

SUN Boao, DOU Shencheng, WANG Xiaoqing, YANG Shuang, YANG Chao, LIU Xuefeng, ZHENG Fu. Design and Calibration of High-resolution Low-noise Micro Flow Sensors for Cold Gas Thrusters (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 601–611. CSTR:32142.14.cjss. 2024-0147. DOI:10.11728/cjss2025.02.2024-0147

面向冷气推力器的高分辨率低噪声 微流量传感器设计与标定*

孙博奥^{1,4} 窦申成² 王小庆¹ 杨双¹
杨超³ 刘雪峰¹ 郑福¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国软件评测中心(工业和信息化部软件与集成电路促进中心) 北京 100048)

3(中国科学院力学研究所 北京 100190)

4(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 微流量传感器用于精确测量和控制流经推力器的气体流量,其性能直接影响冷气推力器系统的整体表现.针对当前微流量传感器分辨率低、噪声大和响应时间慢的问题,研制了一种基于恒温差原理的MEMS微流量传感器系统.该传感器采用了4个MEMS铂电阻构成恒温差架构,通过高精度恒温差驱动电路实现温差恒定,经过测温电桥将温度变化信号经过高精度程控放大器输入到24位高精度模数转换器(ADC)进行采样,实现了低噪声和高精度的微流量信号采集.测试结果显示,该微流量传感器在0.05~1 Hz等效输出噪声小于 $0.126 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,分辨率达到 $0.06 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$,量程为 $0\sim 1000 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$,响应时间为1.2 ms.其测量分辨率高、噪声低、响应速度快,为空间引力波探测中的冷气推力器系统提供了关键的技术支持.

关键词 微流量, 恒温差, 低噪声, 高分辨率, 冷气推力器

中图分类号 TP212

Design and Calibration of High-resolution Low-noise Micro Flow Sensors for Cold Gas Thrusters

SUN Boao^{1,4} DOU Shencheng² WANG Xiaoqing¹ YANG Shuang¹
YANG Chao³ LIU Xuefeng¹ ZHENG Fu¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(China Software Testing Center (MIIT Software and Integrated Circuit Promotion Center), Beijing 100048)

3(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

4(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

* 国家重点研发计划项目资助(2023YFF0719801)

2024-10-30 收到原稿, 2025-01-23 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract Micro flow sensors are critical for the precise measurement and control of gas flow in cold gas thruster systems, directly influencing the overall performance of these systems in space applications. However, conventional micro flow sensors suffer from limitations such as low resolution, high noise, and slow response time, which restrict their effectiveness in high-precision scenarios like drag-free control for space-based gravitational wave detection. To address these challenges, this paper presents the development of a MEMS-based micro flow sensor system utilizing the constant temperature difference principle. The sensor incorporates four MEMS platinum resistors arranged in a constant temperature difference configuration. A high-precision constant temperature difference driving circuit maintains a stable temperature gradient at the sensor's detection site, ensuring enhanced measurement consistency. The sensor system employs a temperature measurement bridge, which converts minute temperature variations into electrical signals. These signals are subsequently amplified by a high-precision programmable amplifier and digitized using a 24-bit high-resolution ADC. This approach significantly reduces noise while improving measurement precision, overcoming the limitations of traditional micro flow sensors. Experimental results demonstrate that the developed micro flow sensor achieves an equivalent output noise of less than $0.126 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ in the frequency range of 0.05 Hz to 1 Hz. Additionally, it offers an ultra-high resolution of better than $0.06 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$, a measurement range of 0 to $1000 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$, and a rapid response time of 1.2 ms. These improvements in measurement resolution, noise suppression, and response speed significantly enhance the sensor's performance, making it well-suited for demanding aerospace applications. The advancements in this micro flow sensor system provide crucial technical support for cold gas thruster systems in space gravitational wave detection missions. By improving flow measurement accuracy and stability, this sensor contributes to the enhanced performance of drag-free control systems, ensuring the precise and stable operation of spacecraft during gravitational wave observations.

Key words Micro flow, Constant temperature difference, Low noise, High resolution, Cold gas thruster

0 引言

空间引力波探测任务中, 冷气微推进系统是实现卫星无拖曳控制的核心, 通过抵消太阳光压、宇宙辐射等亚微牛量级的非保守力^[1], 为卫星提供超稳定平台, 从而实现负载的无拖曳运行状态^[2,3]. 空间引力波探测系统受到不同中心天体的影响, 对无拖曳系统的设计会受到不同的约束^[4], 为了应对轨道和空间环境变化引起的亚微牛量级的干扰力变化, 推进系统必须具备推力宽范围调节、高分辨率、低噪声、快速响应的能力, 以实现对这些非保守力的实时补偿^[5]. 微流量传感器是冷气推进器的关键技术支撑^[6], 通常安装在推进剂输送管道中, 靠近喷嘴或调节装置, 用于实时监测气体流量. 其核心功能是实现高精度流量控制, 确保微推进系统提供的推力满足姿态和轨道调整的精度要求, 从而维持探测器在空间中的高稳定性. 此外, 微流量传感器通过实时监控流量波动, 优化系统性能, 降低由推力扰动引起的环境噪声干扰, 并对

推进剂消耗进行精确监控, 为任务的推进剂管理和系统寿命评估提供重要依据. 为了实现空间引力波探测任务中冷气推力器具有高分辨率、低噪声和快速响应的能力, 微流量传感器性能需要达到高分辨率, 低频噪声水平低至微伏每根号赫兹量级, 响应时间在 10 ms 内, 这些要求对微流量传感器的性能提出了严苛的挑战.

当前, 空间引力波探测是一个快速发展的前沿领域, 涉及多个国家和机构的合作. 国际上的主要探测项目是欧洲航天局 (ESA) 的 LISA 计划, LISA 计划是 20 世纪 90 年代美国航空航天局 (NASA) 与 ESA 共同发起的^[7]. 2015 年 LISA 发射第一颗卫星——空间激光干涉引力波探路者^[8]. 国内的空间引力波探测主要是太极计划和天琴计划, 太极计划是中国科学院在 2016 年启动的战略先导计划, 2019 年成功发射太极 1 号技术实验卫星. 2014 年空间引力波探测组的部分成员提出了基于地心轨道的探测方案, 此方案在 2016 年被命名为天琴计划^[9], 目前已经完成了 TIAN-

QIN-1 技术验证, 正在持续推进 TIANQIN-2 的相关验证.

