

天琴轨道与星座设计进展*

张雪峰¹, 叶伯兵¹, 檀庄斌², 袁慧敏¹,
罗成健¹, 焦磊¹, 谷德峰¹, 丁延卫¹, 梅健伟¹

1. “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
2. 中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518000

摘要: 天琴计划预计将在地球 10 万 km 高度附近处的圆轨道上部部署三颗无拖曳控制卫星, 组成近似等边三角形星座, 并利用高精度星间激光干涉链路来探测宇宙空间中 mHz 频段的低频引力波信号。采用地球高轨是天琴计划的显著特征, 如何行之有效地设计和利用地球轨道是天琴方案面临的重要问题。本文将从星座构型稳定性优化、轨道面与轨道半径选取、地月系引力场干扰效应评估、阴影规避这四个方面介绍天琴轨道与星座设计的主要研究进展。

关键词: 空间引力波探测; 天琴计划; 轨道设计; 星座构型; 空间环境效应

中图分类号: O412.1; P111; V412.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 01-0123-06

Orbit and constellation design for TianQin: progress review

ZHANG Xuefeng¹, YE Bobing¹, TAN Zhuangbin², YUAN Huimin¹,
LUO Chengjian¹, JIAO Lei¹, GU Defeng¹, DING Yanwei¹, MEI Jianwei¹

1. 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
2. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University (Shenzhen Campus), Shenzhen 518000, China

Abstract: The TianQin project plans to deploy three drag-free controlled satellites in circular high Earth orbits at an altitude of 10^5 km. The satellites form a nearly equilateral-triangle constellation, and exchange high-precision laser interferometric links to detect low-frequency gravitational waves in the mHz frequency band. TianQin features a geocentric concept, and is facing the challenge of designing and utilizing high Earth orbits to the best effect. In this paper, we briefly summarize the main progresses on TianQin's orbit and constellation design, including constellation stability optimization, orbital orientation and radius selection, the Earth-Moon's gravity disturbance evaluation, and eclipse avoidance.

Key words: space-based gravitational wave detection; TianQin project; orbit design; constellation configuration; space environmental effect

* 收稿日期: 2020-11-02 录用日期: 2020-11-18 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); 国家自然科学基金 (11805287)

作者简介: 张雪峰 (1983 年生), 男; 研究方向: 空间引力波探测方案概念性研究、引力理论;

E-mail: zhangxf38@mail.sysu.edu.cn;

叶伯兵 (1993 年生), 男; 研究方向: 天琴轨道设计与优化; E-mail: yebb3@mail2.sysu.edu.cn

(以上两位作者为共同第一作者)

1 引言

2016年初地面引力波探测 LIGO 团队宣布首次探测到了引力波^[1],这一重大突破使得人类能够用全新的手段观测宇宙,开启了引力波天文学的时代。地面高频引力波探测的成功为未来空间低频引力波探测提供了有力支持。空间引力波探测面向约 0.1 mHz~1 Hz 的低频段,低频引力波波源较为丰富,探测目标包括超大质量双黑洞、恒星级双黑洞、极端质量比旋近、银河系双致密星、随机引力波背景等^[2]。在实验方面,空间引力波探测主要利用高精度的星间激光干涉测量和空间惯性基准技术来追踪长基线下由引力波产生的检验质量星间距离的微小改变^[3-4]。当前空间引力波探测计划主要可分为地球轨道方案和以 LISA 为代表的绕日轨道方案^[5]。

