

文章编号: 1000-8349(2005)01-0029-11

GOCE 卫星重力计划及其应用

李克行^{1,2}, 彭冬菊^{1,2}, 黄 斌¹, 冯初刚¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 基于 CHAMP 和 GRACE 卫星, GOCE (Gravity Field and Stead-state Ocean Circulation Explore) 是欧空局 (ESA) 的一颗重力场和静态洋流探测卫星。利用它可得到空间分辨率为 200~80 km 的全球重力场模型和 1 cm 精度的大地水准面。简要介绍了目前重力卫星的发展现状与其局限性, 详细叙述了 GOCE 卫星的组成、科学目标、测量原理、在地球物理等学科中的重要应用, 并提出 GOCE 等重力卫星资料在我国的应用设想。

关键词: 天体力学; 重力梯度; 综述; GOCE; 重力场; 卫星; 跟踪

中图分类号: P139; P312.1 **文献标识码:** A

1 引 言

自 1998 年美国公布 EGM 96 全球地球重力场模型以来, 利用空间技术进行重力场探测的理论和技 术——空间卫星大地测量学的发展已成为重力探测技术进入 21 世纪的一个标志^[1]。目前重力卫星的成功发射及其数据的有效利用给地球物理学的发展带来了巨大变化。继 CHAMP (Challenging Mini-satellite Payload)、GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) 卫星后, GOCE (Gravity Field and Stead-state Ocean Circulation Explore) 是即将发射的又一颗重力卫星, 它克服了目前重力卫星的一些局限性, 将给地球物理等相关学科带来一场新的革命。

本文简要介绍了目前重力卫星的发展现状与其局限性, 详细描述了 GOCE 卫星的组成、科学目标及其测量原理、在地球物理等学科中的重要应用, 并对 GOCE 卫星等重力卫星资料在我国的应用提出了一些设想。

2 重力卫星的发展现状及其局限性

目前的重力卫星主要是 CHAMP 和 GRACE。德国于 2000 年 7 月在俄罗斯 Plesetsk 卫星发射基地成功地发射了 CHAMP 地球科学研究和应用小卫星, 这标志着人类利用空间技术

收稿日期: 2004-06-07; 修回日期: 2004-08-15

进行重力场的探测迈出了具有实践性的一步。CHAMP 卫星是世界上第一颗采用 SST (Satellite to Satellite Tracking) 技术的卫星, 它采用了高-低 SST 模式以及近圆极轨道, 轨道高度为 418~470 km, 卫星上搭载 GPS 接收机、激光反射器和测定非重力的加速度计。特别要提到的是, 该卫星平台上的三轴加速度计由于具有良好的工作性能, 能比较精确地测定空气阻尼、太阳辐射压、地球反照压和卫星变轨等对 CHAMP 卫星产生的非保守力, 因此可以得到纯地球引力轨道摄动, 使恢复的地球重力场更接近实际情况。CHAMP 卫星自升空以来, 已收到了大量数据, 其中包括高轨卫星 (GPS 卫星) 对低轨卫星 (CHAMP 卫星) 的 SST 资料。目前, 德国波茨坦地球科学研究中心 (GFZ) 已经利用 CHAMP 卫星资料计算了展开到 72 阶次的地球重力场模型^[2], 其大地水准面精度达到厘米级, 空间分辨率达到 650 km^[3]。然而, 轨道高处重力场信号衰减是 CHAMP 卫星的一个主要弱点, 它阻碍了其获得真正的高空间分辨率^[4]。此外, 搭载的加速度仪的功能障碍及 Z 轴不稳定, 使 CHAMP 卫星所确定的重力场模型和大地水准面精度仍然无法满足地球物理等相关地学学科发展的需要。就应用而言, CHAMP 卫星可以看成是一次概念证明, 因为它是首次采用非间断三维高-低跟踪技术结合三维重力加速度的测量。尽管这将大大提高球谐系数的精度, 并使目前的模型更加可靠, 但该技术在精度和空间分辨率上不会对现有重力场模型有太多改进^[4]。