尽管在 MEMS 技术、热电堆结构、双绕组设计等创新推动下, 微流量传感器在灵敏度、功耗和响应速度方面取得了显著进展, 然而其测量分辨率仍然面临诸多挑战. 当前的微流量传感器在小流量测量中的非线性误差、环境温度漂移、传感器的结构与材料热匹配问题, 均限制了其在高精度应用场景中的表现. 为了满足空间引力波探测中冷气推力器提供精准快速的推力, 进一步提高微流量传感器的分辨率成为亟待解决的技术难题.

针对微流量传感器分辨率低、噪声大和响应时间慢等问题, 本文设计了一种集成于气体管路中的恒温差式微流量传感器, 适用于冷气推力器中的微流量控制系统, 具有高分辨率、低噪声、响应速度快等优点. 文章阐述了传感器工作原理及设计思路, 并对传感器的性能进行了测试. 通过测试验证, 微流量传感器在 $0.05 \sim 1$ Hz 等效输出噪声小于 $0.126 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 分辨率达到 $0.06 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$, 量程为 $0 \sim 1000 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$, 响应时间为 1.2 ms, 满足空间引力波探测中冷气推力器对微流量检测的要求.

1 微流量传感器原理

设计一种基于热传递原理的气体微流量传感器, 其工作原理依赖于流体与热传感器之间的热交换过程, 通过测量温差来推算流体的体积流量^[10]. 该传感器有三种典型结构: 热损失式、热温差式和热脉冲式. 选择热温差式设计, 利用上下游测温电阻之间的温差来测量气体的流量, 从而实现高精度的微流量检测.

微流量传感器的工作原理如图 1 所示, 系统由 4 个铂电阻组成: 环境电阻 (R_r)、上游测温电阻 (R_u)、加热电阻 (R_h) 和下游测温电阻 (R_d). 其中环境电阻 R_r 用于检测和补偿环境温度的变化, 确保外界温度的波动不会对测量结果产生干扰. 上游测温电阻 R_u 和下游测温电阻 R_d 则分别布置在气流路径的上游和下游, 用于感知气体流动前后温度的变化. 加热电阻 R_h 位于气流通道的中心, 作为热源, 对气体进行加热. 微流量传感器的实物图如图 2 所示.

当气体流量为零时, 流体没有显著的热对流现象, 加热电阻 R_h 在上下游区域产生均匀的温度场, 使

得上游和下游测温电阻 R_u 和 R_d 的温度相等, 进而没有温差产生, 电桥电路不输出电压信号. 此时的电路状态为基线条件.

当气体流量不为零时, 气体的流动带走了部分热量, 造成上游和下游测温电阻的温度不再一致. 上游测温电阻 R_u 温升较小, 而下游测温电阻 R_d 由于接受了来自气流带来的额外热量, 温度会升高得更多, 从而产生明显的温度差. 通过测量这个温度差, 传感器可以精确推算出气体的流量.

2 系统整体方案设计

设计的微流量传感器电路系统如图 3 所示, 整体电路由恒温差电路、测温电桥、24 位高分辨率 ADC 电路、微处理器 (Microcontroller Unit, MCU) 和通信接口电路等组成. 恒温差电路通过 4 个铂电阻

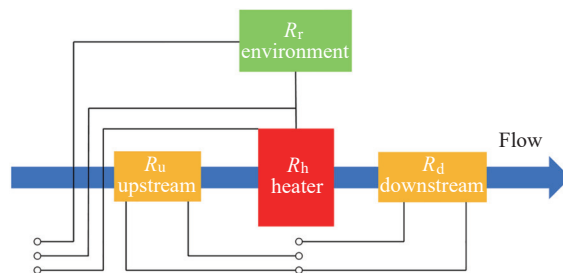


图 1 传感器原理

Fig. 1 Diagram of the specific design of the sensor

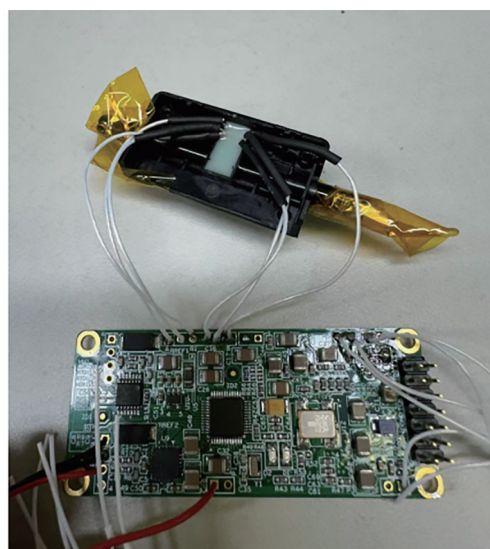


图 2 传感器实物

Fig. 2 Actual image of the sensor

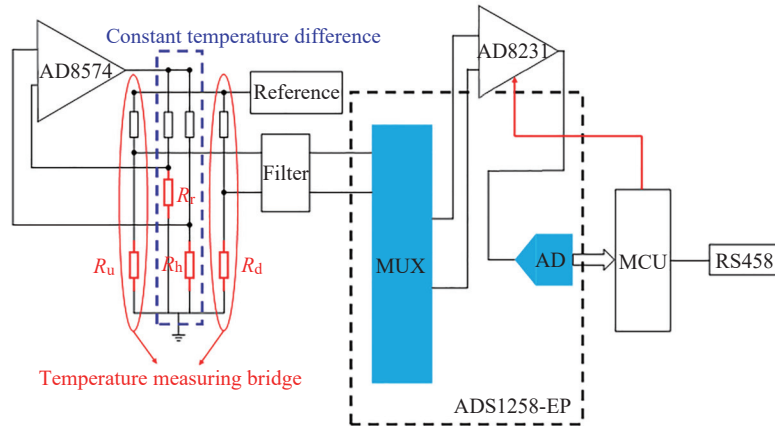


图3 传感器系统总体设计

Fig. 3 Overall design of the sensor system

(R_u , R_d , R_h , R_r) 维持恒定温度差, 检测微流量的变化。当流体流过时, 传感器的温度变化被测温电桥捕捉, 并转化为电压信号输出。此电压信号经过滤波和低噪声差分放大器处理, 以提高信号质量。

