

文章编号: 1000-050X(2001)06-0555-07

文献标识码: A

# 大地测量联合反演理论和方法研究进展

许才军<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 综述了 10 多年来国内外大地测量反演问题研究的成果及最新进展, 特别是大地测量联合反演模型、大地测量联合反演算法以及大地测量联合反演理论和方法在研究地壳运动、地球构造等中的应用成果, 讨论了联合卫星测高、声纳测深及海洋激光雷达遥感信息反演海洋环境参量, 联合 INSAR、GPS 和水准资料反演研究地壳运动和联合各种观测数据反演研究地球内部构造问题。随着科学技术的发展, 大地测量联合反演理论和方法研究将在监测全球变化、防灾减灾、发展地球科学理论方面取得更大进展。

**关键词:** 联合反演理论; 地壳运动; 地球介质参数; 海洋环境参量

中图法分类号: P223.0; P227.1; P228.42

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之一。空间大地测量, 特别是 GPS 定位技术, 近 10 年来已广泛应用于地壳运动和变形的监测。结合水准测量和重力测量监测数据, 现代大地测量已有可能在几乎任意时空、尺度上获取各种地学事件的精确信息。长期以来这一丰富的大地测量监测信息仅停留在用于描述和模拟地壳的动态变化, 限于对现象的表观研究。地壳运动和变形大地测量监测数据是地球内部动力过程中地表力学响应的输出信号, 利用地球物理学建立的先验地球动力学模型, 即地球固体力学弹性变形模型, 可以根据大地测量地壳形变监测数据反推动力学模型参数; 可以根据地表观测结果反演研究地震、地质灾害, 对其进行预测、预报。2001 年 9 月 2 日至 7 日在布达佩斯召开的 IAG 大会上, 大地测量联合反演问题仍是大家关注的一个重点<sup>[1~4]</sup>, 特别是在联合反演模型及反演理论和方法应用方面, Y.M. Chen 提出了一种新的考虑全球各类变形场数据的反演分析模型, 该模型具有精确度高、灵敏性好和收敛快等特点, 能够很好地确定地球参数; 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。这些报告引起各国专家学者的兴趣。最近 10 年来, 大地测量联合反演理论和方法取得了重要进展, 应用领域更加广阔。

## 1 联合反演模型的研究

赵少荣(1991)系统地研究了“基于固体力学的大地测量反演问题”, 给出了基于固体力学模式的多类大地测量反演的解算模型; 许才军(1994)给出了大地测量联合反演构造应力场的解算模型; 晁定波等(1997)进一步提出了四维整体大地测量有限单元法, 把四维整体大地测量模型(包括 GPS, 水准, GPS 水准和重力监测数据)与固体力学基本方程结合起来, 对大地测量和地球物理数据进行有效的整体处理, 强化了边界的大地测量约束, 具有改善刚度矩阵方程数学性质和降低其阶数的优点, 从而提高反演解的稳定性和可靠性。

P. Segall 等(1997)根据永久 GPS 网的扩建在时空上为地壳形变量提供了足够的数据, 建立了一种网络反演滤波模型, 它可以综合频繁收集到的各类大地测量网络数据来估计断层滑动的时空分布, 反演获得各种参数, 包括观测误差、局部移动、瞬时和空间平滑参数。

大地测量反演模型的建立涉及到正演模型、观测数据的类型、反演模型选择及反演参数辨识。正演模型是反演模型的基础, 只有清楚正演问题建立正演模型, 才能给出反演模型。大地测量反演已由单一的观测数据的反演, 发展到多种观测

收稿日期: 2001-10-10。

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(49904001); 教育部高等学校骨干教师资助计划资助项目(20003)。

