

空间引力波探测惯性传感器关键技术与进展

吴树范^{1,2},张倩云^{1,2},刘梅林^{1,2,*},沈强^{1,2}

1. 上海市引力波探测前沿科学研究基地,上海 200240
2. 上海交通大学 航空航天学院,上海 200240

摘要:空间引力波探测任务中的核心科学载荷之一是惯性传感器,旨在探测极其微弱的空间引力波的波纹变化。首先介绍了空间惯性传感器的探测机理和工作原理;然后从电容位移传感、静电反馈控制、地面评价3个方面介绍了惯性传感器设计的关键技术;并且对国内外惯性传感器的发展研究现状进行了梳理,可以看到惯性传感器关键指标为残余加速度噪声,国外在该指标上达到 $3 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$,国内与国外存在着3个量级的差距,因此开展高精度空间惯性传感器研究与设计具有重大战略意义和科学意义,是中国有望赶超世界科技前沿或领跑世界科技研究的重要方向之一。面向中国未来空间引力波探测任务中的惯性传感器需求,可以聚焦于惯性传感器控制体制策略、交流执行机参数优化、多自由度解耦控制技术、低噪声技术这四个方面的研究。

关键词:空间惯性传感器;空间引力波探测;电容位移传感;静电反馈控制;地面评价

中图分类号:V11 文献标识码:A

Key technologies and progress of inertial sensors for space gravitational wave detection

WU Shufan^{1,2},ZHANG Qianyun^{1,2},LIU Meilin^{1,2,*},SHEN Qiang^{1,2}

1. Shanghai Frontiers Science Centre for Gravitational Wave Detection,Shanghai 200240,China
2. School of Aeronautics and Astronautics,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China

Abstract: Space inertial sensor is one of the key science payloads in space gravitational wave detection mission,aiming to detect infinitesimal change in gravitational wave.The research progress,detection principle and working mechanism of the inertial sensor were introduced and discussed to illustrate its technical challenges.The key technologies of the inertial sensor design were illustrated in three aspects;capacitance displacement sensing,electrostatic feedback control and ground evaluation.Then,the development and research status of inertial sensors worldwide were reviewed and summarized.It could be seen that the residual acceleration noise was the key indicator of the inertial sensor.It reached $3 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ orders of magnitude abroad.There are three orders of magnitude deficit between domestic and abroad.Thus,the study on high precision space inertial sensor has great strategic and scientific significance.To meet the needs of inertial sensors in China's future space gravitational wave detection missions,the research can focus on inertial sensor control system strategy,AC actuator parameter optimization,multi-degree-of-freedom decoupling control technology,and low noise technology.

Keywords: space inertial sensor; space gravitational wave detection; capacitance displacement sensing; electrostatic

收稿日期:2022-07-18;修回日期:2022-10-18;录用日期:2022-10-20;网络出版时间:2022-10-31 10:26

基金项目:国家重点研发计划“惯性传感器控制方法与技术研究”(2020YFC2200800)

*通信作者.E-mail: Meilin.Liu@sjtu.edu.cn

引用格式:吴树范,张倩云,刘梅林,等.空间引力波探测惯性传感器关键技术与进展[J].中国空间科学技术,2023,43(4):1-12.
WU S F,ZHANG Q Y,LIU M L,et al.Key technologies and progress of inertial sensors for space gravitational wave detection[J].Chinese Space Science and Technology,2023,43(4):1-12 (in Chinese).

feedback control; ground evaluation

1 引言

高精度的引力波探测是未来基础科学领域最前沿的研究课题之一^[1]。空间引力波探测器相对于地面探测器来说对中低频段更敏感,具有独特的科学价值。目前最具代表性的空间引力波探测计划有欧洲航天局(ESA)的引力波探测计划 LISA 及其先驱任务 LISA Pathfinder (LPF)^[2];以及国内中山大学牵头发起的“天琴计划”和由中国科学院与欧洲航天局合作发起的“太极计划”。“天琴计划”将在距离地球表面 1×10^5 km 高度的同一绕地轨道面内放置三颗航天器,各个航天器之间相位角相差 120° ,测量频段在 $1 \text{ mHz} \sim 0.1 \text{ Hz}$ ^[3]。“太极计划”预计在 2033 年前后发射由三颗卫星组成的引力波探测星组,与 LISA 类似在绕日轨道上形成一个等边三角形,卫星之间相距 3×10^6 km,测量频段在 $0.1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ ^[4]。

空间惯性传感器作为空间引力波的关键载荷之一,其内部的检验质量(Test Mass, TM)为激光干涉仪提供惯性基准^[5-6]。如图 1 所示为天琴测量星座组成的激光干涉仪测量平台,三颗卫星两两之间构成激光测量臂。引力波会引起时空的伸缩,当引力波经过测量臂时,时空伸缩引起的光程差被干涉仪读取,图中黄色部分代表的是惯性传感器的检验质量,它是卫星本地测地线的参考点。



图 1 天琴激光干涉仪测量平台^[6]

Fig. 1 Measurement platform of TianQin laser interferometer^[6]

惯性传感器由检验质量、电极笼、前端电子

学系统以及辅助系统构成,如图 2 所示。其中检验质量是惯性传感器的核心部件,前端电子学系统包括电容位移传感、静电执行机以及控制器三大部分,辅助系统包含锁紧释放系统、紫外放电系统、真空系统,辅助系统处于检验质量的外围,锁紧释放系统负责保证发射时检验质量的安全,紫外放电系统负责管理检验质量上残余电荷,真空系统用于支撑检验质量和电极笼。惯性传感器的主要功能可以分为以下两种^[7]:

1)对航天器受到的非保守力,如大气阻力、太阳光压等作用而产生的加速度进行测量,并反馈给航天器的无拖曳系统,该系统通过控制微推进器产生与之相对的加速度来抵消这部分的非保守力的作用。

