

全速度谱系磁浮交通的技术发展与应用前景^{*}

龚俊虎^{1,2} 谢海林² 鄢巨平² 张家炳²

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都; 2. 中铁磁浮交通投资建设有限公司, 430060, 武汉//第一作者, 高级工程师)

摘 要 全速度谱系磁浮交通根据行车速度的不同分为中低速磁浮、中速磁浮、高速磁浮、超高速磁浮等 4 种类型。我国通过多条中低速磁浮试验线的工程化研发, 以及长沙磁浮快线、北京 S1 线的建设和运营, 全面掌握了中低速磁浮核心技术和系统集成技术, 具备了中低速磁浮专业化装备制造、工程建设与运营管理能力; 通过上海高速磁浮示范线的建设、运营以及后续一系列技术改进和自主创新, 具备了高速磁浮相关关键系统的国产化能力; 正在加速开展中速磁浮、超高速磁浮相关基础理论和试验研究工作。无论从国家发展战略还是从城镇化加速发展下的交通建设需求来看, 磁浮交通均具有巨大的创新空间和广阔的发展前景。

关键词 磁浮交通; 全速度谱系; 应用前景

中图分类号 U237

DOI:10. 16037/j. 1007 - 869x. 2020. 09. 014

Development and Application Prospect of Full-speed Spectrum Maglev Transportation Technology

GONG Junhu, XIE Hailin, YAN Juping, ZHANG Jiabing

Abstract According to the driving speed, the full-speed spectrum maglev transportation can be divided into medium and low speed maglev, medium speed maglev, high-speed maglev and super high-speed maglev four types. Through engineering research and development of some medium and low speed maglev test lines, especially the construction and operation of Changsha Maglev Express Line and Beijing S1 Line, China has comprehensively mastered the core technology and system integration technology of medium and low speed maglev, equipped with the ability of specialized equipment manufacturing, engineering construction and operation management of medium and low speed maglev. In the construction and operation of Shanghai High-speed Maglev Demonstration Line, also based on a series of subsequent technical improvements and independent innovation, China nowboasts of the localization ability of key

systems related to high speed maglev, and is accelerating the basic theory and experimental research works related to medium and super high-speed maglev. From both the perspective of national development strategy and the traffic construction demands under the accelerating development of urbanization, maglev transportation will have a huge space for innovation and broad development prospect.

Key words maglev transportation; full-speed spectrum; application prospect

First-author's address State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

1 全速度谱系磁浮交通的分类与适用范围

1.1 全速度谱系磁浮交通的分类

磁浮交通是利用磁场(电磁场、永磁场或混合磁场)的吸力或斥力实现非接触支撑、导向, 并利用直线电机实现驱动的轨道交通形式。全速度谱系磁浮交通按照行车速度划分为中低速磁浮、中速磁浮、高速磁浮、超高速磁浮 4 种类型, 如表 1 所示。

表 1 全速度谱系磁浮交通按行车速度分类表

设计速度/ (km/h)	分类	应用实例与试验方案
≤160	中低速磁浮	长沙磁浮快线、北京 S1 磁浮线、日本东部丘陵线、韩国仁川机场磁浮线
160 < · ≤250	中速磁浮	美国磁飞机 (Magplane) 永磁方案、M3
400 < · ≤600	高速磁浮	日本 MLX 超导磁浮列车、德国 TR 型磁浮列车
> 600	超高速磁浮	真空管道 + 超导或永磁电动悬浮

目前, 国内外普遍将速度不大于 160 km/h 的磁浮交通统称为中低速磁浮, 中低速磁浮在中国、日

^{*} 中国铁建股份有限公司科技重大专项经费计划项目 (2018-A01)

