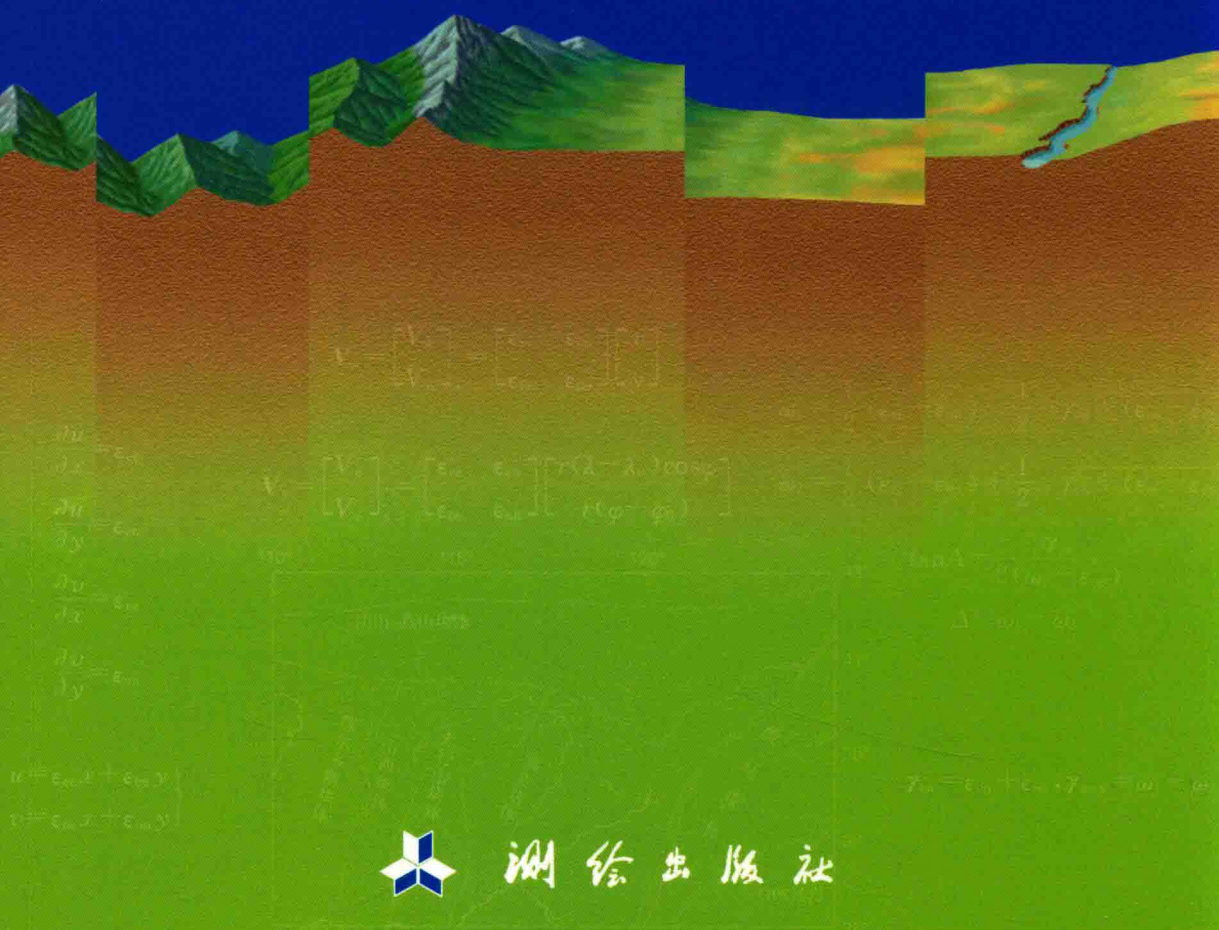


地壳弹塑性形变 反演模型及应用

Crustal Elastic-Plastic Model and Application

张俊 独知行 著



地壳弹塑性形变反演模型及应用

Crustal Elastic-Plastic Model and Application

张 俊 独知行 著

测绘出版社

• 北京 •

© 张 俊 独知行 2016

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 提 要

本书以地壳岩石圈界定为具有连续弹塑性介质性质的运动形变场为基础,研究了地壳形变建模和分析方法;通过对地壳运动板内形变的数学描述机制,提出了半参数和最小二乘配置两种地壳弹塑性形变反演分析模型;利用地震矩张量和卫星定位两类数据进行地形变分析的融合分析方法;联合反演相对权比进行约束反演;对环渤海区域地壳进行形变分析;对中国大陆各亚板块及主要块体形变模式进行联合反演。

