

引力波超稳结构支撑框热形变干涉测量

邱成波 樊汉鲲 何涛 蔡志鸣 陈长永 熊丽园 印欣睿 冯建朝 杨中光 赵东林 陈超 范晓孟 张永合 朱振才

Interferometric measurement of thermal deformation for ultra-stable structural support frame of gravitational wave spacecraft

QIU Cheng-bo, FAN Han-kun, HE Tao, CAI Zhi-ming, CHEN Chang-yong, XIONG Li-yuan, YIN Xin-rui, FENG Jian-chao, YANG Zhong-guang, ZHAO Dong-lin, CHEN Chao, FAN Xiao-meng, ZHANG Yong-he, ZHU Zhen-cai

引用本文:

邱成波, 樊汉鲲, 何涛, 蔡志鸣, 陈长永, 熊丽园, 印欣睿, 冯建朝, 杨中光, 赵东林, 陈超, 范晓孟, 张永合, 朱振才. 引力波超稳结构支撑框热形变干涉测量[J]. 中国光学, 2026, 19(5): 1–11. doi: 10.3724/CO.2026–0088

QIU Cheng-bo, FAN Han-kun, HE Tao, CAI Zhi-ming, CHEN Chang-yong, XIONG Li-yuan, YIN Xin-rui, FENG Jian-chao, YANG Zhong-guang, ZHAO Dong-lin, CHEN Chao, FAN Xiao-meng, ZHANG Yong-he, ZHU Zhen-cai. Interferometric measurement of thermal deformation for ultra-stable structural support frame of gravitational wave spacecraft[J]. Chinese Optics, 2026, 19(5): 1–11. doi: 10.3724/CO.2026–0088

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026–0088>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间引力波探测前向杂散光测量和抑制

Measurement and suppression of forward stray light for spaceborne gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1081 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0251>

空间引力波探测“太极计划”星间姿态–光程耦合噪声迭代拟合与高精度抑制方法

Iterative estimation and precision suppression of inter-spacecraft tilt-to-length coupling noise for the Taiji space gravitational wave detection mission

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 583 <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0042>

空间引力波探测中超低附加相噪频综研究

Ultralow residual phase noise frequency synthesizer for space gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 661 <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0015>

激光外差干涉皮米级平动测量技术研究

Laser heterodyne interferometry for picometer-level displacement measurement

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 535 <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0192>

低灵敏度空间引力波望远镜光学系统设计

Design of optical system for low-sensitivity space gravitational wave telescope

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1384 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0006>

引力波探测中激光干涉量子噪声计算

Calculation of laser interferometric quantum noise in gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 698 <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0180>

文章编号 2097-1842(2026)05-0001-11

引力波超稳结构支撑框热形变干涉测量

邱成波^{1,2}, 樊汉鲲⁴, 何 涛¹, 蔡志鸣¹, 陈长永¹, 熊丽园¹, 印欣睿^{1,2}, 冯建朝¹,
杨中光¹, 赵东林³, 陈 超³, 范晓孟³, 张永合^{1,2}, 朱振才^{1,2*}

(1. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;

2. 中国科学院大学, 北京 100039;

3. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072;

4. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 201804)

摘要:为满足空间引力波探测用陶瓷基超稳结构的热形变测试需求, 解决该类构件制备完成前测量链路难以验证的工程难题, 本文搭建了一套适用于 1mHz~0.1 Hz 频段的地面真空热形变干涉测量系统。选用几何构型、安装接口及测量光路均与陶瓷基构件等效的 4J32 殷钢样件作为试验件, 完成系统综合热膨胀系数标定、长期位移稳定性测试与低频噪声分析。试验将被测结构、光纤测量头、反射镜与温度传感器整体置于真空环境, 利用腔体自然降温实现测量链路整体热响应标定; 在 mK 级稳态温控下, 采用 Welch 法获取位移噪声幅值谱密度, 对比分析干涉仪本征噪声、热等效噪声与系统综合噪声。实验结果表明: 系统综合热膨胀系数与殷钢本征值相对偏差约 8.3%, 可有效表征测量链路整体热响应; 系统在 mHz 频段位移噪声幅值谱密度 26.6 nm/√Hz, 长周期测量稳定性较好; 干涉仪本征噪声较系统综合噪声低约两个数量级, 温度波动转换的热等效位移噪声仅占系统噪声的 7.8%~14.1%, 二者均远低于系统综合测量噪声, 并非系统测量误差的主要来源。该系统与方法完成了全测量链路验证与噪声基准建立, 可为后续陶瓷基超稳结构热形变测试提供等效验证基础与可复用技术方案。

关键词:空间引力波探测; 热形变测量; 激光干涉测量; 尺寸稳定性; 幅值谱密度; 超稳结构

中图分类号: O439; P142.8+4; V447 文献标志码: A doi: 10.3724/CO.2026-0088 CSTR: 32171.14.CO.2026-0088

Interferometric measurement of thermal deformation for ultra-stable structural support frame of gravitational wave spacecraft

QIU Cheng-bo^{1,2}, FAN Han-kun⁴, HE Tao¹, CAI Zhi-ming¹, CHEN Chang-yong¹, XIONG Li-yuan¹,
YIN Xin-rui^{1,2}, FENG Jian-chao¹, YANG Zhong-guang¹, ZHAO Dong-lin³, CHEN Chao³,
FAN Xiao-meng³, ZHANG Yong-he^{1,2}, ZHU Zhen-cai^{1,2*}

(1. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Science, Shanghai 201203, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

4. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 201804, China)

* Corresponding author, E-mail: zhuzc@microstate.com

收稿日期: 2026-05-04; 修订日期: 2026-05-28

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2023YFC2206001, No. 2022YFC2204504);

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2023YFC2206001, No. 2022YFC2204504)

