

空间引力波探测航天器系统及平台技术*

张立华, 黎明, 高永新, 胡越欣, 王凤彬, 张涛

中国空间技术研究院航天东方红卫星有限公司, 北京 100094

摘要: 引力波探测是当代物理学最重要的前沿领域之一, 与引力波的地面探测相比, 引力波的空间探测能够探测更丰富的波源和更遥远的目标, 具有重大的科学价值。空间引力波探测带来了空前的技术挑战, 对航天器系统和平台提出了极高的技术指标要求, 传统的卫星平台难以满足任务需求, 必须设计开发新的平台, 并突破诸多关键技术。本文对空间引力波探测航天器总体和平台设计面临的挑战、主要的设计约束条件进行了分析, 提出了天琴引力波探测航天器的总体方案设想和初步的构型布局方案, 对航天器平台所涉及的关键技术进行了梳理, 并对后续解决途径提出了建议。

关键词: 空间引力波探测; 航天器总体; 航天器平台; 关键技术

中图分类号: O412.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 01-0129-09

The spacecraft system and platform technologies for gravitational wave detection in space

ZHANG Lihua, LI Ming, GAO Yongxin, HU Yuexin, WANG Fengbin, ZHANG Tao

DFH Satellite Co. Ltd, CAST, Beijing 100094, China

Abstract: The detection of gravitational wave is a leading edge scientific research area in contemporary physics. Compared to the detection on the ground, the space based gravitational wave detection can explore richer gravitational wave sources and more distant objects, and so is considered to be of great scientific value. The detection of gravitational wave in space brings great technical challenges and presents demanding technical requirements for the spacecraft system and platform. Traditional platforms can not meet the mission requirements. The ultra-quiet and ultra-stable platform has to be developed. A series of critical technologies need to be broken through. This paper analyzes the technical challenges and constraints faced by the spacecraft system and platform for gravitational wave detection. The preliminary spacecraft system design concept for TianQin gravitational wave detection mission, including spacecraft configuration and layout, is proposed. The critical technologies for spacecraft platform are also analyzed and solution approaches are suggested.

Key words: space based gravitational wave detection; spacecraft system; spacecraft platform; critical technologies

1 引言

引力波的空间探测通常是采用三个或更多航

天器构成一个编队, 航天器之间的距离可以从几公里到上亿公里不等, 以激光链路相连, 构成大型激光干涉仪进行引力波探测。目前国际上提

* 收稿日期: 2020-11-14

录用日期: 2020-11-28

网络首发日期: 2021-01-15

作者简介: 张立华 (1970年生), 男; 研究方向: 航天器总体设计等; E-mail: zlh70717@sina.com

出了多个空间引力波探测计划,包括欧洲主导的 LISA 计划^[1-2]、中国的天琴计划^[3](图 1)和太极计划^[4]等。2017年6月,LISA 已被 ESA 选为其宇宙憧憬(Cosmic Vision)空间科学计划中的第三个

大型任务,目前已进入工程研制阶段,计划于 2034 年发射,NASA 也将参与 LISA 任务的设计、研制和数据分析等工作。

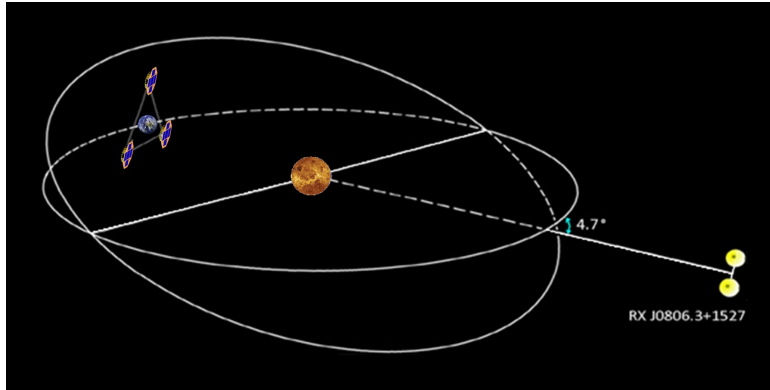


图 1 空间引力波探测天琴计划示意图

Fig. 1 TianQin mission for space based gravitational wave detection

空间引力波探测航天器涉及的核心技术是高精度星间激光干涉测量载荷和具备建立高精度空间惯性基准的超静超稳平台。在具体技术层面航天器需要采用无拖曳控制来抑制航天器受到的太阳光压等非保守力扰动,在测量方向控制航天器随检验质量运动;需要航天器能够具有超稳定的温度控制和结构设计,精确的质量特性控制,高精度的航天器相对指向控制等。

本文对空间引力波探测航天器总体设计面临的主要挑战和主要约束条件进行分析,探讨空间引力波探测航天器的构型布局方案,根据天琴计划的任务构想,提出天琴引力波探测航天器平台的初步方案设想,梳理航天器平台的关键技术并对后续解决思路提出建议。

