

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306632

闭环控制下单丝扭摆微牛级推力测量系统*

王嘉彬^{1,2,3,4,5} 龙建飞^{1,2,3,4,5} 徐禄祥^{1,2,3,4,5} 吴铭钊^{1,2,3,4,5} 郭宁¹ 杨威⁶

(1. 国科大杭州高等研究院基础物理与数学科学学院 杭州 310024; 2. 中国科学院国家空间科学中心 北京 100190;
3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 国科大杭州高等研究院引力波太极实验室(杭州) 杭州 310024;
5. 国科大杭州高等研究院浙江省引力波精密测量重点实验室 杭州 310024; 6. 重庆科技学院电气工程学院 重庆 401331)

摘 要:针对空间引力波探测任务对微推力测量需求,开发出一套基于闭环控制的单丝扭摆微牛级推力测量系统。基于扭摆式微推力测量原理,给出了微推力测量装置详细设计方案,重点分析了扭丝结构、角位移测量、电磁标定力以及闭环控制系统,通过实验测量对该微推力测量装置进行标定,最后开展误差分析。测试结果表明,开环状态下扭丝刚度约为 $0.003\ 25\ \text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$,与理论值误差约 4.0%;闭环状态下推力测量范围 $0.1\sim246.0\ \mu\text{N}$,最小分辨率优于 $0.1\ \mu\text{N}$,相对不确定误差为 1.174%,满足对微推力器推力测量范围、分辨率和精度的测量要求。

关键词:微牛;电磁力标定;系统参数标定;仿真模拟;微推力测量

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

Single wire torsion pendulum micro-newton thrust measurement system in closed loop control

Wang Jiabin^{1,2,3,4,5} Long Jianfei^{1,2,3,4,5} Xu Luxiang^{1,2,3,4,5} Wu Mingshan^{1,2,3,4,5} Guo Ning¹ Yang Wei⁶

(1. School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China; 2. National Space Science Centre, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Gravitational Wave Universe Taiji Laboratory, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China; 5. Key Laboratory of Gravitational Wave Precision Measurement of Zhejiang Province, UCAS, Hangzhou 310024, China; 6. School of Electrical Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: In response to the micro-newton thrust measurement requirements for space gravitational wave detection missions, a single-wire torsion micro-newton thrust measurement system based on closed-loop control has been developed. Based on the principle of torsional pendulum micro-newton thrust measurement, the detailed design scheme of the micro-newton thrust measurement device is given, and the twisted wire structure, angular displacement measurement, electromagnetic calibration force, and closed-loop control system are mainly analyzed. The micro-newton thrust measuring device is calibrated through experimental measurement, and finally the error analysis is carried out. The test results show that the torsion wire stiffness is about $0.003\ 25\ \text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ in the open-loop state, and the error with the theoretical value is about 4.0%; the thrust measurement range in the closed-loop state is $0.1\sim246.0\ \mu\text{N}$, and the minimum resolution is better than $0.1\ \mu\text{N}$, which is relatively uncertainty error is 1.174%, which meets the measurement requirements for the thrust measurement range, resolution and accuracy of micro thrusters.

Keywords: micro-Newton; electromagnetic force calibration; system parameter calibration; simulation; micro-thrust measurement

收稿日期: 2023-04-04 Received Date: 2023-04-04

* 基金项目:国家重点研发计划(2021YFC2202700)、国科大杭州高等研究院自主项目(2022ZZ01009)、重庆市教委科学技术研项目(KJZD-K202101506)、湖南省自然科学基金(2021JJ30564)项目资助

0 引言

我国正在开展“太极计划”和“天琴计划”等空间引力波探测项目^[1-2],其中微推力器作为无拖曳控制技术的推力补偿执行机构,需具备提供高精度、低噪声、微牛级推力的能力。因此,如何实现微推力器推力精准测量对空间引力波探测具有重要意义。

扭摆式微推力测量方法作为一种典型的微推力测量技术已获得广泛应用,其基本原理是利用微推力作用于平衡扭摆使其在水平方向产生扭转,通过标定平衡扭摆扭转角度与扭转力矩之间的关系,结合扭转角度测量换算得到微推力的大小。测试过程中,由于微推力与重力方向相互垂直,可以有效地分离推力器等负载重力带来的影响,具有刚度小、灵敏度高的显著特点,且信噪比和量程可通过平衡扭摆长度进行调节。扭摆式微推力测量装置主要有悬丝扭摆^[3-5]与枢轴扭摆^[6-13]两种结构,相比之下,枢轴扭摆结构只有一个敏感自由度,且灵敏度低于悬丝。

