



# 利用卫星重力测量确定地球重力场模型的进展

罗志才<sup>1</sup> 钟波<sup>2</sup> 周浩<sup>1</sup> 吴云龙<sup>3</sup>

1 华中科技大学物理学院,湖北 武汉,430074

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

3 中国地质大学地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074

**摘要:**卫星重力测量是当前探测全球一致、高精度和高分辨率地球重力场的高效技术手段,主要包括高低卫星跟踪卫星测量(satellite-to-satellite tracking in high-low mode, SST-hl)、低低卫星跟踪卫星测量(satellite-to-satellite tracking in low-low mode, SST-ll)和卫星重力梯度测量(satellite gravity gradiometry, SGG)。系统总结了利用卫星重力测量技术(包括SST-hl、SST-ll和SGG及多模式组合)反演地球重力场的主要方法,评述了利用挑战性小卫星有效载荷(challenging mini-satellite payload, CHAMP)、重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)/GRACE继任者(GRACE follow-on, GRACE-FO)和地球重力场和海洋环流探索器(gravity field and steady-state ocean circulation explorer, GOCE)卫星重力数据构建静态和时变重力场模型的最新进展,并对当前具有代表性的地球重力场模型精度进行了分析和评估,以期对未来的地球重力场研究及其地学应用提供参考。

**关键词:**地球重力场;卫星重力测量;多模式观测数据融合;模型精度评估

**中图分类号:**P228;P223

**文献标志码:**A

地球重力场是地球最基本的物理场之一,是地球内部、地表及外部空间物质分布与地球自身旋转运动信息的综合反映。确定地球重力场的精细结构及其时间变化,历来是物理大地测量学的基本任务和研究热点之一,高精度和高分辨率的地球重力场及其时变信息对于测绘学、冰川学、水文学、固体地球物理、灾害监测及国防军事等领域具有重要科学意义和应用价值<sup>[1-2]</sup>。

卫星重力测量是利用地球低轨卫星搭载的各种传感器(包括全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)接收机、加速度计、恒星敏感器、星间测距系统和重力梯度仪等),精密测定由地球重力场引起的卫星轨道摄动或地球重力场参量,并用这些观测数据实现重力场反演的方法和技术。低轨道卫星、卫星轨道机动、卫星精确定轨和非保守力测量是卫星重力测量技术的最大特点。相比传统的重力测量方法(如地面和航空重力测量),卫星重力测量不受天气状况和地理环境等条件的限制,具有全球高覆盖率、高精度和高时空分辨率等优点。自20世纪80

年代提出地球重力场探测计划(geopotential research mission, GRM)以来,人们对卫星重力测量的理论基础、技术模式进行了深入研究和实验,直到21世纪初重力卫星多项关键技术(如星载精密定轨、加速度计测定非保守力、星间微波测距等)实现重大突破,卫星重力探测任务才得以成功实施。以挑战性小卫星有效载荷(challenging mini-satellite payload, CHAMP)、重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)/GRACE继任者(GRACE follow-on, GRACE-FO)以及地球重力场和海洋环流探索器(gravity field and steady-state ocean circulation explorer, GOCE)等为代表的新一代卫星重力探测任务的成功实施,将地球重力场中长波段的精度提高了1~2个量级,地球重力场建模精度和分辨率实现了里程碑式的跨越<sup>[2-3]</sup>。

新一代卫星重力探测技术主要包括卫星跟踪卫星测量(satellite-to-satellite tracking, SST)和卫星重力梯度测量(satellite gravity gradiometry, SGG)模式,它们被认为是当前最有价值和应用

收稿日期:2022-08-31

项目资助:国家自然科学基金(41931074, 41974015, 42061134007)。

第一作者:罗志才,博士,教授,主要研究方向为物理大地测量学和卫星重力学。zcluo@hust.edu.cn

通讯作者:钟波,博士,副教授。bzhong@sgg.whu.edu.cn

前景的高效重力探测技术。德国于2000年7月15日发射的CHAMP卫星采用了高低卫星跟踪卫星测量模式(SST in high-low mode, SST-hl), 可以获取地球重力场的长波分量<sup>[4]</sup>, 如采用8 a的CHAMP卫星数据解算的地球重力场模型相比传统重力观测数据构建的EGM96模型, 其在60阶次之前的位系数精度提升约1个量级<sup>[5]</sup>。美国、德国于2002年3月17日联合发射的GRACE卫星组合了SST-hl和低低卫星跟踪卫星测量模式(SST in low-low mode, SST-ll), 主要用于探测地球重力场中长波分量及其随时间的变化<sup>[6]</sup>, 研究结果表明: 采用13 a的GRACE卫星观测数据解算的地球重力场模型在100阶次之前精度提升约2~3个量级<sup>[7]</sup>。欧洲空间局于2009年3月17日发射的GOCE卫星组合了SST-hl和SGG模式, 主要用于测定地球重力场的中短波分量<sup>[8]</sup>, 如采用4.5 a的GOCE卫星观测数据解算的地球重力场模型在100至200阶次的精度提升约1个量级<sup>[9]</sup>。美国、德国于2018年5月22日发射的后继卫星GRACE-FO采用了与GRACE相同的技术模式, 并且额外搭载了测距精度高达10 nm的星间激光干涉测距系统, 但由于加速度计故障及背景模型误差的影响, GRACE-FO探测地球重力场的精度和空间分辨率与GRACE相当, 仅在高阶部分的精度略有提升<sup>[10]</sup>。

新一代卫星重力探测任务极大地提升了人们对地球重力场的认识水平, 并拓展了经典重力场理论在地球科学领域中的应用深度和广度。利用卫星重力测量技术研究地球重力场已成为当前物理大地测量学一个活跃和最具吸引力的研究课题, 国内外诸多学者和相关研究机构提出了多种卫星重力场反演方法, 并研制了一系列以卫星重力测量数据为基础的高精度静态和时变重力场模型。然而, 卫星重力测量技术属于典型的军民融合技术, 西方国家对我国实行了严格的技术封锁, 因此借鉴国际重力卫星的成功经验发展中国自主的卫星重力测量核心技术已是发展所需, 并将极大地提升中国综合国力和国际竞争力。在此背景下, 经过几代科学家的共同努力和相关研究机构的联合攻关, 中国自主的重力卫星技术已经实现了重要突破。特别是2019年12月20日发射的“天琴一号”卫星成功搭载了高精度静电悬浮加速度计和GNSS定位系统, 实现了SST-hl对地球重力场的自主观测<sup>[11]</sup>; 2021年12月29日成功发射的“天绘-4”卫星, 则通过SST-ll

实现了对地球重力场的自主观测。

随着国内外卫星重力测量技术的飞跃发展, 地球重力场研究迎来了一场重大变革, 特别是在卫星重力场反演方法、高精度重力场建模水平和相关地学应用等方面取得了重要进展。鉴于地球重力场在地球科学、全球变化和国防安全中的重要作用及战略地位, 国内外相关机构正在加紧开展下一代卫星重力测量技术模式的论证和关键核心载荷的研制<sup>[12-13]</sup>。在此背景下, 对利用卫星重力测量技术研究地球重力场的最新进展进行回顾和总结是非常有必要的。因此, 本文将从卫星重力测量反演方法、地球重力场模型最新研制进展和模型评估等方面展开论述, 以期对今后的地球重力场研究提供参考。

## 1 利用卫星重力测量反演地球重力场的方法

### 1.1 高低卫星跟踪卫星测量

1960年Baker最早提出了SST-hl的概念, 是由若干高轨卫星跟踪低轨卫星的轨道摄动确定扰动重力场。CHAMP是第一颗采用SST-hl技术测定地球重力场的专用重力卫星, 其设计轨道高度约为454 km, 轨道倾角为87°, 主要有效载荷包括双频GNSS接收机、星载加速度计和恒星敏感器。若将CHAMP卫星视为一个单位质量的检测粒子, 受到地球重力场和各种摄动力的作用, 其动力学方程可表示为:

$$\mathbf{a}_s = -\nabla V + \mathbf{a}_g + \mathbf{a}_{ng} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{a}_s$  为卫星加速度;  $V$  为地球引力位;  $\nabla$  为梯度算子;  $\mathbf{a}_g$  为卫星受到的除地球引力以外的保守力加速度;  $\mathbf{a}_{ng}$  为卫星受到的非保守力加速度。其中,  $\mathbf{a}_g$  可通过力学模型计算,  $\mathbf{a}_{ng}$  可通过星载加速度计测定, 因此可将它们从卫星加速度  $\mathbf{a}_s$  中扣除。

若将地球引力位  $V$  表示为正常重力位  $U$  和扰动位  $T$  两部分, 则式(1)可表示为:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_s - \mathbf{a}_g - \mathbf{a}_{ng} = -\nabla(U + T) \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{a}$  为卫星的重力加速度, 它包括正常重力位  $U$  和扰动位  $T$  引起的加速度。若已知卫星的初值状态, 则对式(2)关于时间  $t$  进行两次积分, 可得:

$$\iint \mathbf{a} dt^2 = \iint (-\nabla U) dt^2 + \iint (-\nabla T) dt^2 = \mathbf{r}(t) + \Delta \mathbf{r}(t) \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{r}(t)$  表示在正常重力位  $U$  作用下的卫星轨道;  $\Delta \mathbf{r}(t)$  表示由扰动位  $T$  引起的轨道摄动。因

