

基于力学模式的大地测量 反演理论及应用

独知行 卢秀山 著



地震出版社

基于力学模式的大地测量 反演理论及应用

独知行 卢秀山 著

地 震 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

基于力学模式的大地测量反演理论及应用/独知行, 卢秀山著. —北京: 地震出版社, 2003.9

ISBN 7-5028-2277-1

I. 基... II. ①独...②卢... III. 大地测量学 IV. P22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 076941 号

内 容 提 要

全书共分九章。论述了大地测量反演的定义及反演方法的分类; 反演参数可辨识性问题; 位移数据处理方案; 反演结果的几种定性和定量检验方法; 反演模型辨识的定义、原则和方法; 约束和非约束的各种局部最优化方法 (如单纯形法、模式搜索法、鲍威尔法、变量轮换法、混合罚函数法、复合形法等) 和全局搜索算法 (如蒙特卡罗、遗传算法); 联合反演模型中相对权比反演; 中国大陆及邻域板块边界构造作用力和构造应力场反演; 川滇地区周围边界力的联合反演等。本书没有过多地涉及大地测量反演的基本概念、知识、理论和方法, 着重介绍作者所研究若干课题的初步成果和观点, 以期从事该方向研究的学者开展更前沿的工作。

本书仅供从事大地测量、地球物理、地震及水利水电工程等专业的研究生、教师和研究人員参考。

基于力学模式的大地测量反演理论及应用

独知行 卢秀山 著

责任编辑: 范静泊

责任校对: 庞娅萍

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: 88421706

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: 北京地大彩印厂

版 (印) 次: 2003 年 9 月第一版 2003 年 9 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 234 千字

印张: 9.25

印数: 001 ~ 500

书号: ISBN 7-5028-2277-1/P·1161 (2850)

定价: 25.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

前 言

随着动态大地测量监测技术和手段的发展, 特别 VLBI、SLR 及 GPS 等所提供的大尺度、高精度、高时效的空间大地测量技术, 使大区域和全球性的地壳形变和板块运动的监测成为可能, 为研究地壳运动规律和地球的动力学过程提供了最直接和定量的证据。这一进展促进了大地测量反演理论和方法的深入研究, 使得作为地球动力学物理解释主要手段的大地测量反演理论和方法的研究日益成为世界地学界研究的热点之一。

大地测量反演理论和方法是在地球物理反演理论的基础上, 并与其他地球科学相互交叉、渗透、融合, 延拓其他地球科学的最新进展形成的新的学科分支。它是基于大地测量学与多学科交叉结合, 并辅以随时间变化的数据处理方法和物理解释, 确立的一个内涵十分丰富、领域十分广阔的新兴学科。近十几年来, 我国对大地测量反演理论和方法的研究取得了较大进展, 在对孕震模式、区域边界作用力、大尺度地壳形变特征、典型活动带变形状态和演化特征、构造运动的物理解释及块体划分和块体形变等课题的研究方面, 做出了自己的贡献, 并形成了自己的特色。

本书的研究工作主要集中在大地测量反演的模型建立、求解方法及应用的相关问题的探讨, 具体表现在: ①明确了大地测量反演的定义并对反演方法作了分类; ②讨论了大地测量反演参数可辨识性问题; ③探讨了适合于大地测量反演区域变形的位移数据处理方案, 研究了正法反演结果的几种定性检验方案和定量检验方法; ④提出了大地测量反演的模型辨识这样一个新课题, 并初步探讨了大地测量反演模型辨识的定义、原则和方法; ⑤比较了约束和非约束的各种局部最优化方法(如单纯形法、模式搜索法、鲍威尔法、变量轮换法、混合罚函数法、复合形法等)和全局搜索算法(如蒙特卡罗、遗传算法); ⑥针对联合反演的模型,

特别提出在联合反演中引入相对权比,并将它作为待反演参数,同其他反演参数一同反演求解的理论和方法;⑦研究了中国大陆及邻域板块边界构造作用力和构造应力场反演和川滇地区周围边界力的联合反演。这些内容分述于本书各章节,在每章后都附有小结,以突显各章内容。

本书不追求大地测量反演理论和方法的系统性阐述,侧重于作者近些年来所做研究工作的介绍,在对某些问题分章节地展示给读者时,力求系统、全面和准确。由于地学的复杂性,大地测量反演研究还存在不少困难,加之作者研究方向和学识上的局限性,书中挂一漏万和不足之处在所难免,敬请各位专家和学者指正。若本书尚能起到抛砖引玉的作用,作者也甚感欣慰!

