高温超导磁悬浮助推技术动态特性的试验分析

温 正 刘 宇 杨文将 丘 明

(北京航空航天大学 宇航学院，北京 100083) (中国科学院电工研究所，北京 100080)

摘 要：磁悬浮技术由于其高性能、低成本特性而被认为是一种较为理想的下一代发射系统方案.在概念研究方案的基础上建立了一套磁悬浮助推缩比试验系统，针对缩比试验系统的设计要求，建立动态测试试验分析系统，研究了 YBaCuO 高温超导体组合与 NdFeB 永磁体轨道所构成的磁悬浮系统单元的幅频响应特性、阻尼特性以及悬浮刚度特性等.试验表明，系统共振频率随场冷位置的提高线性降低，在零场冷时达到最低.系统静态刚度随悬浮气隙的提高逐渐降低，动态刚度受到场冷位置的影响明显.对磁浮系统阻尼特性进行的试验研究显示超导系统低频下具有弱阻尼特性，并受振动速度的影响.通过定性分析磁浮系统的综合动态性能，更好的评估系统稳定特性和品质，为磁悬浮助推发射试验平台工作的稳定性和可靠性提供基本保证.

关 键 词：动态响应；阻尼；振动测试；频率；磁悬浮

中图分类号：V 553.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)01-0038-04

Dynamic characteristics of high temperature superconductor bulk magnetic suspension system

Wen Zheng Liu Yu Yang Wenjiang

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

Qiu Ming

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The magnetic levitation technology was regarded as a preferable alternative for the next generation of launcher system owing to its cost-effectiveness and perfect performance. A research plan was performed in our lab by constructing a scale-model suspension system with high temperature superconductor (HTS) bulks over a Nd-Fe-B guideway for launch assistance. An dynamic experimental platform was established to investigate the dynamic characteristics including amplitude frequency response characteristic, damping characteristic, levitated stiffness and so on. The experimental result show that the resonant frequency is decreased with the increase of the field cooling(FC) position and reach lowest at zero field cooling(ZFC) position. The static-stiffness is decreased with the increase of the suspension gap and dynamic stiffness was influenced by the FC position. Damping, the ability of a system to decrease oscillatory seems not enough to stabilize the levitation system during the low frequency and also was influenced by the vibration speed. By qualitative analysis the dynamic performance which could provide a evaluation for the stabilization of the magnetic levitation system and also provide a guidance for stability and security of the launch assistance suspension system.

Key words: dynamic response; damping; vibration measurements; frequencies; magnetic levitation

收稿日期：2006-02-20

基金项目：国家 863 基金资助项目(2004AA722102)

作者简介：温 正(1978—)，男，广西上林人，博士生，wenzheng@sa.buaa.edu.cn.

低成本、高性能、高可靠性的可重复使用单级入轨天地往返运输系统是未来航天技术向更高水平发展的趋势.通过超导悬浮推进原理,在一段助推轨道上将单级入轨运载器加速到所设计的高速,再分离转换成运载器主发动机推进,将被认为是较为理想的发射方案[1].美国、俄罗斯开展了将磁悬浮轨道技术应用于航天发射的方案及技术研究工作[2].随着超导技术在很多领域的日趋成熟和完善,且应用于运输和推进方面具有低能耗,无摩擦,低噪音污染等优点,日趋成为国内外航空航天领域广泛关注的焦点.

本文着重从设计可靠、稳定的缩比磁悬浮助推发射系统试验平台出发,采用动态试验分析方法来评估系统的稳定特性.通过分析不同场冷高度下高温超导体与永磁体之间的相互作用力,并从振幅、频率特性以及阻尼、刚度特性的角度定性地分析高温超导物理本身特有的电磁特性,以便更好的理解超导磁体内部的磁通运动的机理,从而达到较好解决超导悬浮系统的动力特性和稳定性问题的目的,同时也为系统的动力特性仿真研究提供试验参考.

1　试验设计

由于 YBCO 高温超导体的动态特性除了受本身的电磁性能如临界电流密度、磁通流阻、钉扎势等影响外,还取决于合理的场冷环境以及合适的超导组合和永磁体排列方式[3-4].为了达到实际单级发射方案所要求的载荷质量和悬浮高度的设计要求,对磁浮轨道进行了缩比设计,即通过合理的软铁和永磁体配合的三维磁场模拟计算,得到使试验轨道满足缩比设计要求所需要的磁通密度(见图 1).

为了使高温超导体在设计的永磁轨道上能提供最佳的悬浮及导向力,前期工作进行了高温超导块材的多种排列组合对比以及性能分析[5],得到如图 1 所示的悬浮方案,保证了缩比模型在满载情况下要达到的悬浮高度要求.