本、韩国均已建成商业运营线^[14]。中速磁浮的设计速度范围在 160 ~ 250 km/h 之间,美国的“磁飞机(Magplane)”永磁方案^[5]即属于中速磁浮交通范畴,目前在中速范围内尚未研发出可商业化应用的磁浮列车。高速磁浮的速度范围在 400 ~ 600 km/h 之间,典型代表是德国的 TR 型常导磁浮列车和日本 MLX 型超导磁浮列车^[6-7](两者最大运行速度均在 500 km/h 以上)。超高速磁浮的目标速度定义在 600 km/h 以上,最高运行速度可达 1 000 km/h 以上。受气动阻力、运行噪声、悬浮间隙大小及悬浮系统稳定性等因素控制,超高速磁浮一般采用“真空管道+超导或永磁体电动悬浮”方案,目前中国、美国均在开展相关理论和工程化应用研究。

磁浮交通还可根据悬浮原理、驱动方式、线圈导体属性等不同角度分为不同的类型:根据悬浮原理的不同可以分为电磁悬浮(EMS)和电动悬浮(EDS)两种类型^[8];根据直线电机驱动方式的不同可分为短定子 LIM(直线感应电机)和长定子 LSM(直线同步电机)^[9];按线圈导体属性的不同分为常导磁浮和超导磁浮。

1.2 全速度谱系磁浮交通的适用范围

相比较于其他轨道交通制式,全速度谱系磁浮交通的速度适应范围更大,既可用于中短途运输,也可以实现远距离快速运输。

设计速度 100 ~ 160 km/h 的中低速磁浮交通具有安全、舒适、环保、节能等优点,既适用于高峰小时运量低于 3 万人、以高架为主、城区人口 300 万以上的超大、特大和大城市^[10-11]郊区线、机场或高铁快线、新城与中心城区的连接线、市域快线等轨道交通线路,也适用于城区人口 300 万以内的大城市和中等城市的城区轨道交通网,还适用于较短距离的旅游轨道交通线。如武汉、成都、长沙等市的环城区轨道交通、机场快线、市域快线,襄阳、荆州、湘潭、株洲等市的市区轨道交通,清远、张家界景区等的旅游轨道交通等均可采用中低速磁浮交通。

设计速度 160 ~ 250 km/h 的中速磁浮交通适用于中等城市之间、大城市之间、特大和超大城市与卫星城市之间以及城市圈内的较长距离的城际轨道交通运输,同时还适用于较长距离的旅游轨道交通运输。如武汉城市圈、长株潭城市圈等轨道交通,张家口市、延安市等城市的全域旅游交通。

设计速度 400 ~ 600 km/h 高速磁浮交通具有速度快、准点、安全、舒适、便利等优势,将与航空业形

成竞争和互补态势,适用于超大城市、特大城市、省会城市之间的长大干线交通运输,如沪宁、沪杭之间的快速客运交通。

设计速度 600 km/h 以上的超高速磁浮适用于超大、特大城市之间点对点的长距离超快速交通运输,如成渝、沪杭之间的快速客运交通。

2 全速度谱系磁浮交通技术发展现状

面向工程化应用的磁浮交通技术研究始于 20 世纪 60 年代的德国和日本,20 世纪 70 年代以后,中国、美国、韩国、英国等国家相继开展了磁浮交通运输系统的研发,德国和日本在磁浮交通工程化应用领域长期处于领先地位。我国从 20 世纪 80 年代初期开始磁浮交通技术的研究,在中低速磁浮、高速磁浮交通领域陆续取得了一系列科研成果。2015 年以来,我国在国际磁浮交通技术领域的地位持续提升。以下分中低速磁浮、中速磁浮、高速磁浮、超高速磁浮 4 种类型对全速度谱系磁浮交通技术分别介绍其发展现状。

