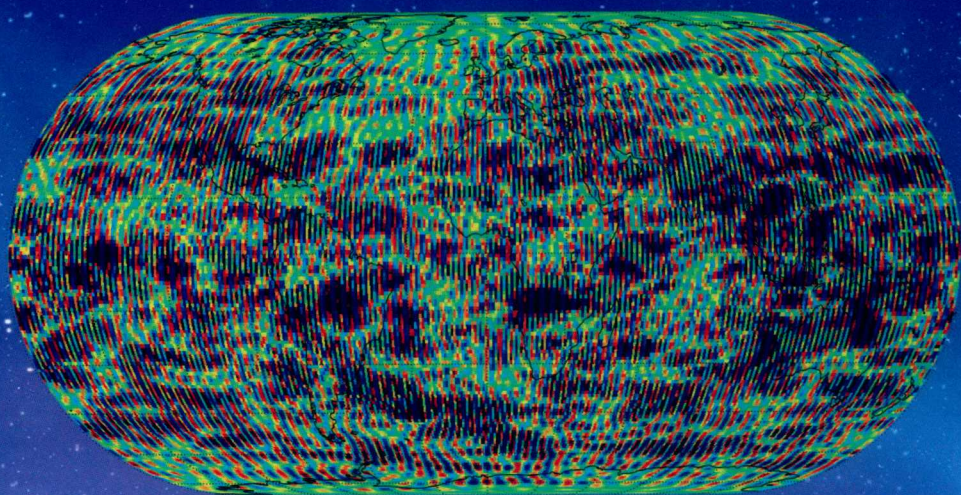




地球观测与导航技术丛书

下一代卫星重力反演 理论、方法与关键技术

郑伟 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

地球观测与导航技术丛书

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

下一代卫星重力反演理论、 方法与关键技术

郑 伟 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本较系统和翔实地论述下一代卫星重力反演理论、方法与关键技术科学专著。全书共 19 章, 主要内容包括: 基于 Lagrange 和 Taylor 星间速度插值法反演 GRACE Follow-On 重力场; NGGM 重力场反演和我国下一代卫星重力计划最优轨道设计; 基于残余星间速度法反演 120 阶 GRACE Follow-On 重力场; 基于下一代 Pendulum-A/B 双星编队开展卫星重力反演和需求论证; 基于星间速度插值法反演下一代三向车轮双星编队 ACR-Cartwheel 重力场; 联合串行式和钟摆式卫星编队精确建立下一代 HIP-3S 重力场模型; 基于下一代四星转轮式编队反演 FSCF 重力场; 基于 GRACE Follow-On 卫星重力梯度法反演下一代重力场; 基于时空域混合法反演 250 阶 GOCE 重力场; 卫星重力梯度一维垂向分量和三维全张量对 250 阶 GOCE 重力场反演精度影响; 基于解析法和功率谱解析误差模型估计下一代 GOCE Follow-On 重力场精度。

本书可供地球科学领域从事与卫星重力反演相关科学研究的科研人员参阅, 亦可作为卫星重力学、空间大地测量学、地球物理学等相关专业本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

下一代卫星重力反演理论、方法与关键技术/郑伟著. —北京: 科学出版社, 2019.6

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-059848-6

I. ①下… II. ①郑… III. ①卫星重力学-重力反演问题-研究 IV. ①P312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 265005 号

责任编辑: 苗李莉 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 图阅社

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 16 1/2

字数: 400 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“地球观测与导航技术丛书”编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	闫国年	孟 波
秦其明	单 杰	施 闯	史文中	吴一戎
徐祥德	许健民	尤 政	郁文贤	张继贤
张良培	周国清	周启鸣		

“地球观测与导航技术丛书”编写说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划(863 计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”规划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示 973 计划和 863 计划主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了“地球观测与导航技术丛书”。

从书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 计划相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009 年 10 月

