



当代
杰出青年
科学文库

地球重力场天基测量理论 及其内编队实现方法

张育林 王兆魁 刘红卫 著



科学出版社

当代杰出青年科学文库

地球重力场天基测量理论 及其内编队实现方法

张育林 王兆魁 刘红卫 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统讲述地球重力场天基测量的解析理论以及基于内编队系统的重力场测量实现方法,同时介绍与重力场测量相关的基础知识。天基重力场测量的解析理论包括绝对轨道摄动重力场测量、长基线和短基线相对轨道摄动重力场测量以及卫星编队重力场测量等不同测量方式下的分析方法。内编队重力场测量实现方法涉及内编队系统概述、内卫星纯引力轨道构造、内外卫星相对状态测量、内编队飞行控制技术等。全书内容丰富,体系完整,结构合理。

本书可供从事天基重力场测量技术研究的科研人员参考,也可作为高等院校航空宇航科学与技术相关专业研究生和高年级本科生的辅助教材。

图书在版编目 CIP 数据

地球重力场天基测量理论及其内编队实现方法 / 张育林,王兆魁,刘红卫著. —北京:科学出版社,2018. 03

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 978-7-03-054827-6

I. ①地… II. ①张…②王…③刘… III. ①航空重力测量-研究 IV. ①P223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 255002 号

责任编辑:孙伯元 王 苏 / 责任校对:桂伟利

责任印制:师艳茹 / 封面设计:陈 敬

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>

河北鹏润印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 3 月第一次印刷 印张:44 3/4 彩插:8

字数:890 000

定价:245.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

重力场是地球的基本物理场,反映了地球内部的物质分布及其运动。通过对重力场的高精度测量,可以推测地球内部构造,用于指导地球科学研究、地质灾害预报和矿产资源勘探,并为运载火箭、洲际导弹等飞行器中的高精度惯性导航提供极其重要的校正数据。因此,高精度、高分辨率的重力场模型是国家重要的战略信息资源,重力场测量理论与方法研究历来受到各国的高度重视。

重力场研究始于 16 世纪,伽利略通过观测自由落体运动,进行了世界上第一次重力观测试验。1687 年,牛顿根据万有引力定律和地球自转,得出地球是两极略扁、赤道略突的旋转椭球。此后,惠更斯、勒让德、斯托克斯、莫洛金斯基等学者的研究,逐步奠定了地球重力场测量的理论基础。随着技术的不断进步,出现了地面重力测量、海洋重力测量、航空重力测量和卫星重力测量等多种手段。其中,卫星重力测量又称为天基重力场测量,它是随着 20 世纪 60 年代航天技术的发展而出现的测量方式,以卫星为测量载体,具有全天候、全球覆盖、不受地缘政治和地理环境影响等突出优势,是获取全球重力场模型的最有效手段。21 世纪以来,以 CHAMP、GRACE、GOCE 重力卫星为标志,天基重力场测量技术逐渐成熟,实现了从理论到工程应用的巨大飞跃,极大地改善了全球重力场模型的精度和分辨率。同时,国内相关高校、研究所和工业部门相继开展了天基重力场测量的基础理论和实现方法研究,取得了丰硕的成果。

2006 年以来,作者围绕天基重力场测量基础理论问题,创新性地提出了基于内编队的天基重力场测量方法,给出了一种不依赖于加速度计的重力卫星实施新途径。针对天基重力场测量任务分析与设计,首次系统地建立了天基重力场测量解析分析方法,包括绝对轨道摄动重力场测量、长基线相对轨道摄动重力场测量、短基线相对轨道摄动重力场测量和卫星编队重力场测量等方式,并发现了不同测量方式之间的内在联系和统一描述方法,是天基重力场测量理论研究的重大进展,可为我国重力卫星任务顶层规划与设计提供技术支撑。在天基重力场测量实现方法研究上,针对自主提出的内编队系统,作者系统研究了基于内卫星纯引力轨道构造的重力信息获取技术,包括内卫星非引力干扰建模与抑制、内外卫星相对状态测量、纯引力轨道飞行控制等,构建了内编队重力场测量的理论与方法。

