

# 三颗感受或(和)测量地球引力场的卫星 ——CHAMP、GRACE、GOCE

张 昌 达

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:** 描述了三颗引力卫星 CHAMP、GRACE 和 GOCE 的工作原理,介绍了重要的以及最新的利用 GRACE 数据建立的全球重力场模型 EIGEN-CG01C、GGM02。

**关键词:** 引力卫星;量子重力梯度仪;重力场模型

**中图分类号:** P631.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2005)05-0377-06

## 1 地球的引力场

地球的引力场是由空间尺度不同、幅度不同的成分组成的,而且随时间而变化。在近地轨道上运行的人造地球卫星,由于复杂的地球引力场的作用,卫星轨道经受摄动。精确地确定卫星运行轨道,能够恢复(推导出)引力场,建立地球的全球引力场模型,绘制出重力异常图<sup>[1]</sup>。利用人造地球卫星导出或(和)测量地球引力场有以下几个特点:①可以迅速、全面地获取有关数据,通过数据处理,得到全球重力图,全面覆盖地球的每一个角落,不分国界,不会留下空白,便于全面、深入地分析和研究问题;②可以隔一段不长的时间对全球进行一次观测,就是说,由于地球物质重新分布(例如大型盆地地下水位的变化,巨型水库蓄水)会引起重力场的变化<sup>[2-3]</sup>,可对重力场进行动态监测,了解重力场随时间的变化;③重力测量从地球表面测量上升为航空测量,再上升到空间测量,这是一种发展趋势;卫星重力测量的精确度和空间分辨率从 20 世纪 80 年代的  $20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 50 km(最短波长)到目前的  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 10 km,以至更精细,并且开始应用于地质找矿工作,也是一种发展趋势<sup>[4-5]</sup>。现在,欧、美科学家正在朝这个方向努力。到 2020 年前后,卫星引力异常图也许会在勘查油气田和其他矿产等方面派上用场。

## 2 三颗引力卫星 CHAMP、GRACE、GOCE

在近地轨道上运行的人造地球卫星,由于复杂的地球引力场的作用,卫星轨道经受摄动。如果能

够精确地确定卫星运行轨道,就能够恢复(推导出)引力场,因此在引力场中,运动的卫星恰似一个引力传感器(重力仪),这样任何一颗人造地球卫星都可称为引力卫星。为了利用近地轨道卫星测出更精确、空间分辨率更高的重力异常图,欧美科学家积极开展研究工作,先后提出 10 多种卫星引力测量方案。最近德国发射的重、磁两用卫星 CHAMP,德国和美国合作发射的引力卫星 GRACE 和欧洲航天局即将发射的引力卫星 GOCE 分别体现其中 3 个优秀的、具有代表性的方案(SST-hl、SST-II 和 SG)<sup>[6]</sup>。

### 2.1 CHAMP

CHAMP 是 2000 年 7 月 15 日德国地球科学研究中心 GFZ(Geoforschungs zentrum)发射的一颗地球物理研究与应用卫星,是一颗重、磁两用卫星。CHAMP 是地球物理研究和应用挑战微型卫星负荷(卫星)(CH allnging microsatellite payload for geophysical research and application)的缩写,为了导出引力异常,它除了装有 2 种磁测仪器外,还装有新一代的星载 GPS 接收机,可以连续不断地、精确地确定卫星的位置,用轨道摄动的数据推算引力异常。GPS 卫星的轨道高度是 20 180 km,而 CHAMP 的轨道高度约 300~500 km,用一颗高空卫星来追踪低空卫星以导出地球引力异常,这种方案称为 SST-hl(satellite-to-satellite tracking in the high-low mode,记作 SST-hl)。CHAMP 上还装有法国航空和航天研究中心(Office National d'Etudes et de Recherches Aerospatiales, ONERA)设计制造的一台静电 STAR 加速度计[electrostatic STAR accelerometer, STAR 是空间研究三轴加速度计(space three-axis accelerometerf

or research mission) 的英文缩写], 用来测量作用于卫星的非引力加速度, 如空气阻力、地球反照和太阳辐射等, 以获得仅仅由地球引力异常导致的轨道偏移。此外还有一组星光仪确定卫星相对于惯性参考系的姿态。CHAMP 的发射, 第一次利用单独一颗卫星的仪器测定地球的引力场, 因此使建造引力场模型的工作进入了一个新时期<sup>[7]</sup> (图 1)。

