

应用 CHAMP 卫星轨道和加速度数据恢复地球重力场

宋 雷¹, 黄 腾¹, 彭碧波²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国科学院测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077)

摘要:介绍了重力卫星 CHAMP、GRACE、GOCE 和利用卫星观测数据解算地球重力场的方法以及加速度数据的处理方法,探讨了基于能量守恒方法恢复地球重力场模型的原理.将基于能量守恒方法利用 CHAMP 卫星星历数据恢复的地球重力场模型与 EGM 96 重力场模型进行比较,结果验证了 CHAMP 卫星对地球中、长波重力场的敏感性,以及能量守恒方法恢复低阶地球重力场位系数的有效性.

关键词:卫星重力;地球重力场模型;能量守恒方法

中图分类号: P312.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2006)06-0676-04

早期的静态地球重力场模型主要是利用地面卫星跟踪资料获取地球重力场的长波部分,利用地面重力观测和卫星测高等资料获取地球重力场的中、短波长部分.近十几年来有关地球重力场的研究表明,经典模式恢复地球重力场,其静态部分无论是在空间分辨率还是在精度上都难以有明显改善,重力场时变部分的精度也难以有所突破.所有这些局限都要求在地球重力场的研究方面寻求更有效的途径,这就促使了卫星重力学的兴起^[1].卫星重力资料可使地球重力场和大地水准面的精度提高一个数量级以上,并可测定高精度的时变重力场.2000 年 7 月 15 日,由德国地球科学中心(GFZ)研制的首次采用高低卫-卫跟踪技术的 CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload) 重力卫星成功发射,迈出了卫星重力测量的重要一步^[2].本文主要基于能量守恒方法,利用 CHAMP 卫星轨道和加速度数据恢复地球重力场位系数模型.

1 卫星重力学研究现状

1.1 重力卫星简介

CHAMP 卫星是一颗低轨道、近极卫星,低轨道保证了它对地球重力场有高的敏感性,而近极轨道可以对全球进行连续的覆盖扫描.GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)卫星是美国国家宇航局(NASA)和欧洲联合研制的重力卫星,已于 2002 年 3 月发射升空.GRACE 卫星采用低-低卫星跟踪技术,利用微波测量装置测定两卫星间的距离和距离变率,通过距离变率可以探测出地球重力场的变化信息.CHAMP 和 GRACE 重力卫星主要是用于高精度地球重力场的中、长波测量以及长波的时变测量.GOCE(Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation)卫星是欧洲空间局经过多年研究确定的探测高精度、高分辨率地球重力场的卫星,GOCE 卫星星载的主要设备有 GPS/GLONASS 组合接收机和三轴重力梯度仪.GPS/GLONASS 组合接收机的卫星轨道跟踪数据提供低频部分的重力场观测值,重力梯度仪测量中、高频的重力场数据.CHAMP 卫星、GRACE 卫星、GOCE 卫星计划是卫星重力研究计划的一个整体系列,它们彼此互补并具有不同的科学应用价值^[2].

1.2 地球重力场的恢复方法

利用卫星观测数据解算地球重力场位系数,按解算方法,可分为时域法和空域法.时域法是将卫星星历观测值直接表示成引力位系数的函数,按最小二乘法或正则化解法直接求解位系数的解算方法.应用时域法建立观测方程时不包含任何的近似与约化,但观测方程数目多,组成和解算法方程时耗时巨大.空域法是利用卫星星历导出卫星高度处的扰动位或重力异常作为观测值,将问题转化为某个类型的边值问题求解位系

数的方法.空域法建立观测方程的数目大大减少,但进行了一些近似处理,不可避免地引入一些误差^[2-3].

按解算步骤,重力场位系数解算又可分为两步法和一步法.两步法是先计算 GPS 卫星的轨道,再把 GPS 卫星的轨道作为固定值解算地球重力场位系数.一步法就是将 GPS 卫星轨道、重力卫星轨道、地球重力场位系数、地球运动参数等均作为平差值整体解算.计算结果表明,一步法的解算结果精度较两步法有大的提高^[4].

2 利用能量法恢复地球重力场的数学模型

基于能量守恒原理恢复地球重力场的方法属于时域法,早在 20 世纪 60 年代这种方法就已经提出,直到专用于重力计划的 CHAMP 卫星的发射,CHAMP 卫星精密的轨道数据和非保守力加速度估计数据才使应用能量守恒方法恢复地球重力场变为可能.