信号处理部分通过多路复用器 (Multiplexer, MUX) 选择不同通道, 输入至 AD8231-EP 进行程控放大 (Programmable Gain Amplifier, PGA), 将信号输入到 24 bit 高分辨率的 ADC (ADS1258), 确保高精度采样。微处理器控制 ADC 的采集过程, 并根据测量的电压差, 计算出流量数值。同时, 增益控制电路调整输入信号的幅度, 以适应不同测量条件下的变化需求。最后, 经过处理的流量数据通过通信串口 (RS485) 输出, 便于与外部设备进行数据交互和监控。

2.1 恒温差驱动电路

为了满足微流量检测的高精度要求, 并有效避免环境温度波动对测量结果的影响, 本文设计了一种基于温度补偿的恒温差电路。该电路能够在不同工作条件下保持测量系统的稳定性, 同时具备低噪声和高精度的优良性能。恒温差电路如图4所示, 其关键组件包括外部电阻 R_a , R_b , R_c , 以及用于环境温度感应的 R_r 和负责加热的 R_h 。通过精准控制这些电阻之间的温差, 确保了系统能够在环境变化下维持稳定的测量状态。图中所示的元器件值为在环境温度 20℃ 下实际测量的标称值, 确保了设计在常见环境条件下的性能稳定。

该电路的核心驱动器件采用高精度、低噪声的运算放大器 AD8574, 具有极低的输入偏置电压 (1 μV) 和非常小的电压漂移 (0.005 $\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$)。此外, 其噪

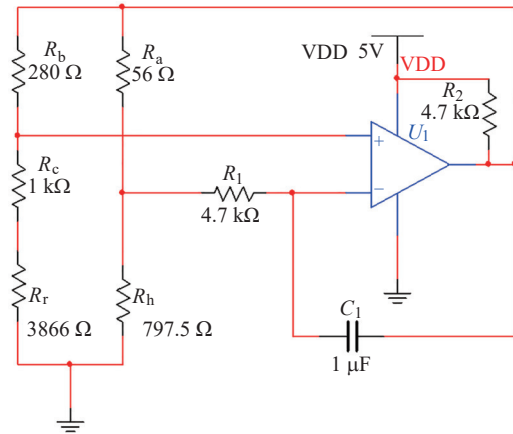


图4 恒温差电路

Fig. 4 Thermostatic differential circuitry

声性能也十分优异, 在 0~10 Hz 范围内的峰峰值电压噪声为 1.3 μV , 在 1 kHz 下电压噪声密度为 51 $\text{nV}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 适用于本文微流量的精密测量应用。

具体 R_a 和 R_b 电阻的取值根据所选的微流量传感器的 R_{r0} 值和 R_{h0} 值来确定, 应满足下式:

$$R_a R_{r0} = R_b R_{h0}. \quad (1)$$

其中, R_{r0} 和 R_{h0} 是电阻在 0℃ 时的阻值。

根据 PT 电阻的温度公式, 有

$$R_{PT} = R_{PT0} (1 + \alpha T). \quad (2)$$

其中, $\alpha = 0.003851$, 是 PT 电阻温度系数。

根据 20℃ 下 R_h 和 R_{r0} 的实测值, 可以计算出在 0℃ 时, R_h 和 R_{r0} 的值。根据运放虚短的特点, 有

$$R_b R_h = R_a (R_c + R_r). \quad (3)$$

代入 PT 电阻与温度的关系式, 得

$$R_a (R_{r0} + R_{r0}\alpha T_r + R_c) = R_b (R_{h0} + R_{h0}\alpha T_h). \quad (4)$$

假设合理取值, 使 $R_a \times R_{r0} = R_b \times R_{h0}$, 代入式 (4) 再化简可得

$$\Delta T = T_h - T_r = R_c / (\alpha R_{r0}). \quad (5)$$

根据计算, $R_a R_{r0} \approx 201013.68$, $R_b R_{h0} \approx 207331.6$, 可认为二者近似相等, 因此可以计算出理论温差为 72.34°C . 实际粗测量温差为 65.36°C , 粗测值与理论值接近, 验证了恒温差电路的功能, 两者有 10% 的误差, 此误差主要来源于实际测量中的热量散失、测温电阻精度限制、电路的电阻取值误差, 尚在合理范围内, 可以接受, 不影响微流量的测量精度.

2.2 测温电桥电路

在恒温电路的调节下, 传感器采集到的流量信号通过桥式电路转换为电压信号. 当没有流体流动时, 上游和下游的测温电阻由于中间热源的影响, 维持相同的温度, 因此阻值相等, 电桥电路不会产生电压输出. 相反, 当存在流量时, 流体的流动会将上游测温电阻的部分热量带到下游, 导致下游测温电阻的温度高于上游, 从而产生阻值差异, 最终产生相应的电压信号.

图 5 是测温电桥电路. 测温电桥电路使用低噪声基准源, 有极低的温度漂移和较高的初始精度 (最大 0.08%). 使用低噪声放大器作为缓冲放大器, 提升了基准电压的驱动能力, 使其能够稳定地为后续电路提供精确的参考电压, 而不会受到负载变化的影响. 电桥输出的信号经过 RC 滤波后, 输入到 ADC 芯片的

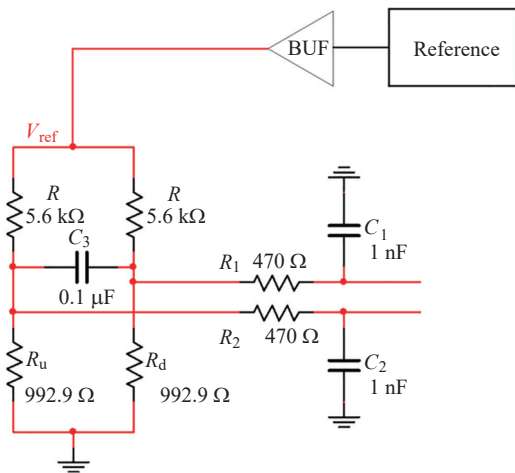


图 5 测温电桥电路

Fig. 5 Thermostatic differential circuitry

多路选择器 (MUX) 进行处理.

