

# 空间引力波探测系统数值与半物理仿真技术综述\*

王继河, 孟云鹤, 宋佳凝, 陆璐, 张鑫, 郭兴, 周金灵, 张居正

“天琴计划”教育部重点实验室, 中山大学天琴中心 & 物理与天文学院, 天琴前沿科学中心,  
国家航天局引力波研究中心, 广东 珠海 519082

**摘要:** 空间引力波探测系统具有超高精度指标需求、子系统间强耦合等特点, 造成传统的航天器数值和半物理仿真技术难以直接应用到空间引力波探测系统的数值和半物理仿真验证中。为促进适用于空间引力波探测系统的数值和半物理仿真技术的研究, 本文首先调研了空间引力波探测系统所涉及的数值和半物理仿真技术国内外研究现状, 包括: 数值仿真系统、光/机/热/自引力多场耦合仿真技术、地面半物理仿真验证技术等。而后, 总结提出空间引力波探测系统在数值和半物理仿真技术方面需重点解决的关键技术, 包括: 空间引力波探测系统数值仿真体系架构设计技术、全任务流程仿真技术、高速高精度的多场耦合仿真技术和高置信度的空间引力波探测系统地面半物理仿真技术。

**关键词:** 空间引力探测系统数值与半物理仿真; 仿真体系结构设计; 全任务流程仿真; 多场耦合仿真

**中图分类号:** V448.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)01-0233-06

## Review of numerical and hardware-in-the-loop simulation technology of space-borne gravitational wave detection system

WANG Jihe, MENG Yunhe, SONG Jianing, LU Lu,  
ZHANG Xin, GUO Xing, ZHOU Jinling, ZHANG Juzheng

MOE Key Laboratory of TianQin Mission, TianQin Research Center for Gravitational Physics & School of Physics and Astronomy, Frontiers Science Center for TianQin, CNSA Research Center for Gravitational Waves, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China

**Abstract:** Space-borne gravitational wave detection system has the characteristics of ultra-high precision index requirements and strong coupling between subsystems, which makes it difficult for the traditional spacecraft numerical and hardware-in-the-loop simulation technology to be directly applied to the numerical and hardware-in-the-loop simulation verification of space-borne gravitational wave detection system. In order to promote the research of numerical and hardware-in-the-loop simulation technology suitable for space-borne gravitational wave detection system, this paper investigates the research status of numerical and hardware-in-the-loop simulation technology involved in space-borne gravitational wave detection system, including: numerical simulation system, optical/mechanical/thermal/self-gravity multi-field coupling simulation technology, hardware-in-the-loop simulation technology, etc. Then, the key technologies in the numerical and hardware-in-the-loop simulation technology of the space-borne gravitational

\* 收稿日期: 2020-11-10 录用日期: 2020-11-25 网络首发日期: 2021-01-08

基金项目: 广东省基础与应用基础重大项目 (2019B030302001)

作者简介: 王继河 (1982年生), 男; 研究方向: 分布式航天器动力学与控制; E-mail: wangjihe@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 孟云鹤 (1978年生), 男; 研究方向: 航天器系统建模与仿真; E-mail: mengyh7@mail.sysu.edu.cn

wave detection system are summarized, including: the architecture design technology of the numerical simulation system of the space-borne gravitational wave detection system, the full task process simulation technology, the high-speed and high-precision multi-field coupling simulation technology, and the hardware-in-the-loop simulation technology of the space-borne gravitational wave detection system with high confidence.

**Key words:** numerical and hardware-in-the-loop simulation of space-borne gravity detection system; simulation architecture design; full task process simulation; multi-field coupling simulation

