

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306270

高温超导磁悬浮力三维测量系统设计*

艾立旺^{1,2} 何少军¹ 苗森¹ 封海潮^{1,2} 高彩霞^{1,2} 许孝卓^{1,2}

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454003;

2. 河南省智能装备直驱技术与控制国际联合实验室 焦作 454003)

摘要: 高温超导磁悬浮因其独特的无源自稳定优势,在高速轴承、轨道交通和飞轮储能系统等领域有着广阔的应用前景。为了探究高温超导磁悬浮系统的悬浮特性,设计了一种适用于测量磁悬浮轴承悬浮特性的高温超导磁悬浮力三维测量系统。首先,基于伺服驱控的三轴联动直线模组与三轴力传感测量单元设计了测量系统硬件部分,利用 LabVIEW 设计了数据采集单元,以实现数据连续采样及其图像化。其次,在恒载和永磁悬浮系统下,对高温超导磁悬浮力三维测量系统的测量精度进行校验。最后,建立了超导体-永磁悬浮系统有限元模型,仿真并测量了高温超导体在零场冷和场冷条件下的悬浮力特性,仿真与测量结果保持基本一致。结果表明,该测量系统具有测量精度高(0.5%),三维空间定位准确(± 0.02 mm),被测对象相对运动时三轴力同步测量(最大悬浮力 500 N,导向力 200 N)等特点。

关键词: 高温超导磁悬浮;磁悬浮特性;三维测量系统;测量精度

中图分类号: TM932; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Design of a high-temperature superconducting maglev force three-dimensional measurement system

Ai Liwang^{1,2} He Shaojun¹ Miao Sen¹ Feng Haichao^{1,2} Gao Caixia^{1,2} Xu Xiaozhuo^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Henan International Joint Laboratory of Direct Drive and Control of Intelligent Equipment, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: With the unique advantage of passive and self-stability levitation, high-temperature superconducting maglev is regarded as a promising element for a wide range of applications such as high-speed bearings, flywheel energy storage system and rail transportation. In order to investigate the levitation behavior of high-temperature superconducting maglev system, a high-temperature superconducting maglev force three-dimensional measurement system is developed, which is suitable for measuring the levitation behavior of maglev bearings. Firstly, based on the triaxial linear module with servo control and triaxial force sensor measurement unit, the hardware of measurement system is designed. Also, the data acquisition unit is developed in LabVIEW so as to realize the continuous sampling and imaging of data. Secondly, the measurement precision of high-temperature superconducting maglev force three-dimensional measurement system is validated under the constant load and permanent magnet levitation system. Finally, a finite element model of the superconductor-permanent magnet levitation system is established. Then, the levitation force behaviors of high-temperature superconductor were simulated and measured under field cooling and zero field cooling conditions. The comparison of the simulation data with the measured data shows that a well agreement between the two can be achieved. The results show that this measurement system has the characteristics of high measurement precision (0.5%), high location accuracy in three-dimensional space (± 0.02 mm) and synchronous measurement of three-dimensional force (maximum levitation force 500 N, guidance force 200 N) at movement of the measured specimens.

Keywords: high-temperature superconducting maglev; magnetic levitation behavior; three-dimensional measurement system; measurement precision

收稿日期: 2023-02-20 Received Date: 2023-02-20

* 基金项目: 国家自然科学基金(52307050)、国家自然科学基金(52177039)、河南省高等学校重点科研项目计划(23B470002)、河南理工大学博士基金(B2020-20)项目资助

0 引言

高温超导体具有零电阻特性和抗磁特性,且在液氮温区下就能维持较好的超导态,这使得其在磁悬浮轴承、飞轮储能系统和磁悬浮列车等领域有着广阔的应用前景^[1]。高温超导体在不均匀外磁场中的悬浮特性直接影响了超导磁悬浮轴承的载荷能力、超导磁悬浮列车的载重能力、超导飞轮储能系统的容量。因此,精确地测量高温超导磁悬浮系统的悬浮特性,可以为高温超导磁悬浮的理论拓展和应用研究提供有效验证手段。

