

引力波探测航天器多物理场扰动噪声建模 与指标分解

杨中光¹ 蔡志鸣^{1*} 侍行剑¹ 陈琨¹ 刘华秋¹ 郑多锦¹
韩瑞龙¹ 韩连新¹ 汤宁标^{1,2} 刘野¹ 郑珍珍¹
1 (中国科学院微小卫星创新研究院 上海市 201304)
2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 空间引力波探测太极计划对检验质量的总残余加速度噪声提出了优于 $3 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ (0.1mHz-1Hz) 的极端要求。在此严苛约束下, 航天器多物理场(包括热、磁、电、自引力等)产生的微弱扰动已成为影响该噪声性能的关键因素。本文从系统级角度出发, 对检验质量的残余加速度噪声进行了全链路分解, 并依据噪声产生机理, 将其划分为气体碰撞噪声、辐射压噪声、银河宇宙射线碰撞噪声、自引力噪声、磁扰动噪声、静电力噪声以及刚度-位移耦合噪声等, 并给出了全链路加速度噪声模型。在此基础上, 从顶层指标出发, 结合噪声模型对各项噪声进行了量化分析, 给出了各项噪声的指标分配值及相关多物理场参数的指标要求。本文构建的全链路噪声指标分解框架, 可为引力波探测航天器系统指标体系构建及多物理场耦合抑制策略制定等提供理论依据与设计参考。

关键词 空间引力波探测, 多物理场噪声, 磁扰动噪声, 静电力噪声, 自引力噪声, 刚度-位移耦合噪声

中图分类号 V19

*

Multi-physical field disturbance noise modeling and indicator decomposition for space-based gravitational wave detectors

YANG Zhongguang¹ CAI Zhiming^{1*} SHI Xingjian¹ CHEN Kun¹ LIU Huaqiu¹ ZHENG
Duojin¹ HAN Ruilong¹ HAN Lianxin¹ TANG Ningbiao^{1,2} LIU Ye¹ ZHENG Zhenzhen¹

1 (Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences,
Shanghai, 201304)

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

Abstract Taiji Program, a space-based gravitational wave detection mission, imposes an extreme requirement on the total residual acceleration noise of the test mass, demanding better than $3 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ over the frequency range of 0.1mHz to 1Hz. Under such stringent

* 国家重点研发计划项目资助 (2024YFC2207201, 2021YFC2202902)
2026-XX-XX 收到原稿, XXXX-XX-XX 收到修定稿

constraints, weak disturbances originating from the spacecraft's multi-physical fields (including thermal, magnetic, electric, and self-gravitational fields) have become critical factors affecting the noise performance. This paper presents a system-level, full-link decomposition of the residual acceleration noise of the test mass. Based on the underlying generation mechanisms, the noise is systematically categorized into gas collision noise, radiation pressure noise, galactic cosmic ray impact noise, self-gravity noise, magnetic disturbance noise, electrostatic force noise, and stiffness-displacement coupling noise, thereby establishing a comprehensive set of full-link acceleration noise models. On this basis, proceeding from the top-level requirements and utilizing the proposed noise model, a quantitative analysis of each noise component is conducted, yielding the allocated noise budget for each term, along with the corresponding specification requirements for the relevant multi-physical field parameters. The full-link noise indicator decomposition framework developed in this work can provide theoretical foundations and design references for the establishment of systematic indicators for gravitational wave detection spacecraft, and the formulation of multi-physical field coupling suppression strategies.

Key words Space-based gravitational wave detection, Multi-physical field noise, Magnetic disturbance noise, Electrostatic force noise, Self-gravity noise, Stiffness-displacement coupling noise

0 引言

空间引力波探测旨在捕捉 0.1mHz-1Hz 频段的引力波信号, 揭示超大质量黑洞并合、极端质量比旋近等重大天体物理过程^[1]。该频段的引力波信号探测, 需要探测器系统具备优于 10^{-21} 量级的应变探测灵敏度^[2-4]。目前, 空间引力波探测任务的典型代表有欧洲航天局与美国国家航空航天局合作的激光干涉空间天线(LISA)^[5]、中国的太极(Taiji)^{[6][7]}和天琴(TianQin)计划^[8]。为实现探测灵敏度要求, 这些计划均采用三星编队激光干涉测量技术, 通过探测相距十万至百万公里的两个自由悬浮的检验质量之间的皮米级距离波动, 实现引力波信号探测^[9-11]。

面对上述皮米级距离波动测量的挑战, 必须将激光干涉链路各类噪声与检验质量残余加速度噪声控制在极低水平。以太极计划为例, 要求检验质量敏感轴方向总残余加速度噪声低于 $3 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ (0.1mHz-1Hz)^[12], 总光程噪声低于 $8 \times 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[13-14]。这一严苛要求使得探测系统成为一个由航天器多物理场与激光干涉测量(含望远镜)^[15-16]、惯性传感器^[17-19]、无拖曳控制^[20-22]深度耦合的复杂系统。特别是惯性传感器内部的检验质量残余加速度噪声, 其中航天器内部多物理场(温度、磁、电、自引力等)^[23-26]产生的微弱扰动, 已经成为制约该项噪声性能提升的关键瓶颈。

航天器在轨运行期间, 检验质量并非处于理想的完全自由悬浮状态。虽然

采用以惯性传感器及微牛级推力器为核心的无拖曳控制方法，对太阳风、太阳光压等非保守力进行了高精度扰动抑制，但是检验质量仍受到航天器多种物理场的综合扰动。根据已有研究，这些扰动涵盖了自引力扰动噪声^{[27][28]}、电磁力噪声^{[29][30]}、辐射压力噪声以及粒子碰撞噪声等^{[31][32]}。欧洲团队对于残余加速度噪声模型^[33]有着深厚的研究积累，构建了磁场噪声、静电噪声、宇宙射线碰撞噪声、热噪声、自引力噪声、刚度-位移耦合噪声等残余加速度噪声模型，形成了加速度噪声分析软件^[34]，并发射了 LISA Pathfinder 航天器对其中的噪声模型进行了验证。LPF 在轨最终实现了 $10^{-15}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 级的高精度残余加速度验证^[35]。但是考虑到 LPF 航天器的结构形式与最终引力波探测任务差异较大，且一些动态影响因素尚未考虑，因此噪声结果仍存在局限性。国内研究亦面临类似挑战。华中科技大学针对惯性传感器中检验质量直接受到的外部扰动进行了建模与分析，包括电-磁噪声、温度相关噪声以及碰撞噪声等^{[36][37]}。同时，国科大杭州高等研究院还对此提出了基于 Noise2Noise 无监督学习的广谱随机噪声抑制方法，对惯性传感器噪声进行了有效抑制^[38]；中国科学院微小卫星创新研究院联合西北工业大学等高校围绕无拖曳控制对各项扰动进行了建模与分析研究^{[39][40]}。