本书的研究和撰写,得到了中国科学院测量与地球物理研究所欧吉坤研究员、许厚泽院士和武汉大学刘经南院士、许才军教授的指导和支持,并得到了许多老师和同行的帮助,在此一并致谢。恳切希望广大读者对本书给予批评指正。

谨以此文献给所有从事地学研究和工作的人们!

感谢:

中国科学院创新工程项目(批准号:KZCX2-106)、国家自然科学基金(批准号:49874006)和国家攀登项目子课题“中国大陆主要活动带现代地壳运动及动力学研究”项目联合资助。

独知行 卢秀山

符号表

G^{-g}	反演算子
$\min$	取最小值
$\mathbf{m}$	待求参数向量
$s. t.$	约束条件符号
λ	联合反演中的相对权比
σ_i	标准差
Λ	对角阵
$\mathbf{Y} \in N(\zeta_1, \sigma_1)$	均值为 ζ_1 协方差阵为 σ_1 的随机向量
$\mathbf{A}^{m \times n}$	设计矩阵
α_i, β_i	m 维列向量
LS	最小二乘估计
G-S	Gram-Schmidt 正交化方法
K	矩阵的条件数
$ \mathbf{A} $	方阵 $\mathbf{A}$ 的行列式
$\ \mathbf{A}\ $	矩阵 $\mathbf{A}$ 的范数
K_f	度量矩阵复共线性的指标
$\mathbf{A}^T$	“T” 转置符号
G-M	高斯-马尔可夫模型
$\mathbf{L}$	观测值向量
$\mathbf{P}$	概率的测度
$\mathbf{J}_A$	投影算子
$\forall$	对于任意
$\perp$	正交
$\oplus$	直和
$\cap$	交集
$\exists$	存在
$(A_1 A_2)$	“ ” 矩阵分块符号
$\dim(\mathbf{A})$	$\dim$ 为基底数 (维数)
$\frac{\partial \eta}{\partial m_i}$	一次偏导数
$\frac{\partial^2 \eta}{\partial m_i \partial m_j}$	二次偏导数

目 录

上部：基于力学模式的大地测量反演理论

第一章 绪 论	(3)
1.1 动态大地测量与地球动力学	(3)
1.2 大地测量反演与物理解释的研究进展	(4)
1.3 基于力学模式的大地测量反演方法、特点及意义	(6)
1.4 本文的主要研究内容	(7)
第二章 大地测量反演研究的若干问题讨论	(9)
2.1 引 言	(9)
2.2 大地测量反演理论概念	(10)
2.3 反演基础理论综述	(10)
2.3.1 三个内容	(10)
2.3.2 三个观点	(12)
2.3.3 解的两重性	(12)
2.3.4 局限性	(12)
2.4 大地测量反演应用研究的讨论	(12)
2.4.1 数据初始化	(12)
2.4.2 参数可辨识条件	(13)
2.4.3 常用数学模型	(14)
2.5 深化研究的观点	(15)
第三章 大地测量反演数据的初步处理	(17)
3.1 引 言	(17)
3.2 大地测量反演数据的归一化	(18)
3.3 一种位移辨识新方法——模式辨识法	(19)
3.3.1 引 言	(19)
3.3.2 初步解决的问题及思想方法	(19)
3.3.3 模式识别	(20)
3.3.4 算 例	(23)
3.4 大地测量反演位移数据的处理方案	(24)
3.4.1 引 言	(24)
3.4.2 处理方案	(25)
3.4.3 算例及分析	(28)
3.4.4 结 论	(32)