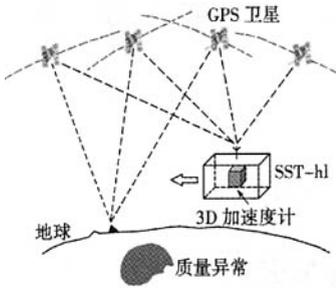


图 1 CHAMP 卫星原理(引自文献[8])

2.2 GRACE

实际上 GRACE 是双星, 是恢复引力场和气候实验(gravity recovery and climate experiment) 的英文缩写, 由美国 NASA 和德国航天研究中心(Deutsches Zentrum fur Luft-und Raumfahrt, DLR) 共同出资 1.45 亿美元研制, 2002 年 3 月 17 日由俄罗斯发射。GRACE 飞行任务由 2 颗一模一样的卫星来完成, 它们一前一后相距 220 km, 在同一条轨道上飞行, 高度 485 km, 极地圆形轨道, 倾角 89°。GRACE 上也装有在 CHAMP 上使用过的高-低卫星追踪仪器, 还装有经过改进的超级 STAR(super STAR) 静电加速度计。2 颗卫星之间的距离用 K-频带 18 ~ 40 GHz 测距系统连续不断地测定, 测量精度优于 10 μm。两星间的距离变化反映两星感受到的引力的变化, 也就是说, 2 颗卫星之间距离的变化是地球引力场特征的一种直接的度量。用一颗低空卫星追踪另一颗低空卫星以导出地球引力异常, 这种方案称为 SST-II(Satellite-to-Satellite Tracking in low-low mode, 记作 SST-II)。有的科学家认为, 用这种方案是“测量”地球引力场沿卫星运行方向的梯度。同时以 SST-hl 模式测量轨道的摄动, 由此也可换算出引力场。SST-hl 和 SST-II 适合于发现地球引力场的中、长波成分<sup>[9]</sup> (图 2)。

2.3 GOCE

GOCE 是欧洲航天局 ESA(European Space Agency) 计划将要发射的一颗恢复地球引力场的卫星, GOCE 是重力场和稳态洋流探测卫星(the gravity field steady-state ocean circulation explorer) 的英文缩写。按计划, GOCE 将于 2006 年发射, 它将沿一条万方数据

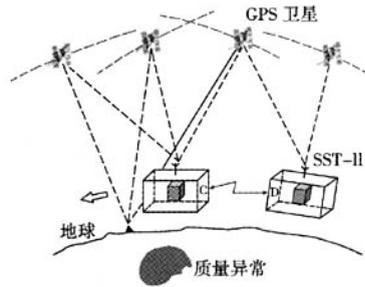


图 2 GRACE 卫星原理(引自文献[8])

非常接近圆形的太阳同步黎明-黄昏轨道飞行, 高度 250 km, 寿命约 1 年。卫星上装载 2 台关键的仪器: 一台是用于大地测量的 GPS/GLONASS 接收机, 确定轨道的精度为几个厘米, GLONASS 是全球导航卫星系统(global navigation satellite system) 的英文缩写, 是苏联研制的导航系统, 非常类似于 GPS, 由轨道的摄动可换算出中、长波长的引力场, 最高球谐约 60 阶次; 一台引力梯度仪(由三对伺服控制电容加速度计组成, 每一对加速度计的距离为 0.5 m) 测量 3 个坐标轴方向引力位的二阶导数, 换算出引力场的中、短波长成分, 其噪声水平低于 3 mE( $3 \times 10^{-12} \text{s}^{-2}$ , mE: milli Eotvos 毫厄缶), 可以测量  $10^{-13} \text{m/s}^2$  数量级的加速度。由于卫星轨道较低, 测量引力梯度的灵敏度较高, GOCE 确定大地水准面的准确度为 1 cm, 确定引力的准确度为  $1 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ , 空间分辨力为 100 km。在卫星上装载引力梯度仪直接测量引力位的二阶导数, 再换算出引力场, 这种方案称为卫星重力测量 SGG(satellite gravity gradiometry, 记作 SGG)。GOCE 是第一次实现 SGG 方案的代表, 而且是一颗低轨道卫星, 适合发现地球引力场的中、短波长成分<sup>[10-11]</sup> (图 3)。