数据的大地测量联合反演问题,这种多种观测数据的大地测量联合反演问题不仅仅指大地测量的多种观测数据,而且也包括不同类型的(地震、地质和大地测量等)多种观测数据。

### 1.1 联合变形、重力和地震资料反演研究地球内部介质参数

地球内部介质的弹性参数  $\mu$  和  $\lambda$  是利用地表的形变观测资料研究地球的应力场及内部的物质运动所必需的参数。观测资料表明,在地球内部,介质的弹性参数  $\mu$  和  $\lambda$  存在横向和纵向上的不均匀性。利用变形资料可以研究地球介质弹性参数  $\mu$  和  $\lambda$ ,利用地震和重力观测资料可以研究参数  $\mu$  和  $\lambda$  的不均匀性。由于参数  $\mu$ 、 $\lambda$  与介质的密度、横波速度和纵波速度参数有关,而密度、横波速度和纵波速度参数又是地震观测资料的场源,密度参数还是重力数据的场源,因此,进一步探求参数  $\mu$  和  $\lambda$  结构的问题,可以转化为利用地震和重力观测资料反演密度、横波速度和纵波速度参数结构的问题。联合变形、重力和地震资料研究地球内部介质参数的联合反演问题可以表示为:

$$\begin{aligned} BX &= U_L \\ NX &= g \\ SX &= d \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)可以通过下列目标函数取极小值求解:

$$\begin{aligned} \Phi &= (U_L - BX)^T W_L (U_L - BX) + (g - NX)^T \\ &W_g (g - NX) + (d - SX)^T W_d (d - SX) = \min \end{aligned}$$

式中,  $X$  为介质参数;  $W_L$ ,  $W_g$ ,  $W_d$  为 3 类数据的权阵, 观测值可以是相关的。

### 1.2 反演模型与参数的辨识

大地测量联合反演模型有多种多样,但无论采用何种模型都是在某一准则下使实际观测数据与反演理论数据达到最佳拟合的条件下确定反演模型的参数。在大地测量联合反演中,模型的选择及模型参数的可确定性,可定义为大地测量联合反演的模型辨识。吕爱钟等(1998)在理论上讨论了反演问题的参数可辨识问题;独知行(2001)基于简单的力学模型具体讨论了反演参数的可辨识性。但大地测量联合反演问题可能是一个十分复杂的问题,它的研究对象可以是全球,也可以是地球的一个特定局部,可以具有复杂的材料性质、边界条件及形状,在进行反演研究时,很难简化成有解析表达式的模型。反演模型与参数的可辨识性问题仍需要进一步的研究。

## 2 联合反演算法的研究

大地测量反演方法可分为解析法与数值法两大类。由于解析法只适用于线性问题和简单的非线性问题的反演,因此,大地测量反演方法的研究主要在数值算法方面,其中数值算法尤以优化反演方法(即把反演参数的估计通过建立目标函数转化为一个优化问题进行求解)的研究最为普遍,进展也最快。大地测量随机反演方法,如蒙特卡罗法、模拟退火法、遗传算法等,特别是遗传算法在地球物理大地测量的反演解算中得到了广泛的应用<sup>[5~10]</sup>。随机反演方法充分利用模型空间参数的优化及先验信息对反演参数增强约束,改善反演解的稳定性。在利用随机方法获取全局最优解的基础上,可利用基于贝叶斯理论的高斯-牛顿法通过迭代计算获取全局最优解,这种联合方法既考虑了随机方法可以在全局解域内搜索全局解的特点,同时又考虑了基于先验信息利用贝叶斯方法可以获取局部最优解的特点,从而提高了反演计算的效率和可靠性(党亚民, 1998)。最近 IA 算法(区间优化算法)(L. G. Casado 等, 2001; J. Fernandez 等, 2001)、数值流形方法——“将连续体的有限单元算法、非连续变形分析方法 DDA 和解析方法统一起来的一种更高层次最新数值分析方法”也被提出用于大地测量反演解算中(许才军等, 2000)。这些将有助于全面探索中国大陆地壳运动及动力学问题,如数值流形方法可以采用连续和非连续覆盖函数的办法把连续和非连续的力学问题的计算统一起来,可更有效地研究中国大陆地壳运动问题。

