

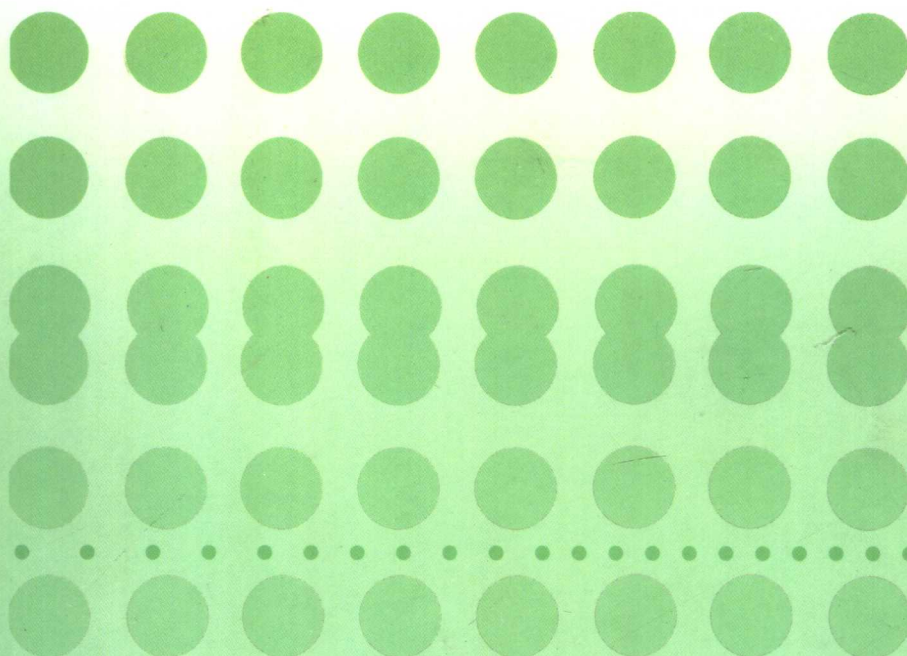
测绘科技专著出版基金资助

海洋重力场测定 及其应用

黄谟涛 翟国君 管 铮

欧阳永忠 刘雁春 编著

HAIYANG ZHONGLICHANG CEDING JIQI YINGYONG HAIYANG ZHONGLICHANG CEDING



测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

海洋重力场测定及其应用

HAIYANG ZHONGLICHANG CEDING JIQI YINGYONG

黄谟涛 翟国君 管 铮
欧阳永忠 刘雁春 编著

测 绘 出 版 社

· 北京 ·

内容简介

海面重力测量和卫星测高重力反演是目前测定海洋重力场的两种主要技术手段。本书主要围绕上述两种测量手段详细论述了海洋重力场的测定理论、方法及其应用。全书由三大部分组成,第一部分为基础理论部分,主要介绍测定海洋重力场必须掌握的基本概念和基本理论,以及海洋重力场测定的主要手段、方法及其特点;第二部分为基本方法部分,主要介绍测定海洋重力场使用的仪器设备,以及海洋重力测量数据处理的理论与方法;第三部分为实际应用部分,主要介绍海洋重力场信息在局部重力场逼近、全球重力场表示以及高空扰动场赋值等三大研究领域中的详细应用。

本书体系完整,内容充实,理论与实用并重,可供从事物理大地测量学、海洋大地测量学、海洋地球物理学、海洋学和航空航天科学等学科的科研和教学人员以及相关学科的应用工作者参考。

© 黄谟涛 翟国君 管铮 欧阳永忠 刘雁春 2005

图书在版编目(CIP)数据

海洋重力场测定及其应用/黄谟涛等编著. —北京:
测绘出版社, 2005. 3

ISBN 7-5030-1239-0

I. 海... II. 黄... III. 海洋测量:重力测量
IV. P223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 008764 号

海洋重力场测定及其应用

黄谟涛 翟国君 管铮 欧阳永忠 刘雁春 编著

测绘出版社出版发行

地址:北京市西城区复外三里河路 50 号 邮编:100045

电话:(010)68512386 68531558 网址:www.sinomaps.com

北京通州区次渠印刷厂印刷

新华书店经销

开本:890mm×1240mm 1/16 印张:21 字数:638 千字

2005 年 3 月第 1 版

2005 年 3 月第 1 次印刷

印数:0001—2000 册

ISBN 7-5030-1239-0/P·395

定价:53.00 元

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

序

地球重力场的知识是大地测量学、地球物理学、海洋学和空间科学以及地球动力学和其他有关的工程学科所必需的基础信息。地球重力场的理论对这些学科的研究和发展具有十分重要的作用。然而地球表面有 70% 以上的面积是海洋, 因此海洋重力场的确定是研究全球重力场的非常重要的组成部分。自从 1923 年, 费宁-梅内斯(Vening Meinesz)使用摆仪在潜艇上成功地进行了第一次海上重力测定以来, 海洋重力测量的技术手段及其获取海洋重力数据的分辨率和精度等都在日益精化和提高, 与之相应地确定海洋重力场精细结构的理论和方法也在不断出新。由黄谟涛、翟国君等几位年轻学者合作编著的《海洋重力场测定及应用》一书是作者多年积累的高水平研究成果的总结。本书从理论和实践两个方面对海洋重力测量数据的获取、处理和分析, 以及由海面重力测量和卫星测高技术所获取的海洋重力场信息在局部地球重力场的逼近、全球重力场的表示和高空扰动场赋值求解和应用做了系统而全面的论述, 其中有许多内容是作者已经获得的有突破性进展的科研成果, 由此, 本书的内容反映了当今国际上这个研究领域的先进学术水平。其主要特点是内容系统全面, 取材先进, 理论和实践结合, 具有较高的实用性, 最后还对当前正在发展和已实现的卫星重力探测技术作了展望性的阐述, 使本书更加全面和具有前瞻性。从我不太全面的了解, 我认为至少在国内目前尚未有一本在这一研究领域涵盖如此系统全面的著作。本书的出版对于进一步提高我国海洋重力测量的研究和应用水平具有很好的参考和实用价值。

