

文章编号: 0258-2724(2016)04-0750-09 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2016.04.021

真空管道 HTS 侧浮系统中 线性电机起动特性研究

周大进^{1 2}, 崔宸昱^{1 2}, 马家庆^{1 2},
赵立峰^{1 2}, 张勇^{1 2}, 赵勇^{1 2 3}

(1. 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 四川成都 610031; 2. 西南交通大学超导与新能源研究开发中心, 四川成都 610031; 3. 新南威尔士大学材料科学与工程学院, 新南威尔士州悉尼 2052)

摘要: 为了使真空管道高温超导 (HTS) 侧浮列车获得更高的起动推力和运行加速度, 提高列车高速运行时的稳定性, 以真空管道 HTS 侧浮列车驱动系统为研究对象, 建立了直线电机 2D 仿真模型, 在此基础上, 采用有限元软件仿真和设计实验, 对不同次级下的电机起动推力及法向力特性进行了研究. 研究表明: 不同次级材质及厚度对列车运行有着明显影响, 当列车以较高同步速度运行时, 选择厚度为 2 mm 左右的工业纯铝作为电机次级, 列车能获得较高的起动推力和加速性能, 同时铝次级的低密度特性降低列车总重, 并在悬挂方向上提供一定的悬浮力, 提高了列车运行的稳定性.

关键词: 真空管道运输; 高温超导; 磁浮列车; 直线电机; 次级板

中图分类号: TM35 **文献标志码:** A

Starting Characteristics of Linear Motor in Evacuated Tube HTS Side-Suspended Maglev System

ZHOU Dajin^{1 2}, CUI Chenyu^{1 2}, MA Jiaqing^{1 2},
ZHAO Lifeng^{1 2}, ZHANG Yong^{1 2}, ZHAO Yong^{1 2 3}

(1. Key Laboratory of Magnetic Levitation Technologies and Maglev Trains (Ministry of Education of China), Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Superconductivity and New Energy R&D Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. School of Materials Science and Engineering, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia)

Abstract: In order to gain a greater starting thrust and higher running acceleration in evacuated tube HTS (high temperature superconductor) side-suspended maglev vehicle, and improve running stability at high speeds, a 2D simulation model for linear motor was established by studying the driving system of evacuated-tube HTS side-suspended maglev. The characteristics of the starting-thrust and normal force of the motor with different secondary plates were studied by finite element simulation and experiments. The results show that the secondary plates of different materials and thicknesses have significantly effects on the operation of maglev vehicle. When a 2 mm-thick commercial-purity aluminum plate was used as the motor secondary, the maglev vehicle could achieve higher starting

收稿日期: 2015-06-29

基金项目: 国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划专项 (2011GB112001 2013GB110001); 国际合作项目 (2013DFA51050); 国家自然科学基金资助项目 (51271155 51377138); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (SWJTU11ZT31 2682013CX004); 四川省科技计划资助项目 (2011JY0031 2011JY0130)

作者简介: 周大进 (1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为直线电机设计与驱动, E-mail: zdj007008009@163.com

通信作者: 赵勇 (1960—), 男, 博士, 教授, 研究方向为高温超导材料应用, E-mail: yzhao@home.swjtu.edu.cn

引文格式: 周大进, 崔宸昱, 马家庆, 等. 真空管道 HTS 侧浮系统中线性电机起动特性研究 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(4): 750-758.

thrust and accelerating performance with a high synchronous-speed. Meanwhile, low density of aluminum plate reduces the total weight of the maglev vehicle and it provides a levitation force in the hanging direction, which increases the running stability of the maglev vehicle.

Key words: evacuated tube transportation; high-temperature superconducting; maglev vehicle; linear motor; secondary plate

