

特约专栏

高温超导磁悬浮车研究进展

邓自刚, 李海涛

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 从1911年发现超导现象至今, 新型超导材料不断涌现。随着临界温度及内部磁通钉扎性能不断提升, 实用型超导磁悬浮技术成为可能。首先介绍了当前主要的磁悬浮交通模式及其特点, 具体包括常导电磁悬浮(EMS, Electromagnetic Suspension)、低温超导电动磁悬浮(LTS EDS, Low-Temperature Superconducting Electrodynamical Suspension)、及高温超导磁悬浮(HTS Maglev, High-Temperature Superconducting Magnetic Levitation)。其次, 针对高温超导磁悬浮, 重点阐述了其自稳定悬浮原理、发展历程以及相关实验样车研究现状。2014年6月西南交通大学将高温超导磁悬浮与真空管道相结合, 成功搭建了新一代的真空管道高温超导磁悬浮车试验平台“Super-Maglev”, 以期探讨高温超导磁悬浮未来可能的交通模式与技术定位等问题。最后, 总结了高温超导磁悬浮相比于其他磁悬浮模式的优势, 并进一步讨论了可能的轨道交通应用速度等级。

关键词: 高温超导磁悬浮; 轨道交通; 真空管道; 磁通钉扎; 自稳定悬浮

中图分类号: U266.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)05-0329-06

Recent Development of High-Temperature Superconducting Maglev

DENG Zigang, LI Haitao

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: New superconductor materials have been constantly found since the discovery of superconductivity in 1911. With the critical temperature and inherent flux-pinning property improved continually, the practical superconducting magnetic levitation (maglev) technology became possible. Firstly, the main maglev transportation methods and their characteristics are introduced. They are electromagnetic suspension (EMS), low-temperature superconducting electrodynamic suspension (LTS EDS), and high-temperature superconducting Maglev (HTS Maglev). Secondly, the development history and the state of the art of HTS Maglev around the world are emphasized and described in detail by focusing on its self-stable levitation characteristics. In June 2014, Southwest Jiaotong University built a test platform for HTS Maglev-Evacuated tube transport (HTS Maglev-ETT), “Super-Maglev”. Based on the “Super-Maglev”, the HTS Maglev and the ETT concepts had been successfully combined. Finally, the prominent advantages of the HTS Maglev are summarized and compared with other Maglev technologies. Furthermore, several potential rail transit applications with different speeds are proposed and discussed in order to gain accesses to the markets.

Key words: high-temperature superconducting maglev; rail transit; evacuated tube; flux pinning; self-stable levitation

1 前言

人类在文明发展史中, 对速度的追求从未停止过。当代轨道交通发展过程中, 高速铁路已经证明了它的效率和作用。据统计, 2016年9月11日郑州至徐州高速铁

路正式开通运营, 我国高铁运营里程突破20000 km。然而, 由于轮轨间粘着作用及其摩擦损耗问题, 轮轨高铁技术很难实现更高的速度, 难以满足现代社会对更高运行速度的要求。

面对更高速度需求, 磁悬浮列车(可简称磁悬浮)摆脱了轮轨间粘着作用, 利用电磁力实现列车与轨道之间无接触的悬浮和导向, 再利用直线电机产生的电磁力牵引列车运行, 具备运行速度高、爬坡能力强、转弯半径小、能耗低、噪音低、振动小、安全等优点^[1]。

近年来, 随着高铁产业的持续升温, 德、日、美、

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375404, 51307147)

第一作者: 邓自刚, 男, 1982年生, 副教授, 博士生导师,

Email: deng@swjtu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.05.02

中等国再次聚焦磁悬浮。2014 年 5 月 27 日,日本政府宣布实施低温超导磁悬浮商业运行线——中央新干线项目,该线将连接东京、名古屋和大阪,计划于 2027 年建成东京到名古屋线路,时速 505 km。2016 年 5 月 6 日,我国长沙中低速常导磁悬浮工程建设完成并正式通车运营,线路全长约 18.55 km,最高速度 100 km/h。在此之前,日本低温超导磁悬浮中央新干线创造了载人时速 603 km 的世界新纪录,引起了全世界的关注。