本书可供地学相关领域的本科生、研究生和学者参考。

图书在版编目(CIP)数据

地壳弹塑性形变反演模型及应用 / 张俊,独知行

著. — 北京:测绘出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-5030-4004-7

I. ①地… II. ①张… ②独… III. ①地壳—
弹塑性变形理论 IV. ①P315.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 273289 号

责任编辑	巩岩	封面设计	李伟	责任校对	孙立新	责任印制	陈超
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	8			字 数	135 千字		
版 次	2016 年 11 月第 1 版			印 次	2016 年 11 月第 1 次印刷		
印 数	001—600			定 价	36.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4004-7

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。



前 言

长期以来,为有效预报和降低地震等各种地质灾害带给人类的巨大伤害,科技工作者对地球深部的各种动力学过程的发生和演变机制做了大量研究。力是很难直接测定的,地壳变形与破裂是地球内部动力过程最直接、最基础的力学输出信号,其中包含着地壳内部圈层对各种动力作用的响应过程信息,可对地壳或地幔的流变性质提供外部的几何学和运动学约束。目前,地球物理探测还不能很好地描述地球深部的精细结构,而地表形变是这些结构参数的函数,因此,利用地表形变与地球内部结构参数的关系,建立地壳形变模型并通过反演分析揭示地球动力过程的发生和演化规律就成为地球动力学的重要课题之一。现代空间大地测量技术几乎可以在任意时空域内监测和捕捉区域地表微动态变化,这使得大地测量技术比以往任何技术研究地壳运动都更具优势。近 20 年来,在世界范围内,以“动力大地测量学”“地形变大地测量学”“地球物理大地测量学”“构造形变大地测量学”“地震大地测量学”等命名的学科术语在学界频频出现,这说明大地测量学参与地壳运动和地球动力学研究已成为当前地球科学中的活跃研究领域。事实上,国际大地测量学和地球物理学联合会(International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG)认为,大地测量学已发展成一门基础性地球学科,它有能力对全球板块运动、构造应力场、地球内部密度分布、极移、地球动力学机制等诸多课题及领域进行研究,并且实现与这些领域的深层交叉与融合。

本书正是基于以上背景,在前人研究基础上,总结了以往大地测量技术在地壳形变研究领域所取得的主要成就和研究进展,着重研究了如何利用大地测量观测资料建立地壳运动—形变的反演分析模型,提出了几种能够顾及板内形变的地壳弹塑性形变反演分析模型,并对中国大陆主要块体及环渤海区域进行应用研究。

由于地学问题的复杂性,作者对所研究的问题仅做了一部分研究工作,希望能起到抛砖引玉的作用,作者将感到不胜欣慰。

本书由贵州大学张俊执笔撰写完成,全文由山东科技大学独知行教授审阅并定稿,在撰写过程中得到了山东科技大学于胜文教授、刘国林教授、郭金运教授及解放军信息工程大学柴洪洲教授的指导与帮助,中国测绘科学研究院章传银研究员为本书提供了环渤海区域 GPS 监测速度场数据,在此一并表示感谢!同时还要感谢本书参考文献所列出的全部作者以及为地球科学研究做出贡献的所有工作者,向他们表示致敬!此书可作为相关领域的本科生、研究生和学者阅读参考。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请各位读者和专家批评指正!

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 地球动力学、动态大地测量学和地形变大地测量学	1
§ 1.2 地壳运动及其形变分析方法和技术	3
§ 1.3 现今地壳运动的大地测量研究进展	6
§ 1.4 本书主要研究内容	10
第 2 章 刚体地壳运动模型及其参考框架	13
§ 2.1 地壳运动模型的建立、评价和检验	13
§ 2.2 刚性地壳运动的数学模型	16
§ 2.3 地壳运动的参考框架	18
§ 2.4 地壳运动的地球物理模型和大地测量模型	21
第 3 章 大地测量反演与地壳运动	23
§ 3.1 反演问题的一般概念	23
§ 3.2 大地测量反演学科的形成与发展	26
§ 3.3 大地测量反演的技术特点	27
§ 3.4 大地测量反演研究进展和取得的成果	29
§ 3.5 大地测量反演的数学方法	31
第 4 章 两种地壳刚性—弹塑性形变反演分析模型	33
§ 4.1 地壳弹性运动理论的提出	34
§ 4.2 块体的整体旋转与均匀应变模型	35
§ 4.3 块体的整体旋转与线性应变模型	37
§ 4.4 块体的弹塑性运动模型的检验	38
第 5 章 基于最小二乘配置的地壳弹塑性形变反演模型	40
§ 5.1 最小二乘配置原理	41
§ 5.2 地壳形变分析的最小二乘配置模型	44
§ 5.3 形变分析的方差-协方差函数	46

