

国际新一代卫星重力探测计划研究现状与进展

宁津生^{1,2} 王正涛^{1,2} 超能芳¹

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:回顾了卫星重力探测技术的发展,讨论了当前卫星重力计划 CHAMP、GRACE、GOCE 研究现状和存在的主要问题,评述了国际下一代 4 个卫星重力计划 E. motion、GRACE-FO、NGGM 和 GETRIS 的最新研究进展,并介绍了 SWARM 卫星星群任务在地球重力场研究中的作用和地位,最后对我国未来卫星重力计划的实施提出了几点建议。

关键词:卫星重力测量;E. motion;GRACE-FO;NGGM;GETRIS;SWARM

中图分类号:P223.0; P223.6 **文献标志码:**A

现代地球科学的任务是致力于把地球作为一个整体的静态和动态系统来研究,该系统主要由岩石圈(固体)、水圈(液体)和大气圈(气体)组成,重力场、电磁场和大气层及电离层则反映其基本的物理特性,制约着地球及其邻近空间所发生的物理事件^[1]。其中,地球重力场反映地球物质的空间分布、运动和变化,确定地球重力场的精细结构及其时间变化不仅是现代大地测量的主要科学目标之一,而且也将为现代地球科学解决人类面临的资源、环境和灾害等问题提供重要的基础地球空间信息^[2]。

在传统地球科学向现代地球科学迈进的进程中,不仅凸显了物理大地测量学与相关学科交叉研究的重要作用和贡献^[3],解决了地球系统科学发展中诸多与地球重力场相关的科学问题,也是物理大地测量学现代化发展的结果,其最显著的标志是新世纪卫星重力探测理论和技术出现的多项重大突破^[4],关键技术包括星载全球定位系统(global positioning system, GPS)连续跟踪精密测轨、同轨双星间连续精密微波测距、星载加速度计精密测定非保守力,以及星载全张量重力梯度仪,以这 4 项新技术为支撑先后实现了高低和低位卫星跟踪卫星以及卫星重力梯度测量,成功实

施了新一代卫星重力探测计划,包括小卫星挑战计划(challenging minisatellite payload, CHAMP)、地球重力场恢复及气候探测计划(gravity recovery and climate experiment, GRACE)与地球重力场稳态海洋环流探测计划(gravity field steady-state ocean circulation explorer, GOCE)3 个卫星任务,其中前两个属于卫星跟踪(satellite-to-satellite tracking, SST)模式,后一个属于卫星重力梯度(satellite gravity gradiometry, SGG)模式,都是轨高 500 km 以下的低轨小卫星。这些计划的主要科学目的除了测定地球重力场的精细结构及长波重力场随时间的变化以外,还包括以全球尺度精密测定电磁场和全球大气层及电离层探测。地球重力场的特点是长波分量占优(>90%),地形和地壳的扰动质量产生的中短波分量相对偏小,短波(地形)影响尤期小,大、中、小山区别为米级、分米级和厘米级,个别情况例外。中、长波分量是重力场谱结构的主分量,是“骨架”,从某种意义上说,精确确定重力场模型的中、长波分量,就是为模型提供了“牢固”和精密的框架,是基础,三个重力卫星任务确保了这个框架基础的成功构建^[5]。传统的地表重力场测量方法因其固有的局限性,其地位已经转变为作为空间方法的补充

收稿日期:2015-12-08

项目资助:国家 863 计划(2013AA122501);国家测绘地理信息局基础测绘项目(B2551);国家 973 计划(2013CB733301, 2013CB733302);国家自然科学基金(41274032,41474018)。

第一作者:宁津生,教授,中国工程院院士,现主要从事地球重力场的理论、方法与技术的科研和教学工作,代表成果为适合于中国局部重力场的全球重力场模型 WDM89 和 WDM94、高分辨率中国重力大地水准面等,著有《地球形状及其外部重力场》和《地球重力场模型理论》等专著 7 部,在国内外学术刊物和学术会议上发表论文 200 余篇。jsning@sgg.whu.edu.cn

通讯作者:王正涛,博士,副教授。ztwang@whu.edu.cn

和校准或进行高精度局部重力场的确定。测高卫星和重力卫星技术可以提供全球的、均匀分布的、比较稠密的和高质量的重力测量数据。新一代卫星重力技术不仅从数量上极大地丰富了地球重力数据,质量上也有很大提高,这为各相关学科利用重力场信息研究地球系统动力过程及系统内物质运动和时空分布的可行性提供了保证,特别有利于全球气候变化及灾害事件的研究^[6]。新一代卫星重力模型将全球重力场中长波段的精度提高了1~2个量级,卫星跟踪卫星技术和卫星重力梯度测量技术也被认为是21世纪初最有价值和应用前景的高效重力探测技术^[7]。在此发展背景下,新一代卫星重力测量联合卫星测高反演高分辨率海洋重力数据和地面重力测量数据^[8],建立静态(超)高阶重力场模型和时变重力场模型序列,进一步满足现代地球科学各相关学科对更精细地球重力场信息的需求,其中包括测绘学科,目前已成为物理大地测量学一个活跃的研究领域^[9]。