Abstract: To satisfy the thermal deformation testing requirements of ceramic-based ultra-stable structures for space gravitational wave detection, and address the difficulty of verifying the measurement link prior to component fabrication, a ground-based vacuum interferometric measurement system operating within 1 mHz–0.1 Hz is developed in this paper. We use an equivalent 4J32 Invar sample for tests. It matches ceramic parts in geometry, interfaces and optical path. We calibrate thermal expansion and test displacement stability. We also decompose low-frequency noise systematically. In the experiment, the tested structure, fiber-optic measuring probe, reflector and temperature sensors are placed in a vacuum environment, and the natural cooling of the cavity is utilized to realize the overall thermal response calibration of the measurement link. Under mK-level steady-state temperature control, the Welch method is employed to acquire the amplitude spectral density of displacement noise, and a comparative analysis is conducted on the intrinsic noise of the interferometer, thermal equivalent noise and system comprehensive noise. The experimental results show that the relative deviation between the system comprehensive thermal expansion coefficient and the intrinsic value of Invar is about 8.3%, which can effectively characterize the overall thermal response of the measurement link. The amplitude spectral density of displacement noise of the system in the mHz band is approximately 26.6 nm/ $\sqrt{\text{Hz}}$, and the consistency of long-period multi-segment steady-state measurement results is high, demonstrating high reliability. The intrinsic noise of the interferometer is about two orders of magnitude lower than the system comprehensive noise, and the thermal equivalent displacement noise converted from temperature fluctuation only accounts for 7.8%~14.1% of the system noise; both of them are far lower than the comprehensive measurement noise and do not constitute major interference. The proposed system and method complete the full measurement link verification and noise benchmark establishment, and can provide an equivalent verification foundation and reusable technical scheme for subsequent thermal deformation testing of ceramic-based ultra-stable structures.

Key words: space gravitational wave detection; thermal deformation measurement; laser interferometry; dimensional stability; amplitude spectral density; ultra-stable structure

1 引言

空间引力波探测可有效突破地面探测器在地面振动、重力梯度噪声及干涉臂长等方面的固有局限,实现 1 mHz~0.1 Hz 中低频段引力波的直接观测,具有重大科学价值。近年来,激光干涉空间天线(Laser Interferometer Space Antenna, LISA)、太极、天琴等空间引力波探测任务持续推进,空间激光干涉测距、惯性传感、无拖曳控制、超稳结构与高精度热控等核心关键技术已成为研究焦点^[1-3]。望远镜、干涉仪与惯性传感器作为精密干涉测量链路的三大载荷,均依托超稳结构安装与基准传递,其尺寸稳定性直接决定测量光程稳定性与引力波探测灵敏度^[1-2]。为满足皮米级光程稳定性要求,超稳结构需在轻量化、高刚度与高精度装调前提下,具备极低的热致形变与 mHz 频

段超稳尺寸保持能力,为高精度空间激光干涉测量提供刚性、低噪声结构基准。

核心超稳结构是引力波探测器中的关键承力构件,既用于连接三大载荷,也用于连接核心舱与外部结构。空间引力波探测对望远镜系统提出皮米量级光程稳定性要求,温度波动引起的结构变形、安装界面微小松弛及局部热梯度,均会转化为沿测量方向的相对位移,从而影响超稳结构的尺寸稳定性评价^[4-5]。碳化硅(SiC)、微晶玻璃等低膨胀材料广泛用于望远镜结构制造及在轨稳定性预测^[4,6],但脆性大,成型与轻量化难度大,一定程度上限制了其工程化应用。为兼顾低热膨胀特性与结构力学性能,碳纤维增强碳化硅(carbon fiber reinforced silicon carbide, C/SiC)复合材料成为超稳结构的优选方案^[7]。然而,C/SiC 陶瓷基复合材料制备周期长、加工难度大,材料批次一致

性和工艺成熟度对结构热稳定性的影响仍需通过地面试验验证。因此, 在 C/SiC 超稳结构完成制备前, 采用几何构型、安装接口与测量光路等效的殷钢件替代, 先期完成测量链路验证与系统性能标定, 是验证测量方法、保障研制进度的关键环节。

国内外围绕空间引力波探测载荷支撑结构的尺寸稳定性与热形变测量已开展大量研究。Sanjuán 等针对 SiC 望远镜支撑结构进行了室温和低温环境下的尺寸稳定性测试, 验证了低膨胀陶瓷材料用于空间引力波探测望远镜支撑结构的可行性, 但测量对象仅限于结构本体, 未将光纤链路在安装界面纳入测量链路, 也未对各噪声来源进行分解^[4]。Sang 等采用光纤干涉仪对太极望远镜 SiC 支撑框架进行了大气环境下的地面尺寸稳定性测试, 并结合数值模型对其在轨尺寸稳定性进行了预测, 但实验未置于真空环境, 噪声测试仪可靠覆盖至 10mHz 以上频段, 缺乏 1mHz 附近的低频噪声定量分析^[6]。Shen 等搭建多通道热形变干涉测量系统, 对 C/SiC 望远镜支撑框架在均匀温升和温度梯度条件下的热膨胀特性进行了测量, 为复合材料支撑结构工艺改进和热稳定性评估提供了实验依据, 但系统未置于真空与振动隔离环境, 有效噪声下限仅至 10 mHz, 且未对干涉仪本征噪声、热等效噪声与结构残余噪声进行系统级分解^[7]。近年来, 针对空间引力波星载望远镜的测试与评估技术、碳纤维复合材料支撑结构热形变优化以及结构变形引起的倾斜-长度耦合 (tilt-to-length, TTL) 噪声控制等问题, 研究人员也开展了进一步分析^[2,8-11]。研究表明, 望远镜支撑结构的热形变不仅与材料本征热膨胀系数有关, 还与结构构型、测点布置、安装界面、热边界条件及低频测量链路稳定性密切相关。

在测量方法方面, 激光干涉测量因高精度、非接触、长量程等优势, 成为超稳结构热形变与光程稳定性测量的主流技术路线。Zhao 等基于外差干涉原理设计了高共模抑制望远镜光程稳定性测量方案, 并建立了光程噪声理论模型, 指出测试环境、光学组件、干涉光路和相位采集链路均会影响光程稳定性测量结果^[12]。Luo 等针对空间引力波探测望远镜多自由度形变测量中的耦合问题开展了解耦研究和噪声分析, 说明复杂结构形变测量需要合理测点布置和系统级误差约束^[8]。