2)作为激光干涉测量系统的一部分,为激光干涉提供惯性基准,通过测量检验质量与航天器之间的相对位移验证激光干涉系统的性能。

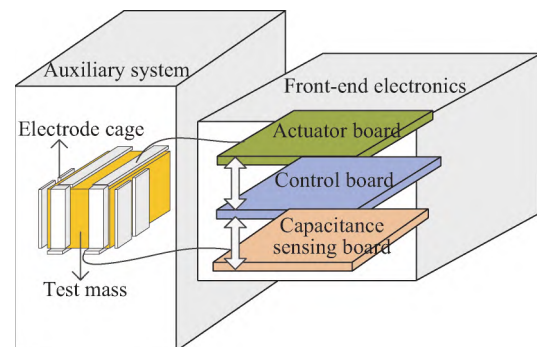


图 2 空间惯性传感器系统组成示意

Fig. 2 Schematic diagram of the composition of space inertial sensor system

这两种功能对应着不同的工作模式,即加速度计模式和惯性参考模式。在一般的空间应用场景下例如测量非引力、引力梯度、弱力检测等采用加速度计模式,在该模式下,检验质量跟随航天器运动。在空间引力波探测中一般使用惯性参考模式,航天器跟随检验质量运动,检验质量作为惯性基准,这就要求在该模式下检验质量敏感轴上的残余加速度噪声必须控制在极低的水平,残余加速度噪声即惯性传感器的关键指标。

目前国内外的空间引力波探测计划对于残余加速度噪声指标的要求均在 $10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 量级。国外目前在轨测试噪声水平已达到

$10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 量级,中国目前用于空间引力波探测的惯性传感器噪声水平在 $10^{-12} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 量级,仍存在3个数量级的差距。可以看出,空间惯性传感器的设计仍面临着极大的挑战。本文将从空间惯性传感器的工作原理、关键技术、研究进展几方面入手分析总结空间惯性传感器的设计思路及研究现状,同时对未来惯性传感器的研究突破方向进行了初步探讨。

2 空间惯性传感器工作原理

空间惯性传感器的工作原理可以看作一个检测系统,传感器外壳受到的外界干扰加速度可以看作输入量,检验质量相对惯性传感器的位移为输出量,其基本模型可以看作由检验质量、阻尼系统和轻弹簧组成。

传感器受到外界非保守力的作用会产生加速度,而检验质量由于惯性的作用会保持原来的运动状态,与传感器发生相对运动。前端电子学单元利用差分电容传感实现检验质量位置和姿态的高精度检测,将检测到的位置及姿态信息传递给控制系统,由控制系统计算出相应的控制力,并转换为电压幅值信号,通过静电执行机构产生反馈电压施加在极板上,以此产生静电力来实现对检验质量的六自由度控制,即“电容位移传感+静电反馈控制”,如图3所示。目前,空间引力波探测任务中的高精度惯性传感器主要采用这种工作原理。

如图4所示为信号在惯性传感器内部的传递形式。在执行机回路中,输入是来自无拖曳系统的控制力信号,在回路中首先将控制力转换为电压控制信号,电压控制信号通过一系列的变化变成施加在极板上的电压 V_f ,这个电压信号对检验质量会产生静电力,控制检验质量的平动和转动,在电容位移传感回路中,检测极板与检验质量间的电荷变化,将变化量传递给无拖曳系统,计算出所需的控制力传递给执行机回路。所以惯性传感器就是引力波探测科学卫星的无拖曳姿态控制系统的一个核心传感器兼重要执行机构,既感知和检测细微的相对运动,同时,通过静电反馈控制的协助,以实现对外环卫星姿态的无拖曳控制目标。

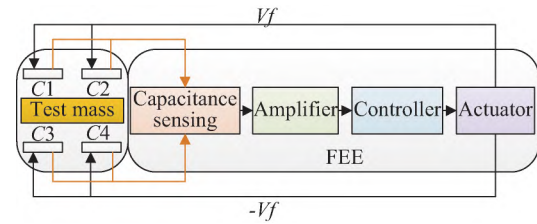


图3 惯性传感器工作原理示意^[12]
Fig.3 Schematic diagram of inertial sensor working principle^[12]

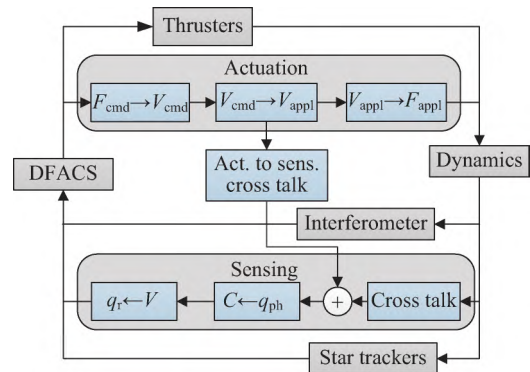


图4 惯性传感器信号传递形式
Fig.4 Form of inertial sensor signal transmission

3 空间惯性传感器关键技术

目前大部分空间惯性传感器主要基于“电容位移传感+静电反馈控制”的工作原理,因此,电容位移传感及静电反馈控制是空间惯性传感器设计时的两大关键技术。此外,在空间惯性传感器入轨前必须对其功能和性能指标进行相应的地面验证以确保并评估系统的基本功能和在轨状态。以下将从这三个方面介绍空间惯性传感器的关键技术。

3.1 电容位移传感技术

位移测量是惯性传感器主要功能之一,而以差分电容传感器为基础的惯性传感器能够对缓变外界扰动力所造成的微小位移进行纳米级精确测量。电容位移传感将检验质量的位移转换成相应的电容变化量,并通过电容变化量来表征(评价)被测物理量^[8]。电容传感器通常由传感元件和检测电路组成,如图5所示。传感元件感知被测物理量并将其转化为电容信号输出,检测电路将电容信号转换成易于测量的电压或者电流信号。

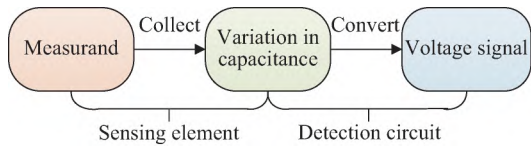


图5 电容传感原理示意^[12]
Fig 5 Schematic diagram of capacitance sensing principle^[12]