1 当前卫星重力计划及存在的问题

本世纪初,随着低轨卫星重力探测任务的成功实施,地球重力场模型的研究取得了重大进展,模型精度和分辨率有了新的跨越^[10]。新一代卫星重力探测技术包括2000年7月15日发射的CHAMP卫星,2002年3月17日发射的GRACE卫星,2009年3月17日发射的GOCE卫星,2002~2010年是重力卫星的黄金时期。卫星跟踪SST,包括低低跟踪(satellite-to-satellite tracking in the low-low model, SST-II)和高低跟踪(satellite-to-satellite tracking in the high-low model, SST-hI)和卫星重力梯度测量SGG,可用于确定全球重力场模型及其时变效应,尤其是低低跟踪GRACE卫星可利用两颗卫星之间的距离变化与距离变化率监测地球系统的质量迁移及变化,开辟了地球重力场时变研究的新时代,其应用成果也扩展到海洋学、冰川学、水文学、地震学等领域^[11]。

CHAMP计划是由德国空间局(DLR)和德国地学研究中心(GFZ)负责实施的第一个基于SST模式测定重力场的卫星计划,科学目标是测定中长波地球重力场的静态部分和时间变化,测定全球磁场及其时间变化,探测大气与电离层环境。CHAMP卫星任务于2010年9月19日终止,运行了11a,远远超出了其设计寿命5a。CHAMP卫星携带了GPS接收机和加速度计,实现GPS卫星对CHAMP卫星的跟踪(SST-hI),

可精密确定卫星轨道,分离保守力和非保守力。CHAMP对卫星重力测量的部分理论进行了验证,且为后续更加复杂的重力任务(GRACE、GOCE)提供了技术支持^[9]。

基于SST-hI技术的CHAMP卫星重力测量,观测的是低轨卫星处重力位的一阶导数,可恢复较高精度的中长波重力场,但这种高低跟踪模式对沿轨重力变化不敏感,不能提供近轨空间重力场精细结构信息。这一缺陷在GRACE和GOCE观测模式中得到了弥补,SST-II可观测量重力位的二阶导数。因此,GRACE的SST-II观测等效于一种长基线重力梯度测量,GOCE的SGG测量则是一种短基线全张量重力梯度测量。GRACE卫星重力测量技术是由美国的国家宇航局(NASA)和德国DLR联合开发,主要用于探测地球重力场中长波分量和随时间的变化。自发射升空起,GRACE每月更新地球重力场模型,迄今已获取超过10a的月时变重力场序列。GRACE采用SST-II技术,同时发射两颗同轨低轨道卫星,彼此相距约220km,一个“追踪”另一个。两者之间的相对运动,即卫星间的距离变化用微波干涉仪进行极其精密的测量,用其一阶微分和二阶微分可分别求得重力加速度和重力梯度。两个飞行器上的非保守力影响由加速度计测定。它所得到的静态和动态重力场的精度比CHAMP高一个数量级,空间解析度(半波长)为1000~200km。GRACE的目的是提供新一代高精度中长波地球重力场模型,由于CHAMP和GRACE具有不同的轨道高度和由此产生的不同的轨道扰动波谱,两个卫星可以互相取长补短,它们将给出一个高精度的重力观测的覆盖,以弥补地球上的重力观测空白区。GRACE卫星任务具有两个显著的优势:第一,可以高达月际时间分辨率测定重力场的时变量,由此反演地球表层的质量分布变化,可在天气时间尺度上反映季节性和年际气候变化;第二,大幅度提高中、长波重力场精度,相应模型大地水准面的精度由米级提高到分米级^[12]。

GOCE是欧洲空间局(ESA)地球探测计划的首个核心任务。这一任务的核心目标是提供高精度、高分辨率的地球重力场和大地水准面模型。GOCE的创新之处是具有无阻尼控制系统和卫星重力梯度测量系统(SGG)。无阻尼控制系统用于补偿大气阻力,而卫星重力梯度测量则是GOCE测量的核心部分,它将提供高精度地球重力场高频信号。SGG的测量原理是基于三对加速度计得到的重力加速度之间的差分数据进行重力场信号的捕

