

纯引力轨道检验质量的相对测量技术

侯振东¹ 王兆魁² 张育林^{1,2,†}

¹ 哈尔滨工业大学卫星技术研究所, 哈尔滨 150080

² 清华大学航天航空学院, 北京 100084

摘 要 纯引力轨道是物体在太空仅受引力作用的运行轨道, 通过构造纯引力轨道, 可实现超高精度的空间引力探测, 也可为科学实验提供超稳定卫星平台. 作为纯引力轨道构造的核心, 检验质量的相对测量不仅提供了部分任务科学数据, 还为航天器平台的跟踪控制提供输入. 首先, 描述了纯引力轨道的概念内涵, 总结了它在卫星重力测量、引力波探测等方面的应用情况. 其次, 综述了不同任务对相对测量的需求, 给出了电容式测量、磁感应测量和光学测量的原理, 总结了各自的优缺点. 根据检验质量的姿态运动, 将检验质量质心相对状态解算问题分为 3 类, 给出了基于检验质量姿态动力学与表面建模的典型解算模型和质心速度估计方法. 最后分析了非引力干扰的理论计算、地面实验验证和在轨实验验证问题.

关键词 空间引力探测, 纯引力轨道, 相对测量, 相对状态解算, 非引力干扰

中图分类号: V11 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0992-15-012

收稿日期: 2015-03-05; 录用日期: 2015-06-11; 在线出版日期: 2015-06-25

[†] E-mail: y.l.zhang@tsinghua.edu.cn

引用方式: 侯振东, 王兆魁, 张育林. 纯引力轨道检验质量的相对测量技术.

力学进展, 2015, 45: 201509

Hou Z D, Wang Z K, Zhang Y L. Relative measurement for the proof mass flying along a purely gravitational orbit. *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 201509

© 2015《力学进展》版权所有

1 引言

空间环境干扰小、信号丰富, 是进行超高精度的微弱引力探测的最佳场合. 近年来, 空间引力探测研究发展迅速, 在卫星重力测量、引力波探测、等效原理检验等方面开展了一系列工作 (Siemes et al. 2012, LISA study team 1998, Touboul 2009), 有力推动了地球物理学的发展, 对验证现代物理学的相关理论起到了重要作用, 极大地带动了精密测量、惯性传感等技术研究的进步, 成为国际航天技术发展的前沿领域之一.

空间环境存在的太阳光压、气动阻力等非引力作用, 对高精度的空间引力探测造成了严重影响, 甚至会淹没某些信号微弱的引力作用. 通过构造纯引力轨道, 获取纯引力作用下的运动信息是克服这一难题的重要手段. 纯引力轨道是指物体在太空仅受引力作用的运行轨道. 目前, 内编队重力场测量系统 (Wang & Zhang 2013)、空间引力波探测计划 LISA (Schumaker 2003)、空间等效原理检验计划 STEP (Sumner 2009) 等都通过检验质量在各个方向或一个方向的纯引力轨道飞行, 来进行相应的高精度空间引力探测.

纯引力轨道一般由检验质量和容纳检验质量的腔体结构组成的系统来实现, 腔体结构屏蔽了空间环境中的非引力干扰, 内部的检验质量仅在引力作用下自由飞行 (谷振丰等 2013). 检验质量相对于腔体结构的位移、速度等状态信息是纯引力轨道任务的核心数据, 有两方面作用, 一方面作为任务科学数据不可或缺的一部分, 另一方面为航天器平台的跟踪、保持和控制提供输入. 为获得检验质量的相对状态信息, 需要解决超高精度相对测量方法设计、检验质量质心位置和速度解算、检验质量受到的非引力干扰抑制等难题. 一般要求相对测量方法能实现检验质量表面与腔体的微米到皮米的精度测量, 检验质量质心位置和速度解算就是根据表面测量数据, 精确解算出质心位置和速度. 除相对测量引起的干扰之外, 检验质量还会受到其他电、热、磁等非引力干扰, 为保证获取的检验质量相对状态能够精确反映纯引力作用, 需要将非引力干扰抑制到满足任务要求的水平.

2 纯引力轨道概念及其应用概况

2.1 纯引力轨道概念

纯引力轨道的构造原理如 **图 1** 所示. 腔体结构屏蔽了太阳光压、气动阻力等主要非引力干扰, 通过航天器平台和腔体结构的合理设计和相应的干扰抑制措施, 使得作用在检验质量上的电、磁、热等非引力干扰降至任务允许范围内, 一般要求在 $10^{-10} \sim 10^{-15} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 量级上 (施梨等 2010, Lammerzahl et al. 2001), 这样可认为检验质量沿纯引力轨道自由飞行. 检验质量与腔体碰撞会导致纯引力运动状态突变和检验质

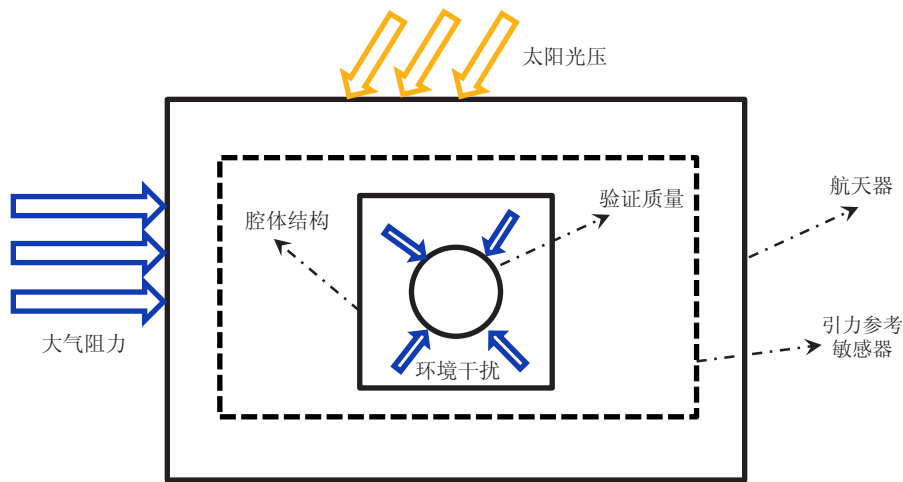


图 1

纯引力轨道构造示意图

量表面破坏,前者会打断空间引力探测任务的连续性,后者会引起非引力干扰增加和质心状态解算误差增大.检验质量在腔体中的大范围移动还会增加与相对位移(或耦合刚度)有关的非引力干扰.因此,一般需要借助推力器等轨道控制机构,使航天器平台精确跟踪检验质量,保持检验质量在腔体中心的位置.

2.2 纯引力轨道任务

2.2.1 卫星重力场测量

重力场是近地环境中的基本物理场,在地球科学研究、矿产资源勘探、地质灾害预报和高精度武器装备建设等方面具有重要应用,历来是大地测量学研究的核心问题.卫星重力测量主要利用卫星在地球重力场作用下的动力学信息,反演得到地球重力场模型.由于卫星在轨运行时,会受到大气阻力、太阳光压等非地球引力作用,卫星重力测量需要剔除这些干扰的影响.

国外主要依靠法国航空航天研究中心(ONERA)的高精度加速度测量技术,研发满足任务需求的空问加速度计,以便在数据处理中剔除非引力干扰.2000年发射的CHAMP卫星携带的STAR加速度计的量程为 0.1 mm/s^2 ,在 $10^{-4}\sim 10^{-1}\text{ Hz}$ 频段内最佳分辨率为 3 nm/s^2 (Bruinsma et al. 2003),如图2(a)所示.2002年发射的GRACE卫星携带的加速度计在高精度模式下量程缩减为 0.05 mm/s^2 ,分辨率提高到 0.1 nm/s^2 (Lammerzahl et al. 2001),如图2(b)所示.CHAMP和GRACE主要利用加速度测量

