

文章编号:1671-1637(2021)01-0177-22

高速磁悬浮轨道交通研究进展

熊嘉阳^{1,2}, 邓自刚¹

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:从磁悬浮轨道交通的基本原理、磁悬浮列车的技术特点等角度出发,简述了世界各国高速磁悬浮轨道交通的发展概况,对比了常导电磁悬浮、永磁电动磁悬浮、低温超导电动磁悬浮和高温超导磁悬浮等 4 种磁悬浮方式的研究历史、悬浮特点、悬浮间隙、悬浮能耗、控制系统、技术成熟度与应用情况;采用文献调研、比对、分析、提炼等方法,综述了国内外高校、研究机构和企业对于高速磁悬浮的研究进展;比较了各类磁悬浮轨道交通的原理、技术优势和劣势,分析了高速磁悬浮轨道交通在应用方面的可行性与不足,探讨了 4 种磁悬浮方式的技术经济性和应用前景与场景;提出了当前发展高速及超高速真空管道磁悬浮轨道交通亟待解决的牵引制动控制、动力和热力学、安全救援、管道密封性能与抽真空效率、无线通信、车内环境控制等 6 个关键科学问题,并介绍了中国原创高温超导磁悬浮的基础研究及关键技术研发进展与研发计划。研究结果表明:在 $400\sim 600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度范围可采用常导电磁悬浮或超导磁悬浮技术;在 $600\sim 1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度范围可采用超导磁悬浮技术; $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以上的速度可采用高温超导磁悬浮与真空管道或电动磁悬浮与真空管道的磁悬浮技术;作为一种前瞻性研究,高温超导与真空管道磁悬浮关键技术的突破和验证对推动中国乃至世界轨道交通快速发展具有重大而深远的意义。

关键词:轨道交通;高速磁悬浮;磁悬浮列车;关键技术;高温超导;真空管道;研究进展

中图分类号:U271.91 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.01.008

Research progress of high-speed maglev rail transit

XIONG Jia-yang^{1,2}, DENG Zi-gang¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The development of high-speed maglev rail transit across the world was summarized based on the basic operating principles and technical characteristics of maglev trains. The electromagnetic suspension (EMS), permanent magnet electrodynamic suspension (PMEDS), low-temperature superconductor electrodynamic suspension (LTSEDS), and high-temperature superconducting magnetic levitation (HTS maglev) were compared in terms of their research histories, suspension characteristics, suspension gaps, suspension energy-consumption levels, control systems, technical maturity, and state of use. The progress of research on high-speed maglev in domestic and foreign universities, research institutions, and enterprises was summarized based on the literature research, comparison, analysis and refinement. The

收稿日期:2020-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(U19A20102)

作者简介:熊嘉阳(1969-),男,四川峨眉人,西南交通大学副教授,工学博士,从事车辆轨道系统动力学、磁悬浮车辆系统动力学研究。

引用格式:熊嘉阳,邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报,2021,21(1):177-198.

Citation: XIONG Jia-yang, DENG Zi-gang. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177-198.

principles, technical strengths and weaknesses of various maglev rail transits were compared to analyze the viability and inadequacies of high-speed maglev rail transit in practical applications. The technical economy, application prospects and scenarios of four maglev modes were discussed. Six key scientific problems for the development of high-speed and ultra-high-speed vacuum-tube maglev rail transit were identified. These include the traction/braking control, kinetics and thermodynamics, safety and rescue protocol, sealing performance and vacuum pumping efficiency of tube, wireless communication, and interior environment control. The progress and plan of research and development in basic research and key technologies for HTS maglev originated in China were also described. Research results shows that the EMS or superconducting maglev technology is suitable for speeds between $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. The superconducting maglev technology can be used for speeds between $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and $1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Speeds of $1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ or greater require the maglev technologies of HTS maglev or EDS with vacuum-tube. As a prospective study, the technological breakthrough and validation in HTS with vacuum-tube maglev have profound and far-reaching implications on the rapid development of rail transit in China and even the world. 2 tabs, 15 figs, 72 refs.

Key words: rail transit; high-speed maglev; maglev train; key technology; high-temperature superconducting; evacuated tube; research progress

Author resume: XIONG Jia-yang(1969-), male, associate professor, PhD, jyxiong@swjtu.edu.cn.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U19A20102)

0 引 言

磁悬浮(Magnetic Levitation, Maglev)是人类科技史上的一项重大发明,可用于交通运输,其运行原理完全有别于传统轮轨交通技术。磁悬浮列车的运行依靠磁力(磁吸力或磁斥力)推动,是一种没有车轮的无接触式悬浮、导向及驱动的陆上新型轨道交通工具,因彻底摆脱了轮轨关系的束缚,其速度、运量、功率、载重、舒适性和安全性等均有更好的表现^[1]。

工业革命进程的快速推进促进了人类对磁悬浮技术的探索与研究,并取得了很好的研究成果。磁悬浮列车的出现被认为是人类交通史上的伟大变革^[2],实现了车辆与轨道的无接触运行,丰富和完善了交通运输网络,改变了世界交通运输格局,并通过不断的理论创新与应用研究,持续推动着磁悬浮交通的长远发展。

尤其是进入 21 世纪后,伴随第四次工业革命的来临和全球经济社会的快速发展,快捷高效的客运需求快速增长,推动着轨道交通领域的飞速发展。磁悬浮轨道交通由于速度域宽、爬坡强、噪声小、平稳性好、安全性高、环保节能、维护成本低以及适应性强等方面的优势,在轨道交通中脱颖而出,是一种极具竞争力的绿色地面交通工具^[3-4],受到全世界的

广泛关注,成为轨道交通领域竞争的热点,各国竞相推出实施方案。21 世纪,中国磁悬浮轨道交通也取得快速突破:高速磁悬浮率先实现商业化运营;中低速磁悬浮工程化应用领跑全球;原创高温超导磁悬浮技术研发持续深入。超高速低真空管道磁悬浮轨道交通已被列为面向 2035 年的国家重大颠覆性工程技术。

1 磁悬浮轨道交通概述

1.1 磁悬浮轨道交通原理

磁悬浮技术是指利用磁力克服重力使物体悬浮的一种技术,属典型的机电一体化技术,整合了电力电子、电磁学、机械学、动力学、控制工程和信号处理等技术,并集成运用于磁悬浮列车上。

磁悬浮列车主要包括三大系统:悬浮系统、驱动系统和导向系统^[5],其悬浮运动的基本原理是利用磁铁产生的强大磁吸力或磁斥力使列车悬浮,并通过直线电机产生的牵引力驱动列车前进。魏庆朝等所著的《磁悬浮铁路系统与技术》一书中,按照车辆悬浮原理及方式不同,将磁悬浮技术分为常导电磁悬浮(Electromagnetic Suspension, EMS)、电动磁悬浮(Electrodynamic Suspension, EDS)、超导钉扎磁悬浮(Superconducting Pinning Levitation, SPL)3 种形式,其中电动磁悬浮又分为永磁电动磁

悬浮 (Permanent Magnet Electrodynamic Suspension, PMEDS) 和低温超导电动磁悬浮 (Low-Temperature Superconducting Electrodynamic Suspension, LTSEDS), 超导钉扎磁悬浮又称高温超导磁悬浮 (High-Temperature Superconducting Magnetic Levitation, HTS Maglev)。

1.1.1 常导电磁悬浮

常导电磁悬浮技术基于铁磁原理, 依靠车载电磁铁与铁磁性轨道之间的磁吸力平衡重力, 使车体悬浮。其原理如图 1 所示, 安装于车上的常规电磁铁既用于悬浮和导向, 也作为同步直线电机的激磁绕组。安装于 T 型导轨 (轨道梁) 上的长定子铁心和导向铁轨与电磁铁相互作用产生悬浮力和导向力。在长定子铁心槽内沿线连续铺设的三相电枢绕组中的电流与电磁铁相互作用产生驱动力。供电采用万千瓦级电力电子变频电源, 实时切换到列车所在区段, 根据车速变频调节。列车的位置与速度信息须实时传输到控制室, 还须采用最先进的地面控制系统, 即常导磁悬浮系统对控制的要求非常高, 依靠车载直流电磁铁产生的吸力吸引轨道下方的磁回路, 从而使车体悬浮。

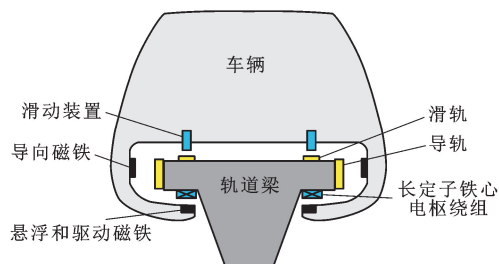


图 1 EMS 原理示意

Fig. 1 Schematic of principle for EMS

走行部左右两侧安装的导向电磁体与导向轨侧面之间保持一定的间隙, 当车辆发生横向偏移时, 导向电磁体与导向轨相互作用, 两侧导向电磁体吸引力的合力使车辆恢复到中心位置。当车辆的运行状态发生变化时, 例如在曲线或坡道上运行时, 控制系统将调节导向磁体中的电流, 以保持这一间隙来控制列车运行方向。

常导电磁悬浮采用常规导体材料作为电磁铁线圈绕组, 产生悬浮力和导向力, 优点是结构简单、维护方便, 缺点是由于材料电阻较大, 电流损耗大, 产生的电磁力小, 车辆悬浮高度较小 (一般为 8~12 mm)。常导电磁悬浮一般采用列车两边包住轨道的抱轨形式, 通过车体底部的常规电磁体与位于电磁体上方的导磁轨道间的吸引力实现悬浮, 常导电磁悬浮又分为高速磁悬浮和中低速磁悬浮 2 类。

1.1.2 永磁电动磁悬浮

永磁电动磁悬浮技术是利用永磁体同极相斥的原理使车体悬浮。悬浮原理简单, 在车辆走行部底端安装有由钕铁硼材料制成的永磁体, 而在轨道上方安装有导体 (导体板)。图 2 为美国蒙哥马利院士团队提出的永磁电动磁悬浮列车方案示意。

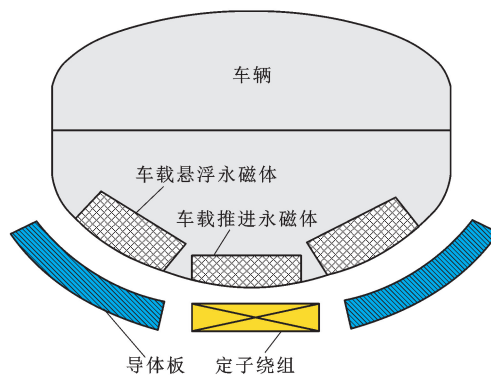


图 2 PMEDS 原理示意

Fig. 2 Schematic of principle for PMEDS

当车载悬浮永磁体 (悬浮 Halbach 阵列) 相对于导电轨道运动时, 分布于导体板轨道内的磁场相对于导体板发生变化, 根据电磁感应定律, 在导体板内产生感应电动势, 导体板本身各部分之间构成回路, 生成与磁体一起运动的镜像涡流, 涡流磁场与车载磁体相互排斥产生悬浮力, 只要悬浮力足够大, 车辆就会悬浮起来, 车辆在运动方向上则受到来自涡流的电磁阻力。然而由于需达到一定车速 ($20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 才能有足够的悬浮力使车体悬浮, 故在静止或低速时车体无法悬浮, 同时因无法直接为车辆提供导向力, 需设导向机构。

车体运动时, 永磁体的磁场在轨道的导体板内形成涡流, 产生斜向上的排斥力, 排斥力垂向分力为悬浮力, 横向分力为导向力。当车体位于轨道中心时, 左右导向力大小相等, 方向相反, 相互抵消; 当车体发生右 (左) 侧横向位移时, 右 (左) 侧导向力增大, 左 (右) 侧导向力减小, 导向力将使车体趋于中心位置。

永磁电动磁悬浮采用长定子直线电机驱动, 定子沿轨道连续分布, 转子采用车载推进永磁体 (驱动 Halbach 阵列) 安装在车体中央, 推力由轨道上定子绕组 (驱动绕组) 的高频交流电流产生。车辆悬浮高度可达 20~30 mm, 速度可达 $550 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。永磁体使用经济, 系统可靠, 原理简单, 建造方便。

1.1.3 低温超导电动磁悬浮

低温超导电动磁悬浮采用低温超导材料将材料温度降到极低 ($-269 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 以至超导状态, 趋于零电

阻。由于电流损耗小,电磁铁功率较大,车辆悬浮高度可达 80~150 mm,缺点是会产生强磁场(最大磁场强度大于 5 T)。低温超导电动磁悬浮一般采用轨道包住列车的形式,利用车辆与轨道间的磁斥力悬浮,可实现列车在 $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上的速度运行。

