

地球物理大地测量 反演理论与应用

Joint Inversion Theory Geophysics
and Geodesy and Its Application

许才军 等编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

武汉大学研究生规划教材

地球物理大地测量 反演理论与应用

Joint Inversion Theory Geophysics
and Geodesy and Its Application

许才军 陈庭 张丽琴 温扬茂 汪建军 刘洋 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地球物理大地测量反演理论与应用/许才军等编著. —武汉:武汉大学出版社,2015.9

ISBN 978-7-307-16331-7

I. 地… II. 许… III. 大地测量—地球物理反演 IV. ①P22 ②P31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 154363 号

责任编辑:黄汉平

责任校对:汪欣怡

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉中科兴业印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:23.75 字数:557千字 插页:1

版次:2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16331-7 定价:48.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,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9章。第1章：地球物理大地测量反演理论概述；第2章：地球物理大地测量反演的物理基础；第3章：地球物理大地测量反演的地质构造基础；第4章：线性反演方法；第5章：非线性反演方法；第6章：地球物理大地测量联合反演模型辨识与确定；第7章：基于位错模式的地球物理大地测量反演方法；第8章：基于黏弹体的地球物理大地测量反演方法；第9章：地球物理大地测量联合反演地壳应变应力场。

本书既有各种反演方法的数学公式推导，又有地球物理大地测量反演的一些概念分析，特别是结合作者的科研工作，体现了地球物理学与大地测量学的交叉特色，具有内容新，覆盖面广，概念清楚，深入浅出，通俗易懂等特点，具有较强的理论性和实用性，可作为固体地球物理专业、大地测量学与测量工程专业的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

本书是作者在武汉大学大地测量学与测量工程及固体地球物理学专业的硕士研究生讲授的(大地测量)地球物理反演理论课程的基础上编写的。

地球物理反演理论的目的是根据观测数据求取相应的地球物理模型,更确切地说是认识地球动力学过程,而观测数据不只限于地球物理观测量,也包括地质、大地测量、摄影测量与遥感观测数据,因此,地球物理反演这个名称并不能确切地表达其内涵。特别是高精度、高分辨率的空间大地测量观测使地球物理反演进入了一个崭新的发展阶段,因此,20世纪80、90年代提出了大地测量反演问题(理论),其特点是应用高精度、高分辨率的大地测量数据进行地球物理问题的研究,大地测量反演问题是大地测量学科深入地学研究领域的核心问题。地球物理反演理论的目的是根据观测数据求取相应的地球物理模型,而大地测量反演与地球物理反演在本质上并没有区别,它也是根据观测数据(主要是大地测量数据)求取地球动力学(数学物理)模型。事实上,随着科学技术的发展,学科的发展不再是单一的,地球物理反演问题也好、大地测量反演问题也好,对于其要表达的含义都具有局限性,于是,一个崭新的学科分支——地球物理大地测量反演应运而生,地球物理大地测量反演问题能比较确切地反映其事物的本质,也代表了学科发展的趋势。

本书共9章,其中第1章由许才军教授编写、第2章由陈庭副教授编写,第3、8章由温扬茂副教授编写,第4、9章由汪建军讲师编写,第5章由张丽琴副教授编写,第6章由许才军教授、刘洋讲师编写,第7章由许才军教授、陈庭副教授、刘洋讲师编写,全书由许才军教授统稿。本书的编写参考了我国许多地学工作者的最新研究成果。

限于水平,书中缺点和疏漏在所难免,敬请读者指正。

编著者

2015年2月

目 录

第 1 章 地球物理大地测量反演理论概述	1
1.1 正演问题与反演问题	1
1.2 地球物理大地测量反演的研究对象	1
1.3 地球物理大地测量反演的发展历史	2
1.4 地球物理大地测量反演的研究内容与方法	6
1.5 地球物理大地测量反演的一般过程	7
参考文献	8
第 2 章 地球物理大地测量反演的物理基础	13
2.1 应力应变基础	13
2.2 弹性力学基础	19
2.3 流变力学基础	26
2.4 岩石的脆性破裂	35
2.5 点源位错模型	46
2.6 矩形位错模型	52
2.7 Jeyakumaran 三角位错原理	57
2.8 球体内点位错产生的球形位移场	60
2.9 Mogi 模型	63
参考文献	69
第 3 章 地球物理大地测量反演的地质构造基础	72
3.1 地球的圈层构造	72
3.2 现今板块构造及运动	78
3.3 几条重要的活动断裂带	97
3.4 活动断裂的闭锁特性	106
3.5 凹凸体与障碍体	109
参考文献	112
第 4 章 线性反演方法	115
4.1 线性反演的一般描述	115
4.2 线性反演模型的建立	116