Zhang 等提出的准单片外差干涉仪和相关低频噪声研究也表明, 光纤链路、温度扰动、光路差变化和电子学慢漂移等因素均可能成为 mHz 频段位移测量的残余噪声来源^[13,14]。此外, 近期针对周期温度调制下望远镜模型非稳态热形变的研究表明, 实际热环境并非简单稳态过程, 热形变响应与扰动频率、热边界条件和结构热惯性均有关^[15,16]。因此, 在地面建立面向 mHz 频段的真空热形变测量系统时, 不仅需要关注干涉仪本身的位移读出能力, 还需要对被测结构、安装界面、反射镜、光纤链路和温控环境构成的完整测量链路进行系统标定与噪声评估。

目前, 上述研究均以被测结构本体为对象, 尚未将光纤链路、安装界面与温控环境纳入统一测量链路进行系统级标定; 在测量频段上, 现有大气环境实验的可靠覆盖频段普遍高于 10 mHz, 而引力波探测的核心噪声需求集中于 1 mHz 附近; 在噪声评估方式上, 现有工作主要给出系统总噪声水平, 尚未在系统级层面将温度波动与干涉仪自身的贡献从总噪声中分离出来, 导致主要干扰来源不明。因此, 面向 1 mHz~0.1 Hz 引力波探测频段、覆盖"被测结构+光纤链路+安装界面+真空温控"的完整测量链路等效验证, 以及在此基础上建立可用于排除非主导噪声项的系统级评估方法, 仍较为缺乏。

针对上述问题, 本文以几何构型、安装接口与测量光路等效的 4J32 殷钢样件为被测对象, 搭建真空主动温控与光纤双频激光干涉热形变测量系统, 建立温度扰动下结构热形变与干涉位移输出的系统级模型, 提出测量链路综合热膨胀系数标定方法, 完成长周期稳定性测试与 mHz 频段噪声评估; 通过将温度波动与干涉仪本征噪声从系统总噪声中分离, 明确在当前系统配置与温控水平下二者均非系统位移噪声的主导因素, 并结合误差传递机理对残余噪声来源进行识别, 为后续针对性抑制研究提供依据。

2 热形变测量方法与基本原理

2.1 温度扰动下的结构热形变模型

温度扰动会引起结构材料热膨胀或收缩, 使测量光路中的特征长度发生变化。材料线膨胀系数用于表征单位温度变化引起的相对长度变化,

可表示为:

$$\alpha(T) = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}, \quad (1)$$

式中, L 为特征长度, T 为温度, $\alpha(T)$ 为温度 T 处的线膨胀系数。当温度变化范围较小、材料线膨胀系数可取近似常数且结构处于线弹性范围内时, 沿某一测量方向的热致长度变化可近似写为

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T, \quad (2)$$

式中, ΔL 为结构长度变化量, L_0 为初始特征长度, ΔT 为温度变化量。式(2)表明, 在小温度扰动条件下, 结构热形变与温度变化可近似按线性关系处理。

实际结构的温度场通常并非完全均匀, 测量方向上的热致长度变化可进一步表示为沿光路或结构特征方向的积分形式:

$$\Delta L \approx \int_0^{L_0} \alpha(s) \Delta T(s) ds, \quad (3)$$

式中, s 为测量方向上的空间坐标, $\alpha(s)$ 和 $\Delta T(s)$ 分别为对应位置的线膨胀系数和温度变化量。当材料参数和温度变化在测量路径附近分布较为一致时, 式(3)可退化为式(2)的集中参数形式。本文后续系统热响应标定中, 采用测量光路附近多测点温度均值表征该区域的等效温度变化。

2.2 光纤双频干涉位移测量原理

本文采用光纤双频干涉方法对测量头与平面反射镜之间的相对位移进行读出, 其基本光路如图 1 所示。

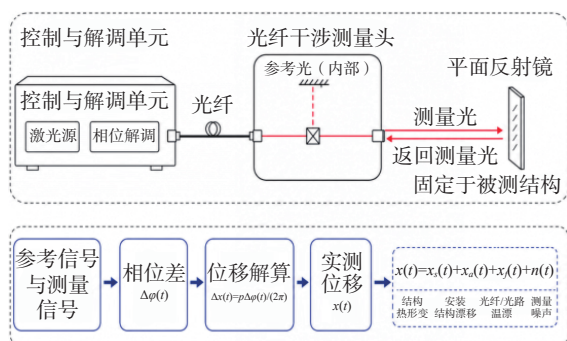


图 1 光纤双频干涉位移测量原理示意图

Fig. 1 Schematic of fiber dual-frequency interferometric displacement measurement

双频激光经由光纤传输至测量头后分为参考光与测量光; 测量光入射至固定在被测结构上的

反射镜并原路返回, 光程变化会引入相位差, 解调单元通过外差相位解算求解得到轴向相对位移。

平面镜构型下, 干涉仪输出位移为相位变化的等效长度:

$$x(t) = \frac{p}{2\pi} \Delta\phi(t), \quad (4)$$

式中, $x(t)$ 为相对于初始时刻的位移变化, $\Delta\phi(t)$ 为解调得到的相位变化, λ 为激光波长, p 为干涉仪位移信号周期。本文所用平面镜测量头采用 4 倍光学细分, 对应位移信号周期 $p = \lambda/4$ 。

干涉仪输出为测量头与反射镜间轴向相对位移, 实测位移可表示为:

$$x_{meas}(t) = x_T(t) + x_{res}(t), \quad (5)$$

式中, $x_{meas}(t)$ 为干涉仪实测位移, $x_T(t)$ 为可由测量区域温度变化表征的热响应分量, $x_{res}(t)$ 为未被该温度变量表征的残余分量, 包括光纤相位漂移、安装结构低频松弛、电子学慢漂移及随机噪声等贡献。该表达用于界定位移读数的系统边界。已有研究表明, 外差干涉系统的光纤热相位耦合、温变光程耦合、激光频率噪声、相位读取噪声及安装结构稳定性, 均会在低频引入额外光程与位移误差^[12-13]。

3 试验系统设计

3.1 系统组成

系统以超稳结构等效样件为被测对象, 试验在高真空环境运行, 真空度优于 1.3×10^{-3} Pa, 抑制大气折射率波动与气体对流对 mHz 频段测量的干扰。系统由被测对象、位移测量子系统、测控子系统组成, 罐内部件经穿罐法兰与罐外设备连接, 系统组成如图 2 所示, 试验场景如图 3 所示。