当地面交通工具运行在 400 km/h 后,稠密的大气层会给高速列车的运行带来强大的气动阻力和噪声。为克服高速列车加速瓶颈,诞生了真空管道技术结合磁悬浮技术的超高速运输系统。1999 年,该系统由美国机械工程戴睿·奥斯特设计并申请专利(美国专利号: 5950543)。2001 年,张耀平和戴睿·奥斯特合作,首次将这项技术引进中国,对真空管道运输系统可行性和关键技术进行了初步的理论研究^[1-2]。2006 年初,西南交通大学超导与新能源研究开发中心(超导研究开发中心)与电气学院组建“磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室”,赵勇教授团队开始了真空管道交通运输系统的实验研究^[3]。2006—2010 年,利用高温超导(HTS)磁浮列车技术^[4-9],该团队设计完成了第 1 代真空管道 HTS 磁浮实验系统,对真空管道运输系统进行了理论及实验研究^[10-13]。但受轨道半径和离心力的限制,列车只能在低速下运行,针对高速真空管道运输系统的研究,目前仍主要以理论仿真研究为主^[14-17]。2010—2015 年,赵勇团队设计搭建了第 2 代高速真空管道 HTS 侧浮实验系统^[18-19],列车运行方式由悬浮变为悬挂,永磁轨道固定在真空管道外侧壁,使列车运动中获得更大的向心力,在真空管道中能高速行驶。

在第 2 代高速真空管道侧浮实验系统中,为了提高驱动系统性能,增加列车高速运行时的稳定性,采用单边长初级直线电机对列车进行连续驱

动。同常规单边长初级直线电机不同的是,直线电机初级由若干单元电机段沿永磁轨道方向铺设拼接而成,单元段初级间存在一个很小的夹角,电机供电采用分段并联供电,每一段电机的供电都由相应的电气开关和位置传感器进行控制。采用这类供电方式的直线电机,可以减少系统对电源容量的要求,提高电机运行效率^[20]。真空管道内的直线电机放置在永磁轨道下方,电机次级感应板固定在磁浮车底部,电机初级推动次级感应板带动侧挂列车作高速环形运动,由于直线电机沿径向空间尺寸狭窄,且运行线路为一定曲率的弧形轨迹,电机次级宽度和长度均不宜过大,所以本文设计研究的次级宽度与长度取恒定值,同时因为列车侧挂时超导体提供的导向力有限,次级板不宜过重。通过调整次级板材质和厚度会显著影响电机的驱动性能^[21-22]。采用有限元仿真软件对不同材质及厚度的次级感应板的电机驱动性能进行仿真研究,提出了影响磁浮列车侧挂运行稳定性的因素,结合高速真空管道 HTS 侧浮系统结构特点,对电机次级感应板进行了综合设计,并通过实验测试,验证了仿真分析的正确性。

1 仿真模型的建立

如图 1 所示,为第 2 代高速真空管道 HTS 侧浮实验系统的 2D 截面图和 3D 结构示意图,图中 2 为运行时的悬浮气隙。当磁浮小车在真空管道内做侧

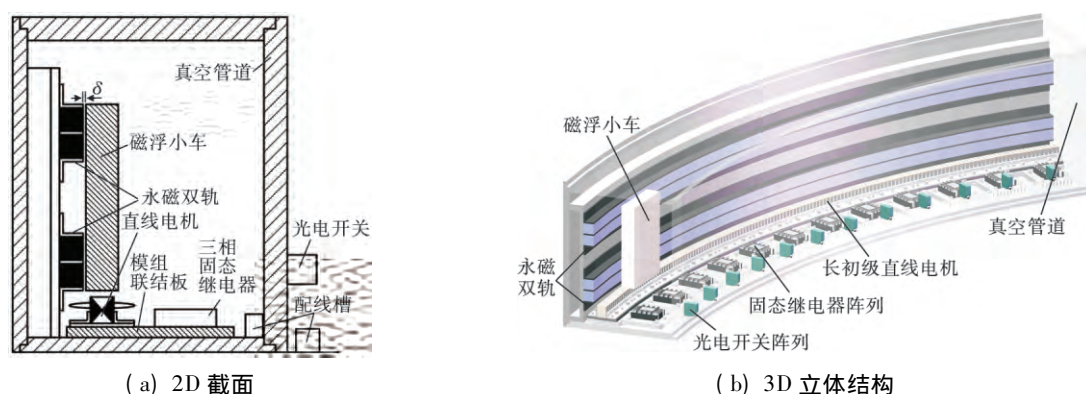
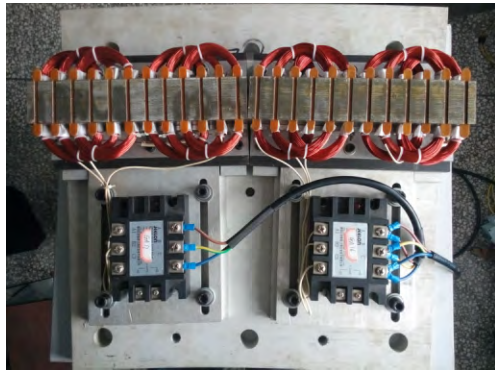


