

空间引力波探测无拖曳技术现状与趋势

张锦绣^{1*}, 陶文舰², 连晓斌³, 王继河¹, 孟云鹤⁴, 刘源¹

(1. 中山大学 航空航天学院, 广东 深圳 518107; 2. 中山大学 物理与天文学院, 广东 珠海 519082;
3. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 4. 中山大学 人工智能学院, 广东 珠海 519082)

摘要: 航天器无拖曳控制是实现引力波空间探测科学平台超静超稳运行的核心关键技术之一。目前, 国内外各研究机构对航天器系统的动力学与控制进行了深入研究, 并针对不同的探测频段需求提出了不同的探测任务。根据探测任务进行了航天器编队设计与控制的详细介绍和分析, 对涉及的无拖曳与姿态控制、高精度惯性传感器与执行机构等原理和理论方法进行了深入的剖析。针对现已开展的空间引力波探测无拖曳航天器在轨飞行的演示验证整体情况进行详述和分析。在此基础上, 提出后续开展相关研究中亟待解决的关键问题, 指出未来无拖曳航天器系统动力学与控制的研究热点和趋势。

关键词: 无拖曳航天器; 空间引力波探测; 轨道设计与控制; 无拖曳与姿态控制; 惯性传感器与执行机构; 飞行演示验证

中图分类号: V448.21 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1001-2486(2024)02-001-17



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Current status and trends of drag-free technology for space-based gravitational wave detection

ZHANG Jinxiu^{1*}, TAO Wenjian², LIAN Xiaobin³, WANG Jihe¹, MENG Yunhe⁴, LIU Yuan¹

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;
2. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;
3. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;
4. School of Artificial Intelligence, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: The drag-free control of the spacecraft is one of the key technologies to realize the ultra-static and ultra-stable operation of science platform for gravitational wave space detection. At present, the dynamics and control of the spacecraft system have been studied deeply by various research institutions at domestic and overseas, and different detection tasks have been proposed according to the requirements of different detection frequency bands. The design and control of spacecraft formation were introduced and analyzed in detail according to the exploration mission, and the principles and theoretical methods of drag-free and attitude control, high-precision inertial sensors and actuators involved were deeply dissected. The overall situation of demonstration and verification of drag-free spacecraft in orbit for space-based gravitational wave detection was detailed and analyzed. On this basis, the key problems required to be solved in the research of follow-up related were presented, and the research hotspots and trends in the methods of future dynamics and control of drag-free spacecraft systems were also pointed out.

Keywords: drag-free spacecraft; space-based gravitational wave detection; orbit design and control; drag-free and attitude control; inertial sensor and actuator; flight demonstration verification

亘古至今,人类对茫茫宇宙的奥秘求知不止,探索不息。近年来,科学界对深远空间环境表现出越来越多的关注,提出了包括空间引力波探测在内的诸多空间科学探测任务,对系统超大孔径、超长焦距、多功能综合且可灵活组合等提出了不同需求。此外,空间引力波探测任务对超高精度惯性基准稳定性和加速度噪声等提出了跨代

需求。

为了使航天器系统长期稳定的处于高精度高稳定状态,必须在航天器内部建立一个或者几个不受非保守力干扰的高精度高稳定性参考源,航天器本体严格跟踪内部惯性参考源运动,从而满足探测任务对探测器系统超高稳定性的要求。自 Pugh^[1]于1959年首次提出了无拖曳(drag-free)

概念以来,无拖曳航天器在检验广义相对论短程线效应与坐标系拖曳效应^[2-4]、获取高精度重力场模型与大地水准面模型^[5-7]等方面取得了显著成果。在此基础上,众多航天机构将无拖曳技术迅速拓展到了空间引力波探测领域,先后提出了包括激光干涉空间天线(laser interferometer space antenna, LISA)、单航天器激光天文动力学空间计划-引力波(astrodynamical space test of relativity using optical devices-gravitational wave, ASTROD-GW)、太极计划(TAIJI)、分赫兹干涉引力波天文台(DECi-hertzinterferometer gravitational-wave observatory, DECIGO)、轨道介质引力天文学探测器(orbiting medium explorer for gravitational astronomy, OMEGA)和天琴计划(TIANQIN)等^[8-19]在内的诸多任务。

所谓无拖曳航天器是检验质量(test mass, TM)被封闭在航天器腔体^[20],原理图如图 1 所示,航天器本体屏蔽大气阻力、太阳光压等非引力干扰,并通过微小推力连续控制实现干扰的前馈补偿,从而使检验质量运行在纯引力轨道^[21]。需要进一步明确的是,空间引力波探测中的无拖曳控制^[22-23]是指,航天器内部的检验质量自由悬浮于探测器内部且无接触,在屏蔽外界非保守力基础上,通过超高精度微推力器和电容极板的联合控制,为测量超微弱时空涟漪导致的距离变化建立超静超稳空间惯性基准。

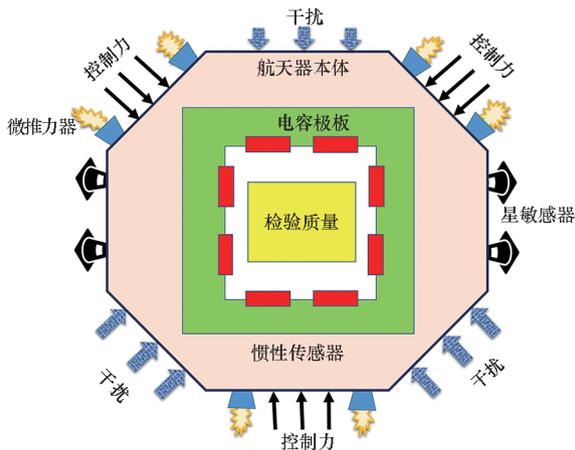


图 1 无拖曳航天器原理图^[20]

Fig. 1 Drag-free spacecraft principle diagram^[20]

故此,可以将空间引力波探测无拖曳航天器理解为一类具备超高精度超高稳定性能的空间天文观测系统。系统表征为混合尺度编队,大尺度编队动力学(一般在百 km 以上,甚至百万 km)与微小尺度编队动力学(一般在毫米或微米量级以下)系统共存。由于处于日地月空

间,三体引力、太阳辐射压力、电磁力、Poynting-Robertson 效应和地球扁率等对系统的影响表现得更激烈,通常系统中存在多条超高精度测量链路,故存在多个与链路相应的超高精度惯性基准,单颗探测系统的自由度远超过 6 个,一般在 12~18 个,甚至更多,内外环、高低频控制系统严重耦合^[24-25];由于检验质量内环控制采用弱力场效应,多个检验质量的初始状态也将严重制约系统的稳定特性。

本文将从空间引力波探测任务、无拖曳编队轨道设计与控制、无拖曳与姿态控制、核心传感器与执行机构以及空间引力波先期飞行演示验证等方面对空间引力波探测中无拖曳航天器相关技术进行系统性综述。

1 空间引力波探测任务发展现状

目前开展的空间引力波探测任务包括太阳中心轨道和地球中心轨道两类引力波任务。其中,太阳中心轨道引力波任务主要包括 LISA、TAIJI、ASTROD-GW 和 DECIGO 计划,地球中心轨道引力波任务主要包括 OMEGA 和 TIANQIN 计划。不同的引力波任务探测的频段也不尽相同,结果如表 1 所示。

表 1 空间引力波探测任务及相关参数

Tab. 1 Space-based gravitational wave detection mission and related parameters

类型	任务	发起单位	探测频段
太阳中心轨道	LISA	ESA	$10^{-3} \sim 10^{-1}$ Hz
	TAIJI	中国	$10^{-4} \sim 1.0$ Hz
	ASTROD-GW	中国	$1 \mu\text{Hz} \sim 0.01$ Hz
地球中心轨道	DECIGO	日本	$0.1 \sim 10$ Hz
	OMEGA	美国	$10^{-4} \sim 10^{-1}$ Hz
	TIANQIN	中国	$10^{-4} \sim 1.0$ Hz

1.1 太阳中心轨道引力波任务

1.1.1 LISA 计划

LISA 是由欧洲航天局和美国国家航空航天局合作的引力波探测计划,主要探测来自宇宙深处微弱的低频($10^{-3} \sim 10^{-1}$ Hz)引力波源^[26]。该计划由三个相同的航天器构成边长(臂长)为 5×10^6 km 的空间等边三角形编队,每个航天器均有 2 个立方体检验质量块^[27],如图 2 所示。检验质量作为 LISA 计划进行引力波探测的探针,通过无拖曳控制抵消各种非保守力,保证检验质量在

0.1 mHz 附近受到的加速度干扰低于 $3 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。该系统运行在与地球相同的太阳中心轨道上,相位角滞后地球约 20° ,编队平面与黄道面之间的夹角成 60° ,以尽可能地减少地球引力对航天器编队造成的干扰,并尽可能长期保持构型稳定且处于高精度科学模式,该计划预计将在 2037 年发射。

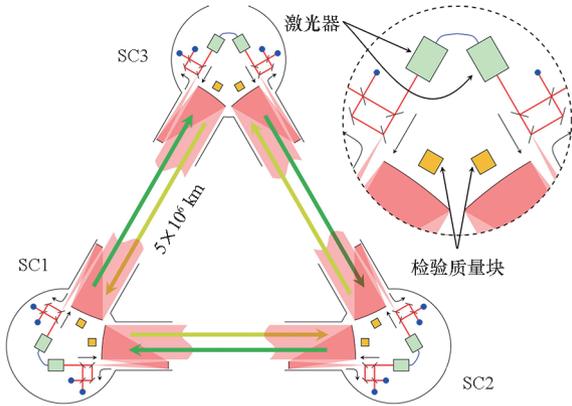


图2 LISA 编队示意图^[28]

Fig. 2 Schematic diagram of LISA formation^[28]

1.1.2 TAIJI 计划

2015 年中国科学院正式提出引力波探测计划,2016 年初该计划正式向外公布为“太极计划”^[18, 29],并预计将于 2030 年前后发射,该任务瞄准中低频段 ($10^{-4} \sim 1.0 \text{ Hz}$) 引力波,其频率范围覆盖了 LISA 的低频和日本 DECIGO 计划的中频,可实现多维观测引力波。不同于 LISA 的 $5 \times 10^6 \text{ km}$,TAIJI 计划中星间距离为 $3 \times 10^6 \text{ km}$ ^[30],其相位超前于地球约 20° ^[31]。同样采用无拖曳控制保证检验质量的残余加速度噪声小于 $3 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

