DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.04.001　　文章编号：1000-128X(2023)04-0001-08

超导电动悬浮应用研究与技术展望

于青松，李　凯，胡　浩，刘洪涛，邵　南，刘　帅
（中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所，吉林 长春　130062）

摘　要：相比于传统交通工具，高速磁浮列车具有其他交通方式无可比拟的优势，通过多年的研究与实践，国际上形成了电磁悬浮与电动悬浮2种较成熟的磁悬浮制式。超导电动悬浮具备潜在的高速、超高速运行应用优势，具有系统结构拓扑简洁、可靠性高、更好的浮重比、更大的悬浮间隙，悬浮系统自稳定等特点。文章概述了日本、韩国、美国、中国的电动悬浮技术应用研究进展，详细介绍了中车长春轨道客车股份有限公司研制的高温超导电动悬浮全要素试验系统，该试验系统的建设对超导电动悬浮关键技术的研究与设计方法的校核提供了有力的支持。目前，超导电动悬浮列车仍处于工程化验证的探索和起步阶段，需要得到相关研究机构的重视、扩充研发力量，解决关键部件、配套装备、试验线路等相关研发问题。未来，磁浮技术将向更高的速度、更好的经济性、更实用的技术方向发展。

关键词：磁浮交通；电动悬浮；超导磁浮；全要素；试验系统
中图分类号：U237　　**文献标识码：**A

Research and technological prospects of applications for superconducting electrodynamic suspension

YU Qingsong, LI Kai, HU Hao, LIU Hongtao, SHAO Nan, LIU Shuai

(Maglev Research Institute, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: Compared to traditional transportation methods, high-speed maglev trains have many advantages. On a world-wide scale, two modes of maglev systems, electromagnetic suspension (EMS) and electrodynamic suspension (EDS), have emerged mature through years of research and practice. The superconducting (SC) EDS system has potential applications for high-speed and ultra high-speed transportation, with simple system topology, high reliability, better floating to weight ratio, larger suspension gap, and self-stable characteristics of the suspension system. This paper outlines the research progress of electrodynamic suspension technology in Japan, South Korea, the United States, and China, and provides a detailed introduction to the full elements test system of high-temperature SC EDS developed by CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd. The construction of this test system promotes the research of key technologies and verification of design methods in SC EDS. Currently, the SC EDS train is still in the exploration and initial stage of engineering verification, and it requires the attention and expansion of research institutions, in order to solve the research and development problems related to key components, supporting equipment, and test tracks. In the future, maglev technology will develop towards higher speeds, better economical, and more practical technological directions.

Keywords: maglev transportation; electrodynamic suspension; superconducting maglev; full elements; test system

---

基金项目：吉林省科技发展计划项目(20220201002GX, 20230201124GX)；中国中车股份有限公司原创技术十年培育专项(2022CGY014)
通信作者：李　凯（1986—），男，博士，正高级工程师，主要从事超导电动悬浮车辆技术研究；E-mail: lk86@163.com
引用格式：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.
Citation: 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.

0 引言

近二十年，我国在高速铁路、磁浮交通等地面高速轨道交通领域发展迅猛，备受国内外关注[1]。相比于其他地面交通工具，高速轨道交通车辆具有诸多优势[2]。由于磁浮列车与轨道之间无直接机械接触，不受传统轮轨系统黏着极限的限制[3-4]，因此一般将磁悬浮技术作为面向高速、超高速应用的主要技术方向开展研究[5]。

自上世纪 60 年代起，德国、美国、日本、中国、韩国等国家相继开展磁浮交通技术的研究，在国际上形成了电磁悬浮、电动悬浮两种较成熟的磁悬浮制式。其中，应用电磁悬浮技术的成功案例有上海高速磁浮示范线，它是世界上唯一一条高速磁浮交通商业化运营线路，其技术路线在国内形成了相对比较完备的技术链和产品供应链[6]。对于电动悬浮，通常以超导电动悬浮为对象开展研究与应用，虽然日本已经开展了先导段的展示运行多年，但该技术在国内研究起步较晚，参与该制式研究的高校、科研院所、企业少于参与电磁悬浮制式研发的相关机构。通过日本超导电动悬浮线路试验可以看到，超导电动悬浮技术是一种不容忽视的、具有较大发展潜力的、可面向高速和超高速应用的磁浮技术路线[7-8]。本文重点围绕超导电动悬浮技术进行论述，结合技术应用进展情况介绍中车长春轨道客车股份有限公司（简称“中车长客”）的高温超导电动悬浮全要素试验系统，最后对磁悬浮交通技术进行展望。

