

基于电磁恒力的扭摆式转动惯量测量方法*

崔海超, 洪延姬, 韩建慧, 杜宝盛, 郑永赞, 王殿恺

(航天工程大学空间高效能推进技术及应用全国重点实验室 北京, 101416)

摘要 针对高精度的微小转动惯量测量需求,提出基于非接触式电磁恒力的扭摆式转动惯量测量方法,并研制了相应的测量装置。首先,通过引入无摩擦弹性部件、设计涡流阻尼器以及高精度系统响应采集,研制了一种扭摆式转动惯量测量系统;其次,深入分析了测量装置在恒力作用下的系统响应极值特性,实现了扭转刚度系数和阻尼比的高精度识别,建立了转动惯量与恒力以及极值特性之间的数学模型,有效解决了阻尼对转动惯量测量的影响;然后,针对实际测量所需的高精度恒力,提出了一种线圈与永磁体组合型电磁力源,并通过高精度电子天平和最小二乘法拟合获得了其电磁力驱动方程;最后,对所提出方法的有效性和高精度进行了实验验证。通过对测量装置在空载和搭载条件下分别多次施加相同恒力和不同恒力,结合转动惯量叠加原理获得了待测件的转动惯量,并将测量值与理论值进行比较,获得的相对误差分别为 1.643% 和 1.529%。

关键词 转动惯量;扭摆系统;电磁恒力;参数识别

中图分类号 TH123;TH11

引言

转动惯量是经典力学中刚体绕轴转动时惯性的量度,是研究刚体旋转运动、掌握刚体三维运动规律的重要参数。目前,确定物体转动惯量的方法大致分为 2 类:①理论计算方法;②实验测量方法。理论计算方法使用方便简单、成本较低,适用于质量分布均匀且几何形状简单的情况,对于实践工程中形状和构造复杂的被测体则需要采用实验测量方法进行间接测量。常用的实验测量方法包括扭摆法、线摆法、复摆法以及落体法^[1-2]。这些方法各有优劣,扭摆法因其具有高精度、高承载以及使用方便等优点,是目前工程上应用最为广泛的方法。传统的扭摆测量方法受到各种摩擦力、阻尼力等干扰因素的影响,难以用于微小转动惯量的高精度测量^[3]。孔玥^[4]基于空气阻尼比测量误差补偿算法,实现了测量结果的修正,提高了测量精度,并对非线性效应削弱方法^[5]和大型被测物体转动惯量的高精度测量^[6]进行了分析研究。Zhang 等^[7]通过机器视觉原理记录扭摆运动的方法,降低了轴承摩擦阻尼的影响。文献[8-9]采用空气轴承减小摩擦力的影响,基于复摆法实现了微小转动惯量的测量。此外,精密气浮技术、磁悬浮技术以及真空技术也被用来克服摩擦力、空气阻力的影响^[10-12],但这些技术要求高、价格

昂贵且使用复杂。目前,在转动惯量测量方法建立和设备研制等方面取得了丰硕的成果,但摩擦力、阻尼力的影响仍不可忽视,尤其是微小物体转动惯量检测误差严重超标^[13]。

笔者通过引入无摩擦、无黏滞、低温漂且具有恒定刚度系数的挠性枢轴,研制了一种扭摆测量装置,有效削弱了干摩擦力、时变恢复力以及温度变化所引起的非线性效应。此外,对扭摆系统的摆臂进行了轻量化设计,降低了测量系统空载转动惯量,为微小转动惯量的高精度识别奠定了基础。针对所研制的扭摆测量系统,笔者基于动力学理论,深入分析了恒力作用下的系统响应极值特性,建立了扭转刚度系数、阻尼比以及转动惯量与响应极值特性之间的关系,实现了系统参数的高精度识别,并基于叠加原理获得了待测物体的转动惯量测量。笔者基于电磁力法研制了一种永磁体与线圈组合型电磁力源,为测量提供所需的高精度标准恒力。恒力作用下的扭摆系统响应选用具有较高采样频率的激光位移传感器,以实现系统响应的高精度获取。

1 扭摆测量装置及测量原理

1.1 装置组成

笔者研制的扭摆式转动惯量测量装置如图 1 所

* 国家自然科学基金资助项目(12402412);激光推进及其应用国家重点实验室自主基金资助项目(SKLLAP-202404)