4.3	长度法	131
4.4	广义逆矩阵方法	137
4.5	线性迭代方法	163
4.6	基函数展开方法	184
4.7	B-G 线性反演	199
4.8	jR_i 方法	214
	参考文献	217
第 5 章	非线性反演方法	219
5.1	非线性反演的一般描述	219
5.2	模拟退火法(Simulated Annealing, SA)	219
5.3	遗传算法(Genetic Algorithm, GA)	222
5.4	人工神经网络法(Artificial Neural Network, ANN)	227
5.5	粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)	234
5.6	多尺度反演法(Multi-Scale Inversion)	239
5.7	同伦法	242
5.8	线性和非线性混合方法	251
	参考文献	262
第 6 章	地球物理大地测量联合反演模型辨识与确定	268
6.1	地球物理大地测量联合反演系统辨识和参数辨识	268
6.2	地球物理大地测量联合反演函数模型辨识	270
6.3	地球物理大地测量联合反演随机模型确定	274
6.4	地球物理大地测量联合反演的抗差方差分量估计法	279
6.5	兼顾权比确定的多源数据联合反演	284
	参考文献	286
第 7 章	基于位错模式的地球物理大地测量反演方法	288
7.1	基于位错模式反演的一般描述	288
7.2	震源参数的反演	288
7.3	同震滑动分布反演	292
7.4	震间变形反演	295
7.5	利用珊瑚礁垂直形变测量数据反演所罗门 Mw8.1 级地震的滑动分析	297
	参考文献	301
第 8 章	基于黏弹体的地球物理大地测量反演方法	303
8.1	岩石圈介质的黏弹性松弛模型	303
8.2	黏弹性-弹性对应原理	306

8.3 黏性通道上覆弹性地壳的黏性松弛响应	307
8.4 二维断层的黏弹性响应	310
8.5 三维断层的黏弹性响应	318
8.6 塔里木盆地的黏滞系数反演	326
参考文献.....	333
第9章 地球物理大地测量联合反演地壳应变应力场.....	335
9.1 地壳应变应力场反演的基本内涵	335
9.2 块体运动与应变模型	336
9.3 地壳应变应力场联合反演模型	348
9.4 四维整体大地测量有限单元法	357
9.5 基于震源机制的地壳构造应力场	360
9.6 地震库仑应力场与地震危险性	363
参考文献.....	370

第1章 地球物理大地测量反演理论概述

1.1 正演问题与反演问题

正演问题和反演问题是普遍存在的两个相辅相成的问题。正演问题一般是属于数学物理方程的问题，即解算适合于一定附加条件的二阶偏微分方程问题(傅淑芳、朱仁益, 1998)。通俗地讲，根据给定的数学物理模型的参数计算出(观测)结果的问题是正演问题，或者说正演问题是按照事物的一般原理(模型)以及相关的条件(初始条件、边界条件)来预测事物的结果。例如，在板块构造理论研究中，根据板块运动模型给出的欧拉运动参数(欧拉极坐标、旋转角速度)来计算任一点的板块运动速度就是一个正演问题；在地球物理磁法勘探的理论研究中，根据磁性体的形状、产状和磁性数据，通过理论计算、模拟计算或模型实验等方法，得到磁异常的理论数值或理论曲线，也是正演问题。而由观测数据通过适当的方法计算数学物理模型参数来重建数学物理模型的问题是反演问题，或者说由结果反推原因的问题就是反演问题。在测量数据处理中我们通常所做的工作由观测数据确定模型参数的平差问题就是反演问题最简单的一个例子；在磁法勘探理论研究和解释磁测成果时，根据磁异常特征，确定磁性体的形状、产状及其磁性等，也属于反演问题。

正演有时也称正演模拟，在地震勘探中，正演模拟是用一种生成人工合成地震记录的算法来实现的，这些算法有地震射线追踪法、有限差分法或有限元波动方程解法等。在重力勘探中，正演模拟方法包括根据假定的地下密度分布计算重力场异常分布。而反演或“反演模拟”试图根据给定的一组地球物理测量结果重建地下特征，重建工作以模型响应“拟合”测量结果的方式进行，反演可以理解为“对不精确、不充分和不一致的数据进行解释”(Jackson, 1972)。