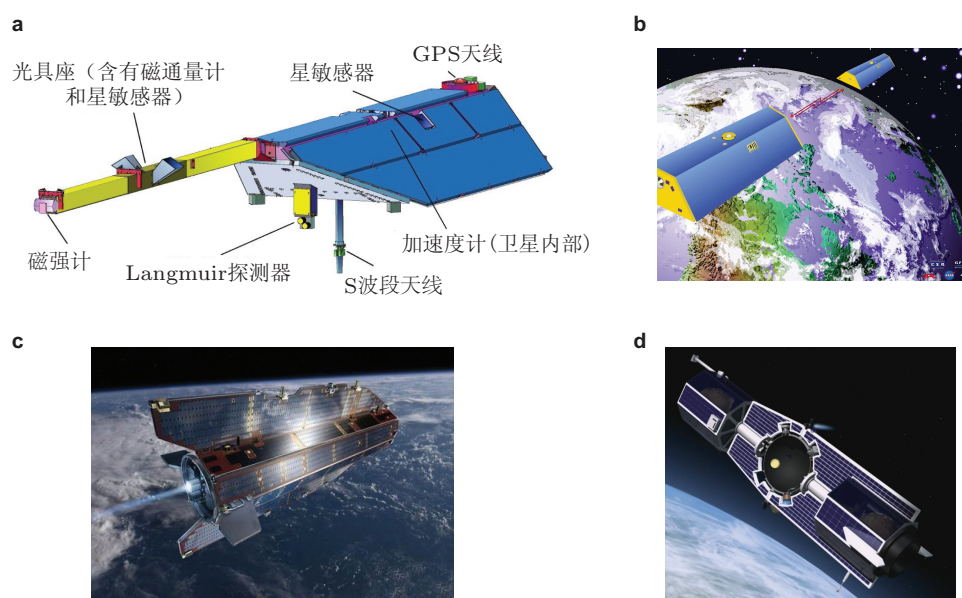


图 2

(a) CHAMP 卫星示意图, (b) GRACE 卫星示意图, (c) GOCE 卫星示意图, (d) 内编队重力场测量系统卫星

信息、卫星定轨数据、星间距测量数据等反演地球重力场. 2009 年发射的 GOCE 卫星携带的梯度仪由 6 个加速度计组成, 在 $5 \times 10^{-3} \sim 0.1 \text{ Hz}$ 频段内, 单个加速度计的实际在轨水平为 $3 \sim 6 \text{ pm}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{-1/2})$ (Rispen & Bouman 2009, Christophe 2010), 通过输出的差模加速度可获得中高阶重力场反演所需的重力梯度, 其共模加速度输出作为推力器控制的输入, 可以减轻非引力作用对卫星平台的扰动, 保障了重力梯度的精确测量 (Canuto et al. 2009), 如 图 2(c) 所示. CHAMP, GRACE 和 GOCE 自身并不沿纯引力轨道 (这里特指地球引力场) 运行, 前两者通过精确测量非引力干扰大小反演重力场, 后者只利用重力梯度信号和轨道信息反演重力场, 其非引力测量信息用于 “drag-free” 控制. 为进一步提高重力卫星科学数据的时、空分辨率, 扩展应用领域, 各国都在考虑发射新的重力卫星, 即后 GRACE 计划 (GRACE-follow-on), 其中一种方案是沿用 GRACE 的双星跟飞构型, 但采用激光测距技术代替原来的微波测距技术 (罗子人等 2014).

国内华中科技大学、中国空间技术研究院兰州物理研究所等也在加速度计研究方面开展了大量工作 (白彦峥等 2010, 薛大同 2009). 清华大学和国防科技大学提出的内编队重力场测量系统 (Wang & Zhang 2013, Liu et al. 2013), 通过构造检验质量的纯引力轨道完成高精度重力场测量, 为重力卫星工程实施提供了一种新途径, 如 图 2(d) 所示. 该系统中央有一个球形卫星腔体, 内部检验质量为球形, 通过卫星腔体的屏蔽和腔

体内非引力干扰抑制措施,使内部检验质量受到的非引力干扰低于 $0.1 \text{ nm}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{-1/2})$. 利用检验质量的相对位置测量和卫星定轨技术,获取检验质量的纯引力轨道信息,可直接应用于重力场测量,无需在数据处理中进行非引力干扰剔除. 相对于 CHAMP,内编队重力场测量系统虽然无需高精度加速度计,但需要检验质量相对测量技术与内编队控制技术 (“drag-free” 控制) 支撑.

2.2.2 空间引力波探测

引力波的存在是爱因斯坦在广义相对论中提出的一个重大预言. 在广义相对论中,引力源运动会导致时空结构发生改变,进而产生相应的几何曲率振荡现象,该振荡的传播就是引力波 (LISA study team 1998, 罗子人等 2013). 引力波会使相距较远的两个点之间的距离发生细微变化,空间引力波探测正是基于这一理论开展的. 随着人们对引力波理论的深入研究,引力波探测的意义不再局限在广义相对论,已发展成一种认识天体物理现象的新途径.

对于引力波探测,首先研究并付诸实施的是地面探测系统,如美国的 LIGO (Carbone et al. 2012)、意大利和法国合作的 VIRGO (Accadia et al. 2011) 等. 然而,由于地表震动和重力梯度的影响以及臂长的约束,地面系统无法适用于低频段 (几赫兹以下) 的引力波探测,这一频段存在着丰富的引力波源,因而构建空间引力波探测系统,可实现与地面系统的优势互补,具有重要意义 (Rubbo 2004).

在空间引力波探测方面,最具代表性的是 LISA 项目. LISA 计划发射 3 颗卫星,形成臂长为 $5 \times 10^6 \text{ km}$ 的等边三角形构型,中心与地球位于同一日心轨道上,有 20° 的相位角差,如图 3(a) 所示 (Crowder 2006). 每颗卫星安装两个引力参考敏感器 (gravitational reference sensors),检验质量为立方体,仅在卫星连线方向实现纯引力飞行,其他自由度受静电悬浮力控制. 3 颗卫星构成一个迈克尔逊干涉仪,通过测量两检验质量在卫星连线方向的距离变化来探测引力波,目标频段为 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ Hz}$,要求相对距离测量精度达到 $1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级,纯引力方向上非引力干扰低于 $3 \text{ fm}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{-1/2})$ (Schumaker 2003). 鉴于 LISA 技术要求高、实现难度大,欧空局提出了 eLISA 计划,它是 LISA 的简化版,星间距缩减为 $1 \times 10^6 \text{ km}$,其中一颗卫星配备两个引力参考敏感器,其他两颗卫星仅配备 1 个,降低了激光测距和平台控制要求,如图 3(b) 所示 (Seoane et al. 2012). LPF (LISA Pathfinder) 任务是 LISA 的前期验证项目,计划对引力波探测所用到的激光干涉测量技术、引力参考敏感器技术进行在轨验证 (Antonucci et al. 2012).

其他类似的空间引力波探测计划还有 ALISA (Bender et al. 2013)、BBO (Corbin et al. 2006)、DECIGO (Kawamura et al. 2011)、ASTROD (Selig et al. 2012) 等. 自 2008 年起,由中国科学院力学研究所牵头,科学院多个研究所及院外科研单位共同成立的科学院空间引力波探测工作组,开始研究我国自主的空间引力波探测方案 (罗子人等

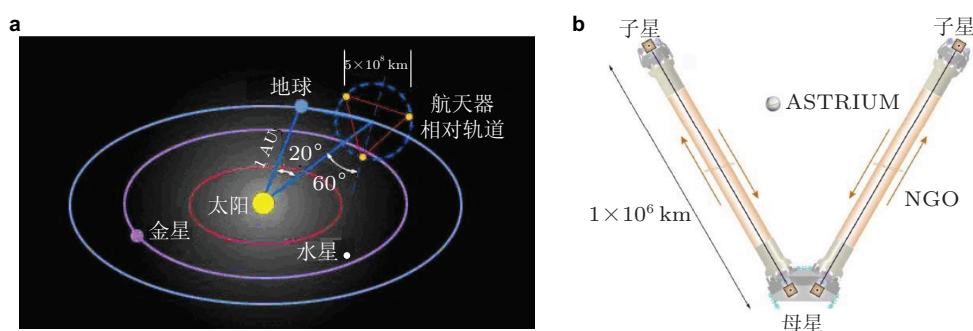


图 3

(a) LISA 示意图, (b) eLISA 示意图

2013). 2011 年底, 中国科学院战略性先导科技专项启动了空间科学预先研究项目“天体号脉”计划, 中国科学院数学与系统科学研究院牵头, 力学研究所与中科大天体物理中心、兰州大学共同参与, 开展了“中国空间引力波探测计划任务概念研究”的课题研究. 初步方案仍沿用 LISA 的三角形星座构型与激光干涉测距技术, 除 LISA 波段的波源外, 拟探测的引力波源还覆盖了电磁波观测尚未确认其存在的中等质量黑洞波源 (龚雪飞等 2015). 通过探测中质量黑洞俘获小黑洞所释放的引力波, 可为理解球状星团、年轻星团及矮星系等结构, 以及星团与星系间的关系, 提供一条创新途径 (Gong et al. 2011).

2.2.3 空间等效原理检验

等效原理是广义相对论的基本假设之一, 目前普遍应用的检验手段是通过测量不同材料的物体在引力场中的加速度差, 检验引力质量与惯性质量之比是否恒定 (高芬 2011). 等效原理检验结果将有力推动广义相对论、超对称理论、弦理论等现代物理学理论的发展.

空间等效原理检验具有信号强、扰动小等优势, 一般采用包含两个质心重合的检验质量的引力参考敏感器方案. 任务初始时刻, 两检验质量的轨道位置和速度完全相同, 在纯引力作用下自由飞行, 倘若等效原理成立, 则二者相对加速度为零, 保持相对静止状态, 否则二者在相对加速度的影响下产生相对运动, 通过对该相对运动的精确测量即可检验等效原理 (高芬 2011).