序

卫星重力测量技术的实现是继美国 GPS 星座成功构建之后在空间大地测量领域的又一项创新和突破。目前国际科研机构共实施了四期地球卫星重力测量计划 [德国 CHAMP (2000~2010)、美德 GRACE (2002~2017)、欧空局 GOCE (2009~2013) 和美德 GRACE Follow-On (2018~)] 和一期月球卫星重力测量计划 [美国 GRAIL (2011~2012)]。我国首期自主卫星重力测量计划已于 2017 年正式立项。基于当前卫星重力测量计划的局限性以及相继结束测量使命的原因,国际众多科研机构正积极寻求和论证下一代新型卫星重力计划。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,我国应尽快汲取国外长期积累的成功经验,加快我国自主研制重力卫星的步伐,旨在通过卫星重力计划的实现带动相关科学和国防领域的发展。

该书开展了下一代卫星观测模式、载荷指标和轨道参数的需求论证,突破了我国下一代重力卫星顶层设计的一系列关键技术,研究成果有力支撑了我国下一代精密卫星重力测量立项规划。主要研究内容包括:基于 Lagrange 和 Taylor 星间速度插值法反演 GRACE Follow-On 地球重力场;NGGM 地球重力场反演和我国下一代卫星重力计划最优轨道设计;基于残余星间速度法反演 GRACE Follow-On 地球重力场;基于下一代 Pendulum-A/B 双星编队开展卫星重力反演和需求论证;基于星间速度插值法反演下一代三向车轮双星编队 ACR-Cartwheel 地球重力场;联合串行式和钟摆式卫星编队精确建立下一代 HIP-3S 地球重力场模型;基于下一代四星转轮式编队反演 FSCF 地球重力场;基于 GRACE Follow-On 卫星重力梯度法反演下一代地球重力场;基于解析模型和数值模拟对比论证卫星重力梯度的一维垂向分量和三维全张量对 GOCE 地球重力场反演精度影响;基于解析法估计下一代 GOCE Follow-On 地球重力场精度;基于功率谱原理解析误差模型开展下一代 GOCE Follow-On 需求论证。

该书不仅为我国卫星重力学与相关学科的交叉研究做出较大贡献,一定程度上提升了我国在该领域的研究水平和国际影响力,为解决我国下一代重力卫星系统的关键技术难题提供了科学依据和理论方法应用服务,还为满足空间大地测量学、地球物理学、国防建设等交叉研究领域对重力场精度进一步提高的迫切需求奠定了理论和技术基础,具有重要的经济价值和社会效益。

由于我与作者具有相同的研究方向和工作往来,我们武汉大学测绘学院的专家、教师,包括我本人也曾经参加过我国前期卫星重力计划的论证工作,对该计划也进行过若干研究。为此,作者在该书完成之后,即寄来给我审阅,我有幸对其能先睹为快。读过此书之后,我感觉这本书内容新颖,理论严密清晰,实践方法可靠可行。该书在国家自然科学基金重点项目、国家重点研发计划、国家 863 计划等国家和省部级项目的支持下,主要围绕“下一代卫星重力反演理论、方法与关键技术”开展了系统研究工作,旨在为我国下一代地球卫星重力测量计划的成功实施提供可行性的理论基础和应用支持。该书研究内容属于空间大地测量学、卫星重力学、地球物

理学等多学科交叉前沿领域。该书作者及其所在单位积累了十多年的研究成果，这些对下一代地球卫星重力计划和将来月球、火星、金星等天体卫星重力探测具有重要的科学意义、经济价值和社会效益。该书紧跟国际卫星重力测量的最新热点，以解决空间大地测量等交叉研究领域的前沿性科学问题为导向，以满足我国迫切提出的科学和国防需求为牵引，提出了一系列具有我国特色和科学适用的技术方案，培养了一批相关交叉研究领域的优秀青年科技人才。该书研究成果为推动“我国首期卫星重力计划正式立项”起到重要作用，为“航天强国”建设提供了有力支撑，读后受益匪浅。为此，将我的读后感受写成“序”供作者和读者参考。如有不妥之处，请不吝赐教。

