

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508521

扭摆式微推力测量装置工作环境热噪声抑制试验研究*

吕朝源¹ 杨威¹ 龙建飞² 冯启昌¹ 杨志峰³

(1. 重庆科技大学电子与电气工程学院 重庆 401331; 2. 国科大杭州高等研究院 杭州 310024;
3. 安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司 安阳 455004)

摘要:针对空间引力波探测等重大航天任务中微推力器地面标定面临的高精度需求,以及环境温度波动引起的热噪声严重制约测量装置性能的问题,开展了热噪声抑制技术研究。基于扭摆式微推力测量原理,深入分析了扭丝刚度热弹性效应、结构热膨胀及传感器漂移等误差来源,揭示了环境热噪声对测量精度的影响机理。在此基础上,研制了一套基于现场可编程门阵列(FPGA)控制的精密环境温控系统。该系统采用外部液体循环恒温罩的硬件架构,结合自适应 Smith 模糊 PID 控制算法,为测量装置构建了一个高稳定性、抗干扰的准绝热工作环境。实验结果显示,所研制的系统性能优异,成功将核心测量区域的温度波动峰峰值抑制在 20 mK 以内;与无温控状态相比,扭丝两端的温度梯度降低至原有的 0.5%,由温度波动导致的理论测量相对误差从 0.66% 降至 0.003 7%。研究结果表明,该温控系统有效解决了环境热波动对微推力测量的干扰,提升了装置的测量精度与热稳定性,为微推力器的高精度标定提供了关键技术支撑。

关键词: 微推力测量;热噪声抑制;温度补偿;FPGA;智能控制

中图分类号: V439.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Research on thermal noise suppression of the rotating pendulum micro-thrust measurement device in working environment

Lyu Chaoyuan¹ Yang Wei¹ Long Jianfei² Feng Qichang¹ Yang Zhifeng³

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;
2. Hangzhou Institute for Advanced Study University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;
3. An Gang Group Yongtong Ductile, Iron Pipe Limited Liability Company, Anyang 455004, China)

Abstract: In response to the high-precision requirements for ground calibration of micro-thrusters in major aerospace missions such as space gravitational wave detection, and the severe limitation of thermal noise caused by environmental temperature fluctuations on the performance of measurement devices, this paper conducts research on thermal noise suppression technology. Based on the torsion pendulum micro-thrust measurement principle, a comprehensive analysis of error sources such as the thermoelastic effect of torsion wire stiffness, structural thermal expansion, and sensor drift is performed, revealing the mechanism of environmental thermal noise on measurement accuracy. On this basis, a precision environmental temperature control system based on field programmable gate array (FPGA) control is developed. This system adopts a hardware architecture of an external liquid circulation constant temperature enclosure, combined with an adaptive smith fuzzy PID control algorithm, to construct a highly stable, interference-resistant quasi-adiabatic working environment for the measurement device. Experimental results demonstrate the superior performance of the developed system, successfully suppressing the peak-to-peak temperature fluctuation in the core measurement area to within 20 mK; compared to the state without temperature control, the temperature gradient at both ends of the torsion wire is reduced to 0.5% of the original value, and the theoretical relative measurement error caused by temperature fluctuations is reduced from 0.66% to 0.003 7%. The research results indicate that this temperature control system effectively mitigates the interference of environmental thermal fluctuations on micro-

收稿日期: 2025-06-30 Received Date: 2025-06-30

* 基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目资助(KJZDK202101506)、重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2420402)、国科大杭州高等研究院自主项目(2022ZZ01009)资助

thrust measurement, enhances the measurement accuracy and thermal stability of the device, and provides critical technical support for the high-precision calibration of micro-thrusters.

Keywords: micro-thrust measurement; thermal noise suppression; temperature compensation; FPGA; intelligent control

0 引言

空间引力波探测是我国面向世界科技前沿的重大战略部署,其中“太极计划”等项目的核心目标之一是构建超稳超静的航天器平台^[1]。为实现这一目标,无拖曳控制技术利用微推力器来精确抵消太阳光压等非保守力^[2],因此,在地面高精度地标定微推力器的性能至关重要^[3]。为满足“太极计划”等任务的地面测试需求,国内外研究机构发展了多种拓扑结构的微推力测量装置^[4]。然而,无论是哪种高灵敏度的测量系统,当测量精度进入 μN 量级时,由环境温度波动引起的热噪声都已成为制约其性能的核心瓶颈^[5-6]。温度对测量系统的影响是多方面的,对于扭摆系统,其敏感核心—扭丝的弹性系数会随温度发生改变,杨山清^[7]与黎卿^[8]的研究均表明,这种由温度引起的热弹性效应是测量系统产生误差和漂移的重要来源。朱春源等^[9]研究指出环境温度 $8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 48\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围变化时,推力测量值改变量约为 $0.35\text{ }\mu\text{N}/^{\circ}\text{C}$ 。Liang 等^[10]的研究中也提及,由温度变化引起的热漂移问题同样不容忽视。此外,测量装置的结构部件会发生热胀冷缩,位移传感器等电子元器件的性能也会随温度漂移,这些因素共同构成了复杂的温度致噪声。