作为地球轨道方案,天琴初步选取 10^5 km 半径的圆轨道,三颗无拖曳控制卫星构成近似等边三角形星座,星座平面与黄道面近似垂直,且正对参考波源双白矮星系统 RX J0806.3+1527(以下简称 J0806)^[6]。天琴外的其它地球轨道方案的轨道选择各有不同。OMEGA 方案^[7]采用位于黄道面内的月外逆行圆轨道,臂长 100 万 km,轨道周期约 53 d; gLISA/GEOGRAWI^[8]与 GADFLI 方案^[9]均采用地球静止轨道,臂长为 7.3 万 km; LAGRANGE 方案^[10]将三个航天器置于地月 L3-5 平动点处,臂长约 67 万 km;日本 B-DECIGO 方案^[11]预计采用地球中低轨道;在技术方面有很强关联性的还包括地球重力场测量任务 GRACE Follow-On、GRACE、GOCE 等,以及空间引力实验任务 MICROSCOPE、Gravity Probe-B 等。天琴在轨道面和半径的选取上与以上方案差别较大,其它方案的研究结论对天琴并不直接适用,而必须开展有针对性的研究和评估。

相比绕日轨道方案,地球轨道方案在发射运载、转移入轨、数据通信、遥测遥控、导航制导等方面具有相对优势。地球轨道方案面临的一个主要挑战是太阳方位相对于轨道面随时间改变,影响卫星热控以及星间激光链路。为了应对这一难题,文献[6]提出了“3+3个月”的运行模式,即当太阳光方向与轨道面接近平行时(每年两次),暂停引力波科学观测。此外,文献[12-13]提出了借鉴 LISA、WMAP、盖亚(Gaia)、詹姆斯·韦伯(JWST)等航天器平台的被动热控概念作为可能的备选之一。该方案采用单一平面遮阳

板,与星座平面平行,使得卫星其他部分在3个月观测期内始终处于太阳阴影中,在此情况下卫星到达外热流变为半年周期缓变,从而有助于实现星内敏感核心器件在 mHz 频段的温度稳定性要求。对该方案的详细评估当前正在进行中^[14]。

如何在地球轨道上有效开展空间引力波探测是天琴方案当前要研究的重要问题,需要进一步明确任务面临的独特挑战、技术解决途径和潜在优势。天琴方案的概念性研究主要包括轨道与星座设计、空间环境评估、科学载荷方案、卫星平台设计、工程大系统选择等部分,各个部分之间相互依赖、影响和制约。其中轨道与星座设计要综合各方面的因素,充分服务天琴探测任务的目标和需求,具体内容包含标称轨道参数设计、星座构型优化、轨道控制与构型维持策略、精密轨道确定、发射部署方案等。由于篇幅所限,本文仅对星座构型稳定性优化、轨道面和轨道半径选取对构型稳定性的影响、地月系引力场对星间加速度噪声的影响、阴影事件规避这四个突出问题的研究进展做简要介绍。其它相关进展可参考本天琴专刊的系列文章及其参考文献。

2 星座构型稳定性优化

由于受到天体引力摄动和轨道初始偏差的影响,天琴卫星轨道随时间的演化会使得星座构型偏离理想的等边三角形。星座构型的稳定性主要由以下3个指标表征:①臂长变化,特别是不等臂长会在激光干涉测量中引入激光频率噪声,这对核心科学载荷设计和数据后处理方法有着深远的影响^[15-16];②星间视线相对速度,其变化决定了激光外差干涉拍频信号的频率范围,从而影响相位计、超稳时钟等重要载荷的指标设计;③呼吸角变化,即星座3个内角的变化,直接影响望远镜和光束指向机构的设计。长期稳定的星座构型对天琴任务至关重要。稳定性指标的变化幅度越小,即星座构型越接近等边三角形,则仪器设计和实验实施方面的难度和压力就越小。星座构型优化应尽可能找到变化幅度小的构型设计。

天琴对星座构型稳定性的初步要求如表1所示,这些指标与科学载荷的设计相匹配。若从标称圆轨道的初值出发,在日月摄动力的作用下臂长会随时间漂移,短时间内便破坏星座构型。为了满足以上稳定性要求,必须对卫星轨道进行优化。由于卫星采用高精度无拖曳控制,抵消来自

表 1 天琴对星座构型稳定性的初步要求^[17]

