

文章编号:1000-6893(2007)增-0S19-04

高温超导磁悬浮助推缩比试验系统动态测试分析

温 正, 刘 宇, 杨文将

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

Experimental Analysis on Dynamic Performance of Scale-model High Temperature Superconductor Bulk Magnetic Levitation and Propulsion System

WEN Zheng, LIU Yu, YANG Wen-jiang

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 基于磁悬浮助推技术概念研究方案建立了一套悬浮加速缩比试验系统。从整体缩比模型振动试验出发,主要研究悬浮质量以及悬浮刚度对整体系统动态性能的影响,并在进行缩比单元动态试验结论的基础上,建立试验模型的加速试验动态采集系统,对整体模型进行运行性能试验。在试验基础上提出了提高磁悬浮推进系统运行稳定性的依据,并据此提出相应可行的解决方案设想。通过模型加速试验并采集试验数据定性分析磁悬浮系统的综合运动性能,以更好地评估系统稳定特性和品质,也为进一步研究磁悬浮助推发射的气动、分离系统稳定性和可靠性提供参考。

关键词: 动态响应; 直线电机; 振动测试; 磁悬浮

中图分类号: V553.1 **文献标识码:** A

Abstract: The paper focus on magnetic levitation and propulsion technology of a scale-model superconductor system with high temperature superconductor (HTS) bulks over a 7-meter NdFeB guideway for concept launch assistance. The vibration experiment is done to investigate the dynamic characteristics such as the resonance frequency, suspension quality and suspension stiffness. The purpose is to evaluate the influence degree under a certain vibration condition. The dynamic experimental acceleration system platform and testing system are established to investigate the movement performance. Experimental design is to provide the warranty of stabilization and show the idea of improving the stability of the acceleration system. The acceleration experiment further confirms the security of the launch assistance suspension system which also gives a reference and evaluation method of the stability and security in the aerodynamic and separation system design.

Key words: dynamic response; linear motor; vibration measurement; magnetic levitation

目前超导技术在电力、交通、航空与航天等领域得到了日趋广泛的应用和发展。近几年来有关高温超导(HTS)特性的研究十分活跃,其试验和理论成果为工程应用提供了有意义的指导。非理想第二类高温超导块材作为其中的一个分支,由于该类超导体具有的不完全抗磁性及强钉扎效应等特点,使得超导悬浮系统在一定条件下无须复杂的稳定控制便可达到理想的自稳定悬浮,因此高温超导悬浮成为最具有吸引力的悬浮技术之一,目前已经应用于磁浮轴承、飞轮储能和陀螺仪等。

高温超导悬浮的动力特性一直是人们关注的重点之一。从目前对于超导本身的物理特性的研

究来看,非理想第二类高温超导块材的动态性能除了受本身的电磁特性如临界电流密度、磁通流阻和钉扎势等影响外,还取决于合理的场冷环境以及外磁场强度等,以至于在结合动力学进行理论仿真和分析时,需要考虑超导材料本身的特点如俘获磁通以及外磁场梯度的影响等,通常引入磁通蠕动和流动物理模型。Yoshida^[1-2]等便是基于磁通流动与磁通蠕动模型提出了一种新的分析超导磁力的方法,并结合运动方程近似模拟了永磁块与高温超导块之间的耦合振动。模型的引入增加了理论计算的难度,尤其对于多块超导体组成的整体悬浮系统的仿真计算难度加大,且误差也加大。

从试验角度来看,Kosuke^[3]等的研究表明了块材超导体磁悬浮力与场冷位置、悬浮气隙、振动幅度和频率之间存在一个非线性的关系。因此,

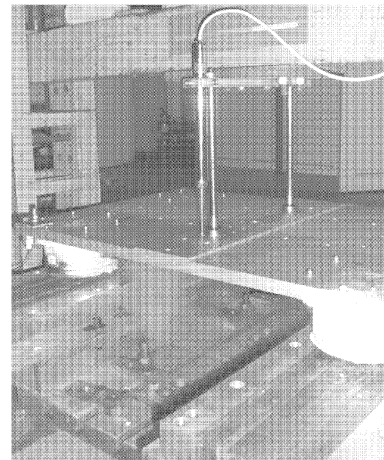
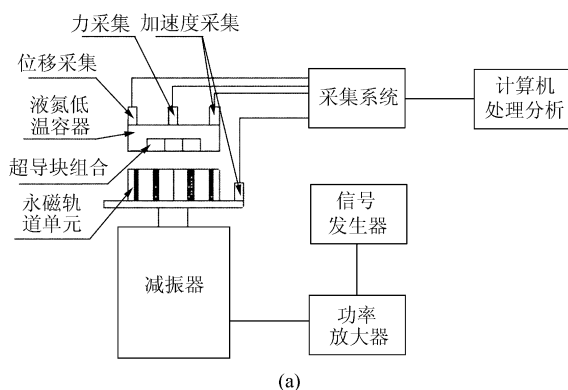
收稿日期:2006-10-25; 修订日期:2007-07-04
基金项目:国家 863 计划(2004AA722102)
通讯作者:温 正 E-mail: wenzheng@sa.buaa.edu.cn