1.2 地球物理大地测量反演的研究对象

地球物理反演是在地球物理学中利用地球表面观测到的物理现象推测地球内部介质物理状态的空间变化及物性结构的一个分支。

地球物理反演理论的目的是根据观测数据求取相应的地球物理模型，更确切地说是认识地球动力学过程，而观测数据不只限于地球物理观测量，也包括地质、大地测量、摄影测量与遥感观测数据，因此地球物理反演这个名称并不能确切地表达其内涵。特别是高精度、高分辨率的空间大地测量观测使地球物理反演进入了一个崭新的发展阶段，因此 20

世纪 80、90 年代提出了大地测量反演问题(理论),其特点是应用高精度、高分辨率的大地测量数据进行地球物理问题的研究,大地测量反演问题是大地测量学科深入地学研究领域的核心问题。地球物理反演理论的目的是根据观测数据求取相应的地球物理模型,而大地测量反演与地球物理反演在本质上并没有区别,它也是根据观测数据(主要是大地测量数据)求取地球动力学(数学物理)模型。事实上,随着科学技术的发展,学科的发展不再是单一的,地球物理反演问题、大地测量反演问题,对于其要表达的含义都具有局限性,一个崭新的学科分支应运而生,地球物理大地测量反演问题(或者叫地球物理大地测量联合反演问题、大地测量地球物理联合反演问题等)能比较确切地反映其事物的本质,也代表了学科发展的趋势。

地球物理大地测量反演问题是一个可以同时包含动力学参数和介质物性参数的混合反演问题,它涵盖了地球物理反演问题和大地测量反演问题所要解决的最基本的问题。

地球物理大地测量反演,以大地测量观测为基础,结合地球物理、地质等其他学科资料,利用地球物理学建立的先验地球动力学模型,反推动力学模型参数,修正或提出新的地球动力学模型;也可以根据地表观测结果反演研究活动断层、活动块体的运动情况,探讨地壳运动与地震关系,进行地震、地质灾害的预测预报。地球物理大地测量反演理论的目的就是根据观测数据求取相应的地球物理模型。

1.3 地球物理大地测量反演的发展历史

从我国东汉的科学家张衡在公元 132 年发明候风地动仪来测验地震以来,地球物理反演已经渗透到地球科学的各个领域。牛顿根据万有引力定律推测地球密度,开尔文研究地球的弹性和热传导,都是早期地球物理反演的范例。

从文献来看,早在 1930 年 Tsuboi 就研究了 1927 年发生的 Tango 地震的地壳形变,发表了论文 *Investigation on the deformation of the earth's crust in the Tango district connected with the Tango earthquake of 1927*。大地测量资料参与地球物理实质性反演最早是日本科学家 Kasahara,他于 1957、1958 年利用地震学的和大地测量学的观测数据反演研究地震成因的基本属性、地震断层的物理条件。Byerly (1958) 利用大地测量资料计算了地震能量。随后 Chinnery (1961, 1965) 分别探讨了地表断层与地面位移、平移(走滑)断层与垂直位移的关系。Press (1965) 发表了远程地震的位移、应变和倾斜的文章。Savage 和 Burford (1973) 利用三角网观测数据反演确定了加利福尼亚中部的相对板块运动。Matsu'ura (1977) 探讨了利用大地测量数据反演地下断层问题,明确提出了大地测量反演这一概念,详细讨论了大地测量反演的数学模型及公式,并对 1927 年发生的 Tango 地震进行了具体的研究。Okada (1985, 1992)、Okubo (1992) 等应用位错理论推导了由于地下断层引起地表位移和重力变化等经典公式,在地震同震变形正反演研究、负位错理论研究以及非震变形研究中,均得到了广泛应用。Segall (1980, 1987, 1988, 1992, 1993, 1994, 1996, 1997, 1998)、Savage (1994, 1998, 2000) 等学者利用大地测量资料反演研究了地壳运动、活动断层运动及震源参数等。最近几年, Fukuda 和 Johnson (2008, 2010) 提出能够同时处理不同数据集相对权比、正则化参数、线性模型参数和非线性模型参数的“全贝叶斯算法”和线性非线