国内外研究人员针对悬丝扭摆式微推力测量技术开展了大量的研究。1999 年美国 Phipps 等^[8]设计了一套双丝扭摆结构微推力测量装置,该装置采用两根直径为 $78\text{ }\mu\text{m}$ 、长度为 10 cm 的二氧化硅作为扭丝,推力器安装在平衡扭摆一端,另一端采用配重保持平衡,通过光杠杆法测量平衡扭摆偏转的角位移,从而换算出微推力大小。2000 年美国 Boccaletto 等^[9]进一步改进了双丝扭摆型微推力测量装置,采用 0.1 mm 的钨丝作为扭丝并设计了专用夹紧结构,该测试系统主要性能:惯性矩为 $2.705 \times 10^2\text{ kg} \cdot \text{m}^2$,扭力常数为 $1.503 \times 10^{-6}\text{ Nm/rad}$,灵敏度 $0.166\text{ rad}/\mu\text{N}$ 。2005 年中国人民解放军装备学院洪延姬等^[10]开展了双丝扭摆式微推力测量装置研究,并提出一种全新高精度的冲量计算数学模型,解决了冲量在 $10^{-6} \sim 10^{-4}\text{ N} \cdot \text{s}$ (微冲量)范围的推力器冲量测试问题。2012 年哈尔滨工业大学宁中喜等^[11]提出了三丝扭摆式微推力测量系统,采用扭矩平衡和光杠杆放大原理,将推力器的微小推力转换成激光光斑的大位移进行测量,利用砝码进行标定,该测量装置在推力为 $50 \sim 110\text{ mN}$ 范围内时最小测量误差为 1.5% 。2017 年西北工业大学杨涓等^[12]进一步采用三丝扭摆微推力测量方法对微波推力器独立开展推力测量实验,同时分析三丝扭摆推力测量装置的数理模型并实验测定其不确定度,测试结果表明,该装置能测出低于 3 mN 的推力,但其相对不确定度为 14% ;2018 年中科院力学所马隆飞等^[13]开展了双丝扭摆微推力测量装置研制,得到其推力测量范围为 $1 \sim 200\text{ }\mu\text{N}$,分辨力为 $0.4\text{ }\mu\text{N}$,相对不确定度为 1.1% 。大量研究表明^[14-19],悬丝扭摆式微推力测量装置在灵敏度、分

辨率等方面具有一定优势,然而也存在悬丝等弹性元件扭转刚度系数变化、以及零点漂移等问题。高灵敏度和高稳定性仍是悬丝扭摆式微推力测量技术研究的热点与难点。以往研究中多是以开环测量为主,而针对闭环控制的微推力测量技术研究相对较少。

针对空间引力波探测任务,研究团队正在开展微霍尔电推进和微推力测量技术研究。研究团队开发出一套基于闭环控制下单丝扭摆式微推力测量装置,在保留单丝高灵敏度的同时,采用闭环控制减少悬丝扭转刚度系数变化带来影响,结合高精度电磁标定力^[20],对该测量装置的测试范围、分辨率进行标定,并进行误差分析,以期服务于微推力器优化与性能评价。

1 微牛级推力测量系统

1.1 推力测量原理

基于闭环控制的单丝扭摆式微推力测量装置示意图如图 1 所示。平衡扭摆通过扭丝悬挂于某一固定端,微牛推力器与电磁标定力装置分别固定于平衡扭摆两端,通过配重砝码设计进行平衡扭摆调平。采用高精度激光测距仪对平衡扭摆水平转向距离进行实时测量,并将测量数据传输给 PID 控制器,同时 PID 控制器控制微安电源输出不同电流值致使电磁标准力产生补偿力,以实现平衡扭摆的闭环控制。

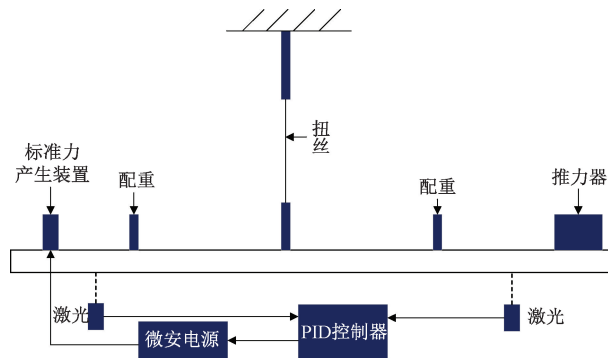


图 1 推力测量原理

Fig. 1 Thrust measuring principle

开环工作状态下,即电磁标定力不工作,当微推力器产生推力时,平衡扭摆在水平面内绕着悬丝产生偏转,悬丝发生周向剪切形变产生阻力,最终扭摆平衡于某一位置。此时微牛推力器产生的力矩与钨丝扭转所产生的力矩相等。通过动量定理可知扭摆的转动方程^[21]为:

$$J\ddot{\theta} + \lambda\dot{\theta} + K_f\theta = FL \quad (1)$$

其中, J 为扭摆系统的转动惯量, θ 为扭摆扭转角度, λ 为扭摆阻尼因子, K_f 为扭丝扭转弹性系数, F 为微牛推力器产生的作用在扭摆上的推力, L 为推力器与扭

丝中心的水平距离。

本方案中为静态推力测量,因此,平衡状态下 $\ddot{\theta}$ 和 $\dot{\theta}$ 均为 0。即进一步得到待测微推力满足如下公式:

$$F = \frac{K_f}{L} \theta \quad (2)$$

当扭丝的材质和结构等参数确定后, K_f 的值即可确定。因此,待测微推力 F 与角位移改变量 θ 成线性关系。最终通过测量扭转角度,结合扭转弹性系数,即可获得开环下待测推力大小。