2 各种磁悬浮模式及特点

主要的悬浮原理包括气动悬浮、声悬浮、光悬浮、磁悬浮等^[2-4],其中气动悬浮与磁悬浮能实现大尺寸的载重悬浮。1969 年,法国于奥尔良郊外率先建起了世界上第一条 18 km 气动悬浮列车实验线路,最高速度达到 422 km/h^[2]。气动悬浮列车存在运行不稳定、可控性差等问题,因此相关研究工作逐渐停滞不前。相比较下,磁悬浮通过电磁场中电流与磁场相互作用产生的电磁力来抵消重力场中物体的自身重量,实现无接触悬浮,可控性较强。因此,早在 1934 年就有相关专利技术提出了将磁悬浮原理运用于轨道交通工具中,从而形成一种新型的轨道交通运输方式。

常见的磁悬浮模式有电磁悬浮 EMS (Electromagnetic Suspension)、电动悬浮 EDS (Electrodynamic Suspension) 和高温超导磁悬浮 HTS Maglev (High - Temperature Superconducting Maglev)。

2.1 电磁悬浮 EMS

20 世纪 20 年代德国工程师 Hermann Kemper 提出了磁吸式常导磁悬浮列车(又称电磁悬浮 EMS)的构想,1934 年他以此高速磁浮列车概念为基础申请了专利。70 年代开始,英国的华威大学、萨塞克斯大学以及德比铁路技术中心开始了这种常导电磁悬浮的研究^[5,6]。高速电磁悬浮 EMS 以德国 Transrapid (TR) 系列为代表,现已发展到了 TR09 型列车。2000 年我国上海引进了 TR08 型(最高速度 500 km/h),建成了世界上首条商业运行的高速磁悬浮线路^[7],其原理示意图如图 1 所示。

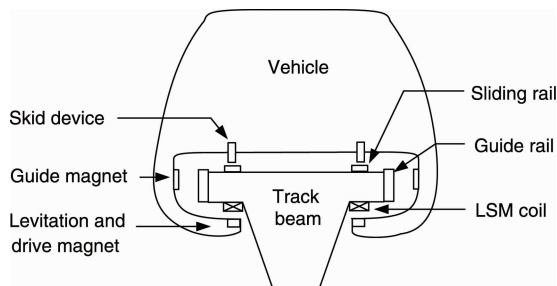


图 1 EMS 常导磁悬浮列车原理示意图

Fig. 1 Principle sketch of the EMS

电磁悬浮 EMS 通过检测与反馈控制系统动态地实时检测车体在空间相对位移,并将检测的位置信息及时反馈给控制系统,调节电磁铁中电流大小来达到稳定悬浮目的。常导磁悬浮列车在静止时仍然需要位置检测和反馈控制实现稳定悬浮。悬浮高度一般为 8 mm,因此,EMS 系统对地面、轨道、桥梁等的施工精度要求很高。

另外,日本也曾开发类似的 EMS 系统——HSST (High Speed Surface Transport),早期的 HSST-01 车型曾跑出 308 km 的时速,后来的车型时速定位 100 km,逐渐面向中低速城市轨道交通系统^[8]。

我国从 20 世纪 90 年代开始研究 EMS 技术,经过 20 余年的积累,已经基本掌握中低速磁悬浮技术。国内拥有自主知识产权的中低速磁悬浮——长沙磁浮快线于 2016 年 5 月 6 日投入运营^[9]。

2.2 电动悬浮 EDS

另一种相对成熟的磁悬浮列车采用的是同性相斥原理建成,起源于 1966 年美国约翰·霍普金斯大学 James Powell 教授的专利。目前日本处于领先地位,采用低温超导线材开发了低温超导电动磁悬浮列车 LTS EDS^[10]。低温超导电动磁悬浮列车将 Nb-Ti 线低温超导线圈浸泡在液氮(4.2 K)中,冷却达到超导态。如图 2 原理图所示,在超导线圈中通以电流,形成强磁场的超导磁体。“U”字形轨道梁侧壁上连续排布着“8”字形线圈。当车载低温超导磁体沿着轨道水平移动时,轨道侧壁上线圈内会产生感应电流,“8”字型线圈下部磁场与车载超导磁体之间相互排斥,上部磁场与车载超导磁体之间相互吸引,使得车体悬浮起来^[11]。因此,EDS 列车需要达到一定初始速度(100 km/h)才能实现悬浮。

