

低真空管道高速磁悬浮系统技术发展研究

冯仲伟¹, 方兴², 李红梅³, 程爱君¹, 潘永杰¹

(1. 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 北京 100081; 2. 中国铁道科学研究院科技管理部, 北京 100081;
3. 中国铁道科学研究院铁道科学技术研究发展中心, 北京 100081)

摘要: 轮轨式是目前轨道交通技术体系的主流, 但由于空气阻力、轮轨黏着、运行噪声等问题的限制, 在现有的技术水平下, 难以经济地实现运营速度大幅度提高。为满足更高经济运行速度的需求, 在利用磁悬浮技术减少轮轨摩擦、振动的基础上, 构建低真空运行环境以减小空气阻力和噪声是未来更高速度轨道交通技术发展的重要方向。本文阐述了发展低真空管道高速磁悬浮系统的意义, 研究了其技术特点、发展现状, 分析了低真空管道高速磁悬浮系统的科学问题和关键技术, 并提出了在国家层面立项研究、建设试验线和国家级实验室的政策建议。

关键词: 轨道交通; 低真空管道; 高速磁悬浮; 系统技术

中图分类号: TB79 **文献标识码:** A

Technological Development of High Speed Maglev System Based on Low Vacuum Pipeline

Feng Zhongwei¹, Fang Xing², Li Hongmei³, Cheng Aijun¹, Pan Yongjie¹

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. Ministry of Science and Technology Management, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 3. Railway Science & Technology Research & Development Center, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The wheel-rail type transit is the mainstream in the current rail transit technology system. However, due to the limitations of air resistance, wheel-rail adhesion, and operating noise, it is difficult to achieve economically any significant increase in the operation speed at the current technological level. To meet the demand for a higher economical operating speed, apart from the use of the magnetic levitation technique to reduce wheel-rail friction and vibration, construction of a low vacuum operating environment to reduce air resistance and noise is an important development direction for higher speed rail transit technology in the future. This paper expounds the significance of developing a high speed maglev system based on low vacuum pipelines, studies its technical characteristics and current situation, analyzes scientific problems and key technologies of this system, and puts forward relevant policy suggestions including project-setting research at the national level, building up test lines, and construction of national laboratories.

Keywords: rail transit; low vacuum pipes; high speed maglev; system technology

收稿日期: 2018-10-22; 修回日期: 2018-10-30

通讯作者: 冯仲伟, 中国铁道科学研究院集团有限公司, 副研究员, 主要从事铁道工程技术的研究与开发工作; E-mail: 13910237750@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“工程科技颠覆性技术战略研究”(2017-ZD-10)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

党的“十九大”明确提出要建设“交通强国”，而衡量一个国家交通行业发展水平和科技创新能力，速度是最重要的指标之一，交通运输速度的每一次提升，都对人类文明的加速发展发挥了重要作用。现有轨道交通技术体系的主流是轮轨式，轮轨式试验列车最高试验速度为 574.8 km/h（法国高速动车组试验车 V150）[1]，运营列车最高试验速度为 486.1 km/h（中国 CRH380AL 动车组），最高运营速度为 350 km/h（中国）。

轮轨式轨道交通由于受制于空气阻力、轮轨黏着、蛇行失稳、运行噪声以及弓网接触受流等问题，运营速度很难经济地大幅度提升，而且能耗和机械摩擦磨损亦随着速度的提高显著增大。最新试验结果表明，动车组以 400 km/h 运行时每百公里人均能耗较 350 km/h 运行时增加约 30%。

20 世纪 20 年代在德国诞生了磁悬浮列车概念 [2]，采用磁悬浮技术解决了轮轨式轨道交通的轮轨黏着、摩擦、振动和高速受流等问题，到目前为止高速磁悬浮技术已经逐渐成熟。我国于 2002 年 12 月 31 日建成了目前世界上唯一一条商业运营的高速磁悬浮线路——运营速度为 430 km/h 的上海磁悬浮专线。日本于 2014 年开工建设东京至名古屋的首条高速磁悬浮线路，设计最高运营速度为 505 km/h，计划 2027 年开通。我国正在研制时速为 600 km/h 的高速磁悬浮系统技术。

