卫星重力研究: 21世纪大地测量研究的新热点

[[1]](#footnote-1)[摘要]卫星重力发射将大大改善人们对地球重力场的了解,最近一些年已经和将要发射的CHAMP、GRACE及GOCE卫星将把现有静态中长波长部分重力场的精度提高1-2个量级,并提供长波部分重力场随时间变化的信息。本文对这一大地测量的新进展作了简单叙述。

[关键词]卫星重力发射；地球重力场；CHAMP；GRACE；GOCE

1.地球重力场研究现状

地球重力场是地球的基本物理场之一,重力场及其时变反映了地球表层及内部的密度分布和物质运动状态,同时决定着大地水准面的起伏和变化,因此,重力场的研究历来是大地测量学的热点之一。

当前,静态地球重力场的确定主要依靠地面重力观测,卫星测高和低轨卫星跟踪三种资料的综合这一经典模式,其中长波长重力场的信息主要由地面对空间多颗不同倾角人造卫星的跟踪资料恢复提取,中短波长的重力场信息则来自地面重力观测和卫星测高资料,例如人们广泛使用的EGM96模型即由此构建。动态地球重力场的研究一直是技术上十分困难的难题,直到80年代中期才开始利用人造激光测距技术测定6阶以下的地球重力场带谐系数的时变量，包括地心的变化,地球扁率项的变化(J2)等。但近十年来有关地球重力场的研究表明,继续沿用经典的地球重力场恢复模式,其静态部分无论是在空间分辨还是在精度上都难以有明显改善,尤其是中长波长的信息部分,其时变部分由于大气对低轨卫星定轨的影响也达到了极限,必须寻找更有效的途径,这就导致了卫星重力研究的兴起。

2.卫星重力学原理

早在70年代初,利用卫星技术及星载重力仪研究重力场的概念就已提出,进入80年代许多欧美学者开始针对不同的专用重力卫星观测方案开始了数值模拟计算,同时专用重力观测的卫星系统设计和卫星的试验也逐步开始,经前后二十多年的反复论证和试验,最终卫—卫跟踪和卫星重力梯度两种观测模式为国际大地测量界普遍接受。

(1)卫—卫跟踪技术

卫—卫跟踪技术是指空间的两颗卫星之间的精密测距测速跟踪,由于GPS技术的发展又演化为高低卫—卫跟踪和低低卫—卫跟踪。高低卫—卫跟踪利用低轨卫星(高度400～500km左右) 上的星载GPS接收机与GPS卫星构成对低轨卫星的空间跟踪网,同时低轨卫星上载有高精度加速计以补偿低轨卫星的非保守力摄动(主要是大气阻力影响),其跟踪精度达到毫米级,恢复低阶重力场精度可以较现有模型提高一个数量级以上,对应的低阶大地水准面精度达到毫米级。低低卫—卫跟踪技术是指两颗低轨卫星,相距200km左右,以微米级的测距测速精度相互跟踪,同时与GPS卫星构成空间跟踪网,因此低低卫—卫跟踪相当于两颗高低卫—卫跟踪再加上两颗低轨卫星之间的跟踪,观测值大大增加,其恢复低阶重力场精度可以提高2个数量级以上,且中波长的地球重力场测定精度也相应提高一个数量级以上。低低卫—卫跟踪可采用微波或激光测距的方式,后者的技术难度较大但精度更高。此外由于卫—卫跟踪卫星的寿命设计达5年左右,因此可以精确测定中低阶地球重力场随时间的变化。

(2)卫星重力梯度技术

卫星重力梯度技术是指在低轨卫星上载有高精度的超导重力梯度计,测定空间在轨卫星处的重力梯度张量,然后求介边值问题反演出地球重力场。由于观测量梯度值为地球重力位的二阶导数,因此卫星重力梯度观测有能力恢复地球重力场的高阶部分(达180阶以上),其精度可提高一个数量级以上。为了减小各种噪声的影响,卫星梯度仪一般放置在低温超导的环境中,由于体积的限制,这类卫星的寿命仅1年左右,一般用于确定静态重力场的研究。近年,人们也致力于长寿命超导重力梯度仪的研制,以便用于重力场时变的观测研究。

