

深空卫星重力测量计划研究综述

郑伟¹, 鄢建国², 李钊伟¹

(1. 中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室, 北京 100094;
2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430077)

摘要: 地球卫星重力测量计划CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload)、GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)、GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) 和月球卫星重力测量计划 (Gravity Recovery and Interior Laboratory, GRAIL) 的成功实施, 以及下一代地球重力卫星 (GRACE Follow-On) 的即将发射昭示着我们将迎来一个前所未有的高精度和高空间分辨的深空卫星重力探测时代。围绕深空卫星重力测量的研究背景、必要性、可行性、卫星重力反演软件平台构建、轨道摄动和未来研究方向开展了研究论证。研究表明: 深空卫星重力测量作为新世纪重力探测技术, 在精化量体重力场、提高惯性导航精度、天体动力学、天体物理学和军事技术的研究, 以及促进国民经济发展和提高社会效益等方面具有广泛的应用前景。

关键词: 深空卫星重力计划; CHAMP; GRACE; GOCE; GRACE Follow-On; GRAIL

中图分类号: P223

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)01-0003-11

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2017.01.001

引用格式: 郑伟, 鄢建国, 李钊伟. 深空卫星重力测量计划研究综述[J]. 深空探测学报, 2017, 4 (1): 3-13.

Reference format: Zheng W, Yan J G, Li Z W. Reviews on deep space satellite gravity measurement mission [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4 (1): 3-13.

0 引言

天体重力场是天体 (地/月球、火星、金星、水星等) 的基本物理场, 反映了星体系统的物质分布、运动和变化状态, 制约着天体本身及外部空间所有物体的运动, 同时决定着大地水准面的起伏和变化。重力场精密测量对于天体测量学、天体物理学、导航与定位、航空航天、水下导航、地质学、地震学、空间科学等具有重要意义。传统的重力探测技术由于受到自然条件的限制, 难以获取全球均匀分布和高精度的天体重力场信息。由于全球重力场测量在国防和民用航天、天体物理等领域具有重大的战略和科学意义, 天体重力卫星测量从20世纪70年代就得到国际科研机构的极大关注和巨大投入。深空卫星重力探测技术是把低轨卫星作为天体重力场的传感器或探测器, 获取高精度天体重力场及其时变信息的测量方式。现实意义在于: 高精度天体重力场不仅是研究天体表面和内部物质的质量变化和重力分布的基础, 而且也是空间飞行器如卫星、导弹、航天飞机和星际探测器的发射、制导、跟踪、遥控以及返回天体的技术开发基本依

据, 对天体物理勘探、全球变化、国防等研究领域具有重要意义, 同时高精度星载设备的研制也将带动我国相关高精尖科学技术发展。

现有全球重力模型的构建是对天体重力测量数据的一种逼近, 由于两极地区、南美和非洲大陆尚有大量重力测量空白区, 故目前所构建的重力场模型不可能精确描述实际重力场情况^[1]。在地球重力场测量中具有划时代意义的德国CHAMP卫星^[2-6]、美德GRACE卫星^[7-31]和欧洲航天局GOCE卫星^[32-38] (未来GOCE Follow-On计划^[39-40]) 已相继于2000年7月、2002年3月和2009年3月发射升空。研究表明: 美德合作的重力卫星GRACE每3个月的观测数据恢复地球重力场精度优于人类以前30年的所有重力场测量数据的总效果。目前其已在对地观测技术和地学相关研究中取得丰硕成果, 包括发现南极冰盖近年来正在迅速融化、苏门答腊地震的同震重力变化、我国华北地区陆地水量明显减少, 以及中长波空间尺度上每月确定的静态大地水准面精度较以往30年综合观测资料的结果高出一个多数量级等重大科学成果。目前美国国家航空航天局

收稿日期: 2016-11-01 修回日期: 2017-01-07

基金项目: 国家自然科学基金面上和重点项目 (41574014, 41131067, 11572168); 中央军委科技委前沿科技创新项目; 中国空间技术研究院杰出青年人才基金、中国航天科技集团航天系统发展中心基金、中国航天科技集团钱学森空间技术实验室自主创新基金联合资助项目

(National Aeronautics and Space Administration, NASA)等科研机构已/即将GRACE/GOCE模式的重力卫星发往月球(当前GRAIL月球重力双星计划^[41-45]、未来月球重力计划Moon-ILRS^[46-47]/Moon-Gradiometer^[48-49])/火星(未来Mars-SST计划^[50-51])/金星(未来Venus-SGG计划^[52]),以期测定重力场、大地水准面等月球^[53-60]/火星^[61-65]/金星^[66-73]物理形状的时空变化。为了赶上国际深空大地测量的发展,我国急需建设自主的下一代高精度深空重力卫星系统,主要目标如下:1)发展我国相关领域自主和高精度的深空卫星观测技术,包括关键技术设备和应用技术,如深空网DSN(Deep Space Network)、激光干涉星间测距、加速度计、Drag-free无拖曳等技术,以及卫星数据处理、精密定轨、重力场反演及应用等;2)美德联合研制的GRACE双星预期于2017年结束在轨运行。美德决定于2020年再发射一组GRACE卫星,德国将补充一套激光干涉测距装置,主要是解决有无问题。为满足长期科学应用需求,研究实施我国下一代高精度的深空重力卫星系统可望弥补此空缺,充分满足全球变化及成因研究对空间观测的需求。

目前基于已发射的GRACE重力卫星反演重力场的内符精度为:静态场,分辨率270 km,精度1 cm;时变场,分辨率1 000 km,精度1 mm或0.2 mGal。综合国防、地学和测绘研究的需求,要求重力场精度应达到:静态场,分辨率100 km,精度1 cm精度;时变场,分辨率200~400 km,精度1 mm或0.02 μ Gal。因此,在GOCE卫星计划完成后,静态场将基本满足需要,而在时变场方面,还需在GRACE卫星基础上,进一步提高空间分辨率。基于模拟研究,GRACE反演重力场的精度与其有效载荷的精度相匹配,即星间测速精度高于1 μ m/s,轨道精度约为3 cm,加速度计精度为 10^{-9} m/s²,并且在一定范围内重力场反演精度基本呈线性关系,同时和重力卫星的测量模式相关。

1 卫星重力测量必要性

1) 科学难题

地球重力卫星CHAMP(2000—2010年)、GRACE(2002—)和GOCE(2009—2013年)的成功发射昭示着人类将迎来一个前所未有的卫星重力探测时代。联合上述3期卫星重力计划虽然可精确测量重力场的静态及其时变,从而获得地球总体形状随时间变化、地球各圈层物质的迁移、全球海洋质量的分布和变化、冰川的增大和消融以及地下蓄水总量变化信息的特性,但仍无法满足21世纪相关学科对地球重力场精度