## 3 联合反演理论的应用

### 3.1 联合大地测量资料、活断层运动速率和地震矩张量反演地壳运动速度场

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。目前,该方法已被发展为利用大地测量、活断层运动速率和地震矩张量资料综合反演地壳运动速度场(Haines 等, 1995; Jackson 等, 1995; T. B. Shen 等, 1995; Tinnon 等, 1995; Kreemer 等, 2000; Holt 等, 2000; Beavan 等, 2001)。该方法的主要思想是利用“双三次样条函数”通过反演方法在一定厚度的板壳上拟合构造应变率分布,从而求出连续的地壳运动速度场。应变率场和速度场的拟合可

通过下列目标函数求解:

$$\sum_{\alpha \in \text{points}} \sum_{\beta, \lambda, \mu} (\bar{\epsilon}_{\alpha \beta}^{fit} - \bar{\epsilon}_{\alpha \beta}^{obs}) V_{\alpha \beta, \lambda \mu}^{-1} (\bar{\epsilon}_{\lambda \mu}^{fit} - \bar{\epsilon}_{\lambda \mu}^{obs}) + \sum_{\text{points}} \sum_{\alpha, \beta} (v_{\alpha}^{fit} - v_{\alpha}^{obs}) V_{\alpha, \beta}^{-1} (v_{\beta}^{fit} - v_{\beta}^{obs}) = \min \quad (2)$$

式中,  $V_{\alpha \beta, \lambda \mu}$  和  $V_{\alpha, \beta}$  分别是平均应变率和大地测量观测速度的方差-协方差阵。 $\alpha, \beta, \lambda, \mu$  分别是经度、纬度的起止值。T. B. Shen 等(1998)应用此方法, 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)应用此方法, 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)也利用此方法采用 GPS 和地震矩张量反演计算了中国大陆地壳运动速度场, 给出了中国大陆地壳运动速度场图像。

### 3.2 联合变形、地震、地质资料反演研究地壳应变-应力场、应变能密度场

由 GPS、形变观测或地震矩张量可获得地壳应变率场。由弹性体地壳应力与应变的关系可得到地壳应变能密度如下(C. Straub, 1996):

$$D_E = \frac{1}{2} \text{trace}(\sigma, \epsilon) = \mu ((\epsilon_{ij} + \frac{\lambda \Theta}{2\mu} \hat{\delta}_i) \epsilon_{ij}) \quad (3)$$

应变能密度  $D_E$  的单位是  $J/m^3$ 。地壳中积累的应变能密度可能是地震释放能量的来源, 是影响地震活动的重要因素(C. Straub, 1996; 张东宁等, 1999)。应变能密度是衡量地壳积累能量高低的重要数量指标, 应变能密度越大, 地壳积累能量越高, 今后发生地震的可能性越大。

C. Straub(1996)利用 GPS 反演计算了 Marmara Sea 地区的地壳应变-应力场、应变能密度场进行地震危险性区域估计; 许才军等(2000, 2001)利用华北地区 GPS 监测网多期观测数据所得的速度场在椭球面上进行了应变率计算, 得到了其最大剪切应变率、主应变率的图像; 并利用 1966 年以来 25 次大于 5.0 级地震的地震矩张量, 由 Kostrov 公式计算了地震应变率, 对两种数据所得的应变率进行了比较分析, 结合地质构造背景探讨了华北地区现今形变特征及地震危险性地区, 在青藏高原及其邻区也作了类似的工作; 许才军等(2001)进一步利用 GPS 和地震资料联合反演计算了中国大陆地壳应变-应力场、应变能密度场, 并结合地震、地质构造背景可以进行中国大陆地震危险性区域分析。

### 3.3 利用地震面波和重力资料联合反演地壳-上地幔三维密度结构

刘崇兵等(1999)利用地震面波和重力资料联合反演了华北地区地壳-上地幔三维密度结构。通过地震面波观测量和密度相对扰动量关系以及重力和密度相对扰动量的关系, 建立地震面波和重力资料联合反演密度扰动分布的观测方程, 从而应用广义反演理论给出反演问题的解。试验结果表明, 联合反演结果与单纯面波反演结果相比, 其解在分辨率和方差两个方面都有改善。