Table 1 Preliminary requirements on constellation stability of TianQin	
指标	容许范围
臂长变化/%	± 0.5
相对速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	± 5 (2年内), ± 10 (5年内)
呼吸角变化/($^{\circ}$)	± 0.1 (2年内), ± 0.2 (5年内)

外界的非保守力, 在当前的优化中初步仅考虑连续纯引力轨道。在此情况下, 卫星轨道演化仅由轨道初始条件决定, 通过调整 3 颗卫星的轨道初值可使星座构型演化趋于稳定。在借鉴早期工作^[18-19]的基础上, 我们采用的组合优化方法分为两步。首先, 通过解析迭代公式调整轨道初值使得 3 颗卫星的平均半长轴、倾角、升交点经度趋于一致, 从而消除臂长漂移, 维持三星共面且相位间隔接近 120° 。第二步以第一步为基础, 建立表征构型稳定性的价值函数, 利用数值算法精细化搜索价值函数的极值。此步的目的在于降低轨道平均偏心率, 从而进一步提升第一步得到的长期稳定性水平。在以上优化中, 轨道计算使用了 NASA 的开源任务分析软件 GMAT^[20]。

通过优化搜索, 我们找到了多组满足天琴构型稳定性要求的纯引力轨道, 特别是沿月球轨道面存在多组不同轨道面指向的、满足要求的轨道, 可作为备选 (例如正交双星座)。在测试中我们还发现将卫星轨道面与月球轨道面 (与黄道面夹角约 5°) 设置为近似垂直有利于保持星座构型的长时间稳定。此外星座平面方位, 即探测器指向, 可以保持长期稳定, 5 年内仅存在少量漂移 ($< 3^{\circ}$)。优化结果表明, 在每 3 个月的观测期内, 天琴星座构型预期可以达到的稳定性水平为臂长变化 $\pm 0.1\%$, 相对速度 $\pm 4 \text{ m/s}$, 呼吸角变化 $\pm 0.1^{\circ}$ 。这些指标可作为轨道控制未来争取实现的目标, 以及科学载荷设计的参考输入。本章节相关成果的详细论述可参见文献 [17]。

3 轨道面与轨道半径选取

如前所述, 天琴方案初步设置轨道半径 10^5 km , 轨道面近似与黄道面垂直, 并正对参考波源 J0806。与 LISA 类型的绕日轨道不同, 天琴的星座平面在 5 年任务期内基本保持不变。因此在轨道设计中, 应当充分考虑轨道面方位 (探测器指向) 和轨道半径 (探测器臂长) 的选取。虽然轨道优

化的结果显示当前的轨道参数设置可以满足构型稳定性需求, 但还不能回答诸如“能否选择其它轨道面和半径”“构型稳定性可否继续提升”等问题。鉴于星座构型稳定性是轨道设计的一项重要考虑因素, 本节主要探讨轨道面方位与轨道半径选取对天琴星座构型稳定性指标的影响。

为突出主要矛盾, 我们在地心黄道坐标系中采用单变量分析的方式分别研究轨道倾角 ($0^{\circ} \sim 180^{\circ}$)、升交点经度 (30° 、 120° 、 210° 、 300°)、轨道半径 (6 万 ~ 15 万 km) 与一年构型稳定性指标之间的关系。为了实现大参数范围的多事例并行优化, 我们在上一节工作基础上开发了新的高效优化算法, 其主要改进点在于摒弃了对价值函数极值的低效率数值“盲搜”, 而将轨道初始时间引入到优化变量中, 以同样达到降低轨道平均偏心率的效果。新算法具有完全的确定性, 优化效率得到很大的改善, 而优化效果可与原有算法保持一致^[21]。