1 超导电动悬浮技术特点

电动悬浮技术最早由美国科学家 POWELL J R 等人[9]于 1966 年提出，其悬浮走行原理基于楞次定律，车辆通过直线电机牵引加速，车载磁体与轨道上的线圈相对运动，从而产生磁通量变化，进而产生感应电流和力的作用。超导电动磁浮的悬浮、导向、牵引/制动共用同一套车载超导磁体，系统结构拓扑简洁，可靠性高。

电动悬浮列车的车载磁体是该系统中磁场的源头，可由永磁体或线圈绕制磁体产生。相比于常导线圈磁体或永磁体，采用超导线圈的磁体能提供更大的磁感应强度，从而有更好的浮重比、更大的悬浮间隙。此外，超导线圈可以工作在闭环模式，这是一种电阻为 0 Ω的闭合线圈，在为其励磁后，电流可在闭合线圈内持续流动，几乎不发生衰减，相当于一个磁场很强的永磁体[10]。对于低温超导线圈和第一代高温超导线圈容易实现闭环运行，第二代高温超导带材的低阻接头技术也日趋成熟[11]，因此闭环运行模式是超导磁体相比于常导线圈的另一显著优势。

在工程应用中，轨道上的悬浮线圈一般采用“8”字形线圈，其安装于轨道侧壁，并且无需通电，“8”字形线圈的上、下两部分串联反接。当车辆运动时，“8”字形线圈的下半部分线圈切割超导磁体的磁场，继而产生感应电流与感应磁场。“8”字形线圈的上半部分线圈产生的磁场与超导磁体互相吸引，而下半部分线圈产生的磁场与超导磁体互相排斥，上、下两部分线圈共同作用产生的合力在垂直方向表现为悬浮力，在水平方向表现为导向力。车辆悬浮原理图如图 1 所示。

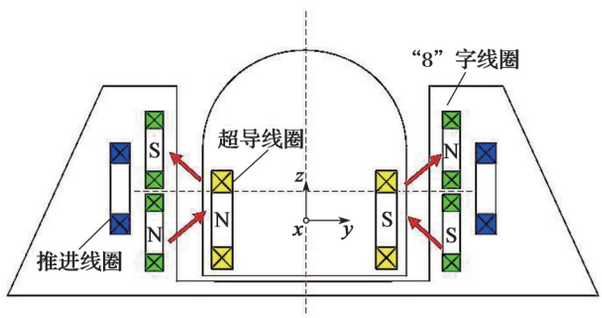


图 1 电动悬浮原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrodynamic suspension principle

悬浮力、导向力的大小与超导线圈、悬浮线圈的电磁参数和结构尺寸有关，两者可根据车辆偏离平衡位置的大小实时变化，具有一定的负反馈、自稳定特征。因此，电动悬浮系统的设计更加依赖计算分析模型的准确性和设计方法的可靠性。

从能量流的角度来看（如图 2 所示），产生悬浮和导向作用的能量源头是牵引系统提供的电能。车辆在牵引系统的作用下获得动能，使超导磁体与地面线圈具有相对运动速度，从而使悬浮线圈内产生磁通变化，对于车辆表现为磁阻力，而对于悬浮线圈表现为感生电流和阻性负载，阻性负载耗能最终以热能的形式耗散在大气中。由此可知，通过超导线圈与悬浮线圈的交互作用，车辆的部分动能通过悬浮系统转化为热能，同时也为车辆提供悬浮能量。从定量计算中可以得出，磁阻力随速度的增加而减小，高速运行时悬浮力与阻力比值可达到 30:1，因此超导电动悬浮制式是一种适合高速、超高速应用的技术路线。

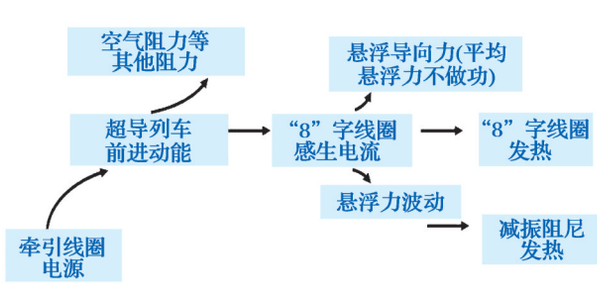


图 2 超导电动悬浮系统能量流示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy flow in superconducting electrodynamic suspension system

2　超导电动悬浮发展历程与现状

超导电动悬浮技术应用是大型复杂系统工程，美国、日本、韩国、中国均有相关报道，美国在磁悬浮技术领域一方面开展低真空管（隧）道列车研究，另一方面利用超导电动悬浮技术开展航天电磁发射和军事试验，两者技术相同，互相促进发展。在军事试验方面，1994 年美国霍洛曼空军基地启动了磁浮火箭橇试验线建设，悬浮系统采用“低温超导磁体+分割铜板”，动力系统采用火箭发动机的技术路线[12]。2013 年 2 月，改造后的霍洛曼设施最高试验速度达到 817 km/h，2016 年 3 月试验最高速度达到 1 019 km/h，如图 3 所示，标志着美国已经率先突破稳定被动悬浮、耐冲击动态超导磁体等超高速磁浮关键技术[13]。