本文结合空间引力波探测计划需求，从系统级角度出发，对引力波探测航天器中检验质量的残余加速度噪声进行全链路分解，阐述了各项噪声的产生机理，形成了全链路残余加速度噪声模型。在此基础上，结合太极计划对检验质量残余加速度噪声的顶层指标要求，对各项噪声及相关物理场参数进行了量化分析与指标分配。所搭建的残余加速度噪声指标分解框架可为引力波探测航天器系统设计与工程实施提供参考依据。

1 多物理场噪声分解

在空间引力波探测在轨科学测量模式下，引力参考传感器与无拖曳控制协同运行，形成高精度干扰抑制闭环，其核心目标是保障惯性基准部件——检验质量能够在仅受引力作用的条件下沿测地线运动。依据噪声来源与产生机理，可将检验质量的残余加速度噪声进行逐项分解，主要包括电极笼内残余气体分子碰撞噪声、辐射压力噪声、银河宇宙射线撞击噪声，磁场、电场和自引力场等多物理场波动引起的扰动加速度噪声，以及无拖曳控制后位移残差与系统等效刚度耦合产生的噪声（简称刚度-位移耦合噪声）。其中，系统等效刚度主要

由静电刚度、自引力刚度、磁刚度等构成，其与位置残差的相互作用会显著影响观测频段的噪声水平。

检验质量的残余加速度噪声进行全链路分解后，主要噪声项如图 1 所示。

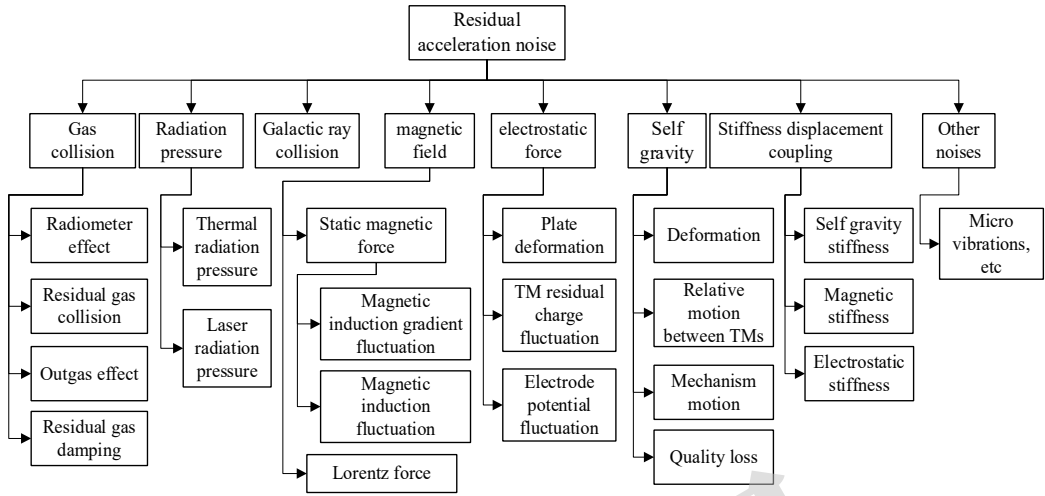


图 1 残余加速度噪声分解

Fig. 1 Decomposition of residual acceleration noise

2 多物理场噪声模型

本节主要结合噪声产生机理，从系统级角度，给出了航天器多物理场对检验质量的扰动加速度噪声模型，并以太极计划为例，对各项噪声进行了量化分析。

2.1 气体碰撞噪声

电极笼与检验质量间的空隙内残留的气体分子及材料放气效应等产生的气体分子，与检验质量相互作用产生的噪声为气体碰撞噪声。主要包括残余气体碰撞噪声、残余气体阻尼噪声、出气效应噪声以及辐射计效应噪声。

2.1.1 残余气体碰撞噪声

空间引力波探测航天器位于高度真空的外太空环境，由于地面气体残留及材料出气效应等因素影响，电极笼与检验质量间的空隙内会存在残余气体，这些残留的气体分子对检验质量的随机碰撞会引起杂散加速度，碰撞不是一个连续的过程，噪声功率谱为白噪声。其引起的加速度噪声可以通过下式^[36]表示：

$$\tilde{a}_{rg} = \frac{1}{m_{TM}} (3p_0 A)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2mkT_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}}$$

11* MERGEFORMAT ()

式中， m_{TM} 为检验质量的质量大小， m 为残留气体分子的质量， k 为玻尔兹曼常

量， T_0 为电极笼内平均温度， A 为检验质量块单面的面积， P_0 为电极笼内残余气体分子压强。当检验质量重 1.95kg，边长为 46mm，平均温度为 293K 时，假设电极笼内残余气体为氮气，压强不超过 10^{-5}Pa ，则残余气体碰撞引起的加速度噪声大小优于 $4.27 \times 10^{-16} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.1.2 残余气体阻尼噪声

当检验质量相对电极笼发生运动时，周围的残余气体会对检验质量的运动产生阻尼作用。若检验质量相对电极笼在敏感轴 X 方向的运动速度为 $\vec{v}_x$ ，则运动方向上总的气体阻尼导致的检验质量加速度噪声由两部分组成，即运动方向上前后面受到气体碰撞的合加速度噪声，以及四个侧面在运动方向上阻尼产生的加速度噪声。

运动方向上前后面受到气体碰撞的加速度噪声可以通过下式表示：

$$a_{v_{x,F}} = -\frac{4p_0 A}{m_{TM}} \left(\frac{2m}{\pi k T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \vec{v}_x \quad 22 \setminus * \text{MERGEFORMAT } ()$$

每对侧面在运动方向上阻尼产生的加速度噪均可以表示为如下形式：

$$a_{v_{x,S}} = -\frac{2p_0 A}{m_{TM}} \left(\frac{2m}{\pi k T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \vec{v}_x \quad 33 \setminus * \text{MERGEFORMAT } ()$$

根据上述结果，我们可以得到运动方向上总的气体阻尼导致的检验质量加速度噪声为^[41]：

$$a_{v_x} = a_{v_{x,F}} + 2a_{v_{x,S}} = -\frac{8p_0 A}{m_{TM}} \left(\frac{2m}{\pi k T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \vec{v}_x \quad 44 \setminus *$$

MERGEFORMAT ()

当电极笼内气体压强不超过 10^{-5}Pa ，相对运动速度不超过 $10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 时，则相对运动方向上产生的阻尼加速度噪声大小优于 $2.4 \times 10^{-18} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.1.3 出气效应噪声