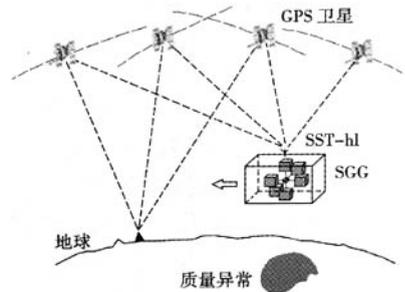


图 3 GOCE 卫星原理(引自文献[12])

除了以上介绍的 3 颗引力卫星 CHAMP、GRACE 和 GOCE 外, 接续的引力卫星有由中国台湾和美国合作、将要在 2006 年发射的 COSMIC。COSMIC 是气象、电离层和气候观测卫星星座的简称(constellation observing system for meteorology, Iono-

sphere and climate, 缩写为 COSMIC), 又称为中华卫星三号 ROCSAT-3。COSMIC 是一个由 6 颗微型遥感卫星组成的卫星星座, 其目的是收集大气数据, 进行天气预报及电离层和重力等方面的研究。卫星轨道高度为 800 km, 寿命 5 年。每颗卫星上装有用于大地测量的 GPS 接收机, 确定位置的精度是 10 cm, 确定速度的精度是 0.1 mm/s, 可以用 SST-hl 方案导出引力场。在重力研究方面, 不仅可以恢复稳态引力场, 而且由于卫星运行时间为 5 年, 还可以研究引力场随时间的变化。中国台湾空间规划局选定美国轨道科学公司为其制造卫星, 花费 0.56 亿美元, 加上发射费用, 估计总共约需 1 亿美元。这些卫星的运行将由中国台湾的一个控制中心负责, 获得的数据传输到美国科罗拉多州博尔德进行分析存档, 并近于实时地提供给国际科学组织使用。目前, 中国台湾等地的一些科学家正就有关 COSMIC 的问题展开研究<sup>[13]</sup>。

### 3 重力梯度测量

要用卫星测量地球的引力, 必须考虑爱因斯坦广义相对论的一个基本原理——等价原理 (the principle of equivalence, 或称等效原理)。等价原理说, 在一个封闭系统内的观测者不能分辨 (区分) 作用于他的力是引力还是他所在的整个系统正在作加速运动; 也可以说, 加速度造成的“重量感”与万有引力定律定义的引力的效应完全相同。如果我们将一台重力仪安装在一颗卫星内发射升空, 那么卫星内的重力仪就是“封闭系统内的观测者”, 它不能区分引力和惯性力, 因而不能测出我们想得到的地球引力值; 但可安装多台重力仪, 构成梯度装置, 消除观测平台的加速度, 测出引力的梯度, 进而恢复 (导出) 引力场。

目前, 许多国家的科学家积极研究和开发超导重力梯度仪 (SGG)。与之竞争的有美国喷气推进实验室 (JPL) 和耶鲁大学最近正在研究供卫星用的量子引力梯度仪 (QGG), 其地面仪器原型的测量精度可达 0.1 E, 目前正在努力提高精度, 使测量精度达到 0.1 mE 并能上天, 目标是能测定异常幅度和分布范围都很小的引力异常, 从空间解决勘查油气田之类的地质问题<sup>[14-16]</sup>。这种仪器所依据的原理是原子干涉测量, 作者曾著文解说<sup>[17]</sup>。

