

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003704

高精度反力矩测量系统研制及标定*

谢琛¹ 傅 骁¹ 段发阶¹ 马本富² 蒋佳佳¹ 刘昌文¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072; 2. 天津航海仪器研究所 天津 300131)

摘 要:针对陀螺仪电机转矩波动高精度微力矩测量需求,提出了一种基于力矩器与角度传感器的高精度反力矩测量系统方案,基于共轴传递的阶梯轴结构,采用弹簧状游丝柔性连接外部接线,降低接线引入的弹性干扰力矩,实现了转矩波动的高精度测量;在传统砝码标定基础上,开展了测量系统静态标定及不确定度分析。实验结果表明,与优化前相比,系统测量精度提高了90%,在-10~10 mN·m 的量程内,测量精度高达0.06%,线性度优于0.03%,漂移误差优于0.5 μN·m/2 h,不确定度优于0.025%。

关键词:反力矩;力矩器;角度传感器;高精度;力矩标定;不确定度分析

中图分类号: TN6;TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4025

Development and calibration of high precision counter torque measurement system

Xie Chen¹ Fu Xiao¹ Duan Fajie¹ Ma Benfu² Jiang Jiajia¹ Liu Changwen¹

(1. State Key Laboratory of Precision Testing Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Navigation Instrument Research institute, Tianjin 300131, China)

Abstract:In response to the need for high-precision micro-torque measurement of the torque fluctuation of the gyroscope motor, a high-precision counter-torque measurement system based on a torque device and an angle sensor is proposed. Based on a coaxially transmitted stepped shaft structure, the external wiring is flexibly connected with spring like hairspring to reduce the elastic interference torque caused by wiring, and realize the high-precision measurement of the torque fluctuation; based on the traditional weight calibration, the static calibration and uncertainty analysis of the measurement system are carried out. The experimental results show that the system measurement accuracy is improved by 90% compared to before optimization. In the range of -10~10 mN·m, the measurement accuracy is as high as 0.06%, the linearity is better than 0.03%, and the drift error is better than 0.5 μN·m/2 h, the uncertainty is better than 0.025%.

Keywords:counter moment; torques; angle sensor; high precision; moment calibration; uncertainty analysis

0 引 言

陀螺仪电机是惯性导航等高精度设备的核心组成部分,在航空、航天、航海等军民领域中具有重要作用^[1]。电机输出的稳定性直接决定着设备的稳定性。在陀螺仪电机的研制与生产过程中,转矩波动和噪声始终是限制其平稳运行的重要原因,对转矩波动进行精确测量,是分

析电机动态性能参数的前提^[2-3]。陀螺仪电机波动力矩十分微小,因此,设计一套测量精度高、漂移小、操作便捷的微力矩测量系统具有十分重要的意义。

力矩直接测量法主要分为传递式测量法与平衡式测量法^[4]。传递式测量法将弹性元件与电机相连,通过对弹性元件形变量的测量得到被测力矩^[5-6],美国 RBG-3000 微力矩测试仪测量范围 0~7.063 mN·m,测量精度最高 1.765 μN·m^[7];天津大学精密测试技术及仪器国家

收稿日期:2020-11-26 Received Date: 2020-11-26

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB2010800)、国家自然科学基金项目(61905175,51775377,61971307)、国家科技重大专项(2017-V-0009)、霍英东教育基金会资助(171055)、中国博士后科学基金(2020M680878)项目资助

重点实验室 2016 年研制的小型力矩电机波动力矩装置^[8],量程 0~1 N·m,测量准确度为 0.3%,线性度为 0.1%。基于传递法的微力矩测量拥有较高的测量精度,但存在带宽固定、易过载损坏力矩传感器等问题,并不能适应批量检测的需求。

平衡式测量法将被测力矩加载于传动装置,通过测量平衡力矩得到被测力矩的大小。九江精密测试技术研究所 2015 年研制的瞬态微小力矩测试装置^[9],采用圆光栅与力传感器结合的平衡式测量法,灵敏度为 0.05 mN·m,测量误差优于 0.1%。国内另一研究所 2016 年研制的高精度扭矩标准装置^[10],在 0.5 mN·m~10 N·m 量程内,标定相对扩展不确定度 0.05%~0.01% ($k=2$),拥有非常高的测量精度,但天平式结构增加转动惯量,降低了响应速度,难以对力矩波动进行准确测量,且系统体积庞大,不便于搬运移动。

本文在上述研究基础上,基于平衡式测量法,研制了一套基于力矩器与角度传感器的高精度反力矩测量系统,采用共轴结构,降低系统转动惯量,同时保证仪器小巧;采用弹簧状游丝柔性连接外部接线,降低弹性干扰力矩,提高系统测量精度。

1 工作原理

本文基于平衡式测量法,力矩器与角度传感器共轴安装,微力矩通过空气静压轴承传递到角度传感器,产生角度偏移,角度传感器输出偏转角度信号,角度信号通过压控电流源转化为驱动电流,测量平衡力矩 M_0 的驱动电流 I_0 大小计算得到被测力矩 M 的大小^[11]。