继 CHAMP 卫星之后, 美国宇航局 (NASA) 和德国空间局 (DLR) 在 CHAMP 卫星基础上共同研制了 GRACE 卫星, 并于 2002 年 3 月成功发射。GRACE 卫星的轨道倾角为 89.5°, 轨道高度为 300~480 km。它采用 SST-II 技术, 即同时发射两颗低轨道卫星到同一个轨道上, 彼此相距 100~400 km, 相互跟踪, 两者之间的相对运动 (卫星间的距离变化) 由微波测距测速仪精密测量, 用其一阶微分便可求得重力加速度。另外, 两个飞行器上的非重力影响可以被测量或被补偿。根据设计要求, 两颗 GRACE 卫星之间的距离及其变化可以被精确地测定, 这一观测量是卫星轨道位置和重力场参数的函数, 主要反映中长波重力场的变化, 可用于精确确定重力场模型的低阶系数, 因而利用 SST 数据可以恢复得到高精度的中长波重力场及长波重力场的时变量。GRACE 卫星的设计寿命是 5 yr, 它所得到的静态和动态重力场精度比 CHAMP 卫星高一个数量级, 空间分辨率 (半波长) 为 1000~200 km。它的科学目标是提供一个前所未有的新的地球重力场模型, 主要应用于固体地球物理学、海洋学和气象学研究, 使人们对海洋面流和海洋热传输等问题有更好的理解。另外, GRACE 卫星主要用于研究重力场的时间变化, 它是目前时间分辨率最高的重力卫星。初步分析表明, 仅用 GRACE 卫星 30 d 数据解算的重力场可以达到前 30 yr 卫星与地面资料累积才能达到的精度^[5]。

虽然 CHAMP 和 GRACE 卫星具有不同的轨道高度, 由此产生不同的轨道扰动波谱, 互相取长补短, 可以给出一个非常可靠的高精度长波重力场模型, 但是它们无法得到高精度的短波重力场, 因此也不可能得出一个精确的全球重力场模型和精化的全球大地水准面。总的来说, CHAMP 卫星是一次概念性的试验, 而 GRACE 卫星则提供了高精度的静态中长波重力场及重力场的时变信息^[6]。现代大地测量、地球物理、地球动力学和海洋学等相关地学学科的发展均迫切需要得到更加精细的全波段地球重力场和厘米级大地水准面支持 (总的要求见表 1^[7]), 为了满足上述需求, 欧空局 (ESA) 研制了最新的重力卫星 GOCE, 用于测定较高空间分辨率的重力场。

表 1 相关地学学科对重力场或大地水准面的要求

学 科		大地水准面精度	空间重力异常精度	空间分辨率
		/cm	/mGal	/km
固体地球	岩石圈和上地幔密度结构		1~2	100
	大陆岩石圈	沉积盆地	1~2	50~100
		裂谷	1~2	20~100
		地壳构造的移动	1~2	100~500
		地震灾害	1	100
		海洋岩石圈和岩流圈的作用		0.5~1.0
海洋学	小尺度	1~2		100
		0.2		200
	洋盆尺度	约 0.1		1000
冰盖	岩基		1~5	50~100
	冰的垂直运动	2		100~1000
大地测量学	GPS 水准	1		100~1000
	统一全球高程系统	1		100~20000
	惯性导航系统		约 1~5	100~1000
	精密定轨		约 1~3	100~1000

3 GOCE 卫星

3.1 组 成

GOCE 卫星计划于 2006 年在俄罗斯 Plesetsk 发射, 它重 1200 kg, 采用近圆极、太阳同步轨道, 轨道高度为 285 km, 轨道倾角 96.5° , 任务期 8 个月, 主要搭载如下元器件 (如图 1 所示)。

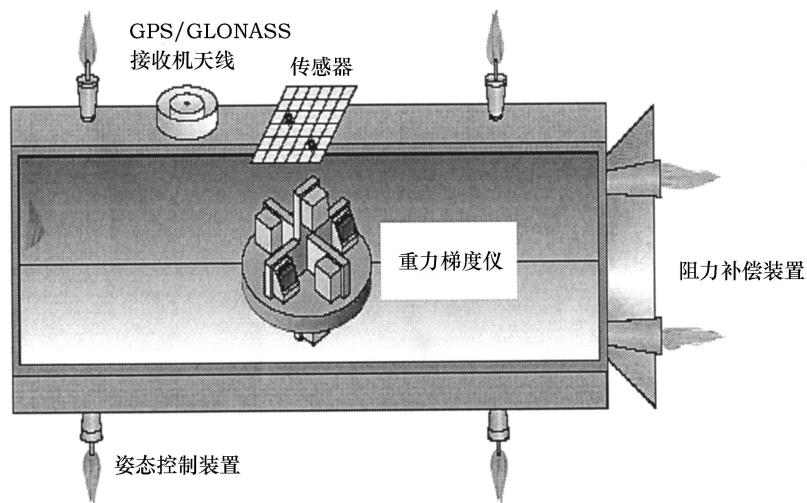


图 1 GOCE 卫星的主要组成器件^[8]

