

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006205

基于高温超导体的真空动态微力测量平台研究*

何世熠^{1,2}, 夏彦³, 周磊⁴, 徐飞³, 欧阳晓平²

(1. 清华大学工程物理系 北京 100084; 2. 西北核技术研究院 西安 710024;
3. 北京卫星环境工程所 北京 100094; 4. 西安交通大学 西安 710049)

摘要:针对 α 衰变微推进器等高辐射性、附着式空间微推进器的测量需求,提出了一种基于高温超导磁悬浮装置的真空动态微小力测量方法和平台。平台利用液氮、分子泵和高温超导体构建了低温、低压、低阻的实验条件,避免了接触型阻力的存在。实验时,硬磁转子将悬浮在超导导轨上进行单自由度的平面转动运动。通过光电测速系统对硬磁转子进行的较远距离长时间监测,实现了对微小力的测量,也减小了可能的放射性危害。重点介绍了微小力测量平台的关键子系统,分析了平台的运动特征与测力机制,给出了实验流程与数据处理方法,并进行了标定实验。经标定,平台可实现小于 $1\ \mu\text{N}$ 的推力测量。平台的阻力可低至 $511\pm 35\ \text{nN}$,微力测量的下限为 $66\ \text{nN}$ 。

关键词:微小力测量;高温超导体;实验平台;运动特征;标定实验

中图分类号: TH823 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Study on vacuum dynamic micro-force measuring platform based on high temperature superconductor

He Shiyi^{1,2}, Xia Yan³, Zhou Leidang⁴, Xu Fei³, Ouyang Xiaoping²

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 3. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China; 4. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the measurement requirements of high radiation and attached space microthrusters, such as alpha decay microthrusters, a new vacuum dynamic micro-force measuring platform based on high temperature superconducting maglev device is proposed in this paper. An experiment condition of low temperature, low pressure and low resistance is established by liquid nitrogen, molecular pump and high temperature superconductors, which avoids the existence of contact resistance. In the experiment, the hard magnetic rotor will suspend on the superconducting guide rail for a single degree of freedom plane rotation. A photoelectric speed measurement system is used to perform long term monitoring on the motion state of hard magnetic rotor remotely, the micro force measurement is achieved and the possible radioactive hazard is reduced. The paper introduces the key subsystems of the micro-force measuring platform, analyzes the motion characteristics and force measuring mechanism of the micro-force measuring platform. In addition, the experiment flow chart and data processing method are given. Calibration test was conducted, and after calibration the platform can realize the measurement of the thrust less than $1\ \mu\text{N}$. The resistance of the platform is as low as $511\pm 35\ \text{nN}$, and the bottom boundary of micro force measurement is $66\ \text{nN}$.

Keywords: micro-force measurement; high temperature superconductor; experiment platform; motion characteristic; calibration test

0 引言

随着微观领域在科学和工业中的不断发展,作为微观实验力学基础的微小力测量和计量技术也逐渐深化和多样化,并逐渐扩展至微机电系统、生物医学、航空航天等各个领域^[1-3]。现有的计量标准和体系,对于微牛以下的微小力测量并没有产生统一的标准计量与溯源方法,各个国家和实验室往往自主地进行原理设计和溯源测量^[4-8]。

在约30年前,在美国国家标准与技术研究所(NIST)的牵头下,美国各个国家标准实验室便提出了利用静电场来复现微小力值的方法^[5]。作为瓦特天平的一种推广应用,英国国家物理实验室发明了一种通过电压、位移和电容的可溯源测量实现微力测量的装置^[6]。该装置利用差分干涉仪对电容中单自由度的电介质片在微小力作用下的位置变化进行准确测量,进而得到目标微小力的大小。装置的标准工作范围为1 nN ~ 1 μ N,分辨率则达到了50 pN。日本群馬大学则是提出了一种利用重力斜坡分量原理^[7]来实现静态微小力测量的方法,实验测得了一个183 μ N的力,不确定度为2 μ N;德国卡塞尔大学出了一种基于固体激光晶体材料Nd:YAG^[8]的测量方法,将微小力以极高精度转变为电信号的频率信息。相较于国外实验室,国内的微小力测量仍处在探索阶段^[9-10],大连理工大学利用薄膜感应原理研制了薄膜微力传感器,其分辨率为3.7 μ N,测量范围为0 ~ 350 μ N^[10]。