1.1 角度传感器原理

八极短路匝角度传感器的工作原理^[12]如图 1 所示。

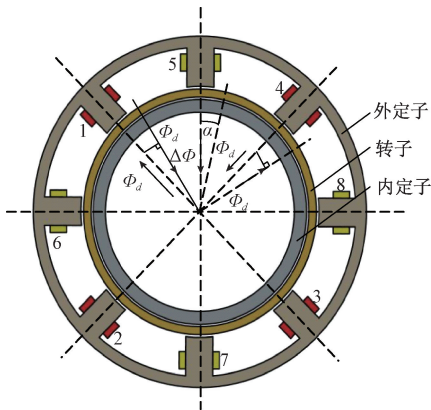


图 1 角度传感器原理

Fig. 1 Schematic diagram of angle sensor

八极短路匝角度传感器的激励线圈通入交流激励后,产生一个交变的主磁通 Φ_d ,通过高磁导率的外定子,

穿过气隙流进内定子中,在内外定子与气隙中形成 12 条闭环磁路且对称分布。位于内外定子间闭环交变磁场中的转子具有导电特性,在短路环内会形成闭环涡流,产生一个与主磁通相反的交流磁通量 Φ_d' ,阻碍主磁通的变化。

当转子离开零位旋转 α 时,转子在相邻短路环内感应电动势产生的磁通分量 $\Phi_d' \cdot \sin(\pi/4 + \alpha)$ 在输出极方向上相反,因此每个输出极的净磁通 $\Delta\Phi = (\sqrt{2}/2) \Phi_d \cdot 2\alpha$,当转角 α 角度较小时, $\Delta\Phi = \sqrt{2} \Phi_d \cdot \alpha$ 。根据电磁感应定律,得到短路匝角度传感器输出线圈感应电动势为:

$$e_2 = -4W_2 \frac{d\Delta\Phi}{dt} = -4\sqrt{2}W_2 \frac{d\Phi_d}{dt} \cdot \alpha \quad (1)$$

式中: e_2 为输出线圈内的感应电动势; W_2 为输出线圈匝数; $\Delta\Phi$ 为单个输出极内的净磁通; α 为传感器转子离开零位时旋转的角度。由式(1)可以看出,短路匝角度传感器输出线圈的感应电动势正比于转角 α ,以此实现转角 α 的测量。

1.2 力矩器原理

高精度力矩器工作原理^[13]如图 2 所示,根据永磁式力矩器工作原理,处于永磁场的线圈受到的力,与线圈电流和磁场磁感应强度成正比。

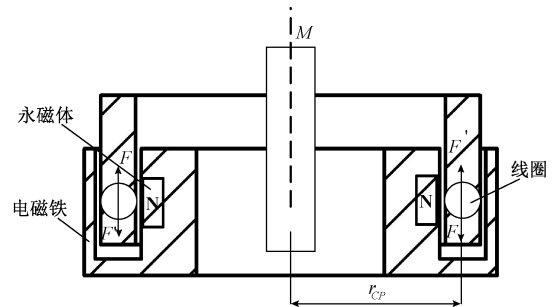


图 2 力矩器原理

Fig. 2 Schematic diagram of torquer

力矩器标度因数 K_T 为:

$$K_T = \frac{M_0}{i} = 2r_{cp}WB_\delta L\lambda_0 \quad (2)$$

由此可得,永磁式力矩器产生的输出力矩 M 为:

$$M_0 = K_T i = i \cdot 2r_{cp}WB_\delta L\lambda_0 \quad (3)$$

式中: r_{cp} 为线圈有效边至挠性支承中心的平均距离; W 为线圈匝数; B_δ 为气隙磁感应强度; L 为线圈有效边长; λ_0 为力矩器线圈圆弧系数,均为常数, i 为力矩器线圈电流,由此可得永磁力矩器输出力矩 M_0 仅与力矩器驱动电流 i 有关,且成线性关系,采用采样电阻将驱动电流 i 转化为电压信号进行读取,力矩器输出力矩 M_0 与电压 V 成线性关系。

2 系统设计

为达到陀螺仪电机微力矩高精度测量要求,同时考虑仪器外观简约、操作便捷,在设计时聚焦力矩器与角度传感器选择、机械结构设计及控制电路设计思路,高精度反力矩测量系统总体图如图3所示。

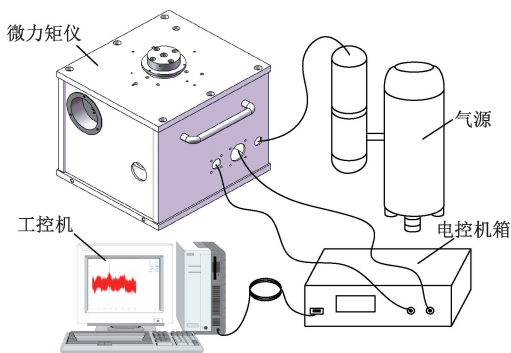


图3 测量系统总体图

Fig. 3 General drawing of measurement system

系统主要分为硬件和软件两部分,转矩波动测量过程主要依靠微力矩仪(力矩器、角度传感器、空气静压轴承^[14])、电控机箱(信号处理、驱动电路)、气源组成,实现微小力矩高精度测量;软件部分上位机完成数据显示与存储,包括数据采集、存储、显示、滤波、校准等功能。

