



磁悬浮列车制动系统

曾凡飞^{1,2}, 陈敬东¹, 王旭阳¹, 孔宴伟¹, 方晓春², 林飞²

(1. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 作为新型轨道交通技术制式, 磁悬浮交通列车具有运行速度快、环境友好等优点; 而可靠高效的制动系统是保障列车安全稳定运行的根本。文章首先对磁悬浮交通的背景和发展进行介绍; 其次围绕制动工况分析了中低速磁悬浮列车制动系统, 基于德国TR高速磁浮列车和日本ML高速磁浮列车的制动系统重点研究了磁轨制动、线圈短路制动以及改进的机械制动等制动方式的作用机理; 最后提出了低真空管道超高速磁浮列车制动系统的初步设计构想, 并分析了关键技术性问题。文章的论述可以为后续磁悬浮列车制动系统的设计提供参考。

关键词: 磁悬浮列车; 制动系统; 真空管道; 高速列车

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)04-0001-12

0 引言

磁悬浮交通凭借其速域宽、噪声小、平稳性好及适应性强等优势备受关注, 相关技术研究已取得系列成果^[1-3]。制动系统作为磁浮列车安全稳定运行的核心保障, 其技术发展至关重要^[4], 为此, 行业科研人员已开展了多维度、不同层次的研究。其中, 文献[5]研究了中低速磁浮列车制动系统性能, 分析了其结构与工作机理。文献[6]对高速动车组制动系统及常导高速磁浮列车制动系统作了对比分析。文献[7]研究了高速磁浮列车运用故障时的安全制动性能。文献[8]介绍了德国高速磁浮制动系统组成。文献[9]介绍了日本高速磁浮机械制动方式。

本文将首先介绍不同制动工况条件下的中低速磁浮列车制动系统; 然后详细分析德、日高速磁浮列车制动系统的制动原理、制动方式; 最后基于现有制动方式提出真空管道超高速磁浮列车制动系统的初步构想, 为后续研究磁浮列车的安全性、可靠性提供参考。

1 中低速磁浮列车制动系统

中低速磁浮交通具备性能稳定、环保性好、社会

效益高等优势, 为现代大中型城市提供了一种高效且经济的公共交通解决方案^[10-11]。2016年5月, 我国首条拥有完全自主知识产权的中低速磁浮线路长沙磁浮快线正式开通运营(图1)^[12]。目前, 国内外用于商业运营的中低速磁悬浮列车一般有3种制动工况, 分别为常用制动、快速制动与紧急制动^[5,13], 其具体的制动作用分析如下:



图1 长沙磁浮快线列车

Fig. 1 Changsha maglev express train

① 常用制动。常用制动通常为列车正常运行调速或进站停车时施加的制动。制动方式采用机械摩擦制动与再生电制动协同作用的复合制动。由于电机电动

通信作者: 陈敬东, 男, 主要从事电力电子及电力传动方面的研究; E-mail: lavender_cjd@163.com

引用格式: 曾凡飞, 陈敬东, 王旭阳, 等. 磁悬浮列车制动系统[J]. 机车电传动, 2025(4): 1-12.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.001.

Citation: ZENG Fanfei, CHEN Jingdong, WANG Xuyang, et al. Braking systems for maglev trains[J]. Electric drive for locomotives, 2025(4): 1-12.

DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.001.

势可表示为 $\varepsilon=\Phi n$ (式中 Φ 为系数, n 为电机转速), 且再生电制动力与电机电势 ε 成正比, 因此在列车运行速度低于 10 km/h 时, 电机转速的下降将导致再生制动力逐渐变小直至为 0、电制动被切除, 与此同时, 机械摩擦制动力将增大以弥补电制动力的缺失, 满足列车总制动力需求。这部分控制作用由制动电子控制单元来执行。

针对机械摩擦制动, 早期的中低速磁浮列车采用气-液转换的机械制动方式, 即通过增压油缸把来自制动电子控制单元的空气压力转换为液压制动力, 满足增压制动需求, 驱动制动夹钳进行制动^[14]。由于中低速磁浮列车的悬浮架与车轨之间的间隙狭小, 而气-液转换制动装置结构笨重、体积庞大, 后期新增磁悬浮列车全部采用了纯液压制动模式, 既减轻了列车重量, 又满足了车下空间狭窄安装应用的要求。机械制动器(图 2) 安装于车体上, 其内外制动夹钳分别位于钢轨两侧, 钢轨采用“F”型轨(图 3)。未制动时, 内外制动夹钳与钢轨保持一定距离。制动时, 液压缸加压使活塞伸出, 驱动外摩擦副接触钢轨外侧; 外制动夹钳在活塞作用下向活塞反方向移动以带动导向杆, 进而带动内制动夹钳向钢轨内侧面移动直至内摩擦副与钢轨内侧面接触; 此时内、外摩擦副分别与钢轨内、外两侧接触, 产生对钢轨内、外侧面的夹持力, 从而产生摩擦制动力。

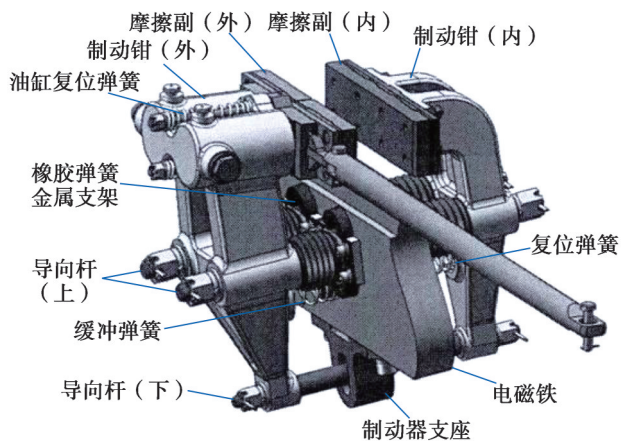


图2 机械制动器主要结构图^[5]

Fig. 2 Main structural components of mechanical braking^[5]

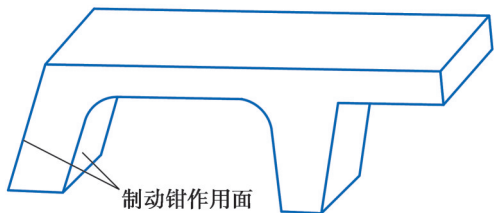


图3 钢轨结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of rail

② 快速制动。快速制动是一种在紧急情况下施加的高强度制动方式, 其目标是在达到与紧急制动相同

的减速度等级的同时, 具备一定的缓解控制能力, 以实现更柔性或可调节的制动过程。制动方式可采用通过液压制动与再生电制动协同工作的复合制动, 也可只采用气-液转换机械制动或纯液压机械制动。

③ 紧急制动。紧急制动为列车故障时施加的制动, 在制动过程中不可实施缓解作用, 也无冲动限制功能^[15]。制动方式采用气-液转换机械制动, 其制动力可根据不同载荷而进行自动调整。