目前,惯性传感器通常使用结构形式简单的平行板电容器作为测量基础器件以降低设计加工难度。根据平行板电容器的基本原理,忽略边缘效应,其电容值可以表示为^[9]:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 和 ϵ_r 分别代表真空介电常数和相对介电常数,相对介电常数与材料属性相关,在轨时电极间介质可近似为真空即 $\epsilon_r = 1$; A 为有效电极面积; d 为电极之间的间距。

从式(1)可知,要改变电容的大小可以从改变介电常数、有效电极面积、电极间距三个方面进行。但是在真空环境中,改变介电常数需要依靠改变材料介质来实现,不仅工艺复杂而且难以满足高可靠性和高精度的需求,因此一般不采用这种方法,目前主要采用的是变面积和变间距这

两种方式,从几何结构的角度来改变电容值,从而建立位移与电容变化间的相互关系。

在实际设计中,对于变面积电容传感,需要考虑面积变化过程中的电极边缘效应,多自由度测量情况下存在的轴间耦合误差以及复杂的结构形式^[10]。对于变间距的传感来说,需要在设计中考虑位移变化与电容变化超出一定区间后呈现非线性关系的问题,可以通过伺服反馈将检验质量控制在线性区间内。此外,当检验质量同时进行转动和平动时,检验质量和极板不再满足平行关系,如图6所示为检验质量与极板间距示意图,EL1-EL4表示四块极板。可以看出,极板间距与平动位移 x, y 及转动角度 φ 有关,对于高精度空间引力波探测的惯性传感器来说,需要考虑平动位移和转动角度的耦合关系。平动转动间的耦合会给位移信号的测量带来噪声,同时,惯性传感器中静电反馈与位移传感间也会存在耦合,施加的静电反馈控制力会对位移信号的测量引入额外的耦合噪声,如图4所示。因此,在对位移传感模块进行设计时,应首先对各项噪声进行研究,进行噪声预算分配,再根据分配的指标进行相应的设计。

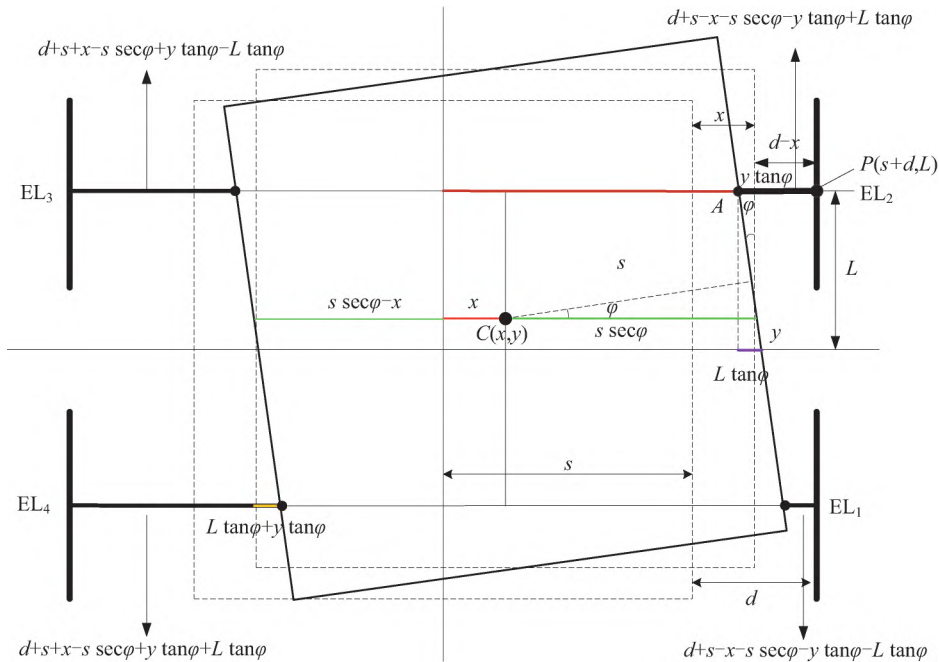


图6 检验质量与极板间距示意
Fig 6 Schematic diagram of distance between TM and electrodes

3.2 静电反馈控制技术

传感电路将检验质量与极板间的电容变化转换为电压信号,执行机回路将电压信号施加在极板上,当一对极板上施加的电压不相等时,会对检验质量产生静电控制力,控制检验质量的运动^[11-13]。检验质量的运动可以分解为平动和转动,如图7所示。

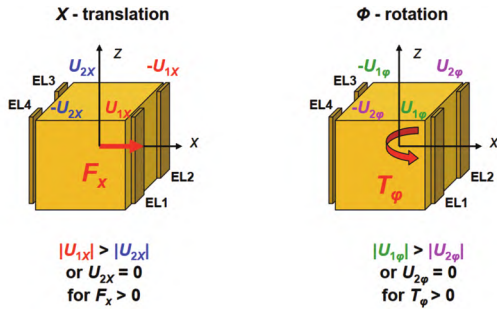


图7 静电反馈控制原理示意图^[13]
Fig.7 Schematic diagram of electrostatic feedback control principle^[13]

图7表示的是检验质量在 x 方向上的平动和绕着 z 轴的转动,由分布在检验质量外的 $EL_1 \sim EL_4$ 四块极板控制。施加控制平动的电压 u_{1x} 和 u_{2x} ,产生的平动静电力如下:

$$F_{x1,4} = \frac{\epsilon S_x}{2} \left(\left(\frac{u_{1x}}{d_1} \right)^2 - \left(\frac{-u_{2x}}{d_4} \right)^2 \right) \cong \frac{C_0}{2d_0} (u_{1x}^2 - u_{2x}^2)$$

$$F_{x2,3} = \frac{\epsilon S_x}{2} \left(\left(\frac{-u_{1x}}{d_2} \right)^2 - \left(\frac{u_{2x}}{d_3} \right)^2 \right) \cong \frac{C_0}{2d_0} (u_{1x}^2 - u_{2x}^2)$$

$$(2)$$

施加控制转动的电压 $u_{1\phi}$ 和 $u_{2\phi}$,产生的转动静电力如下:

$$F_{\phi1,4} = \frac{\epsilon S_x}{2} \left(\left(\frac{u_{1\phi}}{d_1} \right)^2 - \left(\frac{-u_{2\phi}}{d_4} \right)^2 \right) \cong \frac{C_0}{2d_0} (u_{1\phi}^2 - u_{2\phi}^2)$$

$$F_{\phi2,3} = \frac{\epsilon S_x}{2} \left(\left(\frac{u_{2\phi}}{d_2} \right)^2 - \left(\frac{-u_{1\phi}}{d_3} \right)^2 \right) \cong \frac{C_0}{2d_0} (u_{2\phi}^2 - u_{1\phi}^2)$$

$$(3)$$

式中: ϵ 为极板间介质的介电常数; S_x 为 x 轴方向的单个极板的面积; d_i 为第 i 个极板与检验质量之间的距离; d_0 为极板标称距离; C_0 为标称距离下的标称电容值。从式(2)(3)可知,改变一对极板的电压,可以在检验质量上产生相应的静电力,且一对极板上的电压差值越大产生的静电力越大。

