

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校测绘工程系列教材

# 地球物理大地测量学 原理与方法

Geophysical Geodesy Principles and Methods

许才军 申文斌 晁定波 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校测绘工程系列教材

---

# 地球物理大地测量学 原理与方法

许才军 申文斌 晁定波 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

地球物理大地测量学原理与方法/许才军,申文斌,晁定波编著. —武汉:武汉大学出版社,2006.9

(高等学校测绘工程系列教材)

ISBN 7-307-05133-8

I. 地… II. ①许… ②申… ③晁… III. ①地球物理学—高等学校—教材 ②大地测量学—高等学校—教材 IV. ①P3 ②P22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 071721 号

责任编辑:王金龙 责任校对:程小宜 版式设计:支 笛

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉大学出版社印刷总厂

开本:787×1092 1/16 印张:27.75 字数:668千字

版次:2006年9月第1版 2006年9月第1次印刷

ISBN 7-307-05133-8/P·120 定价:39.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

# 内 容 提 要

本书是作为教科书编写的,全书共13章。第1章:绪论;第2章:相关的地球物理问题;第3章:地球参考系统与地球参考框架;第4章:潮汐大地测量观测方法及潮汐改正;第5章:确定地球自转参数的空间大地测量方法;第6章:板块构造学说与活动地块学说;第7章:地壳运动监测与数据处理;第8章:地壳应力与应变分析;第9章:连续形变、应变观测与数据处理;第10章:地震活动的大地测量研究方法;第11章:海洋学大地测量监测方法;第12章:全球重力场及其地学解释;第13章:大地测量反演理论与方法。

本书既有大地测量学和地球物理学的一些背景知识,又有大地测量学和地球物理学的一些新的交叉内容,具有内容新、覆盖面广、概念清楚、深入浅出、通俗易懂等特点,有较强的理论性和实用性,可作为测绘工程专业与固体地球物理专业本科生、研究生教材或教学参考书,亦可供从事相关领域及专业的科技人员和研究人员参考。

# 前 言

本书是作者在给武汉大学测绘工程专业本科生及固体地球物理专业本科生、硕士研究生讲授的地球物理大地测量学课程的基础上编写的。

大地测量学科发展的总趋势是向地球科学纵深发展,深入到其他地学学科的交叉领域,其主要任务是监测和研究地球动力学现象,研究地球本体的各种物理场,认识与探索地球内部的各种物理过程并揭示其规律。

大地测量如何参与研究、认识与探索地球内部的各种物理过程并揭示其规律,是本教材希望讲授的内容,故取名《地球物理大地测量学原理与方法》。以空间大地测量为标志的现代大地测量技术,不论在测量的空间尺度上还是已达到的精度水平方面,已经有能力监测地球动力学过程产生的运动状态和物理场的微变化。早期用大地天文观测方法已能进行地球自转变化的监测,但时间分辨率和精度都较低。现今利用卫星激光测距(SLR)和甚长基线干涉测量(VLBI)技术已能对地球自转进行近于连续的监测,精度比大地天文方法高20倍,极移测定精度优于 $\pm 1\text{cm}$ ,日长变化测定精度优于 $50\mu\text{s}$ 。对监测数据时间序列的频谱分析,可以给出极移和日长变化的频谱分布,描述地球自转时空变化的精细结构,并用于对不同频谱成分激发机制的研究和解释。利用现代高精度固体潮重力仪、倾斜仪和伸缩仪,可以精确测定重力固体潮、地倾斜固体潮。对观测数据进行调和与分析,得出各分潮波的振幅与相位,通过与理论值的比较,可得出实际观测的潮高、重力固体潮和地倾斜固体潮与理论值(平衡潮)之比的特征数(潮汐因子),从而可求解表征地球弹性的各类勒夫数。这些潮汐参数可准确地定量描述和解释地球的潮汐现象。在各大板块上设置若干VLBI站或SLR站以及GPS永久跟踪站,通过定期或连续观测,可以毫米级的精度测定板块的运动速率,由此可建立以欧拉向量(表示两板块间绕定轴旋转的相对角速度向量)表示的全球板块运动模型,用以准确描述板块的运动模式。在一个区域内,根据板内块体的分布,布设一个具有适当密度的GPS定位网络,通过定期复测或GPS永久跟踪站的连续观测,并联合相邻板块同步观测数据,不仅可以分析描述板块间的运动趋势,还可以准确求定板内各地块间的相对运动速率。通过对所获数据的分析处理,利用大地测量反演方法求解地壳弹性应力-应变的分布,并作出动力力源解释。在活动断裂带上,特别是地震活动带上,综合利用GPS、激光测距、水准测量和重力测量的定期复测,根据监测数据可以反演求解断层的几何和运动参数并分析其构造应力的积累,结合其他地球物理数据评估地震发生的可能性和估计震源参数。综合利用GPS、重力测量和卫星测高等大地测量技术,可以监测冰期后回弹、极地冰原的运动和变化、陆地冰川的运动以及海平面变化乃至厄尔尼诺和拉尼娜事件的发生与发展,并据此分析全球环境变迁,对其动力学机制和效应进行解释。