国内外学者在高温超导磁悬浮测量系统研制方面做了大量工作,相关测量系统可分为单轴、双轴和三轴系统。首先,单轴测量系统中最具有代表性的是北京交通大学和意大利博洛尼亚大学设计的高温超导磁悬浮力测量装置^[2-3],上端为永磁体与步进电机相连,下端为低温容器和超导体,通过步进电机驱动永磁体往复运动,可以测得超导体在不均匀永磁磁场中运动时的悬浮力。北京交通大学在该测量装置的基础上,探究了外加电磁场对超导-永磁悬浮系统悬浮力的影响。意大利博洛尼亚大学测量了场冷和零场冷条件下单个 YBCO 块材与永磁体作用的悬浮力,但单轴的高温超导磁悬浮测量装置只能测量超导体在外磁场中的悬浮力,无法测得其导向力。为此,巴西里约热内卢联邦大学设计了双轴的高温超导磁悬浮轴承测量装置^[4],通过水平和垂直方向的两个步进电机实现被测对象在二维空间内的自由移动,能够同时测量超导体在外磁场中的悬浮力和导向力,适用于轴向型的高温超导磁悬浮轴承测量,但不能满足复杂工况下三轴力分量的测试需求。陕西师范大学研制的超导体与磁体间的三维磁力及磁场测试装置,利用 5 个力传感器和 3 个三维的霍尔探头,可以测量因超导体与永磁体相对位置变化引起的三轴力分量及动态磁场分布的变化,该套测量装置在测量过程中同时输出三轴位移分量、力分量和磁场分量共 17 个信号,使得测量效率大幅提升^[5]。西南交通大学研制的三轴高温超导磁悬浮测量系统^[6-7],能够实现被测对象在三维空间内的相对移动,该测量装置主要适用于永磁轨道上超导体悬浮力特性的研究,由于低温容器固定在永磁轨道的上方,低温容器壁的存在导致该测量装置难以测量气隙较小情况下高温超导磁悬浮系统的悬浮特性。中国科学院电工研究所研制的高温超导磁悬浮轴承三轴测量系统^[8],设计了独特的超导体夹具,该测量系统适用于轴向和径向高温超导磁悬浮轴承、高温超导磁悬浮列车的悬浮特性研究,但是需要 3 个独立的拉/压力传感器对 X、Y、Z 轴 3 个方向的力进行测量,操作较为复杂;而且测量系统采用万向球作为测力传感器和低温容器的辅助连接装置,导致滚动摩擦力的

的存在,增大了实验测量误差。

本文在高温超导磁悬浮原理的基础上,针对典型高温超导磁悬浮系统(超导体-永磁体)的多轴悬浮特性测量研究需求,设计了一种适用于测量磁悬浮轴承 X、Y、Z 轴悬浮特性的三维测量系统。通过恒载和永磁悬浮系统的初步测试对高温超导磁悬浮力三维测量系统的测量精度进行校验。最后,基于磁场强度 H 与标量磁势 φ 耦合的方法,在数值仿真软件 COMSOL 中,建立了高温超导磁悬浮系统的二维有限元仿真模型,计算了场冷和零场冷条件下超导体相对于永磁体垂直运动时的悬浮力特性,并对分析仿真与实验结果,验证所述测量系统的合理性与优越性。

1 超导磁悬浮原理

典型的高温超导悬浮系统由一个超导体和永磁体(或电磁铁)组成^[9],图 1 所示为高温超导磁悬浮系统自稳定悬浮原理。

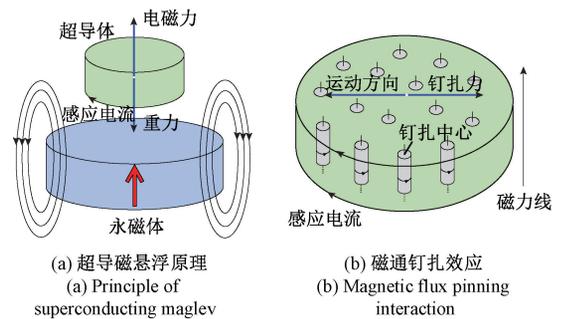


图 1 高温超导磁悬浮系统自稳定悬浮原理

Fig. 1 Self-stability levitation principle of high temperature superconducting maglev system

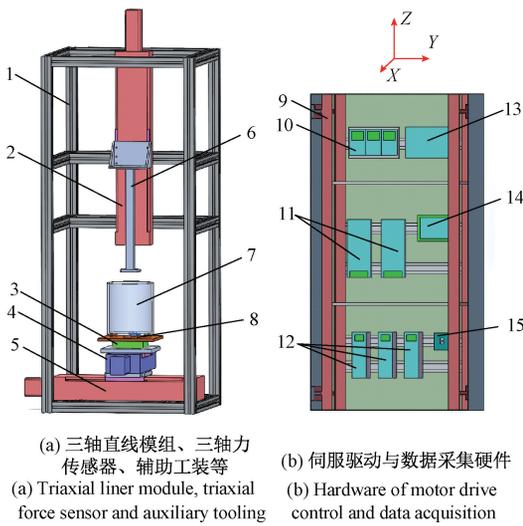
基于超导体的零电阻特性和抗磁特性^[10],如图 1(a)所示,处在外磁场中的超导体因其抗磁特性会阻碍磁通线进入超导体内,进而在超导体表面产生很大的磁通密度梯度;当超导体以垂直运动靠近永磁体时,超导体表面会产生强感应电流,感应电流产生的磁场总是与外部磁场变化的趋势相反,进而表现出超导体与永磁体之间的排斥力,当排斥力等于超导体自身重力时,超导体就会悬浮起来。

特别地,二代高温超导体在制备过程中引入的杂质或缺陷会在其晶体结构内形成钉扎中心。如图 1(b)所示,超导体在磁场作用下冷却进入超导态后,超导体内的钉扎中心会捕获永磁体的部分磁通,而未被捕获的磁场会因超导体的抗磁特性而难以渗透到超导体内部,两者呈现出一种非接触稳定的连接,这种现象被称为磁通钉扎效应。当超导体与永磁体发生横向相对位移时,钉扎

中心捕获的磁通线会发生移动,钉扎力则会阻碍磁通线的移动,进而形成与运动方向相反的导向力。这种超导感应电流与外磁场的相互作用,宏观上表现为超导体保持重力平衡的悬浮力和维持稳定所需的导向力,超导体表现出无源自稳定、自悬浮、自导向的特性。

