



典型磁悬浮技术在磁浮飞行风洞中的应用分析

于馨凝 姜欣彤 张军 周廷波 倪章松

Application of typical magnetic suspension system in maglev flight wind tunnel

YU Xinning, JIANG Xintong, ZHANG Jun, ZHOU Tingbo, NI Zhangsong

引用本文:

于馨凝, 姜欣彤, 张军, 等. 典型磁悬浮技术在磁浮飞行风洞中的应用分析[J]. 实验流体力学, 2023, 37(3): 27–36. DOI: 10.11729/sytlx20220149

YU Xinning, JIANG Xintong, ZHANG Jun, et al. Application of typical magnetic suspension system in maglev flight wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics | J Exper Fluid Mech, 2023, 37(3): 27–36. DOI: 10.11729/sytlx20220149

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11729/sytlx20220149>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高超声速风洞真空系统临界压力比实验研究

Experimental investigation on critical pressure ratio of hypersonic wind tunnel vacuum system

实验流体力学. 2017, 31(4): 79–83, 96 <https://doi.org/10.11729/sytlx20160115>

类F-16飞行器风洞虚拟飞行试验研究

Wind tunnel based virtual flight testing research of F-16 fighter

实验流体力学. 2020, 34(1): 49–54, 86 <https://doi.org/10.11729/sytlx20180157>

600 km/h高速磁浮交通系统气动设计

Aerodynamic design of the 600 km/h high-speed maglev transportation system

实验流体力学. 2023, 37(1): 1–8 <https://doi.org/10.11729/sytlx20220131>

导流装置对高速磁浮列车气动特性的影响

Effect of deflector devices on the aerodynamic characteristics of high-speed maglev trains

实验流体力学. 2023, 37(1): 91–99 <https://doi.org/10.11729/sytlx20220109>

高速磁浮列车过隧道诱导的隧道出口列车风研究

Slipstream at the tunnel exit induced by a high-speed maglev train passing through a tunnel

实验流体力学. 2023, 37(1): 53–63 <https://doi.org/10.11729/sytlx20220110>

600 km/h磁浮列车隧道交会车体压力载荷特征研究

Characteristics of car body pressure load of 600 km/h maglev trains crossing in tunnel

实验流体力学. 2023, 37(1): 82–90 <https://doi.org/10.11729/sytlx20220117>

真空管道磁浮交通车体热压载荷分布特征及其非定常特性

Distribution and unsteady characteristics of the temperature and pressure loads acting on the car-body in evacuated tube maglev transport

实验流体力学. 2023, 37(1): 9–28 <https://doi.org/10.11729/sytlx20220084>

基于舒适性的高速磁浮铁路单线隧道最不利隧道长度分布特征研究

Study on the critical tunnel length distribution characteristics of high-speed maglev railway single-track tunnel based on pressure comfort

实验流体力学. 2023, 37(1): 44–52 <https://doi.org/10.11729/sytlx20220120>

高速磁浮隧道扩大等截面斜切型缓冲结构减缓初始压缩波机理研究

Mechanism of expanded equal-section inclined hood to reduce initial compression wave by high-speed maglev passing through the tunnel

实验流体力学. 2023, 37(1): 100–112 <https://doi.org/10.11729/syltlx20220123>

类F-16飞行器风洞虚拟飞行试验研究

Wind tunnel based virtual flight testing research of F-16 fighter

实验流体力学. 2020, 34(1): 49–54, 86 <https://doi.org/10.11729/syltlx20180157>

地址：四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话：0816-2463376

Email: syltlx@163.com

网址： <http://www.syltlx.com>



关注微信公众号

获得更多资讯

典型磁悬浮技术在磁浮飞行风洞中的应用分析

于馨凝¹, 姜欣彤¹, 张军¹, 周廷波², 倪章松^{1,*}

1. 成都流体动力创新中心, 成都 610071 2. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000

摘要:磁浮飞行风洞的运行原理是利用磁悬浮、牵引和导向技术, 驱动搭载模型的磁浮平台在封闭直线管道内作高速运动。磁悬浮系统对于精确控制模型加速/匀速/减速运动、达到试验所需运动状态尤其重要。本文结合磁浮飞行风洞总体技术指标及对磁悬浮系统的要求, 从运行稳定性、系统安全性、试验功能性、环境适应性、技术成熟度等方面, 对比分析常导电磁悬浮、永磁电动悬浮、高温/低温超导电动悬浮和高温超导钉扎悬浮系统。常导电磁悬浮系统难以达到最高运行速度(马赫数 1.0)的技术指标, 暂不作为磁浮飞行风洞备选磁悬浮方案。针对磁浮飞行风洞应用场景, 基于层次分析法和灰色关联度分析法建立磁悬浮系统综合决策模型。结果表明, 高温超导电动悬浮系统和高温超导钉扎悬浮系统具有较好的应用潜力。

关键词:飞行风洞; 真空管道; 磁悬浮; 层次分析法; 灰色关联度分析法

中图分类号: V211.74; U237

文献标识码: A

Application of typical magnetic suspension system in maglev flight wind tunnel

YU Xinning¹, JIANG Xintong¹, ZHANG Jun¹, ZHOU Tingbo², NI Zhangsong^{1,*}

1. Chengdu Fluid Dynamics Innovation Center, Chengdu 610071, China

2. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China

Abstract: The operation principle of the maglev flight wind tunnel is to drive the model to move at high speed in a closed straight pipe through magnetic suspension. The maglev system is particularly important for accurate control of the acceleration/uniform/deceleration process of the model. This study made a comprehensive analysis of the four maglev systems, including normal conductive electromagnetic suspension (EMS), permanent magnet electrodynamic suspension (PM-EDS), high/low temperature superconducting electrodynamic suspension (HTS/LTS-EDS), and high temperature superconducting pinning levitation (HTS-PL). These several maglev systems were comprehensively analyzed from five aspects. EMS system could not meet the specification requirement of the maximum operating speed $Ma = 1.0$, which could not be used as an alternative maglev system for the maglev flight wind tunnel. Based on the analytic hierarchy process (AHP) and grey relational analysis (GRA), a comprehensive decision-making model of the maglev system was established for the application scenario of the maglev flight wind tunnel. Results show that the HTS-EDS and HTS-PL system have better application potential in the maglev flight wind tunnel.