本书共13章,其中第2、4、5章由申文斌教授编写,第11、12章由晁定波教授编写,其余8章由许才军教授编写。本书的编写吸取了我国许多地学工作者的最新研究成果,同时包含了不少作者及其与所带研究生合作的研究成果;徐新禹、史新奎、张敏等做了大量文字编辑工作,

李进、韩建成、田伟、富宇宁、黄继锋等做了大量的校对工作,有不少听过课的本科生和研究生对进一步完善原来的讲义提出了宝贵意见,在此深表谢意。对于关心、鼓励和支持本书出版的同志们表示真挚的感谢。

一方面由于水平所限,另一方面由于知识更新的速度越来越快,书中难免存在不足、缺憾和疏漏,敬请读者指正。

**编著者**

2006.2

# 目 录

前 言	1
第 1 章 绪论	1
§ 1.1 地球物理学的发展	1
§ 1.2 大地测量学的发展	3
§ 1.3 地球物理大地测量学内涵	5
§ 1.4 地球物理大地测量学和地球动力学的关系	7
第 2 章 相关的地球物理问题	9
§ 2.1 太阳系主要成员	9
§ 2.2 地球的构造	11
§ 2.3 地球潮汐	16
§ 2.4 地球自转及相关问题	24
§ 2.5 全球重力场及其随时间的变化	49
§ 2.6 应力与应变张量简述	58
§ 2.7 地球在负荷作用下的变形	62
§ 2.8 地震估值	73
第 3 章 地球参考系统与地球参考框架	76
§ 3.1 参考系统、参考框架和参考基准	76
§ 3.2 综合各种技术建立全球最优的协议地球参考架 CTRF	78
§ 3.3 协议地球参考架的维持	80
§ 3.4 大地测量参考系统的几种具体实现	83
§ 3.5 ITRF 国际地球参考框架及 ITRF 框架之间的转换	85
第 4 章 潮汐大地测量观测方法及潮汐改正	91
§ 4.1 验潮站观测及守则	91
§ 4.2 潮汐应力场及潮汐因子	95
§ 4.3 重力固体潮观测	96
§ 4.4 大地测量潮汐改正	108
§ 4.5 研究潮汐现象的地球物理意义	113
第 5 章 确定地球自转参数的空间大地测量方法	114

§ 5.1	重力梯度测量的作用	114
§ 5.2	SLR 技术测定地球自转参数的基本原理	115
§ 5.3	VLBI 技术确定大地测量和地球物理参数	116
§ 5.4	地球自转变化涉及的全球动力学过程	122
§ 5.5	地球旋转角速度的变化	123
<b>第 6 章</b>	<b>板块构造学说与活动地块学说</b>	<b>127</b>
§ 6.1	板块构造学说概述	127
§ 6.2	板块构造的基本单元	130
§ 6.3	板块构造运动	134
§ 6.4	板块运动的驱动力(傅容珊等,2001)	141
§ 6.5	活动地块假说	143
§ 6.6	活动地块的大地测量划分方法	155
§ 6.7	现今板块(地块)运动和地壳形变模型的确定方法	162
<b>第 7 章</b>	<b>地壳运动监测与数据处理</b>	<b>165</b>
§ 7.1	全球板块运动监测	165
§ 7.2	高精度的国家 GPS 观测网	166
§ 7.3	区域及局部地壳运动的监测	177
§ 7.4	地壳水平运动监测的数据处理及分析	179
§ 7.5	地壳垂直运动监测数据处理及分析	184
<b>第 8 章</b>	<b>地壳应力与应变分析</b>	<b>193</b>
§ 8.1	地壳应力与应力分析基础	193
§ 8.2	区域地壳运动应变分析	208
§ 8.3	地壳应变的综合估计	209
§ 8.4	地壳应变率的地震矩张量估计	211
§ 8.5	现今板块(地块)运动和应变模型	212
<b>第 9 章</b>	<b>连续形变、应变观测与数据处理</b>	<b>216</b>
§ 9.1	地倾斜测量	216
§ 9.2	洞体应变观测	222
§ 9.3	钻孔应变测量	226
§ 9.4	连续观测序列的数据缺失补值预处理	232
§ 9.5	连续形变、应变观测数据处理	234
§ 9.6	潮汐应变、倾斜数据处理(张国民等,2001)	237
<b>第 10 章</b>	<b>地震活动的大地测量研究方法</b>	<b>239</b>
§ 10.1	中国地震活动的基本特点	239
§ 10.2	地震预报的科学思路	241