2.1 硬件系统设计

1) 力矩器与角度传感器选择及装配分析

测量系统的测量精度取决于力矩器、角度传感器的精度,选择转矩-电流特性非线性度优于0.5%的力矩器,控制绕组输出精度 $0.2 \mu\text{N} \cdot \text{m}$,补偿绕组输出精度 $0.01 \mu\text{N} \cdot \text{m}$,在高精度的小电流驱动下产生微小准确的平衡力矩,实现系统的平衡;选择额定负载下输出灵敏度 $450 \text{ mV}/^\circ$ 的角度传感器,在角度产生微小变化时,及时将角度信号转化为电压信号,实现力矩器的驱动控制,使系统快速响应,提高测量系统精度。

力矩器与角度传感器共轴安装,采用阶梯轴结构,减小轴系半径,设计转子法兰小巧轻便,满足刚度要求下,减小质量,降低系统的转动惯量,降低控制难度,提高测量系统响应速度。

2) 弹性干扰力矩分析设计

被测机电源线会引入弹性干扰,影响系统精度及稳定性。设计弹簧状游丝柔性连接外部接线^[15],避免经验调试的盲目性与风险性,游丝安装方式如图4所示,受力图如图5所示。

弹簧力可以分解为平行于 z 轴的力 F_z 与平行于 xoy 平面的力 F_{xy} ,弹性干扰力矩为:

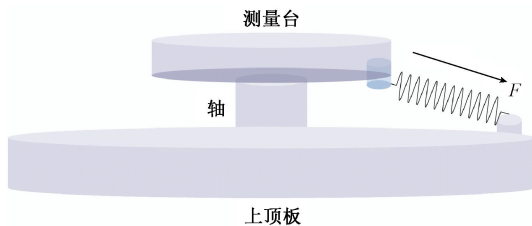


图4 弹簧状游丝示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spring type hairspring

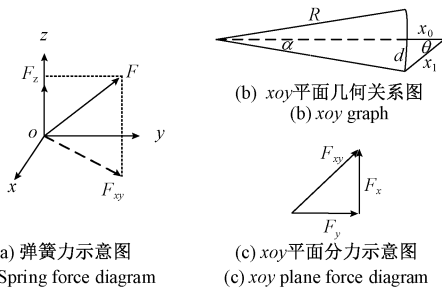


图5 弹簧力及力分解示意图

Fig. 5 Spring force and force decomposition diagram

$$H_e = \begin{bmatrix} H_{exy} \\ H_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xy} \cdot L_{xy} \\ F_z \cdot L_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

弹簧力 F 产生的弹性干扰力矩在 z 轴的力臂 $L_z=0$,只需分析 xoy 平面的分力 F_{xy} 造成的弹性干扰力矩。由图5(b)可得,测量台半径 R 远大于游丝长度 x_0 ,由于转矩波动测量系统旋转角较小,约为 $\pm 1^\circ$,因此可将弧度 αR 近似看作三角形的边长 d ,将三角形视为直角三角形,由此可得游丝转动角 θ :

$$\sin \theta = \frac{d}{\sqrt{d^2 + x_0^2}} \quad (5)$$

$$x_1 = \sqrt{d^2 + x_0^2}$$

由图5(c)可得力 F_{xy} :

$$F_{xy} = k\Delta x = k(\sqrt{d^2 + x_0^2} - x_0) \quad (6)$$

仅 x 轴方向存在力臂 R ,由此计算弹性干扰力矩 M_e 为:

$$M_e = kdR \cdot \left(1 - \frac{x_0}{\sqrt{d^2 + x_0^2}}\right) \quad (7)$$

因此,可以通过减小劲度系数 k 、减小测量台半径 R 、增加游丝长度 x_0 等方式降低弹性干扰力矩。

3) 测控电路分析

测控部分原理如图6所示,角度传感器输出与角度 α 成正比的感应电动势 e_2 ,对角度传感器进行调制解调,将电压信号从载波信号中提取出来,经过放大滤波等调理单元,将电压信号通过A/D转化单元输入单片机,力

矩器采用压控电流源控制,拥有更稳定的电流输出,采用微安级别精度的驱动电流 Δi ,使驱动电流 $i = k\Delta i$ 更精确,驱动力矩器产生平衡力矩 M_0 使角度传感器回到角度 $\alpha = 0$ 的位置,通过采样电阻采集驱动电流 i 的电压信号 V ,将电压信号 V 通过上位机软件进行采集、读取和显示^[16]。