此,如果选定了正常重力位  $U$ ,可利用星载 GNSS 定轨技术精密确定 CHAMP 卫星的轨道摄动,进而可以通过式(3)反演出扰动位  $T$ ,这就是利用 SST-hl 技术反演地球重力场的基本物理内涵。

在实际应用中,利用 SST-hl 技术观测的卫星轨道数据、非保守力加速度计数据和卫星姿态数据等反演地球重力场的主要方法有动力积分法<sup>[4,14-16]</sup>、能量法<sup>[17-19]</sup>、加速度法<sup>[18,20-21]</sup>和短弧边值法<sup>[22-23]</sup>等,这些方法主要遵循了两个物理定律,即牛顿第二运动定律和能量守恒定律,并且每一种方法各自有其优缺点。动力积分法是通过积分牛顿运动变分方程得到状态转移矩阵和参数敏感矩阵,建立卫星轨道摄动与扰动位系数的非线性关系,通过将观测模型线性化后代求解位系数。动力积分法的解算精度较高,但由于需要求解变分方程,且未知参数涉及弧段初始状态等多余参数,因此其计算较为复杂,并且对计算资源要求较高。能量法是根据能量守恒原理建立卫星状态矢量和卫星受力(主要为非保守力)与扰动位系数的关系,并通过能量平衡方程估计扰动位系数。能量法原理简单,但其对卫星速度精度要求较高,重力场反演精度一定程度上受到了目前定轨精度水平的限制,并且建立的能量平衡方程为标量方程,损失了卫星状态矢量的方向信息。加速度法是基于牛顿第二运动定律建立卫星加速度与扰动位系数的线性关系,并以卫星轨道数值微分计算的卫星加速度观测值估计位系数。加速度法的优点是物理含义明确,但由卫星轨道数值微分计算加速度的过程会放大高频误差,进而会影响位系数的估计精度<sup>[20,24]</sup>。短弧边值法是基于牛顿第二运动定律,通过 Fredholm 积分方程计算每个轨道弧段内观测点上引力的积分值,并根据引力与其积分值的关系估计位系数。短弧边值法在位置域上建立了扰动位系数与卫星轨道摄动的关系,其优点是积分弧段短,对卫星摄动力计算精度要求低,但采用短弧段观测数据不利于低阶位系数的反演。文献[25]采用 GOCE SST-hl 观测数据对以上方法反演的重力场模型进行比较,结果表明:除了能量法由于采用标量方程解算的重力场模型精度略低以外,其他方法的反演精度相当,进一步说明不同方法在理论上均能够实现高精度的重力场模型反演。

针对上述 SST-hl 技术反演地球重力场方法的一些缺陷,国内外学者提出了一些改进方法。例如,文献[26]推导了以参考轨道为初值的线性

化解算地球重力场的观测方程,提出了进一步提高动力积分法反演重力场精度的方法;文献[27]通过充分考虑不同轨道方向观测值的频谱贡献,实现了顾及多方向观测值权比反演地球重力场的动力方法;文献[20-21,24]提出了抑制卫星加速度高频误差的均值滤波和去相关滤波方法;文献[23]提出了改进的短弧积分法,并对非保守力加速度和姿态观测误差进行建模;文献[28]提出基于星载 GPS 相位数据的历元差分方法计算卫星平均加速度,有效抑制了观测值中的系统误差和非稳态噪声对加速度法反演重力场的影响。

## 1.2 低低卫星跟踪卫星测量

1969 年 Wolff 提出了 SST-II 的概念,它是通过测定在同一轨道上两颗卫星之间的距离变率(即相对视线速度)所求得的引力位变化来确定重力场。GRACE 是第一个采用 SST-II 技术测定地球重力场及其时变参数的专用重力卫星,其双星平均轨道高度约为 485 km,轨道倾角为 89.5°,星间距约为 220 km,主要有效载荷包括 GNSS 接收机、星载加速度计、星间微波测距系统和恒星敏感器。GRACE-FO 卫星除了搭载以上载荷外,还首次搭载了星间激光干涉测距系统。同样,将 GRACE/GRACE-FO 双星看作是两个具有单位质量的检测粒子,对其分别扣除地球引力以外的保守力和非保守力后,其动力学方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{a}_1 = -\nabla_1(U + T) \\ \mathbf{a}_2 = -\nabla_2(U + T) \end{cases} \quad (4)$$

式中,下标“1”和“2”表示 GRACE/GRACE-FO 双星的编号。将式(4)中的两个方程求差,并类似于式(3)在已知卫星初始状态下对时间  $t$  进行一次积分,可得:

$$\int (\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1) dt = \mathbf{v}_2(t) - \mathbf{v}_1(t) + \Delta \mathbf{v}_2(t) - \Delta \mathbf{v}_1(t) \quad (5)$$

式中, $\mathbf{v}(t)$ 表示在正常重力位  $U$  作用下的卫星速度; $\Delta \mathbf{v}(t)$ 表示由扰动位  $T$  引起的卫星速度变化。式(5)中的  $\Delta \mathbf{v}_2(t) - \Delta \mathbf{v}_1(t)$  即为星间相对速度,它在卫星视线上的投影即为星间距离变率,利用该数据可以精确反演地球重力场。比较式(5)和式(3)可知,SST-II 技术采用了一阶差分的思想,可在一定程度上补偿重力场信号随高度衰减的问题,其测定地球重力场中长波部分的精度比 SST-hl 技术更高,并可提供地球重力场随时间的变化。

利用 SST-II 技术反演地球重力场方法通常以 SST-hl 技术的反演方法为基础,其关键是进一



步建立星间距离变率观测数据与扰动位系数之间直接或间接的函数关系,并采用最优估计方法求解引力位系数。与SST-hl技术反演方法类似,利用SST-II观测数据反演地球重力场的常用方法有动力积分法<sup>[15-16,27,29-33]</sup>、能量法<sup>[19,34-36]</sup>、加速度法<sup>[37-38]</sup>、短弧边值法<sup>[23,39-40]</sup>和天体力学法<sup>[41]</sup>等。其中,天体力学法与动力积分法极为相似,仅仅只是对加速度计数据的处理方面存在一定的差异,因此不作为单独的方法进行论述。

由于不同反演方法在理论上都可用于地球重力场的精细建模,国内外学者针对SST-II技术反演重力场的各种方法从数据处理和求解策略等方面进行了改进和精化。在动力积分法方面,文献[42]发展了卫星轨道和地球重力场的“一步法”同时严密求解技术,文献[43]采用频率定权方法有效抑制观测值的有色噪声,文献[44-45]改进了GRACE星间距离变率低频噪声处理方法和轨道耦合效应处理算法,文献[33]建立了星间测距系统的稳态噪声和天线偏移改正的非稳态噪声分离算法,以上改进方法和技术手段均有效提高了GRACE重力场模型的反演精度。在短弧边值法方面,文献[46-47]建立了改进的短弧边值法,先后将轨道误差、星间距离变率误差、加速度计误差和卫星姿态误差等观测误差与重力场模型同时求解,并突破了短弧边值法计算弧长较短的缺点,有效提高了GRACE卫星重力场的建模精度。在能量法方面,文献[48]基于近似的能量平衡方程将星间距离变率、卫星轨道和加速度计等数据通过固定约束条件进行非线性最小二乘估计,有效提高了星间重力位差的计算精度;文献[36]引入了严密的解析校正方程对能量平衡方程进行改进,并基于重构的动力学平滑轨道消除背景模型的系统误差,进一步提高了星间重力位差的估计精度;文献[49]在改进的能量平衡方程基础上,针对经验参数会吸收重力场低频信号的问题,采用移去-恢复技术有效提高了星间重力位差估计的可靠性,其反演的GRACE重力场模型达到了官方机构发布模型的精度水平。此外,在加速度法方面,文献[37]建立了三点星间距离组合的改进加速度法,并采用频率定权方法有效抑制了加速度数据的高频噪声,提高了加速度法反演GRACE卫星重力场模型的精度;文献[38]基于Cowell积分建立了顾及卫星轨道误差的平均加速度函数模型,并通过差分方法消除星间距离模糊度,进一步提高了加速法构建精细重力场