Keywords: flight wind tunnel; vacuum pipeline; maglev; analytic hierarchy process; grey relational analysis

收稿日期: 2022-12-27; 修回日期: 2023-01-20; 录用日期: 2023-02-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFA0710901)

* 通信作者 E-mail: nzsczcx@163.com

引用格式: 于馨凝, 姜欣彤, 张军, 等. 典型磁悬浮技术在磁浮飞行风洞中的应用分析 [J]. 实验流体力学, 2023, 37(3): 27-36.

YU X N, JIANG X T, ZHANG J, et al. Application of typical magnetic suspension system in maglev flight wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(3): 27-36.

0 引言

磁浮飞行风洞的设计概念结合了真空管道磁浮列车和动模型试验技术,通过构建接近真实飞行环境和运动特点的“体动风静”试验状态,满足航空航天飞行器、高速列车在宽马赫数和宽雷诺数范围、低噪声、低湍流度下的空气动力学及其交叉学科的地面试验需求。磁浮飞行风洞总长度约 1.2 km,管道截面内径 6 m,设计马赫数范围 0.1~1.0,试验雷诺数范围 $1.0 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^7$,试验压力范围 1 kPa~常压。其运行原理是利用磁悬浮、牵引和导向技术,驱动搭载试验模型的磁浮平台在封闭直线长管道内作高速运动^[1]。因此,磁浮飞行风洞的磁悬浮技术选择对于精确控制模型加速/匀速/减速运动过程、达到试验所要求的运动状态尤其重要。

高速磁悬浮技术主要应用于高速磁浮列车、电磁橇、悬浮电枢轨道炮等。在高速磁浮列车方面,国外从 20 世纪 60 年代末开始研究相关技术,目前已达到应用水平,其中电磁悬浮以德国 TR 常导高速磁浮系统为代表^[2-3],超导电动悬浮以日本 MLX 超导高速磁浮系统为代表^[4-5],永磁电动悬浮则以美国 Magplane 磁浮系统为代表^[6-7]。国内从 20 世纪 80 年代开始高速磁浮列车技术研究,目前 600 km/h 常导高速磁浮试验样车已完成制造并下线,超导电动悬浮和超导钉扎悬浮系统均已完成工程化样车及试验线建设,正在推进工程应用^[8-10]。在电磁橇、悬浮电枢轨道炮方面,NASA 于 20 世纪 90 年代提出了基于超导电动悬浮技术的 MagLifter 方案,在运载滑车底部安装超导磁体,建立了实验系统并开展了测试^[11]。Powell 等^[12-13]则提出了与 MagLifter 方案类似的 StarTram 超导磁悬浮发射方案,载物航天子系统 Gen-1 的设计加速度为 $20g \sim 30g$ 。2016 年,霍洛曼空军基地采用超导电动悬浮和直线电机牵引技术把磁悬浮火箭橇地面运行速度提高至 1018 km/h,有望应用于发射水平起飞运载器^[14-15]。国内相关领域研究起步较晚但发展迅速,部分技术已达国际领先水平。2022 年,在山东济南成功试运行了世界首个磁悬浮地面超高速试验设施——“电磁橇”,能将吨级以上物体加速至 1030 km/h ($Ma \approx 0.84$),创造了大质量超高速电磁悬浮技术世界最高速度纪录^[16]。

在高速磁悬浮技术方面,国内外已开展了部分

研究工作,但在真空管道动模型风洞中的应用还缺乏相关基础研究和工程经验。2000 年,NASA 提出高升力飞行风洞(High-Lift Flight Tunnel, HiLiFT)概念,采用磁悬浮和直线电机驱动模型在管道中高速运动,设计马赫数 0.05~0.50,最高加速度 $3g$,试验压力 0.10~0.76 MPa^[17]。研究者基于技术风险性和悬浮间隙控制要求,建议选择电磁悬浮系统^[18]。但受限于当时磁悬浮技术发展水平和成本,该风洞未开展实际建设。与 HiLiFT 相比,磁浮飞行风洞要求具有更高的运行马赫数和加速度,且能够在低压条件下开展试验,对磁悬浮系统提出了更高要求。

本文针对不同磁悬浮系统的技术原理和特点,结合磁浮飞行风洞总体技术指标及对磁悬浮系统的要求,从运行稳定性、系统安全性、试验功能性、环境适应性、技术成熟度等 5 个方面进行对比分析。基于层次分析法和灰色关联度分析法建立磁浮飞行风洞的磁悬浮系统综合决策模型,计算不同磁悬浮技术的综合决策值,可为磁浮飞行风洞的磁悬浮技术选择提供参考。

1 磁悬浮技术分类

根据悬浮原理的不同,磁悬浮技术主要分为永磁悬浮、电磁悬浮、电动悬浮和钉扎悬浮等 4 种,如图 1 所示^[19]。

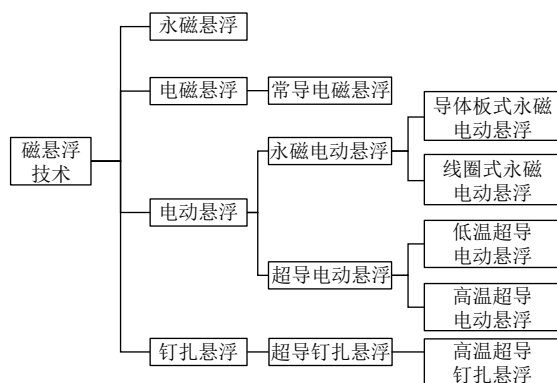


图 1 磁悬浮技术分类^[19]

Fig. 1 Classification of maglev system^[19]

永磁悬浮是利用永磁体之间的排斥或吸引力实现悬浮,系统结构简单、载重能力强^[20]。但永磁悬浮的磁体发生横向偏移时,产生侧向力的方向与偏移方向一致,会进一步促使磁体滑移翻滚,带来失稳风险^[21-22]。其固有的不稳定性限制了永磁悬浮的应用,必须加入导向轮或电磁悬浮控制。而电磁-永磁混合悬浮系统的永磁体吸死现象、磁浮平台-轨道耦合振

动等技术问题也还亟待解决^[23]。因此, 永磁悬浮及其混合悬浮系统目前都难以应用于磁浮飞行风洞。本文主要针对常导电磁悬浮、永磁电动悬浮、超导电动悬浮和超导钉扎悬浮进行对比分析。

