

利用断层滑动资料反演潮阳、 汕头地区构造应力场

王启柱* 强祖基

(中国北京 100029 国家地震局地质研究所)

摘要

应用应力张量方法分析了潮汕盆地的新构造时期构造应力场, 这里至少存在着4种应力状态, 这与它们在盆地中所处的位置紧密相关。从盆地沉降中心向边缘, 水平构造引张应力转为挤压应力。

关键词 断层擦痕; 构造应力场; 反演

一、Etchecopar 断层擦痕算法的计算实现过程

国内外不少地学工作者介绍了法国 Etchecopar 断层擦痕算法的基本原理, 在此就不赘述了。为了进一步普及推广该方法, 将计算实现过程介绍出来, 以供大家参考。

根据 Etchecopar 断层擦痕算法的原理(Etchecopar *et al.*, 1981), 可将此种方法表述为一个非线性优化问题。

对于 N 条已知法向量为 \mathbf{n}_i , 具有擦痕向量 \mathbf{S}_i 的断层, 求四个参数 θ, φ, ψ 和 R , 使得

$$Q = \sum_{i=1}^n \langle \mathbf{S}_i, \mathbf{t}_i \rangle^2 = \sum_{i=1}^n \langle \mathbf{S}_i, \mathbf{L}_i(\theta, \varphi, \psi, R) \rangle^2$$

达到最小。

求解这个问题包括三个步骤:

1. 初值估计

在非线性优化问题中, 选择一组参数的初值是很重要的。在本计算方法中, 采用随机搜索法(Brooks, 1958)在参数 θ, φ, ψ 和 R 的整个变域 $[0, \pi] \times [0, \pi] \times [0, \pi] \times [0, 1]$ 内进行试验。这种方法利用随机数, 在整个变域内随机地选取具有均匀概率密度的参数进行试验。

给定试验次数后, 每次产生四个 $[0, 1]$ 区间的随机数, 转化成变域为 $[0, \pi] \times [0, \pi] \times [0, \pi] \times [0, 1]$ 的 IR^4 空间点后, 作为 θ, φ, ψ 和 R 的值, 计算

1989年9月4日收到本文初稿, 1991年3月24日决定采用。

* 现在加拿大约克大学地球科学系攻读博士学位。

$$Q = \sum_{i=1}^n \langle \mathbf{S}_i, \mathbf{t}_i \rangle^2$$

从所有的试验中,选取使 Q 最小的 $\theta_0, \varphi_0, \psi_0$ 和 R_0 作为 θ, φ, ψ 和 R 的初值.

2. 优化过程

以 $\theta_0, \varphi_0, \psi_0$ 作为初值,采用 Rosenbrock 模式搜索法(石田晴久, 1986; Rosenbrock, 1960) 进行非线性优化.

Rosenbrock 模式搜索法是求形如 $F=F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的无约束多元目标函数的极小值,并且假定目标函数是单峰的,这个方法的逻辑框图如图 1 所示.

已经得到证明,当其它方法失效时,

该方法是有效的(肖普, 1985).

3. 解的逼近

由前面的步骤,已能获得靠近最优的解($\varphi_0, \psi_0, \theta_0, R_0$).现在,围绕这个点线性化,以求得更逼近的解.

$$Q = \sum_{i=1}^n \langle \mathbf{S}_i, \mathbf{L}_i(\theta, \varphi, \psi, R) \rangle^2$$

可以由二次形式 Q 的值来接近,即

$$Q \approx Q' = \sum_{i=1}^n (\langle \mathbf{L}_i, \mathbf{S}_i \rangle + \sum_{j=1}^4 a_{ij} \Delta x_j)^2$$

$(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4)$ 是增向量 $(\theta - \theta_0, \varphi - \varphi_0, \psi - \psi_0, R - R_0)$, a_{ij} 是 $\langle \mathbf{L}_i, \mathbf{S}_i \rangle$ 关于 θ, φ, ψ 和 R 的偏导数.从经典的最小二乘分析(Linnik, 1963),我们知道,最小的 Q' , 可以由下式得到

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{A}' \mathbf{A})^{-1} \mathbf{y}$$

\mathbf{y} 是以 $\langle \mathbf{L}_{i0}, \mathbf{S}_i \rangle$ 作为 n 个分量的向量, \mathbf{A} 是矩阵 (a_{ij}) .这个过程可以反复进行一直达到稳定的解为止.值得注意的是,当 $(\mathbf{A}' \mathbf{A})$ 是病态时,经典的规则化技术是:

用 $\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{A}' \mathbf{A} + \alpha^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}' \mathbf{y}$ 来代替上式,其中 \mathbf{I} 是单位矩阵, α 是一个任意的实数(Marquardt, 1970).通过以上步骤,

我们找到了使 $Q = \sum_{i=1}^n \langle \mathbf{S}_i, \mathbf{L}_i(\theta, \varphi, \psi, R) \rangle^2$

达到极小的参数($\theta_0, \varphi_0, \psi_0, R_0$),从而确定了该期应力场的平均应力状态,即 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 轴的方向和差应力比值 R .

