

微重力测量

——理论、方法与应用

王谦身 张赤军 等著
周文虎 蒋福珍

科学出版社



ISBN 7-03-004581-5

P·813

定 价： 22.00 元

科技新书目：368 205



中国科学院科学出版基金资助项目

微 重 力 测 量

——理论、方法与应用

王谦身 张赤军 等著
周文虎 蒋福珍

国家自然科学基金资助项目

科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

微重力测量是重力学近十余年发展起来的新兴重要分支学科。本书将微重力测量的理论、方法、技术和应用进行了较为详细地介绍,其中特别对与一般重力测量不同的理论问题、特殊的仪器设备与观测技术、特有的数据处理与改正的方法着重作了论述,并且将国内外应用微重力测量的实例分门别类扼要地给以介绍,显示了微重力测量的实际效果和应用前景。

本书内容力求系统全面,文句简洁,图表明晰,避免较繁杂的数学推导。本书既可以作为高等院校地球物理勘探专业学生的教学参考书,也可以供具有大专以上文化程度的从事地质矿产资源勘查或工程地质调查的科研和生产技术人员参考。

微 重 力 测 量

——理论、方法与应用

王谦身 张赤军 等著
周文虎 蒋福珍

责任编辑 彭 斌

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

1995年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1995年2月第一次印刷 印张: 10 1/4

印数: 1 750 字数: 230 000

ISBN 7-03-004581-5/P·813

定价: 22.00元

序

微重力测量是近年来国际上兴起的一种新技术,用于精确测定重力场的时空变化,因而在资源、能源工程的勘探,地震的监测乃至地下古文物的探测中,有着广泛的应用前景,并且在地球动力学的研究中具有重要作用。我国微重力测量的研究工作起步稍晚,在理论、方法和应用方面尚有不少问题需要解决,为此国家自然科学基金委员会于1988—1991年期间批准和资助了王谦身、张赤军等人的“微重力测量的应用与研究”的课题,在1991年底完成此任务后,专家组进行了验收并给予较高的评价。本书是此项研究成果的结晶,也是理论与实践相结合、科研与生产相结合的产物。

本书全面论述了微重力测量的仪器原理、测量方法、数据处理和资料解释,具有较好的系统性和完整性;在自动升降重力梯度架的设计,微重力测量精度的改善,近仪物体的影响,微重力及其梯度的联合反演等方面提出了自己独立的见解,具有一定的新颖性;在介绍国内外微重力测量的同时,更多地介绍了作者自己在油气勘探、工程物探、古墓探测等多方面的实例,具有广泛的实用性。

本书的问世,将对我国进一步开展这一工作是个推动,从事这方面的科技人员,也将从中得到颇为有益的参考。

中国科学院院士

许厚泽

1993年7月15日

前 言

微重力测量学的理论、方法与应用是传统重力学的一个新兴分支。我国在 70—80 年代初期的重力学研究,是以重力学的理论和方法研究深部地壳构造方面问题为主要潮流,重力勘探受到观测精度与分辨能力低的弱点而被削弱。随着世界上最先进的拉科斯特-D (LaCoste-D) 型微伽级精度重力仪的问世,加上电子计算机的高度发展,大大地弥补了重力方法的弱点,高精度重力勘探的需求再度提到日程上来,微伽级精度的重力测量不只是应运而生,而且实践表明其不仅具有很大的优越性,甚至在某些特定环境条件下具有很强的不可替代性。随着国家经济建设的发展,在矿产资源、水资源、地热能源的勘探,大型水电工程、高层建筑、铁路交通、考古发掘及国防工程建设等的基础探查方面,皆日益加强了对精细的小型对象的地球物理勘探的需要。

微重力测量是针对产生重力异常很微小(微伽级)的小尺度、小范围的物质体。因此它的要求条件特殊,不仅观测上要求严格细致,在理论分析上必须计算影响观测精度的各种干扰因素,并给予消除;在数据处理上,研究和给出对观测值的各种影响因素的改正与校正的定量计算和分析误差的专门方法。因此,十分需要专门的论文、手册或专著。但截止到目前,国内尚无同类的微重力测量的专著,国外在美、德、波等国发表也仅有论文和研究报告,而专门的书籍尚没有见到。