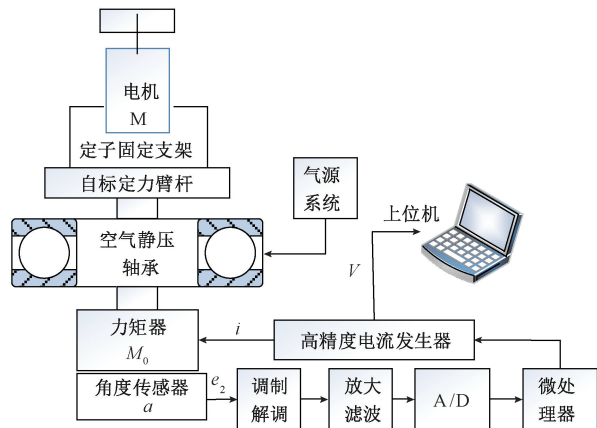


图 6 测控部分原理

Fig. 6 Schematic diagram of measurement and control part

2.2 软件系统设计

针对基于力矩器的高精度反力矩测量系统,开发一款具有数据采集、数据存储、数据读取显示、滤波、在线校准等功能的软件。系统具有数据实时显示功能,通过 RS232 接收数据后显示在绘图界面,同时用户可以进行缩放坐标轴、翻转数据、显示选择点坐标、置零、清空历史数据等操作。系统具有数据存储功能,在接收到数据后存储在文件中,用户可以自行选择文件的存储位置,其采样流程如图 7 所示,系统界面如图 8 所示。

3 系统标定实验及不确定度分析

3.1 标定实验

使用标定杆和 1、2、5、10 g 的 F1 精度砝码进行标定,砝码悬挂处力臂长 100 mm,如图 9 所示,多次测量排除随机误差对实验结果的影响。

力矩系数公式为:

$$K = \frac{V}{M} \quad (8)$$

式中: K 为力矩系数; M 为施加力矩; V 为施加力矩前后电压差值。

标定过程的力矩-电压-力矩系数数据如表 1 所示。

取均值后,得力矩系数:

$$K = 379.208 \text{ mV/mN} \cdot \text{m} \quad (9)$$

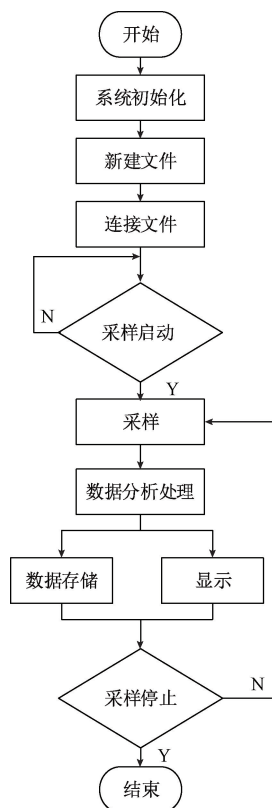


图 7 软件测量流程

Fig. 7 Chart of software measurement flow

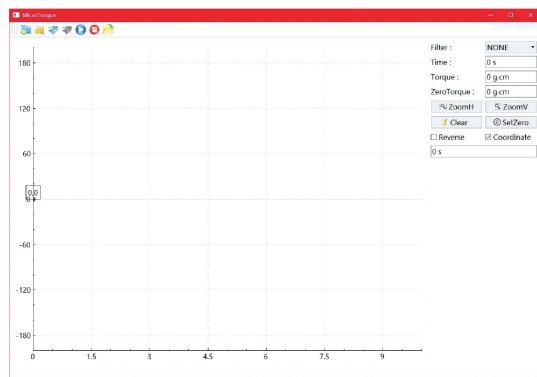


图 8 软件界面图

Fig. 8 Software interface diagram

3.2 不确定度分析

系统标定不确定度分析原理如图 10 所示。

根据力矩公式:

$$M = mgl \cdot \cos\theta \quad (10)$$

根据三角函数公式可得:

$$\sin\theta = \frac{\Delta h}{l} \quad (11)$$

因此:

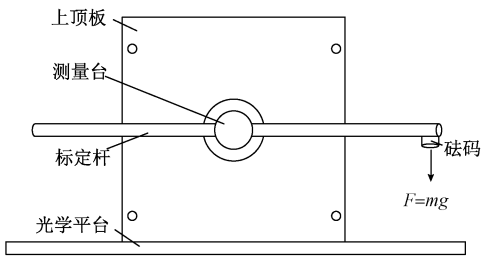


图 9 标定原理

Fig. 9 Calibration schematic diagram

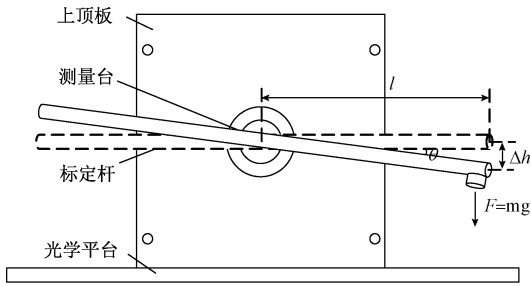


图 10 标定不确定度原理

Fig. 10 Schematic diagram of calibration uncertainty

表 1 力矩-电压-力矩系数数据表

Table 1 Torque voltage torque coefficient data sheet

砝码质量 m/g	施加力矩 $M/(mN \cdot m)$	被测电压差 V/mV	力矩系数/ $mV \cdot (mN \cdot m)^{-1}$
1	0.980 11	371.9	379.447 2
2	1.960 22	743.4	379.243 1
3	2.940 33	1 115.1	379.243 1
4	3.920 44	1 486.4	379.141 1
5	4.900 55	1 858.8	379.304 4
6	5.880 66	2 229.6	379.141 1
7	6.860 77	2 600.3	379.009 9
8	7.840 88	2 972.3	379.077 3
9	8.820 99	3 344.2	379.118 4
10	9.80 11	3 718.1	379.355 4

$$\cos\theta = \frac{\sqrt{l^2 - \Delta h^2}}{l} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)得:

$$M = mg \cdot \sqrt{l^2 - \Delta h^2} \quad (13)$$

根据图 10 标定不确定度分析原理和式(13),可以得到决定力矩的因素^[17-18]: m 为 F1 精度砝码(0.001 kg); g 为天津地区重力加速度(9.801 1 m/s²); l 为标定杆悬挂砝码处到圆心距离($l=100$ mm); Δh 为高度差,由千分表测量得到($\Delta h=0.412$ mm)。