目前, 中低速磁浮列车的运行速度一般不超过 120 km/h, 通过采用直线电机再生电制动与机械制动协同工作的复合制动模式即可实现列车的安全有效制动。

2 高速磁浮列车制动系统

世界各国城市发展和都市圈建设对轨道交通装备的运行速度提出了更高要求, 也使得匹配更高运行速度目标的高速客运交通制式需求更显迫切^[16-18]。相关研究表明, 传统轮轨系统受限于轮轨黏着作用, 其速度极限难以突破 500 km/h; 而磁浮列车为非接触牵引, 可实现 500 km/h 以上的更高运行速度。因此, 高速磁浮列车受到各国学术界与工程界较广泛的关注^[19-20], 其中德国和日本对高速磁浮列车的研究最早、最深入, 也是最先研制出磁浮试验车的国家。在技术路线方面, 德国主要采用电磁悬浮型 (electromagnetic suspension, EMS) 高速磁浮列车, 日本则主要采用电动悬浮型 (electrodynamic suspension, EDS) 高速磁浮列车。本文针对这两种不同的高速磁浮列车, 分别对其制动系统技术开展研究。

2.1 德国 TR 高速磁浮列车制动系统

德国磁浮列车研究始于 1966 年, 由其政府和企业联合开展, 先后对长定子 EDS 系统、短定子 EMS 系统和长定子 EMS 系统这 3 种技术体系进行了探索^[21]。1975 年, Thyssen Henschel 公司率先实现了由长定子直线同步电机驱动的磁浮列车运行, 为 Transrapid (TR) 高速磁浮系统的研究奠定了基础。1977 年, 德国联邦研究与技术部决定集中力量发展长定子直线同步电机驱动的常导磁浮交通系统。1991 年, 德国宣布 TR 高速磁浮系统技术已完全成熟, 并于次年由蒂森克虏伯公司研制出了设计时速为 450 km 的 TR-07 型磁浮列车(图 4)。2000 年中国决定在上海磁浮示范线引入德国 TR-08 磁浮列车(图 5), 该示范线在 2004 年开通运营^[22]。2007 年, 德国在 TR-08 基础上进一步优化, 研制出 TR-09 高速磁浮列车, 该车于 2009 年在试验中创造了 550 km/h 的最高运行速度。

TR 高速磁浮列车的代表车型 TR-07 采用的制动系统包含了长定子直线同步电机再生制动、涡流制动和相关机械制动。



图4 德国TR-07型高速磁浮列车
Fig. 4 German TR-07 high-speed maglev train



图5 上海高速磁浮列车
Fig. 5 Shanghai high-speed maglev train

2.1.1 常用制动

常用制动采用长定子直线同步电机再生制动^[23], 如图6所示。电机次级的励磁磁铁安装于列车悬浮架上, 其绕组水平向上排列布置; 电机定子绕组嵌在平铺的叠片铁心齿槽中, 水平朝下安装于T型轨道梁两侧下方。在列车再生电制动过程中, 通过降低地面初级绕组的供电频率, 使产生的行波磁场的移动速度低于次级磁铁的移动速度。此时, 直线同步电机进入发电状态, 运动中的次级励磁磁场会在定子绕组中产生变化的磁链, 从而感应出电动势和电流。该感应电流

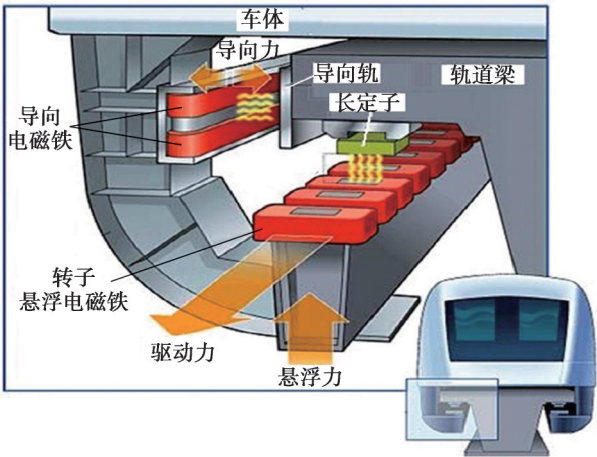


图6 TR磁浮导轨与转向架结构分布图^[24]
Fig. 6 Structural layout of guideway and bogie in TR maglev system^[24]

会产生一个作用于次级励磁磁铁的反向电磁力, 从而实现电制动的效果。

2.1.2 紧急制动

由于动摩擦系数的“速度弱化”效应^[25], 机械摩擦制动方式的制动效果在列车高速运行时急剧下降, 当列车运行速度超过350 km/h时, 其作用受限。因此, TR高速磁浮列车的紧急制动功能通过涡流制动与机械摩擦制动相结合的混合制动方式来实现。

列车涡流制动系统由涡流制动器、导轨及中间的气隙组成。TR高速磁浮列车用涡流制动器主要包括磁极、磁轭、磨耗板、悬挂系统等, 其结构如图7所示; 导轨由感应板及背板组成, 其中背板起到支撑感应板以及闭合磁路的作用。当涡流制动器与导轨做相对运动时, 会在感应板上产生随时间变化的磁感应强度, 根据电磁感应定律, 该时变的磁感应强度将在导电的感应板内感生出涡流。涡流磁场与励磁磁场相互叠加, 使气隙磁场发生畸变: 在运行方向上, 涡流制动器前端磁场被削弱, 后端磁场被增强, 如图8所示。这种不对称的磁场分布, 最终在与运行方向相反的方向上产生一个水平分力 F_x , 该力即为涡流制动力^[26-28]。

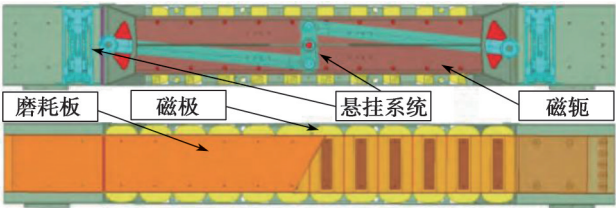


图7 涡流制动器^[28]
Fig. 7 Eddy current brake^[28]

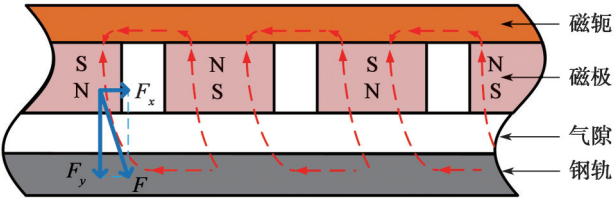


图8 涡流制动力示意图
Fig. 8 Schematic diagram of eddy current braking force

涡流制动能提供较大的制动力, 且不依赖于轮轨间的黏着, 在磁浮列车高速行驶工况下, 可实现较大的制动减速度以应对紧急减速或停车。但仅采用涡流制动的紧急制动方案不够完善。早在20世纪70年代, 法国国营铁路公司联合克诺尔集团在Z7001型试验高速动车组上加装了涡流制动装置并进行了大量测试^[29]。结果显示, 该装置在高速区段制动效能较为理想, 但在低速运行时制动力显著下降。若无其他制动方式配合, 会严重影响列车整体制动性能。因此, TR磁浮列车采用了涡流制动与机械摩擦制动相结合的混合制动方式。