2 空间引力波探测航天器总体设计面临的主要挑战

目前提出的典型的空间引力波探测任务都是采用 3 个航天器构成三角形编队探测的方案,以超高精度惯性传感器和通过微牛级变推力推进系统实施的无拖曳控制来消除非引力因素的干扰,以高精度激光干涉测距来探测空间引力波信号。通常要求在探测频段(0.1 mHz~1 Hz)内,惯性传感器的精度达到 $10^{-15} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 量级,星间激光测距在数十万到数百万公里距离上达到 pm/Hz^{1/2} 量级。

高精度的激光干涉测距是获取空间引力波信号的基本途径,使航天器内部的检验质量在空间

中沿测地线运动是开展空间引力波探测的基本条件。为了实现空间引力波探测的目标,航天器平台需要具备超静超稳的特性,一方面控制检验质量受到的外界扰动水平,体现航天器的超静特性;另一方面保证激光干涉测距和惯性传感器的超高精度,体现航天器的超稳特性。

空间引力波探测给航天器研制带来了前所未有的技术挑战,主要体现在以下几个方面:

1) 空间引力波探测是利用若干个检验质量的自由落体运动来勾画出背景时空的曲率特征。因此,空间引力波探测要求各个检验质量只能在接近纯引力的影响下运动,因此必须将其他非引力因素的干扰抑制或补偿到可接受的范围内,使航天器平台成为一个超静的平台,而国内目前的航天器平台尚不具备这样的能力。

2) 空间引力波探测任务中要利用激光干涉测量技术精确测量两两检验质量间距离的微小变化。激光光束经过远距离传播,再加上航天器之间的相对运动所产生的效应,光束的特性会发生相应的变化,航天器平台对精密测量的各项影响因素也必须充分加以考虑。

3) 为了对引力波进行探测,3 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,高精度的星间光束指向控制等多个方面的协调配合,实现多自由度条件下对航天器的自主协同控制。

4) 为了配合高精度惯性基准、高精度星间激

光干涉测量以及高精度卫星编队的实现, 航天器平台本身需要具有极高的稳定性, 包括极强的温度控制能力和极高的热稳定性、极低的结构噪声和极高的结构稳定性、极高的磁稳定性等。

空间引力波探测航天器平台的超高技术指标要求, 主要体现在以下一些方面:

1) 航天器激光干涉测距方向的无拖曳控制要使检验质量处的加速度噪声水平控制在 $10^{-15} \text{m}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 量级;

2) 航天器关键部位的热稳定性要求极高, 如光学平台的温度稳定性要达到 $\mu\text{K}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级;

3) 航天器星间指向控制精度要达到 10 nrad ;

4) 航天器磁场控制要达到 $10 \mu\text{T}$ 和 $5 \mu\text{T}/\text{m}$ (检验质量处);

5) 航天器自引力控制要达到 $1 \text{ nm}/\text{s}^2$ 。

与这些指标要求相比, 当前的技术水平存在一个甚至几个数量级的差距, 因此空间引力波探测给航天器总体设计和平台研制都带来了极大的挑战, 必须从顶层出发, 通过详细的任务分析, 合理确定和分解各项技术指标要求, 并针对空间引力波探测的极高精度指标要求带来的一系列技术难题, 开展深入研究和攻关, 突破航天器总体和平台的各项关键技术, 在此基础上, 研制出三个航天器组成的编队系统, 最终实现空间引力波探测的目标。

3 空间引力波探测航天器总体设计的主要约束条件

3.1 轨道选择

航天器轨道的选择直接影响航天器的设计, 目前采用激光干涉测距的空间引力波探测航天器, 主要有两类运行轨道可以选择, 一类是日心轨道, 另一类是地心轨道。两类轨道差别较大, 由于绕地球运行轨道距离地球比较近, 火箭发射入轨的代价低, 但航天器编队轨道稳定性较差; 太阳光相对星体的入射角变化大, 外热流不稳定。绕太阳运行轨道距离地球远, 发射入轨的代价大, 但轨道的长周期稳定性好、太阳光相对星体入射角固定、外热流稳定。目前欧洲的 LISA 任务和中国的太极计划采用绕太阳运行的轨道方案^[1, 4], 而天琴计划则采用绕地球运行的轨道方案^[3, 5]。

3.2 星间距离

航天器之间的距离, 也就是空间激光干涉测量的臂长选择直接决定了探测敏感频段, 也就决

定了探测的主要波源类型及相应的科学目标。LISA 计划的臂长最终设计为 250 万 km, 太极计划则采用了 300 万 km 的臂长设计, 两者的敏感频段和科学目标基本重合。天琴计划的臂长为 17 万 km, 探测的敏感频段比 LISA 计划和太极计划要高。臂长的大小也直接影响航天器载荷和平台的设计, 特别是激光干涉测量载荷的设计和航天器间指向控制设计。

