

DOI: 10.13203/j.whugis20130504

文章编号: 1671-8860(2014)12-1477-05

# 顾及地壳粘弹性结构的地震断层 震后形变反演分析

李志才<sup>1,2</sup> 许才军<sup>3</sup> 张 鹏<sup>1,2</sup> 温扬茂<sup>3</sup>

1 国家基础地理信息中心大地测量部,北京,100048

2 导航与位置服务国家测绘地理信息局重点实验室,北京,100048

3 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

**摘要:** 顾及地壳的粘弹性结构特征,建立了基于粘弹性地球模型的地震断层震后反演模型。利用遗传算法重点对走滑断层和逆断层两种主要地震断层进行了震后形变反演研究,并与球体均匀模型反演进行了比较。研究结果表明:遗传算法能在较大范围内搜索出发震断层的位错参数,反演的结果基本可靠;基于粘弹性地球模型特征建立的地震断层震后反演模型,可较好地反演不同类型的地震断层震源位错参数;如果出现模型参数不清楚的情况,需综合考虑衡量反演结果的准则,找寻其他方法来判断,仅以  $V^T P V$  最小作为反演准则并不可靠。

**关键词:** 粘弹性结构;断层;震后反演;位错

中图法分类号:P223

文献标志码:A

强地震运动产生的瞬时应力将会导致地壳深部区域的应力松弛,由此产生的震后地表形变为岩石圈构造和流变学模型提供了一个有效的检验手段<sup>[1-5]</sup>。震后形变的模型主要包括以下几种:沿主破裂面的震后余滑<sup>[2]</sup>,孔隙弹性回弹<sup>[4]</sup>和下地壳或上地幔的震后粘弹性松弛<sup>[1-3]</sup>模型等。对于震后余滑和孔隙弹性回弹模型而言,简单的弹性地壳结构已经足以描述。而下地壳或上地幔的震后粘弹性松弛,是深部粘性流受到地震同震应力作用后的粘弹性效应的释放过程,需要顾及复杂的岩石圈结构及其流变学参数。考虑到地壳结构、地球介质的粘弹性流变特性、地球几何(曲面)的影响和重力的影响,Polizzi<sup>[6-7]</sup>陆续提出球体粘弹性震后表达式,并将其表达式用于震后的变形及应力分析中,得出一些有益的结果<sup>[8-10]</sup>。但目前国内专家学者以此作反演分析的研究并不多见,大多以正演为主<sup>[11-13]</sup>。本文提出以球体粘弹性松弛模型为基础来构建反演模式的思想,研究利用地表形变反演下地壳及上地幔粘弹性参数的方法,并将其推广到应用实际中去。

## 1 模型建立及参数设置

文献<sup>[14-15]</sup>进行了基于球体粘弹性模式在震后形变的分析研究,分别模拟分析了震后多年的形变差异,并给出了唐山地震断层在震后 20 a 带来的变形差异影响,但是并未给出基于该正演方程建立的反演模型。本文通过建立反演方程,研究粘弹性地球模型的地震断层的震后变形,具体正演方程为:

$$u(r, t) = \sum_i u_i(r, t, E, F, \varphi_i, \lambda_i) \quad (1)$$

式中,  $u$  代表位移;  $r$  代表半径;  $t$  表示震后时间段;  $i$  代表第  $i$  个位移分量;  $E$  代表地球分层的介质参数,包含有  $\lambda'$ 、 $\mu$ 、 $\rho$ 、 $\eta$ 、 $H$  等,依次分别表示各层弹性参数,剪切模量参数、密度、粘度系数以及深度;  $F$  代表震源位错参数,如果震源为矩形断层,则有参数如  $\Psi_0$ 、 $\alpha$ 、 $L$ 、 $D$ 、 $\delta$ 、 $U$ 、 $\gamma$  等分别代表断层起始点的坐标、方位角、断层长度、深度、倾角、滑动量及滑动角等;  $(\varphi_i, \lambda_i)$  表示任意观测点的大地坐标。根据式(1),如果给定具体的观测点经纬