TR高速磁浮列车的制动特性曲线如图9所示。由图9可知, 随着车速的降低, 涡流制动电磁铁与导向轨

之间的吸引力增大，使得电磁铁逐渐向导轨方向移动，空气间隙随之减小^[30-31]。由于该电磁铁靠近轨道一侧的磁极上方装有非磁性磨耗板（图 10），当列车速度低于 150 km/h 时，该吸引力会使磁铁磨耗板与导向轨接触，进而产生阻性的机械摩擦力，之后该阻性摩擦力和电磁阻力一起提供列车减速的制动力。

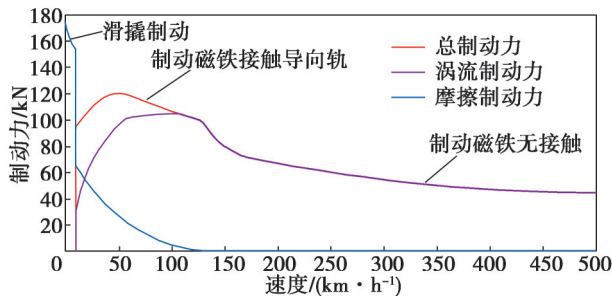


图 9 列车制动特性曲线^[23]
Fig. 9 Characteristics curve of train braking^[23]

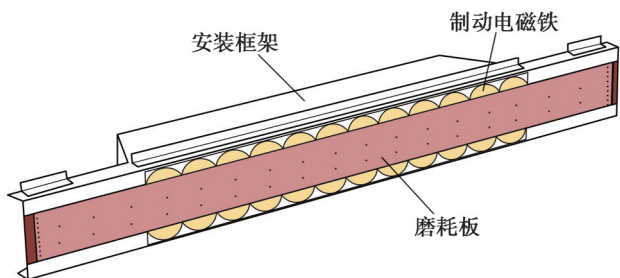


图 10 涡流制动电磁铁结构示意图
Fig. 10 Structure diagram of electromagnet in eddy current brake

当列车速度进一步降低至 10 km/h 时，将放下滑撬制动装置（图 11）。与此同时，涡流制动系统被切除，列车脱离悬浮状态。随后，安装在悬浮架上的滑撬装置与轨道发生机械摩擦，产生制动力，使列车减速并最终滑行至辅助停车点。

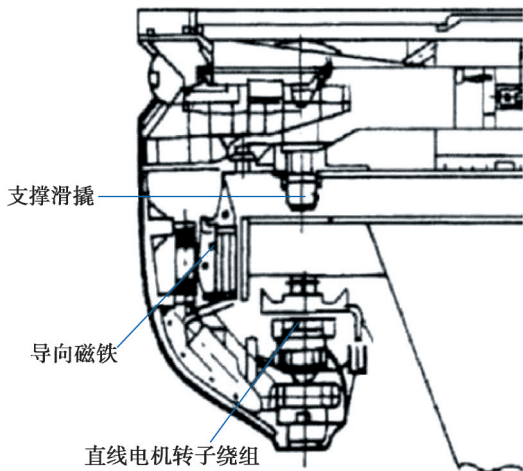


图 11 车轨局部断面图
Fig. 11 Partial cross-section of train-guideway structure

滑撬制动在高速磁悬浮列车制动过程中主要用于安全制动、落车制动、停放制动场景；在停放制动时，

滑撬制动装置可下降至“F”型轨上，为整车提供静态支撑。在安全制动、落车制动场景中，当列车速度不大于 10 km/h 时滑撬制动装置才会发挥作用；当列车在运行中发生悬浮架悬浮系统、供电系统故障时，滑撬制动装置也可协助高速磁悬浮列车停车。

2.2 日本 ML 高速磁浮列车制动系统

1962 年，日本基于本国环境，选择了直线电机驱动与低温超导技术路线。该技术方案具有以下特点：①采用 100 mm 的大悬浮高度，降低了对轨道加工精度与养护维修的要求，能更好地适应地震频发的环境；②其 EDS 系统具有自稳定性，无需复杂的全域控制系统；③采用无车载励磁电源的超导磁铁，实现了车辆的轻量化。基于此，日本于 1974 年启动了宫崎超导磁浮试验线的建设，并成立了超导磁浮试验中心^[32-34]。后持续投入，又建设了用于实用性论证的山梨试验线，并研制了多代试验车（图 12），制订了相关标准。目前建设的连接首都东京和中部城市名古屋的磁悬浮中央新干线，全长 286 km，计划 2027 年投入运营。



图 12 MLX-01 试验车
Fig. 12 MLX-01 test train

以 MLX-01 高速磁浮列车为例，其制动系统由再生电制动和车载机械摩擦制动组成。

2.2.1 常用制动

MLX-01 磁浮列车所采用的长定子直线同步电机由铺设于轨道侧壁的初级驱动绕组和车载超导磁体（superconducting magnet, SCM）次级绕组组成。超导绕组使用铌钛合金制造，在 -269 °C 的温度下呈现超导状态。山梨试验线上使用的低温超导磁铁如图 13 所示。MLX-01 列车每节车厢两侧均装有极性交替（N/S 极）排列的低温超导磁体（图 14）。通过精确控制沿线侧壁驱动绕组的电流相位，使其产生的行波磁场与车载超导磁体的磁场相互作用：前方磁极间产生吸引力，后方磁极间产生排斥力，二者的合力共同推动车辆前进^[35]。

在列车再生电制动时，首先降低轨道侧壁驱动绕组的供电频率，使行波磁场的同步速度低于惯性滑行的列车速度。此时，直线同步电机进入发电状态。车

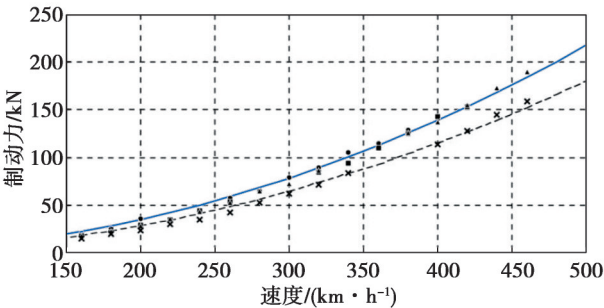


图 19 空气动力制动力试验结果^[38]
Fig. 19 Experimental results of aerodynamic braking force^[38]

