



低真空超高速轨道交通研究进展与思考

张卫华^{1,2}, 邓自刚^{1,2}, 毕海权^{2,3}, 李 田^{1,2}, 李 艳⁴, 李海涛²
(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031;
2. 西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心, 四川 成都 610031;
3. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031;
4. 成都西南交通大学设计研究院有限公司, 四川 成都 610031)

摘 要: 低真空超高速轨道交通具有显著的应用前景, 也有部分科学技术问题亟待攻克。文章全面回顾了低真空管道超高速轨道交通技术的起源、发展和当前的国际研究态势, 分析了开展该技术研究的必要性与可行性, 详细讨论了低气压环境下磁浮列车的悬浮技术适应性及其面临的主要技术挑战, 如散热和绝缘问题。此外, 针对低真空管道交通系统的救援与逃生问题, 文章也提出了相应的技术解决方案和适应措施。

关键词: 超高速; 低真空; 磁浮列车; 低真空管道; 救援与逃生

中图分类号: U23

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)01-0001-13

0 引言

自第二次工业革命以来, 铁路系统一直是全球经济发展和社会进步的基石。在我国, 铁路作为国民经济发展的主动脉和国家重要的基础设施, 在经济社会发展中具有重要作用, 尤其在货运领域发挥了至关重要的作用。在客运铁路中, 中国高速铁路技术已引领全球, CR450型电力动车组更是技术创新的典范, 其研发完全实现了高速列车的正向设计。随着高速铁路网络的扩展, 旅客对列车运行速度的期望亦不断攀升。然而, 在轮轨黏着极限与弓网受流波速的限制下, 轮轨高铁最高运营速度约为400~450 km/h^[1-3], 欲实现对这一速度的突破, 不仅需克服严峻的技术难题, 而且在运行安全性和经济效益方面亦面临重大挑战。

面对轮轨高铁的速度极限, 地面轨道交通速度是否还有提升的技术空间和必要性, 一直是学术界和产业界争论的话题。文献[4]在分析陆地交通与技术进步、工业革命的关系时指出, 伴随每一次工业革命的发生, 地面交通的速度就会增加1倍。当前正处于第

三次工业革命向第四次工业革命发展的时期, 对应的陆地交通最高速度为500 km/h速度级。目前在建轨道交通速度最高的是日本“东京一大阪”(一期为“东京一名古屋”)的超导电动磁浮“山梨线”, 其设计速度为505 km/h。按照文献[4]推测, 当工业技术进步到第四次工业革命, 地面轨道交通速度有可能提升到1 000 km/h, 这在地面稠密大气中是难以完成的, 而且大幅超越传统轮轨高铁的速度极限。中国科学院、中国工程院院士沈志云教授指出“当速度增加时, 气动阻力会随速度的平方上升, 气动噪声则会随速度的6~8次方急增, 这是任何形式的交通工具都无法避免的客观规律。在地表稠密大气层中运行的地面高速交通, 最高经济时速不能超过400公里, 否则能耗和对环境的破坏将大大增加, 导致它根本无法实现商业运营”^[5]。在2004年成都“真空管道高速交通”院士学术报告会上, 沈志云院士与与会的相关学者讨论了发展低真空高速轨道交通的必要性与可行性, 以及面向更高速度的轨道交通发展需求, 提出了“后高铁时代”的概念。

事实上, 中国轨道交通系统正在经历多方面的快

基金项目: 国家自然科学基金委企业联合基金(U24B20125)

通信作者: 张卫华, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事轨道交通移动装备、车辆系统动力学方面的研究; E-mail: tpl@swjtu.edu.cn

引用格式: 张卫华, 邓自刚, 毕海权, 等. 低真空超高速轨道交通研究进展与思考[J]. 机车电传动, 2025(1): 1-13. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.109.

Citation: ZHANG Weihua, DENG Zigang, BI Haiquan, et al. Research review and reflections on ultra-high-speed rail transit in low-vacuum environments[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 1-13. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.109.

速发展, 不仅包括轮轨高铁的高速、全面扩展, 还涉及高速磁浮技术和低真空管道轨道交通的创新。中共中央、国务院于2019年印发《交通强国建设纲要》明确指出“合理统筹安排时速600公里级高速磁悬浮系统、时速400公里级高速轮轨(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”。目前, 在科技部重点研发等相关项目的支持下, 时速400公里级高速轮轨列车和时速600公里级的高速磁浮列车的样车都已经成功下线。四川省和山西省也分别支持建设了公里级的低真空管道的磁浮交通试验研究平台, 标志着我国在低真空管道轨道交通技术研究领域的正式起步。在国外, 低真空管道交通被称作“Hyperloop”(超级高铁), 其中欧美对其的研究开发更是如火如荼。本文将回顾国内外主要研究进展, 并探讨其面临的挑战及其应对措施。

1 国外低真空管道轨道交通的提出与研究进展

低真空管道交通这个概念最早由美国人罗伯特·巴拉德·戴维(Robert Ballard Davy)于1919年提出, 并申请了“真空铁路”(Vacuum Railway)的专利^[6]。同一时期, 现代火箭技术的奠基人罗伯特·H·戈达德(Robert H. Goddard)亦提出了类似的构想, 并由其配偶申请专利。1975年, 罗伯特·L·福尔加奇(Robert. L. Forgacs)发表了*Evacuated tube transportation, energy, and the environment*^[7]的论文, 成为低真空管道交通领域最早的学术论文。1997年, 达里尔·奥斯特(Daryl Oster)申请了低真空管道交通专利Evacuated Tube Transport^[8], 并在佛罗里达创立了低真空管道交通技术公司(ET3.com Inc.), 是全球首家以低真空管道交通为主的企业。尽管早期的研究多停留在概念阶段, 但瑞典地铁提出的Swissmetro方案^[9]则为低真空管道高速磁悬浮列车提供了相对详尽的设计, 该方案考虑把地铁隧道密封, 并形成相当于海拔高度18 000 m的低气压, 以减少空气阻力与气压波作用。然而, 由于资金不足, 该项目未能实施。

2013年, 美国企业家埃隆·马斯克(Elon Musk)发布了一项颇具革命性的城际运输方案——“超级高铁”(Hyperloop), 为“真空管道运输”方案丰富了很多设计细节, 如依靠太阳能和储能设备供给动力等, 其核心技术也是采用低真空管道, 以减少空气阻力。这一方案在设计细节上的详尽和创新引发了全球对超高速轨道交通的广泛兴趣。马斯克的太空探索技术公司(SpaceX)为此建造了一条直径1.6 m、长度1 600 m的低真空管道^[10], 用于全球大学生的SpaceX Hyperloop Pod大赛。该竞赛的首届冠军由麻省理工学院获得, 随后举行的竞赛分别由荷兰代尔夫特理工大学和德国慕尼黑工业大学团队获胜, 其中速度最高纪录为467 km/h。在马斯克发

布了Hyperloop Alpha白皮书之后, 人们对未来超高速轨道交通充满了憧憬与希望, 也觉察到了相关的商机, 越来越多的个人和组织加入到Hyperloop的研究开发中。在其中的团队或公司中, 有2个是参加过SpaceX Hyperloop Pod竞赛并取得胜利而发展起来的, 其中一支队伍是来自荷兰代尔夫特理工大学的团队, 后续逐步发展为HARDT Hyperloop公司; 另一支队伍是来自德国慕尼黑工业大学的团队, 在第三届和第四届竞赛中获得冠军, 发展成为TUM Hyperloop。表1列举了具有代表性的机构和相关的研究进展。由表1可以看出, Hyperloop项目普遍采用磁悬浮技术, 但具体的技术模式各有不同。

目前, 较为领先的公司或组织有美国Hyperloop Transportation Technologies(HTT)公司、美国Virgin Hyperloop One公司、荷兰Hardt Hyperloop公司、欧洲超级高铁中心(European Hyperloop Center, EHC)。HTT公司成立于2013年, 在法国图卢兹建立了一个超级回路研发中心, 并在2019年建成了320 m的测试轨道, 还展示了Quintero One客运列车, 该车的设计时速达1 223 km, 如图1所示^[12]。