在对微纳级力值进行测量时,各个实验室提出了许多不同的技术路径。它们多以微电子学、微传感器和激光分光为基础,通过微静电场保持和测量、微应变感应和放大等实现对微小力的有效测量。而基于微电子学和传感器的微小力测量系统往往存在着系统结构复杂、展示性弱、抗辐射性能低、施力面积较小、静态测量等限制^[11-12],无法实现一些附着式、面积式、较高辐射性的微推力系统的测量^[13],如太阳帆、 α 衰变微推进系统、裂变碎片微推进系统等。

微推进系统的应用在国内外具有无拖曳飞行要求的空间任务中应用广泛。日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)成功发射的太阳帆在轨演示飞船IKAROS^[14]以200 m²的矩形帆面获得并测量了0.56 nN/cm²的太阳辐射光压,以验证光压推进和姿态控制的可行性。在LISA项目^[15]中,对推力的需求甚至低至0.5 pN。因此,微推力系统地面试验的需求和推力测量平台的建设是迫切的。

本文设计建立了一种新型的真空动态微小力测量平台。该平台成功构建了低温、低压、低阻的实验条件,通

过对转子角速度的长时间采集达到了测量微力的目的。平台实现了外部控制下腔室内转子的初速度赋予以及高温超导体温度的调控,限定了转子在受力后的单自由度运动和阻力来源的唯一性,避免了接触型阻力的存在,也同时增大了实验人员与对象的安全距离。平台的建立不仅有针对性地对附着式、大面积、高放射性的粒子反冲型微力产生装置的测量提供了一种新的方法,同时为微力测量技术的发展、原理的拓展与系统的搭建提供了新的思路。

1 动态微小力测量平台的结构与原理

基于高温超导磁悬浮装置的真空动态微小力测量展示平台实物布局如图1所示,可依照不同功能分为3个子系统。

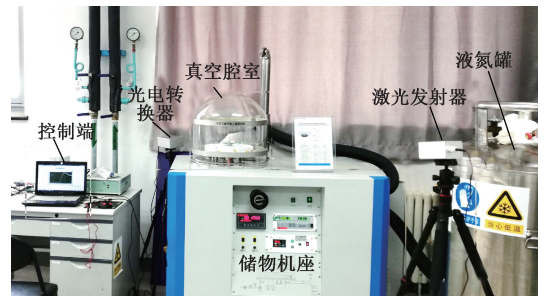


图1 高温超导磁悬浮平台布局

Fig.1 The Layout diagram of high temperature superconducting maglev platform

其中,激光发射器、光电转换器、控制端以及相关的支架、采集卡、连接线等可统称为测速系统。光电转换器在无激光照射时的本底电平为2 mV,激光垂直入射时电平可高达5.5 V。采样卡的采样率为10 kHz,电平信号的前后沿为5 ms。真空腔室、储物机座、液氮罐以及机座内外与真空和制冷相关的其他管道设备、监控模块等统称为高真空热沉系统。其中真空腔室为高真空低温环境的主要载体。系统工作时腔室内气压可低至 10^{-4} Pa以下,底面中心温度小于90 K。

平台的磁悬浮转子系统位于真空腔室内如图2所示^[16]。磁悬浮转子系统由底端的环状超导导轨、制动装置及硬磁转子构成。超导导轨由钇钡铜氧化物(YBa₂Cu₃O_x,简称YBCO)制成。YBCO是首个超导温度在77 K以上的材料^[17],它的转变温度高于液氮的沸点。导轨采用了8块同批次同形状的块状材料进行拼接,固定在真空腔室底面的中心凹槽内。凹槽外侧与液氮管组紧密接触以加速降温。硬磁转子则由中心钕铁硼永磁环、12个连接支架和等量的叶片构成,常温时放置在制动装置的载物平台上。载物平台可分别实现升降和旋转。