和分辨率需进一步提高的迫切要求。因此,寻求新型、高效、高精度、高空间分辨率的下一代卫星重力计划是当前国际众多科研机构在大地测量学、空间科学、国防建设等交叉领域亟待解决的前沿性科学难题之一。

2) 科学需求

地球重力场及其时变反映地球表层及内部物质的空间分布、运动和变化,同时决定着大地水准面的起伏和变化。因此,确定地球重力场的精细结构及其时变不仅是大地测量学、固体地球物理学、海洋学、冰川学、水文学、天文学、惯性导航学、空间科学等交叉研究领域的需求,同时也将为寻求资源、研究全球变化及北极冰融化、保护环境和预测灾害提供重要的信息资源。对于星体而言,重力场信息是进行天体内部结构研究的主要手段。目前我们对月球内部结构的认识,主要来自于系列探测器得到的重力场。通过早期的月球重力场,发现了月球质量瘤。现在高精度的月球重力场信息,则为月幔结构^[74]、月亮厚度^[75]、月球岩石圈弹性厚度^[76]等信息。对火星、金星、水星等其他类地行星而言,由于缺乏地震观测信息,重力场更是开展内部结构研究不可或缺的手段^[77]。

3) 工程需求

天体重力场对天体探测器准确入轨、执行正确的轨道等起到决定性作用。早期月球和火星探测器存在大量的失败案例,主要原因之一即在于对它们的重力场了解有限。重力场在小行星探测任务中尤为重要,特别是采样返回的小行星任务。此任务需要知道降轨段和着陆区域精确的动力学信息,以确保着陆器按要求精确着陆。影响此任务成败的关键因素之一即为重力场。

4) 国家需求

我国西部地区重力场精度较低,卫星重力技术可克服自然条件限制,用于西部环境和资源调查;海洋区域由于受区划或地理位置的限制,无法进行所有海洋领域重力测量,导致海洋重力场可靠性难以保障,影响了陆地和海洋垂直基准面的拼接以及对海洋区域深层地球物理结构的理解;高精度准实时的重力变化能提供水分布和局部地壳变化信息,进而为我国洪水、地震等自然灾害预防提供决策依据;我国卫星重力技术比较薄弱,导致卫星重力信息严重依赖国外,带来对国家安全不利的因素,只有发展我国自主卫星重力计划,才能不受制于人。实施我国卫星重力技术,将带动相关高技术发展,培养交叉领域的科学技术人才。

2 卫星重力测量的可行性

基于GRACE计划的局限性(时变重力信号测量的分辨率太低及高频信号混叠效应)以及GRACE卫星即将结束测量使命,欧洲航天局拟于2020年或稍后发射一组GRACE后继星。因此,尽快实施我国自主GRACE Follow-On卫星重力计划迫在眉睫^[78-90]。据数值仿真结果可知,GRACE Follow-On计划得到的时变地球重力场的精度和分辨率将比GRACE卫星至少高一个数量级。目前,我国有关部门已经在重力卫星关键载荷原理样机研制(高精度卫-卫激光干涉星间测距、深空网DSN、加速度计、Drag-free无拖曳技术等)、重力卫星平台、数据处理、重力场反演等方面取得了重要成果。

国外卫星重力计划的成功实施对我国既存在机遇又不乏挑战,机遇是指我国应尽快汲取国外长期积累的卫星重力测量的成功经验,积极推动我国自主卫星重力计划的实施,加快研制重力卫星的步伐,特别是GRACE Follow-On卫星关键技术的研制,通过卫星重力计划的实现带动相关科学和国防领域的发展;挑战是指我国对星载仪器的研制、观测手段的研究和卫星数据的处理与国外尚存差距。目前,中欧科学家之间正讨论促进中欧联合发射的计划,这可提升我国空间技术水平,减少技术风险。

综上所述,由于GRACE重力卫星对全球重力场的探测精度相对较差,同时卫星探测使命预计于2018年前结束,因此我国下一代自主卫星重力计划的成功实施可进一步提高我国及全球重力场精度。基于以上原因,我国自主GRACE Follow-On地球卫星重力计划应尽快立项。该计划的实施不仅可满足行星科学和国防建设的更高需求,而且对将来月球和太阳系火星、金星等行星重力测量的发展方向具有重要借鉴价值。

3 卫星重力反演软件平台构建

深空卫星重力反演软件系统包括6个子模块(如图1所示)。构建目的如下:以提供高质量的深空重力卫星观测数据为输入,开展深空卫星重力观测数据的精细预处理方法研究;以深空卫星重力边值问题为理论指导,单一深空卫星重力数据的反演方法为基础,建立深空卫星重力观测数据的联合反演模型和高效算法;以应用需求为牵引,开展深空卫星重力探测技术的模拟仿真研究;以产品输出和应用示范为目的,联合深空卫星重力观测数据反演静态和时变重力场模型,开展重力场模型的评价与不确定性分析,探索时变重力场应用于探测地震、干旱等极端事件重力效应的可行性。子模块功能如下。

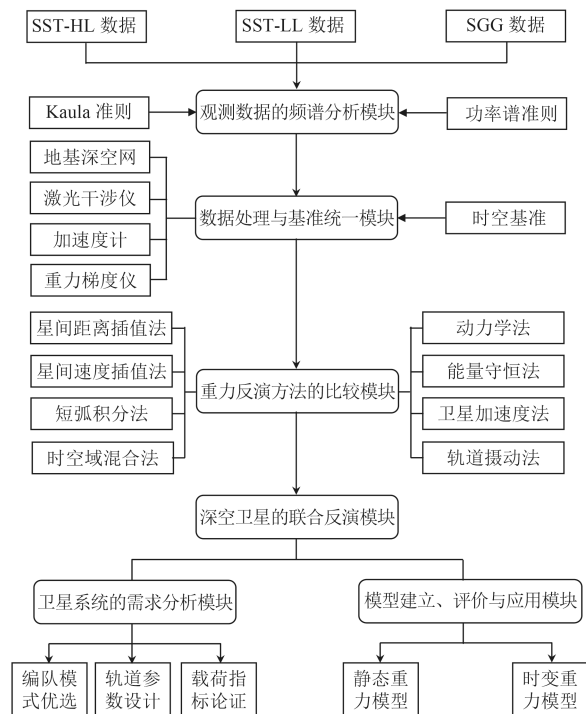


图1 卫星重力反演软件系统流程图

Fig. 1 Flow chart of software system for deep-space satellite gravity recovery

1) 观测数据的频谱分析模块

通过建立深空卫星重力观测数据SST-HL (Satellite-to-Satellite Tracking in the High-Low Mode)、SST-LL (Satellite-to-Satellite Tracking in the Low-Low Mode)、SGG (Satellite Gravity Gradiometry) 等与扰动位泛函之间的理论关系,利用误差传播律、Kaula准则、功率谱信噪比准则等技术手段分析各类深空卫星重力观测数据的精度、频谱特性及相容性,评估它们对恢复重力场的贡献,为各类深空卫星重力观测数据的合理赋权提供参考。