对整体超导悬浮系统运动特性的研究,需要在试验基础上建立相应的磁浮系统动力模型和轨道模型等,结合振动理论研究基本的动态参数,才能更好地分析轨道结构特性和磁浮系统运行平稳性能以及车辆-轨道耦合振动等一系列问题。

为此,本文在超导磁悬浮助推发射的研究背景下,以超导磁浮轴承以及磁浮列车的动力学和运动学研究内容为参考思路,提出磁浮系统的试验动态研究方法和思路,结合振动分析理论对计算优化组合的轨道和悬浮单元进行动态特性的试验分析,为超导技术的拓展研究应用奠定了一定的基础,也为研究高温超导磁浮助推推进系统的运动特性理论和试验的进一步展开提供指导。

1 缩比悬浮系统振动试验

振动试验控制及数据采集分析原理如图1所示,在激振台面上安置2段1 m长的NdFeB永磁导轨,承载撬体上安装4个低温容器给高温超导体提供低温环境,高温超导块材采用尺寸为 $\varnothing 30\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ (直径 \times 厚度)的熔融织构YBaCuO超导块组合排列。对悬浮撬体的水平约束采用直线摩擦轴承,以保证系统维持稳定的轴向振动。数据采集器包括放置在振动台上以及承载撬体上的加速度传感器,考虑到低频振动数值积分的误差较大,采用在承载撬体上安装位移传感器来采集超导系统感应位移变化。此外,对于整体性能试验,需要考虑承载板的固有频率,以避免测试时载板对磁浮力固有属性的影响,同时避免激励频率在承载板的固有频率附近引发共振而容易损坏。图2所示为通过敲击法^[4]得到的承载板的两阶固有频率值分别为13.8,16.2 Hz,在试验过程中,试验将绕开这两个频率值以避免撬体共振对系统动态测量的影响。



(b)

图1 振动试验设计及数据采集分析原理图

Fig. 1 Principles of vibration testing (and data measurement and analysis)

试验场冷高度选择为30 mm,在指定场冷高度位置处开始往低温容器灌入液氮,通过力传感器得到悬浮体总质量为35.2 kg,此时实现自由悬浮的有效悬浮高度16 mm。在振动台激振前首先选择数据采集器采样频率为2 kHz,然后在稳定悬浮以后通过定幅扫频激励并采集,计算机采集数据进行传递函数分析,可得到悬浮体固有频率为6.2 Hz,如图3所示。

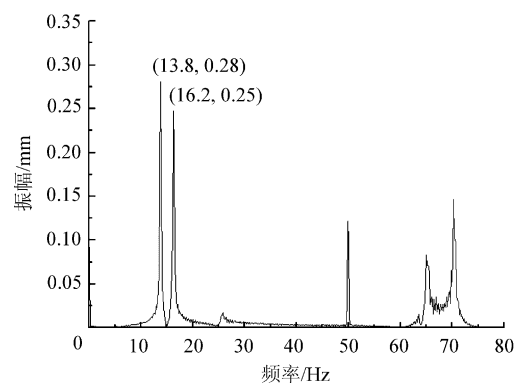


图2 承载板的固有频率

Fig. 2 Natural frequency of the levitation sled

另外,考虑到系统整体助推发射过程中的能量损失(如推进剂消耗)以及气动力影响等因素,悬浮系统总质量也会发生波动,为此,在缩比试验承载板上逐一增加负载,通过采集求解传递函数分析悬浮系统的固有频率特性,如图4所示。试验发现,质量的变化影响振幅的波动,但对悬浮系统的共振频率并无明显影响。

