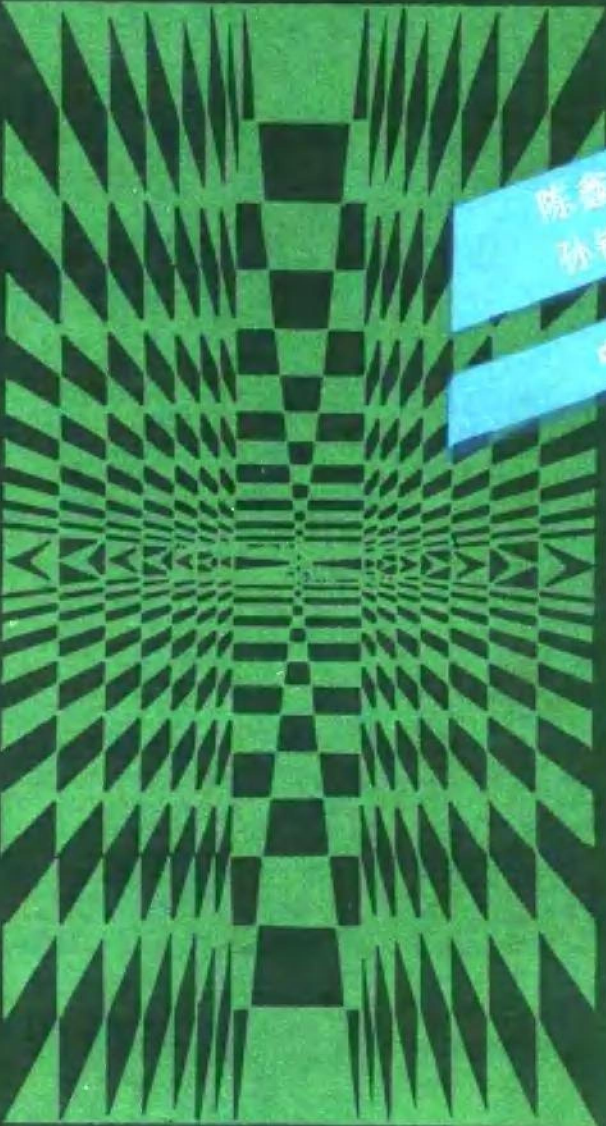


动态大地测量

DONGTAIDADI CELIANG



陈鑫连 黄立人 编著
孙铁珊 薄志鹏

中国铁道出版社

动态大地测量

陈鑫连 黄立人 编著
孙铁珊 薄志鹏

中国铁道出版社

1994年·北京

(京) 新登字 063 号

内 容 简 介

本书介绍了动态大地测量学形成和发展简史, 讨论了它的主要研究对象和方法, 以及它在地球科学中的贡献和作用。结合我国动态测量的实践, 详细论述了获取可靠的地球变形的量化结果所涉及的监测网的布设、优化、数据筛选、变形分析模型及数学方法。讨论了地球物理解释的基本理论和实用方法。

本书可作为从事大地测量、精密工程变形测量、地球物理、地震、地质等学科的科技工作者的参考书。也可供相关专业学生、研究生和教师参考。

* 本书为地震科学出版基金项目

动态大地测量

陈鑫连 黄立人 编著
孙铁珊 薄志鹏

*

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条 14 号)

责任编辑 于文著 封面设计 赵敬宇

各地新华书店经售

北京市燕山联营印刷厂印

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20 字数: 464 千

1994 年 4 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 1—1500 册

ISBN 7-113-01599-9/TU · 348 定价: 35.00 元

序

动态大地测量学是近 20 几年来在大地测量学内迅速发展起来的一个新兴分支学科。它与地球物理学、地质学、地震学和地球动力学有着密切的有机联系，并在这些学科的发展中起着越来越重要的作用。一方面它为地球形变和自转运动提供具有时相的高分辨率、高精度的直接定量依据，另一方面又与反演技术相结合为验证和创立产生这种形变的机制的各种基本理论和学说提供了有力的手段。

大地测量学的研究方法由静态向动态发展，研究对象由静态定位、地球形状和重力场发展到动态甚至实时定位、地壳形变、地球自转运动及重力场的变化，并进一步向地球内部物理的研究领域延拓，这无疑是大地测量发展的一个很重要的趋向。本书根据国际上在这一领域取得的新进展，结合我国 20 多年来在动态大地测量方面的大量实践和理论研究成果，进行了系统地归纳和总结，讨论了它的任务和方向，介绍了我国现阶段动态大地测量实践的基本理论和做法，论述了为获取可靠的地球形变的量化法而所需的监测网布设及其优化、观测数据筛选和评估、形变分析模型和数学方法、观测结果的物理解释的基本理论和方法。本书的论述兼顾理论的严谨与方法的实用性，既介绍了当前国际上在这一领域的前沿研究成果，又顾及了理论、方法与实用，是一本系统的介绍动态大地测量学基本理论和方法的好著作，适合于广大地学科技工作者尤其是大地测量、精密工程形变测量、地球物理、地震、地质等有关学科科技工作者阅读的一本很有价值的参考书。