日本于 1977 年建成一条 7 km 长的宫崎试验线,轨道采用倒 T 型,后来又改为 U 型。1990 年开始,日本着手修建 42.8 km 长的山梨线,并于 1993 年完成了其中的 18.4 km。在山梨试验线上,2015 年 4 月 21 日,日本低温超导电动磁悬浮 L0 系车型跑出了载人时速 603 km 的世界纪录^[12]。

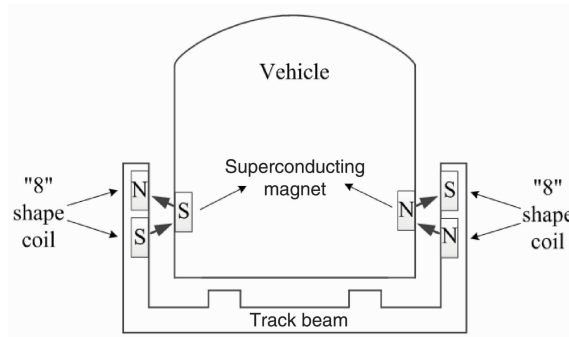


图 2 LTS EDS 低温超导电动磁悬浮列车原理示意图

Fig. 2 Principle sketch of the LTS EDS

另一方面, 1986 年, 美国休斯敦大学朱经武教授小组和中国科学院物理研究所赵忠贤教授小组相继发现了临界温度达 93 K 的氧化物超导体钇钡铜氧 $\text{YBaCuO}^{[13,14]}$ 。超导体的转变温度被提升至液氮(77 K)温区以上, 形成了高温超导体类别。高温超导体的发现使得超导应用摆脱了稀有资源液氮(4.2 K)的制约。2007 年, 日本山梨线采用高温超导 Bi 系线圈, 替换车载低温超导磁体, 最终试验速度达到了 553 km/h^[15]。然而, 采用高温超导 Bi 系线圈替代低温超导 Nb-Ti 线圈的方案没有实施在日本正在建设的超导磁悬浮中央新干线商业项目中。

2.3 高温超导磁悬浮 HTS Maglev

高温超导磁悬浮利用非理想第二类超导体的磁通钉扎特性在具有梯度磁场中产生的自稳定悬浮现象, 来实现一种新型的、悬浮导向一体化的轨道交通应用工具。就当前材料进展来看, 这种高温超导磁悬浮, 是无法被其他电磁材料替代的, 具有唯一性。相比较下, 电动悬浮中超导材料是可以普通电磁体或永磁体实现的。

高温超导磁悬浮的工作原理是: 在外磁场中, 高温超导体独有的强钉扎能力使得磁力线既难逃离钉扎中心的束缚(对于已经被俘获的磁力线)也难渗透进入超导体内(对于未被俘获的自由磁力线)。这种独特的钉扎特性使得超导体能够随外磁场的变化而感应出阻碍这种变化的超导强电流。这种超导电流与外磁场的电磁相互作用在宏观上产生与悬浮体自身重力平衡的悬浮力并提供横向稳定所需的导向力。并且这类超导体能在价廉的液氮温区(77 K)中表现出良好的超导性能, 简化了低温制冷系统。

微观上来看, 高温超导体材料制备过程中产生的位错、沉淀物等缺陷, 形成位能势阱。将正常态的超导块材放入磁场中, 此时磁场能够穿过块材, 块材进行冷却进入超导态后, 位能势阱能阻止磁通线移动, 对磁通线进行“束缚”, 也就是磁通钉扎效应。处于超导态的高温超导块材向永磁体逐渐靠近, 外界磁场以磁通量子束形式开始进入超导体内, 在其通过的路径上遇到结构缺陷等(钉扎中心), 钉扎中心周围超导区域将产生涡流而牢牢地锁定磁通量子束^[16-18], 宏观上表现为自稳定悬浮现象。

高温超导磁悬浮整车系统主要由车载超导块材及其低温系统、地面永磁轨道系统和直线驱动系统三大关键部分组成, 其原理示意图如图 3 所示。车载超导体一般采用熔融织构法制备的圆柱形或者方形高温超导体 YBaCuO 块材, 轨道由 NdFeB 永磁体和聚磁铁轭等按一定的结构组装而成, 直线驱动则由感应或者同步直线电机来完成。