低温超导电动磁悬浮技术基于动生电动势原理,依靠车载磁体与轨道线圈之间的磁斥力平衡重力使车体悬浮。低温超导起源于 1966 年美国约翰·霍普金斯大学 Powell 教授的专利。目前日本在该领域处于领先地位,Sawada^[6]采用低温超导线材开发了低温超导电动磁悬浮列车,将 Nb-Ti 线低温超导线圈浸泡在温度为 4.2 K 的液氮中,通过冷却达到超导态,其原理如图 3 所示。在超导线圈中通电流,形成强磁场超导磁体,U 型轨道梁侧壁上连续排布着“8”字线圈。当车载低温超导磁体沿轨道水平移动时,轨道侧壁上线圈内会产生感应电流,“8”字线圈下部磁场与车载超导磁体之间相互排斥,上部磁场与车载超导磁体之间相互吸引,实现车体悬浮^[7]。由于低速时感应电流较小,列车需达到一定运行速度($120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)才能起浮。

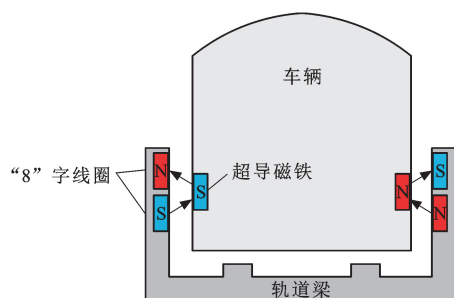


图 3 LTSEDS 原理示意

Fig. 3 Schematic of principle for LTSEDS^[8]

“8”字线圈的零磁通原理既用于悬浮系统,也用于导向系统。位于两侧的悬浮线圈和导向线圈分别用电缆相连。若车辆偏离导轨中心,系统会自动使导轨每侧的悬浮线圈和导向线圈的极性相同,并让偏离侧的地面磁场与车体的超导磁场产生吸引力,靠近侧的地面磁场与车体磁场产生排斥力,从而使车体保持在导轨中心。

1.1.4 高温超导磁悬浮

高温超导是相对于低温超导而言的,前者的冷却温度为 $-196 \text{ }^{\circ}\text{C}$,后者为 $-269 \text{ }^{\circ}\text{C}$,表示工作温度得到了很大的提高^[2]。高温超导磁悬浮技术基于感生原理,依靠车载高温超导体与永磁轨道之间的感应磁斥力平衡重力使车体悬浮。在外磁场中,高温超导体(非理想第二类超导体)独有的强钉扎力使得

磁力线既难逃离钉扎中心的束缚(已经被俘获的磁力线),也难渗透进入超导体内(未被俘获的自由磁力线)。这种独特的钉扎特性使得超导体随外磁场的变化而感应出阻碍这种变化的超导强电流,它与外磁场的电磁相互作用产生与悬浮体自身重力平衡的悬浮力,并提供横向稳定所需的导向力。由于这类超导体能在价廉的液氮温区(77 K)中表现出良好的超导性能,因而可以简化低温制冷系统结构^[8]。

从微观上讲,高温超导体材料制备过程中产生的位错、沉淀物等结构缺陷形成位能势阱。将正常态超导块材放入磁场中时,磁场能穿过块材,块材冷却进入超导态后,位能势阱能阻止磁通线移动并束缚它,即磁通俘获或钉扎效应。超导态高温超导块材向永磁体逐渐靠近,外界磁场以磁通量子束形式进入超导体内,在其通过的路径上遇到晶格缺陷或掺杂等(钉扎中心),钉扎中心(非超导区域)周围超导区域将产生涡流而锁牢磁通量子束^[9-11],从而形成宏观上呈现的自稳定悬浮现象。

高温超导磁悬浮整车系统主要由车载超导块材及其低温系统、地面永磁轨道系统和直线驱动系统三大关键部分组成,其原理如图 4^[8]所示。车载超导体采用熔融织构法制备的圆柱形或方形高温超导体 YBaCuO 块材,轨道由 NdFeB 永磁体和聚磁铁轭等按一定的结构组装而成,直线驱动则由感应直线电机或同步直线电机来完成。

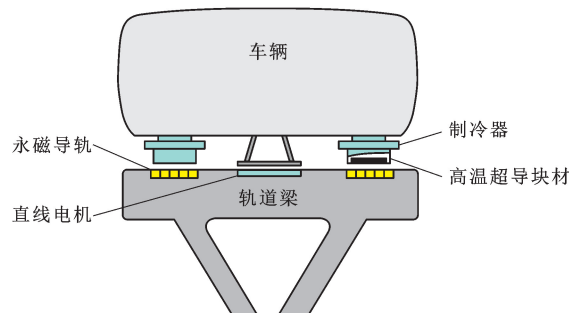


图 4 HTS Maglev 原理示意

Fig. 4 Schematic of principle for HTS maglev

车辆悬浮高度为 10~30 mm,车体质量约为轻轨车的 1/2,基建成本较低;冷却所需液氮来自空气,又排放回空气,对环境无污染;运行能耗仅为飞机的 1/20;永磁轨道产生静磁场,以西南交通大学 Halbach 型永磁轨道为例,距离轨道上方 56 mm 处的磁场为 34.05 mT,侧向距离轨道边缘 38 mm 处磁场为 37.44 mT,低于国际非电离辐射防护委员会推荐的静磁场暴露标准(不大于 40 mT)。可见,高温超导磁悬浮列车是一种高效、节能、环保、安全、舒

适的未来轨道交通工具^[8]。

1.2 磁悬浮技术特点

Shah等所著的《高速磁悬浮与高速轮轨交通系统比较》中列出了磁悬浮列车和轮轨列车不同的技术特点。磁悬浮列车的悬浮及导向功能是由电磁力控制的,避免了轮轨列车依靠轮轨接触实现牵引带来的弊端。以下分别简述各类磁悬浮列车的技术特点。

1.2.1 常导电磁悬浮

常导电磁悬浮利用车辆和轨道间磁场的吸引力悬浮,其技术特点如下。

(1)采用电磁吸力式悬浮。

(2)无需冷却系统等附加设备。

(3)通过控制系统动态实时检测车体在空间的相对位移(垂向和横向),并将检测到的位置信息及时反馈给控制系统,通过调节电磁铁中的电流来稳定悬浮。

(4)列车在静止或低速时能够实现悬浮,但需要精确的主动控制系统才能实现,其动态稳定性需要复杂的控制系统支持。

1.2.2 永磁电动磁悬浮

永磁电动磁悬浮利用轨道导体板涡流磁场与车载永磁体间的排斥力悬浮,其技术特点如下。

(1)轨道上不需要铺设永磁铁,只需要铺设铝感应板,可大大降低成本。

(2)只在车体上安装永磁铁,不需要装感应线圈,质量大大减轻。

(3)通过直线电机驱动,当车速达到 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上时,利用铝感应板切割磁力线产生磁场来悬浮车体,因此,车辆在静止或低速时不能悬浮。

(4)无自导向能力,需设置专门的导向机构。

1.2.3 低温超导电动磁悬浮

低温超导电动磁悬浮依靠车内超导体切割两侧线圈产生磁斥力悬浮,其技术特点如下。

(1)适用于高速,速度越高悬浮力越大,而磁阻力下降,效率提高,自悬浮,自导向,悬浮能力强。

(2)在应用速度下,悬浮间隙是常导电磁悬浮列车的10倍,且无需主动控制。

(3)强大的磁场让乘客无法使用心脏起搏器或磁性数据储存装置,需要进行磁屏蔽,列车须依靠车轮做低速运行,适用于大城市间长距离高速运行。

(4)由于涡流效应,悬浮能耗较常导电磁悬浮更大, $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ (液氮)低温系统结构(包括液氮回收装置)复杂且重,温度非常低,运维成本高,悬浮力与涡流损耗成正比,高涡流损耗问题始终难以解决。

(5)由于道岔设计和施工较为复杂,导致线路建设整体成本高,日本东京至名古屋 286 km ,折合人民币 $13.25\text{ 亿元}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

(6)列车运行时振动与激扰相互作用,速度提升到一定程度时振动会加剧,噪声增强,影响乘坐体验。

(7)列车静止和低速时无法悬浮,速度达到 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 才能悬浮,因此,低温超导电动磁悬浮列车不适合站间距短和需要频繁启动停车的城市轨道交通系统^[12]。

(8)超导材料需要在特殊条件下进行管理维护,费用高昂。

1.2.4 高温超导磁悬浮

高温超导磁悬浮用永磁体做轨道,高温超导体置于车上,利用磁通钉扎效应实现列车悬浮、悬挂和沿永磁轨道前行,其技术特点如下。

(1)列车悬浮和导向均通过钉扎现象实现,无需主动控制,具有自稳定、自悬浮、自导向特性,可靠性极高。

(2)高温超导磁悬浮运行方向上无固有磁阻力,易于实现高速稳定运行^[8]。

(3)车辆不通电能够静浮。

(4) $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (液氮)的低温系统简单,比液氦经济很多,且容易获取。

(5)结构简单,整车轻量化(车载设备少)。

(6)车辆悬浮高度适中($10\sim 30\text{ mm}$),对建筑施工精度要求较低。

(7)能高速,可达 $600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以上,若加真空管道,速度还可更高,提速空间很大,车载高温超导体特有的自导向力可保证其在速度 $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上安全可靠行驶,原理上高温超导磁悬浮可适用于全速度域^[13],适应于不同的市场定位和需求。

(8)属于西南交通大学原创技术^[14],关键技术自主开发,拥有完全自主知识产权,基础研究积淀雄厚,不受制于国外。

1.2.5 高温超导磁悬浮与低温超导电动磁悬浮比较

高温超导磁悬浮和低温超导电动磁悬浮分别是利用高温超导材料和低温超导材料实现悬浮的,二者的主要技术特点对比如下。

(1)高温超导体具有较高的临界温度、临界电流密度和临界磁场,工作在液氮温区可大大降低列车制造和运行成本,节能环保,应用前景更为广阔。

(2)由于低温超导体的热不稳定性,在其内部产生的局部热会引起大的磁通跳跃,容易导致超导体失超;相反,高温超导体块材比热容大,热稳定性好,

不易失超。

(3)高温超导磁悬浮利用超导体磁通钉扎作用,在外磁场中产生一个较大的屏蔽电流实现磁悬浮,同时部分穿过超导体的磁通产生横向稳定的导向力。

(4)高温超导体块材的悬浮力和导向力与悬浮间隙呈指数函数增长,可以保证上下左右长期无故障稳定工作,真正实现安全舒适;悬浮导向系统无需供能,可降低运营成本。

1.3 各国高速磁悬浮轨道交通发展概况

高速磁悬浮轨道交通系统的研发是一个需要持续坚持和长期得到支持的过程,建设与运营中有很

多难题需要解决,目前尚未真正形成产业化,与已建成和运营 50 多年的高速轮轨列车相比,在技术成熟度、建设运营经验和产业化方面差距明显。当然,这是任何一种新技术相比于传统技术都会经历的过程,高速磁悬浮轨道交通也不例外。

表 1^[15-16]列出了不同磁悬浮方式的情况对比。几种磁悬浮方式中,常导电磁悬浮和低温超导电动磁悬浮技术已经成熟,分别由德国和日本掌握。中德合作推动了常导电磁悬浮在中国的商业运营;高温超导磁悬浮(包括真空管道高温超导磁悬浮)目前处于研发和测试阶段,尚未实现商业运营;美国计划采用的永磁电动磁悬浮也还在研发中。

表 1 不同磁悬浮方式的情况对比

Tab. 1 Comparison of different maglev modes

悬浮类型	常导电磁悬浮	永磁电动磁悬浮	低温超导电动磁悬浮	高温超导磁悬浮
开始时间	1934 年专利	20 世纪 40 年代	1966 年专利	20 世纪 90 年代开始, 2001 年中国专利
导轨类型	T 型导轨	弧形导体板轨道	U 型导轨	平板式导轨
车载磁体	线圈	永磁体	超导线圈	超导块材
路轨铺设	硅钢片	铝感应板	“8”字线圈	永磁导轨
悬浮间隙/mm	8~12	20~30	80~150	10~30
推进方式	直线电机	直线电机	直线电机	直线电机
控制系统	需主动控制,控制复杂,要求高	导向需主动控制	较复杂	简单
悬浮能耗	较高	较低	较高	较低
悬浮特点	电磁吸力,需能耗,静止可悬浮,悬浮气隙较小	电动斥力,悬浮不耗能,高速时悬浮,临界稳定,高速需引入阻尼以保证稳定	电动斥力,静止和低速时需轮子支撑,悬浮气隙大,高速需引入阻尼以保证稳定	磁通钉扎力,不通电、静止可悬浮,无源自悬浮,自稳定,自导向
试验速度/(km·h ⁻¹)	550	463	603	≥1 000
研究技术的主要国家	德国、日本、中国、韩国	美国	日本	中国
技术成熟度	已商业运营	试验研究	准商业运营	试验研究
应用情况	中国上海浦东磁悬浮示范线、日本 HSST 型低速磁悬浮列车、美国 Grummam 方案、美国 AMT 磁悬浮系统	美国 Hyperloop、美国 Inductrack 磁悬浮系统、美国 Magplane	日本 MLU 系列	西南交通大学 Super-Maglev 试验线、德国 SupraTrans 系列试验车、巴西 Maglev Cobra 悬浮试验线、意大利拉奎拉大学 V 型轨道