为解决这些问题,学者们开展了大量研究^[11]。王嘉彬等^[12-13]针对微推力测量需求,开发出一套基于闭环控制的单丝扭摆测量系统,为高精度推力测量搭建了基础平台。在此基础上,郑翰恺等^[14]进一步聚焦于热噪声抑制问题,通过设计初步的温控系统将温度波动成功抑制在 30 mK 以内,验证了主动温控对提升测量稳定性的必要性和有效性。尽管这些工作取得了显著进展,但为满足未来任务更为严苛的指标,仍需将温控精度提升至更高水平。

由于太极计划要求微推力器的推力噪声指标为在 $0.1\text{ mHz} \sim 1\text{ Hz}$ 频率范围内,推力噪声不超过 $0.1\text{ }\mu\text{N}/\text{Hz}$,推力精度指标为 $0.1\text{ }\mu\text{N}$,在微推力测量装置的工作过程中,温度的变化使得推力测量装置的热噪声远远大于技术指标要求且无法满足精度指标要求。因此,为进一步抑制环境温度波动对测量精度的影响,在已有研究基础上,重点研发了一套高精度的环境温度补偿系统。该系统通过构建“外部液体恒温罩”的硬件架构,并结合基于 FPGA 平台实现的先进控制算法,旨在将测量系统所处环境的温度波动幅度提升至更高的 mK 量级控制水平,降低环境温度波动噪声对于装置核心部件的

影响,从而提升微推力测量的稳定性和准确性,为空间引力波探测任务提供更可靠的地面标定技术。

1 微推力测量原理与热噪声溯源

1.1 微推力测量原理

单丝扭摆微推力测量装置主要由扭丝悬吊横梁(平衡支架)构成扭秤测量主要部分,如图1所示。

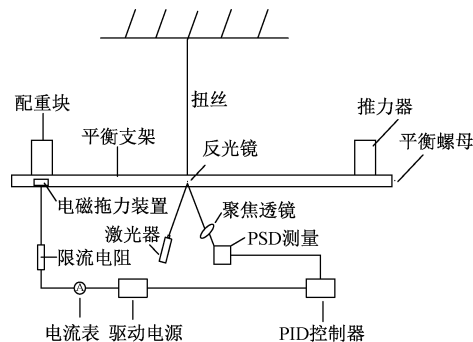


图1 单丝扭摆微推力测量装置原理图

Fig. 1 Principle diagram of single filament torsion pendulum micro-thrust measurement device

在真空精密测量环境中,扭丝将平衡支架悬挂于龙门架横梁上,支架两端分别安装推力器和配重块,形成一个高度对称的力学系统^[15-16]。通过精密调节配重环和平衡螺母,确保平衡支架始终保持理想的水平状态。支架中部安装的反射镜是整个测量系统的关键器件,将入射激光束精确反射到位敏传感器(PSD)上,通过动量定理可知扭摆的转动方程为:

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

式中: 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。

1.2 热误差来源分析

推力器工作时,产生的微小力矩将引起平衡支架极其细微的扭转,与之同步,反射镜也相应发生角度偏转,使反射光斑在 PSD 上产生位移。这种设计将推力器的微小作用力转化为可精确测量的光学信号变化。通过测量 PSD 输出的位置信号,可准确计算平衡支架的扭转角 θ ,进而精确推算出推力器产生的实际推力大小 F ,表示为:

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

式中: L 为力臂的长度; K_f 为扭转弹性系数。推力 F 与角位移 θ 呈线性关系, 通过精确测量扭转角度并结合扭转弹性系数, 可以准确获得待测推力的大小。这一方法将微小推力转化为可测量的机械变形, 实现了高精度的推力检测^[17]。

1) 扭丝刚度影响

由广义胡克定律, 扭丝承重能力和弹性系数均随着扭丝直径成正比, 而测量灵敏度成反比。具体的理论计算公式如下:

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

式中: R 为扭丝半径; G 为剪切弹性模量; L 为扭丝长度。

环境温度变化会影响扭丝的扭转弹性系数, 从而导致产生测量误差。扭丝弹性系数的影响如下:

$$K(t) = K_0 [1 + \alpha_k (t - t_0)] \quad (4)$$

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。

2) 平衡杆热形变

环境温度发生变化时, 从材料的方面也会受到一定的影响, 在高精度的测量过程中, 这个情况尤为明显, 具体的计算公式如下:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (5)$$

式中: ΔL 为材料变化的长度; α 为材料平均热膨胀系数; ΔT 为材料温度变化值。

3) 激光传感器影响

扭摆微推力测量装置中, 平衡扭摆水平方向偏转量通过高精度激光位移传感器测量得到, 通过双激光差分方式可以消除扭摆前后方向摆动。因转动角度是微小弧度, 可近似得到推力测量装置对扭转角度计算公式如下:

$$\theta = \frac{a - b}{x_1 + x_2} \quad (6)$$

式中: θ 的精度受转动距离精度 a 、 b 的影响, 转动距离 a 、 b 则是由激光测距仪测量得到。计算公式如下:

$$e = e_r L \quad (7)$$

式中: e 为绝对误差; e_r 为相对误差; L 为测量距离。

因此, 必须对测量系统进行高精度的温度补偿, 才能抑制以上这些误差所产生的影响。

2 高精度环境温控系统设计

2.1 设计理念与架构

为达到 mK 级别的控温精度, 本文的核心工作是设计并实现了一套高精度的环境温度补偿系统。该系统通过控制微推力测量装置的工作环境温度, 实现对测量系

统的温度补偿^[18]。具体做法是将微推力测量装置置于一个精密设计的恒温设备中, 以最大限度地减少外部温度波动对测量结果的影响, 恒温环境如图 2 所示。

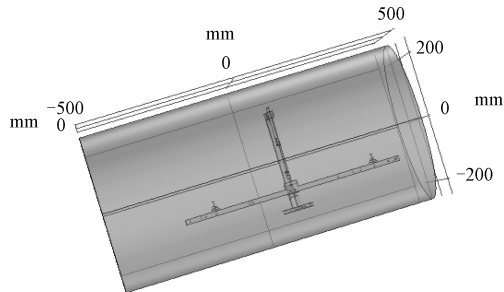


图 2 恒温环境示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a constant temperature environment

恒温系统的核心是一个以循环水为介质的外部恒温罩用于将整个测量装置包裹其中^[19]。考虑到推力测量装置约 600 mm×300 mm×400 mm 的包络尺寸, 恒温罩的设计尺寸定为 800 mm×500 mm×500 mm, 以实现全封闭控温。这一设计的优势在于水的比热容远大于空气, 能够吸收或释放大热量而自身温度变化平缓, 为系统提供了极佳的温度稳定性基础。系统采用分离式设计, 将加热与制冷单元置于外部的水循环系统中, 其工作时产生的振动和电磁干扰不会直接影响到内部高度敏感的测量装置, 相比传统的集成式空气浴恒温箱, 具有更好的隔振和抗干扰性能。通过循环水流进行热交换, 能够确保恒温罩内部温度分布的高度均匀性。在材料选择上, 本文实验验证主要在大气环境下进行, 恒温罩本体采用导热性能优异的铝材, 以实现高效的热量传递与优良的外部隔热^[20]。外部选用了导热系数仅为 0.06 W/(mK) 双层铝箔气泡隔热膜作为一种便捷且有效的隔热手段, 用以隔绝外部空气对流和辐射的影响。由于真空环境下不存在空气对流, 主要的外部热泄漏转变为热辐射, 气泡隔热膜中的气泡将失去意义, 且其塑料材质可能存在真空外逸风险, 污染真空环境。因此, 在真空应用中, 应采用更专业的多层隔热材料如 MLI (multi layer insulation) 它由多层高反射率的薄膜和低导热系数的间隔物组成, 专门用于在真空中高效抑制热辐射, 是航天及真空系统中普遍使用的被动隔热技术。

2.2 控制模块与实现

该补偿系统的控制模块主要由主控电路板、上位机、温度传感器、数据采集模块和加热模块组成, 如图 3 所示。其中, 测温探头选用 PT1000 型铂热电阻, 该传感元件电阻值随温度变化呈高度线性, 测温精度可达 0.001 °C, 满足系统对温控精度的严苛要求。控制核心则基于 EP4CE10F17C8 芯片的 FPGA 开发板, 利用其高速数据采集与实时处理能力, 为了实现对水温的精确、稳