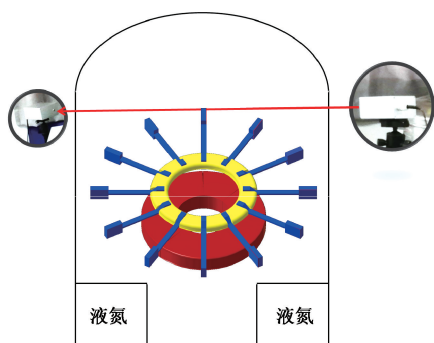


图2 磁悬浮转子系统与光路

Fig.2 Magnetic suspension rotor system and optical path

常温时,硬磁转子通过载物平台保持在超导导轨上方 1.5 cm 处。利用真空泵机组制造真空环境,并通过持续通入液氮使得底座温度逐渐降至液氮沸点以下。随着温度的降低,超导导轨转化为超导状态,发生迈斯纳(Meissner)效应并在表面产生屏蔽电流,进而与硬磁转子之间产生斥力。斥力随转子高度的减小而增加。此时缓慢降低支架,硬磁转子将逐渐脱离载物平台独自悬浮,悬浮高度(距真空腔室底面)约为 0.8~1.0 cm。制动装置下降时可进行旋转,利用摩擦力为转子提供了一定的初始角速度。

转子的角速度可通过测速系统获得。激光从发射器射出,两次穿过透明的真空腔室,进入光电转换器。光路水平,高度与悬浮转子的叶片中心高度相同,与转轴的距离略近于叶片边缘(9.000 cm)。转子旋转时,每个叶片将依次遮挡光路,使光电转换器输出本底电平。以信号从高电平降至 2.50 V 的时刻为记录点时刻。进一步由叶片间的夹角即可得到转子在相邻记录点间的平均角速度。无外力时,通过角速度的变化曲线可以推知平台的阻力矩;当在叶片上进一步施加动力或阻力时将得到合力矩;利用二者的差异即可推得所施加的微力大小。

2 平台运动分析及测量标定方法

该平台所直接测量的可溯源标准量为转子抵达特定位置的时间,直接测量的对象为硬磁转子。赋予初速度后,转子悬浮在腔室内,与其他结构无任何接触。腔室内配有真空和腔室底面温度的监视器,确保了测量中的整个磁悬浮转子系统位于稳定的环境条件下。设计时,转子水平悬浮于超导导轨之上。理论上,竖直方向上转子的重力与超导磁力相互抵消;水平平面上超导磁悬浮的自稳性以及微力的均匀布局保证了转子系统无水平合力且无非竖直方向的力矩分量。忽略振动时,硬磁转子将仅有一个自由度的运动,即仅在水平面内旋转。

2.1 硬磁转子的运动分析

在一定初速度下,硬磁转子的运动方程如式(1)所示,其中 ω 为硬磁转子的角速度; t 为时间; a 为动力产生的角加速度; $f(\omega)$ 则为系统受到的阻力矩产生的角加速度。可预见的阻力主要成分包括缝隙磁阻、腔室内残余空气的阻力等,具体表达式并不清晰。一方面,复杂的表达式并不利于平台标定和实验数据处理,也不符合平台设计的目标;另一方面,从平台运行的初步结果进行后验分析,通过限定单次实验测量的时长,随时间线性降低的 ω 曲线已足以贴近角速度的测量数据。

$$\frac{d\omega}{dt} = a - f(\omega) \quad (1)$$

因此,令 $f(\omega) = f + k\omega + o(\omega)$,取 $f(\omega)$ 级数展开的前两项并忽略 $o(\omega)$ 小量以得到转子角加速度的表达式如式(2)所示。 f 和 k 为 $f(\omega)$ 级数展开的常数项和一次项系数, $t = 0$ 时的初始角速度为 ω_0 。

$$\frac{d\omega}{dt} = a - f - k\omega \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = -(k\omega_0 + f - a)e^{-kt} \quad (2)$$

为了在实验中得到 a 的取值,则需要对平台进行无推力标定($a = 0$)。通过对角速度测量结果的拟合得到 k 和 f 。对于待测 a ,同样对结果拟合得到 k 与 $f - a$,二者作差即可得到 a 。

另一方面,动力角加速度 a 的表达式如式(3)所示,

$$a = \frac{M_d}{J} = \frac{n\sigma SR}{J} \Rightarrow \sigma S = \frac{J}{nR}a \quad (3)$$

其中, M_d 为动力力矩; J 为转子的转动惯量; σ 为微小力的推力面密度,也是目标参量; n 为推力叶片个数; S 为推力薄膜面积; R 为推力中心到旋转中心的距离。几何参量可通过提前测量得到。