无论是轮轨式还是磁悬浮式，当车辆处于开放空间大气环境下运行时，均要面临巨大的空气阻力（与速度的平方成正比）和噪声（与速度的六至八次方成正比）问题，尤其当速度超过 400 km/h 后，空气阻力占列车运行总阻力的 80% 以上，从而给商业运营带来经济性和环保的挑战。

因此，为获得更高的经济运行速度，在利用磁悬浮技术减少轮轨摩擦、振动的基础上，构建低真空运行环境以减小空气阻力和噪声是未来更高速度轨道交通技术发展的重要方向。

二、发展低真空管道高速磁悬浮系统的意义

低真空管道高速磁悬浮系统是轨道交通领域面向未来的颠覆性技术，它既是一个超大型的系统工

程，也是一个复杂巨系统，具有投资和工程规模浩大、技术难度大、层次和接口关系复杂、涉及学科领域众多，同时社会效益和经济效益巨大的特征。

（一）发展低真空管道高速磁悬浮系统是引发交通运输方式变革的重要举措

低真空管道为密闭环境，受暴风、雨雪等恶劣天气影响较小，列车运行可靠性高，车内和外界噪音小。低真空管道高速磁悬浮系统比飞机具有更大的载运量、更小的能源损耗和环境污染，比高速铁路具有更高的速度，且占地较少。在全国乃至全球主要区域中心之间通过低真空管道相连，实现旅客和货物的高速送达，满足人们对更高质量、更快速度交通运输服务的需求，极大地改善信息时代信息传播速度与人和物流速度极不匹配的现状，引发交通运输方式变革。

（二）发展低真空管道高速磁悬浮系统是推动“超级城市群”建设、推进全国区域经济快速增长，带动产业发展的重要助力

过去的十年，中国高速铁路对改善沿线交通基础设施条件、促进区域经济增长及协调发展起到了重要的推动作用。低真空管道高速磁悬浮系统交通运输方式的出现，将推动“超级城市群”的资源优化配置，降低空间距离对人员、产品自由流通的限制，形成覆盖全国范围、半径 600~1 000 km 的“一小时经济生活圈”。原有的“中心城市+卫星城”的区域性产业经济布局将逐步向以“超级城市群”为代表的全国性经济布局过渡，合理整合原有城市的资源要素，使资金、人才、技术加速聚集，形成巨大的聚集经济效益，带动我国国民经济的转型升级和加速发展。

（三）发展低真空管道高速磁悬浮系统是贯彻新发展理念，加快建设创新型国家的重要体现

低真空管道高速磁悬浮系统最大的优点在于其高速度、低能耗、低污染，对于着力解决当前突出的环境问题，推进区域绿色发展，构建清洁低碳、安全高效、绿色出行的新型交通方式意义重大。低真空管道高速磁悬浮系统作为前沿技术的典型代表，相关技术的实际应用对我国相关领域的科技创新也具有很强的引领作用。

(四) 发展低真空管道高速磁悬浮系统是巩固我国高速铁路领先优势, 贯彻交通强国战略的有力武器

当前, 我国高速铁路技术发展迅速, 在世界铁路行业处于领先地位, 与此同时, 俄罗斯、美国、法国、德国、日本、韩国等国家正积极筹划和发展各种方式的交通技术。俄罗斯正在设计建设最高速度为 400 km/h 的莫斯科至喀山轮轨高铁。日本开展了超导高速磁悬浮技术研究, 并于 2015 年创造了载人走行 603 km/h 的世界纪录。美国开展了 Magplane、Hyperloop 等多种技术方案的研究。国际铁路联盟 (UIC) 组织成立了管道高铁技术组, 拟开展相关前期研究工作。我国亟需在更高速度轨道交通领域深化研究, 做好战略技术储备, 而发展低真空管道高速磁悬浮系统, 是践行国家创新驱动战略, 抢占未来交通领域科技制高点, 支撑国家更高速度轨道交通战略发展定位的有力武器。