当检验质量和电极笼处在高真空环境下，材料会产生出气效应，此时材料中溶解的气体分子会发生扩散解溶或材料表面吸附的气体分子会产生脱附等。其中，气体分子脱附的速率与温度高低密切相关，电极笼出气造成检验质量的加速度噪声^[42] $a_{O/G}$ 可以表示为如下形式^[42]

$$a_{O/G} = \frac{C_{O/G} p_{gas} A}{m_{TM} T_0} \delta T$$

55* MERGEFORMAT ()

其中 $C_{O/G}$ 是出气因子，和电极笼几何形状、与检验质量间隙、电极笼内壁孔分布等有关。 p_{gas} 表示电极笼内由出气效应产生的气体压强。当电极笼内出气效应产生的气体压强不超过 10^{-6}Pa ，温度波动不超过 $10\mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ，出气因子取值为 10。则加速度噪声大小优于 $3.7\times 10^{-16}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.1.4 辐射计效应噪声

由于电极笼存在温度不均匀性，残留气体分子吸附到电极笼后与其达到热平衡，再次以克努曾分布释放时，不同温度区域气体分子的速率分布不同，对检验质量碰撞传递的动量不同，由此残留气体分子对检验质量的随机碰撞与温度波动耦合效应产生加速度扰动，如图 2 所示。

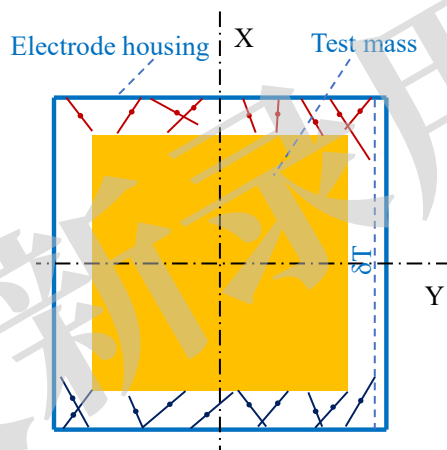


图 2 辐射计效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the radiometer effect

一般来说，只要检验质量导热足够好，其各处温度相同，则从检验质量块上下表面重新逸出的气体对检验质量不引起附加作用力。又由于克努曾效应，碰撞为非弹性碰撞，因而可以只计算从电极笼电极板表面逸出的气体对于检验质量的作用力。于是可以得到辐射计效应引起的检验质量残余加速度 a_{TM} 表达式为^{[36][41]}

$$a_{TM} = \frac{p_0 A}{4m_{TM} T_0} \delta T$$

66* MERGEFORMAT ()

式中， δT 为相对的两电极板间的温差。实际应用中，需加入有限环境修正系数。当电极笼内气体压强不超过 10^{-5}Pa ，温差不超过 $10\mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 。则加速度噪声大小

优于 $9.26 \times 10^{-17} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.2 辐射压噪声

检验质量受到的辐射压噪声主要包括热辐射压噪声与光辐射压噪声，分别是由温度波动和光功率波动引起的。

2.2.1 热辐射压噪声

在惯性传感器内部，电极笼结构因内部的温度场动态变化，会产生热致辐射压强作用在检验质量表面，引入检验质量的残余加速度噪声。当按全反射计算，热辐射压导致的检验质量加速度噪声大小 a_{tr} 可以近似表示为如下形式 [39,43,44]：

$$a_{tr} = \kappa_{tr} \frac{8\sigma A}{3cm_{TM}} T_0^3 \delta T$$

77* MERGEFORMAT ()

式中， c 为光速， σ 为斯特藩常量， κ_{tr} 为修正系数。当温度波动为 $10 \mu\text{K} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ，加速度噪声大小约 $1.4 \times 10^{-16} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。此外，当上下电极板间存在常偏温度梯度时，若温度梯度为 1mK ，则常偏加速度大小约为 $1.4 \times 10^{-14} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2.2.2 光辐射压噪声

根据引力波的任务要求，检验质量受到光照主要分为两部分。第一部分来源于引力波测量所使用的激光干涉仪，根据激光干涉测量原理，可知用于干涉测量的激光需要垂直照射到检验质量其中一个面上，这就导致了在检验质量的表面产生激光辐射压力，进而在检验质量上产生加速度，同时当照射在检验质量上的激光功率发生波动时，会引起光压的波动，加速度亦会发生变化；第二部分来源于电荷管理中用于电荷清除的紫外照射灯，当紫外照射灯照到检验质量时同样会产生光压，光照功率极小，一般不超过 10nW 级，同时考虑到电荷放电策略，这里暂不考虑该部分光压。因此，针对光致加速度噪声，我们这里只考虑激光干涉仪产生的光压。根据激光光压产生的加速度效果，我们将干涉仪激光光压产生的加速度扰动分为两部分：第一部分为激光平均功率带来的常值偏置加速度，第二部分为激光功率变化带来的加速度扰动噪声。

1) 激光平均功率带来的常值偏置加速度

设入射到检验质量的激光平均功率为 P_{LasTM} ，按照全反射计算，根据光压与光功率的关系，可以得到检验质量因激光照射受到的摄动加速度为

$$\mathbf{a}_{LP1,0} = -\frac{2P_{LasTM}}{m_{TM}c} \mathbf{e}_{Las}$$

88* MERGEFORMAT ()

e_{Las} 表示激光入射光光源方向。设入射到检验质量的激光功率为 0.1mW，则激光照射带来的常值偏置加速度不超过 $3.4 \times 10^{-13} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2) 激光功率变化带来的加速度扰动噪声

激光输出中的强度涨落会引起激光功率的变化，从而导致检验质量受到的激光光压产生波动。于是可得激光功率不稳定性造成检验质量的加速度噪声模型 $a_{LPI,1}$ 表达式为

$$a_{LPI,1} = -\frac{2P_{LasTM}\eta_{RPN}}{m_{TM}C}e_{Las} \quad 99 \setminus * \text{MERGEFORMAT } ()$$

式中， η_{RPN} 是激光器相对功率噪声，单位 $\text{Hz}^{-1/2}$ 。当激光器相对功率噪声为 $0.001 \text{Hz}^{-1/2}$ ，则加速度噪声大小约 $3.4 \times 10^{-16} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.3 银河射线碰撞噪声

受航天器所处的空间环境影响，宇宙中的高能射线会穿透航天器撞击到内部惯性传感器的检验质量上，从而对检验质量产生加速度噪声。该噪声同残余气体碰撞噪声类似，假设撞击过程为泊松过程，可以用如下公式来表示宇宙射线撞击引起的加速度扰动噪声^[36]：

$$\tilde{a}_p = \frac{\sqrt{4m_p E_{CR} \lambda}}{m_{TM}} \quad 1010 \setminus * \text{MERGEFORMAT } ()$$