图 3　美国空军基地磁悬浮火箭撬照片

Fig. 3　Photos of maglev rocket skid at US air force base

日本从 1962 年开始磁浮及直线牵引技术的研究，1972 年依托 LSM200 型超导磁浮试验悬浮架确立了电动悬浮的技术路线。由于当时尚未发现高温超导材料，低温超导 NiTi 线是绕制超导线圈的唯一选择。1977 年宫崎试验线投入试验，早期以倒“T”型的轨道开展车辆悬浮测试；经过技术对比和迭代升级，1980 年正式采用“U”型轨道，在 1995 年创造了当时最高载人速度 411 km/h[14-15]的记录。为了开展更加接近实际商业化运行相关试验研究，1990 年山梨试验线获批建设，日本在此线路上持续开展了近 30 年的工程化论证及准商业载人试运行[16-17]。

在长度 7 km 的宫崎试验线上，ML-500、MLU001、MLU002 等多款试验车辆先后被研发，用以验证低温超导磁体、液氦制冷机、轨道断面形式、线路走行、牵引分区切换、空气（阻风板）制动等子系统。通过近十余年的研究，超导电动悬浮技术路线及其技术可行性已得到充分论证，基于正线先导段的山梨试验线获批建设。

山梨试验线是一条商业化运行的全尺寸复线试验线路，具有道岔、明线、隧洞、曲线、坡度验证段，第一阶段耗费 7 年时间建设长度 18.4 km 的线路，开发了 MLX01 低温超导列车；在随后的 5 年，围绕工程化、商业化运行开展了系统可靠性及运维测试，在 2000 年通过了“实用化技术评审”；在 2003 年进行的高速测试中采用 3 辆编组列车创造了载人 581 km/h 的新记录[18]。山梨试验线第二阶段建设于 2013 年竣工，线路延长至 42.8 km，其间开展了第一代高温超导材料绕制线圈的高温超导磁体走行试验，确定了运营车辆的主要技术参数，开发了准商业化运营车辆 L0 系列低温超导列车[19]，2015 年该列车创造了速度 603 km/h 地面交通工具的世界纪录并保持至今，试验线及车辆照片如图 4 所示。日本仍然持续进行高速磁浮的工程优化和新技术研究工作，2018 年报道了应用第二代高温超导带材绕制线圈的超导磁体，并进行了一系列地面测试，在共振频率下即使振动加速度达到 10*g* 仍能够保证高温超导磁体的工作状态[20]。



图 4　日本山梨试验线及试验列车

Fig. 4　Yamanashi test line and trains in Japan

美国埃隆·里夫·马斯克（Elon Reeve Musk）团队结合前人研究经验，于 2013 年以 *Hyperloop Alpha* 白皮书的形式，提出了速度 1 200 km/h 的低真空管道超级高铁（Hyperloop）概念，该概念受到了美国、欧洲国家、韩国等研究团队的关注[21-23]，并在全球范围内引起了技术竞赛。在 Hyperloop 框架之内，悬浮系统采用多种方式[24-25]，其中韩国铁路技术研究所（KRRI）团队采用电动悬浮系统，开展了相关子系统的试验研究，已完成高温超导磁体研制，并在 6 m 长电机静态堵转试验台完成直线牵引静态测试[26]，如图 5 所示。目前，KRRI 团队正在开展长线路动态推进试验台的搭建，所做的研究工作仍处于原理研究阶段[27]。



(a) 高温超导磁体



(b) 推进试验台

图5 韩国高温超导磁体及推进试验台

Fig. 5 South Korea high-temperature superconducting magnet and propulsion test system

国内开发超导电动悬浮高速磁浮制式的牵头单位主要有中车长客和中国航天科工集团第三研究院（简称“航天三院”）。如图6所示，航天三院于2017年8月公布开展速度1 000 km/h以上的“高速飞行列车（T-Flight）”研究计划，主要开展基于低真空管道、低温超导磁体、电动悬浮技术等超高速运载系统的研究，正在积极推进全尺寸试验线的建设。中车长客于2018年开始超导电动悬浮制式的研究，初期以推进关键技术研究、核心子系统的工程化、小系统样机开发为重点任务，至2021年底，已经建成了轨道长度200 m的高温超导电动悬浮全要素试验系统，如图7所示，目前正在开展工程样车的研制工作。



