

【其他研究】

卫星内编队重力场测量关键技术

周辉峰¹, 万思刚¹, 曾国强²

(1. 中国西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615606; 2. 装备指挥技术学院 航天装备系, 北京 101416)

摘要:结合当前典型重力卫星任务,介绍了重力卫星发展概况,阐述了内编队卫星重力场测量原理及系统工程实践的关键技术,最后就我国开展相关研究提出建议。

关键词:重力场模型;卫星重力场测量;内编队卫星

中图分类号:P223

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2010)12-0136-03

1 重力场测量发展情况

地球重力场是反映地球的物质分布与运动的基本物理场,它是固体地球物理学、海洋动力学、地球动力学、冰川学、飞行力学和航天动力学等研究所需的基本物理量,在国防建设、地球科学及其相关学科的研究中都有极其重要的作用^[1]。然而,传统重力探测技术获取全球均匀分布的高精度重力场信息的能力有限,迫切需要新的技术突破。卫星重力场测量是目前全球重力场模型改进最有效的手段。

目前卫星重力探测技术主要有4种模式:地面跟踪观测卫星轨道摄动、卫星测高、卫星跟踪卫星和卫星重力梯度测量。近30年来,前2种探测模式已经形成成熟的理论和技术体系。经过20多年的反复论证和试验,后2种探测模式已成为国际上普遍认可的先进技术^[2-3]。目前,具有代表性的重力测量卫星包括德国独立发射的CHAMP(Challenging Mini-satellite Payload)卫星,美、德合作成功发射的GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)卫星,以及欧空局发射的GOCE(Gravity Field and Steady-state Ocean Explorer)卫星。

CHAMP卫星是德国地球科学中心(GFZ)独立研制的,于2000年7月15日发射,它的成功发射使卫星重力学研究迈出了重要一步。CHAMP卫星采用高低卫-卫跟踪技术模式,其中高轨卫星为GPS卫星,卫星轨道采用近极圆轨道,倾角83°,偏心率0.004,近地点约470 km,其外形如图1所示。主要目的为:确定全球中长波静态重力场及其随时间的变化;测定全球磁场和电场;进行大气和电离

层探测^[4]。

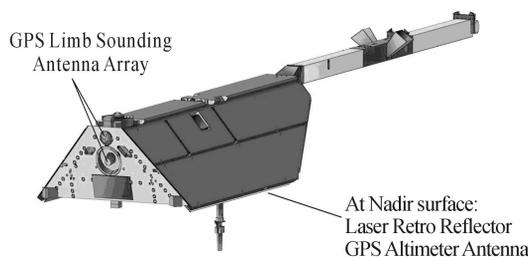


图1 CHAMP卫星外形

GRACE卫星是由德国和美国联合研制发射,主要科学目标是提供高精度、高分辨率的空间静态及时变地球重力场。GRACE卫星于2002年3月17日发射,设计寿命为5年,为圆形近极地轨道卫星,倾角为89°,初始平均高度约为500 km,2颗卫星之间的距离为200 km,沿同一轨道编队飞行,卫星轨道设计如图2所示。通过星上K波段微波系统精确测定出两颗星之间的距离及速率变化来反演地球重力场。卫星每30天可以完成一遍对地球扫描,绘制一幅完整的地球重力图^[5-6]。

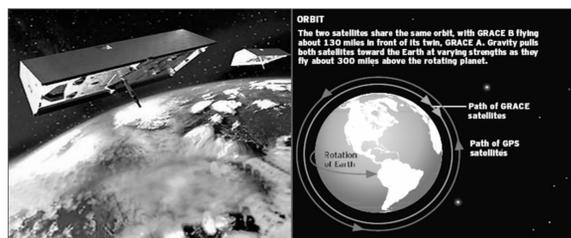


图2 GRACE卫星及其构形

收稿日期:2010-09-28

作者简介:周辉峰(1981—),男,硕士研究生,主要从事航天器测试发射、遥感图像处理研究;

曾国强(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事分布式航天器系统与组网研究。

欧空局研制的 GOCE 卫星采用 260 km 高的太阳同步轨道,倾角为 96.5°。卫星长 5.3 m,主体直径 1 m,外形如图 3 所示。配备了英国奎内蒂克(Qinetiq)防务与安全公司研制的 T5 离子发动机。GOCE 采用卫星重力梯度测量原理进行工作,主要目的是提供高分辨率的静态重力场信息,在功能上和 CHAMP、GRACE 形成互补。