3.3 发射及入轨方式

空间引力波探测航天器有两种发射方式, 一种是由运载火箭直接入轨方式, 另一种是通过航天器自带的推进系统通过轨道转移到达目标轨道。由于日心轨道离地球距离遥远, 因此要依靠航天器自身变轨至目标任务轨道。而天琴计划的航天器距离地球只有约十万公里, 可以由运载火箭直接送入任务轨道, 不需要自身携带推进舱和较多的推进剂, 有利于简化航天器系统设计。

3.4 星地测控与数据传输

航天器测控与数据传输系统的设计与航天器与地面站之间的距离密切相关, 对于 LISA 和太极计划等采用日心轨道的航天器距离地面站达数千万公里, 星地测控和数传的实现代价较大, 星上通常要采用大口径、窄波束、可驱动的天线, 并且需要较大的发射功率, 地面站也要采用有大尺寸天线的深空站。LISA 任务航天器上就采用了 0.5 m 口径抛物面天线, 每隔 9 天要转动控制一次, 放大器的发射功率达到 50 W。天琴计划的航天器运行在地心轨道上, 距离地面站相对较近, 星上天线不需要驱动, 星上发射功率较小, 也不需要采用资源紧张的深空测控站支持。

3.5 在轨运行寿命要求

航天器在轨寿命要求主要影响航天器的推进剂携带量、元器件及部件的选择。特别是目前方案考虑的冷气推进系统, 由于比冲低, 要满足长寿命的要求, 冷气携带量较大, 对航天器构型和布局设计的影响较大。

3.6 避免产生动力学扰动

在任务期间, 要求航天器平台处于超静状态, 设计上必须最大程度地避免航天器自身产生扰动, 主要包括: 不能选择活动部件, 如动量轮、太阳翼驱动机构、天线驱动机构等, 也不能有大型柔性附件, 要采用固定安装的刚性太阳能电池板。设计上不能采用液体推进剂, 也不能使用内部有流体的热管, 要避免加热器开关及负载电流波动等

在测量频带内的影响。

4 空间引力波探测器构型布局方案

4.1 决定构型布局方案的几个关键要素

1) 运行轨道: 是决定航天器构型的关键要素, 对于绕日运行轨道, 太阳光正照太阳电池板, 入射角基本不变, 太阳电池板不需要很大就能遮挡星体免受太阳光影响。但这种轨道必须携带推进舱变轨, 入轨后还要抛弃; 而对于绕地运行轨道, 太阳光相对于太阳电池板角度变化大, 必须采用大尺寸的阳光电池板(顶板), 航天器本体的高度要尽可能小, 才能有效避免太阳光照到航天器本体。

2) 运载火箭包络: 所选用的运载火箭包络决定了星体的尺寸和太阳电池板的尺寸大小以及航天器在火箭整流罩内的布局。如果选择一箭三星的发射方案, 航天器本体高度也要尽可能小。

3) 激光干涉链路夹角: 由于采用三个航天器正三角形编队, 两个激光干涉臂之间要形成 60° 夹角, 因此在航天器内部, 两套激光干涉测量装置必须按夹角 60° 来放置。

4) 质心稳定性: 为了减小航天器对检验质量产生的自引力扰动, 要尽量采用对称的构型和布局方案, 质量分布要均匀, 推进系统气瓶的布置要确保航天器的质量分布不因气体的消耗而变化。

5) 磁场控制要求: 航天器的构型布局要使得检验质量处的绝对磁场和磁场梯度尽可能小, 除了要注意材料的选择外, 构型布局上也要考虑这一需求。

4.2 LISA任务的初步航天器构型布局方案

LISA航天器本体的形状为圆柱体或棱柱体, 顶部的太阳电池板为圆形, 直径约为 2.9 m , 在轨运行过程中一直朝向太阳, 并且阳光一直处于正照状态, 能够完全挡住太阳光照射航天器本体。除了太阳电池阵, 顶板上还布置了两副 0.5 m 口径的二维可驱动高增益数传天线, 用于对地数据传输, 大约每9天调整一次天线指向。

由于LISA轨道距离地球远, 航天器自身要提供较大的速度增量进行轨道转移, 因此必须采用两舱构型, 下面是推进舱, 采用双组元推进系统, 携带推进剂约 $2\ 050\text{ kg}$, 轨道转移的时间约400天, 轨道转移任务完成后将推进舱抛弃。