定调节,设计了自适应 smith 模糊 PID 控制算法。通过这套高精度恒温环境补偿系统,微推力测量装置的温度稳定性得到显著提升,从而有效提高了测量精度。

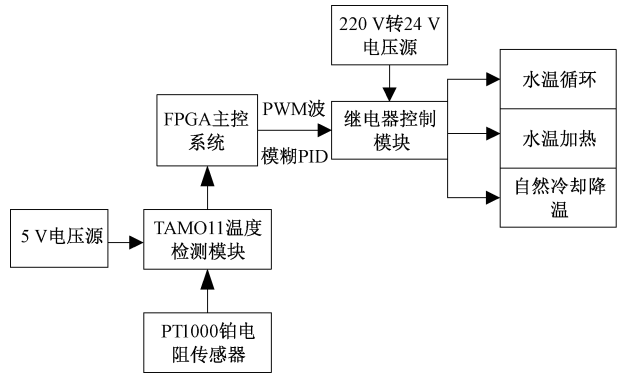


图 3 补偿系统电路
Fig. 3 Compensation system circuit

3 系统仿真分析

3.1 仿真方法与边界条件设置

利用 COMSOL 多物理场仿真软件,基于有限元分析理论,选取“固体传热”物理场接口,开展建模与求解。具体流程如下:首先对装置三维几何模型进行空间离散,采用实体单元进行建模,并在各节点依据热传导控制方程构建能量平衡方程,进而实现温度场的数值计算;针对模型外表面,生成面单元并施加辐射边界条件及其他边界条件,以真实反映装置与外部环境间的热交换过程。

模型的精度主要受限于网格划分的尺寸与质量、部件间接触热阻参数的设定以及材料热物性参数的准确性。在建模过程中,利用 COMSOL 的参数化自动网格划分功能对整体系统进行网格划分。针对大尺寸部件与微小部件交界区域,通过定义“接触对”并手动调整,确保部件间接触关系的物理合理性。热源条件以表面热流密度的形式施加于指定区域,实现对加热功率的精确输入。该方法能够在固体传热物理场下,准确模拟装置在不同工况条件下的温度分布。环境温度补偿装置结构及有限元模型如图 4 所示。

热边界条件是实现准确仿真的关键前提。在温控系统中,热源为循环水,通过调节其温度实现对装置内部环境温度的间接控制。试验条件设定在大气环境下,但鉴于隔热箱体内部为相对封闭空间,流体换热因素可被忽略。仿真时,隔热箱体内部环境温度取温控设定值 26 ℃,以近似反映温控系统稳定运行后的状态。各关键部件的材料热物性参数如表 1 所示。

3.2 仿真结果分析

为了使得环境温度变化对系统影响最小,模拟 24 h

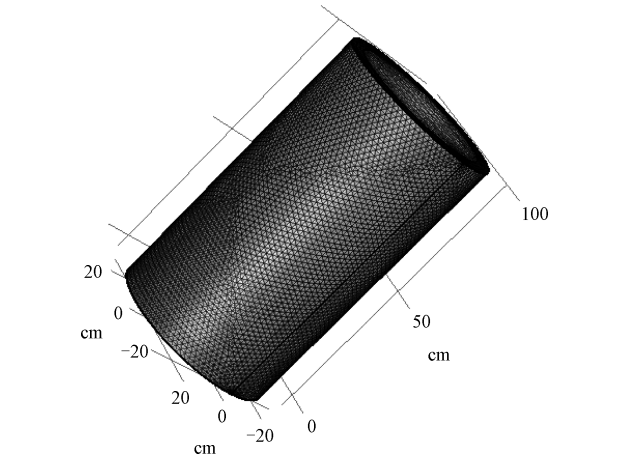


图 4 网格划分示意图
Fig. 4 Grid division schematic diagram

工作的周期,探针设置在恒温装置内部,模拟加热到指定温度然后自然降温的过程,如图 5 所示。观察数据曲线可知温度在初期略有波动,随后在 25.9 ℃~26.1 ℃之间保持稳定,而后呈下降趋势,最终在超过 2 h 之后降至约 25.75 ℃。

表 1 仿真参数设置			
Table 1 Simulation parameter settings			
部件名	材料	导热系数	辐射关系
箱体	铝	237W/(m·K)	面-面
恒温介质	水	0.6W/(m·K)	面-面
辐射介质	空气	0.026W/(m·K)	面-面