三、技术特点与研究现状

(一) 技术特点

磁悬浮铁路是靠电磁吸引力或排斥力将车辆悬浮在导轨上, 利用直线电机的原理推动列车前进的铁路。磁悬浮铁路按速度划分, 可分为高速磁悬浮和中低速磁悬浮, 二者在驱动、导向和控制方式方面均有所不同, 目前世界各国运营的中低速磁悬浮运营速度均为 120 km/h 以下。

根据磁悬浮方式的不同, 高速磁悬浮列车又分电磁悬浮式 (EMS) 和电动悬浮式 (EDS) 两种。EMS 也称磁吸式, 一般采用“T”型导轨, 车辆环抱导轨运行。对置于导轨下方的车载悬浮电磁铁通电励磁而产生磁场, 磁铁与轨道上的铁磁构件相互吸引, 将列车向上吸起悬浮于轨道上, 磁铁和铁磁轨道之间的悬浮间隙一般约为 10 mm, 列车通过控制悬浮磁铁的励磁电流来保证稳定的悬浮间隙。EDS 也称磁斥式, 是利用车载磁体与地面线圈之间的相对运动产生两个感应磁场, 这两个磁场互作用产生电磁力。当车辆行进达到一定速度时, 电磁力才能大到足以使车体浮起。电动悬浮式车体悬浮的高度可达到 100 mm 以上。电磁悬浮式磁悬浮列车的典型代表是德国 Transrapid 磁悬浮列车中的 TR08 列车, 其最高速度可达 400~500 km/h。电动

悬浮式磁悬浮列车的典型代表为日本超导磁悬浮系统 magnetically levitated (ML) 中的 MLX01 (最高速度可高达 500~600 km/h) 以及面向中央新干线的 L0 系。高速磁悬浮系统电磁铁有常导和超导两种类型。而超导型电磁铁是用超导材料冷却到极低的温度, 使其达到超导状态, 即电阻接近零, 这样电能损耗很小, 电流可以很大, 电磁铁功率也可以很大。目前, 由于不同的材料所需的超导温度不同, 又可以分为低温超导 (常用液态氮制冷, 工作温度低达 $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和高温超导 (常用液态氮制冷, 工作温度为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) 两种。

低真空管道高速磁悬浮系统是使高速磁悬浮列车 (铝和碳纤维材料或其他高强度轻型材料制成密闭车厢) 在钢结构的密闭管道中运行的一种交通工具。采用钢筋混凝土支柱将钢结构的管道架设在离地面一定高度或埋设在地下, 并将管道内抽成低真空, 其内空气压力约为海平面大气压力的几百分之一, 甚至千分之一。低真空管道高速磁悬浮系统结合了真空管道技术和磁悬浮列车技术, 采用该种方式, 不存在轮轨动力学问题, 也不存在弓网动力学问题, 甚至高速磁悬浮铁路面临的巨大空气阻力问题也几乎不存在。因此, 低真空管道高速磁悬浮系统可以相对经济地实现地面交通时速 600 km 以上的运行速度。

低真空管道高速磁悬浮系统的不足主要包括两个方面, 一是作为与轮轨高铁技术迥异的高速交通系统, 不能与国内已建成的长达十余万千米的铁路联网运行; 二是受高速磁悬浮道岔及相关技术的制约, 列车追踪间隔时间较长, 影响列车运行效率。但上述不足主要是基于与轮轨高铁竞争为出发点提出的, 随着低真空管道高速磁悬浮系统较轮轨高铁运行速度的大幅度提高, 其对现有交通方式的补充将在很大程度上强化和提升既有交通运输体系的能力与功能。

(二) 研究现状

1. 磁悬浮铁路

20 世纪 60 年代, 德国、日本、美国分别开始研制磁悬浮列车。20 世纪 70 年代, 英国、加拿大、苏联也加入了磁悬浮铁路的研究行列, 但随着时间的推移, 美国、苏联、加拿大、英国先后放弃了对磁悬浮铁路的研究, 20 世纪 80 年代以后, 韩国和

