

中 国 现 代 科 学 全 书 ● 固体地球物理学
CHINESE ENCYCLOPAEDIC SERIES OF MODERN SCIENCES ● SOLID GEOPHYSICS

● 王谦身 等 编著

重力学

GRAVITOLOGY

地震出版社

中国现代科学全书·固体地球物理学

重 力 学

王谦身 等 编著

地 震 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

重力学/王谦身等编著. —北京:地震出版社, 2003. 4

(中国现代科学全书·固体地球物理学)

ISBN 7-5028-2110-4

I. 重… II. 王… III. 重力学 IV. P312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 049332 号

重力学(中国现代科学全书·固体地球物理学)

王谦身 等 编著

责任编辑: 张晓波

责任校对: 张晓梅

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 68423031

门市部: 68467991

传真: 68467972

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 潍坊长城印刷厂

版(印)次: 2003 年 4 月第一版 2003 年 4 月第一次印刷

开本: 850×1168 1/32

字数: 464 千字

印张: 17.25

印数: 0001~1500

书号: ISBN 7-5028-2110-4/P·1133 (2666)

定价: 42.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

中国现代科学全书总编辑委员会

名誉主编	胡 绳	钱伟长	吴阶平	周光召
	许嘉璐	罗豪才	季羨林	王大珩
	郑必坚			
主 编	姜士林	郭德宏	刘 政	程湘清
	卞晋平	王洛林	许智宏	白春礼
	卢良恕	徐 诚	王洪峻	明立志

固体地球物理学编辑委员会

主 编	徐文耀
编辑委员	(以姓氏笔画为序)
	王妙月 王谦身 叶正仁 白武明
	姚振兴 滕吉文

重力学编辑委员会

王谦身	安玉林	张赤军	蒋福珍
-----	-----	-----	-----

前 言

重力学是地球物理学的一个分支学科。本书又是《中国现代科学全书》中《固体地球物理学》的一卷。因此,本卷的编著指导思想是着重从固体地球物理的范畴论述重力学的理论、方法、技术和仪器,以及重力学在国民经济、资源、能源、灾害、环境、国防等方面所起到的重要作用。

根据《中国现代科学全书》编撰的指导思想和原则,在参阅了国内外有关文献、专著的基础上,依据在本学科领域的经典内容和最新成就,对本书的编写,作了整体构思,提出了编撰提纲。由于在编写过程中陆续补充和增加我国近年来新的重要研究成果和新的内容,对初始的计划进行不断修改、补充和删减,直至全书完稿。

本书共分为十四章,由重力学研究对象、发展沿革、特点和本学科在地球科学与社会发展中的重要作用、意义,以及在 21 世纪的发展前景作为开始,系统阐述了重力和重力场的定义、性质,位函数及各阶偏导数等重力基本理论,给出正常重力公式和各类重力异常的物理与地质意义。对于采集与获取重力信息的工具——重力仪器方面,对重力仪器发展各阶段有代表性的仪器给以扼要和明确的介绍外,着重对现今世界上最先进的绝对重力仪和相对重力仪特别是世界上仅有几台,我国只有一台的超导重力仪的原理、结构、使用等都作了较详细的介绍。关于重力测量工作方法,从国家基点网的建立,各级别重力测量的方法技术,微重力测量的特殊要求和测地工作都给以说明。重力测量的数据整理与改正是重力资料的可信性与可应用性的重要前提,本书将各项改正

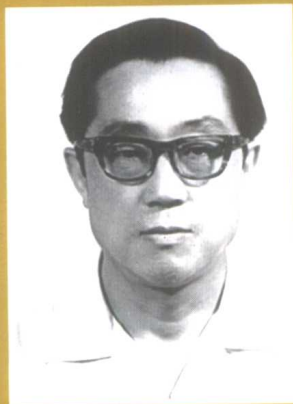
的方法分节逐个详细地论述,以及微重力的近似物体影响的特殊改正也专列为一节,并且对各项重力异常的地质地球物理概念和意义给以详细的说明。重力学的重要内容,也是重力学科从理论研究过渡到实际应用的桥梁,即重力异常的正演、反演问题,在本书中分为两章论述,在这些部分,不仅将空间域的算法给以介绍,同时将近年来发展很快的一些新的波数域的算法提供给读者,并且对七、八十年代提出各种反演方法作了回顾性的论述。本书将重力垂直方向梯度及其异常这一重要的参数,专门列为一章对其进行了理论、方法和实践应用方面的详细讨论。第十章论述了有别于地表的地下重力测量的原理、方法、处理改正与解释;同时将海上重力测量仪器、方法与处理技术作了介绍;对于发展中的航空重力测量与仪器研制,本书也给以简要叙述。人造卫星轨道参数与地球物质密度分布相关,由其转换、导出的全球重力场为研究全球性地学问题提供出极为有用的依据,对此在本书第十一章作了讨论,同时指出空间重力场在弹道导弹方面的实用意义。在日、月、天体的引力作用下,地球形状随时在变化,因而重力场也有周期性变化——重力固体潮和其他由地球运动变化引起的非周期变化,以及对地球环境、灾害的影响,由第十二章专门论述。岩石物性特别是密度,是应用重力方法研究地球内部进行解释时的重要参数,在第十三章给出了直接与间接测定密度的方法。本书的最后,是将国内外,特别是作者亲自进行的应用重力方法解决大地构造、地质构造分区、深部结构等地学问题,以及应用重力方法勘探油气资源、矿产资源、工程基础探查、考古工程等的实际有效的应用成果,重力动态监测地下矿坑岩爆危险、监测山体滑坡、地震、火山灾害等成功的实例包括具体的研究方法、工作程序都详细地作了介绍。目的是一方面给读者介绍了重力学在各方面的实用意义,另一方面也提供给读者在应用重力学方法实际解决资源、环境、灾害与地球科学问题时的参考。