式中， λ 为单位时间内入射到检验质量上的粒子数， E_{CR} 是单位粒子沿某一方向入射到检验质量的能量， m_p 为质子的质量。空间环境高能粒子主要成分为质子，高能粒子要穿过航天器打到检验质量上，一般需要能量达到百兆电子伏特以上。当粒子能量为 400MeV，单位时间内入射到检验质量上的粒子数为每秒 50 个时。则加速度噪声大小约 $2.4 \times 10^{-18} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.4 磁场噪声

航天器对检验质量的磁场噪声主要包括静磁力噪声和洛伦兹力噪声。其中静磁力噪声是由磁场波动引起的，洛伦兹力噪声是由携带残余电荷的检验质量在磁场中运动引起的。

2.4.1 静磁力噪声

设检验质量所处位置的磁场的磁感应强度为 B ，检验质量的磁矩为 m ，则检验质量受到的静磁力可以用下式表示：

$$\mathbf{F}_{sm} = \nabla(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B})$$

1111* MERGEFORMAT ()

检验质量的磁矩可以分为剩磁矩和感应磁矩两部分；检验质量处的磁场包括两部分，一部分为航天器磁场，另一部分为行星际磁场。记 $\mathbf{m}_r$ 为检验质量的剩磁矩，检验质量的磁化率为 χ_{TM} ， $\mathbf{B}_s$ 表示航天器磁场， $\mathbf{B}_i$ 表示星际磁场， V 表示检验质量体积，真空磁导率为 μ_0 ，于是有

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{sm} = & \nabla \mathbf{m}_r \cdot \mathbf{B}_s + \nabla \mathbf{m}_r \cdot \mathbf{B}_i + \mathbf{m}_r \cdot \nabla \mathbf{B}_s + \mathbf{m}_r \cdot \nabla \mathbf{B}_i \\ & + \frac{2\chi_{TM}VB_s}{\mu_0} \nabla B_s + \frac{2\chi_{TM}VB_i}{\mu_0} \nabla B_i + \frac{2\chi_{TM}V}{\mu_0} \nabla(\mathbf{B}_s \cdot \mathbf{B}_i) \end{aligned}$$

1212*

MERGEFORMAT ()

对于检验质量，可以近似认为检验质量的剩磁矩以及星际磁场不存在梯度。

于是可以得到检验质量受到的静磁力扰动加速度 $\mathbf{a}_{sm}$ 的近似表达式为：

$$\mathbf{a}_{sm} \approx \frac{1}{m_{TM}} \left(\mathbf{m}_r \cdot \nabla \mathbf{B}_s + \frac{2\chi_{TM}VB_s}{\mu_0} \nabla B_s + \frac{2\chi_{TM}V}{\mu_0} \nabla(\mathbf{B}_s \cdot \mathbf{B}_i) \right)$$

1313*

MERGEFORMAT ()

记检验质量磁化率为常量，磁场的波动引起的静磁力扰动噪声可以写为如下形式：

$$\tilde{\mathbf{a}}_{sm,logF} \approx \frac{1}{m_{TM}} \left(\mathbf{m}_r \cdot \nabla \mathbf{B}_s + \frac{2\chi_{TM}V}{\mu_0} \left(\widetilde{B_s} \nabla B_s + B_s \widetilde{\nabla B_s} + \widetilde{\nabla \mathbf{B}_s} \cdot \mathbf{B}_i + \nabla \mathbf{B}_s \cdot \widetilde{\mathbf{B}_i} \right) \right)$$

1414\

* MERGEFORMAT ()

式中， $\widetilde{\nabla B_s}$ 表示检验质量处航天器磁场的磁感应强度梯度大小的波动； $\widetilde{B_s}$ 是检验质量处航天器磁场的磁感应强度大小的波动； $\widetilde{\mathbf{B}_i}$ 是检验质量处星际磁场的磁感应强度大小的波动。根据上述公式，可以看出静磁力扰动噪声主要由检验质量处航天器磁场的磁感应强度波动及其梯度波动、星际磁场的磁感应强度波动引起的。

当检验质量的磁化率为 3×10^{-6} ，剩磁矩为 $2 \times 10^{-8} \text{A} \cdot \text{m}^2$ ；检验质量处航天器磁场的磁感应强度 $10 \mu\text{T}$ ，磁感应强度波动 $650 \text{nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ，磁感应强度梯度 $5 \mu\text{T/m}$ ，磁感应强度梯度波动 $25 \text{nT} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ；行星际磁场的磁感应强度为 5nT ，磁感应强度波动不超过 $5 \text{nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。由此可以计算得到各项磁场扰动噪声：航天器磁场的磁感应强度波动引起的噪声优于 $7.8 \times 10^{-16} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ；航天器磁场的磁感应强度梯度波动引起的噪声优于 $3.2 \times 10^{-16} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ；行星际磁场的磁感

应强度波动引起的噪声优于 $6 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.4.2 洛伦兹力噪声

惯性质量上残余电荷的产生来源主要由两个。第一种来源是当测试质量与锁紧机构分离时，由接触电势差产生的接触带电，使得测试质量存在残余电荷。第二种来源是空间中的高能粒子撞击测试质量，带电高能粒子的沉积以及撞击过程中产生的二次电子会给测试质量充电。电荷的沉积是宇宙射线随机到达的结果，根据相互作用过程的随机性质，每次与检验质量相互作用后都会沉积不同数量的电荷。电荷在检验质量上的沉积主要取决于二次电子的产生和 TM 的几何形状。洛伦兹力扰动是残余电荷对检验质量产生的一项主要扰动。具体如下：

洛伦兹力对检验质量的扰动力 F_L 表达式为

$$F_L = Q_{TM} v \times B$$

1515* MERGEFORMAT ()

根据上述公式可以得到检验质量所受到的洛伦兹力为

$$F_L = Q_{TM} (v_{TM}^I \times B_i + v_{TM}^G \times B)$$

1616* MERGEFORMAT

()

其中 Q_{TM} 是检验质量的电荷量， v_{TM}^I 是检验质量在惯性坐标系内的速度， v_{TM}^G 是检验质量在电极笼坐标系内的速度； B 是检验质量处的磁感应强度； B_i 是星际磁场的磁感应强度。由于检验质量相对电极笼的运动速度极小，因此上述模型可以简化为

$$a_L = \frac{Q_{TM}}{m_{TM}} v_{TM}^I \times B_i$$

1717* MERGEFORMAT ()

由此可以得到电荷波动等对检验质量的洛伦兹力加速度扰动噪声，可以近似表示为如下形式：

$$\tilde{a}_L \approx \frac{1}{m_{TM}} \left(\widetilde{Q_{TM} v_{TM}^I \times B_i} + Q_{TM} \widetilde{v_{TM}^I \times B_i} + Q_{TM} v_{TM}^I \times \widetilde{B_i} \right)$$

1818*

MERGEFORMAT ()