第 6 章 基于半参数的地壳弹塑性形变反演分析模型	51
§ 6.1 半参数模型及其补偿最小二乘估计	52
§ 6.2 赋相对权比的半参数模型优化求解方法	53
§ 6.3 半参数模型解的统计性质	55
§ 6.4 正则矩阵与正则参数的确定	57
§ 6.5 地壳弹塑性形变的半参数模型	59
第 7 章 环渤海区域地壳弹塑性形变反演模型及应用	61
§ 7.1 利用 GPS 资料建立环渤海区域地壳弹塑性形变反演模型	62
§ 7.2 环渤海区域地壳形变分析模型的讨论	81
第 8 章 中国大陆主要块体的运动及形变模式反演	84
§ 8.1 联合反演模型中相对权比的确定方法	84
§ 8.2 利用 GPS 和地震矩张量资料联合反演中国大陆主要块体现今 运动状态	89
第 9 章 结束语及展望	95
参考文献	98
附 录	107

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
§ 1.1 Geodynamics, Dynamic Geodesy and Crustal Deformation Geodesy	1
§ 1.2 Crustal Movement and the Analysis Methods and Technologies of Intraplate Deformation	3
§ 1.3 Research Progress by Geodesy on Present Day Crustal Movement	6
§ 1.4 The Main Research Contents of the Book	10
Chapter 2 Rigid Crustal Movement Models and Corresponding Reference Frame	13
§ 2.1 The Modeling, Evaluation and Testing of Crustal Movement Models	13
§ 2.2 The Mathematical Model of Rigid Crustal Movement	16
§ 2.3 The Reference Frame of Crustal Movement	18
§ 2.4 The Geophysical and Geodesy Model of Crustal Movement	21
Chapter 3 Geodetic Inversion and Crustal Movement	23
§ 3.1 The General Concept of the Inversion Problems	23
§ 3.2 The Formation and Development of Geodetic Inversion	26
§ 3.3 The Technical Characteristics of Geodetic Inversion	27
§ 3.4 The Research Achievement and Progress of Geodetic Inversion	29
§ 3.5 The Mathematical Methods of Geodetic Inversion	31
Chapter 4 Two Crustal Rigid-Elastic-Plastic Motion Model	33
§ 4.1 The Theory of Crustal Elastic Movement	34
§ 4.2 The Rotation of Entire Block and Homogenous Strain Model	35
§ 4.3 The Rotation of Entire Block and Linear Strain Model	37

§ 4.4	The Test of the Crustal Elastic-Plastic Deformation Inversion Model	38
Chapter 5	Crustal Rigid-Elastic-Plastic Deformation Inversion Model Based on the Least Squares Collocation	40
§ 5.1	The Principle of Least Squares Collocation	41
§ 5.2	Least Squares Collocation Model for Crust Movement and Intraplate Deformation	44
§ 5.3	Variance Covariance Function for Crust Deformation Analysis	46
Chapter 6	Crustal Rigid-Elastic-Plastic Deformation Inversion Model Based on the Semi-Parametric Model	51
§ 6.1	Semiparametric Model and Its Compensation Least Squares Estimation	52
§ 6.2	An Optimization Parameter Estimation Method with the Relative Weight Ratios for the Semi-parametric Model	53
§ 6.3	The Statistical Properties of the Semi-parametric Model Solutions	55
§ 6.4	The Method for Regular Matrix and Smoothing Parameters Determination	57
§ 6.5	The Crustal Elastic-Plastic Deformation Inversion Model with the Semi-parametric Model	59
Chapter 7	The Crustal Rigid-Elastic-Plastic Deformation Inversion Models By GPS Data and Their Applation in Bohai Rim Region	61
§ 7.1	Using GPS Data to Establish the Crustal Elastic-Plastic Deformation Inversion Model for Bohai Rim Region	62
§ 7.2	Discussion on the Analysis Model of Crustal Deformation in the Bohai Rim Region	81
Chapter 8	Joint Inversion of the Motion and Deformation Patterns of Main Blocks in the Chinese Mainland by Using GPS and Seismic Moment Tensor Datas	84
§ 8.1	Method for Determining the Relative Weight Ratio in the Joint	

Inversion Model	84
§ 8.2 Joint Inversion of the Present-Day Crustal Movement Patterns and Intraplate Deformation State State of Main Blocks in the Chinese Mainland by Using GPS and Seismic Moment Tensor Datas	89
Chapter 9 Conclusions And Further Research Prospects	95
References	98
Appendices	107