图 4 中的圆圈表示 2 个磁-光陷阱 MOT (原子圈闭) 和构成梯度仪的排列, 圆圈中间的小圆球代表被捕获的原子云团, 圆圈周围的 4 个箭头表示迎面传播的激光束, 还有一对垂直于纸面。2 个原子云

团共用同一喇曼激光束 (common raman beam), 可以获得极大的共态噪声抑制效果。 $g$  是重力加速度,  $a$  是活动平台的加速度,  $\Delta\Phi$  是垂直方向上 2 点的重力加速度之差产生的相位差, 由  $\Delta\Phi$  可求得 2 点的重力加速度之差, 可见不受活动平台加速度的影响。

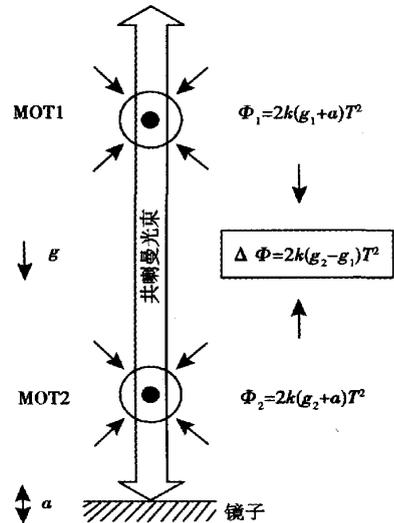


图 4 原子重力梯度仪原理 (引自文献<sup>[15]</sup>)

在欧洲与美国的联合空间项目——卫星检验等价原理 STEP (the satellite test of the equivalence principle) 中, 科学家们使用超导引力梯度仪 (superconducting gravity gradiometer, SGG), 利用超导磁力悬浮原理结合超导量子干涉装置 (SQUID), 测量引力梯度的灵敏度为  $2 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}<sup>[18]</sup>。SGG 的灵敏度很高, 但由于需用液氮, 在空间工作时间不长。$

### 4 重力场模型

为了表示地球引力场的空间分布状况, 要建立一个地球引力场的模型, 在地球物理学中, 常用一个球谐函数的展开式来描述地球的引力场。所谓模型, 是由一个球谐函数的展开式和展开式中的一些球谐系数组成, 展开式中所取的项数愈多, 系数也愈多, 刻画引力场也就愈细致。综合利用卫星、海洋测高、地面观测资料 (包括陆地、海上重力测量和航空重力测量) 算出系数, 就可建立地球引力场模型, 也可以仅仅根据对多颗卫星轨道的观测资料建立地球引力场的模型。现在, 由于 GPS 和 GLONASS 这类系统的应用, 可以仅仅根据对单独一颗卫星轨道的观测资料建立地球引力场模型 (satellite-only)。

据不完全统计, 从人造地球卫星上天至今, 科学家们构造了近 80 个全球引力场模型。目前最好的模型是美国 NASA 的科学家于 1998 年公布的

EMG96 模型,360 阶。有些科学家(包括我国的科学家)还构造了所谓的修订的(tailored)模型,应用于特定的地域,阶次甚高。EGM96 是汇集各种数据构造的,这个模型经过广泛检测,已应用于卫星轨道以及陆地和海洋大地水准面的确定<sup>[19-20]</sup>。

还有一些科学家研制出了甚高阶的重力场模型,例如由德国 Georg Wenzel 构建的 GPM98A、GPM98B、GPM98C,最高阶次  $1\ 800 \times 1\ 800$ ,对应的空间分辨力为 10 km,此前他为欧洲研制的 GPM3E97A 模型,最高阶次就是  $1\ 800 \times 1\ 800$ <sup>[21]</sup>。

我国科学家陆洋、张克非和许厚泽也推出了适合于中国的 720 阶的区域重力场模型。他们还研制了  $N_{\max} = 3\ 600$  阶的西北太平洋地区区域地球位场模型,在建模中联合利用 CHAMP 和由海洋测高结果算出的重力数据。这几位作者认为,他们的这个模型比 GPM98C 优越,空间分辨力为 5 km<sup>[22-23]</sup>。