第四章 大地测量反演的参数辨识及模型辨识	(33)
4.1 参数估计中设计矩阵病态性的 F 分析法	(33)
4.1.1 引 言	(33)
4.1.2 K_f 的定义及其几何意义	(34)
4.1.3 K_f 的计算方法及病态性的度量指标	(35)
4.1.4 算例及结论	(37)
4.1.5 小 结	(40)
4.2 值域空间的正交分解与参数分组估计	(40)
4.2.1 引 言	(40)
4.2.2 向量空间中的参数估计	(40)
4.2.3 值域空间的分解定理	(42)
4.2.4 参数分组估计	(44)
4.2.5 结 论	(48)
4.3 附加参数与基本参数空间关系的度量	(49)
4.3.1 引 言	(49)
4.3.2 向量 α 到空间 H_0 的距离	(50)
4.3.3 参数的空间关系度量	(51)
4.3.4 算 例	(52)
4.3.5 结束语	(54)
4.4 大地测量反演中反演参数的可辨识性讨论	(54)
4.4.1 引 言	(54)
4.4.2 参数可辨识条件	(55)
4.4.3 大地测量反演参数可辨识性	(57)
4.4.4 算例及分析	(59)
4.5 大地测量反演模型辨识初探	(61)
4.5.1 引 言	(61)
4.5.2 模型群及目标函数构造	(61)
4.5.3 计算方法和辨识过程	(62)
第五章 大地测量正法反演的理论与方法	(64)
5.1 引 言	(64)
5.2 正法反演的概念及解算过程	(64)
5.3 正法反演解的含义、解的评价与可靠性检验	(66)
5.3.1 正法反演解的含义、解的评价	(66)
5.3.2 反演结果的可靠性检验	(66)
第六章 优化反演方法的数值实验	(69)
6.1 引 言	(69)
6.2 单一数据反演的数值实验	(69)
6.2.1 数值实验 1	(70)

6.2.2	数值实验 2	(74)
6.3	联合反演方法及相对权比 λ 的反演实验	(79)
6.3.1	引 言	(79)
6.3.2	联合反演方法	(80)
6.3.3	算 例 (用弹性有限元方法)	(83)
6.4	讨 论	(86)
第七章	计算控制及程序实现	(88)
7.1	引 言	(88)
7.2	数据结构	(88)
7.2.1	有限元程序的数据结构	(88)
7.2.2	最优化程序数据结构	(89)
7.2.3	连接部分数据结构	(90)
7.3	结构化程序设计	(90)
7.3.1	主要功能模块及调用关系	(91)
7.3.2	程序流程图	(91)

下部: 基于力学模式的大地测量反演应用

第八章	利用大地测量位移资料反演中国大陆及邻域板块边界作用力及构造应力场	(95)
8.1	中国现代构造运动及动力学背景	(95)
8.2	中国大陆及邻域板块边界作用力及区域应力场的反演	(98)
8.2.1	引 言	(98)
8.2.2	最优化有限元反演的准备	(98)
8.2.3	板块边界力及区域应力场的反演	(103)
8.3	中国大陆及邻域板块边界作用力、应力场的分析及讨论	(106)
8.3.1	关于板块边界作用力的分析	(106)
8.3.2	关于板块边界作用力的进一步研究	(107)
8.3.3	本文反演解算的特点	(108)
第九章	利用大地测量位移和主应力方向观测资料进行川滇地区边界力的联合反演研究	(110)
9.1	引 言	(110)
9.2	联合反演方法	(111)
9.2.1	数据选择	(111)
9.2.2	联合反演模型	(112)
9.3	川滇地区反演计算	(112)
9.3.1	最优化有限元反演的准备	(112)
9.3.2	板块边界力及区域应力场的反演	(115)
9.4	解释与讨论	(118)

9.4.1 边界作用力的分析.....	(118)
9.4.2 本章反演解算的特点.....	(118)
第十章 结束语与展望.....	(120)
附录 最优化算法简介.....	(123)
参考文献.....	(129)

基于力学模式的大地测量反演理论

**上
部**

第一章 绪 论

“在经历了漫长的岁月后，人们才开始懂得，关于地球的任何可靠的理论必须依赖于地球自身提供的证据，在没有收集到大量证据之前，要想正确建立这样一种理论是不可能的。”
(SIR ARCHIBALD GEIKIE, 1905)

1.1 动态大地测量与地球动力学

地球科学的发展产生了相互交叉而有彼此不尽相同的分支学科，如地质学、地震学、地球物理学、大地测量学和地球动力学等。不同分支学科的发展往往离不开其它分支学科的完全不同的方法的参与，某一学科的新进展也常会渗透到其相关学科中去。动态大地测量学的形成和发展及研究的内容和方法充分说明这一点。