目前的LISA航天器方案中, 在轨运行中采用了比较成熟的冷气推进系统, 包括3个容积为

98.3 L 的高压气瓶, 120° 均布在航天器底板上。总的气体携带量为 90 kg , 尽管在轨运行寿命要求为4年, 但气体携带量是按照能够满足10年的拓展任务寿命要求来考虑的。两个激光干涉仪呈 60° 夹角放置在航天器内, 望远镜筒伸出舱外^[6]。

4.3 天琴引力波探测航天器构型布局设想

天琴引力波探测航天器本体构型拟采用截面为直径约 2 m 的正八边形, 高度约 0.5 m 的棱柱体。太阳电池板也为正八边形, 由于天琴计划采用了绕地球运行轨道, 太阳光与电池板之间的角度一直在变化, 为了最大限度减小太阳热流变化对航天器的影响, 太阳电池板的尺寸较大, 目前按照 4.2 m 直径的运载火箭包络来考虑方案, 电池板的直径为 3.8 m , 能够避免 60° 以内入射角的阳光照到航天器本体, 可以保证航天器在轨运行过程中约有 $2/3$ 的时间可以开展探测任务。天琴引力波探测航天器的构型如图2所示。

由于冷气微推进技术成熟, 并经过了天琴一号卫星的在轨验证, 目前方案是采用冷气微推进系统实现航天器的无拖曳以及姿态控制, 每个航天器安装了4组微推力器, 每组3个共12个。考虑最低5年的在轨运行寿命需求, 航天器携带的冷气量不小于 50 kg , 每个气瓶的容积为 45 L , 4个气瓶可携带气体 54 kg 。4个气瓶在平台内均匀分布, 确保不会由于气体消耗影响航天器质量分布均匀性。

两套激光干涉测量装置在航天器内部呈 60° 布放, 星体顶部和底部各布放3副S频段测控天线(两副接收和一副发射), X频段数传天线和GNSS天线布放在对地面上, 实现对地数据传输和对GNSS信号的接收。天琴引力波探测航天器内部设备布局如图3所示。

5 天琴卫星总体方案设想

5.1 平台选择和系统组成

天琴的航天器拟基于中国空间技术研究院正在开发的具有无拖曳控制功能的超静超稳小卫星平台研制, 该平台集成度高, 具备超静超稳的特性, 后续经过改进升级, 满足空间引力波探测任务需求。

航天器由平台和载荷两部分组成, 其中载荷包括激光干涉测量、惯性传感器两个分系统; 平台由星务管理、制导导航与控制(含无拖曳控制和推进系统)、测控(含GNSS子系统)、电源、结构、热控、数传等7个分系统组成, 航天器的系统

