

磁悬浮轨道交通中的磁悬浮导向方式研究综述

唐文冰^{1,2,3}, 肖立业^{1,2,3}, 王 粟^{1,2,3}, 张京业^{1,2}

(1.中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2.中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190;
3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 更快速、安全、舒适和环保的出行方式一直是人类所追求的。在这一大背景下,磁悬浮轨道交通引起了大众广泛关注和学界的深入研究。本文试图对磁悬浮轨道交通技术中磁悬浮导向方式及其对应车轨结构的研究现状做一个全面的总结,提出两种新型混合式磁悬浮导向车轨结构,并对磁悬浮导向方式的未来发展趋势进行展望。首先,本文概述了现有各类磁悬浮轨道交通技术的研究现状。然后,对磁悬浮轨道交通技术中各种磁悬浮导向方式进行了归纳总结,分析了各种磁悬浮导向方式的原理结构和特点;在此基础上,以七条磁悬浮线(两条商业运营线,五条实验/示范线)为例,对各种磁悬浮导向方式进行了技术特征总结和对比。接着,提出了基于永磁斥力式和电磁吸力式混合磁悬浮导向的新型车轨结构、基于永磁斥力式和超导钉扎力式混合磁悬浮导向的新型车轨结构,并分析论述了两种新型车轨结构的原理和优势。最后,展望了磁悬浮轨道交通技术中磁悬浮导向方式的未来发展趋势。

关键词: 磁悬浮轨道交通; 磁悬浮导向方式; 电磁悬浮; 永磁悬浮; 车轨结构

DOI: 10.12067/ATEEE2108022

文章编号: 1003-3076(2022)05-0045-16

中图分类号: TM921

1 引言

21世纪以来,随着社会发展和人们对高速度和效率的追求,高铁、地铁等轨道交通技术成熟应用,极大地方便了人们的交通需求。然而,轮轨交通中轮毂和轨道之间的机械接触,限制了轮轨交通的进一步提速,也造成了巨大的能量损耗和噪音。而磁悬浮轨道交通技术恰好实现了轨道和列车之间的无机械接触,也正是因为这一技术特点,磁悬浮轨道交通技术引起了大众广泛关注和学术界的深入研究。

德国最早进行磁悬浮技术研究,并创造了磁悬浮列车发展史上多个里程碑^[1,2]。1922年,德国人赫尔曼·肯佩尔最先提出了电磁悬浮的原理,并于1934年获得了世界范围内磁悬浮技术领域内的第一个专利^[3]。1970年以后,德国、日本、英国、加拿大、美国、前苏联和中国相继开展了磁悬浮轨道交通技术的研发工作^[4,5]。磁悬浮轨道交通技术与轮轨

交通技术的最大区别是列车和轨道之间的无机械接触,故其具有六大优势:①无接触摩擦,且运行能耗低。300 km/h速度下高速磁悬浮交通的单个座位能耗要比轮轨交通约低30%^[6];②爬坡能力强,且其转弯半径小。同等距离下磁悬浮交通的爬坡能力可达10%,比有轨交通高6%;且同一速度下磁悬浮交通的转弯半径更小,易于路线选定^[6];③安全性好,且舒适度高。电磁悬浮列车的磁悬浮车体振动小,且采用全抱轨结构,安全性和舒适度更高;德国专家评价TR系列磁悬浮列车的安全性是轮轨列车的250倍^[7,8];④磁悬浮列车的速度设计可调范围大,且适应性强。中低速磁悬浮可用于城郊之间的短途交通,高速磁悬浮可为远距离客运提供更高效率的解决方案^[7,8];⑤污染小、环境友好程度高。磁悬浮轨道交通是基于磁悬浮技术实现列车和轨道之间的无接触式运行,故磁悬浮轨道交通的碳排放量和噪音远低于现有有轨交通^[8];⑥系统维护费用低。磁

收稿日期: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(51721005)

作者简介: 唐文冰(1995-),男,湖南籍,博士研究生,研究方向为磁悬浮技术、磁悬浮动能储能、电网惯量支撑;

肖立业(1966-),男,湖南籍,研究员,博士生导师,博士,研究方向为智能电网、新型机械储能、超导电力应用。

悬浮轨道交通正常工作时轨道、受电弓与列车之间无机械接触,系统的维护费自然比较低^[8]。

磁悬浮导向方式是磁悬浮轨道交通技术的核心,也是保证磁悬浮车和导轨无机械接触的技术基础。不同磁悬浮导向方式决定了磁悬浮轨道交通系统的磁悬浮高度、载重比、控制方法、运行损耗、造价比等关键技术指标。因此,研究磁悬浮轨道交通技术的磁悬浮导向方式,对磁悬浮交通的研发和推广应用具有重要意义。

2 磁悬浮轨道交通技术概述

2.1 基本原理和分类

磁悬浮轨道交通在轮轨交通的基础上去掉或弱化了轮轨系统的作用,基于磁极之间“同性相吸,异性相斥”的原理,利用电磁、超导或永磁等磁力克服列车重力或导向力的作用,使磁悬浮列车和轨道之间达到无明显机械接触式(有部分类型磁悬浮列车会有供电弓形轨或导向轮方面的轻微机械接触)的平衡状态,且一般采用直线电机进行驱动^[9]。

磁悬浮轨道交通系统主要由轨道、磁悬浮列车、磁悬浮导向系统、电机驱动系统、牵引供电系统、电力电子装置、集中控制系统组成^[10,11]。根据磁悬浮原理的不同,磁悬浮交通技术主要可分为常导电磁悬浮(ElectroMagnetic Suspension, EMS)、电动磁悬浮(ElectroDynamic Suspension, EDS)、高温超导钉扎磁悬浮(High-Temperature Superconductivity Pinning magnetic levitation, HTSP maglev)、永磁与电磁混合悬浮(Permanent Magnetic and ElectroMagnetic hybrid Suspension, PM-EMS)等;其中,EDS又可分为超导式电动磁悬浮(SuperConductivity EDS, SC-EDS)和永磁电动磁悬浮(Permanent Magnet EDS, PM-EDS)^[9,12]。根据用途的不同,磁悬浮轨道交通技术可分为在载客磁悬浮和货运磁悬浮。根据控制方式的不同,磁悬浮轨道交通技术分为主动式磁悬浮和被动式磁悬浮,也称为有源式磁悬浮和无源式磁悬浮^[13]。主动式磁悬浮是指系统通过连续或断续地测量磁悬浮间隙的大小,通过某个有源变量来控制磁悬浮力,使磁悬浮列车维持在一个无接触的磁悬浮稳定范围内,如EMS和PM-EMS;而被动式磁悬浮不需要通过控制某个有源变量来控制磁悬浮力,磁悬浮列车能实现稳定磁悬浮,如EDS和HTSP maglev。

2.2 六类典型磁悬浮轨道交通发展现状综述

按2.1节中的磁悬浮原理分类,下面分别对

EMS、EDS(SC-EDS、PM-EDS)、HTSP maglev和PM-EMS这四大类磁悬浮轨道交通的发展历程和研究现状进行简述。另外,考虑到两类特殊磁悬浮轨道交通(暗轨/吊轨磁悬浮系统,其特殊之处在于用机械导向轮来实现稳定导向,采用传统旋转电机磁驱动;超级高铁,其特殊之处在于并不是所有磁悬浮方案都是磁悬浮,还有气动磁悬浮方案)的核心技术也是磁悬浮技术,与上述四大类磁悬浮轨道交通有类似共通之处,本文也对这两种特殊的磁悬浮轨道交通进行总结简述。

2.2.1 EMS型磁悬浮

EMS型磁悬浮在轨道交通上的典型应用是EMS型磁悬浮列车,其主要类型有德国TR系列高速磁悬浮列车、日本HSST系列中低速磁悬浮列车、中国高速和中低速磁悬浮列车和韩国中低速磁悬浮列车。其中,高速磁悬浮列车的时速一般大于400 km/h,中低速磁悬浮列车的时速一般小于120 km/h。目前,时速在120~400 km/h之间的中高速磁悬浮尚未有工程应用,而高铁刚好在这一时速范围有较大的竞争力^[13]。

经过半个世纪的发展,德国磁悬浮列车从MBB原理车、TR04样车发展为TR08型和TR09型商业样车,运行速度也从100 km/h提升到500 km/h,形成了TR系列常导高速磁悬浮列车体系^[10,14]。同时,日本为解决市区与郊区之间的短途客运问题,在研制高速磁悬浮列车的同时,先后研发了HSST-01至HSST-05型磁悬浮列车,其最高运行速度可达100 km/h,形成了HSST系列常导中低速磁悬浮列车体系^[10,15]。韩国从1985年开始自主开发磁悬浮列车技术,韩国机械材料协会、韩国现代Hyundai、韩国大宇Daewoo和韩国轨道公司ROTEM,先后开发了HML型磁悬浮列车、UTM型磁悬浮列车和MLV型磁悬浮列车,均为EMS中低速磁悬浮列车^[10,16]。我国磁悬浮轨道交通的研究工作起步较晚,20世纪80年代后期开始研究,但发展速度较快。20世纪末,西南交通大学、国防科学技术大学、中国科学院电工研究所和中国铁道科学研究院联合攻关,相继研发了CMS03型实验样车、CMS03A型工程样车、CMS04实用性工程化样车,运行速度达到110 km/h,形成了具有自主知识产权的CMS系列常导中低速磁悬浮列车体系^[10,17]。同时在20世纪初,我国引入了TR08磁悬浮技术在上海投入商业运营,最高运行速度可达430 km/h^[18]。在此基

础之上,我国开始了常导高速磁悬浮列车的研究,并于2019年青岛四方宣布具有自主知识产权的高速磁悬浮列车研究取得了突破性进展,其设计时速为600 km/h。2021年4月,全球首套内嵌式磁悬浮轨道交通系统在成都亮相,其测试时速达169 km/h。2021年7月,我国具有完全自主知识产权的时速600 km/h高速磁悬浮交通系统在青岛下线。