本书作者所在单位是我国从事海洋测绘(包括海洋重力测量)的教学和科研单位, 在海洋重力测量的研究和应用方面具有很好的技术和人才条件, 而本书作者都是从事海洋大地测量教学和研究的中青年科研和教学骨干, 具有较丰富的科研经验和较强的业务能力。此前已累计发表过上百篇学术论文, 并有著作出版, 这一切都为撰写本书奠定了很好的基础。事实证明, 这是一本质量颇高的好书, 希望对广大读者有参考阅读价值, 能从中得到一点启发。

宁津生

2004 年 7 月 16 日

于武汉大学

* 宁津生 中国工程院院士, 原武汉测绘科技大学校长、全国高等学校测绘类专业教学指导委员会主任。

前 言

地球重力场是地球固有的物理特性之一,它反映地球内部物质分布、运动及其变化状态,并制约地球自身及其邻近空间中的一切物理事件,因此确定地球重力场历来是大地测量学、地球物理学、海洋学和空间科学以及地球动力学研究的重要课题。

海洋重力场测定是地球重力场学科研究的重要组成部分。准确掌握海洋重力场的精细结构,对于深入研究地球形状与地球内部构造、探查丰富的海洋资源、保障航天和战略武器发射等诸多应用领域都具有非常重要的意义。

海洋重力测量是在陆地重力测量基础上发展起来的,因此陆地重力测量的许多技术手段和方法可以在海洋重力测量中得到应用。随着空间技术的发展,人们除了可通过常规的海底和海面重力测量手段获得海洋重力场信息以外,航空和卫星重力探测技术是目前解决全球高覆盖率和高分辨率重力测量最为有效的途径,特别是各种类型的卫星重力探测技术,这些技术主要包括: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。上述测量手段各有特点,其应用范围也略有差异,但可以肯定的是,海面船载重力测量和卫星测高重力反演仍是当今测定海洋重力场的两种主要技术手段。本书主要围绕上述两种测量手段全面论述了海洋重力场的测定理论、方法及其应用。

全书由三大部分组成,第一部分为基础理论部分,主要介绍测定海洋重力场必须掌握的基本概念和基本理论,以及海洋重力场测定的主要手段、方法及其特点;第二部分为基本方法部分,主要介绍测定海洋重力场使用的仪器设备,以及海洋重力测量数据处理的理论与方法;第三部分为实际应用部分,主要介绍海洋重力场信息在局部重力场逼近、全球重力场表示以及高空扰动场赋值等三大研究领域中的详细应用。

本书是作者从事海洋重力场研究工作的学术总结,在多个研究领域取得了突破性的进展,建立了一套比较完整的海洋重力测量数据处理理论体系,在海洋重力测量网平差、海洋重力测量质量控制,利用卫星测高资料反演海洋重力异常,利用海洋重力数据反演海底地形,综合利用海面重力测量数据和卫星测高重力异常计算海洋大地水准面和垂线偏差、扩展超高阶地球重力场模型,以及高空扰动场研究等多个方面都取得了实质性的研究成果,不仅丰富了海洋重力场的测定理论,也从不同侧面丰富了整个地球重力测量学研究的理论体系。

本书的研究内容及创新点主要包括以下几个方面:

(1)深入分析了海洋重力场测定方法的主要特点和误差特性,系统论述了海洋重力场研究的主要进展,并且展望了未来的发展方向。

(2)介绍了海洋重力场测量的基本理论和基本方法,分析了各种类型海洋重力场测量设备的技术特点和使用原则。

(3)全面研究了海洋重力测量数据处理的理论和方法。提出采用傅里叶级数模型描述测量航迹线的变化,并进行重力测线平差计算;提出采用方差分析方法进行海洋重力测量半系统误差检验;提出采用现代抗差估计理论对海洋重力测量异常数据进行定位,从而开辟了海洋测量成果质量控制和可靠性研究新领域。

(4)深入分析了海洋重力测量的误差特征,建立起了比较完善的海洋重力测线网平差理论体系。首先从分析引起交叉点不符值的物理和几何因素出发,提出了同时顾及重力测点误差直接影响和间接影响的联合平差方案;在此基础上,又在更广泛的意义上进一步讨论了海洋重力测量中的交叉点平差问题,提出了自检校测线网平差方法;基于工程化应用的需要,作者最后提出更加实用化的海洋重力测量误差补偿两步处理法。这些新理论和新方法的推广应用对提高我国海洋重力测量的整体水平起到了重要作用。

(5)在利用卫星测高数据反演海洋重力异常研究方面,本书给出了斯托克斯(Stokes)数值反解、斯托克斯解析反解和逆费宁-梅内斯三种计算模型的谱计算式;在标准场中完成了各种算法的全面比较和评价;通过模拟仿真完成了各种方法的可靠性和稳定性检验;完成了由统一处理得到的卫星测高数据,

通过三种反演技术推求我国南部海域 $2' \times 2'$ 网格重力异常的计算;给出了卫星测高重力异常与船测重力异常的比对和检验结果。

(6)在利用海洋重力数据反演海底地形研究方面,本书首先论述了利用海洋重力异常反演海底地形两类常用算法即解析算法和统计算法的基本原理和数学模型,在此基础上基于现代最小二乘配置理论,提出使用完整的带有非随机参数的最小二乘配置模型,进行海底地形迭代反演计算,并将反演结果与实际船测水深进行比对,取得了比较满意的效果。