我殷切希望此书能对在卫星重力领域读者的学习和科研提供有力帮助，并能对我国下一代卫星重力反演研究领域的快速发展起到促进作用。衷心祝愿作者在今后的下一代卫星重力反演研究工作中取得更大进步，同时祝愿所有从事卫星重力学研究的学者们为我国对地观测和国防建设做出更大贡献。



中国工程院院士

2018年8月8日于武汉大学测绘学院

前言

德国 CHAMP (2000-07-15 ~ 2010-09-19)、美德 GRACE (2002-03-17 ~ 2017-10-27)、欧空局 GOCE (2009-03-17 ~ 2013-11-10) 和美德 GRACE Follow-On (2018-05-22 ~) 重力卫星各有所长, 它们的相继发射不是相互竞争而是相互补充; 另外, 中国首期卫星重力测量计划已于 2017 年正式立项。CHAMP (challenging minisatellite payload) 是卫星重力测量计划成功实施的先行者, GRACE (gravity recovery and climate experiment) 和 GRACE Follow-On 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 (gravity field and steady-state ocean circulation explorer) 擅长于感测地球中短波静态重力场。联合上述四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 21 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 NGGM 计划、Cartwheel-A/B 计划等)、钟摆编队 (如 E.MOTION 计划等); ②三星重力计划: 串行-钟摆组合编队 (如 HIP-3S 计划等); ③四星重力计划: 车轮编队 (如 FSCF 计划等)。国际大地测量学界众多科研工作者经过 40 多年的探索终将卫星跟踪卫星 (SST) 和卫星重力梯度 (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技术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 GRACE Follow-On 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下一代卫星重力测量技术的成功经验, 积极推动我国下一代自主卫星重力测量计划的实施, 加快研制重力卫星的步伐, 通过下一代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; 挑战是指我国对下一代星载仪器的研制、观测手段的研究和卫星数据的处理尚处于跟踪阶段, 而且对于下一代卫星重力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, 本书开展了下一代卫星重力测量计划的研究论证, 旨在为我国下一代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。

为了适应卫星重力学、空间大地测量学等交叉学科的发展, 我国很多高等院校都为大地测量专业的本科生和研究生开设了“卫星重力学”或与空间大地测量相关的其他课程。本书是为满足此方面的教学和科研需要撰写而成, 全书共 19 章。第 1 章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, 开展了我国下一代 CSGM 卫星重力测量计划实施的研究论证; 第 2 章基于新型能量插值法, 利用美国喷气推进实验室公布的 2008 年的 GRACE-Level-1B 实测数据, 反演了 120 阶 GRACE 地球重力场; 第 3