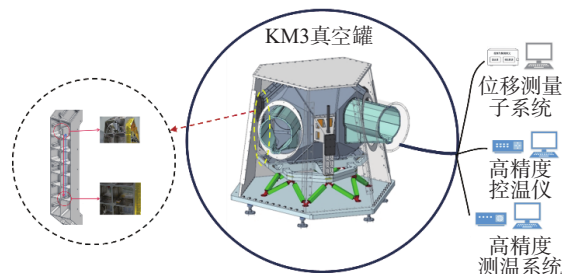


图 2 热形变测量系统总体组成示意图

Fig. 2 Overall schematic of thermal deformation measurement system

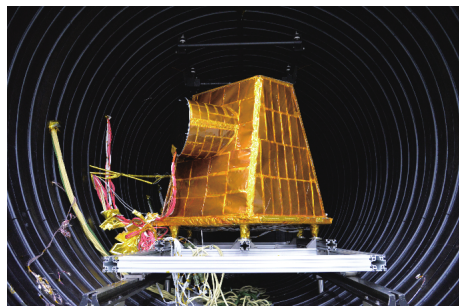


图 3 真空罐中试验场景

Fig. 3 Experimental setup in vacuum chamber

3.2 被测对象

本文试验对象为核心超稳结构殷钢等效样件,几何尺寸、安装界面及测量点位与 C/SiC 超稳结构保持一致,其结构如图 4 所示。所用殷钢牌号为 4J32,标称热膨胀系数为 $8.9 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$,结构尺寸为 $1232 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$ 。

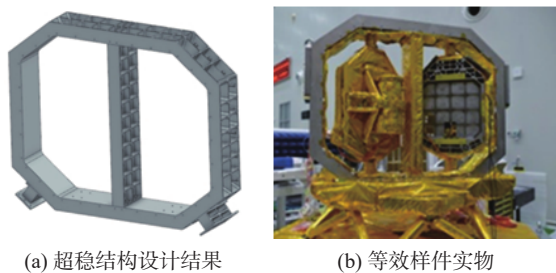


图 4 试验对象

Fig. 4 Test specimen

4J32 殷钢具有低热膨胀、材料参数稳定和加工装配成熟等特点,适合作为当前阶段测量系统验证的等效结构材料。对本批次 4J32 殷钢取两组试样开展线膨胀系数测试, $10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 范围内两组试样平均线膨胀系数分别为 $0.969 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 $0.983 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,均值为 $0.976 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。该值用于表征本批次殷钢材料的本征热膨胀特性,并作为判断系统综合热膨胀系数量级的参考。

3.3 干涉位移测量系统

位移测量系统采用 FDS-02 光纤双频激光干涉仪,由真空罐外的 FIC-02 控制器与罐内 FPIF0104R 单轴平镜测量头构成。激光经穿罐光纤传入测量头,由样件上的平面反射镜返回后,控制器完成相位解调。该布局将激光器与电子学单元置于罐外,有效减少罐内热源,便于受限空间光路集成,主要技术参数见表 1。

干涉仪测量光路如图 5 所示。FPIF0104R 测量头与平面反射镜分别安装在等效样件测量臂的

上下节点,构成单轴测量光路,测量光程 0.8 m 。该构型直接获取测量头与反射镜之间的轴向相对位移,反映等效样件、安装界面与光纤链路的整体响应,作为完整测量链路的系统输出。

表 1 FDS-02 光纤双频激光干涉仪主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of the FDS-02 fiber dual-frequency laser interferometer

参数	数值
激光波长(20°C , 标准大气压)	1550 nm
波长精度	$\leq \pm 0.1 \text{ ppm}$
波长稳定性	$< \pm 20 \text{ ppb}(1 \text{ h}); < \pm 50 \text{ ppb}(24 \text{ h})$
光束直径	$3 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$
测量量程	$0 \sim 1 \text{ m}$
光学信号周期	$\lambda/4(387.5 \text{ nm})$
测量分辨率	$0.38 \text{ nm}(4 \text{ 倍光学细分})$
系统非线性误差(SDE)	$< \pm 2 \text{ nm}(\text{速度} < 50 \text{ mm/s}, \text{信号强度} > 70\%)$
测量头热漂移系数	$< 30 \text{ nm}/^\circ\text{C}$
最大测量速度	1 m/s

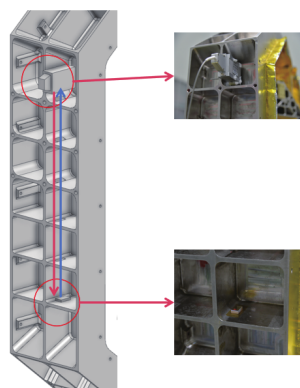


图 5 测量光路布置

Fig. 5 Measurement optical path layout

测量头与框架之间采用螺接、防松胶与硅橡胶三重固定方案,保障连接刚度并抑制长期松弛与微振动,以防止引入结构安装引起的位移测量噪声。平面反射镜为微晶玻璃材质,采用紫外固化胶粘接于镜座,确保结构耦合稳定。

为提升低频相位稳定性,光纤分段约束:罐内光纤总计 3.5 m ,沿框架侧壁每隔 20 cm 固定;核心舱舱体与穿舱法兰之间的过渡段采用 20 mm 铝管包覆并缠绕加热带,维持光纤的温度稳定性,抑制大范围温度变化与机械扰动,如图 6 所示;罐外光纤总计 2 m ,用环氧胶带每隔 30 cm 沿真空

罐壁固定,在室温下与控制器连接,其热相位耦合作为系统残余噪声项统一分析。

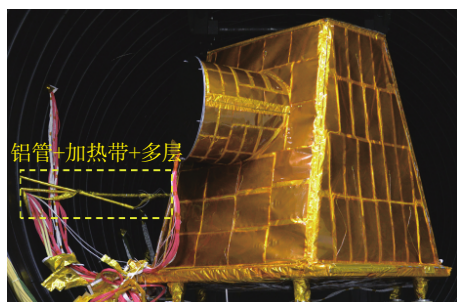


图 6 光纤走线与防护

Fig. 6 Optical fiber routing and protection

光路对准在常压装配阶段完成。测量头和平面反射镜安装面由机械加工精度提供初始对准基础,并通过可见辅助光和干涉信号幅值反馈进行微调。对准后,测量光束可稳定返回测量头接收孔径,满足长时间真空热形变测量需求。