根据式(13),各输入量 m 、 g 、 l 、 Δh 之间互不相关^[19]:

$$u_c^2 = \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (14)$$

$$u_c^2 = c_1^2 u^2(m) + c_2^2 u^2(g) + c_3^2 u^2(l) + c_4^2 u^2(\Delta h) \quad (15)$$

其中:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{\partial M}{\partial m} = g \sqrt{l^2 - \Delta h^2} = 980.102 \\ c_2 = \frac{\partial M}{\partial g} = m \sqrt{l^2 - \Delta h^2} = 9.999\ 9 \times 10^{-2} \\ c_3 = \frac{\partial M}{\partial l} = \frac{mgl}{\sqrt{l^2 - \Delta h^2}} = 9.801\ 2 \times 10^{-3} \\ c_4 = \frac{\partial M}{\partial \Delta h} = \frac{-mg\Delta h}{\sqrt{l^2 - \Delta h^2}} = -4.038 \times 10^{-5} \end{cases} \quad (16)$$

1) 质量不确定度

质量不确定度 $u(m)$,质量误差由 F1 砝码的检定证书给出,F1 0.001 kg 砝码包含因子 $k=2$ 给出的扩展不确定度 $U=2 \times 10^{-7}$,其标准不确定度为:

$$u(m) = \frac{U}{k} = 1 \times 10^{-7} \text{ kg} \quad (17)$$

2) 重力加速度不确定度

重力加速度 $u(g)$,天津地区重力加速度为 9.801 1 m/s²,测量不确定度 $u(g)=5 \times 10^{-7}$ 。

3) 长度不确定度

长度不确定度 $u(l)$,被测标定杆悬挂砝码处到圆心标称距离为 100 mm。设计标定杆结构,使加工对刀时的定位误差可以减小为 $\pm 10 \mu\text{m}$,以矩形分布估计,得到定位误差:

$$u_1(l) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 5.77 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (18)$$

安装标定杆时圆心同轴度引入误差为 $\pm 10 \mu\text{m}$,以矩形分布估计:

$$u_2(l) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 5.77 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (19)$$

合成标准不确定度:

$$u(l) = \sqrt{2 \times 0.005\ 77^2} = 8.16 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (20)$$

4) 高度差不确定度

高度差 $u(\Delta h)$, $u(\Delta h)$ 由测量重复性或千分表分辨力 $u_1(\Delta h)$,千分表允许误差 $u_2(\Delta h)$,光学平台平面度 $u_3(\Delta h)$,量块的测量不确定度 $u_4(\Delta h)$ 引入。

测量重复性引入的不确定度采用 A 类方法评定,正常工作下,测量 10 次,高度差 Δh 为 0.412、0.415、0.413、0.409、0.418、0.409、0.412、0.413、0.408、0.411 mm。

由贝塞尔公式计算得到单次测量实验标准差:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta h - \bar{\Delta h})^2}{n-1}} = 3.02 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (21)$$

则 $u_{11}(\Delta h) = s = 3.02 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。

千分表分辨力引入的标准不确定度采用 B 类不确定度评定方法,分辨力 0.001 mm,半宽 0.000 5 mm,以矩形分布估计,测量时取两次读数差值:

$$u_{12}(\Delta h) = \sqrt{2} \times \frac{0.000\ 5}{\sqrt{3}} = 4.08 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (22)$$

根据 JJF 1033-2008 计量校准考核规范 C. 1.4 中当重复性引入不确定度比仪器分辨力所引入不确定度分量大时,可以忽略分辨力引入不确定度分量:

$$u_1(\Delta h) = u_{11}(\Delta h) = 3.02 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (23)$$

千分表满量程最大允许误差为 $\pm 0.003 \text{ mm}$,以矩形分布估计:

$$u_2(\Delta h) = \frac{0.003}{\sqrt{3}} = 1.73 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (24)$$

光学平台平面度引入误差 $u_3(\Delta h)$,光学平台在 600 mm×600 mm 的工作面内平面度小于 0.05 mm,取半宽 0.025 mm,以矩形分布估计:

$$u_3(\Delta h) = \frac{0.025}{\sqrt{3}} = 1.44 \times 10^{-2} \text{ mm} \quad (25)$$

量块的不确定度 $u_4(\Delta h)$,采用 3 等量块^[20],由 100 mm 量块的检定证书可得,在包含因子 $k = 2.6$ 条件下,扩展不确定度 $U = 0.000\ 2$,其标准不确定度为:

$$u_4(\Delta h) = \frac{0.000\ 2}{2.6} = 7.7 \times 10^{-5} \text{ mm} \quad (26)$$