编写本书的指导思想是从内容取材方面以我们自己的微重力测量方面与数据处理方面的研究成果与实践经验,并结合参考引用了国内外能收集到的有关的最新文献资料进行撰写的。

本书的主要内容是以“微重力测量——方法与应用”的绪言作为开始,首先建立重力场、微重力测量、微重力异常的概念和论述国内外微重力测量的发展、研究现状,对科学研究及在国民经济建设中的应用及其作用;其后推导与论述了重力场的基本理论概念,微重力及重力垂直梯度测量的仪器与特需的设备,微重力测量的观测方法及有别于一般重力测量的技术要求,数据处理与改正的理论及方法,异常的解释原理与结果分析。

在重力垂直梯度测量方面,本书除对其理论、方法、技术作系统介绍外,还根据对重力垂直梯度观测的最佳高差与最优测量次数的研究,以及考虑到特殊的实际应用对象等;并将研制出的国内第一台无级调节梯度高程的 GD-2 型垂直梯度测量架,包括设计制造的图件与经验作了相应的说明。再有,本书有一章专门介绍地下微重力与重力垂直梯度测量,系统论述了使用的测量仪器和其它设备、应用的观测方法与技术,为消除干扰因素而进行校正的方法与应用实例。最后作为微重力与重力垂直梯度测量的应用实例,按天然地质型(小尺度、小重力异常的地质构造、矿脉、岩洞等)及人工工程型两类勘探实例的研究成果,突出扼要地给以评论与剖析。

因此,本书给出的微重力与重力垂直梯度测量的理论、方法、技术与应用的实例,对于现代大型土木、水电工程建设、高层建筑物、公路、铁路、机场跑道等的地基探测与隐伏危

险性研究方面;矿产、黄金、油气、地热与地下水资源的勘探;山体滑坡危险性监测;有价值的考古项目、重要陵墓探查等等方面,都具有十分明显的效果。

本书由中国科学院地球物理研究所和测量与地球物理研究所重力方面的专家和青年科学工作者分工负责撰写,各章撰写人员为:第一章,王谦身、武传真;第二章,王谦身、焦灵秀;第三章,张赤军、江为为;第四章,江为为、周文虎、郑双良、张赤军、杨新社;第五章,张赤军、蒋福珍、杨新社、刘成恕;第六章,王谦身;第七章,武传真、倪大来;第八章,郝天珧、王谦身;第九章,张赤军、蒋福珍、周文虎、武传真、江为为、杨新社、刘薇、李雄、郝晓光、方剑、郑双良、王谦身。并由王谦身、张赤军、周文虎、蒋福珍将各章总体详细审核,最后由王谦身将全书统一融汇编撰完稿。武传真、江为为、刘薇、焦灵秀等还进行了清誉、制图和校稿工作。

本书介绍作者自己的研究成果与实践经验,其中许多是取材于作者承担的国家自然科学基金资助的“微重力测量方法与应用研究”项目。在此对国家自然科学基金的支持表示感谢。同时,中国科学院地球物理研究所和测量与地球物理研究所的科技领导与管理部门,以及《地球物理学报》编辑部为本书的出版都给以热情的支持和大力的帮助;特别是中国科学院院士许厚泽教授专门为本书作序。在此,作者对此一并表示衷心的感谢。

由于微重力测量是一门新兴的分支学科,涉及到理论、方法、技术、应用等许多方面,并且有些还在深入研究之中,尽管作者力图使其系统、完整,但受到水平、经验和条件的限制,论述与引用的材料难免有挂一漏万或不尽妥善之处,恳请读者批评指正,以利今后改进与提高。

作 者

1993年6月

目 录

序

前言

第一章 绪言	(1)
第二章 地球重力场	(5)
§ 2.1 重力的概念与定义	(5)
§ 2.2 地球的重力及其数学表达式	(6)
§ 2.3 正常重力值和正常重力公式	(8)
§ 2.4 重力异常及其表示形式	(10)
§ 2.5 重力位函数、基本性质及其各阶偏导数	(10)
§ 2.6 重力固体潮	(14)
第三章 微重力测量仪器——微伽重力仪	(16)
§ 3.1 L-R 重力仪的结构	(16)
§ 3.2 L-R 重力仪测量原理	(18)
§ 3.3 L-R 重力仪的助动原理	(19)
§ 3.4 L-R 重力仪灵敏度及其调节	(20)
§ 3.5 测程弹簧的位置与作用	(21)
§ 3.6 L-R 重力仪在观测中的误差分析	(22)
§ 3.7 提高微重力测量精度的措施	(24)
§ 3.8 格值的标定	(25)
§ 3.9 其他微伽重力仪简介	(26)
第四章 微重力的测量	(29)
§ 4.1 微重力测量的分类与布点原则	(29)
§ 4.2 微重力测量中的测地工作	(29)
§ 4.3 点位坐标和高程测量方法	(30)
§ 4.4 微重力测量中的地形测量	(34)
§ 4.5 近仪物体及建筑物的测量	(38)
§ 4.6 应用 L-R 重力仪进行野外测量	(47)
§ 4.7 微重力测量中各种误差的分析及消除措施	(51)
§ 4.8 微重力测量野外记录的要求与记录的内容	(53)
第五章 微重力测量中的各项改正	(55)
§ 5.1 观测数据的处理及改正	(55)
§ 5.2 正常重力改正、高度(空间)改正和中间层改正	(56)
§ 5.3 地形改正	(57)
§ 5.4 近仪物体对微重力测量影响的改正	(62)
第六章 岩石矿物密度的测定	(72)