1.1 常导电磁悬浮

常导电磁悬浮系统 (Electromagnetic Suspension, EMS) 的悬浮平台上安装电磁铁, 通电励磁而产生磁场, 与轨道上的电磁线圈产生吸引或排斥作用, 实现平台悬浮, 悬浮间隙 $8 \sim 12 \text{ mm}$ ^[24]。工程应用中通常采用 T 形导轨的磁吸式系统, 其原理如图 2 所示^[9]。电磁铁和轨道之间的吸引力与悬浮间隙的平方成反比^[25], 需要引入闭环控制来实现悬浮平台的稳定运行。在超高速运行状态下, 控制系统的延时可能会使悬浮系统响应滞后, 影响运行稳定性, 存在较大的安全隐患。

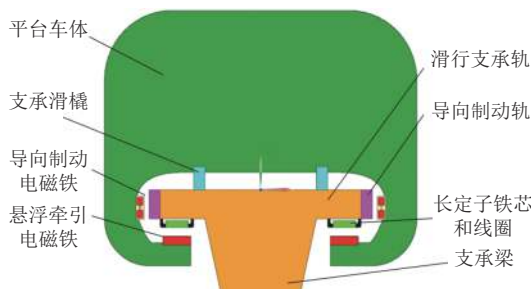


图 2 常导电磁悬浮原理示意^[9]
Fig. 2 Schematic diagram of EMS^[9]

1.2 永磁电动悬浮

永磁电动悬浮系统 (Permanent Magnet Electrodynamic Suspension, PM-EDS) 的悬浮平台上安装永磁体, 运动过程中轨道上的导体切割磁场产生感应电流, 通过感应电流的磁场与源磁场的相互作用产生悬浮力, 悬浮间隙 $20 \sim 30 \text{ mm}$ ^[26]。以导体板永磁电动悬浮为例, 典型工程应用原理结构如图 3 所示^[23]。永磁电动悬浮的控制系统简单、无需额外增

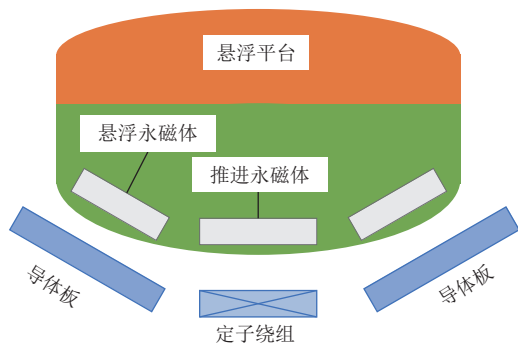


图 3 永磁电动悬浮原理示意^[23]
Fig. 3 Schematic diagram of PM-EDS^[23]

加制冷设备, 悬浮和推进系统能耗小。但悬浮平台无法在静止和低速运动状态下实现悬浮, 且永磁体磁能密度相对较低 (以磁性最强的钕铁硼永磁体为例, 其磁能密度约为 $4.7 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ ^[27]), 在悬浮力相同的条件下, 悬浮平台总重较大。

1.3 高温/低温超导电动悬浮

高温/低温超导电动悬浮系统 (High/Low Temperature Superconducting Electrodynamics Suspension, HTS/LTS-EDS) 的运行原理与永磁电动悬浮系统类似, 悬浮平台上安装超导磁体, 运动过程中轨道上的线圈切割超导磁体的磁场产生悬浮力, 悬浮间隙 $80 \sim 150 \text{ mm}$ ^[28]。在工程应用中, 超导电动悬浮系统通常采用轨道包裹平台的形式, 其原理结构如图 4 所示^[9]。超导电动悬浮系统的悬浮间隙大, 无需主动控制, 且其磁能密度显著高于永磁体, 产生 10 T 磁场时的磁能密度约为 $4.0 \times 10^7 \text{ J/m}^3$ 。因此, 超导电动悬浮在高速运动时可以产生更大的悬浮力和推进力。但与永磁电动悬浮相同, 超导电动悬浮平台无法在静止和低速状态下悬浮^[29]; 同时, 低温超导电动悬浮采用更低温度的液氢制冷, 在运行过程中存在泄漏风险。

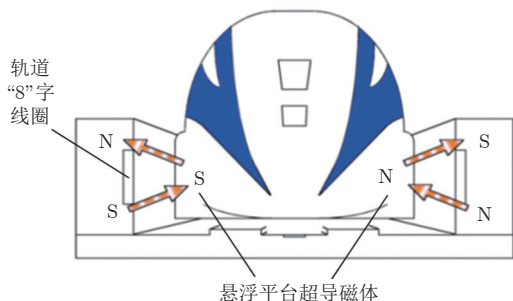


图 4 高温/低温超导电动悬浮原理示意^[9]
Fig. 4 Schematic diagram of HTS/LTS-EDS^[9]

1.4 高温超导钉扎悬浮

高温超导钉扎悬浮系统 (High Temperature Superconducting Pinning Levitation, HTS-PL) 利用高温超导体在超导状态下量子磁通线被超导体缺陷或其他势阱束缚而产生的“钉扎效应”, 与永磁轨道磁场相互作用产生钉扎力, 悬浮间隙 $10 \sim 30 \text{ mm}$ ^[29]。以西南交通大学研发的超导钉扎悬浮样车为例, 其系统原理结构如图 5 所示^[30]。超导钉扎悬浮在运动方向上无固有磁阻力, 容易实现高速运行, 且不需要主动控制, 结构简单。但目前相关研究还处于起步阶段, 尚无工程应用案例; 同时, 超导钉扎悬浮的自稳定能力主要依靠钉扎悬浮力, 当悬浮平

台所受外部载荷和重力的合力超出钉扎悬浮力的调节范围时,难以保持纵向和横向运行稳定。

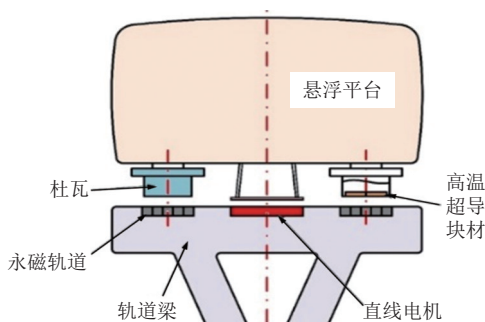


图5 高温超导钉扎悬浮原理示意^[30]
Fig. 5 Schematic diagram of HTS-PL^[30]