本书是作者在天基重力场测量方面研究的系统总结,包括天基重力场测量的解析理论体系、内编队重力场测量实现方法以及卫星精密定轨、卫星轨道动力学、卫星编队飞行、地球重力场等相关的理论基础,共 15 章。

第1章是绪论,介绍地球重力场测量的重要意义和基本方法,针对天基重力场测量,论述了其发展历史、研究现状和未来趋势,使读者能够从整体上把握天基重力场测量的发展脉络。

第2章是地球形状与地球重力场,着重介绍地球重力场的基本概念及其数学表示,以及现有重力场模型状况。第3章介绍勒让德多项式、缔合勒让德多项式和球谐函数等与重力场相关的数学基础。第4章是卫星轨道动力学基础,介绍卫星轨道运动的基本规律,分析地球引力对卫星绝对轨道以及相对轨道的摄动影响,使读者明白基于卫星绝对运动或相对运动反演重力场的物理依据。

精密定轨是天基重力场测量的基本条件和关键技术,第5章详细介绍基于GPS的卫星精密定轨方法。第6~8章分别针对三种天基重力场测量方式,利用频谱分析方法,建立重力场测量性能的解析分析方法,并据此提出天基重力场测量轨道参数、载荷指标的优化设计方法。第9章研究三种天基重力场测量的本质规律,深入揭示绝对轨道摄动重力场测量、长基线和短基线相对轨道摄动重力场测量的内在联系,建立天基重力场测量的统一描述方法。

第10章介绍卫星编队动力学的相关知识,为后面基于卫星编队的重力场测量研究提供理论基础。第11章建立卫星编队重力场测量的解析模型,并提出重力场测量卫星编队的构形优化设计和载荷匹配设计方法,为卫星编队重力场测量任务最优设计奠定了理论基础。

第12章介绍基于天基观测的地球重力场反演理论,使读者理解从各种重力卫星观测数据到高精度重力场模型获取的原理和方法。

第13章介绍作者自主提出的内编队重力场测量系统,包括内编队的系统组成、测量原理、任务目标、参数设计、内外卫星设计等。第14、15章介绍内卫星纯引力轨道构造方法,具体包括内卫星非引力干扰建模与抑制方法、内外卫星相对状态测量方法、内卫星纯引力轨道飞行控制技术等。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(11002076;11572168)、国家高分辨率对地观测系统重大专项和总装备部装备预先研究项目的资助,除作者外,谷振丰博士、党朝辉博士也为相关研究做出了重要贡献,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请批评指正。

作者
2017年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 地球重力场测量的意义	1
1.1.1 地球科学研究	1
1.1.2 地质灾害预报	2
1.1.3 矿产资源勘探	3
1.1.4 高精度惯性导航	3
1.2 地球重力场测量方法	4
1.2.1 地面重力测量	4
1.2.2 航空重力测量	4
1.2.3 海洋重力测量	5
1.2.4 天基重力测量	5
1.3 天基重力场测量的发展历程与现状	5
1.3.1 天基重力场测量的基本方法	5
1.3.2 绝对轨道摄动重力场测量	10
1.3.3 长基线相对轨道摄动重力场测量	15
1.3.4 短基线相对轨道摄动重力场测量	21
1.3.5 典型重力卫星系统	23
1.4 天基重力场测量的发展趋势	38
参考文献	45
第 2 章 地球形状与地球重力场	55
2.1 地球的形状和运动	55
2.1.1 地球的形状和内部结构	55
2.1.2 地球自转和公转	57
2.1.3 地球的基本参数	59
2.2 地球重力场	60
2.2.1 重力的概念	60
2.2.2 地球引力位的球谐展开	62
2.2.3 引力位函数的基本性质	66
2.2.4 正常地球与正常重力场	69
2.2.5 地球重力场测量中的指标量	76