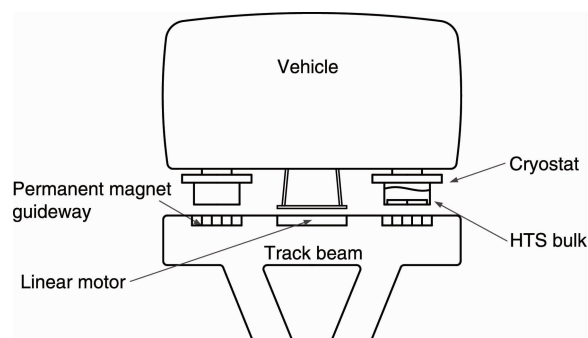


图3 HTS Maglev 高温超导磁悬浮车原理示意图

Fig. 3 Principle sketch of the HTS Maglev

高温超导磁悬浮车的悬浮高度为 10 ~ 30 mm, 其车体质量约为轻轨车的 1/2, 基建成本较低; 冷却所需的氮气来自空气, 排放又回到空气, 不会造成环境污染; 运行能耗仅为飞机的 1/20^[1]; 磁轨道所产生的磁场为静磁场, 以西南交通大学 Halbach 型永磁轨道^[19]为例, 距离永磁轨道上方 56 mm 处的磁场为 34.05 mT, 侧向距离轨道边缘 38 mm 处磁场为 37.44 mT, 低于国际非电离辐射防护委员会 ICNIRP 推荐的静磁场暴露标准(不高于 40 mT), 不存在电磁辐射和电磁干扰的问题。因此, 高温超导磁悬浮列车也被认为是一种新型、高效、节能、环保、安全、舒适的未来轨道交通工具。

3 高温超导磁悬浮车研究现状

早在 1997 年, 中国和德国联合研制出高温超导磁悬浮模型车。该车重 20 kg, 悬浮高度 7 mm, 轨道直径 3.5 m^[20]。2000 年 12 月 31 日, 西南交通大学王家素团队^[21]研制出世界首辆载人高温超导磁悬浮车, 取名“世纪号”。该车可搭载 4 名乘客, 悬浮高度大于 20 mm, 在长 15.5 m 的直线轨道上运行, 悬浮力可达 6350 N, 可持续工作 6 h。图 4 为“世纪号”高温超导磁悬浮车照片。



图4 我国“世纪号”高温超导磁悬浮车

Fig. 4 HTS Maglev test vehicle in China, “Century”

2004 年, 德国固体与材料研究所 IFW^[22]研制成功高温超导磁悬浮实验车“SupraTrans I”, 直线轨道长 7 m,

最大载重能力 350 kg。其改进后的第二代高温超导磁悬浮环形试验线“SupraTrans II”于 2011 年完成。“SupraTrans II”可承载 2 人,最大加速度 1 m/s^2 ,速度可达 20 km/h,轨道为 80 m 的环形线。图 5 为“SupraTrans II”照片。“世纪号”以及两代“SupraTrans”的轨道磁场均为单峰分布结构。



图 5 德国“SupraTrans II”高温超导磁悬浮车^[22]
Fig. 5 HTS Maglev test vehicle in Germany, “SupraTrans II”^[22]

巴西里约热内卢联邦大学从 1998 年开始高温超导磁悬浮研究,并在 2014 年修建完成一条长度为 200 m 的“Maglev Cobra”高温超导磁悬浮试验线。车体采用轻质纤维材料减轻重量,可以搭载 24 人。该条试验线轨道从空中连接两栋教学楼^[23]。与中德实验线不同的是,“MaglevCobra”的电机初级绕组安装于车体上,次级感应板铺设在轨道中央,这样可以减少铺设线圈的费用,但是在车体上安装受电装置,增加了接触,这与高速无接触的高温超导磁悬浮理念是违背的,但是可应用于短距离中低速线路的建设。同期,巴西团队详细比较了高温超导磁浮与城市轻轨,发现同等载重情况下高温超导磁悬浮列车比轻轨更轻,每公里造价仅约后者的 55.26%^[24]。图 6 为“Maglev Cobra”磁悬浮试验线照片。