第1章 绪 论

人类自诞生以来,为了生存,就不得不与各种自然灾害做斗争。千百年来,人们从没停止过对赖以生存的美丽家园——地球的探索和研究。随着知识积累和科学水平的进步,人类改造自然和适应地球环境的能力大大提高,对地球的认识水平已达到了前所未有的高度。但是,迄今为止,地球科学中,有一些与人类生存息息相关的重大科学难题还没有解决。例如,地震对人类生命财产安全造成极大伤害,但是至今科学界对于地震何时、何地、为什么及怎样发生的等一系列科学问题还依然没有完全搞清楚。其中,地球动力学引起的地球的变化及产生这种变化的原因是最根本性的问题之一(牛之俊,2006;王敏,2009)。人们通过各种方法探求地球动力学过程及其机理,试图对地球深部的各种动力学过程的发生和演变做出解释和预报,从而有效减少各种地质灾害带给人类的巨大伤害。在此目的推动下,产生了许多与地球动力学密切相关的地学学科,除了地球动力学本身成为首当其冲的学科之外,近年来,动态大地测量学和地形变大地测量学也日趋成为这一领域的重要基础学科。

§ 1.1 地球动力学、动态大地测量学和地形变大地测量学

1.1.1 地球动力学及其研究对象

勒夫(Love)1911年在其著作《地球动力学的若干问题》中最早使用了地球动力学这个术语。地球动力学是一个内涵广泛的名词,其研究对象是地球内部的力和各种过程(丁国瑜,1991)。地球时刻处于不断变形和运动状态,地球深部发生的力学现象多种多样、形式复杂,如大陆漂移、海底扩张、地震、海啸和火山喷发等。地球动力学的任务就是分析这些现象,并透过这些现象寻求其力学机理,掌握这些现象发生和变化的规律,预测其发展趋势。

由于地球科学问题本身的复杂性和多变性,使得地球动力学难以取得实质性进展,尤其是对地震和其他发生在地表的破坏性地学事件缺乏科学的研究方法。在相当长的一段时期内,地球科学处于定性研究状态,人类对许多已经发生的和正在发生的地学事件难以做出合理解释,对蕴含在其中的规律知之甚少。直到20世纪60年代末,以英国学者 Mckenzie 等(1967)、美国学者 Morgan(1968)、法国学者 Le Pichon(1968)为代表的地球科学家根据已掌握的全球海岭、海沟、转换断层、地磁和地震等资料,综合了大陆漂移、地幔对流、海底扩张等有关地球地壳的若干假

说后提出板块构造运动理论,才使人们对地球海陆变迁及地表演化过程的研究具备了有力的理论工具。

板块构造学说是地球动力学发展史上的一个里程碑。这一学说提出至今已有半个世纪,是目前普遍接受的理论。在板块构造运动的理论框架下,人们提出了许多板块运动模型,这些模型对人们定量了解地壳运动起到了非常重要的作用,也使人类有可能从更科学合理的角度深化对地球内部动力学机制的认识。板块运动是最重要的构造运动,自从板块构造运动理论提出后,探究岩石圈的运动及其动力学机制就一直是当代地球科学研究的主题(胡明城,1994)。地壳运动及其形变是地球深部动力学过程的最直接反映,它综合了各类构造运动信息,如块体下部物质组成及其物理性质、地壳内部热活动、区域内及其周边构造块体活动,以及岩石圈深部物质迁移等。因此,通过研究地球表面点位变化(形变),将地球表面形变看作地球内部动力学过程的某种输出信号,通过建立一定的数学物理模型探究地壳形变的地球物理机制,将有可能开辟地球科学领域有关地球动力学的新的研究手段。

1.1.2 动态大地测量学

20 世纪 80 年代以来,随着现代空间大地测量技术包括甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、合成孔径雷达干涉测量(interferometry synthetic aperture radar, InSAR),以及卫星重力测量技术,包括地球科学研究和应用小卫星(challenging minisatellite payload, CHAMP)、重力探测和气象试验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)、重力场和静态洋流探测(gravity field and steady-state ocean circulation explorer, GOCE)等的崛起,使大地测量技术几乎可以在任意时空域内获取有关地球表面环境的微动态变化,这些革命性技术被迅速应用到地学领域,形成了动态大地测量学。动态大地测量学是由大地测量时变观测数据为基础反推地球内部构造形态、力源和动力学过程参数的科学。它是大地测量学与其他地学学科的交叉研究形成的新学科分支,是大地测量学中最具活力的一门边缘性学科分支。其发展一方面依赖于大地测量学的发展,一方面又与其他相关地球科学的发展密切相关,但就研究方法和内容而言,又保持着与其他地球科学的相对独立性。