考虑到 LISA 的角度分辨率仅可满足特定源星系识别要求,若 TAIJI 与 LISA 形成 TAIJI-LISA 联合空间构型^[32](如图 3 所示),将可以弥补

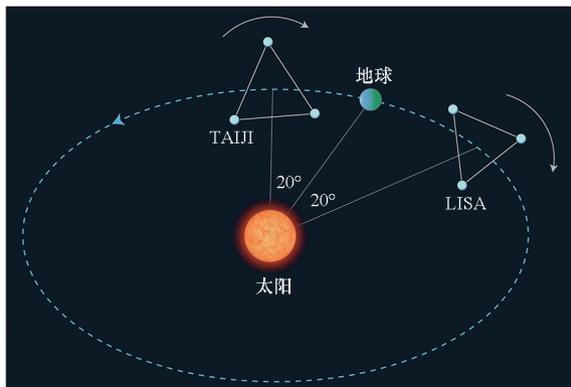


图3 LISA-TAIJI 网络的空间构型^[32]

Fig. 3 Space configuration of the LISA-TAIJI network^[32]

LISA 定位引力波源的角分辨率不足的问题,显著改善引力波源的空间定位^[33],定位精度可提高近 4 个数量级^[34-35]。

1.1.3 ASTROD-GW 计划

ASTROD-GW 源于 1993 年由中国提出的 ASTROD 任务概念,该任务由三个航天器组成一个近似等边三角形的空间阵列^[36],如图 4 所示,分别部署于太阳-地球拉格朗日点 L_3 、 L_4 和 L_5 ,其臂长为 $2.6 \times 10^8 \text{ km}$,各航天器间利用激光干涉进行测距,聚焦于 $1 \mu\text{Hz} \sim 0.01 \text{ Hz}$ 的低频引力波的探测^[37]。ASTROD-GW 主要针对大质量、大范围产生的引力波源及宇宙早期产生的引力波背景进行探测,可进一步探测 LISA 未能探测的波源,和 LISA 有一定的互补性^[38]。

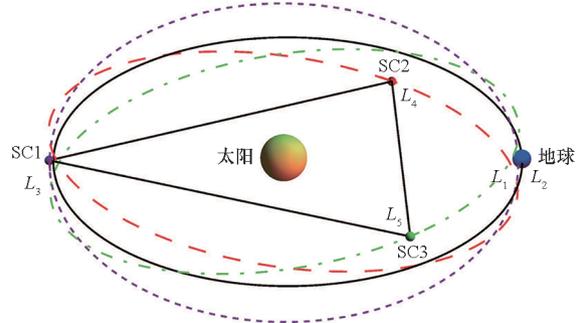


图4 ASTROD-GW 任务轨道设计示意图^[36]

Fig. 4 Schematic diagram of ASTROD-GW mission orbit design^[36]

1.1.4 DECIGO 计划

DECIGO 是由日本于 2001 年发起的空间引力波探测计划^[39],通过探测红移 $z = 1$ 的中子星双星引力波来观测宇宙加速。概念设计如图 5 所示,DECIGO 预计希望于 2027 年能发射,由三个保持等边三角形编队飞行的航天器组成^[40],臂长为 1 000 km,与 LISA 相比,DECIGO 的臂长较短,使得 DECIGO 的探测频段 $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ 远高于 LISA 的探测频段 ($10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ Hz}$)。因此,DECIGO 的探测频段能将 LISA 与地面引力波探测器的频率间隙 ($0.1 \sim 10 \text{ Hz}$) 完美弥合,例如激光干涉引力波天文台 (laser interferometer gravitational-wave observatory, LIGO) 等。

2018 年 DECIGO 合作组将该计划的先期验证系统更名为 B-DECIGO^[41-42],作为正式的引力波探测任务开展研究。B-DECIGO 与 DECIGO 整体基本相同,由三个航天器构成等边三角形的编队,臂长为 1 000 km,B-DECIGO 是 DECIGO 的小型化任务,用于进行检验质量的无拖曳控制、干涉仪在轨稳定运行、法布里-珀罗腔锁定采集以及

稳定编队飞行等关键技术的可行性测试。与 LISA 相比,该计划的编队构型拥有更高的散粒噪声灵敏度,其较短的臂长也更能保持构型和星间距离的稳定。

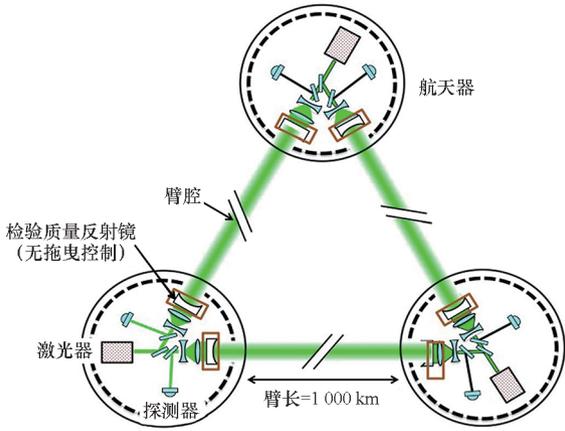


图 5 DECIGO 概念设计^[13, 40]

Fig. 5 Conceptual design of DECIGO^[13, 40]

1.2 地球中心轨道引力波任务

1.2.1 OMEGA 计划

OMEGA 是 1998 年美国 NASA 的 MIDEX 任务中提出的^[43] 候选项目,如图 6 所示,该计划由六个航天器(约 100 kg)构成一个等边三角形,每两个航天器(间隔几 km)分布在等边三角形的每个顶点,边长为 10^6 km,运行于 6×10^5 km 的圆形地球轨道上^[44],所有航天器均通过无拖曳控制系统进行非保守力的抵消,使得检验质量的残余加速度噪声低于 $10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,通过来自六个微型探测器的组合信号,可以构建一个迈克尔逊干涉仪来测量引力波在 $10 \sim 10^4$ s 范围内产生的微小距离扰动,其探测灵敏度窗口在 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Hz 的频率范围内^[45],能够探测到红移 $z = 4$ 含有中心黑洞的星系碰撞形成的大质量黑洞双星合并现象。

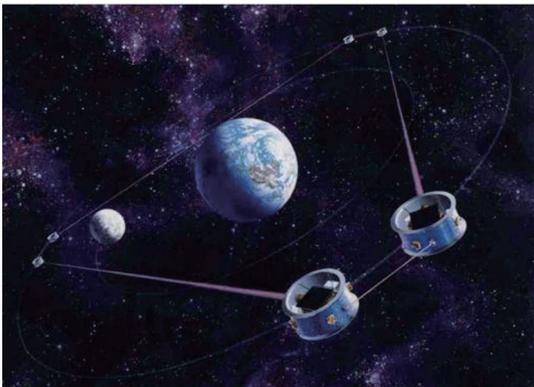


图 6 OMEGA 任务概念^[43]

Fig. 6 Conception of the OMEGA mission^[43]

1.2.2 TIANQIN 计划

天琴计划于 2014 年 3 月被罗俊院士提出^[46],其科学目标是实现对 10^{-4} Hz ~ 1.0 Hz 频段的引力波进行探测^[47]。TIANQIN 星座和轨道示意如图 7 所示,部署三个全同航天器构成边长约为 1.7×10^5 km 的等边三角形星座,运行在垂直于黄道平面且轨道高度为 10^5 km 的轨道上。TIANQIN 探测器的频率灵敏度介于 LISA 和 DECIGO 之间,与 LISA 在 10^{-3} Hz 附近重叠,与 DECIGO 在 1 Hz 附近接近。由于三个航天器在地心轨道上运行距离地球近,所面临的空间环境比较复杂,需要权衡科学目标、空间环境、科学载荷等多方面的限制和要求。目前,TIANQIN 计划已经完成了“0123”中的第“0”和“1”两步,获得对高轨卫星的精密测距能力,其 TIANQIN-1 技术验证航天器也对多项相关技术进行了在轨演示验证,正在持续推进第“2”步 TIANQIN-2 技术试验航天器的相关工作,预期将于 2035 年前后发射,以期实现超静超稳航天器平台及大尺度编队飞行、实现引力波探测信号的辨识测量等。

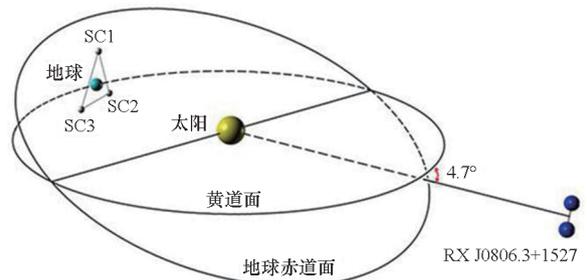


图 7 TIANQIN 星座和轨道示意图^[14]

Fig. 7 Schematic diagram of the TIANQIN constellation and orbit^[14]

无论是哪种轨道类型的空间探测引力波任务,其核心关键技术均包含星间激光干涉测距技术、超静超稳激光收发望远镜、噪声抑制与消除技术、星间激光捕获与跟瞄技术、无拖曳控制技术、高精度惯性传感器技术、超静超稳航天器系统、空间引力波探测全链路数值仿真、指标体系地面综合验证,以及科学目标优化与数据处理等,所有关键技术的研究也将助力空间科学技术的迅速发展。针对上述对各个引力波探测任务的详述和分析,下面将围绕空间引力波探测航天器涉及的关键技术和在轨飞行试验情况进行详述的综述。

2 无拖曳编队轨道设计与控制

鉴于探测频段差异性,空间引力波探测系统航天器之间的距离从常规航天器系统的千米量级

大幅增加到了 $10^5 \sim 10^6$ km 量级,且在长期科学观测期间要求相对构型参数基本保持稳定。受到不同中心天体的摄动影响,不同计划中采用的编队构型表征出不同的设计约束、运行特性、控制性能等,对无拖曳系统轨道的设计与控制也不尽相同。为此,需要建立无拖曳航天器的相对动力学,再进一步开展轨道与编队构型设计、编队构型重构与维持的相关研究。

2.1 无拖曳编队相对动力学

2.1.1 无拖曳相对动力学

早在 1964 年, Lange^[48] 首次建立了地球轨道无拖曳航天器检验质量与航天器本体的相对运动方程; Powell 等^[49] 为消除自旋航天器干扰,提出将无拖曳航天器相对运动分解为基于控制目的的检验质量相对航天器质心运动和基于评估无拖曳性能的检验质量运动。Scheithauer 等^[50] 推导了航天器运动方程、检验质量平动方程、检验质量转动方程和航天器-检验质量耦合方程,提出了一种高保真六自由度通用无拖曳模拟器,对航天器与检验质量之间的小位移高分辨率数值进行描述。进一步地,施梨^[51] 基于达朗贝尔原理建立了不同检验质量六自由度无拖曳航天器动力学模型。Pettazzi 等^[52] 研究了航天器与检验质量的相对线性化动力学,通过考虑系统不确定性,使模型可用于解决一类非球形检验质量的无拖曳航天器。Canuto 等^[53] 基于嵌入式模型理论研究了加速度计模式下无拖曳航天器动力学,并通过飞行试验验证了其理论的正确性和可行性。