§ 6.1 影响岩石矿物密度的地质因素	(72)
§ 6.2 密度测定	(73)
§ 6.3 测定结果的处理	(76)
§ 6.4 确定岩石密度的间接方法	(76)
第七章 重力垂直梯度及其测量	(81)
§ 7.1 正常重力垂直梯度与重力垂直梯度异常	(81)
§ 7.2 重力垂直梯度异常在解释地下密度不均匀体中的应用	(87)
§ 7.3 重力及其垂直梯度的联合反演	(91)
§ 7.4 重力垂直梯度的测量和测量架	(94)
§ 7.5 重力垂直梯度测量架的设计	(95)
第八章 地下微重力测量	(98)
§ 8.1 地下微重力测量的目的、对象与测量方法	(99)
§ 8.2 地下微重力测量数据的校正与改正	(100)
§ 8.3 地下重力垂直梯度的测量	(105)
§ 8.4 地下重力垂直梯度的观测数据改正	(106)
§ 8.5 多层地下平面的微重力测量和垂直梯度测量	(108)
§ 8.6 微重力测量内窥	(110)
第九章 微重力测量及重力垂直梯度测量的实际应用与研究	(112)
§ 9.1 地质型因素引起的微重力异常与重力垂直梯度异常的测量与解释	(113)
§ 9.2 人类活动产物或遗址的微重力异常与重力垂直梯度异常探测	(124)
§ 9.3 微重力测量用于地质体形变及动态的监测	(136)
§ 9.4 浅水域的微重力测量	(151)
参考文献	(153)

第一章 绪 言

地球上任何物体都受到地球重力的作用产生加速度,称为重力加速度。重力加速度的大小随着时间、地点的不同而变化。这种变化与地球运动、地球形状、地球内部质量分布以及日、月等天体相互作用有关。经典重力测量学是研究精确测量重力加速度随不同时间与空间而变化的仪器、技术和理论、方法的科学。

重力测量学是一门古老的学科,早在 16 世纪,伽利略(1564-1642)发现了自由落体原理,首次测量了重力加速度。重力测量应用于地质方面是于 1896 年厄缶(Lóránd Von Eötvös)开始的。在 1908 年,他指出了应用扭秤测量的数据研究地壳上层地质构造的可能性。随着近代科学技术的发展,特别是二三十年代现代工业对地下资源的需要急剧增长,扭秤和摆仪(测重力加速度的早期仪器)测量的速度和精度已大大不能满足要求(测量一个点的数据需要几小时)。各种相对轻便、快速的重力仪的诞生,促进了重力测量学的发展,重力勘探也随重力测量学的发展而被广泛应用于陆地和海洋,以研究地质构造和寻找各种有用矿产。许多年来已取得了显著的效果。

由于生产发展的需要,科学技术的进步,重力仪器精度的提高,处理方法的改进,人们利用重力方法进行观测研究的对象是从尺度规模上越来越细小、从重力信息上是反应越来越微弱的密度异常体的异常信息。这就促使重力观测技术、观测方法和数据处理与分析解释研究不断地提高与深入,逐步形成了一套独特的微重力测量的理论、方法、技术和观测与处理系统。

“微重力”或“微重力测量”一词最初出现在 60 年代初的文献中(Fajklewicz, 1963),微重力测量是指测量的精度和测量探查的对象引起的重力效应是以微伽级的数值来量度的。微重力测量还包含有测量对象的规模和尺度与一般重力测量的对象相比是较微小的意思。微重力测量结果的研究,可以使人们对地球重力场性质有更加深入细致地了解。同时,根据观测得到的微重力异常资料来解释与评价地下密度异常体的形态、分布、结构更具有理论意义与实际的价值。