2 对磁浮飞行风洞的适应性分析

2.1 运行稳定性分析

运行稳定性分析主要包括对垂向运行稳定性、侧向运行稳定性、纵向运行稳定性等方面的分析。

常导电磁悬浮系统能够通过主动控制增加阻尼,抵消垂向和侧向干扰,在设计运行速度范围内的悬浮间隙波动小、可控性强。但当运行速度超过设计范围时,控制系统可能出现延迟,导致悬浮间隙、运动阻尼等参数调节滞后,影响平台运行稳定性。

永磁电动悬浮和超导电动悬浮系统可以通过增加阻尼线圈、改变线圈电流的方式调节悬浮与导向阻尼,提高悬浮平台的运行稳定性。但永磁电动悬浮的磁能密度显著低于高温/低温超导电动悬浮,阻尼调节范围较窄,抵抗外部载荷冲击的能力相对较低,垂向、侧向和纵向的运行稳定性弱于高温/低温超导电动悬浮。

高温超导钉扎悬浮系统利用“钉扎效应”实现自稳定悬浮、维持平台的运行稳定性。在低马赫数运行和抵抗下压力方面基本满足磁浮飞行风洞的试验需求。但在开展高马赫数($Ma > 0.5$)试验时,悬浮平台受到较大的上升力,与自身重力的合力会超出钉扎悬浮力的自稳定调节范围,且两侧位移也超出直线电机间隙限值,影响平台的垂向和侧向运行稳定性,但对纵向稳定性影响不大。

2.2 系统安全性分析

系统安全性分析主要包括对悬浮控制系统安全性能、抗气动力扰动性能、环境安全与人体健康影响等方面的分析。

常导电磁悬浮系统采用主动控制的方式,通过收集传感器反馈信号,调整输出电磁铁的电流大小,

在设计运行速度范围内的悬浮系统控制安全性好,抗气动力扰动性能强。但在高速运行时,控制系统延迟可能导致安全问题。系统通过电流控制磁场,对环境安全和人体健康的影响较小。

永磁电动悬浮不需要主动控制就可以实现稳定悬浮,也不存在超导电动悬浮和超导钉扎悬浮系统的失超风险,悬浮控制系统安全性好。但永磁体的磁能密度较小,在抗气动力扰动性能方面弱于高温/低温超导电动悬浮。同时,悬浮平台上安装的永磁体会在周围产生恒定磁场,在试验准备阶段可能对环境和人体造成一定影响。

高温/低温超导电动悬浮系统需要布置冷却设备维持材料的超导性能,当线圈局部温度过高时,可能发生失超现象,存在悬浮控制安全隐患。与低温超导电动悬浮相比,高温超导电动悬浮系统的失超风险更低,且失超后更容易恢复超导状态。超导电动悬浮能够增加阻尼调节,且超导体的磁能密度较大,因此抗气动力扰动性能较强。低温超导电动悬浮系统的制冷剂液氮的温度更低,在运行过程中存在泄漏风险,威胁环境安全与人体健康。

高温超导钉扎悬浮系统同样需要布置冷却设备维持材料的超导性能,当线圈局部温度过高时存在失超风险,影响悬浮系统控制。超导钉扎悬浮系统不能增加阻尼,主要依靠钉扎悬浮力实现自稳定悬浮,因此仅在钉扎悬浮力的调节范围内能够抵抗气动力扰动。超导钉扎悬浮需要铺设永磁轨道,其周围会产生恒定磁场,在设备维护和检修期间可能对环境和人体健康造成一定影响。

2.3 试验功能性分析

试验功能性分析主要包括对满足磁浮飞行风洞最高运行马赫数、最低试验马赫数和平台牵引性能等方面的分析。

常导电磁悬浮系统能够实现静悬浮,满足磁浮飞行风洞最低试验马赫数的要求。但主动闭环控制存在时滞效应,悬浮平台在高速运行时可能发生控制延迟。目前常导电磁悬浮的最高运行速度可达600 km/h^[31],进一步提速受限,难以满足最高运行马赫数1.0的指标要求。在平台高速运动状态下,轨道的感应涡流会在前进方向上产生磁阻力,在一定程度上影响平台牵引性能。

永磁电动悬浮和超导电动悬浮系统主要依靠轨道上的闭合线圈切割平台上的永磁体或超导磁体产生悬浮力,因此在低马赫数($Ma < 0.04$)试验条件下

需加装轮轨或滑橇支撑装置^[29]。两种电动悬浮系统都能够在磁浮飞行风洞最低试验马赫数下实现悬浮,运行速度均可达1000 km/h量级^[32],满足磁浮飞行风洞最高运行马赫数1.0的指标要求。与常导电磁悬浮系统类似,超导电动悬浮系统在运行过程中也存在一定的磁阻力。另外,由于永磁体和超导磁体的磁能密度差异,超导电动悬浮系统比永磁电动悬浮系统具有更好的牵引和制动性能。

高温超导钉扎悬浮系统能够通过“钉扎效应”实现平台静悬浮,满足最低试验马赫数的要求;同时,超导钉扎悬浮具有超高速应用潜力,仿真运行速度可达1000 km/h以上^[33-34],理论上能够满足磁浮飞行风洞高速试验需求。不同于常导电磁悬浮、永磁电动悬浮和超导电动悬浮系统,超导钉扎悬浮系统的平台在运动方向上没有磁阻力,具有良好的平台牵引性能。

2.4 环境适应性分析

环境适应性分析主要包括对环境温度适应性、轨道平顺适应性及真空环境热效应等方面的分析。

磁浮飞行风洞的洞体没有额外加热或制冷设备,工作温度范围为-10~60℃。常导电磁悬浮系统在自然温度范围内工作,能够满足环境温度适应性要求;悬浮间隙较小,对轨道平顺的适应性较差。在常导电磁悬浮系统工作过程中,电流经过常导线圈会产生热量。目前工程上应用的T形导轨常导电磁悬浮系统主要采用散热片、自然风冷等常压散热方式,无法满足高真空度环境下的散热要求,需要增加水冷等辅助散热方式。

与常导电磁悬浮系统类似,永磁电动悬浮系统也在自然温度范围内工作,能够满足磁浮飞行风洞的环境温度适应性要求。永磁电动悬浮系统的悬浮间隙介于常导电磁悬浮系统和高温超导电动悬浮系统之间,对轨道平顺的适应能力也介于两者之间。在平台高速运动过程中,轨道铺设的导体板或线圈因涡流效应产生感应电流,导致发热问题,但由于通电时间短,产生热量较少,能够满足真空环境的热效应要求。