本书的作者长期从事地壳运动的研究和教学。本书的出版，是他们在这方面工作的结晶。由于这门学科处于蓬勃发展的阶段，它所包含的内容又是如此广泛，本书作者别具匠心编著此书奉献世人，是值得推崇的。我相信，本书的出版必将有助于推动和促进我国在这一学科方面的发展和前进，使这门年轻的学科逐渐完善和成熟起来。

我衷心地祝贺本书的出版，感谢作者付出的辛勤劳动，也向广大的地球科学工作者推荐这本书，愿与更多读者一起同享其益。

陈俊勇

1992 岁末

前 言

最近 20 多年来,随着科学技术的迅猛发展,尤其是空间大地测量技术和地面高精度观测技术的突破性进展,高精度、大范围、瞬时的实测资料大量积累了起来。另一方面,板块构造理论的出现,近代地震学和地球内部物理学研究的深入,为观测到的这些资料的解释开拓了全新的富有生命力的科学思路和方法。动态大地测量就是在这样一种背景上形成和发展起来的一门新兴边缘学科。这门学科以变化着的地球为其研究对象,以定量观测地球变化为基本手段,以探索产生这种变化的成因机制为基本任务,以在继承几何大地测量学和物理大地测量学的方法和理论的同时,广泛吸收了地球物理反演理论和方法,板块构造学说及地震地质、地球内部物理学等相关学科的最新成果形成的一套理论和方法为其基本特点,逐渐发展成地球动力学的一个重要分支。

从动态大地测量学涉及的任务来说,它的研究工作的某些内容可以追溯到 300 多年以前的 16 世纪。但是,作为一门独立学科,动态大地测量学这一名词的确立才不过是近 20~30 年的事。因此,还没有见到对动态大地测量学作系统全面论述的专门著作。虽然有关的文献已大量出现在各类地球科学刊物上。

我国对动态大地测量学的比较系统的研究,是从本世纪 60 年代研究与地震有关的地壳变形现象开始的,并且在以后的几十年中逐渐形成了自己的特色。今天,动态大地测量学已经成为地球科学许多相关学科的科学工作者的一个新的热门课题。

本书的作者在自身研究过程中,深感经过 20 多年的发展,现在是把这 20 多年的主要研究成果作一个比较系统的总结和回顾,并进而对动态大地测量学中涉及的一些基本问题和它的发展方向提出自己看法的恰当时机。它既可承上启下,回顾过去,以便更好地明确未来的努力方向,促进这一学科的深入发展;又可借此抛砖引玉,吸引更多的地球科学工作者投身到这一学科的研究中来,为解决一系列重大的地球科学问题作出自己的贡献。

由于作者从事的工作和学识上的局限性,本书不是动态大地测量学的系统的教科书,书中的挂一漏万和不足之处也是在所难免的。若能起到上述的作用,作者的劳动就是有意义的了。

本书的第一、二章由陈鑫连执笔,第三、四章由孙铁珊执笔,第五章由薄志鹏执笔,第六、七、八章由黄立人执笔。最后由陈鑫连统一了全书、黄立人完成了全书的校阅。

本书在编著过程中,得到了国家地震局科技司吴宁远、沈建华、刘小卫同志的大力支持,第一地形变监测中心的马青同志完成了全书的录入,覃忠德同志清绘了全部图件,王敏、赵承坤、杨国华同志也付出了自己的劳动,在此一并致谢。

作 者

1992. 12. 8

目 录

第一章 导 论	1
§ 1-1 动态大地测量学简史.....	2
§ 1-2 动态大地测量学的任务.....	3
§ 1-3 本书的主要内容.....	5
第二章 全球尺度的形变和动态测量	7
§ 2-1 地球自转和地极运动.....	7
§ 2-1-1 地球自转	7
§ 2-1-2 岁差	7
§ 2-1-3 章动	8
§ 2-1-4 地球自转速度变化	8
§ 2-1-5 极移	9
§ 2-1-6 地球自转轴变化和极移的观测方法.....	11
§ 2-1-7 地球自转、速度变化、极移与地震的关系.....	12
§ 2-2 大地水准面的变化和固体潮的改正	13
§ 2-2-1 大地水准面的变化.....	14
§ 2-2-2 地壳变形对大地水准面的影响.....	15
§ 2-2-3 固体潮的各项改正.....	16
§ 2-3 现代板块运动	18
§ 2-3-1 板块驱动机制.....	18
§ 2-3-2 板块运动的地质学和地球物理学证据.....	19
§ 2-3-3 现代板块运动的测量方法.....	20
§ 2-3-4 现代板块运动的实测结果.....	24
参考文献	29
第三章 区域形变测量	30
§ 3-1 区域形变测量的任务	30
§ 3-2 形变监测网的布设原则	31
§ 3-2-1 精度要求及目前可能达到的精度.....	31
§ 3-2-2 区域形变测量的特殊要求.....	34
§ 3-2-3 布网的基本要求(原则)	35
§ 3-2-4 重复观测周期.....	36
§ 3-3 区域形变测量的若干技术问题	38