STEP 于 1989 年提出 (Sumner 2009), 由美国宇航局和欧空局联合研究, 是最早提出的空间等效原理检验计划. 经过 7 年的概念研究, 在 1996 年确定了采用由 4 对共轴圆柱体检验质量构成 4 个独立的差分加速度计的方案. 通过航天器平台的轨道控制作用, 残余非引力干扰可降至 $0.1 \text{ pm}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{-1/2})$, 检验质量轴线方向为科学探测的敏感方向,

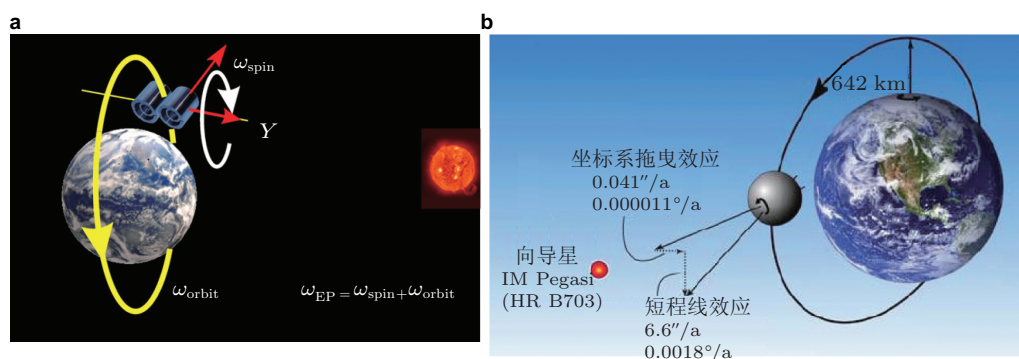


图 4

(a) MICROSCOPE 示意图, (b) GP-B 示意图

由超导量子干涉仪 (superconducting quantum interference device) 测量, 其他方向通过静电悬浮力进行保持控制, 计划实现的等效原理检验精度为 10^{-18} (Sumner et al. 2007). 法国航空航天研究中心于 1999 年也提出了一个等效原理检验计划 MICROSCOPE, 它是一颗小卫星计划, 其核心科学仪器的质量预算仅为 35 kg、功耗 40 W, 检验精度降低为 10^{-15} (Touboul 2009), 同时也降低了工程实现的技术难度, 可能是最早发射入轨的空间等效原理检验计划, 如图 4(a) 所示. MICROSCOPE 采用两对圆筒形检验质量的方案, 相对运动由静电悬浮加速度计测量, 其静电悬浮控制力可保证检验质量与航天器的相对位移小于 10 pm.

国内华中科技大学于 2007 年提出了基于光学测量的空间等效原理检验计划 TEPO (testing the equivalence principle with optical readout in space), 并利用紫外放电技术对检验质量放电, 经过系统分析, 认为对等效原理的检验精度有望达到 8×10^{-17} (高芬 2011, Gao et al. 2011).

2.2.4 短程线效应和坐标系拖曳效应验证

短程线效应和坐标系拖曳效应是广义相对论的推论, 分别描述引力源引起的空间弯曲和引力源运动引起的空间扭曲, 这两种效应会导致高速自旋物体的旋转轴发生进动. 美国宇航局于 2004 年发射的 GP-B 卫星, 运行在 642 km 的近地轨道上, 在卫星内部的杜瓦瓶超低温环境中放置 4 个高速旋转陀螺, 通过超导量子干涉仪测量陀螺自旋轴的进动情况, 来验证短程线效应和坐标系拖曳效应 (Conklin 2008), 如图 4(b) 所示. 由于这两种效应引起的进动极其微弱, 需要使陀螺沿纯引力轨道飞行, 降低非引力干扰的影响. GP-B 的一个陀螺作为纯引力轨道参考, 其非引力干扰在 $10 \text{ pm}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{-1/2})$ 量级上, 卫星平台根据传感器的相对位置输出, 利用推力器控制, 精确跟踪传感器内的

陀螺转子. 其他 3 个陀螺在量级很小的静电悬浮力控制下, 保持在各自腔体中的位置 (Eglington 2000).

3 检验质量的相对测量技术研究

3.1 相对测量的任务需求

不同的空间引力探测任务, 对检验质量的相对测量要求有所差异. 针对相同的探测任务, 采用不同的纯引力轨道构造方案, 需要获取的相对状态也不尽相同. 在每一种纯引力轨道构造方案中, 由于科学任务的数据精度和频段要求有别于跟踪控制, 也可能采用多种信息获取途径.

针对 LISA 任务, Gerardi et al. (2014) 提出了 4 种引力参考敏感器设计方案, 如图 5 所示. 除 LISA 的原始设计 (方案 1) 外, 其他方案给出的新的无阻力飞行模式, 可为未来天基干涉仪提供参考.

方案 1 为 LISA 的原始设计 (LISA study team 1998), 同时也被 LPF 采纳, 由意大利的特伦托大学 (University of Trento) 联合多家研究机构研制, 其检验质量为边长

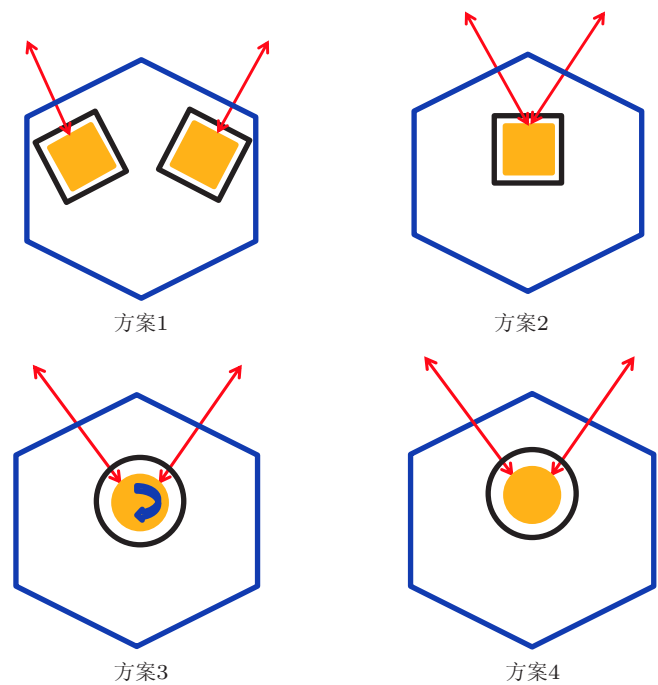


图 5

LISA 的 4 种纯引力轨道构造方案

46 mm 的金铂单相合金立方体, 重 1.96 kg (Sun et al. 2007), 如 图 6(a) 所示. 金铂合金具有很高的密度, 通过 73% 的金和 27% 的铂配比, 可使磁化率低至 10^{-5} , 主要为降低星际磁场或卫星自身磁场梯度引起的非引力干扰. 每个卫星包含两个引力参考敏感器, 和可活动的望远镜组件. 检验质量相对于腔体结构的位置和姿态测量联合了电容式测量和光学测量两种方式, 测量结果可用于卫星平台的无阻力控制, 其中光学测量采用激光干涉原理, 仅测量检验质量沿视线方向, 可得到一个位移和两个夹角的测量数据 (x, η, φ) . 通过调整望远镜组件的夹角, 可克服构型夹角的周年运动, 实现远处激光的对准. 在探测引力波时, 任何两卫星的视线方向均无静电控制力, 检验质量其他自由度不处于完全的纯引力环境, 需要微弱的静电控制力维持, 以保证检验质量位于腔体中央, 并与壁面平行. 星间的差分波前测量 (DWS) 为卫星姿态控制提供输入信号.

方案 2 与方案 1 类似, 也采用了立方体检验质量. 但每个航天器仅配置一个引力参考敏感器, 且望远镜组件是非活动机构, 采用了视场指向 (in-field-of-view pointing) 的方式, 即望远镜组件内的镜面是可活动的. 在引力波探测阶段, 检验质量的相对状态均采用光学测量方式获得. 由于仅有一个检验质量, 卫星可精确跟踪检验质量位置, 检验质量无需静电控制力保持其相对位置, 仅需维持相对姿态, 降低了控制力在视线方向的耦合作用.

方案 3 是斯坦福大学针对 LISA 和可能比 LISA 要求更为苛刻的后续空间引力波探测任务, 提出的模块化引力参考敏感器 (modular gravitational reference sensor) (Sun et al. 2005, Sun et al. 2009), 采用球形检验质量, 完全无需静电悬浮力控制, 实现了全自由度的纯引力飞行, 可进一步提高非引力干扰抑制水平, 如 图 6(b) 所示. 与方案 2 相同, 也采用视场指向方式, 利用可调整的镜面将远处激光照射在引力参考敏感器腔体上. 球形检验质量也采用金铂合金, 配比与立方体检验质量相同, 直径为 20~100 mm (Sun et al. 2006). 为进行不同方案的对比分析, Gerardi et al. (2014) 将直径取为 57 mm,

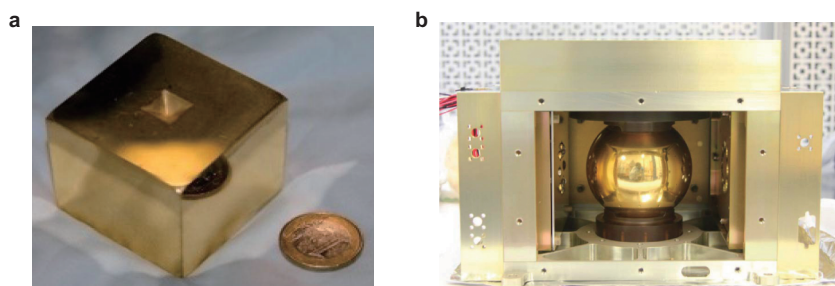


图 6

(a) 立方体检验质量, (b) 球形检验质量

使质量也为 1.96 kg. 该方案不需要相对姿态测量, 其相对位置由两种光学测量系统获得, 一种是精度为纳米量级的光学影像 (optical shadow) 测量系统, 作为航天器平台跟踪控制的输入数据, 另一种是精度为皮米量级的激光干涉测量系统, 测量结果与星间远距离激光干涉测量数据相结合, 作为引力波探测的科学数据. 由于目前加工水平仅能达到 30 nm 的表面不圆度和 300 nm 的形心质心偏离 (Allen 2009), 因此必须考虑剔除球形检验质量自由转动对高精度测量的干扰. 模块化引力参考敏感器采样旋转检验质量的方法, 将形状误差移出任务频段. 为更好地实现这一目的, 需在检验质量内部挖出两个对称的空腔. 这样的检验质量可通过加工两个带空腔的半球, 利用铜锌合金焊接, 并打磨抛光来实现 (Allen 2009).