除德国、日本、韩国和中国四个国家外,英国、加拿大、美国、前苏联等国家从20世纪中期起,均开展了EMS磁悬浮列车技术的研究^[19,20]。然而到目前为止,我国在2002年底引进德国磁悬浮技术于上海建成的国内首条高速磁悬浮线,仍是全球唯一商业运营的EMS高速磁悬浮线路。目前全球范围内仍在运营的EMS中低速型磁悬浮线一共有四条,分别是中国长沙磁悬浮线(其最高运行速度为100 km/h,2021年7月计划提速至140 km/h)、中国北京S1号地铁线(其最高运行速度为80 km/h)、日本名古屋磁悬浮线(其最高运行速度为100 km/h)和韩国仁川国际机场线(其最高运行速度为110 km/h)^[10]。

2.2.2 EDS型磁悬浮

EDS型磁悬浮列车主要包括SC-EDS型磁悬浮列车和PM-EDS型磁悬浮列车两种,下面分别对这两种EDS型磁悬浮列车的研究现状进行简述。

(1) SC-EDS型磁悬浮列车

1962年,日本开始SC-EDS磁悬浮技术的研究,研发了ML100磁悬浮原理车,其载人测试时速60 km/h^[21]。1979年日本国铁研发了ML500R磁悬浮试验车,并在宫崎试验线上试跑的空载时速为517 km/h,创造了当时的世界纪录^[9]。1980年,日本国铁将宫崎试验线的T型轨换成了U型轨,并研发出MLU001磁悬浮样车(其载人测试时速为400 km/h)和MLU002N磁悬浮样车(其空载测试时速431 km/h)^[22,23]。1997年,研制出准商业磁悬浮列车MLX01型样车,并在山梨磁悬浮线上进行了载人实验,最高载人测试时速为531 km/h,并于1999年完成时速552 km/h的载人实验和时速1 003 km/h的会车实验^[24]。2003年改进后的MLX01-901样车完成时速581 km/h的载人实验和时速1 026 km/h的会车实验,再次刷新世界纪录^[25]。2012年,日本东海铁路公司公布了从MLX01样车基础之上研发的L0系列样车,并计划将其应用在中央新干线上商业运营,并于2015年在山梨磁悬浮线上载人测试,其时速达590 km/h,载

白鼠测试时速达603 km/h^[26,27]。2014年,日本政府宣布计划于2027年建成东京到名古屋的商业磁悬浮线,计划速度为505 km/h,建成后东京到大阪可在1 h之内直达^[9]。另外,随着高温超导材料的发现和液氮制冷技术的快速发展,日本2000年左右将山梨磁悬浮线上的车载低温超导磁体线圈替换成高温超导Bi系线圈,实验测试速度达553 km/h,但最后中央新干商业磁悬浮线并未采用高温超导Bi系线圈磁体方案^[28]。

(2) PM-EDS型磁悬浮列车

PM-EDS型磁悬浮在轨道交通方面的典型应用是Magplane磁悬浮(也称为磁悬浮飞机)和Inductrack磁悬浮。

磁悬浮飞机不是通常意义上的飞机,是一种新型永磁电动高速轨道交通。1960年,美国科学家Powell和Danby提出了永磁电动式磁悬浮列车方案^[29]。随后,美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)在此基础上提出了Magplane的概念,车载磁体用新型永磁材料制作而成,并进行车轨结构优化设计,致力于发展简捷、高效、低成本、稳定性高的城内和城间磁悬浮交通系统。20世纪70年代,美国科学部门按照麻省理工学院提出的Magplane原理建造了1:25的模型,在100 m长的轨道上完成几百次实验运行和测试,并在1992年应美国交通部的要求,为800 km的路段进行了工程设计和成本分析。1995年工程设计被采纳,随后进行了更细致的研究分析,并最终在大型运输系统中进行测试使用^[10]。2002年,美国商业合作银行集团与成都四家公司合资成立了成都飞永磁悬浮飞机有限公司,投资8 000万\$建设成都磁悬浮飞机生产基地,总投资8亿\$建设磁悬浮飞机运营线路^[10]。然而,从磁悬浮飞机概念提出到如今,世界上还没有任何磁悬浮飞机商业运营线路。

美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)探索研究了Inductrack永磁悬浮系统^[30,31]。Inductrack磁悬浮系统的原理结构与Magplane磁悬浮系统有类似之处,但在功能和部分结构上做了改进和优化。根据速度的不同,Inductrack磁悬浮系统可分为Inductrack I型中低速磁悬浮系统和Inductrack II高速磁悬浮系统。美国国家航空和宇宙宇航局曾考虑利用Inductrack I磁悬浮系统来发射火箭。Inductrack II磁悬浮系统的浮重比与Inductrack I相比有大的提高,

因此它更适合于市区低速磁悬浮交通系统,该系统也曾在美国联邦运输局的赞助下由 General Atomics 领导设计和建造。之后,LLNL 还推出了适用于重载货物运输的 Inductrack III 磁悬浮系统。

2.2.3 HTSP maglev 型磁悬浮

1997 年,中国和德国联合研制出高温超导磁悬浮模型车,重 20 kg,磁悬浮高度 7 mm,轨道直径 3.5 m^[32,33]。2000 年底,西南交通大学王家素团队成功研制了世界首辆载人高温超导磁悬浮试验车“世纪号”,可承载 4 名乘客,磁悬浮力达 6 350 N,磁悬浮高度大于 20 mm,轨道长 15.5 m^[32,34]。2004 年,德国 IFW 研究所成功研制高温超导磁悬浮试验车“SupraTrans I”,最大载重 350 kg,直线轨道长 7 m^[32,35]。2011 年,德国 IFW 研究所改进完成了第二代高温超导磁悬浮环形实验线“SupraTrans II”,可承载 2 人,环形轨道 80 m 长,速度可达 20 km/h,最大加速度 1 m/s²^[32,36]。1998 年,巴西里约热内卢联邦大学开始从事高温超导磁悬浮研究,并于 2014 年修建成长 200 m 的“Maglev Cobra”高温超导磁悬浮试验线,可承载 24 人,车体采用轻质纤维材料以减轻重量^[32,37]。西南交通大学研究团队在“世纪号”的基础之上深入研究,2014 年将真空管道技术和高温超导磁悬浮技术相结合,研制成新一代高温超导磁悬浮环形试验线和真空环形轨道高温超导磁悬浮实验系统“Super-Maglev”,该系统采用 Halbach 型永磁轨道,轨道全长 45 m,最高车速 50 km/h。2015 年,西南交通大学成功研制了壁挂式高温超导真空管道磁悬浮系统,空载时速 82.5 km/h^[32,38]。2021 年 1 月,西南交通大学公布了完全由我国自主研发设计、制造的世界首台高温超导高速磁悬浮工程化样车及其实验线,设计时速 620 km/h。另外,意大利、俄罗斯等国也相继研制出各自的高温超导磁悬浮系统^[39,40]。

2.2.4 PM-EMS 型磁悬浮

PM-EMS 型磁悬浮的典型应用是美国 M3 磁悬浮列车。M3 磁悬浮列车系统是美国 MagneMotion 公司在 Magplane 的技术基础上,综合考虑了 TR 系列和 HSST 系列磁悬浮列车的优点而开发了中低速长定子直线同步驱动、永磁悬浮与导向的单磁悬浮架系统,以实现高效率、高灵活度和低成本的城市快捷运输^[41,42]。列车可两辆编组,也可六辆或多辆编组,可专程直达,也可中转而达,系统灵活度高且全自动控制。自 2003 年开始,MagneMotion 公司与美

国联邦交通管理局合作验证其专利技术的可行性。随后,MagneMotion 公司提出了 M3 磁悬浮系统的详细初步方案,并在实验室中建成了小尺寸原理车和试验线^[43,44]。2008 年,MagneMotion 公司宣布获得 FTA 约 630 万 \$ 的资助,开发时速 100 mile/h 的城市磁悬浮交通系统;M3 全尺寸系统已在马萨诸塞州丹弗斯克莱斯特的 12 m 长轨道进行了室内测试,并在奥多明尼昂大学 78 m 的室外轨道上进行了测试。在文献[44]中,发表了一张南京 M3 磁悬浮系统的实验样车和试验线图片,但未发现其他文献和报道中有所提及。

另外,中国科学院电工研究所、国防科技大学、西南交通大学等国内高校科研院所也在 PM-EMS 型磁悬浮方面做了深入的研究,并完成了模型车的研制和测试等重要工作^[45,46]。

2.2.5 暗轨/吊轨永磁补偿式磁悬浮列车

暗轨/吊轨永磁补偿式磁悬浮是中国自主知识产权的创新技术,并不是完全意义上的磁悬浮列车,因为其并未完全实现无机械接触,依靠永磁补偿式磁悬浮技术来提供主要的磁悬浮力和导向力、机械导向轮来提供辅助的磁悬浮力和导向力。李岭群团队历经 17 年的研发,申请了多项暗轨/吊轨磁悬浮方面的专利,并于 2004 年 8 月在中国大连市科技局主持的“永磁补偿磁悬浮技术鉴定会”上进行鉴定,鉴定结果为:永磁补偿式磁悬浮技术处于国际领先水平,经过进一步地研究实验,有望用于城内和城际区域交通,并建议通过建设实验线对相关技术进行验证^[47-50]。2004 年 10 月,中国首辆具有完全自主知识产权的暗轨型磁悬浮样车“中华 01 号”在大连磁谷科技研究所内运行成功,轨道长 56 m,车长、车宽和车高分别为 10.3 m、3.12 m 和 2.86 m,设计时速 110 km/h,单车载客人数 32 人,且造价低于 1 亿元/km^[51]。2005 年 5 月,大连磁谷科技研究所研发出“中华 06 号”轻型吊轨磁悬浮技术验证样车,轨道长 70 m,车长、车宽和车高分别为 9.6 m、1.65 m 和 1.87 m,设计时速可达 400 km/h,单车载客人数 10 人。“中华 06 号”轻型吊轨磁悬浮结构受力简单、材耗少,减轻了磁悬浮轨道和车体的重量,便于高速运行,有效降低了磁悬浮车运行成本,且造价约为 0.8 亿元/km,仅相当于 TR 系列磁悬浮造价的 30%^[52]。此外,吊轨磁悬浮列车镶嵌在龙门吊轨中,杜绝了翻车、脱轨等现象,极大地提高了运行安全性。