对极板施加的电压有两种类型:直流电压与

交流电压^[13]。当采用直流电压时,平动电压和转动电压会产生耦合静电力。为了避免耦合的影响,施加直流电压一般采用分时控制的方式,即在一个周期内只施加平动电压或转动电压。然而在实际控制中需要对平动与转动这两个自由度同时进行控制,直流电压的分时控制难以满足要求。而交流电压通过采用不同的频率来消除耦合电压对静电力的影响,可以实现对检验质量两个自由度进行同时控制且相互独立,因此目前静电反馈控制中主要使用交流控制的方式。

3.3 地面评价方法

空间惯性传感器在入轨前必须对其功能和性能指标进行相应的地面验证,一方面有利于验证系统设计的覆盖性、稳定性、可靠性,另一方面有利于确认系统基本功能并估计惯性传感器的在轨工作状态和能力。因此在地面如何对空间惯性传感器进行全面地测试,特别是对一些关键性能和指标的验证就显得尤为重要^[14]。

空间惯性传感器工作在空间微重力环境下,不受重力约束,呈“悬浮”状态。而在地球表面由于受到重力和大地脉动的影响,导致惯性传感器无法完全正常工作,从而无法对其全面标定。同时空间惯性传感器分辨率非常高,量程往往又比较小,远小于重力加速度。所以必须采用一些特殊的手段来抑制地球重力对测量的影响。通常采用的方法有高压悬浮^[15]、悬丝扭摆^[16]、自由落体^[17]。

高压悬浮方式对电极在竖直方向上施加高压,产生的静电力使检验质量在电极笼内实现自由悬浮,从而实现对检验质量六个自由度的指标测试。华中科技大学研制的高压悬浮原理样机目前可实现对71g的检验质量进行指标测试^[18]。

悬丝扭摆采用悬丝的张力平衡检验质量所受到的重力,使检验质量在一定程度上能够自由运动,模拟在轨时的自由状态。采用一根悬丝将检验质量悬挂,检验质量在扭转方向能够自由运动,再将悬丝和检验质量悬挂在扭秤的端点处,另一端添加质量相同的配平质量,形成二级扭摆系统。一级悬丝的转动可以直接反映检验质量的平动,由此进行惯性传感器的两自由度测试。

如图 8 所示为二级扭摆示意图。

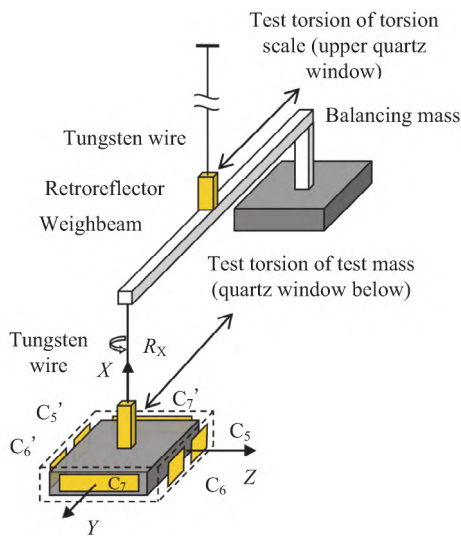


图 8 二级扭摆示意

Fig. 8 Diagram of two stage torsional pendulum

自由落体方式将惯性传感器放置于胶囊发射器内,利用落塔力学实验环境,使惯性传感器进行自由落体运动,利用自由落体过程中产生的微重力环境模拟在轨环境,实现对惯性传感器六自由度控制能力的测试。该方式是最接近在轨运行状态的方式。但由于下落距离短,实验时间只有几秒,无法对分辨率指标进行评价。

表 1 所示为不同地面评价方式的优缺点对比。

4 空间惯性传感器研究进展

空间引力波探测任务中的高精度惯性传感器主要采用“电容位移传感+静电反馈控制”的工作原理。国外研究机构惯性传感器研究进展如表 2 所示。

表 1 惯性传感器不同地面评价方式优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different ground evaluation methods of inertial sensors

Evaluation method	Advantage	Disadvantage
High pressure suspension	Realize 6 degrees of freedom long-term control at the same time	High requirements for the environment, there is a large high voltage noise
Suspension wire torsion	Realize measurement of 1-3 degrees of freedom Realize evaluation of various disturbance acceleration noise	Need special mechanism, the system realization is complex
Freely falling body	Realize 6 degrees of freedom long-term control simultaneously Able to measure the deviation value of the measuring shaft	Only short experiments of a few seconds can be performed, and the resolution cannot be evaluated

表 2 国外研究机构惯性传感器研究进展
Table 2 Research progress of inertial sensors in foreign research institutions

No.	On-orbit test	Ground test
1	ONERA; high precision electrostatic accelerometer, the resolution is $10^{-12} \text{ m/s}^2 / \text{Hz}^{1/2}$	Stanford university; modular gravity reference sensor for LISA mission
2	Trento university; the acceleration noise on-orbit is $1.74 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2 / \text{Hz}^{1/2}$ at 2mHz, $6 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2 / \text{Hz}^{1/2}$ at $20 \mu\text{Hz}$	Split university & ETH Zurich; design and test of sensing and actuation circuits for inertial sensors