## 1 引言

航天系统具有高成本、高风险等特点,其中航天系统数值和地面半物理仿真技术在系统方案优选、系统指标确定、关键技术验证、关键载荷和器件性能测试等方面发挥重要的作用,可有效降低航天器系统开发流程复杂度、缩短任务开发周期、降低开发成本、提高系统可靠性。随着航天器功能多样化(航天器中载荷数量增多)和系统关键指标精度越来越高(姿态和轨道控制精度、关键载荷热控精度等),航天器系统数值和半物理仿真技术也面临着更多的需求与挑战。特别地,空间引力波探测任务,如 LISA<sup>[1]</sup>、ASTROD-GW 计划<sup>[2]</sup>、DECIGO 计划<sup>[3]</sup>、天琴计划<sup>[4]</sup>、太极计划<sup>[5]</sup>等,对空间引力波探测器间激光干涉测量精度、空间引力波探测器间姿态指向控制精度、检验质量残余加速度噪声、关键载荷区域内温度控制精度等都提出了前所未有的超高精度要求,导致适用于传统航天器系统的数值和半物理仿真技术无法直接应用到此类空间引力波探测系统的数值与半物理仿真实验中。其主要原因为空间引力波探测系统分系统间的耦合(惯性传感器与卫星平台间的耦合、激光干涉测量系统与卫星平台间的耦合、惯性传感器与激光干涉系统间的耦合等)远超传统航天器系统,导致传统航天器系统中可忽略的分系统耦合影响,在空间引力波探测系统仿真中是必须考虑的;空间引力波探测系统对仿真的精度提出了前所未有的需求,如在某些关键指标方面需能仿真皮米量级相对位置变化和微 K 量级的温度变化;同时,传统航天器中可进行解耦的光/机/热仿真,在空间引力波探测系统中为仿真皮米量级相对位置和微 K 量级的温度变化,将必须开展光/机/热/自引力多场耦合仿真。为保障空间引力波探测任务的顺利实施,降低任务成本和风险,有必要有针对性的研究适用于空间引力波探测系统的数值和半物理仿真技术。其中构建空间引力

波探测系统的数值仿真系统可对关键技术指标论证、子系统、分系统级指标体系论证提供支撑,特别是其能解决单系统及数值仿真无法解决的系统间强耦合影响问题,确保任务级指标的实现,而构建空间引力波探测系统的半物理仿真系统可进一步增加仿真的可信度,同时可对关键载荷或单机进行地面测试,确保研制的关键载荷或单机的性能。

## 2 空间引力波探测系统数值仿真技术国内外研究现状

### 2.1 空间引力波探测系统数值仿真系统国内外研究现状

为满足 LISA 空间引力波探测任务所涉及的科学目标论证、任务流程设计、指标体系确定、科学运行方案设计等研究需求, LISA 技术团队在方案初期开展了相应的数值仿真系统构建工作。Rubbo 等<sup>[6]</sup>开发了 LISA Simulator 系统,该系统允许用户输入自定义的引力波波形,输出探测器的模拟响应和主要噪声源信号。Vallisneri<sup>[7]</sup>开发了 Synthetic LISA 仿真框架,用于研究 LISA 空间引力波探测任务科学目标与技术实现间的相互作用,该系统运行在比集成建模仿真更高的抽象层次,无需对航天器子系统建模。为分析 LISA 空间引力波探测任务不同子系统对空间引力波探测的影响, Petiteau<sup>[8]</sup>开发了 LISACode 系统,该系统输入是用户定义或内置的引力波源、航天器的噪声水平和轨道参数等,输出是基本测量的时间序列或 TDI (Time Delay Interference) 发生器的时间序列等,该系统可分析 LISA 臂长的影响、缺少部分链路的 TDI 组合可用情况等。

LISANode<sup>[9]</sup>是 LISA 空间引力波探测任务的原型端到端仿真系统,其为仪器和延时干涉测量提供详细的模块化仿真,该系统包含最新的仪器仿真模型、各种噪声源模型和 TDI 算法。LISANode 仿真系统具有易于扩展升级的优势,任何仿真都

可以通过 Python 工具箱将单元节点连接到仿真图中进行。

综上所述, 现阶段针对空间引力探测系统数值仿真系统的研究已经取得一定的进展, 但研究多停留在空间引力波探测子系统级噪声或核心算法仿真层面, 如噪声模拟、TDI 算法模拟等。考虑到空间引力波系统对指标苛刻的精度要求, 需重点开展包含空间引力波波源、探测器系统、数据处理系统在内的全链路仿真技术研究, 同时需重点关注系统及子系统间耦合影响, 为系统和子系统技术方案和指标确定提供技术支撑。