获,通过这种方法,可以测量得到重力位由二阶导数,即重力梯度。由于得到的重力梯度数据在一定程度上弥补了重力位由卫星高度衰减带来的影

响,结合高低卫星跟踪卫星,GOCE 可获取高分辨率的全球和局部地球重力场模型(分辨率提高到了 200 km)^[13]。

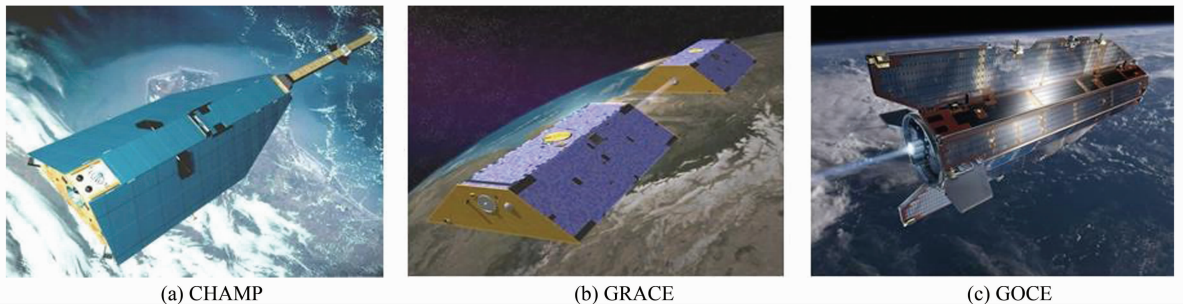


图 1 卫星重力任务

Fig. 1 Mission of Gravity Satellites

CHAMP、GRACE 和 GOCE 分别代表 SST-hl、SST-ll 和 SGG 三种卫星重力测量模式,原理各异,测定含不同频谱信息重力场量,用于恢复重力场有互补作用,可克服传统基于卫星轨道扰动探测技术的局限性。CHAMP 的高低卫星跟踪卫星模式是通过高轨卫星跟踪低轨卫星轨道的摄动测定地球扰动位及其一阶梯度(扰动重力);GRACE 的低低卫星跟踪卫星模式是测定两个同轨低轨卫星间的距离及其一阶、二阶变化率,由此确定扰动位的一阶梯度向量和二阶梯度张量;GOCE 用低轨星载悬浮式三轴差分梯度仪直接测定扰动位的二阶梯度张量,也包含 SST-hl 跟踪测量。这三个卫星重力场测量计划本身相当于一种重力传感器系统,在低轨平台上直接采集重力场信息,不需穿过低空大气层观测,且低轨卫星利用加速度计分离出非保守力的影响(大气阻力、太阳辐射压等),因而观测精度高。采集的信息是卫星轨道的空间重力场的局部精细结构,即扰动位的一阶和二阶导数。由于高轨卫星的轨道可以精密测定,因此,SST-hl 相应于测定低轨道卫星的三维位置、速度和加速度,SST-ll 相应于两个低轨道卫星之间的距离、距离变化或者加速度差值,而 SGG 则相应于重力加速度短基线上的三维重力加速度差值。从数学上讲,它们分别是重力位的一阶导数(SST-hl)、长基线上一阶导数的差分(SST-ll)和二阶导数(SGG)。新一代卫星重力探测计划的成功实施,在 250~500 km 高度的近地空间形成了近于全球覆盖的多模式重力信号传感网络,其空间分辨率最高相当于地面 100~200 km,特别是其中低-低跟踪模式可提供 10~30 d 时间分辨率的重力场时变信息,以及卫星重力梯度测量可提供 100 km 分辨率厘米级精度重力模型全球大地水准面。这一代卫星重力技术提供的

静态和时变重力场模型已在多个涉及重力场信息需求的相关地学领域得到相当广泛的应用。

需要指出的是,尽管新一代卫星重力探测计划取得了瞩目的成果,大大拓展了经典重力场理论的应用领域,但这一系列的成果在时间分辨率和精度水平上的局限性,还远远不能满足相关学科对静态地球物理问题作重力效应解释的需求,更难以满足对地球动力学全球变化作重力场响应分析的需求。例如,用 GPS 水准测定正高要求在 100 km 波长范围内有厘米级精度的大地水准面;研究地球深部结构则要求在几十千米到几千米的波长范围内具有厘米级精度的大地水准面和 ± 1 mGal 精度的重力异常;利用卫星测高测定的海面高来研究海面地形和洋流,则要求有相应波长的厘米级海洋大地水准面;建立全球高程系统要求在 50~100 km 的波长范围内具有优于 5 cm 精度的大地水准面;区域或局部水储量变化和浅层物质质量均衡研究均要求优于 200 km 甚至更高空间分辨率的时变重力场模型。目前全球静态重力场和时变重力场模型的精度与上述要求大约还相差一个量级,实现这一目标首先取决于在全球范围内测定重力和探测近地空间重力场信息的技术发展水平。

当前,CHAMP 和 GOCE 卫星任务已结束,只有原设计 5 a 寿命的 GRACE 仍在运行中,但也早已面临升级换代提高系统性能问题。在静态重力场确定方面,当前的卫星重力任务的局限性主要体现在无法实质性地降低卫星飞行轨道高度和加速度计的实际测量精度,以及其他卫星荷载的测量精度无法满足更高精度和分辨率重力场的需求,这些问题有望在未来的卫星重力计划中得到改进。对于时变重力场的确定,主要依赖于 GRACE 卫星重力探测计划,其研究成果的局限