CHAMP 卫星在地心惯性系下顾及地球自转和非保守力能量损耗的能量守恒方程可表示为^[2,4-8]

$$V_{\text{earth}} = \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 - V_{\text{sun}} - V_{\text{moon}} - \omega(xv_y - yv_x) - \int_0^t \mathbf{a}\mathbf{v}dt - E_0 \quad (1)$$

式中: V_{earth} ——地球引力位(不包括离心力位); $\mathbf{v}$ ——速度矢量, $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$, $\frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2$ 为单位质量卫星的动能; $V_{\text{sun}}, V_{\text{moon}}$ ——太阳和月球的摄动力位和引潮力附加位; ω ——地球自转角速度; $\omega(xv_y - yv_x)$ ——地球自转引起的位旋转效应项; $\int_0^t \mathbf{a}\mathbf{v}dt$ ——非保守力引起的能量耗散(energy dissipation); E_0 ——能量积分常量.式(1)是利用能量方法恢复地球重力场模型的基本方程.

地球引力位正规化的球函数级数式为^[9]

$$V_{(\rho, \theta, \lambda)} = \frac{G_M}{\rho} \left[1 - \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{k=0}^n \left(\frac{a}{\rho} \right)^n (\bar{C}_{nk} \cos k\lambda + \bar{S}_{nk} \sin k\lambda) \bar{P}_{nk}(\cos \theta) \right] \quad (2)$$

式中: θ, λ ——卫星的余纬和经度; a ——地球平均半径; G_M ——地球引力系数; $\bar{P}_{nk}(\cos \theta)$ ——归一化的缔合勒让德多项式; $\bar{C}_{nk}, \bar{S}_{nk}$ ——正常化的地球引力位系数; n, k ——勒让德多项式的阶和次.将式(2)代入式(1)得:

$$\frac{G_M}{\rho} \left[1 - \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{k=0}^n \left(\frac{a}{\rho} \right)^n (\bar{C}_{nk} \cos k\lambda + \bar{S}_{nk} \sin k\lambda) \bar{P}_{nk}(\cos \theta) \right] = \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 - V_{\text{sun}} - V_{\text{moon}} - \omega(xv_y - yv_x) - \int_0^t \mathbf{a}\mathbf{v}dt - E_0 \quad (3)$$

对于卫星的位置、速度和加速度都为已知的历元,式(3)左端 $\bar{C}_{nk}$ 和 $\bar{S}_{nk}$ 为未知数,其余的均为已知数,除 E_0 外,右端各项也可以计算出相应的数值, E_0 即可以作为未知数处理,也可以通过两个方程差分消去.以 E 代表某一历元卫星位置处的扰动位,对于每个历元都可以计算出具体数值与其对应,式(3)可以简写为

$$\sum_{n=2}^{\infty} \sum_{k=0}^n (K_{nk} \bar{C}_{nk} + L_{nk} \bar{S}_{nk}) = E \quad (4)$$

式中 K_{nk} 和 L_{nk} 可根据卫星某个历元的轨道位置和加速度数据计算出具体数值.获得卫星位置的扰动位时间序列,组成方程组,即可按最小二乘法恢复地球引力场位系数.式(4)就是利用能量守恒原理恢复反演地球重力场的数学模型.

3 加速度数据处理应注意的问题

a. 由于加速度资料是通过电信号从 1 s 采样率的观测资料经过转换、改正、平滑等预处理得到的 10 s 间隔结果,使用之前需要对数据进行加速度偏差因子、尺度因子的修正.GFZ 数据中心提供的 CHAMP 加速度计数据文件中给出了用于标校的参数(包括加速度改正数(洛仑兹力改正和模型改正)、尺度因子和偏差参数).

b. 式(1)中使用的是惯性系下的非保守力加速度,而 GFZ 数据中心提供的是仪器固定系的非保守力加速度值,使用之前必须把仪器固定系加速度值转换到惯性系.

c. GFZ 数据中心提供的加速度数据文件中的姿态数据经常出现间断,一般间断几个历元至几十个历元不等.姿态数据间断在 10 个历元以下时,线性插值姿态数据对于计算惯性系下非保守力加速度影响不大,但