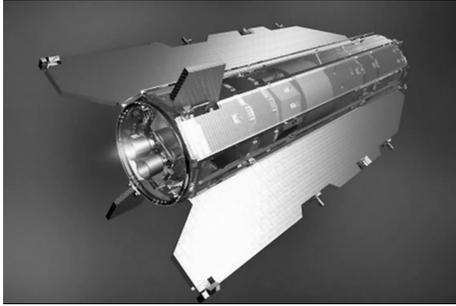


图 3 GOCE 卫星外形图

GOCE 是第一个重力梯度测量卫星,由于其轨道低,再加上高精度的静电重力梯度仪,可以大大减弱由于轨道高度造成的重力场衰减,特别适合于测定高精度和高空间解析度静态重力场。同时结合卫-卫跟踪技术,GOCE 对地球重力场中、短波的测定将有显著的提高。预计分辨率可达到 100 km 甚至更高(其球谐系数将达到 $l=200, m=200$, 甚至更高),对应于此分辨率的大地水准面精度可达到 1~2 cm,重力异常精度达到 1 mGal^[7-8]。

2 内编队卫星重力场测量基本原理

在一颗大卫星的内部设置一个密闭腔体,腔体中悬浮一质量块称之为内卫星,大卫星和质量块一起组成的卫星编队称为内卫星编队。大卫星为外卫星,质量块为内卫星。通过外卫星封闭腔体的设计,可以屏蔽掉非保守力对内卫星的绝大部分影响,使内卫星严格按照无耗散力影响的卫星轨道运行。由卫星重力测量的原理可知,利用内卫星的精密轨道即可实现重力场测量。

理想情况下,内卫星不受非保守力作用,只在保守力场内运动。设引力位为 $U(\vec{r})$,有^[9]:

$$U(r, \varphi, \lambda) = \frac{\mu_E}{r} + \frac{\mu_E}{r} \sum_{l=2}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l (\bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\sin \varphi) \quad (1)$$

$$\text{grad}U(\vec{r}) = \vec{F}_{\text{bs}} = \vec{r}_n - \vec{F}_{\text{ns}} \quad (2)$$

式中: $\vec{r}, \varphi, \lambda$ 分别是内卫星的位置矢量、地心纬度和经度; μ_E, R 分别是地球引力常数和地球赤道半径; $\bar{C}_{nk}, \bar{S}_{nk}$ 为归一化的地球引力位系数; $\bar{P}_{nk}(\sin \varphi)$ 为归一化的勒让德多项式; \vec{F}_{bs} 是单位质量内卫星受到的地球引力; \vec{r}_n 是内卫星位置矢量的二次导数,也就是内卫星受到的所有外力之和;

\vec{F}_{ns} 是内卫星受到的非保守力。

对于单位质量内编队重力测量系统,由于外卫星的屏蔽,可以认为内卫星不受大气阻力、太阳光压等非保守力的作用。外卫星对内卫星的万有引力加速度可以通过内外卫星相对状态实时计算,其绝对影响在 10^{-10} g 量级,误差在 10^{-12} g 量级。辐射计效应、热辐射压差、内舱残存气体阻尼等对内卫星的扰动加速度都在 10^{-12} g 量级以下。考虑到 CHAMP 卫星非保守力 10^{-10} g 的测量精度,在内编队系统中,可以忽略这些扰动力的对内卫星的影响^[1]。这样,只要不引入内卫星附加非保守力影响,精密测定了外卫星轨道和内外卫星的相对状态,就可以计算出内卫星仅受保守力作用下的运动轨道,即可通过重力场恢复方法恢复重力场的系数集合 $\{C_{lm}, S_{lm}\}$ 。

3 内编队卫星重力场测关键技术

内编队重力场测量卫星系统采用内外卫星编队飞行的方式。内卫星飞行在外卫星的内舱中,通过外卫星的相对位置控制,在任务周期内通过对外卫星的控制保持内外卫星不碰撞,并通过精密测量得到测地轨道数据。内卫星在惯性坐标系中的位置矢量可以由外卫星的位置矢量和内外卫星的相对位置矢量求得。内编队重力场测量系统主要包括 4 个部分:内编队初始化及维持控制技术、外卫星定轨技术、内外卫星相对定位技术和基于内编队精密轨道的地球重力场反演方法。内编队卫星系统的主要载荷包括带腔体外卫星、内卫星质量块、GPS 接收机、卫星激光测距反射镜器、微推进系统、太阳敏感器、磁强计、内外卫星相对测量装置等。