2 测量系统软硬件设计

高温超导磁悬浮力三维测量系统由伺服驱控的三轴直线运动单元、三轴力传感测量单元、数据采集单元、机械台架及低温工装等辅助机构组成,图 2 所示为高温超导磁悬浮力三维测量系统的设计方案。



- 1 铝合金型材; 2 Z 轴直线模组; 3 三轴力传感器; 4 X 轴直线模组; 5 Y 轴直线模组; 6 永磁体固定连接件; 7 低温容器; 8 尼龙连接板; 9 镀锌立梁; 10 信号放大器; 11 开关电源; 12 三轴伺服驱动器; 13 数据采集卡; 14 运动控制器; 15 空气开关

图 2 高温超导磁悬浮力三维测量系统设计方案

Fig. 2 The design scheme of high temperature superconducting maglev force three-dimensional measurement system

伺服驱控的三轴直线运动单元由三轴直线模组、三轴伺服驱动器和运动控制器组成。为了实现被测对象三维空间内的相对移动,设计 Z 轴直线模组的运动方向垂直于 X、Y 轴直线模组所构建的十字平面,三轴直线模组均采用丝杆传动滑台实现直线进给,既可以单独移动也可以协同移动。通过调节运动控制器与三轴伺服驱动器,实现三轴直线模组对被测对象进行误差 $\pm 0.02\text{ mm}$ 的精准定位。

三轴力传感测量单元包含三轴力传感器、信号放大器和数据采集卡等。三轴力传感器可以同时测量来自 X、Y、Z 轴 3 个方向的力,另外,为了保证三轴力传感器的

测量精度,采用尼龙材料的过渡连接板将力传感器与低温容器相连,以减小力传感器温漂对测量带来的不利影响。三轴力传感器的测力信号经信号放大器处理后,先传输至数据采集卡,再传输至计算机。

利用 LabVIEW 编写的数据处理程序搭建人机交互友好的界面^[11-13],实现连续采样数据的可视化与图像化。图 3 所示为上位机数据采集程序操作界面,通过串口通信连接上位机与测量系统,设置采样率和每通道采样数,实现数据曲线的实时显示。点击开始按钮后,所采集的 X、Y、Z 轴力数据以波形图形式展现在数据采集程序操作界面右侧,以便在测量过程中观察测力数值的变化趋势,初步判断实验结果的准确性或不足之处并及时做出调整。同时,采集的数据以不覆盖原文件的形式保存为 .txt 格式,方便对历史数据的后处理。实验结束后,点击重置图表,对历史数据进行赋零,以消除历史数据对下一组实验的影响。

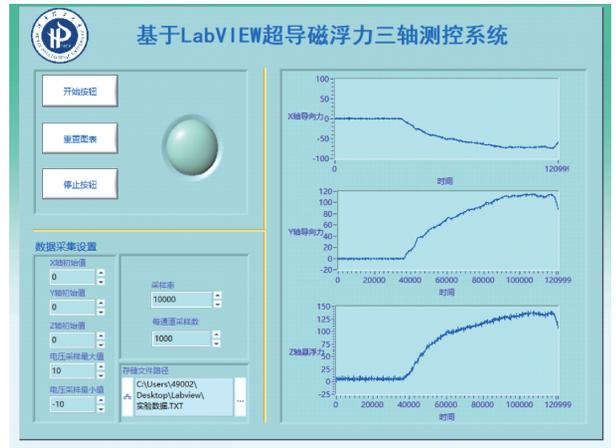


图 3 数据采集程序界面

Fig. 3 Interface of data acquisition program

图 4 所示为搭建的高温超导磁悬浮力三维测量系统,主体结构全部采用铝合金型材加工搭建而成,主要特点是无磁、重量轻、机械强度高、耐腐蚀。4 根铝型材支撑柱垂直固定在万向轮上,每两根支撑柱之间用内置连接件固定多根横梁,以保证整体结构的稳定性。为了保证伺服驱控的三轴直线运动单元与三轴力传感测量单元间兼容稳定的工作状态,首先对各单元硬件之间做了隔层分离,特别是功率线缆的分离,再将所有的信号线替换为带屏蔽层的数据传输线,有效减小各元件之间的串扰,提高了系统测量精度。另外,低温容器外覆一层保温棉可以有效阻碍内部低温液体与外界进行热量传递。

3 测量系统特点

采用上述方案设计的高温超导磁悬浮力三维测量系



图4 高温超导磁悬浮力三维测量系统。

Fig. 4 High temperature superconducting maglev force three-dimensional measurement system

统具有以下特点:

1) 测量精度高

三轴力传感器 LH-SZ-05 可同时测量最大悬浮力 500 N、导向力 200 N, 极限负载 150%, 三轴互扰误差小于 0.3%, 工作温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 非线性 0.1% F. S. 信号放大器 LH-PT901A 在 X、Y 轴 0~200 N 的正向压力下, 对应放大输出信号 0~10 V, Z 轴在 0~500 N 的正向压力下, 对应放大输出信号 5~10 V, 增益误差控制在 $\pm 0.2\%$ 以内, 信号放大器附带 LED 显示屏的显示分度为 0.1 N。数据采集卡的单通道最大采样速率为 250 kHz。综合测量精度达 0.5%。