性反演方法, Kositsky 和 Avouac(2010) 提出主成分分析反演法(PCAIM)进行动态大地测量数据的反演分析。

我国学者利用大地测量资料进行地球物理反演研究最早是陈运泰院士, 他于 1975 年根据地面形变的观测(水平和垂直位移场)研究了 1966 年邢台地震的震源过程, 1979 年他又用大地测量资料反演了 1976 年唐山地震的位错模式。1978 年王椿镛等提出了用大地测量资料在最小二乘意义下确定通海地震断层参数的一个方法。1981 年朱成男等利用新丰江水库 1964 年 5.3 级地震区三角网平差结果反演了地震断层参数, 讨论了“随机尝试——动态平差”方法。1984 年, 张祖胜提出了利用原始观测资料(包括地面长度、角度、高差、倾斜、应变的变化值)直接进行反演的严密方法; 改进了单纯形最优化计算方法, 加速了迭代的收敛并给出了收敛准则; 按逐渐趋近法进行观测资料的标准化, 保证了标准化后的各类资料都属于同一正态分布。文中根据地震前、后的大地测量资料, 对 1976 年唐山 7.8 级地震的震源参数进行了反演, 并对成果的稳定性和可靠性进行了检验。高锡铭等(1990)讨论了地震位错引起的参考系, 即大地水准面形变问题, 给出了位错引起的大地水准面高和垂线偏差的变化, 以及大地水准面高随位错面倾角变化等数值结果。在进一步考虑大地水准面形变的条件下, 给出用表面视位移和重力变化资料反演位错模型参数的处理方法, 以及用于确定唐山地震源参数和大地水准面高的变化的实例。顾国华(1990)详细讨论了形变监测网的基准与形变模型反演问题。

赵少荣(1991)从固体力学的基本方程出发, 发展了动态大地测量反演及物理解释的理论, 并利用大地测量数据反演研究了 1976 年唐山地震震前和震时地壳断裂运动的特征和规律, 以及唐山地震的非均匀破裂图像。许才军(1994)研究了青藏高原地壳运动模型与构造应力场, 建立了由大地测量数据反演三维线弹性构造应力场数学模型, 并用大地测量数据结合地质、地球物理资料对青藏高原构造变形和构造应力场进行了三维数值模拟分析。党亚民(1998)研究了贝叶斯方法、蒙特卡洛法、模拟退火算法以及遗传算法等在大地测量形变分析和解释中的应用, 并利用国家 GPS A 级网资料研究了中国大陆现今地壳水平运动的整体特征。伍吉仓(1998)提出了一种刚体运动加断层位错的板块边界断层运动模型, 针对大地测量数据反演提出了两种构造先验信息矩阵的方法——经验统计法和物理约束法, 较好地克服了反演问题的不唯一性。独知行(2001)初步探讨了大地测量反演模型辨识的定义、原则和方法, 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, 在此基础上利用中国地壳观测网络 GPS 观测资料 and 主应力方向数据进行了中国大陆及邻域边界力位移反演和川滇地区边界力的联合反演研究。杨志强(2003)提出并推导了根据实测资料反演边界力和材料参数的位移反分析模型。李志才(2005)研究了顾及地球结构的大地测量反演的模式, 将大地测量学与活动块体、地震断层位错模型结合起来, 建立了分块体多断层联合反演模式以及顾及地球结构的同震和震后变形反演模式。李爽(2005)研究了基于位错模式的多类数据的联合反演问题, 采用了区间模拟退火法进行了近震定位实验并利用重力和 GPS 数据联合反演了川西地区的断层参数。陈庭(2005)利用数值流形方法模拟了川滇地区地壳运动速度场和应力场变化。张朝玉(2006)提出了半线性反演方法, 克服了当前非线性方法不能评价反演结果, 线性反演对初始模型依赖性大的缺点; 证明了附加相对权比的联合反演方法与赫尔墨特公式的一致

性, 推导了具有自适应权比的大地测量联合反演的序贯算法。黄建平等(2006)利用重力和地形观测反演中国及邻区地壳厚度, 杨元喜等(2009)讨论了顾及几何观测信息和地球物理模型的形变参数自适应滤波解, 许才军等(2009)提出了利用赫尔默特方差估计方法求解大地测量地球物理联合反演中各类观测权比例因子的方法。王乐洋(2011)提出了总体最小二乘联合反演方法, 推导了附有随机等式约束、非线性等情况下的加权总体最小二乘方法, 开展了基于总体最小二乘的大地测量反演理论及应用的研究。刘洋(2012)进一步进行了顾及模型误差的震源参数 InSAR 反演问题的研究。

