

引力波探测航天器磁传感器构型优化

刘野 侍行剑 杨文哲 杨中光 蔡志鸣 李华旺

Magnetic sensor configuration optimization for gravitational-wave detection spacecraft

LIU Ye, SHI Xing-jian, YANG Wen-zhe, YANG Zhong-guang, CAI Zhi-ming, LI Hua-wang

引用本文:

刘野, 侍行剑, 杨文哲, 杨中光, 蔡志鸣, 李华旺. 引力波探测航天器磁传感器构型优化[J]. 中国光学, 2026, 19(5): 1-17. doi: 10.3724/CO.2026-0074

LIU Ye, SHI Xing-jian, YANG Wen-zhe, YANG Zhong-guang, CAI Zhi-ming, LI Hua-wang. Magnetic sensor configuration optimization for gravitational-wave detection spacecraft[J]. Chinese Optics, 2026, 19(5): 1-17. doi: 10.3724/CO.2026-0074

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026-0074>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多阶段偏差修正模型的检验质量磁场重建

Magnetic field reconstruction at test mass using the multi-stage bias correction model

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 596 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0181>

空间引力波探测航天器光学测距噪声链路指标优化

Optimization of optical metrology noise link metrics for space-based gravitational wave detection spacecraft

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 568 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0185>

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>

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>

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>

文章编号 2097-1842(2026)05-0001-17

引力波探测航天器磁传感器构型优化

刘 野^{1,2}, 侍行剑¹, 杨文哲¹, 杨中光¹, 蔡志鸣¹, 李华旺^{1*}

(1. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201304;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:目的: 针对空间引力波探测航天器中检验质量附近磁场无法原位测量、磁场重建精度受磁传感器布置显著影响的问题, 研究有限安装约束下的磁传感器构型优化方法, 以提升检验质量处磁场重建精度。方法: 将磁传感器布置建模为离散组合优化问题, 提出基于改进 IVY 算法的磁传感器构型优化方法(MSC-IVYA)。该方法通过可安装区域离散化、基于默认构型的种群初始化、动态邻域更新以及面向多随机磁模型的累积适应度设计, 实现受约束条件下的高效搜索; 并以 LISA Pathfinder 和 Taiji-2 两种典型空间引力波探测器为对象, 结合距离加权法(IDW)、泰勒展开法(TE)和多级展开法(ME)三种重建方法开展仿真评估。结果: 在 LISA Pathfinder 中, 默认构型下 TM1 在 IDW、ME 和 TE 下的平均相对误差分别为 593.74%、508.04% 和 516.50%, 经 MSC-IVYA 优化后分别降至 390.39%、357.55% 和 363.89%。在 Taiji-2 中, MSC-IVYA 同样表现出稳定改进, TM1 在 IDW 和 ME 下的误差由 72.14% 和 77.27% 降至 32.55% 和 47.25%, TM2 在 ME 和 TE 下的误差由 97.17% 和 112.14% 降至 74.27% 和 80.76%。结论: 磁传感器构型是影响检验质量磁场重建性能的重要设计变量。MSC-IVYA 能够在不同任务条件下稳定改善磁场重建精度, 尤其适用于磁传感器数量有限、安装区域受限的工程场景, 可为空间引力波探测航天器磁诊断系统设计提供方法支撑。

关键词: 空间引力波探测; 磁场重建; 磁传感器构型优化; 改进 IVY 算法

中图分类号: V474.1; O441

文献标志码: A

doi: 10.3724/CO.2026-0074

CSTR: 32171.14.CO.2026-0074

Magnetic sensor configuration optimization for gravitational-wave detection spacecraft

LIU Ye^{1,2}, SHI Xing-jian¹, YANG Wen-zhe¹, YANG Zhong-guang¹, CAI Zhi-ming¹, LI Hua-wang^{1*}

(1. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: lihwa@microsat.com

Abstract: Objective: The magnetic field near the test masses in space-based gravitational-wave detection spacecraft cannot be measured in situ, and the accuracy of magnetic field reconstruction is strongly affected by the arrangement of magnetic sensors. To address this issue, this study investigates a magnetic sensor configuration optimization method under constrained installation conditions, aiming to improve the magnetic field reconstruction accuracy at the test mass locations. Methods: The magnetic sensor placement problem was formulated as a discrete combinatorial optimization problem. An improved Ivy algorithm-based magnet-

收稿日期: 2026-04-24; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2021YFC2202902);

Supported by the National Key Research and Development Program (No. 2021YFC2202902).

ic sensor configuration optimization method, termed MSC-IVYA, was proposed. The method integrates feasible installation region discretization, default-configuration-based population initialization, dynamic neighborhood updating, and a cumulative fitness function designed for multiple random magnetic source models, thereby enabling efficient search under installation constraints. Simulation evaluations were conducted on two representative space-based gravitational-wave detectors, LISA Pathfinder and Taiji-2, using three magnetic field reconstruction methods: inverse distance weighting (IDW), Taylor expansion (TE), and multipole expansion (ME). Results: For LISA Pathfinder, under the default configuration, the average relative errors of TM1 were 593.74%, 508.04%, and 516.50% using IDW, ME, and TE, respectively. After optimization with MSC-IVYA, these errors were reduced to 390.39%, 357.55%, and 363.89%, respectively. In the Taiji-2 case, MSC-IVYA also achieved consistent improvement. For TM1, the reconstruction errors using IDW and ME decreased from 72.14% and 77.27% to 32.55% and 47.25%, respectively. For TM2, the errors using ME and TE decreased from 97.17% and 112.14% to 74.27% and 80.76%, respectively. Conclusion: Magnetic sensor configuration is an important design variable affecting the magnetic field reconstruction performance at the test mass locations. The proposed MSC-IVYA method can consistently improve magnetic field reconstruction accuracy under different mission conditions. It is particularly suitable for engineering scenarios with a limited number of magnetic sensors and constrained installation regions, and provides methodological support for the design of magnetic diagnostic systems in space-based gravitational-wave detection spacecraft.

Key words: Space gravitational-wave detection; magnetic field reconstruction; magnetic sensor configuration optimization; improved ivy algorithm

1 引 言

受地面环境振动噪声和干涉臂长等条件限制,地基引力波探测器难以有效覆盖中低频段引力波信号^[1],而这一频段通常蕴含更丰富的天体物理过程信息^[2,3]。因此,面向 1 mHz ~ 1 Hz 频段开展空间引力波探测,已成为国际引力波探测的重要发展方向^[4]。当前具有代表性的空间引力波探测计划主要包括 LISA (Laser Interferometer Space Antenna)^[5,6]、天琴计划^[7,8]和太极计划^[9]。对于这类任务而言,惯性传感器中检验质量的近自由漂浮状态是实现超高精度测量的关键,其敏感轴残余加速度扰动需被严格抑制至极低水平^[10-12]。

在影响检验质量运动状态的诸多扰动源中,磁场噪声是不可忽视的重要组成部分。一方面,受材料与加工工艺限制,检验质量仍不可避免地存在微弱剩余磁矩和磁化率^[13];另一方面,航天器内部含磁部件产生的静态磁场、单机工作引起的杂散磁场及其波动,以及外部星际磁场变化,均可能与检验质量的磁性参数耦合,进而产生附加磁力和相应的加速度噪声。由于检验质量在轨期间

位于惯性传感器电极笼内部,无法通过星载磁传感器直接对其所在位置的磁场进行原位测量,因此,如何利用有限的外部测量信息对检验质量处磁场进行高精度重建,成为空间引力波探测磁诊断中的关键问题。

针对这一问题,现有任务通常采用间接评估方案,即在检验质量附近布置若干磁传感器 (Magnetic Sensor, MS),实时测量周围磁场信息,并结合特定重建算法反演检验质量位置的磁场及磁场梯度。围绕这一思路,已有研究主要从两个方向展开,一是改进磁场重建方法本身,以提升插值或重建精度;二是发展体积更小、灵敏度更高、对平台干扰更弱的磁传感器,以改善测量条件。LISA Pathfinder 搭载了专门的磁诊断子系统,用于在轨评估检验质量所受磁场干扰^[14]; Diaz-Aguiló 等人曾采用神经网络方法对检验质量位置处的磁场进行重建,实现了较高的估计精度^[15]。随后,面向 eLISA 任务,研究者进一步考虑采用高灵敏度、小型化的各向异性磁阻传感器^[16],并结合多极展开方法开展磁场重建。得益于传感器数量增加以及传感器性能提升,其重建精度较早期远距

离插值方案显著改善^[17]。近期研究还提出了距离加权的多极展开方法,进一步提高了检验质量位置磁场及梯度的重建精度^[18]。

总体来看,现有研究主要聚焦于如何重建与用什么传感器重建,而对于传感器应如何布置才能更有利于重建这一问题,关注仍然相对有限。实际上,磁传感器构型是连接测量信息获取与后续场重建性能的重要中间环节。无论是在 LISA Pathfinder、天琴还是太极的现有方案中,磁传感器通常均采用与检验质量近似等距、并在同一水平面内对称布置的构型;而在 eLISA 方案中,由于每个检验质量周围布置了 8 个磁传感器,其构型进一步扩展为上下两个平面各布置 4 个传感器。上述设计体现了利用有限传感器对局部磁场进行尽可能充分采样的工程思路,但其本质上仍主要基于几何对称性和布局便利性,并不必然对应于给定航天器磁源分布下的最优重建性能。