方案 4 与方案 3 基本相同, 区别在于检验质量不高速旋转, 仅在初始释放扰动和非引力干扰作用下自由转动. 由于检验质量非球形加工误差及质心偏差的影响, 相对测量精度有所降低, 但仍可满足航天器的跟踪控制需求. 星上测量数据会通过地面处理, 得到高精度的检验质量质心位置, 作为引力波探测的科学数据 (Gerardi et al. 2014).

表 1 LISA 引力参考敏感器设计方案 1~4 的对比

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
每个卫星的 检验质量个数	2	1	1	1
检验质量形状	立方体	立方体	球形	球形
检验质量相对 测量系统	电容式 + 光学测量	光学测量	光学测量	光学测量
检验质量悬浮 控制系统	静电控制 (除两 个视线方向和一个 检验质量的 z 轴)	静电控制 (仅控制姿态)	无	无
望远镜 指向控制	可调整的 望远镜组件	望远镜组件内 可调整的镜面	望远镜组件内 可调整的镜面	望远镜组件内 可调整的镜面

表 1 总结了方案 1~4 的主要设计特点. 检验质量在引力波干涉测量方向的加速度噪声是衡量引力参考敏感器方案设计优劣的关键指标. 利用基本相同的设计参数和非引力干扰模型, Gerardi 等 (2014) 分析了各方案的加速度噪声, 主要可分为环境噪声、刚度 (stiffness) 相关噪声、相对测量噪声、悬浮控制噪声 4 类. 得益于较大的腔体间

隙, 方案 3 和 4 是更接近环境噪声极限的设计. 方案 3 和 4 无需静电悬浮控制, 方案 2 仅需静电悬浮力控制相对姿态, 其悬浮控制噪声明显低于方案 1. 相较于方案 1 和 2 的电容式测量噪声, 方案 3 和 4 的光学测量噪声可忽略不计. 方案 3 的总加速度噪声最小, 方案 4 次之, 方案 1 最大. 但是在任务设计时, 除加速度噪声外, 还需权衡多方面因素: 载荷设计、无阻力控制、实验操作、仪器校准复杂度, 以及各项技术成熟度等.

由上述分析可知, 球形检验质量具有简化纯引力轨道构造方案、可实现全自由度纯引力飞行等优势, 因而在空间引力探测中得到了广泛应用, 其他采用球形检验质量的还有 GP-B 和内编队重力场测量系统等 (Dang & Zhang 2011, Dang & Zhang 2012). 其中, GP-B 检验质量的材料选用了熔融石英, 球体的密度均匀度要远高于金铂合金, 因而质心与形心偏差约为 10 nm (Dolphin 2007). 这对 GP-B 任务有着重要意义, 因为它的科学目标是精确测量自旋轴的微弱进动量, 较小的质心偏差可减小非引力作用引起的力矩干扰. 另外, GP-B 检验质量 (陀螺转子) 的表面还镀有一层 1.25 μm 的铌膜, 以配合超导量子干涉仪, 进行自旋轴的方位测量.

3.2 相对测量方法

检验质量的相对测量有电容式测量、磁感应测量和光学测量 3 种, 光学测量又分为干涉测量和光能测量两类.

3.2.1 电容式测量

电容式测量是一种发展较为成熟的检验质量相对位置测量技术, TRIAD I, GP-B 和 LPF 的相对位置测量都采用这种方式. 电容式测量主要利用腔体与检验质量之间的电容变化来反映相对位置信息, 其原理如 图 7 所示. 腔体壁面安装驱动电极, 当施加驱动电压后, 检验质量与正对的两个驱动电极构成的两个电容 C_{x1} 和 C_{x2} 会随着检验质量的位移 x 变化, 而电容的变化又可通过测量检验质量的电势得到. 图 7 给出的是 LPF 的电势测量方法, 通过与两驱动电极正交的信号电极实现了无接触测量 (Cavalleri et al. 2001). MICROSCOPE 采用了另一种电势测量方法, 通过与检验质量接触的 5 μm 直径的金线进行测量 (Levy et al. 2010). 这条金线共有 3 种用途: (1) 控制检验质量的电荷量, 使检验质量电势与电子系统的参考电势相同, 避免高能粒子撞击等引起的电荷累积; (2) 给检验质量施加 100 kHz 的探测信号, 用于相对位置测量; (3) 给检验质量施加 5 V 的偏置电压, 用于静电悬浮控制 (Touboul 2009).

检验质量与腔体之间的间隙是影响纯引力飞行的重要因素. 腔体间隙越大, 非引力干扰越小. 当电容式测量技术用于加速度计模式时, 较大的腔体间隙意味着较高的分辨率, 因而用于地球重力场测量的卫星 CHAMP, GRACE 和 GOCE, 其载荷 STAR, SUPERSTAR 和 GRADIO 的检验质量间隙是不断增大的. 当电容式测量技术仅用

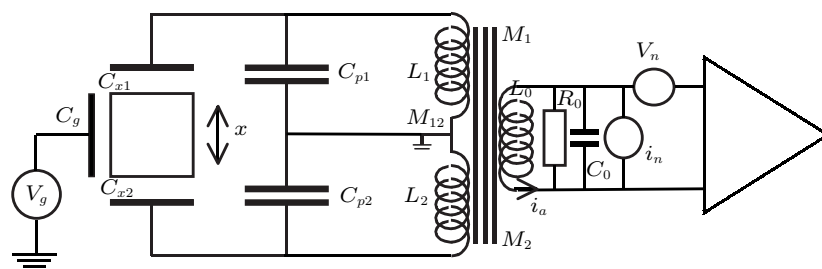


图 7

电容式测量原理示意图

于检验质量位置测量时, 较小的腔体间隙下, 检验质量的相同位移导致的电容变化增大 (Lauben et al. 2006). 驱动电压是影响基于电容式测量技术的纯引力飞行的另一重要因素, 较高的驱动电压会增强检验质量与航天器之间的耦合刚度, 使得检验质量偏离平衡位置时产生较大的非引力干扰. 另外, 由于检验质量的带电量波动等因素的影响, 电容式测量自身对检验质量的电磁非引力干扰会随着频段降低而增大, 而低频段正是很多空间引力探测任务所感兴趣的频段. 经过飞行模型的电子系统验证, MICROSCOPE 任务所采用的电容式测量技术大致可达到 $10^{-7} \text{ PF/Hz}^{1/2}$ 的分辨率, 对应的位置测量分辨率约为 $10^{-11} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (Touboul et al. 2012). 国内华中科技大学在电容式传感器方面开展了深入的研究, 2009 年实现的电容式传感器原型已可在 0.04 Hz 以上的频段达到 $2 \times 10^{-6} \text{ PF/Hz}^{1/2}$, 在 $150 \mu\text{m}$ 的腔体间隙下, 可获得 $10 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ 的位置测量性能 (Bai et al. 2009). 近期又通过监测电桥谐振频率的方法, 达到了 $1.4 \times 10^{-7} \text{ PF/Hz}^{1/2} @ 0.1 \text{ Hz}$ 的电容传感能力 (Hu et al. 2014).

3.2.2 磁感应测量

磁感应测量主要使用超导量子干涉仪, 通过精确测量微小磁通量变化, 得到相对位置信息 (丁衡高等 2013). 超导量子干涉仪最初应用于 GP-B 任务, 以实现检验质量的自旋轴方位测量. STEP 计划采用超导量子干涉仪, 对圆柱形检验质量的轴向位移进行测量, 可在 1 s 周期内达到 1 fm 的高灵敏度 (Sumner et al. 2007), 其原理如图 8 所示.