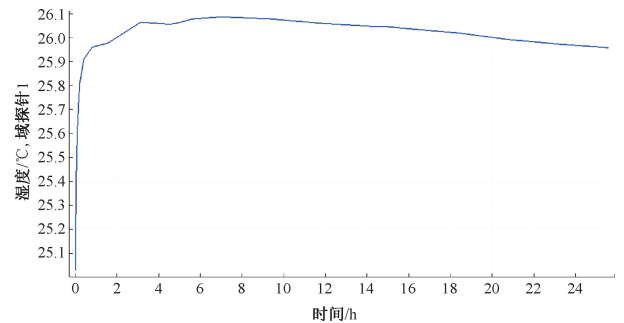


图 5 仿真自然降温结果
Fig. 5 Simulation of natural cooling results

为了了解微推力测量装置温度分布情况,对关键部件进行温度分布仿真,情况如图 6 所示。为提高计算精度并减小由于仿真时间跨度过大引起的数值误差,将 24 h 的热仿真过程划分为 24 个单位 h 的分步模拟,确保温度场变化的细致刻画。

在钨丝两端设置探针,实时采集两端的仿真温度数据。随着时间的推移,结果显示微推力测量装置下端温度显著受到热源影响,而上端的温度变化相对较小。由

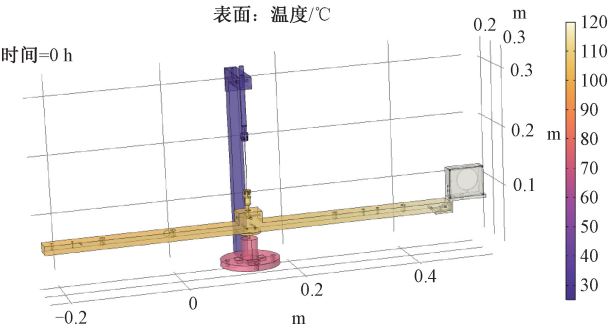


图 6 装置温度分布

Fig. 6 Device temperature distribution

图 7 可得扭丝两端探针的温度数据情况,钨丝内部存在明显的温度非均匀分布现象。

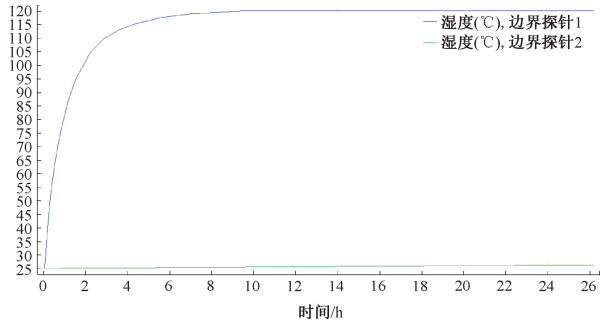


图 7 钨丝探针结果

Fig. 7 Tungsten wire probe results

4 实验验证与分析

4.1 热梯度分布实验

模拟微推力测量装置点火实验由于实验条件的限制,实验过程在大气环境 26 °C 实验室中进行,测试过程中使用计算机自动的采集温度传感器数据,避免人为导致的干扰产生误差。

为系统性地验证推力器热效应对测量装置温度场分布的影响,本研究设计了多组对比实验。实验在一个模拟的微推力测量装置模型上进行,如图所示,通过在支架和扭丝的上下两端共布置 4 支 PT1000 铂电阻温度传感器,实时监测加热条件下的温度响应,实物如图 8 所示。

模拟推力器的工作状态,使用加热片模拟点火情况,当一端受到点火影响产生高温时,实验结果表明,当支架下端被加热至约 85 °C 时,热量沿结构向上传导,导致支架上端温度仅小幅上升至 18 °C ~ 20 °C。这种不均匀的热量传递在核心的扭丝上造成了约 18 °C 的巨大温差,并且由实验室大气环境影响,温度波动较大,结果如图 9 所示。