§ 10.3	地震地壳形变 .....	243
§ 10.4	InSAR 在地震研究中的应用 .....	253
§ 10.5	地壳形变监测台网与地震预报 .....	258
<b>第 11 章</b>	<b>海洋学大地测量监测方法 .....</b>	<b>263</b>
§ 11.1	概述 .....	263
§ 11.2	卫星测高技术监测海平面变化 .....	264
§ 11.3	海洋重力场的确定 .....	281
§ 11.4	卫星测高数据用于建立海潮模型 .....	295
§ 11.5	海面地形 .....	314
<b>第 12 章</b>	<b>全球重力场及其地学解释 .....</b>	<b>321</b>
§ 12.1	概述 .....	321
§ 12.2	由地面重力数据确定全球重力场模型 .....	325
§ 12.3	由卫星重力探测数据确定全球重力场模型 .....	346
§ 12.4	引力反解问题的一般理论 .....	373
§ 12.5	地球重力场的地球物理解释 .....	380
<b>第 13 章</b>	<b>大地测量反演理论与方法 .....</b>	<b>390</b>
§ 13.1	大地测量反演问题的一般原理 .....	390
§ 13.2	大地测量反演问题的适定性讨论 .....	391
§ 13.3	大地测量线性反演问题及其解 .....	392
§ 13.4	$L_1$ 模反问题和线性规划 .....	395
§ 13.5	非线性反演问题及其解 .....	397
§ 13.6	大地测量反演模式 .....	410
§ 13.7	大地测量地球物理联合反演理论的应用 .....	420
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>423</b>

# 第1章 绪 论

## § 1.1 地球物理学的发展

狭义地讲,地球物理学是利用物理学原理及研究成果探索地球奥秘的学科。广义地讲,地球物理学是集物理学、地质学、大气科学、海洋科学、天文学等为一体,描述地球上所发生的各种地学事件并对其发生机制进行科学解释的一门边缘学科,并在 20 世纪迅速发展起来。

地球物理学的主要研究对象是人类赖以生存的地球及其周围空间;它用物理学的原理和方法,通过利用先进的电子和信息技术、航空航天技术和空间探测技术对各种地球物理场进行观测,探索地球内部及其周围空间、近地太空的介质结构、物质组成、形成和演化,研究与其相关的各种自然现象及其变化规律;在此基础上优化和改善人类生存和活动内容,防御并减轻地球与空间灾害对人类的影响,为探测和开发国民经济中急需的能源及资源提供新理论、新方法和新技术。

地球物理学包括固体地球物理学和空间物理学两个二级学科。固体地球物理学主要以固体地球作为研究对象,其研究内容涉及地球本体的各种物理场,目的是认识与探索地球内部奥秘(例如其物质组成及演化规律等),发现地球内部的各种物理过程并揭示其规律,其研究历史可追溯到牛顿和开尔文等物理学家的研究工作。固体地球物理学主要以物理学为依托,研究地球内部结构、演化过程及动力学模型;其研究范围涉及地壳、地幔和地核,包括岩石层和软流层发生的各种物理现象、成因及其过程。这就需要通过地球物理场的观测资料处理和模型计算,并以地球为整体进行综合研究,以达到深入认识地球、造福人类的目的。空间物理学以太阳系特别是日地空间物理环境作为主要研究对象,研究近地(包括电离层、磁层)和行星际空间的各种物理过程,太阳活动的规律、起因及其对地球环境和地外飞行器的影响。地球物理学是一门应用性很强的基础学科,它的研究成果不仅有助于增进人类对地球及其空间环境的科学认识,而且支持着众多的国民经济建设中具有重要意义的产业部门和高科技领域,为太空时代的人类活动提供必要的基础。今天,地球物理学已成为地球科学中最具活力的学科之一,其研究成果将对 21 世纪人类的生存发展、太空环境的充分利用产生重要影响。

地球物理学不仅是一门处于发展前沿的地球科学分支,而且还支持着为数可观的产业部门,在能源和矿产资源的勘探与开发(其中勘探地球物理学是使用地震、重力、磁、电和放射性等方法来寻找石油、天然气、矿石、水等具有经济开发价值的资源的分支学科)、灾害的预测预防、环境监测和保护,甚至文物勘查以及监测核爆炸等方面,取得了辉煌的成果。

地球物理学是一门涉及面十分广泛的边缘科学,它涉及地球内部、大陆、海洋和宇宙空间。从 20 世纪 50 年代起,陆续实施了一系列大型的、全球性的研究计划,如国际地球物理年、国际上地幔计划、国际地球动力学计划、国际岩石圈计划、国际地学大断面计划、国际减灾十年、大陆钻探计划、全球变化计划和大陆动力学计划、日地物理计划、地球空间环境计划、近磁层和磁