其中,ONERA 从 1964 年起研制了第一代高精度静电加速度计 CACTUS,并于 1975-1979 年在 CASTOR-D5B 卫星上搭载。在轨实验数据处理表明,其分辨率达到了 10^{-9} m/s^2 。随后 ONERA 承担了一系列空间计划的静电加速度计的研制工作。典型成果体现在 CHAMP、GRACE、GOCE、GRACE Follow-on 四颗重力卫星上的主载荷——静电加速度计 STAR、SuperSTAR、GRADIO、SuperSTAR-FO,在测量频段内的噪声谱密度分别达到 $3 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2 / \text{Hz}^{1/2}$ 、 $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 / \text{Hz}^{1/2}$ 、 $2 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2 / \text{Hz}^{1/2}$ 、 $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 / \text{Hz}^{1/2}$,上述静电加速度计采用导电金丝注入载波,反馈控制方式均采用直

流静电反馈控制^[17,19-21]。

意大利 Trento University 主要承担了 LISA Pathfinder(LPF)中的空间惯性传感器的设计和地面测试工作。该空间惯性传感器面向空间引力波探测的需求,相对于 ONERA 所设计的静电加速度计在残余加速度指标上有了明显的提升。其采用紫外放电技术代替原本的金丝导电技术以抑制导电金丝的影响,并采用交流的静电反馈控制技术保证检验质量的零电位,用改进的静电模型分析了由杂散静电场作用于导电壳内的带电检验质量造成的力噪声,并结合实验数据说明了如何正确地测量和消除与测试质量电荷相互作用的杂散场。同时搭建了高精度地面二级扭摆系统,开展惯性传感器的地面性能评估,在轨测量结果显示加速度噪声在 2 mHz 为 $1.74 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$,在 20 μHz 为 $6 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 。斯普利特大学 University of Split 和苏黎世联邦理工学院 ETH Zürich 主要开展 LPF 中惯性传感器的传感和反馈电路系统研制与测试,如图 9 所示,并对空间惯性传感器系统的传感与驱动电子系统中的噪声进行详细分析与抑制,对前端电路和载波稳定性也开展了相关的设计和验证^[13]。可以看出空间引力波任务和其他空间任务核心指标需求存在一定差异,空间引力波探测采用惯性基准模式,而其他空间任务大多采用加速度计模式,不同的空间应用场景下,对检验质量上噪声水平的要求不同,这就导致关键技术应用时会存在差异。



图 9 LPF 惯性传感器前端电子学部件^[13]
Fig 9 Inertial sensor front-end electronics component^[13]

此外,国外其他研究机构也开展了一系列的研究以达到对传感器检验质量精确控制的目的。Armano Md 等人^[22-23]。研究了静电驱动系统的精度及其对 LPF 主要观测值的影响,并开发了

一个基于 LPF 设计的模拟器来计算接近现实的驱动电压,从而得到驱动力,实现对检验质量的精确控制。M O Schulte 等人^[24]设计了充电管理装置(CMD)来消除低噪音影响下连续充电或高放电率下间歇充电需要从测试质量去除静电电荷。Nico Brandt 等人^[25]对惯性传感器进行了全面的静电有限元分析,针对不同的检验质量平动和转动,提取了检验质量在 6 个自由度内的静电力和扭矩,以及检验质量与 18 个电极和外壳之间所有不可忽略的电容。并提出了一种适应解析静电模型,更准确地反映传感器的静电力、力矩和刚度值,为检验质量多自由度耦合控制提供了理论依据。上述研究均是基于对检验质量的精确控制的目的开展的,因此对检验质量的精确控制是实现高精度低噪声的空间引力波探测惯性传感器的基础。

国内从事基于“电容位移传感+静电反馈控制”的工作原理的相关惯性传感器的研究机构主要有中山大学、华中科技大学、兰州物理研究所、中科院、清华大学、上海交通大学等。中山大学自 2014 年起开展引力波探测任务中惯性基准系统的指标分析、误差计算与方案设计,研制了空间引力波探测任务中的惯性基准系统,并成功应用于 TianQin-1 试验卫星,在轨测试精度为 0.1 Hz 处 $5 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ ^[26]。华中科技大学多年来针对重力卫星任务,研制了多套静电悬浮加速度计工程样机,搭建单级/二级扭摆系统开展静电悬浮加速度计的多自由度地面性能测试与评估,测试精度可达 $10^{-12} \sim 10^{-11} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 量级;并针对引力波探测任务中静电加速度计的低扰动需求,开展控制器设计以及交流反馈控制研究^[14,27-28]。兰州物理研究所采用高压悬浮技术开展地面静电加速度计的性能测试,并开展静电加速度计样机研制,搭载于 Taiji-1 试验卫星^[29-30]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所为 Taiji-1 试验卫星研制了一套具备搭载条件的空间惯性传感器敏感结构工程样机,开展了地面测试对关键指标进行了测试评估,并根据实验数据对在轨性能进行了评估^[7,31]。上述国内研究机构大多是基于中国“天琴计划”和“太极计划”的空间引力波探测需求来开展对惯性传感器的研制。此外,针对其他的空间测量任务,清

华大学研制了星载硅微静电悬浮加速度计,并开展地面相关测试;并基于等效原理检验计划开展空间惯性传感器研制^[32],同样推动着空间惯性

传感器技术的发展。如表 3 所示,为上述研究机构的主要研究内容及相关成果。

表 3 国内研究机构惯性传感器研究进展
Table 3 Research progress of inertial sensors in domestic research institutions

No.	On-orbit test	Ground test
1	Huazhong University of Science and Technology; engineering prototype of electrostatic suspension accelerometer, the resolution is $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$	Huazhong University of Science and Technology; torsion balance test accuracy reaches $10^{-12} \sim 10^{-11} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$
2	Sun Yat-sen University; inertial reference system, applied in TianQin-1 satellite, the resolution is $5 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ at 0.1 Hz	Tsinghua University; micromechanical electrostatic accelerometers for space missions
3	Lanzhou Institute of Physics; electrostatic accelerometer, applied in Taiji-1 satellite, the resolution is $10^{-9} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$	Changchun Institute of Optics; torsion balance test accuracy reaches $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$