在图 9 的基础上,在支架的另一端,对应地增加了另

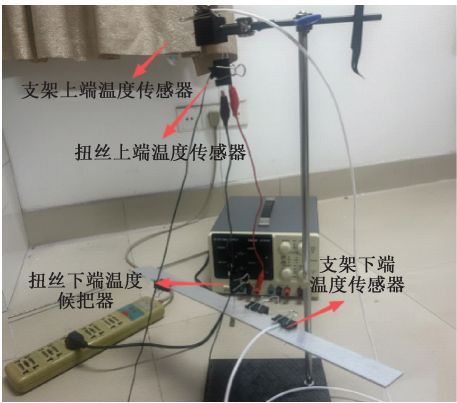


图 8 实验结构

Fig. 8 Experimental structure diagram

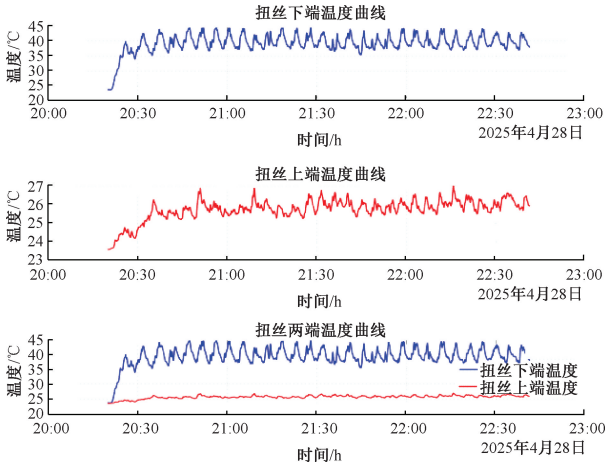


图 9 未温控时扭丝温度误差

Fig. 9 Temperature error of the wire when not under temperature control

一个加热片。实验中,通过调节这个加热片的功率,试图平衡两端热源传导的热量,目标是使扭丝两端的温度传感器读数接近一致。如图 10 所示。

这种局部的补偿方案,虽然在一定程度上减小了绝对温差,但整个装置仍处于高温状态,且两端的温度波动依旧非常剧烈且不同步。该对照实验的结果清晰地表明,在没有整体环境热屏蔽的前提下,仅靠局部的加热补偿无法有效抑制热梯度和热波动。

4.2 温控性能实验

为验证环境温度补偿系统的实际性能,将其与测量装置联调,开展了持续控温试验。试验测试点布置于推力测量装置的摆架上,用以检测恒温装置内部的环境温度。在试验过程中,由基于 FPGA 的控制器自主运行温控程序,通过上位机实时记录并保存温度数据。温控系统实物连接如图 11 所示。

将得到的温度数据进行可视化,温控数据如图 12 所

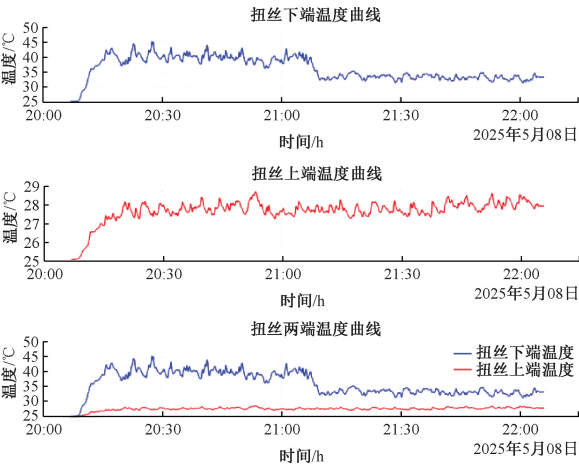
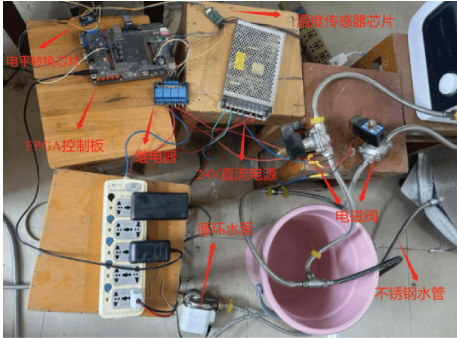


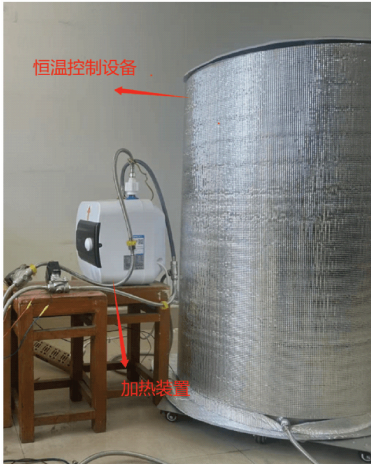
图 10 未温控时加热补偿后扭丝温度误差

Fig. 10 Temperature error of the twisted wire after heating compensation when not under temperature control



(a) 电路实物连接

(a) Physical connection of the circuit



(b) 温控设备及加热装置

(b) Temperature control equipment and heating devices

图 11 温控系统实物图及连接

Fig. 11 Turbulent kinetic energy distribution on the wall with film cooling

在 26℃ 左右,其波动范围稳定在 25.99℃~26.01℃ 之间,最大峰峰值不超过 0.02℃。该结果表明,所设计的温控系统具备出色的环境温度波动抑制能力,达到了预期的设计目标。