性表现在:第一,GRACE受时空分辨率的限制(空间分辨率近似400 km,时间分辨率近似mon),只能探测到以等效水高表示的10 cm质量变化或者是超过1 cm/a的趋势变化,不能满足探测地球动力系统不同过程质量变化所需的时空分辨率,如小尺度范围内的大陆水文和冰川质量变化、海洋的低振幅信号等。第二,测量误差影响较大,特别是南北条带误差,若扩大平滑滤波空间尺度,例如1 000 km,则进一步降低了空间分辨率。此外,地球是一个由气圈、水圈、固体圈(地核、地幔、地壳)外加生物圈组成的极其复杂的开放动力系统,又受太阳系天体物质和能量的作用,例如太阳和月球引力、太阳辐射能的作用。地球重力场在不同时空尺度上的变化,反映这个开放系统在多种动力机制驱动形成的物质迁移综合效果。处理GRACE时变重力场数据,提取地表层水储量变化信息,必须精确分离所有与地球动力过程相关的重力效益,这是目前面临的难题,存在不确定性,特别是冰川均衡调整(GIA)重力效应模型误差。因此,针对时空分辨率不足等问题,通过提高卫星荷载测量精度、优化轨道(多星轨道编队)以及提高卫星对地球时变重力场的敏感度等途径,寻求新型、高效、高精度、高空间分辨率和全频段的下一代卫星重力测量计划成为当前国际众多科研机构竞相制定的远景规划和首要执行的研究任务^[14]。

2 未来卫星重力研究计划

未来的卫星重力计划任务需要满足更长时间序列的观测(GRACE任务的延续),更高的空间分辨率(400 km→200 km→100 km),更高的时间分辨率(消除大气、海洋等的混频效应)和更高精度静态、时变重力场的确定,无需引入滤波技术(消除条纹带现象)等要求。对已成功实施的卫星重力任务的分析与研究表明,若满足上述要求,新一代的卫星重力计划潜在的技术改进有以下几个方面^[15]:第一,采用新的或改进的测量技术。如星间距离测量可联合微波测距和激光干涉测距,采用革新的测量技术,引入冷原子梯度仪和光钟,改进推进器技术,选用更优姿态控制系统与无阻力系统。第二,数据处理方面与地球物理模型的联合。利用改进的地球物理模型消除混频效应,改进时空参数,基于补充的信息改进信号的可分离性。第三,优化卫星星座形态。基于特定数目卫星星群的星座形态改进时空分辨率,同时优化轨道配置和轨道姿态。当前国际上对基于卫星跟

踪模式的优化选取、关键载荷的优化组合、轨道参数的优化设计和反演方法的优化改进,开展了一系列卫星重力测量计划的研究论证。

2.1 E. motion

2010年,欧洲及加拿大科学团队向欧空局提出了新的卫星重力计划——地球系统质量迁移任务(Earth system mass transport mission, E. motion)^[16]。他们提出两颗串行卫星(星间距离约207 km)位于高度为370 km的近极钟摆轨道,并携带激光干涉测距仪、改进的加速计以及GNSS接收机。卫星的低轨飞行高度可获得200 km空间分辨率的重力场信息,任务的重复周期为28.92 d,可确定相同空间分辨率的时变重力场,钟摆轨道的旋转轨道平面技术,可消除单一南北方向观测的局限性。相比于GRACE计划,其不仅可以获取近乎南北方向的信号,同时可以得到更多其他方向的重力场信息,在赤道位置双星测距方向与子午方向最大偏差15°(见图2、表1)。E. motion计划获取的多方向距离与距离变率信号将增强重力场恢复的时空能力,消除GRACE任务的南北条带误差,在数据后处理阶段,可减少

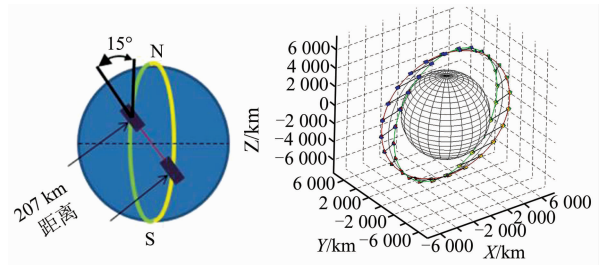


图2 E. motion计划与钟摆轨道

Fig. 2 E. motion Mission and Its Pendulum Orbit

使用滤波技术,保留更多的地球重力场信息。

2.2 GRACE-FO

美国宇航局提出了用于高精度探测地球中短波静态和中长波时变重力场的下一代GRACE Follow-On卫星重力计划^[17],该任务计划将于2017年8月发射。双星重力任务采用近圆、近极和低轨道设计,轨道高250 km,利用激光干涉测距仪精确测量星间距离(约50 km)和星间速度,基于高轨GPS卫星确定轨道位置和轨道速度,通过星载加速度计感测作用于卫星的非保守力以及依靠非保守力补偿系统平衡非保守力(大气阻力、太阳光压、地球辐射压、轨道高度和姿态控制力等)。基于较低的卫星轨道高度和较高的关键载荷测量精度,利用下一代GRACE Follow-On计划反演地球重力场精度较当前GRACE计划至少提高10倍。任务的首要目标是延续GRACE卫