3.4 测控温系统

测控温系统用于向超稳结构等效样件施加可控热激励,并同步记录测量区域及框架关键位置的温度变化。系统由分布式加热片、温度传感器、温度采集设备和温控单元组成,各罐内部件经穿罐电缆与罐外控制和采集设备连接。加热片布置在等效样件八边形侧壁及内部加强筋表面,共设 11 个独立控制通道,覆盖框架主要承力区域。各通道可独立调节加热功率,用于实现整体升温、自然降温及分区热激励等试验条件。加热片位置分布如图 7 所示。

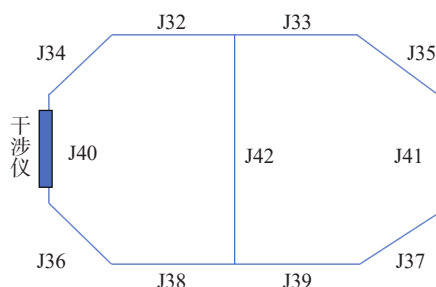


图 7 加热片位置分布示意图

Fig. 7 Layout of heater patches

温度测点共布置 15 个通道,覆盖框架顶侧、底侧、左右侧面、斜角面及内部中心分隔肋等区域,用于表征试验过程中结构温度场的空间分布。其中,CH210、CH301 和 CH302 沿干涉仪测量光路在框架左侧面自上而下布置,分别位于测

量头附近、光路中段和反射镜附近,是后续系统综合热膨胀系数标定和热等效位移噪声估算的核心温度输入。测温点位置分布如图 8 所示。

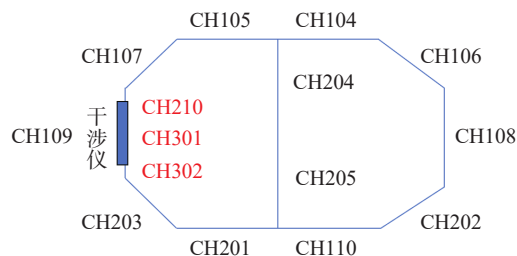


图 8 测温点位置分布示意图

Fig. 8 Layout of temperature sensing points

温度测量采用高精度 NTC 型温度传感器,温度数据采样率为 0.5 Hz。后续数据处理中,将温度数据与干涉仪位移数据按时间戳对齐,并根据分析对象选取测量路径附近温度均值或单通道温度作为代表温度输入。该布置既可记录框架整体温度变化,也可为干涉测量光路附近的局部热环境评估提供数据支撑。

4 实验结果与讨论

4.1 干涉测量稳定性分析

为评估真空热形变测量链路在 1 mHz~0.1 Hz 频段的长期测量稳定性,本文基于连续稳态工况的长时序 319 h 测量数据(如图 9 所示),按等间隔均匀选取 6 段独立稳态区间开展统计分析与频谱对比(如图 10 所示)。每段区间时长均为 10 000 s,温度波动小于 2 mK,区间分布覆盖完整测量周期,以避免单段数据的偶然性偏差,更真实反映系统长期测量一致性。

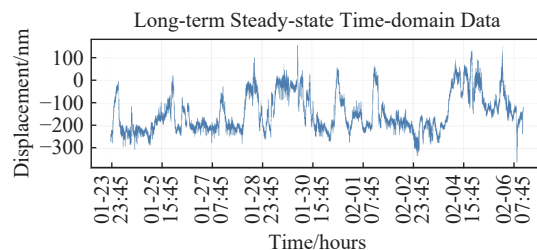


图 9 长周期稳态时域数据

Fig. 9 Long-period steady-state time-domain data

试验过程中系统维持 mK 级高精度温控与高真空环境,首先对 6 段稳态区间内的温度与时域位移数据进行同步观测,剔除整体线性趋势后统

计位移波动特征;随后采用 Welch 法分别计算各区间位移噪声幅值谱密度(ASD):每段稳态数据长度为 10 000 s,子段时长取 4 000 s,对应 4 000 点 FFT,采用 Hann 窗,相邻子段 50% 重叠,对应频率分辨率 0.25 mHz,约 4 段平均;位移时序在分段前已完成一阶线性去趋势,取功率谱密度平方根得到位移噪声幅值谱密度。对比长周期内系统噪声水平的一致性,如图 11 所示。

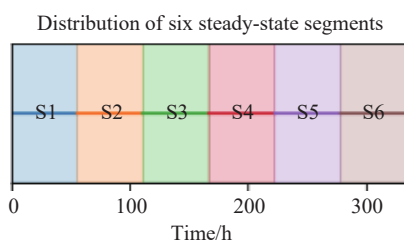


图 10 稳态区间选取

Fig. 10 Selection of steady-state intervals

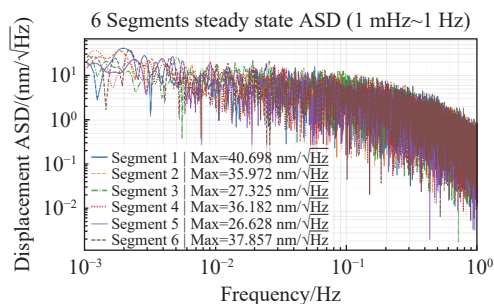


图 11 稳态区间位移噪声幅值谱密度图

Fig. 11 ASD of displacement noise in steady-state intervals

由频谱对比可见:6 段稳态数据频谱曲线重合度高、离散度小,在 1 mHz~10 mHz 关键频段噪声幅值与谱形较为一致,无明显漂移与突变。系统在 mHz 频段位移噪声幅值谱密度最优可达 $26.6 \text{ nm}/\sqrt{\text{Hz}}$,长周期连续运行一致性良好。

