

位错模式的蚁群算法反演断层参数*

刘 宁 张永志

(长安大学地质工程与测绘学院,西安 710054)

摘 要 利用改进的蚁群算法并结合位错理论模型,以及青藏高原东北缘1999—2001年期间的GPS数据,对祁连山断层的三维滑动速率进行了反演。结果表明,蚁群算法可有效地求解断层的三维滑动速率,其反演结果与地质等方法的结果具有较好的一致性。

关键词 位错模型;蚁群算法;反演;断层参数;组合优化

中图分类号:O242

文献标识码:A

FAULT PARAMETER INVERSION WITH ANT COLONY ALGORITHM BY DISLOCATION MODEL

Liu Ning and Zhang Yongzhi

(College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054)

Abstract The ant colony algorithm is modified by replacing tour length and visibility based on the characteristics of fault parameters, and combined with the theoretical dislocation model, using the GPS observations in the north-east edge of the Qinghai-Tibet plateau during 1999—2001, the Qilian fault 3D slip rates are inverted. The results show that the ant colony algorithm is effective for solving the problem of inversion of 3D fault slip rate parameters, the results of the numerical inversion has the good consistency with those of geological methods.

Key words: dislocation model; ant colony algorithm(ACA); inversion; fault parameter; combinational optimization

1 引言

利用地面大地测量数据反演大断裂的滑动速率等动态参数,从而通过地面观测到的地表变形来认识断层滑动的动力过程,是大地测量研究的主要问题之一。采用大地测量数据反演断层滑动速率的反演方法很多,主要分为线性反演和非线性反演方法两大类。线性反演方法有最小二乘法等,非线性反演方法有梯度法、蒙特卡罗法、模拟退火法、遗传算法等。如王文萍等^[1]利用水准测量资料结合遗传

算法和最小二乘联合反演了共和地震的同震位错参数;李爽^[2]详细阐述了模拟退火法、随机耗费法和区间算法3种优化方法的原理和方法,并基于位错模式,采用模拟的重力测量观测数据,计算比较了3种算法的优缺点;王卫民等^[3]采用模拟退火法结合GPS和远场地震波资料对1999年台湾集集地震震源破裂过程进行了反演计算研究。为了丰富大地测量数据反演问题的求解方法,本文将一种新的启发式算法——蚁群算法引入断层参数反演计算。蚁群算法是意大利学者Dorigo^[4]1991年提出的一种新

* 收稿日期:2008-08-05

基金项目:国家自然科学基金(40674001)

作者简介:刘宁,男,1984年生,硕士研究生,主要研究方向是蚁群算法在大地测量反演中的应用。E-mail:liuning-chd@163.com

型优化算法,其主要特点是基于正反馈原理,采用分布式计算,并加入人工启发信息。正反馈原理使算法能快速找到最优解,分布式计算和人工启发信息可使算法在搜索的初期就得到较稳定的解。

2 蚁群算法的原理和方法

蚁群算法是受自然界蚁群集体行为启发而提出的一种模拟进化算法,属于随机类搜索算法。

Dorigo 等^[5]利用蚁群搜索食物的过程与旅行商问题(TSP)之间的相似性,提出用人工蚂蚁模拟自然蚂蚁,通过模拟蚂蚁搜索食物的过程求解复杂的组合优化问题。TSP 问题可描述为:给定 n 个城市,找一条通过各城市一次且仅一次的最短闭合路线。为便于讨论,引入以下记号: N 为 n 维向量,元素 n 为第 n 个城市的编号; m 为蚂蚁总数; d_{ij} 为城市 i, j 之间的距离; (i, j) 为从城市 i 到城市 j 的连线,称为边; $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻边 (i, j) 上的信息素浓度。蚁群算法定义了时间步和算法循环: m 只蚂蚁同时完成 1 步(从一个城市到达另外一个城市)时,时间步自动加 1; m 只蚂蚁完成对所有 n 个城市的访问后称蚁群算法完成 1 个循环。初始时刻,将 m 只蚂蚁随机放入 n 个城市中。设 $\tau_{ij}(0) = C$ (C 为常数)。蚂蚁 k ($k = 1, 2, \dots, m$) 在运动过程中,根据 $\tau_{ij}(t)$ 与 $\eta_{ij}(t)$ 决定其下一步运动方向。 $\eta_{ij}(t)$ 为城市 i, j 之间的能见度(visibility),一般取 $\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$ 。在 t 时刻,蚂蚁 k 由城市 i 转移到城市 j 的概率 $P_{ij}^k(t)$ 为