由于悬丝扭转弹性系数与扭转角度存在一定非线性,同时回滞时会产生零点漂移等问题,使得开环状态下微推力测量精度难以提高。而采用闭环控制时,使用已知标定力去等效待测推力,控制平衡扭摆始终处于初始平衡位置,扭丝不会产生扭转形变,从而解决了开环状态

下结构非线性和零点漂移问题。

闭环控制下微推力测量步骤如下:平衡扭摆处于初始平衡位置时,激光测距系统此时测得一个初始的位置值,记为 D_1 ;当推力器产生微推力 F_1 时,会带动平衡扭摆转动偏离初始位置,激光测距系统将测得新的位置值,记为 D_2 。将两次位移值传入至 PID 控制系统中,通过整定计算调节微安电源输出的电流值,以控制电磁力产生装置产生一个与微推力方向相反的补偿力 F_2 ,并将扭摆重新置于初始的 D_1 位置。此时待测推力 F_1 和补偿力 F_2 满足力矩平衡关系。

1.2 推力测量结构设计

基于闭环控制的单丝扭秤微推力测量装置主要结构包括固定支架、扭丝、平衡扭摆、配重、磁阻尼装置、电磁力产生装置、激光测距组件,如图 2 所示。

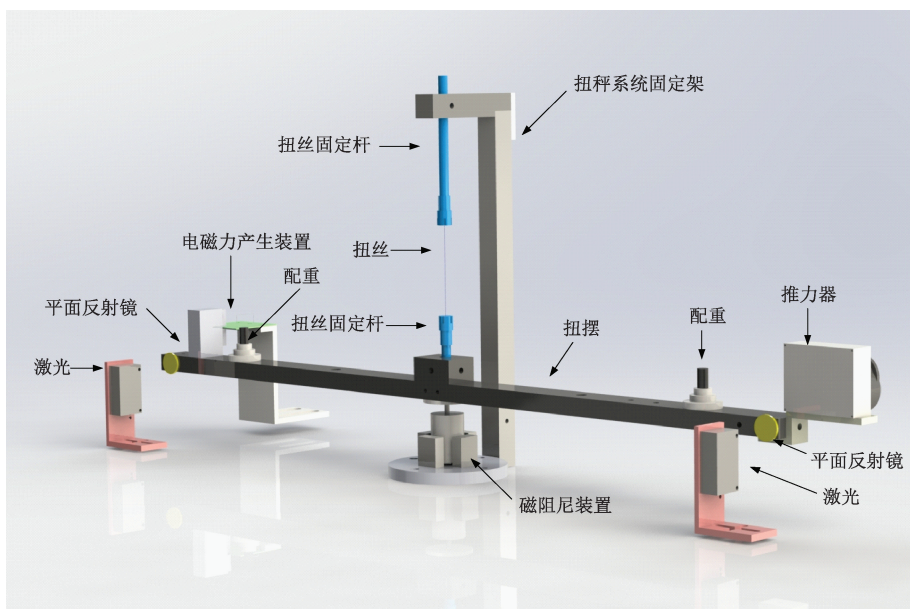


图2 扭摆测量系统

Fig.2 Monofilament torsion balance system

针对该测量装置中重要参数设计做进一步阐述。

1) 扭丝参数设计

在悬丝扭摆式微推力测量装置中,扭丝既要负责悬挂承重,又作为将推力转化为单自由度线性转移的弹性元件。根据广义胡克定律可知,扭丝直径越小,则其弹性系数越小,测量系统的灵敏度越高,但其承载能力变弱。

扭丝的扭转弹性系数 K_f 和承载力 F_s 的计算公式^[11]如下:

$$K_f = \frac{\pi R^4 G}{2l} \quad (3)$$

$$F_s = \pi \sigma_s R^2 \quad (4)$$

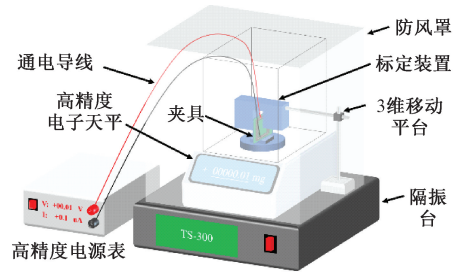
式中: R 为扭丝半径, G 为剪切弹性模量, l 为扭丝长度, σ_s 为扭丝的拉伸屈服强度。

综合考虑待测推力范围和承载重量,扭丝选用直径 0.32 mm、长度为 150 mm 的钨丝,结合高纯钨丝结构参数 G 为 1.57×10^{11} Pa,可以计算出扭丝理论扭转弹性系数 K_f 为 1.0769×10^{-3} N·m,最大承载力 F_s 为 13.6 kg。