图 1 第 2 代高速真空管道 HTS 侧浮实验系统结构图

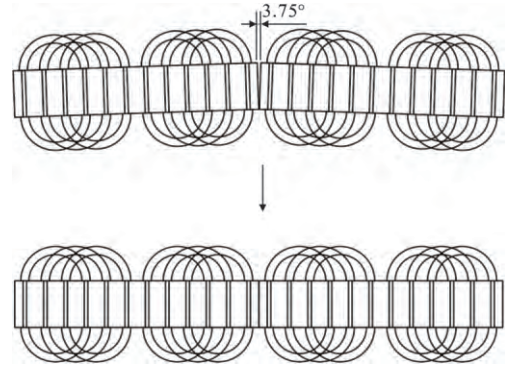
Fig. 1 Structure diagram of the second-generation evacuated-tube HTS side-floating maglev system

浮环形运动时,可以获得更大的向心力和运行时速,相关文章^[18]给出了具体分析.整个设备主要由真空管道系统、HTS 永磁轨道悬浮系统和直线电机驱动系统组成,初步设计速度 100 km/h,管道真空度极限 1 kPa,通过该实验系统可以为中低真空度下,时速 600~1 000 km 的高速列车应用提供实验数据.



(a) 两单元电机试验模组

用于第 2 代真空管道 HTS 侧浮实验系统驱动的直线电机,初级结构形式上为闭合圆环形长初级,采用 96 段直线形单元初级进行拼接安装,每段电机拼接处存在 3.75° 的劈形气隙夹角,由于单段电机长度远远小于电机总周长,可以近似认为局部相邻段电机组成了长度为单元电机长度两倍的直线电机,如图 2 所示.



(b) 电机段拼接

图 2 环形分段直线电机结构图

Fig. 2 Structure diagram of circular segmented-primary linear motor

如图 2 (a) 所示,测试电机由两个单元直线电机组成,采用场路联合建模仿真,近似建立了图 3 所示的直线电机 2D 仿真模型,模型外部接入仿真电路对电机段进行并联供电,电机初次级耦合长度为 6. 供电长度为 8. (. 为电机极距),初级绕组采用单层三相整距集中绕组.通过该仿真模型,可以得到电机推力、法向力、各场量分布和三相电参数等结果.

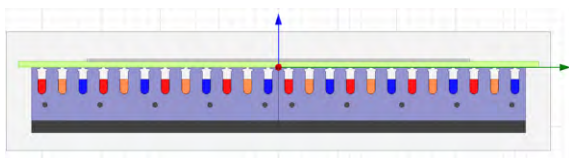


图 3 直线电机 2D 仿真模型

Fig. 3 2D simulation model of linear motor

单元直线电机初级槽数为 12,极对数为 2,次级长度为 6.,参考相关文献^[23],当初次级耦合长度不小于 6. 时,在进行直线电机理论分析或控制时可以不考虑第一类静态纵向边端效应,所以这里固定次级长度为 6. 此外,可以通过修正单相绕组漏电感计入单元直线电机段间夹角,单元直线电机的具体参数见表 1.

根据经典的旋转电机理论^[24],可以得到直线电机驱动的同轴速度为

$$v_s = 2 \cdot f \cdot \tau \tag{1}$$

式中: f 为电源频率.