(7)在利用海洋重力数据和卫星测高重力异常计算海洋大地水准面和垂线偏差研究方面,本书全面推导了重力场逼近二维平面快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,简称FFT)算式的严密公式;指出了传统二维球面快速傅里叶变换算法的主要缺陷;给出了二维球面快速傅里叶变换算法的改进公式;导出了地球重力场逼近计算误差估计通式。

(8)在利用海洋重力数据和卫星测高重力异常扩展超高阶地球重力场模型研究方面,本书提出了位模型全球改善新思路,完善并扩展了位模型局部改善的理论和方法;提出了超高阶勒让德(Legendre)函数计算精度的检核方法,实现了超高阶勒让德函数的数值计算;在位模型计算中,成功采用了快速傅里叶变换技术,使超高阶地球重力场模型解算得以在普通微型机上实现;在国内率先实现了完整到1800阶次超高阶地球重力场模型的解算,获得模型系数总数达320多万个;提出了超高阶地球重力场模型的检核方法,给出了1800阶次位模型的内部和外部检核结果;完成了超高阶地球重力场模型的频谱分析和计算,进一步肯定了超高阶位模型在刻画地球重力场结构特征中的作用和贡献。

(9)在利用海洋重力测量信息开展高空扰动场赋值研究方面,本书在对高空扰动场各种赋值模式进行全面分析和比较研究的基础上,重点探讨了点质量表达式的技术特点和工程化应用的可能性,深入研究了点质量表达模式的构制方法,给出了点质量模式的优化结构,提出了点质量模型的序贯解法,突破了推广使用点质量赋值模式的主要障碍。

当前卫星重力探测技术发展很快,作者为此在最后加上一章有关卫星重力探测技术展望的研究内容,使本书更加全面和具有前瞻性。

本书材料主要来源于作者多年积累的多项科研报告和几十篇学术论文,同时吸收国内外最新的相关研究成果。本书使用大量的实际算例充分验证了作者提出的研究新思路和新方法的正确性和有效性。

在本书撰写过程中,作者得到了武汉大学宁津生院士、西安测绘研究所杨元喜教授、海军大连舰艇学院梁开龙教授等人的指导和帮助,在此深表谢意。

鉴于作者学术水平有限,加之收集的研究资料还不够齐全,疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2004年8月于天津

目 录

第1章 绪 论	(1)
§ 1.1 海洋重力场测定的任务和作用	(1)
1.1.1 海洋重力场测定的任务	(1)
1.1.2 重力测量与自然科学	(1)
1.1.3 重力测量与大地测量	(1)
1.1.4 重力测量与地球物理	(2)
1.1.5 重力测量与地球动力学	(2)
1.1.6 重力测量与空间科学	(2)
§ 1.2 海洋重力场测定的手段和方法	(3)
1.2.1 海底重力测量	(3)
1.2.2 海面(船载)重力测量	(3)
1.2.3 海洋航空重力测量	(4)
1.2.4 重力梯度测量	(5)
1.2.5 卫星测高重力测量	(5)
§ 1.3 海洋重力测量的特点	(6)
1.3.1 水平加速度影响	(6)
1.3.2 垂直加速度影响	(6)
1.3.3 交叉耦合效应影响	(7)
1.3.4 厄特弗斯效应影响	(7)
1.3.5 海洋重力测量的特点	(7)
§ 1.4 海洋重力场测定技术研究进展及评述	(8)
1.4.1 海面重力测量技术研究进展	(8)
1.4.2 卫星测高反演海洋重力场技术研究进展	(10)
§ 1.5 本书的主要内容	(11)
第2章 海洋重力场测定的基本概念	(13)
§ 2.1 重力加速度和重力位	(13)
2.1.1 重力加速度	(13)
2.1.2 重力位	(14)
§ 2.2 重力场的几何学	(15)
2.2.1 水准面和铅垂线的定义	(15)
2.2.2 水准面与铅垂线的几何特性	(16)
§ 2.3 重力位的球谐展开式	(18)
2.3.1 球谐展开式的定义	(18)
2.3.2 球谐系数的物理意义	(19)
§ 2.4 正常重力场	(21)
2.4.1 正常重力场的定义	(21)
2.4.2 正常重力公式	(21)
2.4.3 正常引力位级数式	(24)
2.4.4 正常重力场的几何特征	(24)
§ 2.5 重力场中的各种扰动量	(27)
2.5.1 扰动位	(27)
2.5.2 大地水准面差距	(27)