收稿日期: 2013-09-18

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(41274030, 41204010, 41304008); 国家 863 计划资助项目(2013AA122501, 2013AA122502, 2014AA123104)。

第一作者: 李志才,博士,主要从事大地测量反演及地球动力学应用研究。E-mail: zcli@nsdi.gov.cn

度,利用上述参数,可以灵活计算任意点在任何深度的时变震后变形场-位移场和应变场。

采用非线性方法建立基本的反演方程:

$$\| u(r, t) - u_{\text{obs}} \| = \min \quad (2)$$

式中, $u(r, t)$ 表示根据 Pollitz 模型计算出的震后形变; $t$ 代表时间,可根据公式计算任意时间段的震后地表变形; $r$ 代表需要反演的模型参数,如地震断层位错参数以及地壳模型的介质参数等,通过给定的参数初值计算出任意时间段的震后变形。 $u_{\text{obs}}$ 代表实际地表观测值,或者模拟计算出的真值。依据参数初值计算出的震后变形与实际观测值两者之差值平方和最小的原则,来实际的反演计算。本文主要采用遗传算法来进行反演。

为简单起见,本文主要进行模拟研究。模拟地球模型参照文献[14]中的表1设计,选择采用模型A和模型B进行本文的反演研究工作。具体参数设置详见文献[14],其中,模型A将地球分为4层结构(后文称作球体模型),建立了一个实际地壳模型;为了比较地壳分层和不分层的影响,模型B采用的介质参数除第三层为粘弹性体外,整个地壳是均匀介质(后文称作均匀模型),可看作忽略地壳结构信息的半空间均匀模型。设计断层采用文献[16]中的表2设计,在此不再赘述。

通过模拟发现,点数多少对反演的速度有较大影响,点数较多时,反演时间大幅度增加。因此,本文选择较少的模拟计算点,大多在断层附近,范围从北纬 $36.35^{\circ} \sim 36.65^{\circ}$ ,东经 $110.3^{\circ} \sim 110.7^{\circ}$ ,共56个模拟点。

本文主要通过模拟地震断层中两类主要活动断层(即走滑断层和倾滑断层)的震后形变场进行模拟反演。利用上述设计的地球模型参数及地震断层参数,分别通过式(1)计算两类断层在震后5 a的变形场,依此作为观测形变真值,然后将参数偏离真值,通过式(2)进行反演。

由于模型方程的特殊性,如地球参数产生的几组数据主要依靠球谐计算展开,计算的时间很长,一般超过20 min,这将严重影响反演速度。

因此,本文不涉及地球参数的反演工作,而主要进行基于粘弹性地壳模式的断层参数反演,一来可以提高计算效率,二来可以验证反演模型是否正确可靠。

## 2 反演研究

### 2.1 断层参数模拟反演

遗传算法<sup>[17]</sup>是一种基于种群搜索的启发式优化算法,其基本思想是随机产生种群,然后通过选择、交叉和变异等遗传算子使种群不断进化,最终给出问题的最优解。遗传算法是一种高效的非线性求解方法。在遗传算法反演过程中,需要设定一些基本运行参数,如种群的大小、交叉率、变异概率和进化代数等,本文设定的种群大小为25,最大进化代数为200代,交叉概率为0.5,变异概率为0.02。

表1给出了本文要反演的断层参数的初值,分别是断层的走向、长度、上部深度、下部深度、倾角、滑动量等,然后将这些真值偏离,给出一组初始断层,以便进行模拟反演。同时为防止反演扩散,设定反演参数的上下限。运用遗传算法思想,分别对断层的参数进行反演计算,得出表1的结果。根据表1设定的参数,本文首先计算走滑断层在震后5 a引起的地表变形,具体见图1(a)、1(b)中绿色空心箭头及绿色虚等高线所示,分别代表水平变形和垂直变形。从图1可看出,震后5 a由于粘弹性结构的地壳影响,地表发生了较大变形,水平方向变形高达3 cm左右,垂直方向变形较小,约为0.1 cm。这说明走滑断层的震后变形主要体现在水平方向变化。

