引文格式:肖云,李岩,周泽兵,等.中国重力卫星进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(3):413-424.DOI:10.13203/j.whugis20240466

Citation:XIAO Yun,LI Yan,ZHOU Zebing,et al.Progress on the Chinese Gravimetry Satellite Missions[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(3):413-424.DOI:10.13203/j.whugis20240466

中国重力卫星进展

肖 云[1] 李 岩[2] 周泽兵[3] 潘宗鹏[1] 黄令勇[4] 伍保峰[2]
周 浩[3] 王丽兵[5] 黄志勇[4] 徐保朋[1]

1 西安测绘研究所,陕西 西安,710054
2 航天东方红卫星有限公司,北京,100094
3 华中科技大学国家精密重力测量科学中心,湖北 武汉,430074
4 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054
5 中科星图空间技术有限公司,陕西 西安,710199

摘 要:全球重力场蕴涵了地球形状、物质分布及其变化的丰富时空特征信息,是反演地球内部、表面、外部物质结构及演化的基础性数据,支撑着地球物理、大气、水文、海洋、大地测量、地震等领域的研究工作,应用范围广,可挖掘潜力大。作为全球重力场测量有效手段之一,卫星重力测量技术在21世纪得到长足发展,美国联合德国等欧盟国家先后发展了挑战性小卫星有效载荷卫星、重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment,GRACE)卫星、地球重力场和海洋环流探索器卫星、GRACE继任者卫星等专门重力卫星计划。中国持续跟踪国际该领域的先进技术,逐步突破了卫星重力测量系统的各项关键技术,发射了技术完全自主的低低跟踪重力测量卫星系统,形成独立获取高精度重力场信息并构建全球重力场模型能力。另外,中国发展空间引力波探测计划,2019年底发射了"天琴一号",检验了惯性测量基准能力;计划2027年前后发射"天琴二号",检验激光星间测距技术,并可形成全球重力场精密测量能力。再者,中国推进卫星重力梯度测量技术发展,研制了重力梯度仪、无拖曳控制装置等,通过了地面验证试验,为重力梯度卫星研制奠定了技术基础。概要介绍了中国重力卫星技术的发展现状,分析了各卫星主要技术特征和相互之间的联系与区别,指出了卫星重力测量技术存在的问题及发展趋势,并展望后续主要发展思路,以期进一步推进中国重力测量卫星技术向前发展,更好地满足海洋、水文、地震等多领域对重力测量卫星的需求。

关键词:重力;重力卫星;卫星重力测量;全球重力场模型;星间测距;加速度计

中图分类号:P223 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-02-15

DOI:10.13203/j.whugis20240466 **文章编号**:1671-8860(2026)03-0413-12

Progress on the Chinese Gravimetry Satellite Missions

XIAO Yun[1] *LI Yan*[2] *ZHOU Zebing*[3] *PAN Zongpeng*[1] *HUANG Lingyong*[4] *WU Baofeng*[2]
ZHOU Hao[3] *WANG Libing*[5] *HUANG Zhiyong*[4] *XU Baopeng*[1]

1 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China
2 DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China
3 National Precision Gravity Measurement Science Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
4 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China
5 Zhongke Xingtu Space Information Technology Co., Ltd., Xi'an 710199, China

Abstract: The Earth's gravity data encompass a lot of information, including characteristics of the Earth's shape, mass distribution, and its varying signals. As fundamental data, it is utilized in research related to geophysics, meteorology, hydrology, oceanology, geodesy, and more, demonstrating significant potential for further applications. As an effective method of observing the global gravity field, the gravity satellite missions have been developed well in this century. Some special gravity satellites such as challenging mini-satellite payload, gravity recovery and climate experiment (GRACE), gravity field and steady-state ocean

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3900604);国家自然科学基金(42404008)。

第一作者:肖云,博士,正高级工程师,主要研究方向为大地测量学和卫星重力学。xiaoyungg@qq.com

circulation explorer (GOCE), and GRACE follow-on have been successfully injected into orbit, belonging to the USA, Germany, and the European Union. In China, the gravimetry satellite technique has been researched continually for the last 20 years, and the key techniques have been successfully broken through. The Chinese gravity satellite has been launched successfully and is observing the Earth's gravity field. Besides this, a gravity-wave observatory has been developed. As a first step, the Tianqin-1 satellite was developed in 2019, in which the accelerometer and drag-free device were tested in orbit. In the second step, the Tianqin-2 satellite is planned to launch around 2027, which will test the laser inter-satellite ranging system and be used to precisely measure the Earth's gravity. Additionally, the satellite gravity gradiometer mission is being pursued. Some key engineering models, such as the gravity gradiometer and drag-free system, have been manufactured and tested, laying the foundation for the gravity gradiometer mission. In this paper, the status of the Chinese gravity satellite is briefly introduced, followed by an analysis of the main characteristics of each gravimetry satellite and the correlations and distinctions between them. Furthermore, suggestions are made for the direction and steps to develop the satellite gravimetry mission, in order to advance satellite gravimetry techniques and better meet the needs of oceanology, hydrology, seismology, and others.

Key words: gravity; gravity satellite; satellite gravimetry; the Earth's gravity model; inter-satellite ranging; accelerometer

地球重力场知识是地球科学,特别是大地测量、固体地球物理学和海洋学巨大进展中不可缺少的重要基础信息源[1-2]。地球重力场信息全空间分布各异,且随时间规律性变化,蕴涵着丰富的时空特征。它深刻反映了地球形状、地球圈层物质密度分布及其变化,甚至地外天体质量及形体特征等信息,支撑着地球物理、大气、水文、海洋、大地测量、地震、国防等领域研究和智慧水利、时空基准等大型工程应用,且拓展应用潜力巨大。卫星重力测量技术可全天候、快速、高精度测量全球重力场信息,是高效获取全球重力场数据的手段,大大改善人们对地球重力场的了解[3],它和卫星地形测量、卫星磁力测量、卫星测高、卫星海洋测量等一并构成低轨对地观测卫星航天测绘体系[4],持续提供基础性地理信息数据,服务国家"双碳"战略等重大计划。