在无动力和阻力的情况下转子的角速度不会发生变化,即角速度的变化将直接反应出转子所受的合力。通过光电测速系统对转子角速度进行监控和测量,得到如式(2)所示的角加速度和角速度的线性关系。将测得的数据代入式(2)和(3)中即可得到合力大小。标定中并无动力存在,因此最终合力即为平台受到的阻力。该阻力将由常数阻力和与时间成正比的阻力两项分力构成。

2.2 实验优化与流程确立

标定和实验围绕着式(1)中的 5 个参量展开,采用统一的磁悬浮转子系统(组)。其中, J, n, S, R 可在标定($\sigma = 0$)和实验之前测量得到。 a 的确定则需要两次实验的结果曲线。实验的具体流程如图 3 所示。

首先,设定标准系统及其基础参数并确定测量中所用的臂长。标准系统采用长度为 5.000 cm 的连接支架。支架长度增加时待测微小力提供的动力矩线性增加,转子所受阻力与转子的转动惯量也同时增加,因此存在最优的支架长度。在最优支架长度的基础上额外选取另一

$$\sigma S = \frac{J_1 a_1 - J_2 a_2}{n \Delta R} \quad (5)$$

3 标定实验及其结果分析

平台建成后, 在应用于自发 α 衰变薄膜的推力测量之前, 应对实验平台进行标定。标定时 $\sigma = 0$, 标定实验将分别给出 k 和 f 的取值。

标定实验时, 可提前获得的几何参数包括叶片数量 $n = 12$ 、叶片间的平均夹角为 $29^\circ 59' 59'' \pm 1''$ 、转子的转动惯量 $J = (6.830 \pm 0.005) \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 等。预期附着膜推力中心到旋转中心的距离为 $8.500 \pm 0.001 \text{ cm}$ 。测速系统的采样率为 10 kHz , 叶片每次抵达记录点的时刻定义为信号降至 2.5 V 的时刻, 所得时间的标准差为 0.1 ms 。

3.1 减速过程的数据分析

在硬磁转子的旋转过程中, 叶片 (编号 1~12) 不断对光路进行遮挡, 且相邻两叶片遮挡光路的时间区间是不重叠的。转子在该时间区间内的平均角速度, 可由相邻叶片之间的角度以及记录时间的差值给出。本文实验针对减速过程共进行了 9 次角速度测量。

首先对每次测量的结果进行整理和分析。每次测量时间不超过 2 min , 处理得到的角速度-时间曲线如图 4 所示。

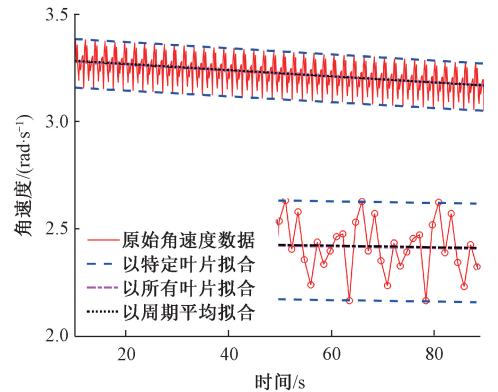


图 4 角速度变化曲线

Fig.4 Schematic diagram of angular velocity change curve

曲线以 12 个点为一个周期, 总体呈下降趋势, 周期内数值波动明显, 极大地影响了数据质量。因此将数据分为 12 组, 分别选取特定的角速度序列得到拟合曲线, 例如由相邻的 1 号与 2 号叶片得到的区间角速度序列。通过对 12 条一次拟合曲线的 95% 可信区间范围以及各组之间的标准差进行计算得到数据精度。图 4 中所示的一次拟合结果如式 (6) 所示。该测量时间区间内, 转子的平均角速度为 $(3.227 \pm 0.074) \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$\omega = (-1.405 \pm 0.023) \times 10^{-3} t + (3.296 \pm 0.063) \quad (6)$$