表 1 单元直线电机参数表
Tab. 1 Parameters of unit linear motor

| 参数 | 取值 | 参数 | 取值 |
|-----------|-------|------------------|-----|
| 初级长度/mm | 208.8 | 初级极数 | 4 |
| 初级叠厚/mm | 40 | 并联支路数 | 1 |
| 初级高度/mm | 45 | 单个线圈匝数 | 120 |
| 极距/mm | 52.2 | 单相绕组串联匝数 | 240 |
| 次级长度/mm | 313.2 | 单相绕组电阻/ Ω | 3.6 |
| 初级铁扼厚度/mm | 10 | 单相绕组漏电感修正值/mH | 6 |

通过调整电机极距和电源频率,可以控制管道中列车的运行时速,电机极距大小一般固定不变,当极距取值较大时,将不利于有限轨道半径的环形驱动,还会增加绕组端部用铜,带来更大的漏电抗,降低电机的运行效率,所以应采用适当的极距,针对高速真空管道 HTS 侧浮实验系统,采用变频器对电机运行速度进行控制.在单相绕组的安全载流范围内,设定了 3 个不同的同步速度值,根据式(1)计算得到了相应的电源频率和电压值,对电机在不同次级下的起动特性进行了分析,具体参数数值如表 2 所示.

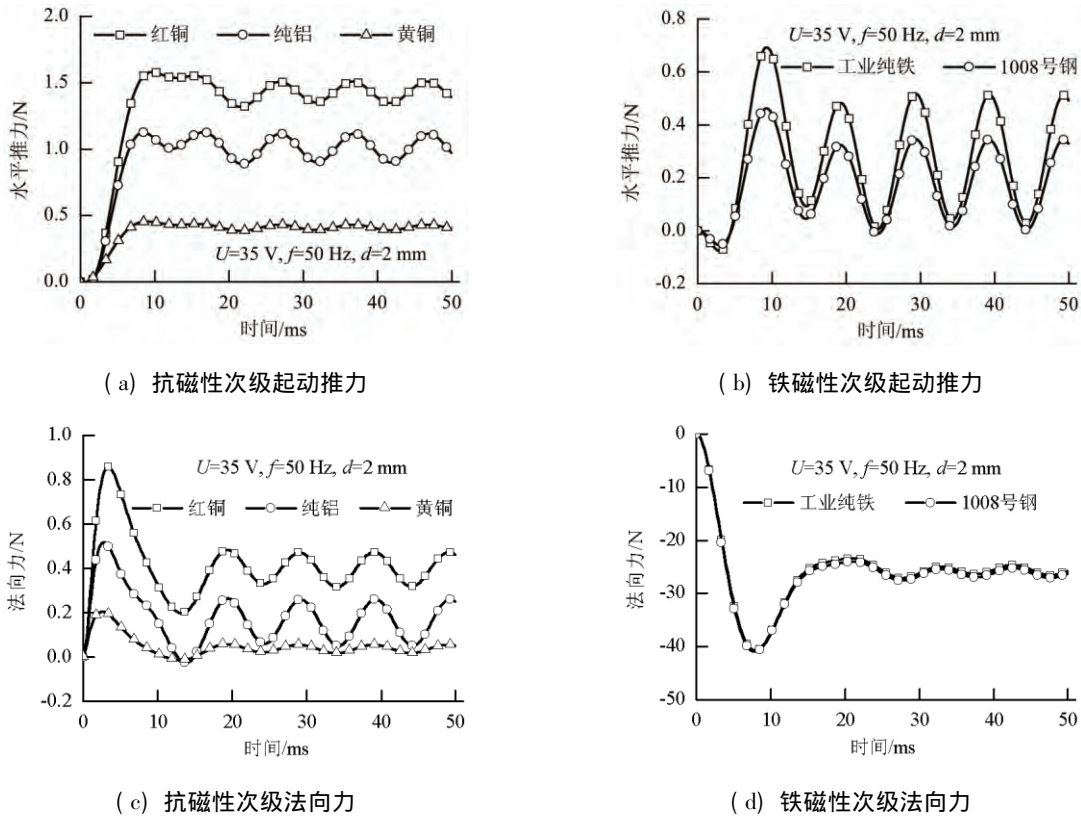


图4 不同次级材质起动推力和法向力曲线图
 Fig.4 Curve of the starting-thrust and normal force with different attribute secondary

3 次级厚度和电源频率对电机性能的影响

根据前面的仿真和分析可知,不同材质电机次级会产生不同的起动推力和法向力,其中铁磁性次级会产生一个很大的法向吸引力,不仅严重破坏磁浮列车运行的稳定性,还会与永磁双轨产生相互作用力,所以在真空管道 HTS 侧浮实验系统中,直线电机次级材质需要尽量避免采用铁磁性次级,此后的仿真均以单一抗磁性次级为研究对象,不再分析单一铁磁性次级及其复合次级。