§ 3-3-1 基于常规大地测量手段的区域形变测量·····	38
§ 3-3-2 空间技术在区域形变测量中的应用·····	43
参考文献·····	53
第四章 近场形变测量 ·····	54
§ 4-1 跨断层大地形变测量·····	54
§ 4-1-1 跨断层大地形变测量方法·····	54
§ 4-1-2 跨断层大地形变测量的作用·····	57
§ 4-1-3 困难和问题·····	58
§ 4-2 定点断层形变测量·····	59
§ 4-2-1 应变测量·····	59
§ 4-2-2 倾斜测量·····	68
§ 4-2-3 定点形变测量中的几个问题·····	75
参考文献·····	77
第五章 大地控制(变形监测)网的优化设计 ·····	78
§ 5-1 最优化原理·····	78
§ 5-1-1 概述·····	78
§ 5-1-2 线性规划·····	80
§ 5-1-3 非线性规划的几个基本概念·····	86
§ 5-1-4 最优性条件·····	88
§ 5-1-5 无约束最优化的直接法·····	89
§ 5-1-6 无约束最优化的解析法·····	91
§ 5-1-7 求约束极值的二次规划法·····	93
§ 5-2 大地控制网优化设计·····	96
§ 5-2-1 大地控制网设计概述·····	96
§ 5-2-2 大地网的质量指标·····	99
§ 5-3 大地网零级优化设计·····	110
§ 5-3-1 零级优化设计的实质·····	110
§ 5-3-2 秩亏网平差·····	110
§ 5-4 大地网图形结构的优化——一级优化设计问题·····	111
§ 5-4-1 用因素交替法确定控制网的最佳图形结构·····	112
§ 5-4-2 按梯度法确定网的最佳图形结构·····	113
§ 5-5 观测计算最优化——二级优化设计问题·····	115
§ 5-5-1 按纯量精度标准进行大地网的二级优化设计·····	115
§ 5-5-2 准则矩阵的无约束最小二乘逼近法·····	118
§ 5-5-3 解 SOD 问题的数学规划法·····	122
§ 5-5-4 方向观测网优化设计的特殊问题·····	125
§ 5-6 附加观测设计的最优化——大地网三级优化设计·····	128
§ 5-6-1 三级设计的序贯优化法·····	128

§ 5-6-2 按准则矩阵进行三级优化设计	131
§ 5-7 形变监测网的优化设计	133
§ 5-7-1 形变监测网的灵敏度	133
§ 5-7-2 按灵敏度要求构造准则矩阵	137
[附录 1] 矩阵的特殊乘积和拉直变换	139
[附录 2] 西尔曼-莫里生 (Sherman-Morison) 公式	140
参考文献	142
第六章 粗差检验和方差分量的估计	144
§ 6-1 粗差检验	144
§ 6-1-1 改正数的性质	144
§ 6-1-2 广义的统计检验模型	145
§ 6-1-3 几种单个粗差的检验方法	151
§ 6-1-4 粗差检验的弃真、纳伪错误, 监测网的内可靠性与外可靠性, 粗差的转移和淹没	154
§ 6-1-5 多个粗差检验的方法	161
§ 6-1-6 粗差定位的稳健估计法	171
§ 6-2 方差分量估计	173
§ 6-2-1 方差-协方差分量的极大似然估计	173
§ 6-2-2 方差-协方差分量的最小二范数无偏估计	176
§ 6-2-3 方差-协方差分量的赫尔默特估计	182
§ 6-2-4 方差分量估计应用举例	185
参考文献	187
第七章 形变场的模拟	188
§ 7-1 位移场的参考基准	188
§ 7-2 地壳垂直运动的模拟	189
§ 7-2-1 离散点场模型下的地壳垂直运动模拟	190
§ 7-2-2 连续地壳垂直运动模拟的回归模型	203
§ 7-3 地壳垂直运动模拟中的几个具体问题	213
§ 7-3-1 离散运动点场模型中速率参数的筛选	213
§ 7-3-2 离散运动点场模型中点的稳定性判别的模糊数学方法	217
§ 7-3-3 速率面回归模型中核函数中心点的选择	220
§ 7-3-4 基准变换	222
§ 7-4 几种模型的一个研究实例	223
§ 7-5 模拟地壳垂直运动的谱分析方法	228
§ 7-5-1 地壳垂直运动的二维切比雪夫谱分析方法	228
§ 7-5-2 地壳垂直运动的二维富里叶谱分析方法	229
§ 7-5-3 研究实例	231
§ 7-6 地壳水平运动的模拟	239

§ 7-6-1 离散点场模型下的地壳水平运动模拟	239
§ 7-6-2 位移场的参考基准及其变换	245
§ 7-6-3 地壳水平变形的应变场模拟	248
§ 7-6-4 模拟地壳水平变形的分块均匀介质模型	254
§ 7-6-5 研究实例	259
§ 7-6-6 模型误差及单点位移的探测和定位	261
§ 7-7 形变场模拟的位错模型	262
§ 7-8 连续水平形变场的多面函数拟合	268
参考文献	272
第八章 形变场的物理解释	274
§ 8-1 基于位错理论的反演方法	274
§ 8-1-1 观测方程	274
§ 8-1-2 反演问题的求解方法	275
§ 8-1-3 两个实例	285
§ 8-1-4 小结	291
§ 8-2 有限元方法	292
§ 8-2-1 有限元方法概述	292
§ 8-2-2 弹性理论中的几个概念	293
§ 8-2-3 两类平面问题	297
§ 8-2-4 有限元方法的基本步骤	299
§ 8-2-5 有限元方法的应用实例	303
参考文献	309