2) 数据处理与基准统一模块

深空卫星重力数据预处理模块旨在为地球重力场联合反演提供高质量的计算输入数据,主要用于深空重力卫星有效载荷观测数据的精细预处理,主要包括地基深空网数据预处理模块、激光干涉测距数据预处理模块、加速度计数据预处理模块、卫星姿态数据预处理模块和重力梯度数据预处理模块。深空卫星重力数据的基准统一模块用于将各类观测数据归算到同一时空基准下,进而消除各类数据的基准误差和系统偏差对联合反演结果的影响。

3) 重力反演方法的比较模块

联合理论分析和数值模拟,利用CHAMP、GRACE、GOCE和GRAIL单类卫星重力观测数据,通过与动力

法、能量法、加速度法等传统卫星重力反演方法的对比,检验星间速度插值法、短弧段动力学法、时空域混合法等新型卫星重力反演方法的有效性和适应性。

4) 深空卫星的联合反演模块

用于优化设计深空卫星重力数据联合反演的计算方案及流程,编写详细实施方案,考虑软件的交互性、可扩展性、可维护性和兼容性,采用模块化设计及软件集成思想,研制深空卫星重力联合反演软件系统,包括数据预处理模块、配置法模块、联合平差模块、谱组合模块、模拟仿真模块、模型评价与应用模块等,并利用模拟数据和实际观测资料验证其正确性、有效性和适用性。

5) 卫星系统的需求分析模块

通过新型星间速度插值法、短弧段动力学法、时空域混合法等多种卫星重力反演法,论证深空重力卫星系统的编队模式、关键载荷精度指标的优化匹配、轨道参数的优化设计等,进而反演高精度和高空间分辨率的全球重力场。地球重力场的探测数据来源相比行星要多元化,地面重力数据来源主要包括地面实测重力数据、航空重力数据、卫星测高数据、卫星跟踪卫星数据以及卫星梯度数据,为了充分利用这些多元化的数据,衍生出了时域法、频域法、能量法、加速度法等多种处理模式。相比之下,天体重力场的数据来源较为单一,以地面深空网Doppler跟踪数据为主。SELENE和GRAIL两个月球探测任务中增加了卫星跟踪卫星模式^[91]。因此,对于天体重力场模型的解算,主要手段仍然是动力学法,即在精密定轨的同时解算天体重力场模型^[92]。解算过程中将星体重力场位系数作为全局参数,单个弧段解算时生成对位系数的法方程矩阵,然后联合多个法方程矩阵,解算位系数。由于动力学法精密定轨将非线性方程进行了线性化处理,因此整个过程需要迭代,达到收敛准则后输出最终的天体重力场位系数模型。

6) 模型建立、评价及应用模块

采用SLR (Satellite Laser Ranging) 数据作为低阶约束,联合CHAMP、GRACE、GOCE和GRAIL观测数据反演高精度静态和时变地/月球重力场模型;采用国际公布的高精度地/月球重力场模型和实测数据,如GPS (Global Positioning System) 水准、重力异常等,对联合反演模型的内符合与外符合精度进行检验;将联合反演的时变重力场模型应用于探测GRACE和GOCE卫星运行期间地震、干旱等极端事件的时变重力效应。

4 卫星重力测量轨道摄动

地球的质量分布不均匀,它的形状虽近似于一个旋转椭球,但实际形状并不规则,因而地球引力场的空间结构非常复杂。卫星在绕地球运行中,除受到不规则地球引力场的摄动外,还受到大气阻力、日月引力、太阳光压、地球潮汐等摄动力的作用,因而卫星轨道不是一个不变的椭圆 (Kepler轨道),其形状、大小和空间位置都随时间不断变化。在大地测量中,引力位为 $U(\mathbf{X}(t))$,当地球重力场已知时,引力向量 $\text{grad}U(\mathbf{X}(t))$ 可以计算,其精度取决于地球重力场模型的精度与分辨率。在惯性坐标系中,地球卫星的运动方程可表示为: $U_0 = \frac{\mu}{r}$, 其中 $\mathbf{X}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{X}}(t)$ 和 $\ddot{\mathbf{X}}(t)$ 分别表示t时刻卫星在惯性坐标系中的位置、速度和加速度向量, $\text{grad}U(\mathbf{X}(t))$ 是卫星的地球引力向量,向量 $\mathbf{a}$ 表示除地球引力外的其他摄动力,根据目前卫星重力测量应用需求和精度水平,可将大于 10^{-9} m/s^2 的非地球引力场摄动力作为主要摄动力,小于 10^{-9} m/s^2 的非主要摄动力可以忽略。

1) 地球引力

地球引力场对卫星的引力包括地球质心引力和地球引力场摄动力 (由于地球形状不规则及其质量不均匀而引起) 两部分。在人造卫星轨道理论中,地球外部空间的引力位可用球谐函数展开表示

$$U = \frac{\mu}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{R_e}{r} \right)^n \cdot \left[J_n P_n(\sin \phi) - \sum_{m=1}^n J_{nm} P_{nm}(\sin \phi) \cos m(\lambda - \lambda_{nm}) \right] \right\} \quad (1)$$

其中: $\mu = GM_e$; G 表示万有引力常数; M_e 表示地球质量; r 、 λ 和 ϕ 分别表示重力卫星在球坐标系上的地心距离、地心经度和地心纬度; R_e 表示地球平均半径; P_n 和 P_{nm} 表示勒让德多项式, n 表示阶数, m 表示次数。公式(1)的右边第一项 $U_0 = \frac{\mu}{r}$ 表示球对称引力位,它是地球外部引力位的主要部分;其余部分为摄动位,以二阶带谐系数 J_2 引起的摄动位为主。

2) 日月引力

日、月引力造成卫星相对于地球的摄动力加速度为 $F \approx GM_d r / r_d^3$, 其中 M_d 表示太阳或月球的质量, r_d 表示太阳或月球到地心的距离。日、月摄动力加速度与地球对卫星的引力加速度之比为 $\frac{F}{F_e} \approx \frac{M_d}{M_e} \left(\frac{r}{r_d} \right)^3$ 。对于近地卫星,太阳摄动力加速度与地球对卫星的引力加速度之比为 $F/F_e = 3 \times 10^{-8}$,月亮摄动力加速度与地球对卫星的引力加速度之比为 $F/F_e = 7 \times 10^{-8}$ 。尽管日、