磁通能穿透导体内部的深度称为渗透深度,不同材质导体具有不同的渗透深度,同种材质导体在不同频率下具有不同的渗透深度,该深度的表达式为^[25]

$$2 = \sqrt{\frac{\#}{\mu_0 \mu_s \pi f}} \quad (3)$$

式中: # 为次级电阻率;

μ_0 为真空磁导率;

μ_s 为相对磁导率。

根据式(3),可以计算出不同材质、不同电源

频率下的次级渗透深度,如表4所示。

表4 不同材质和频率下的渗透深度
 Tab.4 Penetration depth under different materials and frequencies

| 频率/Hz | 渗透深度/mm | | |
|-------|---------|-------|--------|
| | 纯铝 | 红铜 | 黄铜 |
| 50 | 11.598 | 9.346 | 18.966 |
| 160 | 6.483 | 5.224 | 10.602 |
| 270 | 4.991 | 4.022 | 8.161 |

当次级厚度增加时,在一定范围内,电机起动推力和法向力都会增大,但当达到渗透深度后,磁通不再穿过渗透深度外的部分,再增大次级厚度,推力不会再增大,反而会变小,已有相关理论研究也证明了这一点^[25]。在图3所示的2D仿真模型基础上,改变模型中的次级厚度,仿真研究了抗磁性次级在不同厚度下的电机起动推力和法向力特性。

如图5所示,是磁浮车在同步速度18 km/h下加载相应激励时,抗磁性次级在不同厚度下电机起动推力和法向力变化特性曲线。随着次级厚度增加,次级电阻减小,电机起动推力增大,参照表4,当厚度增加到渗透深度附近后,起动推力不再增

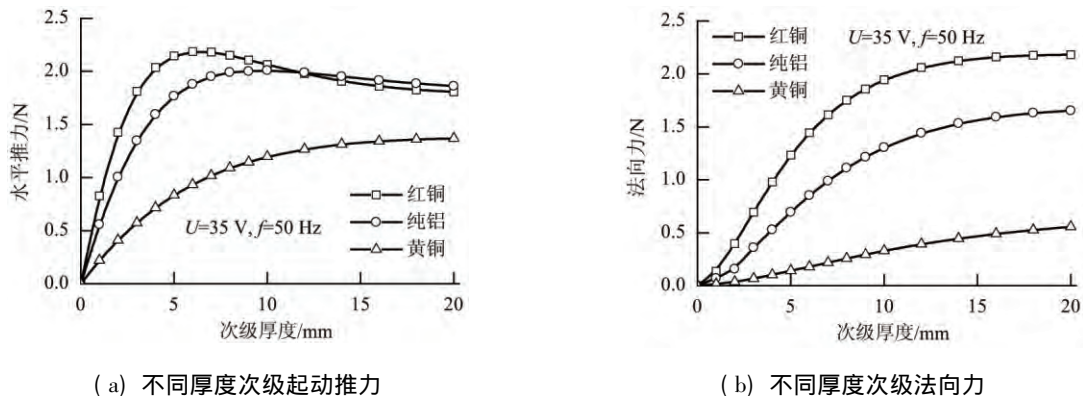


图 5 不同厚度次级起动推力和法向力曲线图
 Fig. 5 Curve of the starting-thrust and normal force with different thickness secondary

加 相反逐渐变小,而法向力则随着次级厚度的增加逐步增大,并趋近一个稳定值。

抗磁性材质中,铝次级具有较低的密度,能有效减轻磁浮车总重,并能提供较大的起动推力,具有良好的加速性能。针对铝次级,按表 2 给定的 3 个同步速度对应的电源参数值,在图 3 所示的 2D 直线电机模型基础上加载不同的电源频率和电压,仿真分析了电机起动推力和法向力随次级厚度

增加的变化规律,随着电源频率的增大,电机取得最大起动推力时的次级厚度变小,如图 6(a) 所示。按同步速度为 18、60、100 km/h 时的激励进行供电时,使磁浮车获得最大起动推力的次级厚度分别约为 10、3、2 mm,同时随着电源频率的增大,次级涡流效应变得显著,电机法向排斥力变大,随着次级厚度的增加,逐渐趋于稳定,如图 6(b) 所示。