模型的能力。

### 1.3 卫星重力梯度测量

SGG技术是通过低轨卫星上搭载的重力梯度仪直接测定卫星轨道处的重力梯度张量(即重力位的二阶导数)或部分梯度分量,并用以确定地球重力场。其中,星载重力梯度仪是SGG技术最核心的核心载荷,其设计的基本思想是通过固定基线上的差分加速度计来测定3个互相垂直方向的重力梯度张量的各个分量。GOCE是第一颗采用SGG技术测定地球重力场的专用重力卫星,其设计轨道高度约为250 km,轨道倾角为96.7°,有效载荷主要包括三轴静电悬浮式重力梯度仪、GNSS接收机和恒星敏感器,并首次采用了无拖曳技术<sup>[50]</sup>。由于无拖曳技术可实时消除卫星所受到的非保守力(主要为沿轨方向),因此可认为GOCE卫星处于惯性运动状态,只受到地球重力场及其他保守力的作用,其动力学方程可表示为:

$$\mathbf{a}_s = -\nabla V + \mathbf{a}_g \quad (6)$$

同理,将其他保守力扣除,并引入正常重力位 $U$ 和扰动位 $T$ ,式(6)可以变为:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_s - \mathbf{a}_g = -\nabla(U + T) \quad (7)$$

对于卫星重力梯度测量来说,将式(7)再取旋度运算可得:

$$\nabla \times \mathbf{a} = \nabla \times (-\nabla U) + \nabla \times (-\nabla T) = (\mathbf{U}_{ij}) + (\mathbf{T}_{ij}) \quad (8)$$

式中, $(\mathbf{U}_{ij})$ 为正常重力位 $U$ 对应的重力梯度张量; $(\mathbf{T}_{ij})$ 为扰动位 $T$ 对应的重力梯度张量。因此,当选定了正常重力位 $U$ ,可利用重力梯度仪测定的扰动重力梯度张量 $(\mathbf{T}_{ij})$ 反演地球重力场。需要说明的是,SGG技术直接测定了重力位的二阶导数,相比SST-hl和SST-II技术更能有效补偿重力场信号随高度的衰减,因此能够以更高精度和分辨率测定地球重力场的中短波频段信息。

利用卫星重力梯度测量数据反演地球重力场的方法主要有空域法和时域法。空域法是将卫星重力梯度数据作为卫星位置的函数,在实际求解中有两种方式:(1)通过建立卫星轨道处重力梯度数据与位系数之间的数学关系,由最小二乘法进行严密求解,称为空域最小二乘法<sup>[51-53]</sup>;(2)将重力梯度数据归算至平均轨道球面上形成格网数据,采用最小二乘配置法或球谐分析法求解扰动位系数<sup>[54]</sup>。时域法是将卫星重力梯度数据看成沿卫星轨道的时间序列,在实际求解中也有两种方式:(1)基于Kaula轨道摄动分析理论建

立卫星重力梯度观测方程,并通过最小二乘法求解扰动位系数,称为时间域时域法<sup>[55-56]</sup>; (2) 将沿轨重力梯度观测值进行快速傅里叶变换,建立频域内 Lumped 系数与位系数的线性观测方程,并通过最小二乘法估计扰动位系数,称为时间域频域法或半解析法<sup>[53,57]</sup>。

GOCE 卫星观测数据发布后,欧洲空间局官方数据处理机构除了利用空域法和时域法进行重力场建模以外,还采用了理论更为严密、解算精度更高的直接法<sup>[58-59]</sup>。直接法是基于完全动力积分法建立卫星轨道、重力梯度观测值与扰动位系数的严密数学关系,在“一步法”框架下经过多次迭代求解扰动位系数。从欧洲空间局官方机构采用的 3 种解算方法来看,空域法一般需要将卫星重力梯度观测值归算到球面上进行格网化处理,不可避免地引入了归算和格网化误差;时域法为使解算的方程具有块对角的特性,引入的一些严格假设条件必然会对重力场解算结果带来近似误差;直接法虽然反演理论更为严密,但其算法复杂、计算量庞大,必须解决海量数据的快速求解问题。除了以上 3 种官方采用的反演方法以外,国内外学者还提出了一些其他反演方法,如重力梯度不变量法<sup>[60-62]</sup>、短弧法<sup>[63]</sup>、Slepian 基函数法<sup>[64]</sup>和重力梯度边值问题解法<sup>[3,52-53]</sup>等。

此外,GOCE 卫星重力梯度测量的误差具有有色噪声的特性,其测量带宽为 0.005~0.1 Hz,在该频段以外含有大量低频系统误差和具有频率倒数(1/f)特性的有色噪声<sup>[65]</sup>。因此,卫星重力梯度数据有色噪声的滤波处理是反演高精度重力场的一个关键环节。对于 GOCE 卫星重力梯度数据的误差处理,直接法是对带通滤波后的重力梯度观测值进行自回归滑动平均(auto regressive moving average, ARMA)滤波,仅求解中高阶次扰动位系数,其低阶位系数严重依赖于先验重力场模型。时域法是利用平滑后的重力梯度误差功率谱密度建立 ARMA 模型,并在全频带内对重力梯度观测值进行滤波,其解算结果不受先验模型的影响。空域法是利用先验噪声方差-协方差模型对重力梯度观测值进行 Wiener 滤波来求解中高阶次扰动位系数,其低阶位系数也依赖于先验重力场模型。此外,文献[66-67]采用移去-恢复和零相位的向前向后数字滤波方法,其滤波通带外的信号也由先验重力场模型提供。文献[68]提出了一种将经验参数或移动平均与 AR-MA 滤波相组合的全频段级联滤波方法,有效抑

制了卫星重力梯度数据的低频系统误差和有色噪声。综上所述,利用 GOCE 卫星重力梯度数据反演高精度、高分辨率地球重力场模型,需要建立严密理论模型和最优噪声处理方法。

#### 1.4 多模式卫星重力数据融合

不同卫星重力测量技术模式(包括 SST-hl、SST-ll 和 SGG)提供了多种类型的重力场观测值,它们不仅与重力场的基本参量扰动位存在不同的泛函相依关系,而且反映了地球重力场不同的频谱特征,各自具有不同的分辨率和精度水平。因此,综合考虑这些不同类型卫星重力数据的精度和频谱特征并实现多模式卫星重力数据的最优融合,是进一步提高地球重力场模型反演精度和分辨率的必然趋势。此外,多模式卫星重力数据融合的地球重力场信息为发展高精度的超高阶地球重力场模型奠定了基础<sup>[8]</sup>。

对于 GOCE 任务而言,它组合了 SST-hl 和 SGG 两种技术模式。其中,SST-hl 技术通过确定卫星轨道摄动可以很好地感知地球重力场的低频信号,而 SGG 技术则对地球重力场的中、高频信号更为敏感,因此联合这两类数据可以反演精度和分辨率更高的重力场模型。在 GOCE SST-hl 和 SGG 数据联合处理方面,空域法是基于最小二乘配置联合 SGG 数据和 SST-hl 得到的沿轨扰动位数据求解 GOCE 卫星重力场模型<sup>[54,58]</sup>;时域法是通过半解析法建立 SGG 观测方程,并由能量法或短弧边值法建立 SST-hl 观测方程,通过最小二乘联合平差求解 GOCE 卫星重力场模型<sup>[9,58]</sup>;直接法是将卫星位置处建立的严密 SGG 观测方程和基于完全动力积分法建立的 SST-hl 观测方程进行联合平差求解。可以看出,最小二乘配置法和最小二乘联合平差法是目前 GOCE SST-hl 和 SGG 数据融合处理的主要方法。其中,配置法是通过各种重力场参量与扰动位之间的协方差函数对扰动位进行最优估计,其最大优点是能够综合处理各种观测数据,但重力场参量之间的协方差函数只能近似获取,且存在超高阶协方差矩阵的求逆问题。联合平差是将各类观测值建立的观测方程进行联合平差解算,并采用方差分量估计通过迭代计算的过程进行最优定权,其求解对海量卫星重力数据的处理极为耗时。此外,文献[69]基于球谐分析方法推导了球近似下 GOCE 平均轨道面扰动位和重力梯度对角线组合分量的最小二乘谱组合法计算公式,并反演了一组谱组合法构建的 GOCE 重力场



模型。应用谱组合法的前提是对各个谱分量进行精确定权,其关键是采用一种有效的估计方法严格确定各个观测量的误差模型。

考虑到 SST-II 比 SST-III 反演地球重力场的性能更优,近年来国内外学者对组合 GRACE SST-II 和 GOCE SGG 观测数据反演高精度和高分辨率的联合重力场模型进行了深入研究。文献[70]通过数值模拟较早地分析了 GOCE 和 GRACE 卫星反演地球重力场的波谱敏感性,发现 GRACE 反演的前 120 阶次位系数精度较高,而 GOCE 对 30~250 阶次的重力场信息均有改善。文献[8]利用联合平差法研制了第一个 GOCE 和 GRACE 观测数据联合重力场模型 GO-CO01S,结果表明联合模型的整体精度优于单一卫星观测数据的解算模型。在此基础上,随着 GOCE 和 GRACE 观测数据的不断积累,GO-CO 系列联合重力场模型的解算精度得到了进一步提高(如 GO-CO06S 模型<sup>[71]</sup>)。文献[72]分析了 GOCE SGG 不同分量和 GRACE SST-II 数据对扰动位系数反演的贡献,并通过最小二乘联合平差解算了 GOCE 和 GRACE 联合重力场模型。此外,文献[67,73-75]也基于最小二乘联合平差的思想采用不同的观测模型分别反演了一系列 GOCE 和 GRACE 联合重力场模型,其精度与官方机构采用同期数据求解的模型精度相当。