月摄动力加速度很大，但仍可以进行修正。

3) 其他行星引力

其他行星引力加速度的计算与日、月引力加速度类似，对于金星、木星等行星对近地卫星的影响均有 $F/F_e < 1 \times 10^{-12}$ 。

4) 大气阻力

大气阻力对低轨卫星的影响较大。以大气分子撞击卫星表面建立阻力模型，有 $F_A = \frac{1}{2} c_d \rho \frac{S}{m} v^2$ ，其中 c_d 表示气动系数，可近似取为1； ρ 表示大气密度； S 表示迎风面积。大气阻力加速度与地心引力加速度之比为 $\frac{F_A}{F_e} \approx c_d \frac{S}{m} \rho \frac{a}{2}$ ，其中 a 为卫星轨道的长半轴。对于通常装载仪器的卫星，其面质比 S/m 的数值范围约为 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m}^2/\text{kg}$ 。在轨道高度200 km处，大气密度约为 10^{-10} kg/m^3 ， $F_A/F_e \approx 3 \times 10^{-6}$ 。当卫星轨高设计为400 km时，大气阻力降低为 $F_A/F_e \approx 10^{-8}$ 。

5) 太阳辐射压力

卫星在运动中受到太阳光辐射压加速度为 $F_p = KpS/m$ ，其中 K 表示与卫星表面材料、形状等性质相关的系数（ $K=1$ 表示全吸收）； S 表示垂直于太阳光线的卫星表面积； $p = 4.5 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ 表示光压强度。若卫星的面质比 $S/m = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{kg}$ ，对于近地卫星 $F_p/F_e \approx 4 \times 10^{-9}$ 。此效应可通过精确测量卫星的面质比并在观测结果中扣除。

6) 地球红外辐射压力

地球红外辐射通量为 $2.4 \times 10^5 \text{ erg cm}^2/\text{s}$ ，辐射压为 $8 \times 10^{-7} \text{ N/m}^2$ 。若卫星的面质比 $S/m = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{kg}$ ，则 $F_p/F_e \approx 8 \times 10^{-10}$ 。因此，地球的红外辐射压力对空间重力场测量的影响基本可忽略。

7) 空间磁场和电场的影响

电离气体中的磁场会导致磁流体效应，磁场可被看作是施加了一个磁压强 $P_{\text{mag}} = B^2/2\mu_0$ ，取 $B = 5 \times 10^{-5} \text{ T}$ ，则 $P_{\text{mag}} = 10^{-3} \text{ Pa}$ ，磁场作用在卫星上的力是由磁场梯度产生，加速度小于 10^{-11} m/s^2 。

8) 太阳风的影响

吹过地球的太阳风是热而稀薄的快速等离子体流，主要是由电离的氢（即质子和几乎等量的电子），以及少量（5%）电离的氦和其他更重要的元素组成。其径向动量的通量密度为 $2.6 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ ，作用在卫星上的加速度将小于 10^{-11} m/s^2 。

9) 卫星姿态控制的影响

由于大气阻力、太阳光压等非保守力的影响，卫星的轨道高度逐步衰减。为保持卫星在确定的轨道上运行，需要通过卫星自身携带的推进器对卫星的轨道

进行修正。设用于卫星变轨和姿态控制的推进器能提供的最大推力为20 mN，如果卫星的质量为500 kg，则卫星在推进器推力作用下产生的最大加速度为 $\Delta a = 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。但通常情况下，推力加速度的大小均控制在 10^{-6} m/s^2 水平。

对于天体重力场探测任务，受到的力模型与地球卫星相比有所区别。对于月球而言，由于没有大气，月球上空接近真空状态，可以不用考虑大气阻力的作用。但是对于GRAIL这样的高精度探测任务，需要考虑摄动量级很小的力模型，比如太阳帆板对卫星本体的遮挡产生的摄动力和卫星在月影和光照交界面时月球地形的遮挡作用^[93]。对于其他类地行星，包括火星和金星，其力模型的考虑与地球类似^[94]。此外，对于天体探测器而言，由于离地球距离尺度远大于地球卫星，对力模型的考虑中，相对论效应不能忽略。比如对于火星探测器“火星快车”而言，相对论摄动力的量级与大气阻力和火星固体潮的摄动力量级接近，在精密定轨中必须考虑。

5 卫星重力测量科学应用

深空卫星重力测量技术为全球高覆盖率、高分辨率和高精度重力测量开辟了新的有效途径，使我们能够以前所未有的精度和分辨率获取天体重力场的精细结构。利用目前和未来的重力卫星观测量，结合其他学科的观测资料，使我们有可能在测绘学、海洋学、固体天体科学（地震、板块运动）、航空航天、军事应用等领域取得突破性成就。

为了深入了解地球过去和未来，以及太阳系的起源与演化，人类已发射了大量深空探测器，目前最远的深空探测器已飞出太阳系。经过近60年的发展，人类已经发射了大量的月球、火星、金星、水星等类地天体探测器，同时也对木星、土星和冥王星及其卫星开展了大量探测。对Ceres、Vesta、Eros、Tutatis等小行星也获得了大量探测结果。在这些探测任务中，重力场探测是一个重要环节。重力场在其中起到的重要作用是保证探测器成功入轨。经过长时间的巡游阶段后，深空探测器靠近目标天体时，需要对探测器进行精确制动以成功入轨。目标天体重力场即为影响制动的主要因素。早期月球、火星的探测存在大量的失败例子，其中一个主要原因在于没有获取精确的重力场信息，导致无法对探测器轨道进行精确调整。

天体重力场一般是深空探测任务的主要科学目标，在天体科学研究中扮演着重要角色。月球探测开始于20世纪60年代初，利用早期的探测数据解算了低

阶次月球重力场,取得了一个重要科学成果,即发现了月球质量瘤。此发现极大地改变了人类对月球形成的认识。为了精化对月球重力场的认识,此后陆续发射了多个月球探测器,包括2007年发射的高低卫星跟踪模式的SELENE探测任务和2012年发射的低低卫星跟踪模式的GRAIL探测任务。SELENE探测器通过四程测量模式,首次实现了月球背面的测量,发现了月球背面的环状盆地结果。GRAIL任务则通过亚微米级的星间测速模式,反演了1 500阶次的重力场模型。此超高精度的重力场模型,极大地改进了对月球内部结构的认识,特别是对月亮密度的结构分布。此外,结合流体动力学仿真程序和布格异常梯度数据,研究人员对月球东方海盆地区域的线性梯度带进行了分析,对环状盆地的起源提出了新的认知,这也为月球上其他环状盆地的形成提供了参考^[95]。