由于在 70 年代以前,还没有真正的微伽级重力仪器,最灵敏的仪器也只有 0.02mGal,当时就有许多人试图应用重力测量结果解决土木工程和浅层地质构造问题,但都由于信噪比很小,较小的密度异常体(构造、断层、空穴等)引起的异常很难从数据中提取出来而得不到有用的结果。70 年代以来,微伽级高精度拉科斯特重力仪(简称 L-R 仪)的逐渐引入和应用,使得精度为几个微伽的微重力测量成为现实可行。以前,因仪器精度低、测探重力效应弱的勘探对象是很困难的,甚至是不能够作的问题。现今,微重力测量对水电、交通、土建工程、高层建筑等基础内部的断裂、岩石爆裂、空洞等存在或形成潜伏的威胁安全的危险性问题的,都可以对其进行探测和作出解释与预计,并且已经由试验进入到实际应用与发展的阶段。

应用微重力测量可以探测到近地表的溶洞、地下河、孔穴、废矿坑巷道、巨径管道以及

规模较小的断裂、断层地质构造等密度异常体。在石油、天然气资源勘探中,利用微重力测量可以探查只能产生较微弱重力异常(几十微伽级)的地层圈闭型的油气藏;同样,在探查碳酸盐岩裂隙岩溶水和松散岩层孔隙水等地下水资源方面,也有比较成功的经验。微重力测量又是探测地热资源的新的方法和手段,它可以探测由于地下温度升高,使围岩膨胀或由于岩石热变质作用所引起的微小重力异常,根据测量得到的结果估算地热的储量。在重力场随时间变化的动态观测方面,应用微重力测量方法在地震活动区内定期定点重复观测,以监测大地震前因物质迁移、地形变化引起的重力场变化,已被许多国家用作地震监测与预报的重要手段之一。再有,大型水库蓄、放水引起的库区坝区的地形变,以及地下采矿巷坑道因岩层受力变化的变形与岩石爆裂的危险性估计等重力场微动态变化的监测,皆可以通过微重力复测达到定量监视的目的。

在微重力测量日益受到重视、广为应用的同时,为解决应用实践中提出的实际问题,通过实践、认识、再实践、再认识,一方面促进微重力测量学科自身的深入与提高,另一方面也促进了其它相关科学研究,如重力正反演理论、方法技术,位场转换、计算技术研究等方面的相应发展。可以预料,方兴未艾的微重力测量学科随着现代科学的进步和社会经济发展的需求,会越加显现出它的广阔的应用前景。

微重力测量是在经典重力测量学基础上发展起来的一个新兴分支学科。因此,在重力位场基础理论、概念等方面与经典重力学基本上是相同的、具有其共性的。但在特殊性上,突出“微”的性质与特点。基于此点,在本书中只简明扼要地引用微重力测量必须应用的重力位场基本概念、理论和公式,不作全面的论述物理重力学的基础理论问题和详细的数学公式推导。

在微重力测量仪器方面,突出介绍世界上公认的、最好的微伽级重力仪——LaCoste-Romberg 公司出产的金属弹簧重力仪,包括该仪器的基本结构、测量原理、使用方法、保持测量高精度的措施和注意事项等。同时,根据微重力测量对重力仪的“微、精、准、快”的需求,重力仪在提高精度的同时,必须使测量工作简化、方便、快速和自动化。本书特别介绍将最新的自动化观测处理系统,装配在重力仪内的 CG-3 重力仪,它能够自动补偿处理重力仪调平,解决了这个长期影响重力观测不能自动化的关键难点。

微重力测量之所以与常规重力测量不同,它能够达到微伽级精度的重力测量,以保证得到微伽级精度的分析解释结果,其关键特点之一在于野外勘测作业的方法、技术上与常规的勘探测量有许多不同的要求、特殊措施和规定。其野外作业比常规的要复杂得多。在地质等自然条件上,地形、地貌、近仪诸物体、温度、压力、振动、固体潮等因素的影响,在观测操作技术上,仪器及底盘的放置、调平操作、测点高程等因素都需要专门考虑;甚至记录方法也需有专门的规定。再有,在观测方法上,既有地面上的观测方法,也有地下的观测、竖井或钻孔的观测方法;要考虑平面的,还要考虑立体的观测方法和技术,甚至在探测对象内部的观测方法与技术。