对于空间引力波探测航天器而言,内部磁源分布通常具有明显的非均匀性和任务依赖性,不同部件的磁矩大小、空间位置及方向分布共同决定了检验质量附近磁场的空间变化特征。在磁传感器数量既定、安装区域受限且航天器总体布局确定的条件下,不同磁传感器构型将对应不同的采样位置集合,从而获取不同的局部磁场信息。这意味着,磁场重建精度不仅取决于重建算法本身,也在很大程度上受制于传感器构型是否能够有效表征检验质量附近真实磁场分布。换言之,默认的等距对称构型虽然具有良好的工程可实施性,但未必是磁场重建意义下的最优构型,磁传感器构型本身应被视为一个值得独立研究和优化的重要问题。

因此,本文围绕引力波探测航天器检验质量附近磁传感器构型优化问题开展研究,提出一种基于改进 IVY 算法的磁传感器构型优化方法 (Magnetic Sensor Configuration based on an Improved Ivy Optimization, MSC-IVYA),以提高检验质量位置磁场的重建精度。为验证所提方法的有效性,本文基于地面磁源模型先验信息,对优化前后的磁传感器构型开展磁场重建仿真,随后结合不同重建方法的建模特点,对构型优化带来的作用机制进行分析,以进一步验证优化构型对提升检验质量磁场重建性能的作用。

2 空间引力波探测磁场噪声与重建

2.1 引力波探测任务航天器磁场仿真与噪声分析

为了精确评估检验质量所受磁场干扰及其对引力波探测结果的不确定性影响,首先需要获取检验质量所在敏感区域的磁场及磁场梯度信息。对于空间引力波探测任务而言,这些磁场信息通常难以通过直接测量完整获得,因此需要结合地面磁测试、磁源建模与在轨磁场重建等手段进行综合评估。

一般而言,航天器磁环境建模首先依赖于地面对单机和分系统磁特性的测试。相关测试通常在专用磁测设施中开展,例如磁线圈设施 (Magnetic Coil Facility, MCF)^[19] 或多磁传感器测量设施 (Multiple Magnetometer Facility, MMF)^[20]。在获得各单机磁特性参数后,可进一步结合基于近场测量的磁性预测方法^[21],建立单机磁源模型,并在此基础上根据航天器总体布局构建整星磁模型。以 LISA Pathfinder 为例,其任务阶段已对航天器内部典型磁源部件进行了磁偶极子建模^[15],如图 1(a) 所示;类似地,处于设计阶段的 Taiji-2 任务也已针对航天器内部常见磁源开展磁偶极子

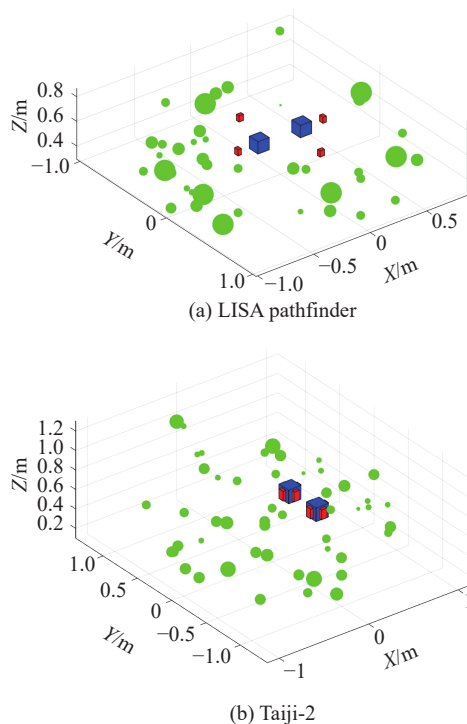


图1 引力波探测器磁源、磁传感器和检验质量的分布

Fig. 1 Distribution of magnetic sources, magnetic sensors, and test masses in the space-based gravitational-wave detector

建模,如图 1(b) 所示。上述模型为分析检验质量附近磁场分布及其重建问题提供了基础。

空间引力波探测中磁场噪声的产生是由于检验质量的剩余磁化强度 $\mathbf{m}_r$ 和磁化率 χ 与其周围磁场及磁场梯度耦合产生杂散力,进而产生加速度噪声,从而对引力波探测任务产生干扰。检验质量的剩余磁化强度 $\mathbf{m}_r$ 和磁化率 χ 是由于现有的加工工艺等因素的限制,其磁性参数的数值不严格为 0;而检验质量附近磁场及磁场梯度主要由航天器上含磁部件以及星际磁场产生。磁场作用在检验质量上的力可以写为

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \langle \nabla(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}) \rangle V \\ &= \langle (\mathbf{m} \cdot \nabla) \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{m} \\ &\quad + \mathbf{m} \times (\nabla \times \mathbf{B}) + \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{m}) \rangle V \end{aligned} \quad (1)$$

其中, V 为检验质量的体积, $\langle \cdot \rangle$ 表示其封闭量的体积平均值, $\mathbf{m}$ 为检验质量的总磁矩,由剩余磁矩 $\mathbf{m}_r$ 和感生磁矩 $\mathbf{m}_i$ 构成, $\mathbf{B}$ 为作用在检验质量的总磁场。由式 (1) 可知,检验质量所受磁干扰不仅与磁场本身有关,还与磁场空间分布及梯度密切相关。因此,在空间引力波探测任务中,准确评估检验质量位置处的磁场与磁场梯度,是分析磁场加速度噪声、建立误差预算以及开展在轨磁诊断的重要前提。

然而,检验质量在轨运行期间位于惯性传感器电极笼内部,无法通过星载磁传感器对其所在位置的磁场进行原位直接测量。这一限制决定了检验质量处磁场信息必须通过邻域测点的磁场观测结果进行间接反演。因此,如何利用有限数量磁传感器的测量值,对检验质量位置的磁场进行高精度重建,成为空间引力波探测磁诊断中的关键问题。

2.2 磁场重建方法

为间接获取检验质量位置的磁场信息,通常需要在其附近布置若干磁传感器,并通过一定的空间插值或场展开方法实现磁场重建。现有研究中,较为典型的方法包括泰勒展开法、距离加权法和多极展开法。三类方法分别从局部线性近似、经验插值和满足物理约束的场展开三个角度对磁场进行估计,适用于不同的测点布局条件和重建精度要求。

2.2.1 泰勒展开法

泰勒展开法 (Taylor Expansion, TE) 是一种用

于估计相邻点值的近似方法,适用于短距离的空间插值^[22]。在空间引力波探测任务中,以检验质量的中心 $\mathbf{x}_{TM}$ 为原点进行泰勒展开:

$$\mathbf{B}_m(\mathbf{x}_m) = \mathbf{B}_e(\mathbf{x}_{TM}) + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^3 \frac{\sigma^k \mathbf{B}_e(\mathbf{x}_{TM}) (\mathbf{x}_{m,i} - \mathbf{x}_{TM,i})^k}{\sigma^k \mathbf{x}_m^k} \frac{1}{k!}, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}_m$ 为磁传感器的位置, $\mathbf{B}_m(\mathbf{x}_s)$ 为磁传感器位置处的读数, $\mathbf{B}_e(\mathbf{x}_{TM})$ 和 $\frac{\sigma^k \mathbf{B}_e(\mathbf{x}_{TM})}{\sigma^k \mathbf{x}_m^k}$ 分别为待求得检验质量位置处磁场值和磁场梯度值。 K 表示泰勒展开的截断阶数, i 表示 x, y, z 三个方向。

泰勒展开法的基本思想,是利用检验质量附近有限个测点的磁场读数,对目标点处的磁场进行局部近似。其优点在于形式直观、计算实现相对简单,并且当测点与目标点距离较近时,能够获得较好的局部逼近效果。然而,该方法的适用性较强依赖于测点分布与截断阶数的合理选择。当磁场空间变化较复杂、测点距离较远或截断阶数不足时,重建误差可能显著增大。因此,泰勒展开法本质上是一种对测点局部代表性较为敏感的重建方法。

2.2.2 距离加权法

距离加权法 (Inverse Distance Weighting, IDW) 认为距离插值点越近的样本点与插值点的关联性越大,因而赋予其更大的权重;而对于离插值点较远的样本点,则赋予其较小的权重,最后对所有样本点进行加权平均得到插值点处的值^[23]。因此在空间引力波磁场重建任务中,对所有的磁传感器读数按照与检验质量之间的距离进行加权,进而插值得到检验质量位置处的磁场值,可表示为

$$\mathbf{B}_e = \sum_{mag=1}^{N_{mag}} \alpha_{mag} \mathbf{B}_{mag}(\mathbf{x}_{mag}), \quad (3)$$

其中,磁强计 r_{mag} 对应的加权系数 α_{mag} 可表示为

$$\alpha_{mag} = \frac{1/r_{mag}^n}{\sum_{i=1}^{N_{mag}} 1/r_i^n}, \quad (4)$$

其中, r_i 为检验质量与各个磁传感器之间的距离, n 表示插值阶数。当插值阶数越大时,距离较近的磁传感器读数的权重越大。

与泰勒展开法相比,距离加权法不显式构造磁场梯度或更高阶项,而是直接依赖测点与目标

点之间的距离关系进行插值,因此实现简单、计算代价较低,在工程应用中具有较强实用性。与此同时,该方法本质上是一种经验型重建方法,缺乏对磁场物理性质的显式约束,其重建效果高度依赖于传感器与检验质量之间的相对位置关系。因此,当测点布局不合理时,即使测量值本身准确,距离加权法仍可能由于权重分配不佳而产生较大误差。