随着卫星重力技术的发展, 特别是新一代卫星重力计划的实施, 从2000年7月开始, CHAMP、GRACE、GOCE 3颗重力卫星相继发射, 时变地球重力场的获取已经成为现实, 解决了地面重力测量难以获取地球重力场时变特性的困境。地球系统大范围的质量迁移, 能引起地球自转、地球重力场及地球质心的变化。在较短的时间范围内这样的变化往往很微小, 而且在较长的时间尺度上又往往保持相对静态, 采用地面重力测量往往无法捕捉到这些变化。而卫星重力技术提供的地球重力场数据达到了地面测量所不能提供的信息, 也为理解全球范围内的质量迁移过程和地球动态响应提供一种有效的途径(Chao 等, 2000)。能引起地球系统质量迁移的基础地球物理过程很多, 比如, 地震, 大气运动, 海洋循环和海洋潮汐, 冰雪融化, 陆地及海洋负载, 陆地水储量等等。在较长的时间尺度上, 引起地球质量迁移的过程非常复杂, 通常涉及固体地球物理以及其他地球动力学过程, 而在较短的时间尺度上, 引起地球质量迁移的最显著的动态因素则是气候因素。气候因素主要由太阳辐射能驱动, 太阳照射时间的长短引起地表及空气温度差异, 这些温度差异引起了大气层中空气的大范围移动, 即气候引起的大气圈质量迁移, 同时也对降水和蒸散产生影响, 全球水循环是引起这部分质量迁移和重新分布的主要原因。这些影响也存在着季节内、季节性以及年际的震荡变化, 而这一变化周期恰好符合卫星重力技术恢复的地球重力场目前所能达到的时间分辨率(胡小工等, 2006)。

时变重力场可反映地球表层物质密度分布的变化。早在1998年 Wahr 建立了重力场模型时变位系数与密度分布变化的关系(Wahr 等, 1998), 以及反演密度分布变化的数学模型, 初步建立了一个由时变重力数据反演地球表层水储量分布变化的较完整的基础理论和方法。此后, 国内外有众多研究人员据此开展了深入研究, 利用 GRACE 时变重力实测数据反演计算了全球各大流域水储量分布的季节性和年际变化以及南极和格陵兰岛冰盖的质量平衡(Tapley 等, 2004; 周旭华等, 2006; Velicogna 和 Wahr, 2006; Chen 等, 2007, 2008, 2009; Guntner 等, 2007, 2008; Rodell 等, 2007; 邢乐林等, 2007; 朱广彬等, 2008; 翟宁等, 2009; 李军海等, 2011; Luo 等, 2012; 黄强等, 2013), 同时研究了青藏高原和印度北部地区冰川变化(Matsuo and Heki, 2010), 以及一些典型地区由于对地下水的过度开采产生的后果, 其中包括印度北部、美国东部、墨西哥北部、中东地区以及我国华北和东北部分地区(Rodell 等, 2009; Tiwari 等, 2009)。

GRACE 重力卫星的发射, 使我们能够得到大尺度的全球时变重力场, 并且有机会观测到质量重分布引起的同震重力变化。Valentin 等(2004)对利用卫星重力测量探测不同震级构造变形引起的重力场变化的可能性进行了数字模拟和统计检验分析。Sun 和 Okubo (2004)也做了类似分析, 认为震级大于9.0级的剪切型或大于7.5级的张裂型地震的同震

形变才能被 GRACE 卫星观测到。

2006 年 Han 等首次从 GRACE 重力卫星数据中提取出了 2004 年 Sumatra-Andaman 地震的同震重力变化,其结果与由地震模型预测的重力变化相当。Cambiotti (2011) 在 Han 的基础之上进行了改进,用 GRACE 重力卫星数据来约束 2004 年 Sumatra 地震的模型,他使用的地球模型是可压缩包含自重的,还考虑到了水准面的反馈并计算了体积变化导致的重力变化。随后他继续使用 GRACE 数据研究了 2011 年日本 Tohoku-Oki 地震的同震重力变化,并反演了矩张量。

Wang 等(2012)尝试使用 GRACE 重力卫星数据反演了 2010 年 Mw 8.8 级智利 Maule 地震和 2011 年 Tohoku-Oki 地震的矩张量和部分震源参数。随后 Han 等(2013)利用过去十年的卫星重力数据反演了 2004 年 Sumatra-Andaman 地震,2011 年 Maule 地震,2011 年 Tohoku-Oki 地震,2012 年 Indian Ocean 走滑地震,2007 年 Bengkulu 地震的震源参数。

多种数据联合反演是地球物理大地测量反演发展的必然趋势,主要有多类大地测量数据如 GPS、水准数据和重力数据的联合反演,以及大地测量数据与地震、地质数据的联合反演。后者更具有代表性。

Holt 等(2000)利用 GPS 数据和地质断层数据(第四纪断层滑动率)反演给出了亚洲地区速度场,Tong 等(2010)联合 InSAR、GPS 和地质数据反演了汶川地震产生的同震滑动分布,其中地质考察的断层崖高作为下限约束,断层的几何参数也基于地表破裂的地质绘图,为 InSAR 和 GPS 的联合反演提供了重要的先验信息和约束。