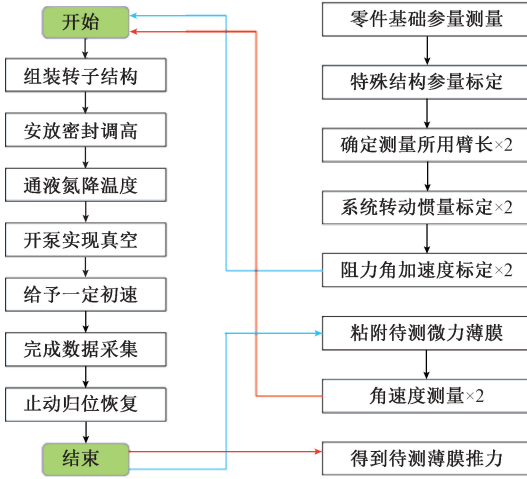


图 3 微小力测量实验总流程

Fig.3 Overall flow chart of micro force measurement experiment

组支架作为对比。两组支架长度的差值为 2.000 cm , 分别记两组转子的转动惯量为 J_1 和 J_2 。

叶片数量的选择也存在着优化的可能。叶片数量过少将造成采样点过少、旋转稳定性降低、推力面积不足等问题。而叶片数量过多则会增加转子的重量、降低悬浮高度。同时, 在相同推力的条件下, 转动惯量的增加将导致角加速度的降低。

其次, 对平台阻力矩展开标定, 实现对式 (2) 的拟合。利用实验中测速系统得到的特征时刻 $t_i (i = 1, 2, 3, 4)$, 记录点 1,2 之间和 3,4 之间转子转过的角度 θ_{12} 和 θ_{34} , 以及记录 1,2 与记录 3,4 之间的间隔时间 T , 即可得到转子的平均加速度如式 (4) 所示。其中 ω 的下标 f 表示其为标定的过程量, 以便与测量 a 时的角速度进行区分。通过大量数据的积累完成对式 (2) 的线性拟合, 并用同样方法得到更换另一组支架后转子角加速度曲线的线性拟合方程。

$$\begin{cases} \omega_{f1} = \frac{\theta_{12}}{t_2 - t_1}, \omega_{f2} = \frac{\theta_{34}}{t_4 - t_3} \\ \frac{\Delta \omega_f}{\Delta t} = \frac{1}{T} (\omega_{f1} - \omega_{f2}) \end{cases} \quad (4)$$

而后, 在叶片上粘附待测推力薄膜, 在有推力的情况下分别对两组支架配合下硬磁转子的角加速度曲线进行测量和拟合。

最后, 消除动力的推力距离误差, 得到小推力 σS 。采用差量法消除因叶片上薄膜附着点的差异产生的推力距离 R 的偶然误差。测量两组转子时, 只更换了长度不同的连接支架, 因此推力距离的差值 (ΔR) 是一定的 (2.000 cm)。因此, 总推力 σS 的表达式如式 (6) 所示。

此时线性拟合的相关指数均大于 0.998 8,且二次拟合结果中二次项系数的 95%可信区间范围过大,因此对于单独一次测量而言,二次拟合并不可取。以图 4 中的“特定叶片”为例,二次拟合曲线的二次项系数为 $2.71 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-3}$,但 95%可信区间下限已经达到 $-2.77 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-3}$,不仅范围过大而且正负不同。9 次测量的结果如表 1 所示,由于各次测量的零时刻并不相同,因此截距的意义并不充分,没有在表中被列出。

表 1 各组实验结果处理后的斜率与平均角速度值

Table 1 The slope and average angular velocity of the experiment results after data processing

序号	斜率/ $\times 10^{-3} (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$	平均角速度/ $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
1	-1.750±0.036	4.64±0.11
2	-1.701±0.032	4.38±0.10
3	-1.639±0.031	4.11±0.11
4	-1.405±0.022	3.23±0.07
5	-1.195±0.024	2.50±0.09
6	-1.119±0.024	2.24±0.09
7	-1.044±0.024	2.00±0.08
8	-0.992±0.032	1.83±0.06
9	-0.961±0.031	1.73±0.06

对比阻力矩结果,每次测量的斜率与其平均角速度之间具有明显的相关性。根据 9 个角速度-角加速度的样本点得到二者的一次拟合如式(7)所示。将 $a=0$ 与式(7)代回式(2),则得到 $k(\text{s}^{-1})$ 和 $f(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$ 的取值和不确定度,如式(8)所示。

$$\frac{d\omega}{dt} = - (2.746 \pm 0.102) \times 10^{-4} \omega -$$

$$(4.985 \pm 0.321) \times 10^{-4} \quad (7)$$

$$\begin{cases} f = (4.985 \pm 0.321) \times 10^{-4} \\ k = (2.746 \pm 0.102) \times 10^{-4} \end{cases} \quad (8)$$