2) 被测对象空间定位精度高

三轴直线模组均采用伺服电机驱动丝杆旋转实现滑台的直线进给, X、Y、Z 轴直线模组的最大位移分别为 100、300 和 500 mm, 最大速度可以达到 120 mm/s, 重复定位精度 $\pm 0.02\text{ mm}$ 。

3) 三轴测量相互独立

三轴直线模组可以三轴联动也可以单独控制, 超导体悬浮特性既可以单轴测量也可以三轴同时测量。

4) 适用对象范围广

适用于高温超导磁悬浮系统的悬浮特性测量, 例如旋转型磁悬浮轴承、小型超导电机、超导磁悬浮列车的测量。

4 测量系统校验

4.1 恒载

三轴力传感器作为高温超导磁悬浮力三维测量系统

的重要组成部分, 在正式使用之前必须要对所测力数据的准确性进行验证^[14]。

将 16.12 N 的恒载加入测量系统, 校验高温超导磁悬浮力三维测量系统的测量精度。表 1 所示为采样周期为 0.25 s, 采样时长 30 s 时的恒载测量结果。相对误差 E_r 的计算公式如式(1)所示:

$$E_r = (F_{\text{test}} - F_{\text{real}}) / F_{\text{real}} \quad (1)$$

其中, F_{test} 为测量重量, F_{real} 为实际重量。可以看到在恒载 16.12 N 下, 测量值略大于实际值, 测量准确度为 99.21%~99.74%, 相对误差为 0.260%~0.794%, 恒载测量精度满足实际测量需求。

表1 恒载测量数据

Table 1 Measurement data of constant load

加载情况	测量平均重量/N	测量最大值/N	测量最小值/N
未加载	0.038	0.128	0.000
恒载 16.12 N	16.187	16.248	16.162

4.2 永磁悬浮轴承

考虑到永磁悬浮系统的非接触力与超导体在永磁外场中的悬浮力类似, 因此可以通过仿真测量两个永磁之间的作用力, 来对比分析该测量平台在被测对象三维空间相对运动下的动态测量性能。

建立了永磁悬浮系统的三维有限元模型, 其中两个永磁体的尺寸均为 30 mm×30 mm、剩磁强度 $B_r = 1.27\text{ T}$ 。永磁悬浮系统测量时设置 Z 轴直线模组的运动速度为 1 mm/s, 数据采集卡的采样周期为 0.25 s。仿真并测量了两个永磁体竖直轴线重合时的悬浮力 F_z , 竖直轴线相对偏移时 15 mm 的导向力 F_x , 结果如图 5、6 所示, 给出了永磁体的运动序列(100 mm-5 mm-100 mm), 在所有的运动过程中仿真与测量结果保持基本一致, 验证了被测对象三维空间相对运动下该测量系统具有较好的动态测力性能。

通过恒载和永磁悬浮系统的测量结果, 验证了该测量系统的测量精度高, 三维空间定位准确, 能够准确输出悬浮力 F_z 、导向力 F_x 随被测对象三维空间相对位置变化时的关系曲线等功能。因此该测量系统同样适用于永磁外场中超导体悬浮力特性的测量。

5 超导磁悬浮系统的仿真与实验对比

5.1 H-φ 法建模

基于磁场强度 H 与标量磁势 φ 耦合的方法^[15-16], 利用软件 COMSOL 的移动网格接口与磁场无电流接口, 建立超导体-永磁体悬浮系统的二维有限元模型, 其求解原理如图 7 所示。

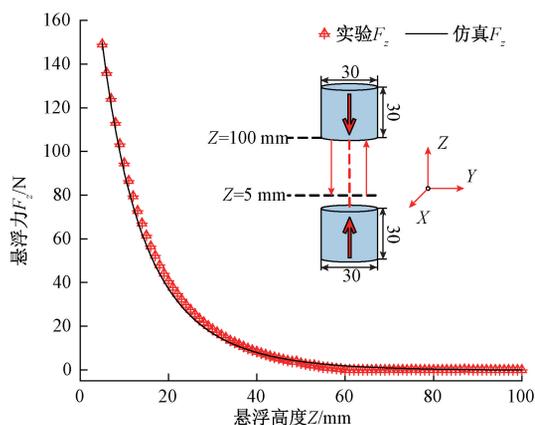


图 5 永磁悬浮系统悬浮力的仿真与测量结果对比

Fig. 5 Comparison of simulation and measurement levitation force results for PM levitation system

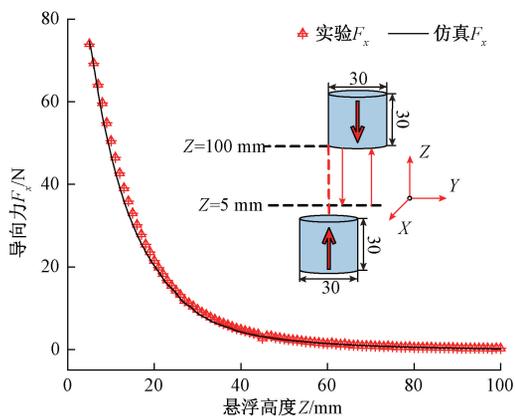


图 6 永磁悬浮系统导向力的仿真与测量结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation and measurement guidance force results for PM levitation system