超导量子干涉仪虽可达到极高的测量精度, 产生的非引力干扰很小, 但要求安装在 1.8 K 的超低温环境中 (Overduin et al. 2012), 且检验质量表面必须镀有超导材料, 如铌膜等. GP-B 和 STEP 都采用充满超流液氦的杜瓦瓶来保证仪器的超低温环境, 这无疑会增大航天器设计难度, 并对质量和功耗提出了很高的要求, 很难在小卫星中实现.

shadow) 两种. 光学杠杆采用四象限光电探测器或位置敏感探测器作为接收终端, 测量光束在检验质量表面反射后, 入射到探测器上, 检验质量的位移会引起光斑在探测器上的位置变化, 探测器通过感知光斑位置实现精密测量 (Rana 2007), 其原理如图 9(a) 所示. Acernese 等 (2004) 搭建的地面实验系统表明, 光学杠杆法可实现纳米量级的位置测量.

光学影像的原理如图 9(b) 所示, 光源发出的测量光束, 在传播途中受检验质量遮挡, 仅有部分光线照射到光电探测器上, 检验质量的位置变化会导致接收到的光能量不同, 通过精确感知光能量大小, 便可实现相对位置测量. 由光源和光电探测器组成的系统可称为光学影像敏感器.

光学影像技术早在 TRIAD I 的后续卫星 NOVA 中就得到了应用, 用于进行检验质量的一维位置测量 (DeBra et al. 2011). 地面引力波探测系统 LIGO 也采用了光学影像技术, 以获取悬挂镜面 (其作用相当于检验质量) 的一维位移信息 (Lockerbie 2004). 斯坦福大学在其设计的模块化引力参考敏感器中, 采用光学影像测量获得检验质量的三维位置信息, 精度可达到纳米量级, 用于为航天器跟踪检验质量提供控制输入 (Zoellner et al. 2013). 与 NOVA 和 LIGO 不同的是, 模块化引力参考敏感器并不直接利用单个光学影像敏感器的数据, 而是利用两个敏感器的差分信号, 这样可以降低光源频率波动等固有噪声, 提高测量精度, 这一方法也称为差分光学影像测量 (differential optical shadow sensing) (Trittler 2008). Conklin 还将差分光学影像原理应用于检验质量质心偏差的地面标定实验中, 精度比之前的方法提高了 4 倍 (Conklin et al. 2011).

选用光强分布规律的稳定光源和响应性能好的光电探测器, 是提高光学影像测量精度的重要途径. 斯坦福大学在构建地面实验系统时, 首先采用非平面环形腔 (non planar ring oscillator) 激光器作为光源, 激光波长 1064 nm, 探测器选用铟镓砷 (InGaAs) 探测器 (Zoellner et al. 2013). 与硅探测器相比, 铟镓砷探测器具有较高的响应度, 同样

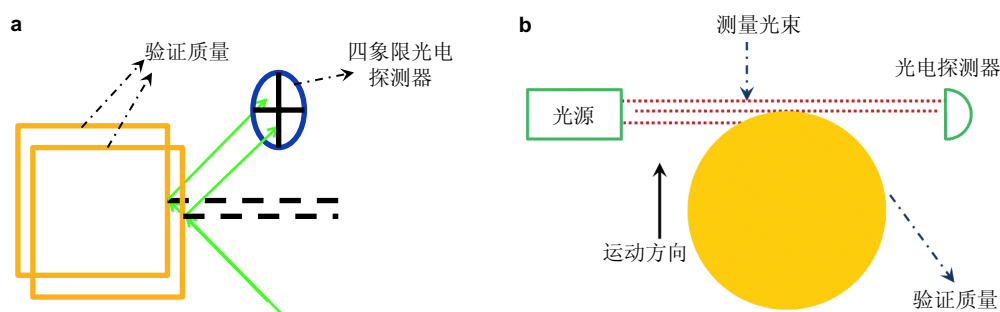


图 9

两种主要光能量测量方法示意图 (a) 光学杠杆测量, (b) 光学影像测量

能量的光产生的电流信号更强, 但仅适用于红外和近红外谱段, 因此需要配合红外激光光源. 在最新的实验系统中, 为降低光纤传输噪声, 斯坦福大学将光源改为超发光二极管, 峰值波长约 1 550 nm, 探测器选用四象限光电探测器, 需要配备 4 个独立的放大器. 此外, LIGO (Lockerbie 2004) 和正在计划的用于验证光学影像技术的 CubeSat 卫星 (Zoellner et al. 2012, Conklin et al. 2012) 均采用 LED 光源, 尽管其性能可能有所降低, 但最容易实现工程化, 对功耗要求也最少.

在已有的相对测量技术中, 光学测量具有精度高、干扰小、对腔体尺寸无约束的显著特点. DeBra et al. (2011) 指出, 引力参考敏感器的性能优化设计, 应首先考虑光学测量方式. 光学影像测量的纳米级精度不仅适用于某些引力探测任务的科学数据获取, 更可满足绝大多数任务对卫星跟踪检验质量的控制需求, 其毫米级量程可保障检验质量的初始状态捕获和仪器设备的在轨校准, 因而可作为引力参考敏感器相对位置获取的一种基本途径.

4 相对位置和相对速度解算方法

纯引力轨道任务需要获取的是检验质量质心与腔体结构的相对位置, 目前的相对测量方法只能得到检验质量表面相对于腔体结构的位置, 因而需要研究基于表面测量结果的检验质量质心位置解算方法.

根据检验质量的姿态运动情形, 可将基于表面测量的质心解算问题分为 3 类, 第 1 类针对的是姿态稳定控制的检验质量; 第 2 类的检验质量姿态无控, 处于缓慢变化的状态; 第 3 类通过起旋措施, 使检验质量处于高速自由旋转状态. 对于第 1 类问题, 由于姿态的稳定控制和相对位置的跟踪控制, 相对测量一般可获得检验质量表面固定点的相对位置, 因此可根据地面标定的表面固定点相对质心的位置信息, 直接得到质心相对腔体结构的位置, 如 图 5 所示的方案 1 和方案 2. 第 2 类问题中, 检验质量在微弱的初始状态扰动和干扰力作用下, 姿态缓慢变化, 相对测量得到的是表面不同测量点的相对位置, 需要考虑质心与形心偏差、表面波动等形状加工误差, 如 图 5 所示的方案 4. 对于第 3 类问题, 通过高速自旋可将检验质量的形状加工误差移出任务感兴趣的频段, 利用这一特点可研究提高质心确定精度的算法, 如 图 5 所示的方案 3.

无控状态下的检验质量姿态动力学和表面建模理论是解决后两类质心确定问题的基础, 目前的研究都针对的是球形检验质量. Dolphin (2007) 在 GP-B 的研究中, 建立了陀螺转子的自旋动力学模型, 给出了描述本体极迹运动的关键参数表达式, 利用球谐函数得到了陀螺转子的表面模型, 基于上述模型和电容式相对位置测量结果对本体极迹运动进行了精确估计, 可用于改进自旋轴方向的测量精度. Conklin 等 (2008) 建立了无力矩下的球形检验质量动力学模型, 分析了微小力矩对姿态运动的影响, 推导

了包含检验质量一阶球谐项的模块化引力参考敏感器相对测量输出模型, 基于该模型分析了结构变形等系统误差, 设计了确定检验质量质心位置的拟合算法。

在得到检验质量质心的相对位置后, 往往还需要根据质心位置结果估计相对速度, 如内编队重力场测量系统 (Wang & Zhang 2013)。在检验质量的非引力干扰实验验证中, 利用相对位置得到的相对加速度可作为评估非引力干扰大小的关键数据, 如 LPF 任务 (Antonucci et al. 2012)。Carbone 等 (2007) 采用二次多项式拟合方法, 由 5 个连续的位置测量数据估计了 LISA 的立方体检验质量的相对速度和相对加速度。Ferraioli 等 (2009) 采用了五点法 (five-point method), 与二次多项式拟合法和级数展开法相比, 是一种更为灵活的方法, 可通过选取不同参数, 提高特定频段的速度与加速度估计精度。

5 非引力干扰分析与实验验证

虽然屏蔽了大气阻力、太阳光压等主要非引力作用, 检验质量在腔体内自由飞行时, 还会受到残余非引力干扰的影响, 主要包括万有引力干扰、热噪声、电磁干扰、测量干扰等 (Schumaker 2003)。万有引力干扰是指航天器平台对检验质量的引力作用。Swank 对万有引力的建模问题进行了研究, 设计了五线扭摆实验系统, 通过测量卫星部件和检验质量的质心位置、转动惯量等质量特性, 来评估检验质量受到的万有引力干扰 (Swank 2009)。谷振丰等 (2013) 提出了基于补偿质量块和航天器自旋的万有引力抑制措施, 设计了基于内编队技术的在轨验证方案。热噪声由腔体内存在的残余气体、环境温度的不均匀等原因产生, 主要包括辐射计效应、残余气体阻尼和热辐射压差。针对引力波探测任务 LISA, Schumaker (2003) 给出了辐射计效应和热辐射压差的近似模型。Liu 等 (2011) 针对内编队腔体环境, 建立了基于自由分子流的辐射计效应模型, 研究了辐射计效应与残余气体阻尼的耦合作用, 并提出了相应的抑制措施。电磁干扰是星际磁场、卫星内部电子设备的微弱电磁场等电磁干扰源与检验质量的剩磁、累积电荷相互作用的结果。对于采用静电悬浮控制和电容式测量的引力探测任务, 电磁干扰可能成为最显著的非引力干扰。静电悬浮控制力会在纯引力飞行方向产生耦合干扰力, 电极电压波动、检验质量带电量波动是电容式测量引入电磁干扰的主要原因, Gerardi 等 (2014) 采用了 LISA 的相关设计参数, 对这些电磁干扰进行了分析和估算, 结果表明电容式测量引起的干扰随着频段降低呈线性增长趋势, 在 10^{-4}Hz 以下频段已经远高于总的非引力干扰指标。测量干扰是指相对测量作用在检验质量上的非引力干扰。光学测量主要引入了光压作用, 光压主要由光功率决定, 皮瓦至毫瓦量级的微弱光束已可实现纳米至皮米范围精度的测量, 而这个量级的光功率造成的光压干扰要远低于其他非引力干扰 (Allen 2009)。