图1 HTT测试轨道和全尺寸列车Quintero One^[12]

Fig. 1 HTT test track and full-scale train Quintero One^[12]

Virgin Hyperloop One公司, 原名Hyperloop One, 成立于2014年, 于2017年完成387 km/h的模型车试验, 并于2022年完成172 km/h的载人测试, 如图2所示^[13]。



图2 Virgin Hyperloop One在DevLoop测试轨道上的乘客测试^[13]

Fig. 2 Passenger testing of Virgin Hyperloop One on the DevLoop test track^[13]

表 1 国外低真空管道交通公司或研究机构

Table 1 Foreign low-vacuum tube transportation companies or research organizations

国家	公司或组织	开始时间	目标速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	悬浮方案	主要进展
美国	SpaceX	2013	1 220		①建设直径 1.6 m、长度 1 600 m 低真空管道用于 Space X Hyperloop Pod 竞赛; ②目前已暂停 Hyperloop 研究
美国	Hyperloop Transportation Technologies	2013	1 220	永磁电动	①2018 年成立法国图卢兹研发中心, 建设 320 m 管道并研制碳纤维车体; ②2024 年将研发中心迁移至意大利威尼托地区
美国	(Virgin) Hyperloop One	2015	1 080	永磁电动	①建设直径 3.3 m、长度 500 m 低真空管道; ②2017 年完成 387 km/h 的模型车试验; ③2022 年完成 172 km/h 的载人测试; ④2023 年公司关闭
加拿大	Trans POD	2015	1 000	永磁电动	2020 年与加拿大艾伯塔政府签订了发展 1 000 km/h 的卡尔加里和埃德顿超级高铁运输系统的谅解备忘录
西班牙	Zeleros Hyperloop	2016	1 000	电磁悬浮	①提出“Tubeloop”概念, 采用磁悬浮技术和航空发动机的气动推进技术; ②准备在 Sagento 建造 2 km 测试跑道
韩国	铁道科学院 HyperTube ^[11]	2017	1 200	超导电动	①建立了长度 35 m、缩比 1:17 的低真空管道测试平台; ②正在研制长度 10 m、直径 4 m 的高密度混凝土真空管道模型; ③计划研制长度 350 m, 最高速度 100 km/h 的超导电动悬浮列车试验线 (2025-04—2027-12)
荷兰	Hardt Hyperloop	2017	1 000	永磁、 电磁混合	2024 年 9 月在 EHC 的低真空管道中完成首次测试, 车辆以 30 km/h 的速度平稳地通过长度约为 100 m 的试验线, 加速度为 0.2g
瑞士	Swisspod	2017			①正在瑞士蒙泰建设一条环形管道线路 (中径 40 m), 用于超级高铁系统测试与验证; ②计划在美国科罗拉多州建设全球最大的超级高铁测试中心, 以支持全尺寸超级高铁舱体的研发和测试
瑞士	欧洲管道基金会 (EuroTube)	2019	暂无	暂无	①聚焦于管隧道与真空系统等基础设施研究 (低真空管道材料、部件和阀门); ②在瑞士苏黎世修建了长度 120 m 的混凝土管道示范线, 采用模块化建造系统, 以测试、验证新技术与工艺, 重点研究混凝土组件和钢材的结构优化与可扩展性
意大利	Hyperloop Italia	2019		永磁电动	①由 HTT 的联合创始人之一 Bibop Gresta 创立, 获得了在意大利独家实施 Hyperloop 项目的许可; ②与 HTT 合作主导意大利 Hyper Transfer 项目, 已完成可行性研究, 计划连接“威尼斯—梅斯特雷—帕多瓦”, 有可能成为世界首个商业化超级高铁项目
土耳其	轨道交通技术 研究所 (RUTE)	2020	暂无	电磁	修建钢制管道长度 210 m, 直径 70~80 cm
德国	慕尼黑工业大学 TUM Hyperloop	2020	800	电磁	①建设的环线管道半径 5 m、管道内径 30 cm、真空度 10 kPa, 模型车 17 kg; ②建设长度 24 m 的全尺寸管道, 管道采用混凝土结构, 直径 3 m, 配置了乘客舱
欧洲	欧洲超级高铁中心 (European Hyperloop Center)	2024			位于荷兰北部格罗宁根省, 是一个专门用于测试和展示低真空管道高速运输技术的开放平台; 建造了钢制低真空管道, 长度 420 m, 直径 2.5 m, 设置有道岔, 呈“Y”形

Hardt Hyperloop 公司成立于 2016 年, 在 2019 年开发了全球首个全尺寸的 Hyperloop 测试系统, 该系统包括悬挂装置、推进系统、圆形轨道、真空环境, 如图 3 所示。Hardt Hyperloop 使用顶部安装的 EMS 系统和直线电机进行推进, 制动系统可以回收电能。该公司在

其总部建造了一个全尺寸的密封测试管, 并与相关国家签署了一项协议, 计划从荷兰阿姆斯特丹到德国法兰克福建设一条 Hyperloop 线路^[14]。

欧洲超级高铁中心 (European Hyperloop Center) 位于荷兰北部格罗宁根省, 是一个专门用于测试和展



图3 Hardt Hyperloop运输系统中的30 m测试管道和试验车^[14]

Fig. 3 Thirty-meter test tube and prototype vehicle in Hardt Hyperloop's transportation system^[14]

示低真空管道高速运输技术的开放平台，其超级高铁测试基础设施建设已经完成，并对外开放进行测试^[15]，如图4所示。该设施拥有一个长度420 m的超级高铁测试管道，能够展示所有关键的超级高铁技术，包括完整的道岔设施。2024年，Hardt Hyperloop公司的试验车即在该管道完成了试验。



图4 欧洲超级高铁中心的超级高铁测试管道^[15]

Fig. 4 Hyperloop test tube at the European Hyperloop center^[15]

Hyperloop的提出对欧洲的影响尤为显著，参与研究的团队也最多，表1中所列的“欧洲管道基金会(EuroTube)”和“欧洲超级高铁中心(European Hyperloop Center)”都是非营利性机构，为欧洲的研究团队提供支持服务。另外，欧盟通过其研究与创新资助计划“地平线欧洲(Horizon Europe)”，资助了多个关于Hyperloop技术的研究项目，包括Hyper4Rail和

MaDe4Rail。这些项目由超过10个国家的20余家机构共同参与，涵盖大学、研究机构、工程公司、技术供应商等上下游组织或企业，旨在推动下一代超高速地面交通系统的发展。其中，Hyper4Rail项目旨在推动Hyperloop技术的规范化发展，通过团结多个国家的研究机构、大学和企业，形成跨领域、跨国界的合作机制，促进Hyperloop技术的协同创新，第一期资助金额约为(150~200)万欧元；MaDe4Rail项目聚焦于探索非传统和新兴的磁悬浮衍生系统，评估其在欧洲的技术可行性和有效性，该项目有8个国家16个合作伙伴参与，总预算为256万欧元，其中欧盟资助150万欧元。这些项目不仅推动了Hyperloop技术的发展，而且为低碳化、智能化和可持续发展交通系统的建设提供了新思路，强化了欧洲在未来交通技术领域的全球竞争力。

2 国内低真空管道轨道交通的提出与研究进展

自从低真空管道交通概念提出以来，中国学者也对此展示了极大的兴趣。1985年，中国铁道科学研究院的钱立新教授就在《铁道运输与经济》杂志上发表了关于低真空管道交通的文章^[16]。在1988年出版的《中国铁路建设》一书中，西南交通大学的郝瀛教授详细介绍了低真空管道磁悬浮铁路^[17]。2002年，西南交通大学的张耀平教授牵头，在校内成立了“真空管道运输研究所”，并完成了一系列研究^[18]，并于2006年获得了国家自然科学基金的资助(真空管道高速磁浮交通基础研究)，这是中国第一个在此领域得到政府资助的科研项目。