ML 高速磁浮列车将空气翼展风阻制动和轮盘制动相结合作为紧急制动，在 400 km/h 以上时以空气风阻制动为主；在中高速、低速域制动时，采用再生电制动、轮盘制动；在过渡期间，轮盘制动按照设定的制动模式对空气动力制动力的降低进行补偿。

2.3 德日高速磁浮列车制动系统对比

综合分析得到德国和日本高速磁浮列车制动系统对比结果如表 1 所示。

表 1 德日高速磁浮列车制动系统对比

Table 1 Comparison of braking systems in German and Japanese high-speed maglev trains

制动方式	适用工况	动能流向	启用速度	特点
德国	再生制动	常用制动 电能	列车当前运行速度	通过地面初级绕组和次级电磁铁的相对运动，改变电机工况进行制动
	涡流制动	紧急制动 热能	列车当前运行速度	根据电磁感应定律产生阻性电磁力进行制动，该方式在高速域的制动力较大
	涡流磨损板制动	紧急制动 热能	150 km/h	通过制动磨损板夹紧导向轨产生的摩擦力制动
	滑橇制动	紧急制动 热能	10 km/h	通过滑橇与滑行轨摩擦制动，并依靠滑橇滑行至停车点
日本	再生制动	常用制动 电能	列车当前运行速度	通过侧壁初级绕组和次级超导绕组的相对运动，进而改变电机工况进行制动
	轮盘制动	常用制动/紧急制动 热能	150 km/h	在列车低速时依靠机械摩擦保持较大制动力，提供低速域的高制动力
	空气动力制动	紧急制动 热能	列车当前运行速度	利用高速行驶时的空气阻力制动，高速域制动效果显著

2.4 其他高速磁浮列车制动系统

除德国和日本两套较为成熟的高速磁浮列车制动技术体系之外，随着各国对高速磁浮交通需求的日益

增长，学术界和工程界也涌现出许多关于其他制动方式的研究，包括磁轨制动、线圈短路制动以及对现有制动方式的改进等。

磁轨制动是非黏着制动方式的一种，具有结构简单、安全性高和制动力大等优势。这种制动方式在欧洲的城市有轨电车、干线铁路和高速列车上均有应用，例如 ICE1、ICE2 型动车组^[39-41]。磁轨制动有低悬挂磁轨和高悬挂磁轨两类，低悬挂磁轨通常用于时速不超过 120 km 的地铁或轻轨列车，高悬挂磁轨通常应用于高速列车。高悬挂磁轨的磁铁安装位置较高（距轨面 120~160 mm），其目的是避免磁铁被轨道异物撞击损坏，因此更适合高速磁浮列车。磁轨制动器工作原理如图 20 所示。制动时，控制悬挂单元下移，使制动器落于钢轨，通电线圈产生的磁场不再受极靴隔板的阻碍，可通过极靴和钢轨形成闭合磁路。该磁路产生的电磁吸力在制动器与钢轨间产生正压力，进而通过相对运动转化为摩擦制动力。因磁轨制动的非黏着制动性质以及其成熟的应用技术，在高速磁浮制动系统中有着良好的应用前景。

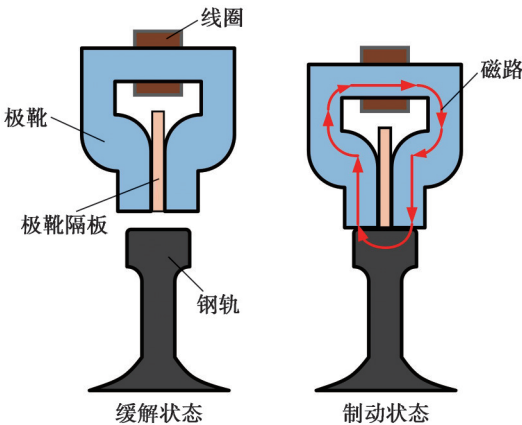


图 20 磁轨制动器工作原理
Fig. 20 Schematic diagram of magnetic track brake

对于高速磁浮列车采用的长定子直线同步电机而言，短路制动也可作为一种非黏着制动方式^[42-43]。短路制动是通过将一部分定子绕组切换到短路模式来实现的。制动时，由于惯性，列车携车载励磁磁场继续运动，该运动磁场与短路的定子绕组共同作用，定子绕组依据法拉第电磁感应定律感应出短路电流，继而再产生一个阻碍相对运动的力矩，由此制动。在此过程中，列车的动能最终在定子绕组的电阻上以热能形式耗散。因此，这部分定子绕组在整个制动期间需保持短路以维持制动效果。但短路制动时间也不宜过长以免导致线圈过热而损毁。短路制动通常被设置为短时内持续，当列车速度降至较低时，系统将退出短路制动，转而由机械制动系统接替，两者共同完成整个制动过程的制动任务。

文献[44]提出了一种基于摩擦制动的高速磁浮新型

电机机械结构制动系统, 包含了电机机械制动控制模块和电机机械摩擦制动装置。电机机械摩擦制动装置如图21所示, 由电机机械制动缸、连杆组件和磨耗板组成。与传统的活塞式机械制动不同, 该电机机械制动缸(图22)内设有丝杠、离合器、电机组件和减速机等机构, 制动时通过电机组件和丝杠的连接将旋转运动转换为平动从而产生大推力, 实现制动作用。该摩擦制动与TR磁浮列车的磨耗板制动都是通过磨耗板夹紧轨道进而产生制动力, 两者都可完成高速磁浮列车在低速域的有效制动, 不同之处在于TR磁浮列车是通过电磁力实现磨耗板与导向轨接触摩擦, 而这种新型摩擦制动方式是通过控制模块和机械装置使磨耗板夹紧来实现制动。

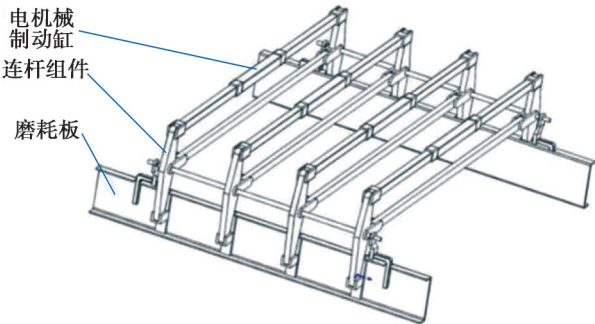


图21 电机机械摩擦制动装置结构示意图

Fig. 21 Structure diagram of electromechanical friction brake

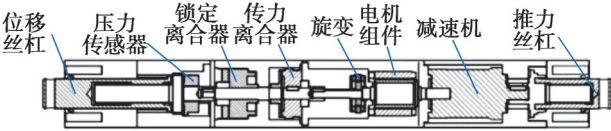


图22 电机机械制动缸结构示意图

Fig. 22 Structure diagram of electromechanical brake cylinder

3 超高速磁浮列车制动系统初步设想

3.1 发展背景

中共中央、国务院于2019年9月印发《交通强国建设纲要》，提出合理统筹安排时速600 km级高速磁悬浮系统、时速400 km级高速轮轨客运列车系统、低真空管道高速列车等技术储备研发^[45]。