爆计划等。这些研究计划的实施深化了人类对地球本体的认识,提供了有关资源、能源、灾害和环境形成、分布与发展的深层过程和空间要素的信息。日地空间物理的研究使得人们的视野扩大到宇宙空间(它是地球系统最外的圈层),极大地增强了对地球整体研究的思维与导向,不仅推动了深入了解空间和地球(包括大陆和海洋)以及生态环境之间的耦合关系,而且也加深了对人类生存空间、社会进步与经济繁荣及其可持续发展间关系的认识,同时加深了对固、气、液态物质成分及结构从地核到宇宙空间的认识。

在 20 世纪,地球物理学在以下 10 个方面取得了具有全球性意义的重大成就(陈运泰等, 2001;滕吉文,2003):

(1) 全球范围的地球物理研究计划和规划对地球物理学乃至整个地球科学领域均产生了极为深刻的影响。对全球范围内重要构造地域的沉积建造,地壳、Moho 界面、地幔盖层、软流层的分布特征、介质的基本物理属性和结构有了一个较全面的认识;为全球动力学研究,不同构造域的对比研究和规律性的认识提供了坚实的深层过程与基本要素;为资源、能源、灾害和环境研究给出了深、浅部的构造格局和包括地球外部空间在内的耦合网络;提出了“板块构造学说”,并对其块体运动和驱动力源进行了探索;对青藏高原的形成与隆升、环太平洋地震带与成矿带的成因有了较深入的认识。

(2) 发现了地球内部圈层结构的基本图像。1935 年英国的杰弗瑞斯(H. Jefferys)和新西兰的布伦(K. E. Bullen)基于当时已有的地球内部信息和地震资料联合编制了全球走时表,1968 年综合利用新的地震体波走时、视速度、地震面波的频散以及地球自由振荡的本征周期等数据,反演地球内部的速度和密度,给出了新的地球内部分层结构与特征,即分为 A、B(B'、B''、B''')、C、D(D'、D'')、E(E'、E'')、F 和 G 层,美国重新编制了平均 P 波走时表。走时表的建立为地震学和地球内部物理学的发展起到了重要作用。

(3) 板块构造理论经历了大陆漂移、海底扩张和岩石圈板块构造发展的过程,它以活动论为基本内涵,动摇了一系列传统观念,也触及了一些以前人们不敢触及的问题,并使得许多孤立的地学现象进一步得到规律性的认识。板块构造理论是地质学和固体地球物理学有史以来最为重要的科学成就,被誉为“科学革命”,以表征它在岩石圈板块大地构造中的作用和意义。

(4) 全世界共完成了 175 条 GGT 断面,其中包括中国的 11 条全球 GGT 大断面计划。在 GGT 大断面编制过程中以地球物理学为主导,在走廊域(宽 100km,深部软流层)内(跨越不同构造单元)进行单一地球物理场的深入研究和多种地球物理场的综合研究与解释。GGT 大断面是综合地球物理研究的产物,它对构造带的划分和深层过程的研究有着极为显著的作用,并对资源、能源和灾害深部背景和预测起着一定的指导作用。

(5) 地震活动和地震预测的研究进展迅速。自从 1906 年米尔恩(J. Milne)给出了全球地震图,1910 年里德(Reid)根据 1906 年旧金山大地震与圣安德烈斯断层的现场考察提出地震成因的弹性回跳理论,并成为地震断层说的支柱以来,中外地球物理学家们在地震活动和地震预测方面做了一系列研究工作与探索,对地震的全球分带特征(喜马拉雅—古地中海和环太平洋世界地震带的形成与板内地震活动的特异构造背景及其分区与分带特征),大地震“孕育”、发生与发展的深部介质和构造环境与震源的物理-力学过程和成因有了一定的认识;防震、减灾、地震灾害评估和地震预测(包括地点、时间与震级)取得了重要进展;建立了全球地震数字台网和各个国家和地区的数字地震台网。

(6) 非均匀性、非线性与各向异性介质中的地震波动理论与计算方法得到了发展,并在资源、能源、灾害和环境研究中得到了应用。

(7)自 20 世纪中叶前后,一系列地球物理勘探方法相继问世,特别是电法勘探、地震勘探、重力勘探、放射性勘探等,它们在世界范围内为科学进步、社会和经济的发展、确保 20 世纪的发展与繁荣起到了重要作用,为人类提供了大量的金属、非金属矿产和石油、天然气、煤、煤成气及地热等能源。资源与能源的勘查、开采与利用,对全球各国的科学进步、社会与经济的发展作出了重要贡献。此外,在大陆深部的钻探中,不论是超深钻井还是深钻井均在重要的地表地质构造部位,它是直接检测与获取深部介质结构与资源和灾害背景的唯一手段,但在开钻前又必须进行详细的深部地球物理探测。这不仅对检验深部结构与深层过程十分重要,而且对证实与修正地球物理反演结果以及对应力、应变和深部流体作用等也是至关重要的。