以上合成可得高度差 $u(\Delta h)$:

$$u(\Delta h) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 u_i^2(\Delta h)} = 0.014\ 8 \text{ mm} \quad (27)$$

5) 合成标准不确定度

各输入量之间不存在任何值得考虑的相关性,根据式(10)可得合成标准不确定度:

$$u_c(M) = 1.265 \times 10^{-4} \text{ mN} \cdot \text{m} \quad (28)$$

6) 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$,扩展不确定度得:

$$U(M) = k \cdot u_c(M) = 2.53 \times 10^{-4} \text{ mN} \cdot \text{m} \quad (29)$$

7) 测量不确定度报告

力矩 $M = (0.980\ 11 \pm 0.000\ 25) \text{ mN} \cdot \text{m}$ 。其中扩展不确定度 $U = 0.000\ 25 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 是由标准不确定度 $u_c(M) = 1.265 \times 10^{-4} \text{ mN} \cdot \text{m}$ 乘以包含因子 $k = 2$ 得到。

4 性能测试实验

4.1 测量精度测试

测量实验如图 11 所示,将仪器水平放置,在转矩波动测试验证系统测量台上安装标定杆,在标定杆上悬挂测量盘,将软件置零。向测量盘内放置高精度砝码,读取软件上相关力矩数据。对测量系统进行重复实验,数据如图 12 所示。

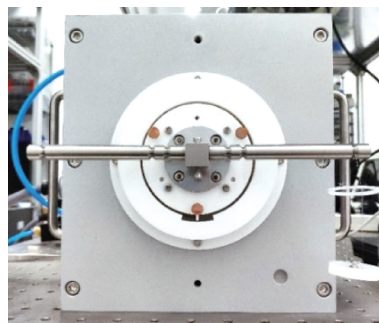


图 11 力矩测量实验

Fig. 11 Experimental diagram of moment measurement

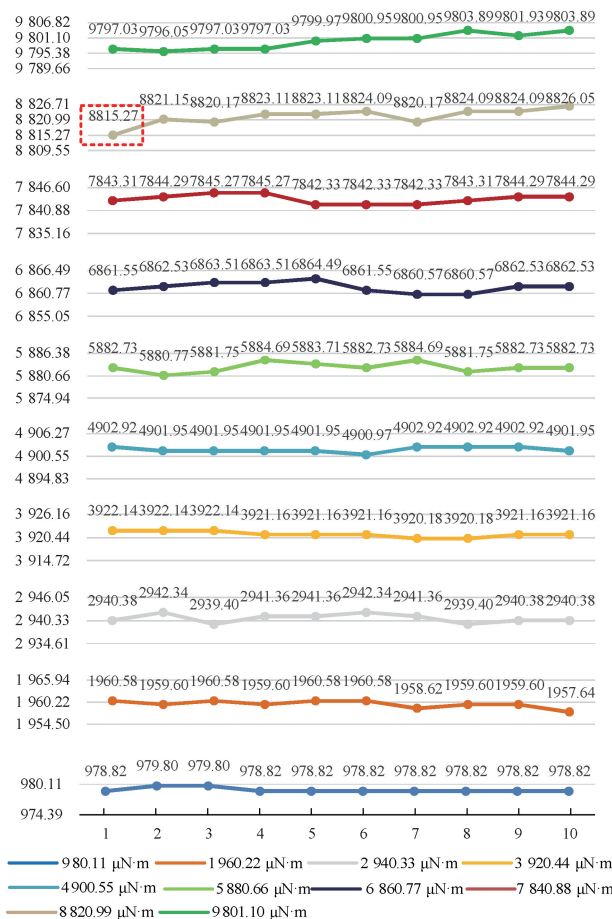


图 12 测量实验结果

Fig. 12 The experimental data were measured

根据测量结果,可得装置的测量精度:

$$\delta_A = \pm \frac{\Delta_{Amax}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (30)$$

式中: Δ_{Amax} 为最大测量绝对误差, Y_{FS} 为满量程力矩值。计算可得,测量系统的测量精度为 0.057%。

分别计算各个测量点的测量平均值,使用最小二乘法进行线性拟合,测量数据如表 2 所示。

表 2 力矩测量数据表

Table 2 Torque measurement data sheet

砝码质量 m/g	施加力矩 $M/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$	测量力矩 $\overline{M}_0/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$
1	980.11	979.02
2	1 960.22	1 959.70
3	2 940.33	2 940.87
4	3 920.44	3 921.26
5	4 900.55	4 902.24
6	5 880.66	5 882.82
7	6 860.77	6 862.33
8	7 840.88	7 843.70
9	8 820.99	8 822.13
10	9 801.10	9 799.87

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta_{L_{\max}}}{Y_{FS}} \times 100\%$$
 (31)