以轮轨作用关系为基础的高速列车, 其运营速度达到400 km/h时, 已逼近安全和成本极限^[46], 通过系统优化或可达500 km/h, 但此时空气阻力将占运行总阻力的92%左右, 而且气动噪声强度与列车运行速度的7~8次方成正比^[47], 急剧增加的噪声将严重影响乘客出行体验。因此速度极限的进一步突破需借助真空管道构建低气压环境来解决空气阻力及噪声问题, 同时也可以明确, 时速600 km级以上的交通运输制式需以磁悬浮技术为载体。

2013年, 美国提出Hyperloop初步方案, 即建设运行于真空管道内、时速高达1 200 km的超高速远距离

运输系统, 该方案引发各国学术界和工程界的热议讨论^[48]。目前国内外对真空管道磁浮列车的研究仍处于起步阶段。2015年成立的加拿大TransPod公司和2016年成立的西班牙Zeleros Hyperloop公司均提出以航空发动机技术为基础开展Hyperloop的研发(图23)^[49]。国内中国航天科工集团、中国铁道科学研究院、西南交通大学、北京交通大学等单位正在致力于低真空管道高速磁浮系统的研究。其中, 中国航天科工三院于2023年1月14日在山西阳高高速飞车试验基地完成了超高速低真空管道磁浮交通系统全尺寸一期试验线的首次超导航行试验并取得成功^[50], 高速飞车样机如图24所示。

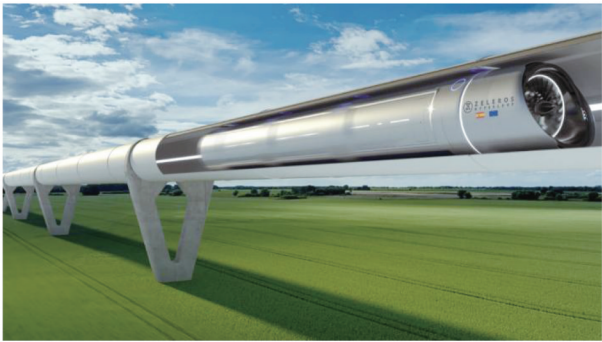


图23 Zeleros Hyperloop概念图

Fig. 23 Conceptual design of Zeleros Hyperloop

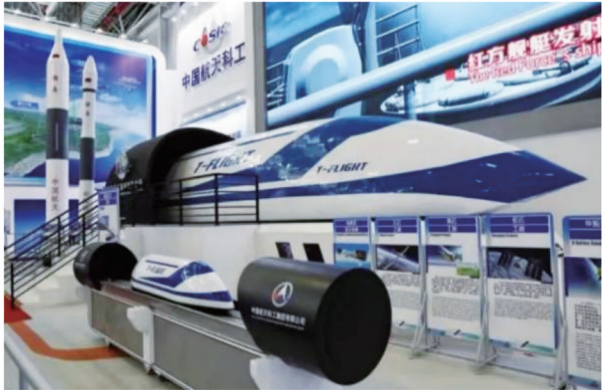


图24 航天三院高速飞车样机

Fig. 24 "High-speed flying train" prototype developed by HIWING Technology Academy of CASIC

3.2 初步设想

目前, 低真空管道超高速磁浮系统尚无太多成功经验可借鉴。本文基于对制动方式的分析, 考虑到超导电动磁浮列车悬浮高度大、悬浮系统可自稳定以及无需车载励磁电源等优势, 以其为分析对象, 提出关于低真空管道超高速磁浮列车制动系统的初步设想, 并分析可能存在的技术问题。

3.2.1 常用制动

再生电制动仍是磁浮列车正常工况下减速进站制动方式的首选。目前, 采用大功率直线同步电机施加牵引力并通过其再生电制动实现常用制动已成为发展

低真空管道超高速磁浮列车的研究共识^[51],因此在低真空环境下电机的电/热特性、解耦机理、暂态能量转换控制规律以及对电机再生制动力的精确控制等均需进一步分析探究;同时,为提升控制精确,列车通常会采用再生电制动与其他机械摩擦制动相配合的复合制动模式,在列车速度较低、再生电制动力不足时由机械摩擦制动进行补充。

气-液转换机械摩擦制动需通过增压油缸将空气压力增大并转换为液压(图25)进而驱动制动夹钳(片)进行制动^[13],该方式作为传统机械摩擦制动仍具有现实意义。但随着电气化技术的发展,诞生于上世纪末的电机械制动技术(electro-mechanical brake, EMB)可彻底摆脱传统制动对压力空气等介质的依赖,与低真空环境和超导电动磁浮列车低速时车轮下落的车体条件都十分契合。

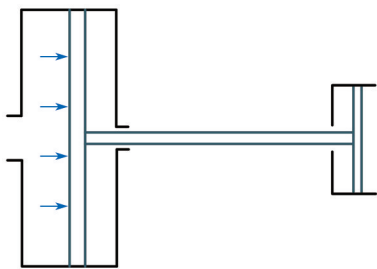


图25 增压缸原理简图

Fig. 25 Schematic diagram of pressure cylinder

EMB技术最早在航空领域提出,之后逐渐广泛应用于轨道交通领域^[52-54]。日本鹿儿岛市交通局曾在1000型低地板有轨电车上试装EMB制动器^[55],国内同济大学开展了适用于轨道车辆的EMB系统设计^[56],电机械盘形制动单元(图26)外形与气压型制动单元一致,仅将驱动方式由气动变为电动。轨道交通行业设计运用经验为磁浮列车的低速域应用提供了技术基础^[57],但实际使用仍需开展进一步研究,主要包括两个方面:一为结构优化设计,即基于列车需求优化主要部件的结构设计、实现各部件的合理布局等;二为控制算法



图26 电机械盘形制动单元

Fig. 26 Electromechanical disc brake unit

研究,即设计一套控制算法,实现精确输出所需的制动夹紧力、提升制动反应速度及识别投入临界速度点等,保障EMB系统安全、高效运行。

3.2.2 紧急制动

由于机械摩擦制动不适用于高速域紧急制动,ML高速磁浮列车采用的空气动力制动系统不适用于低真空环境,而涡流制动无须空气参与、体积小、可控性高,且其低速域制动力的衰减也可由EMB制动来补充,因此低真空管道超高速磁浮列车的紧急制动较适合采用涡流制动方式。

采用涡流制动时,需额外沿线设置金属感应板以构成闭合磁路,且鉴于超导电动磁浮U型轨侧壁线圈的电磁关系复杂,感应板铺设于U型轨底面较为适宜,同时制动磁铁可安装在悬浮架两侧,与感应板平行。