1) 外卫星:具有内舱体的卫星平台,要求可实现厘米级精密定轨和内编队相对位置控制,并能够设置内编队初始化系统,卫星入轨后释放内卫星,完成内编队初始化;

2) 内卫星:在外卫星内舱体飞行的质量体,不受大气阻力、太阳光压和外卫星控制力的影响,整个任务期间处于无控状态;

3) GPS 接收机:高动态双频多通道接收机,用于外卫星的高精度轨道确定;

4) 卫星激光测距反射镜器:和 GPS 配合,实现外卫星高精度轨道确定;

5) 微推进系统:包括用于大气阻力补偿的 mN 量级推力电推进系统和用于内外卫星相对状态闭环控制的冷喷推进系统;

6) 太阳敏感器、磁强计:用于外卫星姿态测量;

7) 内外卫星测量装置:用于测量内外卫星相对位置,为内编队维持控制和内卫星绝对轨道确定提供测量信息。

卫星正确入轨后,即可开始内编队初始化过程。初始化装置设置在外卫星上,要求初始化指令发出后即可由初始化控制系统自行完成初始化。首先杆 1 沿 V_1 方向运动,

然后杆 2 沿 V_2 方向运动将内卫星质量球送入杆 1 的滑槽内,最后杆 2 以 V_3 的速度将内卫星送入外卫星的腔体中,初始化过程如图 4 所示。

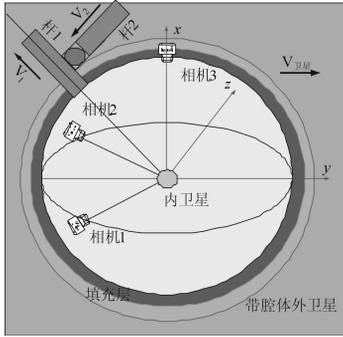


图 4 内编队初始化过程示意图

当内卫星质量球漂入相对状态测量系统可视区域时,测量系统即可实时为维持控制系统提供相对状态信息,并将相对状态信息储存,定期发送到地面和释放存储空间。初始化完成时,内卫星的理想状态应在外卫星腔体中央。

内卫星相对状态测量可采用光学交会测量原理实现,笔者建议采用多相机(3 台以上)冗余设计,保证测量系统安全可靠。当采用可见光背光照明模式,并需要进一步分析所用光强控制在能满足任务要求范围内。外卫星精密轨道确定可采用差分 GPS (WADGPS) 和卫星激光测距 (SLR) 相结合的方法实现。利用微推进系统和前馈反馈相结合的控制方案,实现内编队构形的保持^[2]。最后利用内卫星精密轨道测量数据实现重力场恢复。

4 展望

利用卫星进行重力场探测是获得高精度、高空间解析度的全球重力场和全球大地水准面模型的最有效手段,已成为 21 世纪地球空间探测的热点技术,世界主流国家均在

致力研究这一领域。就我国现有技术而言,卫星重力测量有许多关键技术需要突破。对于 SST 模式来说,高精度的 GPS 接收机、高精度的加速度计和高精度测定距离变率的微波测距系统是必不可少的;对于 SGG 模式来说,高精度的重力梯度仪也是不可缺少的。这几种星载仪器设备的研制难度很大,需要尽快落实相关单位进行攻关研究。本文目的在于抛砖引玉,期望有更多的学者和相关人员投入到这一领域的研究,争取早日研发出我国第一颗实用型重力测量卫星。

参考文献:

- [1] 徐文霞,刘品雄.重力场测量卫星研究概况[J].航天器工程,2005,14(3):79-82.
- [2] 张育林,曾国强,王兆魁,等.分布式卫星系统理论及应用[M].北京:科学出版社,2008:262-269.
- [3] 许厚泽,周旭华,彭碧波.卫星重力测量[J].地理空间信息,2005(2):1-3.
- [4] Reigber Chat. CHAMP phase-B executive summary[R]. GFZ, STR96/13, 1996.
- [5] Tapley B, Ries J, Bettadpur S. GGM02-An Improve Earth Gravity Field Model from GRACE[J]. Journal of Geodesy. 2005(10):1-11.
- [6] Oberndorfer H, Mtiller J. GOCE closed-loop simulation [J]. Journal of Geodynamics, 2002, 33(1/2):53-63.
- [7] 李克行,彭冬菊,黄城,等. GOCE 卫星重力计划及其应用[J]. 天文学进展,2005, 23(1):29-38.
- [8] 郝晓宁,王威.近地航天器轨道基础[M].长沙:国防科技大学出版社,2003:82-85.

(责任编辑 刘 舸)