4.2 超稳结构等效热膨胀系数标定

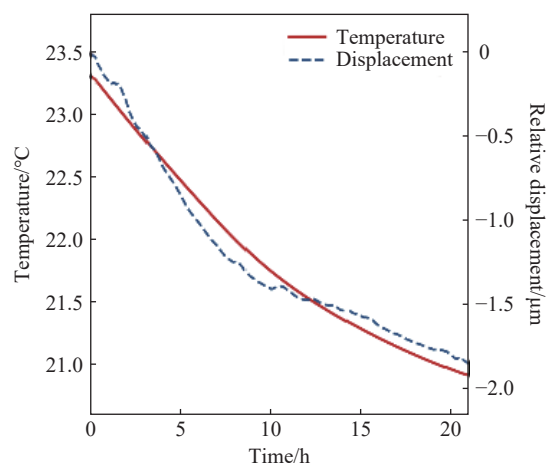
干涉仪光学组件、铠装光纤及安装结构对温度变化各具独立的热响应,其贡献与殷钢框架热形变叠加于同一位移通道,无法通过材料本征线膨胀系数直接预测。为此,本节利用真空腔体自然降温段数据对测量系统综合热膨胀系数进行整体标定。

标定数据取自约 21 h 自然均匀降温过程,三路核心测温通道(CH210、CH301、CH302)同步降温约 2.4°C ,通道间最大温差小于 0.08°C ,温度

场均匀性满足线性标定要求。对位移与温度均值做 30 min 滑动平均以滤除高频波动,再以温度均值为自变量、位移为因变量进行线性回归:

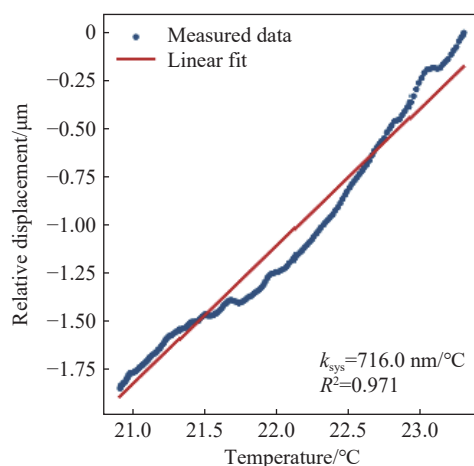
$$x = k_{\text{sys}} \bar{T} + b, \quad (6)$$

式中, x 为干涉仪位移读数, $\bar{T}$ 为三通道温度均值, k_{sys} 为测量系统温度—位移响应斜率, b 为常数项。回归结果如图 12 所示,回归斜率为 $k_{\text{sys}} = 716.0 \pm 0.5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,决定系数 $R^2 = 0.971$,线性拟合质量良好,表明该时段位移漂移主要由温度慢变驱动。



(a) 平均温度-位移变化

(a) Mean temperature-displacement variation



(b) 位移-温度线性回归

(b) Displacement-temperature linear regression

图 12 温度与位移时域变化及系统综合热膨胀系数标定结果 a) 平均温度-位移变化 b) 位移-温度线性回归

Fig. 12 Temperature-displacement evolution and system thermal expansion coefficient calibration a) Mean temperature-displacement variation b) Displacement-temperature linear regression

基于回归斜率及干涉仪往返光程 $L = 0.8 \text{ m}$,

系统综合热膨胀系数 α_{sys} 定义为:

$$\alpha_{sys} = \frac{k_{sys}}{L} = \frac{716.0}{0.8 \times 10^9} = 8.95 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}, \quad (7)$$

标定所得系统等效热膨胀系数与本批次殷钢本征值量级一致, 相对偏差约 8.3%, 将该热膨胀系数作为系统级等效参数, 用于后续热等效位移噪声估算。

4.3 噪声与误差分析

为明确位移噪声来源与系统误差构成, 采用 Welch 法计算位移噪声幅值谱密度(ASD), 结合系统综合热膨胀系数将温度波动转换为热等效位移噪声, 完成噪声贡献量化与误差源分析。

4.3.1 干涉仪本征噪声

干涉仪本征噪声采用平面镜直接粘接于干涉仪出光口、测量光程接近 0 的标定方式获取, 仅反映控制器、测量头与相位解调链路的固有读出噪声。将其与真空罐内 800 mm 实际测量光程的系统噪声频谱对比, 可清晰区分干涉仪自身噪声与测量链路附加噪声。噪声结果如图 13 所示。

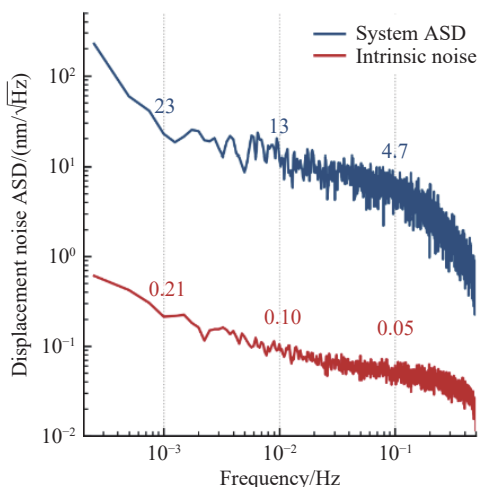


图 13 干涉仪本征噪声与系统位移噪声 ASD 对比

Fig. 13 Intrinsic interferometer noise vs. System displacement noise

由图可知, 系统位移噪声 ASD 在 1 mHz、10 mHz 和 0.1 Hz 处分别约为 23 nm/√Hz、13 nm/√Hz 和 4.7 nm/√Hz。曲线在 1 mHz 以下呈现随频率降低而上升的趋势, 说明完整测量链路在低频段仍存在慢变漂移类噪声贡献。相比之下, 干涉仪本征噪声 ASD 在对应频点分别约为 0.21 nm/√Hz、0.10 nm/√Hz 和 0.05 nm/√Hz, 整体较系统位移噪声低约两个数量级, 且谱形相对平缓, 干涉仪固有

读出噪声并非制约系统 mHz 频段位移测量稳定性的主导因素。

4.3.2 热等效位移噪声与残余噪声分析

为进一步判断稳态温控条件下温度波动对系统位移噪声的贡献, 本节利用 4.2 节标定得到的系统温度—位移响应斜率, 将温度波动转换为热等效位移噪声, 并与系统实测位移噪声和干涉仪本征噪声进行对比。

由图 14 和图 15 可知, 目标频段内热等效位移噪声占系统实测噪声的比例整体低约一个量级, 且呈现明显的频率依赖性。进一步给出热等效噪声占比随频率的分布如图 16 所示: 1 mHz 处占比约 9.3%, 3~5 mHz 区间因系统噪声相对抬升而出现局部低谷, 最低约 7.8%; 10 mHz 处回升至约 9.7%, 向高频段持续上升, 在 0.075 Hz 附近达