桥臂电阻 R 、滤波电阻 R_1 和 R_2 均使用精密低温漂 0603 贴片电阻, 确保温度变化对电阻值影响最小, 从而提高系统的稳定性和一致性. 滤波电容 C_1 和 C_2 则选用低温系数系数的 C0G 材质电容, 进一步降低了温度变化对电路性能的影响. 通过这样的电路设计, 确保了微流量信号的高精度采集和稳定输出.

电桥输出电压 ΔV 与 R_u 和 R_d 之间温差 ΔT_f 的关系计算如下:

$$\Delta V = V \alpha \Delta T_f \frac{R_0 R}{(R + R_d)(R + R_u)}. \quad (6)$$

其中, ΔT_f 表示 R_u 与 R_d 之间的温差.

在实际工作时, R_h 电阻两侧的 R_d 和 R_u 温差不大, 因此假设

$$R' = R_d = R_u = R_0 (1 + \alpha T). \quad (7)$$

代入式 (6) 得到

$$\Delta V = V \alpha \Delta T_f \frac{R_0 R}{(R + R')^2}. \quad (8)$$

因此, 要提高 ΔV 对 ΔT_f 的灵敏度, 应提高电桥供电电压 V , 使 $R = R'$. 当然电桥的供电电压 V 和 R' , R 的取值还需考虑后级检测电路对共模电压的要求.

2.3 ADC 电路和 PGA 放大电路

如图 6 所示, 整个电路设计通过 PGA 放大与高精度 ADC 结合, 不仅大大提高了系统的灵敏度, 还降低了外界噪声和环境干扰对测量结果的影响, 保证了微流量传感器在复杂环境下的稳定性和可靠性.

这里 ADC 部分选用了 ADS1258-EP 芯片, ADS1258-EP 是一款 24 位的 Δ - Σ 型模数转换器, 具有极低的噪声性能 (在 1.8 kSPS 下为 $2.8 \mu\text{V RMS}$) 和极高的线性度 (积分非线性为 0.0003% FSR). 此外, 其偏移漂移仅为 $0.02 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$, 确保了设备在不同温度条件下的稳定性和精确度. ADS1258 芯片的数据速率与其内部配置密切相关. 当 DRAT[1:0] 设置为 00 时, ADC 的输入带宽达到 869 Hz, 允许较高的频率信号输入. 在实际应用中, 微流量传感器使用的是 ADS1258, 时钟频率为 15.729 MHz. 在该时钟频率下, 当斩波功能 (CHOP) 被禁用 (CHOP=0) 时, ADC 的采样率为 1920 SPS; 而当启用斩波功能 (CHOP=1) 时, 采样率会减半至 960 SPS. 斩波功能的主要作用是通过周期性反转输入信号, 消除由于 ADC 外围调理电路带来的偏移和温漂. 因此, 在本文

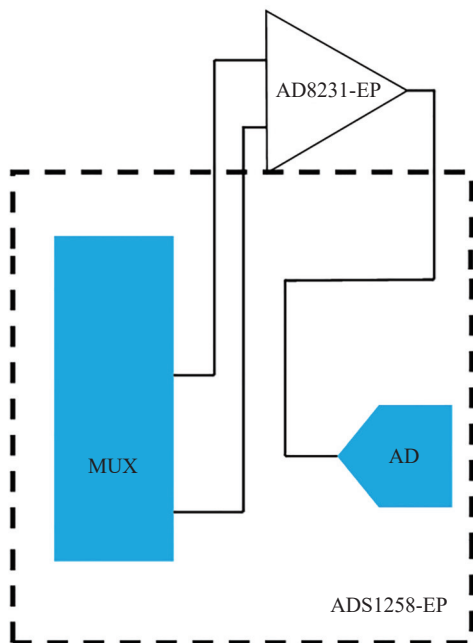


图6 ADC及PGA设计
Fig. 6 ADC and PGA design

中, 除非特别说明, 所有实验均默认启用斩波功能 (CHOP=1).

PGA 的设计是为了应对微弱的输入信号, 确保其在进入 ADC 采样之前具有足够的幅度以提高采样精度. 电路的核心是 AD8231-EP, AD8231-EP 是一款零漂移、数控增益的仪表放大器, 其输入偏置电压仅为 $15 \mu\text{V}$, 温度漂移为 $50 \text{ nV}\cdot\text{K}^{-1}$, 确保了在宽温度范围内的高精度输出. 此外, AD8231-EP 在 $0.1\sim 10 \text{ Hz}$ 范围内的输入峰峰值电压噪声为 $0.7 \mu\text{V}$, 在 1 kHz 下噪声密度为 $32 \text{ nV}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 表现出非常低的噪声水平. 利用其集成的数字增益控制 ($G=1\sim 128$) 实现 PGA 放大, 电路的驱动由内部的备用放大器组成. AD8231-EP 的增益由接入其增益选择引脚的外部电阻设定为 128.

3 微流量传感器性能测试及标定

为全面评估微流量传感器的噪声性能及其在不同工作条件下的系统分辨率, 对传感器电路的噪声水平进行了详尽测量, 并且还在传感器接入实际系统后对整体系统分辨率进行了初步评估. 测试内容涵盖了多个性能指标, 主要包括 ADC 噪声测试、微流量传感器的自噪声测试, 以及在气流量为 0 和 $167 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$

条件下的系统噪声与分辨率评估. 此外, 还对微流量传感器的响应时间进行了测试. 在性能测试完成后, 对微流量传感器进行了标定, 生成了 $0\sim 1100 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内的流量数据, 并对标定数据进行了线性拟合, 得到相应的拟合方程.

3.1 ADC 模数转换噪声性能测试

ADC 噪声评估是在去除调理电路影响的情况下, 分析 24 位高精度模数转换芯片 ADS1258 在微流量传感器中的实际噪声性能. 为此, 在测试过程中, 将 ADS1258 的微流量通道的差分输入端直接短路, 以获取数秒的 ADC 原始数据. 在此设置下, 输入 ADC 的差模信号为 0 V , 而共模信号约为 2.5 V , 这一配置符合 ADS1258 芯片的工作要求, 确保了数据采集的可靠性.