Delouis 等(2002)联合 InSAR、GPS、远场地震波和强震数据反演地震滑动的时空分布,通过混合大地测量数据提供独立的时空约束。之后,Cirella 等(2009)、Yokota 等(2011)、Hartzell 等(2013)诸多学者对 GPS/InSAR 和波形资料联合反演震源时空破裂过程的方法与应用进行了研究。在可以看成是波形的高频 GPS 出现以前,GPS/InSAR 偏重于相对长周期(地震周期)的形变监测,这种相对长周期的监测时间分辨率低,难以识别形变的时变规律,而波形资料偏重于高频形变的观测,因此,在震源破裂过程联合反演中,大地测量数据主要用来约束其空间分布,而波形资料被用来约束时间分布。Wang 等(2012)联合了 GPS、InSAR 和海底测量数据反演 2011 年 Tohoku-Oki 地震滑动分布,利用震后两个时期的 GPS 形变做震后滑动改正,并比较了多个不同的模型,发现混合多种数据的模型能够提供最多的滑动细节,结果和地震波和大地测量联合反演结果一致。

大地测量数据与地震、地质数据的联合反演的发展趋势是,综合利用大地测量技术和地震观测手段,联合高频 GPS、InSAR 等获取的近场资料,与地震观测仪器获得的近场强震仪资料、远场宽频带地震波资料,确定地震的发震断层、发震深度、地震大小以及破裂过程,联合空间大地测量(包括卫星重力测量)、几何大地测量(主要包括地面重力测量、跨断层水准测量)、地震和地质观测资料研究地震震源性质和地震机理。

地球物理大地测量反演经历了由单一大地测量数据反演发展到了多种大地测量数据以及多类(大地测量、地球物理、地质等)观测数据参与的联合反演。反演模型已经由最初的连续型发展到了离散型(Jackson, 1972, 1979),由线性反演发展到了非线性反演(Tarantola 等, 1982; Jackson 等, 1985; Gao 等, 1993),以及线性非线性联合反演(Fukuda 和 Johnson, 2008, 2010)。解反演问题的经典方法是最小二乘法及统计学的回归

分析、参数估计等。近三十年来,由于大地测量地球物理反演问题的计算广泛应用了信息论、线性及非线性规划、广义逆理论及最优化方法等一些数学工具,在理论和方法上都有重大进展。

1.4 地球物理大地测量反演的研究内容与方法

当前,人类社会面临资源短缺、自然灾害频繁和生态环境退化问题,要求现代大地测量学科必须面向资源开发、减灾和监测生态环境。可以说,地球物理大地测量反演正成为大地测量学科深入地学领域、探索地球奥秘,透过复杂的地球动力学现象,研究其力学机制,进而解释区域性或全球性地球事件的最基本、最重要的方法。

地球物理大地测量反演的主要任务可以归纳为以下几个方面(刘鼎文,1989;赵少荣,1991;陈鑫连等,1994;许才军,2009):

(1)利用监测不同周期变化的活动板块的边界运动、应变积累、板内变形以及其他构造运动或区域性的地壳运动信息来研究地震时空展布规律,反演方法求解地壳弹性应力-应变的分布,研究软流圈的流变特性、板块之间的力学耦合程度、建立板块驱动机制。

(2)通过监测全球重力场或区域重力场随时间的变化信息,反演研究地球内部构造和物质分布状态,推断地幔对流的模式;研究冰盖-海洋质量迁移引起的地壳形变,反演地幔的有效黏度。

(3)在活动断裂带上,特别是地震活动带上,综合利用 GNSS、水准测量和重力测量的定期复测,以及 InSAR 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,研究地震破裂过程和地震机理。

(4)综合利用 GNSS、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以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。

(5)监测人类活动对环境的影响,城市地面沉降、矿山崩坍,岩体滑坡以及其他自然因素导致地表变化而造成的各种灾害,进行反演研究并进行灾害预测、预警。

地球物理大地测量反演的主要任务也决定了地球物理大地测量反演的主要研究内容和方法。主要是地球物理大地测量反演模式、反演算法、反演结果的解释及可靠性。

地球物理大地测量反演模式可分为两类:单一种(类)观测资料的反演和多种(类)观测资料的反演。单一种(类)观测资料的反演包括由单一地球物理资料的反演,单一大地测量资料的反演或者单一地质资料的反演;多种(类)观测资料的反演包括由地球物理与大地测量资料的联合反演,地质和大地测量资料的联合反演,以及地球物理、地质和大地测量资料的联合反演等。