2.1 中低速磁浮交通技术发展现状

中低速磁浮列车最早由日本借鉴德国的磁浮技术开发出来。在 1975—1995 年的 20 年时间里,日本通过不断升级改造 HSST 系列(HSST-01 ~ HSST-05、HSST-100S 和 HSST-100L)磁浮列车,实现了从长 4 m 的试验列车到 2 节编组、每节长 14.4 m 的商业运营样车的中低速磁浮列车研发历程,并于 2005 年日本爱知世博会期间建成开通世界第一条中低速磁浮运营线——日本名古屋东部丘陵线 TKL,最高运营速度 100 km/h^[3],到目前已商业化运营 14 a。韩国学习借鉴日本中低速磁浮技术,于 2005 年成功研制出了可商业运营的磁浮列车,最高速度可达 110 km/h,并于 2016 年建成仁川机场示范运营线正式载客运行。另外,韩国还在永宗岛、大田市等地规划了中低速磁浮线,并通过研发不断升级改造中低速磁浮相关技术。美国、英国等国家也开展过中低速磁浮交通的研究工作,但目前均无商业运营线。

我国于 1999 年正式启动中低速磁浮交通工程化应用的研发工作,并陆续在上海、唐山、株洲建成了中低速磁浮试验线^[12],2009 年成功研制实用型磁浮列车,掌握了中低速磁浮核心技术和系统集成技术,磁浮车辆具备完全自主知识产权,形成了完整的、专业化的工程技术实施能力。2016 年建成国

内首条中低速磁浮运营线——长沙磁浮快线;2017年底,国内第二条中低速磁浮商业线——北京 S1 线开通运营;同期,第一条磁浮旅游专线、国内第三条中低速磁浮线——清远磁浮旅游专线正式开工建设,其技术在长沙磁浮快线的基础上进行了一系列升级改造。2018 年以来,国内多家企业和高校正联合研制新一代速度 160 km/h 中低速磁浮列车^[13],并将于 2020 年完成 160 km/h 达速试验测试。随着更高速度的常导短定子中低速磁浮列车研制成功以及配套桥梁、轨道技术的开发,中低速磁浮交通技术正在向更加安全、舒适、经济的方向发展。

2.2 中速磁浮交通技术发展现状

中速磁浮的设计速度在 160 ~ 250 km/h 之间,目前国内外各研究机构提出的中速磁浮交通系统方案各有不同,大部分方案采用车载永磁体的混合悬浮技术和长定子 LSM 驱动技术。

在国外,主要有美国和加拿大关注于中速磁浮交通的研发。美国的研究人员提出了两种不同的中速磁浮交通系统方案:一种是 1972 年由麻省理工学院提出的磁飞机(Magplane)永磁方案^[14],目前已进行了 5 代车比例模型试验;另一种是美国磁动力公司(MagneMotion)提出的 M3 方案^[5],目前已进行单悬浮架试验。

在国内,中速磁浮交通的研发已列入国家“十三五”先进轨道交通重点专项,该科研计划中的“中速磁浮交通系统关键技术研究”课题技术路线主要包括 2 种方案:一种方案是将常导高速磁浮技术优化改进后降速应用于 200 km/h 左右中速磁浮交通;另一种方案是利用现有中低速磁浮交通的悬浮架结构,改用长定子 LSM 替代短定子异步感应电机进行驱动。2018 年 5 月,国内多家企业和高校联合研制的中速磁浮列车工程样车成功在试验线上进行了运行试验,列车采用“长定子永磁直线同步牵引+永磁电磁混合悬浮”技术方案,预期速度可达 160 km/h,为我国发展 200 km/h 中速磁浮交通技术奠定了基础。

2.3 高速磁浮交通技术发展现状

高速磁浮的速度可达 400 ~ 600 km/h,目前国外掌握高速磁浮交通技术的国家为德国和日本,其中,德国为 TR 系统,日本为 MLX 系统。由于要获得 400 km/h 以上的速度,TR 系统和 MLX 系统均采用非车载(位于轨道结构上)动力装置——长定

子 LSM,但是两者的悬浮方式却各有不同:TR 系统采用的是 EMS(电磁吸力型悬浮),MLX 系统采用的是 EDS(电动悬浮),这也导致德国和日本的高速磁浮技术有本质的区别。