章基于 6 点 Lagrange 星间速度插值法和 Taylor 星间速度插值法开展了下一代 GRACE Follow-On 地球重力场反演的研究论证；第 4 章采用不同轨道高度、不同轨道倾角，以及不同星间距离反演了 120 阶 NGGM 地球重力场，并提出我国下一代卫星重力计划的最优轨道参数设计；第 5 章基于新型残余星间速度法反演了 120 阶 GRACE Follow-On 地球重力场；第 6 章基于下一代 Pendulum-A/B 双星编队开展了卫星重力反演和需求论证研究；第 7 章基于星间速度插值法开展了利用下一代三向车轮双星编队 ACR-Cartwheel 提高地球重力场空间分辨率的可行性研究论证；第 8 章开展了联合串行式和钟摆式卫星编队精确建立下一代 HIP-3S 地球重力场模型研究；第 9 章开展基于下一代四星转轮式编队系统精确和快速反演 FSCF 地球重力场研究；第 10 章基于 GRACE Follow-On 卫星重力梯度法开展了精确和快速反演下一代地球重力场的可行性论证研究；第 11 章综述了重力梯度测量原理、重力梯度仪研究历程、卫星重力梯度仪技术特征、卫星重力梯度测量特点，以及卫星重力梯度反演法研究进展；第 12 章基于时空域混合法，利用 Kaula 正则化反演了 250 阶 GOCE 地球重力场，旨在研究卫星重力梯度技术对中高频地球重力场反演精度的影响；第 13 章分别基于解析模型和数值模拟，对比论证了卫星重力梯度的一维垂向分量和三维全张量对 250 阶 GOCE 地球重力场反演精度的影响；第 14 章基于解析法有效和快速估计下一代 GOCE Follow-On 地球重力场精度；第 15 章基于功率谱原理精确建立了卫星重力梯度反演解析误差模型和开展了下一代 GOCE Follow-On 需求论证研究；第 16 章开展了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研究；第 17 章开展了国际火星探测计划进展和我国将来火星卫星重力测量计划研究；第 18 章开展了国际金星探测计划进展和我国金星重力梯度计划实施研究；第 19 章进行全书总结，并提出下一步工作计划。

本书是作者在十多年（2002~2018 年）从事卫星重力学和空间大地测量学的科研〔以第一作者在国内外权威学术期刊 *Surveys in Geophysics* (IF=3.761)、*IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* (IF=2.892)、*Journal of Geodynamics* (IF=2.142)、*Astrophysics and Space Science* (IF=1.885)、*Planetary and Space Science* (IF=1.82)、*Advances in Space Research* (IF=1.529) 等发表研究论文 70 余篇 (SCI 收录 31 篇)；以第一发明人授权国家发明专利 16 项和受理 9 项〕和教学工作总结的基础上扩充整理而成。作者诚挚感谢中国科学院测量与地球物理研究所许厚泽院士，国家自然科学基金委侯增谦院士，北京卫星导航中心杨元喜院士，武汉大学宁津生院士和李建成院士，西安测绘研究所魏子卿院士，中国测绘科学研究院刘先林院士，解放军信息工程大学王家耀院士，中科院力学所胡文瑞院士，中国航天科技集团包为民院士、范本尧院士、吴宏鑫院士和王巍院士，北京航空航天大学房建成院士，中国科学院地质与地球物理研究所万卫星院士等对本书的撰写和出版给予的大力支持；衷心感谢我的博士研究生导师——中山大学校长罗俊院士和博士后导师——日本京都大学徐培亮教授等在博士研究生和博士后科研启蒙阶段的悉心指导。本书的出版获得了国防科技创新特区钱学森空间技术实验室创新工作站项目、中央军委科技委前沿科技创新项目 (17-H863-05-ZT-001-022-01)，国家自然科学基金重点项目 (40234039, 41131067)、面上项目 (41574014, 41774014) 和青年项目 (41004006,

结题特优), 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2006AA09Z153, 2009AA12Z138), 日本学术振兴会(JSPS)基金项目(B19340129), 中国科学院知识创新工程重要方向青年人才项目(KZCX2-EW-QN114), 中国科学院卢嘉锡青年人才和青年创新促进会基金(2012), 中国空间技术研究院杰出青年人才基金(2017~2018 年), 中国科学技术协会学术会议示范品牌建设工程项目(2017XSHY006)等联合资助。本书的研究成果荣获中国测绘科技进步奖一等奖(2012、2018, 第一完成人)、中国地球物理科技进步奖二等奖(2013, 第一完成人)、湖北省自然科学奖二等奖(2012, 第一完成人)、中国科学院卢嘉锡青年人才奖(2012, 个人)、刘光鼎地球物理青年科学技术奖(2014, 个人)、傅承义青年科技奖(2015, 个人)、十佳中国电子学会优秀科技工作者奖(2018, 个人)、中国青年测绘地理信息科技创新人才奖(2018, 个人)、湖北省新世纪高层次人才工程奖(2012, 个人)、领跑者 5000——中国精品科技期刊顶尖论文奖(2013、2014、2016, 排名第一)、中国惯性技术创新优秀论文奖(2018, 排名第一)等 30 余项。本书的技术成果获测绘、航天、海洋、地震、国防等 15 个部门的应用和好评(应用证明), 具有重要的应用前景、经济价值和社会效益。书中的获奖成果受到《中国测绘报》《长江日报》《中国航天》等媒体的跟踪报道。