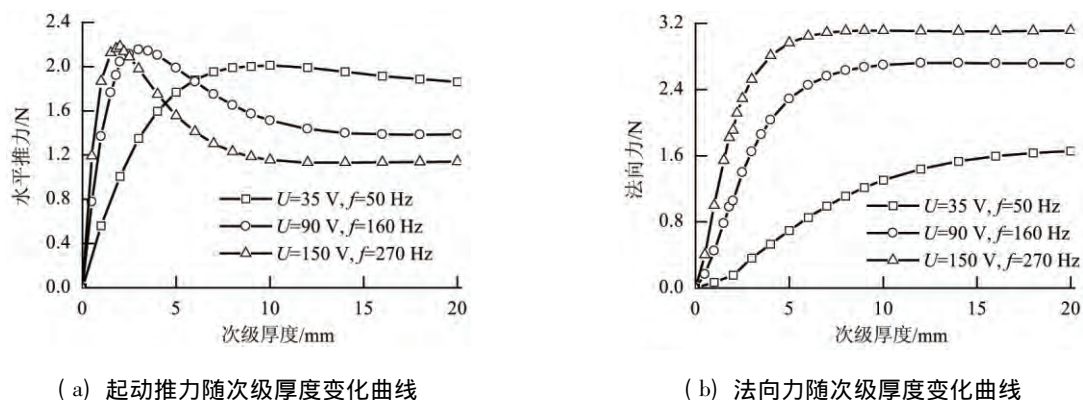


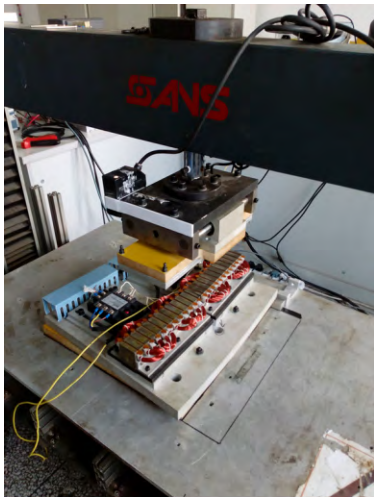
图 6 不同同步速度下电机起动推力和法向力随次级厚度变化曲线图
 Fig. 6 Curves of the starting-thrust and normal force varying with thickness at different synchronous-speeds

4 实验测试

参照第 2 代真空管道 HTS 侧浮实验系统的设计结构,加工了如图 7(a) 所示的两段单元直线电机试验段,该试验段主要由单元电机初级段、三相固态继电器、真空管道底座和次级结构支架组成,并搭建了测试直线电机试验段启动推力的实验平台,如图 7(b) 所示,该平台主要由直线电机分段并联供电控制器、测量控制系统和驱动电源组成。

通过变频器和调压器调整电源频率和线电压,

使直线电机在文中给定的同步速度下进行实验,设计加工了厚度分别为 2、4、6、8 mm 的次级铝板,通过不同厚度铝板的叠加组合,得到了更多不同厚度的次级板,如图 8(a) 所示,为次级铝板厚度为 20 mm 时的电机起动推力测试图,通过这种方法在不同同步速度下,测试了厚度 2 ~ 20 mm 的次级铝板起动推力值,并同有限元仿真结果进行了比较,如图 8 所示,实验与仿真结果基本一致,验证了建模的可靠性和仿真数据的正确性。



(a) 两单元直线电机试验段



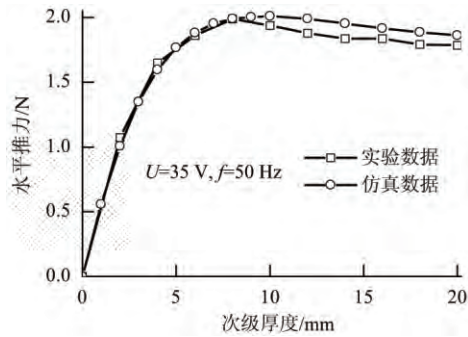
(b) 直线电机试验段测试台

图7 真空管道直线电机性能测试实验图

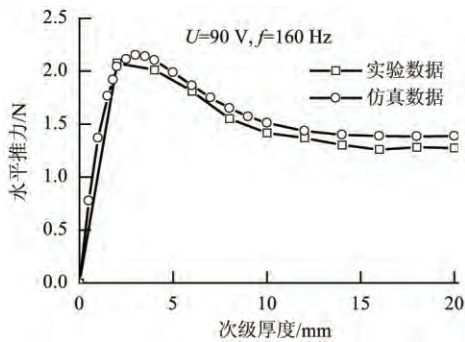
Fig.7 Photos of the performance test on linear motor in evacuated tube