### 3.4 利用 GPS、水准、重力资料反演研究活动断裂模式

随着科学技术的发展, 高精度获取地壳运动信息已成为现实。地表的观测结果是地壳深部断层活动的响应, 根据地表观测量反演研究地壳深部活动断裂模式最近几年取得了重要进展, 发展和完善了位错模式的大地测量反演的理论和方法。主要包括: 将传统线性滑动模式扩展到非线性滑动模式, 顾及了张性分量, 给出了对该分量的导数表达式; 应用基于力学模式的一般反演理论, 给出了更一般的位错模式反演公式, 引入了有限元法, 摆脱了传统方法中均匀介质、常位错、几何尺度固定等限制性假设, 可反演弹性模量, 应用于包括重力变化的各种大地测量观测量的联合反演, 给出了顾及先验信息的震源参数反演。Zhao (1995), Zhao 等, (1999) 利用 GPS 和重力资料以及 GPS 和水准资料联合反演研究了我国红河断裂带的活动断裂模式。

## 4 大地测量联合反演理论和方法应用展望

### 4.1 联合卫星测高、声纳测深及海洋激光雷达遥感信息反演海洋环境参量

开发研究海洋, 是解决人口膨胀、资源匮乏和环境污染等人类目前所面临的一系列问题的主要途径之一。合理开发利用海洋, 离不开基础海洋测绘成果——海底地形图的保障, 更主要的是要研究海洋环境参量。

海洋基础测绘的传统方法是首先布设海底控制网, 再利用船载测深仪以一定的路线进行测深, 对获取的数据进行改正、平差后推算海底地形, 绘制海底地形图。随着科学技术的发展, 传统的基础海洋测绘方法被赋予了新的内容, 特别是全球定位系统(GPS)、多波束测深系统(MES)、侧扫声纳(SS)、机载激光测深系统(ALB)和海洋地理信

息系统(MGIS)等一系列新技术和新方法的产生给海洋科学研究带来了一场技术革命。这些新技术和手段的应用,提高了海洋空间地理信息量的精度,增加了海洋空间地理信息的数量,也提高了获取海洋空间地理信息的速率。此外,卫星测高技术的提出及实现给海底地形的确定带来了新的概念。卫星测高利用雷达测量卫星和海面之间所获得的距离、量测时的位置及各种海面高改正来提供海面高。利用卫星测高资料可以恢复海洋重力场,在此基础上,利用重力异常和海底地形存在线性关系的均衡假设,便可推估海底地形。W. H. F. Smith 等(1994)利用源于卫星测高数据获得的重力资料,采用最优化理论和经验资料反演确定了南部大洋的海深;希腊的 D. Arabelos (1997)运用 Moho 面深度( $12' \times 12'$ )、JGP95E 全球水准数据库( $5' \times 5'$ )、卫星测高资料和重力异常资料,应用最小二乘配置法反演确定了地中海和北大西洋的海底地形;G. S. Vergos (2001)在 IAG 大会上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。

随着 CHAMP、GRACE 和 GOCE 3 颗关于重力场、地磁场、大气探测和海洋环流的小卫星的发射,联合多种卫星测高资料反演研究海底地形将取得重大突破;卫星测高资料也将为反演研究海洋环境参量作出贡献。

海洋环境参量主要包括海面温度、潮汐、海面风场、重力场、海浪方向谱、有效波高、海冰厚度、海面高度等,利用海洋航空遥感遥测技术所获得的信息反演研究海洋环境参量是我国海洋“863”资源环境领域海洋监测技术主题“十五”重点研究课题。

#### 4.2 联合 INSAR、GPS 和水准资料反演研究地壳运动

INSAR 利用雷达信号的强度信息和相位信息获取地球表面的三维空间信息。由于雷达信号能够穿透云雾、雨雪,具有全天候的工作特点,对地物有一定的穿透能力,并且可大面积地测定地面点的精确高程及其变化等优越性,因而可广泛应用于国土测绘、环境监测、地震、海洋、地质、水文、农业、森林和土地利用等方面。INSAR 技术可以获取高精度(精度可达 5m)的数字高程模型(DEM),补充遥远、条件恶劣地区的高程数据;差分 INSAR 技术能够探测到 cm 级甚至 mm 级的地表形变(1993 年 Massonet 等在 California 的 Landers 地震中得到了 cm 级的结果;1999 年 Claudio Carneal 等利用 ERS-1/2 的数据对间隔 4