式中: $\Delta_{L_{\max}}$ 为最大偏差值。计算可得测量系统的线性度为 0.028%。

4.2 系统漂移误差测试

基于力矩器的高精度反力矩测量系统采样率为 500 Hz,取连续 10 个数据的平均值,绘制拟合曲线,如图 13 所示。

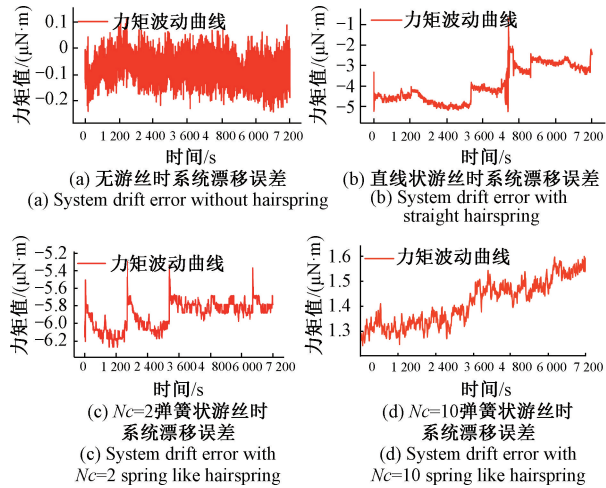


图 13 不同外部接线方式系统漂移误差

Fig. 13 System drift test chart of different wiring methods

对不同外部接线方式进行系统漂移误差测试,由图可得弹簧状游丝对于减小外部接线引入的弹性干扰力矩具有重要作用,测量系统两小时内漂移约为 $0.3 \mu\text{N}\cdot\text{m}$,在测量过程中不会对高精度测量产生较大影响。 N_c 为弹簧有效匝数。

4.3 量程测试

测量系统现场实验图如图 14 所示,在精度测试时,在标定杆两端分别悬挂 11 g 砝码,系统测量力矩为

-10.78 和 $10.79 \text{ mN}\cdot\text{m}$,经过实际测试,系统测量动态范围可以达到 $10 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 。

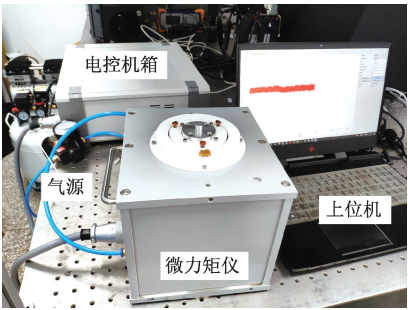


图 14 测量系统现场实验图

Fig. 14 Field experiment diagram of measurement system

4.4 轴系转动惯量与响应速度测试

在实验时发现,对测量系统施加大小相当的力矩,当轴系转动惯量约为 $2\,000 \text{ g}\cdot\text{cm}^2$ 大转动惯量时,如图 15(a)所示,测量系统的响应速度大约为 1.75 s ,恢复稳定状态时间较长,且振荡控制调节较为困难;而当轴系转动惯量为 $315 \text{ g}\cdot\text{cm}^2$ 小转动惯量时,如图 15(b)所示,测量系统响应速度约为 0.4 s ,能快速恢复稳定状态。

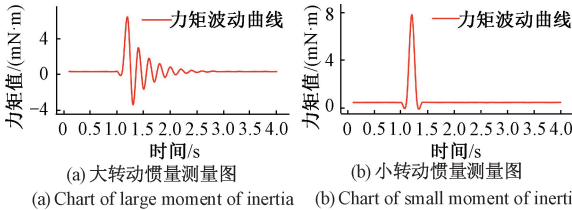


图 15 转动惯量对测量系统影响实验图

Fig. 15 Experimental diagram of the influence of the moment of inertia on the measurement system

转动惯量越大,测量系统对转矩波动的响应速度会越慢,难以对转矩波动进行快速准确的响应,因此在满足刚度的条件下控制轴系转动惯量,可以提高测量系统响应速度,对转矩波动进行快速响应。

5 结 论

本文研制了一套基于力矩器与角度传感器的高精度反力矩测量系统,并对测量系统进行了标定和不确定度分析。利用力矩器与角度传感器共轴安装方式进行转矩波动测量,通过上位机软件完成数据采集、存储等功能。基于共轴传递的阶梯轴结构降低了系统转动惯量,采用了弹簧状游丝柔性连接外部接线,减小了弹性干扰力矩,提高系统测量精度,并定性分析了轴系转动惯量与系统响应速度关系。实验结果表明,与优化前相比,系统测量精度提高了 90%,该测量系统在 $-10 \sim 10 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 的量程,

测量精度达到0.06%,线性度优于0.03%,漂移误差优于0.5 $\mu\text{N}\cdot\text{m}/2\text{ h}$,系统标定过程不确定度优于0.025%。系统具有精度高、漂移误差小、操作便捷等优点,在陀螺仪电机的批量检测中有较强的应用性。