针对多检验质量情况, Wiegand 等^[54] 利用马蒂厄微分方程分析了检验质量运动的稳定性。Theil^[55] 考虑作用在航天器和检验质量上的外力和力矩,推导了检验质量与航天器耦合时的动力学。Guilherme 等^[56] 推导了航天器与检验质量的平动动力学和姿态动力学,提出了一种参数估计/识别策略,改善了无拖曳控制系统的性能。Fichter 等^[57] 和 Wu 等^[58] 分别研究了 15 个自由度的无拖曳航天器动力学,利用定量反馈理论解决无拖曳控制系统的执行性能和稳定性的评估。

此外,诸多学者也考虑了作用于航天器和检验质量的干扰问题, Lange^[59] 认为低轨无拖曳航天器所受外部干扰主要来自微陨石撞击、地磁洛伦兹力、太阳光压、大气阻力和重力梯度力等。Gath 等^[60] 提出太阳轨道无拖曳航天器本体所受干扰主要来自太阳光压和推力器噪声。Lange^[48] 分析了检验质量传感器位置误差引起的耦合干

扰,提出电容位移传感器引起的耦合干扰主要与检验质量位置精度有关。谷振丰等^[61] 系统性分析了地球非球形摄动、大气阻力、太阳光压、天体引力摄动、潮汐摄动、地球辐射压、广义相对论效应和经验摄动等带来的扰动。

2.1.2 编队相对动力学

传统的航天器编队主要基于轨道要素相对运动方程和 CW (Clohessy-Wiltshire) 方程开展近距离编队的相对运动动力学研究,对于超远距离大尺度编队涉及较少。

对于日心轨道任务, LISA 任务的正三角形编队构型主要基于齐次 Hill 方程^[62]。De Marchi 等^[63] 通过移除 CW 方程的长期项并加入摄动参数和约束条件,得到了稳定的空间圆编队初始条件和简化动力学模型。Nayak 等^[64] 解析推导了具有二阶修正项的 CW 方程,以保证臂长在一年内变化缓慢。Yi 等^[65] 提出了动力学模型共轨道限制问题和求一般近似解的方法。Li 等^[66] 采用基于轨道要素进行数值和解析的方法,以保证得到等边三角形编队构型稳定的初始轨道参数。针对 ASTROD-GW 任务,门金瑞等^[67] 采用圆型限制性三体力学模型来研究日-地平动点大尺度编队的构型稳定问题。

针对地心轨道任务, Hu 等^[68] 给出了 TIANQIN 在日心黄道坐标系下相对运动的解析表达式,但未包括地球、太阳、月球、行星、大型小行星等高阶矩的扰动。Tan 等^[69] 得到了 TIANQIN 在地心赤道坐标下初始位置的表达式,同时考虑了来自地球、月球等引力场的多极项的扰动,以满足编队构型稳定性需求。

综上所述,目前空间引力波探测的大尺度航天器编队的相对动力学建模主要采用数值计算和精确解析推导方法,对于大尺度无拖曳多检验质量多航天器编队的相对运动的高精度模型的机理研究并未涉及,开展超远距离间的动力学模型机理建模,是解决引力波探测编队在轨高精度高稳定性运行的重要保障。

2.2 轨道与编队构型设计

2.2.1 编队构型设计

不论日心轨道还是地心轨道引力波探测任务的编队,在轨运行的航天器均采用三星编队的等边三角形稳定构型更利于编队控制和保证进入科学模式后臂长的高敏感度。Folkner 等^[70]、Nayak 等^[64] 和 Li 等^[66] 建立了一种基于轨道几何关系进行数值和解析以对空间等边三角形编队构型进行设计的方法,即先确定其中一个航天器的轨道,然

后通过绕垂直黄道面方向旋转 $\pm 120^\circ$, 得到另外两个航天器的轨道, 最终构成等边三角形编队。Dhurandhar 等^[71] 和 De Marchi 等^[63] 采用相对轨道动力学的 CW 方程构造出相对绕飞虚拟圆, 利用相位均匀分配构建等边三角形编队的构型。张雪峰等^[72]、万小波等^[73] 和 Ye 等^[74] 通过建立了轨道面和轨道半径的选取给出了构型的初步设计方法, 分析了地月系引力场的扰动, 并通过数值优化搜索方法改进了构型设计。刘培栋等^[75] 提出了空间正三角形编队的并行式和串行式的初始化构型。Mishra 等^[76] 使用 CW 方程研究表明, 任何航天器构型与黄道平面 $\pm 60^\circ$ 可以实现在轨稳定, 航天器之间的距离(臂长)在构型的维度上保持不变, 并得到了减少臂长弯曲的摄动解。李卓^[77] 重点考虑对编队臂长、呼吸角、臂长变化率及星地距离等指标进行空间引力波探测编队构型快速优化, 提升了编队构型优化效率。

2.2.2 轨道优化设计

对于日心轨道任务, Hughes^[78] 提出了一种针对 LISA 的初步最优轨道分析方法。Amato^[79] 分析了 LISA 位于日心椭圆轨道上的位置和时间。在轨道稳定性和优化方面, Povoleri 等^[80]、Halooin^[81] 和 Yang 等^[82] 研究学者针对摄动分析、臂长和后缘角选择、注入误差要求等各种问题, 用解析和数值方法对类似 LISA 空间引力波探测系统编队飞行的日心轨道设计和优化进行了广泛的研究。Xia 等^[83] 通过采用混合反应禁忌搜索全局优化算法对 LISA 航天器任务轨道进行了优化设计。Wang 等^[36, 84] 和 Men 等^[85] 通过调整平均轨道周期和偏心率, 对 ASTROD-GW 任务在太阳-地球 L_3 、 L_4 和 L_5 拉格朗日点的轨道进行了设计优化。唐文林^[86] 采用遗传算法对 TAIJI 计划航天器编队的任务轨道参数进行了设计优化。

针对地心轨道任务, 万小波等^[73] 对导致等边三角形轨道构型发生长周期漂移的轨道要素进行了分析, 且将这些要素作为轨道设计的待优化参量, 应用粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 进行优化。Ye 等^[74] 提出了组合优化方法对 TIANQIN 轨道进行优化, 讨论了由轨道进动而导致探测器指向的长期缓慢漂移。Tan 等^[69] 研究了改变轨道方向和半径这两个主要设计因素对 TIANQIN 星座的星间运动稳定性的影响, 由此得到相对稳定的轨道参数范围。

不论是日心轨道任务还是地心轨道任务在对无拖曳航天器编队进行轨道优化设计时, 均需要对整个编队的臂长、航天器之间的相对速度和呼吸角

等参数, 以及轨道平面进行优化。如 TIANQIN 预计将臂长优化为 $\pm 1\% \times (\sqrt{3} \times 10^5)$ km, 运行 5 年的相对速度为 ± 10 m/s, 运行 2 年的相对速度为 ± 5 m/s, 运行 5 年的呼吸角为 $\pm 0.2^\circ$, 运行 2 年的呼吸角为 $\pm 0.1^\circ$ 。目前空间引力波探测的大尺度航天器编队的轨道设计优化的构型稳定主要对各参数采用组合的数值优化方法, 在轨计算效率低, 优化结果不够理想, 难以满足高精度动力学模型机理的优化解计算, 亟须能解决优化速度和效率的鲁棒性高的轨道参数优化算法。

2.3 编队构型重构与维护

2.3.1 构型初始化控制

Sweetster^[87] 分析了脉冲控制不可避免存在入轨偏差, 提出构型初始化后还需要进行准确调整控制, 以满足系统建立激光链路的要求。夏炎^[88] 将初始化问题转化为二体模型下的 Lambert 问题, 对各航天器脉冲制动控制的速度增量进行了解算^[89]。Wu 等^[37] 设计了仅考虑太阳引力拉格朗日平动点航天器双脉冲霍曼转移轨道, 实现了日心轨道拉格朗日平动点编队构型初始化。

2.3.2 构型保持与重构控制

Hechler 等^[90] 通过选择最优初始条件和适当的轨道调整控制实现航天器臂长和臂长变化率的稳定, 从而实现编队构型被动稳定保持。Bik 等^[91] 研究了推力器噪声、定轨误差和轨道注入误差对编队构型保持的影响, 外环补偿模型中的摄动扰动, 内环采用 PD 控制来保持各航天器的位置, 有效地提高了等边三角形编队的稳定性。

黄文涛等^[92] 考虑 TIANQIN 计划航天器编队构型稳定性要求和摄动的影响, 对虚拟编队的构型进行设计, 进而求解航天器平均轨道要素修正量, 求解得到的航天器平均轨道要素修正量小于偏差量, 轨道修正通过四脉冲控制实现, 研究表明该方法通过部分轨道修正满足了探测器的构型稳定性要求。张立华等^[93] 认为 TIANQIN 计划进行引力波探测的三个航天器必须构成并保持高精度的编队或星座, 需要高精度的轨道测量、确定与控制支持, 需要高精度的航天器姿态控制和无拖曳控制, 需要高精度的星间光束指向控制等多个方面的协调配合。王继河等^[94] 认为建立空间引力波探测系统高稳定构型将是未来进行科学任务探测亟待解决的问题, 且空间引力波探测器仅装有微推进系统, 故其姿态和轨道存在强耦合, 需重点开展构型初始化和保持控制过程中的姿轨耦合控

制问题研究。

对于空间引力波探测的航天器编队构型保持和重构控制,需要重点关注:摄动及误差积累导致的构型漂移,需要对其进行构型恢复问题;引力波探测频段更改带来的编队构型尺度调整问题;引力波探测方向更改带来的编队平面指向调整问题;对科学探测任务影响最小的轨道保持控制策略与方法进行研究,对构型初始化和保持控制过程中的姿轨耦合控制方法进行研究^[94]。另外,应该尽可能地设计具有强鲁棒性的控制算法来实现轨道构型的长期稳定,考虑到航天器编队的实际配置约束,可以基于小推力连续控制模式设计编队构型重构控制算法来实现编队的重构控制,为开展大尺度编队构型的稳定控制提供研究基础。