星任务获取高分辨率月重力场模型,计划飞行 5 a,目标大于 10 a,GRACE 卫星的 K/Ka 波段微波干涉计, GPS 和加速度计仍将使用;第二个目标是展示激光测距干涉计(LRI)改进的效果,这

是第一个携带激光干涉计的卫星计划,这个系统将改进未来卫星重力任务的空间分辨率;第三是继续 GRACE 无线电掩星测量,提供垂直温度变化和水汽剖面等信息,为天气预报服务^[18]。

表 1 E. motion 卫星任务参数

Tab.1 Parameters of E. motion Mission

| 轨道配置 | | 有效荷载 | |
|--------|------------------|----------|--|
| 近极钟摆轨道 | 最大交叉偏差 15° (赤道) | 激光干涉仪 | 10~50 nm |
| 任务周期 | >7 a | 加速度计 | 10 ⁻¹¹ ~ 10 ⁻¹² m/s ² |
| 名义轨道高度 | 373 km | 无阻力控制系统 | 3 个高灵敏度轴 |
| 重复周期 | 28.92 d,10 d 子循环 | GNSS 接收机 | 1~2 cm |

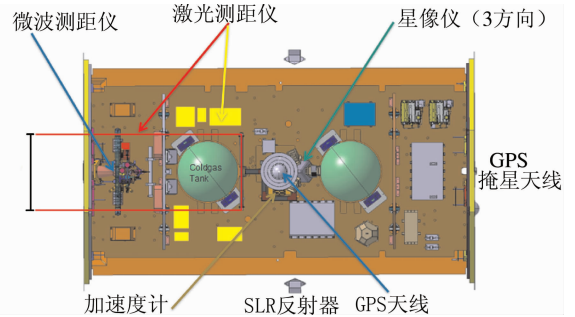
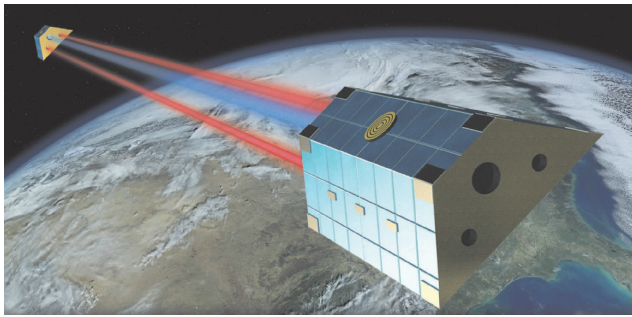


图 3 GRACE Follow-On 卫星重力计划与关键载荷

Fig.3 Satellite Gravity Mission of GRACE Follow-On and Its Key Loads

2.3 NGGM

下一代卫星重力任务(next generation satellite gravimetry mission, NGGM)计划是欧空局和 NASA 联合提出的两队四星卫星重力任务^[3]。其主要目标是提供长时间跨度的时变地球重力场模型,尽可能完整覆盖一个太阳周期(11 a),重力场模型具有高的空间分辨率和时间分辨率(1 周,甚至更优),并抑制 GRACE 时变重力场模型中所具有的高频混频现象。与此同时,NGGM 任务期望确定的大地水准面累计误差为:球谐展开 150 阶,空间分辨率 133 km,精度优于 0.1 mm;200 阶,100 km 分辨率,精度优于 1 mm;250 阶,80 km 分辨率,精度优于 10 mm。为了获得最优的重力场时空采样,两队卫星的倾角分别为 90°和 63°,为了实现 11 a 的任务生命周期,获得 1 个月重复周期(7 d 的子周期)的时变重力场,轨道平均高度为 340 km 或者 424 km。

2.4 GETRIS

空间大地测量与时间参考系统(geodesy and time reference in space, GETRIS)任务是一个创新理念^[3],其主要目标是为低轨卫星导航提供一个高精度的空基大地参考系统,同时为空间和地面用户提供超高精度的时频参考基准。为了实现上述目标,GETRIS 任务计划发射多颗地球同步卫星,这些同步卫星关键星载设备是太空原子钟