(8)在军事需要和国防建设及维护领土主权方面,地球物理学起到了中坚作用,如大陆的自由延伸与国土海域的划分界带;地下、地面与空中核监测与核侦察;中、远程导弹飞行轨迹以及落地点的准确计算;海中下潜物及其所在海底停卧位置的探测;飞行器的空中姿态;核泄漏的监测与防护导向,等等。

(9)全球范围内最具典型性地域的地球物理研究取得了显著成果。全球范围内最具典型性的地域有青藏高原、南北极地区、太平洋东西海域和陆缘地域等。在全球范围内,不论是板块、板缘和板内,其构造格局与深层动力过程都是十分复杂的,而且是不相同的,这些典型地域的地球物理研究在地球动力学的系统研究中起着控制作用。

(10)全球数字地震台网布局已初步完善并实施。大动态、宽频带、三分量数字化地震观测系统与台阵的提出及其在大陆、海洋与海底的观测已在逐步实现;全球定位系统(GPS)、人卫激光测距(SLR)、甚长基线干涉测量(VLBI)、精密重力测量(包括相对与绝对精密重力测量)和干涉合成孔径雷达(INSAR)观测网已初见成效。地球物理观测系统已得到不断完善,全球观测体系已初步形成,高分辨率的观测网络为大量可靠信息的获取提供了保证。

从 20 世纪 50 年代以来,地球物理学已逐渐成为地球科学中最重要的分支之一。在 21 世纪地球科学发展中必将成为地球科学中的先导学科。因为,不论是资源、能源、灾害、环境(包括空间环境)和深化对地球整体的认识,均必然地要研究和探索地球内部及外层空间物质与能量的交换、圈层耦合和其深层动力过程。地球物理学的发展体现了物理学、数学、信息科学等学科向地球科学的渗透,而地球物理学的发展又促进了物理学、应用数学、计算数学、信息科学、电子学及其他应用科学的发展。

21 世纪地球物理的主攻方向是地球内部圈层结构、物质-能量的交换和耦合及深层要素。研究中心是地壳、地幔、壳-幔边界、核-幔边界及地核和其形成与演化的深层过程及响应。研究目标是深部物质运移与板块(特别是板内构造与物质运移)运动和力源机制及新的地球动力学模型的建立。研究目的是深化对地球本体的认识,为资源、灾害、环境和全球变化提供地球深层物质运动的要素,并对其潜在前景进行预测(滕吉文,2003)。

地球科学的最终目标是了解地球本体以及其他行星从太阳系诞生以来的状态及其演化过程,以便能对行星的物理学、化学、地质学和生物学的作用过程建立起详细的、定量的概念性预测模式,即要建立地球(包括行星)的整体理论。

## § 1.2 大地测量学的发展

传统大地测量学是研究测定地面点位置、地球形状和地球重力场的学科。

自 20 世纪 50 年代开始,由于电磁波测距、声呐、卫星大地测量、高速电子计算机和人工智

能以及甚长基线干涉测量等新技术的相继出现,大地测量发生了革命性的变化,现代大地测量已经或将要实现无人干预自动连续观测和数据预处理,可提供几乎是任意时段分辨率的观测系列。可以说现代大地测量技术已跨越了时空和恶劣自然环境的限制,成为一种能持续稳定工作,以高灵敏度、高准确度监测地球动力学过程所反映的地表大地测量信号的精密技术系统。国际大地测量学和地球物理学联合会(IUGG)认为,大地测量学已发展成为一门基础性地球学学科,它有能力对地学的诸多领域(包括全球板块运动、地震区的形变、地球重力场及其随时间的变化、极移、地球自转速度变化、固体潮以及地球深部结构等)作出重要贡献。

大体上说,大地测量学包括几何大地测量学、物理大地测量学和卫星大地测量学(或空间大地测量学)三个主要学科分支,并进一步延伸和拓展,形成第四学科分支——地球物理大地测量学。

目前全球面临如下三大问题:一是地球动力现象引起的地震、海啸、火山喷发和异常气候(主要是厄尔尼诺现象)等自然灾害,给人类生命财产带来巨大损失;二是全球气候变暖、海平面上升、局部地层沉降和海上溢油公害等是随着工业发展引起的环境问题;三是由于人口不断增加和陆地资源日益枯竭,需要开拓生存空间和寻找新的矿产资源。面对上述三大问题,目前地学研究的目标有三个:一是减灾,二是监测环境,三是寻找新的矿产资源。与这些目标相适应,现代大地测量学将以延续人类生存、增进人类福祉为己任,向高要求和高难度的深层次发展(宁津生,1997)。

同传统大地测量比较,现代大地测量在三个方面有重大进展和突破:一是提高了观测精度,二是扩大了跨越范围,三是缩短了观测周期。如同生产技术的突破带来产品档次的更新换代一样,现代大地测量技术给大地测量成果带来了量和质的飞跃。整体水平变化的估计提高了2~3个数量级;相对定位的相邻点之间允许间距可达数千公里量级;可进行全天候观测,单点定位时间只需几小时甚至几分钟。GPS技术与INSAR技术融合不仅可以提供网点的地形变信息,还可以提供相应地表面的地形变信息;卫星影像和INSAR技术还可以在冰川、沙漠以及人无法进入的地区得到应用,提供地壳运动信息。