2.3 全球重力场模型	77
2.3.1 全球重力场模型概述	77
2.3.2 SE 重力场模型	84
2.3.3 GEM 重力场模型	84
2.3.4 OSU 重力场模型	84
2.3.5 TEG 重力场模型	85
2.3.6 JGM 重力场模型	85
2.3.7 GRIM 重力场模型	86
2.3.8 EGM96 和 EGM2008 重力场模型	86
2.3.9 ITG 重力场模型	86
2.3.10 GGM 重力场模型	87
2.3.11 TUM 重力场模型	87
2.3.12 EIGEN 重力场模型	87
2.3.13 IGG 重力场模型	87
2.3.14 DQM 重力场模型	87
2.3.15 WDM 重力场模型	88
2.3.16 不同重力场模型的性能评估	88
参考文献	94
第3章 地球重力场测量的数学基础	103
3.1 勒让德多项式与球谐函数	103
3.1.1 勒让德方程	103
3.1.2 勒让德多项式	104
3.1.3 缔合勒让德多项式	106
3.1.4 球谐函数	107
3.2 缔合勒让德函数导数的去奇异性计算	107
3.3 直角坐标系下的引力位函数及其偏导数	110
3.4 微分方程组的数值解法	127
3.4.1 单步法	127
3.4.2 多步法	132
3.5 大型线性代数方程组解法	134
3.5.1 线性方程组的直接解法	135
3.5.2 线性方程组的迭代解法	140
参考文献	142
第4章 卫星轨道动力学基础	143
4.1 引言	143

4.2 时间系统及其转换	143
4.2.1 太阳时	144
4.2.2 世界时	144
4.2.3 恒星时	145
4.2.4 历书时	146
4.2.5 国际原子时	146
4.2.6 力学时	146
4.2.7 世界协调时	147
4.2.8 GPS时	148
4.2.9 儒略日	148
4.3 坐标系统及其转换	149
4.3.1 坐标系定义	149
4.3.2 地心惯性坐标系和地球固连坐标系的转换	150
4.3.3 地球固连坐标系和局部指北坐标系的转换	154
4.3.4 地心惯性坐标系和轨道坐标系的转换	154
4.4 二体问题	154
4.4.1 运动方程	154
4.4.2 面积积分	156
4.4.3 轨道积分	158
4.4.4 活力积分	161
4.4.5 近地点时间积分	163
4.5 卫星轨道描述	167
4.5.1 卫星轨道根数定义	167
4.5.2 由卫星轨道根数计算位置速度	169
4.5.3 由卫星位置速度计算轨道根数	170
4.6 卫星摄动运动方程	172
4.6.1 高斯型摄动运动方程	172
4.6.2 拉格朗日型摄动运动方程	177
4.7 重力卫星的受力模型	179
4.7.1 地球中心引力	180
4.7.2 地球非球形摄动力	180
4.7.3 大气阻力	182
4.7.4 太阳光压	182
4.7.5 日、月及行星引力	183
4.7.6 潮汐摄动和地球自转变形摄动	183

4.7.7 地球辐射压	184
4.7.8 广义相对论效应	185
4.7.9 经验摄动力	185
4.8 以轨道根数表示的地球非球形引力摄动位	185
4.9 地球引力场引起的轨道摄动特征	191
参考文献	193
第5章 重力卫星精密轨道确定方法	194
5.1 卫星精密轨道跟踪系统	194
5.1.1 DORIS	194
5.1.2 SLR	196
5.1.3 PRARE	196
5.1.4 GNSS	198
5.1.5 不同卫星轨道跟踪系统的比较	203
5.2 GPS 观测方程	204
5.2.1 伪距观测	204
5.2.2 载波相位观测	205
5.2.3 多普勒观测	206
5.2.4 GPS 观测模型的一般形式	207
5.2.5 GPS 观测模型的线性化	208
5.3 GPS 观测方程的偏导数	209
5.3.1 几何距离对 GPS 接收机状态矢量的偏导数	209
5.3.2 几何距离对 GPS 卫星状态矢量的偏导数	210
5.3.3 多普勒观测量的偏导数	210
5.3.4 钟差对其参数的偏导数	211
5.3.5 对流层改正项对其参数的偏导数	212
5.3.6 相位观测量模糊度参数的偏导数	212
5.4 GPS 观测数据的组合与差分	212
5.4.1 GPS 观测数据组合的一般形式	212
5.4.2 宽巷组合和窄巷组合	213
5.4.3 无电离层延迟组合	214
5.4.4 电离层残差组合	215
5.4.5 Melbourne-Wubben 观测值	215
5.4.6 GPS 载波相位差分观测值	216
5.5 星载 GPS 精密定轨方法	219
5.5.1 运动学方法	219