借助高效优化搜索算法, 我们完成了不同轨道面与轨道半径选取对星座构型稳定性指标的影响研究, 明确了稳定构型所对应的轨道参数可选范围。主要结论有^[21]: ① 相对于黄道面, 倾角为 90° 和 140° 左右时, 构型稳定性较优; 相比之下, “平躺”轨道 (倾角为 0° 或 180°) 由于受到的月球扰动较严重, 其稳定性表现较差; 此外, 逆行轨道一般比顺行轨道的构型变化幅度要小。② 在给定的倾角下, 改变轨道升交点经度对构型稳定性的影响较小, 这允许我们沿黄道面附近调整探测器指向, 以帮助丰富科学方面的产出, 而不必局限于指向 J0806。③ 星座构型稳定性随轨道半径增加而趋向于变差。由于与月球的轨道共振效应, 轨道半径 9.6 万、10.5 万、11.6 万和 13.1 万 km 等附近处的构型稳定性较差 (图 1)^[18]。为使呼吸角变化不超过 $\pm 0.2^{\circ}$, 天琴轨道半径不宜超过 11.3 万 km 且避开前述的月球轨道共振区域。

上述结论一方面为天琴轨道的初步设计提供了理论支持, 另一方面, 从构型稳定性的角度看, 天琴的轨道面方位和轨道半径可选范围实际上较为宽泛, 这允许我们后续根据工程和技术需要对目前的轨道参数作出进一步调整和优化。除上一节提到的优化轨道外, 在倾角 140° 附近发现的新稳定逆行轨道, 亦可作为未来轨道方案的潜在备选, 从其他方面开展进一步地评估和对比。本章节相关成果的详细论述可参见文献 [21]。

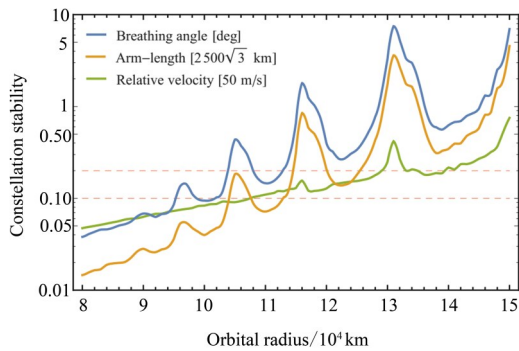


图 1 星座构型稳定性指标随轨道半径的变化关系
Fig. 1 The dependence of TianQin's constellation stability on the orbital radius

4 地月系引力场干扰效应评估

空间引力波探测器在轨运行时会受到来自周边环境的各种影响,包括引力场、热辐射、等离子体、空间磁场、太阳风粒子、宇宙射线、微陨石等等。空间环境效应强烈制约探测器的性能和寿命,是天琴轨道与星座设计中必须充分考虑的重要方面。其中空间引力场是一类较为突出的天然环境因素,包括中心天体的点质量引力和非球形引力摄动,以及来自其它外部天体的引力摄动。由于天琴探测器处于地月系统内,预期这类影响对于地球轨道探测任务会更为显著。具体来说,空间引力场环境对引力波探测的影响或效应表现为两方面:1)在大尺度上影响编队或星座构型的长期演化,使得探测器轨道偏离标称设计,臂长无法固定而随时间变化。如第二节所述,在这方面需要通过轨道优化和控制使得构型稳定性满足科学载荷的要求。2)在小尺度上直接影响悬浮检验质量在近乎纯引力作用下的测地线运动。空间引力波探测器对检验质量星间距离变化的测量精度很高,除了引力波外,对位于探测灵敏频段内能够引起星间距改变的引力场变化也同样敏感。后者在引力波探测中将成为环境噪声,应当予以避免或消除。

在理想情况下,空间引力场摄动在星间测量中表现为臂长的长期缓慢变化。若引力场变化频率与待测引力波的频率有良好的分离,则叠加在引力场摄动大尺度平滑缓变背景上的引力波微小扰动就可以被分离和提取。由此可知引力波探测非常依赖周围引力场的“洁净”。在轨道选取中,应避开强引力场干扰源,设置必要的安全距离,使探测器运行于干扰小的区域。