中国也加入了磁悬浮铁路的研究行列 [3]。

德国是磁悬浮铁路概念的诞生地。德国学者肯佩尔早在 20 世纪 20 年代就提出了磁悬浮理论，并在 1934 年获得磁悬浮列车发明专利。1968 年德国开始了磁悬浮列车的研究，1969 年研制出世界第一列磁悬浮列车的模型车——TR01，以后的数年，先后研制出 TR02、TR03、TR04 等型号的磁悬浮列车，这些磁悬浮列车都采用短定子直线电机原理，以中低速运行为主。1979 年研制出第一列采用长定子同步直线电动机原理的常导吸引型磁悬浮列车——TR05，从 TR05 之后的列车均采用同步直线电机驱动。2007 年研制的 TR09 为截至 2017 年的最新车型。为开展磁悬浮高速列车试验，德国于 1988 年在埃姆斯兰建成全长为 31.5 km 的试验线（TVE）。

日本国有铁道从 1962 年开始研究常导磁悬浮列车，从 1972 年开始研究采用低温超导磁铁的超导电动悬浮式磁悬浮列车——Maglev trains (magnetically levitated trains)，同年研制出世界上第一台单节试验车——ML100。后来分别研制了 ML500、MLU001、MLU002、MLU001N、MLX01 等型号的磁悬浮试验车。为了更好地服务于磁悬浮系统的发展，日本于 20 世纪 70 年代建成了长达 7 km 的宫崎磁悬浮试验线，并于 1979 年创造了不载人情况下最高 517 km/h 的试验速度。1997 年开始在山梨县境内川村—秋山村间修建一条全长 42.8 km 的新的试验线，首期试验线（长 18.4 km）于 1999 年建成，全部工程于 2013 年完成。早在 2003 年，日本的高速磁悬浮列车就在试验线上跑出了载人情况下 581 km/h 的世界纪录。2010 年 10 月 26 日，日本发布了为营业线配置的 L0 系第一代磁悬浮列车技术要求。2012 年 11 月，新研制的 L0 系磁悬浮列车进入山梨试验线。L0 系列车始发时是橡胶轮走行，当速度超过 150 km/h 时，电磁力足够把车体抬起转换为磁悬浮走行，悬浮高度约为 100 mm。2015 年 4 月 21 日，L0 系在山梨试验线的试乘活动中创造了载人走行 603 km/h 的世界纪录。

中国从 20 世纪 80 年代开始研究磁悬浮铁路技术，最先开展研究的单位包括铁道科学研究院、西南交通大学、国防科技大学和中国科学院电工研究所。1989 年，国防科技大学第一次研制出小型磁

浮试验车。1994 年，西南交通大学研制了双转向架 4 t 磁悬浮车。1998 年，铁道科学研究院研制的 6 t 单转向架磁悬浮车实现稳定悬浮。2000 年，西南交通大学研制成功世界首辆载人高温超导磁悬浮实验车。进入 21 世纪以来，中国先后建成国防科技大学磁悬浮实验线、青城山磁悬浮列车工程试验线，以及同济大学高速磁悬浮试验线。2016 年 10 月 21 日，国家科技部将“高速磁悬浮交通系统关键技术研究”重点专项定向委托给中国中车股份有限公司组织实施，标志着我国时速 600 km 高速磁悬浮的研发拉开序幕。该项目旨在攻克高速磁悬浮交通系统悬浮、牵引与控制核心技术，形成我国自主知识产权并具有国际普遍适应性的新一代高速磁悬浮交通系统核心技术体系及标准规范体系，使我国具备高速磁悬浮交通系统和装备的完全自主化与产业化能力。

2. 低真空管道高速磁悬浮系统

美国学者罗伯特·戴维早在 1904 年就提出“真空管道运输”设想。瑞士于 20 世纪 70 年代提出以隧道作为管道的地下低真空高速磁悬浮地铁系统，即 Swissmetro 系统，该系统将地下隧道抽成 10^{-1} atm 的低真空，使用线性推动技术和磁悬浮与导向技术，设计速度为 500 km/h [4]。20 世纪 90 年代，美国工程师奥斯特注册了真空管道运输系统（ETT）的商标和发明专利，该系统为小型分散的管道“汽车”模式，管道内抽成低真空，采用可乘坐 6 人的圆柱状磁悬浮客舱，速度可达到 6 500 km/h。2004 年，沈志云院士提出了发展低真空高温超导磁悬浮高速系统的技术方案 [5]。