在 21 世纪的头几年,德、美科学家利用 CHAMP 和 GRACE 卫星数据建立了一些重力场模型。

最近,德国 GFZ 于 2004 年 10 月 29 日公布了综合重力场模型 EIGEN-CG01C(combined gravity field model EIGEN-CG01C),德国和法国的科学家利用 CHAMP(860 d)和 GRACE(109 d)的卫星引力数据以及地面  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  数据(地面重力测量和测高)建立了一个高分辨力的全球重力场模型,360 阶、次,全球自由空气重力异常的分辨力为 100 km(模型中重力场最短波长成分的波长为 100 km)。利用这个新的高精确度的重力场模型,固体地球物理学家可以更精确地从空间推断地球内部的构造<sup>[24]</sup>。

美国 NASA 也于 2004 年 10 月 29 日公布了 GRACE 重力模型 GGM02(GRACE gravity model 02)。GGM02 根据从 2002 年 4 月 4 日到 2003 年 12 月 31 日期间,共计 363d,GRACE 的飞行数据建立。这个模型有 2 种形式:一种是 GGM02S,160 阶,完全由 GRACE 卫星数据建立,没有任何其他信息约束;另一种是 GGM02C,200 阶,有地面重力信息约束。将 GGM02S 自由空气异常图与以前的相关图件进行对比,分辨力有很大的提高,在青藏高原及邻近地区,这一点特别明显,应该考虑在这个地区和其他地区的应用问题<sup>[25]</sup>。

20 世纪下半叶,地球物理学家建立了国际地磁参考场(IGRF),用来描述源于地球外核的主要磁场,而且追溯到 1945 年。目前,针对不同的地磁场成分,正在建立所谓的综合模型(comprehensive model,已有 CM3、CM4)<sup>[26]</sup>。地球重力场的建模工作是否会朝着建立一个统一的参考模型方向开展万方数据

呢?

## 5 卫星引力异常的解释问题和建议

以往,卫星引力异常主要用来解决海底地质构造问题,近年来开始用于海区油气勘查工作。有的科学家也尝试用卫星重力异常来解决陆地的大地构造问题。卫星重力资料的一个很重要的优点就是覆盖面广,覆盖全球每一个角落,不分国界。例如,印度科学家在关于欧亚板块和印度板块碰撞的研究工作中就利用了卫星重力资料。关于由海洋测高导出的重力异常在解释全球构造中的作用,如果仔细分析对比卫星重力异常分布和板块构造,就会有深刻的印象。

国内,在刘光鼎院士编撰的一本图集中,收录了利用不同阶次的卫星重力异常计算对应的地幔流应力场的成果<sup>[27]</sup>;新疆地矿部门利用卫星重力资料结合地面重力资料,对广阔区域的大地构造问题进行了探讨,他们一方面利用美国 NASA 公布的  $1^\circ \times 1^\circ$  的数据,另一方面与中国地质大学(武汉)郭樟民合作,利用 GEM10B 模型计算了新疆部分地区的重力异常并作了初步解释<sup>①</sup>;中国地质大学(武汉)周国藩等也曾利用卫星重力异常对青藏高原的地质构造问题作了探讨<sup>[29]</sup>;长春地质学院申宁华教授和她的学生们从一个国内出版的图集中的卫星重力异常图上取数,建立了球冠谐和分析模型,据此,在中国大陆范围内,对卫星重力异常与地质构造的关系,作了