(1) 重力梯度仪 (gradiometry)

自上世纪 70 年代末开展重力梯度测量技术 (SGG) 论证以来, 重力梯度仪的灵敏度和稳定性及其精度等问题一直阻碍卫星重力梯度计划的实施。经过几十年的潜心研究, 重力梯度仪的精度已从早期的 1 E ($1 \text{ E} = 10^{-9}/\text{s}^2$) 发展到了 10^{-4} E , 未来的超导重力梯度仪精度有望达 10^{-6} E 。重力梯度仪技术的突破和低轨卫星技术的发展推动了卫星重力梯度测量进入实用性阶段。GOCE 卫星是世界上第一颗采用重力梯度测量技术的卫星, 它的重力梯度仪安置在卫星的质量中心 (COM) 附近, 精度达 $4 \text{ ME}/\text{Hz}$, 由 3 对高灵敏度加速度仪组成, 用于测定地球重力位的二阶导数。

根据地球重力场性质, 重力场在外部空间以 $(R/r)^n$ (R 为地球平均半径, r 为地球外部任意一点的地心向径, n 为引力位球谐展开的阶数) 比例衰减, 这就限制了传统的卫星重力探测技术 (如地基 SLR 跟踪) 感测重力场的空间分辨率。卫星重力梯度测量感测的是引力位的二阶导数, 相对其他重力探测技术, 它相当于在同一卫星轨道高度处将重力场的信号放大了 n 倍, 而且卫星的轨道高度也低, 因而在很大程度上克服了重力场随高度衰减的问题, 能直接观测重力场较高阶的精细结构。

(2) GPS/GLONASS 接收机

GOCE 卫星同时采用了高-低卫星跟踪卫星 (SST-hl) 技术和卫星重力梯度测量技术 (如图 2)。它安装了具有 1 s 采样率的测量伪距和相位功能的 GPS/GLONASS 接收机, 用于确定 1 cm 精度的卫星轨道, 供中长波地球重力场的轨道分析使用。GPS/GLONASS 接收机对卫星的连续跟踪能对 GOCE 卫星进行实时精确定轨。同时, 通过掩星技术, 利用 GPS 数据又可对大气进行监测和研究。

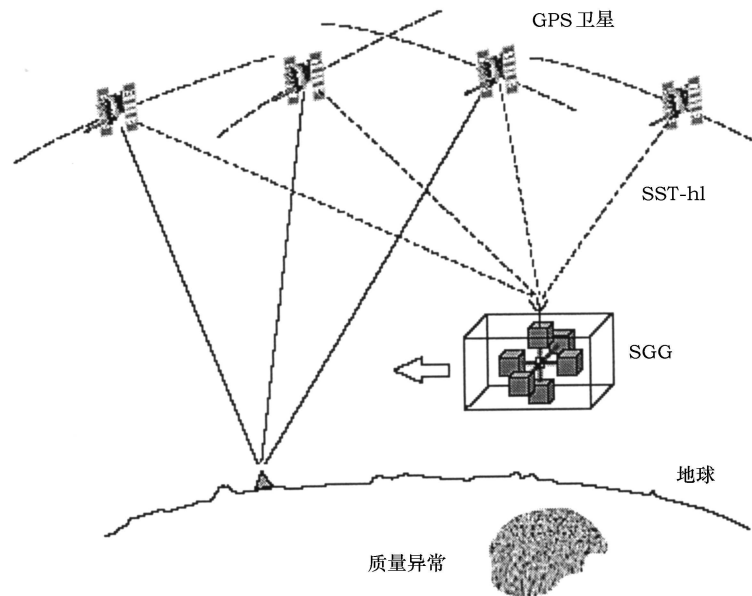


图 2 SST-hl 和 SGG 示意图 [8]

