

我国将来更高精度 CSGM 卫星重力测量计划研究*

郑伟¹, 许厚泽¹, 钟敏¹, 刘成恕¹, 员美娟²

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北 武汉 430077;

2. 武汉科技大学 理学院, 湖北 武汉 430081)

摘要: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、仿真模拟的先期启动和反演方法的优化改进,开展了我国将来 CSGM(China's Satellite Gravity Mission)卫星重力测量计划实施的研究论证。由于卫星跟踪卫星高低/低低(SST-HL/LL)模式对地球中波长重力场的探测精度较高、技术要求相对较低,而且可借鉴当前 GRACE 卫星的成功经验,因此建议将来 CSGM 卫星重力测量计划采用 SST-HL/LL 模式;建议开展激光干涉星间测距仪、复合 GPS 接收机、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的先期研制;建议将来 CSGM 卫星的轨道高度(300~400km)和星间距离(100±50km)选择在已有重力卫星的测量盲区;建议将仿真技术应用于 CSGM 卫星的方案论证、系统设计、部件研制、产品检验、空中使用、故障分析等研发和运行的全过程;对比分析了卫星轨道摄动法、动力学法、能量守恒法和加速度法的优缺点,建议寻求新型、高精度、高效率 and 全频段的卫星重力反演方法;提出将来 CSGM 卫星重力测量计划的预期科学目标:在 300 阶处,累计大地水准面精度和累计重力异常精度分别为 1~5cm 和 1~5mGal。

关键词:CSGM;卫星跟踪卫星;关键载荷;轨道参数;卫星重力反演

中图分类号:V474.2+6 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2014)04-0102-10

Researches on future ultra-precision CSGM satellite gravity mission in China

ZHENG Wei¹, XU Houze¹, ZHONG Min¹, LIU Chengshu¹, YUN Meijuan²

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

2. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract:The research demonstrations on the implementation of the future CSGM satellite gravity mission in China were carried out, based on the preferable selection of satellite tracking modes, the optimal combination of key payloads, the preferred design of orbital parameters, the beforehand execution of simulated studies, and the optimum improvement of gravity recovery methods. Firstly, the Satellite-to-Satellite Tracking in the High-Low/Low-Low mode (SST-HL/LL) was used in the future CSGM satellite gravity mission due to the high-accuracy measurement of the Earth's gravitational field, the lower technical requirements and the successful experiences of the current twin GRACE satellites. Secondly, the space-borne instruments consisting of the interferometric laser intersatellite ranging system, the compound GPS receiver, the drag-free system, the center of mass trim assembly, etc. were developed in advance. Thirdly, the orbital altitude of 300~400 km and the intersatellite range of 100±50 km were designed in the unmeasurable area of the existing gravity satellites. Fourthly, the simulation techniques were applied to the holistic processes of the development and operation for CSGM, including scheme demonstration, system design, parts development, production test, practical application and malfunction analysis. Fifthly, the advantages and disadvantages of the satellite orbital perturbation, dynamic, energy conservation and semi-analytic methods were contrastively analyzed, and the new-type, high-precision, high-efficiency and full-frequency satellite gravity recovery methods were investigated. Finally, the expected scientific objectives of the future CSGM satellite gravity mission showed that the cumulative geoid height error is 1~5 cm and the cumulative gravity anomaly error is 1~5 mGal at degree 300.

Key words:China's satellite gravity mission; satellite-to-satellite tracking; key payload; orbital parameter, satellite gravity recovery

* 收稿日期:2013-10-10

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向青年人才项目(KZCX2-EW-QN114);国家自然科学基金青年项目(41004006, 41202094);国家自然科学基金重点项目(41131067);国家自然科学基金面上项目(11173049);国家留学人员科技活动择优资助基金项目(2011);武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室测绘基础研究基金项目(11-01-02);中国测绘科学研究院地理空间信息工程国家测绘地理信息局重点实验室开放基金项目(201322);西安测绘研究所地理信息工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGIE2013-M-1-5);中国科学院测量与地球物理研究所重要方向项目(Y309451045);大地测量与地球动力学国家重点实验室自主项目(Y309491050);中国科学院卢嘉锡青年人才和青年创新促进会基金项目(2013)。

作者简介:郑伟(1977—),男,山西太原人,副研究员,博士后,硕士生导师, E-mail: wzheng@asch.whigg.ac.cn

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。重力卫星在重力场作用下绕地球作近圆极轨运动,若精密定轨,必须知道精确的地球重力场参数;反之,精确测定卫星轨道摄动,利用摄动跟踪观测数据又可以提高地球重力场参数的精度,两者相辅相成。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、空间科学、国防建设等的需求,同时也将为寻求资源、保护环境和预测灾害提供重要的信息资源。



图1 国际三期卫星重力测量计划

Fig. 1 International three-stage satellite gravity missions

自伽利略于16世纪末第一次进行重力测量以来,国内外众多科研机构在全球范围内的陆地、海洋和空间采用多种技术和方法进行了大量的地球重力场测量。1966年,Kaula首次利用卫星轨道摄动分析理论和地面重力资料建立了8阶的地球重力场模型,奠定了卫星重力学的理论基础。21世纪是人类利用卫星跟踪卫星高低/低低技术(SST-HL/LL)和卫星重力梯度技术(SGG)提升

对“数字地球”认知能力的新纪元。如图1和表1所示,地球重力测量卫星CHAMP(CHallenging Minisatellite Payload)、GRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment)和GOCE(Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer)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。

