

遗传算法反演龙门山断裂带断层三维滑动参数研究

张秀霞¹, 张永志²

(1 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 利用位错理论模型将遗传算法运用于断层三维滑动参数反演问题的求解, 采用川西地区 2004—2007 年 GPS 观测数据对龙门山断裂带主要断层的三维滑动速率进行计算分析。结果表明: 反演结果在量值上整体较小, 与地质结果具有较好的一致性, 走滑分量 $|U_1| < 3.2 \text{ mm/a}$, 倾滑分量 $|U_2| < 1.54 \text{ mm/a}$, 张开分量 $|U_3| < 2.5 \text{ mm/a}$; 低滑动速率反映断层的闭锁及应力的积累及大地震发生的危险性; 局部分量较地质结果偏大, 反映实测 GPS 数据反演结果体现的是断层实时活动状态; 遗传算法的全局收敛、不依赖初值等优点使结果更加稳定, 而张开分量显示局部不规律性, 表现出各子断层空间活动不均匀性。

关键词: 遗传算法; 位错模型; 反演; GPS 测量; 滑动参数; 龙门山断裂带; 断层; 最优解

中图分类号: P227 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)02-0217-04

Inversion of Three-dimensional Slip Parameters of Fault in Longmenshan Fault Zone Using Genetic Algorithm

ZHANG Xiu-xia¹, ZHANG Yong-zhi²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. School of Geology Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract Based on the dislocation theory model, genetic algorithm was used to inverse the three-dimensional slip parameter of fault. The GPS data from 2004 to 2007 in the western of Sichuan were used to calculate the three-dimensional slip rates of the main faults in Longmenshan fault zone. The results showed that the inversion, which accorded with the geological result, was low on the whole, strike-slip component $|U_1| < 3.2 \text{ mm/a}$, dip-slip component $|U_2| < 1.54 \text{ mm/a}$, stretch component $|U_3| < 2.5 \text{ mm/a}$; low slip rate indicated the closure of the fault, the accumulation of stress and the probability of megaseism; part component, which was larger than the geological result, indicated that the actual GPS data inversion displayed the real-time active state of the fault; the results were stable because of the global convergence and independent initial value of genetic algorithm; stretch component indicated that the part was irregular and the space activities of different sub-faults were inhomogeneous.

Key words: genetic algorithm; dislocation model; inversion; GPS measurement; slip parameter; Longmenshan fault zone; fault; optimal solution

0 引言

大地测量反演是利用大地测量观测数据研究地球表面的演化特征和规律、推求地球内部的物性参数和特征、从而揭示地球内部动力过程的一门边缘学科^[1]。大地测量反演问题的算法, 国内外学者做了大量有意义的尝试, 尤其是在优化反演方面, 取得了许多研究成果。如 Murray 等用 Monte Carlo 法

或改进的 Monte Carlo 法反演断层参数^[2-3]; 朱桂芝等结合重力变化和水准资料, 运用遗传有限元方法计算西安地区重力变化和对应的地层密度变化^[4]; 刘宁等将蚁群算法引入大地测量反演研究, 采用重力数据对皇城—塔尔庄断裂带滑动速率进行反演研究^[5]; 李爽详细介绍了模拟退火算法、随机耗费法和区间算法等 3 种优化算法, 利用位错模型, 采用模拟的重力数据进行反演, 并且对 3 种结果进行比较分

收稿日期: 2010-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40674001)

作者简介: 张秀霞 (1985-), 女, 甘肃高台人, 工学硕士, 从事遗传算法在大地测量反演中的应用研究。E-mail: echozxx@163.com

析^[6]。遗传算法是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法,它是由 Holland 于 1975 年首次提出。该算法将生物进化原理和机制引入实际问题的解群体中,通过选择、交叉、变异最终选出全局最优解^[7]。对非线性地球物理反演问题,常规算法受到很大局限。考虑到反演中存在反演依赖初值的选取及容易陷入局部极小值等问题,笔者采用基于全局最优的算法——遗传算法进行断层参数反演,期望有效解决反演问题,提高反演可靠性。

1 遗传算法原理和方法

遗传算法(genetic algorithm)具有智能性、并行性、全局优化、稳健性等特点,特别适合于求解目标函数的极点问题。遗传算法是模拟自然选择和遗传过程中发生的繁殖、杂交和变异现象,通过选择、交叉和变异等遗传机理实现搜索的算法^[8-9]。遗传算法是由可行解组成的群体逐代进化的过程,其一般流程如图 1。