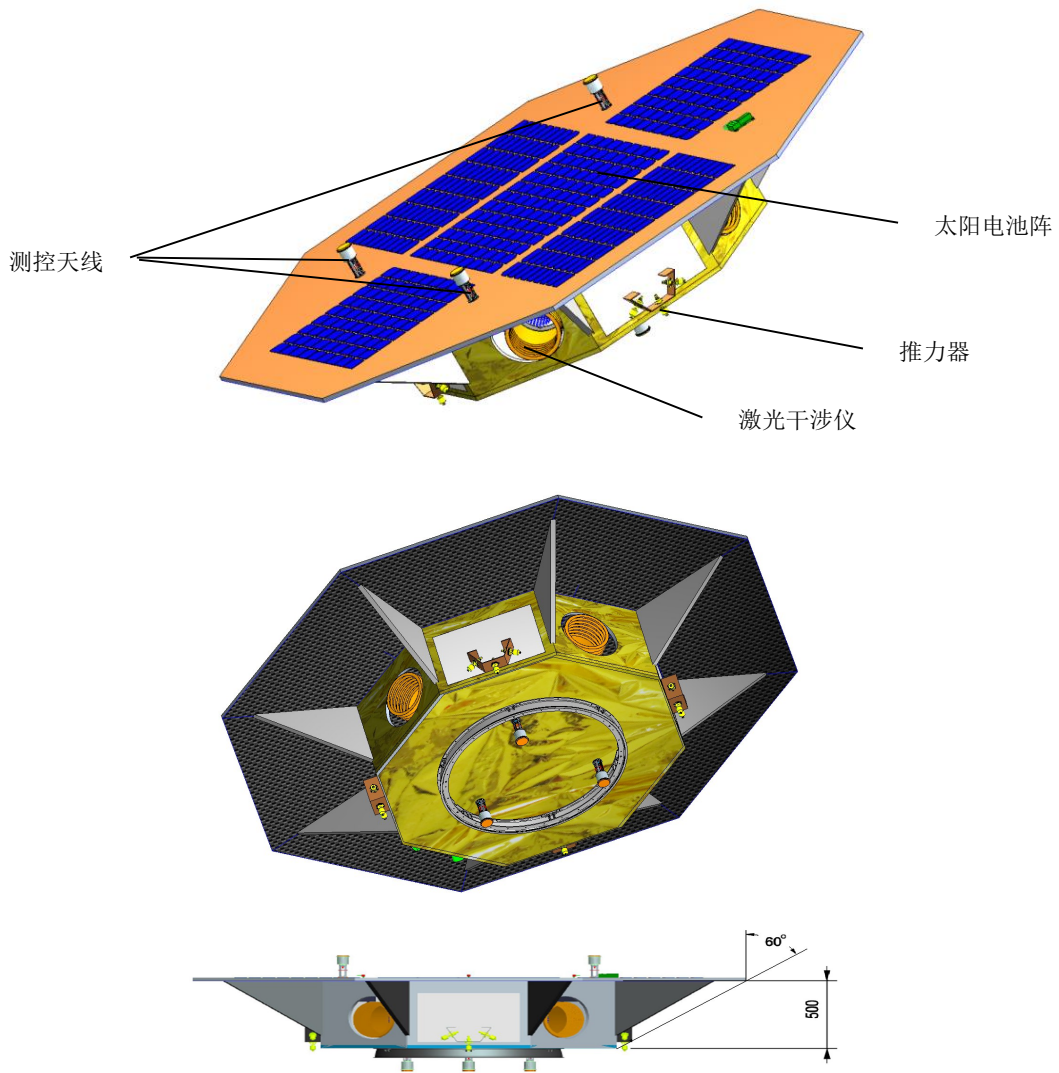


图2 天琴引力波探测航天器构型

Fig. 2 Spacecraft configuration for TianQin mission

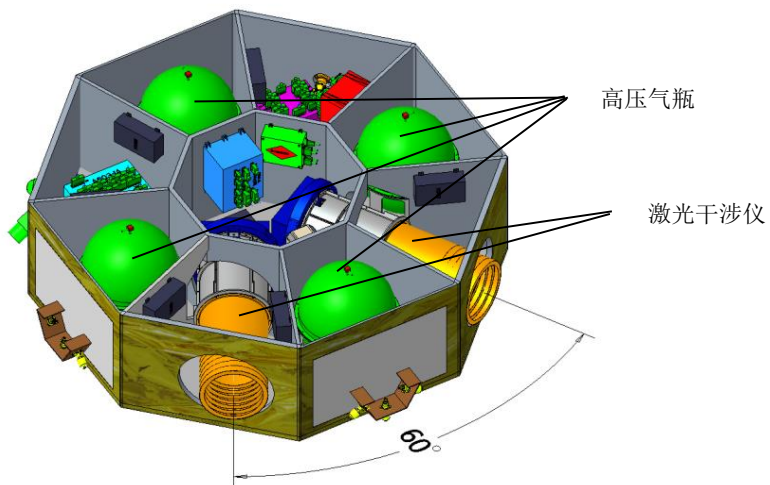


图3 天琴引力波探测航天器内部设备布局

Fig. 3 Layout inside spacecraft for TianQin mission

组成如图 4 所示。

5.2 总体方案概述

天琴航天器采用绕地球运行的轨道，轨道高度 100 000 km，轨道倾角 94.7°，三个航天器编队运行，形成 3 个干涉臂，臂长约 173 200 km，呼吸角为 60°。航天器本体采用截面为正八边形的棱柱体构型，如图 2 所示。单个航天器发射重量约 650 kg，三星共计约 1 950 kg，单星包络尺寸为 $\Phi 3.8 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，采用一箭三星发射，三个航天器采用串联方式布置在运载火箭的整流罩内，由运载火箭直接送入任务轨道，并按照 120° 的相位差依次分离布放到位。卫星在轨运行寿命不小于 5 年。

5.3 平台各分系统方案要点

(1) GNC：采用“星敏+光纤陀螺”定姿方式，采用冷气推进系统进行控制，检验质量和航天器的相对位置信息由惯性传感器提供，GNC 系统既能实现对航天器姿态的控制，也能通过无拖曳控制实现对检验质量和航天器之间的相对位置控制。采用无拖曳控制后，测量频带内每个检验质量在灵敏轴方向上的残余扰动加速度噪声小于 $10^{-15} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ ，航天器还能够实现对地、对日及对惯性空间任意目标的指向控制。冷气微推进系统主要包括 4 个气瓶、12 个推力器、减压模块、控制线路、管路和阀门等组成。为了实现高精度无拖曳和姿态控制并减小对高精度测量载荷的影响，每个微推力器的分辨率要达到 $0.1 \mu\text{N}$ ，噪声水平要小于 $0.1 \mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$ ，并且推力要连续可变。