20 世纪 60 年代以来,德国、日本、美国、中国、巴西、意大利和韩国等相继开展磁悬浮轨道交通技术研究,不同国家基于不同的国情,选择了不同的发展战略、发展模式和技术路线。德国和日本较早投入研发,分别突破了不同技术路线的磁悬浮轨道交通模式^[17]。磁悬浮轨道交通投入高、周期长、技术相对复杂,发展受到技术、经济等诸多因素制约,同时还面对传统轮轨交通、航空等交通模式的竞争,因此,在全球的发展都较为缓慢、审慎且充满不确定性。

德国长期以常导电磁悬浮技术为发展主线,掌

握了常导电磁型高速磁悬浮轨道交通技术,所研发的 Transrapid (TR)是世界上首个进入技术应用成熟阶段的磁悬浮高速铁路系统,TR 车型从 01 发展到 09,最高试验速度接近 550 km·h⁻¹^[18]。遗憾的是,由于技术、经济等原因,德国 20 世纪 90 年代初开始规划的高速磁悬浮线路数次搁浅,2011 年便终止了研发之路。

美国政府对发展高速磁悬浮轨道交通的态度始终摇摆不定,研发支持也时断时续,但在民间资本助推下,美国开展了大量前瞻性技术探索并取得一定

进展。美国曾有意向引进日本的超导磁悬浮技术,双方设立了合资公司,共同开展了环境和技术评估^[19-21]。美国磁悬浮技术发展方向比较灵活,民间研发热情很高,创造性推出了多种技术方案,尤其以真空管道磁悬浮列车(超级高铁)系统的探索和研究最为引人注目。

2 国内外高速磁悬浮研究现状

自 1842 年英国物理学家 Earnshaw 首次提出磁悬浮的概念开始,磁悬浮技术的探索和研究至今已跨越 3 个世纪。

2.1 国外高速磁悬浮研究现状

2.1.1 德 国

针对高速磁悬浮轨道交通,1922 年 Kemper 首先系统提出了电磁悬浮原理,1934 年获得世界上第 1 项有关磁悬浮技术的专利。直到 1969 年德国开展了包含高速磁悬浮轨道交通的高运力快速铁路研究,才真正开始了工程化进程,聚力发展高速常导磁悬浮轨道交通系统^[22-23]。1971 年,德国 MBB 飞机公司完成了速度为 $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的第 1 辆磁悬浮原理车 TR01 和一条长 660 m 的试验线并投入试验运行,同年完成了速度为 $164 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的载人磁悬浮列车 TR02^[24]。1973 年,德国又研制完成了速度为 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的载人磁悬浮列车 TR04^[25]。1975 年,Thyssen Henschel 公司研制了线路侧长定子直线同步电机驱动的 HMB 磁悬浮车辆,首次将直线驱动和悬浮支承集成于一体,奠定了德国 TR 系列高速磁悬浮列车的基础。同年德国还利用蒸汽火箭推力,研制了速度为 $401.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的 Komet 型空载运行磁悬浮列车^[26]。1976 年,德国展示了以长定子线性电机为原理的载人磁悬浮列车,之后几十年,德国持续研制该类型磁悬浮列车,分别于 1987、1989 年研制出速度分别为 406 、 $436 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的 TR06、TR07 型载人磁悬浮列车。1983 年 6 月,德国建成了长 21.5 km 的 TVE 试验线,试验速度达 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。为进一步提高试验速度,1984 年扩建南环线,1987 年建成,使得 TVE 试验线总长达到 31.5 km,速度增至 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。1986~1989 年间 TR07 型列车通过了一系列试验。1991 年底,德国得出 TR 系列高速磁悬浮轨道交通技术已经成熟的结论。据刘华清等编译的《德国磁悬浮列车 Transrapid》中介绍,1993 年 TR07 的速度就已经提高到 $450 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,2007 年发展到了 TR09 型列车^[27]。2009 年在 TVE 试验线上开始 TR09 型磁悬浮列车的测试,最高速度接近 $550 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。图 5 为德国研制

的 TR 系列磁悬浮试验车。



(a) TR08磁悬浮试验车



(b) TR09磁悬浮试验车

图 5 德国 TR 系列磁悬浮试验车

Fig. 5 German TR series maglev test vehicle

德国高温超导磁悬浮车研究主要由德国布尼兹固体与材料物理研究所进行,研制出两代高温超导磁悬浮试验车,分别命名为 SupraTrans-I^[28-29] 和 SupraTrans-II^[30]。2004 年,德国首辆载人高温超导磁悬浮列车 SupraTrans-I 在布尼兹固体与材料物理研究所诞生,直线轨道长 7 m,最大载重达 350 kg。2011 年,布尼兹固体与材料物理研究所建成长 80 m 的环形试验线,研制出 SupraTrans-II,试验车可搭载 2 人,最大加速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,最高运行速度为 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,以直线感应电机驱动,并设计了曲线和道岔。

2.1.2 日 本

日本高速磁悬浮选择了低温超导电动磁悬浮,将低温超导材料运用于磁悬浮列车中,属于超导电动磁悬浮技术。1970 年着手研究,1979 年日本国铁 (Japanese National Railway, JNR) 研制的 ML500 试验车在宫崎试验线上创造了空载速度 $517 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的世界纪录^[31]。1980 年,宫崎试验线地面轨道截面从 T 型变为 U 型,轨道线圈开始分立在列车两侧。之后,JNR 推出了 MLU001、MLU002 磁悬浮列车。为了实现载人运行,1987 年设计了有 44 个座位的

MLU002 型列车,并完成了载人运行,其试验速度达到了 $408.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[32]。1994 年研制了具有防火功能的 MLU002N 型列车,其无人运行速度达到了 $431 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[33]。1995 年研制出超导准商运磁悬浮列车 MLX01,1997 年在 18.4 km 长的山梨磁悬浮试验线进行了载人试验,最高运行速度达 $531 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,不载人高速试验速度达 $550 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[34]。1999 年完成速度为 $552 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的载人试验^[35]和 $1\,003 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 迎面会车相对速度试验,2003 年改进后的新型试验车 MLX01-901 试验速度达 $581 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[36],会车相对速度达 $1\,026 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,再次刷新了地面交通工具最高试验速度纪录。2012 年,日本 JR 东海铁路公司公布了 L0 系列(在 MLX01 型基础上研发)磁悬浮列车,最高设计速度为 $505 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,被确定为适应商运的第一代列车,计划用于高速磁悬浮中央新干线(计划全长 286 km,其中 86% 为隧道)。图 6 为在宫崎试验线上的日本 MLU002 型超导磁悬浮车(图片来自网络)。

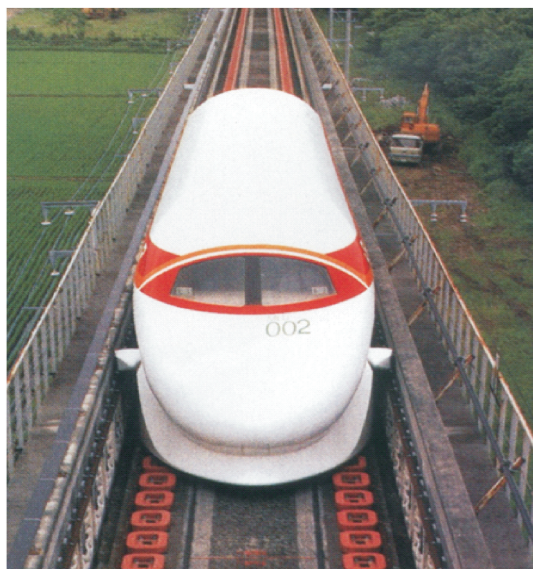


图 6 在宫崎试验线上日本 MLU002 型超导磁悬浮车

Fig. 6 MLU002 superconducting maglev vehicle on Miyazaki Test Line, in Japan

自 2014 年 5 月起,日本政府实施了非轮轨接触式低温超导电动磁悬浮商业线项目,计划于 2027 年建成东京到名古屋线路,速度为 $505 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,东京到大阪 498 km 可 1 h 直达。2015 年,L0 型磁悬浮列车实现了载人 $603 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的试验速度^[37],创下了有车厢车辆的最高陆地速度纪录。日本产业技术综合研究所^[38]还研制出高温超导磁悬浮系统。

2.1.3 美 国

1904 年,现代火箭之父 Goddard 在演讲中提

到,要在波士顿和纽约之间建一条真空管道铁路线,这是最早的关于真空管道轨道交通的设想。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悬浮线路的设想。1978 年,兰德公司的研究人员提出,由电磁悬浮车辆和地下一定真空度的管道组成地下交通——运输之星。1998 年,美国公布 21 世纪交通公正法,以法律形式规定要在美国发展磁悬浮轨道交通技术,由联邦铁道部和交通部具体负责实施。

美国 ET3 公司较早详细地提出真空管道运输的概念。1999 年,美国工程师 Oster 申请并获得真空管道运输(Evacuated Tube Transport, ETT)系统发明专利,注册成立了 ET3 公司,提出在纽约和洛杉矶间修建一条长 4 600 km 的线路,最高速度为 $6\,500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,预计成本为 $125 \text{ 万美元} \cdot \text{km}^{-1}$,每车 27 万美元。ET3 公司在专利中全面地介绍了系统的各个部分,包括管道、车辆、真空设备、加速装置、刹车系统、减振装置、管道定位器、道岔装置、自动控制、检测与维护装置、施工方法和安全系统等^[39]。

2003 年以来,美国铁路员工 Swartzwelte 提出了美国地铁的思路,即在美国建设真空管道磁悬浮地铁系统,使城市之间直线连接,希望形成畅通无阻的地下交通网络。

美国 Magplane 公司采用永磁电动磁悬浮、直线同步电机驱动提出了 2 种方案,分别为速度在 $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右的高速方案和速度在 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右的准高速方案,高速方案采用超导技术,准高速方案为永磁悬浮。

2013 年,美国特斯拉汽车首席执行官 Musk 抛出低空气阻力 Hyperloop 超级高铁概念,提出初始计划方案后^[40],Hyperloop One 公司计划修建时速超过 $1\,200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的真空管道胶囊列车,Musk 设想的 Hyperloop 系统主要包括胶囊车辆、真空管道、驱动系统、供电系统 4 个部分。2016 年 5 月 11 日,Hyperloop One 在西部内华达州荒漠首次公开测试了 Hyperloop 管道运输中的推进系统,实现了 1 s 加速到 $96 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,这一测试结果使得真空管道高速磁悬浮交通概念再次引起全球关注。若 Hyperloop 概念得以实现,洛杉矶到旧金山(560 km)将实现 0.5 h 直达。2016 年,加拿大 TransPod 公司提出一套类似的超级高铁方案,将 EMS 与真空管道相结合,使多伦多至蒙特利尔只需 0.5 h。这些方案,包括中国西南交通大学的 Super-Maglev 平台,均在磁悬浮和低压真

空管道概念技术上取得不同程度的突破。2017 年,Hyperloop One 首次在真空环境中全面测试其超级高铁技术,利用电动磁悬浮技术在内华达沙漠搭建了 500 m 长的真空管道试验线,实现了 $310 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的最高速度。图 7 为美国 Hyperloop One 公司研制的真空管道磁悬浮车辆(图片来自网络)。



图 7 美国 Hyperloop One 公司研制的真空管道磁悬浮车辆

Fig. 7 Vacuum-tube maglev vehicle developed by Hyperloop One Company in the United States

Hyperloop 与其他现有高速运输系统的最大区别在于车辆的容量小,运输能力相对较低。座位数少、单管双向运营、安全和环保要求严格等因素可能是提高运输能力的最大障碍。未来对 Hyperloop 的运输需求将取决于其在旅行时间增益、票价、旅行舒适性、技术可靠性以及安全性方面相对于其他运输系统是否具有综合优势。此外,Hyperloop 极高的运行加速度和制动减速度会给未经训练的旅客带来不好的乘坐体验。研发人员将针对车辆加、减速过程优化(以免令人不适)、低真空管道中的能量需求和车辆的安全运行控制等方面进行更深入的研究^[41]。

美国 HTT 公司在加州建造 5 英里试验线的计划搁浅后,又考虑在法国图卢兹建造试验场。2018 年 4 月,HTT 公司计划在阿布扎比修建真空管道运输系统,还与中国贵州铜仁等多方签订了共同研发协议。超级高铁目前已跨过概念阶段,可能成为新兴产业。

2015 年 Musk 的 Space X 公司在洛杉矶 1.6 km 真空管道磁悬浮赛道上举办了首届 Space X Hyperloop Pod Competition,吸引了众多队伍参赛。2018 年 7 月,德国慕尼黑工业大学的 WARR Hyperloop 团队在第三届竞赛中夺冠,竞赛车最高速度达 $463 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,为 ETT 系统的最高速度纪录^[39]。