2.5.3 垂线偏差·····	(28)
2.5.4 高程异常·····	(29)
2.5.5 扰动重力和重力异常·····	(30)
2.5.6 重力基本微分方程·····	(30)
§ 2.6 重力测量参考系统·····	(31)
§ 2.7 本章小结·····	(32)
第3章 海洋重力场测定的基本理论 ·····	(33)
§ 3.1 引言·····	(33)
§ 3.2 位理论边值问题的基本类型及其球面解·····	(34)
3.2.1 边值问题的基本类型·····	(34)
3.2.2 边值问题的存在性·····	(34)
3.2.3 边值问题的球面解·····	(35)
§ 3.3 斯托克斯边值理论·····	(37)
3.3.1 基本概念·····	(37)
3.3.2 斯托克斯公式·····	(38)
3.3.3 广义斯托克斯公式·····	(39)
3.3.4 垂线偏差和扰动重力的球面近似解·····	(41)
§ 3.4 莫洛坚斯基边值理论·····	(43)
3.4.1 基本概念·····	(43)
3.4.2 简化的莫洛坚斯基问题解·····	(43)
3.4.3 扰动位计算公式小结·····	(47)
3.4.4 高程异常和地面垂线偏差计算公式·····	(47)
§ 3.5 莫洛坚斯基与斯托克斯问题解的关系·····	(48)
3.5.1 关于高程系统·····	(48)
3.5.2 关于重力异常·····	(49)
3.5.3 关于大地水准面差距和高程异常·····	(49)
3.5.3 关于莫洛坚斯基一阶级数解和地形改正解·····	(50)
§ 3.6 霍丁边值理论·····	(52)
3.6.1 霍丁公式·····	(52)
3.6.2 采用重力异常的霍丁公式·····	(53)
3.6.3 关于斯托克斯公式和霍丁公式的说明·····	(54)
§ 3.7 布耶哈马边值理论·····	(55)
§ 3.8 重力场边值理论研究的进展·····	(57)
§ 3.9 本章小结·····	(59)
第4章 海洋重力测量仪器 ·····	(60)
§ 4.1 气压式海洋重力仪与海洋摆仪·····	(60)
§ 4.2 海底重力仪·····	(61)
§ 4.3 KSS5 型海洋重力仪·····	(62)
§ 4.4 L&R 海洋重力仪·····	(64)
§ 4.5 KSS30 型海洋重力仪·····	(66)
§ 4.6 BGM-3 型海洋重力仪·····	(68)
§ 4.7 CHZ 型海洋重力仪·····	(69)
§ 4.8 振弦型海洋重力仪·····	(71)
§ 4.9 S 型海洋重力仪·····	(73)
4.9.1 摆杆式重力传感器·····	(73)

4.9.2	测量原理	(73)
4.9.3	摆杆摆动速度测量机理	(73)
4.9.4	S型重力仪标定	(74)
§ 4.10	海洋重力仪的检定	(74)
§ 4.11	海洋重力仪的安装与操作	(76)
4.11.1	海洋重力仪安装	(76)
4.11.2	S型海洋重力仪操作	(77)
4.11.3	S型海洋重力仪港内检验	(77)
4.11.4	重力基点比对	(79)
4.11.5	S型海洋重力仪海上测量	(80)
4.11.6	使用S型海洋重力仪系统注意事项	(81)
4.11.7	S型海洋重力仪维护保养	(81)
§ 4.12	本章小结	(82)
第5章	海洋重力测量技术设计和数据处理	(83)
§ 5.1	海洋重力测量的技术设计	(83)
5.1.1	海洋重力测量的任务要求	(83)
5.1.2	海洋重力测量的精度要求	(83)
5.1.3	海洋重力测量的密度要求	(84)
5.1.4	海洋重力测量技术设计要求	(84)
§ 5.2	海洋重力测量测线布设	(85)
§ 5.3	海洋重力测量数据的预处理	(88)
5.3.1	重力基点比对	(88)
5.3.2	重力仪滞后效应校正	(89)
5.3.3	重力仪零点漂移改正	(89)
5.3.4	测量船吃水改正	(89)
§ 5.4	航迹线拟合及航向、航速计算	(90)
5.4.1	一般多项式和正交多项式拟合法	(90)
5.4.2	样条函数拟合法	(91)
5.4.3	三角多项式拟合法	(92)
5.4.4	航速和航向计算	(92)
§ 5.5	厄特弗斯改正	(93)
5.5.1	厄特弗斯改正计算公式	(93)
5.5.2	厄特弗斯改正计算误差分析	(93)
§ 5.6	海洋重力异常计算	(95)
5.6.1	海洋重力测点绝对重力值计算	(95)
5.6.2	海洋空间重力异常计算	(96)
5.6.2	海洋布格重力异常计算	(98)
§ 5.7	海洋重力测量精度评估	(99)
5.7.1	重力测线相交点计算	(99)
5.7.2	计算程序设计思想	(100)
5.7.3	精度估算公式	(101)
§ 5.8	抗差估计在海洋重力测量粗差定位中的应用	(101)
5.8.1	概述	(101)
5.8.2	方法介绍	(102)
5.8.3	试验与应用	(105)

§ 5.9 海洋重力测量半系统差检验与计算	(107)
5.9.1 测线系统误差调整原理	(108)
5.9.2 测线系统差显著性检验	(110)
5.9.3 精度评定公式	(111)
5.9.4 算例	(112)
§ 5.10 海洋重力测线网平差	(114)
5.10.1 测线网平差基本方程	(114)
5.10.2 交叉点条件方程的具体形式	(115)
5.10.3 算例	(116)
§ 5.11 海洋重力测量网自检校平差	(118)
5.11.1 误差分析与误差模型的确定	(118)
5.11.2 自检校测线网平差	(119)
5.11.3 验后补偿法	(122)
5.11.4 算例与讨论	(122)
5.11.5 结论	(124)
§ 5.12 海洋重力测量误差补偿两步处理法	(124)
5.12.1 引言	(124)
5.12.2 误差补偿两步处理法	(125)
5.12.3 算例	(126)
5.12.4 结论	(128)
§ 5.13 本章小结	(128)
第 6 章 海洋重力测量数据计算与管理	(129)
§ 6.1 海洋重力异常内插与推值	(129)
6.1.1 解析推值	(129)
6.1.2 统计推值	(130)
6.1.3 解析推值与统计推值的关系	(132)
§ 6.2 海洋平均重力异常计算与精度估计	(132)
6.2.1 计算方法	(133)
6.2.2 精度估计	(135)
6.2.3 实际计算	(136)
§ 6.3 利用位模型计算平均重力异常	(136)
6.3.1 计算公式	(137)
6.3.2 勒让德函数积分值算式	(139)
6.3.3 Clenshaw 求和	(141)
6.3.4 重力异常分辨率与球谐函数展开阶数的关系	(143)
6.3.5 实际计算	(144)
§ 6.4 海洋重力测量数据库	(145)
6.4.1 引言	(145)
6.4.2 数据库组成	(145)
6.4.3 数据库功能	(145)
6.4.4 数据库设计思想	(146)
6.4.5 数据库结构	(146)
§ 6.5 本章小结	(152)
第 7 章 利用卫星测高技术测定海洋重力场	(153)
§ 7.1 引言	(153)