虽然低真空管道高速磁悬浮系统的概念或方案已经提出数十年，但由于技术和经济原因，在世界各国均未得到工程应用。2013 年，美国特斯拉电动汽车公司首席执行官埃隆·马斯克（Elon Musk）提出“超级高铁”（Hyperloop）的初始计划方案，并参与加州高铁项目的竞争，全球再次掀起了真空管道高铁热潮。根据马斯克的设计，超级高铁主要由四部分组成：胶囊、管道、推进系统和储能部件，胶囊可以乘坐 28 名乘客，放置于真空管道中正常行驶时速可达 1 220 km，管道由钢材制成，管道内压力预计保持在地球表面压力的 1/1 000。自马斯克提出“超级高铁”的概念后，有很多美国公司着手研究“超级高铁”，包括 Hyperloop One 公司和

Hyperloop Transportation Technologies (HTT) 公司。

2015年12月,美国Hyperloop One公司开始在拉斯维加斯北部建设测试点,包括一段长约1 km的测试轨道。2016年5月,Hyperloop One公司的超级高铁推进系统首次户外测试成功,测试车辆重约680 kg,以相当于2.5倍重力的推力加速,速度从0加速到97 km/h仅需要1.1 s,最高测试速度达到186 km/h。2017年还进行过三个阶段的试验。

低真空环境下首次磁悬浮小车全系统测试。2017年5月12日,Hyperloop One公司首次在位于内华达州的真空管道中对其超级高铁进行了全系统测试。在测试中,Hyperloop One公司的超级高铁车辆利用磁悬浮技术在低真空管道中运行了5.3 s,加速度接近2g,时速达到113 km。

全尺寸乘客舱测试。2017年7月29日,Hyperloop One公司首次投入使用长8.7 m、宽2.4 m、高2.7 m,由铝和碳纤维构成的全尺寸乘客舱XP-1。测试车辆跑完了全程,最高时速达到310 km。Hyperloop One公司在测试后表示,发动机、电子器件、真空泵和磁悬浮机制等系统在测试过程中均运行良好,XP-1乘客舱以磁悬浮方式在轨道上滑动,推进系统的驱动功率是第一阶段的3.5倍,低管道被减压到相当于海拔 2×10^5 ft (1 ft = 0.3048 m)的气压,尽可能减小了运行阻力。

更高速度测试。2017年12月中旬,Hyperloop One公司完成了最高时速387 km的测试,除了速度测试,还进行了一系列对新气闸系统(让列车在500 m长的真空管和正常空气压力下运行)、电动发动机、控制与电力电子设备、磁悬浮设备等的测试。

HTT公司于2015年开始在加州中部地区修建长约8 km的测试轨道。首节全尺寸车厢HyperloopTM也于2017年3月22日进入制造阶段,HTT公司计划其“超级高铁”将于2019年实现运输货物,2021年运载乘客。

韩国也曾经计划自主开发亚音速胶囊列车,计划应用于首尔—釜山段超高速铁路。2016年10月21日,韩国铁道技术研究院、韩国建设技术研究院、蔚山科学技术大学等联合成立真空管道磁悬浮研究会。2017年初,韩国政府以及相关的学术机构宣布了拟打造代号为“HTX”超级高铁的计划。

目前,我国有西南交通大学、中国航天科工集团有限公司、中国铁道科学研究院等单位正在致力

于低真空管道高速磁悬浮系统的研究,同时这些单位已经建立了或正在推动建立相关试验平台。其中西南交通大学于2011年研制出侧挂式小比例低真空管道高温超导磁悬浮环形加速列车系统,2014年建成了低真空管道高速磁悬浮列车原型测试平台。