CHAMP、GRACE和GOCE卫星各有所长,它们的相继发射不是相互竞争而是相互补充。CHAMP是卫星重力测量计划成功实施的先行者,GRACE的优越性体现于可高精度探测地球重力场的中长波信号及时变,而GOCE擅长于感测地球中短波静态重力场。联合上述三期卫星重力计划虽然可以精确测量重力场,从而获得地球总体形状随时间变化、地球各圈层物质的分布和变化、全球海洋质量的分布和变化、极地冰川的增大和缩小以及地下蓄水总量信息的特性,但仍无法满足本世纪相关学科对全频段地球重力场精度进一步提高的迫切需求。因此,当前国际众多科研机构正积极寻求新型、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。(1)双星重力计划:串行编队(如GRACE Follow-On计划^[1-2]、NGGM(Next-Generation Gravimetry Mission)计划^[3]等)和钟摆编队(如E. MOTION(Earth System Mass Transport Mission)计划^[4,5]等);(2)三星重力计划:串行-钟摆组合编队(GRACE-Pendulum-3S计划^[6]等);(3)四星重力计划:车轮编队(如FSCF(Four-Satellite Cartwheel Formation)计划^[7-8]等)和不同倾角组合编队^[9-10]。

表1 地球重力卫星参数对比

Tab. 1 A comparison of parameters for the Earth's gravity satellites

参 数	重力卫星		
	CHAMP	GRACE - A/B	GOCE
研制机构	德国 GFZ	美 NASA, 德 DLR	欧洲 ESA
飞行时间	2000 - 07 - 15 ~ 2010 - 09 - 19	2002 - 03 - 17 ~ 今	2009 - 03 - 17 ~ 2013 - 11 - 10
卫星寿命(年)	10	10 ~ 15	4
轨道高度(km)	454 ~ 300	500 ~ 300	~ 250
轨道倾角(°)	87	89	96.5
轨道离心率	< 0.004	< 0.004	0.001
星间距离(km)	—	220 ± 50	—
跟踪模式	SST-HL	SST-HL/LL	SST-HL/SGG
空间分辨率(km)	285	166	80

国际大地测量学界众多科研工作者经过 40 多年的探索终将 SST 和 SGG 计划推向实际操作阶段。我国众多学者在基于卫星重力测量反演地球重力场的理论和方法方面已开展了广泛研究。国外卫星重力测量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测量计划的实施,加快研制重力卫星的步伐,通过卫星重力测量计划的实现带动相关科学和国防领域的快速发展;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尚处于起步和跟踪阶段,而且对于重力场反演方法以及观测结果地球物理解释的基础相对薄弱。基于以上原因,本文开展了下一代卫星重力测量计划的研究论证,旨在为我国将来 CSGM 卫星重力测量计划的成功实施提供可行性的理论依据和应用保证。

1 将来 CSGM 卫星重力计划

1.1 卫星跟踪模式的优化选取^[11]

地球重力场的传统测量方法主要包括地面重力观测技术、海洋卫星测高技术 and 卫星轨道摄动技术。由于传统重力测量技术的固有局限性导致地球重力场在 100 ~ 5000km 空间分辨率范围内的测量精度较差,因此无论是由三种传统重力测量技术单独或联合测量建立的地球重力场模型都难以满足本世纪相关学科发展的需求。卫星重力测量技术的实现是继美国全球定位星座成功构建之后在大地测量等领域的又一项创新和突破,它之所以被国际大地测量学界公认为是当前地球重力场探测研究中最高效、最经济和最有发展潜力的方法之一,是因为它既不同于传统的车载、船载和机载测量,也不同于卫星测高和轨道摄动分析,而是通过卫星跟踪卫星高低/低低技术和卫星重力梯度技术反演高精度和高空间分辨率的地球重力场。

1.1.1 卫星跟踪卫星高低(SST-HL)模式

SST-HL 测量原理如下:(1) 通过高轨 GPS 卫星实时跟踪低轨重力卫星(如 CHAMP),从而得到卫星轨道位置 \mathbf{r} (基于微分原理可得到轨道速度和轨道加速度);(2) 基于星载加速度计实时测量卫星受到的非保守力 \mathbf{f} (如大气阻力、太阳光压、地球辐射压、轨道高度和姿态控制力等);(3) 建立保守力模型 \mathbf{F} (如日月引力、地球固体、海洋和大气潮汐力、极潮汐力等);(4) 基于 $\mathbf{g} = \ddot{\mathbf{r}} - \mathbf{f} - \mathbf{F}$ 确定地球重力场。在 SST-HL 跟踪模式

中,轨道位置 \mathbf{r} 和非保守力 \mathbf{f} 是卫星的原始观测量。目前随着星载加速度计研制精度的不断提高(如法国航空气象研究局研制的静电悬浮加速度计 $10^{-13} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$),非保守力的感测精度可满足高精度和高空间分辨率地球重力场反演的需求,但由于 GPS 卫星轨道位置精度(cm 级)的限制,因此基于 SST-HL 测量模式无法实质性提高地球重力场精度。另外,基于 SST-HL 模式反演地球重力场的空间分辨率依赖于卫星的轨道高度,因此仅能感测长波地球重力场的信号(低通滤波),对中波和短波信号敏感性较弱。据德国波兹坦地学研究中心(GFZ)公布的 2000 - 07 - 15 ~ 2010 - 09 - 19 约 10 年的 CHAMP 地球重力场实测数据可知,CHAMP 任务反演地球重力场的有效引力位系数的最大阶数约为 70 阶(对应空间分辨率 285km),大地水准面精度约为 18cm。因此,SST-HL 测量模式仅是地球重力场精密测量的概念性证明和技术性试验,但在精度和空间分辨率上不会对现有地球重力场模型有较大贡献。