对于微重力观测得到的数据,除与常规重力观测数据改正相同的项目以外,为确保达到微伽级的观测数据的质量要求,还需要进行近仪物体影响的改正和在一定范围内的建筑物影响的改正。这几方面的改正在常规重力观测数据处理中一般是不需要的,因为观测误差已远大于这些物质体的重力效应了。至于与常规观测数据改正相同的一些改正项,对微重力观测数据来说,项目名称、内容相同,但都有不同于常规的、特殊的要求。如高度改

正,要求测点高程精确,闭合误差应小于 3mm(小于 $1\mu\text{Gal}$),布格改正要求中间层改正的密度值和地形改正时使用的岩石密度值都要精细地确定。

用微重力测量进行重力勘探所以能找矿、发现空穴和解决地质问题,是基于各种岩矿、洞穴、构造与周围物质存在密度差异。同时,在微重力测量数据的上述几项改正中,都要用到岩石密度,在解释重力异常时岩矿密度又是解释的基础。因此,在微重力测量中,岩矿密度的测定是一项重要工作,在本书辟有专章对岩矿密度测定的取样、测定和数据整理给以简明扼要地论述。

重力垂直梯度是地球重力沿铅垂方向的变化率,它在重力测量学和应用地球物理学的重力勘探中的地位是仅次于重力(加速度)的一个参数。研究这个参数的分布与变化,可以提供关于地球形状与地下密度异常体及其活动性的一些信息。现在矿产资源与工程等重力勘测进入应用微重力测量勘查阶段。开发应用这个参数是有益的。根据位场理论,重力垂直梯度可由重力或重力水平梯度换算得到。但这需要满足含研究点的参考水准面以上没有剩余质量的条件,而实际地形常不能满足该条件。另外,这个换算既繁复又难以保证精度,所以很少应用。因此有必要采用实测的方法得到重力垂直梯度数据。

由于重力垂直梯度异常对埋藏浅的密度异常体具有比微重力异常更高的灵敏度和分辨率,因此在浅层矿产、工程勘探中可以与微重力测量作到优势互补,更好地完成勘探解释与研究的任务。

至今因没有直接精确测量重力垂直梯度的仪器,只有利用重力仪在一个高架上下进行重复测量铅垂高差间隔 Δh 的相应的重力差值 Δg ,得到以 $V_{\infty} = \Delta g / \Delta h$ 表示的实测平均垂直梯度,作为重力垂直梯度 $\partial g / \partial h$ 的近似值。通过误差分析表明, Δh 越大,平均垂直梯度测定精度越高,而 Δh 较小(例如 1m 左右)时,测定精度主要取决于重力仪观测精度。因此,在微伽级重力仪未出现时,在国外重力垂直梯度测量主要是在 3m 以上的观测架上,作多次的铅垂上下重复观测,十分费时、费力,精度也不高。随着 L&R 微伽重力仪的投入使用,大大提高了观测精度。因此,梯度观测架已一般减到 1m 至 1.2m 左右的高度,重复观测次数也由上下共五次至七次减少到上下共三次即可得到精度在 $10-20E^{\circ}$ 的高质量观测重力垂直梯度的数据。这样,将重力垂直梯度从繁复、笨重、观测困难的工作条件中解放出来。1990 年,中国科学院地球物理研究所在吸收了国外经验基础上,研制出中国第一台无级调测程的 GD-2 型重力垂直梯度观测架。可以任选合理的 Δh ,或同点多种 Δh 观测重力垂直梯度的变化,并已投入试使用,效果很好。今后,如在 L-R 重力仪上配备最新的自动化观测处理系统,再结合使用无级调测程观测架,将形成自动观测重力垂直梯度系统,将会更快更简便地进行观测,大大改善探测工作条件和取得更多的资料。通过重力垂直梯度的理论分析与研究,数据处理改正计算,可以提供出更多、质量更好、分辨率更高的研究成果。

早期传统的地球物理勘探、重力勘探一般是在地表面上进行的。随着生产发展的需要,对地表面以下的纵向或横向的重力测量就被提到日程上来。在 60—70 年代,德国、波兰、前苏联等一些国家在矿区竖井中和水平巷道内开展重力测量和重力垂直梯度测量,并发展到在不同深度分布的多层平巷或坑道中进行测量,目的是探测目标矿脉或岩层的纵横延伸、上下展布的形态、以及得出测区的岩层密度的三维分布。同时采用同测点多次重复测量重力值的方式监测岩层因开掘矿巷而发生的形变和进行可能塌陷的危险性预测。

地下微重力测量不仅继承了以前地下重力勘探的传统工作,而且更加提高了探矿的精度与分辨能力和在危险性动态预测上更起到了防微杜渐的监测作用;同时发挥了其它地球物理方法所不具有的优越性。