3 无拖曳与姿态控制

无拖曳与姿态控制的发展大致分为两个阶段^[23],一是20世纪60~70年代第一代无拖曳航天器的代表性任务,这一阶段的特点是内部检验质量一般只采用球体形状,传感器采用电容传感,推进系统采用冷气推进方式。从20世纪80年代至今是无拖曳航天器发展的第二阶段,新一代无拖曳航天器采用一个以上的检验质量布局,同时为了减小检验质量各个自由度之间的测量与控制耦合,采用了高精度的位移传感器和微推力器,其控制精度得到大幅度提升。然而在空间引力波探测中,控制系统各环节间的交叉耦合使航天器的运行模式变得较为复杂,为此需要对无拖曳航天器的相关控制开展深入研究。

3.1 控制体系结构

在空间引力波探测中,无拖曳与姿态控制系统(drag-free attitude control system, DFACS)是无拖曳航天器进行科学任务的核心控制系统,控制着两个检验质量的12个相对自由度以及航天器的姿态,共15个自由度。为了控制这些自由度,DFACS应用了三种不同类型的控制回路^[95],包括:无拖曳控制回路、静电悬浮控制回路和姿态控制回路。

在无拖曳控制回路中,对检验质量的6个自由度使用来自惯性传感器的静电测量或相对检验质量坐标的光学测量进行控制,并使用微推进系统作为执行机构,该控制模式下航天器跟随检验质量运动。

在静电悬浮控制回路中,相对于航天器在6个非无拖曳控制自由度中使用来自惯性传感器的

静电测量或来自光学计量系统的测量对检验质量进行控制,由惯性传感器的静电驱动模块作为执行机构。在该控制模式下检验质量跟随航天器运动。

在姿态控制回路中,控制航天器遵循预先设定的参考姿态,使航天器始终指向太阳,天线始终指向地球,由星敏感器作为传感器。不同的控制回路在带宽上是分开的,以尽量减少回路之间的交叉耦合。无拖曳控制回路具有最高的带宽,姿态控制回路具有最低的带宽。

无拖曳航天器的控制根据是否对检验质量施加控制分为两种控制模式^[56],分别是位移模式和加速度计模式。位移模式下利用位置传感器获得检验质量的相对位置^[96],将其传给控制航天器姿态与相对位置的控制器,以控制航天器本体跟踪检验质量运动,保持检验质量位于电容极板中心,以保证无拖曳控制的高精度要求。

加速度计模式^[96]下从位置传感器上获取检验质量相对于航天器本体的实时位置误差,以控制检验质量跟踪航天器本体运动,保证检验质量质心位于航天器本体中心。与位移模式相比,该模式的敏感精度较低,其控制器的控制算法简单易于实现。

整个无拖曳姿态控制系统贯穿非科学模式到科学模式的整个过程^[95],具体的工作模式如图8所示,从航天器入轨后整个系统进行初始化,随后正式启动DFACS,进行航天器姿态的粗对准,达到姿态精度要求后,进入检验质量的释放捕获模式,采用静电悬浮控制其12个自由度,使其能够快速稳定;星间激光链路建立完成后进入过渡模式,敏感轴方向采用无拖曳控制,检验质量其余11个自由度仍然采用静电悬浮控制,利用相关的切换控制算法保证从捕获模式平滑切换到科学模式;在未满足进入科学模式的精度要求下,还需要进入高精度分辨率模式进一步提高检验质量与航天器的位置和姿态精度;最终进入科学模式,保持高精度控制和维持,以期开展空间引力波探测任

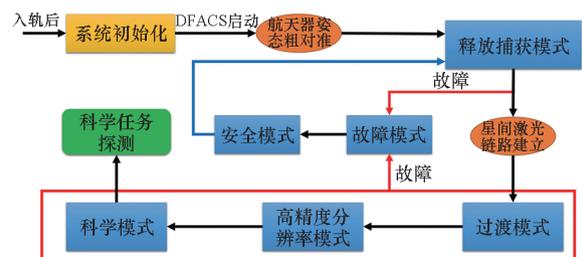


图8 无拖曳控制系统工作模式

Fig. 8 Drag-free control system operating modes

务;科学探测任务结束将锁紧检验质量,等待下一次工作模式开启。在整个过程中都需要建立相应的状态,并通过控制来维持,如果执行机构等发生故障,将会进入安全模式,并进行相应的控制分配、故障诊断与容错控制。

3.2 状态建立与维持控制

Mance^[97]提出采用脉宽调制控制器和 PID 控制器控制检验质量稳定。Montemurro 等^[98]研究了滑模控制器用于检验质量释放捕获控制的优越性。Trobiani^[99]设计了非线性 Bang-Bang 控制器以用于 LISA Pathfinder 中检验质量释放控制。Lian 等^[100-101]解析推导了检验质量相对腔体最小运动的释放位置,研究了无拖曳航天器入轨后的相对运动状态的估计和检验质量扰动问题。

Fichter 等^[57]针对 LISA Pathfinder 航天器的各个回路间相互耦合的特点,采用了反馈解耦的方式,在不破坏整个系统动力学特性的情况下,将姿态控制系统、无拖曳控制系统以及静电悬浮控制系统分别解耦为不同特性的单输入单输出系统。采用 H_{∞} 回路成形方法设计了相应的控制器。Saage 等^[102]针对 LISA Pathfinder 的无拖曳控制系统中控制输出影响科学测量的问题,采用 H_{∞} 控制方法来设计控制器,使控制输出的噪声降至最低。Wu 等^[58]以控制器灵敏度和互补灵敏度传递函数为约束条件,提出基于定量反馈控制的无拖曳控制方法。Hu 等^[103]引入扰动模型描述航天器姿态运动引起的环境扰动和推力扰动等,采用噪声估计器来估计外部非重力加速度,设计了基于嵌入式模型控制的无拖曳控制器。

苟兴宇等^[104]采用单积分 PI 控制器完成了加速度计模式无拖曳控制,引入比例微分项增加系统的稳定裕度。Xiao 等^[105]针对 1 Hz(低频段)以下动态性能,在系统中加入了微分器来调节系统的等效阻尼,进一步抑制低频带内的非重力干扰。Lian 等^[106]考虑系统不确定性和执行机构约束,基于频率分离思想设计了 H_{∞} 混合灵敏度控制器,实现了无拖曳航天器敏感轴的频率分离控制。

初始状态的建立与维持控制是保证无拖曳航天器入轨后检验质量释放快速稳定、抵消来自外部环境和内部扰动,以使得检验质量释放后能够快速稳定与维持,为此需要针对航天器编队的多检验质量从释放到稳定整个过程中的释放策略和状态估计进行深入研究,包括多检验质量释放后的阻尼控制、多检验质量释放方案、多检验质量释放后稳定性的控制与维持,以为进入科学模式提

供稳定状态和相关指标需求。

3.3 控制分配与容错控制

针对无拖曳航天器中微推力器和电容极板等控制分配问题。刘睿等^[107]应用伪逆法研究了无拖曳航天器连续推力分配时的二次优化方法,满足了推力器输出为正和输出限幅的要求,计算简单,可以实现在轨实时分配。关于控制分配问题的研究较少,为保证无拖曳航天器在轨的科学性能和寿命,需要进一步深入开展相关研究。

在多执行机构容错控制方面,Henry^[108-109]针对执行机构电推力器在运行时堵塞和/或关闭故障情况下的非重力扰动补偿的问题,提出了基于 H_{∞} 和 H_2 滤波的故障诊断方法,使得存在测量噪声、测量延迟、传感器失调现象和干扰(即第三体扰动、J2 扰动、大气阻力和太阳光压)影响下,仍能够实现故障的检测和隔离。Feldman 等^[110]提出了一种新的基于模型的诊断(model based diagnostics, MBD)框架来减少诊断的不确定性,建立基于 LYDIA-NG 的决策支持系统,大大减少了故障诊断和隔离时间。

欧空局学者^[111-112]将基于模型的鲁棒 H_{∞}/H_2 故障检测和隔离方法等应用于 LISA Pathfinder 任务。Fan 等^[113]研究了一类具有执行器随机故障的非线性系统的容错控制问题,提出了执行器随机故障情况下参数严格反馈系统的自适应反步状态反馈控制器。赵选^[114]针对无拖曳航天器含多个执行器的未知参数和随机故障问题,设计了基于自适应反步控制技术和 Lyapunov 稳定性理论的自适应故障补偿方案。Zhang 等^[115]提出一种基于循环神经网络的故障诊断方法,采用多层感知机进行故障类型识别分类。目前针对无拖曳航天器故障诊断几乎都基于模型进行研究,基于数据和知识的方法还有待研究,且较少考虑检验质量电容极板故障。另外,对无拖曳航天器不同任务剖面下无拖曳系统故障诊断模型和健康状态评估、系统故障敏感参数的挖掘和故障自主诊断、系统故障的精确诊断以及未知故障情况下的故障检测与容错控制,以期构建基于模型-数据的多级的全链路自主故障诊断、容错控制与恢复,为保障无拖曳航天器连续科学测量的顺利实施提供理论基础与技术支撑。

无拖曳与姿态控制作为空间引力波探测无拖曳航天器高精度高稳定性运行的关键核心技术之一,需要聚焦于:多检验质量释放阶段的快速释放策略和状态估计,保证检验质量释放后能够快速稳定;全链路阶段的多回路耦合多自由度协同控

制的策略和配置,确保航天器编队在轨的高精度;不同模式间快速稳定切换与优化控制策略,保证各模式间的平滑过渡,保证模式切换的稳定性,根据切换策略所达到的控制精度选择不同的后续模式,提高进入科学模式达到开展空间引力波探测相关指标精度要求的快速性;模型-数据多级高精度驱动的无拖曳系统变可信度多故障自主诊断隔离与重构容错控制,构建整体的模型-数据多级故障诊断隔离与容错控制的全周期可靠性,为多检验质量无拖曳控制功能和性能的高可信度提供技术支撑,使无拖曳航天器能够稳定运行。

4 核心传感器与执行机构

4.1 惯性传感器

空间引力波探测使用的惯性传感器^[116] (inertial sensor, IS)如图9所示,包括专用真空腔、检验质量、用于对检验质量进行驱动和位置测量的电容式传感器电极外壳(电容极板外壳)、用于发射和释放捕获过程中确保检验质量安全释放和稳定自由悬浮的捕获定位和释放机构、用于检验质量电荷管理的UV光电单元和前端电子设备^[60]。该传感器具有精度高、结构对称、体积小、能实现空间6个自由度同时测量等优点。