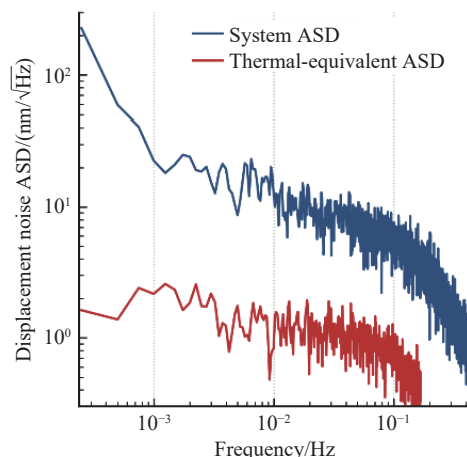


图 14 热等效位移噪声与系统位移噪声 ASD 对比

Fig. 14 Thermal-equivalent noise vs. System displacement noise

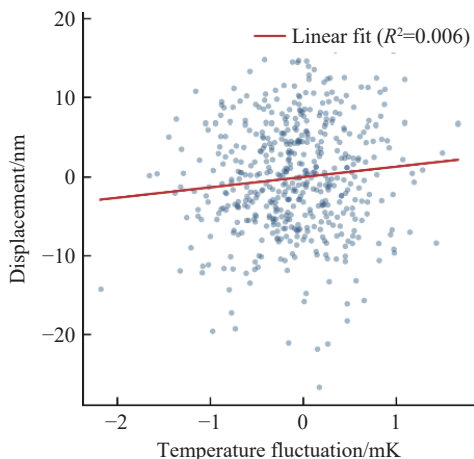


图 15 温度波动与位移波动的散点图及线性拟合结果

Fig. 15 Temperature vs. displacement fluctuation (linear fit)

到峰值约 14.1%, 0.1 Hz 处约 13.8%; 在 1 mHz~0.1 Hz 目标频段内整体处于 7.8%~14.1% 范围。经一阶去趋势后, 温度与位移波动关联的回归决定系数 $R^2 = 0.006$, 说明在当前 mK 级稳态温控条件下, 被测温度节点的温度波动并非系统位移噪声的主要来源。

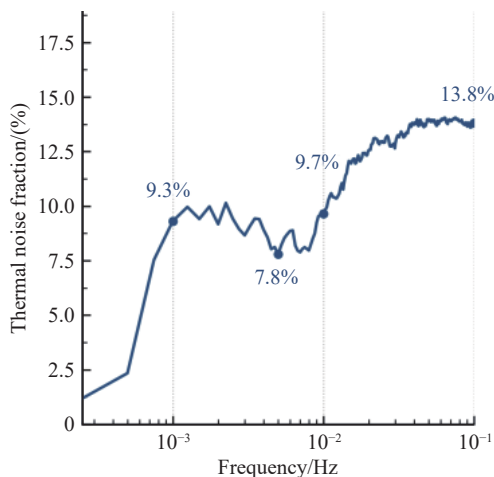


图 16 热等效位移噪声占系统实测噪声的频率依赖比例

Fig. 16 Frequency-dependent ratio of thermal-equivalent displacement noise to measured system noise

基于测量链路组成与误差传递机理开展系统误差分析, 结果表明, 系统残余位移噪声主要来源于非热致附加误差项: 一是光纤热相位耦合误差, 罐外非温控光纤段易受环境温度与机械扰动影响, 形成显著低频光程噪声; 二是安装结构低频松弛误差, 测量头、反射镜与支撑框架的界面微松弛引入慢变漂移; 三是电子学与光路残余噪声, 包括相位解调漂移、光程耦合及探测器读出噪声等。上述误差源与空间引力波探测光程稳定性测量领域的典型噪声机制相符^[12-13], 共同构成本系统噪声本底。

综上, 干涉测量系统噪声主要由测量链路附加非热噪声主导, 干涉仪本征噪声与被测节点热扰动均非制约因素。本文已完成测量链路标定、噪声定量分解与关键误差源识别, 形成完整的地面真空热形变测量与引力波探测频段噪声分析方

法。后续将针对光纤全域温控、高刚度装调工艺、主动光程噪声补偿等关键技术开展深入研究, 进一步抑制系统残余低频噪声; 此外, mHz 频段下结构热惯性与传热延迟可能引入温度-位移响应的相位滞后, 现有线性回归标定方法的适用性存在一定局限, 后续将引入热-结构耦合传递函数模型对系统热等效噪声进行更精确的建模与评估; 此外, 将引入电容式位移传感器或双干涉仪差分测量等独立手段对系统噪声水平进行交叉验证, 以进一步确认测量置信度; 在完成测量链路验证的基础上, 还将针对 C/SiC 陶瓷基复合材料与殷钢在热扩散率、界面热阻及局部热梯度响应方面的差异, 补充开展结构材料差异对噪声分解结果的影响分析, 为后续陶瓷基超稳结构高精度热形变测试与在轨性能评估提供更完善的测量与分析支撑。

5 结 论

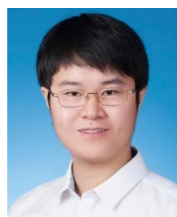
本文搭建了面向空间引力波探测超稳支撑框架的真空热形变干涉测量系统, 利用 4J32 殷钢等效样件完成全测量链路验证, 该系统可直接应用于后续陶瓷基结构测试; 文中建立了系统综合热膨胀系数标定方法, 并针对 1 mHz~0.1 Hz 频段的位移噪声完成定量分析, 系统等效热膨胀系数与本批次殷钢材料本征值偏差约 8.3%, 可准确表征测量链路整体热响应特性。稳态温控下 mHz 频段位移噪声幅值谱密度达到 $26.6 \text{ nm}/\sqrt{\text{Hz}}$, 测量系统在长周期连续运行中保持优异的低频一致性与可信度, 可支撑空间引力波探测超稳结构长期热形变测试。噪声对比分析表明, 干涉仪本征噪声幅值谱密度较系统综合测量噪声低约两个数量级, 温度波动引起的热等效位移噪声仅占系统实测噪声的 7.8%~14.1%, 二者幅值均远低于系统综合测量噪声, 并非制约 mHz 频段位移测量稳定性的主要因素。

参考文献:

- [1] BATKIS M, BERRIER J, BOYCE K, *et al.*. Telescopes for LISA: function, current status, and path forward[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2025, 42(23): 235007.
- [2] 张兰强, 曾意, 吴小虎, 等. 空间引力波星载望远镜测试与评估技术研究进展[J]. 光电工程, 2024, 51(2): 240027.
ZHANG L Q, ZENG Y, WU X H, *et al.*. Progress in the research of testing and evaluation techniques for spaceborne

- gravitational wave telescopes[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(2): 240027. (in Chinese).
- [3] 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. (in Chinese).
- [4] SANJUÁN J, KORYTOV D, MUELLER G, *et al.*. Note: silicon carbide telescope dimensional stability for space-based gravitational wave detectors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(11): 116107.
- [5] CHANG W B, WANG Y X, TAN W H, *et al.*. Earth-lunar thermal effect on the temperature stability of TianQin telescope and the suppression methods[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 67: 105816.
- [6] SANG B L, DENG X Q, PENG B, *et al.*. Dimensional stability ground test and in-orbit prediction of SiC telescope frame for space gravitational wave detection[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 21041-21047.
- [7] SHEN J, ZHAO Y, LIU H SH, *et al.*. Multi-channel thermal deformation interference measurement of the telescope supporting frame in spaceborne gravitational wave detection[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2022, 34(4): 59.
- [8] 罗健, 宋捷, 房思俊, 等. 空间引力波探测望远镜多自由度形变测量方法解耦研究与噪声分析[J]. *光电工程*, 2024, 51(2): 230211.
- LUO J, SONG J, FANG S J, *et al.*. Decoupling study and noise analysis of multi-degree-of-freedom deformation measurement method for space gravitational wave detection telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(2): 230211. (in Chinese).
- [9] LI B H, YAN Y, LUO J, *et al.*. Multi-optimization for thermal deformation of gravitational wave telescope based on CFRP characteristics[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 14943.
- [10] FANG S J, FAN W T, ZHANG R, *et al.*. Design method for the structure of a gravitational wave detection telescope with low TTL noise[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 29575.
- [11] 叶磊巧, 杜明辉, 徐鹏, 等. 空间引力波探测“太极计划”星间姿态-光程耦合噪声迭代拟合与高精度抑制方法[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(3): 583-595.
- YE L Q, DU M H, XU P, *et al.*. Iterative estimation and precision suppression of inter-spacecraft tilt-to-length coupling noise for the Taiji space gravitational wave detection mission[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 583-595. (in Chinese).
- [12] 赵凯, 范纹彤, 海宏文, 等. 望远镜光程稳定性测量方案设计及噪声理论分析[J]. *光电工程*, 2023, 50(11): 230158.
- ZHAO K, FAN W T, HAI H W, *et al.*. Design of optical path stability measurement scheme and theoretical analysis of noise in telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(11): 230158. (in Chinese).
- [13] ZHANG Y Q, GUZMAN F. Quasi-monolithic heterodyne laser interferometer for inertial sensing[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(19): 5120-5123.
- [14] 王雷刚, 云恩学, 罗鑫, 等. 空间引力波探测中超低附加相噪频综研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(3): 661-671.
- WANG L G, YUN E X, LUO X, *et al.*. Ultralow residual phase noise frequency synthesizer for space gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 661-671. (in Chinese).
- [15] WANG B J, LI X H, SUN Z N, *et al.*. Thermal deformation measurement of an aluminum alloy telescope model under periodic temperature modulation[J]. *Applied Optics*, 2025, 64(33): 9919-9924.
- [16] 曾晓强, 李磐, 董鹏, 等. 引力波探测中激光干涉量子噪声计算[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(3): 698-703.
- ZENG X Q, LI P, DONG P, *et al.*. Calculation of laser interferometric quantum noise in gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 698-703. (in Chinese).

作者简介:



邱成波 (1990—), 男, 浙江宁波人, 博士研究生, 2016 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要从事超稳结构与精密测量等方面的研究。E-mail: qiucb@microstate.com

樊汉鲲 (2001—), 男, 安徽合肥人, 硕士生, 主要从事热结构耦合分析及结构稳定性测试研究。E-mail: 2434142@tongji.edu.cn

何涛 (1989—), 男, 江西黎川人, 硕士, 高级工程师, 主要从事超静超稳航天器结构技术研究。E-mail: hetao@microsat.com

陈长永 (1995—), 男, 江苏盐城人, 本科, 工程师, 主要从事结构设计与工艺研究。E-mail: chency@microsat.com

印欣睿 (2000—), 男, 江苏扬州人, 博士生, 主要从事航天器超稳结构研究。E-mail: yinxinrui@microsat.com

杨中光 (1989-), 男, 山东潍坊人, 博士, 副研究员, 主要从事航天器自主姿态确定及总体设计等方面研究。E-mail: yangzg@microsat.com

陈超 (1978—), 男, 陕西西安人, 硕士, 副研究员, 主要从事超稳定结构优化设计研究。E-mail: superchen@nwpu.edu.cn

张永合 (1977—), 男, 山东莱西人, 博士, 研究员, 主要从事卫星任务分析与系统设计技术研究。E-mail: zhangyh@microsat.com

蔡志鸣 (1984—), 男, 浙江温州人, 博士, 研究员, 主要从事空间科学卫星系统设计研究。E-mail: caizm@microsat.com

熊丽园 (1993—), 女, 江西宜春人, 硕士, 工程师, 主要从事航天器超稳结构设计研究。E-mail: xiongly@microsat.com

冯建朝 (1989-), 男, 河北邢台人, 硕士, 高级工程师, 主要从事航天器精密测控温技术研究。E-mail: fengjc@microsat.com

赵东林 (1978—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士, 副研究员, 主要从事零膨胀新型材料制备研究。E-mail: zhaodonglin0@nwpu.edu.cn

范晓孟 (1987—), 男, 河南许昌人, 博士, 副教授, 主要从事超稳结构一体化成型技术研究。E-mail: fanxiaomeng@nwpu.edu.cn

朱振才 (1963—), 男, 山东安丘人, 研究员, 博导, 1993 年于浙江大学光电工程获得博士学位, 主要研究方向为卫星总体设计、光学精密测量等方面的研究。E-mail: zhuzc@microsat.com