2.2.6 超级高铁(Hyperloop)

超级高铁也不是完全意义上的磁悬浮列车,因为其车体磁悬浮有气垫磁悬浮、磁悬浮等多种方案,但主流的超级高铁系统是基于电磁悬浮原理所开发的^[53]。超级高铁的概念雏形是“真空管道运输技术”,最初是由机械工程师达里尔·奥斯特在20世纪90年代提出,在1999年获得该项技术专利,注册成立了ET3公司,并提出在纽约和洛杉矶之间修建一条长为4 600 km的线路,最高时速为6 500 km/h,预计每公里成本125万美元,每辆车体造价27万美元^[9,10]。2013年美国SpaceX公司埃隆·马斯克将其丰富,正式提出超级高铁的概念,称其时速可达600~1 200 km/h,甚至有学者相信超级高铁时速能远超音速(音速为1 224 km/h),达到400 km/h以上^[54-56]。

在马斯克提出超级高铁的概念之后,HTT公司、Hyperloop One公司等开始跟进。2013年,HTT与Ansys、加州大学洛杉矶分校、Aecom和Oerlikon达成合作协议,分别进行流体力学、建筑设计和真空管道技术方面的合作^[54]。2016年5月,Hyperloop One在内达华沙漠公开演示了其推进系统原型,推进装置在1.1 s内从0加速到97 km/h,最高时速187 km/h^[54]。2017年5月,Hyperloop One首次在真空环境中对超级高铁进行了全面测试,时速113 km/h,7月再次测试,时速达310 km/h^[57,58]。同年8月,中国航天科技集团公司宣布,已启动了100 km/h“高速飞行列车”研发项目,将开发最高运行速度2 000 km/h、4 000 km/h的超高速列车^[59]。2018年4月,HTT与阿尔达尔签署合同,将在迪拜与阿布扎比间修建一条10 km的试验线,计划2020年完成,未来将修建150 km的全程,时速将达1 123 km/h。2018年6月,在世界交通运输大会“高速铁路发展技术论坛”上,西南交通大学向外界宣布,世界上时速最快的真空高温超导磁悬浮比例模型试验线正在成都搭建调试,试验线直径4.2 m,长140 m,液氮制冷,磁悬浮高度10 mm,承重200 kg,最高测试时速可达400 km/h^[54]。同月,HTT与乌克兰签署协议,在乌克兰开始建设商业高级高铁系统,随后公布其超级高铁乘客舱的尺寸为纽约市地铁车厢的两倍,最高时速达1 233 km/h。2018年10月,HTT在西班牙展示了其首个全尺寸乘客舱,该乘客舱长32 m,重5 t,由复合材料制成,展出之后将转移到法国的图卢兹市进行重新组装,之后将被部

署到首批超级高铁商用轨道上。2020年11月,Hyperloop超级高铁项目在美国拉斯维加斯附近的沙漠中完成了首次载人实验,载人时速160 km/h。2021年5月,中国中铁和中国航天科工联合打造的超高速低真空磁悬浮高速飞车试验平台落地,这是国内首个建成的全尺寸真空管梁试验平台。

3 各类磁悬浮导向方式的原理结构

3.1 EMS型磁悬浮导向

EMS型磁悬浮导向也称为常导吸力型磁悬浮。根据运行时速的不同,EMS磁悬浮列车可分为EMS中低速磁悬浮和EMS高速磁悬浮,其对应的车轨结构有些不同,分别如图1和图2所示。

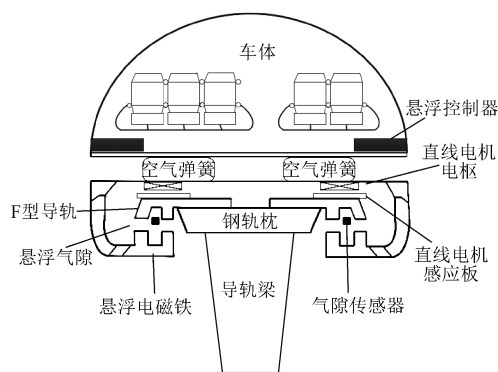


图1 EMS中低速磁悬浮列车结构示意图

Fig.1 Structure diagram of EMS medium-low speed maglev train

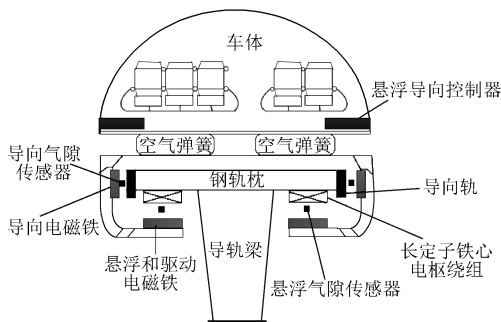


图2 EMS高速磁悬浮列车结构示意图

Fig.2 Structure diagram of EMS high speed maglev train

如图1所示,EMS中低速磁悬浮列车主要由车体、轨道、磁悬浮系统和直线驱动系统四部分组成,其中磁悬浮系统也即导向系统,轨道采用“T”形导轨,磁悬浮列车抱轨运行,磁悬浮高度为8~12 mm。在静止状态下,车载磁悬浮电磁铁通电,与轨道梁上的导轨形成闭合磁场回路,从而在导轨与车体之间形成一个向上的磁吸力,吸力与车体重力平衡,使车

体静止磁悬浮。由于 EMS 型中低速磁悬浮的运行速度小于 120 km/h,故在运动状态下不需要独立的导向系统提供导向力,在列车转弯或有横向扰动情况下,磁悬浮电磁铁与导轨之间将产生横向偏移,横向偏移的存在会使车体磁悬浮力减小、磁悬浮气隙增大、车体磁悬浮高度减小,并受到一个横向阻尼力的作用阻止其做横向偏移运动,磁悬浮控制系统通过实时检测磁悬浮气隙进行反馈控制,调节磁悬浮电磁铁的电流来增大磁回路磁场和磁悬浮力,使磁悬浮列车回到磁悬浮的平衡状态。

如图 2 所示,EMS 高速磁悬浮列车和 EMS 低速磁悬浮列车的磁悬浮系统类似,但 EMS 高速磁悬浮列车往往用磁极面积更大的 E 型电磁铁。由于 EMS 高速磁悬浮列车运行速度较高,当其受到横向扰动或通过曲率较大弯道时,需提供较大的导向力,故其具有一套独立的导向系统。EMS 高速磁悬浮列车的车体从两侧将 T 形梁的翼边缘抱住,T 形梁的翼边缘两侧为导向轨,布置在磁悬浮列车上的导向电磁铁通电后与之产生电磁吸力,导向控制器通过传感器实时测量得到的导向气隙信号,控制导向电磁铁的电流大小,即可将列车控制在中间位置的平衡状态。

3.2 EDS 型磁悬浮导向

(1) SC-EDS 型磁悬浮导向

SC-EDS 型磁悬浮列车也称为超导电动磁悬浮列车,其最高时速可达 603 km/h,其对应的车轨结构如图 3 所示。

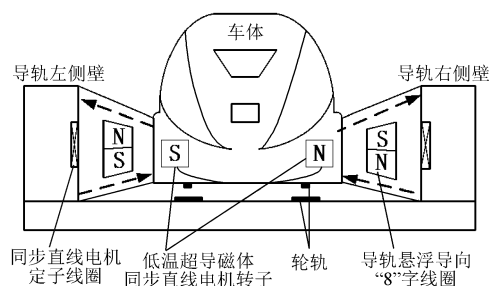


图 3 SC-EDS 高速磁悬浮列车结构示意图

Fig.3 Structure diagram of SC-EDS high speed maglev train

如图 3 所示,SC-EDS 高速磁悬浮列车主要由车体、轨道、磁悬浮导向系统、直线驱动系统四部分组成,其中磁悬浮和导向为同一系统。轨道系统采用“U”形导轨,列车在 U 形轨道中运行,磁悬浮导向绕组安装在 U 形导轨的内侧壁,驱动线圈安装在 U 形导轨的外侧壁。与 T 形轨道相比,U 形轨道对最小曲率半径的要求更高,但其对轨道梁的加工精度、对

列车的磁悬浮控制和导向控制的要求较低,其磁悬浮气隙一般为 100~150 mm,适合日本地震多发的实际国情,这也是日本大力研发 EDS 型高速磁悬浮列车的原因。

由于 SC-EDS 磁悬浮基于电磁感应原理进行磁悬浮和导向,故其不能实现静态磁悬浮,必须达到磁悬浮速度(一般在大于等于 120 km/h)后才能实现动态磁悬浮,故其车体系统中装配有一套用于低速运行的轮轨。SC-EDS 磁悬浮列车的车载磁体为低温超导磁体,工作温度为液氦温度(4.2 K),其磁悬浮原理是车载低温超导磁体(磁体由低温超导带材绕制而成,由于超导体没有电阻,当电流流过超导绕组后不发生热损耗,线圈中的强电流可产生超强磁场)的 N 极和 S 极沿列车的运行方向交替分布,在列车向前行驶时,低温超导磁体产生的强磁场与导轨内侧壁中的“8”字形线圈产生相对位移,使安装在导轨内侧的“8”字形线圈产生感应电流;超导磁体产生的磁场和感应电流产生的磁场相互作用,导轨两侧壁的“8”字形绕组产生上下极性不同的磁场,“8”字形绕组上部对磁悬浮车体产生磁吸力,下部对磁悬浮车体产生磁斥力,磁吸力和磁斥力的合力与磁悬浮列车重力平衡,使磁悬浮列车稳定磁悬浮。当磁悬浮列车受到横向扰动或通过具有一定曲率半径弯道时,产生横向偏移,被偏移侧的导轨侧壁线圈会自动产生磁吸力,偏移侧的导轨侧壁线圈会自动产生磁斥力,克服横向偏移,实现磁悬浮列车的稳定导向,具有较强的自稳定性。