(3) 无阻力控制系统

低轨卫星在太空飞行时会受到非保守力, 如大气阻力、太阳光压和地球反照压等的极大影响。利用无阻力控制系统的卫星点火设备进行非重力补偿, 可以在很大程度上抵消这些非保守力对卫星的影响。

(4) 太阳能电池板和传感器 (恒星跟踪姿态控制系统)

太阳能电池板提供了 GOCE 卫星各器件所需的能量, 而传感器主要用于跟踪地球和太阳、接受地面人员对卫星发出的指令, 以及对卫星进行姿态控制。这两个器件都是 GOCE 卫星必不可少的部分。

(5) 激光反射器

GOCE 卫星的对地一侧安装有棱镜激光反射器, 由此可以利用 SLR 技术来测定 GOCE 卫星和地球上多个 SLR 地面站之间的精确距离 (精度在 $\pm 1 \sim \pm 2$ cm), 并确定精密的卫星轨道, 与运用 GPS/GLONASS 接收机确定的轨道进行比较、检核和校准。SLR 技术受到其地面站分布和观测时间的限制, 没有星载 GPS/GLONASS 接收机定轨技术在时间和空间分辨率方面的优势, 但由于精度好, 特别是在坐标框架内对卫星位置的高确定性, 目前仍是卫星定轨尤其是卫星运行初期定轨的一种极为有效的技术手段。

3.2 科学目标

(1) 测定高精度和高空间分辨率静态重力场 —— 大地水准面和重力异常, 提供最新的具有高空间解析度、高精度的全球重力场模型和大地水准面。空间解析度 (半波长) 将达 200~80 km, 最高可达 65 km, 因而有望恢复 250 阶地球重力场模型和 1 cm 精度的大地水准面, 空间重力异常可达 1~2 magls。

(2) 丰富地球物理学中关于地球内部的知识, 使人们对地球内部的结构、物质组成、密度结构变化有更加深入的了解。

(3) 精确测定海洋的水准面, 结合卫星测高定量确定海洋的洋流以及海洋上热量的传递。

(4) 为地貌、地形等学科提供较好的用于数据连接的海拔参考系, 以实现不同高程系统之间的链接, 从而更好地确定地形的起伏变化, 为大地测量服务。

(5) 通过与岩床地形学结合, 精确估计两极冰盖的厚度, 为研究冰盖变化提供依据。

3.3 测量原理

GOCE 卫星是第一颗重力梯度卫星, 它的重力梯度仪能直接感测引力位的二阶导数即引力梯度张量, 所采用的技术是差分加速度测量技术。所谓差分加速度测量, 就是以作用于检测质量 (或加速度计) 的引力差为基本观测量, 通过两加速度计所观测到的加速度差来获取重力梯度张量的各个分量。

GOCE 卫星测量的基本原理是: 利用一颗卫星内一个或多个固定基线 (大约 70 cm) 上的微分加速度仪来测定 3 个互相垂直方向的引力张量的几个分量, 即测出加速度仪质心之间的空中三向重力加速度差值。这一差值反映了引力加速度分量的梯度, 即引力位的二阶导数。飞行器的非引力加速度 (例如大气阻力、太阳辐射压等) 以同样的方式影响卫星内所有加速度仪, 但是当取差分非引力加速度可以理想地被消除掉。

由于牛顿第二定律在惯性坐标系下成立, 而重力梯度仪获取的数据是相对重力梯度仪坐标系 (或称局部轨道直角坐标系) 的, 为非惯性系, 因而需要将重力梯度仪坐标系中的数据转

换到惯性坐标系:

$$X_I = \mathbf{R}_{Ii} X_i + B_I, \quad (1)$$

这里, \mathbf{R}_{Ii} 为坐标转换矩阵, B_I 为重力梯度仪坐标系原点在惯性坐标系中的坐标分量, X_I 和 X_i 分别为质点在惯性坐标系和重力梯度仪坐标系中的坐标分量。对上式求二阶导数得

$$\ddot{X}_I = \mathbf{R}_{Ii} \ddot{X}_i + 2\dot{\mathbf{R}}_{Ii} \dot{X}_i + \ddot{\mathbf{R}}_{Ii} X_i + \ddot{B}_I. \quad (2)$$