第一章 导 论

最近 20 多年以来,随着科学技术的迅猛发展,实测资料的大量积累,地球科学的研究所取得的巨大成就,促使地球科学逐步向定量化的研究领域迈进,从而把早在 1911 年由著名力学家勒夫 (A. E. H. Love) 提出的地球动力学的学科又重新得到复苏和发展。

地球动力学这门学科的首要问题是确定地球表面及其内部的变形。地球表面变形是属于变形几何学的研究范畴,而地球内部变形则是变形物理学的内容。变形几何学的主要方法与手段,就是动态大地测量学的主题,然而确定地表变形时,通常也采用重力学的方法,因此就此意义来说,几何形变与物理形变学就没有严格的区别,地壳研究中的基本问题仍然是它的变形,变形学可以有两种根本不同的方式,即连续变形与不连续变形。在连续变形的理论中,已有几个分支获得非常深入的发展,弹性理论和粘性流体动力学都达到了很细致的程度,但是,由于地壳介质的不均匀性,实际上很难套用其中任一种理论。尽管连续位移理论中的塑性理论,与地壳中观测到的位移有某种密切的关系,但由于塑性理论主要是描述金属冷却过程的行径,因此这类理论对地壳的应用不可能得出满意的结论。由于地壳中有许多破裂、裂隙、断裂等的现象存在,研究不连续位移是极为重要的。虽然已有相当多的关于断裂的经验判别法则,但对整个断裂的认识还是不完整的,如何描述其中一个断裂面的扩展这样一类问题,目前,尚未得到解决。

在相当长的地质时期中,地质学是地球表面相对运动的记载之一,最近才意识到,垂直运动比水平运动的更为广泛,数公里厚的沉积岩层表明,地壳向下的位移量是非常可观的。这一位移证明,除沉积层的重量外,还存在向下施加于地壳的力;不然,均衡补偿就会将沉积的厚度控制在很少的几公里以内。水平移动是通过沉积地层的褶皱和走滑断层才被认识的,大尺度水平运动的证据不是直接得出,而是用比较间接的方法得到的。古地磁学以及大洋海底的磁性质提供了关于海底扩张及其引起的大陆运动的设想。不同大洋将两边的海岸线加以拼凑使之吻合,同样提供了大陆移动的进一步的证据。尽管这些证据尚未最后定论,但是 Wegener (1924) 采用了这种方法,后来很多学者已经将其定量化,确定了美洲对欧洲和非洲海岸域的拟合。方法的过程是,选择一条约 915m 的等深线确定大陆的边缘,然后使大西洋西岸等深线间不吻合的区域面积使其拟合最小。实际上可以利用 Euler 定理;球面上任何一点的移动都可归化为通过某一极点的转动。对于美洲绕该极的一个转动角 Φ_0 , $\Phi_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Phi_n$, 计算结果令人鼓舞。由此可见,由纯粹的转动的良好拟合的事实,有助于说明地球表层的刚性特征。深入研究再次表明,在中石炭纪 (3.25 亿年前) 和晚三叠纪 (2 亿年前) 之间曾有过重大的地壳相对运动。主要包括北美—欧洲联合陆块从位于南美洲西北部的位置的运动。地质学不论用直接方法或间接方法已为地球表层变形作了历史性的记载。

§ 1-1 动态大地测量学简史

大地测量学按其方法可分为几何大地测量学和物理大地测量学。前者主要以三角测量(或三边测量)和水准测量方法为主体来研究地球形状和大小,后者主要是考虑重力位的大地测量学。几何大地测量经历了漫长的历史进程。公元前 220 年前后,埃及的伊拉托斯森尼斯(Eratosthenes)就开始计算地球的大小。他发现在现今的阿斯旺,夏至那天中午,太阳光直射深井底部,而同时在亚历山大发现太阳光与直立于晷中央的杆子之间有一个 $7^{\circ}06'$ 的夹角。说明两点之间的纬度差为 $7^{\circ}06'$,根据当时商船在两点之间的行程约为 920km。伊拉托斯森尼斯所得的子午线长度与当今的精确值之间仅相差 15%。他的惊人功绩使他被后人称为大地测量学之父。16 世纪末,荷兰的斯内留斯(W. Snellius)发明了三角测量法。1683~1718 年,卡西尼父子(J. D. Cassini)才用三角测量方法在法国境内求出通过巴黎的子午线上 1° 的弧长。1735 年后,法国科学院先后派出以布格(P. Bouguer)和克莱洛(A. Clairaut)为首的两支队伍,南起赤道,北迄北欧,测量子午线上的 1° 弧长,并证实地球为一扁球。从几何学观点支持了牛顿万有引力定律。其后,在 1800 年由弧度测量结果确立了米制,作为基本计量单位之一。