设检验质量电荷量不超过 10^{-12} C ，检验质量的电荷量波动不超过 $10^{-15} \text{ C} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ，检验质量在惯性系内的速度取值 30 km/s ，行星际磁场的磁感应强度取值 5 nT ，磁感应强度波动取值 $5 \text{ nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。可以得到检验质量受到的洛伦兹力扰动噪声不超过 $8 \times 10^{-17} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.5 静电力噪声

检验质量与电极笼电极板之间的电场作用是对检验质量加速度的另外一项主要扰动，为静电力扰动噪声。被电极包围的导电测试质量可以被认为是一组电容器，测试质量形成一个共同的中心电极。这里只考虑检验质量块与电极笼上所有电极板形成的电容（暂不考虑极板框架与检验质量、极板之间的电容，以及极板之间的电容），设电极笼上第 i 个电极板相对于测试质量的电容为 C_i ， V_i 表示电极笼上第 i 个电极板的电势。 V_{TM} 表示检验质量的电势，包括电极笼上所有电极产生的感应电势 V_{ind} 和检验质量所带净电荷 Q_{TM} 所产生的电势 V_Q 。设电势不变，以检验质量相对航天器沿着 x 方向移动位移 Δx 为例，则静电力做的功等于所有电容储存的总能量的变化。记 $C_{Total} = \sum_i C_i$ 表示所有电极和测试质量之间电容的总和，检验质量的电荷和周围电极板上电荷的相互作用产生的加速度可以用下式表示^[25]：

$$a_{ex} = \frac{-1}{2m_{TM}} \left(\sum_i \frac{\partial C_i}{\partial x} (V_{ind} - V_i)^2 + \frac{2Q_{TM}}{C_{Total}^2} \frac{\partial C_{Total}}{\partial x} \sum_i C_i V_i - \frac{2Q_{TM}}{C_{Total}} \sum_i \frac{\partial C_i}{\partial x} V_i + \frac{Q_{TM}^2}{C_{Total}^2} \frac{\partial C_{Total}}{\partial x} \right)$$

1919*

MERGEFORMAT ()

由于极板框架和极板与航天器固连，当不考虑检验质量与极板等敏感部件的加工及安装误差时，各电容的变化将仅与检验质量相对航天器的六自由度位移 $\mathbf{x}_{TM} = (x, y, z, \theta, \eta, \varphi)$ 以及极板形变有关。因此，敏感轴方向上的扰动加速度是关于检验质量的六自由度位移、极板形变、检验质量残余电荷以及各电极极板电势的物理量。其中，检验质量六自由度位移变化引起的扰动噪声为静电刚度耦合噪声，即无拖曳控制位移波动与静电刚度耦合在敏感轴方向产生的库仑力扰动噪声，归入 2.7 节刚度耦合噪声统一分析；极板形变波动引起的扰动噪声主要是温度变化引起，导致电容的波动从而在敏感轴方向产生库仑力扰动加速度噪声；检验质量的残余电荷波动引起的静电力噪声主要由检验质量充电引起；电极笼上电极板的电势变化主要由电子学噪声、驱动信号分辨率、静电控制指令引起，该波动引起的静电力变化亦会通过检验质量的面型及装调误差等因素耦合到敏感轴方向。静电力扰动加速度噪声设计不超过 $1 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.6 自引力噪声

根据万有引力定律，将检验质量受到的航天器本体质量引起的引力定义为自引力，其大小变化引入检验质量残余加速度噪声，是一项占比较高的噪声。检验质量受到的自引力噪声与航天器内部质量分布相关，且与检验质量相对运动、结构热形变、在轨质量损耗（燃料消耗、放气等引起）、机构运动等多种因素耦合。

根据引力波探测方案，可以将每个检验质量近似为密度均匀的立方体（实际为带凹槽的类立方体）， $P(x, y, z)$ 是正方体内部任意一点，在点 $Q(x_0, y_0, z_0)$ 处存在一质量为 M 的点质量，该点质量对检验质量的引力计算公式如下^[27]：

$$F = GM\rho \iiint_V \frac{(x_0 - x)(y_0 - y)(z_0 - z)}{\left[(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2\right]^{1.5}} dx dy dz$$

2020*

MERGEFORMAT ()

式中， G 为引力常量； ρ 为检验质量的均匀密度； V 为检验质量的三维体积空间。由此可以计算得到有限元各网格单元对检验质量处的引力加速度贡献之和，从而获取整体航天器的自引力场。

设检验质量受到的自引力大小为 F_{SG} ，则检验质量受到的自引力加速度 a_{SG} 为：

$$a_{SG} = \frac{F_{SG}}{m_{TM}}$$

2121* MERGEFORMAT ()

式中 $a_{SG} = (a_{SG,x}, a_{SG,y}, a_{SG,z})^T$ 。其中检验质量受到的自引力 F_{SG} 为关于检验质量的运动、形变、航天器质量、机构运动等状态变量的函数，设这些状态变量组成的矢量用 x 表示，对上式进行一阶泰勒展开，可得自引力加速度可以通过下式进行近似表示。

$$a_{SG} = a_{SG}(0) + \left. \frac{\partial a_{SG}}{\partial x^T} \right|_0 x + O(x)$$

2222*

MERGEFORMAT ()

式中， $a_{SG}(0)$ 表示各项状态变量处于基准状态时，检验质量受到的自引力加速

度； $\left. \frac{\partial a_{SG}}{\partial x^T} \right|_0$ 表示自引力加速度关于 x 在基准状态处的一阶偏导数； $O(x)$ 表示高阶小量。根据分解结果，检验质量受到的自引力扰动主要由常值偏置以及检验质量运动、形变、航天器质量损耗、机构运动等动态因素引起。

1) 常值偏置

当各项状态变量处于基准状态时（比如检验质量位于电极笼中心位置、温度为控制目标温度等），航天器整星质量对检验质量的自引力一般不为 0。其大小 a_{SG0} 可以用下式表示：

$$a_{SG0} = a_{SG}(0) \quad 2323 \backslash * \text{MERGEFORMAT} ()$$

根据引力波探测航天器要求， a_{SG0} 需不大于 $10^{-10} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 量级。但是受到 MOSA 运动、燃料消耗等各种运动部件因素影响，自引力偏置 $a_{SG}(0)$ 会不断发生变化，在设计阶段及数据处理时需要考虑该偏置及其变化并进行补偿。

2) 检验质量相对电极笼运动

当检验质量相对电极笼运动时，首先由于自引力场的不均匀性，其相对检验质量平衡位置的梯度与检验质量位移波动耦合，会对检验质量产生自引力扰动加速度，该项扰动在这里称作自引力刚度耦合噪声，该项噪声归入 2.7 节刚度耦合噪声统一分析；其次两检验质量之间的相对运动亦会带来自引力噪声，当检验质量相对电极笼的位移波动 $\tilde{x}$ 不超过 $3 \text{nm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 时，可以通过下式估算该噪声：

$$\tilde{a}_{SG1} \approx -\frac{4Gm_{TM}}{r_{TM}^3} \tilde{x} \quad 2424 \backslash * \text{MERGEFORMAT} ()$$