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{k \in allowed_k} \tau_{ik}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)} & (j \in allowed_k) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $allowed_k$ 为当前蚂蚁 k 可以选择向其移动的城市号, $allowed_k = \{N - tabu_k\}$ 其中 $tabu_k$ 为 n 维动态向量,记录到当前为止蚂蚁 k 已经访问过的城市的编号, α, β 均为控制信息素浓度与转移期望相对重要性的参量。在蚁群完成 1 个循环后,按下式对每条边上的信息素浓度按下式进行更新:

$$\tau_{ij}(t + \Delta t) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t, t + \Delta t) \quad (2)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t, t + \Delta t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (3)$$

式中: ρ 为信息素残留系数($0 \leq \rho \leq 1$); $\Delta \tau_{ij}(t)$ 和 $\Delta \tau_{ij}^k$ 分别为蚁群与蚂蚁 k 在时间段 t 到 $(t + \Delta t)$ 内,在边 (i, j) 上留下的信息素浓度, $\Delta \tau_{ij}^k$ 表示为

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & (\text{蚂蚁 } k \text{ 在 } t \text{ 到 } (t + \Delta t) \text{ 选择边 } (i, j)) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: Q 为常量, L_k 为蚂蚁 k 在本次循环中所选择路

径的总长度。在蚁群算法中,常数 C 及参数 Q, α, β, ρ 的最佳组合由实验确定^[5]。

3 基于蚁群算法的断层参数反演方法

3.1 位错理论模型

断层参数与地面 GPS 观测位移场之间的关系可通过位错理论模型来表示^[6-14](图 1):断层下盘倾角为 φ ;以地面断层走向为 X 轴,地面的垂线方向为 Z 轴,在地面内垂直于 X 轴和 Z 轴的直线为 Y 轴; U_1, U_2, U_3 分别表示矩形断层面上盘相对于下盘分别在走向、倾向和法线方向的滑动量; L, W, d 分别表示断层的长、宽和下底面深度。则矩形断层走滑、倾滑和张开运动引起的地面位移场在 X 轴方向的分量可通过断层面上 3 个相互垂直的位移分量分别表示为:

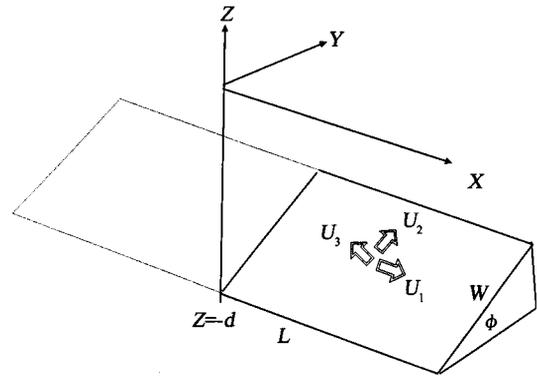


图 1 矩形位错理论模型
Fig. 1 Rectangle dislocation model

$$\left. \begin{aligned} u_x^1 &= -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\xi q}{R(R + \eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \varphi \right] || \\ u_x^2 &= -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} - I_3 \sin \varphi \cos \varphi \right] || \\ u_x^3 &= \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{q^2}{R(R + \eta)} - I_3 \sin^2 \varphi \right] || \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

矩形断层走滑、倾滑和张开运动在 Y 轴方向的位移场分量可通过断层面上 3 个垂直的位移场分量表示为:

$$\left. \begin{aligned} u_y^1 &= -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{\gamma} q}{R(R + \eta)} + \frac{q \cos \varphi}{R + \eta} + I_2 \sin \varphi \right] || \\ u_y^2 &= -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{\gamma} q}{R(R + \xi)} + \cos \varphi \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_1 \sin \varphi \cos \varphi \right] || \\ u_y^3 &= \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{-\tilde{d} q}{R(R + \xi)} - \sin \varphi \left(\frac{\xi q}{R(R + \eta)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right) - I_1 \sin^2 \varphi \right] || \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中方程组的第一式、第二式和第三式分别为断层的走滑运动、倾滑运动和张开运动对地