收稿日期:2024-03-25;修回日期:2024-06-11

示,主要由标准力源、系统响应采集部件、阻尼部件、弹性部件、惯性部件、限位器和支撑件等部件组成。采用非接触式电磁力源作为标准力源,该力源由通电线圈和力源极板组成,为测量装置施加标准阶跃恒力。系统响应采集部件采用非接触式位移传感器,本研究采用激光位移传感器实现系统响应的实时采集。采用涡流阻尼器作为阻尼部件,为扭摆测量系统提供对应的阻尼力或阻尼系数,该阻尼器由一对永磁铁和铜制阻尼片组成,可加快扭摆测量系统进入平衡态,缩短暂态过程。弹性部件由 2 个无摩擦挠性枢轴组成,为扭摆测量系统提供恢复力,在小角度工况下,其提供的扭转刚度系数可视为常数。此外,所用枢轴具有无摩擦、无黏滞、高承载、低温漂以及免维护等特性。在空载工况下,惯性部件主要包括摆臂、载物台、力源极板和阻尼片,是测量系统空载工况下转动惯量的主要组成部分,对摆臂进行轻量化镂空设计有利于实现微小转动惯量的测量。附属部件主要由限位器、支撑架、位移台以及底座组成,限位器可以防止扭摆系统响应过大,有效保护测量装置的弹性部件和系统响应采集部件。支撑架和底座主要用来提高扭摆系统的稳定性和系统性。

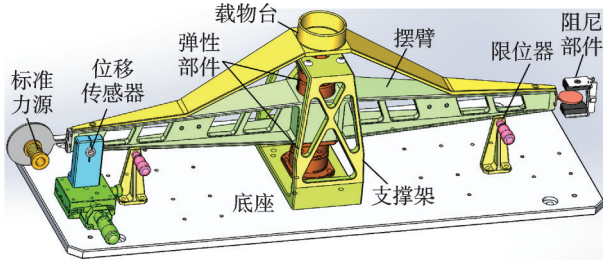


图 1 扭摆式转动惯量测量装置

Fig.1 The torsional device for measuring moment of inertia

1.2 扭摆系统响应

扭摆测量系统在恒力 F 作用下,其系统动力学原理示意图如图 2 所示。根据动量矩定理可知扭摆系统的振动方程为

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = FL_f \quad (1)$$

其中: c 为扭摆系统的阻尼系数; $-c\dot{\theta}$ 为阻尼产生的力矩; k 为弹性部件对应的扭转刚度系数; $-k\theta$ 为扭转刚度系数对应的恢复力矩; J 为扭摆系统的转动惯量; $-J\ddot{\theta}$ 为转动惯量对应的惯性力矩; L_f 为力臂; FL_f 为外力矩。

将式(1)两侧均除以 J ,得到阻尼强迫振动的标准形式为

$$\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2\theta = \frac{FL_f}{J} \quad (2)$$

其中: ω_n 为扭摆系统的固有频率, $\omega_n = \sqrt{k/J}$; ζ 为系统的阻尼比, $\zeta = c/(2\sqrt{Jk})$,是表征阻尼强弱的系数,为无量纲量。

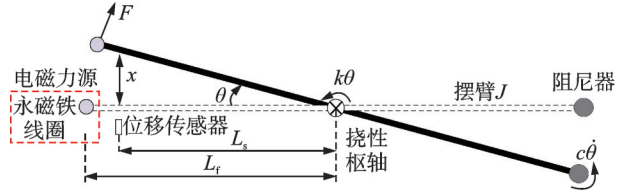


图 2 扭摆测量系统动力学原理示意图

Fig.2 Dynamic principle of the torsion pendulum system

直接采集扭摆系统的扭转角 θ 较为困难,利用位移传感器可以方便获取系统响应的线位移 x 。利用几何关系将角位移响应转化为线位移响应,当扭转角 $\theta \leq 5^\circ$ 时,线位移 x 和角位移 θ 之间的近似关系式为

$$\theta \approx \tan \theta = x/L_s \quad (3)$$

其中: L_s 为测量臂。

式(2)可改写为

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = FL_sL_f/J \quad (4)$$

图 3 为标准恒力作用下的系统响应。假设系统初始时刻的速度和位移均为 0,得到欠阻尼($\zeta < 1$)状态下的系统响应表达式为

$$x(t) = \frac{FL_sL_f}{k} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi) \right) \quad (5)$$

其中: $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$; $\tan \varphi = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$ 。

当 $t \rightarrow \infty$ 时,扭摆系统趋于稳定,相应的稳态响应为

$$x_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \frac{FL_sL_f}{k} \quad (6)$$