从 18 世纪中叶到 20 世纪初期,弧度测量与随后发展的天文大地测量成为一个崭新时期。尽管该时期是以测图控制为主要目的,但在地球椭球体参数的精化方面有了长足进展。由于几何大地测量中的三角测量和水准测量方法一直沿用数百年,在精度与观测方法上没有突破性进展,因此一直到 20 世纪中叶,大地测量陷于停滞状态。

在物理大地测量中,自 1672 年法国里歇(J. Richer)发现在南美圭亚那的卡宴(纬度 $4^{\circ}46'$)与巴黎的单摆钟,易地后用同一个钟却差 2min28s。说明摆的周期与重力加速度的平方根成正比。证实地球是一个在赤道附近凸起的扁的椭球体。牛顿认为,里歇的结论是地球为椭球体的有力证据。但物理大地测量学的形成,始于 1743 年克莱洛理论的提出。在发展过程中,有两个极为重要的历史性的理论阶段,一是 1849 年的斯托克斯理论的出现,另一个是 1945 年的莫洛琴斯基理论的诞生。但迄今为止,无法为已有理论提供全球重力异常的资料。尽管如此,若历史地分析学科的形成过程,可以说,大地测量学乃是地球物理学之母,同时,它也加强了天文学的基础。因为,研究天体的位置和时间的“方位天文学”也被列在广义的大地测量学中。

50 年代末的人造卫星出现,60 年代末发展起来的 VLBI 技术和 70 年代初的 GPS 技术,使大地测量学步入崭新境地。空间技术与计算机技术以及激光技术的发展,使大地测量不仅提高了观测精度,缩短了观测周期,而且不受气候条件、地理环境所限,扩大了跨度范围。填补了时间与空间上的空白。它能获取高精度、大范围的瞬时动态资料,从而为分离地球各种动态效应,建立相应数学模型和物理机制提供了重要手段。于是便形成了动态大地测量学。

动态大地测量学名词的出现是近 20 年的事,但用大地测量方法研究地球运动,则是较早的。1765 年,欧拉(Euler)提出了地球运动有一个 $A/(C-A)$ 恒星日的周期的见解,其后,1841 年 Pater,1842 年 Beisel 和 1851 年 Maxwell 相继研究周期为 10 个月的纬度变化。1891 年,Chandler 的研究表明,除了一个周年项外,还有一个 428 天的周期项。这方面的争议,使

纬度观测成为测定地球刚性的一种最好的手段。导致了国际纬度局 (ILS) (1900~1961 年) 的成立, 1962 年后改名为国际极移局 (IPMS)。大陆漂移, 早在 1620 年, 弗朗西斯·培根 (FRANEIS Bacon) 就讨论了西半球过去曾与欧洲和非洲连接的可能性。1668 年, 普莱斯撰文说明美洲与地球的其它部分不是分开的。大约 200 年后, 安东尼奥·斯奈德 (Atonio Snider) 提出, 所有大陆过去都曾经是单一陆地块的一部分。19 世纪末, 徐士 (Suess) 把南半球大陆重新组合成一个单一的巨大陆块, 称为冈瓦纳古陆 (印度的标准地质区)。1908 年美国的泰勒和 1910 年德国的魏格纳各自单独地提出了解释大规模侧向移动的机制, 由此说明各大陆漂移的原因。但遭到英国地球物理学家哈罗德·杰弗里斯等人强烈反对, 他认为地壳及其下的地幔太刚硬, 而可用的能量有限, 不足以引起这么大的运动。30 年代后期, 文宁·迈纳兹 (Vening Meinez) 在西太平洋深沟及其相邻的岛弧所进行的重力测量, 发现曾经记录到的某些重力均衡补偿不足的最大值, 说明深海沟并不保持地壳均衡。那里作用着的把地壳牵引到海沟深处的某种力比重力的牵引更强烈。从而提出地幔的热对流可以提供这样的机制。这种论点得到广泛的承认。经过对大陆漂移说的长期辩论, 导致了海底扩张的发现。这就是 60 年代执行上地幔计划中取得的海底扩张假说和板块构造假说等成果。70 年代, 基于上地幔计划的成果, 研究的焦点又集中在地球内部的运动上, 于是又提出了地球动力学计划。动态大地测量学获得飞速的发展。80 年代又为保护环境、矿产资源和减轻自然灾害提出了岩石圈动力学计划。

美国科学院认为: “导致美国西部的地震的应变积累性质的认识, 都是来自 19 世纪末的大地测量的研究。”以及后来根据北欧芬纳斯堪的纳维亚和加拿大哈得逊湾等地的地壳长期隆起的数据 (前者系 1892 年以来的水准测量资料), 反演地球介质的粘性, 求得相应的粘滞系数。由于板块相接触处, 经常发生地震、火山活动、造山运动等地学现象。因此, 在日本列岛为研究地壳变动所布设的大地测量监测网, 以及前苏联在 40 年代起布设的精密大地网用以研究地壳运动的成果, 说明动态大地测量学的区域性的研究特点。但是, 动态大地测量学从研究的完整性来说, 则要推美国地壳运动测量专业委员会编写的“构造形变测量” (Geodetic Monitoring of tectonic Deformation-Toward a Strategy) 一书 (1984 年, 中译本), 以及在 1987 年由国际大地测量协会下设的 4.96 专题研究组编写的“四维大地测量定位” (Four-dimensional geodetic positioning) 一书。另一方面, 近些年来, 整体大地测量由三维向四维乃至多维的推进, 无疑为动态大地测量学在理论上有限的离散几何参数集合的三维欧氏空间的初等几何问题向无限、非初等连续函数发展。因此这类问题便与地球物理的反演问题相似, 它的解不是单值的。于是整体大地测量问题成为一个典型的不适定问题 (解的存在性、唯一性和稳定性)。但是, 它将几何参数与重力参数相结合构成了非线性的泛函数, 通过线性化的展开, 并引入正则化条件, 即可求出最小二乘配置解。目前这套实用观测方程已研制有了软件包 OPERA2.4 (Hein)。在我国滇西和鲜水河的实验表明, 大地水准面的计算精度都达到了厘米级, 点位精度达到亚厘米级 (或毫米级)。表明整体大地测量是一种高精度有效的处理方法。