超导电动悬浮系统需在低温环境下工作,携带装有液氢或液氮的杜瓦来维持超导块材的超导状态。磁浮飞行风洞单次试验时间较短,一般不会影响超导体温度,环境温度适应性要求能够得到满足。超导电动悬浮系统的悬浮间隙较大,对轨道平顺的适应能力较好。与永磁电动悬浮系统类似,高

速运动过程中超导电动悬浮系统轨道“8”字线圈感应电流产生的热量较少,能够满足散热要求。

与超导电动悬浮类似,高温超导钉扎悬浮需采用液氮使超导块材处于超导状态,可以满足磁浮飞行风洞的环境温度适应性要求。超导钉扎悬浮系统的悬浮间隙与永磁电动悬浮系统相近,对轨道平顺的适应能力也介于常导电磁悬浮系统和超导电动悬浮系统之间。超导块材存在钉扎效应,其内部磁通变化时,悬浮平台在运动过程中需克服钉扎力做功,在块材内部引起交流损耗,导致局部温度上升。磁场波动和运行速度提高会导致超导块材的温升增大,对真空环境下的散热带来一定挑战。

2.5 技术成熟度分析

技术成熟度分析主要包括对核心技术储备、技术理论成熟度、工程应用进展等方面的分析。

常导电磁悬浮系统的技术成熟度最高,具备一定核心技术储备,已经应用于商业化运行的高速磁浮列车。2000年,我国引进吸收德国常导电磁悬浮技术,建造了上海高速磁浮示范线,最高速度达到403 km/h,迄今已积累了20余年的试运行和商业化运营经验^[35]。2019年,由中车青岛四方股份有限公司研制、具有自主知识产权的高速磁浮交通系统在山东青岛下线,试验线长度为665 m,设计速度为600 km/h^[36]。

美国对永磁电动悬浮技术研究较早,麻省理工学院的Magplane系统、美国通用原子的Inductrack系统及马斯克提出的Hyperloop超级高铁计划均采用基于Halbach阵列的永磁电动悬浮设计方案^[37-39]。永磁电动悬浮技术研究在我国起步较晚,但也积累了一定的核心技术储备,技术理论较为成熟,目前处于试验线验证阶段,试验运行速度接近磁浮飞行风洞的最高运行速度。2022年,中国科学院电工研究所在山东济南建设了永磁电动悬浮制式的超高速试验设施——“电磁橇”,试验运行速度达到了1030 km/h^[16]。

我国的超导电动悬浮技术研究主要为高温超导电动悬浮技术研究,技术理论较为成熟,具有一定的核心技术储备,目前处于试验线验证阶段。2018年,中车长春轨道客车股份有限公司建设了200 m试验线,开展超导电动悬浮缩比列车模型试验研究^[8]。中国航天科工集团开展了超高速磁悬浮电磁推进研究,2021年建成405 m试验线,最高测试速度为623 km/h^[9]。国外低温超导电动悬浮技术的研究较

为深入,目前已有成熟的工程应用案例。2012年,日本研制的L0系列低温超导电动磁悬浮列车进入山梨试验线,最高测试速度603 km/h^[5]。

超导钉扎悬浮技术研究在我国启动较早,具有丰富的核心技术储备,技术理论较为成熟,目前处于试验线验证阶段。2000年,西南交通大学研制出世界上首辆载人高温超导钉扎悬浮车——“世纪号”;2018年,搭建了真空管道高温超导磁浮车高速试验平台,线路长度140 m,最高测试速度430 km/h;2020年正式启动“多态耦合轨道交通动态试验平台”项目,计划于2023年完成长度1620 m、最高测试速度1500 km/h的高温超导钉扎悬浮试验平台^[9, 30]。

3 磁悬浮制式综合决策模型

3.1 建立综合决策模型

基于层次分析法,结合磁悬浮制式对磁浮飞行风洞的适应性分析,提出运行稳定性、系统安全性、试验功能性、环境适应性、技术成熟度等5个决策准则,并划分为15个指标。常导电磁悬浮系统无法满足磁浮飞行风洞最高运行马赫数1.0的关键技术指标要求,暂不作为磁浮飞行风洞的备选磁悬浮方案。方案层为永磁电动悬浮、低温超导电动悬浮、高温超导电动悬浮和高温超导钉扎悬浮等4种磁悬浮制式。建立综合决策模型如图6所示。

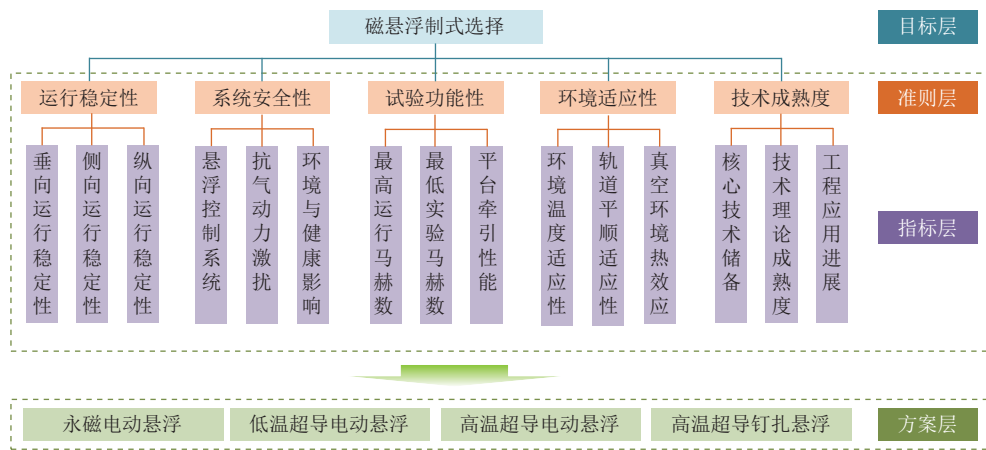


图6 综合决策模型

Fig. 6 Integrated decision model

3.2 以层次分析法确定指标权重

3.2.1 判断矩阵构造方法

通过分析判断准则层和指标层各项 $e = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ 的相对重要程度,引入合适的标度,将判断定量化,构造 n 阶判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。由综合决策模型可知,“目标层-准则层”的判断矩阵为 5×5 矩阵,“准则层-指标层”的判断矩阵均为 3×3 矩阵。判断矩阵的5级比较判断标度及含义见表1^[40]。