L-R 型井孔重力仪的问世,使得在 10cm 左右直径的钻孔中完成纵向重力及重力垂直梯度的测量成为现实。并且由此得到距井孔壁一定范围内的岩层密度分布、含油、气、水的程度,为评价油气层提供重要的参数。井孔重力仪的应用也促进了井孔重力学理论及解释方法技术的发展,并为跨孔测量、井间位场层析研究打下实际的基础。

自微伽级重力仪投入应用、微重力测量概念的提出,经过历年在理论、方法、技术、实践等方面的探索和努力,微重力测量与勘探已经取得明显的成绩和实际的效益。显示了新生事物的强大生命力和在某些条件下不可替代的优越性。在水、电、交通、建筑等一系列地下工程基础的探查,地下地质构造、岩洞、断裂等分布的勘测,金属矿产、石油天然气、地热、水资源等的勘探,地壳形变、岩层裂变、地震活动的监测等国民经济与国防建设的各个方面日益发挥其重要的作用。

第二章 地球重力场

§ 2.1 重力的概念与定义

人们知道在地球表面及附近空间的一切物体都具有重量,这是物体受重力作用的结果。如 P_0 点是地球上的任一点,在 P_0 处有一质量为 m_0 的质点(物体),见图 2-1。它受到质量为 M 的地球对质点 m_0 产生的引力 $F(M, m_0)$;同时,质点 m_0 还受随地球作绕其自转轴旋转而产生的惯性离心力 $C(m_0)$ 的作用。惯性离心力的方向是垂直于地球自转轴指向外面。引力与惯性离心力的矢量合成的合力 $G(M, m_0)$ 就是重力。

$$G(M, m_0) = F(M, m_0) + C(m_0)$$

重力的方向在不同的地点其指向是不同的。由于:

$$|F(M, m_0)| \gg C(m_0)$$

所以重力 $G(M, m_0)$ 大致指向地心。

质点 P_0 不仅受地球物质的吸引,它还受到太阳、月亮等其它天体物质的吸引。运动中的地球在日、月引力的作用下,重力也还会出现周期性的随时间而变的微小变化。

存在重力作用效应的空间称为重力场。

质点 P_0 受到引力、惯性离心力的大小与质点本身的质量大小有关,单位质量的质点在引力场中 P_0 点所受到的引力大小,被定义为 P_0 点地球引力场的场强:

$$\frac{F(M, m_0)}{m_0} = f(P_0)$$

那么, P_0 点的地球离心力场的场强同样可以定义为:

$$\frac{C(m_0)}{m_0} = C(P_0)$$

这样, P_0 点的地球重力场的场强 $g(P_0)$ 便可定义为以上两个场强的矢量和,即:

$$g(P_0) = f(P_0) + C(P_0) \quad (2-1)$$

当考虑质量为 m 的质点只受到重力场的作用而不受其它力场作用时,将这个质点自由下落时产生的加速度称为重力加速度,它与重力之间的关系可写为:

$$G = mg \quad (2-2)$$

式中: G 为重力, m 为质点的质量, g 为重力加速度。若令(2-2)式中的 $m=1$,则 $G' = g$;此时, G' 在数量上等于单位质量的重力值。或者,以 m 除(2-2)式的两端,则得:

$$G/m = g \quad (2-3)$$

由此可知,重力加速度在数值上(包括方向)等于单位质量所受的重力。由于重力随质量的

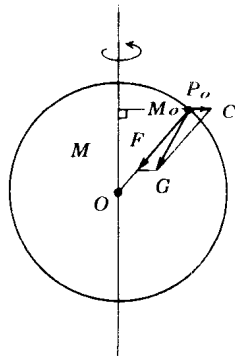


图 2-1

不同而变化,所以为了便于对地球内部物质分布进行比较研究,将单位质量所受的重力 G/m 的大小作为研究的标准。而在此情况下, g 即为重力场强度^①。

在国际单位制(SI)中,重力的单位是 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$,在 MKS 单位中为牛顿,在 CGS 制的单位中,重力的单位为达因。为了纪念第一个测定重力加速度的物理学家伽利略,将重力加速度绝对单位(CGS 制)称为“伽”,以“Gal”表示,即:

$$1\text{cm}/\text{s}^2 = 1\text{Gal}(\text{伽})$$

在国际单位制(SI)中,重力加速度单位是 m/s^2 。并规定以 $10^{-6}\text{m}/\text{s}^2$ 为国际通用重力单位,简写为 g. u., 即:

$$1\text{m}/\text{s}^2 = 10^6 \text{g. u.},$$

$$1\text{Gal}(\text{伽}) = 10^4 \text{g. u.} = 10^{-2} \text{m}/\text{s}^2,$$

$$1\text{mGal}(\text{毫伽}) = 10 \text{g. u.} = 10^{-5} \text{m}/\text{s}^2,$$

$$1\mu\text{Gal}(\text{微伽}) = 10^{-2} \text{g. u.} = 10^{-8} \text{m}/\text{s}^2.$$