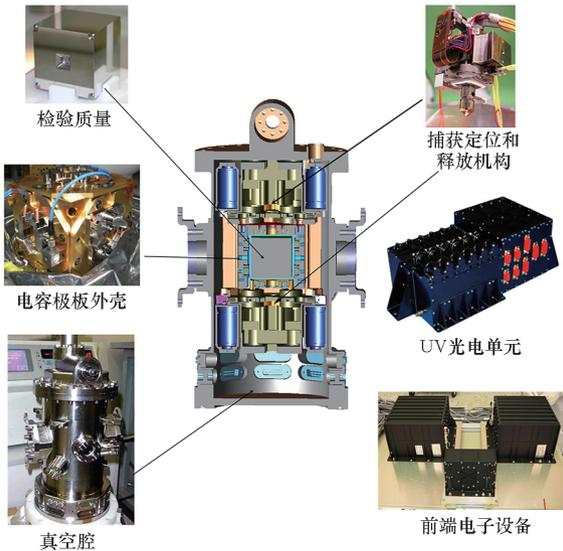


图9 空间惯性传感器示意图^[116]

Fig. 9 Schematic diagram of space inertial sensor^[116]

检验质量作为惯性传感器的探针根据不同的任务具有不同的形状和尺寸^[117],包括球形检验质量 (TRIAD I 和 GP-B)、圆柱形检验质量 (microscope)、长方体检验质量 (GOCE、TAIJI 和 TIANQIN) 和立方体检验质量 (LISA Pathfinder)。LISA 计划中目前给出了多种检验质量配置方

案^[118-120],在其探路者验证计划 LISA Pathfinder 任务中,检验质量采用边长为 46 mm,质量约 1.96 kg 的金铂(73%/27%)合金立方体。为了防止机械敏感探头在发射升空的过程中因受到的冲击过大而损坏,LISA Pathfinder 特别设计了检验质量锁紧释放装置^[98],未来也将应用到 LISA 任务中。

兰州物理研究所在静电悬浮加速度计的研制方面开展了诸多研究^[121],包括真空模拟装置设计、静电悬浮加速度计结构设计、控制器设计、系统结构噪声分析、检测电路噪声分析、阻尼振动分析、出气与辐射效应分析以及噪声数据频谱分析等。华中科技大学引力中心团队研制的惯性传感器已成功应用于 TIANQIN-1 航天器。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所为 TAIJI-1 航天器研制了一套空间惯性传感器敏感结构工程样机^[122],开展了地面测试对关键指标的测试评估,并根据试验数据对在轨性能进行了评估^[123]。

惯性传感器被广泛应用于地球重力场高精度测量、等效原理验证以及空间引力波探测等空间科学研究中,已经在包括 LISA Pathfinder、GOCE 以及 GRACE 等航天器中进行了技术指标验证^[122],在探测频率带宽 0.1 mHz ~ 1 Hz 内,惯性传感器的加速度测量水平已经达到了 $10^{-9} \sim 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。TIANQIN-1 中采用了金铂合金的立方体检验质量和六自由度的电容式位移传感器作为惯性传感器的主要核心部件^[124],在探测频率带宽为 0.06 Hz 处,其加速度测量噪声达到了 $5 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。目前,我国正在开展高精度传感器的理论分析、参数设计、指标论证、仿真分析、原理样机、地面验证等相关研究,将为惯性传感器在未来空间引力波探测中提供技术支撑。

4.2 微型推力器

微型推力器作为无拖曳航天器的执行机构,其性能在很大程度上制约着无拖曳控制的水平^[125],是实现无拖曳控制的关键。根据空间引力波探测对执行机构推力指标(推力调节范围、分辨力、噪声和寿命)的分析,可用于空间引力波探测的微型推力器,包括冷气推力器、胶体推力器和射频离子推力器等多种微型推力器。

20 世纪 60 年代,冷气推力器具备小推力宽范围调节和低噪声的特点,其作为无拖曳航天器的执行机构,被成功应用于 TRIAD I 和 GP-B 等航天器^[126]。其后,LISA Pathfinder、TAIJI-1 和 TIANQIN-1 等任务中也采用冷气推力器,并进

行了在轨考核。LISA Pathfinder 布置有 12 台冷气微推力器,分为两组,每组 6 个推力器^[127],每次只能使用一组,另一组作为冗余备份,用于无拖曳控制和太阳辐射压补偿,实现了无拖曳残余加速度噪声不大于 $3 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的无拖曳指标。

胶体推力器^[128]主要由发射极、抽取极和加速极组成,其采用极强性液体作为工质。进入 21 世纪,胶体推力器的研究随着 LISA 计划的开展得到了更深入的研究,针对 LISA 设计了可以提供微牛范围连续可调的胶体推力器^[129],其推力范围为 $1 \sim 100 \mu\text{N}$,分辨率为 $0.1 \mu\text{N}$,最大推力下工作约 3 000 h。LISA Pathfinder 搭载了 8 台 ST-7 胶体电推力器^[130],推力范围为 $4.35 \sim 35.8 \mu\text{N}$,分辨率为 $0.08 \mu\text{N}$,噪声为 $0.1 \mu\text{N} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,其指标达到了进行空间引力波探测的指标需求。

射频离子推力器^[125]基于射频感性耦合等离子体自持放电,其采用气体作为工质。为满足我国空间引力波探测任务对于微牛级推力高精度控制的需求,由中国科学院力学所设计研制的射频离子微推力器^[131]($\mu\text{RIT}-1$)实现了百微牛级可调推力,推力范围为 $1.5 \sim 60 \mu\text{N}$,分辨率为 $0.5 \mu\text{N}$,噪声低于 $0.2 \mu\text{N} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,推力器性能较优。

空间引力波探测所需的推力范围是由航天器上的非保守力决定的。以 TIANQIN 计划为例,目前也正在积极开展微推进技术的研究,包括冷气推力器、波电离离子推力器、会切磁场型霍尔推力器以及场致发射推力器等,并取得了相关的技术研究进展。经过对推力器的原理设计和控制^[132],TIANQIN-1 搭载的冷气推力器实现了响应时间小于 200 ms,推力满足了 $1 \sim 30 \mu\text{N}$ 的范围,分辨率要求为 $0.1 \mu\text{N}$,推力噪声的要求为 $0.1 \mu\text{N} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ($0.1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$)。

通过上述的分析,空间引力波探测任务无拖曳控制的超高精度要求,对执行机构的小推力宽范围的调节、低推力噪声、超高分辨率、快速响应以及高可靠长寿命等指标需求提出了严格要求。为此,空间引力波探测的执行机构相关研究仍有很多方面亟须解决,具体包括:执行机构的系统集成、执行机构的精细化建模、基于执行机构运动特性的无拖曳控制系统的动力学建模、执行机构的强鲁棒控制、执行机构的故障诊断与容错控制、执行机构的长寿命高可靠问题,以及执行机构快速响应测试与验证平台的研制等。

5 在轨飞行演示验证

在空间引力波探测领域,目前仅有三个先导航

天器,即 LISA Pathfinder、TAIJI-1 和 TIANQIN-1,相关指标参数如表 2 所示,用于验证空间引力波探测的关键技术。下面针对上述任务的无拖曳在轨性能进行相关的介绍和分析。

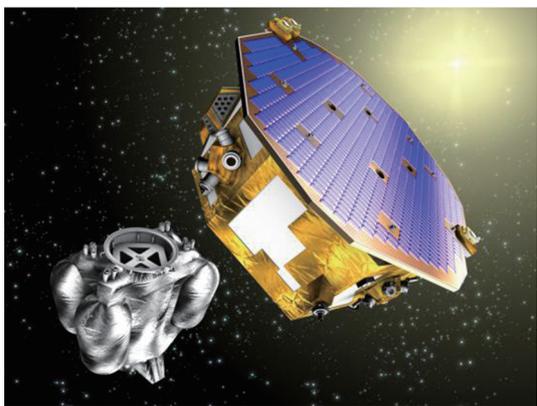
表 2 探测任务和相关指标参数

Tab. 2 Explorer mission and related indicator parameters

指标参数	LISA Pathfinder	TAIJI-1	TIANQIN-1
检验质量形状	立方体	长方体	长方体
TM 残余加速度噪声/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)	3×10^{-14}	10^{-8}	5×10^{-12} @ 0.1 Hz
微推分辨率/ ($\mu\text{N} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)	0.1	0.1	0.3 @ 0.1 Hz
位移测量精度/ ($\text{pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)	10	100	30 @ 0.1 Hz

LISA Pathfinder 航天器如图 10 所示,LISA Pathfinder^[133]是 LISA 的先驱任务,于 2015 年 12 月发射,围绕拉格朗日点 L_1 的光晕轨道运行(距离地球 150 万 km,朝向太阳方向),有助于减少来自地球重力、磁场和大气的干扰,验证的关键技术包括惯性传感器、光学干涉测量系统、冷气体推力器,并将 LISA 中涉及的相距 $5 \times 10^6 \text{ km}$ 的两个检验质量集成到同一个航天器上进行相关技术的试验验证,即内部两个立方体检验质量处于自由落体无拖曳状态,并用激光干涉测量其相对距离的微小变化。同时,检验激光器和光学元器件等在空间环境中的寿命和可靠性,并对 LISA 中的 95% 的噪声进行在轨评估和分析。LISA Pathfinder 的检验质量加速度噪声在频率为 1 mHz 时为 $3 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,在轨对惯性传感器、自由悬浮的检验质量之间的干涉测量、无拖曳与姿态控制系统、微牛顿推进技术(场发射电力推力器和 NASA/JPL 的胶体推力器)进行了演示验证,评估了空间环境中电容式传感器、推力器、激光器和光学器件的寿命和可靠性,其最终于 2017 年 7 月结束在轨运行任务。

TAIJI-1 是 TAIJI 计划的技术验证星,于 2019 年 8 月 31 日发射^[134],是我国首颗完成星载引力波探测关键技术验证的卫星,实现了我国最高精度的空间激光干涉测量,干涉测量精度突破 $100 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,在部分频段可达 $25 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,传感器加速度噪声水平达到 $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot$

图10 LISA Pathfinder 航天器^[133]Fig. 10 LISA Pathfinder spacecraft^[133]

$\text{Hz}^{-1/2}$, 传感精度达到 $2 \times 10^{-6} \text{ Hz}^{-1/2}$, 在国际上首次实现了微牛级射频离子和双模霍尔电推进技术的在轨验证^[134], 微推进系统达到 $0.15 \mu\text{N} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的噪声水平, 推力测量精度优于 $0.02 \mu\text{N} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 国内首次开展卫星无拖曳控制在轨试验, 残余加速度达到 $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。TAIJI-1 已顺利完成预设的全部在轨试验任务, 开展了探索载荷在轨性能极限、长寿命、优化无拖曳控制策略等扩展试验任务。