德国自 1971 年研制成功世界第一辆磁浮列车以来,不断改进其 TR 磁浮交通系统^[15-17]的性能,经历了从 TR01 到 TR08 八代车的升级改造,达到了 430 km/h 的运行速度。2009 年,TR09 高速磁浮试验列车最高试验速度达到了 550 km/h。日本在低温超导高速磁浮技术方面独树一帜,2015 年日本山梨低温超导磁悬浮试验线运行的列车(MLX 系统)创造了 603 km/h 的地面轨道交通运行的最高速度世界纪录。日本磁悬浮中央新干线已经开工建设,最高速度按 505 km/h 设计,其中东京品川至名古屋区间计划于 2027 年开通运营。

我国通过引进德国磁浮轨道技术,并进行了一系列技术攻关和自主创新,于 2002 年底建成上海高速磁悬浮示范线,最高运营速度达 431 km/h。目前,我国已具备高速磁浮线路轨道系统的国产化能力。通过同济大学高速磁浮试验线建设、高速磁浮国产化样车研制以及牵引/运控仿真系统研究,基本掌握了高速磁浮交通系统车辆、牵引供电、运行控制关键技术及系统集成技术。国家铁路局 2019 年 9 月发布的《磁浮铁路技术标准(试行)》制定了高速磁浮相关技术标准,将于 2020 年 1 月开始实施。国家重点研发专项“高速磁浮交通系统关键技术”成功研制的速度 600 km/h 高速磁浮交通试验样车已于 2019 年 5 月下线,试验样车目前正在高速磁浮试验线上开展系统测试,为我国高速磁浮交通的进一步发展奠定了坚实基础。

2.4 超高速磁浮交通技术发展现状

20 世纪 60 年代,美国麻省理工学院的研究人员提出了建设真空管道磁浮线路的设想,美国机械工程师 Daryl Oster 于 1999 年获得了真空管道运输系统发明专利,2013 年,美国的 Elon Musk 提出了超高速真空管道运输系统(Hyperloop)方案。2016 年 5 月,美国超级高铁公司首次对管道运输中的推进系统进行公开测试,试验速度达到 186 km/h。2017 年 7 月,Hyperloop One 进行了一次最新实测,管道超级高铁最高速度达到 320 km/h。这使得超高速真空管道交通技术概念在全球范围内产生了轰动效应。2018 年底,美国 HTT 公司正在准备开展直径 4 m 的全尺寸低真空管道环境和悬浮技术

的测试工作。

我国早在 20 世纪 70 年代就对美国科学家提出的真空管道运输系统设想作过报道。2004 年 1 月,西南交通大学在国际上首次提出速度 600 km/h 及以上载人超高速真空管道高温超导磁悬浮列车技术方案。2014 年 6 月,西南交通大学研制成功世界首条真空管道高温超导磁悬浮车环形试验平台,依托该试验线进行了空气动力学、气动热力学、驱动方案等大量低真空管道磁浮交通系统的基础性研究工作。目前,中国航天科工集团、中车集团也在开展低真空管道超导磁悬浮技术研发。

3 磁浮交通技术应用前景分析

3.1 国家重视磁浮交通技术的发展

党的十九大报告提出了交通强国战略,《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》指出,构建速度 200 km/h 及以下中低速磁悬浮系统的设计、制造、试验、检测技术平台。2016 年中低速磁浮交通列入“十三五”国家重点研发计划,以促进中低速磁浮交通系统的技术创新和工程化示范。2017 年 11 月,国家发展和改革委员会印发《增强制造业核心竞争力三年行动计划(2018—2020 年)》,明确将磁浮轨道交通作为新型轨道交通提升至国家战略发展层面,并纳入国家重点产业发展任务中。要求加快研制速度 160 km/h 中速磁悬浮列车等自主化产品及核心系统部件。2019 年 9 月,《交通强国建设纲要》提出针对速度 600 km/h 高速磁浮交通系统、真空管道高速列车等技术开展研发。因此,从国家发展战略来看,全速度谱系磁浮交通的科技研发和产业发展均受到国家层面的重视,具备较好的发展前景。