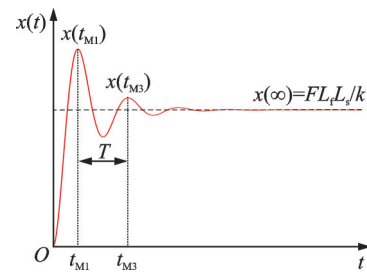


图 3 标准恒力作用下的系统响应

Fig.3 The system response for a standard constant force

对式(5)求导,令扭摆系统的速度为 0,即

$$\dot{x}(t) = \frac{FL_sL_f}{J\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t) = 0 \quad (7)$$

获得系统响应的极值点时刻 t_{Mi} 为

$$t_{Mi} = i\pi/\omega_d = i\pi/(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}) \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (8)$$

如图3所示,由于阻尼的影响,振动逐渐衰减至稳态,因此第1个极值即为系统响应的最大值。将第1个极值点时刻 $t_{M1} = \pi/\omega_d$ 代入式(5),得到系统响应的最大值为

$$x(t_{M1}) = \frac{FL_s L_f}{k} \left(1 + e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \right) \quad (9)$$

1.3 转动惯量测量原理

根据 $\omega_n = \sqrt{k/J}$ 和 $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$, 可得系统的转动惯量为

$$J = k/\omega_n^2 = kT^2(1-\zeta^2)/4\pi^2 \quad (10)$$

由式(10)可知,为了测得所需的转动惯量,需要获得扭摆的振动周期 T 、扭转刚度系数 k 以及阻尼比 ζ 。振动周期 T 可由系统响应相邻极值时间差确定。

1.3.1 确定扭转刚度系数 k

通过对扭摆系统施加已知的标准力 F , 利用位移传感器测得系统的稳态响应 x_∞ , 根据式(6)可获得系统的扭转刚度系数为

$$k = \frac{FL_s L_f}{x_\infty} \quad (11)$$

1.3.2 确定阻尼比 ζ

基于系统响应的衰减特性,通过系统响应的最大值和稳态值即可获得系统的阻尼比大小。将式(6)代入式(9),可得

$$x(t_{M1}) = x_\infty \left(1 + e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \right) \quad (12)$$

整理后得到系统的阻尼比为

$$\zeta = \frac{|\ln a|}{\sqrt{(\ln a)^2 + \pi^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\pi/\ln a)^2}} \quad (13)$$

其中: $a = \frac{x(t_{M1}) - x_\infty}{x_\infty}$ 。

1.3.3 确定转动惯量

将式(11)、(13)代入式(10),可得

$$J = \frac{FL_s L_f T^2}{4x_\infty((\ln a)^2 + \pi^2)} \quad (14)$$

根据式(14)可知,通过对扭摆系统施加大小已知的阶跃恒力 F , 并利用位移传感器测得扭摆系统响应对应的最大值 $x(t_{M1})$ 、稳态值 x_∞ 以及振动周期 T , 即可获得系统的转动惯量。

图4为转动惯量测量原理流程图。假设空载工况下扭摆系统的转动惯量为 J_0 , 负载状态下的转动惯量为 J_1 , 根据叠加原理得到待测物体的转动惯量 J_u 为

$$J_u = J_1 - J_0 \quad (15)$$

由于实际测量的系统响应不可避免地耦合有测量噪声,因此对系统响应进行平滑降噪处理后,可以获得其最大值及所需的极值点时刻,而稳态值响应和振动周期则可通过多组数据求平均后获得,以降低随机误差带来的影响。值得注意的是,笔者所提出方法有效解决了外界阻尼对测量结果的影响,且测量装置空载时的转动惯量只需要确定一次。