在记录原始数据后, 计算了 AD 采集的均方根噪声值, 并将其与 ADS1258 数据手册中提供的参考性能值进行比较. 图 7(a) 显示了当 CHOP 功能关闭 (CHOP=0) 时 AD 采集的原始数据. 由下面公式计算噪声均方根:

$$N_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_N^2}{N}}. \quad (9)$$

微流量传感器电路的 ADC 实测均方根噪声为 $2.336 \mu\text{V}$, 该值与 ADS1258 数据手册中给出的参考值 $2.8 \mu\text{V}$ 相近, 甚至表现出更优的性能.

图 7(b) 是在启用斩波功能 (CHOP=1) 时的 AD 采集原始数据. 在此配置下, 微流量传感器电路的 ADC 实测均方根噪声降低至 $1.676 \mu\text{V}$, 显著优于 CHOP=0 时的噪声水平. 这一结果进一步证明了斩波功能在降低噪声方面的有效性. 基于这些测试结果, 后续的所有测试均采用 CHOP=1 配置, 以确保获得最佳的测量精度和最低的噪声水平.

3.2 微流量传感器输入短路测试

该测试的主要目的是评估微流量传感器电路板的自噪声水平, 重点关注调理电路和 ADC 的噪声表现. 测试过程中, 将微流量传感器的信号输入端短路, 以 50 Hz 的采样频率记录了超过 1000 s 的数据, 原始采样数据如图 8 所示, 均方根噪声为 $0.22833 \mu\text{V}$. 随后对其进行了噪声谱分析, 图 9 显示了电压噪声功率谱密度, 结果表明在 $0.05\sim 1 \text{ Hz}$ 的频率范围内, 电路的本底噪声低于 $0.22 \mu\text{V}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$.

分析结果显示, 整体均方根噪声低, 在低频段 (0.05~1 Hz), 电路噪声谱水平保持稳定, 达到较低的噪声基底 (小于 $0.22 \mu\text{V}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$), 这说明调理电路和 ADC 具备良好的噪声抑制能力, 有助于实现高精度的信号检测。

3.3 流量为 $0 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 与 $167 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的测试

该测试的主要目的是评估微流量传感器板在接入微流量传感器且气流量为 $0 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的噪声性能, 具体包括微流量传感器自噪声、调理电路噪声和

ADC 噪声. 将微流量传感器接入电路, 并关闭流量控制阀门, 以 50 Hz 的采样频率记录了超过 1000 s 的数据, 原始采样数据如图 10 所示, 均方根噪声为 $0.67849 \mu\text{V}$. 噪声谱分析结果如图 11 所示. 在此次测试中, 微流量传感器电路板表现出显著的低频噪声抑制能力, 尤其在 0.05~1 Hz 的频率范围内, 系统的噪声功率谱密度保持在 $1.43 \mu\text{V}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 以内. 相比于输入短路下的测试结果, 虽然噪声有所增加, 但整体依旧处于较低水平, 表明该系统在接入微流量传感器后, 依然具备较强的抗噪性能. 基于上述测试结果, 当微流量传感器接入电路且流量控制阀门关闭时, 系统的分辨率可达到 $0.7 \mu\text{V}$.

同时, 测试在气流量为 $167 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下微流量传感器电路板的整体噪声性能, 相比流量为 0 的情况, 包括微流量引起的气流波动噪声. 在此条件下, 以 50 Hz 的采样频率记录了超过 700 s 的数据, 其原始

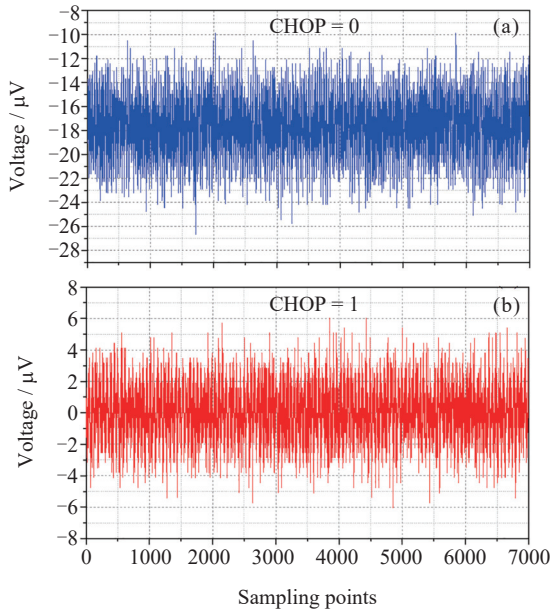


图 7 AD 采集的原始数据. (a) CHOP=0 时的原始数据, (b) CHOP=1 时的原始数据

Fig. 7 Raw data collected by AD. (a) Raw data at CHOP = 0, (b) raw data at CHOP = 1