反演的断层参数结果见表1。从表1可以看出,反演结果符合较好,基本断层参数都能有效反演,且偏离真值不远。其中,滑动量反演较好,差异不到0.02 m。反演的 $V^T PV$ 值也下降较多,从最初的1 525 cm<sup>2</sup>下降到4 cm<sup>2</sup>,说明反演的拟合程度较好。

表1 走滑断层模拟反演结果

Tab. 1 The Inverted Result due to Strike-slip Fault

|      | 走向/(°) | 长度/km | 断层上部深度/km | 断层下部深度/km | 倾角/(°) | 滑动/m | $V^T PV/cm^2$ |
|------|--------|-------|-----------|-----------|--------|------|---------------|
| 真值   | 90     | 25    | 4.5       | 12.5      | 90     | 2.5  |               |
| 初始值  | 70     | 5     | 0.5       | 15        | 70     | 0.5  | 1 525         |
| 下限   | 50     | 5     | 0         | 10        | 0      | 0.5  |               |
| 上限   | 150    | 40    | 10        | 20        | 90     | 4    |               |
| 反演结果 | 92.41  | 22.77 | 3.9       | 12.85     | 89.2   | 2.52 | 4.0           |
| 偏差   | 2.41   | -2.33 | -0.6      | 0.35      | -0.8   | 0.02 |               |

图1给出了反演前后的变形符合图及差异图,其中图1(a)和1(b)为反演前后变形符合图,图1(a)中红色箭头为反演的水平变形,图1(b)中红色实线为反演的垂直变形。图1显示,大部分点的水平变形无论大小、方向均反演得较好,而垂直变形反演较差。经分析,可能是因为变形量级小,显得结果比较紊乱。图1(c)、1(d)分别给出了根据反演参数结果计算的实际变形与模拟变形的结果差异,反演出来的水平变形差异最大偏差仅有0.2 cm(图1(c)),相比实际变形来说,符合得较好;垂直方向上由于本身变化就小,导致反演后的变形差异更小,影响因素可忽略不计。

根据表2设定的参数,研究逆断层的反演可靠性。计算逆断层在震后5 a引起的地表变形值,图2(a)中绿色空心箭头及2(b)中绿色虚等高线,分别代表水平变形和垂直变形。从图2中可看出,震后5 a由于粘弹性结构的地壳影响,地表发生了较大变形,水平方向变形高达4 cm左右,垂直方向上变形较大,约为2 cm,这说明逆断层的震后变形同时体现在水平和垂向方向的变化上。从表2可以看出,反演结果稍逊于走滑断层反演结果,但依然较为可行,除了反演的断层长度

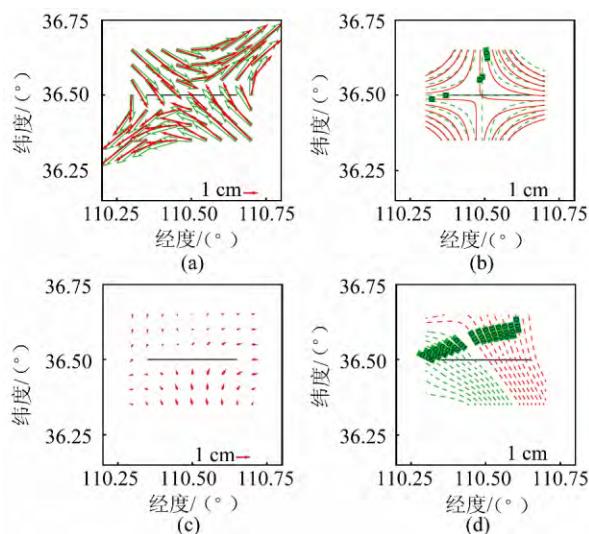


图1 基于粘弹性结构的震后走滑断层模拟地表变形场和差异

Fig. 1 Fitted Surface Deformation and Difference Between Inversion and Observation due to Viscoelastic Structure by Strike-slip Fault