① (卫星重力异常特征及地质解释:在研究过程中,获得两种卫星重力成果,一种是  $1^\circ \times 1^\circ$  美国卫星重力图(新疆部分);一种是利用地球重力场模型的位系数通过计算求得的重力异常。虽然统称卫星重力异常,但其显示的重力异常特征却截然不同,因此对这 2 种资料的解释推断成果也存在较大的差别。 $1^\circ \times 1^\circ$  美国卫星重力异常新疆部分的特征显示主要为相对升高的重力高异常,由异常强度  $200 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  等值线构成一个范围较大的圈闭,其中包括 3 个局部重高中心,一个位于巴楚地区,异常强度  $(-80 \sim -150) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ;一个位于库鲁克塔格地区,异常强度  $-125 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ;一个位于哈密南,异常强度  $-100 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。异常总体成北东方向延伸,长约 1 600 km,宽约 400 ~ 500 km。中国地质大学(武汉)郭樟民利用 1981 年美国哥达德宇航中心发表的 GEM10B 地球重力场模型的 2—36 阶球谐系数计算了西部经度  $76^\circ \sim 100^\circ$ ,纬度  $30^\circ \sim 50^\circ$ ,包括新疆地区的卫星重力异常,其新疆地区显示为北西向延伸的重力低异常,有 2 个异常中心,一个是库尔勒,一个是哈密南部。异常强度为  $-50 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,向两侧异常强度逐渐增高,尤其是南部由且未经和田往南形成巨大的卫星重力异常梯级带,再往南进而成为北西向延伸的卫星重力高异常,与新疆卫星重力低异常基本平行,重力异常强度为  $34.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,构成西藏高原重力高异常。2 个异常中间为昆仑山至阿尔金山的巨大重力梯级带。卫星重力异常与地面区域布格重力异常对比昭示,两者异常相反对应。似乎表明地壳和地幔物质之间可能存在均衡关系。——引自新疆地质矿产信息网.地球物理勘查,新疆区域重力场特征,http://www.xjdk.net/index.asp.

详尽的阐述,并出版了专著<sup>[30]</sup>。总之,我们觉得我国的科技工作者在卫星重力异常的利用方面,作了一些初步的、有益的探索,但是研究工作不够系统、不够全面、不够深入。现在,利用卫星恢复地球引力场的工作进步很快,地球引力场模型的阶次和精度越来越高,也就是说,刻画重力异常的分辨率和精度越来越高,卫星重力异常越来越清晰地显现在我们的眼前。

我国刚开展航空重力测量试验工作,将来开展起来也十分费钱费时,时不我待。因此目前应该特别注意并充分利用卫星重力的成果:迅速收集和分析可以获得的数据和信息,尽快编出各种图件,特别是西部地区 and 海域的图件;研究卫星重力异常与地面重力异常的关系,先定性,后定量,从广大的平原,高原地区(如塔里木、华北、藏北),海区开始,再转向高山地区;研究从卫星重力异常中剔除地形影响的方法;从行星和月球的探测和成果解释工作中,吸取先进的、有用的方法、技术,用于研究地球;地球物理学家与地质学家密切合作,积极进行卫星引力异常的解释工作。