面观测点在 X 轴方向和 Y 轴方向位移场分量的贡献,在函数后面加符号 \parallel 表示函数在整个断层面上的积分结果通过矩形断层角点的坐标表示关系; x, y 为地面观测点在局部坐标系中的坐标; ξ, η 为断层面上质点在局部坐标系中的坐标。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:

$$\begin{cases} u_x = u_x^1 + u_x^2 + u_x^3 \\ u_y = u_y^1 + u_y^2 + u_y^3 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)表示的是断层的三维运动在地面局部坐标系中在 x 和 y 方向的位移场的影响, GPS 实际观测的位移场是以南北和东西分量来表示的,因此要将 GPS 实际观测的位移场根据研究断层的位置和走向进行旋转,求出观测值在局部坐标系中的位移场观测值。

3.2 搜索空间离散

从式(5)、(6)和(7)可以看出,在给定断层几何参数的情况下,每一个独立观测方程含 3 个未知参数,是数学上所谓的欠定问题,其解具有多值性,只能在一定的准则下,寻求最优解,为此目的本文设目标函数为

$$\min \Phi(P) = \sum_{j=1}^n [u_j(P) - u_j(O)]^2 \quad (8)$$

即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。式中, n 为观测值个数, $u_j(P)$ 和 $u_j(O)$ 分别为第 j 个观测点上通过位错理论模型由断层参数 P 计算的位移和通过 GPS 观测获得的位移, $\Phi(P)$ 为目标函数或适应度。设 P 的维数为 m , S 为 P 的搜索空间。则式(8)可描述为,在 m 维空间 S 中找一个向量,使目标函数 $\Phi(P)$ 的值最小^[15,16]。式(8)是连续变量优化问题,而蚁群算法是求解组合优化问题的有力工具,因此,需先将式(8)转化为组合优化问题。

不失一般性,把空间描述成超空间几何体: $S = \{P_i | P_{i-} < P_i < P_{i+}; i = 1, 2, \dots, b\}$, 式中, P_i 为 P 的第 i 个参数; P_{i-} 、 P_{i+} 分别为 P_i 的下限与上限。将 P_i 的取值范围 $[P_{i-}, P_{i+}]$ 分为 k_i 段,即待反演参数的搜索空间 S 被离散成了含有有限个向量的离散空间。参数的组合共有 $A = k_1, k_2, \dots, k_b$ 种情况,相当于在 TSP 问题中,共有 A 条路径供选择。若把每个参数的取值范围分成 n 份,参数的组合情况有 n^m 种。在式(1)的蚁群算法中,不同参数(对应 TSP 中的城市)之间并没有真实意义上的距离 d_{ij} 。因此,必须对蚁群算法的基本公式(式(1)~(4))进行修改。首先考察式(2)~(4),这些等式表明,在进行信息素更新时,较短路径上得到的信息素较多。由

于在断层参数反演问题中,目标是找到一组参数 P_0 ,使得目标函数 $\Phi(P_0)$ 取得最小值。因此,在式(4)中,一条路径(即 1 组参数)的长短可用基于该路径的目标函数值大小来确定。目标函数值越大,则路径的长度越大;反之则越小。蚂蚁 k 在某次循环中所选择路径的长度 L_k 为 $L_k = \Phi_{wk}(P)$, 式中: $\Phi_{wk}(P)$ 表示该次循环中,基于蚂蚁 k 选择的路径 w 的目标函数值。再来考察式(1),该等式表明,蚂蚁 k 从城市 i 转移到城市 j 的概率正比于边 (i, j) 上的信息素浓度。

4 GPS 观测资料分析

青藏高原东北缘 GPS 网共 169 个测点,中国地震局第二监测中心于 1999 年 3—7 月和 2001 年 3—7 月分别采用 Z-XII 型 GPS 接收机对 169 个站点采用蛙跳式观测方式进行了每站 96 个小时的观测。数据处理采用 GAMIT/GLOBK 数据分析软件。精密星历和地球动力学参数从国际 IGS 网站下载,计算中采用的坐标参考框架为 ITRF97 地面参考框架。IGS 站和局部坐标的约束分别为 0.05 m 和 1.0 m。处理的速率归化到局部参考坐标下的结果如图 2 所示。