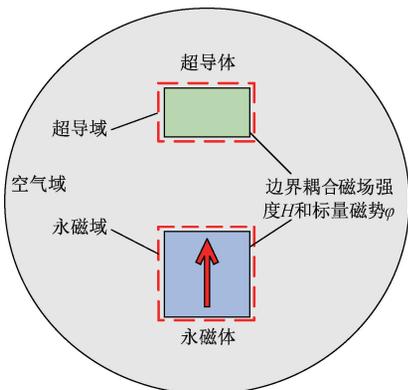


图 7 超导体-永磁体悬浮系统仿真示意图

Fig. 7 Schematic illustration of HTS-PM suspension system simulation

流存在的永磁域和空气域求解其标量磁势 φ 。其控制方程为：

$$\begin{cases} H = -\nabla\varphi \\ \nabla \cdot \nabla\varphi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

对存在感应电流的超导区域,求解其磁场强度 H 。忽略位移电流,采用 Maxwell 方程组：

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ J = \nabla \times H \\ E = \rho J \\ B = \mu H \end{cases} \quad (3)$$

得到超导区域的控制方程：

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \times (\rho \nabla \times H) = 0 \quad (4)$$

其中, $\rho = 1 \Omega \cdot m$ 为空气域电阻率。超导域的电阻率采用 Power-Law E-J 关系：

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1} \quad (5)$$

其中, $E_c = 1 \times 10^{-4} V/m$ 为临界电流准则, $n = 21$ 为超导体材料参数。临界电流密度 J_c 采用 Kim 模型计算：

$$J_c(B) = \frac{J_{c0} B_0}{(1 + |B| + B_0)} \quad (6)$$

其中, J_{c0} 表示超导体在自场中的临界电流密度, $B_0 = 1 T$ 为超导体材料参数。

根据洛伦兹公式求解超导体体受到悬浮力 F_z ：

$$F_z = \int_s J_{sc} \cdot B_x dS \quad (7)$$

5.2 超导磁悬浮力特性仿真与测量对比

考虑到永磁体与超导体之间的作用力是相互的,两者的上下关系对实验数据并不产生影响,为了方便实验时液氮的添加和存储,将高温超导体固定在低温容器底部,永磁体通过永磁体连接件悬挂于超导体上方。为了保证超导体完全进入超导态,超导体的冷却时间为 30 min,并在此过程中向低温容器中多次补给液氮,在 30 min 冷却时间结束前,最后一次向低温容器内添加适量的液氮,保证在单组实验过程中超导体处于被液氮浸没的状态,实验过程中即可不再添加液氮,以避免添加液氮的自重对实验数据产生不利影响。

超导体悬浮力测量前,需要利用永磁悬浮系统调整 X、Y 轴直线模组滑块位置,确保超导体与永磁体轴线重合。定义悬浮高度 Z 为超导体上表面与永磁体下表面之间的距离。图 8 所示为圆柱形永磁体 (30 mm×30 mm, $B_r = 1.27 T$) 轴线处磁场强度及磁场强度梯度随悬浮高度变化的关系曲线,可以看到永磁体磁场强度梯度绝对值随悬浮高度的减小呈强非线性增加,永磁体磁场强度在距离其表面 100 mm 处几乎为 0,因此选取永磁表面

将求解区域划分为永磁域、超导域和空气域,对无电

$Z = 100 \text{ mm}$ 处为零场冷条件永磁体运动的起点,选取永磁体表面 $Z = 15 \text{ mm}$ 处作为场冷条件永磁体运动的起点。

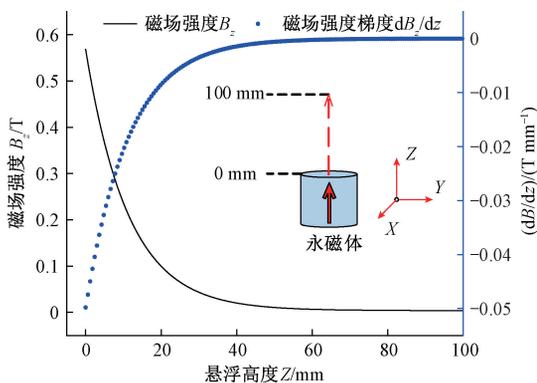


图 8 永磁体上方磁场强度及磁场强度梯度
Fig. 8 Magnetic field intensity and magnetic field intensity gradient above the PM

控制 Z 轴直线模组以 1 mm/s 的速度驱动永磁体沿垂直方向移动,设置永磁体的 3 组运动序列,测量超导体的悬浮力 F_z ,如图 9 所示,序列 a,永磁体的初始位置为超导体上方 $Z = 100 \text{ mm}$ 处,对超导体进行冷却,将永磁体垂直向下移动至 $Z = 5 \text{ mm}$ 处,再移动至初始位置处。该运动序列用于测量零场冷冷却超导体在不均匀外磁场中运动时的悬浮力。序列 b,永磁体的初始位置为超导体上方 $Z = 15 \text{ mm}$ 处,对超导体进行冷却,将永磁体垂直向下移动至 $Z = 5 \text{ mm}$ 处,再移动至初始位置处,往复 3 次。该运动序列用于测量场冷冷却超导体在不均匀外磁场中运动时的悬浮力。序列 c,永磁体的初始位置为超导体上方 $Z = 100 \text{ mm}$ 处,对超导体进行冷却,将永磁体垂直向下移动至 $Z = 5 \text{ mm}$ 处,弛豫时长 300 s ,该运动序列用于测量零场冷冷却超导体在不均匀外磁场中运动时悬浮力的弛豫特性,图 10 所示为超导体悬浮力特性测量试验现场。