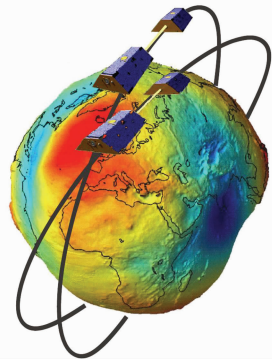


图 4 NGGM 卫星重力计划与扭曲轨道

Fig.4 Satellite Gravity Mission of NGGM and Bender Orbit

(atomic clock ensemble in space, ACES)模块,主要包括两个原子钟和用于时间传输的链路,可实现时频信息的传输与获取。GETRIS 的另外一个主要任务是距离观测,利用微波链路或激光通讯终端(laser communication terminal, LCT),可实现静止轨道卫星与低轨卫星 30 000 km 距离测量的精度达到 1 μm,这些距离观测可用于恢复地球静态与时变重力场,其原理见图 5。

3 SWARM

GRACE 卫星任务寿命已超预期,根据目前

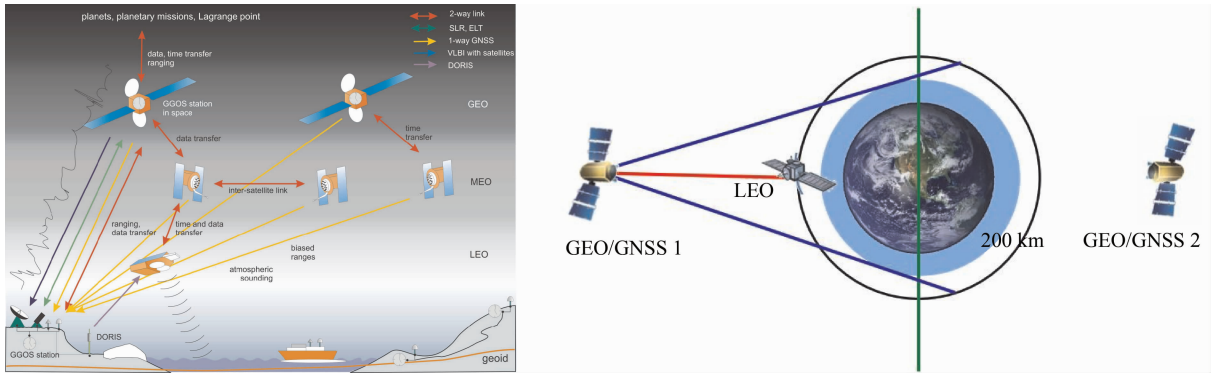


图5 GETRIS任务原理示意图

Fig. 5 Principle Diagram of GETRIS Mission

载荷运行状态,估计尚可延续至2016年,但其后续任务GRACE Follow-On(GFO)至今仍未列入发射计划,在此期间,一个新的卫星计划SWARM将可替续GRACE任务至GFO发射^[19],见图6。

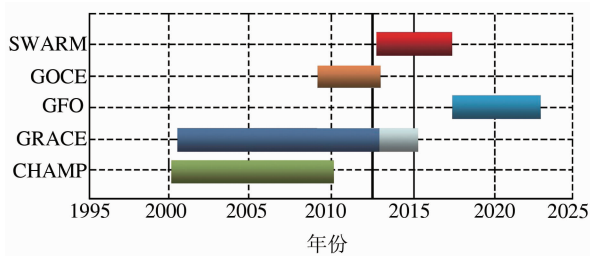


图6 相关低轨卫星运行时间跨度

Fig. 6 Time Span of Related Low Earth Orbiters

CHAMP、GRACE和GOCE三个新一代重力探测卫星分别于2000、2002和2009年成功发射,至今只有原设计5a寿命的GRACE仍在运行中,NASA已启动后续计划,并决定保持原技术模式实施快速后续方案,但其后续任务至今仍未列入发射计划。欧洲空间局于2013年11月22日成功发射了首个地球探测者编队卫星任务SWARM,该卫星任务由三颗类似CHAMP卫星组成,载有精度更高的GNSS接收机、加速度计等重力探测关键有效载荷。

SWARM卫星任务是一个由三颗位于不同极轨(轨道高在400~550 km之间)卫星组成的星座(见图7),其中一颗卫星在高轨道(530 km)飞行,剩余两颗卫星在低轨道(450 km)飞行,卫星设计寿命为4 a,预计产生10 950个数据包、 1.9×10^8 卫星位置信息以及26.5 G的数据。

SWARM携带的与重力场测量相关的关键载荷包括加速度计^[20](accelerometer, ACC)、激光测距仪(激光后向反射器LRR)和GNSS接收机。SWARM搭载加速度计的精度能满足恢复