将角加速度等效于作用在附着薄膜的推力中心处的总阻力 F (单位:N),则如式(9)所示。将表 1 中的最低角速度(序号 9)数据代入,此时转子受到的总阻力大小为 $783 \pm 53 \text{ nN}$,即每个叶片 $65 \pm 4 \text{ nN}$,相对误差为 6.77%。

$$F = \frac{J}{R} f = - (2.206 \pm 0.082) \times 10^{-7} \omega -$$

$$(4.01 \pm 0.26) \times 10^{-7} \quad (9)$$

分析数据的不确定度,占主导的是对测量的拟合误差。 J 和 R 带来的不确定度为 0.34 nN ,叶片间角度的测量($1''$)与记录时间差(0.1 ms)带来的相对误差小于 0.2%,均未对式(6)的结果造成影响。因此现有几何尺寸以及数据采集精度已经足够,进一步优化带来的精度

提升很小。

另一方面, $1.73 \pm 0.06 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 并不是减速过程中角速度的最小值。图 4 中(以及后文图 5 中)的转子角速度的周期波动幅度小于 $0.50 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此可推知减速过程的最低角速度为 $0.50 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,此时由式(6)可知 $F = 511 \pm 35 \text{ nN}$ 。

施加微力后, f 和 F 变为 $f \pm a$ 和 $F \pm n\sigma S$ 。由标定结果推测, $F \pm n\sigma S$ 的相对误差也将为 6.77%。理论上, $F \pm n\sigma S$ 的取值与 F 的取值差异超过二者的不确定度之和,即可判定二者是有差异的。平台测量的主要参数为合力大小,即阻力与动力之差(和)。当平台所测合力值为 445 nN 时,其误差为 30 nN 。 $445 \pm 30 \text{ nN}$ 与 $511 \pm 35 \text{ nN}$ 的可信区间无重合,是不同的两个合力值。此时, 66 nN 作为二者之差即为平台受到的动力大小。因此平台测量分辨率和最小可测微力值可低至 66 nN 。

3.2 周期内叶片速度波动分析

转子旋转时,周期内的角速度波动明显且各个周期的波动曲线规律相同,如图 5 所示。每个周期有 12 个记录点,但每个周期内仅有 8 个极值点。这些极值点的存在应该与 8 块超导材料之间的缝隙情况相关。

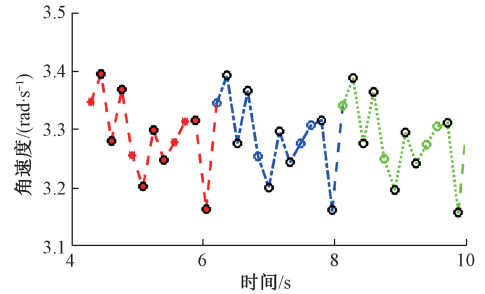


图 5 周期内角速度变化曲线

Fig.5 Schematic diagram of angular velocity change within a period

转子旋转时,超导导轨外的屏蔽电场一定会随之变化,但 8 个超导导轨块之间的缝隙将阻碍这种变化的同步性,并在一个周期内形成这样一个反馈过程:

随着转子的旋转,导轨外的屏蔽电场与转子磁场之间以固定的“相位差”同步变化,以确保超导体内的磁场强度恒为 0。但在各个超导导轨块之间缝隙的影响下,屏蔽电场的变化将发生滞后,二者之间的相位差增加,相互之间产生拉力。此时转子发生减速而屏蔽电场则开始追赶。相位差恢复时,屏蔽电场的变化并没有立刻停止,而是发生过冲,使得二者之间的相位差进一步减小,相互之间产生推力。此时转子发生加速而屏蔽电场的变化速度减缓。

8 块超导导轨将出现 8 次相位差的增减,即在减速旋转的运动基础上叠加了 8 个不同的周期振动。振动比

整体的减速剧烈,造成了转子角速度在周期内的明显变化。由于每个缝隙所造成的影响不同,振动的频率和幅度也不尽相同,因此定量分析将变得尤其复杂。从实验现象入手,这一周期振动的存在不仅将加剧减速过程中的阻力,同时会造成低速摆动现象的出现。

3.3 低速摆动分析

若转子的角速度不足以支撑其完成周期振动中的减速过程,则转子将会被拉回,并将以转子的中心轴线为轴形成摆动。导轨缝隙的存在使得定轴摆动运动十分复杂。而且摆动周期内角速度的采集点较少,很难通过实验对整个摆动过程进行完全的描述。