纵观大地测量学发展史，大地测量学的发展趋势总是不断地与地球科学的其它学科相互交叉、渗透、融合，延拓其它地球科学的最新进展，并在自身不断完善的基础上，形成新的学科分支。动态大地测量是基于大地测量学，与多学科交叉结合，并辅以随时间变化的数据处理方法和物理解释，确立的一个内涵十分丰富、领域十分广阔的新兴学科。现代空间大地测量 (VLBI、SLR (卫星测距)、GPS (卫星定位) 等) 的发展，为动态大地测量增添了崭新的内容，更加拓宽了它的应用领域。动态大地测量的主要任务在于精确测定地球的变形，定量描述变形的动态过程，并结合其它地球科学对变形做出合理的几何和物理解释，具体表现在：①测定地球自转、地极运动和固体潮。为研究全球其它地球动力学现象 (全球地震活动、全球气象变迁等)，地球内部物理过程 (如核幔耦合现象等)，地壳弹性常数的分布、地壳变形幅度、地壳变形的周期特性等提供可靠的基础数据。②监测区域地壳形变与全球板块运动。随着动态大地测量监测技术和手段的发展，特别 VLBI、SLR 及 GPS 等所提供的大尺度、高精度、高时效的空间大地测量技术，使大区域和全球性的地壳形变和板块运动的监测成为可能，为研究地壳运动规律和地球的动力学过程提供了最直接和定量的证据。③监测全球重力场或区域重力场动态变化。利用重力测量的观测结果可以研究地球内部结构、物质分布状态和动力学演化过程，确定由于动力机制的多样性引起的地壳和地幔异常等 (许厚泽等, 2000) ④监测人类活动对环境的影响，地面沉降、矿山崩塌、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 (陈鑫连、黄立人等, 1994)。

地球动力学是一个内涵很广泛的名词，其研究对象是地球内部的力和各种过程 (丁国瑜, 1991)。在相当长的时期内，地球科学处在定性研究阶段，随着科学技术的迅猛发展、实测资料和地球科学研究成果的不断积累，为地球科学的定量研究提供了充分的条件，促使了地球动力学的发展和日益完善。地球时刻处于不断的变形和运动状态，并表现出各种不同时空尺度的地球动力现象，如大陆漂移、海底扩张、造山运动、地震和火山爆发等。探索各种地球

动力现象的力学机理,掌握其发生和变化的规律,预测其发展趋势就成为地球动力学的任务。现代地壳应力场的研究、固体力学理论和模型应用、有限元数值方法的引入、多种反演方法的应用及地震层析成像成就等不断地推动着地球动力学在深度和广度上的进展。但用于研究的数据有限性和模型的不精确性表达,制约着地球动力学发展,迫切需要相关学科提供精确的数据约束。从上述动态大地测量的三个主要任务来看,动态大地测量的观测和研究成果应是这种约束的主要来源。利用这种约束去再造板内应力场,估计块体相互作用的状况和相对运动的速率,推测造成板块运动的动力学过程(丁国瑜,1991),反演板块边界作用力源和影响因素,研究地球介质非均匀性(各向异性)和力学特性(弹性、非弹性、粘弹性)等,将会给地球动力学研究注入勃勃生机。

综上所述,地球动力学的深入研究需要动态大地测量的参与;动态大地测量研究,特别在对变形做出合理的物理解释时更需要同地球动力学相结合。地球变形的物理解释,即根据观测资料推断引起变形的力或物理过程,从本质上讲,解释所采用的方法必然是反演方法。因此,动态大地测量和地球动力学两者相互交叉、渗透及在更深层次上的相互促进、共同发展,为大地测量反演研究创造了良好的背景和条件。

1.2 大地测量反演与物理解释的研究进展

大地测量反演与地球物理解释是对地形变现象认识的进一步深化,它与地震学、地球物理学等学科的结合,在研究地壳动力学和地球的深部结构细节、地球内部动力过程和物性特征等方面不仅具有理论意义,而且具有实用价值,因此已引起国内外学者的高度的重视。目前,作为地球动力学物理解释主要手段的大地测量反演理论和方法的研究,已日益成为世界地质学界研究的热点(刘鼎文,1991;赵少荣等,1993;陈运泰等,1979;许才军等,1996,1997;汪素云等,1996)。