2.2.3 多极展开法

多极展开法(Multipole Expansion, ME)是一种基于势场理论的磁场重建方法。对于满足无源区条件的磁场,可将其表示为若干不同阶次空间模式的叠加,从而在满足物理约束的前提下实现对局部磁场的近似描述^[24]。与泰勒展开法和距离加权法相比,多极展开法能够更充分利用磁场的物理特性,因此在理论上具有更好的可解释性和更强的泛化能力。

由于检验质量附近区域通常不包含实际磁源,磁标势函数 $\psi(\mathbf{x})$ 满足 Laplace 方程,即:

$$\nabla^2 \Psi(\mathbf{x}) = 0 \quad (5)$$

在球坐标系下, Laplace 方程的解可展开为一组球谐函数的线性组合,即:

$$\Psi(\mathbf{x}) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l M_{lm} r^l Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (6)$$

其中, (r, θ, ϕ) 是场点 $\mathbf{x}$ 的球坐标,其原点为检验质量的几何中心, M_{lm} 为 l 阶和 m 阶的多极系数,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \nabla[r_1^1 Y_{1,-1}(\theta_1, \phi_1)] & \nabla[r_1^1 Y_{1,0}(\theta_1, \phi_1)] & \dots & \nabla[r_1^L Y_{L,L}(\theta_1, \phi_1)] \\ \nabla[r_2^1 Y_{1,-1}(\theta_2, \phi_2)] & \nabla[r_2^1 Y_{1,0}(\theta_2, \phi_2)] & \dots & \nabla[r_2^L Y_{L,L}(\theta_2, \phi_2)] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \nabla[r_N^1 Y_{1,-1}(\theta_N, \phi_N)] & \nabla[r_N^1 Y_{1,0}(\theta_N, \phi_N)] & \dots & \nabla[r_N^L Y_{L,L}(\theta_N, \phi_N)] \end{bmatrix} \quad (12)$$

当测点数多于待求多极系数个数时,式(8)通常构成超定方程组,此时可采用最小二乘法求解多极展开系数,即

$$\hat{\mathbf{M}} = \arg \min_{\mathbf{M}} \|\mathbf{A}\mathbf{M} - \mathbf{B}\|_2^2 \quad (13)$$

由式(8)到式(13)可知,多极展开法本质上可视为一个线性参数辨识问题。设计矩阵 $\mathbf{A}$ 由磁传感器测点位置和展开阶数共同决定,因此不同磁传感器构型将对应不同的设计矩阵,并进一步影响多极展开系数的可辨识性及其求解稳定

Y_{lm} 为标准球谐函数。实际上,原始的 Laplace 方程解还包含与 r^{-l-1} 成比例的项,但由于检验质量几何中心处的磁场需保持有限,因此该类奇异项在本文研究场景下可被舍弃。由此,检验质量位置处磁场估计值可进一步写为:

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \nabla \Psi(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \nabla [r^l Y_{lm}(\theta, \phi)] \quad (7)$$

其中,多极系数一般采用最小二乘方法进行求解。

对于离散测点形式,设共有 N 个磁传感器,其位置分别为 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N$, 对应的磁场测量值分别为 $\mathbf{B}(\mathbf{x}_1), \mathbf{B}(\mathbf{x}_2), \dots, \mathbf{B}(\mathbf{x}_N)$ 。根据式(7),每个测点处的磁场均可表示为多极展开系数的线性组合,因此所有测点的观测方程可统一写为

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{M} \quad (8)$$

其中,

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}(\mathbf{x}_1), \mathbf{B}(\mathbf{x}_2), \dots, \mathbf{B}(\mathbf{x}_N)]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{M} = [M_{1,-1}, M_{1,0}, M_{1,1}, \dots, M_{L,L}]^T \quad (10)$$

$\mathbf{A}$ 为多极展开法的设计矩阵,其元素由各测点位置处球谐基函数及其梯度项确定。对于第 i 个测点 $\mathbf{x}_i = (r_i, \theta_i, \phi_i)$, 其对应的磁场可表示为

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_i) = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \nabla [r_i^l Y_{lm}(\theta_i, \phi_i)] \quad (11)$$

因此,设计矩阵 $\mathbf{A}$ 可写为

性。当设计矩阵列相关性较强或数值条件较差时,多极系数反演过程可能出现病态性,从而放大测量误差对重建结果的影响。也正因为如此,多极展开法不仅对测点数量有要求,也对磁传感器构型的空间分布较为敏感。

3 检验质量周围磁传感器的构型优化

由第2节可知,检验质量位置磁场重建的精

度不仅取决于所采用的重建算法,也在很大程度上受制于磁传感器测点对局部磁场分布的表征能力。对于空间引力波探测航天器而言,磁传感器数量通常受平台资源、安装空间和附加磁干扰等因素限制,因而难以通过单纯增加传感器数量来持续提升重建精度。在这一约束条件下,如何通过优化有限磁传感器的空间构型,使其在给定航天器磁源分布和可安装区域内获取更具代表性的磁场信息,成为提高检验质量磁场重建性能的关键问题。

现有空间引力波探测任务中,磁传感器通常采用与检验质量近似等距、在同一平面或上下对称平面内布置的方案。这类构型具有较好的工程可实现性,也便于任务初期开展结构设计与安装布局。然而,对于磁源分布复杂且空间非均匀性

显著的航天器内部磁环境而言,基于几何对称性获得的默认构型并不一定能够在磁场重建意义下达到最优。特别是在磁传感器数量固定、安装区域受限的条件下,不同测点位置组合将直接影响传感器所采集磁场信息的独立性、代表性和对目标点磁场的敏感程度,进而影响后续重建结果。

因此,本文将引力波探测航天器中磁传感器的布置问题建模为一个离散组合优化问题,并提出一种基于改进 IVY 算法的磁传感器构型优化方法。该方法以检验质量位置磁场重建误差最小化为目标,在考虑磁传感器安装区域约束和默认构型工程合理性的基础上,通过解空间离散化、基于默认构型的种群初始化以及改进邻域学习机制,实现对磁传感器构型的高效搜索与优化。图 2 给出了 MSC-IVYA 的整体流程示意。

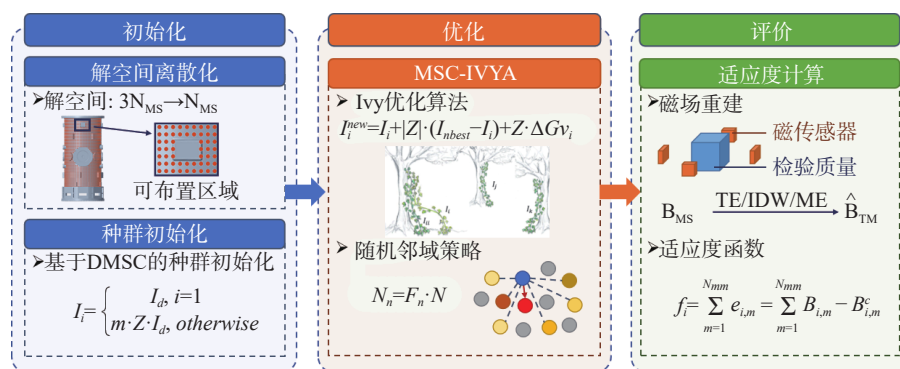


图 2 MSC-IVYA 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of MSC-IVYA

3.1 解空间离散化

IVY 算法是一种新近提出的元启发式优化算法,其灵感来源于常青藤在自然环境中的扩张、生长与攀爬行为^[25]。与其他群智能优化方法类似,IVY 算法通过群体个体在搜索空间中的迭代演化实现对最优解的逼近。在原始 IVY 算法中,种群中各个个体通常在连续搜索空间内随机初始化,其位置可表示为:

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{I}_{\min} + \mathbf{r} \cdot (\mathbf{I}_{\max} - \mathbf{I}_{\min}) \quad (14)$$

其中, $i=1, 2, \dots, N$, N 表示种群中个体的数量。 $\mathbf{I}_i$ 表示种群中第 i 个个体,每个个体包含 D 个维度。 D 为待求解的未知量的个数。 $\mathbf{I}_{\max}$ 和 $\mathbf{I}_{\min}$ 分别表示搜索空间的上边界和下边界。 $\mathbf{r}$ 为各维元素取值位于 $[0, 1]$ 区间内的随机向量。

然而,对于引力波探测航天器中的磁传感器

构型优化问题,直接在连续三维空间内搜索并不合适。原因在于:第一,磁传感器通常并非可以安装在任意空间位置,而是受到惯性传感器外形形状、光学窗口避让、紧固件布局以及结构接口等条件的约束;第二,若直接对每个磁传感器的三维坐标进行连续优化,则搜索维数较高,且大量候选解将落在不可安装区域内,导致优化效率低下并增加约束处理复杂度。为此,本文首先对磁传感器可安装区域进行离散化处理,将满足工程约束的可布置位置预先离散为有限个候选网格点,并以这些网格点作为后续优化的基本搜索单元。

在此基础上,磁传感器构型优化问题可由连续空间中的位置优化问题转化为离散候选点集合上的选址问题。若离散化后可选网格点总数为 N_p ,系统中磁传感器数量为 N_{mag} ,则每个个体仅需

记录 N_{mag} 个网格点索引,其维数由原始连续表示下的 $3N_{mag}$ 降低为 N_{mag} 。因此,离散化不仅能够显著降低搜索维数和计算复杂度,还能够从根源上保证所有候选解满足安装区域约束,避免算法在无效区域进行过度探索,从而提高搜索效率和求解稳定性。