目前卫星重力探测技术主要有地面跟踪观测卫星轨道摄动、卫星测高、卫星跟踪卫星和卫星重力梯度测量4种模式[2],前两种模式技术较为成熟,后两者在21世纪前20年发展迅速。高轨卫星跟踪低轨卫星测量重力场概念由美国科学家贝克于1960年提出,经美国航空航天局20世纪70年代中期陆续组织的多次在轨技术试验验证,例如1974年5月利用卫星ATS-6跟踪阿波罗-联盟号飞船,1975年3月跟踪NMBUS-5气象卫星、GEO-3卫星等,验证了技术可行。德国于2000-07-15发射了挑战性小卫星有效载荷(challenging minisatellite payload, CHAMP)卫星,采用高轨卫星跟踪低轨卫星模式对全球重力场实施测量,以前所未有的精度改善了地球重力场低阶模型系数,探测重力场空间分辨率400 km、精度10 cm[5],代表着第一代卫星重力测量技术走向成熟。美国科学家沃尔夫在1969年提出低轨卫星跟踪低轨卫星技术,美德合作2002-03-17发射重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment,GRACE)卫星[6],采用了高轨卫星跟踪低轨卫星和低轨卫星跟踪低轨卫星两种测量模式对全球重力场实施测量,极大改善了前120阶次全球重力场模型系数质量[7-10],反演静态重力场模型阶数达到160阶,大地水准面精度10 cm,且提供了时变重力场信息,代表第二代卫星重力测量技术走向成熟。20世纪70年代提出卫星重力梯度测量概念,欧洲空间局提出ARISTOTELES(application and research involving space techniques observing the earth field from low earth orbit satellite)计划,美国航空航天局提出超导重力梯度测量任务,美国和意大利两国合作提出系留卫星系统等。欧洲空间局于2009-03-17发射了地球重力场和海洋环流探索器(gravity field and steady-state ocean circulation explorer,GOCE)卫星,采用高轨卫星跟踪低轨卫星模式混合空间重力梯度测量模式对全球重力梯度进行测量[11-14],较大改善了30~200阶重力场模型系数质量,标志着第三代卫星重力测量技术走向成熟。

中国持续跟踪国际上该领域先进技术,21世纪初开始关键技术攻关,论证系统技术指标[15-17],

历时20多年逐步突破了第一代和第二代卫星重力平台、星间测距仪等载荷、数据处理等关键技术[18-27],研制成功了技术完全自主的低低跟踪重力测量卫星系统[28-29],形成独立获取高精度重力场信息和构建重力场模型的能力,在加速度计在轨标定和重力场反演等技术方面取得重要进展[30-34],标志着中国掌握了第一代和第二代卫星重力测量技术。此外,中国发展空间引力波探测计划,计划之一的"天琴计划"设计了"0-1-2-3"发展路线图并持续推进[35]。该计划第一步于2019年发射了"天琴一号",检验了空间高精度惯性基准关键技术;第二步计划2027年前后发射"天琴二号",验证星间激光干涉测量关键技术,并服务于高精度全球重力场的观测与应用,有望显著提升中国获取重力场信息的能力[36-40]。中国也持续研究卫星重力梯度测量技术,研制了重力梯度仪、无拖曳控制系统[41-43]、mK级精度温度控制[44]、高稳定结构[45]等样机,通过了地面验证试验,突破了重力梯度数据处理、姿态引起梯度扰动量重构、梯度仪标定等数据处理关键技术[46-48],为重力梯度卫星立项奠定了技术基础。中国在应用重力卫星反演流域水储量变化研究[46-47]、地下水储量演化[48-50]、海洋地形反演[51]、地震监测[52]、冰川监测研究[53]等方面取得了重要研究成果,支持相关领域的科学研究发展,并积极发展论证下一代重力场探测卫星[54-59]。

尽管卫星重力测量技术得到了快速发展,其数据产品得到了广泛应用,但是尚存在测量数据覆盖不足、数据产品延时较大、测量精度有待提高等问题,且产品分辨率和精度距离全面满足陆地水资源、海洋、地震等研究需求尚有不小的差距。因此,研究卫星重力测量技术方面存在的问题、发展趋势、发展重点很有价值。基于此,本文概要介绍了中国重力卫星技术发展现状,给出了各卫星计划主要技术特征、能力和存在问题,分析了卫星重力测量技术发展趋势,展望后续主要发展思路,以期进一步推进中国重力测量卫星技术向前发展,更好地满足海洋、水文、地震、国防等多领域对重力测量卫星的需求。

1　中国低低跟踪重力测量卫星

21世纪初,中国启动了低低跟踪重力测量卫星系统关键技术攻关,历经20余年逐步突破系统总体设计技术、超静、超稳、超精卫星平台(简称三超平台)设计与研制技术、微米级星间测距载荷研制技术、高精度静电悬浮加速度计研制技术、分体式小型星敏感器研制技术、双模全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)设计与研制技术、高精度卫星重力数据处理技术等,研制了低低跟踪重力测量卫星系统,并成功发射[28]。独立处理该卫星数据,反演得到60阶全球时变重力场系列模型和120阶静态地球重力场模型。

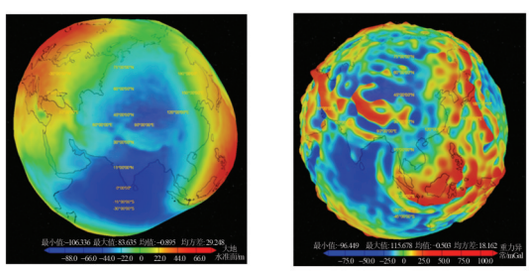
低低跟踪重力测量卫星系统原理抽象且设计复杂,卫星在轨测量数据与地球重力场反演参数之间关系为非线性泛函关系,系统涉及了较多关键技术、繁杂的误差项,且多项误差之间相互耦合,构成了一个星地大闭环嵌套双星小闭环、单星内闭环的复杂系统。国产低低跟踪重力测量卫星系统总体设计采用了"四点三线"抽象模型和全链路仿真系统,解耦了系统复杂嵌套关系,解决了关键技术分解和指标体系论证难题,设计出由三超平台、微米级星间测距等载荷、高精度数据处理算法等构成的卫星系统。

开创性地研制了三超平台,实现超静、超稳、超精功能,在轨测试各项指标满足设计要求。三超平台的超静特征主要表现为卫星零形变结构保持、极端外热流速变环境下的几十分之一稳定度的温度控制、磁控方式加冷气控方式融合精细姿态控制等,构建了极为稳定的测量环境平台;超稳特征表现为双星精确指向保持、姿态变率平缓保持、卫星质心长期稳定保持等,形成了地面支持下稳定的双星系统空间位置与姿态保持闭环回路;超精特征表现为微米级星间测距、微纳水平级静电悬浮加速度计测量、北斗和全球定位系统(global positioning system,GPS)双模精密定轨、分体式微小星敏感器姿态测量、质心精密测量与控制等,实现了双星相对位置微米级测量和微纳级非保守力测量。三超卫星构成了在轨"超级重力敏感体",模糊了卫星平台和载荷界限,平台与载荷一并构成了引力敏感体,即引力检验质量,时刻感知引力时空变化。