根据牛顿第二定律:

$$F_I = m \ddot{X}_I, \quad (3)$$

F_I 包括引力、大气阻力、太阳辐射压等外力, 即 $F_I = F_I^1 + F_I^2 + F_I^3 + \dots$, 定义引力加速度为单位质量上所受的引力:

$$V_I = \frac{\partial V}{\partial X_I} = \frac{1}{m} \cdot F_I^1, \quad (4)$$

其中 F_I^1 为引力分量。那么引力加速度和惯性加速度之差为

$$f_I = \frac{1}{m} \cdot (F_I^2 + F_I^3 + \dots). \quad (5)$$

将 (3)、(4) 式带入 (5) 式得

$$V_I + f_I = \mathbf{R}_{Ii} \ddot{X}_i + 2\dot{\mathbf{R}}_{Ii} \dot{X}_i + \ddot{\mathbf{R}}_{Ii} X_i + \ddot{B}_I. \quad (6)$$

用 \mathbf{R}_{iI} (\mathbf{R}_{Ii} 的逆变换) 乘以上式, 然后作 Cartan 变换, 由于加速度计是沿重力梯度仪坐标轴对称排列的, 并且加速度计与重力梯度仪质心的相对位置保持不变, 因此 $\ddot{X}_i = \dot{X}_i = 0$ 。则

$$V_i + f_i = \dot{\Omega}_{ij} X_j + \Omega_{ik} \Omega_{kj} X_j + \ddot{B}_i. \quad (7)$$

将 V_i 相对于重力梯度仪的质心 O 作 Taylor 级数展开, 且仅取线性项得

$$f_i = \left[\dot{\Omega}_{ij} + \Omega_{ik} \Omega_{kj} - V_{ij}(O) \right] X_j + \left[\ddot{B}_i - V_i(O) \right], \quad (8)$$

其中 $V_{ij}(O) = \left. \frac{\partial V_i}{\partial X_j} \right|_O$, $\left[\ddot{B}_i - V_i(O) \right]$ 是梯度仪非引力的影响, 取差分时可以理想地去除它们。

对于两个加速度计 A 、 B , 根据 (8) 式可得

$$f_i(A) - f_i(B) = \left[\dot{\Omega}_{ij} + \Omega_{ik} \Omega_{kj} - V_{ij}(O) \right] \cdot \delta X_j(A, B). \quad (9)$$

记 $L_j = \delta X_j(A, B)$, 则

$$\frac{1}{L_j} (f_i(B) - f_i(A)) = V_{ij} - \dot{\Omega}_{ij} - \Omega_{ik} \Omega_{kj}, \quad (10)$$

从而可得观测方程:

$$\frac{1}{L} \begin{pmatrix} \gamma_{x2} - \gamma_{x1} & \gamma_{y2} - \gamma_{y1} & \gamma_{z2} - \gamma_{z1} \\ \gamma_{x4} - \gamma_{x3} & \gamma_{y4} - \gamma_{y3} & \gamma_{z4} - \gamma_{z3} \\ \gamma_{x6} - \gamma_{x5} & \gamma_{y6} - \gamma_{y5} & \gamma_{z6} - \gamma_{z5} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{yx} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{zx} & V_{zy} & V_{zz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \dot{\omega}_z & -\dot{\omega}_y \\ -\dot{\omega}_z & 0 & \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y & -\dot{\omega}_x & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\omega_y^2 - \omega_z^2 & \omega_x \omega_y & \omega_x \omega_z \\ \omega_y \omega_x & -\omega_x^2 - \omega_z^2 & \omega_y \omega_z \\ \omega_z \omega_x & \omega_z \omega_y & -\omega_x^2 - \omega_y^2 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

其中, L 可以精确地获取; $\gamma_{in}(i = x, y, z; n = 1, 2, 3, \dots, 6)$ 表示编号为 n 的重力仪所直接测量得到的沿 i 轴的引力分量; $V_{ij}(i = x, y, z; j = x, y, z)$ 是引力梯度分量, 它是引力位的二阶导数, 即 $V_{ij} = \frac{\partial^2 V}{\partial X_i \partial X_j}$ 。 $\omega_i(i = x, y, z)$ 是重力梯度仪旋转角速度分量。观测方程右边的后两项是由于重力梯度仪坐标系相对于惯性坐标系旋转而引起的, 统称为旋转分量。