致谢:衷心感谢张莹先生给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] Gunter Seeber. 卫星大地测量学[M]. 赖锡安译,王庆庭校. 北京:地震出版社,德文版1989年出版,英文版(增订)1993年出版,本书根据英文版译出,1998.
- [2] Boy J P, Chao B F. Time-variable gravity signal during the water impoundment of China's three gorges reservoir[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(24): 53-1 - 53-4.
- [3] Ramillien G, Cazenave A, Brunau O. Global time variations of hydrological signals from GRACE satellite gravimetry[J]. Geophysical Journal International, 2004, 158(3): 813 - 826.
- [4] Green Ch M, Fairhead J D, Maus S. Satellite-derived gravity: where are we and what next[J]. The Leading Edge, 1998, 17(1): 77 - 79.
- [5] Fairhead J D, Green Ch M, Odegard M E. Satellite-derived gravity having an impact on marine exploration[J]. The Leading Edge, 2001, 20(8): 873 - 876.
- [6] Committee on Earth Gravity from Space, National Research Council, Satellite Gravity and the Geosphere. Contributions to the study of the solid earth and its fluid envelop[M]. Washington: The National Academies Press, 1997.
- [7] Reichber Ch. CHAMP Mission[EB/OL]. [http://op.gfz-potsdam.de/champ/index\\_CHAMP.html](http://op.gfz-potsdam.de/champ/index_CHAMP.html).
- [8] tu-Graz Maggi. Measurement principle and comparison with CHAMP and GRACE[EB/OL]. <http://www.cis.tugraz.at/mggi/>.
- [9] Reichber Ch. GRACE Mission[EB/OL]. [http://op.gfz-potsdam.de/grace/index\\_GRACE.html](http://op.gfz-potsdam.de/grace/index_GRACE.html).
- [10] ESA (European Space Agency), GOCE mission overview [EB/OL]. [http://t2wesa.r3h.net/export/esaLP/ESABQK1VMOC\\_goce\\_0.html](http://t2wesa.r3h.net/export/esaLP/ESABQK1VMOC_goce_0.html).
- [11] Das GOCE-Projektbüro Deutschland (German GOCE Project Bureau), Ausgew?hlte Folien zu GOCE, den Sensoren und zu Anwendungen des GOCE-Schwerefeldes [EB/OL]. <http://www.goce-projektbuero.de/seiten/folien.html>.
- [12] Das GOCE-Projektbüro Deutschland. Die Mission GOCE [EB/OL]. <http://www.goce-projektbuero.de/>.
- [13] Space Program Office of Taiwan, China, ROCSAT - 3/COSMIC [EB/OL]. <http://www.orbital.com/PrinterFriendly.php?NavMenuID=203,LastModified:08/24/2005>.
- [14] McGirk J M, Kasevich M A, Kasevich M A, et al. Sensitive absolute gravity gradiometry using atom interferometry[J]. Phys Rev A, 2002, 65: 33 - 608.
- [15] Yu N, Maleki L, Maleki L, et al. Quantum Gravity Gradiometer Sensor for Earth Science Application[J]. JPL, 2003.
- [16] Moring F, Washington J R. Orbiting gravity mappers might spot oil fields[J]. Aviation Week & Space Technology, 2002, March 3.
- [17] 张昌达. 利用原子干涉仪测量重力加速度[J]. 物探与化探, 2000, 24(5): 321 - 326.
- [18] Vol Moody M, Ho Jung Paik, Canavan E R. Three-axis superconducting gravity gradiometer for sensitive gravity experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(11): 3957 - 3974.
- [19] Lemoine F G, Kenyon S C, Factor J. K, et al. The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96[A]. NASA Technical Paper NASA/TP-1998-206861[C]. Greenbelt: GODDARD Space Flight Center, 1998.
- [20] Lemoine F G, Smith D E, Kunz L, et al. The development of the NASA, GSFC and NIMA joint geopotential model[A]. International Symposium Gravity, Geoid and Marine Geodesy, September 30 - October 5, 1996, Tokyo, Japan; International Association of geodesy Symposia, Berlin: Springer Verlag, 1996, 117: 461 - 469.
- [21] Wenzel G. Ultra high degree geopotential models GPM98A, GPM98B and GPM98C to degree 1800[EB/OL]. 1998, Preprint of a paper to be submitted to the Bulletin of the International Geoid Service. <http://www.gik.uni-karlsruhe.de/~wenzel/gpm98abc/gpm98abc.htm>.
- [22] Yang L U, Hsu H T, Jiang F Z. The regional geopotential model to degree and order 720 in China [R]. 22<sup>nd</sup> IUGG congress, July 1999, Birmingham, UK, 1120G3/W/42 - A5.
- [23] Lu Y, Zhang K, Hsu H. Development of a regional geopotential model to 3600 degree through a combination of CHAMP and surface gravity data[M]. IUGG 2003, Abstract, July 2003.
- [24] Reigber Ch (Originator). Combined gravity field model EIGEN-CG01C, 24, 2004[EB/OL]. [http://op.gfz-potsdam.de/champ/results/grav/009\\_eigen-cg01c.html](http://op.gfz-potsdam.de/champ/results/grav/009_eigen-cg01c.html).
- [25] Tapley B J, Ries S, Bettadpur D, et al. GGM02-an improved earth gravity field model from GRACE (GRACE Gravity Model 02)-released October 29, 2004[EB/OL]. <http://www.csr.utexas.edu/grace/>.
- [26] 张昌达. 卫星磁测的过去·现在·未来[J]. 物探与化探, 2003, 17(5): 329 - 332.