上海交通大学牵头承担了国家“引力波探测”重大专项中的惯性传感器研究专项,与多个研究机构协作,共同开展空间引力波探测惯性传感器相关技术的研究与工程实现。重点针对传感器低噪声多自由度控制方法开展研究,研制惯性传感器控制系统原理及工程样机,实现空间引力波探测惯性传感器高精度控制。目前在理论方面已开展基于模型参考自适应抗饱和的惯性传感器解耦控制技术研究,如图 10 所示,基于固定时间观测器及数据驱动方法的噪声预估与抑制技术研究、考虑输入滞后与通讯中断、硬件计算性能的自触发/事件触发控制技术、多自由度解耦性能指标验证等方面的研究^[33]。在样机研制方面已完成引力波探测惯性传感器交流静电反馈两自由度原理样机的设计实现,如图 11 所示。该原理样机在残余位移控制指标上仿真精度已达 10^{-9} 量级,如图 12 所示。针对原理样机的性能指标测试,提出采用半物理仿真的形式,如图 13 所示,借助仿真手段,对惯性传感器的探头模块及位移传感模块进行建模,同时引入无拖曳控制模块,能够快速获得关键性能指标的初步测试结果,有利于推动惯性传感器的模块化设计,加速研制进程。

综上所述,空间引力波探测惯性传感器的设计研制是一项需要众多学科交叉协同的研究,吸引了国内外众多科研机构学者的关注。相较于其他空间惯性传感器而言,引力波探测惯性传感器的难点体现在超高精度和超低噪声上。要实

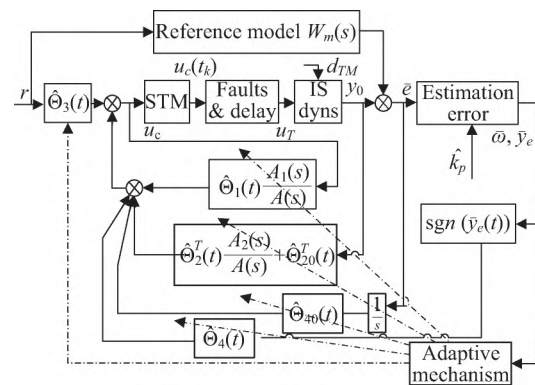


图 10 STM-EMRAC 控制结构
Fig. 10 STM-EMRAC control structure

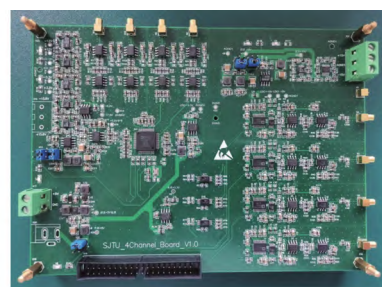


图 11 惯性传感器交流静电反馈两自由度原理样机
Fig. 11 2-DOF inertial sensor AC static feedback principle prototype

现满足空间引力波探测需求的高精度空间惯性传感器,对现有的惯性传感器技术提出了很高的要求。从顶层设计到各组成部件设计再到测试环节都需要理论和工程上的创新。此外,惯性传感器的设计研制在大多数情况下可能由多个团队共同完成,每个团队结合自身优势,对惯性传

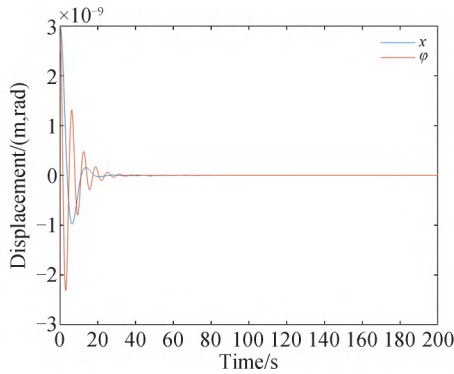


图 12 惯性传感器两自由度残余位移仿真曲线
Fig. 12 Simulation curve of residual displacement of 2-DOF inertial sensor

传感器的某一部件开展针对性的研究。在这一设

计进程中,惯性传感器不同部件间的信号传递,输入输出关系,噪声的分配,单一模块如何完成总体指标的测试,例如仅有执行回路如何实现敏感轴残余加速度的测试,这些问题需要加以重点考虑。同时结合实际的研制及测试对理论上各部件的指标分配进行验证,根据实际的工程难度,对各部件的指标分配进行优化。由于惯性传感器设计总指标敏感轴残余加速度受众多因素影响,对于易于实现的需求,适当提高指标要求,对于工程上实现难度高的需求,可以考虑适当放宽指标要求,这有利于降低工程实现的难度并进一步加快惯性传感器的研制进程。