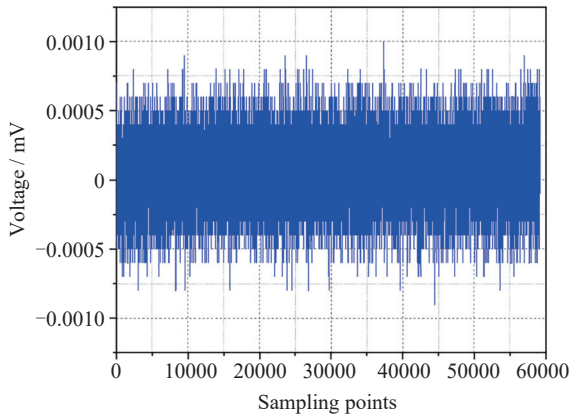


图 8 输入短路原始采样数据

Fig. 8 Raw sample data at input short-circuit

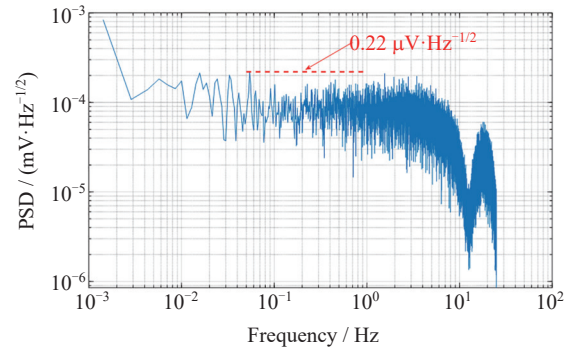


图 9 输入短路噪声功率谱密度

Fig. 9 Noise Power Spectral Density (PSD) at input short-circuit

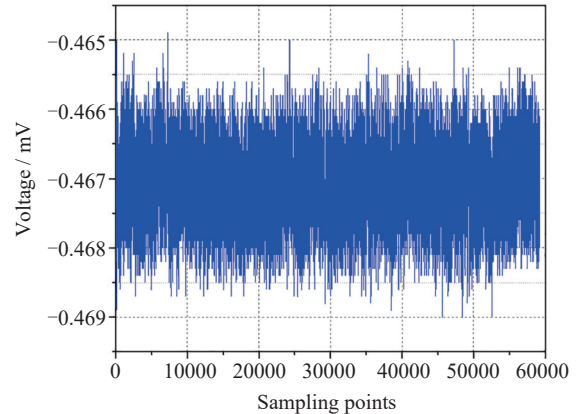


图 10 微流量 $0 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的原始采样数据

Fig. 10 Raw sampling data at microflow of $0 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$

采样数据如图 12 所示, 均方根噪声为 $1.0527 \mu\text{V}$. 并对其进行了噪声谱分析, 如图 13 所示, 在 $0.05 \sim 1 \text{ Hz}$ 的低频范围内, 系统的电压噪声功率谱密度小于 $1.95 \mu\text{V} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 相较于气流量为 $0 \mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 的噪声水平, 该噪声水平稍有上升, 这是因为微小气流波动带来的附加噪声. 这一结果表明, 在微流量为 $167 \mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下, 系统依然能够保持较低的噪声基底, 体现了其较强的抗噪性能和稳定性.

3.4 响应时间测试

该测试中, 将微流量传感器的输出端接入示波器, 并通入设定流量, 以精确评估传感器的响应时间. 具体方法为: 当气流开始流入传感器后, 传感器检测到气流变化, 示波器随即记录输出电压的变化时间, 从而得出传感器的响应时间.

测试结果如图 14 所示, 传感器的响应时间为 1.2 ms . 快速的响应时间意味着传感器能够迅速反馈

流量变化情况, 使得推力器系统能够实时调整气流, 确保推力的稳定输出.

3.5 标定

传感器设计的最后一步是进行标定, 以确保其测量精度和稳定性. 流量产生装置如图 15 所示, 将标准气体通过比例阀连接到微流量传感器一端, 另一端连接流量计进行闭环控制, 通过比例阀控制气流量, 记录此刻下的电压和对应的流量值. 根据微流量传感器的预定测量范围, 对 $0 \sim 1100 \mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围的流量进行标定实验.

标定数据如表 1 所示, 传感器输出的电压值与流量之间表现出显著的非线性关系. 一方面, 因为热传递过程中气流速度与热量传递的关系并非完全线性, 尤其在高速下, 湍流效应和气体热物性参数随温度变化导致传热效率发生变化; 另一方面, 铂电阻的阻

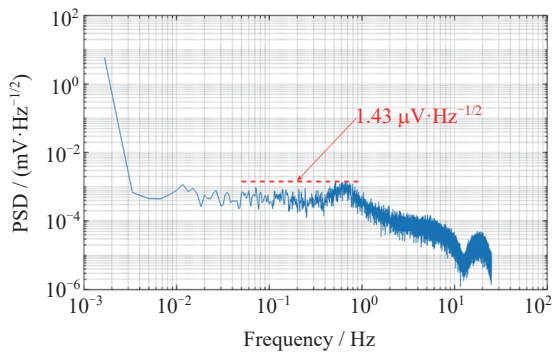


图 11 微流量 $0 \mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的噪声功率谱密度
Fig. 11 Noise Power Spectral Density (PSD) at microflow of $0 \mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$

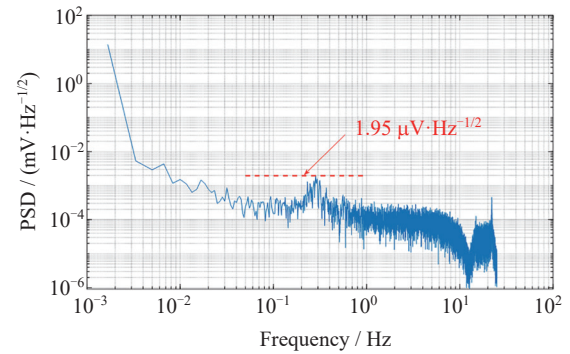


图 13 微流量 $10 \mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的噪声功率谱密度
Fig. 13 Noise Power Spectral Density (PSD) at microflow of $10 \mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$

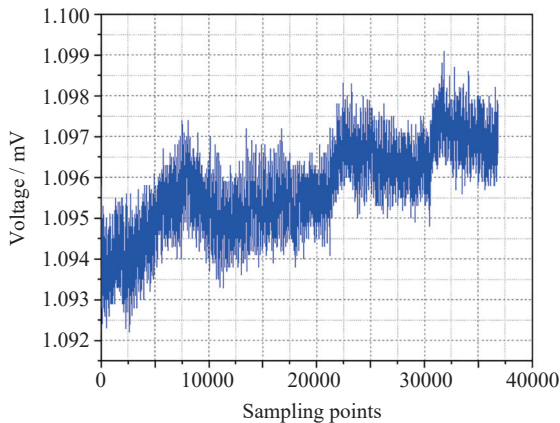


图 12 微流量 $10 \mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的原始采样数据
Fig. 12 Raw sampling data at microflow of $10 \mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$