3.2 磁浮交通具有一定的替代优势

中低速磁浮交通具有选线灵活、绿色环保、安全可靠、乘坐舒适性高、经济效益好等特点,在适用范围内可以替代地铁、轻轨、跨座式单轨等其他城市轨道交通制式。中速磁浮交通在环境要求较高的城际轨道交通运输方面与传统轮轨制式具有一定的替代优势。高速、超高速磁浮交通具有速度快、准点、安全、舒适、便利等优势,可与传统轮轨高速铁路、航空业形成竞争或互补。

3.3 磁浮交通市场需求前景广阔

随着中国城镇化进程的不断推进,国家将更加大力地支持公共交通的建设和发展。截至 2018 年底,全国城区人口达 100 万以上的城市共有 88 个,

但具备修建地铁的大城市仅约 30 余个,其他城市在满足国家政策的前提条件下基本以修建中运量轨道交通系统为主,适合采用中低速磁浮交通制式。此外,全国共有国家级 5A 旅游景区 259 个,随着旅游业的快速发展,中低速磁浮轨道交通也将成为旅游景区的热门交通方式之一。因此,中低速磁浮轨道交通在城市轨道交通、旅游交通和市域轨道交通中的发展潜力巨大,中速磁浮有望在城际轨道交通建设中发挥补充作用。

高速磁浮交通因其准点、安全、快速、舒适、便利(站点能进入市区)等特点,将填补航空与高铁之间的速度空档,有望在大型城市之间建成多条商业运营线。

综上所述,全速度谱系磁浮交通为城镇化战略提供了轨道交通支撑,解决了传统轨道交通振动和噪声问题,延伸了传统轨道交通产业链,未来发展前景非常广阔。

4 结语

磁浮交通具有速度适应范围大、性价比高、绿色环保、运行安全可靠等诸多优点,既可用于中短途运输,也可以实现远距离快速运输。全速度谱系磁浮交通根据行车速度的不同可以分为中低速磁浮、中速磁浮、高速磁浮、超高速磁浮 4 种类型。我国已全面掌握了中低速磁浮、高速磁浮核心技术和系统集成技术,具备了专业化装备制造、工程建设与运营管理能力,正在加速开展中速磁浮、超高速磁浮相关基础理论和试验研究工作。在中低速磁浮交通和常导高速磁浮交通领域,我国已处于世界领先地位;在中速磁浮交通和高温超导磁浮交通领域,我国的研究已达世界先进水平。无论从国家发展战略来看,还是从我国城镇化加速发展下的交通建设需要来看,磁浮交通均具有巨大的创新发展空间和广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 曹健,翁振松,姜松英,等. 国外磁悬浮交通的发展趋势及其启示[C]//中国科学技术协会. 第十七届中国科协年会分 7: 综合轨道交通体系学术沙龙论文集. 北京:中国科学技术协会,2015:1.
- [2] 刘卫东. 日本 Linimo 磁浮线的技术特点和运行情况[J]. 城市轨道交通研究,2014(4):133.
- [3] 张志洲,龙志强. 日本东部丘陵线磁悬浮系统技术综述[J]. 国外铁道车辆,2005(6):7.

(下转第 69 页)

络的方式。但在实际工程实施时,由于LTE核心网线路接口一般在控制中心,为了统一接口及便于维护,其他子系统的线路接口一般也在控制中心实施及预留,此时要在既有线重新敷设延伸段至控制中心的光缆,这将增加延伸段接入既有线的影 响及建设成本。同时,当正线至控制中心通道故障时,延伸线与既有线的站场复示信息、列车信息、控制命令及反馈等都将无法传达,虽然这也意味着无线网络无法正常使用,只能点式运行,但此时维持点式功能的接口也将失效。