对于离散化后的搜索空间,个体位置向量各维的取值范围均对应候选网格点的编号,因此 $\mathbf{I}_{min}$ 可表示为全 1 向量, $\mathbf{I}_{max}$ 可表示为全 N_p 向量。通过这种方式,磁传感器构型优化问题被统一纳入离散组合优化框架,为后续改进 IVY 算法的设计提供了基础。

3.2 基于默认磁传感器构型的种群初始化

对于元启发式优化算法而言,初始种群的分布特性会显著影响算法早期搜索方向、收敛速度以及最终求解结果。若初始个体与高质量解区域相距过远,算法通常需要消耗更多迭代次数才能逐步逼近最优解,甚至可能在复杂约束条件下陷入局部最优。对于一般的无先验优化问题,随机初始化是一种通用且无偏的选择;然而,对于本文所研究的磁传感器构型优化问题,完全随机初始化并不充分合理。

这是因为,在 LISA Pathfinder、eLISA 以及其他空间引力波探测任务中,已有默认磁传感器构型通常并非随意给出,而是综合考虑了检验质量相对位置、结构布局和工程安装可行性后形成的经验设计结果。尽管这类默认构型未必在磁场重建意义下最优,但通常具备一定合理性,例如磁传感器尽可能靠近检验质量、构型整体较为紧凑、对称性较好且便于实现。因此,从默认构型附近出发开展优化搜索,更符合工程实际,也更有利于在保留原始设计可实施性的前提下挖掘局部改进空间。

因此,本文不采用完全随机的种群初始化方式,而是以默认磁传感器构型为中心,通过受控扰动生成初始种群。其形式可表示为:

$$\mathbf{I}_i = \begin{cases} \mathbf{I}_d, i = 1 \\ m \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}_d, otherwise \end{cases}, \quad (15)$$

其中, $\mathbf{I}_d$ 为默认磁传感器构型对应的个体表示。 m 为变异强度参数,用于控制新生成个体相对于默认构型的偏离程度。 $\mathbf{Z}$ 为服从标准正态分布的随机向量。通过调节 m 的大小,可以在继承默认

构型的工程合理性和保持种群多样性之间实现平衡。当 m 较小时,初始种群主要集中于默认构型附近,有利于快速开展局部精细搜索;当 m 较大时,种群分布范围拓宽,有利于探索更广泛的候选构型空间。

相较于完全随机初始化,这种基于默认构型的初始化策略具有两方面优势。首先该策略能够显著缩小初始搜索范围,使算法更快进入潜在优质解区域,提高收敛效率;其次,对于存在多个检验质量或多个局部敏感区域的任务场景,该策略有助于保持不同区域附近磁传感器数量和空间分布的相对均衡,避免随机初始化导致的测点资源分配失衡问题。当航天器中存在两个检验质量时,随机生成的初始个体可能出现某一检验质量附近传感器过于集中、另一检验质量附近测点不足的情况,从而对两处磁场重建性能产生显著不均衡影响。相比之下,围绕默认构型进行初始化更有利于维持整体布局的工程合理性和重建任务的均衡性。

因此,本文将默认构型视为一种可利用的工程先验,并将其嵌入种群初始化阶段,以提升改进 IVY 算法在磁传感器构型优化问题中的适应性。

3.3 改进邻域策略

在原始 IVY 算法中,个体通过模拟常青藤沿邻近目标扩张和向优势位置攀附的行为实现位置更新。相应地,种群个体通常围绕预设邻居个体和当前优良个体开展局部学习与移动,其更新过程可表示为:

$$\mathbf{I}_i^{new} = \mathbf{I}_i + |\mathbf{Z}| \cdot (\mathbf{I}_{ii} - \mathbf{I}_i) + \mathbf{Z} \cdot \Delta \mathbf{G} \mathbf{v}_i, \quad (16)$$

其中, $\mathbf{I}_{ii}$ 是 $\mathbf{I}_i$ 的邻居个体。 $\mathbf{G} \mathbf{v}_i$ 表示第 i 个个体的生长速度,其差分方程可以表示为

$$\Delta \mathbf{G} \mathbf{v}_i = \begin{cases} \mathbf{I}_i / (\mathbf{I}_{max} - \mathbf{I}_{min}), t = 1 \\ \mathbf{r}^2 \cdot (\mathbf{Z} \cdot \Delta \mathbf{G} \mathbf{v}_i), t > 1 \end{cases}, \quad (17)$$

其中, t 表示迭代次数。

原始 IVY 算法在求解连续优化问题时具有一定性能,但若直接应用于本文的离散磁传感器构型优化问题,其固定邻居机制存在明显局限。一方面,固定邻居意味着每个个体在整个搜索过程中信息交互对象相对单一,容易造成信息传播范围受限,不利于种群保持充分多样性;另一方面,在离散组合空间中,若个体长期围绕少量固定

邻居演化,容易过早向局部优势区域聚集,从而降低跳出局部最优的能力。考虑到常青藤在自然环境中的扩张和攀附并非依赖单一固定对象,而是具有更强的随机性和环境适应性,因此本文对 IVY 算法的邻域机制进行改进。

具体而言,在 MSC-IVYA 中,每次迭代均为每个个体随机分配多个邻居个体,形成动态邻域集合。邻居数量定义为 N_n 被定义为

$$N_n = F_n \cdot N, \quad (18)$$

其中 F_n 表示邻居占种群的比例。对于每个当前个体,算法不再围绕固定邻居开展更新,而是在其动态邻域内选取适应度最优的个体作为当前学习对象,据此完成攀附和位置更新,因此公式 (16) 可以被修改为

$$\mathbf{I}_i^{\text{new}} = \mathbf{I}_i + |\mathbf{Z}| \cdot (\mathbf{I}_{\text{nbest}} - \mathbf{I}_i) + \mathbf{Z} \cdot \Delta \mathbf{G} \mathbf{v}_i, \quad (19)$$

其中 $\mathbf{I}_{\text{nbest}}$ 表示 $\mathbf{I}_i$ 邻居中适应度最佳的个体。

这种随机动态邻域策略相较于固定邻域具有更强的信息流动能力。对于种群中的任意个体而言,其在不同迭代阶段可接触到不同的优质解模式,从而增强了搜索过程中的全局信息共享能力。同时,动态邻域的引入也有助于减弱单一局部最优对整个种群演化方向的过早支配,提升算法跳出局部最优的概率。

此外,原始 IVY 算法还通过区分扩张与攀升两种生长状态来实现搜索行为切换。当某一个体适应度劣于当前最优个体一定比例时,该个体会由扩张状态转为攀升状态,并朝全局最优个体方向移动,其更新形式为:

$$\mathbf{I}_i^{\text{new}} = \mathbf{I}_{\text{best}} \cdot (\mathbf{r} + \mathbf{Z} \cdot \Delta \mathbf{G} \mathbf{v}_i), \quad (20)$$

其中 $\mathbf{I}_{\text{best}}$ 表示最佳个体。原始 IVY 中状态切换比例定义为:

$$\beta = (2+r)/2, \quad (21)$$

本文保留 IVY 算法中的双状态搜索框架,但在动态邻域机制的基础上,使个体在局部学习与全局引导之间获得更灵活的切换能力。总体上,基于默认构型初始化策略和动态邻域更新策略, MSC-IVYA 不仅增强了算法对磁传感器构型问题的适应性,也提高了其在复杂离散约束空间中的搜索效率与鲁棒性。

3.4 适应度函数设计

在磁传感器构型优化问题中,适应度函数的设计直接决定了算法搜索方向与最终优化结果。由于本文关注的核心目标是提高检验质量位置磁场的重建精度,因此适应度函数应能够客观反映某一给定磁传感器构型在磁场重建任务中的综合表现。

对于一个确定的航天器磁模型,在已知各磁源位置和磁矩模值的条件下,可通过磁偶极子模型计算各磁源在磁传感器位置以及检验质量位置产生的磁场。单个磁偶极子在空间某点产生磁场的表达式为:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^5} - \frac{\mathbf{m}}{|\mathbf{r}|^3} \right], \quad (22)$$

其中, $\mathbf{r}$ 表示磁矩位置到目标点的距离, $\mathbf{m}$ 表示该磁矩的大小与方向, μ 为真空磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

在获得磁传感器位置的理论磁场值后,可利用所选磁场重建方法计算检验质量位置的重建磁场 B_c ,并与理论真实磁场 B 进行比较。若以检验质量敏感轴方向的重建误差作为评价指标,则单个磁模型下的重建误差可表示为:

$$e = B_s - B_s^c, \quad (23)$$

其中 s 表示检验质量敏感轴方向。

然而,如果直接将单一磁模型下的重建误差作为适应度函数,则优化结果将显著依赖于该特定磁模型。当航天器中各磁源的位置和模值固定但磁矩方向发生变化时,尤其是在轨运行单机运行状态发生变化时,基于单一磁模型获得的最优构型可能失去泛化能力,甚至在其他磁场分布条件下表现劣于默认构型。也就是说,单场景误差最小化只能得到对特定磁模型过拟合的传感器构型,而难以满足实际任务中对鲁棒性的要求。