此时的角速度变化如图6所示。由于摆动幅度的逐渐减小,周期内的角速度点从14个逐渐变为10个,甚至更低。在摆动过程中,半周期内存在特定的两个相邻的采样点,使得二者计算得到的角速度比其他角速度点更大(但不一定是摆动周期内的最大角速度)。从实验结果来看,该位置上的角速度随时间线性下降。

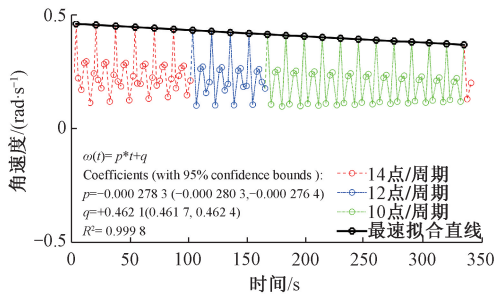


图6 低速摆动过程中的周期变化与角速度拟合

Fig.6 The periodic variation and angular velocity fitting in low-speed swing process

由图6中的拟合直线可知,转子周期平均角加速度为 $\Delta\omega/\Delta t = -(2.783 \pm 0.02) \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$ 。结合转动惯量,可得到作用在推力中心处的周期平均总阻力 $F_b = (2.236 \pm 0.016) \times 10^{-7} \text{ N}$ 。 F_b 的大小和不确定度均要优于减速过程中的等效推力 F 。但若此时施加微力 $n\sigma S$,则转子将受到一个垂直于叶片的推力,以及一个方向不变的推力矩。该推力矩在一个周期内几乎不做功,它的存在与否仅对转子摆动的对称轴位置有影响。在此情况下,令转子自由摆动直至停止,则可以确定摆动的对称轴位置,并通过计算对称轴的偏移角度进一步得到微力的大小。

但是,由于周期振动的影响,停止位置的唯一性并不能被保证。同时,现有实验平台的光轴是固定的且摆动周期内的采样点过少,因此无法准确测量摆动对称轴的偏移角度。若想成功利用摆动过程进行微力测量,实验平台还有待进一步的改进和拓展。

4 结 论

本文建立了一种基于高温超导体的真空动态微小力测量平台,由磁悬浮转子、高真空热沉以及测速系统共3个子系统构成。在真空低温腔室中利用高温超导导轨对硬磁转子进行悬浮。在腔室外,通过测速系统对悬浮在超导导轨上方的具有一定初速度的磁悬浮转子的运动情况进行测量,进而得到转子旋转时的阻力矩和作用在转子叶片中心的微力值。

本文分析了转子的运动行为,确定了实验流程,并在此基础上对实验平台进行了标定。转子受到的等效阻力可分为与角速度无关的固有阻力 $401 \pm 26 \text{ nN}$ 以及与角速度线性相关的阻力(比例系数 $221 \pm 8 \text{ nN} \cdot \text{s}$)两种。在减速模型中,可测的最低阻力约为 $511 \pm 35 \text{ nN}$,已测得的等效阻力为 $783 \pm 53 \text{ nN}$;平台的可测微力最低可达 66 nN ,平均单叶片推力 5.50 nN 。

本文分析了超导导轨间隙造成的导轨磁场与转子磁场之间的相位差变化,并由此讨论了转子角速度的周期波动性,以及低速摆动的形成。通过对摆动运动的分析,发现了实验平台测力精度优化的可能,以及在测速系统布局 and 测速点数量上的不足。

在实验过程中也发现了其他一些需要改进的问题。超导块在冷却过程中,存在冷却温度不均匀的现象,导致了硬磁转子悬浮高度浮动、悬浮出现小角度倾斜等现象。超导材料存在加工性能不稳定、热应力过大导致边缘碎裂、吸收潮气使得自身潮解、大块加工生长期困难等问题。在下一步工作中,将从这些方面对实验平台展开进一步探索,维护平台的工作状态,突破平台的测量下限。

参考文献

- [1] 徐立, 郑培亮, 李闯, 等. MEMS执行机构在微小力传感器量值溯源中的应用[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(11):148-150, 153.
XU L, ZHENG P L, LI CH, et al. Application of MEMS actuator mechanism in micro-force sensor traceability[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(11):148-150, 153.
- [2] GOURIER C, JEGOU A, HUSSON J, et al. A nanospring named erythrocyte. The biomembrane force probe[J]. Cellular and Molecular Bioengineering, 2008, 1(4):263-275.
- [3] CANUTO E, ROLINO A. Nanobalance: An automated interferometric balance for micro-thrust measurement[J]. ISA Transactions, 2004, 43(2):169-187.
- [4] 唐纯谦. 力值计量标准现状及研究进展[J]. 中国测