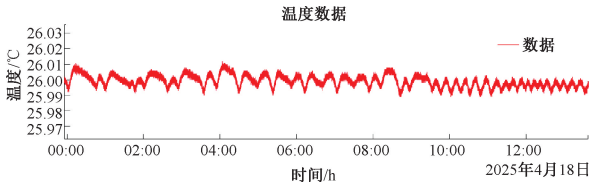


图 12 温控数据结果

Fig. 12 Temperature control data results

4.3 热噪声抑制结果分析

将模拟微推力测量装置放入恒温系统中,加热下端模拟点火工作情况,同样对扭丝另一端加热进行温度补偿,结果由图 13 所示。

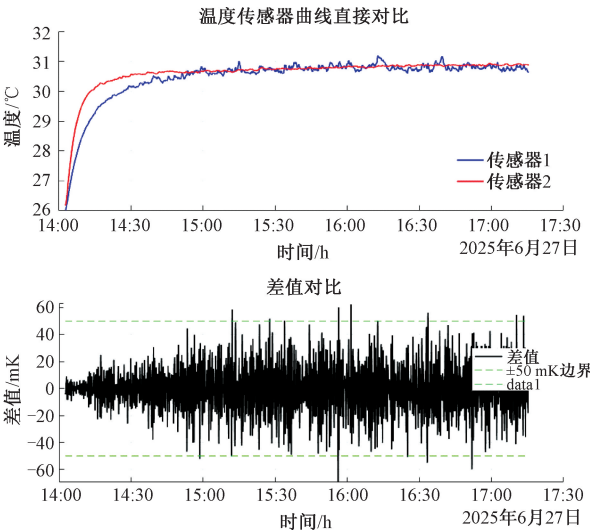


图 13 温控后加热补偿扭丝温度误差

Fig. 13 Temperature control followed by heating compensation to correct the temperature error of the twisted wire

通过加热扭丝两端进行相同的温度补偿,成功将扭丝两端温度梯度差控制在 ± 50 mK,在实验结果图中仍存在部分误差波动较大的数据点,其主要原因来自以下两方面。

- 1) 加热片与装置各部件间通过热辐射和残余气体对流进行的热交换,其过程的微小不稳定性也会引入难以被主控制回路完全消除的温度扰动。
- 2) 控制回路的响应存在固有延迟,难以完全补偿快速热扰动。此外,有限的测温点布局无法代表扭丝沿线的完整温度分布,尤其无法捕捉局部热点,导致控制出现超调或滞后,形成残余波动。

示。在环境温控系统作用下,测点的温度被精确地控制

4.4 热噪声抑制结果分析

为量化温控系统对测量精度的提升效果,将实测数据指标代入热误差模型进行分析。由前文分析可得温度波动导致的推力测量相对误差主要由扭丝刚度变化、平衡杆热膨胀及激光传感器 3 部分构成:

$$\left(\frac{\Delta F}{F}\right)_{total} \approx \frac{\Delta K_f}{K_f} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta F}{F} \quad (8)$$

实验测得,温控前核心部件的温度波动 $\Delta T \approx 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 导致的总理论相对误差约为 0.66%。启用温控系统后,温度波动被成功抑制在 $\Delta T \approx 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, 此时总理论相对误差降至约 0.0037%。

5 结 论

针对扭摆式微推力测量中热噪声导致的测量精度问题,研制了一套基于 FPGA 控制的高精度环境温度补偿系统对其进行补偿。主要结论如下:通过构建外部液体循环恒温的硬件架构,并结合先进的控制算法,成功将测量装置所处环境的温度波动抑制在 20 mK 以内,验证了所提技术方案的先进性与有效性;实验与理论分析表明,20 mK 的环境温度波动,降低了热噪声对测量不确定度的影响,显著提升了系统的热稳定性,使得温控前后扭摆式微推力测量装置核心部件温度梯度下降至原来的 0.5%。

研究成果不仅为扭摆式微推力测量装置提供了有效的热稳定性保障,其所建立的高精度环境控制技术方案,对于解决类似精密测量设备中普遍存在的环境热扰动问题同样具有重要的参考价值和应用前景。

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. China's "Taiji Program" for space gravitational wave detection and in-orbit testing of "Taiji-1" [J]. Journal of deep space detection, 2020, 7 (1): 3-10.
- [2] 张锦绣,陶文舰,连晓斌,等.空间引力波探测无拖曳技术现状与趋势[J].国防科技大学学报,2024,46(2):1-17.
ZHANG J X, TAO W J, LIAN X B, et al. Current situation and trend of drag-free technology for space gravitational wave detection [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(2): 1-17.
- [3] 严宇钊,杨明,姜万录.引力波探测器的噪声及噪声处理综述[J].电子测量技术,2019,42(24):108-115.
YAN Y ZH, YANG M, JIANG W L. Review on noise