图6 “高速飞行列车”模型

Fig. 6 “High Speed Flight Train” model

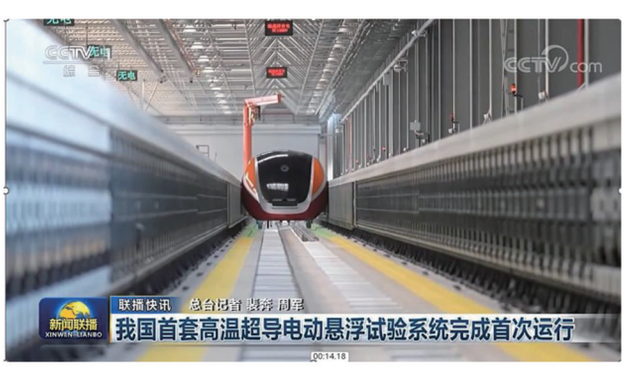


图7 高温超导电动悬浮全要素试验系统

Fig. 7 Full elements test system of high-temperature SC EDS

3 高温超导电动悬浮全要素试验系统

3.1 系统组成

中车长客的超导电动悬浮全要素试验系统包含原理样车、超导磁体系统、轨道系统、牵引供电系统、运行控制系统、车地通信系统、测速定位系统，如图8所示。原理样车上安装有4台超导磁体，每台超导磁体包含2个磁极；“U”型轨道侧壁安装有牵引线圈和“8”字形线圈。该系统于2018年开始研究论证，2019年联合国内多家高校、企事业单位完成方案设计，2021年建成并开始相关系统的调试与试验，至2023年3月31日完成了首次悬浮展示运行[28]。

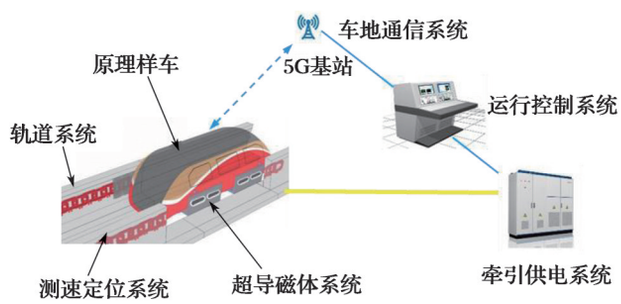


图8 全要素试验系统组成示意图

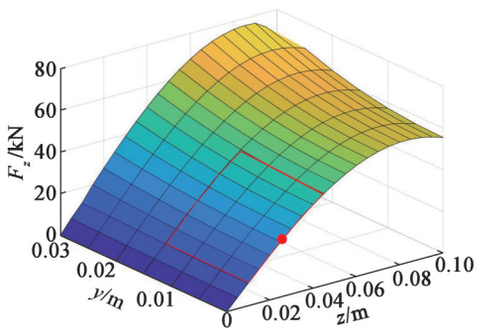
Fig. 8 Composition diagram of full elements test system

一般认为电动悬浮车辆需要被加速至较高速度（如120 km/h）时再进入电动悬浮状态，避免由于低速状态下悬浮力小、磁阻力大导致的经济性问题。但对于轨道长度有限的试验系统，需要尽可能在较短的距离完成加速并实现电动悬浮，用以验证相关试验。因此，该系统在设计时考虑在速度达到50 km/h时车辆进入悬浮状态，并针对牵引系统、悬浮系统建立计算模型，优化超导磁体与牵引线圈、“8”字形线圈的电磁参数、结构参数，从而满足较低速度下的电动悬浮要求。此外，为减轻车辆重量，原理样车未考虑载人功能，主要用于集成超导磁体、车载电气组件、走行和辅助导向装置；车身采用流线型造型，车身采用纤维增强复合材料；内部骨架采用镁铝合金设计，具有轻量化、高强度等优势。

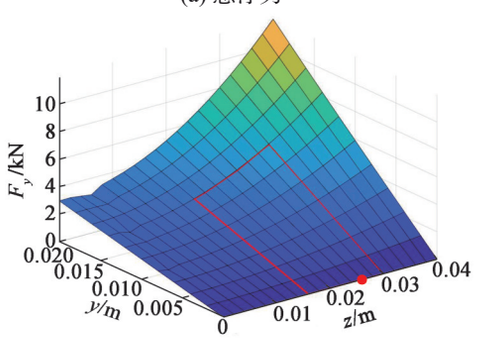
3.2 系统电磁力匹配设计技术

高温超导电动悬浮车辆的悬浮、导向和牵引都依赖地面线圈和超导磁体之间的电磁力，开展悬浮力匹配计算是其他子系统设计的基础，其结果关系轨道、车辆、磁体、线圈等系统与设备的机电参数制定。该试验系统应用了动态电路模型和数值求解的方式，实现了系统电磁力匹配计算。通过商用有限元软件和旋转试验台验证了上述计算方法与模型的准确性，相比于电磁力有限元仿真方法可节省大量的运算时间，能够满足电动悬浮系统工程设计应用需求[29]。该试验系