对于非引力干扰的地面验证, 目前一般采用扭摆实验装置, 将引力参考敏感器悬挂在结构臂上, 通过测量非引力干扰产生的扭矩, 来评估非引力干扰大小, 如图 10 所示. LISA 和 LPF 的研究团队先后采用了包含 1 个检验质量和 4 个检验质量的扭摆系统, 对非引力干扰上界进行测量, 扭矩的理论分辨率可达 $1 \text{ fNm/Hz}^{1/2}$ (Carbone et al. 2007, Cavalleri et al. 2009). 实验采用的引力参考敏感器原理样机中安装有加热器, 用来改变检验质量周围的温度梯度, 利用温度计测量温度变化情况, 利用电离真空计测量气压. 通过测量不同环境条件下的非引力干扰大小, 可对热噪声的理论模型进行验证. 针对所提出的基于光学传感的空间等效原理检验 (TEPO) 方案, 华中科技大学采用两级可控扭摆装置, 进行了非引力干扰的实验测量, 在平动方向上噪声为 $12 \text{ pN/Hz}^{1/2}$, 在转动方向上噪声为 $0.14 \text{ pNm/Hz}^{1/2}$ (Tu et al. 2010).

受重力影响, 地面实验装置的悬挂结构会发生变形, 对干扰力测量方向产生耦合作用: 地面重力梯度和地表震动等因素也会给测量带来显著误差. 因而, 地面实验系统一般只用于非引力干扰的上界确定, 结果相对保守, 需要采用在轨实验进行更精确的非引力干扰验证. 作为 LISA 的前期技术验证任务, LPF 的一个重要目标就是对 LISA 的检验质量受到的非引力干扰进行验证 (Congedo et al. 2012), 卫星结构如图 11 所示. LPF 不仅要 totals 的非引力干扰进行精确评估, 还要对各类干扰进行精确分析. 卫星上的实验系统安装了磁强计、温度计、电离真空计等环境参数测量设备, 以及亥姆霍兹线圈、加热器等改变环境参数的设备. 实验系统中有两个相距约 30 cm 的检验质量, 二者的相对距离通过激光干涉测量. 按照设计的实验方案, 主动改变腔体内环境条件, 通过测量环境参数和相对距离变化情况, 可完成对各类干扰理论模型的实验验证 (Antonucci et al. 2011). LPF 团队开发了相应的软件工具箱, 采用频域空间内的传递函数和时域空间内的状态方程对其核心系统建模, 基于传递函数的建模方法已成功

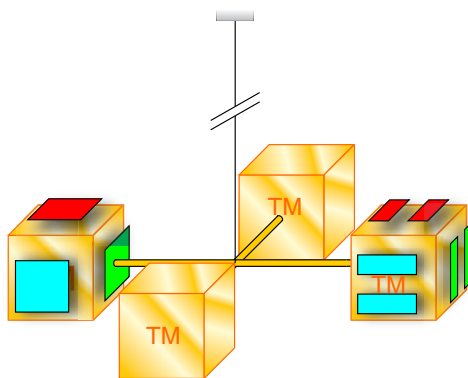


图 10

扭摆实验装置示意图

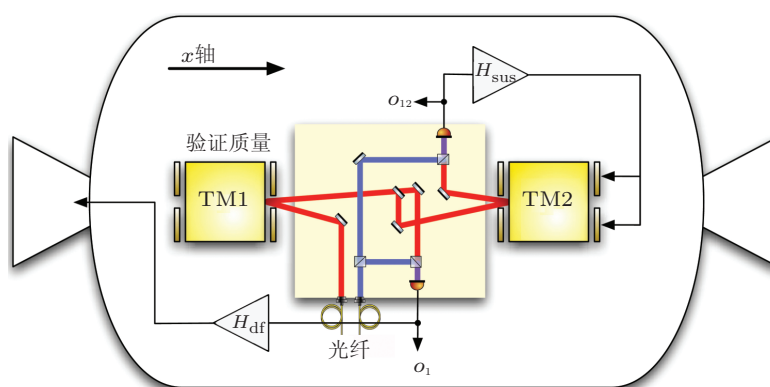


图 11

LPF 卫星实验系统示意图

应用于非引力干扰源建模和参数估计中 (Nofrarias et al. 2013).

6 结论

构造纯引力轨道不仅为超高精度的空间引力探测提供了解决途径, 所形成的超稳定卫星平台也可作为科学实验的理想环境, 具有广泛的应用前景. 检验质量的相对测量是纯引力轨道构造的核心技术之一, 主要有表面精密测量、质心状态解算、非引力干扰抑制这三项关键技术.

检验质量表面精密测量需要兼顾精度和量程. 空间微弱引力的精确测量有赖于超高精度的相对位置测量, 较大的量程可减轻航天器平台跟踪保持的压力, 也便于在轨校准、前期验证试验的实施. 然而, 量程和精度一般是难以同时达到最优的, 需要根据任务需求和工程实施条件权衡取舍. 一方面, 需要系统深入地分析不同测量方式的精度随量程变化关系, 据此优化测量敏感器的设计参数; 另一方面, 可设计多种测量方式相配合的测量系统, 如模块化引力参考敏感器采用的光学影像和光学干涉测量系统 (Zoellner et al. 2013). 此外, 由于大多数空间引力探测任务关注的只是长度有限的低频段, 检验质量表面精密测量可忽略高频噪声的影响, 重点解决低频噪声的干扰, 如空间温度波动、结构低频振动等.

检验质量的质心状态解算主要涉及检验质量自由飞行的姿态动力学、形状模型、参数估计和滤波等. 目前国内外在这方面的研究较少, 主要集中在斯坦福大学对 GP-B 和模块化引力参考敏感器的研究. 选择合适的姿态参数, 建立易于提取测量量的检验质量姿态动力学模型是质心状态解算的基础. 通过对模型特征的分析, 还可提出检验质量的优化设计方法, 以降低解算误差, 如模块化引力参考敏感器设计的检验质量空

腔 (Allen 2009). 球形检验质量表面建模一般都基于球谐函数, 但各阶球谐项系数因材料和加工方式而异, 需要通过测试检验质量样件来确立. 由于每种表面测量数据包含的检验质量形状参数不同, 各测量方式的质心解算模型也有所差异, 需要结合测量模型分别研究. 参数估计和滤波主要降低任务频段内的估计误差和滤波误差.

建立非引力干扰的精确模型、设计其测量验证实验是非引力干扰抑制的两个主要问题. 由于检验质量受到的非引力干扰很微弱, 其精确建模需要从干扰产生的微观物理本质出发, 并研究不同干扰的强耦合特性. 非引力干扰地面测量验证的主要问题是克服低频地动、温度波动等干扰. 由于地面环境比空间环境恶劣得多, 非引力干扰的精确测量验证还需寄希望于在轨实验. 因此, 设计能够满足测量精度要求、代价较低、便于工程实施的在轨实验方案是非引力干扰精确测量验证的一个重要研究问题.

致谢 高分辨率对地观测系统重大专项资助项目 (GFZX04011101).