现代科学技术的迅速发展导致了大地测量出现了以上的重大突破,技术上的突破也导致了大地测量学科经历了一次跨时代的革命性转变,从而推动了传统大地测量在概念上的更新,它从描述地球的几何空间发展到描述地球的物理—几何空间。传统的大地测量是在静态刚性地球的假设下测定地面点的坐标和地球几何参数(半径、扁率等),现代大地测量则是测定地球重力场、极移、自转、板块运动、断层蠕变等地球物理参数,并监测研究非刚性旋转地球的动态变化。因此,现代大地测量学与地球物理学、地质学、地球动力学等学科相互交叉与渗透。更重要的方面体现在从地球表层测量到内部结构的反演。传统的大地测量理论只描述地球表面及其外部重力场,现代大地形变测量和全球动力学监测不仅要求观测地球的各种动态变化,而且还要对这些变化的激发机制作出解释,大地测量必须由地球表面深入到地球内部结构的反演。因此,大地测量从原来的服务对象——为测绘地形和工程测量等提供地面标准点位的控制(即为工程技术服务)的初级阶段为主转向以研究地球科学问题、为探索地球深部结构和动力学过程乃至地学各个领域提供多种信息的高级阶段。现代大地测量学将扩大其直接服务于社会经济活动的应用面,但总的趋势是向地球科学的深层次发展,推动学科发展的主动力将是其在相关地学领域的科学目的。大地测量学的学科性质将从以工程应用为主的应用型学科转向为以研究地球科学问题为主的基础性学科。现代大地测量已大大超过原来传统的大地测量的目标,形成了学科交叉意义上的大地测量学,可以提供和处理原来是地球动力学、大气学、

海洋学、冰川学、地质学和地球物理学的信息。

现代大地测量学的基本任务是：

(1) 建立和维持高精度的惯性和地固参考系,建立和维持地区性和全球性的三维大地网(包括海底大地网),以一定的时间尺度长期监测这些网随时间的变化,为大地测量定位和研究地球动力学机制提供一个高精度的地球参考框架和地面基准点网。

(2) 监测和解释各种地球动力学现象,包括地壳运动、地球自转运动的变化、地球潮汐、海面地形和海平面变化等。

(3) 测定地球形状和地球外部重力场精细结构及其随时间的变化,并对观测结果进行地球物理学解释。

此外,现代大地测量学由面向地球的大地测量学发展为包括月球和太阳系各行星的测量学。

由传统大地测量到现代大地测量的发展过程,是由区域到全球、由静到动、由表及里和由测地到测月和太阳系行星的过程。现代大地测量学的这些任务将在现代科学技术的支持下和与相关地球学科的交叉发展中得到实现。现代大地测量学将成为推动地球科学发展的前沿学科之一,并在经济和社会发展,防灾、减灾和救灾以及在环境监测、评估与保护及国防建设中发挥重要作用。

### § 1.3 地球物理大地测量学内涵

地球物理大地测量学是由大地测量学、地球物理学、地质学和天文学交叉派生出来的边缘学科,它的研究内容和目的是:利用近代空间大地测量和地球物理观测新技术,精确测定地球表面点的几何位置、地球重力场元素、地球自转轴在空间的位置和方向以及上述参数随时间的变化,并从动力学的观点研究地球动态变化的物理机制,进而为环境变迁和海平面变化的研究、地震火山等自然灾害的孕育预测、空间飞行器精密定轨和制导以及地下资源的勘探等提供服务。比如,测定地球自转(章动、极移和周日长)是大地测量学、天文学和地球物理学共同关心的问题。在天文学中需要建立严密的章动理论;在大地测量学中,需要建立和保持一个平极系统,并保持协调世界时与观测的恒星时之间的严密关系,以便在观测结果中顾及极移和地球自转速度变化的影响,并需要建立定量的极移理论,使极移预测成为可能。天文学和大地测量学所要研究的是,短时间尺度(1天到100年)的地球自转变化现象。从地球物理学的观点来看,需要探索大气层、海洋和固体地球之间的相互作用,阐明地幔和地核的构造及其相互作用,并最终解释导致地球自转变化的各种动力学机制。从大地构造学的观点来看,需要研究长时间尺度( $10^6$ 年以上)的地球自转变化现象,如极移和日长的变化等。

地球自转参数(地球自转速度和极移)的变化中包含着各种地球物理因素的变化信息,精确的、高分辨率的、长期的地球自转参数资料是探索这些地球物理因素的变化在激发维持地极的摆动、长期漂移和地球自转速度变化等方面所必需的。