- and noise processing of gravitational wave detectors [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42 (24): 108-115.
- [4] 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]. Acta Mechanica Sinica, 2022, 54(3): 669-677.
- [5] 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. Micro-thrust measurement methods and analysis of key issues [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(10): 2287-2299.
- [6] 冯建朝,张晓峰,梁鸿,等.太极二号卫星精密热控关键技术及试验验证[J].宇航学报,2023,44(1):132-142.
FENG J CH, ZHANG X F, LIANG H, et al. Key technologies and experimental verification of precise thermal control for Taiji-2 satellite [J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(1): 132-142.
- [7] 杨山清.扭丝滞弹性效应的精确测量[D].武汉:华中科技大学,2009.
YANG SH Q. Accurate measurement of the inelastic effect of twisted wire [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [8] 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 on systematic errors in the torsion scale cycle measurement of G experiment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [9] 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. Research on thrust measurement of thrusters based on a parallelogram mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 98-107.
- [10] LIANG S, XU L, LU S, et al. Development of a micro-thrust measurement system and ground thrust measurement of the micro Hall thruster for Taiji mission [J]. Acta Astronautica, 2025, 229: 591-599.
- [11] 汤海滨,张仲恺,张尊.空间电推进微小推力测量技术[J].推进技术,2023,44(6):219-237.
TANG H B, ZHANG ZH K, ZHANG Z. Small thrust measurement space electric propulsion technology [J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44 (6):

- 219-237.
- [12] 王嘉彬,龙建飞,徐禄祥,等. 闭环控制下单丝扭摆微牛级推力测量系统[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(9):93-101.
WANG J B, LONG J F, XU L X, et al. Closed-loop control of monofilament twist bull thrust measuring system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 5 (9) : 93-101.
- [13] 周炜杰,龙建飞,王嘉彬,等. 基准面倾斜对微推力测量影响实验研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(11):178-186.
ZHOU W J, LONG J F, WANG J B, et al. Experimental study on the influence of reference plane inclination on micro-thrust measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 178-186.
- [14] 郑翰恺,孙明明,龙建飞,等. 扭摆式微推力测量装置热噪声抑制试验研究[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 1-13 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0562>.
ZHENG H K, SUN M M, LONG J F, et al. Twist decay thrust measuring device thermal noise suppression experimental study [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1-13 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0562>.
- [15] CONG L X, et al. Thermal noise decoupling of micro-newton thrust measured in a torsion balance [J]. Symmetry,2021,13(8):1357-1357.
- [16] LONG Y, LU ZH J, WANG Y X, et al. Investigating temperature-induced torque noise of a torsion pendulum based on temperature modulation at different frequencies[J]. The Review of Scientific Instruments,2023,94(11).
- [17] 杜沐青. 基于预估模糊PID的恒温箱温度控制系统优化设计[D]. 长沙:中南林业科技大学,2022.
DU M Q. Based on forecast incubator of fuzzy PID temperature control system optimization design [D]. Changsha: Central South Forestry University of Science and Technology, 2022.
- [18] DONG L, LU S, GUO N, et al. Study of the thrust response characteristics of hall micro thruster[J]. Results in Physics,2024,57:107338.
- [19] CIARALLI S, COLETTI M, GABRIEL S B. An impulsive thrust balance for applications of micro-pulsed plasma thrusters [J]. Measurement Science and Technology, 2013. DOI: 10.1088/0957-0233/24/11/115003.
- [20] 陆叶盛. 基于动态热容滤波的循环冷却水超精密温度调控技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
LU Y SH. Based on dynamic heat capacity filter for the circulating cooling water of the ultra precision temperature control technology research [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2021.

作者简介



吕朝源,2023 年于重庆文理学院获得学士学位,现为重庆科技大学硕士研究生,主要研究方向为控制工程。
E-mail: 1604079115@qq.com

Lyu Chaoyuan received a B. Sc. degree from Chongqing University of Arts and Sciences in 2023. Currently, he is a M. Sc. candidate at Chongqing University of Science and Technology. His main research interest includes control engineering.



杨威(通信作者),2019 年于中国空间技术研究院获得博士学位,现为重庆科技大学高级工程师,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: 365955393@qq.com

Yang Wei (Corresponding author) received his Ph. D. from the China Academy of Space Technology in 2019. Currently, he is a senior engineer and a M. Sc. supervisor at Chongqing University of Science and Technology. His main research interests include space electric propulsion technology and the application of plasma technology.