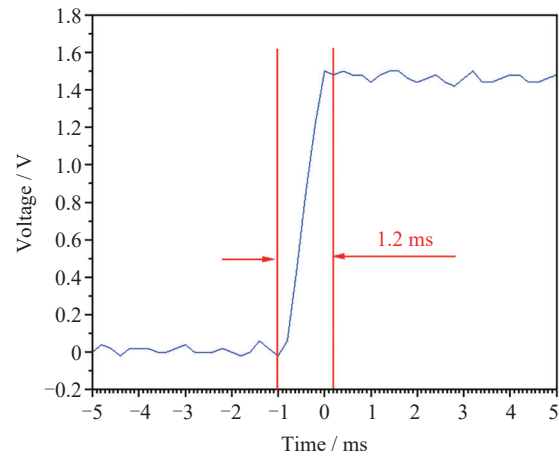


图 14 响应时间测试结果
Fig. 14 Response time test results

值随温度变化存在轻微非线性, 加之惠斯通电桥电路的输出特性在较大电阻变化时表现出非线性. 为了更加准确地评估传感器的性能, 对实验数据进行了多项式拟合, 如图 16 所示. 拟合方程如下:

$$y = 0.0689x^4 + 0.244x^3 - 4.1453x^2 + 76.172x - 35.6278. \quad (10)$$

结果显示, 回归的决定系数 R^2 为 0.99798, 调整 R^2 为 0.99745, 表明模型的拟合效果良好, 传感器的输出能够高度精确地预测实际流量. 此外, 线性拟合的残差平方和 (Sum of Squares for Error, SSE) 为 14.09102, 说明模型拟合精度高. 结合这些结果, 微流量传感器在其测量范围内, 都表现出较高的拟合度、较低的测量误差和较高的预测精度.

根据图 16 的拟合关系, 将流量为 $0 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 的电压噪声转换为流量噪声, 流量噪声数据如图 17 所示,

均方根噪声为 $0.054 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. 结果表明, 微流量传感器的分辨率可以达到 $0.06 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. 分析流量噪声的功率谱密度, 如图 18 所示, 在 $0.05 \sim 1 \text{ Hz}$ 的低频范围内, 微流量传感器流量本底噪声小于 $0.126 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$.

表 2 是现有微流量传感器部分性能的对比, 本文设计的微流量传感器在噪声、分辨率和响应时间方面表现得更出色, 等效噪声降低至 $0.126 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 内, 分辨率达到 $0.06 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$, 响应时间为 1.2 ms , 满足冷气推力器的需求.

4 结论

研究并设计了一种基于恒温差原理的微流量传感器, 旨在解决当前面向冷气推力器的微流量传感器分辨率低、噪声大和响应时间慢等问题. 通过引入恒

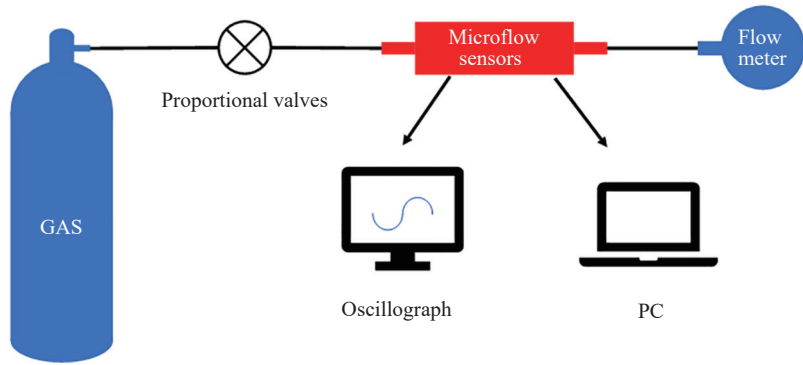


图 15 流量标定实验布局

Fig. 15 Flow calibration experiment layout

表 1 电压与流量拟合
Table 1 Voltage and flow fitting

电压/mV	微流量/ $(\mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	电压/mV	微流量/ $(\mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$
0.31	0	3.9	228.84
0.26	0	4.46	263.34
1	8.83	5.53	365.17
1.01	11.67	5.72	371.51
1.06	21.83	6.82	516.34
1.11	39.00	7	543.68
1.12	48.50	7.29	587.18
1.15	56.67	8.1	746.68
1.87	116.67	8.44	811.85
2.51	162.84	9.5	1079.19

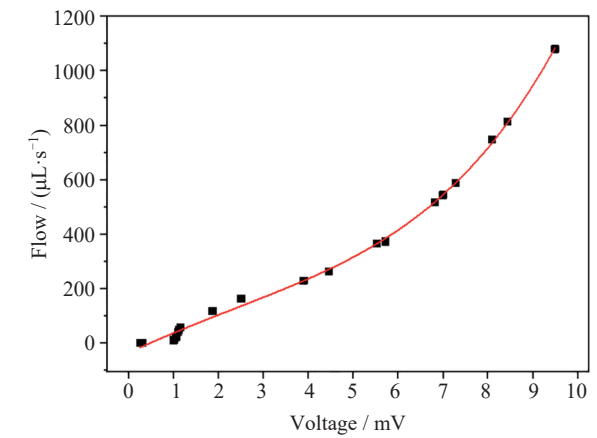


图 16 电压与流量拟合曲线
Fig. 16 Fit curve of voltage and flow

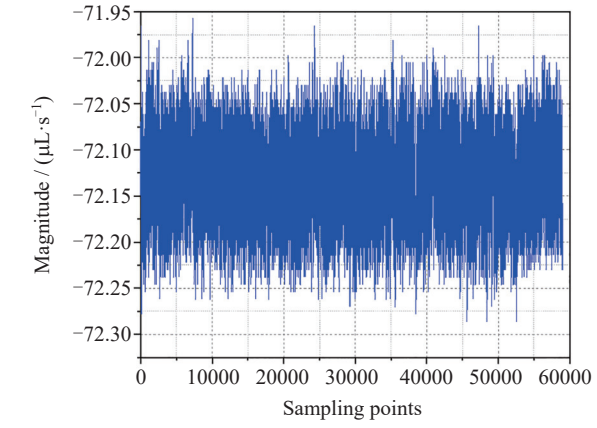


图 17 流量输出本底噪声
Fig. 17 Traffic outputs noise floor

温差电路,有效提高了传感器的分辨率.该传感器采用四个 MEMS 铂电阻构成恒温差架构,通过高精度恒温差驱动电路实现传感器检测位置温差的恒定控制,通过测温电桥将微小的温度变化信号经过高精度程控放大器输入到 24 位高精度模数转换器 (ADC) 进行采样,实现了高分辨率、低噪声和响应快的微流量信号采集.