四、科学技术问题与关键技术

(一) 科学技术问题

理论上,采用真空管道技术,让列车处于真空环境中,没有了空气阻力,将大幅提升磁悬浮列车的速度,但要真正实现“工程化”,在技术、经济、安全等诸多方面仍存在很多问题和争议。本文从巨系统顶层设计、低真空管道及环境、高速磁悬浮以及商业化运营四个方面对低真空管道高速磁悬浮系统可能存在的科学技术和工程问题进行了梳理凝练。

1. 巨系统顶层设计

巨系统顶层设计主要包括高速磁悬浮线路选线及平纵断面设计,真空度与车辆-管道断面合理匹配,站场布置、线路转换及乘客乘降环境过渡,系统与子系统及其部件全生命周期可靠性、可用性、可维修性、安全性(RAMS)体系构建及保障,系统内部与外部接口关系及管理,流-固-磁-热多物理场耦合作用机理及其分析等问题。

2. 低真空管道及环境

低真空管道及环境主要包括低真空管道材料及结构设计,管道支撑结构的类型、铺设精度、温度及沉降变形控制、与管道联接方式及变形协调,管道内运行及辅助系统布置及其与管道联接方式,长距离大断面低真空环境快速构建及控制,车体密封及车内环境维持,车体及电气元件在低真空环境条件下的散热,低真空环境下电气设备特性及电磁场动态畸变,低真空环境下噪声传播机理及车内噪声控制,低真空密闭环境下超高速车-地无线通信,低真空环境下应急疏散救援,管道内养护维修等问题。

3. 高速磁悬浮

高速磁悬浮主要包括悬浮导向技术方案选择及轨道梁几何精度合理匹配,高速运行条件下悬浮导向稳定性控制,高速运行条件下驱动与制动方案及

控制，驱动制动与悬浮导向磁场耦合机理及分析方法，高速运行条件下列车测速定位，高速运行时低真空管内压力波效应及其对列车运行安全性、稳定性影响，高速运行时磁阻效应特性及磁场平顺优化，高速长距离运行条件下多端口同步牵引供电协调控制，高速运动边界引起的气动热辐射、热传导及散热等问题。

4. 商业化运营

商业化运营主要包括相关技术标准体系构建，调度指挥及安全防护，运输组织与客运服务，运营维护，以及与既有交通运输体系的衔接等问题。

(二) 关键技术

从系统功能划分，低真空管道高速磁悬浮系统可分为总体系统、低真空与线路系统、车辆系统、悬浮导向系统、驱动与制动系统、通信与运控系统、安全保障及防灾救援系统等，初步提出 22 项各子系统关键技术。

1. 总体系统

低真空管道高速磁悬浮系统总体层面尚无成功的可借鉴设计经验，需攻克的关键技术有：一体化设计技术、复杂多物理场系统耦合分析技术、系统安全及可靠性技术、系统仿真优化及试验验证技术等。

2. 低真空与线路系统

系统真空尺度大，真空中难以通过对流及时散热；同时，高速对线路的平顺度、可靠性、结构特征等参数提出了更高要求。需攻克的关键技术包括：大尺寸管道低真空环境构建与控制、高精度轨道及线桥隧设计制造技术、高速磁悬浮道岔技术 [6]、轨道瞬时大面积高热量密度散热技术等。

3. 车辆系统

车辆在高速运动状态下，受到力、热、振动及噪声多种载荷的耦合作用，对列车车体、走行机构提出了新的要求。需攻克的关键技术有：低阻 / 噪 / 热车体外形一体化设计技术、轻质 - 高承载车体结构设计技术、高固有频率走行机构设计技术等。

4. 悬浮导向系统

列车在高速运动状态下，对于悬浮系统的稳定性、损耗抑制、结构强度等提出了较高要求。需攻克的关键技术有：大重载稳定磁悬浮设计技术、高速动态悬浮力波动抑制技术、新型高性能超导体研