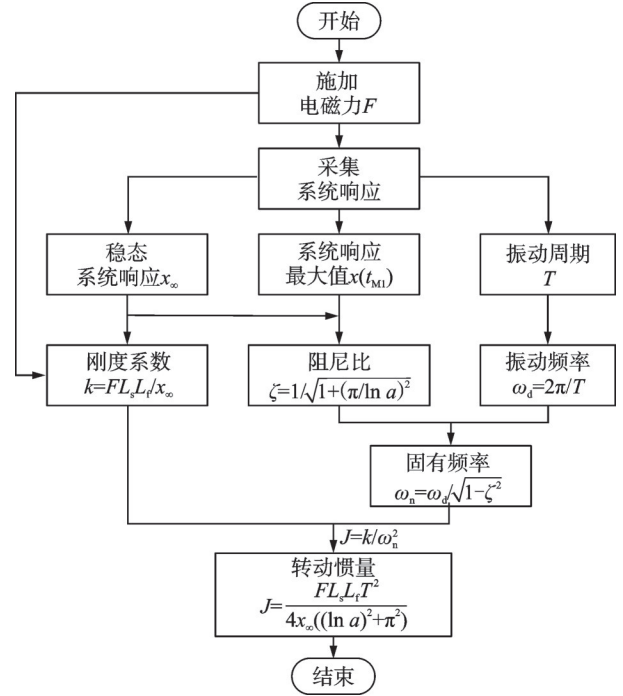


图4 转动惯量测量原理流程图

Fig.4 Flowchart of the measurement principle of moment of inertia

2 电磁力源标定

基于转动惯量测量原理可知,恒力的稳定性、精确性及重复性会对转动惯量的测量结果产生重要影响。目前,常用于产生标定力的方法有重力法、静电力法以及电磁力法^[14]。重力法通常是利用重量已知的物体来提供所需的标定力,该方法往往受到滑轮摩擦、绳索伸缩等因素的影响。静电力法利用平行极板间异性电荷产生所需的静电力,该方法可以产生宽范围的标定力,但需要加载较高的电压。相比之下,电磁力法不仅可以避免线路连接带来的干扰,而且使用方便。笔者研制了一种由永磁铁和通电线圈组成的电磁力源,其电磁力 F_e 由载流导体在磁场中所受的安培力提供,理论表达式为

$$F_e = 2\pi N B R I \quad (16)$$

其中: N 为线圈匝数; B 为磁场强度; R 为线圈半径; I 为线圈电流。

在线圈和永磁铁给定且两者相对位置保持不变

的前提下,式(16)中的变量 N 、 B 、 R 会随之确定,从而可知电磁力与输入电流之间存在良好的线性关系。在实际工程中,由于永磁铁的磁场分布具有不均匀特性,其磁场强度难以解析求得,因此采用实验称重法获取高精度电磁力,即利用高精度电子天平称量获得电磁力的大小。

图5为电磁力测量装置示意图及其实物图。电磁力称量装置连接示意图如图5(a)所示。将永磁铁置于非导磁支撑上部,使其远离电子天平,从而降低其磁场对电子天平的影响。线圈安装在连接杆的底端,置于永磁铁的正上方,并通过位移台进行同轴设置,确保线圈的下表面与磁铁上表面共面。

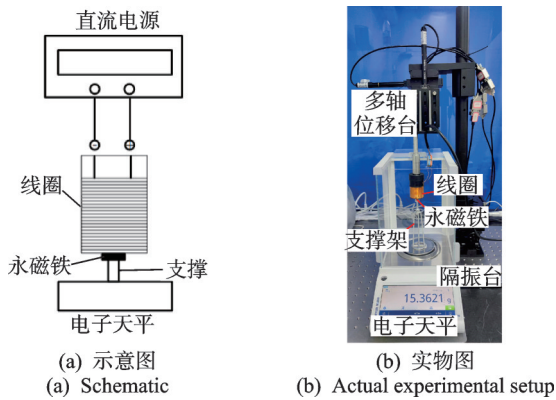


Fig.5 Schematic and actual experimental setup for electro-magnetic force measurement

图6为线圈与永磁铁相对位置设置示意图。具体操作如下:①如图6(a)所示,确保线圈和永磁铁在 xy 平面内的投影有交集;②调节线圈在 z 方向的位置,当电子天平示数突然发生显著变化时,则可确定线圈下表面已与永磁铁上表面发生接触,说明两表面已完成共面设置,此时记录 z 方向位移台的位置为 d_z ;③确定线圈在 y 方向的位置,调节线圈在 x 方向的位置,将永磁铁与线圈内切接触(如图6(b)虚线所示),此时记录 y 方向位移台位置为 d_{y1} ,再调节线圈在 y 方向的位置,当永磁铁与线圈再次发生内切接触时(如图6(b)点划线所示),记录 y 方向位移台位置为 d_{y2} ,然后将 y 方向位移台位置调节为 $(d_{y1}+d_{y2})/2$ (如图6(b)实线所示),即完成线圈在 y 方向设置;④基于相同的操作,确定线圈在 x 方向位置,调节线圈在 x 方向位置,使永磁铁与线圈内切接触,此时记录 x 方向位移台位置为 d_{x1} (如图6(c)虚线所示),再反方向调节线圈在 x 方向位置,当永磁铁与线圈再次发生内切接触时,记录 x 方向位移台位置为 d_{x2} (如图6(c)点划线所示),然后将 x 方向位移台位置调节为 $(d_{x1}+d_{x2})/2$ (如图6(c)实线所示),即完成线圈在 x 方向设置。至此,线圈和永磁铁完