综上所述,卫星重力测量技术包括有：高低卫—卫跟踪HL-GPS,低低卫—卫微波跟踪SST,低低卫—卫激光干涉跟踪SSI,星载重力梯度仪SGG及长效星载重力梯度仪SGGE。对长波长重力场来说,所有的卫星重力技术的预期精度都高于现有的EGM96模型,中波长重力场除高低卫—卫跟踪技术外,其余的SST及SGG技术的预期精度也远高于EGM96模型,只是在短波长场上(根据卫星高度的不同,对于200阶以上的短波长场),卫星重力技术将不再有利。

3.重力卫星研究进展

尽管卫星重力学的概念及其预研开始较早,其可行性及前景也非常明确,但由于空间技术的复杂性以及高精度卫—卫跟踪仪器和重力梯度仪研制的困难,国际上重力专用卫星计划及其实施历经坎坷,历时近30年,直至上世纪末才有重大转机,2000年7月德国发射了高低卫—卫跟踪的重力卫星CHAMP,迈出了卫星重力学研究的重要一步,随后由美欧合作的低低卫—卫跟踪重力卫星GRACE也将计划在2001年底发射升空。CHAMP卫星作为卫星重力学研究的先导和试验,而GRACE卫星预计将能充分展现卫星重力学的主要功能和优越性。之后,欧洲空间局计划在2005年发射载有高精度重力梯度仪的GOCE卫星。因此,从现在起的未来几年内,世界各国科学家呕心沥血孕育的卫星重力学将最终得以实现。针对此,1999年在英国伯明翰举行的22届IUGG大会的大会报告和决议中,卫星重力学被各国科学家视为大地测量研究的里程碑。国际大地测量协会(IAG)通过的决议2指出，鉴于IUGG已将“突出需要精密和详细地测量地球重力场及其时间变化”写进IUGG XXII大会决议,IAG和其他组织及正在研究GRACE和GOCE卫星的NASA和ESA研究群体务必加紧这两个卫星的研究进度。其中GRACE将是第一个低低卫星跟踪系统,重点放在重力场的时间变化上；GOCE将是第一个重力梯度卫星系统,用于确定较高空间分辨率重力场。它们具有从重力场到固体地球物理、海洋学、冰川学、水文学、大地测量和海平面测定等广阔的应用领域”。

下面就CHAMP、GRACE及GOCE三个重力卫星技术作一简单阐述。CHAMP是由德国地球科学中的(GFZ)独立研究也是世界上首次采用卫—卫跟踪技术的重力卫星,已于2000年7月15日成功发射。预期寿命5年,圆形近极轨道,倾角83°,偏心率0.004,近地点约470km,其主要目的: (1)确定全球中长波长静态重力场以及随时间变化；(2)测定全球磁场和电场；(3)大气和电离层探测。作为重力场的测定,卫星上搭截两个重要设备,一是星载双频GPS接收机,用以接收高轨GPS卫星信号以精密确定CHAMP卫星的轨道,二是三轴加速度计,放置在整个卫星系统的重心处,用以直接测量出卫星的非保守力摄动,作为磁场及大气、电离层的监测,卫星上还安装有磁力仪等其他设备,据估计,CHAMP卫星预期反演重力场空间分辨率可达到500km,在此分辨率下将比现有重力场模型的精度提高1～2个量级,即1000km波长以上中长波大地水准面测定精度可达到1cm。

GRACE是由美国NASA和欧洲方面联合研制的重力卫星,计划于2001年底发射,采用低低卫卫跟踪技术,即同时发射相距约200km的两颗低轨卫星在同一轨道上,两个低轨卫星除去有星载GPS接收机准确确定其轨道位置外,还以微米级精度实时测量两个低轨卫星之间的距离及其变化率,轨道高度约500km,仍采用近极园轨道设计,寿命约3～5年,这种技术既包含了两组高低卫卫跟踪,还以差分原理测定两个低轨卫星相互的运动,因此较之CHAMP卫星,精度大大提高,作为重力场测定,GRACE主要搭截的设备有:Turbo-Rogue GPS接收机,进行GRACE与GPS的高低卫—卫跟踪测量；三轴加速度计,用以测量非保守力,K波段微波仪,进行低低卫—卫跟踪测量,其预期的目标是:(1)测定中长波地球重力场,5000km波长大地水准面精度达0.01mm,500km波长大地水准面测定精度可达0.01mm,比CHAMP的精度提高两个数量级；(2)监测15～30天或更长尺度长波重力场的时间变化,预期大地水准面年变化的测定精度为0.01mm/年。(3)探测大气、电离层环境。由于GRACE将为我们提供极高精度的中长波长的地球重力场,同时给出中长波重力场的时间变化,因此它将是卫星重力研究的划时代的开端。