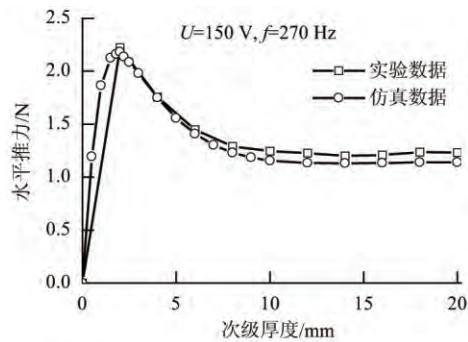
(a) 20 mm 厚次级起动推力测试



(b) 同步速度 18 km/h



(c) 同步速度 60 km/h



(d) 同步速度 100 km/h

图8 直线电机在不同同步速度下起动推力随次级厚度变化实验及仿真曲线

Fig.8 Experimental and simulation curves of LIM starting-thrust versus thickness at different synchronous-speeds

5 结论

针对真空管道侧浮式 HTS 磁悬浮环线实验系

统中线性电机的研究,得到以下结论:

- (1) 抗磁性次级板法向力为一个有益于侧浮超导磁浮车运行的悬浮排斥力,铁磁性次级板则会

产生一个破坏悬浮稳定性的强大吸引力。在次级板厚度小于相应渗透深度范围内,电机起动推力随着次级板电导率的增大而增大;

(2) 电机起动推力随着次级板厚度的增加而增大,当厚度超过某个值(这个值小于次级板的渗透深度)后,再继续增加次级板厚度,起动推力不再增加,相反逐渐衰减至另一个值后趋于稳定,同时电机法向力随着次级板厚度增加而逐渐增大至某个值后趋于稳定;

(3) 侧浮超导磁浮车在较高的同步速度下起动时,考虑采用 2 mm 厚的纯铝次级板,将获得较高的起动推力,同时在悬浮方向上提供一定的悬浮排斥力,提高了磁浮车侧浮运行时的稳定性,仿真结果同实验数据能较好的吻合,验证了实验结论正确性,为高速真空管道 HTS 磁悬浮系统的应用设计提供参考。

致谢: 本文的研究工作得到西南交通大学博士创新基金(A0920502051410-3)的资助。

参考文献:

- [1] ZHANG Y P, OSTER D, KUMADA M, et al. Key vacuum technologies to be solved in evacuated tube transportation[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(2): 110-113.
- [2] OSTER D, KUMADA M, ZHANG Y P. Evacuated tube transport technologies (ET3)tm: a maximum value global transportation network for passengers and cargo[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(3): 42-50.
- [3] 刘本林, 赵勇. 磁浮系统概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009: 14-15.
- [4] WANG J S, WANG S Y, ZENG Y W, et al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world[J]. Physica C: Superconductivity, 2002, 378/379/380/381: 809-814.
- [5] SOTELO G G, DE OLIVEIRA R A H, COSTA F S, et al. A full scale superconducting magnetic levitation (maglev) vehicle operational line[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 3601005.
- [6] D'OVIDIO G, CARPENITO A. Dynamic analysis of high-temperature superconducting vehicle suspension[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2015, 28: 591-595.
- [7] OZTURK K, ABDIOGLU M, SAHIN E, et al. The effect of magnetic field distribution and pole array on the vertical levitation force properties of hts maglev systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(4): 3601607.
- [8] LIU L, WANG J S, WANG S Y, et al. Levitation force transition of high-*t_c* superconducting bulks within a maglev vehicle system under different dynamic operation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1547-1550.
- [9] DA COSTA BRANCO P J, DENTE J A. Design and experiment of a new maglev design using zero-field-cooled YBCO superconductors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(11): 4120-4127.
- [10] JIANG J, BAI X, WU L, et al. Design consideration of a super-high speed high temperature superconductor maglev evacuated tube transport (I)[J]. Journal of Modern Transportation, 2012, 20(2): 108-114.
- [11] 陈绪勇, 赵立峰, 马家庆, 等. 真空管道磁浮列车救援动力学仿真分析[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(11): 1100-1104.
CHEN Xuyong, ZHAO Lifeng, MA Jiaqing, et al. Dynamics simulation of rescuing of magnetic-levitation train running in evacuated tube[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(11): 1100-1104.
- [12] 马家庆, 周大进, 赵立峰, 等. 真空管道中高温超导磁悬浮车运行时的振动能耗特性[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(2): 119-125.
MA Jiaqing, ZHOU Dajin, ZHAO Lifeng, et al. The energy loss of running high-temperature superconducting maglev train for the vibration in evacuated tube[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(2): 119-125.
- [13] 马家庆, 周大进, 赵立峰, 等. 真空管道 HTS 磁浮系统中振动耗能法电磁制动分析[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(2): 130-136.
MA Jiaqing, ZHOU Dajin, ZHAO Lifeng, et al. Electromagnetic braking of high temperature superconducting maglev traveling in evacuated tube transport[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(2): 130-136.
- [14] ZHANG Y P. Numerical simulation and analysis of aerodynamic drag on a subsonic train in evacuated tube transportation[J]. Journal of Modern Transportation, 2012, 20(1): 44-48.
- [15] CHEN X Y, ZHAO L F, MA J Q, et al. Aerodynamic simulation of evacuated tube maglev trains with different streamlined designs[J]. Journal of Modern