统设计目标是当速度达到50 km/h时，悬浮区内车辆能够以电动悬浮的方式平稳运行，因此需要校核悬浮力、导向力与垂向、横向偏移距离的关系，其结果如图9所示。为满足车辆动力学计算要求，设计的车体质量为2.7 t，平衡位置为图9中红色点标示处，力的波动范围为红色框线内。



(a) 悬浮力



(b) 导向力

图9　系统电磁力与车辆位置关系

Fig. 9　Relationship between system electromagnetic force and vehicle position

系统动力学研究用于衡量验证磁浮车辆在高速运行条件下的悬浮稳定性和乘坐舒适度。由于超导电动磁浮交通需要面对速度600 km/h及以上的高速运行需求，受气动载荷、强电磁耦合、轨道线路、电磁不平顺等复杂运行条件影响，需找到一种不同于传统轮轨的动力学分析方法。因此，在前述电磁力计算的基础上，根据车辆拓扑结构，考虑电磁力非线性影响，搭建了多自由度“电磁力–动力学”联合仿真模型，完成子系统参数指标的确定。

采用联合仿真模型主要是基于两方面因素：一方面，从工程化和商用化的角度出发，电动悬浮轨道线圈是离散化的，其作用于车辆的电磁力均为周期性变化，这种周期性变化会给车辆带来激励，并且这种激励频率与速度有关；另一方面，悬浮线圈某一周期的电磁力平均值是与车载超导线圈位置有关，随着车辆运动位置的变化而变化。因此，为了准确地描述车辆动力学状态，在动力学计算过程中，需要对某一时刻的电磁力进行求解，进而代入下一时刻的动力学计算模型中。在该试验系统中，多体动力学模型如图10所示。计算结果表明，超导线圈的磁动势或速度增加，可以减小垂直位移和俯仰角的振动变化[30]，因此在后续的设计中超导磁体磁动势选定为360 kAt。

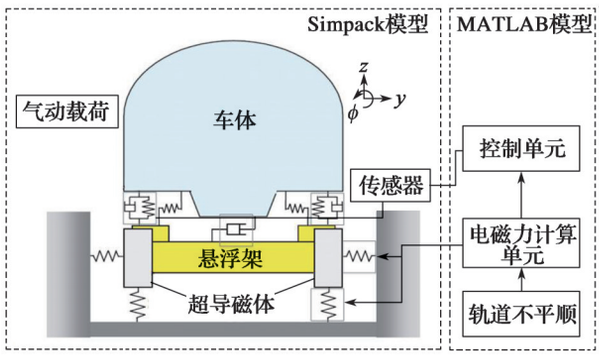


图10　多体联合动态仿真模型

Fig. 10　Multi-body co-simulation dynamic model

由于电动悬浮系统特点，除试验车辆处于悬浮状态以外，其他时间均以车下安装的支撑轮在轨道内走行，因此需考虑走行阶段的车辆动力学特性。该系统中采用较为常用的Pacejka轮胎模型来计算车辆在轨道不平顺激励下的振动特性，仿真结果可以指导车辆走行轮及其一系悬挂的设计[31]。

3.3　轨道系统

试验系统轨道长度为200 m，包括加速区、悬浮区和制动区，如图11所示。全线安装牵引线圈，用于车辆的牵引和电制动；悬浮区在牵引线圈的内侧安装有“8”字形线圈，用于车辆的悬浮和导向；制动区安装有涡流制动板，用于辅助制动，如图12所示。为了满足车辆短距离快速切换支撑轮走行与电磁走行，在悬浮区处车辆支撑轮走行面下凹40 mm。

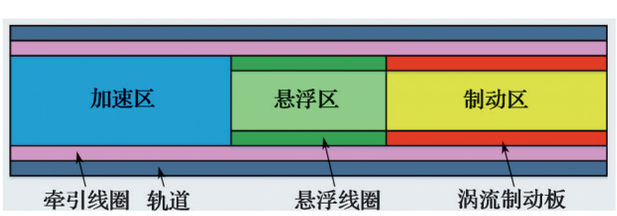


图11　试验系统轨道布置示意图

Fig. 11　Schematic diagram of track layout for the test system



图12　“U”型轨道及安装的线圈照片

Fig. 12　Photo of U-shaped tracks with installed coils

3.4　超导磁体系统

超导磁体系统是电动悬浮车辆的核心部件，其外

观如图 13 所示，其线圈由高温超导带材绕制而成，当磁动势为 360 kAt 时，在定子线圈处最大磁感应强度可达到 0.71 T；在“三无”（无励磁、无制冷、无抽空）的工作条件下，具备 1 h 以上的常态运行能力；应用匝间无绝缘技术，具备在线圈材料失去超导能力后磁场强度仍能够维持数小时的能力，为系统测试提供了可靠、稳定的静态强磁场，该磁体也是国内报道的首个车载高温超导磁体[32]。