本专著由中国科学院地球物理研究所王谦身研究员、中国科学院测量与地球物理研究所张赤军研究员、中国地质大学安玉林教授、中国科学院测量与地球物理研究所蒋福珍研究员在共同讨论的基础上,分工协作编著的。第一章、第二章、第三章、第四章、第十章、第十三章和第十四章由王谦身为主编写,张赤军、安玉林、蒋福珍参加,中国计量研究院李德禧研究员参加了部分工作;第五章至第八章由安玉林为主编写,王谦身参加;第九章、第十一章由张赤军为主编写,王谦身参加;第十二章由蒋福珍编写,王谦身参加部分工作。本书初稿成稿后,经过反复讨论与修改,详细审核,最后由王谦身将全书统一融汇编撰完稿。

本专著在《中国现代科学全书》编委会的大力支持下,得以顺利完成,作者在此对《全书》编委会表示衷心的感谢。同时,对热情组织安排编撰此书的原中国科学院地球物理研究所所长徐文耀教授致以亲切的谢意。

由于本书涉及到理论、方法、技术、仪器与应用等许多方面,尽管作者力图使其系统、完整、选取最新的成就。但是学科还在不断发展与深入,加之受到水平、经验和条件的限制,论述与引用的材料不免有挂一漏万或不尽妥善之处,恳请读者批评指出,以利今后改进与提高。

作者



作者简介

王谦身 中国科学院地球物理研究所研究员，原副所长。1933年生于中国北京，1955年毕业于北京石油大学，1959年北京石油大学研究生毕业，长期从事地球物理学、重力学的研究工作。在国内外发表论文90余篇。合著专著有《塔里木盆地油气地球物理》、《海南石碌地质地球化学》、《中国东部大陆边缘岩石圈结构动力学》、《微重力测量学》和《Microgravimetry》等，历年因科研成就获中国科学院自然科学一等奖三项，二等奖三项，中国科学院科技进步一等奖一项。

内 容 简 介

重力学是固体地球物理学的主要分支学科，本书将重力学的理论、方法、技术和应用作了较为详细的介绍，其中特别对近年来在理论、方法、技术、仪器方面的新进展、新成就给以着重论述，并且将国内外应用重力方法的实例分门别类扼要地给以介绍，显示了重力学用在国民经济、资源、环境、灾害等方面的实际效果和应用前景。

本书内容力求系统全面，文句简洁，图表清晰。本书既可以作为高等院校地球物理专业学生、研究生的教学参考书，也可以供具有大学以上文化程度的从事地质矿产资源调查或工程地质调查的科研和生产技术人员参考。

目 录

第一章 重力学概述	(1)
第一节 重力学的研究对象与任务	(1)
第二节 重力学的形成与发展	(2)
第三节 重力学在中国的发展及在国民经济 和基础研究中的作用	(8)
第四节 重力学科 21 世纪发展趋势与展望	(15)
第二章 重力和重力场	(17)
第一节 重力的概念与定义	(17)
第二节 地球的重力及其数学表达式	(20)
第三节 重力位函数、基本性质及其各阶偏导数	(23)
第四节 正常重力值和正常重力公式	(29)
第五节 重力异常及其表示形式	(33)
第三章 重力测量仪器	(38)
第一节 重力测量仪器的发展历史	(38)
第二节 绝对重力测量仪器	(40)
第三节 绝对重力测量结果误差分析与改正	(50)
第四节 相对重力测量仪器	(54)
第五节 超导重力仪	(77)
第四章 重力测量工作方法与技术	(82)
第一节 国家重力基本网的建立与测量	(83)