## 2.2 光/机/热/自引力多场耦合仿真技术

光/机/热/自引力多场耦合仿真可分为: 基于多软件交互的多场耦合仿真和基于简化模型的多场耦合仿真两方面。

**2.2.1 基于多软件交互的多场耦合仿真** 为解决空间引力波探测系统仿真中涉及的光/机/热/自引力多场耦合问题, Merkowitz 等<sup>[10]</sup> 针对 LISA 空间引力波探测任务提出了基于多软件间交互的光/机/热/自引力多场耦合分析仿真方案, 该方法将单个模型拓扑用于光/机/热/自引力分析周期的所有阶段。

Peabody<sup>[11]</sup> 给出了针对 LISA 空间引力波探测任务的基于多软件交互耦合仿真的流程评估分析, 实现了高精度的 STOG (结构-热-光学-自引力) 耦合分析, 分别讨论了基于 ThermalDesk 和基于 TMG 进行热分析的精度问题。

**2.2.2 基于简化模型的多场耦合仿真技术** 不同于传统卫星独立于航天器姿态和轨道控制回路仿真的光机热分析方法, LISA Pathfinder 将光/机/热/自引力仿真集成到航天器姿态和无拖曳控制回路仿真中, 实现在线的光/机/热/自引力耦合仿真<sup>[12-14]</sup>, 其核心创新是, 不同于在传统的热弹性模型分析, 温度分布的每一次改变都需要重新输入温度分布, 进行全新的 FEM 有限元分析, 而是采用了利用灵敏度因子计算热弹性变形的策略, 无需新的有限元分析, 就可根据该灵敏度矩阵模型计算温度分布, 从而得到所需节点的位移和旋转。

基于简化模型的多场耦合仿真技术同样被应用于其他空间系统仿真中, 例如在 NASA Deep Space Optical Communications 项目中<sup>[15]</sup>, NASA 联合 JPL、波音、格伦研究中心与乔治亚理工大学, 共同开发了基于 MATLAB 的光/机/热/控的模型集成技术, 实现了在概念设计过程中对方案最终性能

的预测与优化。NASA 在 James Webb 太空望远镜的设计阶段<sup>[16]</sup> 也采用了基于 MATLAB 完成光机热控的系统集成。

目前, 针对空间引力波探测系统光/机/热/自引力多场耦合仿真需求, 基于多软件交互的多场耦合仿真和基于简化模型的多场耦合仿真方法都存在一定的缺点和不足。具体为, 基于多软件交互的多场耦合仿真方法, 仿真精度虽然高, 但其计算速度慢, 难以接入到空间引力波探测系统控制闭环仿真回路中; 而基于简化模型的多场耦合仿真计算速度快, 但由于其进行了模型简化, 多场耦合精度会有所降低。而考虑到空间引力波探测任务系统间的强耦合特性, 故需提出可接入系统控制闭环回路的高速高精度的多场耦合仿真技术与方法, 以便在空间引力波探测系统控制闭环大回路中动态考核关键指标 (测距精度、检验质量残余加速度噪声等) 是否满足任务需求。

## 2.3 空间引力波探测系统地面半物理仿真验证技术

由于空间引力波探测系统现阶段还处在方案论证和关键技术攻关阶段, 故尚未见针对空间引力波探测任务的地面半物理仿真系统。下面分别从分布式卫星系统编队控制、检验质量地面测试两个方面对相关领域的研究现状进行调研与分析。

**2.3.1 分布式卫星系统编队控制地面半物理仿真技术** Robertson 等<sup>[17]</sup> 介绍了斯坦福大学开发的基于气浮的编队卫星分布式控制地面半物理仿真系统, 相对状态测量采用室内 GPS 和光学系统, 可实现厘米量级的位置控制精度。Friedman<sup>[18]</sup> 介绍了美国海军研究生院开发的基于气浮的分布式卫星地面半物理仿真系统, 其水平台为环氧树脂浇注而成。Nakka<sup>[19]</sup> 介绍了一种新的地面半物理仿真实验系统 Multi-Spacecraft Testbed for Autonomy Research (M-STAR), 可用于六自由度的编队制导、相对导航和控制策略研究, 具有更加通用的模块设计。NASA JPL<sup>[20]</sup> 实验室开发了用于 TPF (Terrestrial Planet Finder) 编队控制地面验证的半物理仿真系统。Wimmer 等<sup>[21]</sup> 给出了德国宇航中心 DLR 研制的基于桁架结构的近距离编队运动模拟器系统, 用于编队飞行、近距离交会对接等任务的地面半物理仿真验证。