- 试, 2009, 35(3):11-16.
- TANG CH Q. Research development and summary of force measurement standards[J]. China Measurement and Test, 2009, 35(3):11-16.
- [5] SMITH S T, HOWARD L P. A precision, low-force balance and its application to atomic force microscope probe calibration[J]. Review of Scientific Instruments, 1994, 65(4):903-909.
- [6] LEACH R, CHETWYND D, BLUNT L, et al. Recent advances in traceable nanoscale dimension and force metrology in the UK [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(3):467-476.
- [7] FUJII Y. Method for generating and measuring the micro-newton level forces [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2006, 20(6):1362-1371.
- [8] HOLZAPTEL W, NEUSCHAEFER R S, KOBUSCH M. High-resolution, very broadband force measurements by solid-state laser transducers [J]. Measurement, 2000, 28(4):277-291.
- [9] 姚嘉林, 江五贵, 邵娜, 等. 基于柔性电极结构的薄膜电容微压力传感器[J]. 传感技术学报, 2016, 29(7):977-983.
- YAO J L, JIANG W G, SHAO N, et al. Thin film capacitive micro-pressure sensors based on flexible electrode structure [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(7):977-983.
- [10] 崔岩, 孟汉柏, 王兢, 等. PT/PZT/PT 薄膜微力传感器 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(9):1404-1409.
- CUI Y, MENG H B, WANG J, et al. Microforce sensors based on PT/PZT/PT thin films [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(9):1404-1409.
- [11] 沈飞, 徐德, 唐永建, 等. 微操作/微装配中微力觉的测量与控制技术研究现状综述 [J]. 自动化学报, 2014, 40(5):785-797.
- SHEN F, XU D, TANG Y J, et al. Review of measuring and control technology of microforce in micromanipulation and microassembly [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(5):785-797.
- [12] LIANG Q K, ZHANG D, COPPOLA G, et al. Multi-dimensional MEMS/micro sensor for force and moment sensing: A review [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8):2643-2657.
- [13] VULPETTI G, JOHNSON L, MATLOFF G L. Solar sails [M]. New York: Springer New York, 2015.
- [14] TSUDA Y, MORI O, FUNASE R, et al. Achievement of IKAROS — Japanese deep space solar sail demonstration mission [J]. Acta Astronautica, 2013, 82(2):183-188.
- [15] VETRUGNO D. LISA pathfinder first results [J]. International Journal of Modern Physics D, 2017, 26(5):1741023.
- [16] 欧阳晓平, 何世熠, 夏彦, 等. 微小力的动态测量装置: 201610590190.6 [P]. 2016-07-25.
- OUYANG X P, HE SH Y, XIA Y, et al. A dynamic measuring device for microforces: 201610590190.6 [P]. 2016-07-25.
- [17] 古宏伟, 董泽斌, 韩征和, 等. 高温超导材料的研发、产业化与经济性提高 [J]. 电工电能新技术, 2015, 34(6):1-15.
- GU H W, DONG Z B, HAN ZH H, et al. Research and development of high T_c superconducting tapes [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(6):1-15.

作者简介



何世熠, 2014 年于清华大学获得学士学位, 现为清华大学博士研究生。主要研究方向为微小力学测量, 核辐射推进器装置研究。

E-mail: Hesyth10@sina.com

He Shi Yi received his bachelor degree from Tsinghua University in 2014. Now, he is a Ph. D. candidate in Tsinghua University. His main research interests include microforce measurement and nuclear radiation thruster.



夏彦 (通信作者), 2007 年和 2012 年于清华大学分别获得学士学位和博士学位, 现为北京卫星环境工程研究所研究员, 主要研究方向为空间核动力、空间高能辐射与粒子探测。

E-mail: xiayan_cast@163.com

Xia Yan (Corresponding author) received her bachelor degree in 2007 and Ph. D. degree in 2012 both from Tsinghua University, respectively. She is now a research fellow at Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering. Her main research interests include space nuclear power, space high energy radiation and particle detection.