## 2 地球重力场模型研制与评估

### 2.1 静态重力场模型

自新一代卫星重力探测任务(CHAMP、GRACE/GRACE-FO 和 GOCE 等)实施以来,国际相关大地测量研究机构利用卫星重力数据研制了 EIGEN、GGM、ITG、ITSG、AIUB 和 GOCO 系列的静态卫星重力场模型,其中,以德国地学研究中心(German Research Center for Geosciences, GFZ)研制的 EIGEN 系列(如 EIGEN-CHAMP03S、EIGEN-GRACE02S、EIGEN-5S 和 EIGEN-6S 等)、美国德州大学空间研究中心(Center for Space Research, CSR)研制的 GGM 系列(如 GGM01S、GGM03S、GGM05S 和 GGM05G 等)和奥地利格拉茨技术工业大学大地测量研究所(Institute of Geodesy, Graz University of Technology, ITSG)研制的 ITSG 系列(如 ITSG-Grace2014s/k 和 ITSG-Grace2018s 等)重力场模型最具有代表性,并且这些重力场模型均采用了动力积分法进行求解。同时,欧洲空间局

下属的 GOCE 官方数据处理机构采用时域法、空域法和直接法研制了 GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM/SPW/DIR 系列重力场模型,并通过联合平差方法研制了 GOCE 和 GRACE 数据联合反演的 GOCO 系列重力场模型(如 GOCO01S 和 GOCO06S 等)。此外,国内有关研究机构利用官方发布的卫星重力数据也研制了一系列的卫星重力场模型。例如,武汉大学利用能量法研制了 GRACE 静态重力场模型 WHU-GM-05<sup>[35]</sup>,利用重力梯度不变量法研制了 GOCE 静态重力场模型 IGGT-R1<sup>[62]</sup>;同济大学利用改进的短弧边值法研制了 Tongji-Grace02s/k 系列 GRACE 静态重力场模型<sup>[76]</sup>;华中科技大学利用改进的动力积分法研制了 GRACE 静态重力场模型 HUST-Grace2016s<sup>[7]</sup>。

为了对 CHAMP、GRACE 和 GOCE 卫星重力数据反演的重力场模型精度进行评估,图 1 给出了一些典型的卫星重力场模型(如 EIGEN-CHAMP03S、EIGEN-GRACE02S、GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R1、GO\_CONS\_GCF\_2\_SPW\_R1、GO\_CONS\_GCF\_2\_DIR\_R1 和 GOCO01S 等)和传统的 EGM96 模型相比 GGM05C 模型的重力位系数阶误差均方根(root mean square, RMS)。其中,EIGEN-CHAMP03S 模型采用了 33 个月的 CHAMP 观测数据构建,最大的完全阶次为 120<sup>[4]</sup>;EIGEN-GRACE02S 模型由 110 d GRACE 观测数据构建,最大的展开阶次为 150<sup>[29]</sup>;GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R1、GO\_CONS\_GCF\_2\_SPW\_R1 和 GO\_CONS\_GCF\_2\_DIR\_R1 模型采用了约 2 个月的 GOCE 观测数据构建,最大展开阶次分别为 224、210 和 240<sup>[58]</sup>;GOCO01S 采用了 7.5 a 的 GRACE 数据(ITG-GRACE2010S 模型法方程)和 2 个月的 GOCE 数据进行联合求解,最大的展开阶次为 224<sup>[8]</sup>;GGM05C 模型是综合利用 GRACE(约 10 a)、GOCE(约 4 a)、卫星测高和地面重力数据构建的高精度联合重力场模型,其最大展开阶次为 360,可作为高精度的参考重力场模型进行比较。

从图 1 中可以看出,采用 33 个月的 CHAMP 数据构建的 EIGEN-CHAMP03S 模型,其在 60 阶次前的位系数精度相比传统观测数据构建的 EGM96 模型高约 1 个量级,充分体现出 SST-III 技术相比传统重力观测技术在确定长波重力场方面的优越性;采用 110 d 的 GRACE 数据构建的 EIGEN-GRACE02S 模型,其整体精度相比 EI-

GEN-CHAMP03S 模型又高了约 1 个量级,体现了 SST-II 技术相比 SST-hI 技术对确定中长波重力场的优越性;对于采用 2 个月的 GOCE 数据构建的 GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R1、GO\_CONS\_GCF\_2\_SPW\_R1 和 GO\_CONS\_GCF\_2\_DIR\_R1 模型,由于采用不同的解算方法导致这些模型的精度具有一定的差异(其中直接法解算模型的精度最高,空域法次之,时域法最低),但它们在高阶部分(约 50~80 阶以上)的位系数精度整体优于 EIGEN-GRACE02S 模型,体现出 SGG 技术相比 SST-II 和 SST-hI 技术在测定中短波重力场方面的优越性;对于 GOCE 和 GRACE 数据联合求解的 GOCO01S 模型而言,其整体精度优于 CHAMP、GRACE 和 GOCE 数据单独求解的各种模型,充分说明将多模式卫星重力数据进行融合处理有助于实现各类数据的互补,并能有效提高重力场模型反演的精度和分辨率。

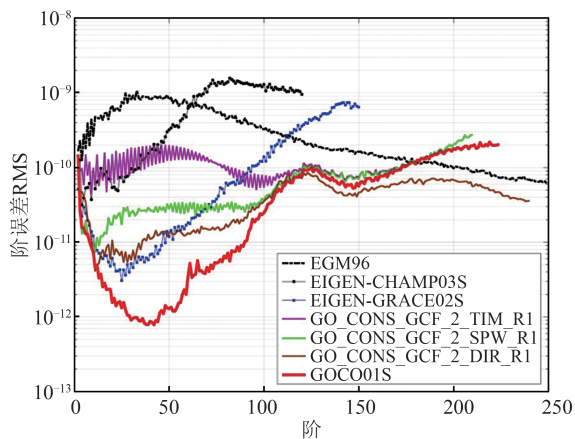


图1 各种卫星重力场模型相比 GGM05C 的阶误差 RMS  
Fig.1 Degree Error RMS of Different Earth's Gravity Field Models with Respect to GGM05C

此外,随着卫星重力数据处理策略和解算方法的改进,以及卫星重力观测数据的不断积累,地球重力场模型的反演精度和可靠性也在不断提高。以时域法求解的 GOCE 卫星重力场模型为例进行分析,图 2 给出了第 1~6 代时域解模型(如 GO\_CONS\_GCF\_2\_DIR\_R1~R6)相对于 GGM05C 模型的重力位系数阶误差 RMS。其中,第 1 代模型的解算采用了 2 个月的观测数据, SST-hI 和 SGG 数据分别采用能量法和时域法建立观测方程,最大解算阶次为 224;第 2 代和第 3 代模型的解算策略与第 1 代模型相同,但分别采用了 8 个月和 18 个月的数据,最大解算阶次为 250;第 4 代模型采用了约 32 个月的观测数据进行解算, SST-hI 和 SGG 数据分别采用短弧边值

法和时域法建立观测方程,最大解算阶次为 250;第 5 代和第 4 代模型的解算策略相同,但采用了约 48 个月的观测数据进行解算,最大解算阶次为 280;第 6 代和第 5 代模型的解算策略相同,但采用了约 48 个月的重新预处理后的观测数据进行解算,最大解算阶次为 300。从图 2 中可以看出,随着数据处理方法的改进和观测数据的不断积累,时域法解算模型的精度也在逐渐提高,特别是第 4~6 代模型采用短弧边值法处理 SST-hI 数据后,其中在低阶部分(约 100 阶以内)的反演精度相比第 1~3 代模型采用能量法处理 SST-hI 数据的反演结果精度约高 1 个量级;在高阶部分(约 120 阶以后),位系数的反演精度随着采用观测数据量的增加而提高。尽管第 5 代和第 6 代模型采用了相同的反演方法和相同时段的观测数据,但由于第 6 代模型采用了重新预处理的 GOCE 数据<sup>[77]</sup>,其反演模型的精度更高,这说明了新版预处理的 GOCE 数据质量更高,有助于提升重力场模型的反演精度。

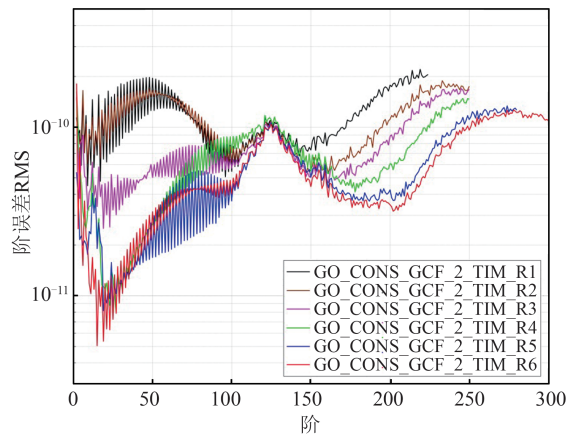


图2 时域法求解的各代 GOCE 重力场模型相比 GGM05C 的阶误差 RMS  
Fig.2 Degree Error RMS of Different Time-Wise Gravity Field Models with Respect to GGM05C