第二节	重力测量工作方法	(85)
第三节	重力测量的野外作业	(92)
第四节	重力测量中的测地工作	(99)
第五节	应用重力仪(相对型)进行野外测量	(101)
第六节	微重力测量方法与技术的特殊要求	(111)
第五章	重力测量数据整理和异常提取方法	(119)
第一节	重力测量数据的初步整理	(119)
第二节	重力基点网平差	(124)
第三节	重力值的纬度校正和高度校正	(128)
第四节	重力值的地形校正	(131)
第五节	重力值的中间层校正	(138)
第六节	地壳均衡重力值的计算与校正	(140)
第七节	靠近仪器物体重力影响值的校正	(144)
第八节	各种校正所得异常的地质地球物理含义	(147)
第六章	重力异常正演问题	(151)
第一节	正演问题概述	(151)
第二节	球体、圆柱体和垂直台阶重力异常	(154)
第三节	二度直立柱体、直立薄板和水平薄板 重力异常	(159)
第四节	直立长方体、圆柱体和截头圆锥 重力异常	(163)
第五节	倾斜台阶、板状体和二维单层面 重力异常	(168)
第六节	任意有限截面二度体重力异常	(177)
第七节	任意形态三度体重力异常	(183)
第八节	物体重力异常波谱表达式	(188)

第九节 密度界面 Δg 波谱表达式	(196)
第七章 重力异常转换处理	(205)
第一节 转换处理概述	(205)
第二节 空间域平面重力异常处理与转换	(209)
第三节 波数域平面重力异常处理与转换	(218)
第四节 起伏地形上重力异常的直接转换	(227)
第八章 重力异常反演问题	(240)
第一节 反演问题概述	(240)
第二节 均匀规则物体解析反演方法	(244)
第三节 重力异常积分反演方法	(255)
第四节 求解反演问题的选择法	(263)
第五节 异常源“全方位成像”与“密度线性反演”	(268)
第六节 单密度界面和密度层反演	(280)
第九章 重力梯度测量及其应用	(291)
第一节 引 言	(291)
第二节 重力梯度测量的基本思路及其张量表示	(294)
第三节 正常重力垂直梯度与重力垂直梯度异常	(298)
第四节 重力垂直梯度异常的观测及其分辨率	(308)
第五节 重力垂直梯度的测量和测量架	(314)
第十章 地下、海洋和航空重力测量	(317)
第一节 地下重力测量的目的、对象与测量方法	(317)
第二节 地下重力测量数据的校正与改正	(321)
第三节 地下重力垂直梯度的测量	(331)
第四节 海上重力测量	(338)

第五节	航空重力测量原理、仪器与进展	(347)
第十一章	空间重力场及其在相关领域中的作用	(355)
第一节	卫星在地球重力场中的运动	(355)
第二节	地球引力场摄动位的轨道根数表示式	(360)
第三节	地球引力场与卫星重力梯度的数学 表达式	(364)
第四节	地球正常引力场对卫星的摄动及其计算	(370)
第五节	外空扰动引力的计算	(373)
第十二章	地球重力场的潮汐与非潮汐变化	(382)
第一节	固体潮的研究现状	(383)
第二节	地球重力场的潮汐变化	(388)
第三节	重力固体潮的理论值	(423)
第四节	地球重力潮汐变化的测量与数据 处理分析	(426)
第五节	地球重力场的非潮汐变化	(438)
第十三章	岩石和矿石密度及测定	(450)
第一节	影响岩石、矿石密度的各种因素	(450)
第二节	岩石矿石标本的采集	(453)
第三节	标本密度的测定方法	(454)
第四节	确定岩石密度的间接方法	(457)
第五节	密度资料的整理和表示方法	(463)
第十四章	重力测量与探查资料的实际应用与研究	(467)
第一节	重力资料在大地构造和区域地质构造方面 的应用	(467)

第二节	重力资料在地球深部构造研究中的应用	(471)
第三节	重力勘探应用于矿产资源、油气 资源探查	(475)
第四节	在土木建筑、交通等工程基础探查中 重力勘探的应用	(484)
第五节	重力探测应用于地震预测、火山 灾害调查	(488)
第六节	煤矿地下建筑与地质体形变及其 动态的监测	(495)
第七节	应用于考古调查的重力探测	(509)
参考文献		(528)

第一章 重力学概述

第一节 重力学的研究对象与任务

重力学是一门有很长历史的、经典的地球科学的重要分支学科。重力学是研究重力随空间、时间的变化及变化的规律,并将重力数据用于大地测量、地球内部构造、地球动力学、资源勘探、工程建设、灾害预防等方面的基础性科学和应用基础性科学。

这样,重力学的研究对象与内容,在基础理论方面,有引力、重力、引力位场及地球重力场的理论研究;重力场的空间、地球表面和地球内部的分布特征与规律,和它们所反映的物质质量分布、密度分布的状态、性质、特征与规律的理论研究;以及重力场因天体运动和地球内部物质运动引起的周期性变化规律与非周期变化的性质、机理的理论研究。但是,这些理论研究的进展程度是参差不齐的。多年来有些理论研究早已是相当成熟的,并且被广泛地应用;有些则是近些年来取得重要的突破性进展,并在实际应用中得到证实和推广;还有一些则属于尚在探索之列的。