由于作者的科研和教学水平有限, 书中不足之处在所难免。如发现不妥之处, 恳请广大读者批评指正, 并与本书作者联系(Email: zhengwei1@qxslab.cn), 作者将不胜感激。

郑 伟

2018 年 8 月 1 日

目 录

“地球观测与导航技术丛书”编写说明

序

前言

第 1 章 我国下一代高精度 CSGM 卫星重力测量计划	1
1.1 国际卫星重力测量计划研究背景	1
1.2 我国将来 CSGM 卫星重力计划	3
1.3 本章小结	11
参考文献	11
第 2 章 基于新型能量插值法精确建立 GRACE-only 地球重力场模型	15
2.1 研究背景	15
2.2 基于能量插值原理的卫星重力反演法	17
2.3 研究结果	21
2.4 本章小结	23
参考文献	24
第 3 章 Lagrange 和 Taylor 星间速度插值法影响卫星重力反演精度	28
3.1 研究背景	28
3.2 卫星观测方程建立	29
3.3 研究结果	33
3.4 本章小结	36
参考文献	36
第 4 章 基于 NGGM 卫星编队提高下一代卫星重力反演精度	39
4.1 研究背景	39
4.2 研究方法	41
4.3 研究结果	41
4.4 本章小结	48
参考文献	49
第 5 章 基于残余星间速度法反演 GRACE Follow-On 地球重力场	52
5.1 研究背景	52
5.2 残余星间速度观测方程建立	53
5.3 卫星观测值色噪声模拟	56
5.4 研究结果	59
5.5 本章小结	62
参考文献	63