图 13　超导磁体照片

Fig. 13　Photo of superconducting magnet

表 1 对比了中车长客车载高温超导磁体与日本电动悬浮列车所采用的低温超导磁体主要指标。中车长客超导磁体具有失超自保护、工作温度更高、工作温区宽、无瞬间失超风险、可脱机运行等优势；作为原理验证试验样机，可论证二代高温超导材料用于车载超导磁体的技术可行性，后续还将继续监测长期服役过程中的闭环运行衰减率和超导电性能变化情况，为将来发展全尺寸车载超导磁体提供新的选择。

表 1　用于电动悬浮车载超导磁体技术参数对比

Table 1　Parameters comparison with different superconducting magnets technology for EDS

参数名称	低温超导磁体（日本）	高温超导磁体（中车长客）
线圈材料	NdTi 合金	YBCO
磁动势	750 kAt	360 kAt
用途	工程化应用	原理验证
运行模式	闭环运行	闭环运行
失超防护	主动保护	匝间无绝缘自保护
工作温度	4.5 K	35~50 K
脱机能力		>1 h

3.5　牵引供电系统

牵引供电采用 DC 1 500 V 电源，通过安装在地面的牵引逆变器逆变为变压变频的三相交流电，为地面的长定子直线驱动三相线圈供电。车辆上设置 1 组 DC 24 V 蓄电池，为车载的测速定位设备和监控设备供电。考虑系统的可扩展性，地面三相电源总容量配置不低于 800 V·A。

试验系统采用长定子同步直线电机驱动，电机动子为超导线圈，线路两侧铺设三相长定子无铁心线圈，牵引逆变器放置在地面。在车辆运行过程中，牵引逆变器向地面的长定子线圈提供变压变频的三相交流电，牵引线圈中进而产生行波磁场，带动试验车辆移动。电机定子线圈和超导线圈仿真模型如图 14 所示。经过计算牵引系统最大牵引力可达 6.5 kN，能够提供峰值不低于 2.3 m/s^2 的加速度，保障车辆在悬浮区前达到设计速度。

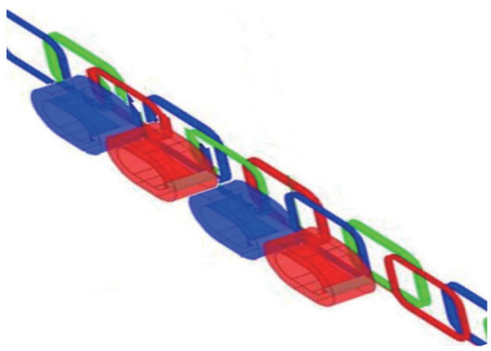


图 14　直线电机各线圈位置关系

Fig. 14　Positional relationship of linear motor coils

3.6　试验测试系统

为获取车辆动态运行时的相关数据，试验测试系统布置 2 套数据采集装置，分别用于测量轨道和车辆的关键参数。布置的传感器类型主要有温度传感器、加速度传感器、应变传感器、霍尔传感器、位移传感器、陀螺仪等。轨道数据采集装置主要采集悬浮线圈与牵引线圈温度、应变及作用力、轨道振动、涡流制动板应变、轨道应变等数据；车辆数据采集装置主要采集车辆的位置、姿态、加速度等运动信息，用于试验系统仿真模型的校核、车辆运行姿态的分析。结合电动悬浮动态调试试验，试验系统可开展 8 大类 32 项试验内容，能够对超导电动悬浮的车辆、轨道、牵引供电、定位测速、超导磁体等关键技术和计算模型进行试验验证。

在系统测试阶段，车辆通过加速区后，速度达到设计悬浮速度 50 km/h，实现了稳定电动悬浮时间近 4 s 的记录，悬浮时车底摄像头拍摄照片如图 15 所示[28]。试验系统达成了前述设计目标，验证了相关设计方法和模型的有效性，为超导电动悬浮工程样车的设计提供有效支撑，有助于超导电动悬浮制式的技术成熟度提升。



图 15　电动悬浮时车底摄像头拍摄画面

Fig. 15　Image captured by the bottom camera during EDS process

4　高速磁浮技术发展展望

与轮轨高速铁路相比，高速磁悬浮铁路具有提速潜力大、安全性好、更节能环保、环境适应性强、维修工作量小等优点，是地面更高速度交通的重要发展方向，是我国综合立体交通网络的重要组成部分，应当持续开展深入研究，不断提高我国高速磁浮的技术成熟度，加快推进工程化应用。