成同轴设置,线圈最终位置为 $[(d_{x1}+d_{x2})/2,(d_{y1}+d_{y2})/2,d_z]$ 。利用直流电源对线圈通电后,电子天平示数会发生改变,将改变量乘以重力加速度 g ,即可获得所需的电磁力大小。图5(b)为电磁力测量装置实物图。实验设备及其性能参数如表1所示。

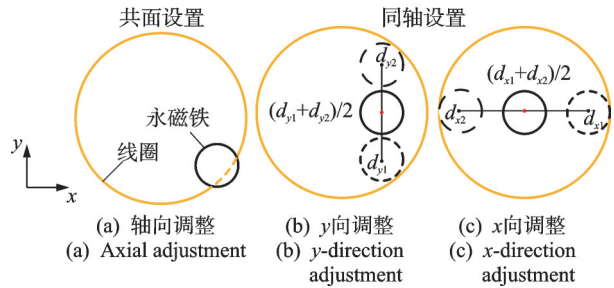


图6 线圈与永磁铁相对位置设置示意图
Fig.6 Schematic of the relative position between the coil and the permanent magnet

表 1 实验设备及其性能参数	
Tab.1 Experimental equipment and their performance parameters	
实验设备	性能参数
电子天平 (MS204TS)	量程:220 g;可读性:0.1 mg; 重复性:0.08 mg;线性度:0.06 mg; 典型稳定时间:2 s
位移台	行程:2.5 cm;分辨率:0.01 mm
线圈	内径:30 mm;高度:30 mm; 匝数:150;线径:0.6 mm
永磁铁(NdFe35)	直径:9.96 mm;高度:3.03 mm
直流电源(E36313A)	分辨率:1 mA

利用直流电源对线圈依次施加 28 个大小不同的电流值。为了降低随机误差的影响,将每个电流值对应的电磁力记录 5 次,并以电流从小到大顺序及反向顺序各测量 1 次以减小迟滞性误差的影响,共测量 $28 \times 5 \times 2 = 280$ 个数据点。电磁力与电流之间的拟合曲线及其标准残差如图 7 所示。

利用最小二乘法对测量数据进行线性拟合,得到电磁力驱动表达式为

$$F_e = 34.931\,92I - 0.000\,819 \tag{17}$$

从图 7 可以看出:①电磁力法产生的标定力与电流具有较高的线性度,拟合相关系数极接近于 1;②测量数据对应的误差棒几乎为 0,表明测量数据的重复性较好;③95% 的标准残差均匀落在 $-2 \sim 2$ 之间,且随机分布在 0 附近,这说明采用的拟合数学模型正确,且拟合标准差较小、置信度较高;④笔者提出的电磁力产生装置可提供 0~35 mN 范围的标准恒力。

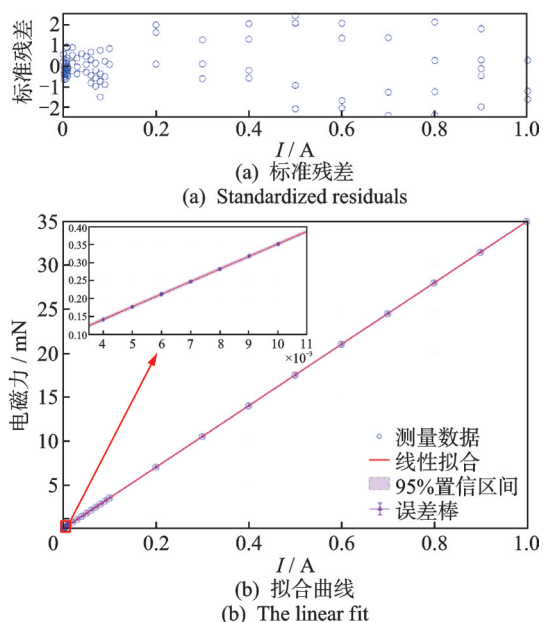


图7 电磁力与电流之间的拟合曲线及其标准残差

Fig.7 The linear fit and standardized residuals between electromagnetic force and applied current

3 转动惯量实验测量

图8为笔者研制的扭摆式转动惯量测量装置实物图。装置本体和载物台均采用7075型航空铝合金加工而成。选用2个Riverhawk 5020-800型挠性枢轴作为测量装置的弹性部件,每个枢轴对应的扭转刚度系数为 $0.191 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。系统响应采集部件选用optoNCDT2300型激光位移传感器,其量程为 2 mm 、分辨率为 30 nm 、采样频率为 20 kHz ,可以实现系统响应的实时记录,将已标定好的电磁力源安装在测量系