TIANQIN-1 技术试验卫星于 2019 年 12 月发射成功^[104, 135], 在轨试验完成了对高精度惯性传感器、高精度激光干涉仪、微牛顿级连续可调推力器、无拖曳控制技术、高稳定热控技术和质心估计技术六大关键技术的验证^[146], 并将空间惯性传感这一核心指标提高约 2 个量级, 在 0.1 Hz 下将残余加速度抑制到 $1 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 在 0.05 Hz 时为 $5 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 微牛顿推力器推力分辨率为 $0.1 \mu\text{N}$, 推力噪声为 $0.3 \mu\text{N} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 频率为 0.1 Hz, 无拖曳控制系统在 0.1 Hz 时的残余加速度噪声为 $3 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。TIANQIN-1 实现了我国空间引力波探测核心技术的跨代发展, 超出预期完成了原定的技术验证任务, 同时在国内首次利用我国的航天器首次自主测量得到了低阶全球重力场位系数^[136-138], 使得我国成为世界上继美、德后第三个有能力自主探测全球重力场的国家。TIANQIN-1 在轨演示验证开启了 TIANQIN 计划“沿途下蛋”的基础研究创新模式, 其必将推动我国空间引力波探测关键技术走向成熟, 从而保障空间引力波探测任务的最终开展。

6 总结与展望

本文综述了无拖曳航天器系统涉及的编队轨

道设计与控制、无拖曳与姿态控制、核心传感器与执行机构等关键技术的研究进展, 梳理了目前应用于引力波探测的无拖曳航天任务和在轨运行任务的演示验证情况。涉及的大尺度超高精度超稳定性编队飞行、无拖曳控制技术、惯性传感器以及执行机构都是实现空间引力波探测亟待持续推进研究的空间技术和核心载荷, 为我国物理学、天文学以及空间科学等基础学科的发展提供机遇, 对我国开展空间引力波探测和全球重力场测量具有重大的工程和科学意义, 使我国有望成为空间引力波研究的世界科技前沿高地。

针对目前空间引力波探测无拖曳航天器系统动力学与控制研究, 结合各项探测任务的研究进展, 本文提出如下无拖曳航天器的动力学与控制相关技术展望。

1) 空间引力波探测无拖曳航天器编队对超大尺度超远距离的轨道设计与控制不同于传统近距离航天器编队, 需要重点开展大尺度超远距离编队动力学机理研究、高稳定性构型设计和重构优化理论研究、非科学模式和科学模式下编队姿态维持控制、多星多体超高精度编队多自由度协同控制技术等方面的理论和技术研究。

2) 无拖曳与姿态控制是保证能够进入科学测量开展空间引力波测量的控制中枢, 其中所涉及的关键技术包括: 检验质量的快速释放阻尼控制、多检验质量释放策略与状态估计、非科学模式与科学模式下无拖曳控制策略与配置、不同模式间快速稳定切换与优化控制策略、电容极板和冗余机构的自适应控制分配、无拖曳系统变可信度多故障诊断隔离与重构容错控制、无拖曳控制系统的全链路全周期数值仿真等关键技术。

3) 惯性传感器作为引力波探测的探针, 对于能否探测到空间引力波起着决定性作用。其中所涉及的关键技术包括: 锁紧释放装置、电容位移传感器、电容极板的分区和冗余设计、惯性传感器控制理论方法、高精度集成与高可靠的地面测试等。另外, 空间引力波探测还需要执行机构与惯性传感器等共同作用才能实现无拖曳, 保证检验质量不受非保守力的干扰。其中涉及以下亟须突破的技术瓶颈: 推进系统的集成研制、多推力器模型建模、推力器高可靠响应的冗余控制策略等。

通过国家科技部重点研发计划“引力波探测”专项的大力支持, 国内相关研究团队不断深入研究和科学问题持续攻关, 有望在未来几年

能够研制攻破制约进行引力波探测的核心技术和关键载荷,从而为实现我国空间引力波探测任务提供强有力的技术支撑。

参考文献 (References)

- [1] PUGH G E. Proposal for a satellite test of the Coriolis predictions of general relativity [M]// Nonlinear Gravitodynamics, the Lense Thirring Effect, a Documentary Introduction to Current Research. [S. l. : s. n.], 2002: 414 - 426.
- [2] EVERITT C W F, MUHLFELDER B, DEBRA D B, et al. The Gravity Probe B test of general relativity[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, 32(22): 224001.
- [3] 贺晓霞, 丁衡高. B 型引力探测器 50 年探索总结[J]. *导航与控制*, 2014, 13(3): 56 - 64, 31.
HE X X, DING H G. Result of Gravity Probe B over 50 years[J]. *Navigation and Control*, 2014, 13(3): 56 - 64, 31. (in Chinese)
- [4] PELIVAN I. Dynamics and control modeling for Gravity Probe B[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 151: 5 - 23.
- [5] CESARE S, ALLASIO A, ANSELMINI A, et al. The European way to gravimetry: from GOCE to NGGM[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(4): 1047 - 1064.
- [6] 刘滔, 钟波, 李贤炮, 等. GOCE 卫星重力梯度数据反演重力场的滤波器设计与比较分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(5): 694 - 701.
LIU T, ZHONG B, LI X P, et al. Design and comparison of filters of gravity field inversion from GOCE satellite gravity gradient data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(5): 694 - 701. (in Chinese)
- [7] 冉将军, 闫政文, 吴云龙, 等. 下一代重力卫星任务研究概述与未来展望 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(6): 841 - 857.
RAN J J, YAN Z W, WU Y L, et al. Research status and future perspectives in next generation gravity mission [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(6): 841 - 857. (in Chinese)
- [8] FALLER J E, BENDER P L, HALL J L, et al. An antenna for laser gravitational-wave observations in space [J]. *Advances in Space Research*, 1989, 9(9): 107 - 111.
- [9] DANZMANN K, the LISA Study Team. LISA: laser interferometer space antenna for gravitational wave measurements [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 1996, 13(11A): A247 - A250.
- [10] DANZMANN K. LISA: an ESA cornerstone mission for a gravitational wave observatory [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 1997, 14(6): 1399 - 1404.
- [11] Gravitational Observatory Advisory Team. The ESA-L3 gravitational wave mission final report[R/OL]. (2019 - 09 - 01) [2022 - 07 - 01]. <https://sci.esa.int/web/cosmic-vision/-/57910-goat-final-report-on-the-esa-l3-gravitational-wave-mission>.
- [12] AMARO-SEOANE P, AUDLEY H, BABAK S, et al. Laser interferometer space antenna [EB/OL]. (2017 - 02 - 20) [2022 - 07 - 01]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1702/1702.00786.pdf>.
- [13] SATO S, KAWAMURA S, ANDO M, et al. The status of DECIGO[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 840(1): 012010.
- [14] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a spaceborne gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035010.
- [15] LUO J, MEI J W, SHAO C G, et al. TianQin mission concept [M]// *Gravitation, Astrophysics, and Cosmology*. [S. l.]: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2016: 44 - 48.
- [16] FAN Z C, ZHAO L J, CAO S Y, et al. High performance telescope system design for the TianQin project[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2022, 39: 195017.
- [17] CYRANOSKI D. Chinese gravitational-wave hunt hits crunch time[J]. *Nature*, 2016, 531: 150 - 151.
- [18] LUO Z R, ZHANG M, WU Y L. Recent status of Taiji program in China [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(4): 536 - 538.
- [19] DITTUS H, LÄMMERZAHN C, TURYSHEV S G. Lasers, clocks and drag-free control: exploration of relativistic gravity in space [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [20] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, et al. LISA Pathfinder platform stability and drag-free performance [J]. *Physical Review D*, 2019, 99(8): 082001.
- [21] LIAN X B, ZHANG J X, CHANG L T, et al. Test mass capture for drag-free satellite based on RBF neural network adaptive sliding mode control [J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(2): 1205 - 1219.
- [22] TAN S P, GUO J, ZHAO Y L, et al. Adaptive control with saturation-constrained observations for drag-free satellites: a set-valued identification approach [J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64: 202202.
- [23] 李洪银, 叶小容, 刘佳恒, 等. 天琴无拖曳控制研究的关键问题[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(1/2): 213 - 224.
LI H Y, YE X R, LIU J H, et al. Key issues in the research on drag-free control of TianQin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni*, 2021, 60(1/2): 213 - 224. (in Chinese)
- [24] 马浩君, 韩鹏, 高东, 等. 深空双质量块无拖曳卫星 H_{∞} 鲁棒控制器设计 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(2): 1 - 13.
MA H J, HAN P, GAO D, et al. H_{∞} robust controller design for deep space drag-free satellite with two test masses [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(2): 1 - 13. (in Chinese)
- [25] 张锦绣, 曹喜滨, 董晓光, 等. Drag-free 卫星编队的发展现状和趋势研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(5): 673 - 677.
ZHANG J X, CAO X B, DONG X G, et al. Development status and tendency of Drag-free satellite formation flying [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(5): 673 - 677. (in Chinese)