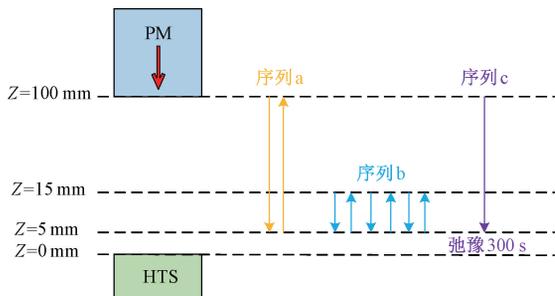


图 9 超导体悬浮力特性仿真测量 3 组运动序列示意图
Fig. 9 Schematic illustration of the three movement sequences for simulation and measurement of superconductor levitation force behavior

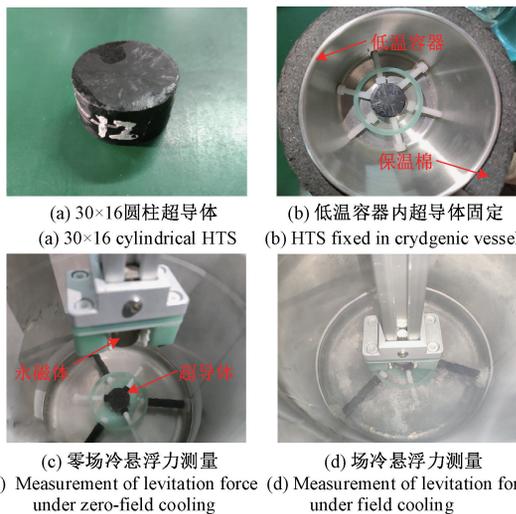


图 10 超导体悬浮力特性测量图片

Fig. 10 Measurement picture of Superconductor levitation force behavior

零场冷超导体悬浮力仿真测量结果如图 11 所示,随着永磁体的靠近,超导体表面的磁场强度梯度绝对值越来越大(图 8 可以说明),进而在超导体内产生更大的感应电流,超导体的悬浮力呈强非线性增加。当永磁体从最小悬浮高度远离超导体时,超导体内已经捕获的部分永磁磁通使其出现了不可逆的磁化,因此超导体的悬浮力在永磁体远离和靠近的过程中出现了悬浮力的类滞滞现象(图中标注一个往返过程中,相同悬浮高度下悬浮力测量差值 $\Delta 1$ 为 4.29 N),相同永磁悬浮高度下,永磁靠近过程中超导体的悬浮力要大于永磁远离过程中的悬浮力^[17-18]。由于超导体临界电流密度的各向异性和实验误差的影响,仿真与测量悬浮力曲线存在一定差距,但悬浮力的大小和变化趋势吻合度较高,因此所述高温超导磁悬浮力三维测量系统对超导磁悬浮系统的悬浮特性模拟具有一定的实践指导意义。

场冷超导体悬浮力仿真测量结果如图 12 所示,超导体悬浮力与悬浮高度的关系基本与零场冷相同,且都表现出了力的类滞滞现象。场冷冷却时,超导体内已经捕获了部分永磁磁通,因此,相同悬浮高度下,超导体场冷冷却的悬浮力要小于零场冷的悬浮力^[19],而且当永磁体从最小悬浮高度远离超导体时,超导体悬浮力表现出短暂的负向悬挂力。另外,随着悬浮高度的往复循环,超导体悬浮力的类滞滞现象减弱(图中标注一个往返过程中,相同悬浮高度下悬浮力测量差值 $\Delta 2$ 逐渐减小,分别为 $4.73, 3.48$ 和 1.89 N)。

零场冷超导体悬浮力弛豫仿真测量结果如图 13 所示,该仿真与测量过程可以分为两个阶段,在悬浮高度不断减小的第 1 阶段,超导体悬浮力呈强非线性增加,仿真

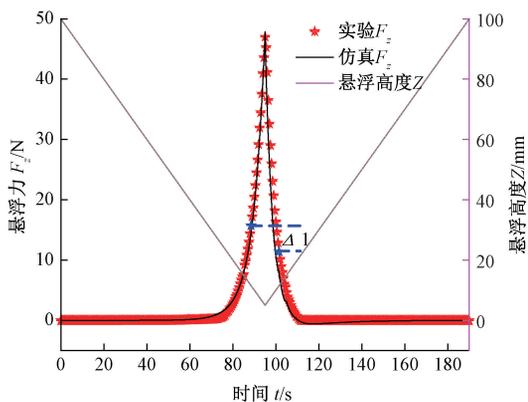


图 11 零场冷超导体悬浮力仿真与测量结果对比
Fig. 11 Comparison of simulation and measurement results of superconductor levitation force under zero-field cooling