5.5.2 动力学方法	219
5.5.3 简化动力学方法	221
5.5.4 卫星定轨精度分析	221
5.6 重力卫星精密定轨的工程技术条件	223
5.6.1 GPS 接收机时钟精度	223
5.6.2 GPS 接收机天线安装及其相位中心确定	224
5.6.3 重力卫星姿态测量精度	224
5.6.4 IGS 全球观测数据获取能力	224
5.6.5 SLR 激光反射镜的安装精度	224
5.6.6 基于地面激光测距站的卫星定轨精度检验能力	225
参考文献	225
第 6 章 绝对轨道摄动重力场测量机理建模与任务设计方法	227
6.1 绝对轨道摄动重力场测量的基本原理	227
6.2 绝对轨道摄动重力场测量性能的解析建模	229
6.3 利用大规模数值模拟验证重力场测量解析模型	236
6.3.1 绝对轨道摄动重力场测量性能数值模拟	236
6.3.2 绝对轨道摄动重力场测量性能的解析模型校正	238
6.3.3 校正后的绝对轨道摄动重力场测量性能解析模型验证	241
6.4 任务参数对绝对轨道摄动重力场测量的影响分析	244
6.4.1 任务参数对重力场测量性能影响程度的分析模型	244
6.4.2 非引力干扰、定轨误差改变量对应的等效轨道高度改变量比较	246
6.4.3 非引力干扰、采样间隔改变量对应的等效轨道高度改变量比较	248
6.4.4 定轨误差、采样间隔改变量对应的等效轨道高度改变量比较	251
6.4.5 任务参数对应的等效轨道高度改变量比较	254
6.5 绝对轨道摄动重力场测量任务优化设计方法	256
6.5.1 重力场测量任务参数的影响规律	257
6.5.2 绝对轨道摄动重力场测量任务参数的优化设计方法	260
6.6 典型重力卫星任务轨道与数据产品	261
6.6.1 CHAMP 卫星任务轨道	261
6.6.2 CHAMP 卫星重力场测量数据产品及性能分析	266
参考文献	274
第 7 章 长基线相对轨道摄动重力场测量机理建模与任务设计方法	276
7.1 长基线相对轨道摄动重力场测量机理	276
7.2 长基线相对轨道摄动重力场测量的解析建模	277
7.2.1 长基线相对轨道摄动重力场测量的能量守恒方程	277

7.2.2	两个引力敏感器地心距之差与相对距离变化率的关系	280
7.2.3	两个引力敏感器相对距离变化率的数学表达式	282
7.2.4	长基线相对轨道摄动重力场测量性能的解析模型	284
7.2.5	长基线相对轨道摄动重力场测量解析模型的验证	291
7.3	长基线相对轨道摄动重力场测量任务轨道与载荷匹配设计方法 ...	292
7.3.1	轨道高度的优化选择	292
7.3.2	引力敏感器相对距离的优化选择	293
7.3.3	相对距离变化率测量误差、非引力干扰和定轨误差的优化选择	296
7.3.4	观测数据采样间隔的选择	297
7.3.5	总任务时间的确定	298
7.4	典型重力卫星任务轨道与数据产品	298
7.4.1	GRACE 卫星任务轨道	298
7.4.2	GRACE 卫星重力场测量数据产品及性能分析	303
参考文献		311
第 8 章 短基线相对轨道摄动重力场测量机理建模与任务设计方法		313
8.1	局部指北坐标系下的重力梯度表示	313
8.2	径向短基线相对轨道摄动重力场测量的解析建模	315
8.3	迹向短基线相对轨道摄动重力场测量的解析建模	319
8.4	轨道面法向短基线相对轨道摄动重力场测量的解析建模	321
8.5	短基线相对轨道摄动重力场测量的解析模型	322
8.6	短基线相对轨道摄动重力场测量任务优化设计方法	323
8.6.1	短基线相对轨道摄动重力场测量任务参数的影响规律	323
8.6.2	短基线相对轨道摄动重力场测量任务参数的优化设计方法	329
8.7	典型重力卫星任务轨道与数据产品	330
8.7.1	GOCE 卫星任务轨道	330
8.7.2	GOCE 卫星重力场测量数据产品及性能分析	333
参考文献		343
第 9 章 三种天基重力场测量方法的内在联系及统一描述		345
9.1	概述	345
9.2	绝对和迹向长基线相对轨道摄动重力场测量的内在联系	345
9.2.1	绝对和长基线相对轨道摄动重力场测量内在联系的定性分析	345
9.2.2	长基线相对轨道摄动到绝对轨道摄动重力场测量参数的变换	346
9.2.3	绝对轨道摄动到长基线相对轨道摄动重力场测量参数的变换	351
9.3	长基线和短基线相对轨道摄动重力场测量的内在联系	354
9.3.1	迹向长基线、短基线相对轨道摄动重力场测量参数的转换	354