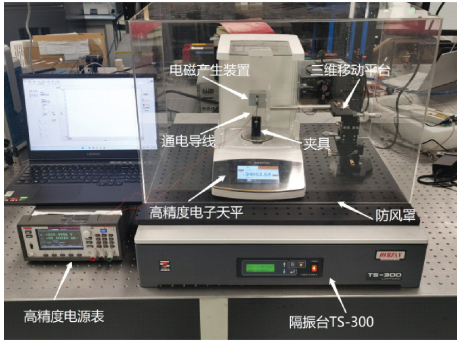
2) 角位移测量

角位移测量原理如图 3 所示。采用两路高精度激光位移传感器对平衡扭摆进行动态测量,结合差动法进行计算,从而精确测量平衡扭摆相对扭转角度,以提高测量装置精度。

t_0 为平衡扭摆初始位置, t_1 为扭转后平衡位置,包括绕 z 轴转动和沿 y 向平动。两路激光分别置于平衡扭摆两侧,与悬丝水平距离分别为 x_1 和 x_2 ,测量位移值分别为 a 和 b ,则平衡扭摆的转动角度可近似表示:



(a) 标定装置原理图
(a) Schematic diagram of experimental device



(b) 标定装置实物图
(b) Physical drawing of experimental device

图6 电磁弱力标定装置

Fig.6 Electromagnetic weak force calibration device

量5次,以平均值为测试结果,最大差值为误差棒。实验测试结果与仿真结果如表1所示。

基于测试数据对电磁力与电流值线性度分析,得到电磁力拟合公式:

$$F_{EM} = 11.885\,68 \times I + 0.060\,12 \tag{6}$$

故该拟合公式的拟合曲线斜率约为11.886,拟合的决定系数为0.99999,测试结果与仿真结果最大误差为2.29%(见图中标注),测试结果如图7所示。

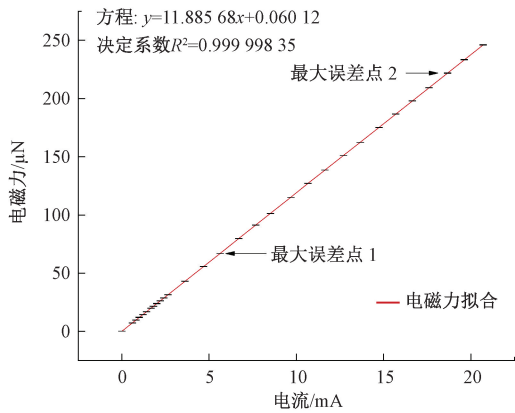


图7 校准实验电磁力拟合曲线

Fig.7 Calibration experiment electromagnetic force fitting curve

高精度电子天平的分度值为0.01mg,当电流值为

表1 实验值与仿真值

Table 1 Experimental value and simulation value

电流值/mA	电磁力实验值/μN	电磁力仿真值/μN	误差/%
0.010 0	0.097 9	0.098 6	0.68
0.600 0	7.184 1	7.295 0	1.52
0.801 2	9.575 6	9.741 5	1.70
1.002 4	11.967 0	12.188 0	1.81
1.203 6	14.358 5	14.634 6	1.89
1.404 8	16.750 0	17.081 1	1.94
1.670 0	19.985 1	20.305 8	1.58
1.807 2	21.533 0	21.974 3	2.01
2.008 4	23.924 5	24.420 8	2.03
2.209 6	26.316 0	26.867 3	2.05
2.410 8	28.707 5	29.313 8	2.07
2.640 0	31.435 4	32.100 7	2.07
3.610 0	42.991 8	43.895 6	2.06
4.680 0	55.723 5	56.906 4	2.08
5.630 0	66.888 2	68.458 1	2.29
6.700 0	79.815 8	81.468 9	2.03
7.670 0	91.372 2	93.263 8	2.03
8.510 0	101.263 7	103.478 0	2.14
9.690 0	115.268 6	117.826 4	2.17
10.670 0	127.118 8	129.742 9	2.02
11.640 0	138.577 3	141.537 7	2.09
12.700 0	151.113 1	154.427 0	2.15
13.660 0	162.473 7	166.100 2	2.18
14.740 0	175.205 4	179.232 7	2.25
15.690 0	186.566 0	190.784 4	2.21
16.650 0	197.926 6	202.457 7	2.24
17.610 0	209.287 2	214.131 0	2.26
18.670 0	221.823 0	227.020 2	2.29
19.630 0	233.281 5	238.693 5	2.27
20.700 0	246.013 2	251.704 3	2.26

10 μA 时,Δm 为 0.01 mg,取 g=9.793 6 N/kg,由重力计算公式 F=mg,计算得到电磁力的大小为 0.097 9 μN,与理论值相一致,即电磁标定力实测精度为 0.097 9,优于 0.1 μN。

2.2 微推力测量装置标定实验

微推力测量装置标定实验在真空环境下进行,将该装置安装在真空舱内光学平板上,工作室真空度为 1.0×10⁻⁴ Pa。

1) 开环状态实验

平衡扭摆偏转位移测量的实时响应如图 8 所示。采用高精度激光位移传感器对平衡扭摆位移进行实时监测,开环状态下对电磁力产生装置施加不同电流值以产生相应的电磁力,在电磁力作用下平衡扭摆产生偏转振动并最终在某一位移量达到平衡。测试中电流从 3.25 mA 先逐渐增大到 6.75 mA,然后逐渐减少到 3.24 mA。平衡扭摆偏转位移则先从 1.133 15 mm 逐渐增大到 2.445 60 mm,之后逐渐回落到 1.149 33 mm。