(2) PM-EDS 型磁悬浮导向

PM-EDS 型磁悬浮的典型应用是 Magplane 和 Inductrack 磁悬浮系统。Magplane 磁悬浮系统的结构示意图如图 4 所示。

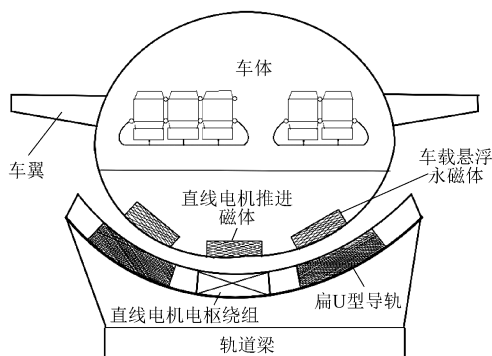


图 4 Magplane 磁悬浮系统的结构示意图

Fig.4 Structure diagram of Magplane

如图 4 所示,Magplane 的结构与磁悬浮列车类

似,主要由车体、轨道、磁悬浮导向系统和驱动系统组成。与磁悬浮列车相比多了边翼和尾翼,采用电动磁悬浮导向原理,轨道为扁 U 型导轨。磁悬浮飞机在车体下部两侧装有永磁体,与车载永磁体位置相对的是轨道扁 U 型金属板,当磁悬浮飞机运动时,金属板上感应电流产生的磁场方向和车载永磁体产生的磁场方向相反,两个相反磁场的相互作用产生磁悬浮力,使车体磁悬浮。与 EDS 高速磁悬浮列车类似,磁悬浮飞机在静止状态和低速运行时通过轮轨支撑和加速,当其时速大于 20 km/h 后,车体开始稳定磁悬浮和导向。

另外,磁悬浮飞机与 SC-EDS 高速磁悬浮的主要区别有两点^[10]:①SC-EDS 高速磁悬浮列车的车载磁体为低温超导磁体,而磁悬浮飞机的车载磁体为永磁体,磁悬浮导向系统更为简单;②SC-EDS 高速磁悬浮的磁悬浮速度大约为120 km/h,而磁悬浮飞机在侧翼和尾翼的辅助下,磁悬浮速度大约为20 km/h,更易磁悬浮。

Inductrack 磁悬浮系统的结构示意图如图 5 所示,主要由车体、磁悬浮导向感应轨、磁悬浮导向 Halbach 阵列磁体、直线驱动系统四部分组成。其磁悬浮导向原理与 Magplane 磁悬浮系统有类似之处,但做了三点重要改进:①采用 Halbach 的永磁阵列作为车载磁体,解决了之前永磁磁悬浮系统浮重比不足的问题;②采用闭合线圈或闭合叠片作为导轨,有效提高浮重比的同时降低了涡流损耗;③可采用两层 Halbach 永磁阵列进一步提高系统的浮重比。

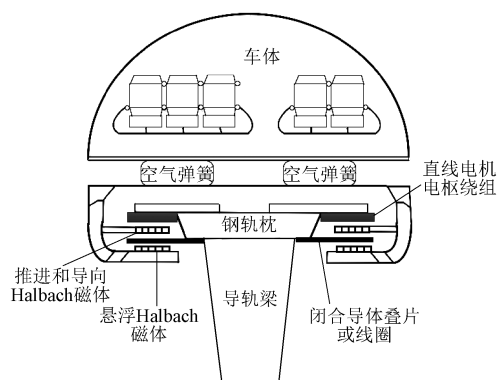


图 5 Inductrack 磁悬浮系统的结构示意图

Fig.5 Structure diagram of Inductrack

3.3 HTSP Maglev 型磁悬浮导向

HTSP Maglev 型磁悬浮的典型代表是高温超导磁悬浮,是一种新型磁悬浮。主要由高温超导磁体及其制冷系统、车体、永磁轨道和驱动系统组成。车

载超导磁体的高温超导块材(一般为 YBCO 块材, 第二类非理想超导体)采用熔融织构法制备成圆柱形或方形磁体,工作温度为液氮温度(77 K)。永磁轨道一般用 NdFeB 系列永磁单体和聚磁铁轭按特定的 Halbach 结构阵列而成,有单边型永磁轨道和双边型永磁轨道。高温超导磁悬浮对应的车轨结构示意图如图 6 所示。

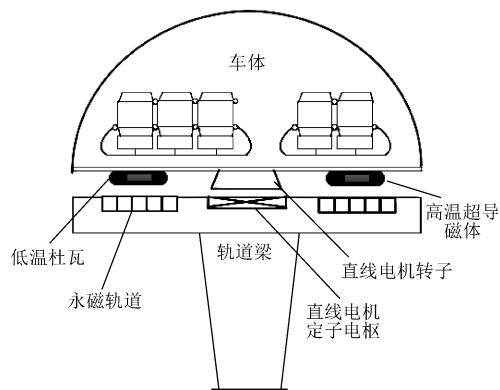


图 6 高温超导磁悬浮列车结构示意图

Fig.6 Structure diagram of high temperature superconductor maglev train

高温超导磁悬浮的磁悬浮导向基于高温超导体的磁通钉扎效应,具有较强的自稳定性,磁悬浮高度一般为 $10\sim 30\text{ mm}$ 。磁悬浮导向基本原理从宏观上可简述为:在永磁轨道的外磁场中,高温超导体具有独特的钉扎和抗磁特性,使得已经被高温超导体的钉扎中心俘获的磁力线难以逃离束缚,而对于未被钉扎中心俘获的磁力线也难以渗透进入高温超导体内;因此,当外磁场发生变化或高温超导体与外磁场产生相对运动时,高温超导体能够感应出阻碍相对运动或外磁场变化的超导强电流,这种电流与外磁场的相互作用产生电磁力,这种电磁力在宏观上表现为与超导体自身重力平衡的磁悬浮力和提供横向稳定所需的导向力^[9,32]。从微观上可简述为:高温超导体在生长制备过程中产生的位错等缺陷形成了位能势阱,将未进入超导态的超导块材放入外磁场中时,外磁场的磁力线可自由穿过超导块材,而超导块材经过低温冷却进入超导态后,位能势阱会阻止原本自由的磁力线自由移动。当处于超导态的高温超导块材向永磁体轨道方向慢慢靠近时,永磁外磁场将以磁通量子束的形式开始进入超导体内,并将遇到分布在超导体内各处的钉扎中心,钉扎中心周围的超导区域将产生涡流锁定磁通量子束,这个过程在宏观上表现为自稳定磁悬浮和导向^[9,32]。

3.4 PM-EMS 磁悬浮导向

PM-EMS 磁悬浮是一种电磁和永磁混合磁悬浮,典型应用是 M3 磁悬浮系统,其车轨结构示意图如图 7 所示^[44]。

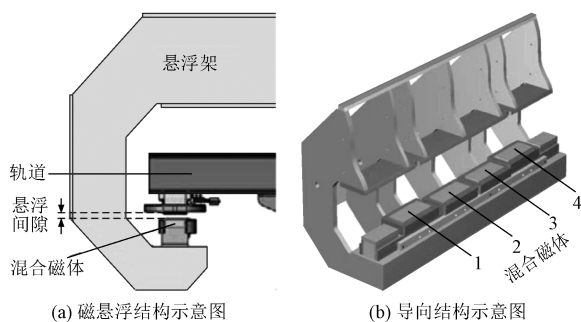


图 7 永磁电磁混合磁悬浮列车结构示意图

Fig.7 Structure diagram of PM-EMS maglev train

图 7 中磁悬浮系统的磁悬浮磁体、导向磁体和驱动磁体为同一套混合磁体^[60]。单个磁悬浮架的每侧各有 4 个混合磁体,它们横向错位排列,第 1 号混合磁体和第 4 号混合磁体对齐,中间 2 个混合磁体对齐,而且中间 2 个混合磁体与第 1 号、第 4 号混合磁体之间留有一定的偏移量^[44]。在磁悬浮方面,混合磁体的电磁力和永磁力的合力与车体的重量大小相等,使磁悬浮列车稳定磁悬浮;其中电磁部分的功能和控制方式与 EMS 型磁悬浮列车一致。在导向方面,通过调节第 1 号和第 4 号混合磁体与中间 2 个混合磁体中电流的比例进行反馈控制,使车体向电流较高的磁极方向移动,以实现稳定导向。

3.5 暗轨/吊轨永磁补偿式磁悬浮

吊轨永磁补偿式磁悬浮列车的车轨结构示意图如图 8 所示。吊轨永磁补偿式磁悬浮列车主要由车体、轨道、磁悬浮导向系统和驱动系统组成。还有一种暗轨永磁补偿式磁悬浮列车,其结构与吊轨永磁补偿式磁悬浮列车相似,两者的区别是暗轨磁悬浮列车的载客车厢位于地面之上,动力舱埋嵌在地下涵道内,而吊轨磁悬浮列车的载客车厢和动力舱均吊挂在轨道梁上。暗轨/吊轨永磁补偿式磁悬浮列车是基于永磁补偿式磁悬浮技术研制出的磁悬浮轨道交通,其轨道底部永磁体与车体顶部导磁板之间形成闭合的磁回路,产生主磁吸力,导轨两翼磁体与车体两翼导磁板形成闭合磁回路,产生补偿磁吸力,两部分磁吸力共同提供磁悬浮力,实现磁悬浮列车的稳定磁悬浮。侧向的导轨上装有机机械导向轮,以保证磁悬浮列车稳定导向。另外,这种磁悬浮列车与 EMS 和 EDS 型磁悬浮在驱动方式上有本质区