1.1.2 卫星跟踪卫星高低/卫星重力梯度(SST-HL/SGG)模式

SST-HL/SGG 测量原理如下:(1) 基于高轨 GPS 卫星对低轨重力卫星(如 GOCE)实时定轨;(2) 通过星载重力梯度仪直接测定卫星轨道高度处引力位的二阶导数;(3) 利用非保守力补偿系统(Drag-free)屏蔽重力卫星受到的非保守力;(4) 联合上述卫星观测值基于卫星重力梯度原理感测地球重力场。重力梯度卫星 GOCE 原计划于 2004 年发射升空,但由于星载三维静电悬浮重力梯度仪(精度 $3 \times 10^{-12}/\text{s}^2$)和卫星整体系统研制的困难性,因此至 2009 年成功发射为止已推迟发射多次。由于 GOCE 卫星对重力梯度仪的研制精度要求较高,而且中国目前对重力梯度仪的研究水平尚处于起步和跟踪阶段,因此 SST-HL/SGG 跟踪模式在现阶段暂时不符合我国的国情。但是,SGG 是国际大地测量学界创新提出的又一项探测地球重力场特性特征、精细结构和演变过程的新技术和新领域,目前已逐渐发展成为专门研究空间重力梯度测量的理论、方法、载荷和应用的新兴科学。由于地球引力位二阶微分仅与地球重力场相关,通过对引力位二阶微分的观测,可直接获得地球重力场信息,不仅有利于避免运动加速度误差的负面影响,而且可有效抑制地球重力场中高频信号的衰减效应,因此 SST-HL/SGG 模式有望成为我国将来优选和具有发展潜力的卫星重力测量模式之一。

1.1.3 卫星跟踪卫星高低/低低(SST-HL/LL)模式

SST-HL/LL 测量原理如下:(1) 利用高轨 GPS 卫星对低轨双星(如 GRACE)精密跟踪定位;(2) 基于高精度静电悬浮加速度计测量作用于卫星的非保守力;(3) 通过姿态和轨道控制系统测量卫星和载荷的空间三维姿态;(4) 两颗低轨卫星在同一轨道平面内前后相互跟踪编队飞行,利用星间测距仪高精度测量星间距离(共轨双星轨道摄动之差),进而高精度和高空间分辨率反演地球重力场。在 SST-HL/LL 测量模式中,由于地球重力场反演精度主要敏感于高精度的星间测距 ρ 或星间测速 $\dot{\rho}$,而且高精度星间测距仪数据的后处理可进一步改善卫星的定轨精度,因此对 GPS 定轨精度的要求可适当放宽。据德国 GFZ 公布的自 2002 年至今的 GRACE 地球重力场实测数据可知,GRACE 双星计划反演地球重力场的有效引力位系数的最大阶数约为 120 阶(空间分辨率 166km),大地水准面精度约为 18 cm^[12]。SST-HL/LL 跟踪模式既包含两组 SST-HL,同时以差分原理测定两个低轨卫星之间的相互运动,因此得到的静态和动态重力场精度比 SST-HL 模式至少高一个数量级。由于 SST-HL/LL 跟踪模式对地球中长波静态及时变重力场的探测精度较高,技术含量相对较低且容易实现,全球重力场测定速度快、代价低和效益高,可满足相关学科领域对地球重力场精度进一步提高的迫切需求,而且可借鉴当前 GRACE 卫星整体系统的成功经验,因此我国将来 CSGM 卫星重力测量计划采用具有中国特色的 SST-HL/LL 跟踪模式较符合国情。

1.2 卫星关键载荷的优化组合

鉴于我国在激光干涉星间测距仪、GPS 接收机、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距离世界先进水平仍有差距,而且这些技术不可能通过从国外引进获得,必须依靠独立自主解决,同时上述技术的实现直接决定了我国能否成功实现将来 CSGM 卫星重力测量计划,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^[13-15]。

1.2.1 激光干涉星间测距仪

在 SST-HL/LL 跟踪模式中,目前国际上通常采用微波测距或激光测距两种模式。GRACE 卫星 K 波段星间测距仪采用微波测距方式,优点是微波束宽角可在设计时进行调整,并且对卫星姿态实时控制技术和指向精度要求较低,缺点是对

星间距离和星间速度(10^{-6} m/s)的测量精度较低;激光干涉星间测距仪采用的激光束方向性强,虽然对重力卫星整体系统姿态控制的要求较高,但能大幅度提高星间距离和星间速度(10^{-9} m/s)的感测精度。激光干涉星间测距仪是我国将来 CSGM 重力卫星的最重要关键载荷,测量原理如下:为了提高星间距离的测量精度以及消除电离层对信号的延迟效应,激光干涉星间测距仪采用双单向和双频段测量模式。首先,CSGM 双星的激光干涉星间测距仪分别向对方发送两种不同频率的激光信号;其次,双星各自接收的激光信号与本地超稳定振荡器(USO)产生的相应参考频率信号混频处理(信号相乘),通过低通滤波保留差频信号,并送到数据处理器;最后,利用数字锁相环路跟踪差频信号得到相位变化解,并将测量结果传回地面跟踪站综合处理。CSGM 双星的轨道除受到非保守力摄动外,主要受到地球静态和时变引力场的综合影响。由于 CSGM 共轨双星以不同的轨道相位敏感地球质量系统的影响,因此双星间将产生微小的轨道摄动差。此轨道摄动差使 CSGM 共轨双星连线方向的距离 ρ_{12} 、速度 $\dot{\rho}_{12}$ 和加速度 $\ddot{\rho}_{12}$ 实时变化,而 CSGM 星载激光干涉星间测距仪可高精度测量此距离变化 $\Delta\rho_{12}$ 、速度变化 $\Delta\dot{\rho}_{12}$ 和加速度变化 $\Delta\ddot{\rho}_{12}$ 。通过对距离差、速度差和加速度差的精密测量,地球重力场的高频信号被放大,因此有效提高了地球重力场高阶谐波分量的测量精度。激光干涉测距仪的研制和应用是今后国际上 SST-HL/LL 跟踪模式发展的主流方向,是建立下一代高精度、高空间分辨率和全频段地球重力场模型的重要保证。