为提高优化结果对磁源方向不确定性的适应性,本文在适应度构造中引入多磁模型累积评价机制。具体地,在每次迭代过程中,固定各磁源位置和磁矩模值,仅对磁矩方向进行随机采样,生成 N_m 个不同的航天器磁模型。随后,对每个候选构型分别计算其在所有随机磁模型下的重建误差,并将累积误差作为该个体的适应度值,即:

$$f_i = \sum_{m=1}^{N_m} e_{i,m} = \|B_s - B_s^c\|^2, \quad (24)$$

其中 $e_{i,m}$ 表示第 i 个个体在第 m 个磁模型下的重建误差, f_i 表示当前最优个体的适应度值。

这种多磁模型累积适应度设计不再追求某一特定磁分布情形下的极端最优,而是给定构型在一组代表性磁场场景中的整体平均表现,因此更符合实际任务中航天器磁环境具有方向不确定性和场景变化性的特点。通过该方式得到的优化构型,能够在不同磁矩方向组合下保持较稳定的重建性能,从而提高优化结果的鲁棒性和工程适用性。

4 磁传感器构型优化仿真实验

4.1 仿真设置

为系统分析磁传感器构型对空间引力波探测航天器检验质量位置磁场重建精度的影响,并验证本文所提 MSC-IVYA 的有效性,本文选取 LISA Pathfinder 与 Taiji-2 这两种具有代表性的空间引力波探测任务作为仿真对象,两者在磁源分布、结构布局、磁传感器数量及其可布置区域等方面存在明显差异,因而能够为评估所提方法在不同任务约束条件下的适用性提供较为充分的对比基础。

在磁环境建模方面,本文将两种航天器中的主要磁性部件统一等效为磁偶极子。虽然相关任务已给出磁源的位置和磁矩模值,但磁矩方向通常未被明确给定。考虑到磁偶极矩方向变化将直接影响检验质量附近磁场分布,从而进一步影响磁场重建结果,本文在仿真中固定各磁源位置和磁矩模值,仅对磁矩方向进行随机采样,以此构造具有统计代表性的航天器磁模型集合,仿真总次数设置为 10,000 次,以保证评价结果具有足够稳定性。而在算法迭代优化过程中,用于构造适应度函数的随机磁模型数量 N_m 设置为 1000,用以平衡适应度评估精度与计算开销。

对于磁传感器可布置区域,本文依据不同任务的结构条件分别进行离散化处理。由于公开资料中缺少 LISA Pathfinder 惯性传感器及其局部结构的精确几何信息,本文将默认构型下磁传感器所在圆柱面近似视为可布置区域,并以 0.005 m 的网格间隔对其进行离散化,离散化后的可布置

区域如图 3 所示,其中橙色网格点表示磁传感器可选择的位置。对于 Taiji-2,则依据其惯性传感器设计方案和局部结构约束,对惯传外壁可安装区域进行离散化处理,如图 4 所示。其中,除光学窗口及已被用于紧固等其他功能的区域外,其余满足安装条件的外表面均被纳入候选布置区域。通过上述处理,本文将不同任务中的磁传感器构型优化统一转化为离散候选点集合上的选址问题。

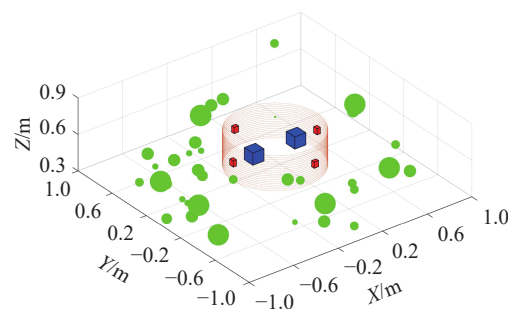


图3 LISA Pathfinder 航天器磁模型与离散化后的磁传感器可布置区域

Fig. 3 Magnetic model of the LISA Pathfinder spacecraft and the discretized feasible installation region for magnetic sensors

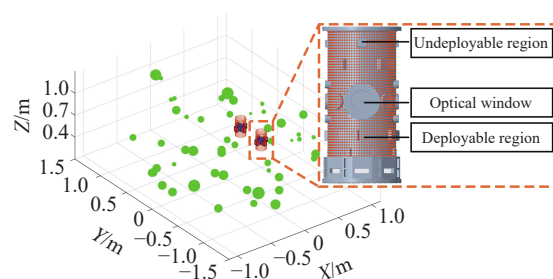


图4 Taiji-2 航天器磁模型与离散化后的磁传感器可布置区域

Fig. 4 Magnetic model of the Taiji-2 spacecraft and the discretized feasible installation region for magnetic sensors

为验证本文所提 MSC-IVYA 的优化性能,仿真中进一步引入粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[26]和原始 IVY 算法作为对比方法。三种优化算法的最大迭代次数均设置为 200,种群规模均设置为 50,各个个体的维数与对应任务中的磁传感器数量保持一致。在 MSC-IVYA 中,变异强度参数 m 设置为 0.5,以在保持默认构型先验信息的同时保留必要的种群多样性;动态邻域比例设置为 0.25。对于 PSO,惯性权

重系数设置为 0.7, 个体学习因子和社会学习因子均设置为 1.5。上述参数设置保证了不同算法在相近计算预算下进行公平比较。

在磁场重建方法方面, 本文选取 IDW、ME 和 TE 三种典型重建方法, 分别评估不同磁传感器构型下的重建性能。IDW 的加权阶数设置为 2, TE 的截断阶数设置为 1, ME 的展开阶数设置为 2。对于 Taiji-2, 由于整星共布置 8 个磁传感器, 因此仿真中使用全部 8 个测量值分别对两个检验质量位置的磁场进行重建^[18]。评价指标采用检验质量磁场重建结果与理论真实值之间的平均相对误差, 并分别从磁场各分量及磁场模长两个层面进行统计, 其定义见式 (25) 和式 (26)。

$$\bar{\varepsilon}_{B_j} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \left| \frac{B_{i,j} - B_{i,j}^c}{B_{i,j}} \right|, \quad (25)$$

$$\bar{\varepsilon}_{|B|} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \left| \frac{|B_{i,j}| - |B_{i,j}^c|}{|B_{i,j}|} \right|, \quad (26)$$

其中, i 为仿真的次序 ($i=1, 2, \dots, N_s$)。 $B_{i,j}$ 表示第 i 次仿真中理论磁场在 j 方向的分量, $B_{i,j}^c$ 表示第 i 次实验中重建磁场在 j 方向的分量。

4.2 仿真结果与分析

4.2.1 LISA Pathfinder 中的磁传感器构型优化

LISA Pathfinder 的磁传感器构型优化问题具有较高挑战性。一方面, LISA Pathfinder 中仅布置了 4 个磁通门磁传感器, 且磁传感器与检验质量之间距离较远, 最大距离达到 56.45 cm^[15], 这使得传感器测量值对检验质量位置局部磁场的直接代表性较弱; 另一方面, 航天器内部磁源在检验质量及其邻域区域的磁场贡献较为显著, 且其空间分布可能较为复杂, 从而导致检验质量附近磁场空间变化更强、非均匀性更明显, 因此无论采用何种重建方法, 均面临显著的外推难度^[27]。在这一背景下, 磁传感器构型对重建结果的影响将更加突出。

表 1 给出了不同构型优化方法下, LISA Pathfinder 两个检验质量在敏感轴方向上的磁场重建平均相对误差。可以看到, 在默认磁传感器构型下, 无论采用 IDW、ME 还是 TE, 两个检验质量的重建误差均处于较高水平。其中, TM1 的最小平均相对误差为 508.04%, TM2 的最小平均相对误差为 327.37%。这一结果表明, 对于 LISA

Pathfinder 而言, 磁场重建性能受到任务本身磁源分布、大小、局部磁场分布复杂等限制, 在默认构型下, 磁场重建误差较大。

表 1 不同构型优化方法下, LISA Pathfinder 两个检验质量在敏感轴方向上的磁场重建平均相对误差

Tab. 1 Average relative errors of magnetic field reconstruction along the sensitive axis for the two test masses of LISA Pathfinder under different sensor configuration optimization methods

指标	构型优化方法	IDW	ME	TE
$\bar{\varepsilon}_{B_s, TM1} \%$	DMSC	593.74	508.04	516.50
	PSO	482.48	400.88	455.59
	IVY	494.69	430.98	445.64
	MSC-IVYA	390.39	357.55	363.89
$\bar{\varepsilon}_{B_s, TM2} \%$	DMSC	327.37	390.20	435.83
	PSO	157.53	137.08	216.99
	IVY	182.56	185.28	231.88
	MSC-IVYA	162.57	181.16	180.75

尽管如此, 不同构型优化方法之间仍然表现出明确差异, 这说明在高难度重建场景下, 磁传感器构型仍然会对最终重建结果产生显著影响。与默认构型相比, 三种优化方法均在不同程度上降低了重建误差, 表明在传感器数量不变、重建方法不变的前提下, 仅通过重新配置测点位置, 仍有可能改善测量信息对检验质量局部磁场的表征能力, 从而提高重建精度。

从具体结果来看, 针对 TM1, MSC-IVYA 在三种重建方法下均取得了最优结果, 其平均相对误差分别为 390.39%、357.55% 和 363.89%, 相较默认构型分别降低了 203.35%、150.49% 和 152.61%。这说明对 TM1 而言, 本文提出的方法能够较稳定地改善不同重建模型下的磁场重建性能。相比之下, PSO 和原始 IVY 虽然也能够降低误差, 但整体改善幅度不及 MSC-IVYA, 说明针对离散测点构型问题引入默认构型先验与改进邻域机制是有效的。

对于 TM2, 结果则呈现出一定差异性。PSO 在 IDW 和 ME 下分别取得了 157.53% 和 137.08% 的最低误差, 优于 MSC-IVYA; 而在 TE 下, MSC-IVYA 取得了最优结果 180.75%, 较默认构型下降了 255.08%。这一现象表明, 在 LISA Pathfinder