§ 7.2 斯托克斯数值反解公式及其谱计算式	(154)
7.2.1 基本公式	(154)
7.2.2 改进公式	(156)
7.2.3 内环数值计算	(156)
§ 7.3 斯托克斯解析反解公式及其谱计算式	(157)
7.3.1 基本公式	(157)
7.3.2 改进公式	(158)
§ 7.4 逆费宁-梅内斯公式及其谱计算式	(158)
7.4.1 基本公式	(158)
7.4.2 改进公式	(159)
§ 7.5 计算模型数值检验	(160)
7.5.1 斯托克斯数值反解公式数值检验	(160)
7.5.2 斯托克斯解析反解公式数值检验	(160)
7.5.3 逆费宁-梅内斯公式数值检验	(164)
§ 7.6 计算模型稳定性检验	(169)
7.6.1 斯托克斯数值反解公式误差影响检验	(169)
7.6.2 斯托克斯解析反解公式误差影响检验	(169)
7.6.3 逆费宁-梅内斯公式误差影响检验	(170)
7.6.4 基本结论	(171)
§ 7.7 卫星测高反演海洋重力异常实际计算	(171)
7.7.1 原始观测数据概况	(171)
7.7.2 南中国海重力异常实际反演	(172)
7.7.3 计算精度外部检核	(172)
§ 7.8 本章小结	(175)
第8章 利用卫星测高资料反演海底地形研究	(176)
§ 8.1 引言	(176)
§ 8.2 反演海底地形基本原理与数学模型	(176)
8.2.1 解析算法模型	(176)
8.2.2 统计算法模型	(177)
§ 8.3 实际计算与外部精度检核	(178)
§ 8.4 本章小结	(180)
第9章 海洋重力场数据在局部重力场逼近计算中的应用	(181)
§ 9.1 引言	(181)
§ 9.2 利用快速傅里叶变换技术计算大地水准面高	(182)
9.2.1 二维球面快速傅里叶变换计算公式的改进	(182)
9.2.2 数值计算稳定性试验	(189)
9.2.3 大地水准面计算中各种参数的选择	(190)
9.2.4 实际计算	(192)
§ 9.3 利用快速傅里叶变换技术计算重力垂线偏差	(193)
9.3.1 计算公式的改进	(193)
9.3.2 数值计算稳定性试验	(195)
9.3.3 垂线偏差计算中几个具体问题的讨论	(196)
9.3.4 实际计算	(198)
§ 9.4 利用快速傅里叶变换技术计算重力地形改正	(198)
9.4.1 数学模型	(199)

9.4.2	数值试验	(201)
9.4.3	计算模型稳定性试验	(204)
§ 9.5	利用快速傅里叶变换技术计算大地水准面间接影响	(205)
9.5.1	数学模型	(205)
9.5.2	数值试验	(205)
9.5.3	计算模型稳定性试验	(207)
§ 9.6	地球重力场逼近计算误差估计通式	(207)
§ 9.7	本章小结	(210)
第 10 章	海洋重力场数据在全球重力场逼近计算中的应用	(212)
§ 10.1	引言	(212)
§ 10.2	全球重力场模型的作用	(213)
10.2.1	在大地测量学中的应用	(213)
10.2.2	在卫星轨道计算中的应用	(213)
10.2.3	在现代武器发射中的应用	(214)
10.2.4	在地球物理学中的应用	(214)
10.2.5	在海洋学研究中的应用	(214)
§ 10.3	全球重力场模型研究进展及评述	(214)
10.3.1	早期的地面重力异常球谐分析	(215)
10.3.2	早期的卫星位模型和地面—卫星综合模型	(215)
10.3.3	20 世纪 70 年代的进展	(216)
10.3.4	20 世纪 80 年代的进展	(217)
10.3.5	20 世纪 90 年代的进展	(218)
10.3.6	近期展望	(220)
§ 10.4	全球重力场模型的求解技术	(220)
10.4.1	建立全球重力场模型的基本理论和方法	(221)
10.4.2	低阶次重力场模型的求解技术	(227)
10.4.3	高阶次重力场模型的求解技术	(230)
§ 10.5	最新全球重力场模型 EMG96 介绍与分析	(232)
10.5.1	数据使用情况	(233)
10.5.2	求解方法	(235)
10.5.3	模型检核	(236)
§ 10.6	全球重力场模型使用中的若干问题	(237)
10.6.1	零阶项影响	(237)
10.6.2	大地水准面与高程异常的联系	(238)
10.6.3	潮汐系统转换	(238)
10.6.4	位模型单独使用中的优化问题	(239)
10.6.5	位模型与地面重力数据联合使用中的优化问题	(240)
§ 10.7	扩展超高阶地球重力场模型的理论与实践	(242)
10.7.1	计算公式	(242)
10.7.2	计算公式的实现	(244)
10.7.3	勒让德函数计算精度检核	(245)
10.7.4	数据准备	(246)
10.7.5	模型解算	(247)
10.7.6	模型检验	(248)
10.7.7	模型功率谱分析	(253)