差距较大外(−2.5 km),其他断层参数都能有效反演出来,且偏离真值不远。反演的  $V^T PV$  值也下降较多,从最初的  $9400 \text{ cm}^2$  下降到  $9 \text{ cm}^2$ ,说明反演的拟合程度也还是很好的。

表2 逆断层模拟反演结果

Tab. 2 Inverted Result due to Thrust Fault

|      | 走向/(°) | 长度/km | 断层上部深度/km | 断层下部深度/km | 倾角/(°) | 滑动/m  | $V^T PV/\text{cm}^2$ |
|------|--------|-------|-----------|-----------|--------|-------|----------------------|
| 真值   | 90     | 25    | 4.5       | 12.5      | 90     | −2.5  |                      |
| 初始值  | 70     | 5     | 0.5       | 15        | 70     | −4    | 9400                 |
| 下限   | 50     | 5     | 0         | 10        | 0      | −0.5  |                      |
| 上限   | 150    | 40    | 10        | 20        | 90     | −4    |                      |
| 反演结果 | 90.3   | 22.48 | 4.58      | 12.66     | 89.76  | −2.67 | 9.08                 |
| 偏差   | 0.3    | −2.52 | 0.08      | 0.16      | −0.24  | −0.17 |                      |

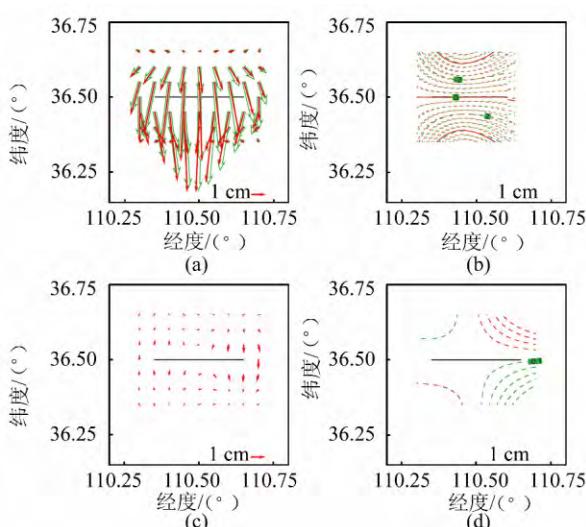


图2 基于粘弹性结构的震后逆断层模拟地表变形场和差异

Fig. 2 Fitted Surface Deformation and Difference Between Inversion and Observation due to Viscoelastic Structure by Thrust Fault

## 2.2 球体模型与均匀模型反演比较

在实际工作中,为简单起见,有时将球体模型不分层进行反演,可以降低反演难度,提高反演成功率。建立一组球体均匀模型进行反演工作,并将其与球体分层结果进行比较。地球均匀模型的参数采用文献[15]中参数设置,除了均匀未分层模型外,其他的参数设置均和上节一致。分别对前述的走滑断层和逆断层进行反演计算,计算的结果见表3、表4。

从表3、表4中可以看出,逆断层模拟反演的结果比较可靠,而走滑断层模拟的反演结果较差,特别是断层的深度(分别为3.88 km和6.25 km)和断层的滑动量(偏差1.12 m),均偏离真值较远。但是反演的  $V^T PV$  较小(从  $1685 \text{ cm}^2$  下降到  $1.95 \text{ cm}^2$ ),说明仅用  $V^T PV$  最小这一原则作为衡量反演结果的准则并不可靠,还需用其他方法加以佐证。