在此基础上,根据系统动力特性设计了一套动态试验分析系统,如图 2 所示,系统包括激振器、试验轨道、低温容器、定位光杆、电机等.定位光杆与上固定板采用直线摩擦轴承定位,可以最大程度的减小摩擦,保证垂直方向自由悬浮.固定板上改装伺服电机,与低温容器固定,可用于采集准静态环境下悬浮系统的悬浮力和位移.自由悬浮激振测量时,在低温容器与激振器支撑盘上各安装一个加速度传感器用于采集加速度信号,位移传感器用于采集位移信号.通过对采集的数据进行处理分析可得出系统固有频率特性以及动态刚度、阻尼等动态特性.

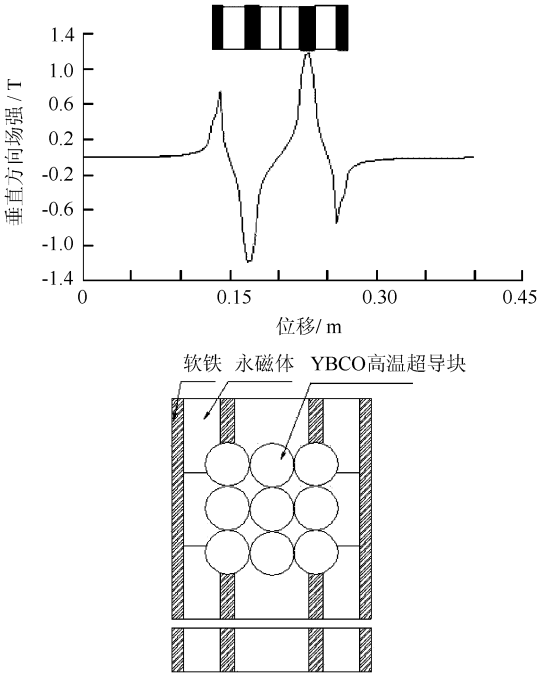


图 1　1 m 长永磁轨道中部截面方向表面磁场分布图以及永磁导轨单元和超导体排列

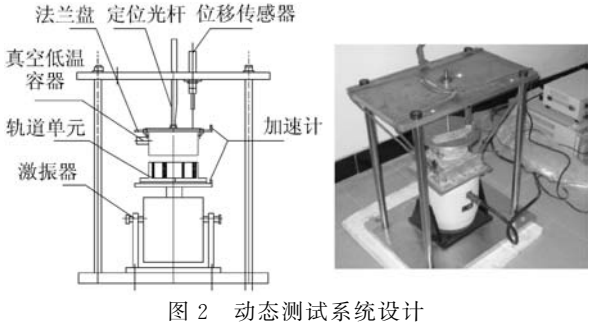


图 2　动态测试系统设计

2　试验结果及讨论

2.1　静态测试及分析

根据缩比试验要求,设计承载模型的自由悬浮高度为 20 mm,通过静态试验,可得出悬浮体质量(包括低温容器和超导块材以及液氮)的范围要求.设计质量约在 5 kg 左右,实际实体重4.94 kg(不包括液氮质量).通过第 1 次静态测量,由于磁通的第 1 次穿透,必然存在较大的磁滞损耗,这是外磁场变化造成超导体内磁通流动使俘获磁场增加的结果.之后继续多次试验其得到的力和位移曲线基本和第 2 次测试结果保持一致,说明俘获磁通达到一定的平衡.静态试验基础上可以得到悬浮位置的准静态刚度,进而根据式(1)可得到准

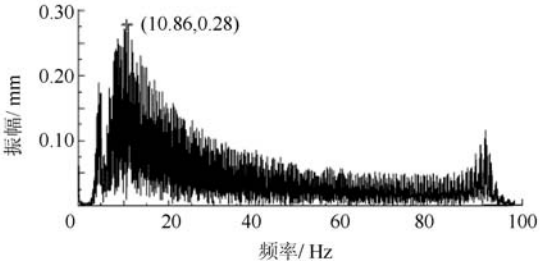
静态环境下,系统在自由悬浮位置下的固有频率为 4.2 Hz.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_0}{m}} \tag{1}$$

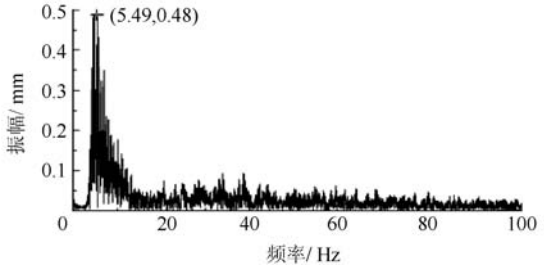
式中,k_0 是静刚度;m 为悬浮体质量.