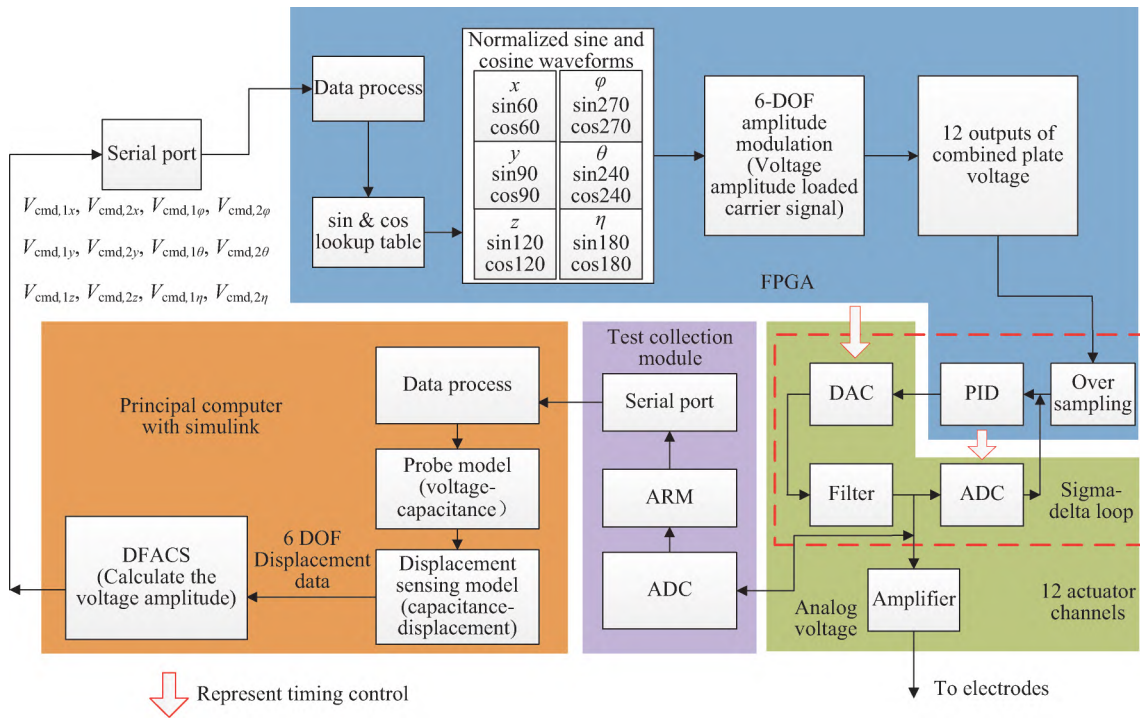


图 13 半实物仿真方案设计
Fig. 13 Design of hardware-in-the-loop simulation scheme

5 结论

本文讨论了空间惯性传感器的组成、工作原理及三大关键技术,梳理了国内外近年来对惯性传感器的研究进展。可以看到,空间惯性传感器是实现空间引力波探测的核心载荷,具有很多技术挑战,国际国内都在积极开展相关的研究和工程实现。随着中国空间引力波探测计划的持续推进,开展高精度空间惯性传感器研究与设计具

有重大战略意义和科学意义,是中国有望赶超世界科技前沿或领跑世界科技研究的重要方向之一。本文认为,面向中国未来空间引力波探测任务中的惯性传感器需求,应该聚焦以下四个方面的研究。

1) 惯性传感器控制体制策略研究。“天琴计划”对惯性传感器提出了在 $1 \text{ mHz} \sim 0.1 \text{ Hz}$ 频段敏感方向引入的残余加速度扰动小于 $1 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 的指标需求^[4],这就对检验质量的控制提出了很高的要求,而惯性传感器检验

质量具有非线性多输入多输出动力学耦合特性,外部多源扰动及噪声会影响对检验质量的控制精度。因此,高精度惯性传感器控制体制策略是一个至关重要的研究方向,将为惯性传感器的实际设计提供精确的设计指标。

2)交流执行机设计及参数优化。针对交流执行机需要设计合适的交流电压幅值、频率、相位。在实际设计时需要考虑众多的约束,如考虑信号频率的混叠效应、检验质量的执行刚度为常数、以及硬件电路实际设计时不同器件的性能,综合上述约束,如何通过优化的方法获得交流执行机的最优参数是一个有待解决的问题。

3)交流反馈多自由度解耦控制技术。控制检验质量的平动和转动时,极板上的交流电压在检验质量上产生的静电力包含耦合项,即控制不同自由度的电压信号会对同一个自由度上静电力同时产生作用。在精度要求较低的情况下,这些耦合项可以忽略,但是在高精度的设计需求下,直接忽略这些耦合项会造成控制精度的下降,特别在面向深空引力波探测过程中,对敏感轴的耦合加速度扰动要求小于 $1 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$,如何降低不同自由度之间的耦合干扰是一个值得深入探讨的问题。

4)惯性传感器低噪声技术。惯性传感器运行时会受到内部噪声及外部噪声的影响,内部噪声主要是设计时由于电路器件性能导致的,外部噪声主要包括热噪声、环境噪声、辐射噪声、布朗噪声等。这些噪声影响着惯性传感器的精度。为降低噪声对惯性传感器的影响,对于内部噪声,通过一些工程技术手段如自稳零斩波技术可以降低器件带来的噪声。对于外部噪声,对惯性传感器的影响主要体现在获得实验测量数据时会包含大量的噪声,因此需要对噪声来源进行分析,并建立相关数学模型,针对噪声模型,如何通过滤波技术将有用信号从大量的噪声中提取出来也是未来研究的方向。

参考文献(References)

- [1] 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).
- [2] GIULICCHI L, WU S F, FENAL T. Attitude and orbit control systems for the LISA pathfinder mission [J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 24: 283-294.
- [3] LIU Z Y. Tianqin project captures cosmic ripples in space [J]. Science and Technology Herald, 2016, 34(3): 53-54.
- [4] 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).
- [5] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector [J]. Classical & Quantum Gravity, 2015, 33(3): 035010.
- [6] 李洪银,刘雁冲,王铨锐,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(Z1):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(Z1): 186-193 (in Chinese).
- [7] 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].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2020:25-26.
WANG S X. Research on the construction of the sensitive structure and ground evaluation method of space inertial sensor [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2020: 25-26 (in Chinese).
- [8] 祝翔宇.高分辨率充放电式差分电容传感器研究[D].武汉:华中科技大学,2016:2-3.
ZHU X Y. High resolution charging/discharging differential capacitance sensor research [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016: 2-3 (in Chinese).
- [9] 孙云娟.平行板电容器极板间电场及电容的计算探讨[J].山西电子技术,2020(5):69-70.
SUN Y J. Calculation of electric field and capacitance between plates of parallel plate capacitor [J]. Shanxi Electronic Technology, 2020(5): 69-70 (in Chinese).
- [10] TOUBOUL P, METRIS G, RODRIGUES M, et al. Microscope mission: first results of a space test of the equivalence principle [J]. Physical Review Letters, 2017, 119(23): 231101.
- [11] 万镇.六轴静电悬浮微加速度计的设计及系统级仿真[D].上海:上海交通大学,2012:49-51.
WAN Z. Design and system-level simulation of a micromachined electrostatically suspension accelerometer [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 49-