**2.3.2 检验质量地面测试实验技术** 在 LISA 空间引力波探测任务中, 在 0.1 mHz~0.1 Hz 的测量频段, 检验质量上的残余加速度干扰需要低于  $3 \times$

$10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ , 条件极其苛刻<sup>[22]</sup>。为研发并验证惯性参考敏感器, 国内外设计了精密的扭摆装置并做了大量实验。

特伦托大学的一个团队一直致力于为LISA及LISA PATHFINDER等空间引力波探测项目开发惯性参考敏感器的研究, 并取得了瞩目的成就。Hueller等建立了GRS(Gravitational Reference Sensor)扭摆验证装置, 利用一根细长悬丝将检验质量悬吊起来, 测量电容腔体作为电容位置传感器时对检验质量的影响<sup>[23-24]</sup>; Giuliana Russa等在Hueller等的扭摆验证装置的基础上, 通过加强装置的隔热隔振等技术使得用于测量GRS性能的扭摆装置的灵敏度进一步提高, 通过这套设备测量了电容驱动噪声, 并验证了LPF在敏感轴上的free-fall控制模式的可行性<sup>[25-27]</sup>; Tombolato等<sup>[28]</sup>用这套设备对检验质量未知干扰上限进行估计, 并对紫外线放电设备进行实验, 检测紫外放电引入的干扰力影响。

综上所述, 现阶段对分布式卫星系统动力学与控制地面半物理仿真和检验质量地面半物理仿真的研究较多, 但是综合检验质量、编队卫星姿态、编队卫星轨道控制、激光链路控制的空间引力波探测器系统地面半物理仿真装置还未见公开文献发表。而考虑到检验质量、激光干涉测量与卫星编队之间的强耦合关系, 需在地面对上述耦合关系进行仿真验证。

### 3 空间引力波探测系统数值与半物理仿真关键技术

在对空间引力波探测系统所涉及的数值仿真系统研发、光/机/热/自引力多场耦合仿真技术和空间引力波探测系统地面半物理仿真验证技术进行国内外研究现状调研和分析的基础上, 为促进相关领域的研究进展, 下面将梳理出空间引力波探测系统数值仿真与半物理仿真技术方面亟需重点攻关的关键技术。

#### 3.1 空间引力波探测系统全链路数值仿真技术

现阶段针对空间引力波探测系统数值仿真系统的研究多集中在环境噪声、关键载荷测量噪声以及核心算法的模拟上, 已经开发的空间引力波探测仿真系统可在系统方案设计初期发挥重要作用, 对不同技术路线和传感器组合进行评估。随着空间引力波探测系统相关技术和器件研发的深入, 需要重点开展包含空间引力波源、空间探测

系统、地面处理系统和地面评估系统在内的空间引力波探测任务全链路数值仿真系统, 进行全链路的仿真, 同时需重点考虑分系统间的耦合, 如卫星平台与检验质量耦合、卫星平台与干涉测量系统的耦合、检验质量和干涉测量系统间的耦合等, 从而为空间引力波探测系统的关键系统级指标确定、关键技术方案的可行性和有效性提供支撑。

#### 3.2 全任务流程仿真技术

目前空间引力波探测系统的数值仿真研究多关注在科学模式下的仿真, 即空间引力波探测器系统激光链路已建立且正常工作、航天器无拖曳系统正常工作、检验质量悬浮控制回路正常工作, 空间引力波探测器正处在科学探测模式状态。然而, 通过分析空间引力波探测系统全任务流程, 可知该类任务除科学探测模式外, 其他模式下空间引力波探测系统能否正常工作同样会决定任务是否顺利实施。其他模式需解决的问题包括: 空间引力波探测器从火箭分离后, 如何进入目标轨道、形成高稳定构形, 星间激光链路如何捕获和建立、检验质量如何释放、无拖曳模式如何建立、高稳定构形保持、故障模式下的航天器姿轨轨迹规划与控制、以及如何重新进入科学模式等, 这些问题同样需要进行仿真研究, 同时各模式方案的可行性、指标满足度、以及模式间切换仿真等也需重点研究。