式中， r_{TM} 为两检验质量之间的距离。当两检验质量距离 0.2m 时，该噪声大小不超过 $2 \times 10^{-16} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

3) 形变致自引力噪声

航天器结构形变主要由应力释放、微推推力、机构运动、整星温度波动、材料放气、辐射损伤等引起，特别是靠近敏感结构附近包括真空腔等部件的热形变，形变会导致整星质量分布发生变化，从而引起自引力波动，该波动大小需要结合航天器结构机构、温度场与自引力场等联合分析。形变引起的自引力数值大小，可根据航天器方案中的质量分布信息和形变信息得到。航天器形变引起的敏感轴向自引力噪声大小设计 $\tilde{a}_{SG2}$ 不超过 $1 \times 10^{-16} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

4) 航天器质量损耗

航天器质量损耗主要源于推进剂消耗，其次为材料放气等长期效应。质量损耗通过质量减少直接效应影响自引力场，使得检验质量受到的自引力产生时变漂移，虽然采用补偿质量块阵列、对称消耗策略、在轨辨识等手段，可将该漂移控制在可接受范围内，但是仍有残留自引力噪声。航天器质量损耗引起的

敏感轴向自引力噪声大小设计 $\tilde{a}_{SG3}$ 不超过 $5 \times 10^{-16} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

5) 机构运动

空间引力波探测航天器中，机构运动是导致自引力时变的主要因素之一，比如可移动光学组件运动、超前指向机构等。他们通过部件的运动改变整星的质量分布，从而使得检验质量受到的自引力产生波动。虽然通过设计、补偿和控制策略，可将机构运动引起的自引力波动控制在可接受范围内，但依旧有残留自引力噪声。航天器机构运动引起的敏感轴向自引力噪声大小设计 $\tilde{a}_{SG4}$ 不超过 $5 \times 10^{-16} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.7 刚度-位移耦合噪声

引力波探测航天器惯性传感器在正常运行中，其检验质量与外部环境无任何机械接触。但是检验质量仍通过自引力场、电场、磁场等各种力场与卫星耦合。由于这些力场的不均匀性，其相对检验质量平衡位置的梯度与检验质量相对电极笼的残留位移控制噪声耦合，产生作用于检验质量上的杂散力，称为刚度-位移耦合噪声。刚度的来源主要包含电场耦合作用梯度、剩磁场耦合作用梯度以及自引力效应耦合作用梯度等。

以检验质量敏感轴向加速度 a 关于检验质量六自由度运动的总刚度为例，该刚度可以表示为如下形式

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\partial a_x}{\partial x} & \frac{\partial a_x}{\partial y} & \frac{\partial a_x}{\partial z} & \frac{\partial a_x}{\partial \varphi} & \frac{\partial a_x}{\partial \theta} & \frac{\partial a_x}{\partial \psi} \end{bmatrix} \quad 2525 \setminus *$$

MERGEFORMAT ()

由此可以得到敏感轴方向的总刚度-位移耦合噪声为

$$a_{\text{diff}} = K [dx, dy, dz, d\varphi, d\theta, d\psi]^T \quad 2626 \setminus *$$

MERGEFORMAT ()

式中， $[dx, dy, dz, d\varphi, d\theta, d\psi]^T$ 表示检验质量相对电极笼的三个方向的相对位移和相对姿态。当检验质量受到的六自由度总刚度大小分别为 $5 \times 10^{-7} \text{s}^2$ 、 $5 \times 10^{-8} \text{s}^2$ 、 $5 \times 10^{-8} \text{s}^2$ 、 $2 \times 10^{-9} \text{m/s}^2$ 、 $2 \times 10^{-9} \text{m/s}^2$ 、 $2 \times 10^{-9} \text{m/s}^2$ ，检验质量相对电极笼的三个平动方向的线位移大小均为 $3 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ，三个转动方向的角位移大小均为 $0.2 \mu\text{rad} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 时，总刚度耦合噪声大小约为 $1.7 \times 10^{-15} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2.8 其他噪声

除上述噪声外，还有其他各种因素综合引起的一些噪声以及一些未知噪声，比如机构运动引起的微振动带来的扰动加速度噪声、涡流效应^[12]等。记其他噪

声大小不超过 $5 \times 10^{-16} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

3 多物理场噪声分配表

根据上述检验质量受到的多物理场扰动加速度噪声模型及其分析，可形成空间引力波探测航天器系统各项噪声及多物理场的指标体系，如表 1 所示。从而为无拖曳控制设计、磁洁净度控制及高精度温控等提供设计依据，保障航天器为检验质量在科学测量频段内提供超静超稳环境，支撑空间引力波探测科学目标的实现。

表 1 多物理场扰动噪声分配表
Table 1 Multi-physical field disturbance noise budget

噪声名称	噪声值 $/(\text{fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2})$	相关参数名称	参数值
残余气体碰撞噪声	0.43	电极笼内残余气体压强/Pa	10^{-5}
残余气体阻尼噪声	0.0024	检验质量相对电极笼运动速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	10^{-8}
出气效应噪声	0.37	电极笼内出气效应产生的气体压强/Pa	10^{-6}
		出气因子	10
		电极笼温度波动/ $\mu\text{K} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	10
辐射计效应噪声	0.093	-	-
热辐射压噪声	0.14	-	-
光辐射压噪声	0.34	激光器相对功率噪声/ $\text{Hz}^{-1/2}$	0.001
银河射线碰撞噪声	0.0024	-	-
航天器磁场的磁感应强度波动引起的静磁力噪声	0.78	检验质量的磁化率	3×10^{-6}
		磁感应强度波动/ $\text{nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	650
		磁感应强度梯度/ $\mu\text{T}/\text{m}$	5
航天器磁场的磁感应强度梯度波动引起的静磁力噪声	0.32	剩磁矩/ $\text{A} \cdot \text{m}^2$	2×10^{-8}
		检验质量处航天器磁场的磁感应强度/ μT	10
		磁感应强度梯度波动/ $\text{nT} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	25
行星际磁场的磁感应强度波动引起的静磁力噪声	0.006	-	-
洛伦兹力噪声	0.080	检验质量电荷量/C	10^{-12}
		检验质量电荷量波动/ $\text{C} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	10^{-15}
极板形变、极板电势、残余电荷等波动引起的静电力噪声	1.0	-	-
检验质量间相对运动引起的自引力噪声	0.20	-	-
形变致自引力噪声	0.10	-	-
航天器质量损耗引起的自引力噪声	0.50	-	-