1.2.2 复合全球定位接收机

目前获得全球、规则、密集、全频段、高精度和高空间分辨率的地球重力场数据必须满足三个基本准则:(1) 连续高精度跟踪卫星的三维空间分量(位置和速度);(2) 精密测量作用于卫星的非保守力和精确模型化作用于卫星的保守力;(3) 尽可能降低卫星的轨道高度(200 ~ 500km)。在三个基本准则之中,连续高精度跟踪卫星的三维空间分量是反演高精度和高空间分辨率地球重力场的必要前提和重要基础,需通过星载全球定位接收机实现。在卫星重力测量中,激光干涉星间测距仪、GPS 接收机、加速度计等关键载荷的精度指标应严格匹配^[13-15]。如果某个载荷的精度指标高于其他载荷,据误差原理可知,高精度指标的载荷无法发挥自身高精度的优势,只有与其他载荷相匹配的精度部分对地球重力场反演精度才有

贡献^[16]。目前激光干涉星间测距仪(星间速度 10^{-9} m/s)和加速度计(非保守力 10^{-13} m/s²)等关键载荷的精度指标均可满足将来 CSGM 卫星重力测量计划中各关键载荷精度指标匹配的要求。虽然高精度的激光干涉星间测距仪可辅助定轨,但由于 GPS 接收机本身动态定轨的精度指标(轨道位置 10^{-2} m)较难进一步提高,因此定轨精度将是限制下一代高精度和高空间分辨率地球重力场模型建立的关键误差源。当前 CHAMP 和 GRACE 卫星采用 GPS 接收机实现精密定轨,GOCE 卫星采用双频接收机实现 GPS 和 GLONASS 卫星星座同时对低轨卫星联合跟踪定位。对于我国将来 CSGM 重力卫星,应致力于研制能同时接收和处理 GPS、GLONASS、Galileo 和我国北斗导航定位系统信号的复合全球定位接收机,以期进一步提高重力卫星的定轨精度。

1.2.3 非保守力补偿系统

在卫星重力测量中,利用重力卫星作为传感器高精度感测地球重力场的最大弱点是卫星高度处的重力场成指数衰减 $[R_e/(R_e + H)]^{l+1}$ 。为了克服上述缺点进而反演高精度地球重力场,目前最有效的办法是采用低轨重力卫星。因此,如果重力卫星受到的非保守力能被高精度扣除,在保证地球重力场反演精度和空间分辨率的前提下,可以适当降低各关键载荷(星间测距仪、GPS 接收机、星载加速度计等)研制的难度以及避免不必要的人力、物力和财力的浪费^[17-18]。重力卫星非保守力的有效扣除通常包括两种方式:非保守力后期改正技术和非保守力实时补偿技术。

非保守力后期改正技术的原理如下:首先,在前期重力卫星测量地球重力场过程中,通过星载加速度计获得卫星受到的非保守力数据;其次,在后期反演地球重力场的观测方程中,将卫星受到的非保守力 f 效应从合外力 \ddot{r} 中扣除。优点是是非保守力效应的扣除分前期测量和后期改正两步完成,重力卫星在飞行过程中通过加速度计仅对卫星受到的非保守力进行测量,不需要实时补偿,因此在一定程度上降低了载荷研制的难度。缺点是随着卫星轨道高度逐渐降低,作用于卫星的非保守力(以大气阻力为主)将急剧增大,重力卫星轨道高度每降低 100km,大气阻力提高约 10 倍^[19]。第一,为调整卫星轨道高度和姿态需频繁进行轨道机动,不稳定的卫星平台工作环境将影响各关键载荷的测量精度;第二,由于卫星频繁喷气引起喷气燃料消耗,将导致星体质心和加速度计检验质量质心存在实时偏差;第三,卫星使用寿命极大

地缩减,将影响地球静态和时变重力场的反演精度和空间分辨率。CHAMP 和 GRACE 卫星重力测量计划的缺点是未采用非保守力实时补偿技术,因此卫星轨道高度无法实质性降低(400 ~ 500km),从而较大程度地影响了地球重力场中高频信号的感测精度。

非保守力补偿系统通常由星载加速度计、轨道和姿态微推进器、实时控制微处理系统组合而成。基本原理如下:通过星载加速度计感测卫星体受到的非保守力;实时控制微处理系统将星载加速度计测得的非保守力转换为轨道和姿态微推进器的期望推进力和力矩;利用轨道和姿态微推进器实时补偿卫星体受到的非保守力。优点是影响卫星平台系统和载荷的非保守力效应被非保守力补偿系统有效屏蔽,不仅为卫星平台系统和载荷提供了安静的工作环境进而保证了测量精度,同时可有效降低重力卫星的轨道高度,有效抑制了地球中短波重力场信号的衰减;缺点是在重力卫星载荷中新增加了非保守力补偿系统,适当增加了重力卫星研制的难度。GOCE 卫星的优点是采用非保守力补偿系统实时消除作用于卫星的非保守力效应,进而有效降低了卫星轨道高度(200 ~ 300km),提高了地球短波重力场信号的感测精度。