表 1 给出了基于卫星重力数据构建的典型重力场模型在全球各个地区的 GNSS 水准检核精度(差值 RMS)统计结果,其中 GGM05C 和 EIGEN-6C4 是综合卫星重力、卫星测高和地面重力等多源重力数据求解的高精度联合重力场模型,而其他模型是仅采用卫星重力数据构建的纯卫星重力场模型。可以看出,采用 CHAMP SST-hI 数据构建的 EIGEN-CHAMP03S 模型的检核精度仅为 1.0 m 左右,而主要基于 GRACE SST-II 数据构建的 EIGEN-GRACE02S 和 ITSG-Grace2018s 模型的检核精度提升约 0.5 m,并且模

型的空间分辨率(即最高有效阶数)也有提高;采用GOCE SST-hl和SGG数据构建的时域法模型GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R1、空域法模型GO\_CONS\_GCF\_2\_SPW\_R1和直接解模型GO\_CONS\_GCF\_2\_DIR\_R1的检核精度约为0.4~0.5 m左右,但模型的空间分辨率有了进一步提高;而将GOCE和GRACE数据联合求解的GOCO01S和GOCO06S模型相比GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R1、GO\_CONS\_GCF\_2\_SPW\_R1和ITSG-Grace2018s模型的检核精度有了进一步

提高,特别是最新一代的联合模型GOCO06S精度已达到0.3 m左右。此外,以卫星重力观测数据为基础,融合多源卫星重力数据构建的联合重力场模型GGM05C和EIGEN-6C4,它们的检核精度已经达到了0.2 m左右,特别是超高阶重力场模型EIGEN-6C4的检核精度在全球范围内的统计精度已优于0.2 m。需要指出的是,尽管新一代卫星重力技术有效提升了地球重力场中长波段的精度,但GNSS水准检核结果表明目前地球重力场模型的精度水平仍为分米级。

表1 各种典型重力场模型的GNSS水准检核精度/m

Tab.1 Accuracies of GNSS Leveling Checking Derived from Different Gravity Field Models/m

| 地球重力场模型              | 阶数    | GNSS水准检核精度 |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      |       | 澳大利亚       | 巴西    | 加拿大   | 欧洲    | 日本    | 墨西哥   | 美国    |
| EIGEN-CHAMP03S       | 140   | 0.826      | 0.888 | 1.123 | 1.539 | 2.019 | 1.271 | 0.816 |
| EIGEN-GRACE02S       | 150   | 0.480      | 0.681 | 0.734 | 0.865 | 1.027 | 0.942 | 0.739 |
| ITSG-Grace2018s      | 200   | 0.363      | 0.402 | 0.391 | 0.504 | 0.573 | 0.545 | 0.496 |
| GO_CONS_GCF_2_TIM_R1 | 224   | 0.387      | 0.372 | 0.424 | 0.470 | 0.578 | 0.501 | 0.455 |
| GO_CONS_GCF_2_SPW_R1 | 210   | 0.396      | 0.399 | 0.479 | 0.496 | 0.569 | 0.528 | 0.471 |
| GO_CONS_GCF_2_DIR_R1 | 240   | 0.290      | 0.344 | 0.349 | 0.384 | 0.489 | 0.404 | 0.407 |
| GOCO01S              | 224   | 0.384      | 0.371 | 0.417 | 0.468 | 0.578 | 0.498 | 0.451 |
| GOCO06S              | 300   | 0.259      | 0.320 | 0.297 | 0.341 | 0.430 | 0.346 | 0.398 |
| GGM05C               | 360   | 0.175      | 0.276 | 0.219 | 0.225 | 0.282 | 0.253 | 0.321 |
| EIGEN-6C4            | 2 190 | 0.091      | 0.234 | 0.137 | 0.121 | 0.079 | 0.197 | 0.247 |

注:数据引自[http://icgem.gfz-potsdam.de/tom\\_gpslev](http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_gpslev)(2022-08-31)

## 2.2 时变重力场模型

迄今为止,GRACE/GRACE-FO已提供了近20 a的时变重力场信息,国际三大官方机构(包括CSR、GFZ和美国宇航局喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL))采用动力积分法研制了阶次为60或96、时间分辨率为1个月的Level-2时变重力场模型,如最新发布的CSR RL06、GFZ RL06和JPL RL06等系列时变重力场模型。与此同时,法国空间研究中心空间大地测量研究所(Groupe de Recherche de Geodesie Spatiale, GRGS)、ITSG和德国汉诺威莱布尼茨大学大地测量研究所(Leibniz Universität Hannover, LUH)也采用动力积分法研制了CNES\_GRGS\_RL04<sup>[78]</sup>、ITSG-Grace2018s<sup>[33]</sup>以及LUH-GRACE2018<sup>[79]</sup>等系列时变重力场模型;波恩大学理论大地测量研究所(Institute of Theoretical Geodesy, ITG)采用短弧边值法研制了ITG-GRACE2010系列时变重力场模型<sup>[8]</sup>;代尔夫特地球观测与空间系统研究所(Delft institute of Earth Observation and Space system, DEOS)采用

加速度法研制了DTM-1系列时变重力场模型<sup>[37]</sup>。在国内,相关研究机构重点对时变重力场反演的数据处理策略和建模方法进行了改进,并研制了一系列具有国际精度水平的GRACE时变重力场模型。例如,同济大学采用改进的短弧边值法研制了Tongji-Grace2018时变重力场模型<sup>[47]</sup>;华中科技大学采用改进的动力积分法研制了HUST-Grace2020时变重力场模型<sup>[44-45]</sup>;武汉大学采用历元差分的动力积分法研制了WHU-RL02时变重力场模型<sup>[80]</sup>,并采用改进的能量平衡方程计算的星间重力位差研制了WHU-GRACE-GPD01s时变重力场模型<sup>[81]</sup>。此外,中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、西安测绘研究所、西南交通大学和西南石油大学等利用动力积分法也分别研制了IGG RL01、XISM&SSTC GRACE01、SWJTU-GRACE-RL01、SW-PU-GRACE2021等系列的时变重力场模型。

随着建模方法的改进和数据预处理及摄动力模型的精化等,GRACE时变重力场模型的反演精度也在不断提高。文献[82]比较了CSR发



布的不同代 GRACE 时变重力场模型的精度水平,结果表明最新发布的第 6 代模型(RL06)相比第 1 代模型(RL01)的精度水平提升了约 20 倍。同时,由于采用的数据处理策略和建模方法等的差异,不同机构解算的时变重力场模型的精度和可靠性仍然存在一定的差异。以 2005 年 9 月和 2006 年 4 月的解算模型为例,图 3 给出了国内外不同机构发布的最新时变重力场模型对应的大地水准面阶次误差曲线。可以看出,不同机构反演的 GRACE 时变重力场模型在低阶次部分具有较好的一致性,反映出它们均能反演出一致的长波段时变重力场信号,而不同的时变重力场模型

在中高阶次部分具有明显差异(特别是 LUH-GRACE2018 模型与其他模型的差异较大),这主要与不同机构采用的数据处理标准、建模方法和求解策略等因素有关。但总体而言,除了 LUH-GRACE2018 模型的整体一致性略差以外,不同机构解算的 GRACE 时变重力场模型精度水平相当。此外,鉴于不同机构解算的时变重力场模型存在差异性,瑞士伯尔尼大学正在实施时变重力场模型综合服务计划(combination service for time variable gravity field solutions, COST-G),以充分发挥不同机构反演时变重力场模型的优势,进而实现多家机构研制模型的最优联合解算<sup>[83]</sup>。

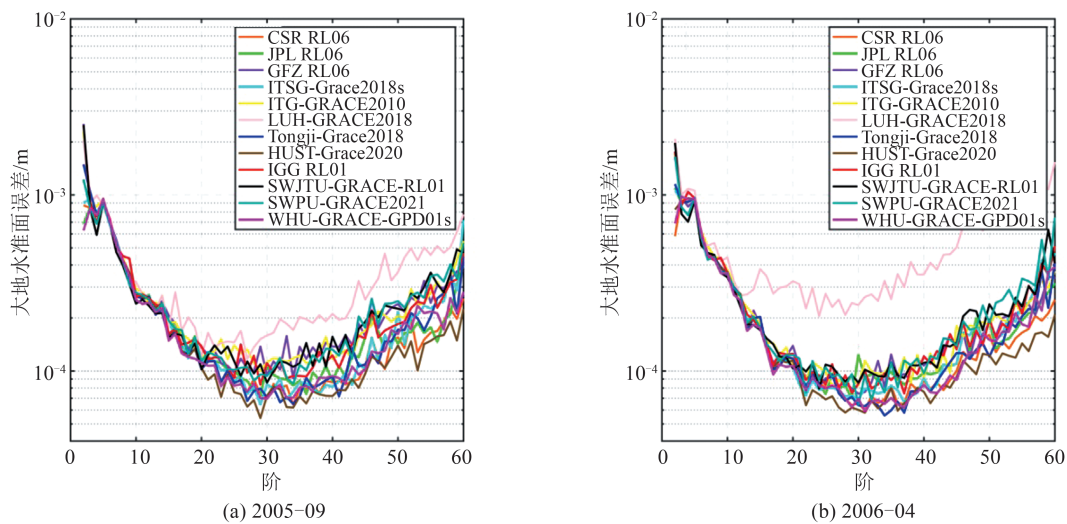


图 3 不同机构发布的时变重力场模型的大地水准面阶次误差

Fig.3 Geoid Height Error Per Degree of Time-Variable Gravity Field Models Published by Different Institutions