引力场环境的干扰问题很早就在地面引力波

探测器的设计中被意识到^[22],因而并非空间探测器所独有。在地面探测器 LIGO 中,地面引力干扰,即牛顿噪声,限制了低于约 10 Hz 频段的探测灵敏度的提升^[23]。削弱这类噪声已有多种有效的策略,相关的技术在下一代地面引力波探测的设计中发挥着重要的作用。

在空间引力波探测中,若处理不当,空间引力场环境效应会抬高探测灵敏度曲线,造成类似于银河系引力波前景噪声(Confusion Noise)的情况。中国科学院引力波专家团队曾明确指出“轨道噪声”的风险^[24]。因此,空间引力场环境是检验质量星间距离测量的一项重要的潜在干扰来源,直接关系到空间引力波探测的噪声预算及灵敏度,在探测方案中有必要给予充分研究和评估。

天琴团队自 2016 年起针对该问题开展了系统研究,取得了重要进展。针对摄动效应评估对数值计算精度的特殊要求,团队自主开发了高精度轨道数值计算程序,完成了一系列的数值积分算法与参数组合测试,优化了代码执行以提升计算效率。在精细化引力场建模方面,已包含日、月、八大行星点质量,太阳 J_2 引力场,月球高阶静态引力场,地球高阶静态引力场,以及地球固体潮、海洋潮、极潮、大气潮、相对论效应等等。未来还将对力模型进一步扩充与完善。针对天琴轨道的模拟结果显示,当前已实现超越 $10^{-16} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 精度的星间加速度计算,满足评估的要求。

依托该轨道计算程序,我们系统评估了地月系引力场对天琴星间视线相对加速度噪声的影响,结果表明地月系主要摄动贡献均不在天琴 $10^{-4} \sim 1 \text{ Hz}$ 的探测频段内。当前可排除的摄动因素包括日、月、七大行星点质量、地球静态重力场(含不规则转动)、地球固体潮、海洋潮、极潮、大气潮、月球静态重力场、太阳 J_2 、相对论效应等。初步判断 10^5 km 高度附近处的空间引力场环境较为“洁净”,以上摄动干扰对天琴引力波探测不构成颠覆性因素。相关研究成果的详细论述将于近期发表^[25]。

5 阴影规避

卫星在地球轨道上的运动存在星食现象,即卫星可能进入月球和地球的太阳阴影区。天琴的阴影问题与热控问题直接相关,也同样引起外界的关注和质疑^[26-27]。首先,进出地月阴影会对航天器产生热干扰,破坏星内的敏感科学载荷的热

平衡, 而核心科学载荷对温度稳定性要求非常苛刻, 在 mHz 频段约为 10^{-5} K/Hz^{1/2} 量级。其次, 阴影事件干扰太阳电池阵列的稳定功率输出, 亦可能对核心载荷的正常工作产生负面影响。与通过硬件设计直接应对太阳阴影的策略相比, 在轨道设计中避免阴影事件发生显得更为便捷高效。对天琴而言, 地影事件仅出现在 3 个月的非观测期内, 其危害性预期较小, 因此我们重点关注 3+3 个月观测窗口内的月影事件。为了确保引力波观测的连续性, 我们要求在五年任务的所有 3+3 个月的观测窗口内 (6 月 8 日 ~ 9 月 6 日, 12 月 7 日 ~ 3 月 7 日), 3 颗卫星不得经历阴影事件。阴影规避问题需要与星座构型稳定性问题同时处理, 即轨道设计面临规避阴影和满足星座构型稳定性要求的双重挑战。