火星重力场尚没有达到月球所具有的精度和分辨率。目前对火星重力场的了解主要来自于MGS、Odyssey、MRO等探测器的轨道跟踪数据。积累了近十多年的轨道跟踪数据后,陆续解算了多个阶次的火星重力场模型,最新的模型阶次达到120。在计算稳态重力场的同时,还给出了低阶项位系数的时变信息。火星重力场是刻画火星结构的二分性、火星壳厚度、岩石圈弹性厚度等信息的主要数据源。结合火星重力场和火星自转,可以约束火星核的大小和密度,可以为研究火星的演化提供重要参考。除了对类地行星的研究,对小行星的重力场也开展了大量的研究工作。最新的小行星重力场方面的工作由美国国家航空航天局发射的Dawn探测器完成。利用Dawn探测器2011—2012年围绕Vesta运行的轨道探测数据,研究人员解算了20阶次的重力场模型。利用重力和地形模型,对Vesta的内部结构进行了研究,认为Vesta不同于其他均质小行星,它具有明确的分层结构。然而,现有的观测数据精度,尚不能约束Vesta是否具有内核^[96]。

6 卫星重力测量未来研究方向

CHAMP作为首颗专用于地球重力场探测的重力卫星,由于轨道高度(454 km)、关键载荷精度和测量模式的制约仅适于探测地球重力场的长波信号,因此CHAMP仅是人类利用专用重力卫星高精度探测地球重力场的探索性试验,对提高现有地球重力场模型的精度和空间分辨率的贡献有限,但将使目前的地球重力场模型更加可靠。GRACE计划的成功实施使人类对地球重力场的认识提升到前所未有的高度,对高精度探测中长波地球重力场的贡献甚至超越过去30年地球重

力场探测信息量的总和,得到的地球静态和动态重力场的精度比CHAMP至少高一个数量级。为了反演高精度、高空间分辨率和全频段的地球重力场以进一步提高人类对赖以生存地球的理解和认知,美国NASA、欧洲ESA(European Space Agency)、中国CAST(China Academy of Space Technology)等国际众多研究机构已竞相提出了下一代卫星重力测量计划和将高精度探测地球重力场的SST技术应用于月球、火星及太阳系其他星体的重力场探测之中。

1) 一步动力学卫星重力反演法

基于“一步法”理论框架严密和地球重力场解算精度较高的特性,利用美国JPL(Jet Propulsion Laboratory, 喷气推进实验室)公布的GRACE-Level-1B实测数据高精度和高空间分辨率反演120阶GRACE双星地球重力场,并将结果和国外现有地球重力场模型(如EIGEN-GRACE02S、GGM02S等)进行比对。在卫星重力测量中,目前国际大地测量学界基于SST观测数据反演地球重力场通常采用两种方法:两步法和一步法。所谓“两步法”(分步法)是指首先利用高轨GPS卫星对低轨重力卫星精密跟踪定轨(位置、速度和加速度);其次,将精确解算得到的卫星轨道数据作为观测值并联合K波段测距系统的星间距离和星间速度,加速度计的非保守力,以及恒星敏感器的姿态等观测值共同解算地球重力场。优点是将一个复杂的地球重力场反演问题分步解算,不仅降低了在处理整体问题时遇到的各种困难,而且可采用各种具体有效的方法有针对性地解决每步中存在的实际问题;缺点是由于精密定轨依赖于先验地球重力场模型,因此将不同程度地损失地球重力场解算的精度。所谓“一步法”(整体法)是指将卫星精密定轨和地球重力场整体解算,同时求解地球自转参数、海潮模型、地面站坐标、地球重力场模型、卫星轨道等,以及其他动力学和非动力学参量,通过综合卫星运动学、卫星动力学、大地测量学、地球物理学等多学科的知识建立的一种合乎自然规律的解算方法。优点为不依靠参考地球重力场信息、理论框架严密、参数解算精度高等;缺点为解算时间较长、求解过程复杂、需并行计算机支持。

2) Mascon点质量卫星重力反演法

基于可高精度反演局部地球重力场的点质量法(Mascon Solution),综合利用美国JPL公布的13年GRACE卫星实际观测资料以及ICESat激光测高卫星、GPS卫星、验潮站洋底压力等多种观测数据,联合监测研究南极和青藏高原现今冰川质量季节变化和长期

趋势以及冰后回升效应, 提高其长期变化的信噪比, 并给出其冰盖变化的时空特性, 深入理解人类活动与全球环境变化的内在关系。目前国内外研究机构在基于卫星重力测量反演全球重力场中普遍采用地球引力位按球谐级数展开法 (Harmonic Solution)。但在反演局部地球重力场时, 地球引力位按球谐级数展开难以保证其在地球表面及其附近空间的有效性。点质量法是当前国际大地测量学界高精度和高空间分辨率解算南极和青藏高原等区域局部地球重力场的有效途径, 可有效提高冰川质量长期变化的信噪比, 并给出其冰盖变化的时空特性。其优点为: (1) 可有效抑制局部地球重力场信号的“泄漏”, 较好地消除长周期误差的传递; (2) 可实质性提高局部地球重力场反演的时间和空间分辨率; (3) 计算过程简单, 计算速度较快, 计算结果可靠。

3) 球面小波函数卫星重力反演法

基于球面小波函数的局部特性和快速算法, 将地球重力场球谐函数和球面小波函数相结合共同反演高精度和高空间分辨率的地球重力场。目前地球重力场模型通常按球谐函数展开, 由于球谐函数擅于描述全球重力场而缺乏刻画局部地球重力场的特性, 同时任何局部地球重力场的变化都会导致所有球谐系数随之变化, 因此国际大地测量联合会成立了小波函数研究组, 旨在基于球面小波函数精细刻画局部地球重力场。

4) 基于动力插值法建立时变重力场模型

紧跟国际卫星重力测量的最新热点和动态, 面向满足我国日益增长和迫切提出的科学和国防需求, 结合动力学法的精确性和空间三维插值法的快速性的优点, 构建新型动力插值卫星重力反演观测方程; 基于GRACE重力卫星实测数据GRACE-Level-1B的有效预处理和新型地球静态重力场模型WHIGG-GRACE-S的精确建立, 检验新型动力插值法的有效性; 利用精确和快速的动力插值法建立新型地球时变重力场模型WHIGG-GRACE-T, 并通过与美国CSR公布的地球时变重力场模型CSR-RL05的符合性, 检验新型时变模型WHIGG-GRACE-T的可靠性; 采用新型动力插值法, 论证我国下一代激光干涉测距型Post-GRACE重力卫星系统的关键载荷匹配精度指标和轨道参数的优化设计。