§ 1—2 动态大地测量学的任务

动态大地测量学是地球动力学的重要分支之一, 是研究地球变形学 (几何与物理的) 的

重要方法。它既集成几何大地测量学和物理大地测量学的方法与理论，又延拓其它地球科学的最新进展，并辅以随时间变化的数据处理方法和物理解释。

动态大地测量学主要研究地球的变形。地球随时间的变形可以分为长期的、周期性的和突发性的，此外，人类活动形成的局部变形是确定性的。由于观测资料的长度不足，尚无法区分长期运动与长周期运动。其中固体潮和冰期后回弹已占有较长资料，因此对此了解也相应的充分些。

地球是一种粘性弹性介质的球体，它对变形力的响应特征主要取决于作用的时间。对于短周期变化（含突变）的响应主要是弹性，对长周期变化则主要是粘性。引起地球变形的原因，主要是：

（1）潮汐力——天体对计算点的引力与地球质心引力之差。潮汐位可以展开成天体天顶距的勒让德级数。潮汐力直接影响是地球重力场随时间的变化。由于受地球自转和天体运动的影响，因此，潮汐力是周期性的。潮汐力最大影响是海潮。

（2）地球自转和地极运动——地球的日自转速率有长期的、周期性的和不规则的变化。地极运动对重力场有明显影响，可引起大地水准面的变化达 7cm。但地球自转与地极运动估计不影响地球的形状。

（3）地壳荷载变化——由于地幔物质受热和压力的影响可变得易于流动，而使漂浮在地幔物质上的固体板块受到各种地球物理荷载的影响，从而引起地球表面区域性的变形，使重力场和大地水准面发生变化。

（4）构造运动——由于岩石圈与软流圈之间的密度的差异，驱使板块不断漂移和在汇聚带处板块下沉，从而形成构造运动。由于热对流，岩石圈基底的剪应力影响板块的动力学性质，以致引起断层运动，使地壳发生区域性变形。

（5）突发性运动——与地震和火山活动有关的地壳运动。通常与板块运动密切相关。人们已观测到地震前的地壳形变的事实，如海城地震前金县短水准异常，鲜水河断层的蠕动、粘滑与地震的响应等。火山活动前，通常可观测到地壳垂直形变与重力场的变化。

（6）人类活动的荷载——地面局部性的下沉和人类活动引起的坍塌和各种滑坡。如地下洞穴、采矿、开采地下水或石油，以及地下核爆炸触发的相应的地球自由振荡等。

地球自身的运动以及外部天体的触发，地球处于动态过程中，因此静态大地测量的参考坐标系是不适应的，目前迫切要求建立一个保持长期稳定的参考系统，即建立全球惯性坐标系。使各种随时间变化的动力现象都能在这个系统中予以表述。

地球变形的原因很广泛，精确测量地球的变形，定量给出地球随时间的变形过程，以及对变形机制提出物理的解释，这便是动态大地测量的主要任务。具体地说：

（1）定量观测地球自转速度和地极运动随时间的变化，为研究全球其它地球动力现象（全球地震活动、全球气象变迁等）以及地球内部物理过程（如核幔耦合现象等）提供基础数据，探求相应的激发机制。

（2）测定地球固体部分的弹性变形随时间变化的固体潮。根据倾斜固体潮、应变固体潮和重力固体潮的数据，研究地壳弹性常数的分布，不仅确定地壳变形的幅度，而且获得地壳变形的周期特性，同时得到有关地球内部构造的特性。固体潮的短期畸变，可能被视作地震前兆的信息。此外，固体潮数据为大地测量资料本身提供有关改正项的数值。

(3) 监测不同周期变化的活动板块的边界运动、应变积累、板内变形以及其它构造运动或区域性的地壳运动。研究地震时空展布规律、软流圈的流变特性、板块之间的力学耦合程度、建立板块驱动机制。

(4) 监测全球重力场或区域重力场随时间的变化, 不仅研究地球内部构造和物质分布状态, 而且推断地幔对流的模式。研究冰盖——海洋质量迁移引起的地壳升降, 反演地幔的有效粘度。