其它地球轨道探测方案也曾讨论过阴影问题, 例如 gLISA、LAGRANGE 以及 OMEGA 等^[5]。天琴在轨道半径和轨道面方位的选取上均与以上几个方案不同, 因此阴影事件发生的规律和特点也不一样。虽然阴影问题很早就被注意到, 但在地球轨道方案文献中相应的解决方法尚缺乏足够的探讨。阴影规避在装备精密观测仪器的空间天文台的轨道方案中较为常见。以日地拉格朗日 L2 点的任务为例, WMAP、赫歇尔、普朗克、盖亚、詹姆斯·韦伯空间天文台在轨道设计中均考虑了阴影问题^[28]。此外位于地月拉格朗日 L2 点附近的嫦娥四号中继卫星鹊桥选取了合适的晕轨道振幅和相位, 以减少阴影事件并保持与地球的通讯不被月球遮挡^[29]。这些任务所采用的规避方法对天琴有重要的参考价值。

解决天琴阴影问题至少有 3 种策略: ① 规避机动, 即在观测窗口内的阴影事件预测发生前, 在 3 个月的非引力波观测期内启动 3 颗卫星上的微推进器, 实施调相以错开阴影区。轨道机动会消

耗额外的推进剂, 缩短任务寿命, 此外轨道机动不得破坏星座构型稳定性。综合权衡, 在实践中应尽可能少地使用该种策略。② 初始相位选取, 即通过选取特殊的卫星初始相位的方法, 保持在后续较长时间的轨道演化中卫星与月影不相遇。③ 轨道半径调整, 即相位速率调整, 此方法可与前一方法联合使用, 以达到最佳的效果。天琴在初步设定 10^5 km 轨道半径时未考虑阴影问题, 但依据第二节所述, 轨道半径存在后续可调整的空间。

在解决天琴阴影问题时, 我们主要联合应用策略②和③, 并结合高效的轨道优化方法, 搜索满足稳定性要求的在 3+3 个月观测窗口内无月影的轨道参数可选范围。当前结果显示, 满足要求的可选轨道参数范围较大, 无月影观测窗口可延长, 天琴轨道的阴影问题可以获得较为圆满的解决。相关研究成果将于近期发表^[30]。

6 总结与展望

采用地球高轨是天琴计划的显著特征。天琴计划的轨道与星座设计需综合权衡来自科学目标、空间环境、科学载荷、卫星平台、工程大系统等多方面的限制和需求, 在天琴方案概念性研究中具有特殊位置。反过来, 轨道的选取决定了探测器所处的空间环境, 并作为约束条件影响科学载荷和卫星平台的设计, 而后两者必须能够适应地球轨道的动力学特性并应对在轨空间环境的干扰。天琴团队目前在科学运行轨道的设计方面取得了多个进展, 由于篇幅所限, 本文仅对星座构型稳定性优化、轨道面和轨道半径选取、地月系引力场干扰效应、阴影规避这四个方面做了简要介绍, 这些成果为未来的工作打下了必要基础。综上所述, 天琴地球轨道的最终优选和方案可行性评估预期将得到合理、完善的分析与解答。

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]. Phys Rev Lett, 2016, 116: 061102.
- [2] LISA. A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts[R]. 2017.
- [3] LISA. Unveiling a hidden Universe, assessment study report[R]. ESA publication # ESA/SRE(2011)3, 2011.
- [4] LUO Z R, BAI S, BIAN X, et al. Gravitational wave detection by space laser interferometry [J]. Adv Mech, 2013, 43: 415.
- [5] NASA. Gravitational-wave mission concept study final report[R]. 2012.
- [6] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. Class Quantum Grav, 2016, 33: 035010.
- [7] HISCOCK B, HELTINGS R W. OMEGA: a space gravitational wave MDEX mission[J]. Bull Am Astron Soc, 1997, 29: 1312.