§ 10.8 本章小结 (257)

第 11 章 海洋重力场数据在外部重力场逼近计算中的应用 (258)

§ 11.1 引言..... (258)

§ 11.2 利用地球重力场位模型计算扰动重力..... (258)

§ 11.3 利用斯托克斯积分法计算扰动重力..... (260)

11.3.1 经典的直接积分法赋值模式 (260)

11.3.2 非奇异的直接积分法赋值模式..... (261)

11.3.3 直接积分法精度估计..... (263)

§ 11.4 利用点质量表达法计算扰动重力..... (266)

11.4.1 基本方程..... (266)

11.4.2 误差分析与结构优化..... (267)

11.4.3 点质量模型构制..... (270)

11.4.4 点质量解算..... (275)

11.4.5 联合使用重力异常和高程异常求解点质量..... (282)

11.4.6 地形在点质量解算中的影响..... (285)

11.4.7 点质量模型检验..... (289)

11.4.8 模型精度分析..... (296)

§ 11.5 本章小结..... (302)

第 12 章 卫星重力探测技术研究现状与展望 (303)

§ 12.1 引言..... (303)

§ 12.2 卫星跟踪卫星测量技术..... (303)

§ 12.3 卫星重力梯度测量技术..... (305)

§ 12.4 卫星重力测量数据处理技术研究进展..... (306)

§ 12.5 本章小结..... (309)

参考文献..... (310)

第1章 绪论

§ 1.1 海洋重力场测定的任务和作用

1.1.1 海洋重力场测定的任务

海洋重力测量是地球重力测量学研究的重要组成部分,因此,它具有和陆地重力测量学研究相同的目和作用。大家知道,地球上的任何物体都会受到地球及其他天体的引力和离心力的作用,引力和离心力的合力称为重力,重力的大小取决于地球内部物质及外部物质的分布和地球自转。由于物质分布和地球自转是随时间而变化的,因此,严格说来,重力是时间和空间的函数。重力测量学的研究目的就是要通过在地球表面或在地球表面附近所进行的重力测量和重力梯度测量,来测定作为位置和时间函数的地球重力场和其他天体的重力场。

1.1.2 重力测量与自然科学

重力场观测数据在自然科学和工程科学研究中有着广泛的应用。首先在自然科学中,由于地球表面上的许多力学现象几乎都涉及重力,因此在计量学中将它用来作为确定计量单位的依据。例如,在国际单位制中,引进牛顿(N)作为力的单位,有

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (1.1)$$

即1牛顿(N)就是使1kg质量的物体产生 1m/s^2 的加速度的力。压力、功、功率均为力的导出量。压力的单位为Pa,有

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \quad (1.2)$$

功(能量)的单位为J,有

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \quad (1.3)$$

功率的单位为W,有

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \quad (1.4)$$

以上各个量都与重力值有关,因此说重力在计量上是一个很重要的基本参数。另外,在物理学中,万有引力常数 G 更具有基础地位,其绝对数值在地球科学和天文学研究中具有特殊意义,因为当已知乘积 GM 的值以后,就可以很方便地计算出特定天体的质量 M 和平均密度。

1.1.3 重力测量与大地测量

重力资料在地球科学两个主要领域——大地测量和地球物理中可以找到多种用途。大地测量的主要任务是确定地球和其他天体表面的时空变化,其观测量总包含着测站和照准目标的位置矢量以及地球重力场的信息。为了确定地面位置,必须对地球重力场信息进行改正。例如在常规大地测量中,为消除观测量中重力场的影响,必须在水平角观测、垂直角观测、几何水准和距离测量中,考虑垂线偏差分量和大地水准面差距的影响。在现代大地测量中,也需顾及地球重力场的影响,利用卫星观测进行长距离的定位,地球重力场的影响隐含在卫星轨道中,卫星轨道的精确程度直接影响到地面定位的精度。若在卫星定位的基础上再按惯性测量系统来进行加密控制,那么除了要确定惯性测量系统运载工具的运动以外,也还需要知道重力矢量。正因为如此,又可以由一些对重力场敏感的观测量和结果,反过来确定地球和其他天体的外部重力场。因此,确定外部重力场是大地测量的主要任务之一。

1.1.4 重力测量与地球物理

在地球表面测定重力所包含的地球内部物质分布信息可应用于地球物理学研究。在固体地球物理中,如果能确定地球内部物质的密度分布,或者说能给出它的密度模型,对解释地球的形成和发展以及解释现代地球的一些物理现象都是很有用处的。观测地震波在地球内部的传播速度是研究地球密度分布的主要信息源。地震波速度在某一深度处发生突变,与该处的弹性物质的性质是密切相关的,但它也只能提供该处物质的密度有可能变化的信息,不能确定其确切的密度。为了确定地球密度分布,还需要利用多种物理资料和手段进行综合分析。由于地球重力场与地球内部质量有关,因此重力场信息对地球内部的密度分布的确定是有帮助的。