- 51(in Chinese).
- [12] 徐双雷.空间惯性传感器中检验质量的交流电压控制仿真研究[D].武汉:华中科技大学,2018:11-12.
XU S L.Simulation research on AC voltage control of test mass in space inertial sensors [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018: 11-12(in Chinese).
- [13] MANCE D.Development of electronic system for sensing and actuation of test mass of the inertial sensor LISA [D].Croatia University of Split,2012.
- [14] 白彦峥,周泽兵.高精度静电悬浮加速度计的地面测试方法研究[C]//微机电惯性技术的发展现状与趋势—惯性技术发展动态发展方向研讨会文集.北京市:中国惯性技术学会,2011:155-159.
BAI Y Z,ZHOU Z B.Research on testing methods of high-precision electrostatic accelerometers [C] // The Present Situation and Trend of MEMS - Seminar on the Dynamic Development Direction of MEMS.Beijing:Chinese Society of Inertial Technology,2011:155-159(in Chinese).
- [15] BERNARD A,TOUBOUL P.Development of the high sensitivity GRADIO accelerometers—the aristoteles gradiometer mission preparation [J].NASA STI/Recon Technical Report A,1991,1991(92):163-176.
- [16] STANGA R,MARCONI L,GRIMANI C, et al.Ground based 2 DoF test for LISA and LISA pathfinder;a status report [C] // AIP Conference Proceedings. Toledo: American Institute of Physics,2006:210-214.
- [17] TOUBOUL P, FOULON B. ASTRE accelerometer. verification tests in drop tower Bremen [J]. Office National D Etudes Et De Recherches Aerospatiales Onera-publications-tp,1996.
- [18] LI G,WU S C,ZHOU Z B, et al.Design and validation of a high-voltage levitation circuit for electrostatic accelerometers[J]. Review of Scientific Instruments, 2013,84(12):310-314.
- [19] TOUBOUL P, FOULON B, CLERC L, et al. The accelerometer of geodesic mission CHAMP[C]// 49th International Astronautical Congress, Melbourne: International Astronautical Federation,1998:307.
- [20] RODRIGUES M, FOULON B, LIORZOU F, et al.Flight experience on CHAMP and GRACE with ultra-sensitive accelerometers and return for LISA [J]. Classical and Quantum Gravity,2003,20(10):S291.
- [21] WILLEMENT E, TOUBOUL P.On-ground investigation of space accelerometers noise with an electrostatic torsion pendulum [J].Review of Scientific Instruments, 2000,71(1):302.
- [22] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, et al.Analysis of the accuracy of actuation electronics in the laser interferometer space antenna pathfinder[J]. Review of Scientific Instruments,2020,91(4):045003.
- [23] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, et al.Beyond the required LISA free-fall performance: new LISA pathfinder results down to 20 μ hz[J].Physical Review Letters,2018,120(6):061101.
- [24] SCHULTE M O,SHAUL D,HOLLINGTON D et al. Inertial sensor surface properties for LISA pathfinder and their effect on test mass discharging [J].Classical & Quantum Gravity,2009,26(9):094008.
- [25] BRANDT N, FICHTER W.Revised electrostatic model of the LISA pathfinder inertial sensor[J]. Journal of Physics:Conference Series,2009,154:012008.
- [26] LUO J, BAI Y Z, CAI L, et al.The first round result from the TianQin-1 satellite[J].Classical and Quantum Gravity,2020,R2(107049):1-17.
- [27] 李洪银,屈少波,白彦峥,等.静电悬浮加速度计在轨质心位置的最小二乘估计[J].地球物理学报,2017,60(3): 897-902.
LI H Y, QU S B, BAI Y Z, et al.Least squares estimation of in-orbit mass center position of the electrostatic accelerometer [J].Chinese Journal of Geophysics,2017, 60(3):897-902(in Chinese).
- [28] 周泽兵,白彦峥,屈少波,等.静电悬浮加速度计研制及空间飞行试验进展[C]//地球重力场及其地学应用论文集.北京:中国地球物理学会,2014:357.
ZHOU Z B, BAI Y Z, QU S B, et al. Development of electrostatic suspension accelerometer and progress of space flight test[C]//Proceedings of the Earth's Gravity Field and Its Geological Applications. Beijing: Chinese Geophysical Society,2014:357.
- [29] 鱼航,李云鹏,王鹤,等.基于斩波技术的静电悬浮加速度计驱动电路噪声抑制方法研究[J].空间电子技术,2020, 17(3):65-72.
YU H, LI Y P, WANG Y, et al. Research on noise suppression method of electrostatic suspension accelerometer driving circuit based on chopper stabilization [J].Space Electronic Technology, 2020, 17 (3):65-72(in Chinese).
- [30] 陈光锋,霍红庆,王佐磊,等.静电悬浮加速度计地面高压悬浮原理与应用[J].中国空间科学技术,2015,35(5): 56-63.
CHEN G F, HUO H Q, WANG Z L, et al.Principle and application of ground high voltage suspension of electrostatic suspension accelerometer [J]. Chinese Space Science and Technology,2015,35(5):56-63(in Chinese).
- [31] 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).
- [32] 贺晓霞,李娇娇,李海霞,等.一种地面用静电悬浮加速度计的误差分析及仿真[J].中国惯性技术学报,2020,28(6):794-801
- HE X X, LI J J, LI H X, et al. Error analysis and simulation of a ground electrostatic suspended accelerometer [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(6): 794-801(in Chinese).
- [33] 孙笑云,吴树范,沈强.包含有界切换增益的空间惯性传感器输出调节积分模型参考自适应控制[C]//2022国际制导、导航与控制学术会议.哈尔滨:中国航空学会,2022.
- SUN X Y, WU S F, SHEN Q. Integrated model reference adaptive control for space inertial sensor output regulation with bounded switching gain [C] // 2022 International Conference on Guidance, Navigation and Control. Harbin: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2022(in Chinese).
- [34] 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):059201.

作者简介:

吴树范(1964—),男,讲席教授,博士生导师,国际宇航科学院通信院士,上海市引力波探测前沿科学研究基地主任,主要研究方向为卫星总体设计、引力波探测、无拖曳控制、航天器导航制导与控制,shufan.wu@sjtu.edu.cn。

刘梅林(1981—),男,博士,副研究员,上海市引力波探测前沿科学研究基地办公室主任,主要从事电磁场理论在航天器领域的应用研究,包括引力波探测等,Meilin.Liu@sjtu.edu.cn。

(编辑:邓薇)