制技术等。

5. 驱动与制动系统

列车在高速运行状态时，对高频、高压、大电流条件下驱动系统的工作效率，以及不同速度下涡流制动器的制动力密度和速域范围等提出了更高要求。需攻克的关键技术有：大推力高速电机研制技术、大功率高速驱动变流控制技术、高密度高可靠储能及供电技术、宽域高密度涡流制动技术等。

6. 通信与运控系统

低真空管道高速磁悬浮系统间耦合性强，控制复杂且可靠性要求高，需攻克的关键技术有：高速高可靠运行控制技术、低真空密闭环境高速高可靠车地无线通信技术等。

7. 安全保障及防灾救援系统

安全保障及防灾救援系统主要包括状态和灾害监测与评估技术、应急处置与安全救援技术等。

五、建议

(一) 国家层面立项研究

虽然国家科学技术部已立项“磁悬浮交通系统关键技术”重点专项，但由于低真空管道高速磁悬浮系统注入了低真空的环境特征，其技术复杂程度大幅度增加。建议由国家立项，在前期研究的基础上，开展面向时速 600 km 以上的低真空管道高速磁悬浮系统研究，包括系统整体架构与系统技术研究、基础设施设计建造技术研究、关键装备研发与制造技术研究，以及运营维护和安全保障策略研究等。

(二) 建设低真空管道高速磁悬浮系统试验线

低真空管道高速磁悬浮系统作为技术复杂的工程巨系统，需反复进行工程验证试验，虽然西南交通大学正在建设一条低真空高温超导磁悬浮直道试验线，但其总长度为 140 m，仅可用于 400 km/h 以下的技术测试，远远达不到工程验证试验的目的，建议立项研究建设约 5 km 长度的试验线，推动低真空管道高速磁悬浮系统工程应用突破，促进科技成果的工程化和产业化进程。

(三) 建设低真空管道高速磁悬浮系统国家级实验室

由国家科学技术部、交通运输部、中国铁路总

公司共建, 主要依托中国铁道科学研究院、西南交通大学、中国中车股份有限公司、航天科工集团、中国中铁股份有限公司、中国铁建股份有限公司、中国石油管道公司等单位联合建设。实验室瞄准“交通强国战略”需求, 通过科研院所、高校、轨道交通领域大型企业集团资源共享, 持续开展科技创新, 最终建成我国低真空管道高速磁悬浮系统基础理论和前沿技术研发基地、学术交流中心和人才培养基地, 形成低真空管道高速磁悬浮系统技术的科技创新体系。

参考文献

- [1] 钱立新. 574.8 km/h 世界高速列车速度新记录的启示 [J]. 铁路技术监督, 2007 (5): 1-3.
Qian L X. Inspiration from the new record of 574.8 km/h for high speed train [J]. Railway Quality Control, 2007 (5): 1-3.
- [2] 严陆光. 关于我国高速磁悬浮列车发展战略的思考 [J]. 中国工程科学, 2002, 4(12): 40-46.
Yan L G. Consideration on the development strategy of high speed maglev in China [J]. Strategic Study of CAE, 2002, 4(12): 40-46.
- [3] 程建峰, 苏晓峰. 磁悬浮列车的发展及应用 [J]. 铁道车辆, 2003, 41(11): 14-18.
Cheng J F, Su X F. Development and application of magnetic levitation trains [J]. Railway Vehicle, 2003, 41(11): 14-18.
- [4] 张瑞华, 严陆光, 徐善纲, 等. 一种新的高速磁悬浮列车——瑞士真空管道高速磁悬浮列车方案 [J]. 变流技术与电力牵引, 2004 (1): 44-46.
Zhang R H, Yan L G, Xu S G, et al. The new kind of High speed maglev train—High speed maglev train based on vacuum pipeline in Switzerland [J]. Converter Technology & Electric Traction, 2004 (1): 44-46.
- [5] 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 Z Y. On developing high-speed evacuated tube transportation in China [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(2): 133-137.
- [6] 周冬. 中国磁悬浮列车技术专利状况解析 [J]. 中国发明与专利, 2011 (8): 100-104.
Zhou D. Research on technology patent of maglev train in China [J]. China Invention & Patent, 2011 (8): 100-104.