在姿态间断数据大于 15 个历元时,需要精密计算非保守力加速度时线性插值姿态数据就需要谨慎处理^[10]。

d. 由于 CHAMP 卫星加速度仪的其中一个电极出现故障,导致所测径向加速度值出现大的偏差,因此若径向加速度观测值未得到合理的处理,计算所得的耗散能量会产生较大的误差,目前许多学者建议采用如下公式^[3,8]计算:

$$F_{\text{drag}} = \int_{t_0}^t |\boldsymbol{v}| a_y dt$$

(5)

式中: $|\boldsymbol{v}|$ ——速度矢量的模; a_y ——加速度仪沿迹方向的分量。原因在于非保守力中量级最大的是大气阻力,而大气阻力引起的摄动加速度正好由加速度仪沿迹方向的分量 a_y 测得。

4 利用能量法恢复地球重力场的结果

利用 GFZ 数据中心提供的精密星历数据(PSO)和加速度数据(ACC)作为恢复重力场的原始数据,采用 2002 年 3 个不同时间段共 180d 的数据恢复 3 组完全到 50 阶次的地球重力场模型,分别命名为 GFM01、GFM02、GFM03,将 3 组重力场模型与 EGM96 重力场模型(EGM96 是美国国家宇航局利用卫星定轨资料、海洋测高观测值以及各国的地面重力观测数据联合计算的 360 阶全球重力场模型,是目前同阶次中最好的重力场模型)进行比较,大地水准面差值统计结果列于表 1。

表 1 GFM 系列重力场模型与 EGM96 模型大地水准面差值比较结果

Table 1 Statistical result of geoid difference between GFM and EGM96 gravity field models

重力场模型	与 EGM96 模型大地水准面差值/m			
	最大值	最小值	平均值	标准差
GFM01	2.557	-3.564	0.006 6	0.076 7
GFM02	2.611	-3.648	0.005 9	0.076 9
GFM03	2.603	-3.641	-0.002 4	0.081 4