统。为了避免线路的拖曳影响,将永磁铁安装在摆臂上,通电线圈安装在永磁铁的正对面,并利用位移台调整二者的相对位置关系,以确保二者在电磁力标定时的相对位置与进行转动惯量测量时的相对位置一致,以便获得高精度的标准恒力。此外,通过控制通电线圈的输入电流以产生较小的电磁力,从而保证扭摆测量系统具有较小的稳态响应,降低电磁力随相对位置改变所产生的影响。制作待测件的材料为7075型铝合金,密度为 $2830 \text{ kg}/\text{m}^3$,其包含1个长方体和1个圆柱体。实测获得长方体的长、宽、高分别为 299.60 、 40.07 和 9.80 mm ,圆柱体的高为 20.06 mm 、直径为 35.02 mm 。计算得到待测件绕中心轴的转动惯量 J_u 为 $2.5426 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

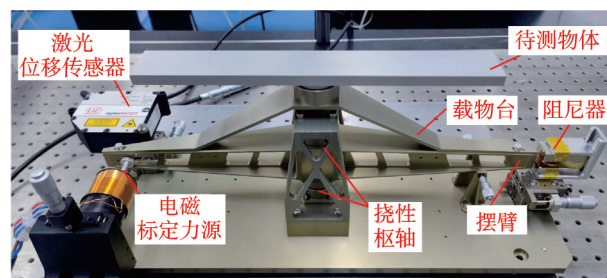


图8 扭摆式转动惯量测量装置实物图

Fig.8 Physical diagram of torsional rotational inertia measuring device

3.1 多次施加相同恒力

恒力作用下的系统响应如图9所示。首先,测量空载工况下的系统转动惯量,通过直流电源对线圈施加 0.05 A 电流,相应的恒力为 $1723.665 \mu\text{N}$,重复施加、卸载6次,利用激光位移传感器测得恒力作

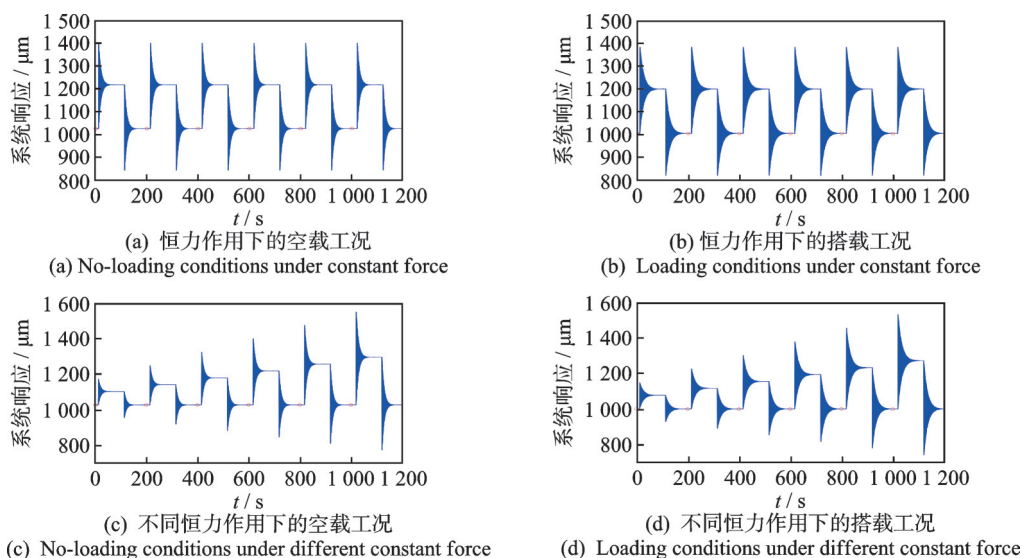


图9 恒力作用下的系统响应

Fig.9 The system responses under constant forces

用下空载工况对应的扭摆系统响应如图 9(a)所示,并基于系统响应特性和式(14),获得每施加一次恒力所对应的转动惯量。多组相同恒力作用下测得的待测物体转动惯量如表 2 所示。