为了验证传感器的性能,对其电路噪声和响应时间进行了测试,并对传感器进行标定.测试结果表明,该微流量传感器在 0.05~1 Hz 等效输出噪声为小于 $0.126 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,分辨率达到 $0.06 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$,量程为 $0\sim1000 \mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$,响应时间为 1.2 ms,满足冷气推力器在空间引力波探测任务的需求.实际标定结果表明,传感器的测量值与标准流量之间具有良好的拟合度,线性回归拟合的 R^2 值接近 1. 相比现有的微流量传感

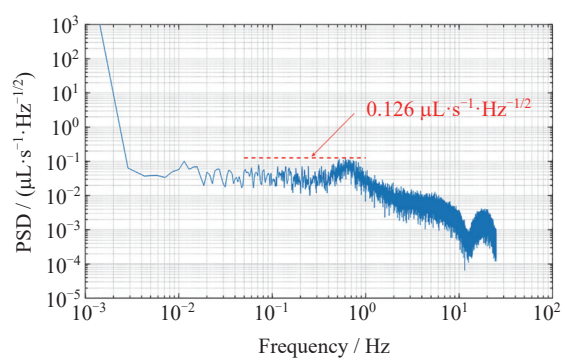


图 18 流量输出本底噪声功率谱密度
Fig. 18 Power spectral density of flow output noise floor

表 2 微流量传感器性能对比
Table 2 Comparison of microflow sensor performance

微流量传感器	分辨率/ ($\mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	响应时间/ms	等效噪声/ ($\mu\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$)
本文	0.06	1.2	0.126
文献[1]	0.08		0.083
文献[11]	—	7	—
文献[12]	—	25	—

器,分辨率提高,表现出较低的噪声水平和较快的响应速度.

面向空间引力波探测任务中的冷气推力器的应用,解决了微流量传感器在测量分辨率、噪声性能和响应速度方面的挑战,还通过实验验证了其在流量测量中的可靠性与稳定性.这一传感器的设计为进一步提升微流量测量分辨率提供了新的解决方案,特别是对于空间引力波探测任务中的冷气推力器系统具有重要意义.通过本文开发的微流量传感器,能够有效提高冷气推力器系统的响应精度和控制稳定性,从而确保无拖曳探测器在亚微牛的力干扰下保持稳定飞行轨迹,最终助力空间引力波探测任务的顺利实施.

参考文献

[1] YANG Chao, HE Jianwu, KANG Qi, *et al.* Design and experimental study of sub-micro-scale thrust measurement systems[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 526-534 (杨超, 贺建武, 康琦, 等. 亚微牛级推力测量系统设计与实验研究 [J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 526-534)

[2] YU Daren, NIU Xiang, WANG Taibu, *et al.* The developments of micro propulsion technology based on space gravitational wave detection task[J]. *Acta Scientiarum Nat-*

- uralium Universitatis Sunyatseni*, 2021, **60**(1/2): 194-212 (于达仁, 牛翔, 王泰卜, 等. 面向空间引力波探测任务的微推进技术研究进展 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2021, **60**(1/2): 194-212)
- [3] LIU H, NIU X, ZENG M, *et al.* Review of micro propulsion technology for space gravitational waves detection[J]. *Acta Astronautica*, 2022, **193**: 496-510
- [4] ZHANG Jinxiu, TAO Wenjian, LIAN Xiaobin, *et al.* Current status and trends of drag-free technology for space-based gravitational wave detection[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2024, **46**(2): 1-17 (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)
- [5] MATTICARI G, NOCI G, SICILIANO P, *et al.* Cold gas micro propulsion prototype for very fine spacecraft attitude/position control[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Sacramento: AIAA, 2006: 4872
- [6] NOCI G, MATTICARI G, SICILIANO P, *et al.* Cold gas micro propulsion system for scientific satellite fine pointing: review of development and qualification activities at Thales Alenia Space Italia[C]//45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Denver: AIAA, 2009: 5127-5139
- [7] WU Yuliang, HU Wenrui, WANG Jianyu, *et al.* Review and scientific objectives of spaceborne gravitational wave detection missions[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 589-599 (吴岳良, 胡文瑞, 王建宇, 等. 空间引力波探测综述与拟解决的科学问题 [J]. 空间科学学报, 2023, **43**(4): 589-599)
- [8] LISA Consortium. LISA: laser interferometer space antenna—a proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts[EB/OL]. (2017-01-20)[2019-12-30]. https://www.cosmos.esa.int/documents/678316/1700384/LISA_L3_20170120+-+Submitted.pdf/5b036a72-ed33-dbad-871d-f16ed282723d
- [9] LUO Ziren, ZHANG Min, JIN Gang, *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 (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)
- [10] KUO J T W, YU L, MENG E. Micromachined thermal flow sensors — a review[J]. *Micromachines*, 2012, **3**(3): 550-573
- [11] HOU Zhihao, LIU Xuhui, LONG Jun, *et al.* Development of a silicon-based MEMS thermal flow sensor chip based on platinum resistance[J]. *Microprocessors*, 2023, **44**(3): 11-14 (侯智昊, 刘旭辉, 龙军, 等. 一种基于铂电阻的硅基 MEMS 热式流量传感器芯片研制 [J]. 微处理机, 2023, **44**(3): 11-14)
- [12] QIAO J P, CHEN J Y, JIAO B B, *et al.* A highly sensitive dual-mode thermal flow sensor based on calorimetric mode[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, **24**(2): 1245-1254

作者简介



孙博奥 男, 2001 年 6 月出生于陕西省渭南市, 现为中国科学院国家空间科学中心电子信息硕士研究生, 主要研究方向为高精度空间时频分布.

E-mail: sunboao23@mailsucas.ac.cn



郑 福 (通信作者) 男, 1989 年出生于河北省张家口市, 中国科学院国家空间科学中心博士, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 主要研究方向为弱信号检测与数字处理和智能信息处理.

E-mail: fzheng@nssc.ac.cn