2.1.4 巴 西

巴西一直热衷于磁悬浮技术研究,里约热内卢联邦大学从 1998 年开始研究高温超导磁悬浮,2014 年建成一条长 200 m 的 Maglev-Cobra 高温超导磁悬

浮试验线。试验车为轻质纤维材料,可搭载 20 人,最高速度达 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,试验线由高架桥组成,从空中连接 2 栋教学楼^[42-43]。Maglev-Cobra 磁悬浮技术的轨道由 NdFeB 永磁体按照混合型 Halbach 结构排列而成。Maglev-Cobra 的电机初级绕组置于车体上,次级感应板铺在轨道中央,虽然可节约铺设费用,但在车体上安装受电装置却增加了接触,与高速无接触的高温超导磁悬浮理念相背,适用于短距离中低速线路。同期巴西研究团队做了详细比较,发现相同载重下高温超导磁悬浮线路比较轨更轻,每公里造价仅约为后者的 55.26%。

2.1.5 其他国家

瑞士工程师 Nieth 于 1974 年提出了建设真空隧道超高速地铁工程项目的建议,1981 年得到洛桑理工学院专家们的支持,并进行了可行性研究。1992 年,瑞士成立了专门从事真空管道开发的 Swissmetro SA 公司。1995 年提出了真空管道方案,由 2 个直径 5 m 的隧道组成,车体运行采用电磁悬浮方式。1997 年,瑞士地铁申请建设日内瓦到洛桑的试验段,因联邦政府无法投入足够资金而暂停计划,目前的计划是尽快建成一条 15 m 长的试验线。

俄罗斯于 2004 年成功研制定人高温超导磁悬浮车,无驱动装置,可载客 2 人。

此外,意大利拉奎拉大学^[44]采用 V 型轨道结构开展了高温超导磁悬浮模型车的相关研究。磁轨和单个杜瓦小车均做成 V 型,用于增加悬浮力。模拟列车长 0.72 m,宽 0.81 m,轨道长 3.72 m,宽同样为 0.81 m,最大模拟线速度可达 $37 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[43]。

2.2 国内高速磁悬浮研究现状

2000 年中国上海从德国引进磁悬浮铁路技术,2002 年 12 月底,上海磁悬浮铁路单线正式通车运营,2003 年底完成双线工程,线路总长 30 km。这



图 8 德国 EMS 磁悬浮车 TR08 在上海浦东机场线

Fig. 8 German EMS maglev vehicle TR08 on Shanghai Pudong Airport Line

是世界上第 1 条,也是至今唯一一条商业运营的高速磁悬浮铁路^[45],如图 8 所示(图片来自网络),采用 TR08 型常导电磁悬浮列车,包括悬浮架和其上安装的电磁铁、二系悬挂系统和车厢,此外还有车载蓄电池、应急制动系统和悬浮控制系统等电气设备。一次性可乘坐 959 人,每小时可发车 12 列,最高运营速度为 $430 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,平均运行速度为 $380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,全程只需 8 min。

西南交通大学高温超导磁悬浮^[14,46]研究始于 1997 年。2000 年 12 月 31 日,西南交通大学王家素团队^[14]研制出世界首辆载人高温超导磁悬浮车,取名“世纪号”,由直线感应电机驱动且由地面控制系统控制,采用 15.5 m 长双轨直线永磁轨道结构,感应板置于车辆底部,无附加悬浮和导向控制系统,结构简单。定子长 15.5 m,分为 6 段,分段供能,除定子外整个系统无需供能。车辆可搭载 4 人,悬浮高度大于 20 mm,悬浮力达 6 350 N,可持续工作 6 h。

2004 年 1 月,西南交通大学组织召开了“超高速高温超导磁悬浮车系统”方案论证会,提出了速度超过 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的载人超高速真空管道高温超导磁悬浮系统方案,经专家论证通过。同年 12 月,参加“四川(成都)院士咨询中心首次院士论坛”的院士和专家一致建议:大力支持中国首创的高温超导磁悬浮技术的开发及产业化^[39]。沈志云院士在会上提出,超高速是 21 世纪地面高速交通的需求,真空管道地面交通是达到超高速的唯一途径,认为中国应将目标定位在发展速度 $600 \sim 1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的超高速地面交通上。

在“世纪号”试验数据的基础上,西南交通大学研究团队持续优化悬浮模型^[47-48],2013 年 5 月,成功研制出国内首条载人高温超导磁悬浮环形线,2014 年 6 月,建成全球首个真空管道超高速磁悬浮列车环形试验线系统 Super-Maglev^[49],实现了 0.029 个标准大气压下连续运行 10 h 的纪录,验证了真空管道高温超导磁悬浮的原理可行性。悬浮和导向系统无需供能,真空管道直径为 2 m,线路总长 45 m,导轨采用闭环赛道式双轨永磁轨道结构,由两段长 3.6 m 的直线导轨和两段半径为 6.0 m 的半圆型导轨组成,设计载重 300 kg,最大载重达 1 t,悬浮净高大于 20 mm,是目前国际上同等载重能力中截面最小、永磁材料用量最少的超导磁悬浮系统,可进行 $0 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的实际动态运行试验。由于饱和蒸气压的存在,液氮在真空环境下的沸点将低于 77 K,浸泡在液氮中的超导块材会随温度降低而提

供更大的悬浮力与导向力^[50-51],在真空管道理想状态下,可将列车理论时速提高到 $1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上。利用此平台,已开展了一系列真空管道高温超导磁悬浮动力学和气动性能研究^[52-55]。

2014 年 7 月,美国 IEEE Spectrum 对 Super-Maglev 进行了专题报道,英国 BBC、德法 ARTE、瑞士 SRF 电视栏目也进行了相关报道,引起了人们对高温超导磁悬浮技术和真空管道交通发展趋势及其对社会和商业影响的持续关注和探讨。图 9 为西南交通大学载人高温超导磁悬浮环形试验线。



图 9 西南交通大学载人 HTS 环形试验线

Fig. 9 Manned HTS maglev circular test line of Southwest Jiaotong University

2016 年 10 月,中车四方股份公司正式启动研制速度为 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的磁悬浮轨道交通工程化系统项目,集层流低阻空气动力、轻量化结构、磁悬浮供电系统、磁悬浮运行控制系统、信号系统等高科技于一体进行专项研发^[56]。2019 年 5 月,高速磁悬浮试验列车在青岛下线,如图 10 所示(图片来自网络)。



图 10 中国 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 高速磁悬浮试验样车

Fig. 10 Test sample vehicle of high-speed maglev with speed of $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in China

速度 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 高速磁悬浮轨道交通系统是科技部国家重点研发计划“先进轨道交通”重点专项课题之一。按计划,一列 5 辆编组的工程样车将于 2020 年下线,2021 年进行系统综合试验,完成集成验证,将形成高速磁悬浮全套技术和工程化能力,2021 年启动高速试验示范线建设,通过高速试验、考核及试运行,2025 年前投入运营。

2017 年 8 月 30 日,在武汉召开的“第三届中国(国际)商业航天高峰论坛”上,中国航天科工集团宣布将研制时速千公里级的人类第 5 种交通工具高速飞行列车,项目已开展研究论证,拟通过商业化、市场化模式将超音速飞行技术与轨道交通技术相结合,利用超导磁悬浮技术和真空管道技术,致力于实现超音速近地飞行,研制先期速度为 $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,后续目标速度为 $2\,000$ 、 $4\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高速飞行列车。图 11 为高速飞行列车设计效果(图片来自网络)。

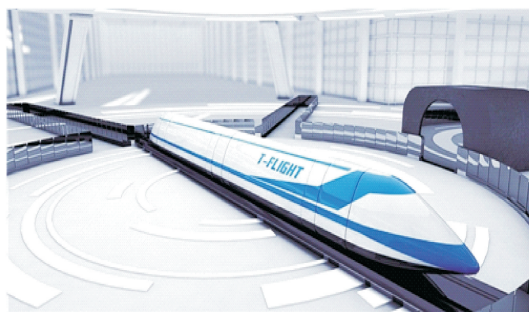


图 11 高速飞行列车设计

Fig. 11 Design of high speed flying train

目前,世界上已有美国两家公司以及中国航天科工集团等对外宣布开展速度高于 $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的运输系统研究。中国航天科工集团拥有丰富的重大项目系统工程实践经验和技术积累,具有大工程必备的仿真建模和大系统试验能力,以及国际一流的超音速飞行器设计能力,为高速飞行列车工程项目建设提供了重要基础。

高速飞行列车的最高速度可达 $4\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,相比传统高铁提升了 10 倍以上,相比民航客机提升了 5 倍左右,这将是人类对交通速度极致追求的一大进步。

王麟在 2018 年出版的《轨道交通的前世今生》中提到,高速飞行列车是利用低真空环境和超音速外形减小空气阻力,通过磁悬浮减小摩擦阻力,实现超音速运行的运输系统。它不仅大大拉近了城市之间的时空距离,同时具有不受气候条件影响、不消耗化石能源、可与城市地铁无缝接驳等优点,是未来交通领域的发展趋势和技术制高点,项目落地将按照三步走战略:通过 $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 运输能力建设区域性城际飞行列车交通网;通过 $2\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 运输能力建设国家超级城市群飞行列车交通网;通过 $4\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 运输能力建设“一带一路”飞行列车交通网,最终形成一张继航天、高铁、核电之后的中国新名片。

3 高速磁悬浮轨道交通的应用

目前,中国乃至世界商业运行的高速磁悬浮

线路只有 2003 年建成的上海高速磁悬浮线。近年来,一些城市和地方开始对高速磁悬浮技术产生浓厚兴趣,相继提出规划建设高速磁悬浮线。尽管高速磁悬浮轨道交通应用前景广阔,但在技术方面仍然存在一些需要解决的问题:磁悬浮列车运量相对轮轨列车偏小,今后应着重针对提高载客量进行研究;磁悬浮轨道梁结构设计研究以及相应规范和标准还不完善,还应加大对磁悬浮轨道梁现场试验及其控制限值的研究力度;造价高,利润回收周期长,不能与现有铁路网连通兼容;高速运行时存在停电制动问题;常导电磁悬浮列车由于悬浮高度低,对线路平整度要求高;低温超导电动磁悬浮由于涡流效应悬浮损耗较大,冷却系统较重,悬浮控制存在问题^[4]。

中国高速轮轨列车已实现 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 商业运营,高速磁悬浮列车已具备 $500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的运用能力,技术的不断进步激发着人们对更高速度的期盼^[57]。目前普遍认为,高速轮轨列车在 $400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的商业运营技术风险较大。高速磁悬浮列车基于非接触运行原理,其应用速度范围可覆盖从城市轨道交通速度直至数个马赫,徐飞等^[13]提出了全速度域的概念,覆盖了这一宽泛的速度范围,并将其划分为 5 个等级。在几种磁悬浮方式中,高温超导磁悬浮具有在全速度域均可运用的潜力,其技术关键是提升承载能力。电磁悬浮可应用于中低速域和高速域,其技术关键在于有效抑制车辆/轨道耦合振动。电动磁悬浮可应用于高速域,但因磁阻力很大,不适用于中低速域。目前在中低速域和高速域均已成功实现磁悬浮轨道交通商运,而在中速域和超高速域的应用研究正持续开展。超高速磁悬浮轨道交通系统是一个十分复杂的大科学装置,涉及交通运输、土木工程、自动控制、电力电子、直线推进、机械设计制造、通信与信息、故障监测与诊断等众多学科,其研究能力是一个国家科技实力和工业水平的重要标志,从科学试验到商用,需要经历落地试验、联调联试、载人运营和国家验收等必经的几个阶段。如何加快突破技术瓶颈并将众多关键技术整合集成实现工程化和商业化,相关科研人员还任重道远。

21 世纪以来,人类对磁悬浮轨道交通研究的热度不断升温,说明它有着其他交通方式无可替代的优势。磁悬浮轨道交通与其他交通方式的综合优势比较见表 2^[58]。

随着经济和社会的发展,必然会有对高速以及超高速运输系统的需求。

表 2 磁悬浮轨道交通与其他交通方式综合比较

Tab. 2 Comprehensive comparison between maglev rail transit and other modes of transportations

交通方式	运营时速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	安全性	运量	投资 成本	振动 噪声	能耗	气候影响 运营	全天候 运营	运载工具 大修周期	技术难度、 建设工期	工程拆迁 难度	维管人员
磁悬浮	80~430	更高	较大	高	低	较高	基本不影响	易	无	大、较长	小	少
轮轨	80~350	高	大	高	较高	较高	影响较大	较易	有	大、较长	大	多
航空	800~2 000	高	小	高	高	最高	影响大	难	有	大、较长	较小	多
公路	80~200	高	小	较低	较高	高	影响较大	较难	有	小、短	较小	多
水运	80~100	高	大	低	低	最低	影响大	难	有	小、短	小	少