我国将来 CSGM 卫星重力测量计划可在 GRACE 卫星计划的基础上增加非保守力补偿系统进而弥补其缺点,优点是有效降低了卫星各关键载荷的研制难度(适当缩短测量动态范围以保证测量精度)和卫星轨道高度,有望进一步提高地球中高频重力场的测量精度。

1.2.4 卫星体和加速度计质心调节装置

在地心惯性系中研究卫星绕地球运动的规律,通常将卫星视为质点。因此,在卫星飞行中作用于卫星的非保守力可等效为作用于卫星的质点处。在卫星重力测量中,为了将地球引力从卫星受到的合外力中有效分离,作用于卫星非保守力的实时精确扣除是能否反演高精度和高空间分辨率地球重力场的重要保证,因此 CSGM 星载加速度计检验质量的质心要求精确定位于卫星体的质心处。由于卫星在实际飞行中,卫星体的质心和星载加速度计检验质量的质心实时存在偏移,因此卫星体和加速度计质心调节装置的研制是加速度计能否将作用于卫星体的非保守力精确扣除的关键技术。CSGM 卫星体和星载加速度计检验质量的质心偏差源主要来自于两个方面:第一,地面安装误差源。由于在地面安装时卫星体质心和加

速度计检验质量质心存在偏移,导致了 CSGM 卫星加速度计的静电力和作用于卫星的非保守力存在固有偏差。第二,在轨飞行误差源。由于空间环境(温度、压力等)的复杂性导致在轨飞行的卫星发生形变以及对卫星进行实时轨道和姿态控制引起喷气燃料消耗(每 2~3 min 喷气 1 次,每次喷气时间 200~300 ms),将会导致 CSGM 卫星体和星载加速度计检验质量的质心存在实时偏差。由于 CSGM 卫星体和星载加速度计检验质量的质心偏差与卫星姿态测量具有耦合效应,因此在反演地球重力场时会同时将卫星姿态测量误差引入卫星观测方程。CSGM 星体和加速度计检验质量的质心偏差以及卫星姿态测量误差的引入必将会在加速度计的三轴测量中附加扰动误差,从而影响地球重力场反演的精度。因此,CSGM 星体和星载加速度计检验质量质心调节装置的研制和应用是提高地球重力场反演精度的重要保证^[20]。

1.3 卫星轨道参数的优化设计

卫星轨道参数(如轨道高度、星间距离等)的优化设计是成功实施我国将来 CSGM 卫星重力测量计划的关键因素和重要保证。

1.3.1 轨道高度

由于不同卫星轨道高度敏感于不同阶次的地球引力位系数,因此 CHAMP(400~500km)、GRACE(400~500km)和 GOCE(200~300km)仅在特定轨道高度区间能发挥优越性,而在轨道空间范围之外基本无能为力。如果我国将来 CSGM 重力卫星也设计在上述三期重力卫星的轨道高度空间范围,除非反演重力场的精度高于它们,否则效果仅相当于其测量的简单重复,对于重力场精度的进一步提高没有实质性贡献。因此,我国将来 CSGM 重力卫星的轨道高度应尽可能选择在已有重力卫星的测量盲区 300~400km,进而形成互补的态势。

GRACE 为了尽可能降低非保守力的干扰进而延长卫星的使用寿命(约 10~15 年),将轨道高度设计为 400~500km 的空间范围。我国将来 CSGM 卫星重力测量计划虽然增加了非保守力补偿系统,但由于具有一定测量精度的非保守力补偿系统不可能将作用于卫星体的非保守力完全平衡,同时轨道和姿态微推进器的频繁喷气将导致卫星携带燃料的大量损耗。因此,适当降低卫星轨道高度有利于提高地球重力场的反演精度,代价是在一定程度上牺牲了卫星的使用寿命。据误差理论可知,如果观测数据增加了 n 倍,那么地球

重力场的测量精度仅提高约 \sqrt{n} ,因此由于适当降低卫星轨道高度而导致卫星使用寿命缩短不会对重力场反演精度产生本质影响。我们首次于 2009 年基于功率谱原理的半解析法^[13]和 2010 年基于解析法^[14]开展了将来 CSGM 卫星轨道高度的需求分析。在 120 阶处,基于功率谱原理的半解析法和采用平均轨道高度 350km,估计 CSGM 累计大地水准面精度为 3.725×10^{-5} m,其较 EIGEN-GRACE02S 地球重力场模型(轨道高度 500km)精度提高了 5082 倍,卫星关键载荷精度指标的匹配关系和相关参数见文献[13]。综上所述,我国将来 CSGM 卫星轨道高度设计为 300~400km,进而填补已有重力卫星轨道高度的测量盲区可行。

1.3.2 星间距离

在 SST-HL/LL 跟踪模式中,适当缩短星间距离有利于地球高频重力场的反演,但如果星间距离设计太小,在抵消掉双星共同误差的同时,重力场信号也将被部分差分掉,将导致信噪比较低,因此星间距离设计太小不利于地球低频重力场的确定;适当增加星间距离有助于提高地球低频重力场的信噪比,但星间距离设计太大将导致测量噪声急剧增加以及对卫星轨道和姿态测量精度的要求提高,不利于地球高频重力场测量。因此,星间距离的优化设计是建立将来高精度和高空间分辨率地球重力场模型的关键因素。