别,其采用传统旋转电机磁驱动。与 EMS 高速磁悬浮相比,吊轨永磁磁悬浮有四大优势^[49,50]:造价低,相当于 TR 系列磁悬浮的 1/4;节能,相当于 TR 系列磁悬浮的 70%;载重大,相当于 TR 系列磁悬浮的 5 倍;自重轻,仅 0.8 t/m。

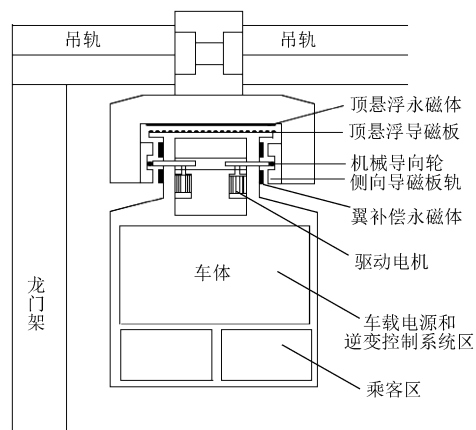


图 8 吊轨永磁补偿式磁悬浮列车结构示意图

Fig.8 Structure diagram of hanging rail permanent magnet compensation type maglev train

3.6 超级高铁

超级高铁主要由真空管道、真空泵机组、磁悬浮车体、轨道、磁悬浮导向系统和驱动系统组成。根据不同磁悬浮原理,超级高铁有多种系统方案,不便统一性的表述和构图。在这里只简单地表示其车轨结构,示意图如图 9 所示。

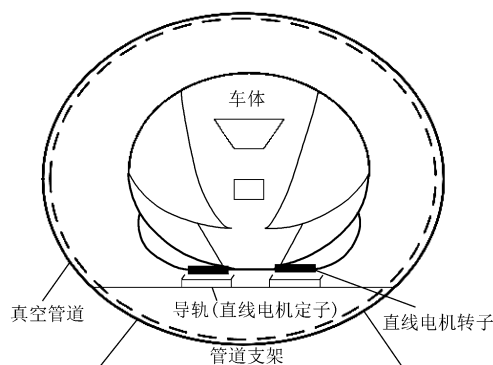


图 9 超级高铁结构示意图

Fig.9 Structure diagram of hyperloop

HTT 研发的超级高铁采用被动磁悬浮技术,被动磁悬浮系统是 Richard Post 与同事在劳伦斯利福摩尔国家实验室工作时开发。该技术的基本原理是在轨道中安装无动力线圈环路,将永磁铁植入到列车的“豆荚”状车厢中,从而创造出磁悬浮效应。从安全角度看,被动磁悬浮系统拥有很大的优势,它的磁悬浮效应纯粹通过运动产生,即使电源出现故障,

超级高铁“豆荚”状车厢也可以继续磁悬浮,直到速度降到最低才接触到地面。另外,也有学者和研究单位提出用压缩空气磁悬浮(即气动磁悬浮),虽然气动磁悬浮与磁悬浮能实现大尺寸的载重磁悬浮,但其存在运行不稳定、可控性差等问题,目前为止该技术研究工作停滞不前^[54]。中国西南交通大学和航天科工在超级高铁方面的研究是分别基于 HTSP Maglev 技术、SC-EDS 技术和真空管道技术为基础开展的。总结而言,上述三种超级高铁磁悬浮导向方案均是被动磁悬浮和导向技术,其目的是简化系统结构,尽可能减少超高速运行状况下的控制难度,增强超级高铁系统的自稳定性。

3.7 几种磁悬浮轨道交通的技术特征总结

目前世界范围内有过深入研究且技术相对成熟的磁悬浮类型有 EMS 型中低速磁悬浮、EMS 型高速磁悬浮、SC-EDS 型高速磁悬浮、PM-EDS 型高速或中低速磁悬浮、HTSP-Maglev 型磁悬浮和 PM-EMS 型磁悬浮,另外还有两类较为特殊的磁悬浮应用——永磁

补偿式磁悬浮和超级高铁。各种磁悬浮类型对应的试验线或商业线分别为中国长沙中低速磁悬浮线、中国上海高速磁悬浮线、日本新干磁悬浮线、美国磁悬浮飞机试验线、中国成都高温超导磁悬浮实验线、M3 磁悬浮系统、中国大连永磁悬浮试验模型和迪拜超级高铁试验线。这里需要重点说明的是永磁补偿式磁悬浮仅进行过 1 : 10 缩放模型车和极短距离试验线的试跑,未曾成功建设 1 : 1 尺寸的样车或完整的试验线来测试其设计时速、载重比等关键参数,不能有效地说明永磁补偿式磁悬浮列车系统的整体性能,不宜与其他磁悬浮列车系统直接比较。因此,在文中后续将不再将其与各类磁悬浮的运营线或实验线路一同比较。以上述七条磁悬浮试验/示范/商业运营线(除去永磁补偿式磁悬浮)为代表,对磁悬浮轨道交通的技术特征总结见表 1^[10,32,54]。在这里需要说明的是表 1 中的载重比指标是每单位长度下磁悬浮列车自重和载客重量的总和。

表 1 七条典型磁悬浮轨道交通运营线或试验线的技术特征简表
Tab.1 Technical characteristics of seven typical maglev rail transit operating lines or test lines

磁悬浮线路 /系统	类型	最高时速 /(km/h)	磁悬浮高度 /mm	载重比 /(t/m)	造价比 /(亿元/km)	导向 方式	驱动 方式	电机 类型	应用 特点
中国长沙 中低速 磁悬浮线	EMS 型	100 (运行时速)	8~10	≈2	≈2.3	被动 导向	列车 驱动	短定子 直线感 应电机	载重低,时速低,适合 城内、短途载客交通
中国上海 高速磁 悬浮线	EMS 型	430 (运行时速)	8~10	≈2.06	≈3	电磁 主动 导向	导轨 驱动	长定子 同步直 线电机	载重低,时速较高,适 合城间、远距离载客交 通
日本新干 磁悬浮线	SC-EDS 型	603 (测试时速)	100~150	≈3.52	≈12.3	被动 导向	导轨 驱动	长定子 同步直 线电机	载重比较高,时速高, 但造价高,运行损耗 大,适合城间、远距离 载客交通
美国磁悬浮 飞机试验线	PM-EDS 型	550 (设计时速)	80~150	≈3.5	≈1.65	被动 导向	导轨 驱动	永磁同 步直线 电机	载重相对较高,时速 高,造价较低,适合城 间、远距离载客交通
西南交通大学 高温超导 磁悬浮 试验平台	HTSP Maglev 型	50 (测试时速)	10~30	-	-	被动 导向	导轨 驱动	长定子 直线感 应电机	尚处于研究测试阶段, 其时速、载重和造价等 参数不宜比较
M3 磁悬浮 系统	PM-EMS 型	90~160 (设计时速)	15~20	<2	1.5~1.8	主动 导向	导轨 驱动	长定子 同步直 线电机	载重比和时速较低,但 列车编组灵活,模式多 样,智能化调度,适合 城内、短距离载客交通
迪拜超级 高铁试验线	-	1 000 (设计时速)	100~150	≈1	≈8.8	被动 导向	导轨 驱动	永磁同 步直线 电机	载重低,时速超高,适 合大距离载客交通,技 术尚处于研究阶段

分析表 1 可以得出以下结论:①目前技术成熟且商业运营的磁悬浮轨道交通是 EMS 中低速、高速磁悬浮和 EDS 高速磁悬浮,其中 EMS 磁悬浮能实现静态磁悬浮,且综合造价比低、列车时速灵活可调,但控制复杂、运行能耗大;EDS 磁悬浮控制简单、对轨道要求低,但综合造价比高、运行能耗大,不能实现静态磁悬浮。②目前技术成熟且商业运营的磁悬浮轨道交通载重比普遍较小,其中 EDS 型高速磁悬浮载重比相对较大的原因是车载液氦低温冷却系统和轮轨系统,也正是由于低温系统和轮轨系统的存在,致使其造价比 EMS 型高速磁悬浮高出近 4 倍。③美国的 Magplane 和 Inductrack 磁悬浮系统与 EMS 磁悬浮、EDS 磁悬浮相比,在磁悬浮高度、载重比和造价比的设计上优势明显,但近年来研究工作停滞不前,还从未有商业应用。④在综合造价可接受范围内,现有磁悬浮轨道交通很难同时满足高载重比和高时速两大要求,这一特性决定了现有磁悬浮轨道交通技术仅限于客运交通方面应用,无法应用于高载重比、高时速的客运或货运交通。⑤现有磁悬浮轨道交通技术的造价比基本决定于磁悬浮系统的磁悬浮导向方式、列车时速和载重比,磁悬浮导向方式、列车时速和载重比的合理优化设计是未来磁悬浮轨道交通技术的研究重点。⑥比较超级高铁和其他磁悬浮轨道交通可发现,磁悬浮技术和真空管道技术的结合应用是进一步提高轨道交通时速的必然选择,但具体选用哪种磁悬浮方案和真空管道结合应用还未有成熟的方案。

4 两种新型磁悬浮导向车轨结构

高温超导磁悬浮、Magplane 和 Inductrack 磁悬浮系统、M3 磁悬浮系统、永磁补偿式磁悬浮等磁悬浮系统在设计上试图集成高载重比、高时速、易控制和低运行能耗等特性,这几种磁悬浮的磁悬浮导向方式及其对应车轨结构均融入了永磁体的特性和优势,间接体现了未来磁悬浮导向方式及其对应车轨结构的发展方向。为此,本文以永磁力为主要磁悬浮导向力、电磁力或高温超导钉扎力为辅助磁悬浮导向力,提出两种新型车轨结构,试图解决现有磁悬浮轨道交通技术难以集成高载重比、易控制和低运行损耗等问题,也为磁悬浮动能储能提供一定新思路。