(2) 星务：星务管理计算机采用高性能片上系统，配置大容量内存，采用 CAN 总线网络形成分布式信息拓扑结构，各设备以节点形式与星上

网络成功能密集、配置灵活的集散系统架构。星务分系统以硬件资源统一应用、充分发挥软件效用为原则，统一管理和调度航天器上各设备，支持航天器在轨自主、安全、稳定运行。

(3) 结构：采用板式结构形式，包括结构板和太阳电池板，航天器主结构为一个正八边形棱柱体，采用蜂窝夹层板结构，面板为铝合金或碳纤维增强复合材料 (CFRP)，蜂窝芯子材料为铝。关键部位采用碳-碳复合材料，保证极高的热稳定性要求。为有效隔离太阳光对航天器内部设备的影响，航天器顶板设计为结构板+隔热泡沫+太阳基板网格面板的复合形式 (一体固化)。

(4) 热控：采用分层分级的控制方式，应用高精度的测温元件和高精度控制算法实现超稳定热控制，同时在材料选择和结构设计也适应超稳定热控的需求。一个重点是控制检验质量周围的温度波动和温度梯度，满足惯性传感器的低频温度稳定性要求。另一个是保证激光干涉测量光学平台和望远镜的温度稳定性。

(5) 电源：电源分系统采用 5 块总面积约为 6 m^2 的三结砷化镓太阳电池阵和 90Ah 的高比能量锂离子电池组为星上设备供电，采用不调节供电母线及分散式的配电体制。整星最大功率需求约为 600 W，太阳电池阵在寿命末期、阳光入射角 60° 条件下的输出功率能够满足各设备需求。

(6) 测控：对地测控采用 USB 测控体制，采用两台数字应答机和六副低增益螺旋天线 (其中四副接收天线，两副发射天线)，确保航天器能够在任意姿态下对地测控链路畅通，配置两台 4W 固态放大器，上行码速率为 2 000 bps，下行码速率

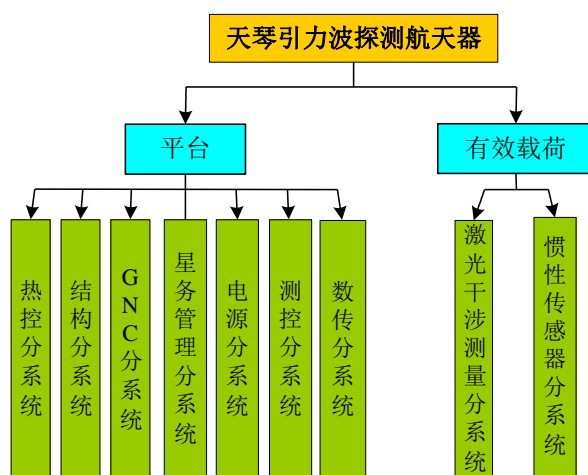


图 4 天琴引力波探测航天器系统组成框图

Fig. 4 Spacecraft subsystems for TianQin mission

4 096 bps。配置高灵敏度 GNSS 接收机, 接收北斗等 GNSS 系统的旁瓣信号和漏信号, 为高精度定轨提供支持。

(7) 数传: 对地数传采用 X 频段, QPSK 调制方式, 由一体化数传终端和天线组成。配置一台 20 W 固放和一副轻量化高增益喇叭天线 (8°范围内的增益不小于 15 dBi), 数传码速率不小于 1 Mbps, 星上存储容量不小于 512 Gbits, 能够满足空间引力波探测科学数据的传输需求。

6 平台关键技术与难点分析

6.1 任务分析与仿真验证技术

空间引力波探测任务技术指标要求极高, 系统间高度耦合, 同时很多指标由于条件限制, 地面的测试和试验验证难以实现, 前期的任务分析和仿真验证非常重要, 要能够精准地模拟平台各种误差影响因素的噪声特性, 建立包含平台各类影响因素与检验质量和激光干涉仪的耦合模型, 通过仿真验证并进行耦合影响分析, 为工程研制提供支撑。

6.2 无拖曳与姿态控制技术

无拖曳控制技术是实现空间引力波探测的关键之一, 需要准确的环境干扰力模型, 要基于自适应控制、智能控制等先进的控制方法, 研究无拖曳控制和姿态控制的新方法及新的非线性滤波方法, 实现精准的控制。在天琴任务中, 3 个航天器的激光干涉臂相互对准精度要求达到 10 nrad, 这也对航天器姿态控制系统的精度提出了极高的要求。由于轨道控制与姿态控制的耦合和极多的自由度, 航天器平台姿态控制、无拖曳控制、星间激光光束指向控制等必须高度协调配合, 保证控制精度满足要求。