从图 2 的 GPS 观测结果可以看出,祁连山断裂向南俯冲、海原断裂左旋走滑特征比较明显,但由于观测点离阿尔金断裂、昆仑断裂较远,他们的活动与 GPS 观测结果关系不明显。

5 算例及结果分析

为了验证蚁群算法的有效性和稳定性,以及深入理解实际断层活动与三维形变场的关系,利用青藏高原东北缘 1999—2001 年期间观测的 GPS 数据对该地区祁连山断层的三维滑动速率进行了反演计算分析。用矩形断层位错模型来表示震源在一定条件下是合理的,然而,实际断层往往并不是单一的矩形断层,它具有分段性,断层产状在不同深度也存在差异^[17]。为了尽可能地减少模型误差,本文利用断层微分思想^[18]:将复杂断层微分化,即将复杂断层看成是多个小的矩形断层的组合,细分以接近真实的模型。

计算过程简述如下:1)将祁连山断层分为距离相等的 9 个子断层单元,每个子断层单元的长度为 46.5 km,断层其他主要参数分别取为:宽度 30 km,深度 22 km,走向 -45° ,倾角 70° ; 2)将断层三维滑动速率的每个参数空间的取值在 $[-10 \text{ mm}, 10 \text{ mm}]$ 区间内离散成 10 000 份,然后采用随机函数产生一

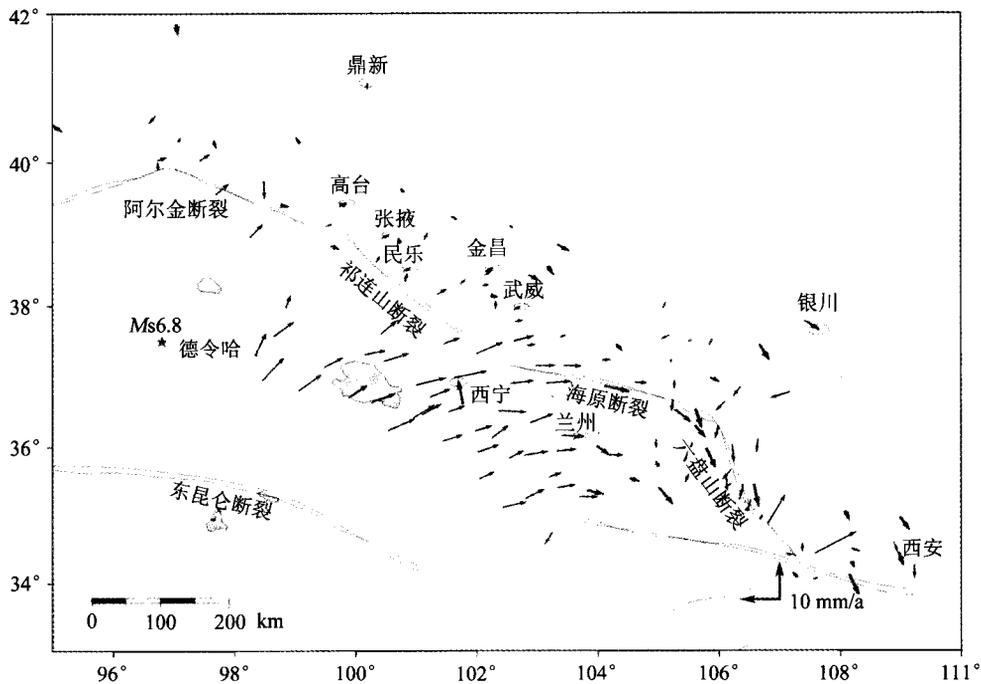


图 2 青藏高原东北缘位移场 GPS 观测结果(1999—2001 年)

Fig. 2 Displacement field observed by GPS in northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau(1999—2001)

组参数值;3)通过文件读入断层初始参数和 GPS 观测数据及观测点的坐标,然后由位错理论模型根据断层初始参数计算观测点的位移场,再由计算的位移场与观测的位移场求出目标函数 $\Phi_{wk}(P)$,并设蚂蚁 k 在某次循环中所选择路径的长度为 $L_k = \Phi_{wk}(P)$,再由公式(1)~(4)建立蚁群算法的递推关系,最后由式(1)的大小来确定断层参数的更新。在实际计算中,由于参数之间不存在距离的概念,能见度 $\eta_{ij}(t)$ 取 1 进行计算。祁连山断裂三维运动速率反演结果如表 1 所示。