4.1 基于永磁斥力式和电磁吸力式混合磁悬浮导向的车轨结构

基于永磁斥力式和电磁吸力式混合磁悬浮导向

的车轨结构以永磁斥力为主要的磁悬浮导向力、电磁吸力为辅助的磁悬浮导向力,以实现磁悬浮车在各自由度的静态和动态受力平衡。该车轨结构的磁悬浮导向系统如图 10 所示。由于本文主要研究磁悬浮轨道交通中的磁悬浮导向方式及其对应车轨结构,故磁悬浮列车的驱动系统不是本文研究的重点,将不在示意图中表示。

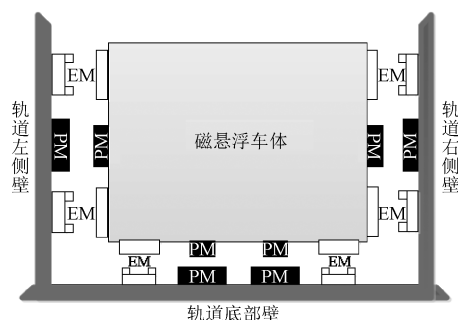


图 10 永磁斥力和电磁吸力式混合磁悬浮导向结构示意图

Fig.10 Hybrid suspension-guide structure of permanent magnetic repulsion and electromagnetic attraction

图 10 中的 PM 代表永磁体,EM 代表电磁铁。轨道侧壁和底部的永磁体极性与对应方位的磁悬浮车体永磁体极性相同,故根据磁极之间异性相吸、同性相斥原理,轨道左侧壁对磁悬浮车体的斥力与轨道右侧壁对磁悬浮车体的斥力大小相等,轨道底部壁对磁悬浮车体的斥力与磁悬浮车体的重力大小相等。恩绍定理表明,点粒子集不能被稳定维持在仅由电荷的静电相互作用构成的一个稳定静止的力学平衡结构中^[61,62]。那么将恩绍定理扩展到磁场领域,也就意味着在仅有永磁力的作用下磁悬浮车不能实现静态稳定磁悬浮,而其动态稳定磁悬浮是有可能实现的,但其动态稳定平衡点很难找到。为此,分别在磁悬浮导向系统中加入了电磁铁提供辅助的磁悬浮导向力,以提高磁悬浮导向系统的阻尼,保证磁悬浮车的静态、动态稳定磁悬浮和导向。当磁悬浮车运行在曲线轨道时,离心力的作用将使磁悬浮车体向轨道外侧壁产生一定的横向位移,横向位移的产生将使轨道外侧壁对磁悬浮车体的永磁斥力增加、轨道内侧壁对磁悬浮车体的永磁斥力减小;与此同时,轨道内侧壁对磁悬浮车体的电磁吸力增加、轨道外侧壁对磁悬浮车体的电磁吸力减小。永磁斥力和电磁吸力的共同作用,以克服离心力的作用,使磁悬浮车体重新达到动态平衡状态,这一过程有效地说明了基于永磁斥力式和电磁吸力式混合磁悬浮导向的车轨结构具有较强的自稳定性。

永磁体可采用五块(或多块)永磁体单体组合而成的 Halbach 阵列,这样可大幅提高两块永磁体之间的磁斥力,但同时也不可避免地增大了磁悬浮和导向系统的磁耦合程度,提高了装配和控制难度。另外,磁悬浮永磁体和导向永磁体也可直接采用永磁单体,该种结构永磁体的斥力大小虽然远小于 Halbach 阵列永磁体,但可在结构上实现磁悬浮和导向系统的解耦,有效降低了磁悬浮导向系统的控制难度和安装难度,其自稳定性较高。

基于永磁斥力式和电磁吸力式混合磁悬浮导向的车轨结构具有诸多优点:①采用永磁斥力为主、电磁吸力为辅的磁悬浮导向方式可大幅提高磁悬浮车的载重比,大幅降低磁悬浮系统的运行损耗;②磁悬浮车的磁悬浮系统和导向系统可在结构上实现电磁解耦,可大幅降低磁悬浮系统的控制难度;③永磁斥力为主、电磁吸力为辅的磁悬浮导向方式类似于被动磁悬浮和被动导向,优化设计电磁吸力与永磁斥力的比值,是降低系统运行损耗和提高系统自稳定性的关键。

4.2 基于永磁斥力式和高温超导钉扎力式混合磁悬浮导向的车轨结构

基于永磁斥力式和高温超导钉扎力式混合磁悬浮导向的车轨结构以永磁斥力为主要的磁悬浮导向力、高温超导钉扎力为辅助的磁悬浮导向力,以实现磁悬浮车在各自自由度的静态和动态受力平衡。该车轨结构的磁悬浮导向系统如图 11 所示。

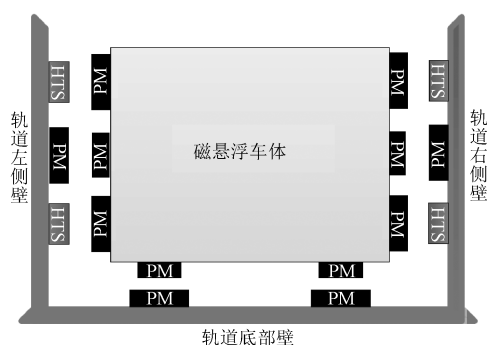


图 11 永磁斥力式和高温超导钉扎力式混合磁悬浮导向结构示意图

Fig.11 Hybrid suspension-guide structure of permanent magnetic and high-temperature superconducting

图 11 中的 PM 代表永磁体,HTS 代表高温超导磁体。永磁斥力式和高温超导钉扎力式混合磁悬浮导向结构与永磁斥力和电磁吸力式混合磁悬浮导向结构的主要区别是将用以提供辅助电磁吸力的电磁铁换成了提供辅助钉扎力的高温超导磁体,其中高

温超导磁体是由非理想第二类高温超导块材制成。由于高温超导磁体具有磁通钉扎特性,故在永磁体的梯度磁场中高温超导磁体将产生一个钉扎力,底部轨道对磁悬浮车体的永磁斥力和侧壁轨道对磁悬浮车体的钉扎力的合力与车体重力平衡,左、右侧壁轨道对磁悬浮车体的磁斥力和钉扎力的合力平衡,使磁悬浮车体实现静态、动态稳定磁悬浮和导向。

基于永磁斥力式和高温超导钉扎力式混合磁悬浮导向的车轨结构与基于永磁斥力式和电磁吸力式磁悬浮导向的车轨结构相比,优势和不足主要体现在三个方面:①转弯半径更小,其原因是当磁悬浮车通过弯道时,导轨外侧壁中的永磁体对磁悬浮车体的磁斥力和导轨内侧壁中的高温超导磁体对磁悬浮车体的钉扎力方向相同,能提供更大的向心力以克服离心力的作用;②磁悬浮导向的稳定性更高,其原因是导轨内侧壁中的高温超导磁体对磁悬浮车体的钉扎力的方向灵活多变,能更大程度上阻碍磁悬浮列车向下向上、向左向右偏移;③由于使用了高温超导块材,且配备了低温制冷系统,基于永磁斥力式和高温超导钉扎力式混合磁悬浮导向车轨结构的综合造价和运行损耗相对较高。

4.3 对比分析

为了有效地说明文中所提两类新型混合磁悬浮导向车轨结构的潜在应用价值,这里以图 10 中的永磁斥力和电磁吸力式混合磁悬浮导向车轨结构为例,在 ANSYS Maxwell 中搭建了电磁铁和永磁铁模型,得出了单位磁极面积电磁力和永磁力与磁悬浮气隙之间的变化规律,如图 12 所示。需要说明的是,电磁铁模型采用 E 型电磁铁结构,铜线圈匝数为 500 匝,线圈电流为 3 A;永磁铁模型为 NeFeB38 型永磁块带铁轭的结构。

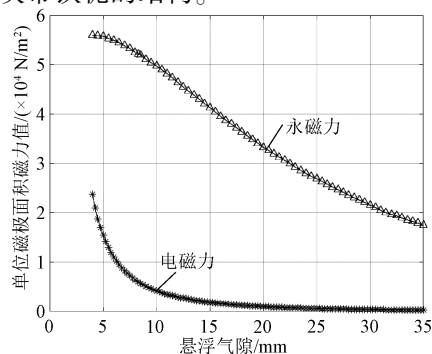


图 12 单位磁极面积电磁力和永磁力与磁悬浮气隙之间的变化规律

Fig.12 Relationship between magnetic force of per unit pole area and floating air gap

从图 12 中可以看到单位磁极面积的永磁力远大于电磁力,尤其是当磁悬浮气隙较大时这一现象更加明显。当然,可以增大电磁铁的电流大小,但电流的增加不会明显改变电磁力随磁悬浮气隙增大而衰减的速度和总体趋势。相反,永磁力随磁悬浮气隙的增大而衰减的速度明显小于电磁力,这也说明了永磁体更适合应用在大磁悬浮气隙的磁悬浮应用中,这与实际情况是相符的。因此,有充分的理由相信基于永磁主磁悬浮导向、电磁辅助磁悬浮导向的车轨结构在提升载重比和降低运行损耗这两方面是有明显优势的。

与永磁斥力和电磁吸力式混合磁悬浮导向方式相比,永磁斥力和高温超导钉扎力式混合磁悬浮导向方式也有其独特的优势。这里在 4.1 节和 4.2 节的论述基础之上,对两种新型磁悬浮导向方式的部分技术指标进行总结并做出一定预期(供参考)见表 2。

表 2 两种新型混合磁悬浮导向方式特点的总结对比

Tab.2 Summary and comparison of characteristics of two new types of hybrid suspension guiding methods

磁悬浮导向方式 技术指标	永磁斥力和 电磁吸力式	永磁斥力和高温 超导钉扎力式
预期磁悬浮高度/mm	≈10	10~30
预期载重比/(t/m)	6~10	6~10
预期造价/(亿元/km)	<2	<3
导向方式	主动导向	被动导向
施工难度	中等	较高
应用特点	可控性强,造价 较低,但系统 需要有源控制	需配备低温系统, 造价较高, 但自稳定性强