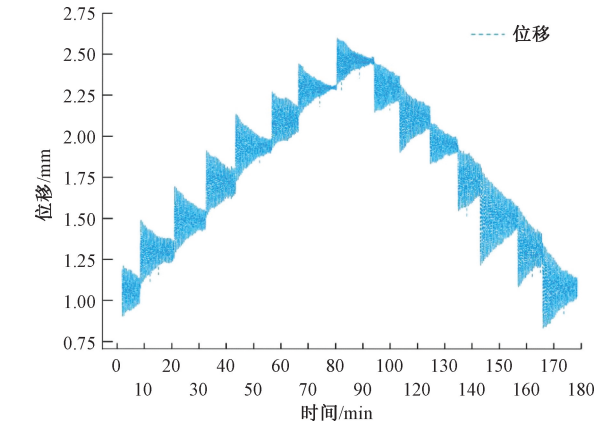


图 8 系统开环响应试验

Fig. 8 Open loop system response test

实验结果表明,微推力测量装置中扭丝与微推力具有较好的线性关系,且重复性和回滞性较好。

平衡扭摆偏转位置与电磁标定力电流的对应关系如表 2 所示。

表 2 系统开环标定响应试验
Table 2 Calibrating result of open loop system response test

I/mA	D_B/mm	I/mA	D_B/mm	I/mA	D_B/mm
3.25	1.133 15	5.68	2.114 02	5.26	1.962 19
3.78	1.361 13	6.22	2.293 16	4.74	1.765 04
4.22	1.539 35	6.75	2.445 60	4.22	1.550 34
4.74	1.756 34	6.22	2.290 26	3.78	1.342 97
5.26	1.959 14	5.68	2.122 71	3.24	1.149 33

根据电磁力的标定关系,可以得到不同电流下产生的标准力,结合表 2 中平衡扭摆偏转位移以及电磁力距离扭丝水平位置 $L_1=318\text{ mm}$,进一步可以计算出开环状态下推力与偏转角度拟合关系如下:

$$FL_1 = k\theta + b \tag{7}$$

其中, $k = 0.003\ 25\ \text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$, $b = -2.352\ 28 \times 10^{-6}\ \text{N} \cdot \text{m}$ 。即测试刚度为 $0.003\ 25\ \text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 。根据扭转弹性系数 K_f 结合式 (2) 计算出刚度理论值为 $0.003\ 386\ \text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$,两者误差约为 4.0%。

2) 闭环状态实验

推力噪声是空间引力波探测任务的重要指标,本测量系统背景噪声测试结果如图 9 所示。

在不加静电力情况下,利用 LabVIEW 持续采集系统位置信息,从而得到系统的背景噪声。从下图测试结果可以看出,系统本身的背景噪声功率谱密度在 $1\ \text{mHz} \sim 1\ \text{Hz}$ 范围优于 $0.1\ \mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

系统阶跃响应如图 10 所示。从图中可以看出,在闭环响应测试时,系统在两个振荡周期内可以实现目标位置平衡,通过对 PID 的控制参数做进一步优化,实现系统

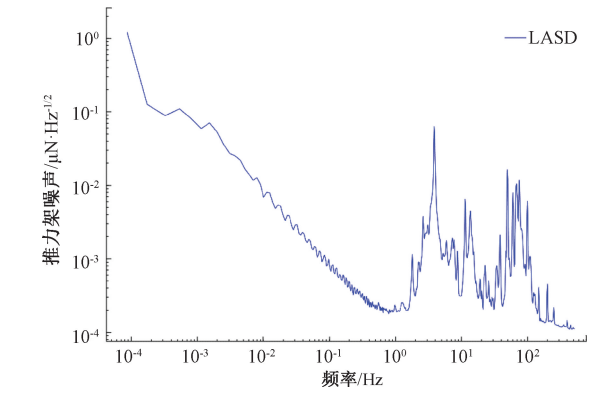


图 9 推力噪声测试

Fig. 9 Thrust noise measurement

快速响应。

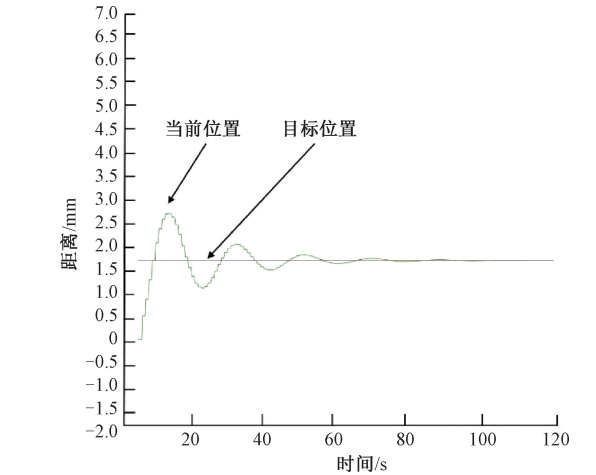


图 10 闭环推力响应测试

Fig. 10 Closed-loop thrust tuning test

推力测量范围和最小分辨率标定。根据闭环测量原理可知,待测微推力与电磁标定力的力矩相等,即:

$$F_{EM} \times L_1 = F_c \times L_2 \tag{8}$$

微推力测量装置中, L_1 为 318 mm , L_2 为 318 mm ,因此,电磁标定力等于待测标定力。电磁力标定测试结果显示:当电流值为 $10.0\ \mu\text{A} \sim 20.7\ \text{mA}$ 范围时,产生电磁力约为 $0.097\ 9\ \mu\text{N} \sim 246.013\ 2\ \mu\text{N}$,此为闭环状态下微推力测量范围。当电磁标定力电流分辨率为 $10.0\ \mu\text{A}$ 时,电磁标定力分辨率测试值 $0.097\ 9\ \mu\text{N}$,即实现了闭环状态下的最小分辨率优于 $0.1\ \mu\text{N}$ 。

3 误差分析

3.1 加工与安装误差

结构件加工精度、零件安装以及调试精度等是悬丝扭摆式微推力测量装置高精度测量的基础。因此,在设

计阶段充分考虑不同零件之间的尺寸匹配性,正负公差 of 合理选取等。零件加工精度采用 GB/T1084-m 执行,加工精度优于 $1.0\text{ }\mu\text{m}$,平衡扭摆对称性好,对测量结果影响可以忽略。采用禁钢结构方式设计扭丝夹具,防止测量过程中扭丝滑动产生误差,另外在安装前进行长期垂直处理,尽量释放夹具与扭丝之间的扭转形变误差。平衡扭摆两端配平下水平方向误差低于 0.1 mm ,电磁标定力产生装置中 PCB 板与磁极相对位置偏差小于 0.1 mm ,两台激光位移传感器固定水平度偏差小于 0.1° 。扭摆微牛级推力测量装置的优点是推力器的重力与推力有效分离,从而消除了推力器及扭摆自重对推力的影响,因此,测试过程中对竖直方向振动不敏感。安装调试后,平衡杆的水平度主要依靠配平重量加工(标准砝码)和扭丝安装精度来保证,假定平衡杆配平存在偏差,将使得推力器的臂长发生改变,满足如下公式:

$$L' = \sqrt{L^2 - \Delta H^2} \quad (9)$$

式中: L 为水平距离理论值, L' 为真实值, ΔH 为竖直高度偏差。调平后采用激光水平仪进行测验,平衡杆两端误差低于 0.1 mm ,而水平距离 L 为 318 mm 。因此,该误差项小于 0.01% ,从而进行忽略。

3.2 温度差异的影响

微推力测量过程中,推力器的热效应会影响扭丝的扭转弹性系数,从而引起测量误差。扭丝弹性系数的影响可表示为公式:

$$K(t) = K_0 [1 + \alpha_k (t - t_0)] \quad (10)$$

式中: K_0 为温度 t_0 时的扭转弹性系数, α_k 为扭转弹性系数的线性温度系数。

根据参考文献[15] 研究温度对纯钨丝热弹性效应的测试结果, α_k 约为 $(-115.6 \pm 2.0) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,因此,当测量环境升高 10°C 时,推力测量误差约为 0.12% 。推力器工作时通过底板传热等途径使得扭丝温度改变量控制在 10°C 以内,即热效应误差可以忽略。

3.3 扭丝的非线性影响

根据前面分析可知,扭丝的扭转角度与推力呈线性相关,两者之间满足如下公式:

$$\Delta\theta = \frac{4(1 + \mu)FL}{\pi R^4 E} \quad (11)$$

实际上,力矩与扭转角度之间的关系还存在关于扭转角度的高次项^[22]:

$$F \times L = k\theta + \varepsilon\theta^2 + \gamma\theta^3 + o(\theta^4) \quad (12)$$

在面对扭丝非线性效应影响,本实验闭环控制将平衡扭摆稳定在初始位置,平衡扭摆最大偏移角度控制在最小角度分辨率为 $0.305 \times 10^{-6}\text{ rad}$ 以内,即扭丝发生偏转几乎可以忽略,从而减小了扭丝非线性效应的影响。

3.4 角位移测量误差

平衡扭摆角位移测量是实施闭环控制的前提。本方

案角位移测量中,采用两路激光位移传感器实施差动法使得角度测量最小分辨率为 $0.305 \times 10^{-6}\text{ rad}$,结合扭丝刚度测量值($k = 0.003\text{ }25\text{ N} \cdot \text{m/rad}$) 识别最小微推力满足如下公式:

$$F_{\min} L = k\theta_{\min} + b \quad (13)$$

其中, L 为 318 mm ,通过计算可知,识别最小微推力仅为 $0.009\text{ }5\text{ }\mu\text{N}$,即比电磁标定力分辨率 $0.1\text{ }\mu\text{N}$ 低一个量级,因此,可以忽略角度测量误差。