参考文献

- 白彦峥, 田蔚, 周泽兵, 吴书朝, 徐海波. 2010. 高精度空间加速度计及其应用. 空间科学学报, **30**: 601-606 (Bai Y Z, Tian W, Zhou Z B, Wu S C, Xu H B. 2010. High-precision space-borne accelerometer and its applications. *Chin J Space Sci*, **30**: 601-606).
- 丁衡高, 贺晓霞, 高钟毓. 2013. 应用惯性技术验证广义相对论. 北京: 清华大学出版社 (Ding H G, He X X, Gao Z Y. 2013. The Application of Inertial Technology for Testing General Relativity. Beijing: Tsinghua University Press).
- 高芬. 2011. 基于光学传感的空间等效原理检验可行性分析. 武汉: 华中科技大学 (Gao F. 2011. Feasibility for testing of the equivalence principle with optical readout in space. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology).
- 龚雪飞, 徐生年, 袁业飞, 白嫻, 边星, 曹周键, 陈葛锐, 董鹏, 高天舒, 高伟, 黄双林, 李玉龙, 刘影, 罗子人, 邵明学, 孙宝三, 唐文林, 于品, 徐鹏, 臧云龙, 张海鹏, 刘润球. 2015. 空间激光干涉引力波探测与早期宇宙结构形成. 天文学进展, **33**: 59-82 (Gong X F, Xu S N, Yuan Y F, Bai S, Bian X, Cao Z J, Chen G R, Dong P, Gao T S, Gao W, Huang S L, Li Y L, Liu Y, Luo Z R, Shao M X, Sun B S, Tang W L, Yu P, Xu P, Zang Y L, Zhang H P, Liu R Q. 2015. Laser interferometric wave detection in space and structure formation in the early universe. *Progress in Astronomy*, **33**: 59-82).
- 谷振丰, 王兆魁, 张育林. 2013. 基于卫星自旋的纯引力轨道万有引力干扰抑制. 中国科学技术, **20**: 239-253 (Gu Z F, Wang Z K, Zhang Y L. 2013. Reduction of gravitational attraction disturbance to purely gravitational orbit based on satellite spinning. *Chinese Space Science and Technology*, **20**: 239-253).
- 罗子人, 白嫻, 边星, 陈葛瑞, 董鹏, 董玉辉, 高伟, 龚雪飞, 贺建武, 李洪银, 李向前, 李玉琼, 刘河山, 邵明学, 宋同消, 孙保三, 唐文林, 徐鹏, 徐生年, 杨然, 靳刚. 2013. 空间激光干涉引力波探测. 力学进展, **43**: 415-447 (Luo Z R, Bai S, Bian X, Chen G R, Dong P, Dong Y H, Gao W, Gong X F, He J W, Li H Y, Li X Q, Li Y Q, Liu H S, Shao M X, Song T X, Sun B S, Tang W L, Xu P, Xu S N, Yang R, Jin G. 2013. Gravitational wave detection by space laser interferometry. *Advances in Mechanics*, **43**: 415-447).
- 罗子人, 钟敏, 边星, 董鹏, 董玉辉, 高伟, 李洪银, 李玉琼, 刘河山, 冉将军, 邵明学, 唐文林, 徐鹏, 杨然, 靳刚. 2014. 地球重力场空间探测: 回顾与展望. 力学进展, **44**: 291-337 (Luo Z R, Zhong M, Bian X, Dong P, Dong Y H, Gao W, Li H Y, Li Y Q, Liu H S, Ran J J, Shao M X, Tang W L, Xu P, Yang R,

- Jin G. 2014. Mapping Earth's gravity in space: review and future perspective. *Advances in Mechanics*, **44**: 291-337).
- 施梨, 曹喜滨, 张锦绣, 张世杰, 董晓光. 2010. 无阻力卫星发展现状. 宇航学报, **31**: 1511-1520 (Shi L, Cao X B, Zhang J X, Zhang S J, Dong X G. 2010. Survey of drag-free satellite. *Journal of Astronautics*, **31**: 1511-1520).
- 薛大同. 2009. 静电悬浮加速度计伺服控制分析. 空间科学学报, **29**: 102-106 (Xue D T. 2009. Servo-control analysis of electrostatically suspended accelerometer. *Chin J Space Sci*, **29**: 102-106).
- Acernese F, Calloni E, Rosa R D, Fiore L D, Garcia L, Milano L. 2004. An optical readout system for the LISA gravitational reference sensors. *Classical and Quantum Gravity*, **21**: 621-627.
- Allen G S. 2009. Optical sensor design for advanced drag-free satellite. CA, USA: Stanford University.
- Allen G, Sun K X, Byer R. 2006. Using an optical fiber fed littrow cavity as a displacement sensor for use in dragfree satellites. AIP Conference Proceedings, **873**: 334-338.
- Antonucci F, Armano M, Audley H, Auger G, Benedetti M, Binetruy P. 2012. The LISA pathfinder mission. *Classical and Quantum Gravity*, **29**: 124014.
- Antonucci F, Armano M, Audley H, Auger G, Benedetti M. 2011. From laboratory experiments to LISA Pathfinder: achieving LISA geodesic motion. *Classical and Quantum Gravity*, **28**: 094002.
- Antonucci F, Armano M, Audley H, Auger G, Benedetti M. 2011. LISA Pathfinder data analysis. *Classical and Quantum Gravity*, **28**: 094006.
- Bai Y Z, Zhou Z B, Tu H B, Wu S C, Cai L, Liu L, Luo J. 2009. Capacitive position measurement for high-precision space inertial sensor. *Front. Phys. China*, **4**: 205-208.
- Bender P L, Begelman M C, Gair J R. 2013. Possible LISA follow-on mission scientific objectives. *Classical and Quantum Gravity*, **30**: 165017.
- Bruinsma S, Tamagnan D, Biancale R. 2003. Atmospheric densities derived from CHAMPSTAR accelerometer observations. *Planetary and Space Science*, **52**: 297-312.
- Canuto E, Massotti L. 2009. All-propulsion design of the drag-free and attitude control of the European satellite GOCE. *Acta Astronautica*, **64**: 325-344.
- Carbone L, Ciani G, Dolesi R, Hueller M, Tombolato D, Vitale S, Weber W J. 2007. Upper limits to surface-force disturbances on LISA proof masses and the possibility of observing galactic binaries. *Physical Review D*, **75**: 042001.
- Cavalleri A, Ciani G, Dolesi R, Hueller M, Nicolodi D, Tombolato D, Wass P J, Weber W J, Vitale S, Carbone L. 2009. Direct force measurements for testing the LISA Pathfinder gravitational reference sensor. *Classical and Quantum Gravity*, **26**: 094012.
- Cavalleri A, Dolesi R, Fontana G, Hueller M, Turneure J, Vitale S, Weber W. 2001. Progress in the development of a position sensor for LISA drag-free control. *Classical and Quantum Gravity*, **18**: 4133-4144.
- Christophe B, Marque J P, Foulon B. 2010. In-orbit data verification of the accelerometers of the ESA GOCE mission. Proceedings of Societe Francaise d'Astronomie etd' Astrophysique (SF2A), Marseille, France: 237-240.
- Congedo G, Ferraioli L, Hueller M, Marchi F D, Vitale S. 2012. Time domain maximum likelihood parameter estimation in LISA Pathfinder data analysis. *Physical Review D*, **85**: 122004.
- Conklin J W, Allen G, Sun K X, DeBra D B. 2008. Determination of spherical test mass kinematics with modular gravitational reference sensor. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **31**: 1700-1707.

- Conklin J W, Balakrishnan K, Buchman S, Byer R L, Cutler G D, DeBra D B, Hultgren E, Lipa J A, Saraf S,
Conklin J W, Sun K X, DeBra D B. 2011. Sphere mass center determination by velocity modulation. *Precision Engineering*, **35**: 464-472.
- Conklin J W. 2008. Estimation of the mass center and dynamics of a spherical test mass for gravitational reference sensors. CA, USA: Stanford University, 1-42.
- Corbin V, Cornish N. 2006. Detecting the cosmic gravitational wave background with the Big Bang Observer. *Classical and Quantum Gravity*, **23**: 2435-2446.
- Crowder J O. 2006. Data analysis for space-based gravitational wave detectors. Montana, USA: Montana State University.
- Dang Z H, Zhang Y L. 2011. The principle of solar radiation for controlling a spherical proof mass in an inner-formation satellite. *Acta Astronautica*, **69**: 860-868.
- Dang Z H, Zhang Y L. 2012. Formation control using μ -synthesis for inner-formation gravity measurement satellite system. *Advances in Space Research*, **49**: 1487-1505.
- DeBra D B, Conklin J W. 2011. Measurement of drag and its cancellation. *Classical and Quantum Gravity*, **28**: 094015.
- Dolphin M D M. 2007. Polhode dynamics and gyroscope asymmetry analysis on Gravity Probe B using gyroscope position data. CA, USA: Stanford University.
- Eglinton M L. 2000. Authority-on-demand adaptive suspension control for the Gravity Probe B gyroscopes. CA, USA: Stanford University.
- Ferraioli L, Hueller M, Vitale S. 2009. Discrete derivative estimation in LISA Pathfinder data reduction. *Classical and Quantum Gravity*, **26**: 094013.
- Gao F, Zhou Z B, Luo J. 2011. Feasibility for testing the equivalence principle with optical readout in space. *Chin Phys Lett*, **28**: 080401.
- Gerardi D, Allen G, Conklin J W, Sun K X, DeBra D, Buchman S, Gath P, Fichter W, Byer R L, Johann U. 2014. Advanced drag-free concepts for future space-based interferometers: acceleration noise performance. *Review of Scientific Instruments*, **85**: 011301.
- Gong X F, Xu S N, Yuan Y F, Bai S, Cao Z J, Chen G R, Chen Y B, He X K, Heinzl G, Lau Y K, Liu C Z, Luo J, Hu M, Bai Y Z, Zhou Z B, Li Z X, Luo J. 2014. Resonant frequency detection and adjustment method for a capacitive transducer with differential transformer bridge. *Review of Scientific Instruments*, **85**: 055001.
- Kawamura S, Ando M, Seto N, Sato S, Nakamura T, Tsubono K, Kanda N. 2011. The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO. *Classical and Quantum Gravity*, **28**: 094011.
- Lammerzahl C, Everitt C W F, Hehl F W. 2001. Gyros, Clocks, Interferometers...: Testing Relativistic Gravity in Space. Berlin: Springer.
- Lauben D, Allen G, Bencze W, Buchman S, Byer R, Goh A, Dorlybounxou S, Hanson J, Ho L, Higuchi S, Huffman G, Sabur F, Sun K, Tavernetti R, Rolih L, Patten R V, Wallace J, Williams S. 2006. Electrostatic sensing and forcing electronics performance for the LISA Pathfinder gravitational reference sensor. AIP Conference Proceedings, **873**: 576-582.
- Levy A, Touboul P, Rodrigues M, Metris G, Robert A. 2010. The MICROSCOPE space mission and the inflight calibration approach for its instrument. Proceedings of the Annual Meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics, SF2A: 123-126.
- LISA study team. 1998. LISA pre phase a report. LISA Project International Report, MPQ **233**: 1-40.