表 1 祁连山断裂三维滑动反演结果

Tab.1 Inversion results of three dimension displacement velocity of Qilianshan fault by GPS data

东经 (°)	北纬 (°)	走滑速率 (mm)	倾滑速率 (mm)	张裂速率 (mm)
99.656	39.137	-0.995 8	9.629 6	-4.2313
100.026	38.809	-1.4112	7.128 2	-1.199 6
100.380	38.502	0.521 7	-6.999 0	-1.339 1
100.690	38.268	0.156 6	-9.613 8	-1.116 2
101.015	38.052	-4.380 8	-9.757 8	-4.420 0
101.324	37.860	0.214 1	6.748 4	-9.798 8
101.590	37.696	-4.784 9	9.882 9	-9.866 7
101.816	37.568	3.161 8	-9.351 4	-9.736 4
102.057	37.439	-0.233 4	-9.273 7	-9.647 1

注:经纬度分别为每个子断层单元的中心坐标

从表 1 的断层滑动速率反演结果可以看出,祁连山断层活动速率在倾滑、张裂方向大于走滑方向,而且具有空间分布不均匀性的特征。数值反演结果与地质的趋势基本一致,只是在数值上存在的一定的差异^[18]。

6 结论

1) 蚁群算法经过一定的改进后,结合位错模型,可以用于地面大地测量数据对断层滑动速率的反演,而且能有效地求解断层参数反演问题。

2) 祁连山断层活动速率在倾滑、张裂方向大于走滑方向,呈现张裂性质,具有挤压趋势,且在空间总体分布上不均匀。

参 考 文 献

- 1 王文萍,王庆良. 利用遗传算法和最小二乘联合反演共和地震位错参数[J]. 地震学报,1999,21(3):285-290.
- 2 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.
- 3 王卫民,等. 1999 年台湾集集地震震源破裂过程[J]. 地球物理学报,2005,48(1):132-147.
- 4 Dorigo M, Maniezzo V and Colorni A. The ant system: optimization by ant colony of cooperating agents [J]. IEEE Trans. Syst. Man. Cybern-PartB,1996,26(1):29-41.
- 5 Dorigo M and Gambardella L M. Ant colonies for the traveling salesman problem[J]. Biosystems, 1997,43:73-78.

- 6 Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. BSSA, 1985, 82:1 018 -1 040.
- 7 Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. BSSA, 1992, 82:1 018 -1 040.
- 8 张永志,等. 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.
- 9 申重阳,等. 云南地区主要断层运动模型的 GPS 数据反演[J]. 大地测量与地球动力学, 2002,22(3):46 -51.
- 10 陈运泰,等. 用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式[J]. 地球物理学报, 1979,22(3):201 -216.
- 11 孙建宝,等. 基于线弹性位错模型及干涉雷达同震形变场反演 1997 年玛尼 $M_w7.5$ 级地震参数 -I 均匀滑动反演[J]. 地球物理学报,2007,50(4):1 097 -1 110.
- 12 孙建宝,等. 基于线弹性位错模型反演 1997 年西藏玛尼 $M_w7.5$ 级地震的干涉雷达同震形变场-II 滑动分布反演[J]. 地球物理学报,2007,50(5):1 390 -1 397.
- 13 孙文科. 地震火山活动产生重力变化的理论与观测研究的进展及现状[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(4):44 -53.
- 14 付广裕,孙文科. 2004 年苏门答腊地震引起的远场形变[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(2):1 -7.
- 15 陈双全,等. 地震波阻抗反演的蚁群算法实现[J]. 石油物探. 2005,44(6):551 -553.
- 16 李守巨,刘迎曦,孙慧玲. 基于蚁群算法的含水层参数识别方法[J]. 岩土力学. 2005,26(7):1 049 -1 053.
- 17 谢阳,常祖峰. 铲形正断层特征数值模拟及其与地震机制的研究[J]. 地震研究,2001,24(4):351 -357.
- 18 谈洪波,申重阳,李辉. 断层位错引起的地表重力变化特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(4):54 -62.