3.1 高速磁悬浮对比高速轮轨的应用优势

作为新兴的无接触式地面高速交通系统,高速磁悬浮摆脱了传统轮轨列车依靠轮轨接触实现牵引带来的弊端,相比于高速轮轨列车,高速磁悬浮已经证实的主要优点具体如下^[3,5,59-61]。

(1)以电磁力代替车轮支撑车体,简化了走行和系统结构。列车与轨道非接触多点分布载荷取代了传统轮轨的接触集中载荷,减小了承载应力和结构

尺寸^[58],如图 12 所示。依据轨道动力学理论,列车荷载以每延米重量来衡量,高速磁悬浮和高速轮轨荷载均为 $20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 左右,但二者力的作用方式不同,因此,轨道的动力响应也不一样,分布荷载优于集中荷载^[62]。

(2)非接触驱动,速度高,加减速性能好。磁悬浮比轮轨列车的服役速度更高,出行效率更高。克服了轮轨交通提速的主要障碍。

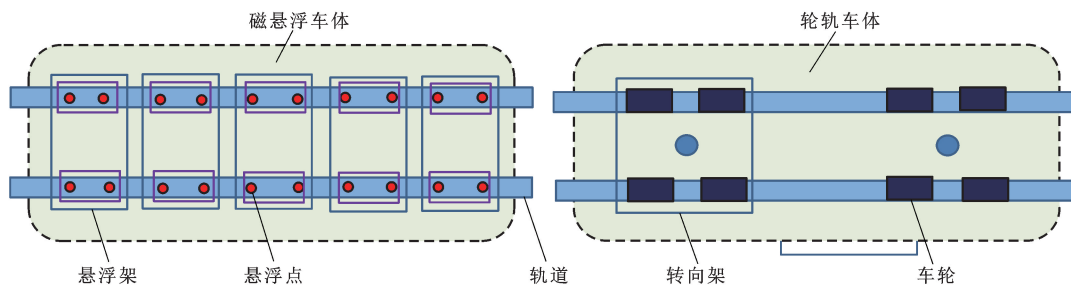


图 12 磁悬浮车辆和轮轨车辆承载方式

Fig. 12 Load bearing modes of maglev vehicle and wheel/rail vehicle

(3)阻力小,能耗低,运能强。磁悬浮列车运行时只有空气摩擦阻力,德国数据显示,由于良好的空气动力外形和无高速轮轨列车受电弓及复杂的转向架结构,相同速度下其阻力仅为轮轨列车的 60%;若采用真空管道,则几乎没有空气阻力。由于无轮轨及受电弓的磨损,它比最先进的高速轮轨列车省电 30%。研究表明,在 $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度下,每座位每公里的能耗仅为飞机的 $1/3 \sim 1/2$,比汽车能耗也少 30%;在 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度下,德国 TR 磁悬浮列车每座位每公里能耗比 ICE 轮轨列车低 33%,而在 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时能耗与 ICE 轮轨列车在 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时相当;磁悬浮列车能做到单位功率或单位能耗下的最大客运量,还可以高密度追踪运行。

(4)噪声低,振动小,舒适性好。2000 年,经德国赖因兰技术监督协会实测,按德国标准,在离线路 25 m 处以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 通过时,磁悬浮列车的噪声为 79 dB,而 ICE3 轮轨列车为 91 dB。磁悬浮列车以 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 通过时噪声为 86 dB,在 $450 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

通过时则为 89 dB,后来还有进一步改善。磁悬浮列车的振动在 $420 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时明显低于普通轮轨列车在 $136 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时的振动。同时无轮轨和受电弓机械接触,振动小,舒适性好。

(5)可快起快停,爬坡能力强,相同速度下可通过曲线半径更小,选线自由度大。德国 TR07 磁悬浮列车每座位质量为 0.63 t,相当于 ICE3 轮轨列车的 64%,驱动功率容量为 ICE 的 3~4 倍。已经证明, $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时磁悬浮列车爬坡能力可达 100%,而轮轨列车为 40%;因选线自由度大,故线路可减少绕行,节约土地,可提高对自然地理和城市布局结构环境的适应性,从而大大降低整个线路的工程造价。

(6)安全,维护少。磁悬浮列车结构上保证不脱轨,推进方式上保证不撞车。采用分段供电,无追尾风险,列车运行动力来自固定在路轨两侧的电流感,同一区域内的电流感强度相同,不会出现几辆列车以不同速度而行的现象,从而排除了列车追尾可能。

磁悬浮列车按飞机的防火标准配置。无磨损运行,维修主要为电子电气装备,节省大量劳力。

(7) 电力驱动,环境友好。磁悬浮列车不受能源结构、燃油供应限制,无有害气体排放,环境污染小。由于车辆悬浮高度小,磁力线处于闭合状态,磁场泄漏量小。实际上其电磁相互作用决定了不会产生对人体有害的电磁泄漏,这已经过严格测试和评估。地球磁辐射强度为 $50 \mu\text{T}$,彩电为 $500 \mu\text{T}$,而磁悬浮为 $100 \mu\text{T}$ 。磁悬浮列车一般以 4.5 m 以上的高架通过平地或翻越山丘,从而避免了开山挖沟对生态环境的破坏。

(8) 非接触驱动,无轮轨、受电弓等机械摩擦磨损,全寿命性价比高。

总之,高速磁悬浮列车具有速度高、安全可靠、噪声低、振动小、载客量较大、能耗低、环境友好等优点。常导磁悬浮列车速度可达 $400 \sim 600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,超导磁悬浮列车速度可达 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上。它的高速度使其在 $1\,000 \text{ km}$ 及以上的旅行距离中比乘坐飞机更优越,可以作为轮轨高铁和航空运输之间的重要补充。

3.2 高速磁悬浮轨道交通技术经济分析

中国上海磁悬浮线是世界上第 1 条,也是唯一一条商业应用的高速磁悬浮示范线,沪杭高速磁悬浮项目一再搁置,其他国家至今仍无高速磁悬浮商运线,应用推广慎之又慎。尽管各国对常导电磁、永磁电动、低温超导电动、高温超导 4 种磁悬浮方式技术方案的主要原理、优缺点、关键技术、技术经济性、技术就绪度进行了深入探讨,但还有很多难题需要进一步研究^[46]。以下对各种方式高速磁悬浮轨道交通的应用进行简要技术经济分析。

3.2.1 常导电磁悬浮

常导电磁悬浮可实现全程无接触运行,技术较成熟,但常导电磁悬浮为吸力磁悬浮,车辆端需要通过电力线圈生磁相吸,使车辆处于悬浮状态,这种纯励磁结构需要通入大量电流来产生系统所需要的悬浮力,其中线圈会产生电阻损耗,产热较多,功耗较大^[63],成本高;悬浮和导向间隙较小($8 \sim 12 \text{ mm}$),对基建施工精度要求高,而且车辆电磁铁发热量大。

常导电磁悬浮轨道交通在中国已有最高速度 $430 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的运营实践,通过多年专项支持,形成了产业化能力和条件,“十三五”科技部专项完成了 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 试验样车和关键装备样机。德国 TR 常导电磁悬浮列车需要依靠高精度控制器来维持车辆 $8 \sim 12 \text{ mm}$ 的悬浮高度,以保证列车安全可靠运行。上海浦东磁悬浮示范线目前仍需投入大量人力物力。高速常导电磁悬浮采用长定子固定于轨道、转子固定在列车上的直线电机结构,可以消除接触式供电^[58],以达到安全和高效的目的,如图 13 所示。

3.2.2 永磁电动磁悬浮

美国计划研发永磁电动磁悬浮列车,并开展了积极研究,其最大优点是成本最低,但缺点也很明显:不能静浮,磁阻特别大,悬浮力小,不能自导向,而且在列车停止时仍需要车轮或轨道的一段继续运动。这项新技术仍在开发中,商业版本或全面系统尚未形成。

3.2.3 低温超导电动磁悬浮

低温超导电动磁悬浮可大间隙($80 \sim 150 \text{ mm}$)悬浮,线路工程相对容易实现,低真空环境下发热量少,但车上需要搭载制冷系统,且车载超导体系统技

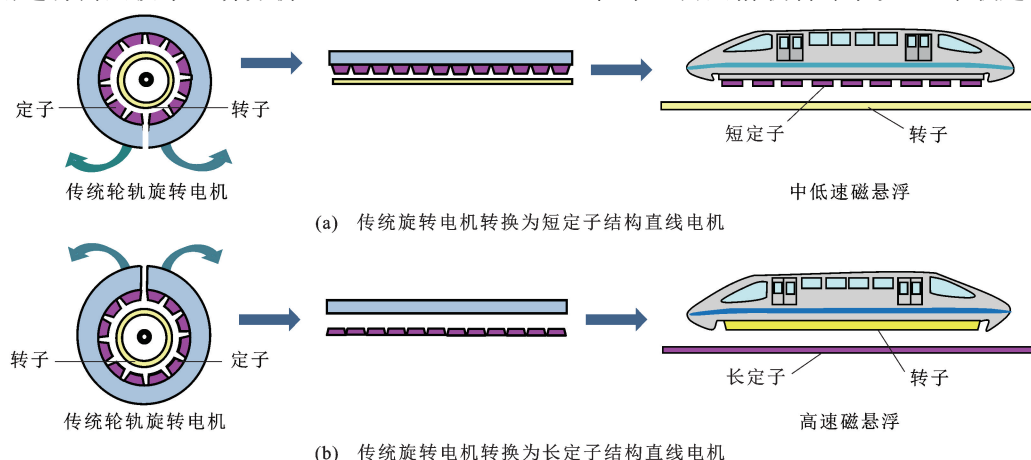


图 13 传统旋转电机转换为长、短定子结构直线电机的衍生

Fig. 13 Derivation of linear motors with long and short stator structures from traditional rotating motor

术难度较大,低速运行时需要支撑轮。日本已实现 $603 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的最高试验速度,在建东京至名古屋线预计达 $505 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运营速度。低温超导电动磁悬浮有几个问题需要解决:一是振动扰动问题,速度超过一定限值时车辆振动开始加剧,乘坐舒适性降低;二是速度提升问题,技术上限制了速度提升;三是经济性问题,低温超导电动磁悬浮在低速段磁阻力很大,用于中低速域极不经济。有研究认为其最佳运用速度应高于 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[12]。日本对磁悬浮铁路经济性的目标是除车辆以外的系统综合投资仅比轮轨系统高 $10\% \sim 20\%$,这又为低温超导电动磁悬浮投入商用奠定了基础,如果日本按既定目标于 2027 年将低温超导电动磁悬浮投入商用,它很有可能再次成为 $400 \sim 800 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 区间高速轨道交通的主流发展方向^[64]。

3.2.4 高温超导磁悬浮

高温超导磁悬浮是中国原创技术,可实现全程无接触运行,自稳定悬浮和导向,悬浮和导向无需供电,运行方向上无固有磁阻力;低真空环境下发热量小,能提升悬浮力和导向力,但轨道上要求铺设稀土永磁材料,线路建设成本相对较高^[65]。目前处于实验室和仿真验证阶段,已完成部分关键技术缩比样机试验线建设和试验。

高速磁悬浮系统由线路、道岔基础系统、列车控制系统和供电与驱动系统组成,通过运行控制中心实现系统运转,与运用历史 50 多年的高速轮轨系统相比,技术系统更加复杂。据上海磁悬浮线资料,全长 30 km 造价 89 亿元,约 $3 \text{ 亿元} \cdot \text{km}^{-1}$ 。磁悬浮系统造价大约是轮轨系统的 2 倍。技术在进步,成本会逐渐降低,降到人们能接受的程度。比如,最早日本磁悬浮建设成本是高铁的 2 倍,现在降为高铁的 150% 就已开始建磁悬浮试验线了。据估计,到 2027 年,日本的磁悬浮票价将会是高铁的 120%。相信中国也会有这样一个适应过程。应该看到,磁悬浮轨道交通具有长远的经济优势。

3.3 高速磁悬浮轨道交通应用前景

2019 年中国《交通强国建设纲要》中提出:合理统筹安排时速 600 km 级高速磁悬浮系统、时速 400 km 级高速轮轨(含可变轨距)客运列车系统、低真空管(隧)道高速列车等技术储备研发。虽然轮轨列车的最高运营速度还是个尚未破解的世界难题,但可以洞见的是,时速 600 km 以上必须采用磁悬浮技术,实现由轮轨向磁悬浮过渡,这将是世界乃至中国乃至世界轨道交通领域第 2 个颠覆性技术创新,也是人