表 2 多组相同恒力作用下测得的待测物体转动惯量

Tab.2 The moment of inertia of the object to be measured is determined by applying a constant force in multiple groups					
次数	I/A	外力/ μN	$J_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$J_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$J_u/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
1	0.05	1 723.665	$3.798\ 2\times 10^{-3}$	$6.288\ 8\times 10^{-3}$	$2.490\ 6\times 10^{-3}$
2	0.05	1 723.665	$3.802\ 2\times 10^{-3}$	$6.298\ 7\times 10^{-3}$	$2.496\ 5\times 10^{-3}$
3	0.05	1 723.665	$3.803\ 9\times 10^{-3}$	$6.314\ 1\times 10^{-3}$	$2.510\ 2\times 10^{-3}$
4	0.05	1 723.665	$3.814\ 1\times 10^{-3}$	$6.325\ 8\times 10^{-3}$	$2.511\ 7\times 10^{-3}$
5	0.05	1 723.665	$3.806\ 3\times 10^{-3}$	$6.296\ 6\times 10^{-3}$	$2.490\ 3\times 10^{-3}$
6	0.05	1 723.665	$3.801\ 3\times 10^{-3}$	$6.324\ 2\times 10^{-3}$	$2.522\ 9\times 10^{-3}$

其次,在确保待测件中轴线与载物台中轴线平行后,同样施加、卸载 6 次上述恒力,测得搭载工况下的系统响应如图 9(b)所示。

最后,根据式(15)得到待测物体的 6 组转动惯量,计算获得其均值 $\hat{J}_u$ 和标准差分别为 $2.503\ 7\times 10^{-3}$ 和 $1.325\ 1\times 10^{-5}$,从而获得测量均值与理论值之间的相对误差为

$$e_J=\frac{\left|\hat{J}_u-J_u\right|}{J_u}\times 100\% = 1.529\% \tag{18}$$

3.2 多次施加不同恒力

通过施加多组不同恒力测量转动惯量,以评估所研制的电磁标定力源对测量结果的影响。通过直流电源对线圈依次施加 0.02、0.03、0.04、0.05、0.06

和 0.07 A 共 6 种电流,测得扭摆系统在空载和搭载 2 种工况下由不同恒力所产生的系统响应,如图 9(c)、(d)所示。根据测得系统响应和所提出方法计算得到每种外力对应的转动惯量如表 3 所示,从而得到待测物体的转动惯量均值 $\hat{J}_u$ 和标准差分别为 $2.500\ 8\times 10^{-3}$ 和 $3.229\ 4\times 10^{-5}$ 。基于式(18)获得该均值与理论值之间的相对误差为 1.643%。与施加多组相同恒力所得转动惯量相比,两者的均值几乎一致。施加多组不同恒力对应的标准差稍大一些,是由于在不同恒力作用下,扭摆系统的系统响应不同,导致电磁力源的线圈与永磁铁之间的相对位置发生不同程度的改变,使实际电磁恒力发生了微弱变化,而在系统响应较小的情况下,相对位置改变所引起的电磁力变化对测量结果的影响可以忽略不计,因此所施加的电磁力可近似为恒力。

表 3 多组不同恒力作用下测得的待测物体转动惯量

Tab.3 The moment of inertia of the object to be measured is determined by applying the different constant forces					
次数	I/A	外力/ μN	$J_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$J_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$J_u/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
1	0.02	664.146	$3.732\ 3\times 10^{-3}$	$6.273\ 5\times 10^{-3}$	$2.541\ 2\times 10^{-3}$
2	0.03	1 017.319	$3.787\ 1\times 10^{-3}$	$6.241\ 9\times 10^{-3}$	$2.454\ 8\times 10^{-3}$
3	0.04	1 370.492	$3.794\ 0\times 10^{-3}$	$6.304\ 1\times 10^{-3}$	$2.510\ 1\times 10^{-3}$
4	0.05	1 723.665	$3.808\ 3\times 10^{-3}$	$6.288\ 6\times 10^{-3}$	$2.480\ 3\times 10^{-3}$
5	0.06	2 076.838	$3.802\ 9\times 10^{-3}$	$6.291\ 8\times 10^{-3}$	$2.488\ 9\times 10^{-3}$
6	0.07	2 430.011	$3.798\ 4\times 10^{-3}$	$6.327\ 8\times 10^{-3}$	$2.529\ 4\times 10^{-3}$

由测量结果分析可知,无论是施加多次相同恒力,还是多次施加不同恒力,本研究方法所得的转动惯量均具有较高的测量精度和良好的重复性,测量误差小于 2%,而相应的标准差较小。