如果把所求地质体(又称扰动体)的真实密度与围岩密度(类似于平均密度或正常密度)之间的差值称为扰动密度,那么根据扰动体的位置、形状和扰动密度,就可求得相应的扰动重力异常,这在地球物理重力勘探中称为正演问题。重力勘探的反演问题则是利用测得重力(或高阶导数)的异常场来确定扰动体的形状位置及扰动密度。显然,为了寻找矿藏,反演问题是重力勘探要解决的主要问题。由于异常场是扰动体形状和位置及扰动密度的函数,而且同一异常场可以对应于多种情况的扰动体,因此,反演问题不存在唯一解,必须依据区域内地质、岩石及地球物理的各种相关信息进行综合分析,才能对其进行解释。在应用上,反演问题虽然不能唯一地确定扰动质量的分布,但它可以通过所谓的高斯(Gauss)公式唯一地确定整个扰动质量的总值,进而确定矿体的储量。重力勘探还可以在工程建筑,地下空洞、碎石堆以及地下水探测等领域发挥作用。在这些情况下往往重力异常很小,因此对观测和归化精度具有较高的要求。

1.1.5 重力测量与地球动力学

在地球表面,通过重复测定重力所获得的固体地球随时间的变化的信息可应用于地球动力学研究。地球动力学是通过地球内部各种力学之间的关系来研究地球的运动过程和特征的。地质和地球物理所引起地壳运动和位移,则是大地测量所关心的地球动力的主要部分。20世纪60年代,地学出现了一场意义深远的革命,即提出了板块构造理论,并基本得到确认。现在,这个理论已普遍被接受,因为这个理论经受了大量的、广泛的、不同类型的野外数据检验,已经证实它完全超越了假设阶段。说这个理论是一场革命,是因为它第一次提出了有关地球构造过程的统一概念。在这个理论发展过程中,重力测量虽不是主角,但也起了一定的作用。重力异常,特别是海洋重力异常,目前已经用板块构造理论来解释;相反,板块构造理论又推动了对新区域重力场的研究。这个领域的应用有:勘探含有石油的大陆架;确立古老大陆基岩和年青海洋地壳之间接触带的被动陆缘;确定壳下密度的中央海岭和板块边界;确定有大量沉积物堆积的海沟以及作为板块消减结果可能成为矿床的岛弧等。重力异常和大地水准面差距数据还可以对其他一些地球物理现象进行解释,例如海底地壳的年龄、地壳及其下面的热量、海沟两侧的密度以及冰后回跳等。

重力场的非潮汐随时变化,是地球质量迁移的重要信息。全球重力变化的描述可以借助于重力模型来进行,可通过卫星轨道分析球谐系数的变化(主要是 $n \leq 2$ 阶的变化),它们是与地球的体积、质心位置、极扁率、赤道扁率以及地球惯性主轴在地球内部的定位有关的参数。区域性的重力变化除了在构造板块边界上很明显外,这种信息对分析一些板块内的冰后回跳和沉积层等也是有作用的。局部的重力变化则与地震和火山等影响有关。

重力变化除了与地球内部的物质迁移有关外,还与地面的垂直位移有关。研究重力—高程变化,也是大地测量领域中很感兴趣的问题。由于重力测量快速而且比较经济,重力与高程变化又具有一定的关系,因此可利用重力变化监测可能存在现代地壳运动地区的高程变化。当然重力测量只能给出高程变化的初步结果,精确的变化仍需使用精密水准进行测定。

1.1.6 重力测量与空间科学

20世纪60年代以来,随着空间科学技术的飞速发展,地球形状与外部重力场研究的实用价值越来

越引起人们的关注,各发达国家相继投入大量的人力、物力和财力,开展全球性重力场资料获取、数据处理与分析,以及应用研究工作。

自然天体(月亮和行星)和人造天体(卫星和航天器)的轨道计算都离不开地球重力场数据,对月亮和行星飞行任务而言,同样需要了解各有关的引力场参数,它们的轨道计算也离不开地球重力场。此外,在地面附近应用惯性导航系统也存在重力场与其运行轨道计算问题。

随着 21 世纪人类开发利用海洋资源高潮的到来,我们相信,海洋重力测量在自然科学和应用科学各个领域将发挥越来越重要的作用。

§ 1.2 海洋重力场测定的手段和方法

海洋重力测量是在陆地重力测量基础上发展起来的,因此陆地重力测量的许多手段和方法可以在海洋重力测量中得到应用。在现有的技术条件下,人们主要通过以下各种手段获取海洋重力场数据。

1.2.1 海底重力测量

海底重力测量是陆地重力测量直接扩展到海洋的结果。使用陆地重力仪在海底进行测量可以通过以下途径来实现:

- (1) 将陆地重力仪和观测者一起下放到钟型潜水器或潜水艇中;
- (2) 通过屏蔽和遥控系统将陆地重力仪改装成水下重力仪。

水下重力仪(海底重力仪)主要由以下几个部分组成:重力仪本体,将重力仪从船上放到海底的装置,安装在船上的遥控与显示系统,联接电缆。另外,船上还要配备一条带绳索的绞缆来拉重力仪。海底重力仪具有以下特点:

- (1) 有防压和防水的外箱;
- (2) 有用来固定位置的宽大底座(提高稳定性);
- (3) 通过遥控实现锁紧、松开和置平;
- (4) 具有遥控传感器系统、读数系统和存贮系统;
- (5) 具有强阻尼和在某些情况下对由于水流运动而增大的海底振动进行补偿的附加装置。

当重力仪在海底固定以后,通过遥控设备可进行与陆地操作相似的测量。海底重力测量的精度与海洋和海底状态有关,在通常条件下,如果能有效地控制零点漂移(通过联测到港口上的测站来控制),则可取得 $\pm 0.02 \sim \pm 0.2 \text{ mGal}$ ($1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$) 的精度。海底重力测量的施测速度视水的深度(不大于 200m)和点间距(几百米到几公里)而定,一般每天能测 10~20 个点。