此外,针对环境振动等引发平衡扭摆两端在垂直方向产生上下微扰,由于激光固定且采用点光源,射在平衡扭摆上的光斑不受影响,因此,不影响水平方向角位移测量精度。

3.5 电磁力标定误差

电磁力标定中仪器误差来源主要包括:电子天平误差、电源误差、三维移动平台位移误差。标准不确定的计算公式如下所示:

$$u_m = \frac{\Delta M}{C}, u_I = \frac{\Delta I}{C}, u_x = \frac{\Delta X}{C} \quad (14)$$

其中, C 为包含因子,取决于仪器误差的分布规律,仪器说明书无特殊说明,取矩形分布, $C = \sqrt{3}$, ΔM 、 ΔI 、 ΔX 分别为天平、源表、三维移动平台的误差限。这 3 个量互不相关,根据误差传递函数,将上述误差进行相加^[23],得到标定力测量过程中仪器产生的不确定误差公式如下:

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial m}\right)^2 \cdot \left(\frac{u_m}{\Delta m}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial I}\right)^2 \cdot \left(\frac{u_I}{\Delta I}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot \left(\frac{u_x}{\Delta x}\right)^2} \quad (15)$$

高精度电子天平的可重复性为 0.01 mg ,2280S-32-6 型电源的分辨率为 $0.1\text{ }\mu\text{A}$,三维移动平台的分辨率为 0.01 mm 。计算得相对不确定误差为 1.174% 。

4 结 论

针对空间引力波探测任务需求,本文设计了一种基于闭环控制下单丝扭摆微牛级推力测量系统。采用闭环控制,将待测微推力转换为电磁标定力,从而实现连续微推力测量。通过实验测试,得到主要结论如下:

1) 电磁标定力装置实测最小分辨率优于 $0.1\text{ }\mu\text{N}$;在电流输出范围 $10\text{ }\mu\text{A} \sim 20.7\text{ mA}$ 下,电磁力标定范围约为 $0.1\text{ }\mu\text{N} \sim 246\text{ }\mu\text{N}$,电磁力与电流值之间满足线性关系,拟合平方值 $0.999\text{ }99$;

2) 采用两路激光位移传感器进行差动法可以精确测量平衡扭摆角度,角度测量最小分辨率为 $0.305 \times 10^{-6}\text{ rad}$,具有较好的准确性。开环状态下,结合电磁标

定力实测扭丝刚度约为 $0.003\ 25\ \text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$, 与理论值误差约 4.0%;

3) 闭环状态下系统本身的背景噪声功率谱密度在 $1\ \text{mHz} \sim 1\ \text{Hz}$ 范围内优于 $0.1\ \mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$, 扭丝的固有周期约为 30 s, 系统在两个周期内可实现待测推力的整定, 具有较好的稳定性;

4) 基于闭环控制扭摆式微推力测量装置推力测量范围 $0.1 \sim 246.0\ \mu\text{N}$, 最小分辨率优于 $0.1\ \mu\text{N}$, 测量误差主要来源于电磁标定, 相对不确定误差为 1.174%。