在中国低真空管道轨道交通研究发展的关键时刻，2004年沈志云院士在成都主办“真空管道高速交通”院士学术报告会，会议对这一未来技术给予了充分肯定。受此启发，西南交通大学的“牵引动力国家重点实验室”(现更名为“轨道交通运载系统全国重点实验室”)于2014年建成了低真空管道环形试验线^[19-20]。该试验线全长45 m，由2个半径为6 m的半圆和2段直线组成，采用“透明的有机玻璃+钢结构”材料，设计真空度为10.132 5 kPa。在试验线中运行的车辆是由直线感应电机驱动的高温超导磁浮车，该车在常压下可载人运行，如图5所示。受限于曲线半径，测试速度最高为50 km/h左右，但该试验线的建成在全球引起了广泛关注，*IEEE Spectrum*^[21]和BBC电视台等媒体组织对此进行了报道。2016年1月，西南交通大学赵勇教授团队开发了一套侧挂悬浮型高温超导磁浮环线轨道系统，克服了离心力的限制，提高了系统速度，如图6所示^[22]。西南交通大学在低真空管道轨道交通所取得的成就足以表明西南交通大学是低真空管道轨道交通研究的开拓者之一。



图5 西南交通大学低真空管道磁浮环形试验线^[21]

Fig. 5 Low-vacuum tube maglev ring test line at southwest jiaotong university^[21]



图6 侧挂悬浮型高温超导磁浮环线轨道系统^[22]

Fig. 6 Side-mounted levitation high-temperature superconducting (HTS) maglev circular track system^[22]

为了推动低真空管道磁浮交通的研究,西南交通大学利用高速列车运行多功能试验平台,通过改造建成了基于高温超导钉扎磁浮的时速400公里级高速动模试验台,如图7所示。该平台管道长145 m,直径4.2 m,真空度可达5 066.25 Pa,磁浮车为1:10的模型车,试验线长140 m,其中试验段60 m、加速段50 m。加速段采用刀片式电励磁同步直线电机驱动,最高试验速度达到400 km/h^[23]。这一试验平台已于2019年建成。



图7 时速400公里级高速动模试验台^[23]

Fig. 7 High-speed dynamic model test rig for 400 km/h level^[23]

为了实现更高速度的试验能力,在四川省支持下,西南交通大学主持了四川省的重大科技基础设施“多态耦合轨道交通动模试验平台”项目^[24],如图8所示。该项目是一个高架钢制低真空管道系统,管道长1 600 m,直径3 m,最低气压506.625 Pa,最高试验速度1 500 km/h;试验对象可以是各种制式的模型车(包括磁浮制式和轮轨模式);试验用磁浮车缩比为1:8到1:3,并且可以完成悬浮架1:1试验;模型车驱动采

用刀片式永磁同步直线电机,该电机将成为速度最高的同步直线电机。该项目目前还在建设之中,预计在2025年建成。



图8 正在建设的多态耦合轨道交通动模试验平台

Fig. 8 Multi-state coupled rail transit dynamic model test platform under construction

在低真空管道磁浮交通工程化研究方面,中国航天科工集团有限公司(以下简称“航天科工”)走在前列,在2018年的珠海航展上提出“高速飞车”的概念,并进一步给出了1 000 km/h及以上的速度目标值。2022年4月,航天科工和山西省合作,在大同市到阳高县之间启动了超高速低真空管道磁浮交通系统全尺寸试验线的建设,如图9所示,项目一期建设线路长2 km,管道直径约6.0 m,管道最大真空度为1 013.25 Pa,采用超导电动悬浮模式,车辆断面约3 m×3 m,符合工程化载人运行要求。2024年8月,完成了低真空环境下系统集成演示验证试验,并通过了山西省科技厅组织的现场测试检查。这标志着我国拥有了世界上线路最长、管径最大的低真空管道磁浮交通工程化试验线^[25]。



图9 低真空管道磁浮交通系统全尺寸试验线^[25]

Fig. 9 Full-scale test line for low-vacuum tube maglev transportation system^[25]

3 低真空管道轨道交通发展路径与可行性分析

3.1 发展低真空管道磁浮交通的必然性

尽管低真空管(隧)道轨道交通已经写进国家《交通强国建设纲要》之中,但关于发展低真空管道磁浮交通目前还存在很多争议。支持者认为,基于工业进步与速度提升的历史趋势,发展地面超高速轨道交通是未来的必然方向,而采用低真空管道技术可以有效降低空气阻力,提升列车速度,这是探索高速轨道

交通技术的重要一环。反对者认为，飞机可以在自然形成的低气压环境中飞行，不必在地面上营造这样一个低气压环境，而且技术过于复杂，安全性也难以保证。但根据文献[4]的分析，地面交通速度随着每一次工业革命翻倍的规律，其技术进步是由当时的工业化程度所决定的。在实际生活中，旅客通常期望更高的轨道交通速度，在选择高速列车出行时，在保证经济性情况下倾向于选择用时较短的车次。因此，轨道交通的更高运营速度，既是广大乘客所期望的，也是轨道交通发展的历史趋势。

地面轨道交通列车运行速度越高，受到气流的作用越大。空气阻力与列车运行速度的平方呈正相关^[26-29]，而气动噪声是列车运行速度的6~8次方关系。空气阻力的计算公式如下所示^[30]：

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 A$$

式中： F 为空气阻力，N； C_d 为空气阻力系数，量纲为1； ρ 为空气密度， kg/m^3 ； v 为物体在空气中的运动速度， m/s ； A 为物体的迎风面积， m^2 。

从上式可知，空气阻力与空气阻力系数、空气密度、物体运动速度的平方、物体的迎风面积成正比。高速列车外形设计的主要作用是减小阻力系数，同时尽可能减小列车的截面积。但这样努力的效果有限，我国高

速列车外形从早期的CRH2等动车组到最新的复兴号CR400 AF，经过不断优化迭代，空气阻力系数仅仅减小24%（3车编组风洞试验结果^[31]）。但减少空气阻力最有效的方法就是减小空气密度，空气密度不仅与气压相关，而且与温度相关^[32]，在同一气温下，当气压从1个标准大气压降低到0.01个标准大气压时，空气阻力便可减少99%。因此，对未来超高速轨道交通而言，采用低真空管道来营造一个低气压环境十分必要。

表2是轮轨列车（350 km/h）、磁浮列车（600 km/h）和低真空管道列车的空气阻力计算值比较。运行条件为：①列车编组形式均为8车编组；②轮轨列车横截面积为 12.0 m^2 ，磁浮列车横截面积为 9.15 m^2 ；③低真空管道列车阻塞比取0.34（管道直径6.0 m）；④列车分别以800、900、1 000 km/h的不同速度运行。由表2可知，600 km/h磁浮列车通过减小列车横截面来实现空气阻力的减小，但其空气阻力仍稍高于350 km/h轮轨列车；低真空超高速运行磁浮列车的空气阻力随着列车运行速度增加而增大，但随着气压的减少而减小；由于管道内列车运行的活塞效应，当真空度为0.05个标准大气压时，其空气阻力仍大于明线高速磁浮列车，降低到0.01个标准大气压，方可真正实现低空气阻力运行。

表2 不同工况的空气阻力比较
Table 2 Air resistance comparison across various conditions kN

运行速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	轮轨列车（350 km/h）	磁浮列车（600 km/h）	低真空管道磁浮列车				
	明线	明线	0.500 atm	0.100 atm	0.050 atm	0.010 atm	0.005 atm
800	52.7	62.0	750.0	149.6	75.0	15.0	7.5
900			840.0	168.3	84.0	16.8	8.4
1 000			94.0	188.3	94.0	18.8	9.4