延伸段采用互联互通方案接入,当出现新增列车或电子地图等公用数据变化时,会导致两段的系统要分别进行对应修改,软件修改的工作量成倍增加。同时,由于采用两家不同厂家的设备,备品备件无法综合备用,维修维护的要求也有一定的区别,对于运营维护来说较为不便。

延伸段采用不同厂家的设备接入既有线虽然便于业主进行招标,但从技术方案上有可能会采用重复设备,额外的接口设备及接口服务等均会提高项目成本,因此,此方式是否能使工程造价更为合理需根据具体项目进行判断。

3 结语

采用满足互联互通标准的不同厂家设备作为延伸线的信号设备选型方案,存在着延伸线和既有线结合度降低、维护相对不便、接口协调工作量、工

程实施工作量相比较多等缺陷,同时需充分考虑接口风险可控的问题。与传统方案相比,互联互通方案有利于引入竞争,同时也是信号系统发展的趋势,存在的问题在各方共同努力下也是可解决的,而且随着互联互通标准应用经验的进一步积累及标准的进一步优化和深化,相关问题在未来必将会有更妥善的解决方案。综上所述,在支持互联互通标准信号系统的既有线上,采用互联互通信号系统作为延伸线招标实施的方案是基本适用的,同时应根据具体线路的条件确定采用的具体方案。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通系统规范:T/CAMET 04010[S]. 北京:中国铁道出版社,2018.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通接口规范:T/CAMET 04011[S]. 北京:中国铁道出版社,2018.
- [3] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通工程规范:T/CAMET 04013[S]. 北京:中国铁道出版社,2018.
- [4] 重庆市住房及城乡建设委员会. 重庆轨道交通列车控制系统(CQTC)标准:DBJ 50T/-250—2016[S]. 重庆:重庆市建设技术发展中心,2016.
- [5] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通车地综合通信系统(LTE-M)接口规范第2部分:核心网间数据接口:T/CAMET 0406.2[S]. 北京:中国铁道出版社,2018.

(收稿日期:2018-11-19)

(上接第64页)

- [4] KIM K J, HAN J B, HAN H S, et al. Coupled vibration analysis of maglev vehicle-guideway while standing still or moving at low speeds [J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53 (4):587.
- [5] 李云钢,常文森,闫宇壮. 美国新型结构磁悬浮交通技术与比较[J]. 机电传动,2006(3):6.
- [6] 翟婉明,赵春发. 磁浮车辆/轨道系统动力学(I):磁/轨相互作用及稳定性[J]. 机械工程学报,2005(7):1.
- [7] 翟婉明,赵春发. 磁浮车辆/轨道系统动力学(II):建模与仿真[J]. 机械工程学报,2005(8):163.
- [8] 王延安,陈世元,苏战排. EMS式与EDS式磁悬浮列车系统的比较分析[J]. 铁道车辆,2001(10):17.
- [9] 魏庆朝,冯雅薇,施翊. 直线电机交通模式及技术经济特性[J]. 都市快轨交通,2004(1):48.
- [10] 戚伟,刘盛和,金浩然. 中国城市规模划分新标准的适用性研

究[J]. 地理科学进展,2016,35(1):47.

- [11] 王雪芹,王成新,崔学刚. 中国城市规模划分标准调整的理性思考[J]. 城市发展研究,2015,22(3):113.
- [12] 蔡文锋,徐锡江,吴承锦,等. 株洲中低速磁浮试运线轨道设计关键技术研究[J]. 铁道标准设计,2015(6):40.
- [13] 宗凌潇. 时速140 km新型中低速磁浮列车走行机构研究分析[D]. 成都:西南交通大学,2016:2.
- [14] 张瑞华,刘育红,徐善纲. 美国Magplane磁悬浮列车方案介绍[J]. 变流技术与电力牵引,2005(5):40.
- [15] 刘华清. 德国磁悬浮列车Transrapid[M]. 成都:电子科技大学出版社,1995:10.
- [16] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003:2.
- [17] 魏庆朝,孔永键. 磁浮铁路系统与技术[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003:3.

(收稿日期:2019-09-20)