- [26] JOFFRE E, WEALTHY D, FERNANDEZ I, et al. LISA: heliocentric formation design for the laser interferometer space antenna mission [J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(11): 3868 – 3879.
- [27] VIDANO S, NOVARA C, PAGONE M, et al. The LISA DFACS: Model Predictive Control design for the test mass release phase[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 193: 731 – 743.
- [28] BOGENSTAHL J, TRÖBS M, D'ARCIO L, et al. Design and construction of a telescope simulator for LISA optical bench testing [C]//*Proceedings of International Conference on Space Optics*, 2012.
- [29] JIN G. Program in space detection of gravitational wave in Chinese Academy of Sciences [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 840: 012009.
- [30] 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)
- [31] WU Y L. Space gravitational wave detection in China [R/OL]. (2012 – 10 – 22) [2022 – 07 – 01]. https://apc.uparis.fr/APC_CS/Conferences/First_eLISA_Consortium_Meeting/Expose_files/China_YLWU.ppt.
- [32] RUAN W H, LIU C, GUO Z K, et al. The LISA-Taiji network[J]. *Nature Astronomy*, 2020, 4: 108 – 109.
- [33] RUAN W H, LIU C, GUO Z K, et al. The LISA-Taiji network: precision localization of coalescing massive black hole binaries[J]. *Research*, 2021, 2021: 6014164.
- [34] GUO Z K. Standard siren cosmology with the LISA-Taiji network [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 65(1): 210431.
- [35] WANG G, NI W T, HAN W B, et al. Numerical simulation of sky localization for LISA-TAIJI joint observation [J]. *Physical Review D*, 2020, 102(2): 024089.
- [36] WANG G, NI W T. Orbit optimization and time delay interferometry for inclined ASTROD-GW formation with half-year precession-period[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(5): 059501.
- [37] WU A M, NI W T. Deployment and simulation of the ASTROD-GW formation[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2013, 22(1): 1341005.
- [38] 倪维斗, 门金瑞, 梅晓红, 等. ASTROD 空间引力波探测优化方案:ASTROD-GW[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第六届学术会议论文集, 2009.
NI W D, MEN J R, MEI X H, et al. ASTROD space gravitational wave detection optimization scheme: ASTROD-GW [C]// *Proceedings of the 6th Annual Meeting of the Specialized Committee on Deep Space Exploration Technology of the Chinese Society of Astronautics*, 2009. (in Chinese)
- [39] 吴树范, 王楠, 龚德仁. 引力波探测科学任务关键技术[J]. *深空探测学报*, 2020, 7(2): 118 – 127.
WU S F, WANG N, GONG D R. Key technologies for space science gravitational wave detection [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(2): 118 – 127. (in Chinese)
- [40] MUSHA M. Space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO[J]. *CEAS Space Journal*, 2017, 9: 371 – 377.
- [41] ISOYAMA S, NAKANO H, NAKAMURA T. Multiband gravitational-wave astronomy: observing binary inspirals with a decihertz detector, B-DECIGO [J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2018, 2018(7): 073E01.
- [42] KAWAMURA S, ANDO M, SETO N, et al. Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO [J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, 2021(5): 05A105.
- [43] HELTINGS R, LARSON S L, JENSEN S, et al. A low-cost, high-performance space gravitational astronomy mission [R/OL]. [2022 – 07 – 01]. <https://pcos.gsfc.nasa.gov/studies/architecting/grav-wave/submissions/GWRFI-0007-Hellings.pdf>.
- [44] HELTINGS R W. Gravitational wave detectors in space [J]. *Contemporary Physics*, 1996, 37(6): 457 – 469.
- [45] FLOYD A. Conceptual design of an orbiting drag-free international explorer (ODIE) small satellite mission [C]// *Proceedings of Small Satellite Conference*, 1997.
- [46] 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.
LUO J, AI L H, AI Y L, et al. A brief introduction to the TianQin project [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni*, 2021, 60(1/2): 1 – 19. (in Chinese)
- [47] MEI J W, BAI Y Z, BAO J H, et al. The TianQin project: current progress on science and technology [J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, 2021(5): 05A107.
- [48] LANGE B. The drag-free satellite [J]. *AIAA Journal*, 1964, 2(9): 1590 – 1606.
- [49] POWELL J D, LANGE B O, JHIN P. Mass attraction reduction by integral control in spinning drag-free satellites [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1972, 9(8): 592 – 596.
- [50] SCHEITHAUER S, THEIL S. Generic drag-free simulator [C]// *Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 2002.
- [51] 施梨. 无阻力卫星动力学建模与控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 1 – 18.
SHI L. Dynamic modeling and control research of drag-free satellite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 1 – 18. (in Chinese)
- [52] PETTAZZI L, LANZON A, THEIL S, et al. Design of robust drag-free controllers with given structure [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(5): 1609 – 1621.
- [53] CANUTO E, MASSOTTI L. All-propulsion design of the drag-free and attitude control of the European satellite GOCE [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(2/3): 325 – 344.
- [54] WIEGAND M, SCHEITHAUER S, THEIL S. Step proof mass dynamics [J]. *Acta Astronautica*, 2004, 54(9): 631 – 638.
- [55] THEIL S. Drag-free satellite control [M]// *Lasers, Clocks*

- and Drag-Free Control. Berlin; Springer-Verlag, 2008; 341–359.
- [56] GUILHERME M S, LEITE FILHO W C, THEIL S. Strategies for in-orbit calibration of drag-free control systems [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2008, 12(5): 365–375.
- [57] FICHTER W, GATH P, VITALE S, et al. LISA Pathfinder drag-free control and system implications [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, 22(10): S139–S148.
- [58] WU S F, FERTIN D. Spacecraft drag-free attitude control system design with Quantitative Feedback Theory [J]. *Acta Astronautica*, 2008, 62(12): 668–682.
- [59] LANGE B. The control and use of drag-free satellites [D]. California: Stanford University, 1964; 55–85.
- [60] GATH P, FICHTER W, KERSTEN M, et al. Drag free and attitude control system design for the LISA Pathfinder mission [C]//Proceedings of the Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004.
- [61] 谷振丰, 王兆魁. 基于卫星自旋的纯引力轨道万有引力干扰抑制 [J]. *中国空间科学技术*, 2013, 33(4): 40–46.
GU Z F, WANG Z K. Reduction of gravitational attraction disturbance to purely gravitational orbit based on satellite spinning [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2013, 33(4): 40–46. (in Chinese)
- [62] CLOHESSY W H, WILTSHIRE R S. Terminal guidance system for satellite rendezvous [J]. *Journal of the Aerospace Sciences*, 1960, 27(9): 653–658.
- [63] DE MARCHI F, PUCACCO G, BASSAN M. Optimizing the Earth-LISA "rendezvous" [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29(3): 035009.
- [64] NAYAK K R, KOSHTI S, DHURANDHAR S V, et al. On the minimum flexing of LISA's arms [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, 23(5): 1763–1778.
- [65] YI Z H, LI G Y, HEINZEL G, et al. Coorbital restricted problem and its application in the design of the orbits of the LISA spacecraft [J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2008, 17(7): 1005–1019.
- [66] LI G Y, YI Z H, HEINZEL G, et al. Methods for orbit optimization for the LISA gravitational wave observatory [J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2008, 17(7): 1021–1042.
- [67] 门金瑞, 倪维斗, 王刚. ASTROD-GW 轨道设计 [J]. *天文学报*, 2010, 51(2): 198–209.
MEN J R, NI W D, WANG G. The orbit design of ASTROD-GW [J]. *Acta Astronautica Sinica*, 2010, 51(2): 198–209. (in Chinese)
- [68] HU X C, LI X H, WANG Y, et al. Fundamentals of the orbit and response for TianQin [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2018, 35(9): 095008.
- [69] TAN Z B, YE B B, ZHANG X F. Impact of orbital orientations and radii on TianQin constellation stability [J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2020, 29(8): 2050056.
- [70] FOLKNER W M, HECHLER F, SWEETSER T H, et al. LISA orbit selection and stability [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 1997, 14(6): 1405–1410.
- [71] DHURANDHAR S V, NAYAK K R, KOSHTI S, et al. Fundamentals of the LISA stable flight formation [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, 22(3): 481–487.
- [72] 张雪峰, 叶伯兵, 檀庄斌, 等. 天琴轨道与星座设计进展 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(1/2): 123–128.
ZHANG X F, YE B B, TAN Z B, et al. Orbit and constellation design for TianQin: progress review [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni*, 2021, 60(1/2): 123–128. (in Chinese)
- [73] 万小波, 张晓敏, 黎明. 天琴计划轨道构型长期漂移特性分析 [J]. *中国空间科学技术*, 2017, 37(3): 110–116.
WAN X B, ZHANG X M, LI M. Analysis of long-period drift characteristics for orbit configuration of the TianQin mission [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2017, 37(3): 110–116. (in Chinese)
- [74] YE B B, ZHANG X F, ZHOU M Y, et al. Optimizing orbits for TianQin [J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2019, 28(9): 1950121.
- [75] 刘培栋, 党朝辉. 空间引力波探测正三角形编队动力学机理与控制方法 [J]. *指挥与控制学报*, 2021, 7(3): 275–286.
LIU P D, DANG Z H. Triangular formation dynamics and optimal control for space-based gravitational-wave observatory [J]. *Journal of Command and Control*, 2021, 7(3): 275–286. (in Chinese)
- [76] MISHRA S. A brief study on orbits of LISA and its stability [R]. [S.l.: s.n.], 2014.
- [77] 李卓. “太极”空间引力波探测编队飞行轨道优化设计与分析 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020.
LI Z. Formation flying trajectory optimization and analysis for TAIJI space-based gravitational waves observatory [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences), 2020. (in Chinese)
- [78] HUGHES S P. Preliminary optimal orbit design for the laser interferometer space antenna (LISA) [C]//Proceedings of the 25th Annual Guidance and Control Conference, 2002.
- [79] AMATO J C. Flying in formation: the orbital dynamics of LISA's three spacecraft [J]. *American Journal of Physics*, 2019, 87(1): 18–23.
- [80] POVOLERI A, KEMBLE S. LISA orbits [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 873(1): 702–706.
- [81] HALLOIN H. Optimizing orbits for (e)LISA [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 840: 012048.
- [82] YANG C H, ZHANG H. Formation flight design for a LISA-like gravitational wave observatory via Cascade optimization [J]. *Astrodynamics*, 2019, 3(2): 155–171.
- [83] XIA Y, LI G Y, HEINZEL G, et al. Orbit design for the Laser Interferometer Space Antenna (LISA) [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2010, 53(1):