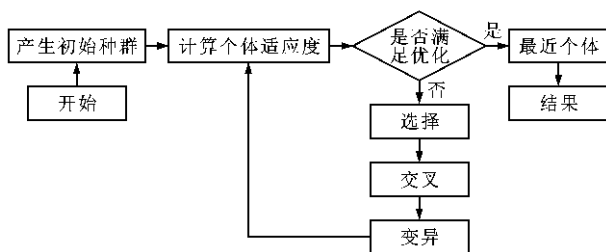


图 1 遗传算法流程

Fig. 1 Flowchart of Genetic Algorithm

选择、交叉、变异等 3 个操作算子构成了遗传算法的主要遗传操作,其实现过程可由以下步骤完成^[10]。

(1)编码。采用实数编码,不必进行二进制的编码和解码,让遗传在问题空间中直接进行,可以克服二进制编码的不足,提高优化算法的性能。

(2)随机产生第一代个体,即初始种群。

(3)适应度函数计算。若符合判断条件,输出最优个体以及其代表的最优解,结束计算,否则转向第(4)步。

(4)采用轮盘赌选择,将群体中部分适应度高的个体作为父(母)体,淘汰适应度低的个体。

(5)交叉/基因重组。交叉是把两个父个体的部分进行替换重组,从而生成新个体的操作。经过交叉重组,使得遗传算法的搜索能力有很大提高。结合实际问题,经多次试验,选用交叉概率 p_c 为 0.8。

(6)变异算子。变异算子使遗传算法具有局部搜索能力,当通过交叉算法接近最优邻域时,利用变异算子局部搜索能力加快其向最优解收敛,从而防止未成熟就过早收敛的现象。选用变异概率 p_m 为 0.15。

(7)进行重复迭代。重复第(3)至第(6)步,直至找出最优个体。

2 基于遗传算法的断层参数反演方法

位错模型模拟断层可通过图 2 来表示^[11-12]。图 2 中表示倾角 δ 的断层下盘, x 轴与断层面走向同向,以地面垂线方向表示 z 轴,垂直于 x 和 z 轴的直线表示 y 轴, U_1 、 U_2 、 U_3 分别表示断层上盘相对于下盘的走滑、倾滑和张开,断层长、宽及下底面深度分别用 L 、 W 、 d 表示。

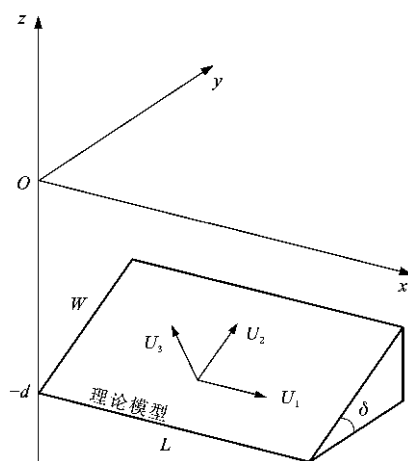


图 2 矩形位错理论模型

Fig. 2 Rectangle Dislocation Theory Model

由弹性位错理论可求得断层的三维运动在局部断层坐标系中产生的地面水平位移场,可表示为

$$\begin{cases} u_x = u_x^1 + u_x^2 + u_x^3 \\ u_y = u_y^1 + u_y^2 + u_y^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_x^i 表示矩形断层走滑、倾滑和张开运动引起的地面位移场在 x 轴方向的分量, $i=1, 2, 3$; u_y^i 表示矩形断层走滑、倾滑和张开运动引起的地面位移场在 y 轴方向的分量。式(1)表示地面局部坐标系中 x 和 y 方向下断层三维运动位移场的影响,具体解析见文献[13]。GPS 实际观测的位移场是以南北和东西分量来表示的,因此 GPS 实际观测的位移场是根据断层位置、走向进行旋转,求解观测值在局部坐标系中的位移场观测值^[13]。