研制了微米级星间测距系统,代表目前中国在轨工作星间测距精度最高水平,在轨测试指标优于10 $\mu m/Hz^{1/2}$@0.1 Hz。采用了星间测距系统与GNSS接收机一体设计理念,保证了相对测距和绝对定位的高精度时间同步,实现了双向测距精密组合,完成星间距离高精度测量。研制了高精度静电悬浮加速度计,与三超平台一体实现在轨高精度非保守力测量,在轨测试指标最好水平

达到了5×10^{-12} m/s^2/Hz$^{1/2}$水平[35,38,40]，与国外同类型加速度计研制历程30多年相比，节省了约15年研制时间，赶超国际先进水平。研制了专门分体式小型星敏感器，与稳定结构组成了姿态测量系统，解决了与轨道耦合的周期误差大问题，在轨测试相对指向稳定度均方根误差小于3″。采用了分体式设计方式，实现了小型化、高稳定、低功率目标，较国外CHAMP卫星、GRACE卫星、GOCE卫星测量姿态确定精度更高。研制了北斗和GPS双模接收机，与星间测距系统一体设计，实现两类数据高精度时间同步，双模数据用于卫星定轨，测试精度优于3 cm。

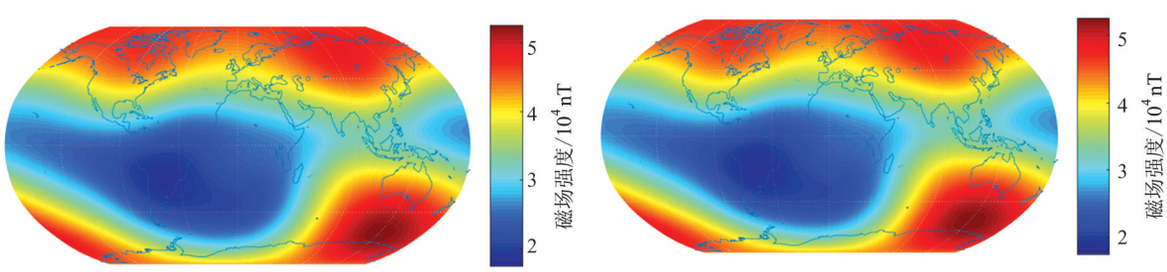
研制了中国重力卫星高精度数据处理系统，用于处理卫星下传的星间测距系统数据、加速度计数据、星敏感器数据、北斗/GPS双模接收机数据等，反演得到120阶静态地球重力场模型和60阶时变重力场模型，实现了地球重力场信息空间三维可视化，反演时变重力场模型和磁场格网数据，支持了水文、空间电磁等领域科学应用。突破了基线法[60]、改进短弧法[61]、改进Mascon方法[9]、动力学方法[24]重力场反演技术，仅采用中国重力卫星数据反演得到连续全球重力场时变模型和全球重力场静态模型(图1)，分析加速度计数据获得空间非保守力数值模型，处理星载磁强计数据产出了全球磁场格网数据模型(图2)。由图1可见，中国重力卫星数据较好地反演出静态全球重力场模型，较好地描述了地球大地水准面高和重力异常分布特征。由图2可见，A星测量的地球总磁场与B星测量的地球总磁场一致，测量的总磁场强度为20 000～50 000 nT。



(a) 静态场大地水准面(120阶)　(b) 静态场重力异常(120阶)

图1　中国重力卫星反演地球重力场模型

Fig. 1　The Earth's Gravity Model Recovered by Chinese Gravimetry Satellite



(a) A星测量的全球磁力场格网模型　(b) B星测量的全球磁力场格网模型

图2　中国重力卫星磁场测量结果(2024-04)

Fig. 2　Geomagnetic Field Map from Chinese Gravimetry Satellite Data (April, 2024)

2　“天琴一号”卫星

“天琴一号”卫星是中国空间引力波探测计划之一“天琴计划”的第一步。该卫星于2019-12-20成功发射，搭载了惯性传感器、无拖曳控制系统、激光干涉测量系统等关键载荷，开展了高精度惯性传感技术、微牛级连续可调微推进技术、无拖曳控制技术等在轨试验，达到既定的试验技术指标，为推进中国自主重力卫星发展提供了重要技术支撑[35,38]。同时，卫星搭载的GNSS定位系统、惯性传感器、星敏感器等载荷，获取了卫星轨道、非保守力、姿态等观测信息，为全球重力场的全流程技术验证提供了支撑。

“天琴一号”卫星轨道设计为近圆近极轨道，轨道高度平均约629 km，倾角为97.85°，离心率为0.001 3，获取的观测数据几乎覆盖全球。天琴卫星团队处理了多级数据，包含GNSS数据、加速度计数据、星敏感器数据等原始观测数据L0、原始载荷观测数据集L1a、标准载荷观测数据集L1b和地球重力场模型L2，获取了卫星精密轨道、非保守力、卫星姿态等科学数据产品，处理星载GNSS数据和加速度计数据，产出了15阶次的地球重力场模型TQ01s-20200807，利用模型计算了全球格网大地水准面高产品[39]，如图3所示。

3　“天琴二号”卫星

中国空间引力波探测计划之一“天琴计划”在轨试验的第二步“天琴二号”[62]目前处于研制

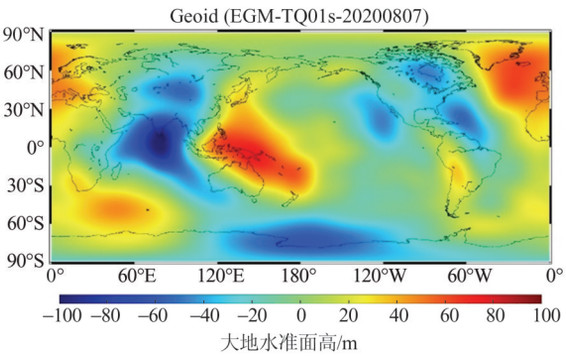


图 3　“天琴一号”反演的全球大地水准面高模型[39]

Fig. 3　Global Geoid Height Recovered by Tianqin-1 Satellite[39]

阶段。“天琴二号”由两颗卫星组成,设计轨道高度 500 km 左右,轨道倾角接近 90°,卫星试验内容包括两个方面,一方面开展星间高精度激光干涉测量技术试验验证,另一方面实现高精度地球重力场测量与应用,服务于大地测量、地球物理、国家安全等领域。

“天琴二号”卫星采用低低跟踪卫星重力测量技术,与国产低低跟踪重力测量卫星的区别是搭载高精度激光测距系统替代微波测距系统,搭载了精密测定轨系统、星敏感器、加速度计等载荷,连续获取星间距离及其变率、卫星轨道、姿态、非保守力等观测数据,经数据处理反演获得高精度时变和静态重力场模型。通过系统先期闭环仿真评估,卫星系统有望实现更高精度和分辨率的全球重力场测量[59]。