(5) 监测人类活动对环境的影响, 地壳地面沉降、矿山崩坍, 岩体滑坡以及其它自然因素导致地表变化而造成的各种灾害。

(6) 建立一个有精密时间系统的全球惯性坐标系。

§ 1—3 本书的主要内容

动态大地测量学形成和发展的历史以及现今动态大地测量的研究内容和方法表明, 它是一个多种学科交叉结合的内涵十分丰富、领域十分广阔的新兴学科。它几乎涉及了绝大多数的地球科学分支学科, 它的研究成果将对整个地球科学的发展作出贡献。

要在本书有限篇幅内包容动态大地测量学的所有方面或者只是其主要方面显然是不可能的, 它也大大超出了本书作者的学识和能力, 因此, 我们不得把本书的内容局限于作者相对较为熟悉的某几个方面。从这个意义上来说, 把本书称为“动态大地测量学”不能说是恰当的。它似乎应当更恰当地被称之为“动态大地测量学若干问题”。但是, 作者还是采用了“动态大地测量”这样一个名称。这是因为动态大地测量学作为一个独立系统的学科在中国还不曾明确而广泛地被接受和承认, 我们希望本书的出版能为这一新兴的具有强大生命力的学科的确立和发展起到一点促进作用。此外, 本书也确实简要地提到了作者对“动态大地测量”这一术语所包含的内涵的理解, 对它的研究领域和方法作了概述。

关于本书的主要内容, 读者可以从每个章节的标题中得到一个大致的概念。归纳起来它涉及以下几个方面: 第一、二章对动态大地测量学的发展作了简单的历史回顾, 介绍了近一二十年来在若干重大地学问题上动态大地测量的观测和研究成果作出的主要贡献, 进而概述了动态大地测量学的研究领域和主要方法。第三、四章重点讨论了区域形变测量和近场形变测量的现状和进展, 介绍了我国在这一领域取得的主要成果和经验, 指出了存在的问题和今后的努力方向。从第五章开始, 则比较深入细微地讨论了动态大地测量学中若干重要的技术问题。第五章论述了形变监测网优化设计对于探测形变信息的意义。介绍了迄今这一领域取得的主要成果, 解决优化设计问题的具体方法和尚待解决的问题。第六章主要介绍了观测质量的评价和粗差检验问题。这些问题是在从观测数据中提取形变信息之前必须加以解决的问题。解决不当将掩盖真实的形变信息, 或者将得到被歪曲了的结果。第七章主要介绍了形变场的模拟, 或者叫变形分析。严格地说, 它仍属于变形的几何分析或者运动学分析。它主要涉及如何从正确的观测结果得到描述变形的几何状态参数以及这些参数随时间的变化。这一直是动态大地测量学中研究比较活跃的领域。本章对变形分析模型作了系统的分类和详细介绍, 它显然有助于读者结合研究对象的不同情况, 恰当地选用这些方法, 并在此基础上进一步发展出一些新的模型和方法。本书的最后一章, 则对变形的地球物理解释作了初步的讨论。

变形的地球物理解释是变形观测的落脚点，也是动态大地测量的科学目的——研究地球变形机制，因此是一个极为重要的方面。但迄今这是一个比较薄弱的方面。这是因为变形的地球物理解释，本质上是一个反问题，即从结果（地球的变形）推断原因（引起变形的力或物理过程）的问题。这样一个反问题最终要通过反演方法来解决。众所周知，反演问题的解存在与否、解的唯一与否以及我们观测结果是否足以对所求解的问题产生充分而有效的约束等一系列问题都还在不断探索和研究，更何况对于研究对象——地球内部的结构、介质性质所知甚少，因此这是一个十分困难的问题。本章介绍了其中一些基本方法和迄今取得的一些重要成果。

限于篇幅，某些具体问题不可能介绍得很详细，但我们在有关章节后面都列出了主要参考文献，有兴趣的读者可以从中查到所需的内容。

第二章 全球尺度的形变和动态测量

§ 2—1 地球自转和地极运动

§ 2—1—1 地球自转

地球的运动方式是复杂多样的,其中有地球自转、地球公转、绕地月系质心运动、绕太阳系质心运动、自转速率变化、地极移动、轨道偏心率变化、黄赤交角变化、近地点进动、岁差、章动、浮动、绕银河系中心运动以及穿越银道面运动等。

地球自转是地球一种周日旋转运动。它是地球运动的基本形式之一。地球不仅绕着一条轴线自西向东自转,同时也沿着近于圆的轨道绕着太阳转动。地球自转周期,相对于恒星来说,春分点在天球上由东向西连续两次通过同一子午圈所需时间为恒星日,1 恒星日(消除章动影响)等于平太阳日的 $23\text{h}56\text{min}4.09054\text{s}$ 。相对月亮而言,月亮在天球上由东而西连续两次通过同一子午圈所需时间为太阴日,1 太阴日等于平太阳日的 $24\text{h}50.47\text{min}$ 。地球自转的真正周期是以同一恒星在天球上自东而西连续两次通过同一子午圈的时间确定的,它比 1 恒星日约长 0.0084s 。地球自转的角速度为 $7.29211515 \times 10^{-5} \text{rad/s}$ (1900.0 年时),在地球赤道上自转线速度为 465.1m/s 。由于各纬圈的向径 (R_ϕ) 为地球半径 (R) 的余函数,因此,由地球自转所产生的各纬圈的线速度是不等的,即在赤道上为 465.1m/s ,在极点上,则为 0。地球自转的角动量为 $5.861 \times 10^{10} \text{cm}^2 \cdot \text{g/s}$ 。