4 结 论

1) 提出了一种扭摆式转动惯量测量装置,其弹

性部件采用无摩擦、无黏滞、低温漂且具有恒定扭转刚度系数的挠性枢轴,有效削弱了干摩擦力、时变恢复力以及温度变化引起的非线性效应,有助于实现待测物体转动惯量的高精度测量。

2) 分析了恒力作用下的系统响应极值特性,建立了扭转刚度系数、阻尼比以及转动惯量与响应极值之间的关系,有效消除了阻尼对测量结果的影响,实现了扭摆测量系统参数的高精度识别。

3) 基于电磁力法研制了一种永磁体与线圈组合型电磁力源,通过高精度电子天平称重法和最小二乘拟合法获得了电磁恒力驱动方程,为测量转动惯量提供所需的高精度标准恒力。

4) 对研制的扭摆式测量装置多次施加相同恒力和不同恒力,并利用所提出方法实现了待测件转动惯量的高精度测量,得到的相对误差分别为1.643%和1.529%,且标准差较小,分别为 1.3251×10^{-5} 和 3.2294×10^{-5} 。

5) 本研究方法不仅操作方便,适用于远程操作,还具有好的通用性和拓展型,通过对扭摆测量装置空载工况下转动惯量的设计,可以实现任意量级转动惯量的高精度测量。此外,提出的电磁恒力转动惯量测量方法不仅适用于扭摆型测量系统,还可用于多线摆和复摆等类型的测量装置。

参 考 文 献

- [1] 赵岩, 张晓琳, 王军, 等. 非线性阻尼条件下物体转动惯量测量研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 37-40.
ZHAO Yan, ZHANG Xiaolin, WANG Jun, et al. Measurement of a moment of inertia of a sample piece under nonlinear damping condition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 37-40. (in Chinese)
- [2] 张心明, 王凌云, 尚春民, 等. 复摆法弹药静态多参数测试仪器研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(1): 212-215.
ZHANG Xinming, WANG Lingyun, SHANG Chunmin, et al. Research on ammunition static parameter-measurement instrument using compound-pendulum method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(1): 212-215. (in Chinese)
- [3] 穆继亮. 转动惯量测量若干关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2009.
- [4] 孔玥. 阻尼条件下转动惯量测量技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [5] WANG J, ZHENG L, WANG Y X, et al. Analysis of air bearing torsion pendulum moment of inertia measurements including nonlinear oscillation and damping[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(6): 065106.
- [6] YU H, ZHANG X L, WANG Z Q, et al. Research on the pose error compensation technology for the mass and centroid measurement of large-sized aircraft based on kinematics[J]. Sensors, 2023, 23(2): 701.
- [7] ZHANG L S, WANG M B, LIN J J, et al. A demodulation algorithm for processing rotational inertia signals using a torsion pendulum method based on differentiation and resonance frequency analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(2): 025005.
- [8] 王凯. 微小物体转动惯量测量机理与实现方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [9] 王向军, 王凯. 微小物体转动惯量测量机理与实现方法研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(2): 182-189.
WANG Xiangjun, WANG Kai. Measurement mechanism and realization method of moment of inertia for tiny objects[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(2): 182-189. (in Chinese)
- [10] 李启行, 湛璨, 王维民, 等. 基于横向振动的旋转机械扭振信号提取方法[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(6): 1211-1216.
LI Qihang, CHEN Can, WANG Weimin, et al. Method of extracting torsional vibration signal based on lateral vibration signal in rotating machinery[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(6): 1212-1216. (in Chinese)
- [11] SCHEDLINSKI C, LINK M. A survey of current inertia parameter identification methods[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(1): 189-211.
- [12] XU Z, ZHAO K, CHEN M, et al. Research on the influence of air resistance in spacecraft moment of inertia measurement[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 163(1): 012170.
- [13] 姚国年, 王丽娟, 刘哲. 基于扭摆法的弹箭转动惯量测量仪[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(2): 223-228.
YAO Guonian, WANG Lijuan, LIU Zhe. Technical research of measuring instrument for moment of inertia of projectiles based on torsion pendulum method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(2): 223-228. (in Chinese)
- [14] 冯孝辉, 洪延姬, 崔海超, 等. 高精度电磁标定力数值模拟及实验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 210806.
FENG Xiaohui, HONG Yanji, CUI Haichao, et al. Numerical simulation and experimental methods for high precision electromagnetic calibration force[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(8): 210806. (in Chinese)



第一作者简介:崔海超,男,1989年5月生,博士生、副研究员。主要研究方向为微推力测量技术以及系统参数标定方法。
E-mail: cuihaichao521@163.com