具体的原理图如图 3 所示。

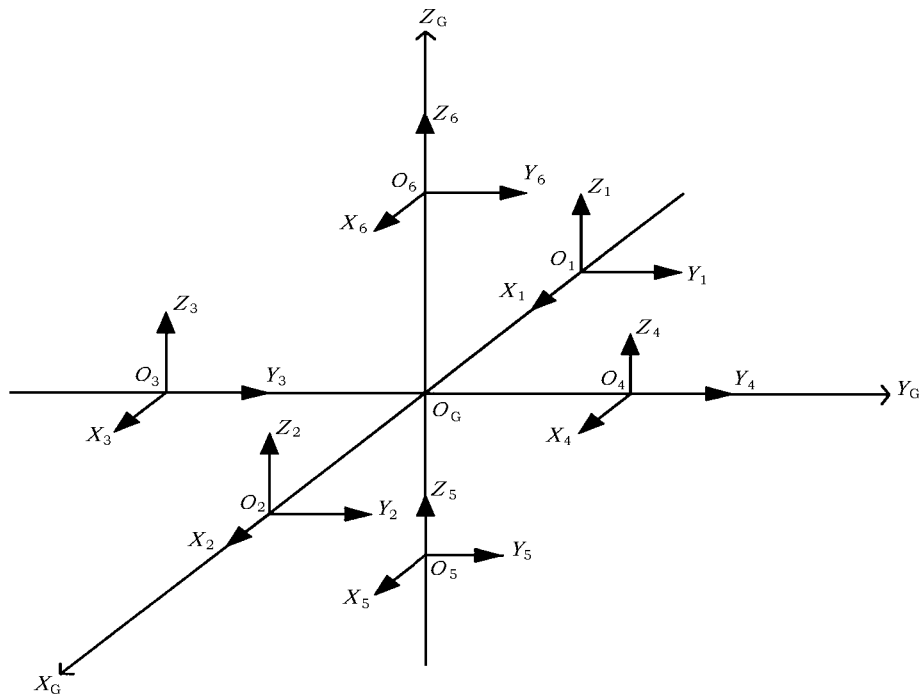


图 3 GOCE 卫星的测量原理图

基于上述原理, 可以从观测信号中分离出引力梯度信号, 反演出高精度地球重力场模型的球谐系数, 得到高精度的全球重力场模型和大地水准面模型。

引力位的球谐展开式可表示为^[9]

$$V(r, \mu, \Lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^L \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} \sum_{m=-l}^{m=l} \sum_{k=-l}^{k=l} K_{lm} F_{lmk}(I) \exp[i(k\mu + m\Lambda)], \quad (12)$$

式中, r 是地心到卫星的距离, $\Lambda = \Omega - \theta_G$, μ 是真近点角, F_{lmk} 是倾角函数, I 为轨道倾角, K_{lm} 是位系数, R 为地球的平均半径, GM 是地球引力常数。

由 (12) 式容易得到

$$V_{zz} = \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^L \frac{(l+1)(l+2)}{R^2} \left(\frac{R}{r}\right)^{l+3} \sum_{m=-l}^l \sum_{k=-l}^l K_{lm} F_{lmk}(I) \exp[i(k\mu + m\Lambda)] . \quad (13)$$

同理可得 V_{xx} 、 V_{yy} 、 V_{xy} 、 V_{yz} 、 V_{xz} 的展开式。比较 (12) 和 (13) 两式, 即可计算出地球重力场模型的球谐系数, 得到全球重力场模型。然后通过严密解算模型求得正常重力场, 进而得到扰动重力场。利用 Bruns 公式可得大地水准面高, 而再利用逆 Stokes 公式就可得到重力异常。

3.4 数据种类

GOCE 卫星产生的数据分为 3 类:

(1) 直接测量的数据, 包括卫星重力梯度仪测量到的数据和 GPS/GLONASS 接收机得到的原始数据。

(2) 利用一个时间序列的仪器参数和卫星轨道根数来标校重力梯度仪的数据; 标校过的卫星局部坐标系下 3 个方向的重力梯度数据; 按时间序列排列的校准过的重力梯度数据、GPS 定轨数据、卫星姿态控制以及轨道数据。