地球物理观测是提供有关地球内部结构信息的主要来源,它们包括地震波的走势、振幅和频率、通过地表的热流量和磁场参数。行星的形状以及外部重力场的大地测量观测则提供进一步的约束。这些观测结果与物理和化学参数一起成为估测地球内部的性质并构成描述地球和其他行星演化模型的基础。地质学(包括地貌学和地球化学)的观测结果,是了解地壳演化史、变形事件史、变质作用史、岩浆活动史以及水平垂直运动史的关键。地震活动性研究在短

得多的时间尺度上提供了地壳的局部和区域变形的信息。中心的问题是确定导致这种变化的物理过程。如:作用在地壳上的已经发展成为当前这种状态的力的性质有何特点?造成大尺度水平运动的过程如何?产生变质和岩浆活动的热源的起源是什么?大地测量对于了解这些地质过程的贡献有两个方面:第一,大地测量的观测结果为地球对已知力的响应提供了一种量度,例如,在地表载荷问题中,作用力是已知的,变形的观测结果为地壳和地幔的流变性质提供约束;第二,大地测量观测结果被用来对力源本身提供约束(K. Lambeck, 1988)。

许多地球物理观测结果可用径向对称地球模型来拟合,但重力场的卫星测量结果表明,横向结构也很重要,这些资料提示了地球内部的非流体静力状态。这些全球的重力测量结果反映了地球的动力学过程,为地球的现今结构提供了进一步的约束,并间接地对地球的演化提供了约束。全球的构造运动的证据是很多的,但目前描述地震位移场和板块运动的模型基本上是运动学模型,只有很少的模型能解释引起地表运动的动力学机制,几乎没有模型能解释地壳或岩石圈下的变形。现代物理学和地质学的中心任务就是要定量了解所涉及的机制。虽然近年来在这方面已经有了显著的进展,但由于我们对地壳和地幔流变学的知识有限,对于作用在行星内部的力的性质的了解也很有限,因此,许多地球物理研究不仅是为了解决全球问题,而且也是为了解决相当专门的问题,包括地球的地震模型的进一步改进,地壳和地幔流变性质的确定,以及板块边界和板块内部的构造过程的研究。这样一来,作为研究地质学和地球物理学相关问题的大地测量学的发展就显得尤为重要了。

现代大地测量学包括地壳运动和变形,重力场的时、空变化及地球的潮汐和自转变形。大地测量学的观测结果在地球结构和演化的研究中起着重要的作用。在很长的时间尺度上,重力和大地水准面异常观测结果提供了有关地球内部非流体静应力和地球对这种应力的响应的信息。例如,在海山或沉积盆地上的重力观测结果可提供岩石圈对时间尺度为  $10^6 \sim 10^7$  年的载荷的响应量度;在  $10^3 \sim 10^4$  年的尺度上,海平面的视变化提供了地幔对发生在 18000 年至 6000 年以前的大范围的冰川消退的响应估计;在更短的几天到几十年的时间尺度上,固体潮和地球自转的观测结果提供了地球全球弹性和非弹性响应的估计;在局部,大地测量观测值提供了地壳变形的估计,而这种变形由于地震仪的响应频带宽度不够是探测不到的;倾斜和应变测量结果也可以解释地震前后的变形过程。

现代大地测量学观测手段与技术可以从相对短的时期内的观测中看到高噪声的地球物理信号,如地球短周期章动的 VLBI 观测。近地卫星的高精度激光跟踪也为重力场的中长波部分的测量和对由于固体潮、气象和冰期后回弹变形引起的重力场随时间的变化提供重要的信息。

已发射的 CHAMP、GRACE 和将于 2006 年发射的 GOCE 重力卫星,将会在很大程度上改善上述求定重力场的不足。由于这些低轨卫星借助于星载 GPS 不间断的精确三维定轨,以及高灵敏度的新一代加速度计对非惯性力的测定,加上高精度激光测距仪对同轨双星间距离变化的感知(即卫星跟踪卫星测距),完全可以构建几乎纯粹由地球重力场起作用的卫星轨道运动,由此反演地球重力场及其变化。根据估算,由这些卫星运动一个月所提供的重力数据所确定的重力场,其精度和空间分辨率(中低频)的可靠性将超过目前正在使用的地球重力场模型。CHAMP 卫星能提供和改善小于 90 阶的重力场球谐系数,GRACE 达到 150 阶(陈俊勇, 2003), GOCE 预测达到 200 阶左右。

重力卫星对地球重力场的持续观测可提供地球重力场的时变值。重力场的时变主要是由地球上各种物质的重新分布(各种物质迁移)引起的,这包括日月潮汐,后冰期回弹,大气移

动,其中影响较大的是地球水源(海、湖、河、地下水、冰川、冰原、雪原等)质量分布的变化。今后重力场的时变测量,近期来说,将对海平面上升、冰川学、海洋动力学和大陆水量变化的研究作出独特的贡献(陈俊勇,2003)。