下一阶段将针对响应周期进行优化, 并提高系统的抗干扰性, 以实现更高精度的快速测量目标。

参考文献

- [1] 罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极 1 号”在轨测试[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 3-10.
LUO Z R, ZHANG M, JIN G, et al. Introduction of Chinese space-borne gravitational wave detection program “Taiji” and “Taiji-1” satellite mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 3-10.
- [2] 刘红, 张晓峰, 冯建朝, 等. 精密热控技术在太极一号卫星上的应用[J]. 空间科学学报, 2021, 41(2): 337-341.
LIU H, ZHANG X F, FENG J CH, et al. Application of precision thermal control techniques in Taiji-1 satellite (in Chinese)[J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(2): 337-341.
- [3] 洪延姬, 周伟静, 王广宇. 微推力测量方法及其关键问题分析[J]. 航空学报, 2013, 34(10): 2287-2299.
HONG Y J, ZHOU W J, WANG G Y. Methods of micro thrust measurement and analysis of its key issues[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2013, 34(10): 2287-2299.
- [4] 洪延姬, 李德天, 冯孝辉, 等. 星载微推力器推进性能测量与评估方法[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
HONG Y J, LI D T, FENG X H, et al. Measurement and Evaluation Methods of Satellite Microthruster Propulsion Performance [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [5] 张骝鹏, 杨鑫, 裴磊, 等. 空间电推进的推力测量方法研究现状[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(3): 25-38.
ZHANG L P, YANG X, CHANG L, et al. Research of thrust measurement for space electric propulsion[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(3): 25-38.
- [6] ZHOU W J, HONG Y J, CHANG H. A micronewton thrust stand for average thrust measurement of pulsed microthruster [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(12): 125115.
- [7] 王若琳, 胡翔, 余烨, 等. 基于扭摆的落体质心与光心距离的高精度测量[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 85-92.
WANG R L, HU X, YU Y, et al. High-precision measurement of the distance between the mass center and the optical center of falling body based on the pendulum system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 85-92.
- [8] PHIPPS C, LUKE J. Diode laser-driven microthrusters: A new departure for micropropulsion[J]. AIAA Journal, 2002, 40(2): 310-318.
- [9] BOCCALETTO L, D'AGOSTINO L. Design and testing of a micro-Newton thrust stand for FEEP [C]. 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2000: 3268.
- [10] 洪延姬, 陈景鹏, 金星, 等. 激光推力器微冲量测试装置[P]. 北京: CN106507921B, 2007-08-22.
HONG Y J, CHEN J P, JIN X, et al. Laser thruster micro impulse testing device [P]. Beijing: CN106507921B, 2007-08-22.
- [11] 宁中喜, 范金葵. 三丝扭摆微推力在线测量方法及不确定度分析[J]. 测控技术, 2012, 31(5): 45-48.
NING ZH X, FAN J R. On line measurement method of three-wire torsion pendulum micro thrust and analysis of its uncertainty[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(5): 45-48.
- [12] 杨涓, 刘宪闯, 王与权, 等. 微波推力器独立系统的三丝扭摆推力测量[J]. 推进技术, 2016, 37(2): 362-371.
YANG J, LIU X CH, WANG Y Q, et al. Thrust measurement of an independent microwave thruster propulsion device with three-wire torsion pendulum thrust measurement system [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(2): 362-371.
- [13] 马隆飞, 贺建武, 薛森文, 等. 双丝扭秤微推力测量系统[J]. 推进技术, 2018, 39(4): 948-954.
MA L F, HE J W, XUE S W, et al. A microthrust measurement system with two-wire torsion balance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(4): 948-954.
- [14] 杨超, 贺建武, 章楚, 等. 基于扭摆的微冲量测量方法及实验研究[J]. 力学学报, 2022, 54(3): 669-677.
YANG CH, HE J W, ZHANG CH, et al. Micro impulse measurement method and experimental research based on torsion pendulum[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(3): 669-677.

- [15] 黎卿. 扭秤周期法测 G 实验中的系统误差研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
LI Q. Research of systematic errors in G measurement with time-of-swing method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2013.
- [16] 常浩,叶继飞,林正国. 脉冲微推力作用下的扭摆系统响应特性仿真分析[J]. 红外与激光工程,2016,45(S2):115-119.
CHANG H, YE J F, LIN ZH G. Simulation analysis of response characteristics of torsion pendulum by pulse micro-thrust [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S2):115-119.
- [17] CIARALLI S, COLETTI M, GABRIEL S B. An impulsive thrust balance for applications of micro-pulsed plasma thrusters[J]. Measurement Science and Technology, 2013,24.
- [18] SONI J, ROY S. Design and characterization of a NanoNewton resolution thrust stand [J]. Review of Scientific Instruments,2013,85: 95-103.
- [19] YANG Y X, TU L C, YANG S Q, et al. A torsion balance for impulse and thrust measurements of micro-Newton thrusters[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(1):153001.
- [20] 王大鹏,金星,周伟静,等. 高精度电磁标定力的产生及其特性分析[J]. 仪器仪表学报,2017,38(8):1933-1942.
WANG D P, JIN X, ZHOU W J, et al. Generation and characteristic analysis of high accuracy electromagnetic calibration force [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(8):1933-1942.
- [21] 金星,洪延姬,周伟静,等. 一种用于微小推力冲量测量的扭摆系统参数标定方法[J]. 推进技术,2015,36(10):1554-1559.
JIN X, HONG Y J, ZHOU W J, et al. A parameter calibration method for torsion pendulum using in micro thrust and impulse measurement [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015,36(10):1554-1559.
- [22] 莫雄. 微牛级推力测量技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2019.
MO X. Research on micro-Newton thrust measurement technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2019.
- [23] 朱春源,赵美蓉,张宏,等. 基于平行四边形机构的推力器推力测量研究[J]. 仪器仪表学报,2022,43(4):98-107.
ZHU CH Y, ZHAO M R, ZHANG H, et al. Study on thruster thrust measurement based on parallelogram mechanism[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(4):98-107.

作者简介



王嘉彬,2019 年于中国民航大学获得学士学位,现为中国科学院大学硕士研究生,主要研究方向为空间电推进技术。

E-mail: wangjiabin22@mails.ucas.ac.cn

Wang Jiabin received his B. Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2019. Now he is a M. Sc. candidate in University of Chinese Academy of Sciences. His main research interest includes space electric propulsion technology.



龙建飞(通信作者),2017 年于中国空间技术研究院获得博士学位,现为中国科学院大学高级工程师,硕士生导师,主要研究方向为空间电推进技术、等离子体技术应用等。

E-mail: longjianfei@ucas.ac.cn

Long Jianfei (Corresponding author) received his Ph. D. degree from China Academy of Space Technology in 2017. Now he is a senior engineer and master tutor at the University of Chinese Academy of Sciences. His main research interests include space electric propulsion technology, and plasma technology applications, etc.