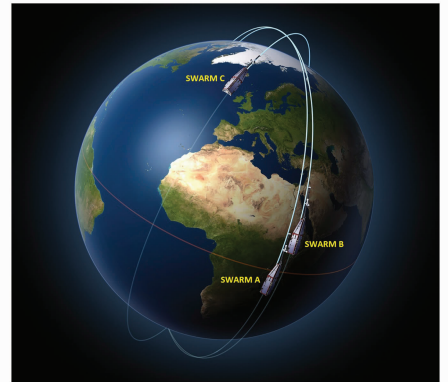


图7 SWARM星座整体运行图

Fig. 7 Picture of SWARM Constellation Operation

地球重力场的要求,其具体参数见表2。

表2 星载加速度计参数

Tab. 2 SWARM Acceleration Parameters

| 参数 | 指标 |
|--------------|---|
| 质量 | 5.4 kg |
| 包括温度控制系统的总质量 | 6.2 kg |
| 功率 | 4.5 W |
| 规格 | 310 mm×155 mm×164 mm |
| 中心质量块规格 | 约30 mm×30 mm×30 mm |
| 测量范围 | $2 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-2}$ |
| 分辨率 | $2 \times 10^{-10} \text{ ms}^{-2}$ |
| 频率范围 | $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ Hz}$ |
| 稳定性 | 热稳定度: $3 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{K}$ |
| | 长期稳定度: $1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ |
| 数据传输率 | 0.278 kb/s |

SWARM携带的精密定轨设备包括GNSS接收机和激光测距仪,这些设备和其低轨飞行的特性可满足地球重力场探测的需求。SWARM无论从技术设计和硬件设备都类似于早期的CHAMP卫星(见图8),可以说,SWARM任务是3颗类似CHAMP卫星的组合星群计划。

由于CHAMP和GOCE卫星任务已结束,GRACE任务随时可能终止,GRACE Follow-On

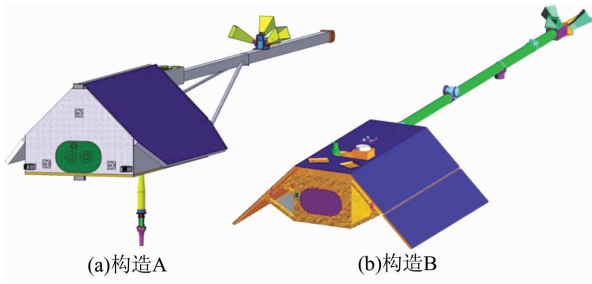


图 8 SWARM 卫星构造

Fig. 8 Structure of SWARM

计划于 2017 年发射,在此期间,缺少专门的重力卫星对地球重力场及其时变进行观测,卫星重力场观测数据将会中断。虽然 SWARM 没有 SST-II 星间测距功能,不是专用的重力卫星,但 SWARM 载有精度更高的 GNSS 接收机、加速度计等重力探测关键有效载荷,可用于探测地球时变重力场^[19]。SWARM 卫星计划的飞行时间是 2013 年 11 月到 2017 年底,可弥补 GRACE 卫星重力观测的空白,有利于保持地球时变重力场监测的完整性。

4 结语

CHAMP、GRACE 和 GOCE 三个重力探测卫星的成功实施,ESA 和 NASA 已启动的 4 个后续计划的仿真模拟研究,都为我国发射自主的重力卫星计划提供了很好的借鉴经验。考虑到我国当前在 GNSS 接收机、激光干涉和微波星间测距仪、非保守力补偿系统、卫星体和加速度计质心调节装置等关键载荷研制方面与世界先进水平仍存在差距,因此,我国应先期开展重力卫星高精度关键载荷的研制工作。在此基础上,根据我国研制的重力卫星高精度关键载荷的精度水平,设计卫星重力卫星任务的观测模式和轨道参数等。就当前国际卫星重力任务实施的计划和预演的结果来看,我国自主重力卫星应以 GRACE 报告地点 Follow-On 为基本蓝图,发射时间不晚于 2025 年,卫星任务基于卫星跟踪观测模式,采用激光干涉星间测距仪、多模 GNSS 接收机和非保守力补偿系统等新技术,确定静态和时变地球重力场模型的精度,满足本世纪相关地球科学学科的迫切需求。

参 考 文 献

[1] Ning Jinsheng, Wang Zhengtao. Progress and Pres-

ent Status of Research on Earth's Gravitational Field [J]. *Journal of Geomatics*, 2013, 38(1):1-7 (宁津生,王正涛. 地球重力场研究现状与进展[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(1):1-7)