GRACE 采用 K 波段微波测距仪感测星间距离,由于卫星轨道高度(400~500km)的限制,GRACE 仅对地球中长波重力场信号较敏感,而对中短波信号趋于滤波。因此,GRACE 将星间距离设计为 220 ± 50 km 有利于提高地球中低频重力场的反演精度。由于非保守力补偿系统和激光干涉星间测距仪的成功应用,CSGM 的轨道高度得以有效降低(300~400km),因此 CSGM 将致力于反演地球中短波重力场。我们首次于 2010 年基于动力学原理的半解析法开展了将来 CSGM 星间距离的论证研究^[15]。在 300 阶处,当星间距离设计为 50km 时,累计大地水准面精度为 3.993×10^{-1} m;当星间距离分别设计为 110km 和 220km 时,累计大地水准面的精度分别降低了 1.259 倍和 1.395 倍,卫星关键载荷精度指标的匹配关系见文献[15]。综上所述,我国将来 CSGM 重力卫星的星间距离设计为 100 ± 50 km 较优。

1.4 仿真模拟研究的先期启动

随着科学技术的日新月异,特别是计算机、微

电子学和各种运动模拟器的迅速发展,使卫星系统仿真日趋完善。建议我国将仿真技术应用于 CSGM 重力卫星的研制和运行的全过程。从方案论证、系统设计、部件研制、产品检验、空中使用、故障分析等各个阶段,都进行不同类型的仿真实验,从而达到提高研制质量,缩短研制周期和降低研究成本的目的。

(1)必要性。在接近真空环境条件下以整星方式演示各分系统的技术性能和任务功能的有效性,能够在 CSGM 重力卫星发射之前对整体系统设计及性能上的缺陷进行检查和修改,有效降低研制过程中整星的风险性,确保在飞行前各分系统与整体的相容性以及系统参数和结构的最优化,提供有效手段进行故障分析以及研究故障对策。

(2)可行性。现代计算机技术、高水平的仿真软件(如 MATLAB 等)以及各种高精度和高可靠性的环境模拟设备可提供充足的物质条件,同时我国已具有一支从事卫星硬件研制和仿真实验模拟的科研团队。

1.5 重力反演方法的优化改进

卫星重力反演是指通过分析卫星观测数据(轨道位置 \mathbf{r} 及轨道速度 $\dot{\mathbf{r}}$ 、星间距离 ρ_{12} 、星间速度 $\dot{\rho}_{12}$ 及星间加速度 $\ddot{\rho}_{12}$ 、非保守力 \mathbf{f} 、卫星姿态 $(q_{1,2,3}, q_4)$ 、卫星重力梯度 \mathbf{V}_{ij} 等)和地球重力场模型中引力位系数 (C_{lm}, S_{lm}) 的关系,建立并求解卫星运动观测方程,进而确定地球引力位系数,最终目的是反演高精度和高空间分辨率的地球重力场。在利用卫星重力测量数据反演地球重力场的众多方法中,按地球引力位系数解算方式的差异可分为空域法和时域法。

空域法^[21-24]的优点是因网格点数固定从而方程维数一定,且可以利用 FFT 方法进行快速批量处理,因此极大降低了计算量;缺点是在进行网格化处理中作了近似计算,且不能对色噪声进行处理。由于空域法做了许多人为性的假设,存在许多潜在的弊端且随着近年来计算机技术的飞速发展及各种快速算法的广泛应用,计算量的大小不再是制约地球重力场反演精度的重要因素,时域法的优点正逐渐体现于地球重力场反演之中。

时域法的优点是直接对卫星观测数据进行处理,不需作任何近似,求解精度较高且能有效处理色噪声;缺点是随着卫星观测数据的增多,观测方程数量剧增,极大地增加了计算量。时域法主要包括 4 种类型:(1)卫星轨道摄动法,主要包括经

典 Kaula 线性摄动法^[25-26]和轨道非线性摄动法^[27]。经典 Kaula 线性摄动法仅在初始值和参考平均值附近有效,存在由临界轨道倾角和随机共振引起的奇异值问题。轨道非线性摄动法成功解决了经典 Kaula 线性摄动法存在的问题,不受由临界轨道倾角和随机共振引起的奇异值影响,在整个轨道弧长范围内均有效,而且模型误差随积分弧段的生长而增大。(2)动力学法^[28-32]的优点是不依赖于任何先验的地球重力场模型,理论框架严密,各种地球重力场参数求解精度较高;缺点是整体解算过程较复杂,需要高性能的并行计算机支持,而且随着轨道弧长增加,解算模型误差将增大。(3)能量守恒法^[33-41]的优点是避免了数值微分、数值积分等计算,直接利用地球扰动位和引力位系数的线性关系建立卫星运动观测方程,而且观测方程物理含义明确,易于地球重力场的敏感度分析,通常采用 PC 计算机可完成高阶地球重力场的快速求解;缺点是对卫星速度的测量精度要求较高。(4)卫星加速度法^[42-48]的优点是观测方程形式简单、在保证求解精度的前提下计算量较小;缺点是采用的数值微分算法在一定程度上损失了地球低频重力场的精度。

自人类于 1957 年成功发射第一颗人造卫星以来,国际众多科研机构通过多种卫星观测技术的联合已获得了全球、规则、密集和高精度的地球重力场信息,因此地球重力场反演方法的优劣是决定我们对“数字地球”认识水平的关键所在。至今为止,国际众多科研机构基于车载、船载、机载和星载重力观测数据利用空域法和时域法已建立了不同精度和阶次的全球重力场模型,但由于目前地球重力场反演方法自身的不足和局限性,无论是各种方法单独还是联合均无法满足下一代国际卫星重力测量计划中精确和快速反演全频段地球重力场的需求,而且仅仅依靠各种方法的自我完善也无法满足本世纪相关学科对地球重力场精度进一步提高的迫切要求,因此寻求新型、高精度、高效率 and 全频段的地球重力场反演方法是本世纪国际大地测量和地球物理等领域正面临的挑战和亟待解决的难题之一。此科学问题的研究和解决有利于为我国将来 CSGM 地球卫星重力测量计划(如图 2 所示)、月球卫星重力探测计划^[49-51]、太阳系火星^[52-54]和金星^[55]等其他行星重力探测计划中高精度和高阶次全球重力场模型的有效和快速确定提供理论基础和计算保证。目前国内外大地测量和地球物理学界紧跟国际卫星重力测量的热点和动态,正积极投身于利用卫星