3.2 日趋成熟的建设运营技术

对于创建人工低气压环境以推进低真空管道磁浮交通，有人持怀疑态度：一方面，飞机已在自然低气压环境中运行，怀疑推进低真空管道磁浮交通建设的必要性；另一方面，人造低气压环境的技术能否实现，维护成本能否承担，包括低气压的生成和维持，以及在此环境中的紧急逃生和救援操作。

对于前者，可以从能耗、碳排放和从市中心到郊外机场的额外时间损耗来考虑。与飞机相比，超高速低真空管道轨道交通因其低能耗和短旅行时间的优势而具有潜力，并且轨道交通系统可以通过能量制动回收技术补偿加速阶段的能耗，而这一技术在飞机上尚未实现。此外，飞机爬升阶段需消耗大量能量用于增加势能，而在降落阶段释放的势能目前无法得到有效利用。

对于后者，创建低气压环境首先需要建造密封的管道。目前，低真空系统主要采用2种材料制成的管

道：一种是Hyperloop One公司和HTT公司采用的高架钢管道，另一种是TUM Hyperloop公司采用的博格公司的混凝土管道。航天科工在大同到高阳的试验线采用的是创新的马鞍形钢混结构，其下部是混凝土结构，而上部是钢制管道，这样的设计兼顾了结构的稳定性和维护低气压的需求。从目前的技术实现来看，无论采用哪种材料或结构，构建密闭管道在技术层面已相对成熟；然而，现有管道最长的长度为2 km，针对长距离的工程应用，仍需考虑多个问题，如热胀冷缩、不均匀日照导致的管道变形、低泄漏性、分段、隔离、不均匀沉降等。为了规避地面高架管道可能遇到的问题，有人提议采用地下管道方式，使用深埋隧道以利用地下相对稳定的地质结构和温度，最早瑞典地铁的Swissmetro方案就是利用地铁隧道。比较遗憾的是，这样的地下管（隧）道至今还没有开展工程化实践，主要原因是在管道成形方面存在其他困难，但随着技术的进步和新材料的出现，工程化解决方案应该可以很快实现。何祚庥院士在2004年的“真空管道高速交通”院士学术报告会发言时也表

示, 抽真空技术十分成熟, 特别是这样的低真空。

3.3 移动装备走行模式的选择

沈志云院士曾提出在现有高速铁路的基础上, 通过加盖和密封技术来创建一个低真空环境, 以形成一

个低真空高速铁路系统, 这一设想的概念图如图 10 所示。该图展示了可能的低真空铁路结构, 然而, 该系统具体实施的可行性仍需深入研究, 包括评估现有高速铁路是否能够形成有效的低真空环境, 以及传统轮轨高速列车的轮轨关系是否适合超高速运行条件。

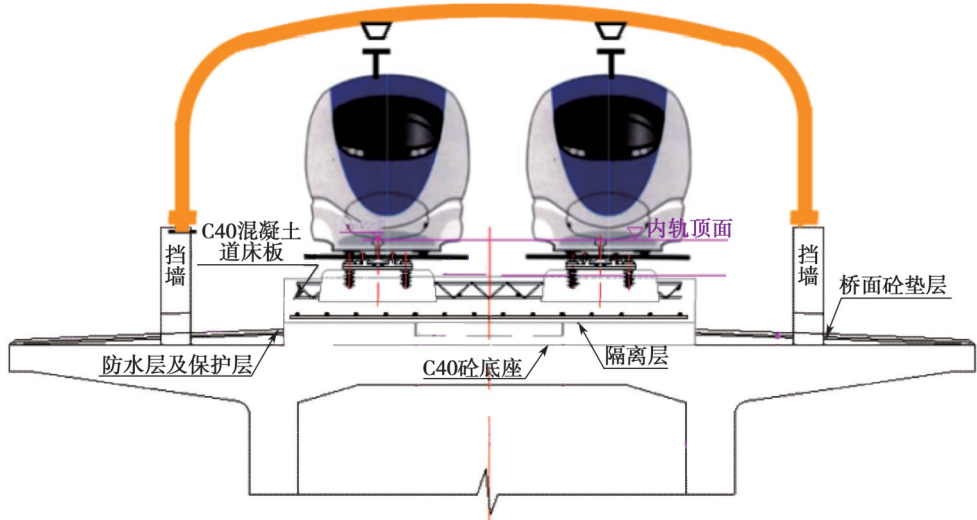


图 10 低真空高速铁路概念图

Fig. 10 Schematic illustration of a low-vacuum high-speed rail system

低真空管道轨道交通移动装备走行模式的选择需要考虑的主要因素是高速适应性。对传统的铁路而言, 轮轨关系是基础, 是影响列车高速运行的关键因素。车轮的低等效锥度设计, 有助于车辆实现高速运动的稳定性, 满足高速运行的需求。较小的等效锥度, 虽然可以有效提高临界速度, 但等效锥度容易因为车轮踏面磨损而增大, 并迅速超出等效锥度的合理范围。如果等效锥度不合适, 车辆就可能产生蛇行失稳。因此, 轮轨模式的高速列车的最高运营速度一般控制在 400~450 km/h。对于轮轨模式的高速列车而言, 并不适合 600 km/h 及以上的超高速运行。对此, 学术界、经济界和产业界普遍认为时速 600 公里级的轨道交通应该放弃轮轨模式, 而考虑采用磁浮模式。

近年, 磁浮交通在我国得到了高度重视, 中低速磁浮已经在长沙机场线、北京地铁 S1 号线、湖南凤凰旅游线、广东清远旅游线等线路实现了应用^[33-34], 而且利用德国技术在上海浦东建成了世界上第一条高速磁浮示范线^[35], 最高运营时速 430 公里。同时, 我国高速电磁悬浮、高/低温超导电动悬浮和高温超导钉扎磁浮的研究也相当活跃, 已经实现了模型车或样车“浮起来”“动起来”, 一旦有了合适的试验线, 这些技术就可能支撑模型车或样车“跑起来”。未来低真空超高速轨道交通采用何种磁浮模式, 研究团队应该从最基本的悬浮能力和导向能力进行分析。

未来超高速磁浮列车的列车质量不可能过大, 当前磁浮技术的悬浮能力都能够满足需求。具体而言, 电磁悬浮模式通过精确控制磁场实现悬浮, 但随着速

度的提升, 控制难度也随之增加。在超高速条件下, 这种模式的控制精度能否满足要求, 还需通过实践进一步验证。

超导电动悬浮是一种被动悬浮模式, 高速时能够提供稳定的悬浮性能, 并且通过巧妙的结构设计解决了导向问题, 具有较强的悬浮能力和较高的悬浮高度, 是一种较为理想的悬浮模式^[36-37]。超导电动悬浮技术已在日本实现了时速 603 公里的载人试验运行^[38], 但它的系统较为复杂, 并存在失超等风险。同时, 超导电动悬浮阻尼相对较小, 给其运行稳定性和可靠性带来挑战。

高温超导钉扎磁浮技术利用非理想第二类超导体的物理特性实现了一体化的悬浮与导向, 是另一种理想的悬浮模式。但其研究历史较短, 悬浮能力、悬浮刚度和阻尼还有提升空间^[37, 39]。因此, 从工程化高速应用的角度来看, 这一技术仍需进行大量的研究和优化。

总的来说, 要实现超高速运行, 无论选择何种磁浮模式, 都仍需进一步开展工程化研究, 确保技术在实际应用中的可行性, 以实现长期稳定、高速和可靠悬浮。

4 低真空管道磁浮交通面临的挑战

低真空管道磁浮交通不仅需要实现 600 km/h 及以上的超高速运行, 而且更关键的是需要应对低真空环境带来的挑战, 这与常压敞开式轨道交通面临的情况大不相同。

4.1 轨道不平顺对运行舒适性的影响

轨道不平顺是轨道交通列车运行过程中面临的主要激励源之一,也是轨道交通系统中一个不可避免的问题,其对列车的运行稳定性、安全性和舒适性均产生显著影响。尽管如此,目前关于磁悬浮轨道不平顺的测量和相关数据相对匮乏,难以形成统一的不平顺标准。