这样磁场分布复杂、重建难度较高的场景中,不同检验质量位置附近的局部磁场特征可能并不一致,不同优化算法对不同区域磁场结构的适应能力也存在差异。因此,在 LISA Pathfinder 中,构型优化总体上是有效的,而 MSC-IVYA 在多数情况下,尤其是在 TM1 以及 TM2 的 TE 重建中,表现出更优或更稳定的优化能力。

进一步看, LISA Pathfinder 的结果还说明了一个更重要的问题,当磁场重建问题本身受到测点数量、测点距离以及磁源贡献强度和空间分布复杂性等多重因素共同制约时,构型优化虽然不能从根本上消除重建难度,但仍然能够作为改善重建性能的有效手段。也就是说,构型优化可以在既有困难条件下尽可能提高测点信息质量,即便在重建难度较高的任务场景下,合理的磁传感器构型优化仍能够带来磁场重建性能改善,这也体现了构型优化研究的必要性。

4.2.2 Taiji-2 中的磁传感器构型优化

与 LISA Pathfinder 相比, Taiji-2 场景下的磁场重建整体表现明显更好。这一结果首先反映的并非某一种构型优化方法本身的优势,而是 Taiji-2 在磁场重建条件上具有更有利的任务基础。具体而言, Taiji-2 拟采用尺寸更小、适于空间弱磁探测的小型磁传感器^[28],从而可以将传感器布置在距离检验质量更近的位置;同时,每个检验质量附近均配置了 4 个磁传感器,整星共 8 个测点,这使得检验质量附近磁场信息的采样更加充分。由于磁传感器测量值与目标位置磁场之间的空间距离缩短,局部磁场表征能力相应增强,因此从重建条件上看更具优势。

表 2 给出了不同构型优化方法下, Taiji-2 两个检验质量在敏感轴方向上的磁场重建平均相对误差。在默认磁传感器构型下, TM1 在 IDW、ME 和 TE 三种方法下的平均相对误差分别为 72.14%、77.27% 和 122.03%, TM2 对应误差分别为 87.76%、97.17% 和 112.14%。与前述 LISA Pathfinder 的结果相比,这一误差水平已显著降低,说明 Taiji-2 的传感器布置、磁源分布与大小、局部磁场的空间分布更有利于检验质量磁场重建。

在此基础上进一步比较不同构型优化方法可以发现,即便 Taiji-2 已具备相对较好的重建条

件,磁传感器构型优化仍然能够对重建精度产生显著影响,但这种影响具有明显的任务局部性和方法相关性。对于 TM1, MSC-IVYA 在 IDW 和 ME 下分别取得了最优结果 32.55% 和 47.25%,较默认构型分别下降了 39.59% 和 30.02%;而在 TE 下, PSO 取得了最优结果 59.46%,优于 MSC-IVYA 的 81.08%。这表明对于 TM1 而言,构型优化能够有效改善磁场重建性能,但不同重建方法对测点布局特征的敏感性并不一致,尤其是在 TE 这类依赖局部线性近似的方法下,某一构型是否最优不仅取决于传感器与检验质量之间的距离,还与测点对局部磁场变化趋势的表征能力有关。

表 2 不同构型优化方法下, Taiji-2 两个检验质量在敏感轴方向上的磁场重建平均相对误差

Tab. 2 Average relative errors of magnetic field reconstruction along the sensitive axis for the two test masses of Taiji-2 under different sensor configuration optimization methods

指标	构型优化方法	IDW	ME	TE
$\bar{\epsilon}_{B_s, TM1} / \%$	DMSC	72.14	77.27	122.03
	PSO	34.56	70.67	59.46
	IVY	101.13	84.98	81.07
	MSC-IVYA	32.55	47.25	81.08
$\bar{\epsilon}_{B_s, TM2} / \%$	DMSC	87.76	97.17	112.14
	PSO	92.73	155.57	117.20
	IVY	44.42	119.43	121.36
	MSC-IVYA	59.14	74.27	80.76

对于 TM2, 结果同样表明构型优化是有效的,但不同算法之间存在更明显差异。具体来看,在 IDW 下, IVY 取得了最低误差 44.42%;在 ME 和 TE 下, MSC-IVYA 分别取得了 74.27% 和 80.76% 的最优结果,较默认构型分别降低了 22.90% 和 31.38%。相比之下, PSO 在 TM2 上的表现并不理想,其在三种重建方法下的误差均高于默认构型,说明在 Taiji-2 这种安装区域受限、局部结构约束更强的场景中,常规全局搜索策略并不一定能够稳定地找到优于默认构型的解。原始 IVY 在 TM2 的 IDW 下虽然取得了最优结果,但在 ME 和 TE 下未表现出一致优势,也说明其优化效果对具体重建模型和局部磁场特征较为敏感。

图 5 清晰地展示了利用 MSC-IVYA 优化前后磁传感器的构型, 可以看见优化后的磁传感器与默认磁传感器的位置较为接近, 说明对于 Taiji-2 来说, 默认磁传感器的构型能够作为磁传感器构型的参考, 在此基础上进行构型优化更加高效, 验证了本文提出基于默认磁传感器构型的初始化策略的有效性。

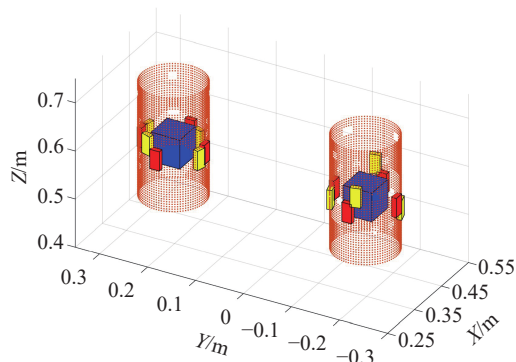


图 5 MSC-IVYA 优化后的磁传感器构型

Fig. 5 Magnetic sensor configuration optimized by MSC-IVYA

从整体上看, 一方面 Taiji-2 的默认构型已经具有较强工程合理性, 因此构型优化的作用并不是推翻原有布局, 而是在较优初始设计基础上进一步提高局部测量信息对检验质量磁场的表征能力。这一点也与优化前后磁传感器位置变化较为有限的现象相一致, 即优化后的构型整体上仍与默认构型保持一定的相似性。另一方面, 正因为默认构型本身具有一定合理性, 优化算法若不能充分利用这一先验信息, 反而可能由于搜索方向偏离合理区域而导致结果退化。PSO 在 TM2 上出现误差升高, 正是这一现象的体现。相比之下, MSC-IVYA 通过基于默认构型的种群初始化策略, 将工程先验显式嵌入搜索过程, 并结合动态邻域更新机制增强了解空间探索与局部开发之间的平衡能力, 因此在 Taiji-2 场景下能够更稳定地得到优于默认构型的结果。

因此, Taiji-2 的仿真结果说明, 在传感器与检验质量距离较近、测点数量较充足、默认构型已具有一定工程合理性的条件下, 磁场重建精度的提升并不单纯取决于是否进行构型优化, 而是取决于优化算法能否在尊重原有工程布局的基础上, 对测点分布进行针对性的精细调整。本文提出的 MSC-IVYA 在这一点上表现出较好的适应

性, 虽然其并未在所有检验质量和所有重建方法下都取得绝对最优结果, 但整体上能够比默认构型更稳定地改善重建性能, 尤其在 ME 和 TE 下表现出更一致的优势。这表明 MSC-IVYA 更适合作为一种面向工程构型修正的优化方法, 用于在实际任务约束条件下进一步提升检验质量磁场重建精度。

4.2.3 不同磁场重建方法下优化构型作用机理分析

为了进一步解释优化后磁传感器构型能够改善磁场重建性能的原因, 本文结合不同重建方法的建模特点, 对构型优化带来的作用机制进行分析。需要说明的是, 本文在 MSC-IVYA 的适应度函数构造中仅采用了 IDW 方法对重建误差进行评估, 但从表 1 和表 2 可以看出, 优化后的磁传感器构型在 TE 和 ME 下同样通常表现出不低于默认构型、甚至明显优于默认构型的结果, 这说明优化后的构型并非仅对某一种重建模型有效, 而是从更本质上改善了磁传感器测点对检验质量附近局部磁场分布的表征能力。因此, 本文分别从 TE、IDW 和 ME 的方法特征出发, 对优化构型的作用进行讨论。

(1) 泰勒展开法

本文采用的一阶截断形式本质上对应于检验质量位置磁场的局部线性近似:

$$\mathbf{B}_m(\mathbf{x}_m) \approx \mathbf{B}_e(\mathbf{x}_{TM}) + \nabla \mathbf{B}_e(\mathbf{x}_{TM})(\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_{TM}) \quad (27)$$

也就是说, 在一阶泰勒展开框架下, 磁传感器测量值可被视为检验质量位置磁场及其梯度信息的线性响应。因此, 若测点位置能够更准确地反映目标区域局部磁场的变化趋势, 则一阶模型对检验质量磁场的逼近能力将相应增强。基于 Taiji-2 仿真结果, 本文进一步比较了优化前后磁传感器测量值与检验质量敏感轴方向磁场之间的相关性。