GOCE是由欧空局(ESA)研制的重力卫星,计划在2005年发射,采用卫星重力梯度测量原理,即直接用卫星梯度仪测量出低轨卫星处重力位的二阶导数,然后按边值问题反演出地面重力场,卫星轨道高度约250km,近极园轨道,以利于反映短波长高阶重力场信息,其携带的设备主要有：GPS/GLONASS组合接收机,三轴重力梯度仪或超导重力梯度仪,以及姿态控制系统。GOCE的主要目的是提供高分辨率的静态重力场信息,预期重力场空间分辨率(半波长)达到100km左右,即球谐展开至200阶级。

综上所述,CHAMP、GRACE 和GOCE是卫星重力研究的一个整体系列,彼此互补并具有不同的科学应用。CHAMP是概念性的试验,GRACE提供高精度的静态中长波重力场及重力场的时变信息,GOCE用于高阶静态重力场的测定。

4.发展我国的重力卫星探测研究

卫星重力研究的科学成就是国际大地测量学界继GPS之后的又一次具有革命性的发展,不仅带动大地测量学本身的发展,还将在其他相关科学领域取得重要的科学应用,为此我们应高度重视和紧跟这一研究方向,就当前而言,建议从三个方面着手工作。

(1)鉴于国际上已经开展了卫星重力学原理,模拟计算、重力卫星系统设计等研究,积累了丰富经验,今年CHAMP卫星的资料即将公开供各国科学家使用。我国在此领域尚存在较大差距, 为此,我国大地测量学界应抓住目前的机遇,对这些基本问题进行深入扎实的了解和研究,包括：深入了解卫卫跟踪和卫星重力梯度测量系统的组成,技术指标的制定及对重力场确定最终结果的影响；深入了解重力卫星系统的主要硬件设备的作用；研究卫卫跟踪及卫星重力梯度测量的最佳轨道设计；研究重力场反演的理论和方法。

(2)CHAMP、GRACE、GOCE的相继发射将大大提高地球重力场的时空分辨率和精度,从而有效地拓宽了地球重力学的科学应用范围,对大气、海洋、水文、地球物理及全球变化都有重要的科学意义,同时对我国的基础测绘服务和国防建设有重要的实用价值,因此我们要跟上这一发展,加强学科的交叉和卫星重力观测结果的应用研究。

(3)由于涉及卫星重力研究的有关软硬件耗资相对较少(据目前了解,在硬件方面,主要的设备包括：沿迹星间测量,精度要求优于几μm/s；加速度计,精度优于1nm/s2 ；重力梯度仪,精度优于4×10-3E/；姿态控制系统,精度优于3×10-3rad/；星载GPS,精度优于0.1m/),中国作为一个快速发展中的大国应适时考虑和安排有关重力卫星软硬件的研制或引进,着手相关的预研工作,力争在不远的将来太空中有中国的重力卫星,以提高我国在国家基础服务能力和科学研究的国际地位。

参考文献

[1] Ch Reigber, Schwintzer P. CHAMP, A Challenging Micro-satellite Payload for Geophysical Research and Application, Final Report[R] . GFZ, Potsdam, 1995

[2] GRACE-Gravity Recovery and Climate Experiment: Science and Mission Requirements Document, Revision A, JPLD-15928, 1998

[3] ESA: Gravity Field and Steady-state Ocean Circulation Mission (GOCE). In: Report for Mission Selection: The Four Candidate Earth Explorer Core Mission, ESA SP-1233/ 1, 1999

[4]沈云中. 应用CHAMP 卫星星历精化地球重力场模型的研究[ D], 2000

[5]ZHANG Chuan-ding. Orbital Design of Satellite for Geodetic Application[J]. Acta Geodaetice et Cartographica Sinca , 2000, 29( 增) [ 张传定. 大地测量应用卫星的轨道设计[J] . 测绘学报, 2000, 29( 增)]

1. 本文发表于《测绘科学》，2001年，作者为许厚泽。 [↑](#footnote-ref-1)