- Transportation, 2012, 20(2): 115-120.
- [16] 米百刚, 詹浩, 朱军. 基于动网格的真空管道高速列车阻力计算方法研究[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(9): 877-882.
MI Baigang, ZHAN Hao, ZHU Jun. Simulation of aerodynamic drag of high-speed train in evacuated tube transportation[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(9): 877-882.
- [17] 刘加利, 张继业, 张卫华. 真空管道高速列车气动阻力及系统参数设计[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(1): 10-15.
LIU Jiali, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Impacts of pressure, blockage-ratio and speed on aerodynamic drag-force of high-speed trains[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(1): 10-15.
- [18] 周大进, 马家庆, 赵立峰, 等. 真空管道 HTS 磁浮列车实验系统环形加速器设计[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(4): 391-398.
ZHOU Dajin, MA Jiaqing, ZHAO Lifeng, et al. Design of ring-shaped accelerator for high-temperature superconducting maglev trains moving in evacuated tube[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(4): 391-398.
- [19] LIANG G, ZHAO L F, YANG J L, et al. Study of the maglev performance of the side-mounted high-temperature superconductor maglev rotating system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(4): 3601406.
- [20] 许金, 马伟明, 鲁军勇, 等. 分段供电直线感应电机气隙磁场分布和互感不对称分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 61-68.
XU Jin, MA Weiming, LU Junyong, et al. Analysis of air-gap magnetic field distribution and mutual inductance asymmetry of sectionally powered linear induction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 61-68.
- [21] 刘斌, 方进, 曹君慈, 等. 次级结构参数对高温超导直线感应电机电磁特性的影响[J]. 低温与超导, 2014, 42(5): 46-50.
LIU Bin, FANG Jin, CAO Junci, et al. Effect of secondary structural parameters on HTS LIM electromagnetic properties[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2014, 42(5): 46-50.
- [22] 彭威, 李伟力, 程树康, 等. 次级对直线感应电动机性能的影响[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(1): 47-51.
PENG Wei, LI Weili, CHENG Shukang, et al. Influence of secondary on linear induction motor performance[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(1): 47-51.
- [23] 孙兆龙, 马伟明, 鲁军勇, 等. 长初级双边直线感应电动机静态纵向边端效应及阻抗矩阵研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 72-77.
SUN Zhaolong, MA Weiming, LU Junyong, et al. Research of static longitudinal end effect and impedance matrix for long primary double-sided linear induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 72-77.
- [24] 杨通. 高速大推力直线感应电机的电磁理论与设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [25] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 46-48, 90, 76-78.
- [26] 陈红艳. 直线感应电机电磁特性数值计算与仿真设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

(中文编辑: 唐 晴 英文编辑: 周 尧)