动态大地测量学主要用于研究地壳形变及其动态演化过程,为其他地球科学对变形做出合理的几何物理解释提供定量约束。“形变”是地球内部动力过程引起的一种现象,也是由地球内部动力学原因引起的一种特定“结果”。引起这种结果的“原因”有多种,从根本上说,动态大地测量学研究手段需要采用反分析方法,地学界更多地称为大地测量反演。大地测量反演技术是近年来在大地测量学和地球动力学中的共同研究热点课题。事实上,近 20 年来,利用现代空间大地测量观测

技术建立板块的定量化运动模型,以及建立基于多源观测信息融合的大地测量联合反演模型用以研究块体的边界力学性质和块体内部的应力场分布的研究正方兴未艾,这些研究构成了地球动力学研究的前沿和热点。

1.1.3 地形变大地测量学

地形变大地测量学是现代大地测量学与地球物理学、地质学和地壳运动学及信息系统学科相结合的当代前沿学科,它通过集成先进的大地测量及地球探测技术,通过建立运动学和动力学模型,经严谨数据处理预测地壳运动的未来变化,直接服务于地震等灾害预报和研究。

地球表面为人类提供了赖以生存的基本空间和条件,但它总是处于变化中。地震、火山、滑坡、沉降等自然灾害时刻威胁着人类生命财产安全,这些与人类生存息息相关的地球变化与地球构造运动直接相关。构造运动必然引起构造形变,地震就是由地球内部构造运动引起的一种剧烈的地形变形式。地震与地球内部的力是联系的,但一般来讲,力是很难直接测定的,目前,主要通过监测地球内部动力学的某些输出信号间接研究内部的力学过程。地壳变形与破裂是揭示地球内部动力过程最直接、最基础的力学信息(周硕愚等,2004,2008)。现代地球科学研究表明,地震发生前会释放一定的地震前兆信息,地壳形变即是一种最重要的前兆信息,通过研究地壳形变,建立地壳形变分析模型,有效预报地壳形变演化过程,及时发现地震前兆,必将有助于击破地震预报的“瓶颈”问题。

综上所述,地球动力学深入研究需要动态大地测量学的参与,动态大地测量学的研究,特别是对形变做出合理动力学解释时更需要与地球动力学相结合。地形变大地测量学既可以作为大地测量学的研究分支,也可以作为动力大地测量学的重要研究内容。三种学科之间有着千丝万缕的联系,但彼此又保持相对独立,不具备相互替代的可能。

§ 1.2 地壳运动及其形变分析方法和技術

目前为止,有关地壳运动研究,大致包括地质学、地震、地球物理、大地测量、海洋学、天文学和考古学等,但鉴于技术资料的综合积累和可靠性、技术实施难度等因素限制,现代地壳运动的研究手段主要是地质与地球物理学和大地测量技术两类。

1.2.1 地质与地球物理方法及技術

利用地质与地球物理方法研究地壳运动,实际上就是利用长期积累的地质及地球物理资料借助一定的数学方法建立描述地壳运动的定量化模型。在地球物理

中,用以建立地壳运动的资料主要包括三大类:第一类是大洋底的地磁异常剖面等时线资料,根据地磁异常等时线到大洋中轴的距离和地磁异常年龄即可推算板块的扩张速率;第二类是假定海底深度为海底形成年龄的函数,则可根据洋底水深测深资料,根据大洋中脊两侧的坡度变化或水深变化大致推算板块扩张速率;第三类是地震滑动矢量资料,利用该类资料建立地壳运动模型,假定沿断层的所有断错是相继连续发生的,历次断错引起地震时会出现滑动,将研究区域内所有滑动矢量累加起来就可以计算块体的相对运动速度。

传统地质及地球物理方法建立地壳运动模型的数学方法是基于刚体定点旋转的欧拉(Euler)定理基础之上的。该定理是著名的瑞士数学家欧拉于1776年研究球面刚体运动时提出的。根据欧拉定理,当一个刚体绕某一固定点做有限运动时,刚体上任一点的运动速度等于刚体角速度与该点至固定点距离的乘积。据此,如果将地球看成球体,并将球心强制为在球面上做刚性运动的各块体转动的固定点,则板块上任一点的运动都可等效为该点绕通过地心的某一轴线的旋转运动,这一定理后来被用作研究板块运动的基本定理(孙付平等,1998a)。

基于欧拉球面刚体绕定点旋转的基本定理建立板块运动的量化地球物理模型,实际上是先利用地球物理资料推算板块相对运动速度,然后根据欧拉定理通过最小二乘法估计欧拉旋转角速度拟合用地质手段推算的板块运动速率,模型确定后即可利用板块上各点坐标及相应台站对球心的矢径计算板块上任意点的运动速度。