卫星研制团队围绕卫星核心载荷的参数设计、大气海洋去混频产品的精度指标需求分析等关键问题开展了系统性研究。结合卫星的科学目标,对比分析载荷观测带宽对于重力场反演精度的影响效应,发现可以将加速度计的观测带宽从 0.001～0.1 Hz 放宽至 0.004～0.1 Hz,而星间测距系统的观测带宽可以从 0.01～1 Hz 拓展至 0.1～1 Hz[59]。针对加速度计中存在的谐波误差,研究发现在同类型、同大小的谐波误差条件下,沿轨道法向加速度测量误差对重力场反演影响较小,而沿径向和沿卫星轨迹方向误差影响显著。针对国内外密切关注的大气海洋去混频产品的需求问题,卫星团队设定 26 种不同大气海洋去混频模型误差的分析场景,通过闭合模拟开展了系统性分析,结果表明,通过提升大气海洋去混频模型精度,重力场模型的反演精度预期提升 26%～65%[61,63-64]。

4　重力梯度卫星

卫星重力梯度测量基本观测量是引力梯度张量,即引力位的二阶导数,依据引力位梯度与位系数函数关系式反演全球高精度重力场模型。重力梯度卫星区别于低低跟踪型重力测量卫星,前者的引力敏感器为加速度计质量块,假设无拖曳控制系统完全补偿了非保守力,加速度计质量块沿大地线运行;而后者引力敏感器是重力卫星本身。重力梯度卫星相较于低低跟踪重力测量卫星,可理解为将两颗低轨重力卫星敏感器构成的超长可变臂缩短为一对敏感器的超短固定臂,且将沿轨道面近似迹向(双星视线方向)单维测量拓展为沿轨道迹向、径向、法向三维测量,再者将两个独立卫星敏感质量体等效封装于单一卫星内成为两个加速度计质量块,构建了引力梯度测量装置。显然,重力梯度卫星的优势在于两个质量敏感器封装于同一卫星,差分测量模式极大抵消了无拖曳控制之后的残余非保守力;其次是实现了 3 个维度重力梯度测量,获得更细致重力信号结构数据;再就是在于无拖曳控制补偿大部分非保守力,降低了过大测量量程对于加速度计分辨率限制条件,提升梯度仪测量引力梯度能力。

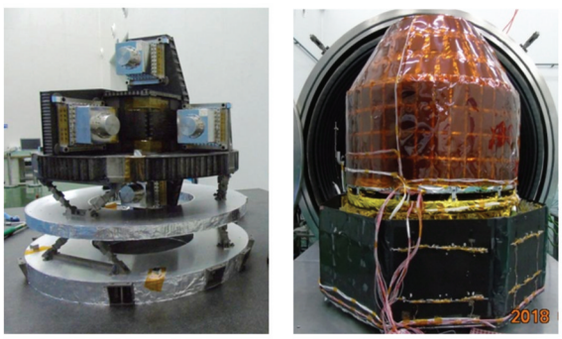
重力梯度卫星梯度测量模式相对而言也存在一些劣势,一是超短固定臂长设计使得敏感器仅对引力信号中 20～30 阶以上信号部分敏感,难以测量到长波重力场信息,长波重力场部分采用高轨卫星跟踪低轨卫星模式补充测量;二是分辨率较大的引力梯度仪对于卫星环境变化同样十分敏感,环境变化梯度均被混淆到梯度测量数据中,造成了信号分离困难;三是梯度测量需要分离姿态项引起的梯度变化,要求姿态项测量准确度与梯度仪测量精度匹配,精密姿态测量技术难度较大。还有一个不可避免的卫星工程实践问题是重力卫星地面轨迹在南北极存在一定范围的空白区,测量数据不能完全覆盖地球,影响全球重力场反演精度。不论重力梯度测量技术各项优缺点,重力梯度卫星以其独特测量模式实施空间引力梯度信号感知,对于引力场中高频段信号测量具有较为突出的优势,与低低跟踪重力测量卫星配合形成卫星重力测量体系。

中国持续推进重力梯度卫星关键技术攻关工作,先后攻克重力梯度卫星总体与地面数据处理、梯度仪设计与研制、无拖曳控制、超稳定结构

设计研制、6台高精度静电悬浮加速度计与三轴正交梯度仪超稳定基座的精密集成、梯度仪在轨标定等技术,研制了星地全链路仿真系统、单轴梯度仪、无拖曳控制系统、超稳定结构等[41-45],无拖曳系统和高精度加速度计通过了在轨试验验证,利用仿真数据、国外梯度卫星GOCE数据试验反演了200阶全球重力场模型。

研制了极低热膨胀系数的碳/碳蜂窝夹层结构、超稳定基座、均衡连接结构等样机,完成了各类样机地面力学验证试验[41-45],验证了卫星平台和载荷关键技术可行性。研制的用于无拖曳控制的微型冷气推力器实现推力连续可调,保证梯度卫星克服大气阻力等非保守力作用,始终沿空间大地线运行,高精度测量空间引力梯度。研制的精密温度控制仪,采用整星多级高精度热控方法、四线制铂电阻高精度测量技术、比例-积分-微分算法计算控制每路加热回路功率方法等,实现了mK级的高精度温度控制,通过了真空热平衡试验验证。研制的单轴重力梯度仪采用了碳纤维材料超稳定结构和超高精度加速度计集成技术,构成了单轴梯度仪,通过了地面试验验证。核心载荷超高精度静电悬浮加速度计设在地面通过了高压悬浮试验、扭丝悬挂试验、落塔试验等测试,搭载于"天琴一号"通过了在轨试验,性能得到完整测试[38,40]。

在地面数据处理方面,重点突破了卫星姿态测量数据重构技术,顾及多星敏感器安装偏差融合改善姿态确定精度,估计梯度仪加速度计位姿偏差方法保证梯度测量系统一致性,附加温度参数和轨道周期参数吸收加速度计长期漂移和随轨道周期波动,优化空间重力梯度变化测量准确性,各种数据处理方法弥补系统硬件制造、安装误差等制约因素,改善了重力梯度测量技术水平。图4给出了重力梯度仪超稳定基座样机及热平衡试验。