第 6 章 基于下一代 Pendulum-A/B 双星编队精确反演地球重力场 65

6.1 研究背景 65

6.2 Pendulum-A/B 双星观测值的色噪声模拟..... 67

6.3 下一代 Pendulum-A/B 双星编队的可行性检验..... 69

6.4 下一代 Pendulum-A/B 双星编队的需求分析..... 71

6.5 本章小结 72

参考文献 73

第 7 章 基于下一代三向车轮双星编队改善地球重力场空间分辨率 76

7.1 研究背景 76

7.2 星间速度插值卫星重力反演法..... 78

7.3 研究原理 79

7.4 研究结果 82

7.5 本章小结 88

参考文献 89

第 8 章 联合串行和钟摆式卫星编队反演下一代 HIP-3S 地球重力场 92

8.1 研究背景 92

8.2 扰动星间距离观测方程..... 95

8.3 轨道稳定性检验..... 97

8.4 卫星重力反演..... 99

8.5 本章小结 101

参考文献 101

第 9 章 基于下一代四星转轮式编队精确反演 FSCF 地球重力场 106

9.1 研究背景 106

9.2 卫星轨道根数的优化设计..... 108

9.3 地球重力场反演..... 108

9.4 下一代四星转轮式编队系统的优点..... 112

9.5 本章小结 113

参考文献 113

第 10 章 基于 GRACE Follow-On 卫星重力梯度法反演地球重力场 116

10.1 研究背景 116

10.2 研究方法 117

10.3 研究结果 123

10.4 本章小结 125

参考文献 125

第 11 章 卫星重力梯度测量研究进展 128

11.1 研究背景..... 128

11.2 卫星重力梯度仪研究进展..... 129

11.3 卫星重力梯度测量特点..... 132

11.4 卫星重力梯度反演法研究进展..... 133

11.5	GOCE 地球重力场模型研究进展	134
11.6	我国将来卫星重力梯度计划实施建议	141
11.7	本章小结	143
	参考文献	143
第 12 章	基于时空域混合法和 Kaula 正则化解算 GOCE 重力场	148
12.1	研究背景	148
12.2	时空域混合卫星重力梯度反演法	149
12.3	时空域混合卫星重力梯度反演结果	154
12.4	本章小结	156
	参考文献	156
第 13 章	一维垂向和三维卫星重力梯度影响地球重力场精度对比	159
13.1	研究背景	159
13.2	解析误差模型建立	161
13.3	数值模拟	164
13.4	本章小结	166
	参考文献	166
第 14 章	基于解析法估计下一代 GOCE Follow-On 地球重力场精度	169
14.1	研究背景	169
14.2	解析误差模型建立	170
14.3	下一代 GOCE Follow-On 卫星系统需求论证	173
14.4	四期卫星重力计划反演地球重力场精度对比	176
14.5	本章小结	177
	参考文献	178
第 15 章	重力梯度解析误差模型建立和 GOCE Follow-On 需求论证	180
15.1	研究背景	180
15.2	卫星重力梯度张量的信号功率谱	181
15.3	卫星重力梯度反演解析误差模型	185
15.4	研究结果	188
15.5	本章小结	192
	参考文献	192
第 16 章	基于激光干涉星间测距原理的月球卫星重力计划需求论证	195
16.1	研究背景	195
16.2	国际探月计划研究进展	196
16.3	GRAIL 探月双星计划	201
16.4	我国将来月球卫星重力测量计划	203
16.5	本章小结	209
	参考文献	210
第 17 章	国际火星探测计划进展和我国将来火星卫星重力计划研究	213
17.1	研究背景	213

17.2	国际火星探测计划发展历程.....	213
17.3	中国火星卫星重力梯度计划研究.....	216
17.4	本章小结	219
	参考文献	219
第 18 章	国际金星探测计划进展和我国金星重力梯度计划实施	222
18.1	研究背景	222
18.2	国际金星探测计划研究进展.....	223
18.3	金星重力场模型建立进展（1980~2002 年）	225
18.4	我国实施金星重力梯度计划建议	226
18.5	我国实施金星重力梯度计划的重要意义	227
18.6	本章小结	227
	参考文献	227
第 19 章	总结与展望	230
19.1	卫星重力测量现状.....	230
19.2	卫星重力测量必要性.....	231
19.3	卫星重力测量可行性.....	232
19.4	卫星重力反演软件平台构建.....	233
19.5	卫星重力测量轨道摄动.....	235
19.6	卫星重力测量科学应用.....	237
19.7	卫星重力测量未来研究方向.....	238
	参考文献	239
	作者简介	

第 1 章 我国下一代高精度 CSGM 卫星重力测量计划

本章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。第一,由于卫星跟踪卫星高低/低低 (SST-HL/LL) 模式对地球中长波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,所以建议将来 CSGM 卫星重力测量计划采用 SST-HL/LL 模式;第二,建议开展激光干涉星间测距仪、复合 GPS (global positioning system) 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;第三,建议将来 CSGM 卫星的轨道高度 (300~400 km) 和星间距离 [(100±50) km] 选择在已有重力卫星的测量盲区;第四,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;第五,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;第六,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 1~5 cm 和 1~5 mGal (郑伟等, 2014b)。

1.1 国际卫星重力测量计划研究背景

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。

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 1.1 和表 1.1 所示,地球重力测量卫星 CHAMP、GRACE 和 GOCE 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。