地球物理大地测量学是现代大地测量学的延伸和拓展。现代大地测量学和地质学、地球物理学的关系非常紧密,大地测量学能够给研究地球物理问题和地质问题提供必要的资料,同时,它的发展也是伴随着地球物理学和地质学的发展和不断发展的。

地球物理大地测量学主要是利用大地测量技术与手段,包括天体测量学技术与手段,结合地质学和地球物理学证据一起对地球的慢形变进行研究,并对观测结果进行地球物理解释。这种慢形变包括地壳运动和变形、重力场的空间和时间的变化,行星自转和潮汐变形。

地球物理大地测量学原理与方法主要讲述研究地球慢形变的理论、观测技术和研究方法;着重讨论地壳运动及与其相关的一些问题,包括板块构造运动和地壳运动的监测,研究地壳运动的方法与手段,应力应变分析,大地测量地球物理反演,地震的预测预报等。

## § 1.4 地球物理大地测量学和地球动力学的关系

与地球物理大地测量学密切相关的术语是地球动力学。地球动力学是地球科学与力学相结合的跨学科研究分支,它从地球整体运动、地球内部和表面的构造运动探讨其动力演化过程,进而寻求它们的驱动机制(王仁,1997)。地球动力学的名称是著名弹性力学家勒夫(Love)于1911年在其论文“Some Problems of Geodynamics”中首次提出的,他对地壳的均衡、固体潮、地球内的压缩效应等进行了卓越的研究,在地球学和潮汐理论中的勒夫波和勒夫数就是以他的名字命名的。

地球动力学研究地球的整体运动、地球内部运动及其与地表结构的相互作用和地表大型构造变形和破裂的力学过程。地球动力学是一个复杂的跨学科课题:它依赖于地质学提供近地表的构造;大地测量学提供位移测量;地球化学、材料科学和岩石力学提供介质的性质;地球物理学提供深部结构以及可能的动力学驱动机制;地震学给出地震机制数据和地震勘探结果;古生物学和古地磁学决定过去的历史,等等。

地球动力学又有天文地球动力学和空间地球动力学之分。天文地球动力学是用天文手段测定和研究地球各种运动状态及其力学机制的一门学科(郑大伟,1994),它所研究的主要内容是地球的整体自转运动和公转运动以及地球内部、地壳、水圈、大气圈的物质运动。因此,天文地球动力学是天文学与大地测量、气象、海洋、地质、地震、地球物理等多学科相互交叉、相互渗透而发展起来的一门新兴前沿学科。在这门学科领域中,天文学的重要作用是:精确地测定地球的各种运动状态,提供测量所需要的参考坐标系,研究地球各种运动的规律和机制。空间地球动力学则是用空间观测技术来研究人类赖以生存的地球系统中的各种运动状态及其力学机制的一门学科,属天文、地质、空间大地测量和地球物理等学科的交叉前沿研究领域。空间地球动力学主要用空间技术精确测量地球的整体运动、地球各圈层(特别是岩石圈)的物质运动与形变,定量地给出地球随时间的变形过程,确定各种运动或变形过程的相互联系,探索它们的演化过程和动力学机制(叶叔华、黄城,1995)。

空间技术在地球动力学乃至地球科学的研究中起着关键作用。地球科学的研究,从静态研究发展为动态研究,从运动学扩展到动力学,从三维空态拓展到四维时空,从刚体领域转变为弹性体和流变体的研究,从地球表面伸向地球外部空间,深入地球内部,从孤立的地球整体



和地球各圈层(大气圈、水圈、岩石圈、地幔、地核)运动的研究,转变为把地球整体和地球各圈层的运动看成一个完整体系,研究其相互激发、驱动和制约的动力学关系,从地球动态变化的一些定性假设到以高精度实测为基础建立精细的现代地球的定量模型、进而建立完整的动力学体系,从各学科封闭式的研究状态转向各学科交叉、综合的研究。地球科学随空间新技术的发展正经历一场深刻的变革。此外,通过空间新技术可发现传统方法无法探测到的地壳运动非线性时变细节,进而能真正探索地震、火山喷发、海陆升降的成因过程与机制,为预测灾害、保护人类生存环境作出贡献(叶叔华、黄城,1995)。

地球动力现象的空间尺度是非常广阔的,从地球整体、全球范围直到一个小的局部。从时间尺度来看,地球动力现象有以亿年计的大陆漂流、海底扩张和造山运动过程,有以万年计的冰期和间冰期所引起的一些构造过程和海洋过程,也有周期为几十年、十年、一年、半年、一月、半月乃至一日的各种周期运动,直到为时短暂的地震发生和火山爆发。

透过这些复杂的地球动力现象,探索其力学机制,进而掌握其发生和变化的规律,预测其发展趋势,这属于地球动力学的任务,而地球物理大地测量学的基本原理和方法是研究地球动力学的基础。