2.2 动态测试及分析

在系统自由悬浮状态下,利用信号发生器和功率放大器,使底座的激振器产生特定的激励(如正弦和随机振动),通过对轨道及磁浮系统采用扫频分析,可得到各自的自功率谱和超导单元相对于永磁轨道的互功率谱,进而可求出轨道单元和悬浮单元各自的共振频率范围(见图 3).对系统的动态时间响应曲线作傅里叶变换,就可得出相应的动态响应幅频特性曲线.图 3a 可见,永磁导轨共振频率在 10.86 Hz,由图 3b 可知,在超导体在无外场影响下冷却时(零场冷条件),系统在 5.5 Hz 时会产生共振,此时振幅急剧增大,容易导致悬浮系统崩溃.因此,低频对磁浮系统的稳定性影响最大.



a 永磁导轨共振频率分析



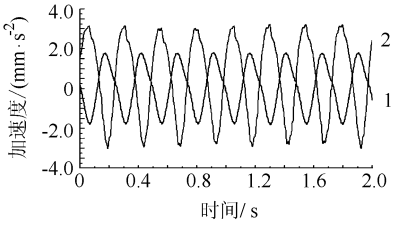
b YBCO 超导悬浮系统共振频率分析(ZFC)

图 3 频域分析得到的共振频率范围

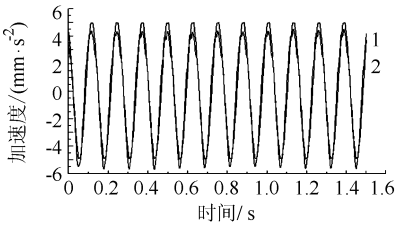
从不同激励频率下的时域信号曲线来看(见图 4),在相同的激振加速度下,对于不同频率,存在一定的滞后情况,从时域信号图还可以看到,低频波上附带有高频成分,很可能是外加激励和系统自由振动 2 部分叠加而成的.随着外加激励频率的增大和系统阻尼的存在,系统逐步过渡至稳定状态,对应的悬浮力随时间变化波形也基本保持稳定了.当频率大于 20 Hz 以后,外加扰动对系统运行稳定性的影响已经很小了.

此外,通过多种场冷位置试验还发现(图 5),共振频率随着场冷位置的降低而线性增大,试验结果显示随着场冷从 45 mm 位置降为 25 mm 位置,系统共振频率从 5.6 Hz 升至 10.1 Hz.

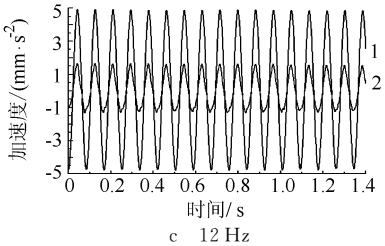
由于系统刚度随位移的增大而减小,可以认为超导悬浮系统具有类似于渐软弹簧的性质,系统阻尼主要表现在磁滞损耗,即由于磁通钉扎作用和不可逆磁化所引起的能量损耗.对于本试验系统永磁体轨道而言(无导电部分),能量损耗主



a 4 Hz



b 8 Hz



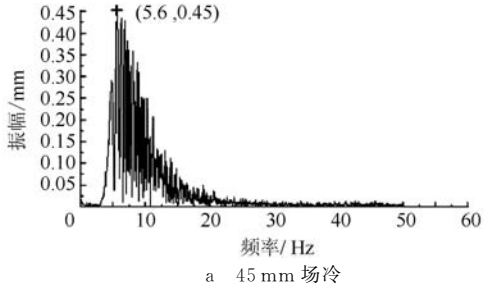
c 12 Hz

图 4 永磁轨道 1 和超导体 2 不同频率下时域信号

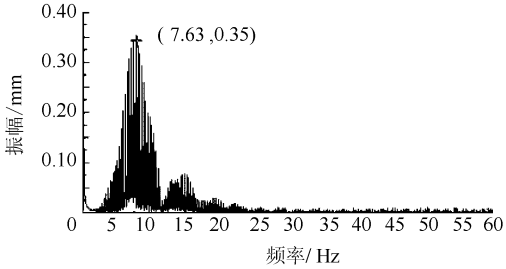
要来自于超导体的磁滞损耗,因此,试验还研究了相同振幅下不同频率的阻尼特性,使用电机固定悬浮体,采集悬浮体在不同轨道激励频率(从 1～10 Hz)下的受力情况,如图 6a 所示.从试验数据中抽取较为光滑的一段进行分析.每周期的磁滞损耗 r 可表示为[6]

$$r = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \left(F_z^{\mathrm{up}} - F_z^{\mathrm{down}}\right) \mathrm{d}z \tag{2}$$