半个多世纪以来,利用地质及地球物理资料并基于板块刚性假设,已提出许多著名的板块运动模型(Le Pichon, 1968; Morgan, 1972a; Chase, 1972; Minster et al, 1978; DeMets et al, 1988, 1990; Argus et al, 1991)。这些定量模型对人类认识地球和研究地表块体运动的动力学机制起到非常巨大的作用,是早期应用最广泛的地壳运动模型。但鉴于地质地球物理资料的短缺及推测精度不高并且在建立模型时需满足过多假设等原因,以上利用地球物理资料建立的地壳运动模型具有“半定性”成分。尽管如此,根据现代大地测量观测结果,全球各大板块的宏观运动观测值与地球物理模型预测结果大体上是吻合的,这表明在研究区域尺度较大时,对块体的刚性假设基本符合实际。

但同时,另一种情况也是非常值得注意的,那就是板块运动的地球物理模型虽然在全球各大板块的宏观运动和解释上取得了极大成功,但是却忽略了各大块体内部的形变。现代对地观测技术已经非常可靠地证实了在板块边界及板块内都存在一定程度的构造运动及变形。但是,传统的地球物理模型难以在更精细的程度上描述这一情况,这已逐渐成为传统地球物理地壳运动模型面临的最大挑战。

1.2.2 大地测量方法及技术

早期的大地测量技术主要是基于地面的观测技术,其作业范围小,且精度不高,难以满足地壳运动及形变研究的基本要求。现代空间测量技术的出现和日益发展,不仅大幅度提升了野外测量距离,测量精度更是提高了几个数量级(许才军等,2000;郑作亚等,2004)。尤其是随着导航定位技术系统的进一步完善和国际科学研究协作的不断加强,解决了大地测量过去不能研究地壳形变的核心技术瓶颈问题,从而使利用大地测量观测资料研究地壳运动及形变成为了可能。不仅如此,利用现代大地测量观测资料研究地壳运动及形变,与地球物理方法相比,还有一些明显的优势,这些优势主要表现在如下几个方面:

(1)空间对地观测技术获得的是地表运动的位移信息,通过多年积累,不但资料丰富,而且其观测量是地球内部动力学的输出信号,是地表运动的直接信息,而非像地球物理资料那样,不但资料相对稀缺,而且是利用满足某些假设条件下间接推断的扩张速率建立的模型。因此,从资料的角度看,利用大地测量研究地壳运动,其结果的可靠性明显优于地球物理方法。

(2)空间对地观测技术获得的是地壳的现时运动结果,涉及的时间尺度从几年到百年之间,可以反映与人类生存息息相关的现今地壳运动及动力过程。利用这些观测结果研究地壳运动,不仅可以为地球深部动力学研究提供可靠的几何空间约束,而且可以与地球物理模型的结果进行对比或与地球物理资料联合建模分析,在时间尺度和精度上互为补充,从而使两类资料研究结果互相验证和约束,为深化地球科学研究提供新的可靠途径。

(3)利用空间大地观测资料研究地壳运动及进行形变分析,理论上并不需要知道各相邻板块的确切边界,研究板块之间相对运动仅取决于各块体上监测台站的分布位置及数目。但为增强板块研究结果的解释能力,一般也需要根据具体研究区域的构造情况对块体进行划分。

利用空间大地测量技术研究地壳运动,其理论依然是建立在板块的球面刚性定点运动的欧拉定理基础之上的。但不同的是,利用空间大地测量资料研究板块运动,并不只局限于对各大板块的宏观运动进行研究,与地球物理方法相比而言,它更大的优势在于对板内局部形变的研究。只要研究区域具有一定数量的台站监测资料,即可利用这些监测序列建立数据所在区域的块体运动模型,而这种运动不限在板块边界附近。

就时间分辨率而言,地质及地球物理学研究的时间尺度大致是几百万年,给出的地壳运动模型结果反映的是几百万年以来地壳的平均运动结果,对与人类生存息息相关的现今地壳运动反映不足。而现代大地测量技术可以几乎任意空间尺度和准实时方式直接获取高精度地壳运动位移信息,从而成为现今地壳运动研究中

最重要的技术手段之一,它将地球物理学中以百万年计甚至更长时间尺度的地壳运动研究推进到以百年、年、月、日为周期的现今地壳运动研究新阶段。另外,传统地球物理方法研究板块运动,一般是在尺度较大板块之间展开的,并且强调板块的相对运动和形变仅限于板块边界附近一定范围的条带之内发生。但是,大地测量技术可在板块的任意位置布设监测台站并可研究板块任意区域之间的相对运动,因此,二者在研究尺度上亦可实现互补。