由式(1)可知,在已经给定断层几何参数时,每个观测方程含有 3 个未知数,称为欠定问题。为防

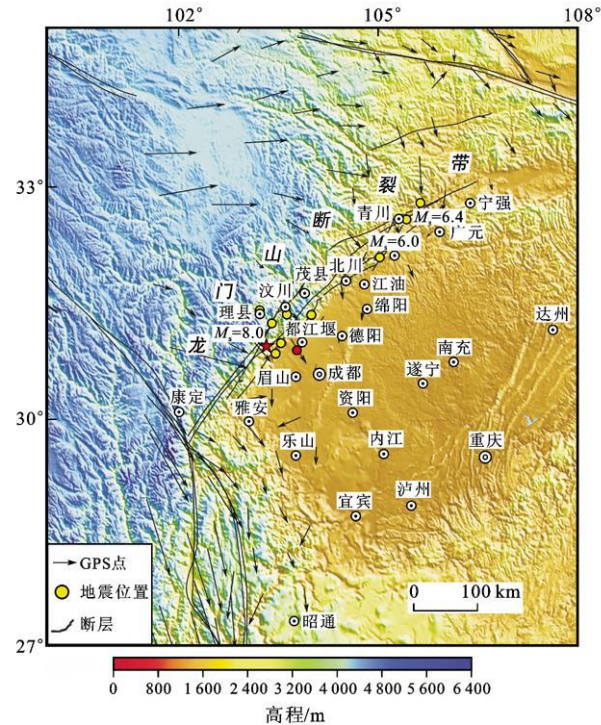
止其解的多值性, 设置一定准则, 寻求最优解。设目标函数为

$$\max \Phi(p) = 1\,000 / \sum_{j=1}^n [u_j(p) - u_j(o)]^2 \quad (2)$$

式中: $\Phi(p)$ 为适应度函数; $u_j(p)$ 为第 j 个观测点上通过位错理论模型由断层参数 p 计算得到的位移; $u_j(o)$ 为 GPS 观测获得的位移, 观测个数值为 n , p 的维数为 m 。式 (2) 表示通过位错理论模型计算得出的地面位移场经过一定的基准改正后与实际观测值之差的范数最小。综上所述, 式 (2) 可描述为在 p 的搜索空间中找一个向量, 使适应度函数 $\Phi(p)$ 的值最大。

3 算例及结果分析

龙门山断裂带位于青藏高原东缘的中部, 是一条著名的走滑—逆冲断裂带, 是活动强烈的青藏块体与活动较弱的川东块体之间的界线, 总体走向北东, 倾向北西^[14-19]。关注龙门山断裂活动对研究该断裂地震有着重要意义。基于位错理论模型, 采用在南北地震带 2004—2007 年观测的 GPS 位移量来反演龙门山断裂带主要断层参数。该地区断层、GPS 数据分布关系如图 3。



注: M_s 为地震震级。

图 3 川西地区 GPS 位移量和断层的分布关系
Fig. 3 Relationship Between the Displacement of GPS and Distribution of Faults in the Western of Sichuan

利用断层微分思想, 将龙门山断裂带主要断层进行微分化, 从而达到接近真实模型的效果。

(1) 将龙门山断裂带主要断层分别分成若干个子断层, 其位置参数和几何参数见表 1。

表 1 断裂带参数

Tab. 1 Parameter of Fault Zones								
断裂带	编号	经度/ (°)	纬度/ (°)	长度/ km	宽度/ km	深度/ km	走向/ (°)	倾向/ (°)
安县— 灌县断裂带	1	102.786 48	30.199 95	72.418 0	45	20	45	65
	2	103.264 13	30.704 66	73.031 7	45	20	45	65
	3	103.764 68	31.201 89	57.947 5	45	20	45	65
	4	104.185 45	31.622 94	84.914 8	45	20	45	65
	5	104.917 62	31.938 72	78.673 2	45	20	45	65
	6	104.448 84	31.845 02	57.259 6	45	20	45	65
	7	104.945 33	32.067 09	67.722 5	45	20	45	65
	8	105.007 76	32.158 58	12.663 3	45	20	45	65
	9	105.236 79	32.305 48	89.636 3	45	20	45	65
茂汶断裂带	1	102.142 59	29.793 88	114.114 0	40	20	40	65
	2	102.838 20	30.625 85	57.658 5	40	20	40	65
	3	103.217 21	31.029 62	46.993 0	20	20	40	65
	4	103.476 54	31.389 45	63.851 1	40	20	40	65
汶川— 映秀断裂带	1	102.158 85	29.698 75	84.175 4	45	20	40	65
	2	102.637 98	30.332 19	55.323 0	45	20	40	65
	3	103.136 31	30.814 07	61.808 9	45	20	40	65
	4	103.626 15	31.178 44	57.060 7	45	20	45	65
	5	104.004 43	31.577 36	79.587 1	45	20	50	65
	6	104.562 62	32.113 64	83.823 5	45	20	50	65
	7	105.292 21	32.547 74	67.161 2	45	20	55	65

(2) 查阅相关地质资料及研究结果^[14-19], 将要反演的每个断层单元 3 个位错量 (U_1 、 U_2 、 U_3) 初始值分别取值为 $[-5, 5]$ 、 $[-5, 3]$ 、 $[-5, 5]$ (单位为 mm/a)。