年(1993~1997)Cerro Prieto 地区进行了分析,INSAR 求出的形变量与一级水准路线结果的中误差为 4mm)。由于雷达干涉的高空间覆盖能力及相对低廉的成本,近年来日益受到重视,在地震、火山及地壳形变监测、DEM 提取、土地资源利用调查等领域建立了独特的地位。雷达干涉已用于多例地震(Massonn 等, 1993a, 1994, 1996; Murakami 等, 1996; Ozawa 等, 1997; Fujiwara 等, 1998; D. T. Sandwell 等, 2000)和火山活动的形变研究(Mouginis-Mark 等, 1993; Briole 等, 1997; Thatcher 等, 1997; Gaddis 等, 1998),还有冰川运动和冰川地形研究(Goldstein 等, 1993),热带雨林监测(Wegmuller 等, 1995)、滑坡监测(Fruneau 等, 1996)及地表沉降观测(Rosen 等, 1997)等。INSAR 作为一种监测手段,也有其固有的限制,例如 INSAR 对大气影响(对流层延迟、电离层延迟等)、卫星轨道误差、地表状况和时变去相关性(temporal decorrelation)非常敏感,这些误差很容易导致 INSAR 图像解释错误,而且这些都无法用 SAR 数据本身消除。

GPS 精密定位可以确定地面离散点上的精确位置和高程变化,可以较为精确地确定电离层、对流层参数,是当前研究地壳形变最为精确、方便、实用的手段。INSAR 与 GPS 两种技术,具有很好的互补性,可以相互结合,取长补短。GPS 是一种理想的点定位系统,尤其是采用相对定位工作方式时,定位精度已达  $10^{-9} \sim 10^{-10}$ ,而 INSAR 提供的是整个区域面上连续的信息。GPS 获得的是高精度的绝对坐标,而 INSAR 仅提供相对坐标。由于入射角的关系,INSAR 对高程信息特别敏感,而这恰恰是 GPS 最薄弱的一环。最为重要的是,GPS 允许长时间连续观测,而 INSAR 可被看作瞬时测量。GPS 可提供时间分辨率很高的观测数据(采样率为 10Hz 乃至 20Hz),而 SAR 卫星通常 35d 左右的重复周期很难提供足够的时间分辨率(ERS-1 和 ERS-2 共同服役期间重复周期较短)。因此,GPS 和 INSAR 互为补充,可以同时保证时间连续性和空间连续性,特别是利用 GPS 改善 INSAR 卫星轨道的确定精度以及减少大气效应的影响,进而改善 INSAR 图像质量是一种行之有效的手段。1997 年 Bock 和 Williams 首先提出 INSAR 与 GPS 集成的思想。同年, Linlin Ge 等人进一步提出了 DIDP(double interpolation and double prediction)方法。他们提出利用 GPS 数据减弱大气影响(对流层延迟、电离层延迟等)和卫星轨道误差,并通过改正后的

INSAR 图像去加密 GPS 观测结果。李振洪在 2001 年 IAG 大会上作了题为“Subsidence of Tianjin City Measured by Integration of Interferometric SAR and GPS Measurements”的报告, 报告提出了 GPS 与 INSAR 两种集成方案, 并提出联合 INSAR、GPS 和水准资料研究天津地面沉降运动的思想。

联合 INSAR、GPS 和水准资料反演研究地壳运动, 预测预报地质灾害也将是国际地学界的一个热点。

#### 4.3 联合各种观测数据反演研究地球内部构造

大地水准面是地球内部物质结构与运动的物理特性的一种几何表征, 它与地球深部构造有着密切的关系, 因此利用大地水准面起伏和重力异常的精细结构可以反演地球内部构造、地幔对流。此外利用重力、水准、定位、地磁等精确观测数据, 可以探测地球内部局部构造细节, 地壳上地幔的结构、地表和岩石圈的密度、莫霍面深度和应力场, 为地球物理探矿、油气寻找、地热调查等服务。在过去的十几年中, 中外学者已在这方面作了部分工作, 取得了初步成果。联合各种观测数据反演研究地球内部构造是地球科学中一项长期的、艰巨的基础任务, 它将为探索地球奥秘、发展地球科学理论作出重要贡献。