总之,利用地质及地球物理和空间大地测量技术研究地壳运动是现代地壳运动量化研究的主要方法,两类方法的融合必将成为发展趋势。同时,随着现代科技的发展和多种技术观测资料的积累和完备,一个集空间、地面及地球深部相结合的立体对地观测系统正在形成。资料的融合推动了技术的融合,使得现今地壳运动研究资料具有宽频域、多尺度、多圈层、多时段、高精度和量化等特点(柴洪洲, 2006)。现代地壳运动研究方法及技术手段必将向多元化和复合性技术方向发展。

§ 1.3 现今地壳运动的大地测量研究进展

纵观大地测量学的发展史可以发现,其发展趋势总是与地球科学的其他学科相互交叉、渗透、融合,延拓其他学科的最新进展,并在自身不断完善的基础上,形成新的学科分支(独知行 等, 2003a)。事实上,经过多年发展,以精确测定地球变形、定量描述地球变形的动态过程,并结合其他学科对形变做出合理的几何物理解释的形变大地测量学分支学科业已形成,并在地球动力学及地形变分析中发挥作用(独知行 等, 2003b; 许才军 等, 2009)。

虽然早期利用大地测量技术开展块体运动的研究因观测尺度和精度的限制无法发挥重要作用,但是人们利用大地观测资料研究地壳运动的努力却从来没有间断过。早在板块学说孕育之初,大陆漂移学说的提出者韦格纳(Wegener)就曾尝试利用当时的大地测量成果作为其大陆漂移说的证据,但因测量精度太差,他引用的结果未能有效支持他的学说,最终并未引起学界重视。但随着科学技术的发展及越来越多大陆漂移的地质证据相继被发现,人们不仅接受了韦格纳有关大陆漂移的基本理论和观点,还综合了其他假说提出了板块构造运动学说,并且利用古地磁等资料建立了全球板块运动的地球物理模型。

然而,由于这些地球物理模型本身需满足某些特定假设及所用资料精度不高,板块构造运动模型尚需进一步精化,其理论尚需进一步验证和完善。这从客观上要求,必须发展其他与地球物理保持相对独立的技术及理论,从新的角度研究地壳运动,利用这些技术和地球物理方法的结果相互约束和解释,从而解决利用地球物理方法和技术未能解决的一些理论和应用问题。目前,以 GNSS 为代表的现代大地测量技术对地监测能力已得到超乎想象的发展,由于此项技术具备高精度捕

捉瞬态地学现象的能力,所以目前已被学界推向地学研究的纵深领域。

基于大地测量观测资料研究板块运动的探索始于20世纪80年代。当时,有许多学者试图利用大地测量观测资料建立板块运动模型,以便检验和验证当时几个比较有名的地球物理模型。德鲁斯(Drews,1982)率先导出了一套可以利用站点坐标和弧长变化求解板块欧拉向量的模型,并借助有限元方法,研究了北美板块和澳大利亚板块的相对运动参数。但由于台站较少,研究结果与地球物理模型有一定的差距。稍后几年,他又分别利用甚长基线干涉测量和卫星激光测距资料解算的站坐标和基线增量,重新估计了北美、欧亚、太平洋和澳大利亚几个较大板块的运动参数(Drews et al,1990)。由于测站资料相对比较充分,本次解算的板块运动参数与当时的AM1-2模型结果比较接近,首次验证了利用大地测量资料给出的历时几年的板块运动与长达几百万年的地球物理模型平均结果具有较好的一致性,说明地壳运动具有长期稳定性特点。Argus等(1991)利用1984年至1987年甚长基线干涉测量结果估计了北美和太平洋之间的相对运动参数;Ward(1990)也利用更多甚长基线干涉测量资料推算了同一地区板块运动参数;朱文耀等(1990)、孙付平等(1995,1998)用甚长基线干涉测量、卫星激光测距和GNSS实测数据研究了全球板块运动及中国大陆现今地壳运动,他们的结果与当时的权威地球物理模型NUVEL-1(Demets et al,1990;Gripp et al,1990)已非常接近,再次验证了大地测量技术在地壳运动研究中是可行的。

以上是一些早期的利用现代空间大地观测资料研究地壳运动的典型成果,这些成果与地球物理模型相比,大体上具有较好的一致性,这是令人振奋的。但是,由于监测台站数目的有限性、分布不均匀和观测资料的时间不长等因素,这些研究成果尚属初步。例如,这些模型结果的可靠性对于不同的板块很不一致,且与各地地球物理模型的局部差异非常显著。因此,随着台站及观测年限的增长,此类方法的模型精度可望得到有效改善。