类轨道交通历史步入后高铁时代的必由之路。

常导电磁悬浮、低温超导电动磁悬浮和高温超导磁悬浮 3 种技术各有优劣,应用前景分析如下。

(1) $400 \sim 600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 作为高铁($300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)与航空($800 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)之间的速度衔接,既能补充重要走廊上的运能不足,还能提供差异化服务,可以形成航空、轮轨高铁、高速磁悬浮和城市交通速度梯度更加合理、高效、灵活便捷的多维交通架构,满足不同人群出行需求^[12]。这一速度域可采用常导或超导磁悬浮技术。常导和低温超导电动磁悬浮交通工程化技术已经成熟,近年来的研发主要围绕降低成本、环境友好、提高效率和安全性来开展^[66]。2020 年 6 月 21 日,由中车四方股份公司承担研制的设计速度 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 高速磁悬浮试验样车在同济大学磁悬浮试验线上试跑,成为常导电磁悬浮突破技术速度瓶颈的成功尝试,如图 14 所示(图片来自网络)。



图 14 同济大学 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 高速磁悬浮试验样车
Fig. 14 High-speed maglev test sample vehicle with speed of $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in Tongji University

(2) $600 \sim 1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 无论轮轨或磁悬浮,都必须加装低压管道,否则气动阻力和噪声超标问题很难解决。加低压管道后的成本肯定大幅提升,高速磁悬浮所需的长定子成本也会增加。然而,速度只限于 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 是不经济的。从目前掌握的技术上看,常导电磁悬浮系统最高运营速度很难超过 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。基于上述对常导电磁悬浮的技术经济分析,在 $600 \sim 1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度范围采用超导磁悬浮技术是一种选择。

(3) $1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上,在大城市之间修建专线,充分发挥运行成本低、运行周期短、无噪声、无污染、车站可修建于市中心的优势,进一步缓解民航运输压力^[12]。高温超导磁悬浮、低温超导电动磁悬浮已被证实原理上可超过 $1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度^[8,67],因此,可采用高温超导和真空管道或电动磁悬浮和真空管道的磁悬浮交通技术。当列车速度达

到 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上时,超过 83% 的牵引力会被浪费在抵消空气阻力上。研究人员希望通过建造真空管道环境来减少空气对磁悬浮列车的阻力。低真空环境下高温超导磁悬浮轨道上需要铺设永磁材料形成磁轨,虽然轨道建设相对成本提高,但是可以有效带动中国稀土资源发展。

综合来看,中国原创的高温超导磁悬浮依靠独特的钉扎作用悬浮或悬挂,可沿着永磁轨道运行,实现自悬浮、自稳定和自导向。运营速度可达 $600 \sim 1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 甚至更高。从综合技术和可靠性方面来看, $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上完全可以采用中国的高温超导磁悬浮技术,这一技术具有后发技术优势和划时代的意义。

高速及超高速磁悬浮轨道交通系统的研制需要科技部国家重点研发计划专项支持,汇集国内高铁、磁悬浮领域优势资源,联合多家企业、高校、科研院所共同攻关,攻克高速磁悬浮核心技术,研制具有自主知识产权的 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上高速磁悬浮工程化系统,逐步形成中国高速磁悬浮产业化能力。目前,中国研究机构正按照工程化目标持续发力,开展研究。

事实上,在 $200 \sim 400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度区间,磁悬浮列车与轮轨列车相比不具备竞争优势,即“轮轨天下”; $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上速度必须采用低气压真空管道磁悬浮技术,提速空间极大,这是“磁浮未来”。

4 高速及超高速磁悬浮轨道交通的关键技术问题

对地面交通来说,轮轨列车速度达到 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 基本已经达到安全和成本的极限^[68]。通过优化或许能达到 $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行速度(空气阻力占总阻力的 92%),一旦超过这一速度限制,就需要真空管道来提供低气压环境以减小空气阻力。因为在地表稠密大气层里,气动阻力与速度的 2 次方成正比,速度越高,气动阻力越大,克服过大的空气阻力显然不经济。太高的速度不仅会出现安全隐患,由于能耗比过高的原因,其运营成本也会增加。当然,还有不可回避的噪声问题,气动噪声随速度的 7 或 8 次方剧增^[39],令旅客难以接受。而磁悬浮确实还有极大的提速空间,所以除研究速度 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的磁悬浮外,中国也在研究速度为 $1\,000 \sim 4\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的真空管道磁悬浮。有学者认为,真空管道磁悬浮的理论极限速度接近第一宇宙速度,可实现时速 2 万公里。一旦真空管道磁悬浮得以实现,因为真空管道

几乎没有空气阻力,所以速度更快,能耗更低,当然运营成本就低了。

超高速真空管道交通是采用磁悬浮技术,利用密闭管道,通过抽取空气达到接近真空的低气压环境,从而实现列车全天候在无轮轨阻力、低空气阻力、低噪声模式下超高速运行的新型轨道交通技术^[69]。真空管道磁悬浮系统研发时间不长,当前的研发热点主要集中在真空管道的设计和制造、管道结构特征和优化方法、施工方法方面。

超高速真空磁悬浮是一个颠覆性的崭新技术,目前还处在探索和验证阶段,距工程化应用还有很长的距离,因此,考虑安全、可靠、适用、经济等方面因素,围绕经济性速度、建设运营成本、安全可靠性等关键科学指标,许多关键科学问题有待研究解决^[34]。比如,真空管道作为高速或超高速域列车的基础设施,需要解决超长度真空管道的建设、真空获得与维持、环境控制、灾害预防、应急救援、适用车辆、站场接口与过渡、无线通信等一系列轮轨交通不曾遇到的技术问题。这在刘本林等著的《车速系统概论》中也有相关介绍。图 15 列举了超高速磁悬浮系统的科学指标及关键科学问题,详述如下。

4.1 牵引制动问题

真空管道磁悬浮最大的难点在于牵引动力问题,牵引动力采用大功率同步线性电机已成共识^[14],也就是需研发出时速千公里级的直线驱动电机,需具备线性驱动、高效率、高可靠性、牵引力平稳、电机法向力小等特点。中国已经掌握电磁炮技术,速度能达到 7 倍音速。问题在于,电磁炮弹射弹头很轻,几千克的钨棒弹头达到 7 倍音速容易做到,但磁悬浮列车车体巨大,若要达到这个速度难度很大。所以超导超高速直线电机技术需要率先突破,一旦磁悬浮动力得到解决,真空管道磁悬浮列车就基本大功告成。

大推力直线电机是超高速磁悬浮交通车辆的牵引力及电制动力来源,在面向超高速运行需求时,其在能量传递机理、牵引制动与悬浮导向耦合特征与解耦机理、瞬态能量变换控制规律、低真空环境下电学及热学行为特征等方面均存在亟待解决的科学问题。另外,未来长距离甚至超长距离长定子直线电机的供电模式与分析模型也是亟待探究的命题。

4.2 动力学、热力学问题

探索动力学、热力学特性是高速及超高速磁悬浮系统实现高速运行的必经之路。

一是车辆-轨道耦合动力学问题。目前关于高

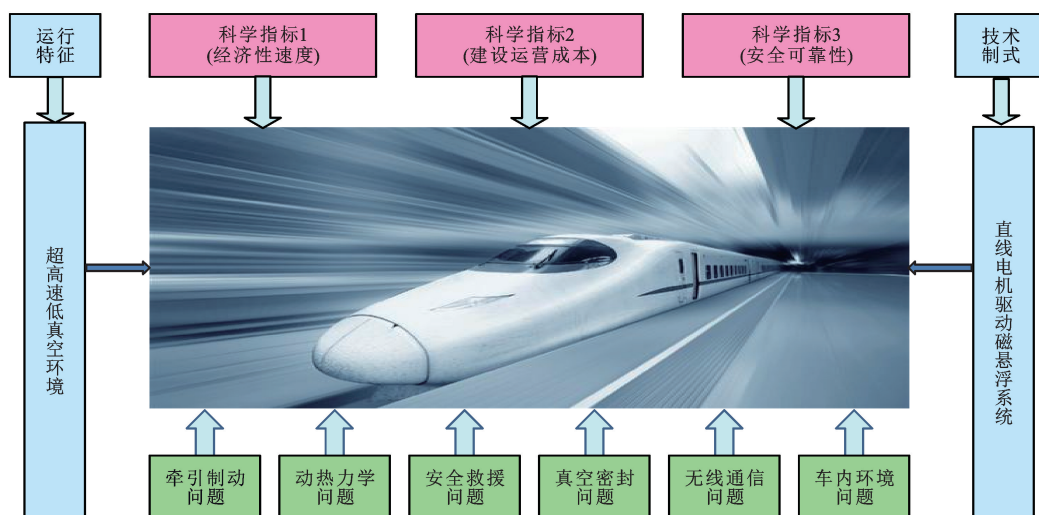


图 15 超高速磁悬浮系统科学指标及关键科学问题

Fig. 15 Scientific indexes and key scientific problems of ultra-high-speed maglev system

温超导磁悬浮的试验研究主要集中在准静态或低速范围,利用高温超导磁悬浮动态测试系统开展的试验研究速度还只在 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下^[70],所获得的试验数据并不能支撑速度在 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上高温超导磁悬浮车悬浮与导向稳定性研究,因此,研究高温超导块材与运动外场之间的作用关系,同时探讨运动速度对超导块材内部感应电流和捕获磁通的影响,发现超导块材在高速运动场中的悬浮力、导向力、磁阻力与高温超导材料物性之间的关系以及振动失稳发生的临界条件是真空管道运输系统发展需要解决的重要问题。

二是空气动力学问题。列车在真空管道中快速运行时,管道内稀薄的空气与列车发生相对运动,产生的气动阻力仍然是列车运行的主要阻力。影响列车气动阻力的因素较多,如车速、阻塞比、管道真空度、列车外形、管道截面形状等。对于低压高速气流,现有仿真手段难以准确模拟,因此,针对低压稀薄空气动力学问题,需要试验测定稀薄空气物理参数,探究高速运动条件下稀薄空气动力学作用特性及其规律。仿真计算结果还应通过实物模型试验验证。这些基础研究是确定管道压强和遮挡系数(列车横截面与管道内截面之比)的依据^[14,46]。

三是管道-列车-气流-热耦合作用问题。由于低真空管道的密闭低气压环境,列车运动、电气系统散热以及管道环境维持所引发的管道内空气流动与传热过程异常复杂。为此需要开展相关研究:低真空管道压力分布与演变规律,管道内空气流动特征与管道结构、列车速度间的映射关系,管道热的产生机制、传播规律及控制方法,低真空管

道内超高速列车与空气间的流固耦合作用机理,超高速列车空气动力学特性及表征方法,列车气动效应与管道结构、列车外形、列车速度、管道压力间的关系,非定常气动力对列车运行平稳性的影响,基于多目标的列车外形气动优化技术,气动自适应的外形变化控制技术。

4.3 安全救援问题

磁悬浮列车尤其要注重车辆和系统的可靠性,必须确保行车安全。真空管道一方面带来了隔离、降噪、降阻等好处,但也对 $1\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度下列车车内乘客的安全救援带来挑战;另一方面必须参考飞机应急模式,在车内配备生命维持系统,在突发事件发生时保证乘客生命安全;同时,由于管道内气压低,接近真空,且密封效果较好,不易被外界破坏,若出现突发事件,如何实施可靠的解救措施和救援方案成为工程应用前不得不思考和解决的重要问题,因此,必须积极开展主动安全保障技术和装备本身安全技术研究。

4.4 管道密封性能与抽真空效率问题

尽管采用较为成熟的航空密封技术,但要保持管道内长大空间长时间的真空度,对管道结构及其密封要求极高,必须保证高可靠性和较长使用寿命。这其中站口对接是一个重大的技术难题。如果对接密封不好,因真空吸力超强,可能会酿成巨大灾难,后果不堪设想。站口对接需用到超强磁铁技术或超强电磁铁技术,使得真空管道口和车厢出口牢牢吻合,不能漏气。这项对接技术有相当难度,但可以借鉴空间站对接技术,因为真空管道列车内部与空间站内部技术路线一样,

都需要外壁能承受高压,并保持车体内外相同的大气压,还要保证充足的氧气供应。

针对长大管道,需要高性能的真空设备,抽气速率快,持续时间长。为了精准维持管道内的真空度,基于高压射流卷吸作用的射流式真空发生器值得关注和研究;管道内的分级调压技术需要探索;抽气设备安装位置也需要优化设计,以降低抽气成本。

4.5 无线通信问题

管道内 $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以上列车通信技术是一个崭新的课题。在真空管道中,高速列车运行速度达 $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以上时对车地之间的通信稳定性、可靠性要求更高^[71]。基于超高速真空管道磁悬浮列车的超高速移动和真空管道特点,列车无线通信需要解决几个问题^[72]:一是由于真空管道内无线自由波/非接触耦合的传播环境特殊,且金属密闭管道内无线电波传播存在波导现象,因此,管道内信道特性与传统高铁开阔场景完全不同,导致管道内无线覆盖困难,需要探究并解决;二是超高速移动会引起极其频繁的越区切换、无线信道快速变化和严重的多普勒效应,应保证较低的误码率;三是由于传统的轮轨/磁悬浮高铁无线通信系统不支持速度超过 $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,为了满足真空管道交通宽带无线接入的业务需求,必须对车地无线接入通信系统开展前瞻性研究,在真空管道无线接入、新型漏泄波近场耦合等方面形成系统解决方案。