重力测量技术建立下一代高精度和高阶次全球重力场模型的研究当中。

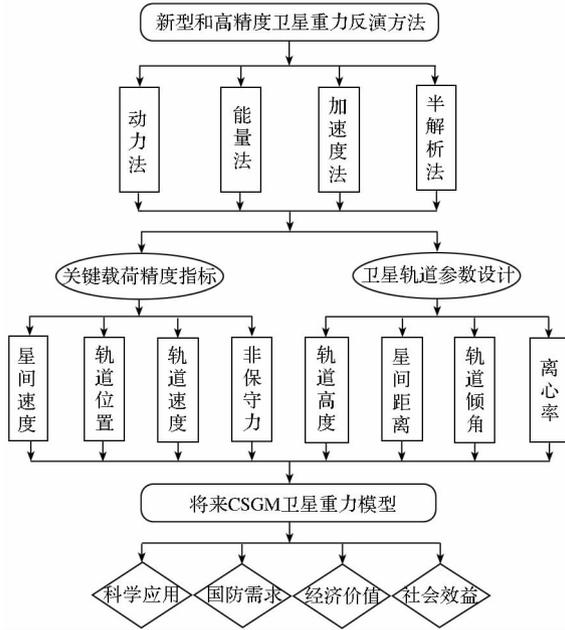


图2 我国将来 CSGM 卫星重力反演流程图
Fig. 2 Flowchart of the future CSGM satellite gravity recovery in China

2 结语

我国将来 CSGM 卫星重力测量计划是国家需求,同时具有重要的科学意义和应用前景。预期科学目标如下:基于 SST-HL/LL 跟踪观测模式、采用激光干涉星间测距仪(星间测速精度 $10^{-9} \sim 10^{-7}$ m/s)和非保守力补偿系统(非保守力测量精度 $10^{-13} \sim 10^{-11}$ m/s²)等新技术,以及利用优选的卫星轨道高度(300~400km)和星间距离(100±50km)建立300阶次(空间分辨率66km)的CSGM全球重力场模型。在300阶处,预期累计大地水准面精度为1~5cm,累计重力异常精度达到1~5mGal,力争满足本世纪相关学科和国防建设对地球重力场精度进一步提高的迫切需求。

致谢:感谢评审专家及华中科技大学罗俊院士对本文的帮助。感谢美国 NASA、德国 GFZ、欧盟 ESA 等提供了地球重力卫星 CHAMP、GRACE 和 GOCE 的相关信息。

参考文献 (References)

[1] 郑伟,许厚泽,钟敏,等. 基于残余星间速度法精确和快速反演下一代 GRACE Follow-On 地球重力场[J]. 地球物理学报, 2014, 57(1): 31-41.
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, et al. Precise and rapid recovery of Earth's gravity field from next-generation

GRACE Follow-On mission using the residual intersatellite range-rate method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(1): 31-41. (in Chinese)

[2] Loomis B D, Nerem R S, Luthcke S B. Simulation study of a follow-on gravity mission to GRACE[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(5): 319-335.

[3] Cesare S, Sechi G. Next Generation Gravity Mission [C]//D'Errico M. (ed.), Distributed Space Missions for Earth System Monitoring, Space Technology Library 31, 2013, 575-598.

[4] Sneeuw N, Sharifi M, Keller M. Gravity recovery from formation flight missions [C]//XU Peiliang, LIU Jingnan, Dermanis, Athanasios (Eds.), VI Hotine-Marussi Symposium on Theoretical and Computational Geodesy, vol. 132. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008:29-34.

[5] Panet I, Flury J, Biancale R, et al. Earth System Mass Transport Mission (e. motion): A Concept for Future Earth Gravity Field Measurements from Space [J]. Survey in Geophysics, 2013, 34: 141-163.

[6] Elsaka B, Ilk K H, Kusche J. Simulated Multiple Formation Flights for Future Gravity Field recovery [C]//Poster in European Geosciences Union (EGU), General Assembly, 19-24/04/2009 Vienna, Austria, 2009.

[7] Wiese D N, Folkner W M, Nerem R S, Alternative mission architectures for a gravity recovery satellite mission[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83: 569-581.

[8] 郑伟,许厚泽,钟敏,等. 基于下一代四星转轮式编队系统精确和快速反演 FSCF 地球重力场[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 2928-2935.
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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(9): 2928-2935. (in Chinese)

[9] Bender P L, Wiese D N, Nerem R S. A possible dual-GRACE mission with 90 degree and 63 degree inclination orbits [C]//Proceedings of the third international symposium on formation flying, missions and technologies. ESA/ESTEC, Noordwijk, 2008: 1-6.

[10] Zheng W, Shao C G, 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: 555-561.