由于地球物理学的学科性质和特点,地球物理学者首当其冲地成为反演研究的生力军。

地球物理反演理论的形成和发展与计算机科学的发展密不可分,开始只是作为正演研究的自然延伸分散在单一的地球物理分支之中(杨文采,1996)。1967~1970年期间,美国地球物理学家 Backus 和应用数学家 Gilbert 连续发表的 3 篇关于地球物理反演的文章(Backus,G.E.,Gilbert,J.F.,1967,1968,1970),奠定了地球物理反演理论和方法的基础。这一理论简称“BG”理论,它讨论的模型是连续的。1972年,美国的 Wiggins 和英国的 Jackson 等人提出了离散模型情况下的反演理论(Wiggins, R. A.,1972; Jackson,D. D.,1972)。20世纪80年代偏微分方程反问题、90年代非线性反演问题的研究进一步深化了反演的内涵。目前,地球物理反演研究在某些方面无论在理论上还是在应用上都已相当成熟。在我国,80年代以来,地球物理反演的研究热潮才真正兴起,并做出了应有的贡献:有关学者提出了利用有限元技术和线性叠加原理,根据区域内的观测位移、应力和应变等量,反演区域边界作用力或位移的基本思想和方法(王仁等,1983,1985);利用这一方法,提出了只根据区域内主应力方向观测结果反演区域边界作用力的约束反演法和应力张量拟合法,并给出了中国东部地区周围板块边界作用力的方向和大小(许忠淮等,1992);利用平滑方法处理应力主向的观测资料,反演了中国及邻区可能受到的周围板块作用力(汪素云,1996);利用遗传有限元反演研

究区域现今构造应力场的力源和影响因素、震源过程及相关研究 (安美建, 1998) 等等。

国内外, 虽然大地测量反演与地球物理解释的研究远没有地球物理反演研究那么系统、深入和成熟, 但有关大地测量的反演与地球物理解释的研究正方兴未艾。近十几年来, 该方向的研究十分活跃, 理论深度和应用广度都取得了较大进展 (Jackson, 1985; Wang, 1983; Tarantola and Balette, 1982; Yabuki and Matsu'ura, 1992; Blaha, 1996; Braitenberg and Zadro, 2000)。将位错理论引入地震学领域, 并运用于实际的地壳断层活动和反演块体参数的研究: Steketee (1958) 根据弹性力学理论给出了利用 Green 函数计算地表位移的公式, Savage (1966), Mansinha and Smylie (1971), Sato and Matsu'ura (1974) 发展了这一理论, 特别是 Okada (1985, 1992) 总结了位错理论研究成果, 给出了在各向同性的均匀半无限介质空间中, 任意倾角的矩形位错面以任意方向的常位错分布而产生的地表以及地球内部位移场的通用表达式; Ruth A Harris 等 (1987) 提出将断层单元化, 利用残差加权平方和最小的方法去反演断层参数; Mark H. Murray 等 (1996) 提出了利用 Monte Carlo 法来估计矩形断层最优几何参数解及其不确定性问题; Kristine M. Larson 等 (1999) 也提出约束非线性最优化算法来反演断层参数, 并讨论了双断层反演问题; Mitsuhiro, M. (1977), 陈运泰 (1979), 张祖胜 (1984), 赵少荣 (1995), Larson (1999) 等都进行了卓有成效的研究。利用观测位移、重力、应力和应变等物理量, 反演区域应力场、应变场和区域边界作用力的研究也相当活跃: Haines 和 Holt (1993) 提出利用地震矩张量获得的地壳应变率反演地壳运动速度场的方法, 该方法得到了广泛的发展并取得了很多成果 (Haines et al., 1995; Kreemer et al., 2000; Holt et al., 2000; Beavan et al., 2001); Solomon (1980), 王仁 (1985), 许才军 (1996, 1997) 等, 用数值方法反演构造应力场, 已由模拟反演发展到实际应用, 由线性叠加发展到非线性三维有限元法; 党亚民 (1998), 独知行 (2001) 等, 利用 GPS 位移数据和区域应力数据研究了区域边界力、应力场, 等等。