表3 走滑断层球体均匀模型模拟反演结果

Tab. 3 Inverted Result due to Strike Slip Fault in a Homogeneous Spherical Model

|      | 走向/(°) | 长度/km | 断层上部深度/km | 断层下部深度/km | 倾角/(°) | 滑动/m  | $V^T PV/cm^2$ |
|------|--------|-------|-----------|-----------|--------|-------|---------------|
| 真值   | 90     | 25    | 4.5       | 12.5      | 90     | 2.5   |               |
| 初始值  | 70     | 5     | 0.5       | 15        | 70     | 0.5   | 1 685         |
| 下限   | 50     | 5     | 0         | 10        | 0      | 0.5   |               |
| 上限   | 150    | 40    | 10        | 20        | 90     | 4     |               |
| 反演结果 | 89.98  | 22.48 | 0.62      | 18.75     | 89.9   | 1.38  | 1.95          |
| 偏差   | -0.02  | -2.52 | -3.88     | 6.25      | -0.1   | -1.12 |               |

表4 逆断层球体均匀模型模拟反演结果

Tab. 4 Inverted Result due to Thrust Fault in a Homogeneous Spherical Model

|      | 走向/(°) | 长度/km | 断层上部深度/km | 断层下部深度/km | 倾角/(°) | 滑动/m  | $V^T PV/cm^2$ |
|------|--------|-------|-----------|-----------|--------|-------|---------------|
| 真值   | 90     | 25    | 4.5       | 12.5      | 90     | 2.5   |               |
| 初始值  | 70     | 5     | 0.5       | 15        | 70     | 0.5   | 8 790         |
| 下限   | 50     | 5     | 0         | 10        | 0      | 0.5   |               |
| 上限   | 150    | 40    | 10        | 20        | 90     | 4     |               |
| 反演结果 | 90.34  | 24.66 | 3.42      | 12.09     | 89.16  | 2.19  | 2.68          |
| 偏差   | 0.34   | -0.34 | -1.08     | -0.41     | -0.84  | -0.31 |               |

### 3 结语

顾及地球的球体粘弹性地壳结构特征,本文建立了基于球体粘弹性模型的地震断层震后反演模型,采用遗传算法对走滑断层和逆断层两种主要类型的地震断层进行了反演;同时,与球体均匀模型模拟反演的结果做了比较。结果表明,首先,基于非线性算法建立的顾及地球粘弹性结构的震后反演模型是可行的;其次,本文采用的遗传算法可在较大范围反演出走滑断层的位错参数,反演的结果基本可靠;再次,顾及粘弹性地球模型建立的地震断层震后反演模型,可较好地反演出走滑断层和逆断层的震源参数;最后,与球体均匀模型模拟反演结果比较可知,如果出现模型参数不清楚的情况,衡量反演结果仅以  $V^T PV$  最小作为最佳的准则并不可靠,需综合考虑寻找其他方法来加以判断。

### 参 考 文 献

- [1] Pollitz F, Peltzer G, Bürgmann R. Mobility of Continental Mantle: Evidence from Postseismic Geodetic Observations Following the 1992 Landers Earthquake[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 8 035-8 054
- [2] Bürgmann R, Ergintav S, Segall P, et al. Time-sapce Variable Afterslip on and Deep Below the Izmit Earthquake Rupture[J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, 92: 126-137
- [3] Hearn E H, Bürgmann R, Reilinger R E. Dynamic of Izmit Earthquake Postseismic Deformation and Loading of the Düzce Earthquake Hypercenter[J].
- [4] Jónsson S, Segall P, Pederson R, et al. Post-earthquake Ground Movements Correlated to Pore-pressure Transients[J]. *Nature*, 2003, 424: 179-183
- [5] Hille E G, Johnson K M, Wang M, et al. Earthquake-cycle Deformation and Fault Slip Rates in Northern Tibet[J]. *Geology*, 2009, 37: 31-34
- [6] Pollitz F F. Postseismic Relaxation Theory on the Spherical Earth [J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1992, 82: 422-453
- [7] Pollitz F F. Gravitational Viscoelastic Postseismic Relaxation on a Layered Spherical Earth[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 17 921-17 941
- [8] Pollitz F F, Bürgmann R, Segall P. Joint Estimation of Afterslip Rate and Postseismic Relaxation Following the 1989 Loma Prieta Earthquake[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103: 26 975-26 992
- [9] Cesca S, Vermeersen L, Sabadini R. Influence of Lithospheric and Mantle Stratification on Co- and Post-seismic Deformation due to Finite Faults[J]. *Geophys. J. Int.*, 2000, 143: 575-581
- [10] Masterlark T. Finite Element Model Predictions of Static Deformation from Dislocation Sources in a Subduction Zone: Sensitivities to Homogeneous, Isotropic, Poisson-solid, and Half-space Assumptions[J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108: B11 2540
- [11] Pollitz F F, Vergnolle M, Calais E. Fault Interaction and Stress Triggering of 20th Century Earthquakes in Mongolia[J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108: 2 503
- [12] Vergnolle M, Pollitz F, Calais E. Constraints on the Viscosity of the Continental Crust and Mantle