§ 2—1—2 岁 差

由于地球内部的不均匀性,形成一个赤道半径略大于极半径的椭球体,太阳、月亮对地球赤道隆起部分的引力,使地球转动轴在空间的位置变化。其结果是使春分点在黄道上每年向西移动 $50.2786''$ 。当地球两次经过春分点时。实际上未绕完一周,这一事实叫作春分点的岁差,简称岁差。其中由日、月引起的岁差叫日月岁差,由行星引起的叫行星岁差。岁差的周期是 25500 年,它既是回归年 (365.24219878 天) 和恒星年 (365.25636273 天) 的公共周期,也是回归月 (27.32158214 天) 和恒星月 (27.32166139 天) 的公共周期。岁差是地球自转轴在空间指向的一种长期运动。由于地球自转轴在旋转过程中出现晃动,使地球自转轴指向天球的点(天极)绕黄道轴作一圆锥运动,从而造成赤道面与黄道面呈 $23^\circ 27' 08''$ 的交角(黄赤交角)。这就是说,地球自转轴的北天极—北极星是变动的,现在的北极星距北天极不到 1° ,而公元前 2500 年的北极星是天龙星座的 α 星,公元前 1000 年是小熊星座的 β 星。到公元 4000 年北极星将是仙王星座的 γ 星,到公元 13600 年北极星将是织女星。

由于月球对地球的岁差也有影响,它的影响与太阳的类似。按照开普勒定律

$$n_i^2 R_L^3 = GM$$

式中, n_L 是月球轨道的角速度, R_L 是月球质心到地球质心的距离, M 是地球质量, G 为地球引力常数。进行必要运算便可求得总岁差及其周期。但是, 观测的岁差量和月球质量, 便可求得岁差常数

$$H = \frac{C - A}{C} = 0.00327293 \pm 75.10^{-8}$$

式中 A 为地球主轴惯性矩, C 为最大惯性矩。

必须指出, 由于记年的基本单位是回归年, 正是以春分点起算, 岁差虽使春分点在黄道上的空间位置发生变化, 地球季节的春分、秋分、夏至、冬至以及其它节气的黄径值都是不会变化的。

§ 2-1-3 章 动

由于地球自转轴的转动转矩效应, 地球自转轴在空间指向产生一种短周期的晃动, 叫做章动。它是叠加在岁差之上的。它使天球上描绘的岁差小圆沿弧向产生一个小的波动 (图 2-1-1)。这是因为月球对地球引力发生 18.61 年周期的作用而使月球轨道面 (白道面) 的位置发生变化。章动的主周期是 18.61 年, 地轴空间指向每年偏移 $18''$ 。说明月球轨道通过黄道面的升交点在黄道上向西运动的周期为 18.61 年。章动是回归月 (27.32158214 天) 和交点月 (27.21222039 天) 的公共周期; 也是回归年和食年 (346.62003090 天) 的公共周期。此外章动还有年周期和月周期变化。

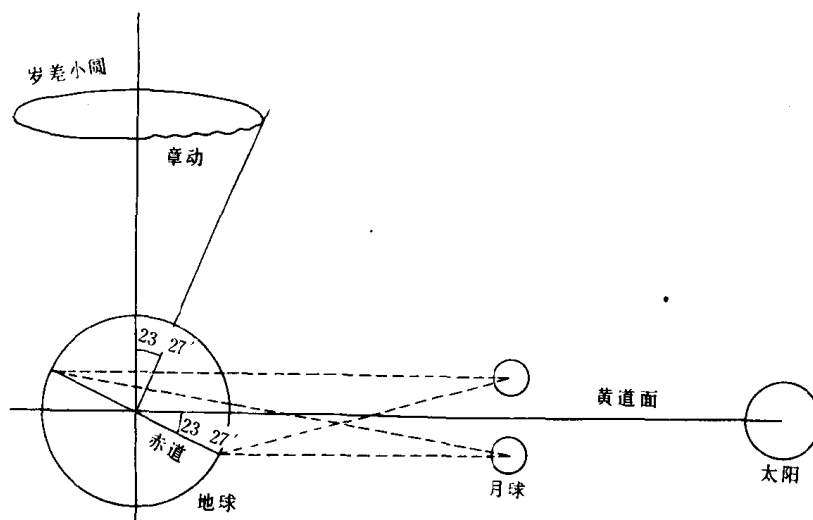


图 2-1-1 岁差和章动示意图

§ 2-1-4 地球自转速度变化

地球自转的速度变化有长期减慢、地质时期变化、周期变化和不规则变化。表征地球自转速度的单位, 一般是用日长。有时一天的日长可变化 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ms}$ 。此外, 还有用相对变化 $(\frac{\Delta\omega}{\omega_0})$ 来表示的。 ω_0 为 1900.0 年的地球自转速度, 为 $7.29211515 \times 10^{-5} \text{rad/s}$ 。 $\Delta\omega$ 为观测时