### 参 考 文 献

- 1 Ray R D, Egbert G D. MF Ocean Tide Inverse Modeling: Constraints from Polar Motion. IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2001
- 2 Vergos G S, Sideris M G. Improving the Estimation of Bottom Ocean Topography with Satellite Altimetry Derived Gravity Data Using the Integrated Inverse Method. IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2001
- 3 Chen Y M. Developing an Inverse Analysis Model Based on the Global Deformation Data. IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2001
- 4 Lukandu I A. Nonlinear Gravity Inversion Modeling Around the Faults/ Tectonic Lines in the Central Ranges (Japan Alps). IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2001
- 5 石耀霖. 遗传算法及其在地球物理科学中的应用. 地球物理学报, 1992, 35(增刊): 367~371
- 6 万永革, 刘瑞丰, 李鸿吉. 用遗传算法反演京津唐地区的三维地壳结构和震源位置. 地震学报, 1997, 19(6): 623~633
- 7 王海军, 林邦慧, 陈诗安, 等. 用遗传算法反演 1994 年台湾海峡地震的震源过程及其相关研究. 地震学报, 1998, 20(2): 118~127
- 8 王世民. 北美板块构造变形、构造应力及其驱动力的联合反演研究: [博士论文]. 北京: 北京大学, 1996
- 9 党亚民, 陈俊勇, 晁定波. 模拟退火算法及其在大地测量反演中的应用. 测绘科技动态, 1999
- 10 党亚民, 陈俊勇, 晁定波. 大地测量反演解算中的遗传算法. 见: 陈俊勇编. 大地测量学论文专集. 北京: 测绘出版社, 1999. 179~186
- 11 Fernandez J, Pelegrin B. Using Interval Analysis for Solving Planar Single-F Facility Location Problems: New Discarding Tests. Journal of Global Optimization, 2001, 19: 61~81
- 12 许才军, 晁定波, 赵少荣, 等. 华北地区地震活动性特征分析及大地测量研究对策. 测绘信息与工程, 2000(2): 8~12
- 13 Schaffrin B, Bock Y. Geodetic Deformation Analysis Based on Robust Inverse Theory. Manuscripta Geodaetica, 1994, 19: 31~44
- 14 Bernd A B. Locating Global Minima in Optimization Problems by a Random-Cost Approach. Nature, 1993, 361: 708~710
- 15 Du Y, Aydin A, Segall P. Comparison of Various Inversion Techniques as Applied to the Determination of a Geophysical Deformation Model for 1983 Borah Peak Earthquake. Bull. Seism. Soc. Am., 1992, 82: 1 840~1 866
- 16 Stutzmann E, Montagner J P. An Inverse Technique for Retrieving Higher Mode Phase Velocity and Mantle Structure. Geophys. J. Int., 1993, 113: 669~683
- 17 Kaunari N, Yoshio F, Ryuichi S, et al. Inversion of Gravity Data to Determine the Terrain Density Distribution in Southwest Japan. J. G. R., 1997, 102: 27 703~27 719
- 18 Xu P L, Shimada S, Fujii Y, et al. Invariant Geodynamical Information in Geometric Geodetic Measurements. Geophys. J. Int., 2000, 142: 586~602
- 19 Segall P, Matthews M. Time Dependent Inversion of Geodetic Data. J. G. R., 1997, 102: 22 391~22 409
- 20 Peltzer G, Saucier F. Present-day Kinematics of Asia Derived from Geologic Fault Rates. J. G. R., 1996, 101: 27 943~27 956
- 21 赵少荣. 动态大地测量反演理论与应用及其物理解释: [博士论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1991
- 22 吕爱钟, 蒋斌松. 岩石力学反演问题. 北京: 煤炭工业出版社, 1998
- 23 独知行. 基于力学模式的大地测量反演理论及应用: [博士论文]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2001
- 24 Xu C J, Liu J N, Li Z C, et al. Analyze Characteristic of Deformations in Qinghai-Tibet and Its Margins by Inverting Seismic Moment Tensors and GPS Velocities.