#### 3.3 高速高精度的多场耦合仿真技术

现有的基于多软件交互的多场耦合仿真和基于简化模型的多场耦合仿真技术都存在一定的缺点, 不能完全满足空间引力波探测系统对光/机/热/自引力多场耦合仿真的需求。具体表现在, 基于多软件交互的多场耦合仿真技术虽然求解精度高, 但是计算速度慢, 难以接入空间引力波探测系统控制仿真闭环回路中; 而基于简化模型的多场耦合仿真技术, 虽然计算速度快, 但是仿真精度受限, 故为在空间引力波探测系统控制闭环回路中动态考核关键技术指标的满足度, 需提出高速高精度的多场耦合仿真技术。在这方面, 需重点开展的研究包括: ①高精度的多场耦合仿真模型简化方法; ②高速高精度的多场耦合仿真求解方法; ③高速高精度的多场耦合仿真置信度评估方法。

#### 3.4 高置信度地面半物理仿真验证系统

考虑到现阶段针对空间引力波探测系统的研究多为方案论证和关键技术攻关阶段, 故还未见到有成熟的可适用于空间引力波探测地面半物理

仿真验证系统方案与半物理仿真实验设计。而考虑到关键载荷或器件存在一些难以精确建模的特性或环节, 在空间引力波探测器任务发射入轨前, 在地面对系统关键载荷或技术进行地面半物理仿真验证是必要的, 可验证关键载荷或技术方案的正确性和有效性, 为任务顺利实施提供保障。针对现阶段空间引力波探测系统地面仿真所存在功能单一、未考虑空间引力波探测任务特点等缺点, 需重点开展可对激光链路捕获、建立, 无拖曳控制, 多星姿轨协调控制等进行地面半物理仿真验证的空间引力波探测系统地面半物理仿真技术研究。在这方面, 需重点开展的研究包括: ① 基于悬吊和气浮的空间引力波探测地面半物理仿真系统设计; ② 基于悬吊和气浮的空间引力波探测地面半物理仿真系统搭建技术; ③ 基于悬吊和气浮的空间引力波探测地面半物理仿真实验设计与评估技术。

#### 参考文献:

- [1] KARSTEN D, PAU A, HEATHER A, et al. LISA: A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts[R]. 2017.
- [2] MEN J R, NI W T, WANG G. Design of ASTROD GW orbit[J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2010, 34(4): 434-446.
- [3] KAWAMURA S, NAKAMURA T, ANDO M, et al. The Japanese space gravitational wave antenna {DECIGO [J]. Classical and Quantum Gravity, 2006, 23 (8): 125-131.
- [4] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector [J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33: 035010.
- [5] GONG X F, LAU Y K, XU S N, et al. Descope of the ALIA mission [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 610(1):012011.
- [6] RUBBO L J, CORNISH N J, POUJADE O. The LISA simulator[J]. AIP Conference Proceedings, 2003, 686 (1): 307-310.
- [7] VALLISNERI M. Synthetic LISA: Simulating time delay interferometry in a model LISA [J]. Physical Review, 2005, D71: 022001.
- [8] PETITEAU A, AUGER G, HALLOIN H, et al. LISACode : A scientific simulator of LISA [J]. Physical Review, 2008, D77(2):023002.
- [9] BAYLE J B, LILLEY M, PETITEAU A, et al. Effect of filters on the time-delay interferometry residual laser noise for LISA[J]. 2019, 99(8): 084023.
- [10] MERKOWITZ S M, CONKEY S, HAILE W B, et al. Structural, thermal, optical and gravitational modelling for LISA [J]. Classical & Quantum Gravity, 2004, 21 (5):S603-S610(8).
- [11] <https://tfaws.nasa.gov/TFAWS03/Data/Interdisciplinary%20Session/Peabody.pdf>.
- [12] BRANDT N, FICHTER W, KERSTEN M, et al. End-to-End modeling for drag-free missions with application to LISA pathfinder [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2004, 37(6):241-246.
- [13] BRANDT N, FICHTER W, KERSTEN M, et al. LISA Pathfinder E2E performance simulation: optical and self-gravity stability analysis[J]. Classical & Quantum Gravity, 2005, 22(10):S493.
- [14] MONTEMURRO F. Self-gravity and thermo elastic distortion modelling for drag-free satellite simulations [D]. Pisa:University of Pisa, 2004.
- [15] CESARONE R J, ABRAHAM D S, SHAMBAYATI S,