GNSS技术的发展对改善全球测站数据及分布提供了可能。特别是纳入国际GNSS服务(International GNSS Service,IGS)组织台站数量的逐年增加极大地弥补了甚长基线干涉测量和卫星激光测距台站数目不足,并且其地表监测精度也并不逊于甚长基线干涉测量和卫星激光测距,且从实际技术实施上来看,在全球板块布设监测台站更加灵活和方便。经过多年的发展和积累,目前全球(美国、日本、新西兰、南美、中国等)已建成多个有影响的区域地壳监测网络和全球监测网络(胡明城,1994),通过这些分布在全球的GNSS和甚长基线干涉测量及卫星激光测距网络监测数据和国际上的友好协作,为广大学者利用GNSS观测数据开展各类地学研究提供了数据保障。

近20年来,国内外学者利用GNSS监测数据开展地壳运动的研究十分活跃,取得了一批非常有价值的成果。例如,Larson(1990)、Larson等(1991)将全球分

成 8 个主要板块,并利用 GPS 资料建立了由 8 个块体组成的全球板块运动模型;Argus 等(1995)利用 4 年的 GPS 监测资料建立了由 6 个主要板块组成的全球板块运动模型;Drews 等(1998)联合甚长基线干涉测量、卫星激光测距和 GPS 三种资料建立了一个由 12 个板块组成的 APKIM 全球板块运动模型,这种利用多种观测资料组合建立的模型结果比以往使用单一资料建立模型的做法前进了一步。

中国大陆及其海域的主体属于欧亚板块,位于亚洲大陆的东南部,西南缘以雅鲁藏布江缝合线为界,与印度板块相接,东部沿日本、菲律宾岛弧—海沟系与太平洋、菲律宾海板块为邻。印度板块向北东约 7.1° 方向推挤中国大陆(李延兴等, 2001a);太平洋板块、菲律宾海板块则沿西或北西方向向中国大陆俯冲(李延兴等, 2001b),加之北面巨大而坚硬的西伯利亚地块阻挡,致使中国大陆内部积聚了特别强大的构造作用力,使之成为世界板内构造最活跃、地震最强烈的地区之一(独知行等, 2003a)。鉴于上述地质构造背景,中国大陆内部各种构造形态广泛存在,素有“地质公园”之称。因此,对于中国大陆的地壳形变及构造研究和动力学研究吸引了国内外众多学者的注意,历来都是世界地学领域的研究热点。

为研究中国大陆板块及板内亚板块运动和形变模式,中国自 1988 年开始了最早的 GPS 网络建设,历经约 30 年时间,目前已先后建成了“中国地壳运动观测网络”(李延兴等, 2001a;王琪等, 2003;牛之俊等, 2005)和“中国大陆构造环境监测网络”两大系统,使中国大陆现今地壳运动的空间大地测量观测资料日益丰富,为中国及世界学者开展利用空间大地测量资料定量化、分区、分块研究中国大陆内部各级块体的运动及形变研究提供了条件。

中国学者利用早期及两大网络系统的工程监测数据研究中国大陆及邻区地壳运动,取得了丰硕的成果。各学者通过专著形式全面梳理、总结和评述了我国进入 21 世纪以前的地壳运动研究成果(丁国瑜, 1991;马杏垣, 1992;叶叔华等, 1997),他们的工作包括了地质及地球物理和大地测量两类技术在我国地壳运动及形变研究方面的主要成果,既包含了基础理论及技术的阐述,也有前瞻性分析,对我国在这一领域的研究起到了承前启后的作用。进入 21 世纪以来,我国利用 GPS 资料研究板块运动及板内形变进入高潮,涌现了大量成果。这些成果包括利用 GPS 资料研究中国大陆地壳运动速度场,初步利用几何大地观测资料建立中国大陆地壳运动模型,并进行了相关地球动力学分析(黄立人等, 2000;朱文耀等, 2000;刘经南等, 2001;马宗晋等, 2001;王琪等, 2002;江在森等, 2003a;李延兴等, 2003, 2006;朱守彪等, 2006a;柴洪洲等, 2009;魏子卿等, 2011;李强等, 2012;程鹏飞等, 2013;赵国强等, 2014);还有些是利用 GPS 资料研究了中国大陆不同区域地壳形变,建立了中国大陆内部各亚板块的运动模型(刘经南等, 2000;党亚民等, 2002;张静华等, 2004;张跃刚等, 2005;刘峡等, 2006, 2010;王辉等, 2008;杨少敏等, 2008;李志才等, 2009;温扬茂等, 2009;李冲等, 2012;丁开华等, 2013;邓