为了进一步对不同机构发布的 GRACE 时变重力场模型精度进行评估,采用不同时变重力场模型计算 2005—2010 年期间撒哈拉沙漠和中太平洋地区的质量变化时间序列,其中“南北条带”误差采用 300 km 半径的高斯滤波进行了处理,具体统计结果如表 2 所示。由于撒哈拉沙漠和中太平洋地区本身的质量变化信号非常小,因此表 2 中的结果可认为是各个模型本身的不确定度引起的,主要代表了各个模型的误差水平。可以看出,除了 ITG-GRACE2010、LUH-GRACE2018 和 IGG RL01 模型在撒哈拉沙漠和中太平洋地区计算的质量变化 RMS 较大以外,其他模型在这两个区域的精度水平均优于 2.0 cm(等效水柱高),并且国内机构研制的 HUST-Grace2020、Tongji-Grace2018 和 WHU-GRACE-GPD01s 等系列模型与官方机构发布的模型(即 CSR RL06、JPL RL06 和 GFZ RL06)的精度水平相当,甚至更优(如 HUST-Grace2020 模型),这也表明中国在卫

星重力测量数据处理方法和时变重力场建模水平等方面已达到了国际先进水平。

此外,由于 GRACE/GRACE-FO 任务间隔期较长及观测数据间断等造成的数据空白等问题,严重影响了 GRACE/GRACE-FO 时变重力信号的连续性。在此背景下,文献[21, 84]研究了利用 Swarm SST-h1 观测数据构建时变重力场模型,结果表明 Swarm 卫星获取的时变重力场在长波部分(15 阶以内)与 GRACE 精度相当,可作为 GRACE/GRACE-FO 任务间隔期间数据填充的一种可选手段,但 Swarm 时变重力场具有显著的高频误差,其空间分辨率(1 300~2 000 km)十分有限。

### 3 结 语

卫星重力测量技术的发展,特别是 CHAMP、GRACE、GOCE 和 GRACE-FO 等卫星重力探测任务的相继成功实施,使得地球重力场模型在中

表2 各种时变重力场模型计算的2005—2010年间撒哈拉沙漠和中太平洋地区的质量变化统计/cm

Tab.2 Statistics of Mass Changes in the Sahara Desert and the Central Pacific Region During 2005—2010 from Different Time-Variable Gravity Field Models/cm

| 模型               | 撒哈拉沙漠 |       |      | 中太平洋地区 |       |      |
|------------------|-------|-------|------|--------|-------|------|
|                  | 最大值   | 最小值   | RMS  | 最大值    | 最小值   | RMS  |
| CSR RL06         | 4.12  | -4.25 | 1.69 | 3.41   | -2.95 | 1.51 |
| JPL RL06         | 4.36  | -3.93 | 1.77 | 3.34   | -3.38 | 1.44 |
| GFZ RL06         | 3.89  | -4.92 | 1.86 | 4.41   | -4.31 | 1.82 |
| ITSG-GRACE2018s  | 4.04  | -3.65 | 1.47 | 3.12   | -2.57 | 1.29 |
| ITG-GRACE2010    | 6.06  | -5.36 | 2.61 | 4.65   | -6.27 | 2.32 |
| LUH-GRACE2018    | 9.88  | -6.77 | 3.31 | 5.74   | -7.60 | 2.53 |
| Tongji-Grace2018 | 5.08  | -4.62 | 1.80 | 2.70   | -3.50 | 1.47 |
| HUST-Grace2020   | 4.54  | -4.12 | 1.56 | 3.34   | -2.60 | 1.43 |
| IGG RL01         | 6.01  | -5.28 | 2.21 | 4.36   | -4.88 | 2.00 |
| SWJTU-GRACE-RL01 | 4.67  | -4.77 | 1.89 | 3.21   | -2.95 | 1.38 |
| SWPU-GRACE2021   | 4.38  | -4.66 | 1.99 | 3.99   | -3.30 | 1.62 |
| WHU-GRACE-GPD01s | 4.53  | -3.62 | 1.72 | 2.98   | -3.21 | 1.39 |

长波部分的精度提升约2个数量级。考虑到卫星重力测量技术对地球重力场研究带来的革命性变化,以及当前国内外卫星重力计划的蓬勃发展,本文总结了利用卫星重力测量技术(包括SST-1I、SST-1II、SGG及其多模式组合)反演地球重力场的主要方法,并对静态和时变地球重力场模型研制的最新进展及模型精度等方面进行了评述和对比分析。尽管卫星重力测量技术极大地提升了人们对地球重力场的认识水平,并拓展了经典重力场理论的应用领域,但现有地球重力场模型的时空分辨率和精度水平仍然难以满足相关地球科学的迫切需求。为了进一步提升地球重力场反演的精度,国内外诸多学者重点对现有数据处理标准(包括数据预处理、噪声模型和背景力模型等)进行了精化,并对建模方法和解算策略进行了优化与改进。尽管中国在重力卫星核心关键技术和原始数据获取等方面受到了西方国家的封锁和限制,但在卫星重力测量数据处理方法和地球重力场建模水平等方面已达到了国际先进水平,这为推进中国自主重力卫星计划奠定了重要的理论基础和技术支撑。与此同时,国内外相关机构正在加紧开展下一代卫星重力测量技术模式的论证和关键核心载荷的研制,这有助于从本质上进一步提升地球重力场探测的精度水平。尽管下一代卫星重力探测任务在星座设计和载荷精度水平等方面更优,但如何得到精度与之相匹配的背景力模型(如海洋潮汐模型、大气海洋去混频模型等)并优化估计载荷噪声模型,仍是今后一段时期内高精度卫星重力场

模型构建中需要解决的关键问题。

#### 参 考 文 献

- [1] Xu Houze, Lu Yang, Zhong Min, et al. Satellite Gravity and Its Application to Monitoring Geophysical Environmental Change [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 42(6): 843-853 (许厚泽, 陆洋, 钟敏, 等. 卫星重力测量及其在地球物理环境变化监测中的应用[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(6): 843-853)
- [2] Ning Jinsheng, Wang Zhengtao, Chao Nengfang. Research Status and Progress in International Next-Generation Satellite Gravity Measurement Missions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 1-8 (宁津生, 王正涛, 超能芳. 国际新一代卫星重力探测计划研究现状与进展[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2016, 41(1): 1-8)
- [3] Luo Zhicai, Zhong Bo, Ning Jinsheng, et al. Theory and Method for Determining the Earth's Gravity Field from Satellite Gravity Gradiometry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2015 (罗志才, 钟波, 宁津生, 等. 卫星重力梯度测量确定地球重力场的理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015)
- [4] Reigber C, Jochmann H, Wünsch J, et al. Earth Gravity Field and Seasonal Variability from CHAMP [M]//Reigber C, Lühr H, Schwintzer P, et al. *Earth Observation with CHAMP*. Heidelberg: Springer, 2005
- [5] Weigelt M, van Dam T, Jäggi A, et al. Time-Variable Gravity Signal in Greenland Revealed by High-Low