- [8] TINTO M, de ARAUJO J C N, AGUIAR O D, et al. Searching for gravitational waves with a geostationary interferometer[J]. *Astropart Phys*, 2013, 48: 50.
- [9] McWILLIAMS S T. Geostationary antenna for disturbance-free laser interferometry (GADFLI) [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1111.3708>.
- [10] CONKLIN J W, BUCHMAN S, AGUERO V, et al. LAGRANGE: Laser gravitational-wave antenna at geolunar lagrange points [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1111.5264>.
- [11] KAWAMURA S, NAKAMURA T, ANDO M, et al. Space gravitational-wave antennas DECIGO and B-DECIGO[J]. *Int J Mod Phys D*, 2018, 27: 1845001.
- [12] 张雪峰,李洪银,梅健伟. 基于LISA卫星概念的天琴卫星热稳定性估算(技术报告)[R]. 2018.
ZHANG X F, LI H Y, MEI J W. Thermal stability estimation of TianQin satellites based on LISA-like thermal design concept (internal technical report) [R]. 2018.
- [13] 张雪峰. 天琴理论组方案分析进展[C]//第二届华中科技大学引力中心&中山大学天琴中心精密测量物理学术交流会暨2018年度学术年会, 2019.
ZHANG X F. TianQin theoretical group: progress on mission concept studies [C]// Plenary Talk at 2018 Annual Conference of HUST Center for Gravitational Experiments and SYSU TianQin Research Center, 2019.
- [14] 郑浩颖. 天琴卫星的空间外热流分析与隔离控制研究[D]. 广州:中山大学, 2020.
ZHENG H Y. Analysis and control studies of external heat flow of TianQin Spacecraft [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2020.
- [15] FOLKNER W M, HECHLER F, SWEETSER T H, et al. LISA orbit selection and stability [J]. *Class Quantum Grav*, 1997, 14: 1405.
- [16] TINTO M, DHURANDHAR S V. Time-delay interferometry[J]. *Living Reviews in Relativity*, 2014, 17:6.
- [17] YE B, ZHANG X, ZHOU M, et al. Optimizing orbits for TianQin [J]. *Int J Mod Phys D*, 2019, 28: 1950121.
- [18] 胡寿村,赵玉晖,季江徽. 天琴任务轨道设计与分析报告(技术报告)[R]. 2015.
HU S C, ZHAO Y H, JI J H. Internal report by Purple Mountain Observatory (internal technical report) [R]. 2015.
- [19] 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.
- [20] NASA. General mission analysis tool [CP/OL]. <http://gmtcentral.org/>.
- [21] TAN Z, YE B, ZHANG X. Impact of orbital orientations and radii on TianQin constellation stability [J]. *Int J Mod Phys D*, 2020, 29: 2050056.
- [22] WEISS R, MUEHLNER D. Electronically coupled broad-band gravitational antenna, Quarterly Progress Report [R]. Research Laboratory of Electronics (MIT), 1972, 105: 54.
- [23] HARMS J. Terrestrial gravity fluctuations [J]. *Living Reviews in Relativity*, 2019, 22: 6.
- [24] 香山科学会议组委会. 会议纪要[C]//香山科学会议第649次学术讨论会, 2019.
- [25] ZHANG X, LUO C, JIAO L, et al. Effect of Earth-Moon's gravity on TianQin's range acceleration noise, [EB/OL]. <http://arxiv.org/abs/2012.03264>.
- [26] 胡文瑞. 空间引力波探测方案的探讨[J]. *科技导报*, 2018, 36(12):1.
HU W R. Comments on spaceborne gravitational-wave detector mission concepts [J]. *Sci Technol Rev*, 2018, 36(12):1.
- [27] 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 wavedetection program “Taiji” and “Taiji-1” satellite mission [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1):3-10.
- [28] HECHLER M, HERSCHEL J. Planck and GAIA orbit design [C]//Libration Point Orbits and Applications- Proceedings of the Conference. Singapore: World Scientific, 2003: 115.
- [29] GAO S, ZHOU W, LIANG W, et al. Trajectory analysis and design for relay satellite using Lagrange L2 point of Earth-Moon system [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(2): 122-129.
- [30] YE B, ZHANG X, DING Y, et al. Eclipse avoidance in TianQin orbit selection [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2012.03269>.

(责任编辑 张冰)