对于常导高速磁浮，国内多家企业开发了自主化的速度 600 km/h 常导高速磁浮车辆及其配套系统，但仍未实现达速验证，仿真环境下建立的模型和方法尚未被有效验证，更高速度等级下的线路精度、空气动力、悬浮控制算法、“车–轨–桥”耦合关系、高速下车辆动力学特性等问题的研究还需持续开展。对于超导电动悬浮，从国外的应用经验上来看，这是一种具有较大发展潜力的高速磁浮制式。虽然我国能够自主生产低温超导线材、高温超导带材等关键原材料，也完成了原理样机和工程化小系统阶段验证，但由于国内该制式的研究起步晚、参与研究的单位少，工程化验证还未开展，当前急需面向工程化应用解决关键部件、配套装备、试验线路的研发，开展轻量化车体、高性能起落架、高速气动噪声、车轨桥隧耦合动力学等关键技术的深入研究。

从工程化路线角度看，无论是德国的常导高速磁浮还是日本的低温超导电动磁浮，都经历了“原理样机→工程化小系统→工程化验证及优化→商业化运用”等阶段，特别是日本的高速磁浮，将工程化验证线路规划为商业化运用线路的一部分，从而实现了更高效的衔接和降低总研究投入，为我国高速磁浮的发展提供了很好借鉴。

对高速磁浮交通技术的深入研究也有利于推动技术进步和产业升级，高速磁浮产业辐射力强，产业链条覆盖众多高新技术领域，涵盖先进控制、低延时通信、高精度检测、复合材料、超导材料、超导磁体等高技术含量、高附加值的新兴产业。

参考文献：

[1] 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.
DENG Zigang, LIU Zongxin, LI Haitao, et al. Development status and prospects of maglev trains[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2022, 57(3): 455-474.

[2] 刘士苋, 王磊, 王路忠, 等. 电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J/OL]. 西南交通大学学报: 1-20. (2022-12-01) [2023-02-11]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/51.1277.U.20221201.0849.003.html.
LIU Shixian, WANG Lei, WANG Luzhong, et al. Review on electrodynamic levitation trains and on-board superconducting magnets[J/OL]. Journal of southwest jiaotong university: 1-20. (2022-12-01) [2023-02-11]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/51.1277.U.20221201.0849.003.html.

[3] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
ZHAI Wanming, ZHAO Chunfa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2016, 51(2): 209-226.

[4] 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: 34.
WEI Qingchao, KONG Yongjian, SHI Jin. System and technology for maglev transit[M]. 2nd ed. Beijing: China Science and Technology Press, 2010: 34.

[5] 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.

[6] 余浩伟, 寇峻瑜, 李艳. 600 km/h 高速磁浮在国内的适应性及工程化发展[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(12): 16-20.
YU Haowei, KOU Junyu, LI Yan. Adaptability and engineering development of 600 km/h high-speed maglev in China[J]. Journal of railway engineering society, 2020, 37 (12): 16-20.

[7] 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.

[8] 龚俊虎, 谢海林, 鄢巨平, 等. 全速度谱系磁浮交通的技术发展与应用前景[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(9): 61-64.
GONG Junhu, XIE Hailin, YAN Juping, et al. Development and application prospect of full-speed spectrum maglev transportation technology[J]. Urban mass transit, 2020, 23 (9): 61-64.

[9] 王一宇, 蔡尧, 宋旭亮, 等. 零磁通式电动悬浮等效模拟系统的特性分析与实验[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1628-1635.
WANG Yiyu, CAI Yao, SONG Xuliang, et al. Characteristic analysis and experiment of the equivalent simulation system for null-flux electrodynamic suspension[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36 (8): 1628-1635.

[10] LU Li, WU Wei, YU Xin, et al. High-temperature superconducting non-insulation closed-loop coils for electrodynamic suspension system[J]. Electronics, 2021, 10(16): 1980.

[11] PAN Yunhao, WU Wei, ZHEN Shuiliang, et al. Investigation on current distribution and joint resistance-overlap length re-

lationship for non-superconducting joints[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2019, 29(2): 1-5.

[12] HSU Y H, LANGHORN A, KETCHEN D, et al. Magnetic levitation upgrade to the Holloman high speed test track[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2009, 19 (3): 2074-2077.

[13] GUROL H, KETCHEN D, HOLLAND L, et al. Status of the Holloman high speed maglev test track (HHSMTT)[C]// AIAA. 30th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. Atlanta: AIAA, 2014: 2014-2655.

[14] 商福昆 . 宫崎实验线新磁浮实验车 MLU-002N[J]. 铁道机车车辆, 1995(1): 58-60.
SHANG Fukun. New maglev experimental vehicle MLU-002N for Miyazaki experimental line[J]. Railway locomotive & car, 1995(1): 58-60.