9.3.2 法向长基线、短基线相对轨道摄动重力场测量参数的转换	365
9.3.3 径向长基线、短基线相对轨道摄动重力场测量参数的转换	365
9.4 径向和迹向短基线相对轨道摄动重力场测量的内在联系	368
9.5 天基重力场测量的统一描述体系	369
第 10 章 卫星编队动力学基础	371
10.1 卫星编队飞行	371
10.1.1 卫星编队飞行的概念	371
10.1.2 卫星编队飞行的优势	373
10.1.3 卫星编队任务与计划	374
10.2 基于动力学方法的卫星相对运动分析	379
10.2.1 圆参考轨道下的卫星相对运动模型	380
10.2.2 椭圆参考轨道下的相对运动模型	384
10.2.3 考虑 J_2 摄动的卫星相对运动模型	387
10.2.4 考虑大气阻力摄动的卫星相对运动模型	392
10.3 基于运动学方法的卫星相对运动分析	397
10.4 卫星编队构形设计方法	401
10.5 典型的重力场测量卫星编队构形	403
参考文献	408
第 11 章 卫星编队重力场测量解析建模与性能最优设计方法	414
11.1 卫星编队重力场测量的基本概念	414
11.2 卫星编队重力场测量性能的解析模型	415
11.3 重力场测量卫星编队构形优化设计与载荷匹配设计方法	419
11.3.1 卫星编队任务参数对重力场测量性能的影响规律	419
11.3.2 卫星编队重力场测量的约束条件	432
11.3.3 重力场测量卫星编队构形优化设计方法	433
11.3.4 重力场测量卫星编队载荷匹配设计方法	437
11.4 重力场测量卫星编队构形长期自然维持策略	437
11.5 卫星编队重力场测量的基本构形	440
11.6 设计案例:面向地震研究的天基重力场测量任务设计	443
11.6.1 重力场测量任务的目标	443
11.6.2 重力场测量任务的工程约束	443
11.6.3 综合多种观测手段的重力场测量任务优化设计	444
11.6.4 卫星编队重力场测量任务设计结果	449
参考文献	450

第 12 章 基于天基观测的地球重力场反演理论	451
12.1 概述	451
12.2 绝对轨道摄动重力场反演的数学模型	452
12.2.1 Kaula 线性摄动法	452
12.2.2 能量守恒法	456
12.2.3 动力学方法	459
12.2.4 短弧边值法	467
12.2.5 加速度法	470
12.3 长基线相对轨道摄动重力场反演的数学模型	474
12.3.1 Kaula 线性摄动法	474
12.3.2 能量守恒法	477
12.3.3 动力学方法	479
12.3.4 短弧边值法	482
12.3.5 加速度法	486
12.4 短基线相对轨道摄动重力场反演的数学模型	488
12.5 卫星编队重力场反演的数学模型	489
12.6 重力场测量观测方程中引力位系数的排列	490
12.6.1 以阶数为主的位系数排列	490
12.6.2 以次数为主的位系数排列	492
参考文献	493
第 13 章 内编队重力场测量系统	495
13.1 内编队纯引力轨道构造与重力场测量	495
13.2 内编队重力场测量系统概述	496
13.2.1 内编队系统组成	496
13.2.2 内编队重力场测量任务目标	497
13.2.3 内编队系统任务参数设计	497
13.3 内卫星	499
13.3.1 内卫星所处腔体环境	499
13.3.2 内卫星参数	500
13.3.3 金铍合金内卫星加工	503
13.3.4 金铍合金的物理性能	504
13.3.5 内卫星锁紧释放机构	506
13.4 外卫星	509
13.4.1 外卫星结构	509