图 6 展示了优化前后, 各个磁传感器沿敏感轴方向的测量结果与检验质量沿敏感轴方向的磁场值之间的相关系数, 其中, MS1 到 MS4 是 TM1 附近的四个磁传感器, MS5 到 MS8 是 TM2 附近的四个磁传感器。结果表明, 优化后 TM1 附近磁传感器 (MS1-MS4) 与 TM1 磁场之间的相关系数平均提升了 0.0275, TM2 附近磁传感器 (MS5-MS8) 与 TM2 磁场之间的相关性也呈现提

升趋势,其中部分测点的提升更为明显,MS8的相关系数提升了0.04。同时,各磁传感器与非对应检验质量之间并未表现出明显相关性增强。该结果说明,优化后的构型并不是简单地增强所有测点与所有目标点之间的耦合,而是提高了对应局部测点对目标区域磁场变化的针对性表征能力。对于一阶泰勒展开而言,这意味着测点所提供的局部线性信息更加贴近检验质量附近真实磁场分布,从而有利于提高重建精度。

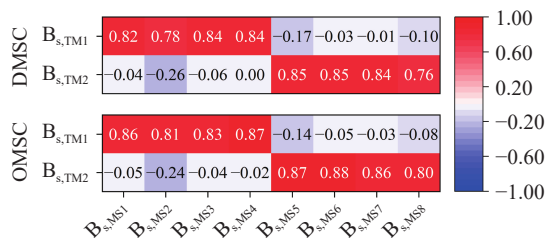


图6 优化前后磁传感器测量值与检验质量位置磁场的相关性矩阵(敏感轴方向)

Fig. 6 Correlation matrices between magnetic sensor measurements and the magnetic field at the test mass locations before and after optimization in the sensitive-axis direction

(2)距离加权法

基于距离加权法的重建结果由各磁传感器测量值按照与检验质量之间的距离进行加权求和得到,因此该方法更加直接地依赖测点值与目标点真实磁场之间的接近程度,以及距离权重分配是否合理。从这一角度看,影响IDW重建效果的关键并不只是几何距离本身,而是测点磁场值是否能够在合适权重作用下更准确地代表检验质量位置磁场。基于Taiji-2仿真结果,本文进一步分析了优化前后磁传感器测量值与检验质量敏感轴方向磁场之间的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)。结果如图7所示。

图7直观地展示了磁传感器测量值与检验质量位置磁场在敏感轴方向地均方根误差。结果显示,除个别测点外,优化后多数磁传感器测量值与对应检验质量磁场之间的均方根误差均有所降低或基本持平,表明优化构型总体上提高了测点读数对目标点磁场的代表性。磁传感器构型优化后,除了MS3的测量值与检验质量位置磁场的均方根误差比优化前稍大,其余位置的均方根误差均小于或与优化前持平,尤其是在MS6位置,优

化前后的均方根误差明显下降。此外,MS1到MS4测量值与检验质量1的均方根误差明显小于MS5到MS8,而MS5到MS8测量值与检验质量2的均方根误差明显小于MS1到MS4,这也能说明与检验质量距离近的磁传感器的测量值具有更高的代表性。

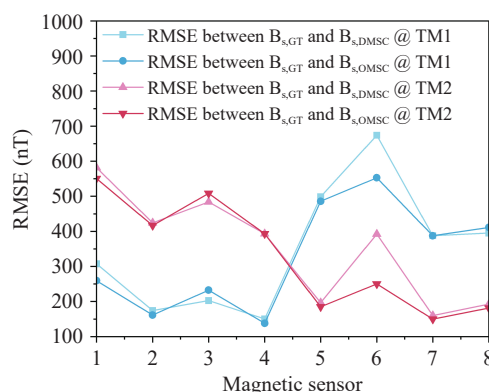


图7 磁传感器测量值与检验质量位置磁场之间在敏感轴方向的均方根误差

Fig. 7 RMSE between magnetic sensor measurements and the magnetic field at the test mass location in the sensitive-axis direction

由于优化后MS3的测量值与两个检验质量的均方根误差大于优化前,所以我们绘制了优化前后各个磁传感器对应IDW方法中平均权重的折线图,分析优化前后位置改变带来权重变化,如图8所示。

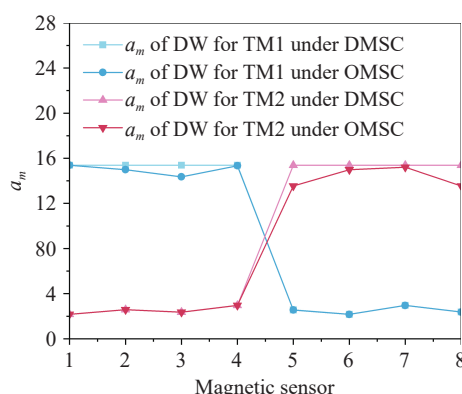


图8 优化前后各个磁传感器测量值的平均权重

Fig. 8 Average weights of magnetic sensor measurements before and after optimization

结合优化前后各磁传感器在IDW中的平均权重可以发现,构型优化不仅改变了测点值与目标点之间的差异程度,也改变了各测点对最终重建结果的贡献分配。在默认磁传感器构型下,由

于每个检验质量周围的磁传感器与对应的检验质量是等距的,所以它们的加权系数是相等的,均为 15.38。但是在优化后的磁传感器构型下,由于磁传感器位置发生改变,有些磁传感器与它对应的检验质量之间的距离增加,导致它对应的加权系数降低,其中变化比较明显的是 MS3。优化后的 MS3 与 TM1 之间距离变远,权重变低,它对重建结果的贡献也变小。即使优化后 MS3 测量值与检验质量位置磁场均方根误差变大,对重建结果的影响也相应减小。由此可见,优化构型对 IDW 的改善作用主要体现在提高了多数测点读数对目标点磁场的代表性,同时通过调整测点空间分布优化了权重分配结构,使重建过程更加依赖高代表性的测点信息。

(3)多极展开法

基于多极展开法重建过程并不是直接基于测点值与目标点值之间的局部线性关系或距离加权关系,而是首先由磁传感器测点位置构造设计矩阵,再利用测量数据求解多极展开系数,最后由展开系数恢复检验质量位置处的磁场。因此,ME 的重建精度不仅取决于测点值本身,还与测点构型对不同多极项的区分能力以及多极系数求解过程的数值稳定性密切相关。相较于 TE 和 IDW,ME 的误差形成机制更复杂,其构型作用机理也更难通过相关系数或均方根误差等指标进行直观刻画。

为此,本文进一步对默认构型与优化后构型下多极展开设计矩阵的奇异值特性进行了分析。结果表明,优化后构型对应设计矩阵的最小奇异值由 1.6262 提升至 1.6884,提高了 3.83%;与此同时,2-范数条件数由 2.8984 降低至 2.8218,降幅为 2.64%,倒条件数则由 0.3450 提高至 0.3544,而矩阵数值秩在优化前后均保持为 3。计算结果说明,优化后的磁传感器构型并未改变多极展开设计矩阵的基本秩结构,但在一定程度上改善了其数值条件,使得不同多极项之间的可分辨性有所增强,同时减弱了多极展开系数求解过程对测量误差和数值扰动的敏感性。

从多极展开法的求解机理来看,设计矩阵最小奇异值的增大意味着测点构型对某些原本较难区分的低阶空间模式具有更好的辨识能力,而条件数的下降则表明系数反演过程的病态性有所减

弱。因此,优化后的构型虽然未必显著改变检验质量位置磁场与各测点磁场之间的直接对应关系,但更有利于提高多极展开系数求解的稳定性,从而为磁场重建精度的改善提供了支持。结合表 1 和表 2 中优化后构型在 ME 下通常优于或不劣于默认构型的结果,可以认为对于多极展开法,优化构型的积极作用主要并不体现为测点值对目标点磁场的直接逼近,而更可能体现为测点集合对局部磁场空间模式辨识能力的提升,以及由此带来的参数求解稳定性改善。

综上,优化后的磁传感器构型之所以能够同时提升 TE、IDW 以及 ME 的重建性能,并不是因为其仅针对某一种重建方法进行了特化设计,而是因为它从根本上改善了测点对检验质量附近磁场空间分布的采样质量。对于 TE,这种改善主要体现为局部线性关系表征能力的增强;对于 IDW,主要体现为测点代表性提升与距离权重分配优化;对于 ME,则体现为测点构型对局部空间模式辨识能力和参数求解稳定性的改善。由此可见,优化后的测点位置更具代表性,是其提升磁场重建性能的共同原因。

5 结 论

本文围绕空间引力波探测航天器中检验质量附近磁场难以原位测量、磁场重建精度受限这一关键问题,系统研究了磁传感器构型对检验质量磁场重建性能的影响,并提出了一种基于改进 IVY 算法的磁传感器构型优化方法(MSC-IVYA)。与已有研究主要聚焦于磁场重建模型改进或磁传感器性能提升不同,本文将研究重点前移至测点布局这一更基础但长期缺乏系统讨论的环节,指出在磁传感器数量有限、安装区域受约束的工程背景下,构型设计本身是影响磁场重建精度的重要因素,应作为独立优化问题加以研究。

在方法上,本文首先针对实际航天器中磁传感器不能任意布置的特点,对可安装区域进行离散化处理,将连续空间中的三维位置优化问题转化为离散候选点集合上的选址问题;随后,结合空间引力波探测任务中默认磁传感器构型所蕴含的工程先验,设计了基于默认构型的种群初始化策略,以提高搜索效率并增强优化结果的工程可接

受性;进一步地,针对原始 IVY 算法在离散组合优化问题中邻域信息传播不足的问题,提出动态邻域更新机制,改善了种群个体之间的信息交互方式;最后,通过构建面向多随机磁模型的累积适应度函数,使优化结果不依赖于单一磁矩方向场景,从而兼顾了重建精度与构型鲁棒性。