[15] KYOTANI Y. Recent progress by JNR on maglev[J]. IEEE transactions on magnetics, 1988, 24(2): 804-807.

[16] 林国斌, 连级三 . 德国、日本磁浮铁路系统发展近况[J]. 学术动态报导, 1996(4): 13-18.
LIN Guobin, LIAN Jisan. Recent development of maglev railway systems in Germany and Japan[J]. Academic news report, 1996(4): 13-18.

[17] OHSAKI H. Review and update on maglev[R]. Karlsruhe: European cryogenic days, 2017.

[18] SHIRAKUNI N, TERAI M, WATANABE K, et al. The status of development and running tests of superconducting maglev[C]//The International Maglev Board. MAGLEV'2006: The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Dresden: The International Maglev Board, 2006: 1-5.

[19] NAGASHIMA K. Research and development concerning superconducting maglev and research on applying its technology to the conventional railway system[J]. Quarterly report of RTRI, 2015, 56(2): 86-90.

[20] MIZUNO K, TANAKA M, OGATA M, et al. Mechanical vibration test of a REBCO coil designed for application to the maglev[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2018, 28(4): 1-7.

[21] MITROPOULOS L, KORTSARI A, KOLIATOS A, et al. The hyperloop system and stakeholders: a review and future directions[J]. Sustainability, 2021, 13(15): 8430.

[22] PLAVEC M, MICHELBERGER F. Eine analyse des hyperloop-konzepts[DB/OL]. (2020-11-01) [2023-02-18]. https://eurailpress-archiv. de/SingleView. aspx? show= 2003522&lng=en.

[23] LEE J, YOU W, LIM J, et al. Development of the reduced-scale vehicle model for the dynamic characteristic analysis of the hyperloop[J]. Energies, 2021, 14(13): 3883.

[24] PAWLAK W, KONIECZNY P. Advanced suspension system of hyperloop pod[DB/OL]. (2017-09-01) [2023-02-15]. https://www. researchgate. net/publication/330006320_Advanced_suspension_system_of_hyperloop_pod.

[25] LIM J, LEE C Y, LEE J H, et al. Design model of null-flux coil electrodynamic suspension for the hyperloop[J]. Energies, 2020, 13(19): 5075.

[26] CHOI S Y, LEE C Y, JO J M, et al. Sub-sonic linear synchronous motors using superconducting magnets for the hyperloop[J]. Energies, 2019, 12(24): 4611.

[27] YOON R, NEGASH B A, YOU W, et al. Capsule vehicle dynamics based on levitation coil design using equivalent model of a sidewall electrodynamic suspension system[J]. Energies, 2021, 14(16): 4979.

[28] 陈平丽, 刘亮 . 中国首套高温超导电动悬浮全要素试验系统完成首次悬浮运行 未来时速可达 600 公里[EB/OL]. (2023-04-02) [2023-04-26]. https://news. cctv. com/2023/04/02/ARTI61Rjq4Io1B01ghrbVk8l230402.shtml.
CHEN Pingli, LIU Liang. China's first high-temperature superconductivity electric suspension all factor test system has completed its first suspension operation, and the future speed can reach 600 kilometers per hour[EB/OL]. (2023-04-02) [2023-04-26]. https://news. cctv. com/2023/04/02/ARTI61Rjq4Io1B01ghrbVk8l230402.shtml.

[29] CHEN Dachuan, LI Xiaofen, HUANG Xiangyu, et al. An FEM model for evaluation of force performance of high-temperature superconducting null-flux electrodynamic maglev system[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2021, 31(7): 1-6.

[30] YU Qingsong, WANG Min, YAO Guofeng, et al. Study on beat vibration of a high temperature superconducting EDS maglev vehicle at low speed[J]. Applied sciences, 2023, 13 (5): 3131.

[31] SHAO Nan, WANG Min, HOU Qi. Analysis on the dynamic response of an EDS maglev train based on Pacejka similarity tire model[C]//IEEE. 2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA). Dalian: IEEE, 2021: 72-76.

[32] 吴蔚, 李凯, 邵南, 等 . 电动磁浮车载高温超导磁体全断电运行特性[C]//中国振动工程学会 . 第十届全国磁悬浮技术与振动控制学术会议(CSMLTVC10)论文集 . 沈阳: 中国振动工程学会, 2022: 50.
WU Wei, LI Kai, SHAO Nan, et al. Operation characteristics of high-temperature superconductivity magnets under full power off for EDS[C]//Chinese Society for Vibration Engineering. Proceedings of the 10th National Conference on Magnetic Levitation Technology and Vibration Control. Shenyang: Chinese Society for Vibration Engineering, 2022: 50.

收稿日期：2023-05-31
修回日期：2023-07-01