- Satellite-to-Satellite Tracking [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118 (7) : 3848-3859
- [6] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System [J]. *Science*, 2004, 305(5683): 503-505
- [7] Zhou H, Luo Z, Zhou Z, et al. HUST-Grace2016s: A New GRACE Static Gravity Field Model Derived from a Modified Dynamic Approach over a 13-Year Observation Period [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(3): 597-611
- [8] Pail R, Goiginger H, Schuh W D, et al. Combined Satellite Gravity Field Model GOCO01S Derived from GOCE and GRACE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(20): L20314
- [9] Brockmann J M, Zehentner N, Höck E, et al. EGM\_TIM\_RL05: An Independent Geoid with Centimeter Accuracy Purely Based on the GOCE Mission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(22): 8089-8099
- [10] Pie N, Bettadpur S V, Tamisiea M, et al. Time Variable Earth Gravity Field Models from the First Spaceborne Laser Ranging Interferometer [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(12): e2021JB022392
- [11] Luo J, Bai Y Z, Cai L, et al. The First Round Result from the TianQin-1 Satellite [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(18): 185013
- [12] Zheng Wei, Yan Jianguo, Li Zhaowei. Reviews on Deep Space Satellite Gravity Measurement Mission [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4 (1): 3 - 13 (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)
- [13] Pail R, Yeh H C, Feng W, et al. Next-Generation Gravity Missions: Sino-European Numerical Simulation Comparison Exercise [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(22): 2654
- [14] Xiao Yun. Research on the Earth Gravity Field Recovery from Satellite-to-Satellite Tracking Data [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006 (肖云. 基于卫星跟踪卫星数据恢复地球重力场的研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006)
- [15] Zou Xiancai. Theory of Satellite Orbit and Earth Gravity Field Determination [D]. Wuhan: Wuhan University, 2007 (邹贤才. 卫星轨道理论与地球重力场模型的确定[D]. 武汉: 武汉大学, 2007)
- [16] Zhang Xingfu. The Earth's Field Model Recovery on the Basis of Satellite-to-Satellite Tracking Missions [D]. Shanghai: Tongji University, 2007 (张兴福. 应用低轨卫星跟踪数据反演地球重力场模型[D]. 上海: 同济大学, 2007)
- [17] 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
- [18] Xu Tianhe. Gravity Field Recovery from CHAMP Orbits and Accelerometer Data [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2004 (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)
- [19] Zheng Wei. Theory and Method of Satellite Gravity Inversion Based on the Principle of Energy Conservation [M]. Beijing: Science Press, 2015 (郑伟. 基于能量守恒原理的卫星重力反演理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015)
- [20] Ditmar P A A. van Eck van der Sluijs. A Technique for Modeling the Earth's Gravity Field on the Basis of Satellite Accelerations [J]. *Journal of Geodesy*, 2004, 78(1): 12-33
- [21] Bezděk A, Sebera J, Teixeira da Encarnação J, et al. Time-VARIABLE Gravity Fields Derived from GPS Tracking of Swarm [J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 205(3): 1665-1669
- [22] Mayer-Gürr T, Ilk K H, Eicker A, et al. ITG-CHAMP01: A CHAMP Gravity Field Model from Short Kinematic Arcs over a One-Year Observation Period [J]. *Journal of Geodesy*, 2005, 78 (7) : 462-480
- [23] Chen Qiuji. Theory, Methodology and Application of GRACE Gravity Recovery Using Modified Short Arc Approach [D]. Shanghai: Tongji University, 2017 (陈秋杰. 基于改进短弧积分法的 GRACE 重力反演理论、方法及应用[D]. 上海: 同济大学, 2017)
- [24] Ning Jinsheng, Zhong Bo, Luo Zhicai, et al. Decorrelation Filtering Methods for Gravity Field Recovery Based on Satellite Acceleration Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(4): 331-337 (宁津生, 钟波, 罗志才, 等. 基于卫星加速度恢复地球重力场的去相关滤波法[J]. *测绘学报*, 2010, 39(4): 331-337)
- [25] Baur O, Bock H, Höck E, et al. Comparison of GOCE-GPS Gravity Fields Derived by Different Approaches [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(10): 959-973
- [26] Shen Yunzhong. Algorithm Characteristics of Dynamic Approach-Based Satellite Gravimetry and Its Improvement Proposals [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46 (10) : 1308-1315



- (沈云中. 动力学法的卫星重力反演算法特点与改进设想[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1308-1315)
- [27] Zhou Hao. Study on the Recovery of the Earth's Gravity Field from the Combination of Multi-Type Satellite Gravimetry Data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015 (周浩. 联合多类卫星重力数据反演地球重力场的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015)
- [28] Guo X, Ditmar P, Zhao Q, et al. Earth's Gravity Field Modelling Based on Satellite Accelerations Derived from Onboard GPS Phase Measurements [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(9): 1049-1068
- [29] Reigber C, Schmidt R, Flechtner F, et al. An Earth Gravity Field Model Complete to Degree and Order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S [J]. *Journal of Geodynamics*, 2005, 39(1): 1-10
- [30] Wang Changqing. GRACE Time-Varying Gravity Field Inversion and Research on Related Issues [D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2015 (王长青. GRACE时变重力场反演与相关问题研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2015)
- [31] Guo Nannan, Zhou Xuhua, Wu Bin, et al. A Model of the Time-Variable Gravity Field Inverted from Combined GRACE On-Board GPS and KBR Range Rate Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(7): 2568-2577 (郭南男, 周旭华, 吴斌, 等. 联合星载GPS和KBR星间测速数据反演GRACE时变重力场模型[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2568-2577)
- [32] Liang Lei, Yu Jinhai, Zhu Yongchao, et al. Recovered GRACE Time-Variable Gravity Field Based on Dynamic Approach with the Non-linear Corrections [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(9): 3259-3268 (梁磊, 于锦海, 朱勇超, 等. 顾及非线性改正的动力学方法反演GRACE时变重力场模型[J]. 地球物理学报, 2019, 62(9): 3259-3268)
- [33] Kvas A, Behzadpour S, Ellmer M, et al. ITSG-Grace2018: Overview and Evaluation of a New GRACE-Only Gravity Field Time Series [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(8): 9332-9344
- [34] Han S C. Efficient Determination of Global Gravity Field from Satellite-to-Satellite Tracking Mission [J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2004, 88(1): 69-102
- [35] Wang Zhengtao, Li Jiancheng, Jiang Weiping, et al. Determination of Earth Gravity Field Model WHU-GM-05 Using GRACE Gravity Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(5): 1364-1371 (王正涛, 李建成, 姜卫平, 等. 基于GRACE卫星重力数据确定地球重力场模型WHU-GM-05 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1364-1371)
- [36] Shang K, Guo J, Shum C K, et al. GRACE Time-Variable Gravity Field Recovery Using an Improved Energy Balance Approach [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 203(3): 1773-1786
- [37] Liu X, Ditmar P, Siemes C, et al. DEOS Mass Transport Model (DMT-1) Based on GRACE Satellite Data: Methodology and Validation [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181(2): 769-788
- [38] Chen Q, Shen Y, Chen W, et al. A Modified Acceleration-Based Monthly Gravity Field Solution from GRACE Data [J]. *Geophysical Journal International*, 2015(2): 1190-1206
- [39] You Wei, Fan Dongming, Huang Qiang. Analysis of Short-Arc Integral Approach to Recover the Earth's Gravitational Field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(11): 2745-2752 (游为, 范东明, 黄强. 卫星重力反演的短弧长积分法研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2745-2752)
- [40] Ran Jiangjun, Xu Houze, Zhong Min, et al. Global Temporal Gravity Field Recovery Using GRACE Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(4): 1032-1040 (冉将军, 许厚泽, 钟敏, 等. 利用GRACE重力卫星观测数据反演全球时变地球重力场模型[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1032-1040)
- [41] Beutler G, Jäggi A, Mervart L, et al. The Celestial Mechanics Approach: Theoretical Foundations [J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(10): 605-624
- [42] Zou Xiancai, Zhong Luping, Li Jiancheng. Simultaneous Solution for Precise Satellite Orbit and Earth Gravity Model [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(7): 2413-2423 (邹贤才, 衷路萍, 李建成. 卫星精密定轨与重力场建模的同解法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(7): 2413-2423)
- [43] Guo X, Zhao Q, Ditmar P, et al. Improvements in the Monthly Gravity Field Solutions Through Modeling the Colored Noise in the GRACE Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(8): 7040-7054
- [44] Zhou H, Luo Z, Zhou Z, et al. Impact of Different Kinematic Empirical Parameters Processing Strategies on Temporal Gravity Field Model Determination [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(11): 10252-10276
- [45] Zhou H, Zhou Z, Luo Z. A New Hybrid Processing Strategy to Improve Temporal Gravity Field Solution [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(8): 9415-9432