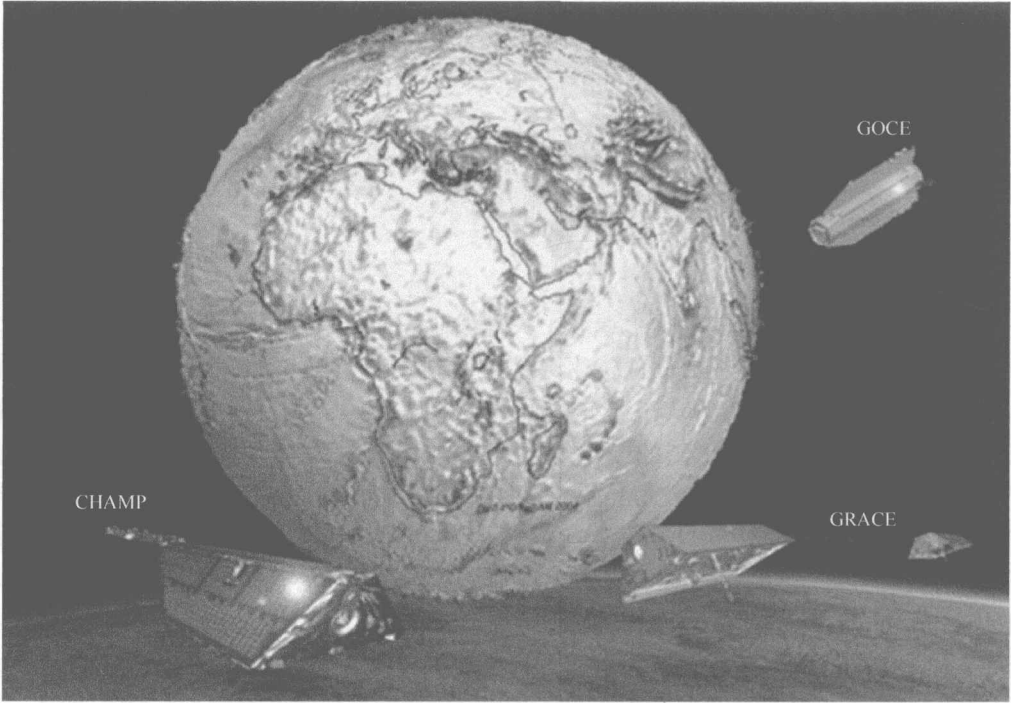


图 1.1 国际三期卫星重力测量计划

表 1.1 地球重力卫星参数对比

参数	重力卫星		
	CHAMP	GRACE-A/B	GOCE
研制机构	德国 GFZ ^①	美国 NASA ^② ，德国 DLR ^③	欧洲 ESA ^④
飞行时间	2000-07-15~2010-09-19	2002-03-17~2017-10-27	2009-03-17~2013-11-10
卫星寿命/年	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

①GFZ: Deutsches GeoForschungsZentrum;
②NASA: National Aeronautics and Space Administration;
③DLR: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt;
④ESA: European Space Agency

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 21 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(Loomis et al., 2012; Zheng et al., 2014)、NGGM(next-generation gravimetry mission)计划(Cesare and Sechi, 2013)等]和钟摆编队[如 E.MOTION(earth system mass transport mission)计划(Sneeuw et al., 2008; Panet et al., 2013)等];②三星重力计划:串行-钟摆组合编队[GRACE-Pendulum-3S 计划(Elsaka et al., 2009)等];③四星重力计划:车轮编队[如 FSCF(four-satellite cartwheel formation)计划(Wiese et al., 2009; Zheng et al., 2013b)等]和不同倾角组合编队(Bender et al., 2008; Zheng et al., 2008a)。

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军民融合领域的快速发展;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,本章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。

1.2 我国将来 CSGM 卫星重力计划

1.2.1 卫星跟踪模式的优化选取

地球重力场的传统测量方法主要包括地面重力观测技术、海洋卫星测高技术和卫星轨道摄动技术。传统重力测量技术的固有局限性导致地球重力场在 100~5000 km 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还是联合测量建立的地球重力场模型都难以满足 21 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 GPS 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(许厚泽等, 2012)。

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),