计算矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和相应的特征向量 $V = (V_1, V_2, \dots, V_n)$,对 V 进行归一化处理得到 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$,即代表各指标的权重^[41]。采用随机一致性指标 I_{RC} 判断矩阵 A 的一致性程度, $I_{RC} < 0.1$ 时通过一致性检验。计算公式如下:

$$I_{RC} = (\lambda_{\max} - n) / [(n-1)I_{ARC}] \quad (1)$$

式中: I_{ARC} 为平均随机一致性指标。 $n = 3$ 时, $I_{ARC} = 0.58$; $n = 5$ 时, $I_{ARC} = 1.12$ ^[40]。

3.2.2 确定指标权重

建立目标层-准则层判断矩阵 A , 其中 $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} = \{\text{运行稳定性, 系统安全性, 试验功能性, 环境适应性, 技术成熟度}\}$ 。

表1 判断矩阵标度及含义
Table 1 Scaling and meaning of decision matrix

重要性等级	a_{ij} 值	说明
e_i 比 e_j 极端重要	9	2个指标的判断差异达到可能范围内最大
e_i 比 e_j 强烈重要	7	2个指标的判断差异强烈
e_i 比 e_j 明显重要	5	2个指标的判断差异明显
e_i 比 e_j 稍重要	3	2个指标的判断差异轻微
e_i 和 e_j 同等重要	1	2个指标无判断差异
e_i 比 e_j 稍不重要	1/3	2个指标的判断差异轻微
e_i 比 e_j 明显不重要	1/5	2个指标的判断差异明显
e_i 比 e_j 强烈不重要	1/7	2个指标的判断差异强烈
e_i 比 e_j 极端不重要	1/9	2个指标的判断差异达到可能范围内最大

注:若 e_i 和 e_j 的差异程度介于上述2个相邻等级之间,则 a_{ij} 值相应取为8、6、4、2、1/2、1/4、1/6、1/8。

环境适应性, 技术成熟度}。系统安全性和试验功能性的重要性最高, 其后依次为环境适应性、运行稳定性和技术成熟度。判断矩阵 A 如下:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 2 \\ 3 & 1 & 1 & 2 & 4 \\ 3 & 1 & 1 & 2 & 4 \\ 2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/4 & 1/4 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

计算得到 $\lambda_{\max} = 5.0364$, $I_{RC} = 0.0090 < 0.1$, $W = (0.1093, 0.3192, 0.3192, 0.1840, 0.0683)$ 。

以此类推, 建立准则层-指标层判断矩阵。运行稳定性、系统安全性、试验功能性、环境适应性和技术成熟度的判断矩阵 $A_1 \sim A_5$ 及计算结果分别如下:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

计算得到 $\lambda_{\max 1} = 3$, $I_{RC1} = 0 < 0.1$, $W_1 = (0.4000, 0.4000, 0.2000)$ 。

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

计算得到 $\lambda_{\max 2} = 3.0092$, $I_{RC2} = 0.0079 < 0.1$, $W_2 = (0.1635, 0.5396, 0.2969)$ 。

$$A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

计算得到 $\lambda_{\max 3} = 3$, $I_{RC3} = 0 < 0.1$, $W_3 = (0.4000, 0.4000, 0.2000)$ 。

$$A_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

计算得到 $\lambda_{\max 4} = 3.0092$, $I_{RC4} = 0.0079 < 0.1$, $W_4 = (0.1635, 0.2969, 0.5396)$ 。

$$A_5 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

计算得到 $\lambda_{\max 5} = 3$, $I_{RC5} = 0 < 0.1$, $W_5 = (0.4000, 0.4000, 0.2000)$ 。

根据目标层-准则层、准则层-指标层判断矩阵的归一化特征向量, 得到目标层-指标层各项(垂向运行稳定性、侧向运行稳定性、纵向运行稳定性、悬浮控制系统、抗气动力激励、环境与健康影响、最高运行马赫数、最低试验马赫数、平台牵引性能、环境温度适应性、轨道平顺适应性、真空环境热效应、核

心技术储备、技术理论成熟度、工程应用进展)的权重向量 $\omega = (0.0437, 0.0437, 0.0219, 0.0522, 0.1722, 0.0948, 0.1277, 0.1277, 0.0638, 0.0301, 0.0546, 0.0993, 0.0273, 0.0273, 0.0137)$ 。

3.3 以灰色关联度法评价结果

3.3.1 指标量化

采用灰色关联度法进行决策结果评价, 结合磁悬浮制式对磁浮飞行风洞的适应性分析, 对各项指标进行等级评价。设定 A、B、C、D 等 4 个等级, 分别对应 100 分、90 分、80 分和 70 分。得到的指标评价结果如表 2 所示。

表 2 指标评价结果
Table 2 Indicator quantification value of centesimal system

指标层	永磁 电动悬浮	低温超导 电动悬浮	高温超导 电动悬浮	高温超导 钉扎悬浮
垂向运行稳定性	C	B	B	C
侧向运行稳定性	C	B	B	C
纵向运行稳定性	C	B	B	B
悬浮控制系统	B	D	C	C
抗气动力激励	C	B	B	C
环境与健康影响	D	D	A	B
最高运行马赫数	A	A	A	A
最低试验马赫数	A	A	A	A
平台牵引性能	D	C	C	B
环境温度适应性	A	A	A	A
轨道平顺适应性	C	A	A	B
真空环境热效应	B	B	B	B
核心技术储备	B	D	B	A
技术理论成熟度	B	B	B	B
工程应用进展	C	B	C	C

将评价结果的各项指标进行归一化处理, 得到标准化决策矩阵 S 如下:

$$S = \begin{pmatrix} 8/9 & 1 & 1 & 8/9 \\ 8/9 & 1 & 1 & 8/9 \\ 8/9 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 7/9 & 8/9 & 8/9 \\ 8/9 & 1 & 1 & 8/9 \\ 7/10 & 7/10 & 1 & 9/10 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 7/9 & 8/9 & 8/9 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4/5 & 1 & 1 & 9/10 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 9/10 & 7/10 & 9/10 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 8/9 & 1 & 8/9 & 8/9 \end{pmatrix}$$

3.3.2 计算决策值

根据权重向量 ω 和决策矩阵 S ,得到对方案层的初步评价价值如下:

$$X = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{15}) \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_{15} \end{pmatrix} \quad (2)$$