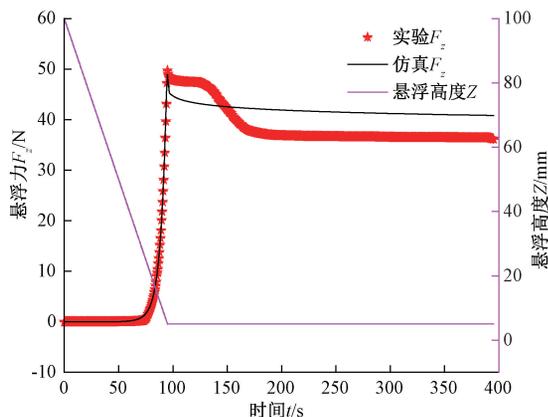


图 13 零场冷超导体悬浮力弛豫仿真与测量结果对比
Fig. 13 Comparison of simulation and measurement results of superconductor levitation force relaxation under zero field cooling

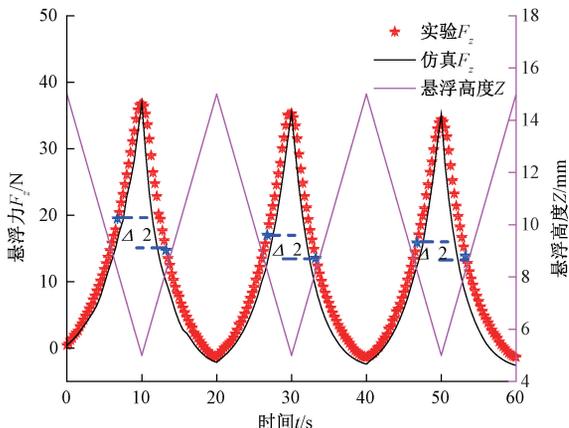


图 12 场冷超导体悬浮力仿真与测量结果对比
Fig. 12 Comparison of simulation and measurement results of superconductor levitation force under field cooling

与测量结果保持高度拟合。在永磁体保持 5 mm 最小悬浮高度并弛豫 300 s 的第 2 个阶段,由于二代高温超导体的磁通蠕动现象,超导体悬浮力随着其内部感应电流的衰减而减小,弛豫初始阶段悬浮力衰减明显,随后便逐渐稳定下来^[20-21],仿真与测量结果规律保持基本一致。由于本次实验的移动对象为永磁体,在永磁体达到最小悬浮高度 5 mm 时,部分永磁体已经浸没在液氮中,低温环境致使永磁体的磁化强度发生不均匀变化,另外,室温永磁体进入液氮后,永磁体周围的液氮保持了一段时间沸腾,对超导体维持超导态所需的工作温度产生影响,同时超导体在沸腾液氮中的流体作用力情况也发生变化,对超导体悬浮力弛豫测量造成了一定干扰,在弛豫时长结束时,超导体悬浮力仿真与测量结果差值为 4.45 N。

6 结 论

本文设计了一种适用于测量磁悬浮轴承悬 X、Y、Z 轴悬浮特性的高温超导磁悬浮力三维测量系统。该测量系统的主要技术指标为: X、Y、Z 轴直线模组的最大位移分别为 100、300、500 mm,重复定位精度为 0.02 mm,导向力、悬浮力的最大测量范围为 500 和 200 N,综合测量精度 0.5%。利用恒载和永磁悬浮系统对测量系统的精度进行校验,实验结果表明,该系统的测量精度满足实验测量需求。基于 $H-\varphi$ 公式在 COMSOL 建立了高温超导磁悬浮系统的二维有限元仿真模型,计算测量了场冷和零场冷条件下,超导体在不均匀永磁外场中垂直运动的悬浮力 F_z ,分析不同运动序列下超导体的悬浮力特性。超导体悬浮力仿真与实验测量结果虽存在一定误差,但悬浮力的大小与变化趋势仍具有较高的吻合度,都表现出明显的类磁滞现象和悬浮力弛豫现象,验证了该测量系统关键性能指标满足高温超导磁悬浮系统悬浮特性测量需求。

超导体悬浮特性的测量实验中,超导体与永磁体的同轴误差、室温永磁体进入液氮、三轴力传感器的工作环境温度等因素都会对实验数据产生影响,未来将会从这些方面对实验平台进一步改善,以获得更加精确的测量结果。

参考文献

[1] 艾立旺,张国民,靖立伟,等. 超导体在低温液体泵中的应用研究与发展现状[J]. 低温与超导, 2021, 49(2): 32-43.