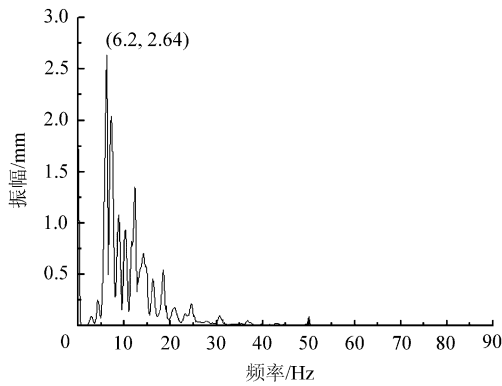


图3 超导磁浮体振动固有频率特性

Fig. 3 Characteristics of natural frequency of the HTS levitation system

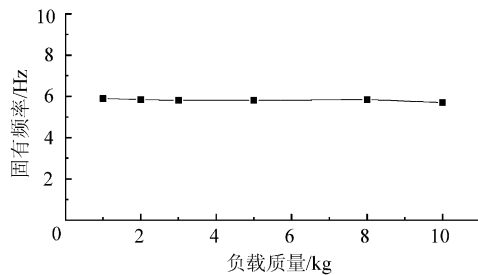


图4 负载质量对共振频率的影响

Fig. 4 Influence of levitated mass on resonance frequency

悬浮刚度,作为系统稳定性的一个判据,能近似评估磁浮系统承载的重量和系统的稳定性。这里研究的悬浮刚度是超导体在悬浮力作用下的刚度,即轨道磁场对悬浮体的刚度。影响动刚度特性的因素除了系统总质量,另外一个主要因素是振幅的大小,如图5所示,对于超导单元,其动刚度随振幅的增大而逐渐减小,这也表明超导体内部临界电流密度受磁场梯度的影响很显著。

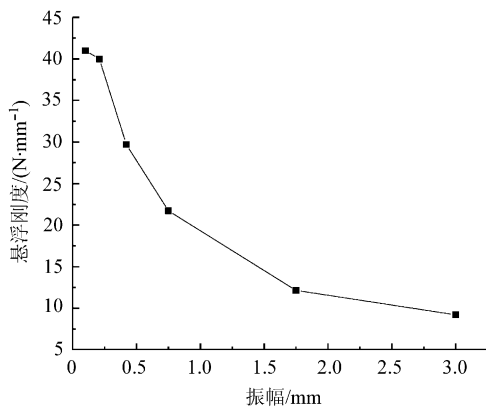


图5 单元体悬浮刚度随振幅波动特性

Fig. 5 Influence on resonance frequency at different fluctuation of amplitude

2 缩比悬浮-推进系统的试验测试

在对系统振动试验结论分析的基础上,进一步试验选择了比较合理的3种场冷方案进行加速试验,分别是40,30,25 mm场冷位置。磁浮缩比加速试验台如图6所示,加速段采用双边直线感应电机组驱动,根据缩比要求设计起动推力为900 N,电机总长为2.4 m,电机总输出功率为75 kW,输出总电流为156 A,动子安装在磁悬浮载体下方,利用三相交流感应原理^[5]驱动动子带动磁浮系统高速运行,设计初始速度为6 m/s。试验平台系统的瞬间制动采用缓冲机构。

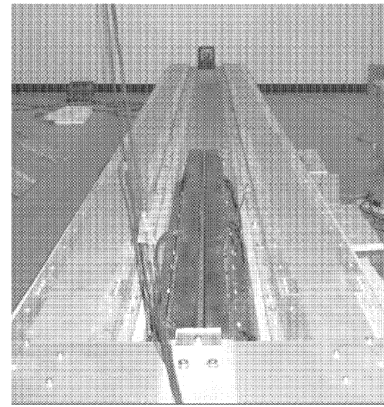


图6 7 m长试验轨道及推进系统

Fig. 6 The 7 meter-long track and propulsion system

测试系统通过3个三向加速度传感器连接到磁浮系统承载机构上,以采集垂向、水平(运行方向)和导向(纵向)3个方向的加速度信号,3个三向加速度计以三角形形式分别安装在前端、左后端和右后端。

由图7和图8的试验结果可见,在0.3 s启动期间由于瞬间加速度很大,振动比较剧烈,随后的采集数据表明,在25 mm场冷位置,波动明显比40 mm场冷位置时要小,低场冷的钉扎力作用效果明显。另外,25 mm工况下垂向加速度缓和系统稳定的时间要短,在后半段平缓程度要好于40 mm场冷工况。

3 结论

在国内外磁浮列车研制过程中,都曾出现过车体/轮轨系统发生共振现象。通常系统的共振现象与系统频率分布不合理有关。对于增加了悬挂机构的磁浮运载器系统来说,即使轨道基频与悬挂系统频率相等,整体系统仍然能够稳定悬浮,但如果超导磁浮子系统、运载器、轨道频率以及悬