计算得到 $X = (0.9109, 0.9446, 0.9829, 0.9489)$ 。进一步确定灰色关联系数 ρ :

$$\rho = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i \quad (3)$$

计算得到 $\rho = 0.9468$ 。进一步根据公式(4)^[42], 可得关联系数矩阵 Z 。

$$z_{ij} = \frac{\rho \max_j |1 - s_{ij}|}{|1 - s_{ij}| + \rho \max_j |1 - s_{ij}|} \quad (4)$$

$$Z = \begin{pmatrix} 0.4863 & 1 & 1 & 0.4863 \\ 0.4863 & 1 & 1 & 0.4863 \\ 0.4863 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0.4863 & 0.6544 & 0.6544 \\ 0.4863 & 1 & 1 & 0.4863 \\ 0.4863 & 0.4863 & 1 & 0.7396 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.4863 & 0.6544 & 0.6544 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.4863 & 1 & 1 & 0.6544 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.6544 & 0.4863 & 0.6544 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.4863 & 1 & 0.4863 & 0.4863 \end{pmatrix}$$

经过计算得到方案层最终决策值 $Y = (0.7294, 0.8884, 0.9434, 0.8980)$ 。根据综合决策模型的计算结果, 高温超导电动悬浮和高温超导钉扎悬浮技术在磁浮飞行风洞中具有较好的应用潜力, 其次为低温超导电动悬浮和永磁电动悬浮技术。

需要说明的是, 上述结果基于本文设置的指标和判断矩阵计算得到, 仅作为磁浮飞行风洞的磁悬浮制式决策方法探索。后续还需深化论证研究, 细化决策模型准则层、指标层及判断矩阵, 进一步完善决策模型。

4 结 论

本文对常导电磁悬浮、永磁电动悬浮、高温/低温超导电动悬浮、高温超导钉扎悬浮系统的运行原理、悬浮性能、技术特点等进行综合论述, 并从运行稳定性、系统安全性、试验功能性、环境适应性、技

术成熟度等方面分析了不同磁悬浮技术对磁浮飞行风洞的适应性。常导电磁悬浮难以达到最高运行马赫数 1.0 的技术指标要求, 暂不作为磁浮飞行风洞的备选磁悬浮方案。与永磁电动悬浮相比, 超导电动悬浮在运行稳定性、抗气动力激励、平台牵引能力等方面具有更好的性能。高温超导钉扎悬浮在试验功能性、核心技术储备等方面表现较好。基于技术适应性分析, 初步建立了磁悬浮系统综合决策模型, 通过层次分析法确定指标权重, 采用灰色关联度法评价决策结果。计算得到永磁电动悬浮、低温超导电动悬浮、高温超导电动悬浮和高温超导钉扎悬浮的决策值分别为 0.7294、0.8884、0.9434 和 0.8980, 说明高温超导电动悬浮和高温超导钉扎悬浮技术在磁浮飞行风洞中具有较好的应用潜力。

参考文献:

- [1] 倪章松, 张军, 符澄, 等. 磁浮飞行风洞试验技术及应用需求分析[J]. *空气动力学学报*, 2021, 39(5): 95-110.
NI Z S, ZHANG J, FU C, et al. Analyses of the test techniques and applications of maglev flight tunnels[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2021, 39(5): 95-110.
doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0206
- [2] MNICH P. 德国和日本磁悬浮高速铁路系统的现状和比较[J]. 王渤洪, 译. *变流技术与电力牵引*, 2001(6): 1-8.
doi: 10.13889/j.issn.2095-3631.2001.06.001
- [3] 舒光伟, Reinhold Meisinger. 德国电磁型磁浮列车40年回顾[J]. *上海应用技术学院学报(自然科学版)*, 2012, 12(4): 305-309.
SHU G W, MEISINGER R. Review of German EMS maglev vehicles in the past 40 years[J]. *Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science)*, 2012, 12(4): 305-309.
- [4] 大概久夫. 日本超导磁悬浮铁路开发的现状[J]. 易厚梅, 译. *变流技术与电力牵引*, 2002(3): 5-7.
doi: 10.13889/j.issn.2095-3631.2002.03.002
- [5] 蓝建中. 日本超导磁浮列车时速创纪录[J]. *城市轨道交通研究*, 2015, 18(5): 134.
- [6] 张瑞华, 刘育红, 徐善纲. 美国Magplane磁悬浮列车方案介绍[J]. *变流技术与电力牵引*, 2005(5): 40-43.
doi: 10.13889/j.issn.2095-3631.2005.05.009
- [7] POST R F. Toward more efficient transport: the inductrack maglev system[EB/OL]. [2021-11-25]. https://gcep.stanford.edu/pdfs/ChEHeXOTnf3dHH5qjYRXMA/09_Post_10_11_tr ans.pdf.
- [8] 张旭东. 我国将在2020年研制出时速600公里高速磁浮样车[J]. *广东交通*, 2018(1): 46.
- [9] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. *西南交通大学学报*, 2022, 57(3): 455-474, 530.
DENG Z G, LIU Z X, LI H T, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022, 57(3): 455-474, 530.
doi: 10.3969/j.issn.0258-2724.20220001
- [10] GOU J S. Development status and global competition trends analysis of maglev transportation technology based on