涡流制动的应用还需考虑如下几方面内容:①大气隙下涡流制动力的衰减问题。图27显示了涡流制动系统中车载励磁磁极与感应板间气隙厚度对制动力的影响^[58]。由图27可知,随着气隙厚度的增大,制动力不断降低,且降低的趋势逐渐变缓。由于EDS列车在高速运行时其车底与轨面的间距大于10 cm,因此在优化大气隙下涡流制动力性能方面仍需进行深入研究。②涡流制动时钢轨产生高热的热演变过程及消散方式。为避免损毁轨道及其他设备,该方向需进行深入研究。③宽域、高密度的涡流制动技术。超高速运行对涡流制动器的制动力密度和速域范围有更高要求。④涡流产生的感应电磁场对其他设备的影响。该感应电磁场极易影响其他系统的正常工作,如车-地无线通信系统。高速磁浮列车牵引与悬浮控制系统所需的列车位置信息,其传输延迟要求为低于5 ms,而高速移动带来的频繁的越区切换和多普勒效应问题^[59],以及金属密闭管道内存在的波导现象^[60],均会影响无线通信系统,因此屏蔽涡流感应电磁场至关重要。⑤EMB轮盘制动的备用制动。EMB虽有技术优势,但较传统机械摩擦制动而言,电气器件的故障率相对偏高,因此还需配备备用制动以提高列车安全运行系数。

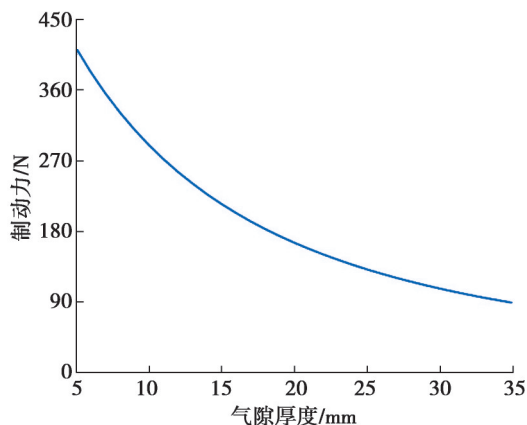


图27 涡流制动力随气隙变化曲线^[58]

Fig. 27 Eddy current braking force curve varying with the air gap^[58]

磁轨制动结构简单且制动力较大, 可作为备用制动。设计时需明确制动电磁铁在不同励磁电流下与感应板的吸力特性, 得到效率最优的匹配组合; 同时, 磁轨制动的磨耗部件与钢轨的摩擦热特性、摩擦材料的选取等也需进一步研究。

综合分析可知, 运行在低真空管道内的列车在进行紧急制动时, 不可避免地产生大量热量, 造成管道空间环境和电机、轨道等相关设备的温升, 温升问题严重时会影响列车的安全运行^[61-62]。因此, 在系统设计中, 如何有效地进行热管理以抑制环境温升并最小化其对乘客与环境的影响, 是一项关键的技术挑战。

3.2.3 超高速列车制动系统

综合上文对低真空管道超高速低温超导 EDS 列车在常用制动和紧急制动工况下所采用制动方式的分析, 形成系统概况如表2所示。

表2 超高速磁浮列车整体制动系统设想及相关技术特点
Table 2 Conceptual design of braking system for ultra-high-speed maglev train and its technical features

制动 工况	制动 方式	启用速度	应用优势	相关关键技术
常用 制动	再生制动	列车当前 运行速度	技术成熟, 超 高速制动效果 显著	低真空环境下电机 的电/热特性, 解耦 机理, 暂态能量转 换控制规律等
	EMB 轮盘制动	150 km/h	电信号响应速 度快, 环境污 染小	结构优化设计, 控 制算法研究
紧急 制动	涡流制动	列车当前 运行速度	制动力易于实 现控制, 适用 于紧急情况就 近停车	金属感应板的设计 铺设, 气隙对制动 力的影响与优化, 电磁干扰等
	EMB 轮盘制动	150 km/h	电信号响应速 度快, 环境污 染小	结构优化设计, 控 制算法研究
	磁轨制动 (备用 制动)	150 km/h	制动力大, 适 用于低速域紧 急制动	不同励磁电流下电 磁铁的吸力特性, 磨耗散热问题及磨 耗材料选择等

4 结束语

磁悬浮交通系统作为一种非接触式的轨道交通制式, 具有优越的高速、环保性能, 被认为是目前铁路运输行业重点研发的方向之一。制动系统对于磁浮列车的安全稳定运行至关重要。

本文针对不同速度范围、不同运行工况下磁浮列车的制动系统进行研究, 梳理了制动需求和制动原理, 提出了低真空管道超高速磁浮列车制动系统的初步设想, 并分析了制动系统方案相关的关键技术问题, 为后续的技术研究和产品开发提供指导。未来通过专家

学者的持续深入研究, 相关关键技术问题终将被逐一解决, 并最终实现低真空管道高速磁浮系统的实际应用。

参考文献:

[1] THORNTON R D. Efficient and affordable maglev opportunities in the United States[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(11): 1901-1921.

[2] LEE H W, KIM K C, LEE J. Review of maglev train technologies[J]. IEEE transactions on magnetics, 2006, 42(7): 1917-1925.

[3] LIU Zhigang, LONG Zhiqiang, LI Xiaolong. Maglev trains [M]. Berlin: Springer, 2015: 1-28.

[4] HOU Shengjie, DOU Fengshan, LI Yungang, et al. Assessment model of the maglev train braking system safety pre-warning and the optimization of parameters[C]//IEEE. 2016 Chinese Control and Decision Conference. Yinchuan: IEEE, 2016: 4915-4920.

[5] 赵海涛. 中低速磁悬浮列车制动系统性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

ZHAO Haitao. Study on braking system of mid-low speed maglev train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[6] 滕辉, 杨昌锋. 高速动车组与常导磁浮车辆制动系统差异分析[J]. 自动化应用, 2022(1): 46-47.

TENG Hui, YANG Changfeng. Analysis of the difference between the high-speed EMU and the conventional magnetic levitation vehicle braking system[J]. Automation application, 2022(1): 46-47.

[7] 曹洪凯, 李倩, 梁旭, 等. 磁浮列车安全制动性能研究[J]. 铁道机车与动车, 2020(6): 7-10.

CAO Hongkai, LI Qian, LIANG Xu, et al. Research on safety braking performance of maglev train[J]. Railway locomotive and motor car, 2020(6): 7-10.

[8] 刘少克. 德国磁悬浮列车 TR07 推进和制动系统[J]. 机车电传动, 2000(3): 10-12.

LIU Shaoke. The propulsive and braking systems of German maglev vehicle TR07[J]. Electric drive for locomotives, 2000(3): 10-12.