5 磁悬浮轨道交通技术中的磁悬浮导向方式研究展望

现有技术成熟、且商业应用的磁悬浮导向方式仅有 EMS 电磁悬浮和 EDS 电动磁悬浮,随着新材料的发展、制造工艺的提升和轨道交通市场的需求推动,磁悬浮轨道交通技术中的磁悬浮导向方式未来或将从以下几个方面发展:

(1) 具有高载重比、低造价比特性的磁悬浮导向方式。目前商业运营的磁悬浮轨道交通载重比普遍较低,EMS 磁悬浮列车的载重比仅 2 t/m,搭载了低温制冷系统的 EDS 高速磁悬浮列车的载重比也只有 3.52 t/m,远低于现有高铁和普通列车。现有磁悬浮轨道交通低载重比的特点一定程度上限制了

载客量,更加限制了其在货运交通方面的应用。因此,提出并研究高载重比的磁悬浮导向方式是未来的研究方向之一,也是磁悬浮轨道交通实现商业盈利和大范围推广的关键所在。

(2) 适用于超高速运行的磁悬浮导向方式。随着科技的发展和进步,轨道交通朝着“更快速、更安全、更舒适、更环保”的方向发展是必然趋势,而真空管道技术和磁悬浮技术的结合应用是实现“更快速”这一目标的最有效途径。然而,中、高真空度管道内空气稀少,对流散热失效,只能采取辐射和传导散热方式,若将目前技术成熟的 EMS 电磁悬浮和 EDS 被动磁悬浮技术应用在真空管道磁悬浮轨道交通中,磁悬浮车在高速运行过程中产生的大量热损耗将堆积,给系统的热平衡设计增大了难度和成本。因此,提出并研究适用于超高速运行的磁悬浮导向方式是未来的研究趋势之一。

(3) 高温超导型磁悬浮导向方式。高温超导磁悬浮是一种被动磁悬浮导向的磁悬浮导向方式,具有磁悬浮导向稳定性高、运营成本低、控制简单、无电磁辐射等特性优势。高温超导磁悬浮采用永磁导轨,在载重比方面与现有成熟磁悬浮轨道交通相比优势也比较明显。未来随着材料制造工艺的提高,永磁材料、超导块材、液氮和低温杜瓦等设备成本的进一步降低,在综合造价方面高温超导磁悬浮造价比的优势也将越来越明显。另外,高温超导磁悬浮导向方式应用在真空管道磁悬浮轨道交通中有明显优势,其原因是高温超导磁悬浮系统自带的低温制冷系统能在真空环境中有效带走系统热损耗,能更加有效地解决高、中真空度管道内散热难的问题。

(4) 新型混合磁悬浮导向方式。EMS 型、EDS 型和 HTSP Maglev 型磁悬浮都有各自的优势和现阶段的不足,而未来磁悬浮轨道交通领域的应用场景也必将越来越多元化。在不同应用场景的特性需求下,提出对应的混合磁悬浮导向方式在系统可靠性和经济性方面将更有优势。

6 结论

本文对磁悬浮轨道交通技术中磁悬浮导向方式的研究现状做一个较为全面的总结介绍,提出两种新型磁悬浮导向车轨结构,并探讨未来进一步的研究方向。首先概述了磁悬浮轨道交通技术的种类、系统结构和技术成熟度,并对各种磁悬浮轨道交通技术的关键技术特征进行了总结。其次,对磁悬浮

轨道交通技术中的各类磁悬浮导向方式进行了归纳总结,分析了各种磁悬浮导向方式的具体结构、原理和优缺点。接着,提出了基于永磁斥力式和电磁吸力式混合磁悬浮导向的新型车轨结构、基于永磁和超导混合磁悬浮导向的新型车轨结构,分析论述了两种新型车轨结构的原理和优势。最后,展望了磁悬浮轨道交通技术中磁悬浮导向方式的未来发展趋势,为磁悬浮导向方式的研究和发展提供了一些新思路。

参考文献 (References):

- [1] 周富民 (Zhou Fumin). 考虑轨道若干因素的磁悬浮控制研究 (Research on levitation control considering some guideway factor) [D]. 长沙: 国防科学技术大学 (Changsha: National University of Defence Technology), 2009.
- [2] 张延昭 (Zhang Yanzhao). 德国磁悬浮列车研究概况 (Survey of research on maglev train in Germany) [J]. 全球科技经济瞭望 (Global Technology and Economic Outlook), 1993, (4): 9-12.
- [3] 曹卓娜 (Cao Zhuona). 磁悬浮“世界版图” (The world map of magnetic levitation) [J]. 世界轨道交通 (World Rail Transit), 2017, (9): 48-49.
- [4] 苏晓峰 (Su Xiaofeng). 磁悬浮列车的发展及应用 (Development and application of magnetic levitation trains) [J]. 铁道车辆 (Railway Vehicle), 2003, 41 (11): 14-17, 1.
- [5] 江浩, 连级三 (Jiang Hao, Lian Jisan). 磁悬浮列车在世界上的发展与展望 (The development and prospect of maglev train in the world) [J]. 铁道学报 (Journal of the China Railway Society), 1991, (2): 95-101.
- [6] 严陆光, 徐善纲, 孙广生, 等 (Yan Luguang, Xu Shangang, Sun Guangsheng, et al.). 高速磁悬浮列车的战略进展与我国的发展战略 (Strategic progress of high-speed maglev and the development strategy in China) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2002, 21 (4): 1-12.
- [7] 邓永权 (Deng Yongquan). 磁悬浮列车静悬稳定性与仿真分析 (Static levitation stability researches and simulation of maglev) [D]. 成都: 西南交通大学 (Chengdu: Southwest Jiaotong University), 2005.
- [8] 严陆光 (Yan Luguang). 高速磁悬浮列车技术及其在我国客运交通中的战略地位 (High speed magnetic levitation train and its strategic importance for future passenger transportation in China) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 1999, 18 (4): 19-24.
- [9] 熊嘉阳, 邓自刚 (Xiong Jiayang, Deng Zigang). 高速磁悬浮轨道交通研究进展 (Research progress of high-speed maglev rail transit) [J]. 交通运输工程学报 (Journal of Traffic and Transportation Engineering), 2021, 21 (1): 177-198.
- [10] 李益民 (Li Yimin). 直线电机与磁悬浮驱动 (Linear motor with maglev drive) [M]. 成都: 西南交通大学出版社 (Chengdu: Southwest Jiaotong University Press), 2018: 4-21.
- [11] 王君香 (Wang Junxiang). 浅谈磁悬浮列车的原理及应用 (Talking about the principle and application of maglev train) [J]. 科学技术创新 (Science and Technology Innovation), 2019, (15): 38-39.
- [12] 魏朝庆, 孔永健 (Wei Zhaoqing, Kong Yongjian). 磁悬浮铁路系统与技术 (Maglev railway system and technology) [M]. 北京: 中国科学技术出版社 (Beijing: China Science and Technology Press), 2003: 12-30.
- [13] 徐飞, 罗世辉, 邓自刚 (Xu Fei, Luo Shihui, Deng Zigang). 磁悬浮交通关键技术及全速度域应用研究 (Study on key technologies and whole speed range application of maglev rail transport) [J]. 铁道学报 (Journal of Railway), 2019, 41 (3): 40-49.
- [14] Glatzel K, Khurdok G, Rogg D. The development of the magnetically suspended transportation system in the federal republic of germany [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980, 29 (1): 3-17.
- [15] Suzuki S, Kawashima M, Hosoda Y, et al. HSST-03 system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1984, 20 (5): 1675-1677.
- [16] 张志洲, 张惠霞 (Zhang Zhizhou, Zhang Huixia). 韩国磁悬浮列车发展 (Development of magnetic levitation trains in Korea) [J]. 国外铁道车辆 (Foreign Railway Vehicle), 2006, 4 (3): 8-12.
- [17] 贺光 (He Guang). EMS 型中速磁悬浮列车动力学建模与导向能力研究 (Dynamic modeling of the medium speed maglev train and research on the guidance ability) [D]. 长沙: 国防科学技术大学 (Changsha: National University of Defence Technology), 2016.
- [18] 王天录, 吴锦青 (Wang Tianlu, Wu Jinqing). 我国磁悬浮铁路的发展概况 [J]. 电气化铁道 (Electrified Railway), 2002, (2): 38-41.
- [19] 杨志华 (Yang Zhihua). 中低速磁悬浮列车磁悬浮系统仿真研究 (Simulation research on suspension system of middle and low speed maglev train) [D]. 成都: 西南交通大学 (Chengdu: Southwest Jiaotong University Press), 2014.
- [20] 安邦 (An Bang). 中低速磁悬浮列车再生制动及运行能耗仿真 (Simulation of mid-to-low speed maglev train