地球内部动力过程会引起各种动力学现象, 即某一特定“结果”可能引起的“原因”有多种, 这是大地测量反演的一类不适定问题。研究中, 人们总是设法利用各种手段, 获取多种观测资料, 从中提取有用信息, 借以还原描述地球内部的物性参数、特征和动力过程的“模型”。现代空间大地测量技术, 如甚长基线干涉技术 (VLBI)、卫星激光测距 (SLR)、全球定位系统 (GPS)、合成孔径干涉雷达 (INSAR) 等技术在地球动力学研究方面的应用, 为结合地震、地质及地球物理资料进行的联合反演研究创造了良好的背景和条件。T. B. Shen 等 (1998) 利用地震矩张量、甚长基线干涉测量和 GPS 观测值反演研究了美国西部现今地壳运动速度场; Holt 等 (2000) 利用第四纪以来断层滑动速率和 GPS 观测值反演研究了亚洲地壳运动速度场; 许才军等 (2001) 采用 GPS 和地震矩张量反演计算了中国大陆地壳运动速度场图像; Zhao 等 (1995, 1999) 利用 GPS 和重力资料以及 GPS 和水准资料联合反演了中国红河断裂带的活动断裂模式; 等等。这些成果充分说明, 大地测量反演已由单一数据的反演, 发展到多种数据的联合反演问题。2001 年 9 月在布达佩斯召开的 IAG 大会上, 大地测量联合反演问题仍是大会关注的一个重点 (许才军, 2001), Y. M. Chen 提出了一种新的考虑全球各类变形场数据的联合反演分析模型, G. S. Vergos 介绍了利用卫星测高获得的重力数据通过联合反演方法改善海底地形估计的结果, 等等。联合反演模型、反演理论和方法将成为今后反演研究的核心问题之一 (党亚民, 1998, Come Kreemer and William E. Holt, 2000; 许才军, 2001)。

总的看来,大地测量反演研究作为一种数据处理理论已被我们所接受和认识,它与地球物理解释的研究取得了较大的进展,但其理论的数学严密性和应用的深度和广度都需进一步提高。理论上,问题的适定性、求解方法和解的定量评价;应用上,最优化方法、有限元等数值计算方法和各种力学模型在大地测量反演研究中的应用和讨论,将随着人们的重视、资料的积累成为今后研究的方向和热点。

1.3 基于力学模式的大地测量反演方法、特点及意义

基于力学模式的大地测量反演是在选择的力学模型和一定的边界条件下,利用有限元等数值计算方法,以位移等观测值与相应点计算值之差的平方和趋于最小为准则,来反求待参数的方法。这种反演系统主要有两部分:①力学模型求解部分。从力学角度看,力学模型求解问题实际是边值问题。大地测量反演问题所考虑的力学模型多为非线性的,预测数据与模型参数具有非线性关系。②目标函数拟合部分。目标函数采用最小二乘拟合,属非线性优化问题。这些特点决定了它属非线性反演问题,同时也决定了基于力学模式的大地测量反演研究的内容和方法的特殊性。

非线性反演要比线性反演复杂得多,非线性反演通常采用两种方法:①先用泰勒展开、取一次项线性化,用迭代法解线性方程组,这种做法常常带来许多复杂、困难的问题。②若在泰勒展开时取了高次项,则可导出广义非线性反演方法,这种方法目前还难以广泛应用。

基于以上的讨论,本文采用“正法”反演来处理基于力学模式的大地测量反演问题。相应于这种反演问题的两个部分,反演系统存在两部分解算:①力学模型部分的求解利用有限元等数值方法直接解算。数值计算可以充分利用现有的成熟正问题计算方法和程序,既适用于线性函数的情形又适用于非线性函数的情形。②用恰当的最优化方法处理目标函数拟合部分。约束和非约束的各种局部最优化方法(如模式搜索法、变量轮换法、单纯形法、鲍威尔法、复合形法等)和全局搜索算法(如蒙特卡罗、模拟退火、遗传算法),是求解目标函数拟合部分的有力工具。特别是最优化方法中的直接法和有限元等数值计算的有机结合,更能有效地实现这两部分的解算任务。因此,最优化方法中的直接法和有限元等数值计算的有机结合,是基于力学模式的大地测量反演研究的显著特点之一。