参考文献

- [1] 马本富. 液浮陀螺仪用磁滞电动机的设计[D]. 天津: 天津大学, 2017.
MA B F. The design of hysteresis motor used for a type of floated gyroscope [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [2] 夏鲲, 徐梦晗, 毕超. 电机转矩波动测量方法综述[J]. 电子测量技术, 2018, 41(5): 87-94.
XIA K, XU M H, BI CH. Overview of torque ripple measuring methods for motors [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(5): 87-94.
- [3] ISLAM R, HUSAIN I. Analytical model for predicting noise and vibration in permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(6): 2346-2354.
- [4] 王岩, 储江伟. 扭矩测量方法现状及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2010, 38(11): 14-18.
WANG Y, CHU J W. Current status and development trend of torque measuring methods [J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2010, 38(11): 14-18.
- [5] 李志鹏, 王博男, 孟旭, 等. 电磁式扭矩传感器原理、研究现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 1-14.
LI ZH P, WANG B N, MENG X, et al. Principle, study status and development trend of the electromagnetic torque sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 1-14.
- [6] 谢锐, 马铁华, 张红艳. 传动轴扭矩无电池实时测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 47-54.
XIE R, MA T H, ZHANG H Y. Real-time measurement method for drive shaft torque without battery[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 47-54.
- [7] 王洋洋. 伺服机构微小力矩测试系统的研究与开发[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
WANG Y Y. Research and development of the miniature torque test system for the servo mechanism[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [8] 王向军, 王晓青. 小型力矩电机波动力矩的测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1359-1364.
WANG X J, WANG X Q. Measurement of torque ripples for small torque motors [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(6): 1359-1364.
- [9] 九江精密测试技术研究所. 一种瞬态微小力矩测试装置: 201521054101.3[P]. 2016-09-14.
Jiujiang Institute of precision testing technology. A transient micro torque measuring device: 201521054101.3[P]. 2016-09-14.
- [10] 林静, 戴明, 林杰俊, 等. 0.5mN·m~10N·m 高精度扭矩标准装置的研制[J]. 船舶工程, 2016, 38(9): 75-78.
LIN J, DAI M, LIN J J, et al. Research and manufacture of 0.5 mN·m~10 N·m high precision torque standard machine[J]. Ship Engineering, 2016, 38(9): 75-78.
- [11] 孔令波, 陈茂胜, 曲云昭, 等. 商用卫星姿控反作用飞轮控制系统设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 167-172.
KONG L B, CHEN M SH, QU Y ZH, et al. Design and realization of commercial satellite attitude control reaction flywheel control system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(12): 167-172.
- [12] 陈宗玉, 李醒飞, 董九志. 短路匝式角度传感器不同极数下输出特性对比分析[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(1): 115-121.
CHEN Z Y, LI X F, DONG J ZH. Analysis on the output characteristics of shorted-turn angular transducer for the different polos [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(1): 115-121.
- [13] 许丹, 陈云霞, 梁媛, 等. 陀螺力矩器标度因数变化模型及稳定性研究[J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1319-1325.
XU D, CHEN Y X, LIANG Y, et al. Research of gyro torque scale factor variation model and its stability[J]. Acta Aeronautica and Astronautica Sinica, 2013, 34(6): 1319-1325.
- [14] 王福全, 周智勇, 张军, 等. 精密气浮转台励磁电流矢量控制[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 66-73.
WANG F Q, ZHOU ZH Y, ZHANG J, et al. Vector control of excitation current for precision air flotation turntable[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 66-73.
- [15] 王春生, 宁汝新, 刘检华, 等. 导引头稳定平台弹性干扰力矩分析与优化技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(3): 566-574.
WANG CH SH, NING R X, LIU J H, et al. Analysis and optimization technology of spring disturbance torque on stabilized platform [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(3): 566-574.
- [16] 刘兴富. 高精度卫星气浮仿真转台微小干扰力矩分析与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

- LIU X F. Research and experiment on high precision and micro torque airbearing turntable of micro satellite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [17] 梁伟, 韦铁平, 杨晓翔, 等. 超大量程力传递系统不确定度评定研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 35-42.
- LIANG W, WEI T P, YANG X X, et al. Study on uncertainty evaluation of force transfer system with a super-large range [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 35-42.
- [18] 褚进华, 唐修雄, 矫健, 等. 能见度仪校准系统的不确定度评定分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2): 180-187.
- CHU J H, TANG X X, JIAO J, et al. Uncertainty analysis of the calibration system of visibility meter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(2): 180-187.
- [19] 何改云, 黄鑫, 郭龙真. 自由曲面轮廓度误差评定及不确定度分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 395-401.
- HE G Y, HUANG X, GUO L ZH. Evaluation of free-form surface profile error and analysis of uncertainty [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(3): 395-401.

- [20] 龚俊庆. 对正弦规检定规程技术分析及不确定度评定[J]. 工业计量, 2019, 29(3): 50-52.
- GONG J Q. Technical analysis and uncertainty evaluation of verification regulation of sine gauge [J]. Industrial Metrology, 2019, 29(3): 50-52.

作者简介



谢琛, 2018 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究领域为电机的微小力矩测量。

E-mail: xiechen960121@tju.edu.cn

Xie Chen received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Tianjin University. His main research interest includes the measurement of micro torque of motor.



傅晓(通信作者), 2013 年于天津大学获得学士学位, 2018 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为光电测量与光谱分析。

E-mail: fuxiao215@tju.edu.cn

Fu Xiao (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degree both from Tianjin University in 2013 and 2018, respectively. Now he is a lecturer and M. Sc. supervisor at Tianjin University. His main research interests include photoelectric measurement and spectral analysis.