[9] SEINO H, AZAKAMI M, YOSHIOKA H, et al. Developments and test results of wheel-disk braking systems for the maglev vehicles[J]. Railway technical research institute, quarterly reports, 1998, 39(2): 00751783.

[10] 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.

[11] 赵丰年, 邱冰, 彭立, 等. 中低速磁浮在旅游交通领域适应性研究[J]. 铁道勘察, 2021, 47(1): 59-63.

- ZHAO Fengnian, QIU Bing, PENG Li, et al. Study on the adaptability of medium-low speed maglev in tourism transportation[J]. Railway investigation and surveying, 2021, 47(1): 59-63.
- [12] 佟来生. 长沙磁浮快线列车概述[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(4): 1-5.
- TONG Laisheng. Summary of Changsha maglev express train[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2020, 43(4): 1-5.
- [13] TAN Qinglong, QI Hongfeng, LI Jiangsuo, et al. The reliability modeling and analysis on brake system of medium-low speed maglev train[C]/IEEE. 2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring. Zhangjiajie: IEEE, 2012: 772-777.
- [14] 孙介夫. 中低速磁悬浮列车基础制动装置闸片偏磨研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
- SUN Jie fu. Research on brake pad eccentric wear of foundation brake rigging of the mid-low speed maglev train[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.
- [15] 金建春. 浅谈地铁制动控制与列车冲动[J]. 城市建设理论研究, 2014(28): 2039.
- JIN Jianchun. On subway braking control and train impulse[J]. Urban construction theory research, 2014(28): 2039.
- [16] GIVONI M. Development and impact of the modern high-speed train: a review[J]. Transport reviews, 2006, 26(5): 593-611.
- [17] 梁建英. 中国高速磁浮交通系统发展现状与展望[J]. 科学, 2022, 74(5): 31-36.
- LIANG Jianying. Development status and future prospects of the high-speed maglev transportation system in China[J]. Science, 2022, 74(5): 31-36.
- [18] HOLMER P. Faster than a speeding bullet train[J]. IEEE spectrum, 2003, 40(8): 30-34.
- [19] 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 Shihui, DENG Zigang. 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.
- [20] HÄGELE N, DIGNATH F. Vertical dynamics of the maglev vehicle transrapid[J]. Multibody system dynamics, 2009, 21(3): 213-231.
- [21] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- WU Xiangming. Maglev train[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2003.
- [22] 吴祥明, 常文森, 刘万明. 上海高速磁浮列车及磁浮技术发展刍议[J]. 综合运输, 2005(1): 28-31.
- WU Xiangming, CHANG Wensen, LIU Wanming. Discussion on the high-speed magnetic suspension train and magnetic suspension technology development of Shanghai[J]. Comprehensive transportation, 2005(1): 28-31.
- [23] 魏庆朝, 孔永健, 时瑾. 磁浮铁路系统与技术[M]. 2 版. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- WEI Qingchao, KONG Yongjian, SHI Jin. System and technology for maglev transit[M]. 2nd ed. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [24] 楚志恒. 电动式高速磁浮系统直线发电机的设计与阻尼特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- CHU Zhiheng. Research on design and damping characteristics of electric high-speed maglev linear generator[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [25] 陈坤. 轮轨动摩擦系数影响因素的试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- CHEN Kun. Experimental study on influencing factors of friction coefficient of wheel[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [26] CHO S, LIU Huaicong, LEE J, et al. Design and analysis of the eddy current brake with the winding change[J]. Journal of magnetism, 2017, 22(1): 23-28.
- [27] CHEN Chuntao, XU Jie, WU Xinzheng. Analytical calculation of braking force of super-high speed maglev eddy current braking system[C]/IEEE. 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems. Harbin: IEEE, 2019: 1-5.
- [28] 王明星, 陈萍, 杨昌锋, 等. 高速磁浮列车涡流制动力仿真分析[J]. 机车电传动, 2020(6): 47-50.
- WANG Mingxing, CHEN Ping, YANG Changfeng, et al. Simulation analysis on eddy current braking force of high-speed maglev train[J]. Electric drive for locomotives, 2020(6): 47-50.
- [29] 邓长青. 城轨车辆涡流制动技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- DENG Changqing. Research on eddy current braking technology of urban rail vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [30] 朱仙福, 罗会美, 邵丙衡. 磁悬浮列车的涡流制动问题[J]. 机车电传动, 2001(4): 32-34.
- ZHU Xianfu, LUO Huimei, SHAO Bingheng. Problems on eddy current brake of maglev train[J]. Electric drive for locomotives, 2001(4): 32-34.
- [31] LIU Jun, LI Wei, JIN Lijun, et al. Analysis of linear eddy current brakes for maglev train using an equivalent circuit method[J]. IET electrical systems in transportation, 2021, 11(3): 218-226.
- [32] 沈通, 马志文, 杜晓洁, 等. 世界高速磁悬浮铁路发展现状与趋势分析[J]. 中国铁路, 2020(11): 94-99.
- SHEN Tong, MA Zhiwen, DU Xiaojie, et al. Development status and trend analysis of high speed maglev railways worldwide[J]. Chinese railways, 2020(11): 94-99.
- [33] 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 techno-