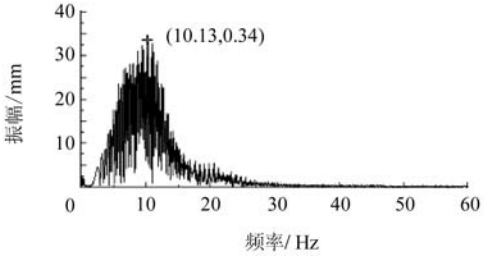
式中,r 为封闭曲线所围的面积,对应着阻尼的大小;$z_{\max}$ 和 $z_{\min}$ 分别是轨道振动位移的最大和最小值;F_z^{up} 和 F_z^{down} 分别为上半周期和下半周期悬浮力值,动刚度可用图 6b 所示的斜率 k 近似表示.试验得出,当振幅很大(2 mm)时,系统阻尼随频率增加而有所增大,即低频下对于系统能量损耗较大.这也说明了振动速度的大小对系统阻尼的影响,而对刚度变化影响并不大.



a　45 mm 场冷

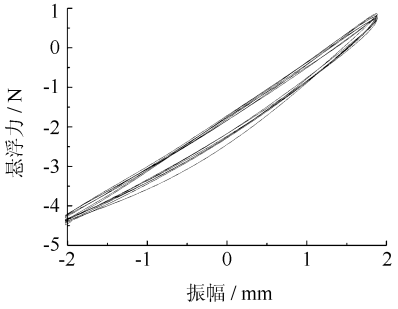


b　30 mm 场冷

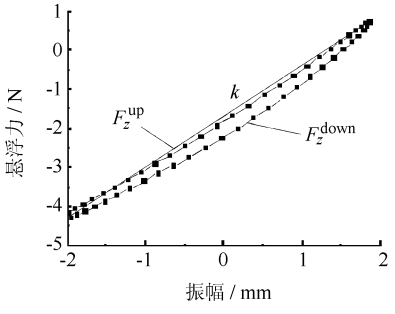


c　25 mm 场冷

图 5　不同场冷位置下系统共振频率



a　试验曲线



b　规律描述

图 6　悬浮力与振幅的振动循环曲线

3　结　论

通过研究缩比导轨与悬浮系统之间的动态特性,包括准静态悬浮力、刚度以及振动特性,得到如下结论:①高温超导悬浮系统具有较良好的自稳定特性,在外界干扰下能最终达到稳定状态,但振幅衰减需要较长时间,而且外加激励频率较小时(试验在 20 Hz 以内),系统能量损耗较大,并随频率增大而有所增加,因此从工程上考虑则设计阻尼器是很有必要的. ②动态悬浮过程中超导系统的共振频率是存在的,对于不同场冷环境,其共振频率是不同的,共振频率随场冷位置的降低而线性增大,其原因是场冷位置越低俘获磁通越多,则抵抗外场变化的能力越强. 另外,随着外加激励幅值的增大,主共振频率略有变小的趋势. ③系统动态刚度受到场冷位置的影响明显. 在稳定正弦激励环境下,当振幅一定时,动刚度受频率变化的影响很小. 此外,通过试验表明,系统振动具有非线性特性,模拟仿真分析时应综合考虑最初的场冷位置、外激励频率和振幅以及稳定悬浮气隙.

参考文献(References)

[1] Jacobs W A. Magnetic launch assist——NASA′s vision for the future [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2001,37(1):55－57

[2] 杨文将, 刘宇, 温正,等. 航天发射用磁悬浮助推发射系统概念研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005,31(1):105－110
Yang Wenjiang, Liu Yu, Wen Zheng, et al. Conceptual study of maglev launch assist system for space launch[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(1):105－110(in Chinese)

[3] Sanagawa Y, Ueda H, Tsuda M, et al. Characteristics of lift and restoring force in HTS bulk[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001,11(1):1797－1800

[4] Teranishi Y, Ueda H, Tsuda M, et al. Static and dynamic characteristics in levitating X-Y transporter using HTS bulk [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2002,12(1): 911－914

[5] 杨文将, 温正, 刘宇, 等. 航天发射超导磁浮平台设计的初步实验研究[J]. 低温物理学报,2005, 27(5):1040－1044
Yang Wenjiang, Wen Zheng, Liu Yu, et al. Primary experimental study of superconducting maglev test vehicle design for space launch[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2005, 27(5):1040－1044(in Chinese)

[6] Portabella E. Static and dynamic properities of high temperature superconducting bearings[D]. Braunschweig: Mechanical and Electronic Institute, Techn Univ Carolo-Wilhelmina, 2000

(责任编辑:张　嵘)