常导电磁悬浮轨道不平顺^[40-41]的主要原因包括轨道基础沉降、施工误差、温度变化、材料老化等。基础沉降和施工误差导致轨道表面不平,温度变化引起轨道膨胀或收缩,材料老化使轨道逐渐失去平整性。超导电动悬浮轨道线路由桥墩、桩基、悬浮导向、推进功能部件等组成,因此轨道方面的激励因素较为复杂。轨道几何不平顺主要由地面线圈制造安装误差和地面轨道侧梁安装误差等造成。用于悬浮导向的“8”字形线圈离散铺设也会导致不平顺。此外,地面轨道支撑梁、桥墩、地基的沉降和弹性变形等因素也会影响轨道的平顺性,尤其是影响车辆乘坐舒适性的长波不平顺,主要来自轨道侧梁和地面基础的变形。目前,关于超导电动磁浮的轨道不平顺的文献均是基于日本山梨试验线的测试^[42-43]。超导钉扎磁浮所用的永磁轨道具有较大结构差异,其不平顺度也更加复杂。永磁轨道的不平顺主要分为几何不平顺和磁场不平顺两方面^[44]。其中,几何不平顺主要源于磁体和土木工程施工中的机械误差,而磁场不平顺则由多种复杂因素引起。高温超导钉扎磁浮的永磁轨道由多个永磁体拼接而成,在当前的装配技术下,不可避免地出现表面剥离、接缝间隙和错位等缺陷,这些缺陷会影响轨道上方磁场的均匀性^[45]。此外,永磁体的充磁和退磁差异,也会导致轨道上方磁场的均匀性。

上述3种磁浮技术在不平顺激励下都会影响列车的运行舒适性,尤其在超高速运行工况下,不平顺激励可能引发安全性问题。对于常导电磁悬浮系统,其控制系统需要能够快速响应,以应对轨道不平顺带来的影响,及时调节悬浮和导向力,从而避免对列车运行的影响。相比之下,作为被动悬浮系统的超导电动磁浮和超导钉扎磁浮,由于其悬浮原理的特殊性,更适合采用被动减振方式。因此,在设计和运行这些磁浮系统时,需要根据不同的悬浮方式和激励环境,选择适合的减振方法,以提高整体系统的性能和可靠性。

4.2 超导磁浮弱/负阻尼以及改善措施

超导磁浮由于其车载磁体的低电阻性,其运行过程中的能耗较低,同时悬浮系统也难以提供足够的阻尼应对上述不平顺的激励。

超导电动悬浮列车悬浮、导向线圈与永磁轨道之间的耦合效应阻尼系数是负的^[46-49],如图11所示。这

使得振动能量耗散变得困难。为此,相关研究者通过改变超导电动磁浮轨道线圈激励方式^[50]、引入一系电磁阻尼^[51-52]、优化二系悬挂参数及其控制方法^[53-54]来提升电动磁浮车辆的动力学性能。

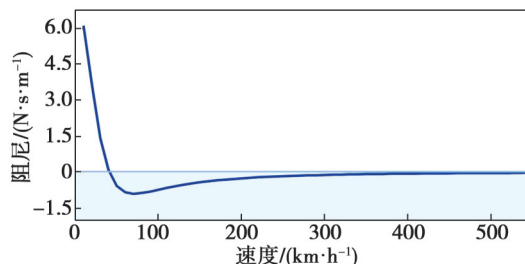


图11 电动悬浮系统不同速度下的阻尼系数

Fig. 11 Damping coefficients of electrodynamic suspension system at varying speeds

超导钉扎悬浮系统具有较低的阻尼特性^[55],其悬浮导向力呈现出明显的非线性特征,这使得系统在运行过程中,尤其是在激烈的动态工况下,可能会出现非线性振动^[56]。如果不采取适当的减振设计,这种非线性振动不仅会增加系统的能量损耗,还可能导致运动稳定性区间的收窄^[57-58],影响列车的舒适性和安全性。为了解决这一问题,可以利用永磁轨道提供的稳定磁场构造电磁分流阻尼器^[59-60]。电磁分流阻尼器利用电磁分流效应,通过调整电流和电阻来改变磁流变液的阻尼力,实现对系统振动的动态调节。经过适当的电路设计,振动能量还有可能被回收利用^[61]。

针对上述2种磁浮的减振技术仍面临一些挑战,如为应对不同频率的激励,如何提高阻尼系统的响应速度、有效地调节阻尼力,以及如何优化阻尼器的设计以减少能量消耗等问题。

4.3 低真空管道磁浮交通技术经济性问题

低真空管道磁浮交通系统的构建需要花费高额的费用,建设要求严苛,需要使用能够承受巨大压力差的材料,以保证管道在真空环境下的稳定性和密封性,同时磁浮系统所需的轨道铺设和电磁设备安装同样复杂、昂贵。磁浮轨道需要精确的施工工艺,以确保轨道的平整度和电磁性能的一致性。同时,为了实现列车的悬浮与驱动,需要大量高性能的电磁元件和控制系統,这进一步增加了建设成本。在城市间建设一条长距离低真空管道磁浮线路,不仅要考虑穿越不同地形、不同地貌带来的施工难度,还需应对沿线城市规划和土地征收等问题,这些都会使建设成本增加。然而,从工程经验角度看,一项技术的经济性是决定能否大规模推广应用等关键因素,随着技术的日趋成熟和建设规模的扩大,建设成本会显著降低。

至于真空的生成与维持,现有的抽真空技术已相当成熟,能够满足低真空状态的需求。如四川省在建的“多态耦合轨道交通动模试验平台”项目中,其管

道长 1.6 km、直径 3 m、总管道容积约为 11 000 m³, 经详细计算, 平台的真空产生与维持系统是由一级变频螺杆泵加两级变频罗茨泵并联组成的三级系统, 系统总装机容量为 128 kW, 从常压抽至 0.005 个标准大气压需要的时间为 19 h, 总能耗不超过 2 432 kW·h; 在管道总泄漏率不超过 100 SLM (Standard Liter per Minute, 中文意为“每分钟标准升”) 的设计条件下, 每小时管道压力上升 40 Pa 左右, 仅需 1 路泵组即可维持管道压力, 消耗不超过 32 kW 的功率即可有效地维持所需的低压状态, 这验证了维护低气压环境的可行性和经济性。

4.4 低气压导致的散热和绝缘问题

在低气压下, 空气密度大幅降低, 空气密度与气压几乎成正比关系。轨道交通的走行部件主要依靠流动气流进行散热, 但空气密度越低, 气流的散热能力就越差。因此, 低气压下设备的散热效率也大幅下降。更为严重的是, 设备的发热系数与气压几乎成反比关系。例如, 在气压 0.01 atm 下, 设备的发热系数是常压下的 100 倍, 这对低真空管道磁浮交通来说是一个不容忽视的问题。

研究表明, 如果采用电磁悬浮模式, 当气压降低至 0.3 atm 时, 悬浮与导向系统的温度, 特别是悬浮线圈的温度, 会接近其允许的温度上限。然而, 考虑到列车在管道中的活塞效应, 0.3 atm 的气压显然过高, 因为此时的空气阻力仍然较大。一般认为, 列车在 0.01~0.05 atm 的低气压下运行是比较合理的。若采用电磁悬浮模式, 需要在列车上配备冷却系统, 对磁悬浮系统进行降温处理, 这无疑增加了车载设备的复杂度, 并带来了热量的消耗或储存问题。相比之下, 超导电动悬浮与钉扎磁浮在低气压条件下的散热问题上具有优势, 基本没有散热问题。

低真空管道磁浮交通的最大发热源并不是悬浮导向系统, 而是直线电机牵引系统 (包括电制动系统)。然而, 无论采用哪种悬浮模式, 电机定子都安装在管道基础上, 能够利用管道结构进行热传导和散热。因此, 尽管低气压环境会影响直线电机的散热效率, 但这一问题并非不能解决, 在技术层面上, 解决方案相对容易找到。例如, 可以通过强制冷却等方法确保直线电机的散热不受影响。总的来说, 低气压环境下的散热问题是制约低真空管道磁浮交通的一个挑战, 但其技术解决途径较为清晰, 特别是在对直线电机和磁悬浮系统的散热设计上, 依然可以通过合理的工程方法来克服。