6.3 连续可调微推进技术

空间引力波探测平台必须通过高精度、低噪声推进系统为平台提供微小并且连续稳定可变的推力, 来实现“无拖曳”的运行环境。目前可选的微牛级连续可调微推进系统主要包括冷气微推进和微电推进两种类型, 可以选择的电推进系统主要有场致发射电推进 (FEED)、微型射频离子电推进 (μ RIT) 以及胶体电推进 (CMNT) 三种^[7]。冷气微推进系统和胶体电推进系统在 LISA Pathfinder 项目中都进行了在轨验证, 指标达到了任务要求。鉴于冷气微推进系统技术成熟、工作可靠, 目前 LISA 方案中采用了冷气推进系统, 但

由于比冲低, 系统重量代价较大。一旦电推进系统在寿命和可靠性方面取得突破, 未来可能会替代冷气推进系统, 能够大幅降低推进系统重量。

6.4 超稳定材料与结构技术

空间引力波探测航天器对结构稳定性也提出了很高的要求, 因此在设计上要选用稳定性好、热膨胀系数低的材料和结构形式, 有效控制结构变形。碳纤维复合材料, 特别是碳-碳复合材料, 具有极高热弹稳定性, 通过采用合理的铺层/缠绕工艺, 以及一体化结构设计方法, 能够满足空间引力波探测任务对结构稳定性的要求。

6.5 超稳定温度控制技术

高精度激光干涉测量系统与惯性测量敏感器都易受平台热噪声的扰动影响, 按照任务需求, 光学平台等关键部位的温度稳定性控制水平要达到 $\mu\text{K}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级, 必须发展新的热控方法和手段解决超高精度控制的难题。需要采用高精度传感器, 并通过智能 PID 控制等技术实现关键部位的超高稳定度温度控制。高精度热控问题的解决是一个系统性问题, 未来必须结合航天器任务设计、总体设计着手解决问题, 从轨道选择、构型布局、工作模式设计等各方面统筹考虑, 尽可能保证有比较稳定的外热流和内热源。

6.6 航天器质量特性及自引力控制技术

航天器自身的引力作用会增加检验质量在测量频段的加速度噪声, 因此要以检验质量为中心进行精细设计, 检验质量要尽可能靠近航天器的质心, 检验质量周围的质量分布要均匀。为了抑制航天器自身引力带入的检验质量加速度噪声, 除了设计上要采取有效的措施, 同时在研制过程中要精确测量航天器上所有部件的质量特性, 利用有限元模型分析评估检验质量处的差分加速度水平, 必要时通过配重来调整和优化航天器质量分布, 使自引力引入的加速度噪声满足要求。

7 航天器平台关键技术的解决途径

7.1 加强顶层任务分析研究, 理清需求

空间引力波探测航天器的高精度测量载荷和平台是一个密不可分、高度耦合的统一体, 必须统筹考虑。要从任务的顶层需求出发, 深入分析研究技术指标体系, 并通过层层分析分解, 逐级确定对航天器各分系统和关键设备的具体技术指标要求。航天器工程研制单位要与科学家任务团队密切沟通与协调, 深化对探测任务需求和工程

研制能力的理解,做好顶层任务方案,确定合理可行的航天器技术指标。

7.2 加大专项技术攻关力度,夯实基础

前期在空间引力波探测关键技术方面已经取得了一些阶段性成果,但与实现空间引力波探测的超高要求相比,还存在较大的差距。因此必须进一步加大投入,确保高精度无拖曳控制、超稳定热控等一系列关键技术尽快取得实质性突破,为空间引力波探测任务的工程实施奠定坚实的基础。

7.3 集中全国优势单位力量,联合攻关

空间引力波探测航天器总体及平台的关键技术攻关难度大,涉及的专业领域广,投入也比较大,必须充分依托各专业优势单位的技术基础,集中全国力量,联合进行攻关。各团队要密切配合,大力协同,确保提出的技术指标合理,采取的技术途径可行,取得的成果可测试验证。

7.4 加快测试试验手段建设,做好保障

如何在地面做好测试与评估也是空间引力波探测航天器平台相关关键技术突破的难点和核心,现有的测试和试验手段难以满足高精度系统的地面验证需求,必须研究和发展的地面测试和试验验证系统,解决微小变形、热致微振动测量等精密测试验证手段的建设。

7.5 适时开展在轨技术验证,分步实施

空间引力波探测技术难度极大,难以一步实现,需要分阶段对相关关键技术进行验证。由于地面环境因素影响,难以充分验证,必须尽可能创造条件在空间环境下进行验证。LISA 探路者

(LISA Pathfinder)项目对LISA计划的关键技术进行了验证^[8],2015年12月发射后,完成了预期的关键技术验证目标,取得了较好的效果,为LISA任务的立项和工程研制奠定了坚实的技术基础。

天琴计划安排了0123四步走的技术验证规划,2018年10月,国家航天局批准了天琴一号卫星任务的实施。2019年12月,天琴一号成功发射,经过近半年的在轨测试和试验,圆满完成了各项试验任务^[9],图5为天琴一号卫星在轨运行示意图。