噪声名称	噪声值 $/(fm \cdot s^{-2} \cdot Hz^{-1/2})$	相关参数名称	参数值
机构运动引起的自引力噪声	0.50	-	-
刚度-位移耦合噪声	1.7	检验质量相对电极笼 X 轴向加速度关于 X 轴平动刚度/ s^{-2}	5×10^{-7}
		检验质量相对电极笼 X 轴向加速度关于 Y/Z 轴平动刚度/ s^{-2}	5×10^{-8}
		检验质量相对电极笼 X 轴向加速度分别关于 X/Y/Z 轴转动的刚度/ m/s^2	2×10^{-9}
		检验质量相对电极笼的平动位移大小/ $m \cdot Hz^{-1/2}$	3×10^{-9}
		检验质量相对电极笼的角位移大小/ $\mu rad \cdot Hz^{-1/2}$	0.2
其他噪声	0.50	-	-
总噪声合计	2.4	-	-

4 结论

空间引力波探测器是一个典型的复杂极限性能系统。针对该系统，本文围绕引力波探测航天器中检验质量的残余加速度噪声，开展了系统级全链路噪声分解，形成了全链路残余加速度噪声模型。在此基础上，基于 $3 \times 10^{-15} m \cdot s^{-2} \cdot Hz^{-1/2}$ (0.1mHz-1Hz) 的顶层指标要求，对各项噪声进行了量化分析，并对相应多物理场参数进行了约束，实现了从科学需求到工程指标的系统化映射，可为后续引力波探测航天器地面测试验证方案的制定以及工程任务的实施提供量化参考。下一步研究将从以下几个方向深入拓展：结合航天器工程构型设计与布局，以及低磁化率、低放气率、超低热膨胀系数等新型材料，深入研究结构-机构运动-热-形变-电磁-自引力等多物理场之间的耦合效应，揭示形变、微振动、机构运动等引起的加速度噪声规律；发展基于在轨观测数据的多物理场扰动实时辨识与补偿方法，为后续科学探测噪声处理提供数据依据；探索动态全链路仿真技术，明确无拖曳控制与多物理场动态耦合后的全链路噪声演化特性，推动引力波探测航天器噪声建模与控制技术向更高精度、更强鲁棒性的方向发展。

参考文献

- [1] LUO Ziren, BAI Shan, BIAN Xing, *et al.* Gravitational wave detection by space laser interferometry[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, **43**(4): 415-447 (罗子人, 白珊, 边星, 等. 空间激光干涉引力波探测[J]. 力学进展, 2013, **43**(4): 415-447)
- [2] BARKE S, WANG Y, ESTEBAN DELGADO J J, *et al.* Towards a gravitational

- wave observatory designer: sensitivity limits of spaceborne detectors[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, **32**(9): 095004
- [3] ROBSON T, CORNISH N J, LIU C. The construction and use of LISA sensitivity curves[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, **36**(10): 105011
- [4] PRINCE T A, TINTO M, LARSON S L, *et al.* LISA optimal sensitivity[J]. *Physical Review D*, 2002, **66**(12): 122002
- [5] DANZMANN K, RÜDIGER A. LISA technology—concept, status, prospects[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2003, **20**(10): S1-S9
- [6] LUO Z R, GUO Z K, JIN G, *et al.* A brief analysis to Taiji: science and technology[J]. *Results in Physics*, 2020, **16**: 102918
- [7] LUO Z R, WANG Y, WU Y L, *et al.* The Taiji program: a concise overview[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, 2021(5): 05A108
- [8] LUO Jun, AI Linghao, AI Yanli, *et al.* A brief introduction to the TianQin project[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, **60**(1/2): 1-19 (罗俊, 艾凌皓, 艾艳丽, 等. 天琴计划简介[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, **60**(1/2): 1-19)
- [9] BOND C, BROWN D, FREISE A, *et al.* Interferometer techniques for gravitational-wave detection[J]. *Living Reviews in Relativity*, 2016, **19**(1): 3
- [10] WANG Juan, QI Keqi, WANG Shaoxin, *et al.* Advance and prospect in the study of laser interferometry technology for space gravitational wave detection[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2024, **54**(7): 270405 (王娟, 齐克奇, 王少鑫, 等. 面向空间引力波探测的激光干涉技术研究进展及展望[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, **54**(7): 270405)
- [11] ZHANG Ziheng, FAN Xiqian, JIN Gang, *et al.* Design and verification of a laser link auxiliary function scheme for the Taiji program[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, **52**(11): 1106001 (张子恒, 范习谦, 靳刚, 等. 太极计划激光链路辅助功能方案设计及验证[J]. 中国激光, 2025, **52**(11): 1106001)
- [12] KE Jun. Theoretical Modeling and Simulation for the Test Mass Noise of Space Inertial Sensors[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2025 (柯俊. 空间惯性传感器中检验质量噪声的理论建模与仿真研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2025)
- [13] FANG Ziruo, ZHU Zhencai, CAI Zhiming, *et al.* Optimization of optical metrology noise link metrics for space-based gravitational wave detection spacecraft[J]. *Chinese Optics*, 2025, **18**(3): 568-582 (方子若, 朱振才, 蔡志鸣, 等. 空间引力波探测航天器光学测距噪声链路指标优化[J]. 中国光学(中英文), 2025, **18**(3): 568-582)
- [14] LIU H S, WANG J, TAO W, *et al.* Recent development of the laser interferometer for Taiji space gravitational wave detection[J]. *Research*, 2026, **9**: 1252
- [15] LIU Heshan, WANG Juan, GAO Ruihong, *et al.* Noise and index decomposition of Taiji-2 interferometer system[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(4): 1047-1057 (刘河山, 王娟, 高瑞弘, 等. 太极二号干涉仪系统噪声与指标分解[J]. 空间科学学报, 2025, **45**(4): 1047-1057)
- [16] SHEN J, WANG S X, QI K Q, *et al.* The suppression effect of an imaging