GFM 系列重力场模型与 EGM96 模型计算的全球 1°×1°大地水准面差值结果如图 1 所示。

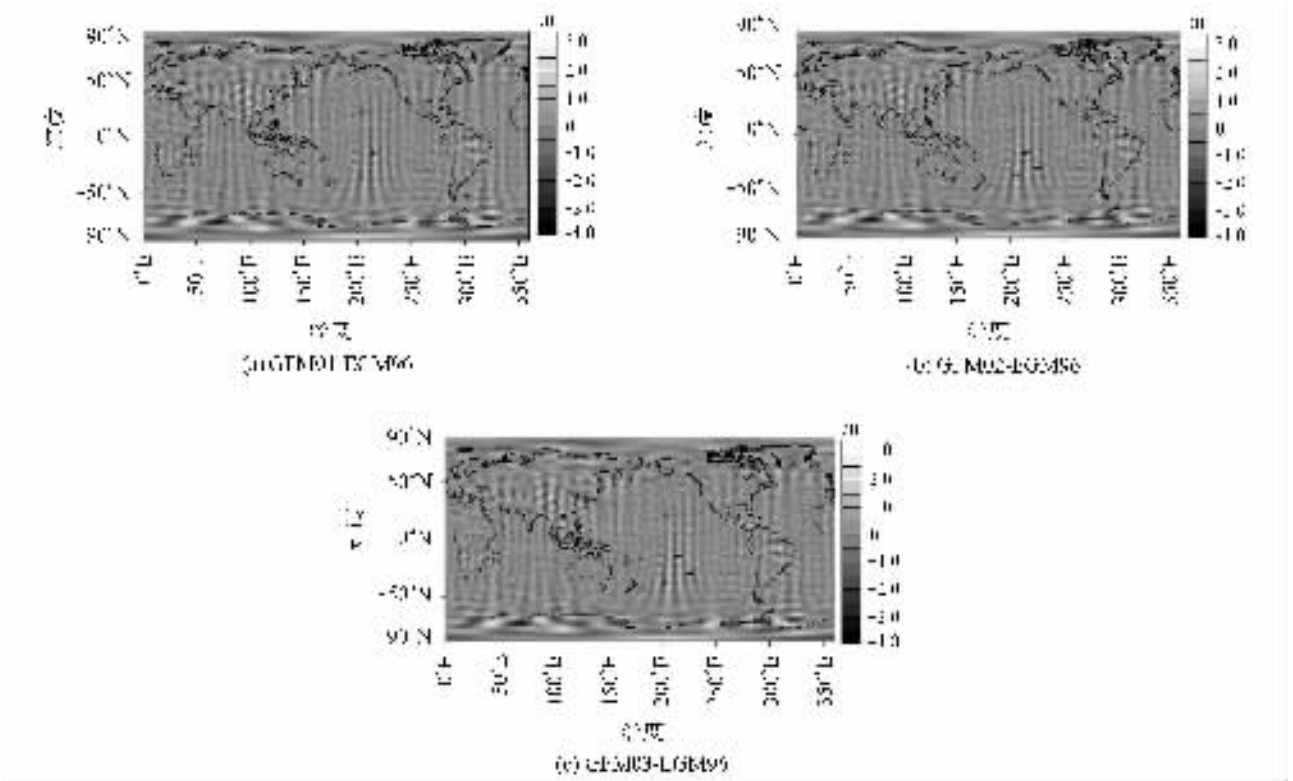


图 1 GFM 系列重力场模型与 EGM96 模型计算的全球 1°×1°大地水准面差值结果

Fig.1 Global 1°×1° geoid difference between GFM and EGM96 gravity field models

从图 1 和表 1 可知,GFM 系列地球重力场模型与 EGM96 模型计算的全球 1°×1°大地水准面差值一般在 0.5 m 以下,平均值小于 0.008 m。这说明卫星重力观测数据恢复低阶地球重力场位系数有较好的精度,也说明了 CHAMP 卫星观测数据大大地改善了地球重力场长波部分的精度。大地水准面和重力异常差值较大的地方在南北极地区、高原地区,这些地区正是构建 EGM96 模型时数据不足和卫星数据质量较差的地区。若适当增加数据量或者与其他卫星的观测数据联合计算,还可取得更满意的结果。

5 结 语

卫星重力研究的科学成就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.利用卫星重力观测资料恢复地球重力场将大大提高地球重力场的时空分辨率及精度,对推动大地测量学、固体地球物理学和海洋学等学科的发展具有重要意义,对我国的基础测绘和国防建设的发展也具有重要的实用价值.

致谢:德国 GFZ 数据中心为本文的研究工作提供了 CHAMP 卫星观测数据,在此表示感谢!

参考文献:

[1] 许厚泽. 卫星重力研究 21 世纪大地测量研究的新热点[J]. 测绘科学, 2001, 26(3): 382-384.

[2] 宋雷. 能量守恒方法恢复 CHAMP 卫星地球重力场模型[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所, 2005.

[3] 徐天河. 利用 CHAMP 卫星轨道和加速度计数据推求地球重力场模型[D]. 郑州:信息工程大学, 2004.

[4] 陈俊勇, 党亚民. 国际大地测量和地球物理联合会 2003 年日本大会札记[J]. 测绘科学, 2003, 28(3): 10-12.

[5] VISSER P, SNEEUW N, GERLACH C. Energy integral method for gravity field determination from satellite orbit coordinates[J]. Journal of Geodesy, 2003, 77: 207-216.

[6] JEKELI C. The determination of gravitational potential differences from SST tracking[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 1999, 75: 85-101.

[7] HOWE E, STENSENGT L, TSCHERNING C C. Analysis of one month of CHAMP state vector and accelerometer data for the recovery of the gravity potential[J]. Advances in Geosciences, 2003(1): 1-4.

[8] GERLACH C, SNEEUW N, VISSER P, et al. CHAMP gravity field recovery using the energy balance approach[J]. Advances in Geosciences, 2003(1): 73-80.

[9] 管泽霖, 宁津生. 地球形状与外部重力场(下) [M]. 北京: 测绘出版社, 1981: 295-350.

[10] 宋雷, 彭碧波, 周旭华. 插值法恢复 CHAMP 卫星姿态间断数据对惯性系非保守力加速度的影响[J]. 测绘科学, 2005, 31(1): 35-37.

Recovery of earth gravity field with CHAMP data of orbit
and acceleration

SONG Lei¹, HUANG Teng¹, PENG Bi-bo²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract :An introduction was given to the gravity satellites CHAMP, GRACE, and GOCE and methods for dealing with the data of acceleration and calculating earth gravity field with observed data from gravity satellites. The principle of model development for recovery of earth gravity field based on energy conservation theory was discussed. The comparison of the earth gravity field model based on the observed data from CHAMP satellite and energy conservation theory with EGM96 gravity field model shows that CHAMP satellite is sensitive to medium and long wavelength of gravity field, and that energy conservation theory is effective for recovery of low-order potential coefficients of earth gravity field.

Key words :satellite gravity ; earth gravity field model ; energy conservation method