- regenerative braking and movement energy consumption) [D]. 长沙: 国防科学技术大学 (Changsha: National University of Defence Technology), 2014.
- [21] Surya S, Ramyashree S, Nidhi R, et al. Development of a simple MAGLEV system for a low-speed wind tunnel [A]. Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Power and Advanced Control Engineering [C]. Bengaluru, India, 2015. 441-444.
- [22] Kyotani Y. Recent progress by JNR on maglev [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 24 (2): 804-807.
- [23] 商福昆 (Shang Fukun). 宫崎实验线新磁浮实验车 MLU-002N (New maglev test vehicle MLU-002N on the Miyazaki test line) [J]. 铁道机车车辆 (Railway Locomotive & Car), 1995, (1): 58-60.
- [24] Yoshioka H, Suzuki E, Seino H, et al. Characteristics of the dynamics of the MLX01 Yamanashi maglev test line vehicles [J]. Quarterly Reports of RTRI, 1998, 39 (2): 62-67.
- [25] Takizawa H, Takami H, Yoshioka H. Characteristics of vehicle dynamics of MLX01 for two trains passing each other and for the five-car train set [J]. Quarterly Report of Rtri, 2007, 41 (2): 68-73.
- [26] Kondo Y, Terai M, Nishikawa Y, et al. Development of a GM-type pulse tube refrigerator cooling system for superconducting maglev vehicles [M]. New York: Springer, 2005.
- [27] Nakagawa A, Matsuda S. Status of development and running tests on Japan's superconducting maglev [J]. Transportation Research Record, 2005, (1916): 26-29.
- [28] Kusada S, Igarashi M, Nemoto K, et al. The project overview of the HTS magnet for superconducting maglev [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17 (2): 2111-2116.
- [29] 王厚生 (Wang Housheng). 永磁电动式导体板磁悬浮列车轨道结构及相关研究 (Permanent magnet electric conductor plate maglev train track structure and related research) [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences), 2004.
- [30] 武瑛, 严陆光, 徐善纲 (Wu Ying, Yan Luguang, Xu Shangang). Inductrack 磁悬浮技术及其在磁悬浮列车系统中的应用 (Inductrack maglev technology and its application in maglev train system) [J]. 电气应用 (Electrical Application), 2006, 25 (1): 1-3.
- [31] Toshiaki Murai, Hitoshi Hasegawa. Electro-magnetic analysis of inductrack magnetic levitation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 121 (10): 1049-1054.
- [32] 邓自刚, 李海涛 (Deng Zigang, Li Haitao). 高温超导磁悬浮车研究进展 (Research progress of high temperature superconducting maglev vehicle) [J]. 中国材料进展 (Materials China), 2017, 36 (5): 329-334, 351.
- [33] Wang J R, Wu M Z, May H, et al. High- T_c superconductive vehicle for maglev model [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1998, 27 (4): 240-242.
- [34] Wang J, Wang S, Zeng Y, et al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world [J]. Physica C Superconductivity & Its Applications, 2002, 378-381 (1): 809-814.
- [35] Schultz L, Haas O D, Verges P, et al. Superconductively levitated transport system—The SupraTrans project [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15 (2): 2301-2305.
- [36] Kuehn L, Haas O D, Berger D, et al. SupraTrans II: Test drive facility for a superconductor-based maglev train [J]. Elektrische Bahnen, 2012, (110): 461-469.
- [37] Sotelo G G, de Oliveira R, Costa F S, et al. A full scale superconducting magnetic levitation vehicle operational line [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25 (3): 1-5.
- [38] Deng Z. A high-temperature superconducting maglev ring test line developed in Chengdu, China [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (6): 1-8.
- [39] 刘文旭, 李文龙, 方进 (Liu Wenxu, Li Wenlong, Fang Jin). 高温超导磁悬浮技术研究论述 (Discussion on research on high temperature superconducting magnetic levitation technology) [J]. 低温与超导 (Low Temperature and Superconductivity), 2020, 48 (2): 44-49.
- [40] Ovidio G D, Crisi F, Lanzara G. A "V" shaped superconducting levitation module for lift and guidance of a magnetic transportation system [J]. Physica C Superconductivity, 2008, 468 (14): 1036-1040.
- [41] Thornton R, Clark T, Stevens K, et al. MagneMotion Maglev system [A]. 82nd Annual Meeting of the Transportation-Research-Board [C]. Washington, USA, 2003. 50-57.
- [42] 黄中荣, 罗世辉 (Huang Zhongrong, Luo Shihui). 基于 M3 车辆磁悬浮架结构方案的曲线通过能力研究 (Research on curve passing capacity based on M3 vehicle suspension frame structure scheme) [J]. 电力机车与城轨车辆 (Electric Locomotives and Urban Rail Vehicles), 2012, 35 (4): 1-5.
- [43] 黄中荣, 奚华峰 (Huang Zhongrong, Xi Huafeng). 基于 M3 磁悬浮车辆磁悬浮结构与解耦设计研究 (Research on suspension structure and decoupling design of maglev vehicle based on M3) [J]. 机车电传动 (Loco-

- motive Electric Drive), 2012, (4): 44-48.
- [44] 宋一锋, 林国斌 (Song Yifeng, Lin Guobin). 面向智能快速公交的 M3 磁悬浮交通系统 (M3 maglev transportation system for smart bus rapid transit) [J]. 现代城市轨道交通 (Modern Urban Rail Transit), 2020, (8): 89-92.
- [45] 蒋超华 (Jiang Chao-hua). 永磁混合磁悬浮列车驱动电机及其控制研究 (Research on drive motor and control of permanent magnet hybrid maglev train) [D]. 成都: 西南交通大学 (Chengdu: Southwest Jiaotong University), 2014.
- [46] 程虎 (Cheng Hu). 混合型 EMS 系统的低功耗磁悬浮控制技术研究 (Research on low power suspension control technology of hybrid EMS system) [D]. 长沙: 国防科学技术大学 (Changsha: National University of Defense Technology), 2005.
- [47] 李岭群 (Li Lingqun). 暗轨永磁补偿式磁悬浮路-车系统 (Dark rail permanent magnet compensated suspension road-vehicle system): CN2723262Y [P]. 中国专利 (Chinese Patent), 2005.
- [48] 李岭群 (Li Lingqun). 暗轨永磁双吸平衡补偿式磁悬浮路-车系统 (Dark rail permanent magnet double suction balance compensation suspension road-vehicle system): CN2725086Y [P]. 中国专利 (Chinese Patent), 2005.
- [49] 李岭群 (Li Lingqun). 吊轨永磁吸引磁悬浮和导向路-车系统 (Suspended rail permanent magnet attraction suspension and guide road-vehicle system): CN1775602Y [P]. 中国专利 (Chinese Patent), 2006.
- [50] 李岭群 (Li Lingqun). 吊轨永磁双吸平衡补偿式磁悬浮路-车系统 (Hanger rail permanent magnet double suction balance compensation suspension road-vehicle system): CN1680135Y [P]. 中国专利 (Chinese Patent), 2005.
- [51] “中华 01 号”磁悬浮列车运行成功 (The “China 01” maglev train runs successfully) [J]. 军民两用技术与产品 (Dual Use Technologies & Products), 2004, (11): 10.
- [52] 宗平 (Zong Ping). “中华 06 号”磁悬浮验证车运行成功 (The “China 06” maglev vehicle runs successfully) [J]. 军民两用技术与产品 (Dual Use Technologies & Products), 2005, (6): 13.
- [53] 超级高铁 (Hyperloop) 理念分析 (Analysis on the concept Hyperloop) [J]. 现代城市轨道交通 (Modern Urban Rail Transit), 2021, (4): 134-137.
- [54] 邓自刚, 张勇, 王博, 等 (Deng Zigang, Zhang Yong, Wang Bo, et al.). 真空管道运输系统发展现状及展望 (The development status and outlook of evacuated tube transportation system) [J]. 西南交通大学学报 (Journal of Southwest Jiaotong University), 2019, 54 (5): 1063-1072.
- [55] 苏靖棋 (Su Jingqi). 超级高铁可行性分析 (Feasibility analysis of Hyperloop) [J]. 现代城市轨道交通 (Modern Urban Rail Transit), 2020, (5): 114-118.
- [56] Matthias Plavec, Frank Michelberger. Eine analyse des hyperloop-konzepts [J]. Der Eisenbahn Ingenieur, 2020, (11): 52-55.
- [57] 谷江敏 (Gu Jiangmin). 秒杀磁悬浮的交通工具——超级高铁 (Spike maglev vehicle—Hyperloop) [J]. 中国经济报告 (Chinese Economy), 2016, (6): 114-116.
- [58] 崔丽媛 (Cui Liyuan). 国外研究: “超级高铁”真的要来了? (Research abroad: Is Hyperloop coming?) [J]. 交通建设与管理 (Traffic Construction and Management), 2017, (4): 44-47.
- [59] 谭元斌, 胡喆 (Tan Yuanbin, Hu Zhe). 我国将研制“高速飞行列车” (China to develop high-speed train) [J]. 城市轨道交通研究 (Research on Urban Rail Transit), 2017, 20 (9): 130.
- [60] 李云钢, 常文森, 闫宇壮 (Li Yungang, Chang Wensen, Yan Yuzhuang). 美国新型结构磁悬浮交通技术分析与比较 (Analysis and comparison of new structure maglev transportation technology in the United States) [J]. 机车电传动 (Locomotive Electric Drive), 2006, (3): 6-9.
- [61] Tang W B, Xiao L Y, Shi L M, et al. Research on the principle and structure of a new energy storage technology named vacuum pipeline maglev energy storage [J]. IEEE Access, 2020, 8 (1): 89351-89366.
- [62] Jones W. Earnshaw's theorem and the stability of matter [J]. European Journal of Physics, 2000, 1 (2): 85.

Summary of research on levitation-guidance modes in maglev rail transportation technology

TANG Wen-bing^{1, 2, 3}, XIAO Li-ye^{1, 2, 3}, WANG Su^{1, 2, 3}, ZHANG Jing-ye^{1, 2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Faster, safer, comfortable and environmentally friendly travel has always been pursued by mankind. In this context, the maglev rail transit has aroused widespread public concern and in-depth research in academic circles. This article attempts to make a comprehensive summary of the research status of levitation-guidance modes in maglev transportation technology, and proposes two new types of car-rail structure. In addition, the future development trend of the levitation-guidance mode is prospected. First of all, the current research status of existing maglev transportation technology was summarized. Then, the various levitation-guidance modes and its principle structure were summarized and analyzed. On this basis, seven maglev lines (two commercial operation lines and five experimental demonstration lines) were taken as examples. The technical characteristics of the levitation-guidance mode were summarized and compared. Then, the hybrid levitation-guidance mode of permanent magnet and electromagnetic, the hybrid levitation-guidance mode of permanent magnet and high temperature superconducting and their corresponding car-rail structure were proposed, and the principles and advantages of the two levitation-guidance modes were analyzed and discussed. Finally, the future development trend of the levitation-guidance mode in maglev transportation technology was prospected.

Key words: maglev rail transportation; levitation-guidance mode; electromagnetic levitation; permanent magnetic levitation; car-rail structure