天琴一号卫星重点是解决通过无拖曳控制技术实现高精度空间惯性基准构建的问题。利用超高精度惯性传感器的加速度和位移测量信息,通过无拖曳控制算法,驱动微牛级变推力推进系统施加可变推力来补偿航天器受到的非保守力,同时通过高稳定的温度控制、精准的质心控制,为无拖曳控制提供良好的环境保障。另外,还对高精度激光干涉测量载荷进行了初步验证。在无拖曳控制技术方面,在轨实现了位移模式和加速度模式的无拖曳控制,位移模式的无拖曳控制精度优于40 nm。加速度模式下,卫星平台在轨残余加速度噪声下降到 $10^{-9} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})@0.1 \text{ Hz}$ 量级,这是我国迄今在轨最安静的平台;连续可调冷气微推进系统的推力分辨率达到了 $0.1 \mu\text{N}$ 的水平,推力噪声小于 $0.3 \mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}@0.1 \text{ Hz}$ 。高精度温度控制的最优温度稳定性达到 $\pm 3 \text{ mK}/\text{轨}$,地面质心控制和在轨质心检测精度均达到了小于 0.1 mm 的水平^[10]。天琴一号卫星取得的成果为后续超静超稳平台的开发奠定了基础。

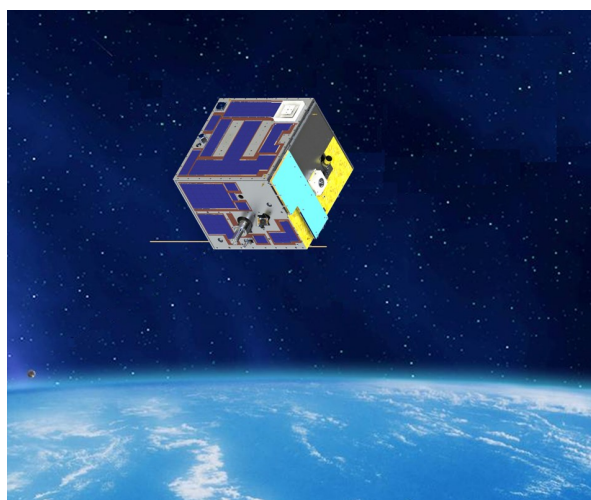


图5 天琴一号卫星在轨示意图

Fig. 5 TianQin-1 technology demonstration satellite

8 结束语

空间引力波探测任务给航天器总体设计及平台研制带来了前所未有的技术挑战, 随着 LISA Pathfinder 技术验证任务的成功实施和 LISA 任务的立项, 欧洲与美国正联合全面推进空间引力波探测计划的工程实施。我国的天琴一号和太极一号^[10-11]在完成研制和在轨试验后, 也迈出了空间

引力波探测关键的第一步。

后续要进一步加强顶层任务分析研究, 加快平台相关关键技术攻关步伐, 提出满足任务要求的航天器系统和平台方案。要结合关键技术攻关进展情况, 适时开展后续在轨技术验证。在各项关键技术取得实质性突破的基础上, 积极争取早日立项, 使我国能够尽快实现空间引力波探测的目标, 抢占国际科技制高点。

参考文献:

- [1] HAMMESDAHR A. LISA mission study overview [J]. *Class Quantum Grav*, 2001, 18:4045 - 4051.
- [2] DANZMANN K. LISA — An ESA cornerstone mission for the detection and observation of gravitational waves [J]. *Adv Space Res*, 2003, 32:1233-1242.
- [3] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(3):035010.
- [4] HU W R, WU Y L. The Taiji program in space for gravitational wave physics and the nature of gravity [J]. *Natl Sci Rev*, 2017(4):685-686.
- [5] 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.
- [6] STEBBINS R T. Recent progress at NASA in LISA formulation and technology development [J]. *Class Quantum Grav*, 2008, 25:114050.
- [7] ZIEMER J. Micro thrust Propulsion for the LISA Mission [C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 12-14, 2004.
- [8] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, et al. Beyond the required LISA free-fall performance: New LISA pathfinder results down to 20 μHz [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120 (6): 061101.
- [9] 王晓宇, 祁首冰, 赵汉卿. 天琴奏响, 空间引力波探测技术验证再传佳音 [J]. *国际太空*, 2020(7):33-37.
WANG X Y, QI S B, ZHAO H Q, et al. TianQin , Good news for Space-borne gravitational wave detection technology demonstration [J]. *Space International*, 2020 (7):33-37.
- [10] LUO J, TU L C, ZHOU Z B, et al. The first round results from the TianQin-1 satellite [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, DOI: 10.1088/1361-6382/aba66a.
- [11] 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.

(责任编辑 秦社彩)