- AI L W, ZHANG G M, JING L W, et al. Application research and development status of superconductors in cryogenic liquid pumps [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2021, 49(2): 32-43.
- [2] 宋文娟,方进,丘明,等. 外加磁场强度对高温超导磁悬浮力影响的分析[J]. *低温与超导*, 2014, 42(5): 32-36.
- SONG W J, FANG J, QIU M, et al. Analysis of the effect of additional magnetic field intensity on HTS magnetic levitation force [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2014, 42(5): 32-36.
- [3] MORANDI A, FABBRI M, RIBANI P L. The measurement and modeling of the levitation force between single grain YBCO bulk superconductors and permanent magnets [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(5): 1-10.
- [4] SASS F, DIAS D H N, SOTELO G G. Superconducting magnetic bearings with bulks and 2G HTS stacks: Comparison between simulations using H and A-V formulations with measurements [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2018, 31(2): 25006.
- [5] YANG W M, YUAN X C, GUO Y X. Influence of ZnO doping on the properties of single domain YBCO bulks fabricated by RE+011 TSIG process [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2017, DOI: 10.1142/S0217979217450187.
- [6] QUÉVAL L, LIU K, YANG W J. Superconducting magnetic bearings simulation using an H-formulation finite element model [J]. *Superconductor Science Technology*, 2018, 31(8): 84001.
- [7] LIU K, YANG W J, MA G T. Experiment and simulation of superconducting magnetic levitation with REBCO coated conductor stacks [J]. *Superconductor Science & Technology*, 2017, 31(1): 1-13.
- [8] LI W J, ZHANG G, AI L, et al. A Three-dimensional measurement system for high-temperature superconducting magnetic bearings [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(4): 1-5.
- [9] ZHENG J, HUANG H, ZHANG S, et al. A general method to simulate the electromagnetic characteristics of HTS maglev systems by finite element software [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(5): 1-8.
- [10] ZHENG X J, YANG Y. Transition cooling height of high-temperature superconductor levitation system [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, 17(4): 3862-3866.
- [11] 李雪洋,李岩松,刘君. 对称式闭环霍尔电流传感器研究与设计 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(8): 69-76.
- LI X Y, LI Y S, LIU J. Symmetrical closed-loop Hall current sensor research and design [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(8): 69-76.
- [12] 刘子琦,陈启梦,李子博,等. 基于磁悬浮式基因生物成像扫描仪电磁结构设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(2): 128-137.
- LIU Z Q, CHEN Q M, LI Z B, et al. Magnetic structure design based on magnetic levitation type gene biological imaging scanner [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(2): 128-137.
- [13] KARUNARATHNA M, DHANURANGA K. Generating electricity from mechanical vibrations: Optimization of linear a generator [J]. *Instrumentation*, 2021, 8(2): 34-39.
- [14] 艾立旺,苗森,许孝卓,等. 径向高温超导磁悬浮轴承的端部效应分析 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(1): 28-35.
- AI L W, MIAO S, XU X ZH, et al. Analysis on end-effect of radial HTS magnetic levitation bearing [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(1): 28-35.
- [15] GUAN X, ZOU Y C, SHANG J, et al. Numerical study on the model of HTS bearing by coupling the magnetic scalar potential and magnetic field intensity [J]. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 2020, 578: 1353752.
- [16] AI L, ZHANG G, JING L, et al. Dynamic levitation behavior of a radial-type SMB under axial load condition [J]. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2020, 575: 1353671.
- [17] QUEVAL L, SOTELO G, KHARMIZ Y, et al. Optimization of the superconducting linear magnetic bearing of a maglev vehicle [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(3): 1-5.
- [18] KOU L, DENG Z G, LI H T, et al. A two-dimension force model between high-temperature superconducting bulk YBaCuO and halbach-type permanent magnet guideway [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31(4): 1-8.
- [19] 侯洁洁,许吉敏,吴九汇,等. 超导磁悬浮力的理论研究与实验分析 [J]. *低温物理学报*, 2015, 37(5): 364-369.
- HOU J J, XU J M, WU J H, et al. Theoretical and experimental analysis of levitation force in the magnetic-superconductor system [J]. *Low Temperature Physical*

Letters, 2015,37(5):364-369.

- [20] ABIN D, OSIPOV M, POKROVSKII S, et al Relaxation of levitation force of a stack of HTS tapes [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3):1-4.
- [21] SIAMAKI M, STOREY J G, BADCOCK R A. Towards a non-destructive method of mapping the E-J relation using force decay measurements on superconducting bulks [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(5):1-5.

作者简介



艾立旺,2019 年于中国科学院大学获博士学位。现为河南理工大学电气工程与自动化学院讲师,主要研究方向为直线电机理论及应用、超导磁悬浮、新型电磁直驱装备技术。

E-mail: ailiwang1009@163.com

Ai Liwang received Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2019. Now he is lecturer in Henan Polytechnic University. His main research interests include linear motor theory and application, superconducting

magnetic levitation and new electromagnetic direct drive equipment technology.



何少军,2021 年于山西农业大学获得学士学位。现为河南理工大学硕士研究生,主要研究方向为超导磁悬浮与新型电磁直驱装备技术。

E-mail: heshaojun1228@163.com

He Shaojun received his B. Sc. degree from Shanxi Agricultural University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate of Henan Polytechnic University. His main research interests include superconducting magnetic levitation and new electromagnetic direct drive equipment technology.



许孝卓(通信作者),博士,河南理工大学电气工程与自动化学院教授,主要研究方向为电机设计、智能控制和故障诊断。

E-mail: xxz@hpu.edu.cn

Xu Xiaozhuo (Corresponding author), Ph. D. degree. Now he is a professor in the School of Electrical Engineering and Automation of Henan Polytechnic University. His main interests include motor design, intelligent control fault diagnosis.