在低真空环境中, 气压的减少会导致一系列绝缘问题。气体是一种重要的绝缘材料, 其绝缘性能依赖气体的介电常数。随着气压的降低, 介电常数减少, 从而导致绝缘材料的绝缘性能降低。此外, 由于空气

密度的减小, 电场中的离子数量减少, 离子撞击的概率变小, 这容易导致电极间电荷积累, 电场强度增大, 进一步降低了绝缘材料的绝缘性能。

巴申曲线^[62] (Paschen's Curve) 揭示了不同气体的击穿电压 V_{br} 与气压、绝缘距离乘积 $p \cdot d$ 的关系, 如图 12 所示。对空气而言, 在绝缘距离一定的情况下, 气压越低, 击穿电压越小, 击穿电压与气压呈近似线性关系。但当气压降到一定值后, 空气的绝缘性能达到最低点, 随着气压的进一步降低, 击穿电压会迅速提升, 形成“U”形巴申曲线。由于空气绝缘性能的降低, 需要通过加强设备自身的绝缘措施来弥补, 例如加强悬浮或牵引线圈的绝缘设计, 这使得设备的绝缘性能比在常压环境下要求更加严苛。从磁悬浮系统的角度来看, 高温超导钉扎磁浮作为一种无源系统, 由于其不需要额外通电, 可以一定程度上避免由于低气压引起的空气绝缘性能下降的问题。

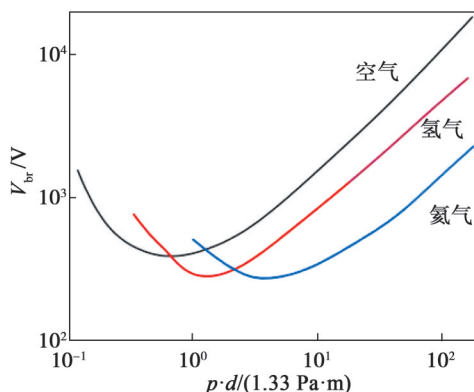


图 12 巴申曲线^[62]

Fig. 12 Paschen's curve^[62]

4.5 低气压带来旅客乘降与救援疏散问题

在低真空管道磁浮交通系统中, 由于运行环境的低气压特性, 乘客的上下车环节与紧急疏散过程面临特殊挑战。关于乘降问题, 借鉴船闸的操作原理, 目前的解决思路主要有 2 种: 一是整体列车气压调整。这种方案通过调整整个列车内的气压来适应外部低气压环境, 使得乘客能够在接近正常气压的环境中进出列车, 这需要列车具备完全密封的结构和气压调节系统。二是局部气压调整的廊桥方案^[63]。此方案较为经济实用, 不需要对整个列车进行气压调整, 而是在列车与站台之间的廊桥接驳口局部进行气压调整。廊桥的设计使得仅在接驳口处形成气压缓冲区, 通过简单的高低压阀门操作实现气压的快速调整。由于这部分的空间较小, 气压的调整不会对整个管道系统造成影响, 也不需要大量的能耗来抽放气体。

在低真空管道内进行救援与人员疏散, 是低真空管道磁浮交通的特有问题。故障与救援情况极其复杂, 涉及众多制约因素, 常见的情形包括:

①在管道低气压条件不变时, 列车发生异常, 无

法正常运行,但车内旅客的生存环境可维持较长时间。这种情况只需等待救援,并将列车拖拽至专门设置的救援位置,旅客可自行离开列车。

②在管道低气压条件不变时,车辆正常运行,但因突发事故(如车厢失压或火灾)导致司乘人员必须离开列车进行逃生。如果列车能够快速行驶到管道系统设置的逃生区,则只需将列车驶入救援位置即可;若列车无法移动或没有足够时间移动至逃生区,情况将变得更为紧急,此时需要迅速停车,并使管道内气压提升至能供人呼吸的生存条件,即达到 0.3 atm 以上^[64],确保司乘人员能够顺利逃离。为了迅速提升管道内气压,管道必须具备强大的“破空”能力,同时具备分段隔断结构,以便管道快速升压,每个隔离段内应有通向常压空间的逃生通道。

③若管道因异常泄漏导致压力骤升,并且列车仍处于可运行状态,则对乘客的影响相对较小。首先需解决泄漏导致的高速气流对列车运行的影响,尤其是当气流作用大于列车的牵引或制动力时,此时需确保列车能自控,尽量先紧急停车(最好能停放到救援区)。待气压升高、气流平稳后,再进行人员疏导,先将旅客撤离至管道内,并通过逃生通道撤离。另外,异常泄漏可能会产生巨大的气流啸叫声,因此应特别注意耳部防护。

考虑到低真空管道磁浮交通的救援与逃生特殊性,管道系统设计必须充分考虑管道分段、隔离、破空、逃生通道、救援区等功能需求。如果是位于地下的隧道系统,还需特别设计常压空间或逃生管道以供应急使用。

总之,低真空管道磁浮交通的工程化面临许多前所未有的问题,因此相关的系统设计、结构布局和关键技术的研究应尽早启动,以便提前解决可能遇到的挑战。

5 结束语

对于超高速轨道交通,基本的发展方向是低真空管道磁浮交通。2013 年,中国与美国率先开展了实质性研究,随后欧洲进入了研究高峰期,多国研究机构同步推进,并启动了欧洲的 Hyper4Rail 和 MaDe4Rail 研究计划,集中力量开展研究。目前,美国的相关研究放缓,甚至暂停。中国在地方政府的支持下加快了研究进程,其中包括大同修建的 2 km 工程化试验线和成都在建的 1.6 km 动模试验线,试验速度有望达到 1 500 km/h,将为低真空超高速轨道交通提供不可或缺的试验装备、直接的研究数据和技术支持。同时,这一技术的落地实现还有运行舒适性和经济性等诸多科学技术问题亟待研究解决,尤其是故障状态下的安全性等问题需要特别关注。相信在中共中央、国务院《交通

强国建设纲要》中提出的“合理统筹安排低真空管(隧)道高速列车技术储备研发”的指导下,我国在低真空超高速轨道交通的研究将取得更大的成果,支撑未来颠覆性轨道交通技术的研究,引领全球轨道交通的发展。

参考文献:

- [1] 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 Zhiyun. On developing high-speed evacuated tube transportation in China[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2005, 40(2): 133-137.
- [2] 熊嘉阳, 沈志云. 中国高速铁路的崛起和今后的发展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 6-29.
XIONG Jiayang, SHEN Zhiyun. Rise and future development of Chinese high-speed railway[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(5): 6-29.
- [3] 陈南翼, 张健. 高速列车空气阻力的研究[J]. 中国铁路, 1998(2): 43-47.
CHEN Nanyi, ZHANG Jian. Research on air resistance of high-speed trains[J]. China railway, 1998(2): 43-47.
- [4] 徐飞, 邓自刚, 罗世辉. 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, DENG Zigang, LUO Shihui. 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.
- [5] 彭丽. 沈志云院士:真空管道高速交通必须“三步走”[EB/OL]. (2010-08-12)[2024-12-28]. https://www.cas.cn/ys/ysjy/201008/t20100812_2923271.shtml.
PENG Li. Academician SHEN Zhiyun: The 'three-step' approach for vacuum tube high-speed transportation [EB/OL]. (2010-08-12) [2024-12-28]. https://www.cas.cn/ys/ysjy/201008/t20100812_2923271.shtml.
- [6] ROBERT BAILLARD DAVY. Vacuum railway: US1336732 [P]. 1919-05-13[1920-04-13].
- [7] FORGACS R L. Evacuated tube transportation, energy and the environment[J]. High speed ground transportation journal, 1975, 9(1): 331-344.
- [8] OSTER Daryl. Evacuated tube transport: US5950543A[P]. 1999-09-14.
- [9] 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 Ruihua, YAN Luguang, XU Shangang, et al. A new high-speed maglev train: scheme of high-speed maglev train for vacuum tunnel in Switzerland [J]. Converter technology & electric traction, 2004(1): 44-46.
- [10] MACK E. Space X to build Hyperloop test track, host pod-building competition[EB/OL]. (2015-06-15) [2024-12-28]. https://newatlas.com/spacex-announces-hyperloop-pod-competition/38026/?itm_source=newatlas&itm_medium=article-