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): 1-3.
- [2] 徐天河, 杨元喜. 利用CHAMP卫星几何法轨道恢复地球重力场模型 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 288-293.
- Xu T H, Yang Y X. CHAMP gravity field recovery using kinematic orbits [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(2): 288-293.
- [3] 张兴福, 沈云中, 胡雷鸣. 基于CHAMP短弧长动力学轨道的地球重力场模型 [J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 106-110.
- Zhang X F, Shen Y Z, Hu L M. A gravity field model based on CHAMP short-arc dynamical orbits [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(1): 106-110.
- [4] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 地球重力场模型研究进展和现状 [J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(4): 83-91.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Progress and present status of the research on Earth's gravitational field models [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(4): 83-91.
- [5] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 国际重力卫星研究进展和我国将来卫星重力测量计划 [J]. 测绘科学, 2010, 35(1): 5-9.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Research progress in international gravity satellites and future satellite gravity measurement program in China [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(1): 5-9.
- [6] Zheng W, Xu H Z. Progress in satellite gravity recovery from implemented CHAMP, GRACE and GOCE and future GRACE Follow-On missions [J]. Geodesy and Geodynamics, 2015, (6): 241-247.
- [7] 姜卫平, 章传银, 李建成. 重力卫星主要有效载荷指标分析与确定 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(S1): 104-109.
- Jiang W P, Zhang C Y, Li J C. Analysis and determination of the major payload indexes for gravity exploring satellite [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(S1): 104-109.
- [8] 沈云中, 许厚泽, 吴斌. 星间加速度解算模式的模拟与分析 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 807-811.
- Shen Y Z, Xu H Z, Wu B. Simulation of recovery of the geopotential model based on intersatellite acceleration data in the low-low satellite to satellite tracking gravity mission [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(4): 807-811.
- [9] Zheng W, Lu X L, Xu H Z, et al. Simulation of the Earth's gravitational field recovery from GRACE using the energy balance approach [J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(7): 596-601.
- [10] 周旭华, 吴斌, 许厚泽, 等. 数值模拟估算低低卫-卫跟踪观测技术反演地球重力场的空间分辨率 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 282-287.
- Zhou X H, Wu B, Xu H Z, et al. Resolution estimation of Earth gravity field recovery through the low-low satellite to satellite technology by numerical simulation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(2): 282-287.
- [11] Zheng W, Shao C G, Luo J, et al. Numerical simulation of Earth's gravitational field recovery from SST based on the energy conservation principle [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(3): 644-650.
- [12] 肖云, 夏哲仁, 王兴涛. 用GRACE星间速度恢复地球重力场 [J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 19-25.
- Xiao Y, Xia Z R, Wang X T. Recovering the Earth gravity field from inter-satellite range-rate of GRACE [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 19-25.
- [13] Xu P L. Position and velocity perturbations for the determination of

- geopotential from space geodetic measurements [J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2008, 100(3): 231-249.
- [14] Zheng W, Shao C, Luo J, et al. Improving the accuracy of GRACE Earth's gravitational field using the combination of different inclinations [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(5): 555-561.
- [15] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Physical explanation on designing three axes as different resolution indexes from GRACE satellite-borne accelerometer [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25(12): 4482-4485.
- [16] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Efficient and rapid estimation of the accuracy of GRACE global gravitational field using the semi-analytical method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(6): 1143-1150.
- [17] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Physical explanation of influence of twin and three satellite formation mode on the accuracy of Earth's gravitational field [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(2): 029101-1-029101-4.
- [18] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Influence of the adjusted accuracy of center of mass between GRACE satellite and SuperSTAR accelerometer on the accuracy of Earth's gravitational field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(3): 564-574.
- [19] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Effective processing of measured data from GRACE key payloads and accurate determination of Earth's gravitational field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(4): 772-782.
- [20] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Demonstration on the optimal design of resolution indexes of high and low sensitive axes from space-borne accelerometer in the satellite-to-satellite tracking model [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(6): 1200-1209.
- [21] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 卫-卫跟踪测量模式中轨道高度的优化选取 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2009, 29(2): 100-105.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Optimal design of orbital altitude in satellite-to-satellite tracking model [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(2): 100-105.
- [22] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 两种GRACE地球重力场精度评定方法的检验 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2009, 29(5): 89-93.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Mutual verification of two methods on evaluating the accuracy of GRACE Earth's gravitational field [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(5): 89-93.
- [23] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. An analysis on requirements of orbital parameters in satellite-to-satellite tracking mode [J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2010, 34(4): 413-423.
- [24] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Efficient calibration of the non-conservative force data from the space-borne accelerometers of the twin GRACE satellites [J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2011, 54(184): 106-110.
- [25] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 卫星跟踪卫星测量模式中关键载荷精度指标不同匹配关系论证 [J]. *宇航学报*, 2011, 32(3): 697-706.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Demonstration on different matching relationship of accuracy indexes from key payloads in the satellite-to-satellite tracking model [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(3): 697-706.
- [26] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 基于星间加速度法精确和快速确定GRACE地球重力场 [J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(2): 416-423.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Accurate and fast measurement of GRACE Earth's gravitational field using the intersatellite range-acceleration method [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(2): 416-423.
- [27] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 利用改进的预处理共轭梯度法和三维插值法精确和快速解算GRACE地球重力场 [J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(3): 805-812.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Accurate and rapid determination of GRACE Earth's gravitational field using improved the pre-conditioned conjugate-gradient approach and three-dimensional interpolation method [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(3): 805-812.
- [28] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Precise recovery of the Earth's gravitational field with GRACE: intersatellite range-rate interpolation approach [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 422-426.
- [29] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Efficient accuracy improvement of GRACE global gravitational field recovery using a new inter-satellite range interpolation method [J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 53: 1-7.
- [30] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Effect of different inter-satellite range on measurement precision of Earth's gravitational field from GRACE [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2012, 3(1): 44-51.
- [31] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 基于新型能量插值法精确建立GRACE-only地球重力场模型 [J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(3): 1269-1279.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Accurate production of GRACE-only Earth gravity field model using the new energy interpolation principle [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(3): 1269-1279.
- [32] 罗志才, 吴云龙, 钟波, 等. GOCE卫星重力梯度测量数据的预处理 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2009, 34(10): 1163-1167.
- Luo Z C, Wu Y L, Zhong B, et al. Pre-processing of the GOCE satellite gravity gradiometry data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(10): 1163-1167.
- [33] 徐新禹, 李建成, 王正涛, 等. Tikhonov正则化方法在GOCE重力场求解中的模拟研究 [J]. *测绘学报*, 2010, 39(5): 465-470.
- Xu X Y, Li J C, Wang Z T, et al. The simulation research on the Tikhonov regularization applied in gravity field determination of GOCE satellite mission [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2010, 39(5): 465-470.
- [34] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 国际卫星重力梯度测量计划研究进展 [J]. *测绘科学*, 2010, 35(2): 57-61.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Study progress in international satellite gravity gradiometry programs [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(2): 57-61.
- [35] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Accurate and rapid determination of GOCE Earth's gravitational field using time-space-wise approach associated with Kaula regularization [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(1): 240-249.
- [36] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. A contrastive study on the influences of radial and three-dimensional satellite gravity gradiometry on the accuracy of the Earth's gravitational field recovery [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(10): 109101-1-109101-8.
- [37] 刘晓刚, 孙文, 李新星, 等. 由GOCE高低卫卫跟踪数据反演地球重力场的模拟研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, (6): 66-71.
- Liu X G, Sun W, Li X X, et al. Study on recovering Earth's gravity field with GOCE's SST-HL data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, (6): 66-71.
- [38] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 卫星重力梯度反演研究进展 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(4): 1-8.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Research progress in satellite gravity gradiometry recovery [J]. *Journal of Geodesy and*