- logical prospects of applications for superconducting electrodynamic suspension[J]. Electric drive for locomotives, 2023(4): 1-8.
- [34] SAWADA K. Outlook of the superconducting maglev[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(11): 1881-1885.
- [35] ONO M, KOGA S, OHTSUKI H. Japan's superconducting maglev train[J]. IEEE instrumentation & measurement magazine, 2002, 5(1): 9-15.
- [36] YUTAKA O, JUN-ICHI K, HARUO I, et al. The drive control system of Yamanashi maglev test line[J]. IEEE transactions on industry applications, 1999, 119(3): 308-314.
- [37] 曲选辉, 章林, 吴佩芳, 等. 现代轨道交通刹车材料的发展与应用[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(2): 1-9.
- QU Xuanhui, ZHANG Lin, WU Peifang, et al. Development and application of braking materials for modern rail transit vehicles[J]. Materials science and technology, 2017, 25(2): 1-9.
- [38] YOSHIMURA M, SAITO S, HOSAKA S, et al. Characteristics of the aerodynamic brake of the vehicle on the Yamanashi maglev test line[J]. Quarterly report of RTRI, 2000, 41(2): 74-78.
- [39] 王可, 丁福焰, 宋跃超, 等. 低地板有轨电车磁轨制动装置的研究[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(3): 92-96.
- WANG Ke, DING Fuyan, SONG Yuechao, et al. Study of magnetic track brake equipment for low floor tramcar[J]. Railway locomotive & car, 2016, 36(3): 92-96.
- [40] XIANG Chun, WANG Juncheng, GU Yufeng, et al. Experiment, optimization, and design of electromagnetic track brake for high-speed railways system[J]. Mathematical problems in engineering, 2020, 2020(1): 6957963.
- [41] П.С.Анисимов. 高速列车的制动设备[J]. 国外机车车辆工艺, 2013(2): 33-37.
- П.С.Анисимов. Braking equipment of high-speed trains[J]. Foreign locomotive & rolling stock technology, 2013(2): 33-37.
- [42] A·韦伯, L·法尚, S·布鲁克尔. 长定子直线电机的短路制动: CN201910513135.0[P]. 2019-06-14.
- WEBER A, FASHAN L, BRUCAR S. Short-circuit braking of long stator linear motor: CN201910513135.0[P]. 2019-06-14.
- [43] 姜付杰, 王云飞, 张志强, 等. 一种高速磁浮列车制动系统及方法: CN202011090916.2[P]. 2020-10-13.
- JIANG Fujie, WANG Yunfei, ZHANG Zhiqiang, et al. A braking system and method for high-speed maglev train: CN202011090916.2[P]. 2020-10-13.
- [44] 马天和. 一种高速磁浮电机机械制动系统及方法: CN202210992205.7[P]. 2022-08-18.
- MA Tianhe. A high-speed maglev electro-mechanical braking system and method: CN202210992205.7[P]. 2022-08-18.
- [45] 中共中央, 国务院. 中共中央 国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. (2019-09-19) [2025-04-22]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
- The Central Committee of the Communist Party of China, State Council. The Central Committee of the Communist Party of China and The State Council have issued the "Outline for Building a Strong Transportation Nation"[EB/OL]. (2019-09-19) [2025-04-22]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
- [46] 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 Zhiyun. Two wrong views on the technical understanding of maglev high-speed train[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2004, 4(1): 1-2.
- [47] 李倩. 600 km/h真空管高速列车车内气动噪声仿真分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- LI Qian. Simulation of aerodynamic noise in 600 km/h vacuum tube high speed train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [48] MUSK Elon Reeve. Hyperloop alpha[EB/OL]. [2025-05-16]. https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf.
- [49] VARINDIA. Zeleros raises 7M€ in financing to lead the development of hyperloop in Europe[EB/OL]. (2020-06-02) [2024-11-21]. <https://varindia.com/news/zeleros-raises-7m-in-financing-to-lead-the-development-of-hyperloop-in-europe>.
- [50] 中国航天科工三院电磁总体部. 国内首次全尺寸超导航行试验成功[EB/OL]. (2023-01-14) [2024-11-21]. https://mp.weixin.qq.com/s/_dPNZyZqVDNCsqUcOhZC2Q.
- HIWING Technology Academy of CASIC, General Department of Magnetism and Electricity. The first full-scale superconducting navigation test in China was successful[EB/OL]. (2023-01-14) [2024-11-21]. https://mp.weixin.qq.com/s/_dPNZyZqVDNCsqUcOhZC2Q.
- [51] 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 Jiayang, DENG Zigang. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1): 177-198.
- [52] MOSELEY D D, CARTER T J. Performance testing of an electrically actuated aircraft braking system: SAE Technical Paper 881399[R]. Warrendale: SAE International, 1988.
- [53] LIU Zehua, LI Zhenshui, QIN Cheng. The review and development of the brake system for civil aircrafts[C]//IEEE. 2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems. Beijing: IEEE, 2016: 762-767.
- [54] 朱雪青. 电子机械式制动器的控制方法研究[J]. 客车技术, 2019(3): 3-7.
- ZHU Xueqing. Research on control method of electronic mechanical brake[J]. Bus technology, 2019(3): 3-7.
- [55] AGASAKI Electric Tramway. Detailed report of 3000-tram[EB/OL]. [2024-11-14]. <http://nagaden.fc2web.com/geneki/>

- report-3000gata/3000-yukasita/3000-yukasita.html.
- [56] 吴萌岭, 周嘉俊, 田春, 等. 轨道交通制动系统创新技术[J]. 现代城市轨道交通, 2019(7): 30-35.
- WU Mengling, ZHOU Jiajun, TIAN Chun, et al. Innovative technology of rail transit braking system[J]. Modern urban transit, 2019(7): 30-35.
- [57] 张帅. 电子机械制动(EMB)控制策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- ZHANG Shuai. Research on control strategy of electro-mechanical braking(EMB) [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [58] 韩亚鹏. 电磁涡流制动系统及其对高速磁浮列车制动特性影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- HAN Yapeng. Electromagnetic eddy current braking system and its influence on the braking characteristics of high-speed maglev train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [59] YANG Haining, SHE Meili, LI Tingjun, et al. The effect of vacuum tunnel on millimeter-wave propagation in high-speed maglev train communication[C]//Association for Computing Machinery. Proceedings of the 2021 2nd International Conference on Computing, Networks and Internet of Thing. Beijing: Association for Computing Machinery, 2021: 1-7.
- [60] 刘振玉, 杨凯, 樊亮, 等. 真空管道超高速磁悬浮列车通信信号系统展望[J]. 控制与信息技术, 2021(4): 103-108.
- LIU Zhenyu, YANG Kai, FAN Liang, et al. Outlook of the communication & signaling system for vacuum pipeline ultra high speed maglev train[J]. Control and information technology, 2021(4): 103-108.
- [61] 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 Wenguang. The characteristic investigation of evacuated tube transport system on thermodynamics[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2013.
- [62] 张俊博, 李红梅, 王俊彪, 等. 低真空管道磁悬浮列车热效应仿真分析研究[J]. 中国铁路, 2020(11): 100-106.
- ZHANG Junbo, LI Hongmei, WANG Junbiao, et al. Simulation analysis and research on thermal effect of maglev train in low vacuum tube[J]. Chinese railways, 2020(11): 100-106.

Braking systems for maglev trains

ZENG Fanfei^{1,2}, CHEN Jingdong¹, WANG Xuyang¹, KONG Yanwei¹, FANG Xiaochun², LIN Fei²

(1. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Magnetic levitation (maglev) transportation, as an innovative rail transit system, offers distinctive advantages such as ultra-high operating speeds, low noise, and environmental sustainability. Among its key components, the braking system plays a pivotal role in ensuring the safety, reliability, and stability of train operation. This paper first reviews the technological background and development of maglev transportation. It then analyzes the braking systems of medium- and low-speed maglev trains under various braking scenarios. Special emphasis is placed on discussing the operational mechanisms of several braking modes, including magnetic track braking, coil short-circuit braking, and improved mechanical braking, within the context of Germany's Transrapid (TR) and Japan's ML high-speed maglev systems. Finally, a conceptual design for the braking system tailored to ultra-high-speed maglev trains operating within low-vacuum tubes was proposed, along with a discussion of the key technical challenges associated with its implementation. The discussions presented in this paper provide theoretical and engineering references for the future design and optimization of braking systems for maglev trains.

Keywords: maglev train; braking system; vacuum tube; high-speed train