- body.
- [11] SEO Y, CHO M, KIM D H, et al. Experimental analysis of aerodynamic characteristics in the Hyperloop system[J]. Aerospace science and technology, 2023, 137: 108265.
 - [12] SCHULZE E. Hyperloop firm unveils first images of its new test track in Toulouse[EB/OL]. (2019-02-16)[2024-12-28]. <https://www.cnbc.com/2019/02/26/hyperloop-firm-unveils-first-images-of-its-new-test-track-in-toulouse.html>.
 - [13] CARSCOOPS. First passengers travel through Virgin's Hyperloop vacuum tube[EB/OL]. [2024-12-28]. https://www.youtube.com/watch?v=I_gHHQYbL3Q.
 - [14] Hardt Hyperloop. A route concept study on the Amsterdam - Frankfurt connection[EB/OL]. [2024-12-28]. <https://docs.hardt.global/studies/amsterdam-frankfurt>.
 - [15] European Hyperloop Center. Accelerating hyperloop innovation[EB/OL]. [2024-12-28]. <https://www.hyperloopcenter.eu>.
 - [16] 钱立新. 超高速管道列车[J]. 铁道运输与经济, 1985(7): 67.
QIAN Lixin. Ultra-high speed hyperloop train[J]. Railway transport and economy, 1985(7): 67.
 - [17] 郝瀛. 中国铁路建设[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1988.
HAO Ying. Chinese railway construction[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1988.
 - [18] 张耀平, 梅绍祖, 曾学贵. ETT: 引领 21 世纪的高速运输[J]. 世界科技研究与发展, 2002, 24(4): 60-64.
ZHANG Yaopin, MEI Shaozu, Zengxuegui. ETT: lead the high-speed transportation of the 21st century[J]. World science R & D, 2002, 24(4): 60-64.
 - [19] DENG Zigang, ZHANG Weihua, 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. DOI: 10.1109/TASC.2016.2555921.
 - [20] DENG Zigang, ZHANG Weihua, ZHENG Jun, et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS maglev-ETT) test system[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2017, 27(6): 3602008. DOI: 10.1109/TASC.2017.2716842.
 - [21] Anon. A super chute [The Big Picture][J]. IEEE spectrum, 2014, 51(7): 20-21.
 - [22] ZHOU Dajin, CUI Chenyu, ZHAO Lifeng, et al. Running stability of a prototype vehicle in a side-suspended HTS maglev circular test track system[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2017, 27(1): 3600107. DOI: 10.1109/TASC.2016.2635801.
 - [23] DENG Zigang, ZHANG Weihua, WANG Li, et al. A high-speed running test platform for high-temperature superconducting maglev[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2022, 32(4): 3600905. DOI: 10.1109/TASC.2022.3143474.
 - [24] 中铁二十三局. 多态耦合轨道交通动模试验平台项目封顶 [EB/OL]. (2024-02-02) [2024-12-28]. <http://Maglev-pt.org.cn/index.php?m=home&c=View&a=index&aid=378>.
 - China railway 23rd bureau group corporation limited. The polymorphic coupling rail transit dynamic model test platform project has been capped[EB/OL]. (2024-02-02)[2024-12-28]. <http://Maglev-pt.org.cn/index.php?m=home&c=View&a=index&aid=378>.
 - [25] 贾晓龙. 全尺寸超导电动悬浮试验成功[EB/OL]. (2024-02-02)[2024-12-28]. <http://www.dtnews.cn/dushi/20240202/47306.html>.
 - JIA Xiaolong. Full-scale superconducting electrodynamic suspension successfully tested[EB/OL]. (2024-02-02)[2024-12-28]. <http://www.dtnews.cn/dushi/20240202/47306.html>.
 - [26] MELLET C, LÉTOUREAUX F, POISON F, et al. High speed train noise emission: latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution[J]. Journal of sound and vibration, 2006, 293(3/4/5): 535-546.
 - [27] 孙振旭, 姚永芳, 杨焱, 等. 国内高速列车气动噪声研究进展概述[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(3): 385-397.
SUN Zhenxu, YAO Yongfang, YANG Yan, et al. Overview of the research progress on aerodynamic noise of high speed trains in China[J]. Acta aerodynamica sinica, 2018, 36(3): 385-397.
 - [28] 朱剑月, 张清, 徐凡斐, 等. 高速列车气动噪声研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 39-56.
ZHU Jianyue, ZHANG Qing, XU Fanfei, et al. Review of aerodynamic noise research of high-speed train[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(3): 39-56.
 - [29] ZHOU Peng, QIN Deng, ZHANG Jiye, et al. Aerodynamic characteristics of the evacuated tube maglev train considering the suspension gap[J]. International journal of rail transportation, 2021, 10(2): 195-215. DOI: 10.1080/23248378.2021.1885514.
 - [30] 杜俊涛, 田爱琴, 聂双双, 等. 高速列车阻力、升力与头部外形参数映射关系研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(6): 1017-1024.
DU Juntao, TIAN Aiqin, NIE Shuangshuang, et al. Research on the mapping relations between the drag and lift properties and the shape parameters of a high-speed train[J]. Journal of railway science and engineering, 2016, 13(6): 1017-1024.
 - [31] 丁叁叁. 高速列车车体设计关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
DING Sansan. Study on the key technology of the high-speed train carbody[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
 - [32] MASSEY B. WARD-SMITH J. Mechanics of fluids[M]. 6th ed. London: Routledge, 1989.
 - [33] 马卫华, 罗世辉, 张敏, 等. 中低速磁浮车辆研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 199-216.
MA Weihua, LUO Shihui, ZHANG Min, et al. Research review on medium and low speed maglev vehicle[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1):