- Geodynamics, 2014, 34(4): 1-8.
- [39] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Efficient and rapid accuracy estimation of the Earth's gravitational field from next-generation GOCE Follow-On by the analytical method [J]. Chinese Physics B, 2013, 22(4): 049101-1-049101-8.
- [40] Zheng W, Wang Z K, Ding Y W, et al. Accurate establishment of error models for satellite gravity gradiometry recovery and requirements analysis for the future GOCE Follow-On mission [J]. Acta Geophysica, 2016, 64(3): 732-754.
- [41] Asmar S W, Konopliv A S, Watkins M M, et al. The scientific measurement system of the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) mission [J]. Space Science Reviews, 2013, 178(1): 25-55.
- [42] Klipstein W M, Arnold B W, Enzer D G, et al. The lunar gravity ranging system for the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) mission [J]. Space Science Reviews, 2013, 178(1): 57-76.
- [43] Zuber M T, Smith D E, Lehman D H, et al. Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL): mapping the lunar interior from crust to core [J]. Space Science Reviews, 2013, 178(1): 3-24.
- [44] Klinger B, Baur O, Mayer-Gürr T. GRAIL gravity field recovery based on the short-arc integral equation technique: Simulation studies and first real data results [J]. Planetary and Space Science, 2014, 91: 83-90.
- [45] Yan J G, Xu L Y, Li F, et al. Lunar core structure investigation: Implication of GRAIL gravity field model [J]. Advances in Space Research, 2015, 55(6): 1721-1727.
- [46] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Improvement in the recovery accuracy of the lunar gravity field based on the future Moon-ILRS spacecraft gravity mission [J]. Surveys in Geophysics, 2015, 36(4): 587-619.
- [47] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 基于激光干涉星间测距原理的下一代月球卫星重力测量计划需求论证 [J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 922-932.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Demonstration of requirement on future lunar satellite gravity exploration mission based on interferometric laser intersatellite ranging principle [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(4): 922-932.
- [48] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Sensitivity analysis for key payloads and orbital parameters from the next-generation Moon-Gradiometer satellite gravity program [J]. Surveys in Geophysics, 2015, 36(1): 111-137.
- [49] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 月球重力场模型研究进展和我国将来月球卫星重力梯度计划实施 [J]. 测绘科学, 2012, 37(2): 5-9.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Progress in lunar gravitational field models and operation of future lunar satellite gravity gradiometry mission in China [J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(2): 5-9.
- [50] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. “萤火一号”火星探测计划进展和 Mars-SST 火星卫星重力测量计划研究 [J]. 测绘科学, 2012, 37(2): 44-48.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Progress in “Yinghuo-1” Martian exploration program and research on Mars-SST satellite gravity measurement mission [J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(2): 44-48.
- [51] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 国际火星探测计划进展和我国将来火星卫星重力测量计划研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(3): 51-57.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Progress in international Martian exploration programs and research on future Martian satellite gravity measurement mission in China [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(3): 51-57.
- [52] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Future dedicated Venus-SGG flight mission: accuracy assessment and performance analysis [J]. Advances in Space Research, 2016, 57(1): 459-476.
- [53] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 国际金星探测计划进展和我国金星重力梯度计划的实施 [J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(1): 8-14.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Progress on international venus exploration programs and implement of venus gravity gradiometry mission in China [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(1): 8-14.
- [54] Konopliv A S, Binder A B, Hood L L, et al. Improved gravity field of the Moon from lunar prospector [J]. Science, 1998, 281(5382): 1476-1480.
- [55] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 351-358.
- Ouyang Z Y. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 351-358.
- [56] 陈俊勇, 宁津生, 章传银, 等. 在嫦娥一号探月工程中求定月球重力场 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 275-281.
- Chen J Y, Ning J S, Zhang C Y, et al. On the determination of lunar gravity field in the Chinese first lunar prospector mission [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(2): 275-281.
- [57] 李斐, 鄢建国, 平劲松. 月球探测及月球重力场的确定 [J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 31-37.
- Li F, Yan J G, Ping J S. Lunar exploration and lunar gravity field determination [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 31-37.
- [58] 鄢建国, 平劲松, 李斐, 等. 基于绕月单卫星和双星测量的月球重力场恢复仿真分析 [J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 425-429.
- Yan J G, Ping J S, Li F, et al. Simulation of the lunar gravity field recovery based on lunar solo and bi orbiters [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(2): 425-429.
- [59] 宁津生, 罗佳. 卫星跟踪卫星应用于月球重力场探测的模拟研究 [J]. 航天器工程, 2007, 16(1): 18-22.
- Ning J S, Luo J. Simulation of satellite-to-satellite tracking in lunar gravity field determination [J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(1): 18-22.
- [60] Namiki N, Iwata T, Matsumoto K, et al. Farside gravity field of the moon from four-way Doppler measurements of SELENE (Kaguya) [J]. Science, 2009, 323(5916): 900-905.
- [61] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 月球探测计划研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2296-2307.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Progress in international lunar exploration programs [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2296-2307.
- [62] Sjogren W L, Lorell J, Wong L. Mars gravity field based on a short-arc technique [J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(20): 2899-2908.
- [63] Smith D E, Sjogren W L, Tyler G L. The gravity field of Mars: results from Mars global surveyor [J]. Science, 1999, 286: 94-97.
- [64] Konopliv A S, Yoder C F, Standish E M. A global solution for the Mars static and seasonal gravity, Mars orientation, phobos and deimos