- Geo-Spatial Information Science, 2000, (3): 54~60
- 25 许才军, 董立祥, 李志才. 华北地区地壳形变的 GPS 及地震矩张量反演分析. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6): 471~476
- 26 晁定波, 许才军, 刘崇兵. 联合形变、重力和地震面波资料研究地球介质参数的探讨. 见: 陈俊勇编. 大地测量学论文专集, 北京: 测绘出版社, 1999. 63~70
- 27 刘崇兵, 宁津生. 利用地震面波和重力资料联合反演地壳-上地幔三维密度结构的方法探讨. 测绘学报, 1999, 28(2): 103~109
- 28 许才军, 晁定波, 刘经南, 等. 用大地测量资料反演青藏高原构造应力场初步尝试. 测绘学报, 1997, 26(2): 95~100
- 29 晁定波, 许才军, 刘大杰. 四维整体大地测量有限单元法. 测绘学报, 1997, 26(1): 7~13
- 30 Zhao S R. Joint Inversion of Observed Gravity and GPS Baseline Changes for the Detection of Active Fault Segment at the Red River Fault Zone. *Geophys. J. Int.*, 1995, 122: 70~88
- 31 Zhao S R, Chao D, Lai X, et al. The 1996  $M_L = 7.0$  Lijiang Earthquake, Yunnan, China: An Anticipated Event. *J. Geodynamics* 1999(27): 529~546
- 32 Beavan J, Haines J. Contemporary Horizontal Velocity and Strain Rate Fields of the Pacific-Australian Plate Boundary Zone through New Zealand. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106: 741~770
- 33 Bennett R A, Rodi W, Reilinger R. Global Positioning System Constraints on Fault Slip Rates in Southern California and Northern Baja, Mexico. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101: 21 943~21 960
- 34 Bourne S J, Arnadottir T, Beavan J, et al. Crustal Deformation of the Marlborough Fault Zone in the South Island of New Zealand: Geodetic Constraints over the Interval 1982~1994. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103: 30 147~30 166
- 35 Feigl K L, Agnew D C, Bock Y, et al. Space Geodetic Measurements of Crustal Deformation in Central and Southern California, 1984~1992. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 21 677~21 712
- 36 Haines A J, Jackson J A, Holt W E, et al. Representing Distributed Deformation by Continuous Velocity Fields. *Sci. Rep. 98/5*, Inst. of Geol. and Nucl. Sci., Lower Hutt, New Zealand, 1998
- 37 Haines A J, Holt W E. A Procedure for obtaining the Complete Horizontal Motions within Zones of Distributed Deformation from the Inversion of Strain Rate Data. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 12 057~12 082
- 38 Holt W E, Haines A J. The Kinematics of Northern South Island, New Zealand Determined from Geologic Strain Rates. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 17 991~18 010
- 39 Holt W E, Pichon X L, Haines A J, et al. Velocity Field in Asia Inferred from Quaternary Fault Slip Rates and GPS Observations. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 19 185~19 209
- 40 Kreemer C, Holt W E. Active Deformation in Eastern Indonesia and the Philippines from GPS and Seismicity Data. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 663~680
- 41 Shen T B, Holt W E, Haines A J. Intraplate Deformation in the Japanese Islands: a Kinematic Study of Intraplate Deformation at a Convergent Plate Margin. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 24 275~24 293
- 42 Shen T B, Holt W E, Haines A J. The Contemporary Kinematics of the Western United States Determined from Earthquakes Moment Tensors, VLBI and GPS Observations. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103: 18 087~18 118
- 43 Straub C, Kahle H G. Active Crustal Deformation in the Marmara Sea Region, N. W. Anatolia, Inferred from GPS Measurements. *Inst. of Geod. and Photogramm. ETHZ Mitt.*, 58, 1996
- 44 Xu C J, Wang Q, Liu J N, et al. Recent Crustal Deformation and Strain Accumulations in Continental China Inferred from GPS and Seismicity Data. IAG 2001, Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2001
- 45 Xu C J, Dong L X, Shi C, et al. GPS Estimate of the Tectonic Activity in North China. IAG International Symposium on Recent Crustal Movements, Helsinki, Finland, 2001.
- 46 Aabelos D, Tziavos I N. Gravity-Field Improvement in the Mediterranean Sea by Estimating the Bottom Topography Using Collocation. *Journal of Geodesy*, 1998, 72(3): 127~138
- 47 Smith W H F, Sandwell D T. Bathymetric Prediction from Dense Satellite Altimetry and Sparse Shipboard Bathymetry. *J. Geophys. Res.*, 1994(99): 21 803~21 824
- 48 Aabelos D. On the Possibility to Estimate Ocean Bottom Topography from Marine Gravity and Satellite Altimeter Data Using Collocation. *J. Geophys. Res.*, 1997(95): 105~112
- 49 Li Z H, Liu J N, Xu C J. Subsidence of Tianjin City Measured by Integration of Interferometric SAR and GPS Measurements. IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2001
- 50 Claudio C, Hubert F. Monitoring and Modeling Land Subsidence at the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, Using SAR Interferometry. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(9): 1 211~1 214
- 51 InSAR/GPS Integration. [Http://Topex.Ucsd.Edu/SAR/Proposals/Sar-Gps.Html](http://Topex.Ucsd.Edu/SAR/Proposals/Sar-Gps.Html), 2001
- 52 Ge L L, Han S W, Chris R. The Double Interpolation