- system on the geometric tilt-to-length coupling in a test mass interferometer[J]. *Photonics*, 2024, **11**(7): 638
- [17] WANG Shaoxin, GUO Weichuan, ZHAO Ping'an, *et al.* Inertial sensor for space gravitational wave detection and its key technologies[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2024, **54**(7): 270404 (王少鑫, 郭纬川, 赵平安, 等. 空间引力波探测惯性传感器及其关键技术[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, **54**(7): 270404)
- [18] WANG Fang, SHE Mingchao, PENG Xiaodong, *et al.* Simulation of residual gas noise in high-precision inertial sensors with optical readout[J]. *Chinese Optics*, 2025, **18**(3): 612-621 (王芳, 余明超, 彭晓东, 等. 光读出高精度惯性传感器残余气体噪声仿真研究[J]. 中国光学(中英文), 2025, **18**(3): 612-621)
- [19] LIU Chang, WEI Xiaotong, ZHANG Haoyue, *et al.* Design of in-orbit calibration scheme for scale factor and center-of-mass deviation of inertial sensor of Taiji program for space gravitational wave detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2025, **74**(8): 080401 (刘畅, 魏晓通, 张昊越, 等. 空间引力波探测太极计划惯性传感器标度因数与质心偏差的在轨定标方案设计[J]. 物理学报, 2025, **74**(8): 080401)
- [20] FAN Yidi, WANG Pengcheng, LU Wei, *et al.* Robust controller design for drag-free satellites with two test masses[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, **10**(3): 310-321 (范一迪, 王鹏程, 卢苇, 等. 双检验质量无拖曳卫星鲁棒控制[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, **10**(3): 310-321)
- [21] WANG J H, GUO X, MA Z J, *et al.* A low fuel-consumption drag-free tracking approach for space-based gravitational wave detection satellite[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, **60**(2): 1545-1555
- [22] VIDANO S, NOVARA C, COLANGELO L, *et al.* The LISA DFACS: a nonlinear model for the spacecraft dynamics[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, **107**: 106313
- [23] FENG Jianchao, ZHANG Xiaofeng, LIANG Hong, *et al.* Key technology and experimental verification of precision thermal control of Taiji-2 satellite[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, **44**(1): 132-142 (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)
- [24] LIU Y, SHI X J, YANG W Z, *et al.* A precise magnetic modeling method for scientific satellites based on a self-attention mechanism and Kolmogorov-Arnold Networks[J]. *Astronomical Techniques and Instruments*, 2025, **2**(1): 1-9
- [25] YANG Fangchao. Investigation of Charge Management and Control for Space Inertial Sensors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020 (杨方超. 空间惯性传感器的电荷测量与控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020)
- [26] TANG N B, FANG Z R, YANG Z G, *et al.* Neural network-based self-gravity modeling via mechanism decomposition in space gravitational wave detection[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2026, **169**: 111508
- [27] TANG Ningbiao, YANG Zhongguang, YU Xiansheng, *et al.* Self-gravity analysis and modeling method of space gravitational wave detector[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2024, **46**(12): 4083-4090 (汤宁标, 杨中光, 余贤圣,

- 等. 空间引力波探测器自引力分析与建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2024, **46**(12): 4083-4090)
- [28] GAO Zhiyong, WANG Shang, WANG Zhi. Calculation and compensation of self-gravity for gravitational reference sensor based on finite element method[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2024, **44**(2): 89-97 (高志勇, 王上, 王智. 基于 FEM 的引力参考传感器自引力计算与补偿[J]. 中国空间科学技术, 2024, **44**(2): 89-97)
- [29] SUMNER T J, MUELLER G, CONKLIN J W, *et al.* Charge induced acceleration noise in the LISA gravitational reference sensor[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, **37**(4): 045010
- [30] CHAI Guozhi, HUANG Liang, QIAO Liang, *et al.* Effect of the on-board residual magnetism on inertial sensors[J]. *Chinese Optics*, 2019, **12**(3): 515-525 (柴国志, 黄亮, 乔亮, 等. 星上剩磁对惯性传感器的影响[J]. 中国光学, 2019, **12**(3): 515-525)
- [31] SALA L. Residual Test Mass Acceleration in LISA PATHFINDER: In-Depth Statistical Analysis and Physical Sources[D]. Trento: University of Trento, 2023
- [32] ZHANG H Y, XU P, YE Z Q, *et al.* A systematic approach for inertial sensor calibration of gravity recovery satellites and its application to Taiji-1 mission[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(15): 3817
- [33] SCHUMAKER B L. Disturbance reduction requirements for LISA[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2003, **20**(10): S239-S253
- [34] HANNEN V M, SMIT M, HOYNG P, *et al.* End-to-end simulations for the LISA Technology Package[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2003, **20**(10): S261-S271
- [35] ARMANO M, AUDLEY H, AUGER G, *et al.* Sub-Femto-g free fall for space-based gravitational wave observatories: LISA pathfinder results[J]. *Physical Review Letters*, 2016, **116**(23): 231101
- [36] WAN Qingyuan. Analysis of Acceleration Disturbances of the Inertial Sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007 (万庆元. 空间惯性传感器的扰动力分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007)
- [37] WANG Chengrui, BAI Yanzheng, CAI Lin, *et al.* High precision electrostatic inertial sensor[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2023, **53**(5): 250401 (王铖锐, 白彦峥, 蔡林, 等. 高精度静电惯性传感器[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, **53**(5): 250401)
- [38] XU Peng, YANG Zhilan. Noise suppression method of electrostatic suspension inertial sensor based on Noise2Noise[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2023, **31**(6): 611-619 (徐鹏, 杨智岚. 基于 Noise2Noise 的静电悬浮惯性传感器噪声抑制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, **31**(6): 611-619)
- [39] YUE C L, JIAO B H, DANG Z H, *et al.* A review on DFACS (II): modeling and analysis of disturbances and noises[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, **37**(5): 120-147
- [40] FANG Ziruo, SHI Xingjian, CHEN Kun, *et al.* Gravitational wave detection spacecraft noise decomposition and electromagnetic force noise simulation[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, **10**(3): 334-342 (方子若, 侍行剑, 陈

- 琨, 等. 引力波探测航天器噪声分解及电磁力噪声仿真[J]. 深空探测学报, 2023, **10**(3): 334-342)
- [41] XUE Datong. Noises sources with vacuum in electrostatically suspended accelerometer[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2011, **31**(5): 633-640 (薛大同. 静电悬浮加速度计与真空有关的噪声分析[J]. 真空科学与技术学报, 2011, **31**(5): 633-640)
- [42] WANG Zuolei. Influence of outgas effect and radiometer effect on sensitivity of electrostatic accelerometer[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2008(2): 56-59, 71 (王佐磊. 出气与辐射计效应对静电悬浮加速度计的影响[J]. 中国空间科学技术, 2008(2): 56-59, 71)
- [43] GIBERT F, NOFRARIAS M, DIAZ-AGUILÓ M, *et al.* State-space modelling for heater induced thermal effects on LISA pathfinder's test masses[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, **363**: 012044
- [44] LIU Yanchong. Disturbance Modeling and Analysis for the TianQin Inertial Sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024 (刘雁冲. 天琴惯性传感器扰动力建模与分析研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024)

作者简介

杨中光 男, 1989 年出生于山东省潍坊市, 现为中国科学院微小卫星创新研究院副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为空间引力波探测、多物理场建模与卫星自主导航等。

E-mail: yangzg@microsat.com



蔡志鸣 (通信作者) 男, 1984 年出生于浙江省温州市, 现为中国科学院微小卫星创新研究院正高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为空间科学卫星总体设计等。

E-mail: caizm@microsat.com