- 199-216.
- [34] 牟瀚林. 清远市磁浮旅游专线线路方案研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(6): 10-14.
- MU Hanlin. Research on the route scheme of the Qingyuan maglev tourism railway[J]. Journal of railway engineering society, 2021, 38(6): 10-14.
- [35] 丁叁叁, 付善强, 梁鑫. 中国高速磁浮交通工程实践与展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 40-48.
- DING Sansan, FU Shanqiang, LIANG Xin. Engineering practice and prospects of high-speed maglev transportation in China[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 40-48.
- [36] 于青松, 李凯, 胡浩, 等. 超导电动悬浮应用研究与技术展望[J]. 机车电传动, 2023(4): 1-8.
- YU Qingsong, LI Kai, HU Hao, et al. Research and technological prospects of applications for superconducting electrodynamic suspension[J]. Electric drive for locomotives, 2023(4): 1-8.
- [37] 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 Guangtong, YANG Wenjiao, WANG Zhitao, et al. Research development of superconducting maglev transportation[J]. Journal of South China university of technology (natural science edition), 2019, 47(7): 68-74.
- [38] HUANG Huan, LI Haitao, SUN Yougang. Development and challenges of maglev transportation[M/OL]// MOHEBBI M. Railway transport and engineering: a comprehensive guide, 2025: 33. DOI: 10.5772/intechopen.1007211.
- [39] GAO Lingfeng, DENG Zigang, HU Xianhong, et al. High-temperature superconducting magnetic levitation with the Halbach array and V-shaped combined permanent magnet guideway[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2024, 34(7): 4606208. DOI: 10.1109/TASC.2024.3432110.
- [40] SHI Jin, FANG Wenshan, WANG Yingjie, et al. Measurements and analysis of track irregularities on high speed maglev lines[J]. Journal of Zhejiang university: Science A, 15(6): 385-394. DOI: 10.1631/jzus.A1300163.
- [41] HUANG Jingyu, WU Zhewei, SHI Jin, et al. Influence of track irregularities in high-speed maglev transportation systems[J]. Smart structures and systems, 2018, 21(5): 571-582. DOI: 10.12989/sss.2018.21.5.571.
- [42] ASEKI A, OSADA Y, KITANO J, et al. Dynamics of the bogie of a maglev system with guideway irregularities[J]. IEEE transactions on magnetics, 1996, 32(5): 5043-5045. DOI: 10.1109/20.539484.
- [43] SONG M K, FUJINO Y. Dynamic analysis of guideway structures by considering ultra high-speed maglev train-guideway interaction[J]. Structural engineering and mechanics, 2008, 29(4): 355-380. DOI: 10.12989/sem.2008.29.4.355.
- [44] DENG Zigang, ZHOU Xucheng, HUANG Huan, et al. Measurement and characterization method of permanent magnetic guideway irregularity in HTS maglev system[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2022, 32(2): 3600307. DOI: 10.1109/TASC.2021.3133332.
- [45] SUN Ruixue, ZHENG Jun, ZHENG Botian, et al. Study on the magnetic field inhomogeneity of a Halbach permanent-magnet guideway due to different defects[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2016, 26(1): 3600107. DOI: 10.1109/TASC.2015.2501100.
- [46] ROTE D M, CAI Yigang. Review of dynamic stability of repulsive-force maglev suspension systems[J]. IEEE transactions on magnetics, 2002, 38(2): 1383-1390. DOI: 10.1109/20.996030.
- [47] HIGASHI K, OHASHI S, OHSAKI H, et al. Magnetic damping of the electrodynamic suspension-type superconducting levitation system[J]. IEEE transactions on industry application, 1997, 117(8): 1015-1023. DOI: 10.1541/ieejias.117.1015.
- [48] 胡道宇, 冯馨月, 张志华. 超导电动悬浮系统阻尼特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4679-4687.
- HU Daoyu, FENG Xinyue and ZHANG Zhihua. Study on the damping characteristics of superconducting electrodynamic suspension system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4679-4687.
- [49] YONEZU T, WATANABE K, SUZUKI E, et al. Characteristics of magnetic springs for guidance of superconducting maglev vehicles[J]. Quarterly report of RTRI, 2018, 59(4): 293-298. DOI:10.2219/rtriqr.59.4_293.
- [50] SAKAMOTO T, NAKAYAMA M. Levitation-guidance stabilization of superconducting maglev through LSM currents[J]. Mathematics and computers in simulation, 2006, 71(4/5/6): 404-414.
- [51] 胡道宇, 冯馨月, 马逊, 等. 基于场-路-运动耦合模型的超导电动悬浮系统垂向振动抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3972-3985.
- HU Daoyu, FENG Xinyue, MA Xun, et al. Study on the vertical vibration suppression method of superconducting electrodynamic suspension system based on field-track-motion coupling model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3972-3985.
- [52] HUANG Huan, LI Haitao, COOMBS T A, et al. Advancements in dynamic characteristics analysis of superconducting electrodynamic suspension systems: modeling, experiment, and optimization[J]. Superconductivity, 2024, 11(3): 100114.
- [53] 李刚. 超导电动磁悬浮列车悬挂系统减振控制策略及其优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- LI Gang. Study on vibration control strategy and its optimization of suspension system for superconducting electrodynamic suspension train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [54] 张伟海, 曾靖淞, 闫兆盈, 等. 超导电动磁悬浮列车次级悬挂半主动控制研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(5): 161-168.

- ZHANG Weihai, ZENG Jingsong, YAN Zhaoying, et al. Study on semi-active control of secondary suspension for superconducting electrodynamic suspension train[J]. Noise and vibration control, 2021, 41(5): 161-168.
- [55] LI Haitao, LIU Di, HONG Ye, et al. Modeling and identification of the hysteresis nonlinear levitation force in HTS maglev systems[J]. Superconductor science and technology, 2020, 33(5): 054001. DOI: 10.1088/1361-6668/ab7845.
- [56] WANG Shan, LI Haitao, WANG Li, et al. Nonlinear resonance characteristics in HTS pinning maglev systems based on multiscale method and experimental test[J]. Mechanical systems and signal processing, 2025, 226(22): 112367. DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.112367.
- [57] LI Haitao, DENG Zigang, JIN Li'an, et al. Lateral motion stability of high-temperature superconducting maglev systems derived from a nonlinear guidance force hysteretic model[J]. Superconductor science and technology, 2018, 31(7): 075010. DOI: 10.1088/1361-6668/aac860.
- [58] LI Jipeng, ZHENG Jun, HUANG Huan, et al. Motion stability of the magnetic levitation and suspension with $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ high- T_c superconducting bulks and NdFeB magnets[J]. Journal of applied physics, 2017, 122(15): 153902. DOI:10.1063/1.4994903.
- [59] YU Jinbo, DENG Zigang, LI Haitao, et al. Vibration suppression of high-temperature superconducting maglev system via electromagnetic shunt damper[J]. Journal of superconductivity and novel magnetism, 2019, 32(2): 2819-2828. DOI: 10.1007/s10948-019-5050-3.
- [60] LI Haitao, DENG Zigang, HUANG Huan, et al. Theoretical optimization and experimental verification of a non-contact damper for high temperature superconducting maglev systems[J]. Journal of vibration and control, 2022, 28(5/6): 606-614. DOI: 10.1177/10775463211050177.
- [61] KE Zhihao, DENG Zigang, REN Titanci, et al. Simultaneous vibration suppression and energy harvesting system design via electromagnetic shunt damper for high-temperature superconducting pinning maglev[J]. Mechanical systems and signal processing, 2024, 214(4): 111374. DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.111374.
- [62] 李彦森. 微米尺度气体放电实验及巴申曲线多形态研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2022.
- LI Yansen. Micron-scale gas discharge experiment and multiform study of Paschen curve[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2022.
- [63] 董安然, 于小娟, 孟凡平, 等. 一种用于真空管道交通的接驳走廊: CN200710049111.1[P]. 2009-05-06.
- DONG Anran, YU Xiaojian, MENG Fanping, et al. A connector corridor for evacuated tube transportation: CN200710049111.1[P]. 2009-05-06.
- [64] 李政波, 张进, 王雪. 高原低氧环境短期暴露对官兵心脏的影响[J]. 西北国防医学杂志, 2019, 40(3): 174-178.
- LI Zhengbo, ZHANG Jin, WANG Xue. Effect of short-term exposure to plateau hypoxic environment on the heart of officers and soldiers[J]. Medical journal of national defending forces in Northwest China, 2019, 40(3): 174-178.

Research review and reflections on ultra-high-speed rail transit in low-vacuum environments

ZHANG Weihua^{1,2}, DENG Zigang^{1,2}, BI Haiquan^{2,3}, LI Tian^{1,2}, LI Yan⁴, LI Haitao²

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Research Center for Super-High-Speed Evacuated Tube Maglev Transport, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 4. Southwest Jiaotong University Chengdu Design Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Despite its significant application potential, low-vacuum ultra-high-speed rail transit faces several pressing scientific and technical challenges. This paper presents a comprehensive review of low-vacuum tube ultra-high-speed rail transit technology, covering its origins, development, and current international research trends. The necessity and feasibility of developing this technology are then analyzed, followed by a detailed discussion on the adaptability of magnetic levitation technology for trains operating in low-pressure environments, as well as the primary technical challenges, such as heat dissipation and insulation issues. Furthermore, the paper proposes technical solutions and measures for rescue and evacuation specific to low-vacuum tube transportation systems.

Keywords: ultra-high-speed; low-vacuum; maglev train; low-vacuum tube; rescue and evacuation