- [46] Chen Q, Shen Y, Chen W, et al. An Improved GRACE Monthly Gravity Field Solution by Modeling the Non-conservative Acceleration and Attitude Observation Errors [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90 (6): 503-523
- [47] Chen Q, Shen Y, Chen W, et al. An Optimized Short-Arc Approach: Methodology and Application to Develop Refined Time Series of Tongji - Grace2018 GRACE Monthly Solutions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124 (6): 6010-6038
- [48] Han S C, Shum C K, Jekeli C. Precise Estimation of in Situ Geopotential Differences from GRACE Low-Low Satellite-to-Satellite Tracking and Accelerometer Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B4): 4411-4423
- [49] Zhong B, Li Q, Chen J, et al. Improved Estimation of Regional Surface Mass Variations from GRACE Intersatellite Geopotential Differences Using a Priori Constraints [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12 (16): 2553
- [50] Drinkwater M R, Floberghagen R, Haagmans R, et al. VII: Closing Session: GOCE: ESA's First Earth Explorer Core Mission [J]. *Space Science Reviews*, 2003, 108(1): 419-432
- [51] Koop R. Global Gravity Field Modeling Using Satellite Gravity Gradiometry [J]. Delft: The Netherlands Geodetic Commission, 1993
- [52] Xu Xinyu. Study of Determining the Earth's Gravity Field from Satellite Gravity Gradient and Satellite-to-Satellite Tracking Data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2008 (徐新禹. 卫星重力梯度及卫星跟踪卫星数据确定地球重力场的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2008)
- [53] Zhong Bo. Study on the Determination of the Earth's Gravity Field from Satellite Gravimetry Mission GOCE [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010 (钟波. 基于 GOCE 卫星重力测量技术确定地球重力场的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010)
- [54] Reguzzoni M, Tselis N. Optimal Multi-step Collocation: Application to the Space-Wise Approach for GOCE Data Analysis [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(1): 13-29
- [55] Rummel R, van Gelderen M, Koop R, et al. Spherical Harmonic Analysis of Satellite Gradiometry [R]. Delft: The Netherlands Geodetic Commission, 1993
- [56] Klees R, Koop R, Visser P, et al. Efficient Gravity Field Recovery from GOCE Gravity Gradient Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2000, 74 (7): 561-571
- [57] Sneeuw N. Space-Wise, Time-Wise, Torus and Rosborough Representations in Gravity Field Modeling [J]. *Space Science Reviews*, 2003, 108 (1): 37-46
- [58] Pail R, Bruinsma S, Migliaccio F, et al. First GOCE Gravity Field Models Derived by Three Different Approaches [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(11): 819-843
- [59] Bruinsma S L, Förste C, Abrikosov O, et al. The New ESA Satellite-Only Gravity Field Model Via the Direct Approach [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(14): 3607-3612
- [60] Baur O, Sneeuw N, Grafarend E W. Methodology and Use of Tensor Invariants for Satellite Gravity Gradiometry [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(4): 279-293
- [61] Yu J H, Wan X Y. Recovery of the Gravity Field from GOCE Data by Using the Invariants of Gradient Tensor [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56 (7): 1193-1199
- [62] Lu B, Luo Z, Zhong B, et al. The Gravity Field Model IGGT\_R1 Based on the Second Invariant of the GOCE Gravitational Gradient Tensor [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(5): 561-572
- [63] Schall J, Eicker A, Kusche J. The ITG-GOCE02 Gravity Field Model from GOCE Orbit and Gradiometer Data Based on the Short Arc Approach [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(4): 403-409
- [64] Zhu Guangbin, Li Jiancheng, Wen Hanjiang, et al. Slepian Localized Spectral Analysis of the Determination of the Earth's Gravity Field Using Satellite Gravity Gradiometry Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(1): 1-7 (朱广彬, 李建成, 文汉江, 等. 卫星重力梯度数据确定地球重力场的 Slepian 局部谱分析方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(1): 1-7)
- [65] Rummel R, Yi W, Stummer C. GOCE Gravitational Gradiometry [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85 (11): 777-790
- [66] Wan Xianyun, Yu Jinhai, Zeng Yanyan. Frequency Analysis and Filtering Processing of Gravity Gradients Data from GOCE [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(9): 2909-2916 (万晓云, 于锦海, 曾艳艳. GOCE 引力梯度的频谱分析及滤波[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2909-2916)
- [67] Su Yong, Fan Dongming, Pu Xinggang, et al. New Static Gravity Field Model SWJTU-GOGR01S Derived from GOCE Data and GRACE Normal Equation [J]. *Geomatics and Information Science of Wu-*

- han University, 2018, 43(3): 457-463 (苏勇, 范东明, 蒲星钢, 等. 联合 GOCE 卫星数据和 GRACE 法方程确定 SWJTU-GOGR01S 全球重力场模型 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(3): 457-463)
- [68] Liu Tao, Zhong Bo, Li Xianpao, et al. Filters Design and Comparison of Gravity Field Inversion from GOCE Satellite Gravity Gradient Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200705 (刘滔, 钟波, 李贤炮, 等. GOCE 卫星重力梯度数据反演重力场的滤波器设计与比较分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200705)
- [69] Zhong Bo, Luo Zhicai, Li Jiancheng, et al. Spectral Combination Method for Recovering the Earth's Gravity Field from High-Low SST and SGG Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 735-742 (钟波, 罗志才, 李建成, 等. 联合高低卫-卫跟踪和卫星重力梯度数据恢复地球重力场的谱组合法. 测绘学报, 2012, 41(5): 735-742)
- [70] Visser P. Gravity Field Determination with GOCE and GRACE [J]. *Advances in Space Research*, 1999, 23(4): 771-776
- [71] Kvas A, Brockmann J M, Krauss S, et al. GOCO06s: A Satellite-Only Global Gravity Field Model [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(1): 99-118
- [72] Yi W, Rummel R, Gruber T. Gravity Field Contribution Analysis of GOCE Gravitational Gradient Components [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2013, 57(2): 174-202
- [73] Farahani H H, Ditmar P, Klees R, et al. The Static Gravity Field Model DGM-1S from GRACE and GOCE Data: Computation, Validation and an Analysis of GOCE Mission's Added Value [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(9): 843-867
- [74] Zhou H, Xu C, Luo Z, et al. HUST-GOGR2018s: A New Gravity Field Model Derived from the Combination of GRACE and GOCE Data [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2019, 30: 97-109
- [75] Chen Jianhua, Zhang Xingfu, Chen Qiuji, et al. Unconstrained Gravity Field Model Tongji-GOGR2019S Derived from GOCE and GRACE Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(9): 3251-3262 (陈鑑华, 张兴福, 陈秋杰, 等. 融合 GOCE 和 GRACE 卫星数据的无约束重力场模型 Tongji-GOGR2019S [J]. 地球物理学报, 2020, 63(9): 3251-3262)
- [76] Chen Q, Shen Y, Francis O, et al. Tongji-Grace02s and Tongji-Grace02k: High-Precision Static GRACE-Only Global Earth's Gravity Field Models Derived by Refined Data Processing Strategies [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(7): 6111-6137
- [77] Brockmann J M, Schubert T, Schuh W D. An Improved Model of the Earth's Static Gravity Field Solely Derived from Reprocessed GOCE Data [J]. *Surveys in Geophysics*, 2021, 42(2): 277-316
- [78] Lemoine J M, Biancale R, Reinquin F, et al. CNES/GRGS RL04 Earth Gravity Field Models, from GRACE and SLR Data [BD]. *GFZ Data Services*, 2019, DOI: 10.5880/ICGEM.2019.010
- [79] Koch I, Flury J, Naeimi M, et al. LUH-GRACE2018: A New Time Series of Monthly Gravity Field Solutions from GRACE [C]//International Association of Geodesy Symposia, Montreal, Canada, 2019
- [80] Guo X, Ditmar P, Zhao Q, et al. Improved Recovery of Temporal Variations of the Earth's Gravity Field from Satellite Kinematic Orbits Using an Epoch-Difference Scheme [J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(8): 1-16
- [81] Zhong B, Li X, Chen J, et al. WHU-GRACE-GPD01s: Monthly Gravity Field Models Derived from GRACE Intersatellite Geopotential Differences [J]. *GFZ Data Services*, 2022, DOI: 10.5880/icgem.2022.002
- [82] Save H. GRACE RL06 Reprocessing and Results from CSR [C]//EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2018
- [83] Meyer U, Jean Y, Kvas A, et al. Combination of GRACE Monthly Gravity Fields on the Normal Equation Level [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1645-1658
- [84] Lück C, Kusche J, Rietbroek R, et al. Time-Variable Gravity Fields and Ocean Mass Change from 37 Months of Kinematic Swarm Orbits [J]. *Solid Earth*, 2018, 9(2): 323-339



## Progress in Determining the Earth's Gravity Field Model by Satellite Gravimetry

LUO Zhicai<sup>1</sup> ZHONG Bo<sup>2</sup> ZHOU Hao<sup>1</sup> WU Yunlong<sup>3</sup>

1 School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Satellite gravimetry is an efficient technical means to detect the global consistent, high-precision and high-resolution Earth's gravity field, mainly including high-low satellite-to-satellite tracking (SST-hl), low-low satellite-to-satellite tracking (SST-ll) and satellite gravity gradiometry (SGG). We summarize the main methods to recover the earth's gravity field from satellite gravimetry technologies (including SST-hl, SST-ll, SGG and multi-mode combination), and review the latest progress in constructing the static and time-variable gravity field models using challenging mini-satellite payload(CHAMP), gravity recovery and climate experiment(GRACE)/GRACE follow-on(GRACE-FO) and gravity field and steady-state ocean circulation explorer(GOCE) satellite gravity measurements. And the accuracies of the current representative static and time-variable gravity field models are analyzed and evaluated. It is expected to provide reference for the study of the Earth's gravity field and its geoscience application in the future.

**Key words:** Earth's gravity field; satellite gravimetry; multi-mode observation data fusion; model accuracy evaluation

**First author:** LUO Zhicai, PhD, professor, specializes in physical geodesy and satellite gravimetry. E-mail: zcluo@hust.edu.cn

**Corresponding author:** ZHONG Bo, PhD, associate professor. E-mail: bzhong@sgg.whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41931074, 41974015, 42061134007).

**引文格式:** LUO Zhicai, ZHONG Bo, ZHOU Hao, et al. Progress in Determining the Earth's Gravity Field Model by Satellite Gravimetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10):1713-1727. DOI:10.13203/j.whugis20220537 (罗志才, 钟波, 周浩, 等. 利用卫星重力测量确定地球重力场模型的进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(10):1713-1727. DOI:10.13203/j.whugis20220537)