4.6 车内环境控制问题

车体内部需设置环境控制系统来保障人所适应的氧气含量、温度、湿度、空气流速、空气压力和洁净度以及噪声等参数;在低气压下,管道内尽管空气稀薄,但极少的气体分子也会与列车表面碰撞与摩擦而带来一定的温升,车辆系统内电气设备的热积聚会造成电器设备损坏,需要提供散热通道;在低气压环境下,传导和辐射为主要散热方式,因此,必须研究低气压下列车表面的温升特性以及电气设备的散热机理,以保证车辆系统内的热平衡。

5 低真空管道高温超导超高速磁悬浮研发进展

5.1 研究目标

2018年8月,根据沈志云院士关于《创建低压管道高温超导超高速列车》的建言,计划在“十三五”期间完成中国原创高温超导,并在新建低压管道研究和试验基础上进行工程化,建设示范性运营线;“十

四五”期间开始修建管道线路及准备列车等装备;“十五五”期间调试及逐步提速到 $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;“十六五”期间推广超高速低真空管道磁悬浮交通。西南交通大学首创的高温超导磁悬浮具有显著的技术优势,依靠永磁轨道悬浮,钉扎作用导向,自稳定,无自激振动,运行平稳,目前已建成全球首例真空管道高温超导磁悬浮模型车高速试验平台,正在积极谋划建设超高速($1\,500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)低真空管道磁悬浮交通模式试验平台。预计在未来几年内可以在实验室实现速度 $1\,500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的超音速。这一研究目标的提出为超高速低真空管道磁悬浮的研究指明了方向,具有革命性意义。

5.2 基础研究进展与研发计划

2008年开始,西南交通大学牵引动力国家重点实验室开始建设管道磁悬浮基础研究基地。2013年,牵引动力国家重点实验室完成第1个项目,即高温超导环形试验线。2014年,在环形试验线上加管道,可进行低真空管道磁悬浮的基础性研究。2019年,建成第2个大型管道磁悬浮室内直线试验线,长142 m,管道直径为4.2 m,气压为0.05~10.0个大气压,采用电磁弹射,在60 m距离内加速到 $430\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,进行测试后于最后40 m涡流制动。

2020年5月20日,四川省创建综合性国家科学中心第一批支撑项目正式启动。西南交通大学“多态耦合轨道交通模式试验平台”作为本次启动建设的6个项目之一,是唯一由高校牵头建设的项目,得到四川省、成都市和天府新区的大力支持,总投资5.8亿元,是该校史上投资规模最大的科学试验装置。平台占地 $70\,000\text{ m}^2$,模型比例为 $1:8\sim 1:3$ 。该项目已由四川省发改委立项,计划于2023年建成,将建设一个长度为1.6 km、管道直径为3 m、真空度可达 $0.005\sim 1.000$ 个大气压、最高试验速度为 $1\,500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (超音速)的高架结构真空管道磁悬浮试验线以及相关配套设施。该试验线及设施将成为超高速轨道交通领域最先进的综合性研究试验平台,平台旨在采用磁悬浮和管道的模式,为真空管道超高速轨道交通基础科学问题、共性关键技术、大功率轨道助推技术、飞行器动模气动试验和弹射直线电机验证等军事试验研究提供超高速与低气压的试验环境,引领超高速轨道交通科技发展,助力国家“交通强国”战略实施。

5.3 工程化进程预期

(1)2023年基本完成基础性研究:一是精选超导体材料,提高悬浮能力及悬浮高度;二是确定对

速度的适应性,目标速度为 $1\,500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。建设 $1\,500\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 超高速动模试验线,用于研究多功能、多模式、全速度、变环境、多态耦合条件下的轨道交通磁轨动力学、管道-轨道-列车-气流-热耦合作用等多学科综合交叉的基础科学问题;三是确定对低气压的要求,达到 0.005 个大气压。

(2)2030 年基本完成关键技术研发:一是建成真车实线试验线,开展试验研究,使技术基本成熟;二是力促昆楚大丽高速磁悬浮试验线建成,长 430 km 。先按 $450\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 试验速度运行测试。

(3)2049 年以前,选择 2 条 100 km 左右的高速磁悬浮试验运行线,完成 50 万 km 试运行,使技术完全成熟。

(4)2050 年,速度为 $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 高温超导真空管道磁悬浮列车实现载客运营。

6 结 语

(1)人类对速度的不懈追求描绘了世界交通技术发展的历史画卷,科技进步不断推动经济社会发展,现代科技为人类陆地飞行的理想插上了翅膀,高速磁悬浮轨道交通最高速度可达 $600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以上,使得人类陆地飞行之梦成为现实。从 19 世纪上半叶的电磁理论到实际应用走过了近 190 年,上海浦东磁悬浮示范线的开通营运为中国乃至世界探索高速客运系统提供了新的选择。通过引进、吸收、消化、创新,掌握具有自主知识产权的磁悬浮原创、实用技术,有望形成与高速轮轨系统并存的城际高速客运网,构建城市、城际综合交通体系,促进中国交通技术跨越式发展,提高居民出行质量和水平。

(2)2019 年,高速磁悬浮作为前沿关键科技被列入国家《交通强国建设纲要》。速度 $600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 高速磁悬浮交通系统的研制将是中国高速交通的重要补充和过渡,助力“交通强国”战略的实施,对于丰富现代化综合交通体系,实现中国轨道交通技术的持续领跑,在国际竞争中抢占战略制高点,意义重大。高速磁悬浮交通具有高速快捷、安全可靠、运输力强、舒适准点、绿色环保、维护成本低等优点,其应用场景丰富,既可用于长途运输,即走廊化交通,在大型枢纽城市之间或城市群之间形成高速走廊,促进地区间协同发展,又适用于中短途客运,即通勤化、同城化交通,用于大城市通勤或城市群内相邻城市连接,打造半小时至一小时经济圈,促进都市圈和城市群一体化、同城化发展。

(3)中国已拥有 18 年高速磁悬浮系统的运营经

验,建立了高速磁悬浮轨道交通运维技术体系,掌握了高速磁悬浮轨道系统的设计和制造技术。常导电磁悬浮技术路线有一些相对成熟的技术,经工程试验验证后,国内一些研究机构和企业仍在继续尝试。虽然各国研究人员在真空管道、超导磁悬浮和永磁悬浮等方面有了一些探索,但这些技术还在科学研究阶段,距离技术成熟还有较长的路要走,不过这也正说明该方向需要加快研究和努力攻坚。新技术的研究工作虽然困难重重,但只要长期坚持,持续论证试验,曙光必现。

(4)基于超高速磁悬浮广阔的市场前景,美国、意大利、西班牙、日本、韩国和巴西等都在积极研究超高速真空管道交通系统。面对日本运营速度为 $505\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的超导磁悬浮交通工程以及美国超级高铁等更高速轨道交通技术的挑战,中国应在国家层面大力支持,以充分发挥高温超导磁悬浮原创技术优势,加快开展 $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以上真空管道超高速轨道交通关键技术研究以及经济和工程可行性等研究。一项新技术如果性价比不高,肯定没有市场,因此,必须将技术研究和经济成本结合起来综合考量,走机电设备国产化道路,降低工程造价,提高市场竞争力,可通过国家重点研发计划、地方政府重点科技项目、产学研合作项目、颠覆性创新类项目以及产业化培育项目,分别布局超高速真空管道交通技术的有关基础研究和关键技术攻关^[70]。采取多元投资策略,充分利用中央、地方资源,创新体制机制,举全社会之力推进项目进程,构建研发、试验、试制平台,加快试验线、示范线建设和运用,掌握核心关键技术,形成超高速磁悬浮全套技术和工程化能力后,搭建全系统国产化产业链,最终实现中国在超高速磁悬浮交通领域世界领先的地位,引领未来真空管道超高速轨道交通技术发展。

(5)超高速真空管道磁悬浮交通的意义如同蒸汽机取代马力,是划时代的。作为被称为陆上飞行器的第五代交通工具,具有成本低、运营能耗低以及安全性高等优势,其顺利实现将更好助力“一带一路”倡议发展,辐射全球交通,构建超高速交通网络,实现国内各大型城市间的一小时经济圈、国际各大型城市 4 小时经济圈,这对全球政治、经济、文化、国防等方面将产生巨大影响。

(6)相信未来在新一轮科技革命背景下,云计算、大数据、物联网、人工智能、宽带通信等技术快速发展,以科技创新为源动力,加快新技术、新材料、新

工艺的应用和转化,高速及超高速磁悬浮行业孕育着重大技术创新需求和发展机遇。加快智能磁悬浮科技攻关,将物联网、大数据等新技术应用在磁悬浮各专业领域,打造更加安全可靠、经济高效、温馨舒适、方便快捷、绿色节能的智能磁悬浮系统将成为中国乃至世界后高铁时代的发展趋势。人类必将开创轨道交通新纪元,迎来高速及超高速磁悬浮时代,这绝不是一个梦。

参考文献:

References:

- [1] 李永善,徐安.磁悬浮技术在德国的发展[J].城市轨道交通研究,2001(2):64-68.
LI Yong-shan, XU An. Magnetic levitation technology development in Germany[J]. Urban Mass Transit, 2001(2): 64-68. (in Chinese)
- [2] 邓自刚,张卫华.高温超导磁悬浮或将引发交通运输的大变革[J].金融经济,2016(11):42-43.
DENG Zi-gang, ZHANG Wei-hua. High temperature superconducting maglev or will cause a revolution in transport [J]. Finance Economy, 2016(11): 42-43. (in Chinese)
- [3] THORNTON R D. Efficient and affordable maglev opportunities in the United States[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(11): 1901-1921.
- [4] 王理达.中低速磁悬浮轨道梁关键参数研究[D].成都:西南交通大学,2014.
WANG Li-da. Key parameters of low-speed maglev rail beam[D]. Chengdu: Southwest jiaotong university, 2014. (in Chinese)
- [5] 王君香.浅谈磁悬浮列车的原理及应用[J].科学技术创新,2019(15):38-39.
WANG Jun-xiang. Introduction to the principle and application of maglev train[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(15): 38-39. (in Chinese)
- [6] SAWADA K. Outlook of the superconducting maglev[J]. Proceeding of the IEEE, 2009, 97(11): 1881-1885.
- [7] FUJIWARA S, FUJIMOTO T. Characteristics of the combined levitation and guidance system using ground coils on the side wall of the guideway[C]//National Technical Information Service. Proceeding of the 11th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Washington DC: National Technical Information Service, 1989: 241-244.
- [8] 邓自刚,李海涛.高温超导磁悬浮车研究进展[J].中国材料进展,2017,36(5):329-334.
DENG Zi-gang, LI Hai-tao. Recent development of high-temperature superconducting maglev[J]. Materials China, 2017, 36(5): 329-334. (in Chinese)
- [9] ABRIKOSOV A A. On the magnetic properties of superconductors of the second group[J]. Soviet Physics JETP, 1957, 5(6): 1174-1182.
- [10] ESSMANN U, TRAUBLE H. The direct observation of individual flux lines in type II superconductors[J]. Physics Letters, 1967, 24(10): 526-527.
- [11] GAMMEL P L, BISHOP D J, DOLAN G J, et al. Observation of hexagonally correlated flux quanta in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ [J]. Physical Review Letters, 1987, 59(22): 2592-2595.
- [12] 张杨,吴超.磁悬浮列车技术发展路线研究[J].技术与市场,2017,24(6):101-104.
ZHANG Yang, WU Chao. The maglev technology development route[J]. Technology and Market, 2017, 24(6): 101-104. (in Chinese)
- [13] 徐飞,罗世辉,邓自刚.磁悬浮轨道交通关键技术及全速度域应用研究[J].铁道学报,2019,41(3):40-49.
XU Fei, LUO Shi-hui, DENG Zi-gang. Study on key technologies and whole speed range application of maglev rail transport[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 40-49. (in Chinese)
- [14] WANG Jia-su, WANG Su-yu, ZENG You-wen, et al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world[J]. Physica C: Super Conductivity and Its Applications, 2002, 378(1): 809-814.
- [15] 王家素,王素玉.高温超导磁悬浮列车研究综述[J].电气工程学报,2015,10(11):2-12.
WANG Jia-su, WANG Su-yu. High temperature superconducting maglev train[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(11): 2-12. (in Chinese)
- [16] 叶新羽.高温超导磁悬浮在轨道交通中的研究和应用[J].电工材料,2018(4):27-31.
YE Xin-yu. Research and application of high temperature superconductors maglev transportation system[J]. Electrical Engineering Materials, 2018(4): 27-31. (in Chinese)
- [17] 孙宝融.超高速地面运输在萌芽中停滞不前[J].铁道科技动态,1976(13):13-17.
SUN Bao-rong. Ultra-high-speed ground transportation stagnated in the bud[J]. Railway Technology Trends, 1976(13): 13-17. (in Chinese)
- [18] 胡思继,徐源泉. TR 磁悬浮高速铁路系统的技术经济分析[J].北方交通大学学报,1993(3):233-237.
HU Si-ji, XU Yuan-quan. Technical and economic analysis of TR maglev high speed railway system [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1993(3): 233-237. (in Chinese)
- [19] Northeast Maglev. Green transportation [EB/OL]. (2018-07-22)[2020-09-15]. <https://northeastmaglev.com/green-transportation/>.
- [20] Baltimore-Washington SC Maglev Project. Environmental study[EB/OL]. (2018-10-15)[2020-09-15]. <https://www.bwmaglev.info/index.php>.
- [21] Washington SC Maglev Project. Purpose and need[EB/OL]. (2017-10-12)[2018-09-15]. http://www.bwmaglev.info/images/document_library/reports/purpose_and_need_2017_10_12.pdf.
- [22] JAYAWANT B V, SINHA P K, WHEELER A R, et al. Proceedings of the institution of electrical engineers [J]. Digital Library, 1976, 123(9): 941-948.