图 6 巴西“Maglev Cobra”高温超导磁悬浮试验线^[23]
Fig. 6 HTS Maglev test line in Brazil, “Maglev Cobra”^[23]

相比较下,西南交通大学研究团队在成功研制“世纪号”之后,持续深入研究,于 2014 年 6 月将高温超导磁悬浮与真空管道概念相结合,研制成功了新一代的高温超导磁悬浮环形实验线及真空管道高温超导磁悬浮试验平台“Super-Maglev”^[25],如图 7 所示。轨道全长 45 m,分为两个直线段(各长 3.6 m)和两个曲线段(半径 6 m)。

在其中一段直线段安装有直线驱动电机,受轨道较小曲线半径的限制,车速最高为 50 km/h。“Super – Maglev”主要参数如表 1 所示^[25]。

“Super – Maglev”系统采用了 Halbach 型永磁轨道,实现了在同等载重能力情况下轨道截面积最小成本最低的数据^[25]。目前,已实验达到了最低气压 0.029 atm,车架最高运行速度 50 km/h。

2014 年 7 月,美国 IEEE Spectrum 针对真空管道高温超导磁悬浮试验平台“Super-Maglev”以“A SUPER CHUTE”为题进行了报道^[26],引起了人们对高温超导磁悬浮列车技术和真空管道交通发展趋势及其对社会和商业影响的关注和探讨。

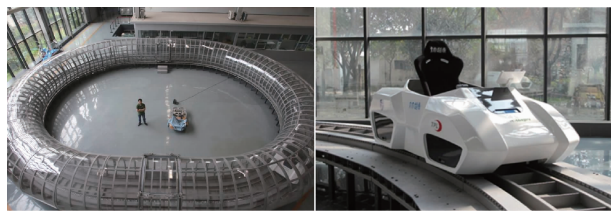


图 7 “Super – Maglev”高温超导磁悬浮试验线^[25]
Fig. 7 HTS Maglev test line in China, “Super – Maglev”^[25]

表 1 “Super – Maglev”试验线主要参数 Table 1 Main parameters of the “Super – Maglev” test line	
Guideway	45 m double – track composed of two 3.6 m straight – lines and two 6 m – radius curve – lines
Levitation height	10 ~ 20 mm
Load capability	max 1000 kg
Propulsion mode	One sectional 3 m long linear induction motor
Maximum acceleration	0.5 m/s^2
Maximum speed	25 km/h(normal pressure) 50 km/h(low pressure)
Tube pressure	0.1 ~ 1 atm

此外,意大利拉奎拉大学^[27]采用“V”型轨道结构,开展了高温超导磁浮模型车的相关研究工作。日本产业技术综合研究所 AIST^[28]、俄罗斯莫斯科航空学院^[29]等也相继研制出各自的高温超导磁悬浮系统。这些工作都推动着高温超导磁悬浮不断向前发展。2006 年前后,西南交通大学研究团队^[30]、北京航空航天大学团队^[31]将高温超导磁悬浮与电磁弹射相结合,分别搭建了磁浮助推模型,并针对相关动态性能开展了诸多实验研究。

综上所述,从 2000 年至今的 16 年里,高温超导磁悬浮研究重点已由早期的车载超导块材组合与永磁轨道间的准静态电磁特性及优化工作,发展到动态特性分析、

运行试验、中试线建设等方面。高温超导磁悬浮走出实验室, 面向实际应用正在得到更多的认可和关注。

4 结 语

21 世纪初, 我国专家们就发展磁浮还是高铁进行了激烈讨论, 最终选择了高铁。经过多年的积累, 我国已掌握了高铁核心技术, 能保证时速 300 km 下列车的安全运行 (若不计运营成本时速甚至可以超过 400 km)。纵观全球, 德国 ICE、日本新干线以及法国 TGV 均可达到这个速度量级。伴随着高铁产业的蓬勃发展, 世界各国已经开始了新一代轨道交通技术储备和布局的激烈竞争。