应当指出,实际观测到的并不是(2-1)式所定义的重力场强度,而是宇宙间全部质量在该测点的引力场强度和该测点随地球相对于惯性中心运动而引起的离心力场强度的矢量合。显然它将随时间而变化。再者,在地面上重力加速度并不到处都相同,而是随着地点的不同有所变化。重力在地面上变化的原因主要有:

(1) 地球不是一个圆球体,而是北极略凸,南极略凹的不太对称的扁球体,并且地球自然表面是起伏不平的。

(2) 地球绕一定的轴作自转运动,绕太阳作公转运动。

(3) 地球内部的质量(密度)分布不均匀,这种不均匀是复杂的地质作用造成的。

这样,除日、月等天体使重力在同一测点的不同时间引起变化外,由于地质构造运动的作用,也使在同一测点的重力随时间有微小的变化。

因此,人们不仅可以利用不同地点的重力变化来研究地球内部的地质构造,也可以利用不同时间的重力变化来研究地质构造运动。在微重力变化的研究与应用中,对于微小的不同地点的重力变化和不同时间的重力变化都应当特别给以注意,以提高观测精度和解释结果的可信程度。

§ 2.2 地球的重力及其数学表达式

1. 地球引力

取直角坐标系(见图 2-2),坐标原点设在地球地心处,Z 轴与地球的自转轴重合,X、Y 轴在赤道面内。根据牛顿万有引力定律,地球质量对其外部任一点 $P(x, y, z)$ 处的单位质量所产生的引力 F 应为:

$$F = G \int_M \frac{dm}{\rho^2} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho} \right) \quad (2-4)$$

此处 G 为万有引力常数,其数值近似为 $6.672 \times 10^{-11} \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$,或 $6.672 \times 10^{-8} \text{cm}^3/$

① 需指出的是,人们一般把重力加速度的测量简称为重力测量,为习惯起见,本书除在个别处作说明外,一般也称重力加速度为重力,引力加速度为引力。

$(g \cdot s^2)$; dm 为地球内部质量元, $dm = \sigma(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$; $\sigma(\xi, \eta, \zeta)$ 地球介质密度, ρ 为 P 点在 dm 处的距离; 由图 2-1 知,

$$\rho = [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2]^{1/2};$$

ρ/ρ 为 P 点到 dm 方向的单位矢量。(2-4) 式的积分表示遍及地球的所有质量。

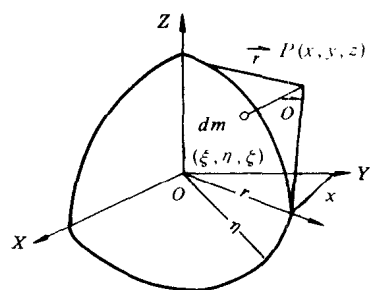


图 2-2

2. 地球惯性离心力

地球为一个自旋的天体, 若其旋转角速度为 ω , 则单位质量物体随地球自转而引起的惯性离心力 C 为:

$$C = \omega^2 r \quad (2-5)$$

这里 r 为自转轴到 P 点的垂向矢径, 其值为 $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$, 其方向自转轴到 P 点向外。

3. 重力数学表达式

(2-4) 和 (2-5) 式只是数学上的表达式, 为进行计算, 向量积分式需改写成沿 X 、 Y 、 Z 三个坐标轴方向的分量。这样 (2-4) 式中的引力 F 与三坐标轴夹角的方向余弦分别为:

$$\left. \begin{aligned} \cos(\widehat{F}, X) &= \frac{\xi - x}{\rho} \\ \cos(\widehat{F}, Y) &= \frac{\eta - y}{\rho} \\ \cos(\widehat{F}, Z) &= \frac{\zeta - z}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

而惯性离心力 C 的方向余弦为:

$$\left. \begin{aligned} \cos(\widehat{C}, X) &= \frac{x}{r} \\ \cos(\widehat{C}, Y) &= \frac{y}{r} \\ \cos(\widehat{C}, Z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

