵策略。对于 GoA4 级的真空管道超高速磁悬浮列车信号系统，其 ATS 系统有必要扩展为行车综合自动化系统（train integrate automatic system, TIAS），以方便进一步接入全部轨旁弱电设备的维护和监测。

5 车地无线通信系统

信号系统对于真空管道超高速磁悬浮列车安全运行保障的实现，要依赖于列车-地面无线通信系统。随着 5G 通信技术的发展，旅客信息化服务系统也需要依赖大容量、高速移动的列车-地面无线通信系统。但传统的轮轨、磁浮高速铁路无线通信系统，比如 LTE-R, WLAN, GSM-R 等，在设计时并不支持速度超过 1 000 km/h 的高速移动和跨区切换，因此无法支撑超高速工况下的车地通信需求。

与此同时，如图 5 所示的漏波系统已在轨道交通专用无线通信中发挥重要的作用，近年来得到广泛应用^[11]。漏波系统一般沿车体运行方向铺设，具有与电波覆盖高度融合的特点，其结构与辐射特性对电波覆盖起着决定性作用，传统天线方式存在的“电波独自传播很长距离”的情况将不再出现。综上所述，相比“电波传播”在自由空间的无线系统，采用“电波覆盖”理念的真空管道漏波系统更适合于真空管道超高速磁悬浮列车通信系统。

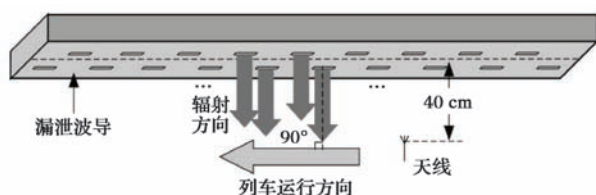


图5 真空管道超高速磁悬浮列车漏波通信系统

Fig. 5 Leaky wave communication system of vacuum pipeline ultra high speed maglev train

采用漏波系统提供电波覆盖有以下几点好处:

(1) 保障了高速移动情况下的可靠通信和安全通信;

(2) 漏波结构可以与真空管道的金属管壁一起实现一体化设计与加工, 不仅能够提高漏波系统的工作稳定性, 而且能降低其生产与铺设的成本;

(3) 对于广大旅客来讲, 可以方便地通过车载中继站接入漏波系统, 进而接入移动互联网, 在高速旅途中体验到高速上网的便捷服务。

6 结语

本文基于真空管道超高速磁悬浮列车应用场景, 提出一种不同于传统FAO和车车通信系统的新型真空管道超高速磁悬浮列车运行控制系统, 其大部分功能都可以通过传统CBTC各子系统的功能重组来实现。其测速定位系统以及可用于超高速度的漏波通信系统, 都已经有了较为成熟的应用经验。在现有技术支持下, 可以在传统CBTC系统或基于车车通信的CBTC系统的基础上裁剪既有ATP设备实现车载信号系统; 采用联锁列控一体化思路开发分区控制系统; 在传统ATS设备基础上升级优化实现中央控制系统, 进而开展真空管道磁悬浮超高速飞行列车通信和信号系统的设计研发和实验室验证。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会. 城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)接口规范-互联互通接口规范 互联互通系统总体要求: CZJS/T 0033-2015[S]. 北京: 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会, 2015.
- [2] 耿宏亮, 张超. 列控系统一体化设计分析构想[J]. 机车电传动, 2018(4): 47-49.

GENG H L, ZHANG C. Integrated Design Analysis and Proposition of Train Control System [J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(4): 47-49.

- [3] 吴丹. 高速磁悬浮列车运行控制与传统轮轨列车运行控制的比较[J]. 交通运输系统工程与信息, 2003, 3(4): 79-81.
- WU D. A Comparison between Operation Control Systems for High-Speed Maglev Transportation and for Conventional Railway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2003, 3(4): 79-81.
- [4] 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 W P, HU J, GAO Y. 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.
- [5] ES-AENOR. Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 2: Functional requirements specification: IEC/EN 62290-2-2014 [S]. Geneva: IEC, 2014.
- [6] 姜宏阔, 任颖. 车车通信CBTC系统对象控制器设计[J]. 控制与信息技术, 2018(3): 52-55.
- JIANG H K, REN Y. Design of the Object Controller for Vehicle-to-vehicle CBTC System [J]. Control and Information Technology, 2018(3): 52-55.
- [7] 郑艺, 胡云卿, 耿宏亮, 等. 车车通信CBTC系统区间追踪间隔研究[J]. 控制与信息技术, 2020(3): 81-83.
- ZHENG Y, HU Y Q, GENG H L, et al. Research on Interstation Tracking Interval of CBTC System Based on Train-train Communication[J]. Control and Information Technology, 2020(3): 81-83.
- [8] 郭小舟, 王滢, 王式雄. 高速磁悬浮列车定位测速系统[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(4): 455-459.
- GUO X Z, WANG Y, WANG S X. Location and Speed Detection System for High-speed Maglev Vehicle[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(4): 455-459.
- [9] 吴峻, 周文武, 李璐. 高速磁浮列车测速定位系统的研究[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(1): 109-114.
- WU J, ZHOU W W, LI L. Research on Speed and Position Detection System of High Speed Maglev Train[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(1): 109-114.
- [10] 赖晴鹰, 刘军, 许心越, 等. 中高速磁悬浮管一控一电一体化优化框架[C]//第十二届中国智能交通年会大会论文集. 常熟: 中国智能交通协会, 2017.
- [11] 刘留, 裴陈成, 李铮, 等. 真空管道高速飞行列车车地宽带无线通信关键技术的思考[J]. 铁道学报, 2019, 41(1): 71-79.
- LIU L, QIU C C, LI Z, et al. Thoughts on Key Technologies of Broadband Wireless Communication for High-speed Vacuum Pipeline Flying Train[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(1): 65-73.