为了获得理论研究的基础数据和资料,重力的测量原理、方法、技术和重力测量仪器的研制就是重力学的重要的、基本的研究对象与内容。在此基础上,建立国家重力基本网,一、二级重力网,重力数据库以及与国际联网等同样是重力学的一个组成部分。

观测获得的重力数据必须归算到统一的、可对比的某种标准条件下,因此需要通过各种校正、改正、换算等处理的程序,而这些处理的方法、技术的研究与改进是必不可少的研究对象。

采用经各项改正后的重力异常资料,研究地壳内部的结构、构造,探查固体矿产和油气资源分布,查明大型建筑工程基底的稳定

性等,是重力学的重要的研究对象。而作为实现这些研究的基础,则是建立地壳内部结构、构造、固体矿产和油气赋存状态的地质模型,进而研究各种地质模型的正演问题和反演问题,给出对应的正、反演理论和方法,以及与其他地质、地球物理资料结合的综合解释方法、联合反演方法等现今已成为重力学研究的主要内容,并得到很大的发展。

地质灾害(如滑坡、天然地震、火山喷发等)给人类生命财产和国家建设带来巨大危害,而地质灾害发生前,常常伴随重力场的变化。因此,采用高精度重力仪监测重力非正常变化,预测地质灾害发生的时间和地点,也是重力学研究的重要内容。重力监测研究包括固体潮汐变化的长期连续监测,火山和地震等特定地质现象的动态重复监测,以及监测结果的解释理论、方法与技术等。

总之,重力学研究的对象与任务是涉及地球表面及内部的重力场的时、空变化及规律研究的各个方面。并应用于资源探查,环境保护、灾害预防等国民经济、国防建设和地球科学的各个领域。随着科学技术的发展,应用任务的需要,重力学在新理论、新方法、新技术和新仪器等方面的研究任务是相当艰巨的,也是十分光荣的。

第二节 重力学的形成与发展^[1,2,3,4]

重力学是一门古老的学科,从 16 世纪末至今 400 年来,它是以重力测量开始,到重力场的理论研究,再拓展到应用重力资料研究地球的外表形状、地球的内部结构与构造运动,进而深入到资源、环境、灾害和空间科学等研究领域。这些构成了现代重力学的基本内容及研究范畴。

16 世纪,意大利科学家伽利略(G. Galileo)在 1590 年通过从比萨斜塔上投掷铅球的实验,和在斜面上球体滚落实验,研究发现了

物体受地球重力下落的加速度规律。在那时就粗略地求出地球重力加速度的数值为 9.8 m/s^2 。

17 世纪和 18 世纪是科学变革的兴盛时期,重力测量的理论基础是伴随着引力理论、刚体力学的发展而建立起来的。在伽利略发现自由落体以均匀加速度运动和摆的周期运动时间与摆的长度相关的这些认识基础上,惠更斯(C. Huygens)(1629 ~ 1695)提出了数学摆和物理摆的理论,并研制出第一架钟摆。此后的 200 多年间,测定重力的惟一工具就是摆。

法国天文学家理查(J. Richer)(1630 ~ 1696)在南美洲赤道附近圭亚那的科学考察,揭示了重力随测点位置的变化。1687 年,牛顿根据开普勒行星运动定律推导出万有引力定律,发表在《自然哲学的数学原理》一书,这一著名的定律为:

$$b = G m_1 m_2 / l$$

式中 b 为引力, G 为引力常数, l 为两个相互吸引的质量为 m_1, m_2 的物体之间的距离。

由于万有引力和离心运动的发现,牛顿提出了液态均质地球的均衡状态学说,认为地球形状是一个旋转的椭球体,指出了地球呈两极扁平的特征和重力是由赤道向两极增大的规律,从而解释了理查的观测事实。布格(P. Bouguer)(1698 ~ 1758)将均衡状态的研究扩展到按共焦层分布的旋转体的研究,引进了水准面的概念。克莱劳(A. C. Clairaut)(1713 ~ 1765)在他的《地球形状原理》一书中提出了后来以他名字命名的“克莱劳定理”。这一定理适用于旋转椭球体,可以通过在不同纬度测定的两个重力值来确定椭球体扁率,进而确定椭球体的大小。这对地球物理学有重要的意义。

1735 ~ 1744 年,布格等人通过一系列的观测证实了重力随纬度的变化;1749 年又进行了重力随高度变化的观测,并研究了重力的海平面改正(又称高度改正)。

19 世纪初的发展特点是开展新的测量方法研究和可移动的