- and Double Prediction (DIDP) Approach for INSAR and GPS Intergration. IAPRS, 2000, XXXIII
- 53 Massonet D, Feigl K L . Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface. Reviews of Geophysics, 1998, 36(4): 441~500
- 54 许厚泽, 王广运. 大地测量学的新挑战. 测量与地球物理集刊, 1990(11): 1~9

作者简介: 许才军, 教授, 博士, 博士生导师。现主要从事大地测量和地球动力学及大地测量地球物理反演研究。代表成果: 青藏高原现今地壳运动的监测及其动力学机制的研究; 青藏高原地壳运动与形变的 GPS 研究; 华北地区活动地块的大地测量反演综合研究; 等。

E-mail: cjxu@wtusm.edu.cn

## Progress of Joint Inversion on Geodesy and Geophysics

XU Caijun<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, The Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

**Abstract:** The achievement and new progress in geodesy and geophysical inversion in the recent decade are summarized in this paper. There are many models of geodesy joint inversion based on mechanical pattern. The model identification is preliminarily discussed. Developing an inverse analysis model based on the Global deformation data is presented in IAG2001. Various local optimization methods and global optimization methods (like genetic algorithm and IA algorithm) are developed. The numerical manifold method (NMM) is also introduced into geodesy joint inversion. Both the finite element method (FEM) for continual and the discontinuous deformation analysis (DDA) for block systems are special cases of this numerical manifold method.

We can estimate bottom ocean topography with gravity data using the integrated inverse method, obtain the complete horizontal motions within zones of distributed deformation from the inversion of strain rate data and study recent crustal deformation and strain accumulations inferred from GPS and seismicity data. We can also detect active fault segment with joint inversion of observed gravity and GPS baseline changes and study the crustal movements with various observations including geodetic, geological and seismic.

**Key words:** joint inversion theory; crustal movement; medium parameter; ocean environment parameter

**About the author:** XU Caijun, professor, Ph.D. Ph.D Supervisor. His interested fields include geodesy and geophysics inversion, geodesy and geodynamics. His typical achievements are monitoring the present-day crustal movements and studying its geodynamical mechanism in Qinghai-Tibet Plateau; studying the crustal movements and deformations in the Qinghai-Tibet plateau with GPS measurements, synthetic study of active blocks in North China by joint inversion on Geodesy and Geophysics.

E-mail: cjxu@wtusm.edu.cn