13.4.2	外卫星尾翼优化设计	511
13.4.3	外卫星热控对结构的要求	511
参考文献		513
第 14 章 内卫星非引力干扰建模与抑制方法		514
14.1	内卫星纯引力轨道飞行干扰源	514
14.2	外卫星万有引力精确计算与摄动抑制方法	515
14.2.1	外卫星万有引力作用的物理规律	516
14.2.2	外卫星万有引力对内卫星纯引力轨道飞行的影响	518
14.2.3	基于质点假设的外卫星万有引力计算误差分析	518
14.2.4	基于 CAD 模型的外卫星万有引力计算方法	525
14.2.5	基于质量特性的外卫星万有引力计算方法	528
14.2.6	基于补偿质量块的外卫星万有引力抑制方法	534
14.2.7	基于外卫星自旋的万有引力抑制方法	538
14.2.8	外卫星万有引力摄动地面检验方法	541
14.2.9	外卫星万有引力摄动在轨飞行验证方法	542
14.3	内卫星热噪声的数学模型与抑制方法	549
14.3.1	内卫星辐射计效应	549
14.3.2	内卫星热辐射压力	556
14.3.3	内卫星残余气体阻尼	558
14.3.4	内卫星辐射计效应和气体阻尼的耦合作用	559
14.4	内卫星电磁非引力干扰分析与抑制	568
14.4.1	电磁干扰力建模	568
14.4.2	基于金钎合金的内卫星电磁干扰力抑制	569
14.5	测量光压建模与抑制	572
14.6	宇宙射线撞击	573
14.7	出气效应分析与抑制	574
14.8	内卫星非引力干扰综合分析	575
14.8.1	内卫星各非引力干扰汇总	575
14.8.2	内卫星非引力干扰的量级排序及耦合性分析	576
参考文献		579
第 15 章 内编队相对状态测量与飞行控制技术		581
15.1	概述	581
15.2	内编队动力学建模与分析	584
15.2.1	内编队系统编队动力学模型	584

15.2.2	内编队系统相对姿态动力学模型	585
15.2.3	内编队摄动干扰力模型	586
15.3	内外卫星相对状态测量方法	589
15.3.1	内外卫星相对状态测量的意义	589
15.3.2	红外被动成像测量方法	589
15.3.3	基于光束能量的内外卫星相对状态测量方法	603
15.3.4	内外卫星相对状态确定的滤波方法	606
15.4	内编队飞行控制方法	610
15.4.1	时变系统控制理论	610
15.4.2	内编队非线性控制算法设计	611
15.4.3	仿真计算及分析	616
15.5	内编队系统姿态轨道一体化控制方法	618
15.5.1	基于微推力器组合的姿轨一体化控制总体方案	619
15.5.2	姿轨一体化控制算法设计	621
15.5.3	姿轨一体化推力分配算法设计	622
15.5.4	仿真计算及分析	623
	参考文献	625
	附录 A 内符合标准下的全球重力场模型性能	628
	附录 B 缩写词	697
	索引	701
	彩图	

第1章 绪 论

1.1 地球重力场测量的意义

重力场是地球内部物质分布和地球旋转运动的反映,决定了地球内部及其周围的诸多物理事件^[1]。地球重力场是大地测量学、地球物理学、大气学、海洋学、冰川学等地球科学研究的基础信息^[2],广泛应用于自然灾害预报、矿产资源勘探、大型工程实施等国民经济和社会发展的方面,同时是洲际导弹远程精确打击、潜射导弹发射、水下重力匹配导航、天基武器精密定轨等军事行动的必要信息^[3,4]。由此可见,重力场是地球空间极为重要的基础物理信息,也是关系国民经济和社会发展和国防安全的重要战略信息。

因此,重力场测量历来为世界各国高度重视,其测量手段从地面重力测量逐步发展到航空重力测量、海洋重力测量和卫星重力测量,获取了精度、分辨率越来越高的重力场模型,尤其是基于卫星观测数据得到的全球高精度重力场模型,有力地推动了地球科学研究、自然灾害预报、矿产资源勘探、高精度武器装备建设等方面的快速发展。