(3) 在断层其他参数不变的情况下, 分别读入断层初始参数、GPS 观测数据、观测点的坐标, 对断层的三维滑动速率进行反演计算分析 (表 2)。

表 2 为遗传算法在反演龙门山断裂带主要断层的三维滑动速率走滑、倾滑和张裂的计算结果。走滑分量负号表示右旋, 从量值上看, 比地质结果较大; 倾滑分量显示断裂的逆冲性质并与地质结果基本一致; 张开分量负号表示下降, 在量值上滑动速率呈现空间不均匀性。

4 结语

(1) 龙门山断裂带断层滑动速率量值上整体较

表 2 遗传算法的反演结果

Tab. 2 Inversion Results by Genetic Algorithm				
断裂带	编号	$U_1/(mm \cdot a^{-1})$	$U_2/(mm \cdot a^{-1})$	$U_3/(mm \cdot a^{-1})$
安县— 灌县断裂带	1	−2.537	1.404	2.135
	2	−2.869	0.643	2.378
	3	−2.536	0.648	1.786
	4	−2.339	0.726	1.731
	5	−2.276	1.533	2.261
	6	−2.525	0.701	2.185
	7	−2.648	1.302	2.120
	8	−2.982	0.828	2.152
	9	−2.473	1.174	2.436
茂汶断裂带	1	−3.102	0.830	1.850
	2	−2.554	1.006	2.303
	3	2.840	1.499	1.975
	4	−0.084	1.326	2.232
汶川— 映秀断裂带	1	2.002	1.284	2.429
	2	−2.863	0.898	1.977
	3	−2.988	0.652	1.765
	4	−3.065	0.712	−0.462
	5	−3.075	0.723	−0.752
	6	−2.501	1.071	−0.573
	7	−3.017	1.49	2.214
地质结果		< 1.46(右旋)	< 1.1	0.3~0.4

小,走滑 $|U_1|<3.2\text{ mm/a}$,倾滑 $|U_2|<1.54\text{ mm/a}$,张开分量 $|U_3|<2.5\text{ mm/a}$ 。低滑动速率反映了断裂的闭锁及伴随应力的积累,同时也反映了发生大地震的高危险性。

(2)反演的走滑分量和张开分量较地质结果偏大,引起的原因是GPS实测数据所得结果反映的是断层实时活动状态,而地质结果是长时间尺度下的综合反映。

(3)遗传算法的全局收敛、不依赖初始值等优点使结果更加稳定,而张开分量显示了局部的不规律性,表现出各子断层空间活动的不均匀性。

参考文献:

[1] 独知行. 基于力学模式的大地测量反演理论及应用[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2001.

[2] Murray M H, Marshall G A, Lisowski M, et al. The 1992 $M_s=7$ Cape Mendocino, California Earthquake: Coseismic Deformation at the South End of the Cascadia Megathrust [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(B8): 17707-17725.

[3] Freymueller J, Murray M H, Segall P, et al. Kinematics of the Pacific-North America Plate Boundary Zone, Northern California [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B4): 7419-7441.

[4] 朱桂芝, 石耀霖, 祝意青, 等. 遗传有限元法反演西安地区的地层密度变化[J]. 地震地质, 2008, 30(2): 544-552.

[5] 刘 宁, 张永志, 吴小利, 等. 通过重力场用蚁群算法反演活动断层运动[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(4): 30-33.

[6] 李 爽, 许才军, 王新洲. 位错模式反演的算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(1): 53-57.

[7] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

[8] 邹德强, 王晓尧. 遗传算法在公路堤沉降反演优化中的应用[J]. 湖南交通科技, 2003, 29(4): 16-19.

[9] 翟 越, 赵均海. 基于自适应混合遗传算法的岩石类材料动态参数反演[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(3): 286-291.

[10] 郭嗣琮, 陈 刚. 信息科学中的软计算方法[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2001.

[11] Okada Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75(4): 1135-1154.

[12] Okada Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2): 1018-1040.

[13] 张永志, 王卫东, 魏玉明, 等. 利用 GPS 资料反演祁连山断层的三维滑动速率[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(1): 31-35.

[14] 李传友, 宋方敏, 冉勇康. 龙门山断裂带北段晚第四纪活动性讨论[J]. 地震地质, 2004, 26(2): 248-258.

[15] 唐文清, 刘宇平, 陈智梁, 等. 龙门山断裂构造带 GPS 研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(3): 57-59.

[16] 李 勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 40-51.

[17] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震震源断层的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1066-1073.

[18] 彭建兵, 马润勇, 范 文, 等. 汶川大震的科学思考[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(1): 1-29.

[19] 白贵霞, 程传录, 郭春喜, 等. 汶川地震地形形变监测与分析[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(2): 205-210.