轮轨交通想要获得更快的速度, 必须要降低阻力, 具体指: 轮轨接触和空气阻力。

2014 年 5 月起, 日本政府实施了非轮轨接触式的低温超导电动磁悬浮商业线项目, 计划 1 h 内跑完东京到大阪 498 km 的运程。2013 年美国 Elon Musk 抛出低空气阻力的 Hyperloop 超级高铁概念后, Hyperloop One 公司计划修建时速超过 1200 km 的真空管道“胶囊列车”。2016 年 5 月 11 日, Hyperloop one 在西部内华达州荒漠首次对 Hyperloop 管道运输中的推进系统进行公开测试, 实现了 1 s 加速到 96 km/h。这一测试结果, 使得真空管道高速磁浮交通概念再次引起全球范围的关注。若美国的 Hyperloop 概念得以实现, 洛杉矶到旧金山的行程将被缩短为 0.5 h。近日, 加拿大 TransPod 的公司也计划出一套类似的超级高铁方案 (目前仅为设想), 将电磁悬浮 EMS 与真空管道结合起来, 将多伦多至蒙特利尔的行程缩短为 0.5 h。这些方案, 包括我国西南交通大学的“Super-Maglev”平台, 均在非轮轨接触的磁悬浮和低气阻的真空管道概念技术上作出了不同程度的突破。

相比美、加计划实施的其他类型磁悬浮方案, 我国“Super-Maglev”试验平台使用的高温超导磁悬浮的技术优势包括:

- (1) 悬浮导向系统无需供能, 运营成本低;
- (2) 悬浮高度较高, 对基建施工精度要求较低;
- (3) 轨道磁场为静磁场, 无电磁辐射;
- (4) 自稳定悬浮系统, 系统简单, 操作方便。

当前, “Super-Maglev”车体可以在半径 6 m 的轨道上 (无缓和曲线、无外轨超高) 以时速 50 km 安全行驶。众所周知, 离心力与速度平方成正比, 与半径成反比。若等比推算, 将曲线半径扩大到 6 km (350 km 时速高铁的最小曲线半径为 7 km), 车载高温超导块材特有的自导向力可保证其以 1500 km 以上的时速安全行驶。

1992 年, 高温超导磁悬浮轴承最高实验转速达到了 52000 rpm^[32] (折算成线速度大于 3600 km/h)。因此, 理

论和实验证明, 高温超导磁悬浮列车的最高运行速度有望超过 1000 km/h。就不同的市场定位和需求而言, 高温超导磁悬浮具备低、中、高速, 乃至超高速的多种发展方向:

(1) 时速 200 km, 使得机场到市中心时间距离缩短到 0.5 h 之内。高温超导磁悬浮可以充分发挥造价低、转弯半径小、爬坡能力强、无噪音、无污染等优点, 为旅客带来便利的同时节能环保。

(2) 时速 600 km, 弥补高铁 (时速 300 km) 与飞机 (时速 800 km) 之间的速度空白。人类的生活习惯将一天分为 3 个工作时间段 (上午、下午、晚上各 4 h)。按照 600 km 时速行驶, 从北京到上海、武汉、成都、兰州等区域中心城市的旅行均可在一个工作时间内完成。

(3) 时速 1000 km (真空管道高温超导磁悬浮交通), 在大城市之间 (如北京到上海、成都到北京) 修建专线, 充分发挥运行成本低、运行周期短、无噪音、无污染、车站可修建于市中心的优势, 以缓解民航运输的压力。

然而, 轨道交通领域的项目动辄过亿, 全部依靠科研经费是不现实的, 需要轨道交通领域产业的加入, 以及市场的支持和引导。自稳定特征的高温超导磁悬浮具有成为高速轨道交通工具的潜力, 随着研发工作的不断深入, 上述 3 种速度的运营模式将逐渐得到肯定、试验与实现, 更高速轨道交通研究也将得以实质性推进。