1.1.1 地球科学研究

地球科学研究涉及的范围很广,包括大地测量学、地球物理学、地质学、大气学、海洋学、冰川学、水文学等。这些学科研究与地球相关的各种自然现象,其中高精度重力场模型是重要的基础信息。地球科学研究对重力场模型的需求如表 1.1 所示^[5]。随着重力测量技术的发展,获取的重力场模型精度、空间分辨率、时间分辨率均大幅提高,极大地推动了地球科学研究的发展。根据由卫星重力测量得到的高精度时变全球重力场模型,可以分析地表和地下水资源的运动变化,从而使水文学研究的尺度从传统的数十公里扩展到局部区域甚至全球尺度^[6]。文献[7]将卫星重力测量数据引入地球动力学研究,解决了长期困扰的大陆构造动力学中的边界条件选取问题。文献[8]基于卫星重力观测数据建立了全球地貌动力学模型,显示了全球海洋稳态环流的基本特征。文献[9]和文献[10]利用重力测量数据首次得到了南极、格陵兰冰盖质量的变化趋势,为准确掌握全球冰川增融变化提供了第一手资料。同时,重力测量数据为研究地球内部的质量分布、质量迁移提供了重要的手段^[11]。更多的文献表明,重力场测量为地球科学研究提供了基本科学

数据和研究手段,是其不断发展、不断进步的推动力。

表 1.1 地球科学研究对地球重力场模型的需求

	科学领域	空间分辨率 需求/km	时变需求	大地水准面和 重力异常需求	备注
固体地球物理学	冰川均衡调整	>500	$10^4 \sim 10^5$ 年	$1 \sim 10 \mu\text{m}/\text{年}$	总的大地水准面变化为 $1 \sim 2 \text{mm}/\text{年}$
	地震	局部区域	瞬时~几十年	$0.1 \sim 1 \text{mm}$	需要实时监测
	板块构造、地幔运动、火山构造	>10	瞬时,百年	$<1 \text{mm}/\text{年}$	需要实时监测
	地核运动	>5000	$10 \text{s} \sim 18$ 年	$1 \text{nGal} \sim 1 \mu\text{Gal}$	
水文学	地面水迁移、土壤湿度等	$10 \sim 5000$	$1 \text{h} \sim \text{百年}$	$0.5 \sim 1 \text{mm}$	对空间分辨率的要求比对精度的要求更高
海洋学	海水流动、地形测量	$20 \sim 50$	准静态	$5 \sim 10 \text{mm}$	
	大陆架测定	$10 \sim 50$	准静态	$5 \sim 10 \text{mm}$	
	海洋涡流	$10 \sim 100$	准静态	$5 \sim 10 \text{mm}$	
	海水深度测量	$1 \sim 10$	静态	—	
	海盆质量迁移	$1000 \sim 5000$	数月~几十年	10mm	
	海底地形变化	$10 \sim 200$	数月~几十年	$0.1 \sim 1 \text{mm}$	
	全球海平面监测	>2000	数年~数百年	$0.1 \text{mm}/\text{年}$	需要实时监测
冰川学	冰层质量变化	$100 \sim 4000$	季节性	$<0.01 \text{mm}/\text{年}$	需要实时监测
	冰层底部地形	$20 \sim 50$	准静态	$0.01 \sim 0.1 \text{mGal}$	
	海冰表面	$10 \sim 100$	静态	100mm	
大地测量学	全球定位	$20 \sim 50$	静态	$5 \sim 20 \text{mm}$	
	惯性导航	$5 \sim 10$	静态	0.1mGal	需要结合地面测量数据

注: $1 \text{Gal} = 1 \text{cm}/\text{s}^2$ 。

1.1.2 地质灾害预报

地球重力场可以反映地球板块的内部构造及其运动,并与地表附近大气、水文、洋流等运动密切相关,因此,基于高精度重力场模型可以进行地震、洪水、台风等自然灾害预测。文献[12]研究了2011年日本东北部海域地震前3个月的海洋重力测量数据,发现了该区域的重力异常变化,并分析指出这一变化是由海底隆起或板块断面处的密度增加引起的。文献[13]分析了2010~2012年川西地区的局部重力场变化,并指出该变化是2013年4月20日四川省芦山县7.0级地震孕育