## 4 结 论

1) 不同于已广泛研究的近地近距离卫星编队与星座系统所涉及的数值仿真与半物理仿真问题, 空间引力波探测系统对数值仿真和半物理仿真提出了前所未有的挑战, 且目前相关研究还处在初级阶段, 其中涉及关键问题尚有待深入展开。

2) 为加快空间引力波探测系统数值和半物理仿真方面的研究, 需重点解决空间引力波探测系统数值仿真体系架构设计技术、全任务流程仿真技术、高速高精度的多场耦合仿真技术和高置信度地面半物理仿真验证系统等关键技术问题。同时, 需重点关注所建立的数值和半物理仿真系统的可信度问题, 需通过开展与成熟专业软件仿真结果、类似地面半物理仿真试验结果比对等多种方法对所建立的仿真系统进行可信度评估, 确保所建立仿真系统的可信性。

- et al. Deep-space optical communications [C]// Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2011 International Conference on. IEEE, 2011.
- [16] [https://femci.gsfc.nasa.gov/workshop/2001/presentations/mosier/Mosier\\_NGST\\_Mono6.pdf](https://femci.gsfc.nasa.gov/workshop/2001/presentations/mosier/Mosier_NGST_Mono6.pdf).
- [17] ROBERTSON A, INALHAN G, HOW J P. Formation control strategies for a separated spacecraft interferometer [C]// Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat No 99CH36251). IEEE, 1999; 6: 4142–4147.
- [18] <https://core.ac.uk/display/24604296>.
- [19] [https://dst.jpl.nasa.gov/test\\_beds/](https://dst.jpl.nasa.gov/test_beds/).
- [20] NAKKA Y K, FOUST R C, LUPU E S, et al. Six degree-of-freedom spacecraft dynamics simulator for formation control research [C]// 2018 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, 2018.
- [21] WIMMER T, BOGE T, MUEHLBAUER Q. EPOS: A Hardware-in-the-Loop robotic simulation assembly for testing automated rendezvous and docking GNC sensor payloads [C]// 8th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems. 2011: 5–10.
- [22] DANZMANN K. LISA – an ESA cornerstone mission for the detection and observation of gravitational waves [J]. *Advances in Space Research*, 2003, 32 (7) : 1233–1242.
- [23] HUELLER M, CAVALLERI A, DOLESI R, et al. Torsion pendulum facility for ground testing of gravitational sensors for LISA [J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2002, 19(7):1757.
- [24] CARBONE L, CAVALLERI A, DOLESI R, et al. Achieving geodetic motion for LISA test masses: ground testing result [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(15):151101.
- [25] RUSSANO G. A torsion pendulum ground test of the LISA Pathfinder Free-fall mode [D]. Trento: University of Trento, 2015.
- [26] DANIELE N. Toward a third generation torsion pendulum for the femto newton level testing of free fall in the laboratory [D]. Trento: Università Degli Studi Di Trento, 2007.
- [27] RUSSANO G, CAVALLERI A, CESARINI A, et al. Measuring fN force variations in the presence of constant nN forces: a torsion pendulum ground test of the LISA Pathfinder free-fall mode [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2018, 35(3): 035017.
- [28] TOMBOLATO D. A laboratory study of force disturbances for the LISA pathfinder free fall demonstration mission [D]. Trento: University of Trento, 2008.

(责任编辑 张 冰)