参考文献 References

- [1] Wang Jiasu (王家素), Wang Suyu (王素玉). *Journal of Electrical Engineering* (电气工程学报) [J], 2015, 10 (11): 1-10.
- [2] Yang Xueshi (杨学实). *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* (交通运输系统工程与信息) [J], 2003, 3 (3): 66-70.
- [3] King L V. *On the Acoustic Radiation Pressure on Spheres* [C]. London: Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1934, 147 (861): 212-240.
- [4] Brandt E H. *Science* [J], 1989, 243 (4889): 349-355.
- [5] Jayawant B V, Sinha P K, Wheeler A R, et al. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* [J], 1976, 123 (9): 941-948.
- [6] Sinha P K. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* [J], 1978, 100 (4): 333-342.
- [7] Anteleff W, Barnard G, Kurtz C, et al. *Science and Technology of West China* (中国西部科技) [J], 2005, 6: 54-56.
- [8] Sawada K, Murai M, Tanaka M. *Japan Railway and Transport Review* [J], 2000, 25: 58-67.
- [9] Tang Lu (唐 璐). *Finance Economy* (金融经济) [J], 2016, 9: 15-17.
- [10] Sawada K. *Proceeding of the IEEE* [J], 2009, 97 (11): 1881

- 1885.
- [11] Fujiwara S, Fujimoto T. *Characteristics of the Combined Levitation and Guidance System Using Ground Coils on the Side Wall of the Guideway* [C] // *Proceeding of the 11th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (Maglev' 89)*. Yokohama: Conference Held in Argonne, 1989: 241–244.
- [12] Koei Tsuge. Central Japan Railway Company [EB/OL]. (2016–03–30) [2017–05–15]. http://english.jr-central.co.jp/company/ir/investor-meeting/_pdf/im_2016_03.pdf
- [13] Wu M K, Ashburn J R, Torng C J, *et al.* *Physical Review Letters* [J], 1987, 58 (9): 908–910.
- [14] Zhao Zhongxian (赵忠贤), Chen Liquan (陈立泉), Yang Qiansheng (杨乾声), *et al.* *Chinese Science Bulletin (科学通报)* [J], 1987, 6: 412–414.
- [15] Kusada S, Igarashi M, Nemoto K, *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2007, 17 (2): 2111–2116.
- [16] Abrikosov A A. *Soviet Physics JETP* [J], 1957, 5 (6): 1174–1182.
- [17] Essmann U, Trauble H. *Physics Letters* [J], 1967, 10 (24A): 526–527.
- [18] Gammel P L, Bishop D J, Dolan G J, *et al.* *Physical Review Letters* [J], 1987, 59 (22): 2592–2595.
- [19] Deng Z, Wang J, Zheng J, *et al.* *Superconductor Science and Technology* [J], 2008, 21 (11): 115018.
- [20] Wang J R, Wu M Z, May H, *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* [J], 1998, 27 (4): 240–243.
- [21] Wang J, Wang S, Zeng Y, *et al.* *Physica C* [J], 2002, 378–381: 809–814.
- [22] Schultz L, Haas De O, Verges P, *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2005, 15 (2): 2301–2305.
- [23] Sotelo G G, De Oliveira R A H, Costa F S, *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2015, 25 (3): 3601005.
- [24] David E G, Stephan R M, Costa G C, *et al.* *Feasibility Study of an HTS – Maglev Line at the Federal University of Rio de Janeiro* [C] // *Proceeding of the 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (Maglev' 06)*. Dresden: Conference Held in Argonne, 2006.
- [25] Deng Z, Zhang W, Zheng J, *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2016, 26 (6): 3602408.
- [26] A Super Chute [N]. *IEEE Spectrum*, 2014–07–21.
- [27] D' Ovidio G, Crisi F, Lanzara G. *Physica C* [J], 2008, 468 (14): 1036–1040.
- [28] Okano M, Iwamoto T, Furuse M, *et al.* *Journal of Physics: Conference Series* [J], 2006, 43: 999–1002.
- [29] Kovalev K L, Koneev S M – A, Poltavec V N, *et al.* *Magnetically Levitated High – Speed Carriages on the Basis of Bulk HTS Elements* [C] // *Proceeding of the 19th International Symposium on Magnetic Suspension Technology*. Dresden: Conference Held in Argonne, 2005: 51.
- [30] Wang J, Wang S, Deng C, *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2007, 17 (2): 2091–2094.
- [31] Yang W J, Wen Z, Duan Y, *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2006, 16 (2): 1108–1111.
- [32] Ma K B, Postrekhin Y V, Chu W K. *Review of Scientific Instruments* [J], 2003, 74 (12): 4989–5017.

(编辑 吴琛)