仿真结果表明,磁传感器构型优化能够在不同任务条件下有效改善检验质量磁场重建精度,但其收益大小与任务本身的观测条件密切相关。对于 LISA Pathfinder,在默认磁传感器构型下, TM1 在 IDW、ME 和 TE 下的平均相对误差分别为 593.74%、508.04% 和 516.50%, TM2 分别为 327.37%、390.20% 和 435.83%,整体误差水平较高,反映出该任务在磁传感器数量有限、测点距离检验质量较远且局部磁场分布更复杂条件下的重建难度。在此基础上, MSC-IVYA 仍表现出明显优化效果, TM1 在 IDW、ME 和 TE 下的误差分别降低至 390.39%、357.55% 和 363.89%,降幅分别为 34.25%、29.62% 和 29.55%,均优于 PSO 和原始 IVY; TM2 在 TE 下的误差由 435.83% 降至 180.75%,降幅达到 58.53%,显著优于 DMSC。对于 Taiji-2,默认构型下的重建结果已明显优于 LISA Pathfinder,其中 TM1 在 IDW、ME 和 TE 下的平均相对误差分别为 72.14%、77.27% 和 122.03%, TM2 分别为 87.76%、97.17% 和 112.14%。在此基础上, MSC-IVYA 仍可进一步提升重建精度, TM1 在 IDW 和 ME 下的误差分别降至 32.55% 和 47.25%,较默认构型分别下降 54.88% 和 38.85%,均优于 DMSC、PSO 和 IVY; TM2 在 ME 和 TE 下的误差分别降至 74.27% 和 80.76%,为三种方法中的最优结果,而在 IDW 下 IVY 取得最低误差 44.42%, MSC-IVYA 为 59.14%,仍优于默认构型和 PSO。总体来看, PSO 和原始 IVY 虽然在部分任务和部分重建方法下也能取得较优结果,但其表现缺乏一致性,甚至在部分情形下劣于默认构型;相比之下, MSC-IVYA 在两类任务和多种重建方法下均表现出更稳定的误差下降趋势,说明其更适合用于受安装约束条件下的磁传感器构型优化。上述结

果表明,磁传感器构型是影响磁场重建性能的重要设计变量,而本文提出的 MSC-IVYA 在总体性能和结果稳定性方面均具有较好的综合优势。

为了进一步解释优化构型为何能够改善重建性能,本文还从不同重建方法的建模特征出发,对其作用机理进行了分析。对于 TE,优化后的磁传感器构型提高了测点磁场与对应检验质量磁场之间的相关性,从而增强了一阶局部线性近似的有效性;对于 IDW,优化构型一方面降低了多数测点读数与目标点磁场之间的偏差,另一方面通过改变测点相对位置优化了距离权重分配,使重建结果更多依赖于高代表性的测点信息;对于 ME,本文引入设计矩阵奇异值指标进行定量分析,结果表明优化后构型对应设计矩阵的最小奇异值提高了 3.83%, 2-范数条件数下降了 2.64%,而数值秩保持不变,说明优化后的测点布局并未改变多极展开模型的基本结构,但确实改善了设计矩阵的数值条件,有利于增强不同多极项的可分辨性并提高多极展开系数求解的稳定性。由此可见,优化构型对不同重建方法的改善虽然表现形式不同,但其共同基础在于提高了测点对检验质量附近真实磁场空间分布的采样质量与表征能力。

当然,本文仍存在进一步深化的空间。当前研究主要基于磁源位置和模值固定、磁矩方向随机变化的建模条件展开,虽能够反映典型不确定性,但对更复杂在轨时变磁环境的刻画仍有限;对多极展开法的机理分析也主要集中于设计矩阵数值条件的层面,尚未进一步展开到不同阶次展开项可辨识性和误差传播机制的系统研究。后续工作可进一步结合更真实的在轨磁环境模型、更多任务约束条件以及实验验证手段,对磁传感器构型优化与磁场重建之间的耦合机制开展更深入研究,并探索面向多目标指标的构型协同设计方法。尽管如此,本文的研究结果表明,在空间引力波探测航天器磁诊断问题中,将磁传感器构型纳入系统优化框架,是提升检验质量磁场重建能力、降低磁场噪声评估不确定度的一条具有明确工程价值和研究意义的可行路径。

参考文献:

- [1] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, *et al.*. Observation of gravitational waves from a binary black hole

- merger[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 061102.
- [2] XIAO G Z, KUANG T F, HE Y T, *et al.*. Giant enhancement of nonlinear harmonics of an optical-tweezer phonon laser[J]. *eLight*, 2024, 4(1): 17.
- [3] GAO L, ZHENG L A, LU B, *et al.*. Generation of squeezed vacuum state in the millihertz frequency band[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 294.
- [4] WANNER G. Space-based gravitational wave detection and how LISA Pathfinder successfully paved the way[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(3): 200-202.
- [5] LISA Pathfinder Collaboration. LISA Pathfinder: first steps to observing gravitational waves from space[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 840(1): 012001.
- [6] DANZMANN K, RÜDIGER A. LISA technology—concept, status, prospects[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2003, 20(10): S1-S9.
- [7] LUO J, CHEN L SH, DUAN H Z, *et al.*. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035010.
- [8] MILYUKOV V K. TianQin space-based gravitational wave detector: key technologies and current state of implementation[J]. *Astronomy Reports*, 2020, 64(12): 1067-1077.
- [9] HU W R, WU Y L. The Taiji program in Space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. *National Science Review*, 2017, 4(5): 685-686.
- [10] MANCE D. *Development of electronic system for sensing and actuation of test mass of the inertial sensor LISA*[D]. Zurich: Fakultet Elektrotehnike, Strojarsstva I Brodogradnje u Splitu, 2012.
- [11] 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.
- [12] ZHOU A N, CAI L, XIAO CH Y, *et al.*. Non-gravitational force measurement and correction by a precision inertial sensor of TianQin-1 satellite[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2022, 39(11): 115005.
- [13] SUN ZH Y, LI P X, LI Z Q, *et al.*. Analysis of the calculation method and evaluation of the magnetic acceleration noise of space inertial sensor[J]. *Results in Physics*, 2023, 53: 106955.
- [14] CAÑIZARES P, CONCHILLO A, GARCÍA-BERRO E, *et al.*. The diagnostics subsystem on board *LISA Pathfinder* and *LISA*[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2009, 26(9): 094005.
- [15] DIAZ-AGUILÓ M, GARCÍA-BERRO E, LOBO A. Theory and modelling of the magnetic field measurement in LISA PathFinder[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(3): 035005.
- [16] MATEOS I, RAMOS-CASTRO J, LOBO A. Low-frequency noise characterization of a magnetic field monitoring system using an anisotropic magnetoresistance[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 235: 57-63.
- [17] MATEOS I, DÍAZ-AGUILÓ M, RAMOS-CASTRO J, *et al.*. Interpolation of the magnetic field at the test masses in eLISA[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, 32(16): 165003.
- [18] LIU B B, YANG ZH, QIANG L E, *et al.*. Magnetic field recovery technique based on distance weighting multipole expansion method[J]. *Europhysics Letters*, 2023, 143(5): 59003.
- [19] TROUGNOU L. ECSS space systems electromagnetic compatibility handbook[C]. *2012 ESA Workshop on Aerospace EMC*, IEEE, 2012: 1-6.
- [20] TSATALAS S, VERGOS D, SPANTIDEAS S T, *et al.*. A novel multi-magnetometer facility for on-ground characterization of spacecraft equipment[J]. *Measurement*, 2019, 146: 948-960.
- [21] SPANTIDEAS S T, CAPSALIS C N. Validation of a source identification method for prediction of low-frequency magnetic fields in space missions[J]. *IEEE Magnetism Letters*, 2018, 9: 1300805.
- [22] XU L. A proportional differential control method for a time-delay system using the Taylor expansion approximation[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2014, 236: 391-399.
- [23] LU G Y, WONG D W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique[J]. *Computers & Geosciences*, 2008, 34(9): 1044-1055.
- [24] ALAEE R, ROCKSTUHL C, FERNANDEZ-CORBATON I. An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation[J]. *Optics Communications*, 2018, 407: 17-21.
- [25] GHASEMI M, ZARE M, TROJOVSKÝ P, *et al.*. Optimization based on the smart behavior of plants with its engineering applications: Ivy algorithm[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2024, 295: 111850.

- [26] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, IEEE, 1995: 1942-1948.
- [27] 刘野, 侍行剑, 蔡志鸣, 等. 多阶段偏差修正模型的检验质量磁场重建[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(3): 596-611. LIU Y, SHI X J, CAI ZH M, *et al.*. Magnetic field reconstruction at test mass using the multi-stage bias correction model[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 596-611. (in Chinese).
- [28] MATEOS I, DIAZ-AGUILÓ M, GIBERT F, *et al.*. Magnetic back action effect of magnetic sensors for eLISA/NGO[C]. *Proceedings of the 9th LISA Symposium*, ASP, 2013: 341.

作者简介:



刘野 (1999—), 男, 江苏徐州人, 博士生, 主要从事航天器工程和航天器磁洁净方面的研究。E-mail: lauye@mail.ustc.edu.cn



李华旺 (1973—), 男, 江西都昌人, 博士, 博士生导师, 研究员, 主要从事嵌入式系统、计算机应用、信息处理、航天器总体方面的研究。E-mail: lihw@microstate.com