- [23] SINHA P K. Magnetic suspension for low-speed vehicles[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1978, 100(4): 333-342.
- [24] 张延昭. 德国磁悬浮列车研究概况[J]. 全球科技经济瞭望, 1993(4): 9-12.
ZHANG Yan-zhao. German maglev train[J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 1993(4): 9-12. (in Chinese)
- [25] DICKMAN S. Germans debate maglev train[J]. Nature, 1989, 340(6235): 584-584.
- [26] SANCHEZ H. Maglev train technology debate: American vs. German[J]. Bond Buyer, 2000, 333(30982): 1-9.
- [27] 冯仲伟, 方 兴, 李红梅, 等. 低真空管道高速磁悬浮系统技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2018(6): 105-111.
FENG Zhong-wei, FANG Xing, LI Hong-mei, et al. Technological development of high speed maglev system based on low vacuum pipeline[J]. Strategic Study of CAE, 2018(6): 105-111. (in Chinese)
- [28] SCHULTZ, 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.
- [29] BEYER C, HAAS O D, VERGES P, et al. Guideway and turnout switch for the SupraTrans project [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006(43): 991-994.
- [30] KUEHN L, HAAS O D, BERGER D, et al. SupraTrans 2: test drive facility for a superconductor-based maglev train[J]. Elektrische Bahnen, 2012(110): 461-469.
- [31] SAIJO T, KOIKE S, TADAKUMA S. Characteristics of linear synchronous motor drive cycloconverter for maglev vehicle ML-500 at Miyazaki Test Track[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1981, 17(5): 533-543.
- [32] KYOTANI Y. Recent progress by JNR on maglev[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(2): 804-807.
- [33] 商福昆. 宫崎实验线新磁浮实验车 MLU-002N[J]. 铁道机车车辆, 1995(1): 58-60.
SHANG Fu-kun. Miyazaki experiment line new maglev car MLU-002N[J]. Railway Locomotive and Car, 1995(1): 58-60. (in Chinese)
- [34] YOSHIOKA H, SUZUKI E, SEINO H, et al. Characteristics of the dynamics of the MLX01 Yamanashi Maglev Test Line vehicles[J]. Railway Technical Research Institute Quarterly Reports, 1998, 39(2): 62-67.
- [35] TAKIZAWA H, TAKAMI H, Yoshioka H, et al. Characteristics of vehicle dynamics of MLX01 for two trains passing each other and for a five-car train set[J]. Quarterly Report of RTRI, 2000, 41(2): 68-73.
- [36] 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.
- [37] KOEI T. Central Japan Railway Company[EB/OL]. (2016-03-30) [2020-09-15]. [http://English.Jr-central.Co.jp/](http://English.Jr-central.Co.jp/company/ir/investor-meeting/_pdf/im_2016_03.Pdf)
- compa-ny/ir/investor-meeting/_pdf/im_2016_03.Pdf.
- [38] OKANO M, IWAMOTO T, FURUSE M, et al. Running performance of a pinning-type superconducting magnetic levitation guide [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006(43): 999-1002.
- [39] 邓自刚, 张 勇, 王 博, 等. 真空管道运输系统发展现状及展望[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 1-11.
DENG Zi-gang, ZHANG Yong, WANG Bo, et al. Present situation and prospect of evacuated tube transportation system[J]. Chinese Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(5): 1-11. (in Chinese)
- [40] ELON M. SpaceX[EB/OL]. (2020-05-01) [2020-09-15]. http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf.
- [41] 苏靖棋. 超级高铁(Hyperloop)可行性分析[J]. 现代城市轨道交通, 2020(5): 114-118.
SU Jing-qi. Feasibility analysis of Hyperloop[J]. Modern Urban Transit, 2020(5): 114-118. (in Chinese)
- [42] SOTELO G G, DE OLIVEIRA R A H, COSTA F S, et al. A full scale superconducting magnetic levitation (maglev) vehicle operational line [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 3601005.
- [43] 刘文旭, 李文龙, 方 进. 高温超导磁悬浮技术研究论述[J]. 低温与超导, 2020, 48(2): 44-49.
LIU Wen-xu, LI Wen-long, FANG Jin. Review of research on high temperature maglev[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2020, 48(2): 44-49. (in Chinese)
- [44] D'OVIDIO G, CRISI F, LANZARA G. A "V" shaped superconducting levitation module for lift and guidance of a magnetic transportation system[J]. Physica C, 2008, 468(14): 1036-1040.
- [45] ANTELEFF W, BARNARD G, KURTZ C, et al. Shanghai maglev high-speed rail[J]. Science and Technology of West China, 2005(6): 54-56.
- [46] 沈志云. 关于我国发展真空管道高速交通的思考[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(2): 133-137.
SHEN Zhi-yun. On developing high-speed evacuated tube transportation in China[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(2): 133-137. (in Chinese)
- [47] DENG Zi-gang, WANG Jia-su, ZHENG Jun, et al. High-efficiency and low-cost permanent magnet guideway consideration for high- T_c superconducting maglev vehicle practical application[J]. Superconductor Science and Technology, 2008, 21(11): 1-6.
- [48] DENG Zi-gang, WANG Jia-su, ZHENG Jun, et al. An efficient and economical way to enhance the performance of present HTS maglev systems by utilizing the anisotropy property of bulk superconductors [J]. Superconductor Science and Technology, 2013, 26(2): 1-5.
- [49] DENG Zi-gang, ZHANG Wei-hua, ZHENG Jun, et al. A high temperature superconducting maglev ring test line developed in Chengdu, China[J]. IEEE Transactions on

- Applied Superconductivity, 2016, 26(6): 3602408.
- [50] 李家志,索红莉,王毅,等.超导材料在磁悬浮列车上的应用进展(上)[J].铁道技术监督,2020,48(3):38-44.
LI Jia-zhi, SUO Hong-li, WANG Yi, et al. Progress in the application of superconducting materials on maglev trains (Part 1 of 2) [J]. Railway Quality Control, 2020, 48(3): 38-44. (in Chinese)
- [51] 李家志,索红莉,王毅,等.超导材料在磁悬浮列车上的应用进展(下)[J].铁道技术监督,2020,48(4):51-57.
LI Jia-zhi, SUO Hong-li, WANG Yi, et al. Progress in the application of superconducting materials on maglev trains (Part 2 of 2) [J]. Railway Quality Control, 2020, 48(4): 51-57. (in Chinese)
- [52] 王博.真空管道高温超导磁悬浮车气动特性研究[D].成都:西南交通大学,2017.
WANG Bo. Study on aerodynamic characteristics of evacuated tube transport-high temperature superconducting maglev [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [53] 刘加利,张继业,张卫华.真空管道高速列车气动特性分析[J].机械工程学报,2013,49(22):137-143.
LIU Jia-li, ZHANG Ji-ye, ZHANG Wei-hua. Analysis of aerodynamic characteristics of high-speed trains in the evacuated tube [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 137-143. (in Chinese)
- [54] 贾文广.真空管道交通系统热动力学特性研究[D].青岛:青岛科技大学,2013.
JIA Wen-guang. The characteristic investigation of evacuated tube transport system on the thermodynamics [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [55] 黄兆国.超高速磁悬浮列车空气动力学问题研究[D].成都:西南交通大学,2018.
HUANG Zhao-guo. Study on aerodynamics of super high speed maglev train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [56] 林一平.我国磁悬浮列车研制取得重大进展[J].交通与运输,2017(3):50-53.
LIN Yi-ping. Major progress was made in maglev train development in our country [J]. Traffic and Transportation, 2017(3): 50-53. (in Chinese)
- [57] 徐飞.中国建设交通强国的综合基础与战略意义[J].学术前沿,2018(11):70-79.
XU Fei. The foundation and strategic significance of building a great transportation for China [J]. Frontiers, 2018(11): 70-79. (in Chinese)
- [58] 简炼.磁悬浮交通是真正的智能交通[EB/OL]. (2019-06-14) [2020-09-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/SuZidKY26r5jTtydsEVx1A>.
JIAN Lian. Maglev traffic is a real intelligent transportation [EB/OL]. (2019-06-14) [2020-09-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/SuZidKY26r5jTtydsEVx1A>. (in Chinese)
- [59] 金鑫.磁悬浮交通技术的发展及应用现状简述[J].四川建筑,2018,38(5):73-75.
JIN Xin. The development and application status of outlining the maglev transportation technology [J]. Sichuan Architecture, 2018, 38(5): 73-75. (in Chinese)
- [60] 耿杰.中低速磁悬浮简支轨道梁关键设计参数的理论与试验研究[D].成都:西南交通大学,2018.
GENG Jie. Theory and experimental research of key parameters design on simply-supported track girders of low to medium speed malev line [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [61] 严陆光.高速磁悬浮列车的战略进展与我国的发展战略[J].电工电能新技术,2002,21(4):1-12.
YAN Lu-guang. Strategic progress of high-speed maglev and the development strategy in China [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21(4): 1-12. (in Chinese)
- [62] 沈志云.高速磁悬浮列车对轨道的动力作用及其与轮轨高速铁路的比较[J].交通运输工程学报,2001,1(1):1-6.
SHEN Zhi-yun. Dynamic interaction of high speed maglev train on girders and its comparison with the case in ordinary high speed railways [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(1): 1-6. (in Chinese)
- [63] 张瑞华,严陆光,徐善纲.几种典型的高速磁悬浮列车方案比较[J].电工电能新技术,2004,23(2):46-50.
ZHANG Rui-hua, YAN Lu-guang, XU Shan-gang. Comparison of several typical high speed maglev trains [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(2): 46-50. (in Chinese)
- [64] 于子良,任坤华,许文天.高速轨道交通发展趋势[J].装备制造技术,2020(3):230-232.
YU Zi-liang, REN Kun-hua, XU Wen-tian. Development trend of high speed rail transit [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(3): 230-232. (in Chinese)
- [65] 马光同,杨文姣,王志涛,等.超导磁浮交通研究进展[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(7):68-74.
MA Guang-tong, YANG Wen-jiao, WANG Zhi-tao, et al. Superconducting maglev transportation research progress [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(7): 68-74. (in Chinese)
- [66] 孙玉玲,秦阿宁,董璐.全球磁悬浮交通发展态势、前景展望及对中国的建议[J].世界科技研究与发展,2019,41(2):109-119.
SUN Yu-ling, QIN A-ning, DONG Lu. Research on development and prospects of maglev transportation and suggestions to China [J]. World Sci-Tech R & D, 2019, 41(2): 109-119. (in Chinese)
- [67] MA K B, POSTREKHIN Y V, CHU W K. Superconductor and magnet levitation devices [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(12): 4989-5017.
- [68] 沈志云.对磁悬浮高速列车技术认识的两个错误观点[J].交通运输工程学报,2004,4(1):1-2.
SHEN Zhi-yun. Two wrong understanding of high-speed maglev train technology point of view [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(1): 1-2. (in Chinese)

- [69] 金茂菁,黄 玲.超高速真空管道交通技术发展现状与趋势[J]. 科技中国,2018(3):13-15.
JIN Mao-jing, HUANG Ling. Ultra high speed vacuum pipeline transportation technology development status and trends[J]. China SciTechnology Business, 2018(3):13-15. (in Chinese)
- [70] LIU Lu, WANG Jia-su, WANG Su-yu, et al. Levitation force transition of high- T_c superconducting bulks within a maglev vehicle system under different dynamic operation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1547-1550.
- [71] 田 恺.超高速磁悬浮铁路移动通信关键技术分析[J]. 铁道建筑技术,2020(6):158-161.
TIAN Kai. High-speed magnetic levitation railway mobile communication key technology analysis[J]. Railway Construction Technology, 2020(6): 158-161. (in Chinese)
- [72] 刘 留,裘陈成,刘 叶,等.真空管道高速飞行列车车地无线通信技术[J].北京交通大学学报,2019,43(1):146-156.
LIU Liu, QIU Chen-cheng, LIU Ye, et al. Wireless communication technology for vacuum tube high-speed flight train[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 146-156. (in Chinese)