利用传统大地测量或现代大地测量监测(如GPS、VLBI、SLR等)所获取的位移数据,通常基于全球参考框架或某一较大区域参考基准,位移数据中既含有这种框架或基准的影响信息,又含有研究区域内刚体运动信息、变形信息(顾国华等,2000.11;张强等,2000.9;P.Briole et al.,2000.11;Muneo Hori et al.,2000)。但从基于力学模式的大地测量反演角度考虑,我们最关心的问题在于研究区域运动的空间差异性、区域内部相对运动信息。因此,对观测位移进行特定局部参考基准的相似变换,即将位移数据从一个变形参考系变换到另一个变形参考系(这里称为“特定基准”),将观测位移转变为变形位移(完全由于研究对象本身变形引起的位移,反映研究对象内部点间的相对运动关系。)是十分必要的。当然,“特定基准”的转换要求保持变形体内部相对位置关系不变,变换必须为线性变换。这一点是基于力学模式的大地测量反演研究的特点之二。

实质上,由大地测量反演方法所得到的各种参数的物理意义是十分模糊的,因为:①要

建立一个能完全正确地反映各种因素的数学物理模型和考虑复杂的边界条件,几乎是难以实现的,实际应用时常作一些假设,如物质是各向同性的、连续的、均匀的、线性的和简单的边界条件等。②岩石力学特性随时间和空间的变化也在不断的变化,而我们获得的观测资料具有一定的时空尺度,如观测位移是一段时期的相对位移,并非固体力学模型所要求的绝对位移。③算法仅能保证目标函数的所刻化的量(如位移、应力主向等)的有效性,研究区域的内部物理性质的真实性还要依赖模型和边界条件的选择。由此,反演所得到的参数实际上是综合考虑岩体物性特征、地质构造、边界条件、区域特点等各种因素的“有效参数”,它与室内和野外实验值有一定的偏差,但其实际意义是非常明显的。这是基于力学模式的大地测量反演研究的特点之三。

基于力学模式的大地测量反演研究实际意义在于:①利用反演得到的更加细化的计算位移、应力和应变等物理量,可以有效研究构造单元细划、运动性质、变形特点等。②利用反演所得参数可以得到同大地测量信息相符合的地壳形变分析结果,对后期预测研究有切实的意义。

1.4 本文的主要研究内容

大地测量反演作为一种研究地球动力学的方法和手段,已被我们所接受和认识,近十几年来,它的研究取得了较大的进展,但其理论的严密性和应用的深度和广度都需进一步研究。任何学科的发展都会面临这样或那样的困难,大地测量反演研究尚属一个新兴学科,它面临的问题和困难显而易见。考虑基于力学模式的大地测量反演研究特点、意义和在大地测量反演中的重要性,以及学位论文研究时间、所需数据资料、人力等诸方面的限制,本文重点做了以下几个方面的研究:

(1) 在综合分析大地测量反演理论与应用现状和进展的基础上,针对研究中的几个重要问题系统而详细地讨论,明确了大地测量反演较为准确的定义,并对大地测量方法进行了详细地分类,提出了深化大地测量反演研究的若干观点。

(2) 反演研究所采用的位移数据要满足反演解算对基础信息要求,如两期间坐标之差应为变形而非误差干扰、位移应反映点间相对运动信息等,对此本文做了初步研究。提出一种区分变形与误差的新方法——概率距离法;在对大地测量位移数据信息描述的基础上,探讨了适合于基于力学模式大地测量反演的区域变形反演分析的位移数据处理方案:①“特定基准”确定;②“异常位移”定位;③有限元局部处理。方案中将新近提出的“粗差拟准检定法”拓展到形变分析中,并对该方案作了详细的讨论。

鉴于人们讨论的大地测量反演模型有多种,如力学模式(弹性、弹塑性、粘弹性、粘弹塑性模型等)、位错模式等,尝试性地提出大地测量反演的模型辨识这样一个新课题,并初步探讨了大地测量反演模型辨识的定义、原则和方法。

利用大地测量(重力测量、传统大地测量、现代空间大地测量)观测值,通过反演可以获得地球介质参数、板块或块体边界力、构造应力场和应变场等参数,但大地测量反演存在参数可辨识性问题。本文基于目标函数推演出大地测量反演参数可辨识性条件,并进行了可辨识性的相关讨论。