- masses, and Mars ephemeris [J]. *Icarus*, 2006, 182: 23-50.
- [65] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. China's first-phase Mars exploration program: Yinghuo-1 orbiter [J]. *Planetary and Space Science*, 2013, 86: 155-159.
- [66] 鄢建国, 平劲松. 火星重力场研究现状及发展趋势 [J]. *物理*, 2009, 38(10): 707-711.
- Yan J G, Ping J S. A gravity field model for Mars [J]. *Physics*, 2009, 38(10): 707-711.
- [67] Ananda M P, Sjogren W L, Phillips R J, et al. A low-order global gravity field of Venus and dynamical implications [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(A13): 8303-8318.
- [68] Williams B G, Mottinger N A. Venus gravity field: pioneer Venus orbiter navigation results [J]. *Icarus*, 1983, 56(3): 578-589.
- [69] Nerem R S, Bills B G, McNamee J B. A high resolution gravity model for Venus: GVM-1 [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(7): 599-602.
- [70] Konopliv A S, Sjogren W L. Venus spherical harmonic gravity model to degree and order 60 [J]. *Icarus*, 1994, 112(1): 42-54.
- [71] Perini J P, Nerem R S, Lemoine F G. The development of a high resolution gravity field model for Venus [J]. *Lunar and Planetary Science*, 1996, 27: 1017.
- [72] Barriot J P, Valès N, Balmino G, et al. A 180th degree and order model of the Venus gravity field from Magellan line of sight residual Doppler data [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(19): 3743-3746.
- [73] Konopliv A S, Banerdt W B, Sjogren W L. Venus gravity: 180th degree and order model [J]. *Icarus*, 1999, 139(1): 3-18.
- [74] Harada Y, Goossens S, Matsumoto K, et al. Strong tidal heating in an ultralow-viscosity zone at the core-mantle boundary of the Moon [J]. *Nature Geoscience*, 2014(7): 569-572.
- [75] Wiczeorek M A, Neumann G A, Nimmo F, et al. The crust of the Moon as seen by GRAIL [J]. *Science*, 2013, 339(6120): 671-675.
- [76] Zhong Z, Li F, Yan J G, et al. Lunar geophysical parameters inversion based on gravity/topography admittance and particle swarm optimization [J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54: 770-779.
- [77] Wiczeorek M A. Gravity and topography of the terrestrial planets [C]//*Treatise on Geophysics*, 2nd edition. Amsterdam: Gerald Schubert and Tilman Spohn, Elsevier, 2015.
- [78] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Accurate and rapid error estimation on global gravitational field from current GRACE and future GRACE Follow-On missions [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(8): 3597-3604.
- [79] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Efficient and rapid estimation of the accuracy of future GRACE Follow-On Earth's gravitational field using the analytic method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(2): 218-230.
- [80] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. Improved-GRACE卫星重力轨道参数优化研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30(2): 43-48.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Research on optimal selection of orbital parameters in the Improved-GRACE satellite gravity measurement mission [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(2): 43-48.
- [81] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Influences of interpolation formula, correlation coefficient and sample interval on the accuracy of GRACE Follow-On intersatellite range-acceleration [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(2): 100-111.
- [82] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 国际下一代卫星重力测量计划研究进展 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(3): 152-159.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Progress in international next-generation satellite gravity measurement missions [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(3): 152-159.
- [83] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Precise and rapid recovery of the Earth's gravitational field by the next-generation four-satellite cartwheel formation system [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 523-531.
- [84] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Precise and rapid recovery of the Earth's gravity field from the next-generation GRACE Follow-On mission using the residual intersatellite range-rate method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(1): 11-24.
- [85] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Precise recovery of the Earth's gravitational field by GRACE Follow-On satellite gravity gradiometry method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(3): 269-279.
- [86] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Physical analysis on improving the recovery accuracy of the Earth's gravity field by a combination of satellite observations in along-track and cross-track directions [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(10): 109101-1-109101-8.
- [87] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 不同插值法对下一代卫星重力反演精度的影响 [J]. *宇航学报*, 2014, 35(3): 269-276.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Influences of different interpolation methods on accuracy of next-generation satellite gravity recovery [J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(3): 269-276.
- [88] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 我国将来更高精度CSGM卫星重力测量计划研究 [J]. *国防科技大学学报*, 2014, 36(4): 102-111.
- Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Researches on future ultra-precision CSGM satellite gravity mission in China [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(4): 102-111.
- [89] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. A study on the improvement in spatial resolution of the Earth's gravitational field by the next-generation ACR-Cartwheel-A/B twin-satellite formation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(2): 135-148.
- [90] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Requirements analysis for future satellite gravity mission Improved-GRACE [J]. *Surveys in Geophysics*, 2015, 36(1): 87-109.
- [91] 李斐, 郝卫峰, 鄢建国, 等. 空间跟踪技术的发展对月球重力场模型的改进 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(4): 1249-1259.
- Li F, Hao W F, Yan J G, et al. Advancement of lunar gravity model due to the development of space tracking techniques [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(4): 1249-1259.
- [92] Yan J G, Goossens S, Matsumoto K, et al. CEGM02: an improved lunar gravity model using Chang'E-1 orbital tracking data [J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 62: 1-9.
- [93] Konopliv A S, Park R S, Yuan D N, et al. The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL primary mission [J]. *Journal Geophysical Research*, 2013, 118(7): 1415-1434.
- [94] Konopliv A S, Sjogren W L, Yoder C F, et al. Venus gravity: 180th degree and order model [J]. *Icarus*, 1999, 139: 3-18.
- [95] Zuber M T, Smith D E, Neumann G A, et al. Gravity field of the Orientale basin from the Gravity Recovery and Interior Laboratory Mission [J]. *Science*, 2016, 354(6311): 438-411.
- [96] Konopliv A S, Asmar S W, Park R S, et al. The Vesta gravity field,

spin pole and rotation period, landmark positions, and ephemeris from the Dawn tracking and optical data [J]. *Icarus*, 2014, 240: 103-117.

作者简介:

郑伟(1977-), 男, 研究员, 日本京都大学博士后。主要研究方向: 深

空卫星重力测量和天空海一体化海洋导航研究。

通讯地址: 北京市海淀区友谊路104号航天城(100094)

电话: (010)68111077

E-mail: zhengwei1@qxslab.cn

Reviews on Deep Space Satellite Gravity Measurement Mission

ZHENG Wei¹, YAN Jianguo², LI Zhaowei¹

(1. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract: The successful implementation of the international gravity satellite mission around the Earth, named CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) and GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer), and the international satellite gravity measurement program orbiting the Moon, named GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory), and the upcoming launch of the international next-generation Earth's gravity satellite GRACE Follow-On will usher in an unprecedented high precision and high spatial resolution of the deep space satellite gravity detection era. In this paper, the research background, the necessity, the feasibility study, the construction of the software platform, the orbit perturbation and the future research direction of the deep-space satellite gravity measurement are demonstrated. The deep-space satellite gravity measurement technology has a broad application prospect with regard to the planetary geodesy, the planetary gravity field, planetary physics, the planetary dynamics and the national defense, and the construction for the national economy and the social benefits.

Key words: deep space satellite gravity mission; CHAMP; GRACE; GOCE; GRACE Follow-On; GRAIL

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 任树芳]