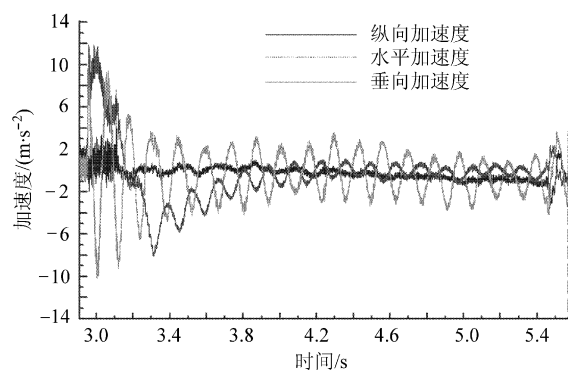


图7 40 mm场冷下3个坐标轴方向加速度

Fig. 7 Longitudinal, lateral and vertical accelerations when suspension system is at 40 mm field-cooled position

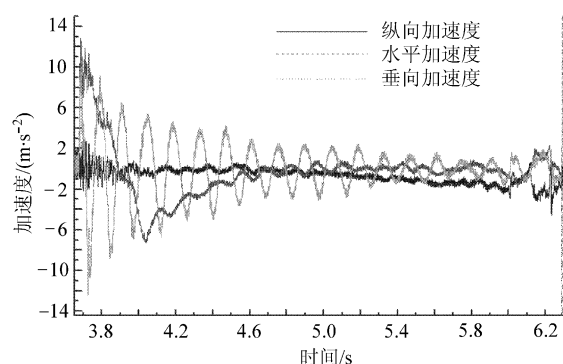


图8 25 mm场冷下3个坐标轴方向加速度

Fig. 8 Longitudinal, lateral and vertical accelerations when suspension system is at 25 mm field-cooled position

挂系统之间固有频率靠得太近,则会加剧轨道振动,延长轨道稳定时间,甚至引起悬浮车体与轨道系统的共振失稳。而增大悬浮载体或悬挂机构系统阻尼可以更有效地抑制轨道瞬态振动幅值,因此,在磁悬浮系统整体设计中,必须考虑各子系统的特征频率之间是否具有足够的距离,才能从根本上避免整体系统共振失稳。

本文试验结果得出,对于超导缩比试验系统而言,固有频率因场冷位置的不同变化范围约在5~12 Hz,轨道一阶频率在10 Hz左右。倘若参考磁浮铁路高架线路,其一阶频率在5~10 Hz范围,可见,各系统间特征频率相差不大。由上述分析得知,系统存在耦合共振的可能。因此需要对轨道阻尼、悬挂系统阻尼以及悬浮阻尼进行优化设计,只有这样,才能获得良好的磁浮系统动态性能。

试验还表明,悬浮刚度受振动幅度影响较为显著,平缓加速及运行过程中保证悬浮气隙尽可能小的波动范围是很必要的,即合理的可变阻尼方案设计是必不可少的。

运行平稳性的另一个重要影响因素在加速试验中得到验证,即在保证设计要求允许的悬浮高度的临界范围内(例如对于该试验系统,30 mm场冷高度能满足设计最低为15 mm有效悬浮高度时),尽量采用低场冷高度,这样有利于增大超导块材钉扎力效果,得到较理想的稳定悬浮导向力。

参 考 文 献

- [1] Yoshida Y, Uesaka M, Miya K. Evaluation of dynamic magnetic force of high T_c superconductor with flux flow and creep[J]. *Int J Appl Electromagn Mater*, 1994, 5(1): 83-89.
- [2] Yoshida Y, Uesaka M, Miya K. Magnetic field and force analysis of high T_c superconductor with flux flow and creep [J]. *IEEE Trans Magn*, 1994, 30(5): 3503-3506.
- [3] Kosuke N, Syunsuke S. Approximate boundary conditions in a circular conductor and their application to nonlinear vibration analyses of high- T_c superconducting levitation system[J]. *IEEE Trans Magn*, 1996, 32(3): 1888-1896.
- [4] 振动与冲击手册编委会. 振动与冲击手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
Compiler Committee of Vibration and Impact Manual. Vibration and impact manual[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [5] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 51-89.
Ye Y Y. Principle and application of linear motor[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 51-89. (in Chinese)

作者简介:



温 正(1978—) 男,博士研究生。主要研究方向:航空宇航推进理论及工程。
Tel: 010-82316855
E-mail: wenzheng@sa.buaa.edu.cn



刘 宇(1963—) 男,教授,博士生导师。主要研究方向:航天推进技术。
Tel: 010-82338495
E-mail: liuyu@buaa.edu.cn

(责任编辑:刘振国)