(3) 通过计算得出的最后结果。

3.5 在地球科学中的重要应用

(1) 确定前所未有的全波段地球重力场和高精度大地水准面

重力场是地球的一个物理特性, 它可以反映地球内部的物质分布、运动和变化状态, 并制约地球本身及其邻近空间的物理事件, 因此确定高精度全波段的地球重力场是地球科学的基础性任务。目前的全球重力场模型仅仅基于卫星资料, 是从卫星轨道摄动的观测数据中得到的。由于资料不充分、卫星轨道的非最优化构型, 因此将至今所有的几十颗卫星的跟踪数据融合在一起再加上地面的重力测量资料才能得到代表当今水准的地球重力场模型。由于引力场信号在卫星高度处已经衰减了不少(地球引力场随高度增加而不断衰减), 因而上述重力场只代表重力场的大致结构。

GOCE 卫星的轨道较低, 这减小了重力信号的衰减。同时, 它采用差分重力梯度技术, 有效地消除了非引力加速度的影响, 实现了重力主频信号的放大, 对重力场的高频部分更加敏感, 结合现有的地球重力场模型, 可以得到一个全新的、高精度的重力场。此外, GOCE 卫星可以确定梯度仪每个坐标轴的每对加速度仪之间 3 d 的重力变化^[10], 得到与实际地球重力场更加相符的重力场模型。GOCE 卫星确定的重力场增加了重力场的高频部分, 填补了 CHAMP 和 GRACE 卫星的空白, 提高了重力场的精度, 满足了一些学科对重力场精度的需求, 使人们有能力估计两极冰盖的动力和体积质量的变化, 建立更加精确的惯性导航系统, 更加精密地进行卫星定轨, 确定较好的用于数据连接的高程系统。同时它又是确定高精度大地水准面的前提和基础。大地水准面是一个接近海平面的等重力位面, 相对于理想椭球体面有大约 100 m 起伏。它的形状定义了地方水平面, 并在陆地上提供了地形的参考面, 这对固体地球质量分布研究、大地测量、海平面变化解释、海流及海洋热传输以及与此相关联的气象研

究和预报等方面来说都是非常重要的。GOCE 卫星的模拟数据计算表明, GOCE 卫星确定的大地水准面精度比现有的要高两个量级, 因此这将给地球科学的发展带来革命性的变化。

(2) 研究海洋环流

长期以来, 人们对于海洋与气候关系的认识是不充分的, 主要是对海洋环流知之甚少, 很难对气候变化给出准确的预报。海洋环流动力学的一个最重要信息是海洋表面和大地水准面的形状之差, 称为动态地形 (dynamic topography), 它是直接获得绝对平均海洋环流模式和静力学气压场的基本信息之一。

GOCE 卫星可以获得一些海洋高空间分辨率的重力场资料, 以弥补海洋重力资料的不足。一旦有了这些观测结果, 海洋大地水准面形状就可以在 100~200 km 空间尺度以 1 cm 精度精确确定。由于 GOCE 卫星提供了高精度的静态地球重力场和大地水准面 (独立于由卫星测高得到的准大地水准面), 且卫星雷达测高可以以同样的精度测定实际海洋面的形状, 则两者的差就是海洋静态时的动态地形, 它可以直接被转换成海洋面环流。如果结合过去、现在和将来的卫星测高数据, 这个方法就可以测定全球大尺度的绝对海洋面环流。绝对海洋面环流反映了海洋深部的洋流, 对其热量和二氧化碳运输形式的认识是全球气候模型及对长期海平面变化进行解释的前提条件。精确确定海洋面环流对于研究气候的小尺度变化和估计海洋热量的传递、海水质量的变迁十分重要, 而后者又是了解海洋在全球气候中作用的两个关键因素。此外, 海洋面环流的研究将有助于分析非线性海洋动力学、洋流的平均部分和变化部分之间的相互依赖关系, 丰富有关地球模型和海洋预测方面的知识。

(3) 研究地壳、地幔和地核, 预测地震

由于观测技术和条件的限制, 一些问题诸如地球核幔的耦合机制、软流层的对流问题、地核的组成等问题一直困扰着人们。地球内部的运动变化通过重力场和重力异常反应出来, 因此知道了地球的重力场和重力异常, 就能反演地球的内部情况。

GOCE 卫星为解决以上问题提供了可能。通过它的可以建立地幔粘弹模型, 使冰后期反弹研究有新的进展; 把重力异常转化为密度异常, 与地球的均匀球密度相比较, 能建立全球密度模型, 从而更好地解释地幔构造、均衡补偿和大地水准面起伏等。