[11] 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.
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. (in Chinese)

[12] 郑伟,许厚泽,钟敏,等. GRACE 卫星实测数据有效处理和地球重力场快速解算[J]. 地球物理学报, 2009, 52(8): 1966-1975.
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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(8): 1966-1975. (in Chinese)

[13] 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.
- [14] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 利用解析法有效和快速估计将来 GRACE Follow-On 地球重力场的精度[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 796–806.
ZHENG Wei, XU Houze, 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(4): 796–806. (in Chinese)
- [15] 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 Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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. (in Chinese)
- [16] 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 Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 卫星跟踪卫星测量模式中星载加速度计高低灵敏轴分辨率指标优化设计论证[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2712–2720.
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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(11): 2712–2720. (in Chinese)
- [19] 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 Wei, XU Houze, ZHONG Min, et al. Optimal design of orbital altitude in satellite-to-satellite tracking model[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(2): 100–105. (in Chinese)
- [20] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. GRACE 星体和 SuperSTAR 加速度计的质心调整精度对地球重力场精度的影响[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1465–1473.
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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(6): 1465–1473. (in Chinese)
- [21] Sneeuw N. A semi-analytical approach to gravity field analysis from satellite observations[D]. Technical University of Munich, 2000, 1–112.
- [22] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 基于半解析法有效和快速估计 GRACE 全球重力场的精度[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1704–1710.
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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): 1704–1710. (in Chinese)
- [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: 413–423.
- [24] Migliaccio F, Reguzzoni M, Sanso F. Space-wise approach to satellite gravity field determination in the presence of colored noise[J]. Journal of Geodesy, 2004, 78(4): 304–313.
- [25] Hwang C. Gravity recovery using COSMIC GPS data: application of orbital perturbation theory[J]. Journal of Geodesy, 2001, 75(2): 117–136.
- [26] Cheng M K. Gravitational perturbation theory for intersatellite tracking[J]. Journal of Geodesy, 2002, 76(3): 169–185.
- [27] 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.
- [28] Reigber Ch, Schmidt R, Flechtner F. An earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S[J]. Journal of Geodynamics, 2005, 39(1): 1–10.
- [29] Tapley B, Ries J, Bettadpur S, et al. GGM02—an improved Earth gravity field model from GRACE[J]. Journal of Geodesy, 2005, 79(8): 467–478.
- [30] 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 Xuhua, WU Bin, XU Houze, 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. (in Chinese)
- [31] 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, 1–120.
ZHANG Xingfu. The Earth's field model recovery on the basis of satellite-to-satellite tracking missions[D]. Shanghai: Tongji University, 2007, 1–120. (in Chinese)
- [32] 刘红卫, 王兆魁, 张育林. 内编队地球重力场测量性能数值分析[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(4): 14–19.
LIU Hongwei, WANG Zhaokui, ZHANG Yulin. Numerical analysis for earth gravity field measurement performance by inner-formation flying system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(4): 14–19. (in Chinese)
- [33] Han S C, Jekeli C, Shum C K. Efficient gravity field recovery using in situ disturbing potential observables from CHAMP[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29: 36–1–36–4.
- [34] Visser P N A M, Sneeuw N, Gerlach C. Energy integral method for gravity field determination from satellite orbit coordinates[J]. Journal of Geodesy, 2003, 77(3): 207–216.
- [35] 徐天河, 杨元喜. 利用 CHAMP 卫星星历及加速度计数据推求地球重力场模型[J]. 测绘学报, 2004, 33(2): 95–99.
XU Tianhe, YANG Yuanxi. Recovering the gravitational potential model from the ephemerides and accelerometer of CHAMP[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(2): 95–99. (in Chinese)

- [36] Zheng W, Lu X L, Xu H Z, et al. Simulation of earth's gravitational field recovery from GRACE using the energy balance approach[J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(7): 596-601.
- [37] 郑伟, 邵成刚, 罗俊, 等. 基于卫-卫跟踪观测技术利用能量守恒法恢复地球重力场的数值模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(3): 712-717.
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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): 712-717. (in Chinese)
- [38] 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.
WANG Zhengtao, LI Jiancheng, JIANG Weiping. Determination of earth gravity field model WHU-GM-05 using GRACE gravity data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(5): 1364-1371. (in Chinese)
- [39] Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Physical explanation of influence of twin and three satellites formation mode on the accuracy of earth's gravitational field[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(2): 029101-1-029101-4.
- [40] 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.
- [41] 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 Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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. (in Chinese)
- [42] Ditmar P, Kuznetsov V, Van Eck Van Der Sluijs A A, et al. DEOS CHAMP-01C 70: A model of the earth's gravity field computed from accelerations of the CHAMP satellite[J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 79(10): 586-601.
- [43] Rummel R. Determination of short-wavelength components of the gravity field from satellite-to-satellite tracking or satellite gradiometry an attempt to an identification of problem areas[J]. *Manuscripta Geodetica*, 1979, 4: 107-148.
- [44] 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 Yunzhong, XU Houze, WU Bin. 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. (in Chinese)
- [45] 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 Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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. (in Chinese)
- [46] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 插值公式、相关系数和采样间隔对 GRACE Follow-On 星间加速度精度的影响[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 822-832.
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, et al. Impacts of interpolation formula, correlation coefficient and sampling interval on the accuracy of GRACE Follow-On intersatellite range-acceleration[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 822-832. (in Chinese)
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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 Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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. (in Chinese)
- [50] 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 Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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. (in Chinese)
- [51] 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 Wei, XU Houze, ZHONG Min, et al. Progress in international lunar exploration programs[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(6): 2296-2307. (in Chinese)
- [52] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 国际火星探测计划进展和中国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 Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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. (in Chinese)
- [53] 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 Wei, XU Houze, ZHONG Min, 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. (in Chinese)
- [54] 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.
- [55] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 国际金星探测计划进展和我国下一代金星重力梯度计划实施[J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(1): 8-14.
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, et al. Progress in international Venus exploration programs and implement of next-generation venus gravity gradiometry mission in china[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(1): 8-14. (in Chinese)