(a) 重力梯度仪超稳定基座样机 (b) 重力梯度仪样机热平衡试验

图4 重力梯度仪超稳定基座样机及热平衡试验

Fig. 4 Engineering Prototype of Gradiometer Senser and Thermal Balance Test

5 发展趋势

全球重力场测量卫星以其独特能力持续改善全球重力场模型,相对重力卫星发射前极大改善了全球重力场测量精度和分辨率,研制出多个纯卫星数据重力场模型,特别是产出了时变重力场模型,支持水文、地震等科学研究取得技术进步。目前,尽管重力卫星技术发展促使全球重力场测量能力及应用取得重要进步,但是重力测量卫星目前依然存在不足之处,一是测量分辨率低,以300~500 km分辨率测量重力场时变,融合合成孔径雷达干涉、GNSS等数据可提高到几十千米,尚不能完全满足地下水储量监测等应用方向的空间分辨率需求;二是测量精度还有提高的潜力,重力卫星以2~3 mGal精度测量全球重力场,与地面重力测量系统的微伽级测量能力、航空重力测量系统1 mGal左右的测量能力还有较大差距,在重力测量仪器体系中还处于短板位置;三是测量实时性还有改善空间,国际上发布时变重力场数据延迟3~5个月,国产重力卫星产出时变重力场产品通常延迟1~2个月,与水文、地震、海洋环境监测分析实时性需求尚有差距。相对地球科学领域对于重力卫星的需求,现有重力卫星技术尚有持续提升空间。

针对当前重力卫星技术体系的薄弱环节,后续将重点关注如下发展方向:

1)新型卫星重力测量模式研究

针对卫星重力测量分辨率低和精度有改善空间的问题,持续研究新型卫星重力测量模式,拓展目前高轨卫星跟踪低轨卫星、低轨卫星跟踪低轨卫星、重力梯度卫星等模式,设计出新型卫星重力测量模式。主要考虑三方面技术改进,一是发展卫星引力位直接测量模式,设计采用高精度冷原子钟技术发展重力卫星星族间引力位差测量模式和冷原子重力梯度测量模式,补充引力位长波长信息直接测量数据,且进一步改善空间引力梯度测量精度,提升全球重力场测量分辨率和精度;二是构筑重力卫星星座,发展极轨重力卫星和倾斜轨道重力卫星组合测量模式,计划构建跟踪型重力测量卫星和重力梯度卫星联合测量重力的星族。仿真分析表明,多组重力卫星构成星座可以较高精度改善重力场反演模型质量,且多卫星测量在短时间内可覆盖全球,将提高时变重力场分辨率,减小延迟时间,从月时变重力

场提高到周时变重力场、甚至日时变重力场,更快支持地球科学时变特性近实时监测与应用。

2)高分辨、高精度卫星重力测量技术

卫星重力测量技术尚有完善空间,综合考虑卫星重力测量环境条件、平台性能、载荷能力等几方面,系统性改善卫星重力测量技术能力。一是设计卫星轨道高度、倾角、星间距离等星座轨道参数,构筑低轨道、多倾角、多星间距离的卫星星座,提升卫星测量信噪比,拓展卫星感知多向重力信息能力,增强各频段信息匹配性,系统性改善卫星重力测量的分辨率和精度;二是研制更高稳定度卫星平台,设计推力无级可变离子推力器、磁悬浮柔性链接结构、多级温度精准控制装置等,改善卫星姿轨控准确度和稳定度,提升非保守力补偿、测量基准稳定性控制等能力,优化温度控制和热效率管理水平,进一步改善卫星平台性能;三是改善星间测距系统、加速度计、梯度仪等载荷性能,研制高精度激光测距仪、冷原子重力梯度测量仪、超高精度加速度计等载荷,实现几十纳米星间距离测量、毫厄级梯度测量、微纳级加速度测量目标,可以更细微敏感空间重力信号结构特征,高分辨率、高精度实施空间重力测量。

3)高精度卫星重力测量数据处理技术

卫星重力测量数据中含有平台干扰、载荷噪声、环境耦合效应、数学模型不完备等误差因素,需要从多个角度研究误差控制方法,改善重力场反演技术水平。一是完善观测方程、状态方程等数学模型,研究星间测速观测方程、GNSS定位和测速观测方程、卫星运动状态方程和轨道积分技术,优化力模型、参考轨道模型、状态模型等,完善观测方程和状态方程;二是完善误差模型,卫星重力的微米级甚至纳米级空间距离测量、微纳级加速度测量等需要顾及更全面误差因素,改进星间距离误差模型、非保守力误差模型、重力梯度误差模型等,更重视平台环境和电、磁、热、机物理环境等耦合误差,合理建模修正,实施更全面误差控制和改正;三是完善在轨标定与校正方法,星载加速度计、星间测距仪、星敏感器、重力梯度仪、无拖曳装置等载荷的偏差、漂移、周期特性等在轨随着环境变化而变化,需要设计先进标定方法和研制合理校正算法,研究质心标定、星敏感器安装误差标定、星间测距仪相位中心标定、GNSS相位中心标定等技术,更好确定载荷各项特征参数并用于改进卫星重力测量数据。从数学模型完善到误差控制,从研制质量提升到参数标定实施,多方面研究挖掘卫星重力测量数据潜能,改善卫星重力反演地球重力场能力。

6　结　语

卫星重力测量技术以前所未有精度与空间分辨率对全球重力场实施测量,且反演了月分辨率时变重力场信息,将全球重力场模型信息从三维特征拓展到四维特征,彻底改变了传统利用几十年各类卫星数据反演一个低阶重力场模型的现状,从全球质量变化角度解析了地球质量演变特征,对地球物理学、水文学、海洋学等多领域研究做出了有益的基础性数据贡献。

1)克服卫星重力测量技术复杂度高、研制难度大的困难,研制成功国产重力卫星[65],实现全球重力场测量。从20世纪60年代提出卫星重力测量概念到21世纪初第一颗重力卫星在轨工作耗时约40年,突破了空间微米级星间距离测量、微纳级非保守力测量、厘米级卫星定位技术、几十微米级质心测量与调节等技术,截至2024年,国际上仅美国联合德国和中国掌握了重力测量卫星的完整研制技术,目前在轨工作的重力卫星仅有GRACE-Follow-On卫星和中国低低跟踪重力测量卫星系统。相较美国、德国等联合在21世纪初成功发射重力卫星,中国在时间上落后20余年,但是在一些性能指标方面略优于国外系统,且跨越了第一代高低跟踪重力测量卫星阶段,有较高的性价比。

2)突出重力卫星优势,融合地面重力和测高卫星数据产出高阶模型,拓宽科学与工程应用。重力测量卫星极大改变了传统重力测量模式,使得地球重力场观测从静态发展到动态,促使重力测量区域由小范围拓展到全球,将重力测量站位由地表面或者近地表面拓展到天基,改变多卫星轨道数据反演地球重力场方法为专用重力卫星数据反演地球重力场方法,实现全域、快速、高精度获取全球重力场信息。融合地面重力数据和多组卫星重力数据反演地球重力场,挖掘各类重力数据的不同频段信息优势,产出高精度、高分辨率时变重力场模型,进一步支撑地球物理学、水文学、地震学研究和数字孪生水利、时空基准统一等国家重大工程。