预报地震灾害场的一个新途径是, 将模拟构造负荷产生的应力慢积累模型所获得的数据与 GPS 测量得到的形变分布相比较^[4], 这需要知道岩石圈和上地幔的密度异常。只有利用 GOCE 卫星所得到的重力场进行反演才可以得到具有足够精度和解析度的全球密度构造分布。

(4) 用于其他方面的研究

GOCE 卫星在两极冰层厚度、全球海洋面变化、定轨等方面的应用与 GRACE 等重力卫星的作用相当, 只是它提高了精度, 能得到更加准确的结果。

4 结 束 语

卫星重力研究的科学成就是国际大地测量学界继 GPS 之后的又一次革命性的突破,它不仅带动大地测量学本身的变革,还将推动其他相关科学领域的发展,为此,我们应高度重视和紧跟这一研究方向,充分利用 GRACE、CHAMP 以及即将发射的 GOCE 卫星的资料,为我国大地测量学及其相关科学的发展作出努力。建议从以下几个方面入手:

(1) 编撰属于我国自己的资料处理和预处理程序,为利用重力卫星的资料服务。

(2) 利用重力卫星资料,努力实现卫星重力测量结果与地面重力测量资料的同化,结合我国现有的重力场模型和地面点的重力资料,建立我国的高精度重力场,改善我国局部重力场参数。其中包括新建国家重力基准,填补中国大陆的重力测量空白区;推定至少具有分米级精度和 $10' \times 10'$ 分辨率的我国局部大地水准面。现今,我国东部地区的重力点密度优于西部,但是东部重力变化比西部平缓。另外,由于观测条件的限制,我国边境地区和海洋的重力点很少,因此利用这些重力点建立的重力场精度难以满足我国国防和大地测量学发展的需求。充分利用 GOCE 卫星重力资料和其建立的全球重力场模型,将极大地精化我国的重力场和水准面。

(3) 利用低轨重力卫星,开展重大自然灾害预报的研究。基于低轨重力卫星对全球重力场的敏感性,分析局部重力场产生变化的原因,结合实际建立的重力场与自然灾害之间、环境之间的关系,揭示地球系统质量重新分布对环境气候的影响,从而对重大自然灾害进行预报,为人民的生活、生产服务。

参考文献:

- [1] 陈俊勇. 测绘科学, 2002, 25(2): 8
- [2] 刘经南, 罗佳. 武汉大学学报, 2002, 27(6): 553
- [3] <http://op.gfz-potsdam.de/champ/>, 2004
- [4] 孙文科. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(1): 92
- [5] 黄斌, 胡小工. 天文学进展, 2004, 22(1): 35
- [6] 许厚泽. 测绘科学, 2001, 26(3): 3
- [7] http://www.esa.int/export/esaLP/ESAJJL1VMOC_goce_2.html, 2004
- [8] <http://www.goce-projektbuero.de/>, 2004
- [9] Johnny A J, Miguel A M. In: Bruce B ed. The Four Candidate Earth Explorer Core Mission, ESA_1233(1), The Netherlands: ESA Publications Division, 1999: 13
- [10] http://www.esa.int/export/esaLP/ESAYEK1VMOC_goce_0.html, 2004

GOCE Program and its Applications

LI Ke-hang^{1,2}, PENG Dong-ju^{1,2}, HUANG Cheng¹, FENG Chu-gang¹

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Current knowledge of the earth's gravity field, as derived from CHAMP and Grace's data, is incomplete, and the determined geoid can not reach the precision required by geophysics and the subjects related to Earth Science. GOCE (Gravity Field and Stead-state Ocean Circulation Explore), which will be launched by ESA in 2006, is the Earth Explorer Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Core Mission satellite based on CHAMP and GRACE. It can determine the geoid with an accuracy of 1 cm and spatial resolution (half wavelength) at length scales between 200 — 80 km. This paper briefly introduces the current gravity satellites' developing status and their limitations. The GOCE satellite's instruments, its scientific objectives and surveying principle, the important applications in geophysics field, etc., are discussed in detail in this paper. Finally, the applications of the data sources which are generated by GOCE and other gravity satellites are conceived in our country.

Key words: celestial mechanics; gravity gradiometry; review; GOCE; gravity field; satellite; tracking