海底重力测量由于安置仪器的基础是稳固的,所以几乎不受海上各种特殊因素的影响。但是这种方法要求解决遥控、遥测以及自动置平等一系列复杂技术难题,而且观测工作既费时又麻烦,同时又只能在浅海地区作业,因此已逐渐被淘汰。

1.2.2 海面(船载)重力测量

海洋重力测量最常用的手段是将重力仪安置在海面舰船或潜水艇内进行动态观测,对测量剖面提供连续的观测值。这种方法所使用的仪器结构简单,观测方便,工作效率高。这种测量方式的显著特点是,测量船受到海浪起伏、航行速度、机器震动以及海风、海流等扰动因素的影响,将使重力仪始终处于运动状态。这样,作用在重力仪弹性系统上的除了重力以外,还有许多因船的运动而引起的扰动力,这些扰动力必须在重力观测值中予以消除。相对而言,在潜水艇中,这些扰动力要比海面舰船上小得多。

在海面上进行重力测量受到的扰动影响归纳起来主要有以下四个方面:

(1) 水平加速度影响。这是由于波浪或气流起伏以及机器振动等因素引起测量船在水平方向(前后和左右)上的周期性振动对重力观测的影响。测量船作加速度航行对重力观测也会产生水平加速度影响。

(2) 垂直加速度影响。波浪起伏和机器振动引起测量船在垂直方向上的周期性振动对重力观测的

影响。

(3) 旋转影响。波浪或其他因素引起测量船绕三个相互正交轴的转动对重力观测的影响。当测量船改变航向沿曲线航行时,对重力仪还会产生径向加速度的作用。

(4) 厄特弗斯(Eötvös)效应。由于重力仪随测量船相对于地球在运动,作用在仪器上的离心力改变了,因而也改变了重力观测值的大小,这种影响称为厄特弗斯效应。

以上各项扰动力的影响已经远远超过重力测量的观测误差,其量值甚至可以达到几十伽。因此必须采取相应的措施来消除或在重力观测值中加以改正。本节的主要内容是论述海面重力测量方法,有关海洋重力测量干扰影响及消除方法将在下一节作进一步的介绍。

使用现有的海洋重力仪系统,在良好的导航条件(GPS 或综合导航系统)下,海洋重力测量可获得 1~2km 的重力场分辨率,观测精度一般为 $\pm 1 \sim \pm 2$ mGal,最好的情况可达 ± 0.5 mGal。

1.2.3 海洋航空重力测量

应用重力仪在舰船上成功地进行重力测量使人们联想到在空中进行重力测量的可能性。20 世纪 50 年代末期,当海洋重力仪研制成功以后,美国和前苏联的科学家们立即开始了航空重力测量试验。20 世纪 80 年代初美国研制成实用的航空重力测量系统。利用航空重力测量进行大面积测量既方便又迅速,对广阔的海洋具有特殊的意义。

海洋航空重力测量和海面重力测量均属动态重力测量,两者尽管有许多相似之处,但比较而言,海洋航空重力测量比海面重力测量还要复杂和困难得多。例如在海面重力测量中,除去海洋潮汐影响以外,测量船基本上是在平均海面上航行的,不存在高度变化问题,垂直加速度可以通过取观测平均值予以消除;而在航空重力测量中,航行高度是随着气流影响不断变化的,垂直加速度同高度变化引起的重力变化叠加在一起,不能用简单的滤波方法予以消除,必须将其测出并加以改正,但又难以改正准确;此外,由于飞机航速较快,厄特弗斯效应相应增大,也不易对其准确测定。

归纳起来,海洋航空重力测量具有以下特点:

- (1) 高速度运动平台要求平均时间要短,同时导航精度要高;
- (2) 扰动加速度谱宽,除对更高频分量抑制和滤波外,还要求对低频加速度进行估计和改正;
- (3) 高程变化引起的直接重力变化可达 ± 0.3 mGal/m;
- (4) 航行高度对重力场有平滑作用。对短波长的分辨能力随高度的增大而迅速减弱,这样,几乎无法在大于 1 km 以上高度按目前的测量精度来评估波长小于 8 km 的重力场结构。

通过以下改进措施,可将航空重力测量对重力场的分辨率提高到几公里,测量精度可达到 ± 1 mGal。这些措施包括:

- (1) 选择稳定性好的飞机、高效能的陀螺平台,以及平静的大气观测条件(在夜间),尽可能减小扰动加速度;
- (2) 借助连续高精度导航(如 GPS 或综合导航系统),尽可能维持飞行条件(航线、航速和航高)不变;
- (3) 使用气压测高计、雷达测高仪或激光测高仪精确测定航行高度;
- (4) 尽可能降低飞行高度和速度;
- (5) 使用最优化估计方法(如卡尔曼滤波)对观测数据进行后处理。

自 1958 年以来,大量实验表明,在客机上进行重力测量是可能的。现已证明,海洋重力仪系统也能在客机上使用,航空重力测量的精度主要由导航,尤其是航行高度测定精度决定。1977 年以来,在直升飞机上进行重力测量已进入实用阶段,区域测量精度可由在测量剖面交汇点处测到的不符值,或由与地面实测重力数据的比对结果来进行估算。

在具有局部导航设备的直升飞机上作业时,现有的航空重力仪系统可提供 1 km 分辨率的重力场信息,观测精度可达 ± 0.5 mGal。在客机中的重力测量获得的重力场分辨率,随飞行高度不同而异,一般条件下的结果为 20~50 km,观测精度为 $\pm 5 \sim \pm 10$ mGal。把分辨率提高到几公里,精度提高到几毫伽,对于大地测量和地球物理学应用是必要的,这就要求进一步改进导航方法,尤其是航行高度测定