- 179 - 186.
- [84] WANG G, NI W T. Orbit optimization for ASTROD-GW and its time delay interferometry with two arms using CGC ephemeris[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(4): 049501.
- [85] MEN J R, NI W T, WANG G. Design of ASTROD-GW orbit[J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2010, 34(4): 434 - 446.
- [86] 唐文林. 中国空间引力波探测计划卫星轨道设计的初步研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 17 - 31.
TANG W L. Preliminary study on satellite orbit design of China space gravitational wave exploration program [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 17 - 31. (in Chinese)
- [87] SWEETSER T H. An end-to-end trajectory description of the LISA mission [J]. Classical and Quantum Gravity, 2005, 22(10): S429 - S435.
- [88] 夏炎. 引力波探测计划 LISA 的任务轨道设计与优化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2009.
XIA Y. Mission orbit design and optimization of gravitational wave detection program LISA [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [89] 夏炎, 李广宇, HEINZEL G, 等. 激光干涉仪空间天线航天计划的轨道设计[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2009, 39(12): 1779 - 1785.
XIA Y, LI G Y, HEINZEL G, et al. Orbit design for the laser interferometer space antenna [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2009, 39(12): 1779 - 1785. (in Chinese)
- [90] HECHLER F, FOLKNER W M. Mission analysis for the laser interferometer space antenna (LISA) mission[J]. Advances in Space Research, 2003, 32(7): 1277 - 1282.
- [91] BIK J J C M, VISSER P N A M, JENNRICH O. LISA satellite formation control[J]. Advances in Space Research, 2007, 40(1): 25 - 34.
- [92] 黄文涛, 师鹏, 赵育善, 等. 空间激光干涉引力波探测器轨道修正方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(3): 598 - 607.
HUANG W T, SHI P, ZHAO Y S, et al. Orbit correction method of space-based laser interferometric gravitational wave detector[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(3): 598 - 607. (in Chinese)
- [93] 张立华, 黎明, 高永新, 等. 空间引力波探测航天器系统及平台技术[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(1/2): 129 - 137.
ZHANG L H, LI M, GAO Y X, et al. The spacecraft system and platform technologies for gravitational wave detection in space [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni, 2021, 60(1/2): 129 - 137. (in Chinese)
- [94] 王继河, 张锦绣, 孟志鹤, 等. 空间引力波探测系统编队动力学与控制技术综述[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(1/2): 156 - 161.
WANG J H, ZHANG J X, MENG Y H, et al. Review of formation dynamics and control technology of space-borne gravitational wave detection system [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni, 2021, 60(1/2): 156 - 161. (in Chinese)
- [95] SCHLEICHER A, ZIEGLER T, SCHUBERT R, et al. In-orbit performance of the LISA Pathfinder drag-free and attitude control system [J]. CEAS Space Journal, 2018, 10(4): 471 - 485.
- [96] 王玉爽. 无拖曳卫星控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 5 - 6.
WANG Y S. Research on control algorithm for the drag-free satellite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 5 - 6. (in Chinese)
- [97] MANCE D. Development of electronic system for sensing and actuation of test mass of the inertial sensor LISA [D]. Split, Croatia: University of Split, 2012.
- [98] MONTEMURRO F, FICHTER W, SCHLOTTERER M, et al. Control design of the test mass release mode for the LISA pathfinder mission [J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 873(1): 583 - 587.
- [99] TROBBIANI L. Alternative control strategy for test mass release of spaceborne inertial sensors [D]. Pisa, Italy: University of Pisa, 2013: 11 - 53.
- [100] LIAN X B, ZHANG J X, YANG J K, et al. The determination for ideal release point of test masses in drag-free satellites for the detection of gravitational waves [J]. Advances in Space Research, 2021, 67(2): 824 - 833.
- [101] LIAN X B, ZHANG J X, WANG J H, et al. State and disturbance estimation for test masses of drag-free satellites based on self-recurrent wavelet neural network [J]. Advances in Space Research, 2021, 67(11): 3654 - 3666.
- [102] SAAGE R, ROSS R, SCHLEICHER A, et al. Controller design method for drag-free systems with micro-propulsion constraints [C]//Proceedings of the the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010.
- [103] HU Z Q, WANG P C, DENG J F, et al. The drag-free control design and in-orbit experimental results of "Taiji-1" [J]. International Journal of Modern Physics A, 2021, 36(11n12): 2140019.
- [104] 苟兴宇, 王丽娇, 李明群, 等. 天琴一号卫星加速度模式无拖曳控制[J]. 宇航学报, 2021, 42(5): 603 - 610.
GOU X Y, WANG L J, LI M Q, et al. Acceleration mode drag-free control of TQ-1 satellite [J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(5): 603 - 610. (in Chinese)
- [105] XIAO C Y, BAI Y Z, LI H Y, et al. Drag-free control design and in-orbit validation of TianQin-1 satellite [J]. Classical and Quantum Gravity, 2022, 39(15): 155001.
- [106] LIAN X B, ZHANG J X, LU L, et al. Frequency separation control for drag-free satellite with frequency-domain constraints [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2021, 57(6): 4085 - 4096.
- [107] 刘睿, 周军. 无拖曳航天器连续推力分配的伪逆法二次优化方案 [J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(6): 948 - 953.
LIU R, ZHOU J. Optimizing continuous thrust allocation of a drag free spacecraft with pseudo-inverse method [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(6): 948 - 953. (in Chinese)

- [108] HENRY D. Robust fault diagnosis of the microscope satellite micro-thrusters [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2006, 39(13): 342–347.
- [109] HENRY D. Fault diagnosis of microscope satellite thrusters using H_∞/H_- filters[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(3): 699–711.
- [110] FELDMAN A, DE CASTRO H V, VAN GEMUND A, et al. Model-based diagnostic decision-support system for satellites[C]// *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, 2013.
- [111] FALCOZ A, BOQUET F, FLANDIN G, et al. Robust H_∞/H_- thruster failure detection and isolation with application to the LISA Pathfinder spacecraft[C]// *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2010.
- [112] FALCOZ A, BOQUET F, DINH M, et al. Robust fault diagnosis strategies for spacecraft application to LISA Pathfinder experiment [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2010, 43(15): 404–409.
- [113] FAN H J, LIU B, SHEN Y D. Fault tolerant control for uncertain systems with actuator stochastic failures [C]// *Proceedings of the 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, 2012.
- [114] 赵选. 低轨无拖曳卫星执行器故障下的容错控制算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
ZHAO X. Research on fault tolerant control algorithms for LEO drag-free satellite with actuator failures [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [115] ZHANG Y H, ZHOU T T, HUANG X F, et al. Fault diagnosis of rotating machinery based on recurrent neural networks[J]. *Measurement*, 2021, 171: 108774.
- [116] ARMANO M, AUDLEY H, AUGER G, et al. The LISA Pathfinder mission [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, 610: 012005.
- [117] 傅江良, 甘庆波, 张扬, 等. 无拖曳航天任务检验质量的设计和比较[J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 463–476.
FU J L, GAN Q B, ZHANG Y, et al. Design and trade-off study of proof masses for future spatial drag-free missions[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 463–476. (in Chinese)
- [118] GERARDI D, ALLEN G, CONKLIN J W, et al. Invited article: advanced drag-free concepts for future space-based interferometers; acceleration noise performance[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 011301.
- [119] 侯振东, 王兆魁. 纯引力轨道检验质量的相对测量技术[J]. *力学进展*, 2015, 45: 496–520.
HOU Z D, WANG Z K. Relative measurement for the proof mass flying along a purely gravitational orbit[J]. *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 496–520. (in Chinese)
- [120] LANGE B. Managing spherical proof masses in drag-free satellites with application to the LISA experiment [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2001, 18(19): 4153–4158.
- [121] 薛大同. 静电悬浮加速度计伺服控制分析[J]. *空间科学学报*, 2009, 29(1): 102–106.
XUE D T. Servo-control analysis of electrostatically suspended accelerometer[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2009, 29(1): 102–106. (in Chinese)
- [122] 王少鑫. 空间惯性传感器敏感结构构建及地面评价方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
WANG S X. Research on the construction of the sensitive structure and ground evaluation method of space inertial sensor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [123] 王少鑫, 齐克奇, 王玉坤, 等. 电极不对称性对惯性传感器性能损失的研究[J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 455–462.
WANG S X, QI K Q, WANG Y K, et al. Study on loss of performance in inertial sensors due to electrode asymmetry[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 455–462. (in Chinese)
- [124] 李洪银, 刘雁冲, 王锐铨, 等. 天琴惯性传感器初步设计思考与进展[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(1/2): 186–193.
LI H Y, LIU Y C, WANG C R, et al. Preliminary design consideration and development of TianQin inertial sensor[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni*, 2021, 60(1/2): 186–193. (in Chinese)
- [125] 于达仁, 牛翔, 王泰卜, 等. 面向空间引力波探测任务的微推进技术研究进展[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(1/2): 194–212.
YU D R, NIU X, WANG T B, et al. The developments of micro propulsion technology based on space gravitational wave detection task[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni*, 2021, 60(1/2): 194–212. (in Chinese)
- [126] NOCI G, MATTICARI G, SICILIANO P, et al. Cold gas micro propulsion system for scientific satellite fine pointing: review of development and qualification activities at Thales Alenia Space Italia[C]// *Proceedings of the 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2009.
- [127] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, et al. LISA Pathfinder micronewton cold gas thrusters: in-flight characterization[J]. *Physical Review D*, 2019, 99(12): 122003.
- [128] 陈凯, 李得天, 谷增杰, 等. 胶体推力器的研究进展及关键技术[J]. *真空科学与技术学报*, 2019, 39(10): 918–926.
CHEN K, LI D T, GU Z J, et al. Latest progress of colloid electric propulsion thruster technology[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2019, 39(10): 918–926. (in Chinese)
- [129] HRUBY V, GAMERO-CASTAÑO M, FALKOS P, et al. Micro newton colloid thruster system development [C]// *Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference*, 2001.
- [130] ANDERSON G, ANDERSON J, ANDERSON M, et al. Experimental results from the ST7 mission on LISA Pathfinder[J]. *Physical Review D*, 2018, 98: 102005.
- [131] 马隆飞, 贺建武, 杨超, 等. 微牛顿级射频离子推力器结构优化研究[J]. *推进技术*, 2021, 42(2): 474–480.
MA L F, HE J W, YANG C, et al. Structure optimization of micro-newton class radio-frequency ion thruster[J]. *Journal*

- of Propulsion Technology, 2021, 42(2): 474 – 480. (in Chinese)
- [132] SONG P Y, SUN L M, KUANG S Y, et al. Micro-newton electro-spray thrusters for China's space-borne gravitational wave detection mission (TianQin) [C]//Proceedings of the 36th International Electric Propulsion Conference, 2019.
- [133] MCNAMARA P. Overview of LISA Pathfinder[R]. (2009 – 09 – 01) [2022 – 07 – 01]. <https://sci.esa.int/web/lisa-pathfinder/-/45822-overview-of-lisa-pathfinder>.
- [134] 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.
- [135] LUO J, BAI Y Z, CAI L, et al. The first round result from the TianQin-1 satellite[J]. Classical and Quantum Gravity, 2020, 37: 185013.
- [136] LI Z, DUAN H Z, HUANG X Q, et al. Design and performance test of the spaceborne laser in the TianQin-1 mission [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107155.
- [137] ZHOU A N, CAI L, XIAO C 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.
- [138] WEI C B, GU D F, SHAO K, et al. In-flight performance analysis and antenna phase center calibration of MEMS GPS receiver on-board TianQin-1 in the nadir-pointing and Sun-pointing modes [J]. Advances in Space Research, 2022, 69(2): 1050 – 1059.

(编辑:王颖娟,罗茹馨)