- from GPS Measurements and Postseismic Deformation Models in West Mongolia [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(B10): 2 502
- [13] Shen Zhengkang, Wan Yongge, Gan Weijun, et al. Viscoelastic Triggering Among Large Earthquakes Along the East Kunlun Fault System [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(6): 786-795 (沈正康, 万永革, 甘卫军, 等. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 786-795)
- [14] Li Zhicai, Xu Caijun, Zhao Shaorong, et al. Effect on Crustal Layering on Post-seismic Deformation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(3): 203-208 (李志才, 许才军, 赵少荣, 等. 基于地壳分层的震后变形分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(3): 203-208)
- [15] Li Zhicai, Xu Caijun, Zhao Shaorong, et al. The Postseismic Deformation Analysis Based on Crustal Layering due to Tangshan Earthquake Fault [J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(4): 961-968 (李志才, 许才军, 赵少荣, 等. 基于地壳分层的唐山地震断层震后变形分析 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 961-968)
- [16] Li Zhicai, Xu Caijun, Zhang Peng, et al. The Co-seismic Deformation Inversion Analysis due to Different Seismic Fault Based on Crust Layering [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(3): 229-232 (李志才, 许才军, 张鹏, 等. 基于地壳分层的地震断层同震变形反演分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(3): 229-232)
- [17] Carroll D L. Chemical Laser Modeling with Genetic Algorithms [J]. *AIAA J.*, 1996, 34(2): 338-346

## Post-seismic Deformation Inversion of Seismic Fault Considering the Crustal Viscoelastic Structure

LI Zhicai<sup>1,2</sup> XU Caijun<sup>3</sup> ZHANG Peng<sup>1,2</sup> WEN Yangmao<sup>3</sup>

1 Department of Geodesy, National Geomatics Center of China, Beijing 100048, China

2 Key Laboratory of Navigation & Location Based Service National Administration of Surveying  
Mapping and Geoinformation, Beijing 100048, China

3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Considering the spherical visco-elastic structure, the post-seismic deformation inversion mode had been constructed based on the visco-elastic earth model. We developed the inversion mode and inversion software package based on the post-seismic fault dislocation model considering the crust-stratified structure. Using the genetic algorithm to invert the different fault dislocation parameters due to strike slip fault, dip slip fault respectively and comparing to the result inverted from the homogenous dislocation model, the result shows that the inversion algorithm used here could invert the dislocation parameters from the large region using the genetic algorithm and the inversion result is better to use. The inversion mode proposed here could better invert the seismic source parameters to different types fault. There is also a important find to suggest us that we could not use the minimum of  $V^T P V$  as the only rule to judge the inversion result whether good or not when the model mode is not obvious. We should find other ways to make a supplement judge.

**Key words:** visco-elastic structure; fault; post-seismic inversion; dislocation

**First author:** LI Zhicai, PhD, specializes in geodesy inversion and geodynamics. E-mail: zcli@nsdi.gov.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274030, 41204010, 41304008; the National High-Tech Research and Development Program of China (863 Program), Nos. 2013AA122501, 2013AA122502, 2014AA123104.