这样, 引力和惯性离心力在 X 、 Y 、 Z 三个坐标轴方向的分量为:

$$\left. \begin{aligned} F(x) &= F \cos(\widehat{F}, X) = G \int_M \frac{\xi - x}{\rho^3} dm \\ F(y) &= F \cos(\widehat{F}, Y) = G \int_M \frac{\eta - y}{\rho^3} dm \\ F(z) &= F \cos(\widehat{F}, Z) = G \int_M \frac{\zeta - z}{\rho^3} dm \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

$$\left. \begin{aligned} C(x) &= C \cos(\widehat{C}, X) = \omega^2 x \\ C(y) &= C \cos(\widehat{C}, Y) = \omega^2 y \\ C(z) &= C \cos(\widehat{C}, Z) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

因此, 由 (2-1) 式知, 重力 g 在 X 、 Y 、 Z 三个坐标轴方向的分量为:

$$\left. \begin{aligned} g(x) &= G \int_M \frac{\xi - x}{\rho^3} dm + \omega^2 x \\ g(y) &= G \int_M \frac{\eta - y}{\rho^3} dm + \omega^2 y \\ g(z) &= G \int_M \frac{\zeta - z}{\rho^3} dm + \omega^2 z \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

而重力 g 的数值则为:

$$g = [g(x)^2 + g(y)^2 + g(z)^2]^{1/2} \quad (2-11)$$

g 的方向与过该点的水准面内的法线方向(即铅垂线方向)一致。

由于地球是自转的椭球体,地球表面的重力值在不同点处是不同的。赤道处的重力最小(约为 9.780m/s^2),向两极逐渐增大,两极极点上为最大值(约为 9.832m/s^2)。这样,最大与最小值之差为 $52\,000\text{g. u.}$ ($5\,200\text{mGal}$)。重力随纬度变化的关系曲线可表示于图 2-3。

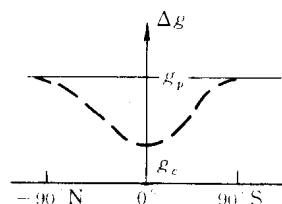


图 2-3

至于惯性离心力在地球表面上的变化(图 2-4),即地球表面上任一点的惯性离心力可以表示为:

$$C = \omega^2 r = \omega^2 R_e \cos \phi \quad (2-12)$$

式中: ω 为地球自转角速度, R_e 为地球平均半径, ϕ 为纬度角。

由(2-12)式知,在 $\phi = \pm 90^\circ$ 时, $C = 0$ 。

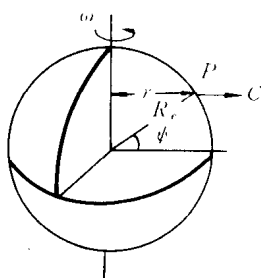


图 2-4

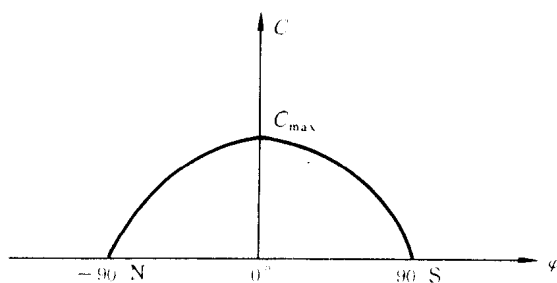


图 2-5

在 $\phi = 0^\circ$ 时, $C_{\max} \cong 3.39 \times 10^4 \text{g. u.}$ (见图 2-5)。

这样,与重力平均值相对比,最大的离心力值也只是重力平均值的 $1/289$ 。由此可知,地球质量的引力是组成重力的主要部分。

同时,根据离心力的变化规律,在赤道($\phi = 0^\circ$)处,引力值为 $F_{\text{赤}} = 9.7800 + 0.0339 = 9.8139\text{m/s}^2$,在两极($\phi = \pm 90^\circ$)处为 $F_{\text{极}} = 9.8320\text{m/s}^2$ 。引力由赤道向两极逐渐变大,表明地球的形状不是正圆球形而是扁球形的。

§ 2.3 正常重力值和正常重力公式

由 § 2.2 已经知道,地球表面上的重力加速度随着地点的不同有所变化。根据测量得到的地面上的重力变化来研究地下的地质构造特点、勘探矿藏和地下人工建筑物体以及一些人类活动遗迹,这是微重力探查的主要内容。因此,首先应该知道重力在地表上变化