地球物理大地测量反演算法可以分成两大类:线性反演算法和非线性反演算法,其中非线性反演算法包括有最速下降法、共轭梯度法、牛顿法、变尺度法、蒙特卡洛法,以及目前常用的模拟退火法、遗传算法、人工神经网络法,还有最近几年发展起来的多尺度反演方法、粒子群算法(PSO)等。

反演结果的解释及可靠性也可以认为是对反演问题的解的评价, 由于反演结果的非唯一性, 使得它对反演问题非常重要, 目前也正在发展之中。

1.5 地球物理大地测量反演的一般过程

地球物理大地测量反演问题首先必须确定观测数据和地球模型(数学物理)参数之间的函数关系, 由此可以根据给定的模型参数计算相应的观测数据、进行正演计算, 也可以根据观测数据求取地球动力学模型的参数、实现反演分析。正演是反演的前提和条件, 只有解决了正演计算, 不管是靠解析的方法还是数值的方法, 才能实现反演分析。在地球物理学中或地球物理大地测量学中, 将观测数据和地球的物理模型参数联系起来的数学表达式叫数学物理模型。不同的地球物理问题或地球物理大地测量学问题, 其数学物理模型是不同的, 就是同一个地球物理问题或地球物理大地测量学问题, 若观测方式不同, 近似条件有变, 其数学物理模型也不一样。虽然地球物理问题或地球物理大地测量学问题千差万别, 但把观测数据和物理模型参数联系起来的数学表达式却只有线性和非线性两大类。

如以 x 表示模型参数, y 表示观测数据, F 表示联系 x 和 y 的函数或泛函表达式, 则满足

$$\begin{cases} F(x_1 + x_2) = F(x_1) + F(x_2) = y \\ F(\alpha x) = \alpha F(x) = y \end{cases}$$

两个条件时, 称 F 为线性函数或线性泛函, 其中 α 为常数。显然, 不满足上式的函数或泛函就是非线性函数或非线性泛函。

不管是线性反演还是非线性反演, 都涉及地球响应函数(或理论观测值)的计算。正演是反演的前提和条件, 只有准确地计算出地球的响应函数, 才能求得可靠的地球动力学模型。如果观测数据和地球动力学模型之间存在着确定的函数关系, 具有解析表达式, 这种正演计算是不难实现的。但是如果观测数据和地球动力学模型之间不存在着确定的函数关系, 即不具有解析表达式, 这时需要利用数值计算方法来实现正演计算。数值计算方法主要有有限单元法、样条函数拟合法、数值流形方法和积分方程等。

地球物理大地测量反演理论与地球物理反演理论一样必须解决以下 3 大问题。

1) 解的适定问题, 包括解的存在性(即给定一组观测数据后, 是否一定存在一个能拟合观测数据的解或模型)、唯一性(即能拟合观测数据的模型是唯一的, 还是非唯一的)及稳定性(即反演问题中的数据稍有变化时其解是否会发生大的变化)。

2) 反演问题的求解方法: 由于实际问题的复杂性, 有时尽管作过解的存在性与唯一性的验证, 但并不等于就有了求解的方法。许多问题都是通过反复的实践与演变, 才能建立起比较完整的理论。

3) 反演问题的解的评价: 研究解的评价的一系列准则及折中原则, 没有给出解的评价的反演理论是不完全的, 它也不同于一般正演问题的误差分析, 而是在反演理论中提取真实模型的地球动力学信息的重要工具。

解决这三大问题的过程也就是地球物理大地测量反演的一般过程。

◎参考文献:

- [1] Byerly P, DeNoyer J. Energy in earthquakes as computed from geodetic observations// Contributions in Geophysics, 1958, 1: 17-35, London: Pergamon Press
- [2] Cambiotti G, Bordoni A, Sabadini R, et al. GRACE gravity data help constraining seismic models of the 2004 Sumatran earthquake. J. Geophys. Res, 2011, 116(B10403), B10403
- [3] Cambiotti G, Sabadini R. A source model for the great 2011 Tohoku earthquake ($M_w = 9.1$) from inversion of GRACE gravity data. Earth Planet Sc Lett, 2012, 335: 72-79
- [4] Chao B F, Dehant V, Gross R S, et al. Space geodesy monitors mass transports in global geophysical fluids. EOS Transactions, 2000, 81(22): 247, 249-450
- [5] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake. Geophys. Res. Lett, 2007, 34, L13302, doi: 10.1029/2007GL030356
- [6] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, Yang Z L, Niu G Y. 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models, J. Geophys. Res, 2009, 114, B05404, doi: 10.1029/2008JB006056
- [7] Chinnery M A. The deformation of the ground around surface faults. Bull. Seismol. Soc. Am, 1961, 51: 355-372
- [8] Chinnery M A. The vertical displacements associated with transcurrent faulting. J. Geophys. Res., 1965, 70(18): 4627-4632
- [9] Fukuda J, Johnson K M. Mixed linear-non-linear inversion of crustal deformation data: Bayesian inference of model, weighting and regularization parameters. Geophys. J. Int., 2010, 181(3): 1441-1458
- [10] Fukuda J, Johnson K M. A fully Bayesian inversion for spatial distribution of fault slip with objective smoothing. Bull. Seismol. Soc. Am., 2008, 98(3): 1128-1146, doi: 10.1785/0120070194
- [11] GOCE project. <http://www.esa.int/export/esaLP/goce.html>, ESA, 2005
- [12] GRACE mission overview. <http://www.csr.utexas.edu/grace/overview.html>, CSR, 2015
- [13] Guntner A. Improvement of global hydrological models using GRACE data. Survey Geophysics, 2008, 29: 375-397
- [14] Guntner A, Schmidt R, Doll P. Supporting large-scale hydrogeological monitoring and modeling by time-variable gravity data. Hydrogeology Journal, 2007, 15: 167-170
- [15] Han S C, Shum C K, Bevis M, et al. Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake[J]. Science, 2006, 313(5787): 658-662
- [16] Han S, Riva R, Sauber J, et al. Source parameter inversion for recent great earthquakes from a decade-long observation of global gravity fields[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013: 1-28
- [17] Han S C, Sauber J, Luthcke S. Regional gravity decrease after the 2010 Maule (Chile)

- earthquake indicates large-scale mass redistribution. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, 37, L23307, doi: 10.1029/2010GL045449.
- [18] Han S C, Sauber J, Luthcke S, et al. Implications of postseismic gravity change following the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake from the regional harmonic analysis of GRACE intersatellite tracking data. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113, B11413, doi: 10.1029/2008JB005705
- [19] Hartzell S, Mendoza C, Ramirez G L, et al. Rupture history of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan, China, earthquake: evaluation of separate and joint inversions of geodetic, teleseismic, and strong-motion data. *B Seismol Soc. Am.*, 2013, 103(1): 353-370
- [20] Holt W E, Chamot-Rooke N, Le Pichon X, Haines A J, Shen-Tu B, Ren J. Velocity field in Asia inferred from quaternary fault slip rates and global positioning system observations. *J. G. R.*, 2000, 105 (B8): 19185-19209
- [21] Jackson D D, Matsu'ura M A Bayesian approach to nonlinear inversion. *J. G. R.*, 1985, 90(B1): 581-591
- [22] Jackson D D. Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data. *J. G. R., astr. Soc.*, 1972, 28: 97-110
- [23] Jackson D D. The use of a priori data to resolve non-uniqueness in linear inversion. *J. Geophys. Res. astr. Soc.*, 1979, 57: 137-157
- [24] Kasahara K. Physical conditions of earthquake faults as deduced from geodetic data. *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, 1958, 36(4): 455-464
- [25] Kasahara K. The nature of seismic origins as inferred from seismological and geodetic observations(1). *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, 1957, 35(3): 473-532
- [26] Koketsu K, Yokota Y, Nishimura N, et al. A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake. *Earth Planet Sc. Lett.*, 2011, 310(3): 480-487
- [27] Kositsky A P, Avouac J P. Inverting geodetic time series with a principal component analysis-based inversion method. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115, B03401, doi: 10.1029/2009JB006535
- [28] Luo Z C, Li Q, Zhang K, et al. Trend of mass change in the Antarctic ice sheet recovered from the GRACE temporal gravity field. *Sci. China Earth Sci.*, 2012, 55: 76-82
- [29] Rodell M, Famiglietti J S, Chen J L, et al. Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observation. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(L20504): 1-4
- [30] Matsu'ura M. Inversion of geodetic data. Part I. Mathematical formulation. *J. Phys. Earth*, 1977, 25: 69-90
- [31] Matsu'ura M. Inversion of geodetic data. Part II: Optimal model of conjugate fault system for the 1927 Tango earthquake. *J. Phys. Earth*, 1977, 25(3): 233-255
- [32] Mikhailov V, Tikhotsky S, Diamant M, et al. Can tectonic processes be recovered from new gravity satellite data? [*J*]. *Earth Planet Sc. Lett.*, 2004, 228(3-4): 281-297
- [33] NASA, Goddard Space Flight Center. Studing the Earth's Gravity from Space: The Gravity