3)紧盯卫星重力测量技术前沿和发展潜力,突破新型冷原子重力卫星关键技术,研制新型重力场测量卫星。尽管卫星重力测量技术取得长足进步,取得显著的科学应用价值,但是距离多

学科需求尚有差距,仍需在冷原子重力测量技术、高精度原子钟测量技术等发展基础上持续发展,使得卫星重力测量精度和分辨率提升成为可能。在重力卫星跟踪测量模式和梯度测量模式基础上,顾及到优化重力梯度测量匹配性、改进姿态项扰动、完善跟踪测量单向特征等,设计新型卫星重力测量模式,研制出以冷原子引力位测量、冷原子梯度测量为特征的新型重力场测量卫星,提升重力测量卫星性能。

可以预见,重力卫星技术受到多领域科学研究和工程实践对地球重力场时变信息迫切需求牵引,并受到冷原子测量、原子钟测量引力位等先进技术驱动,将大幅度向前发展,得到强国、大国重视,提供战略基础信息。中国在重力卫星领域从落后国外先进技术,逐步突破重力卫星平台、载荷、数据处理等关键技术,跨越了第一代高低跟踪卫星重力测量技术,研制成功了第二代低低跟踪卫星重力测量系统,成为独立自主掌握该项技术的国家;后续将抓住发展机遇,聚焦创新测量模型、构筑星族、地球动力参数精化算法研究,持续发力引领卫星重力测量技术新飞跃。

参 考 文 献

[1] 宁津生. 跟踪世界发展动态致力地球重力场研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(6): 471-474.
NING Jinsheng. Following the Developments of the World, Devoting to the Study on the Earth Gravity Field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(6): 471-474.

[2] 宁津生. 卫星重力探测技术与地球重力场研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(1): 1-5.
NING Jinsheng. The Satellite Gravity Surveying Technology and Research of Earth's Gravity Field[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, 22(1): 1-5.

[3] 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.
XU Houze. Statellite Gravity Missions-New Hotpoint in Geodesy[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2001, 26(3): 1-3.

[4] 杨元喜, 王建荣, 楼良盛, 等. 航天测绘发展现状与展望[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(3): 1-9.
YANG Yuanxi, WANG Jianrong, LOU Liangsheng, et al. Development Status and Prospect of Satellite-Based Surveying[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42(3): 1-9.

[5] REIGBER C, BALMINO G, SCHWINTZER P, et al. A High-Quality Global Gravity Field Model from CHAMP GPS Tracking Data and Accelerometry (EIGEN-1S)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(14): 37-1-37-4.

[6] TAPLEY B D, BETTADPUR S, WATKINS M, et al. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9): 2004GL019920.

[7] 吴庭涛,郑 伟,尹文杰,等. 地球卫星重力场模型及其应用研究进展[J]. 科学技术与工程,2020,20(25): 10117-10132.
WU Tingtao, ZHENG Wei, YIN Wenjie, et al. Review of Earth's Gravity Field Model and Application from Satellite[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(25): 10117-10132.

[8] JIANG T, XU X Y, CHU Y H, et al. Review of the Research Progress on Static Earth Gravity Field and Vertical Datum in China During 2019—2023[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2023, 6(3): 76-86.

[9] 王云鹏, 刘晓刚, 李琦, 等. DQM2022系列超高阶地球重力场模型构建及其精度评估[J]. 测绘学报, 2024, 53(8): 1505-1516.
WANG Yunpeng, LIU Xiaogang, LI Qi, et al. Construction of Series Ultra-High-Degree Earth's Gravity Field Models DQM2022 and Their Precision Evaluation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(8): 1505-1516.

[10] 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.
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.

[11] FLOBERGHAGEN R, FEHRINGER M, LAMARRE D, et al. Mission Design, Operation and Exploitation of the Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer Mission[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(11): 749-758.

[12] 李建成, 徐新禹, 赵永奇, 等. 由GOCE引力梯度张量不变量确定卫星重力模型的半解析法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 21-26.
LI Jiancheng, XU Xinyu, ZHAO Yongqi, et al. Approach for Determining Satellite Gravity Model from GOCE Gravitational Gradient Tensor Invariant Observations[J]. *Geomatics and Information Science*

of Wuhan University, 2016, 41(1): 21-26.

[13] 游为, 范东明, 贺全兵. 利用GOCE卫星轨道反演地球重力场模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(3): 294-297.
YOU Wei, FAN Dongming, HE Quanbing. Recovering Earth's Gravitational Field Model Using GOCE Satellite Orbits[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 294-297.

[14] 吴云龙, 郭泽华, 肖云, 等. 卫星重力梯度观测数据L1级构建方法[J]. 地球物理学报, 2021, 64(12): 4437-4448.
WU Yunlong, GUO Zehua, XIAO Yun, et al. L1 Level Construction Method of Satellite Gravity Gradiometry Observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(12): 4437-4448.

[15] 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 Weiping, ZHANG Chuanyin, LI Jiancheng. 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.

[16] 肖云, 王云鹏, 刘晓刚, 等. 空域最小二乘法用于重力卫星误差分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(3): 340-346.
XIAO Yun, WANG Yunpeng, LIU Xiaogang, et al. Application of Space-Wise Least Square Method to Error Analysis for Satellite Gravimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(3): 340-346.

[17] 冉将军, 钟敏, 许厚泽, 等. 模拟分析低低跟踪模式重力卫星反演地球重力场的精度[J]. 地球物理学报, 2015, 58(10): 3487-3495.
RAN Jiangjun, ZHONG Min, XU Houze, et al. Analysis of the Gravity Field Recovery Accuracy from the Low-Low Satellite-to-Satellite Tracking Mission[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(10): 3487-3495.

[18] 陈秋杰, 沈云中, 张兴福, 等. 基于GRACE卫星数据的高精度全球静态重力场模型[J]. 测绘学报, 2016, 45(4): 396-403.
CHEN Qiujie, SHEN Yunzhong, ZHANG Xingfu, et al. GRACE Data-Based High Accuracy Global Static Earth's Gravity Field Model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(4): 396-403.

[19] 牛晗晗, 王长青, 钟敏, 等. GRACE-FO加速度计校正方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(10): 998-1003.
NIU Hanhan, WANG Changqing, ZHONG Min, et al. Research on Calibration Method of GRACE-FO Accelerometer[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(10): 998-1003.

[20] 邹贤才, 金涛勇, 朱广彬. 卫星跟踪卫星技术反演局部地表物质迁移的MASCON方法研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4623-4632.
ZOU Xiancai, JIN Taoyong, ZHU Guangbin. Research on the MASCON Method for the Determination of Local Surface Mass Flux with Satellite-Satellite Tracking Technique[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(12): 4623-4632.