- [2] Arora K. *Geodesy, Figure of the Earth* [M]. New York: Springer-Verlag, 2014
- [3] Roland P, Thomas G. *Future Gravity Missions: An Integral Component of the Global Geodetic Observing System* [R]. Österreichischer Geodätentag, Velden am Wörthersee, 2015
- [4] Flechtner F, Sneeuw N, Schuh W D. *Observation of the System Earth from Space-CHAMP, GRACE, GOCE and Future Missions; Geotechnologien Science Report No. 20* [M]. Berlin, Germany: Springer, 2014
- [5] Jürgen Müller, Nico Sneeuw, Frank Flechtner. *Future Satellite Gravity Missions Activities in Germany, Technical Report* [R]. Graz, Austria, 2009
- [6] Gruber T. *Future Gravity Missions Outlook and Application* [R]. Hamburg, Germany, 2010
- [7] Zheng Wei, Xu Houze, Zhong Min et al. *Progress in International Next-Generation Satellite Gravity Measurement Missions* [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(3):152-158 (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):152-158)
- [8] Marks K M, Smith W H F, Sandwell D T. *Significant Improvements in Marine Gravity from Ongoing Satellite Missions*[J]. *Mar Geophys Res*, 2013, 34:137-146
- [9] Flechtner F. *Observation of the System Earth from Space-CHAMP, GRACE, GOCE and Future Missions* [M]. New York: Springer-Verlag, 2014
- [10] Silvestrin P, Aguirre M, Massotti L, et al. *The Future of the Satellite Gravimetry After the GOCE Mission* [J]. *Geodesy for Planet Earth*, 2011, 136(1):223-230
- [11] Rodell M, Houborg R, Li B, et al. *Practical Applications of GRACE and Future Satellite Gravity Missions* [R]. Greenbelt, MD, USA, 2015
- [12] Zheng W, Hsu H. *Requirements Analysis for Future Satellite Gravity Mission Improved-GRACE* [J]. *Surv Geophys*, 2015, 36:87-109
- [13] van der Meijde M, Pail R, Bingham R, et al. *GOCE Data, Models, and Applications: A Review* [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 35:4-15
- [14] Panet I, Flury J, Biancale R, et al. *System Mass Transport Mission (E. motion): A Concept for Future Earth Gravity Field Measurements from Space*

- [J]. *Surv Geophys*, 2013, 34: 141-163
- [15] Plag H P, Pail R. A Roadmap for Future Satellite Gravity Missions [R]. Reno, NV, USA, 2015
- [16] Panet I, Flury J, Biancale R, et al. System Mass Transport Mission (E. motion): A Concept for Future Earth Gravity Field Measurements from Space [J]. *Surv Geophys*, 2013, 34: 141-163
- [17] Flechtner F, Morton P, Watkins M, et al. Status of the GRACE Follow-On Mission [C]. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2013
- [18] Zheng Wei, Hsu H T, Zhong Min, 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
- [19] Wang Z T, Chao N F. Time-variable Gravity Signal Greenland Revealed by SWARM High-Low Satellite-to-Satellite Tracking [J]. *Chinese J Geophys*, 2014, 57(10): 3 117-3 128 (王正涛, 超能芳. 利用 SWARM 卫星高低跟踪探测格陵兰岛时变重力信号 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(10): 3 117-3 128)
- [20] Zou Xiancai, Li Jiancheng, Zhong Luping, et al. Calibration of the Accelerometers Onboard GRACE with the Dynamic Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(3): 357-360 (邹贤才, 李建成, 衷路萍, 徐新禹. 动力法校准 GRACE 星载加速度计 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(3): 357-360)

Research Status and Progress in International Next-Generation Satellite Gravity Measurement Missions

NING Jinsheng^{1, 2} WANG Zhengtao^{1, 2} CHAO Nengfang¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education,

Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: We review the development of the satellite gravity measuring techniques. The research status of present satellite gravity missions, including CHAMP, GRACE, and GOCE, are discussed and the main shortcomings of GRACE are analyzed. Some suggestions for determining gravity field at higher precision and higher resolution in space and time are proposed, which include reduction of the current level of aliasing, the elimination of systematic distortions (non-isotropic sensitivity of a single pair low-low SST), and the improvement in the separability of the observed geophysical signals are discussed. The progress of the next four international satellite gravity missions: E. motion, GRACE-FO, NGGM, GETRIS, are presented and the role and status of the SWARM satellite constellation mission on the earth's gravity field research are summarized. Finally, several suggestions about the implementation of the future satellite gravity missions in China are put forward. The next generation satellite gravity systems should be capable of global determination of changes in the *Earth's* gravity field from global down to regional spatial scales and at time scales of two weeks or shorter.

Key words: satellite gravity measurement; E. motion; GRACE-FO; NGGM; GETRIS; SWARM

First author: NING Jinsheng, professor, Academician of Chinese Academy of Engineering, mainly engages in the theory, methods and technology of the Earth's gravity field of scientific research and teaching work. His representative achievements are local gravity field of global gravity field models WDM89 and WDM94 which suitable for China, high resolution Chinese gravity geoid. He is the author of "the shape of the Earth and its external gravity field", "the Earth's gravity field model theory" and others all about seven books, and he has published more than 200 papers in journals and academic conferences. E-mail: jshning@sgg.whu.edu.cn

Corresponding author: WANG Zhengtao, PhD, associate professor. E-mail: ztwang@whu.edu.cn

Foundation support: The National 863 Program of China, No. 2013AA122501; Foundmental Surveying and Mapping of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation of China, No. B2551; The National Key Basic Research and Development Program (973 Program) of China, Nos. 2013CB733301, 2013CB733302; The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274032, 41474018.