- Liu H W, Wang Z K, Zhang Y L. 2013. Modeling and analysis of Earth's gravity field measurement performance by inner-formation flying system. *Advances in Space Research*, **52**: 451-465.
- Liu H, Wang Z, Zhang Y. 2011. Coupled modeling and analysis of radiometer effect and residual gas damping on proof mass in purely gravitational orbit. *Sci China Tech Sci*, **54**: 894-902.
- Lockerbie N. 2004. Measurement of shadow-sensor displacement sensitivities. LIGO Document, LIGO-T040136-00-K: 1-5.
- Luo Z R, Paton A P, Rudiger A, Shao M X, Spurzem R, Wang Y, Xu P, Yeh H C, Yuan Y F, Zhou Z B. 2011. A scientific case study of an advanced LISA mission. *Classical and Quantum Gravity*, **28**: 094012.
- Nofrarias M, Antonucci F, Armano M, Audley H, Auger G, Benedetti M, Binetruy P. 2013. State space modelling and data analysis exercises in LISA Pathfinder. *arXiv preprint*, arXiv: 1306.4487.
- Overduin J, Everitt F, Worden P, Mester J. 2012. STEP and fundamental physics. *Classical and Quantum Gravity*, **29**: 184012.
- Rana A L. 2007. An optical readout for the gravitational reference sensor of LISA. Italy: University of Napoli Federico II: 50-66.
- Rispens S, Bouman J. 2009. Calibrating the GOCE accelerations with star sensor data and a global gravity field model. *J Geod*, **83**: 737-749.
- Rubbo L J. 2004. Gravitational wave astronomy using spaceborne detectors. Montana, USA: Montana State University.
- Schumaker B L. 2003. Disturbance reduction requirements for LISA. *Classical and Quantum Gravity*, **20**: 239-253.
- Selig H, Lammerzähl C, Ni W T. 2012. Astrodynamical space test of relativity using optical devices I (Astrod I) - mission overview. *International Journal of Modern Physics D*, **22**: 1341003.
- Seoane P A, Aoudia S, Babak S, Binetruy P, Berti E, Bohe A, Caprini C, Colpi M, Cornish N J, Danzmann K, Dufaux J F, Gair J, Jennrich O. 2012. Low-frequency gravitational-wave science with eLISA/NGO. *Classical and Quantum Gravity*, **29**: 124016.
- Shimizu S, Zoellner A. 2012. The drag-free cubeSat. 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Utah, USA: SSC12-VI-8.
- Siemes C, Haagsmans R, Kern M, Plank G, Floberghagen R. 2012. Monitoring GOCE gradiometer calibration parameters using accelerometer and star sensor data methodology and first results. *Journal of Geodesy*, **86**: 629-645.
- Speake C C, Aston S M. 2005. An interferometric sensor for satellite drag-free. *Classical and Quantum Gravity*, **22**: 269-277.
- Sumner T J, Anderson J, Blaser J P, Cruise A M, Damour T, Dittus H, Everitt C W F, Foulon B, Jafry Y, Kent B J, Lockerbie N, Loeffler F, Mann G, Mester J, Pegrum C, Reinhardt R, Sandford M, Scheicher A, Speake C C, Torii R, Theil S, Touboul P, Vitale S, Vodel W, Worden P W. 2007. STEP (satellite test of the equivalence principle). *Advances in Space Research*, **39**: 254-258.
- Sumner T J. 2009. The STEP and GAUGE Missions. *Space Science Reviews*, **148**: 475-487.
- Sun K X, Allen G, Buchman S, DeBra D, Byer R. 2005. Advanced gravitational reference sensor for high precision space interferometers. *Classical and Quantum Gravity*, **22**: 287-296.
- Sun K X, Allen G, Williams S, Buchman S, DeBra D, Byer R. 2006. Modular gravitational reference sensor: simplified architecture to future LISA and BBO. *Journal of Physics: Conference Series*, **32**: 137-146.
- Sun K X, Buchman S, Byer R, DeBra D, Goebel J, Allen G, Conklin J W, Gerardi D, Higuchi S, Leindecker

- N, Lu, Swank P A, Torres E, Trittler M. 2009. Modular gravitational reference sensor development. *Journal of Physics: Conference Series*, **154**: 012026.
- Sun K X, Johann U, DeBra D B, Buchman S, Byer R L. 2007. LISA gravitational reference sensors. *Journal of Physics: Conference Series*, **60**: 272-275.
- Swank A J. 2009. Gravitational mass attraction measurement for drag-free references. CA, USA: Stanford University: 4-11.
- Touboul P, Métris G, Lebat V, Robert A. 2012. The MICROSCOPE experiment, ready for the in-orbit test of the equivalence principle. *Classical and Quantum Gravity*, **29**: 184010.
- Touboul P. 2009. The MICROSCOPE mission and its uncertainty analysis. *Space Science Reviews*, **148**: 455-474.
- Trittler M. 2008. Differential optical shadow sensing testbed for gravitational reference sensors. Universität Stuttgart, Germany: 9-23.
- Tu H B, Bai Y Z, Zhou Z B, Liu L, Cai L, Luo J. 2010. Performance measurements of an inertial sensor with a two-stage controlled torsion pendulum. *Classical and Quantum Gravity*, **27**: 205016.
- Wang Z K, Zhang Y L. 2013. Acquisition of pure gravity orbit using precise formation flying technology. *Acta Astronautica*, **82**: 124-128.
- Zoellner A, Buchman S, Conklin J W, DeBra D B, Saraf S, Shimizu S. 2012. Differential optical shadow sensor cubesat missions. 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Utah, USA: SSC12-IX-6.
- Zoellner A, Hultgren E, Sun K X. 2013. Integrated differential optical shadow sensor for modular gravitational reference sensor. 8th International LISA Symposium, Stanford University, USA: 1-6.

(责编委: 靳刚)

Relative measurement for the proof mass flying along a purely gravitational orbit

HOU Zhendong¹ WANG Zhaokui² ZHANG Yulin^{1,2,†}

¹ Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150080, China

² School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Purely gravitational orbits are the trajectories of objects in space with gravitational force only. Once constructed, they allow us to detect spaceborne gravity with extremely high precision, and provide highly stable spacecraft platforms for scientific experiments. As the core of purely gravitational orbit construction, the relative measurement for the proof mass is used for scientific data acquisition, and spacecraft tracking control input. In this paper, we first present the concept of purely gravitational orbits, and summarize the applications on satellite gravity measurement and gravitational wave detection. Then we survey the relative measurement requirements for various missions, and give the principles, pros and cons for three major measurement methods, namely, capacitive sensing, magnetic sensing and optical sensing. According to the attitude motion of the proof mass, the relative state resolving for its mass center can be classified into three categories. We investigate the typical resolving models based on attitude dynamics and surface modeling of the proof mass, and the velocity estimation methods for mass center. Finally we discuss theoretical computations, on-ground validations and on-orbit validations for non-gravitational disturbances.

Keywords spaceborne gravity detection, purely gravitational orbit, relative measurement, relative state resolving, non-gravitational disturbance

Received: 5 March 2015; accepted: 11 June 2015; online: 25 June 2015

[†] E-mail: y.l.zhang@tsinghua.edu.cn

Cite as: Hou Z D, Wang Z K, Zhang Y L. Relative measurement for the proof mass flying along a purely gravitational orbit, *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 201509

© 2015 *Advances in Mechanics*.



张育林, 工学博士, 教授. 主要研究方向为分布式空间系统理论与应用、快速响应空间系统、空间系统智能控制与决策. 获国际宇航联合会第 34 届大会 Manlina 航天奖章、国家“有突出贡献的中国博士学位获得者”称号、首届“中国航天奖”、中国科协“求是”奖、曾宪梓载人航天基金会突出贡献奖、中国载人航天工程突出贡献奖. 获国家科技进步二等奖 1 项, 全国优秀图书奖 1 项, 省部级科技进步一等奖 4 项、二等奖 6 项, 军队教学成果二等奖 1 项. 发表学术论文 200 余篇, 其中 SCI 检索 24 篇, 出版《航天发射项目管理》、《卫星星座理论与设计》等学术著作 13 部.