[21] 游为. 球谐分析方法对GRACE大气去混频模型计算的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(4): 397-402.
YOU Wei. Impact of Spherical Harmonic Analysis Methods on the Computation of GRACE Atmosphere De-Aliasing Models[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(4): 397-402.

[22] 杨帆, 许厚泽, 钟敏, 等. 利用径向基函数RBF解算GRACE全球时变重力场[J]. 地球物理学报, 2017, 60(4): 1332-1346.
YANG Fan, XU Houze, ZHONG Min, et al. GRACE Global Temporal Gravity Recovery Through the Radial Basis Function Approach[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(4): 1332-1346.

[23] 陈秋杰, 沈云中, 张兴福. 基于重力卫星几何轨道线性化的地球重力场反演方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2238-2244.
CHEN Qiujie, SHEN Yunzhong, ZHANG Xingfu. Linearization Method of Recovering Earth's Gravity Field with Respect to Gravity Satellite's Kinematic Orbits[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(7): 2238-2244.

[24] 王长青, 许厚泽, 钟敏, 等. 利用动力学方法解算GRACE时变重力场研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 756-766.
WANG Changqing, XU Houze, ZHONG Min, et al. An Investigation on GRACE Temporal Gravity Field Recovery Using the Dynamic Approach[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 756-766.

[25] 郭金运, 于学敏, 孔巧丽, 等. 基于GRACE卫星数据的低阶重力场时变分析[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1002-1010.
GUO Jinyun, YU Xuemin, KONG Qiaoli, et al. Analysis of Low Degree Gravity Changes from GRACE Gravity Field Model[J]. *Progress in Geo-*

physics, 2015, 30(3): 1002-1010.

[26] 罗志才, 周浩, 李琼, 等. 基于GRACE KBRR数据的动力积分法反演时变重力场模型[J]. 地球物理学报, 2016, 59(6): 1994-2005.
LUO Zhicai, ZHOU Hao, LI Qiong, et al. A New Time-Variable Gravity Field Model Recovered by Dynamic Integral Approach on the Basis of GRACE KBRR Data Alone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(6): 1994-2005.

[27] 邹贤才, 李建成, 衷路萍, 等. 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.
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.

[28] 肖云, 杨元喜, 潘宗鹏, 等. 中国卫星跟踪卫星重力测量系统性能与应用[J]. 科学通报, 2023, 68(20): 2655-2664.
XIAO Yun, YANG Yuanxi, PAN Zongpeng, et al. Performance and Application of the Chinese Satellite-to-Satellite Tracking Gravimetry System[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(20): 2655-2664.

[29] XIAO Y, YANG Y X, PAN Z P, et al. Chinese Gravimetry Augment and Mass Change Exploring Mission Status and Future[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2023, 6(3): 67-75.

[30] 李浩思, 邓琼, 徐鹏, 等. 低低跟踪重力卫星高精度微波测距系统数据预处理与分析[J]. 地球物理学报, 2023, 66(5): 1945-1959.
LI Haosi, DENG Qiong, XU Peng, et al. Data Preprocessing and Analysis of High-Precision Microwave Ranging System for Low-Low Satellite-to-Satellite Tracking Mission[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(5): 1945-1959.

[31] 王康, 李耀宗, 肖云, 等. 加速度计移植误差来源及对重力场建模影响分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 72-77.
WANG Kang, LI Yaozong, XIAO Yun, et al. Analysis of Source of Accelerometer Transplant Error and Its Influence on Gravity Field Modeling[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology* (*Nature Science Edition*), 2023, 51(3): 72-77.

[32] 潘宗鹏, 肖云, 刘晓刚, 等. 重力卫星加速度计数据预处理研究[J]. 地球物理学报, 2024, 67(10): 3697-3706.
PAN Zongpeng, XIAO Yun, LIU Xiaogang, et al. Research on Preprocessing of Gravity Satellite Accelerometer Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(10): 3697-3706.

[33] 周浩, 李耀宗, 周泽兵, 等. 星载加速度计频域噪声对时变重力场反演的影响研究[J]. 地球物理学报, 2024, 67(5): 1733-1745.
ZHOU Hao, LI Yaozong, ZHOU Zebing, et al. Study on the Influence of Frequency-Dependent Accelerometer Noise in Determining Temporal Gravity Field Model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(5): 1733-1745.

[34] 黄志勇, 李姗姗, 李世忠, 等. 基于质心定标机动信号估计GRACE-FO卫星激光测距系统TTL耦合系数[J]. 地球物理学报, 2024, 67(8): 2897-2908.
HUANG Zhiyong, LI Shanshan, LI Shizhong, et al. Estimation of TTL Coupling Coefficients for the GRACE-FO Satellite Laser Ranging System Based on the Center of Mass Calibration Maneuver Signals[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(8): 2897-2908.

[35] 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.

[36] CAI L, BAI Y Z, LI H Y, et al. Calibration and Validation of a Space Electrostatic Accelerometer Onboard Tianzhou-1 Cargo Spacecraft Using GNSS and Attitude Data[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 138: 108320.

[37] XIAO C Y, BAI Y Z, LI H Y, et al. Drag-Free Control Design and In-Orbit Validation of Tianqin-1 Satellite[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2022, 39(15): 155001.

[38] ZHOU A N, CAI L, XIAO C Y, et al. Non-Gravitational Force Measurement and Correction by a Precision Inertial Sensor of TianQin-1 Satellite[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2022, 39(11): 115005.

[39] 周浩, 罗志才, 周泽兵, 等. 基于天琴一号观测数据反演地球重力场模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 117-125.
ZHOU Hao, LUO Zhicai, ZHOU Zebing, et al. Earth's Gravity Field Determination Based on Tianqin-1 Observations[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology* (*Natural Science Edition*), 2022, 50(9): 117-125.

[40] 谭定银, 白彦峥, 屈少波, 等. 空间静电加速度计研究与应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 96-103.
TAN Dingyin, BAI Yanzheng, QU Shaobo, et al.

Research and Application of Space Electrostatic Accelerometer[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology* (*Nature Science Edition*), 2022, 50(9): 96-103.

[41] 祝竺, 赵艳彬, 尤超蓝, 等. 面向空间引力波探测的非接触式卫星平台无拖曳控制技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(S1): 9-13.
ZHU Zhu, ZHAO Yanbin, YOU Chaolan, et al. Drag Free Control of Non contact Satellite Platform for Space Gravitational Wave Detection[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(S1): 9-13.

[42] 刘伟, 高扬. 空间引力波探测中无拖曳控制方法研究[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2020, 50(7): 108-118.
LIU Wei, GAO Yang. Drag-Free Control Methods for Space-Based Gravitational-Wave Detection[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(7): 108-118.