- patent data[J]. *Urban Rail Transit*, 2018, 4(3): 117–129.
doi: [10.1007/s40864-018-0087-3](https://doi.org/10.1007/s40864-018-0087-3)
- [11] JACOBS W A. Magnetic launch assist-NASA's vision for the future[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(1): 55–57.
doi: [10.1109/20.911790](https://doi.org/10.1109/20.911790)
- [12] POWELL J, MAISE G, RATHER J. Maglev launch: ultra-low cost, ultra-high volume access to space for cargo and humans[J]. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 2010, 1208(1): 121–136.
doi: [10.1063/1.3326240](https://doi.org/10.1063/1.3326240)
- [13] POWELL J, MAISE G, PANIAGUA J, et al. Maglev launch and the next race to space[C]//Proc of the 2008 IEEE Aerospace Conference. 2008: 1–20.
doi: [10.1109/AERO.2008.4526501](https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526501)
- [14] RANDAHL J J. 633 mph-nothing to mach [EB/OL]. [2016-04-20]. <https://www.aerotechnews.com/blog/2016/04/20/633-mph-nothing-to-mach/>.
- [15] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(6): 1–5.
MA W M, LU J Y. Electromagnetic launch technology[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(6): 1–5.
doi: [10.11887/j.cn.201606001](https://doi.org/10.11887/j.cn.201606001)
- [16] 王延斌. 世界首个电磁橇设施运行, 磁悬浮速度突破1000公里/小时 [EB/OL]. [2022-10-21]. <https://m.gmw.cn/baijia/2022-10/21/1303175289.html>.
- [17] 战培国, 杨炯. 国外风洞试验的新机制、新概念、新技术[J]. *流体力学实验与测量*, 2004, 18(4): 1–6.
ZHAN P G, YANG J. New systems, concepts and techniques in the area of foreign wind tunnel test[J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2004, 18(4): 1–6.
doi: [10.3969/j.issn.1672-9897.2004.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9897.2004.04.001)
- [18] LOFFTUS D, LUND T, ROTE D. High-lift flight tunnel[R]. NASA/CR-2000-210653, 2000.
- [19] 张昆仑. 高速磁浮铁路技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.
- [20] RACHMAN N F, WIRAWAN W A, PRADIPTA A, et al. Design and levitation performance above A permanent magnet in maglev train prototype[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 1000(1): 012002.
doi: [10.1088/1755-1315/1000/1/012002](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1000/1/012002)
- [21] 苏宇锋, 叶志通, 段智勇, 等. 微型抗磁悬浮振动能量采集器结构分析与实验[J]. *机械设计与制造*, 2017(10): 19–23.
SU Y F, YE Z T, DUAN Z Y, et al. Analysis and experiment of structure design for the micro-vibration energy harvester based on diamagnetic levitation[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017(10): 19–23.
doi: [10.19356/j.cnki.1001-3997.2017.10.006](https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.2017.10.006)
- [22] EARNshaw S R. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether[J]. Cambridge Philosophical Society, 1848, 18(7): 97–112.
- [23] 高涛. 永磁磁浮轨道交通系统的悬浮系统研究与设计[D]. 赣州: 江西理工大学, 2019.
GAO T. Research and design of suspension system for permanent magnetic maglev rail transit system[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019.
- [24] MORISHITA M, AKASHI M. Guide-effective levitation control for electromagnetic suspension systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999, 119(10): 1259–1268.
doi: [10.1541/ieejias.119.1259](https://doi.org/10.1541/ieejias.119.1259)
- [25] 赵春发, 翟婉明. 常导电磁悬浮动态特性研究[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(4): 464–468.
ZHAO C F, ZHAI W M. Dynamic characteristics of electromagnetic levitation systems[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2004, 39(4): 464–468.
- [26] 陈殷. 低速永磁电动悬浮电磁力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
CHEN Y. Characteristic analysis of electromagnetic forces created by low-speed PM electrodynamic suspension[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [27] GUTFLEISCH O, WILLARD M A, BRÜCK E, et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(7): 821–842.
doi: [10.1002/adma.201002180](https://doi.org/10.1002/adma.201002180)
- [28] 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 W X, LI W L, FANG J. Review of research on high temperature maglev[J]. *Superconductivity*, 2020, 48(2): 44–49.
doi: [10.16711/j.1001-7100.2020.02.009](https://doi.org/10.16711/j.1001-7100.2020.02.009)
- [29] 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.
XIONG J Y, DENG Z G. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(1): 177–198.
doi: [10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.01.008](https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.01.008)
- [30] 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, 351.
DENG Z G, LI H T. Recent development of high-temperature superconducting maglev[J]. *Materials China*, 2017, 36(5): 329–334, 351.
doi: [10.7502/j.issn.1674-3962.2017.05.02](https://doi.org/10.7502/j.issn.1674-3962.2017.05.02)
- [31] 王宇飞. 高速磁悬浮系统的电磁发射特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
WANG Y F. Research on the electromagnetic emission characteristics of high-speed maglev system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
doi: [10.26944/d.cnki.gbfju.2020.001405](https://doi.org/10.26944/d.cnki.gbfju.2020.001405)
- [32] 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 F, LUO S H, DENG Z G. 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.
doi: [10.3969/j.issn.1001-8360.2019.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2019.03.006)
- [33] WANG H D, DENG Z G, MA S S, et al. Dynamic simulation of the HTS maglev vehicle-bridge coupled system based on levitation force experiment[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5): 3601606.
doi: [10.1109/TASC.2019.2895503](https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2895503)
- [34] ZHANG J K, DENG Z G, WANG W, et al. Vibration characteristics of the new high-temperature superconducting maglev vehicle based on operation test[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31(8): 3602904.

- doi: [10.1109/TASC.2021.3091087](https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3091087)
- [35] 吴祥明. 高速磁浮上海示范线的建设[J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2002, 30(7): 814-818.
WU X M. Construction of Shanghai maglev demonstration line[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2002, 30(7): 814-818.
doi: [10.3321/j.issn:0253-374X.2002.07.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-374X.2002.07.008)
- [36] 李琦. 我国时速600公里高速磁浮试验样车下线[J]. *今日科苑*, 2019(6): 1.
- [37] MONTGOMERY D B. Overview of the 2004 Magplane design[C]// *Maglev 2004 Proceedings*. 2004: 106-113.
- [38] GUROL S, BALDI B, POST R. General atomics urban maglev program status[C]//*Proc of the 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. 2006: 1-4.
- [39] ABDELRAHMAN A S, SAYEED J, YOUSSEF M Z. Hyperloop transportation system: analysis, design, control, and implementation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(9): 7427-7436.
doi: [10.1109/TIE.2017.2777412](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2777412)
- [40] 许莹. 中低运量城市轨道交通系统制式选择研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
XU Y. Research on system mode selection of medium or small carrying-capacity urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

- [41] 王兴仁, 邓友生, 李红敏, 等. 都市区城市轨道交通制式综合决策模型[J]. *西安科技大学学报*, 2022, 42(5): 968-974.
WANG X R, DENG Y S, LI H M, et al. Comprehensive decision-making model of urban rail transit systems in metropolitan area[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022, 42(5): 968-974.
- [42] 蒋诗泉. 基于一般灰数的灰色关联决策模型及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
JIANG S Q. Research on model and application of grey incidence decision making based on general grey number[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
doi: [10.27239/d.cnki.gnhhu.2018.000135](https://doi.org/10.27239/d.cnki.gnhhu.2018.000135)

作者简介:



于馨凝(1992—), 女, 辽宁丹东人, 博士, 工程师。研究方向: 工程热物理。通信地址: 四川省成都市青羊区二环路西二段 75 号成都流体动力创新中心(610071)。
E-mail: 3100101056@zju.edu.cn

(编辑: 孙春晖)