[43] 张锦绣, 陶文舰, 连晓斌, 等. 空间引力波探测无拖曳技术现状与趋势[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(2): 1-17.
ZHANG Jinxiu, TAO Wenjian, LIAN Xiaobin, et al. Current Status and Trends of Drag-Free Technology for Space-Based Gravitational Wave Detection[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2024, 46(2): 1-17.

[44] 刘伟, 周宇鹏, 伍保峰, 等. 重力梯度仪mK级温度稳定度控制设计及验证[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(6): 597-603.
LIU Wei, ZHOU Yupeng, WU Baofeng, et al. Design and Verification of a MK-Level Temperature Fluctuation Control System for Gravity Gradiometer[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, 39(6): 597-603.

[45] 刘宇峰, 张中伟, 许正辉, 等. 空间高稳定碳/碳蜂窝夹层结构制备及性能[J]. 宇航学报, 2020, 41(8): 1067-1075.
LIU Yufeng, ZHANG Zhongwei, XU Zhenghui, et al. Preparation and Properties of Carbon/Carbon Honeycomb Sandwich Panels for Space Ultra-Stable Structures[J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(8): 1067-1075.

[46] 张岚, 孙文科. 重力卫星GRACE Mascon产品的应用研究进展与展望[J]. 地球与行星物理论评, 2022, 53(1): 35-52.
ZHANG Lan, SUN Wenke. Progress and Prospect of GRACE Mascon Product and Its Application[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, 53(1): 35-52.

[47] 李琼, 罗志才, 钟波, 等. 利用GRACE时变重力场探测2010年中国西南干旱陆地水储量变化[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1843-1849.
LI Qiong, LUO Zhicai, ZHONG Bo, et al. Terrestrial Water Storage Changes of the 2010 Southwest China Drought Detected by GRACE Temporal Gravity Field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(6): 1843-1849.

[48] LONG D, YANG W T, SCANLON B R, et al. South-to-North Water Diversion Stabilizing Beijing's Groundwater Levels[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3665.

[49] YANG J W, PAN Y, ZHANG C, et al. Comparison of Groundwater Storage Changes over Losing and Gaining Aquifers of China Using GRACE Satellites, Modeling and In-Situ Observations[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 938: 173514.

[50] 曹杰, 肖云, 龙笛, 等. 联合重力卫星和水井资料监测华北平原地下水储量变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 805-818.
CAO Jie, XIAO Yun, LONG Di, et al. Combined Gravity Satellite and Water well Information to Monitor Groundwater Storage Changes in the North China Plain[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 805-818.

[51] 胡敏章, 李建成, 金涛勇, 等. 联合多源数据确定中国海及周边海底地形模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(9): 1266-1273.
HU Minzhang, LI Jiancheng, JIN Taoyong, et al. Recovery of Bathymetry over China Sea and Its Adjacent Areas by Combination of Multi-Source Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(9): 1266-1273.

[52] 祝意青, 张勇, 杨雄, 等. 时变重力在地震研究方面的进展与展望[J]. 地球与行星物理论评, 2022, 53(3): 278-291.
ZHU Yiqing, ZHANG Yong, YANG Xiong, et al. Progress of Time-Varying Gravity in Seismic Research[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, 53(3): 278-291.

[53] RAN J J, DITMAR P, VAN DEN BROEKE M R, et al. Vertical Bedrock Shifts Reveal Summer Water Storage in Greenland Ice Sheet[J]. *Nature*, 2024, 635(8037): 108-113.

[54] 孙文科. 低轨道人造卫星(CHAMP、GRACE、GOCE)与高精度地球重力场: 卫星重力大地测量的最新发展及其对地球科学的重大影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(1): 92-100.
SUN Wenke. Satellite in Low Orbit (CHAMP, GRACE, GOCE) and High Precision Earth Gravity

Field: The Latest Progress of Satellite Gravity Geodesy and Its Great Influence on Geoscience[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2002, 22(1): 92-100.

[55] BENDER P L, CONKLIN J W, WIESE D N. Short-Period Mass Variations and the Next Generation Gravity Mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2025, 130: e2024JB030290.

[56] 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.
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.

[57] 周浩, 罗志才, 周泽兵, 等. 利用卫星跟踪卫星观测数据确定时变重力场球谐解的发展趋势[J]. 地球与行星物理论评, 2022, 53(3): 243-256.
ZHOU Hao, LUO Zhicai, ZHOU Zebing, et al. Progress of Temporal Gravity Field Model Determination in Terms of Spherical Harmonic Coefficients *via* Satellite-to-Satellite Tracking Observations[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, 53(3): 243-256.

[58] 冉将军, 闫政文, 吴云龙, 等. 下一代重力卫星任务研究概述与未来展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 841-857.
RAN Jiangjun, YAN Zhengwen, WU Yunlong, et al. Research Status and Future Perspectives in Next Generation Gravity Mission[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(6): 841-857.

[59] ZHOU H, TANG L, TAN D Y, et al. Impacts of Frequency-Dependent Instrument Noise for Next-Generation Gravimetric Mission on Determining Temporal Gravity Field Model[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(3): 23.

[60] 肖云, 夏哲仁, 孙中苗, 等. 基线法在卫星重力数据处理中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(3): 280-284.
XIAO Yun, XIA Zheren, SUN Zhongmiao, et al. Application of an Improved Dynamic Method Baseline Method to Satellite Gravtimetry Data Processing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 280-284.

[61] CHEN Q J, SHEN Y Z, ZHANG X F, et al. Monthly Gravity Field Models Derived from GRACE Level 1B Data Using a Modified Short-Arc Approach[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(3): 1804-1819.

[62] 罗俊, 艾凌皓, 艾艳丽, 等. 天琴计划简介[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(S1): 1-19.
LUO Jun, AI Linghao, AI Yanli, et al. A Brief Introduction to the TianQin Project[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60(S1): 1-19.

[63] ZHOU H, ZHENG L J, PAIL R, et al. The Impacts of Reducing Atmospheric and Oceanic De-Aliasing Model Error on Temporal Gravity Field Model Determination[J]. *Geophysical Journal International*, 2023, 234(1): 210-227.

[64] BAI Y L, CHEN Q J, SHEN Y Z, et al. Impacts of Temporal Resolution of Atmospheric De-Aliasing Products on Gravity Field Estimation[J]. *Geophysical Journal International*, 2024, 237(3): 1442-1458.

[65] 党亚民, 蒋涛, 杨元喜, 等. 中国大地测量研究进展(2019—2023)[J]. 测绘学报, 2023, 52(9): 1419-1436.
DANG Yamin, JIANG Tao, YANG Yuanxi, et al. Research Progress of Geodesy in China(2019—2023)[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(9): 1419-1436.