在一般情况下,脆性破裂发育的地区总是受过对应于几个应力张量的 n 个连续构造事件的影响,这就要求对擦痕数据进行分类,同期的放在一起,然后再求出各自的应力状

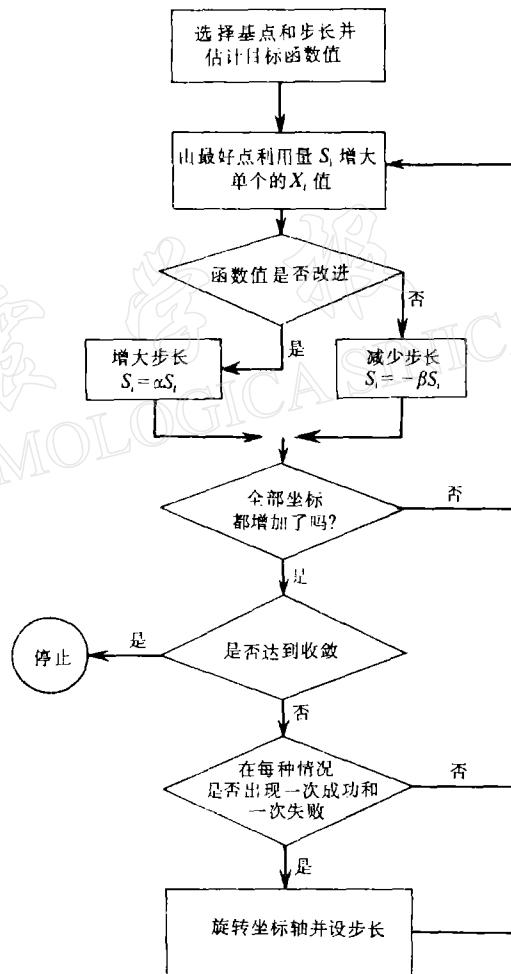


图 1 Rosenbrock 模式搜索法逻辑框图

态。

解决构造分期的问题是基于下面的思想: 如果几个数据($n \leq N$)是属于同期应力场的, 则函数 Q 值就比 n 条数据不属于同期应力场的值要小, 在算法上, 只是对单期应力场的算法进行修正, 计算上可分为以下步骤:

1. 假定总共 N 条擦痕中有 n 条是同期的, 用随机选取的许多组参数(θ, φ, ψ, R)试验, 对每一组参数, 都算出 N 条断层中, 每条断层的剪应力方向 t_i , 从中选出 $\langle t_i, S_i \rangle$ 最小的 n 条断层, 然后计算

$$S = \sum_{i=1}^n \langle t_i, S_i \rangle^2$$

这样, 在每次试验中都选出一组 n 条断层, 给出 S , 在所有 S 中使 S 最小的那组参数将作为初值 T_0 .

2. 将前面选定的($\theta_0, \varphi_0, \psi_0, R_0$)作为初值, 相应的 n 条断层作为初步的选择, 然后应用前节所叙述过的优化方法, 进行优化计算. 与单期应力场不同的是, 在优化过程中, 当参数值发生变化时, 这时要重新选择 n 条 $\langle S_i, t_i \rangle$ 最小的断层, 前面选出的 n 条断层中, 与新的参数不协调的断层, 将被这次选出的断层所取代, 重复以上优化过程, 直至收敛. 如果在初选中, 属于同期应力的断层占大多数, 则以上的选择过程是很快的.

3. 这样, 就求出了 n 条断层所属于的同期应力场的应力状态, 利用剩下的断层还可以再进行上述过程, 求出不同期次的应力场.

由于事先不知道究竟有多少条断层是属于同期的, 因此 n 的选择具有任意性, 所选出的 n 条断层是不是同一期应力场的产物, 这还要进行判别, 判别的标准有下面几条:

(1) 对于不同的随机试验, 所得出的解是稳定的, 即对取不同的随机数初值, 所求得 T_0 不会变化太大, 选取的 n 条断层, 也不会有太大出入.

(2) 在以 $\langle t_i, S_i \rangle$ 为横轴, 断层条数为纵轴的直方图中, 靠近横轴原点处的应力是纵轴的最大值, 并显阶梯形.

(3) 尽可能多地选择出使 $\langle S_i, t_i \rangle$ 较小的断层(一般 $\langle S_i, t_i \rangle < 20^\circ$ 比较合适).

以上条件不能同时满足时, 则 n 的选择是不合适的, 可以重新选择 n , 重复计算过程. 因此, 使用 Etchecopar 断层擦痕算法, 就是一种筛选过程.

下面我们给出一个试算的例子, 它是由已知应力场, 求出该应力场作用下, 12 个断面上的剪应力方向作为擦痕, 然后再应用程序反求应力场, 以求对程序进行考核.

已知应力场 σ_1 直立, σ_2 水平北东向, σ_3 水平北西向, $R = 1/3$, 作用在 n 个断面上的最大剪应力方向, 我们作为实测擦痕数据, 见表 1 所示.

将这组数据与另一期应力场的 8 条数据混合在一起共 20 条数据进行计算.

取试验次数为 900, 随机数初值为 307, 将同期擦痕的条数从大到小取值, 进行计算(在程序中给定的百分数 n/N). 观察直方图中是否有 n 条断层擦痕呈阶梯形分布, 当 $n=13$ 时($n/N=65\%$), 达到了要求结果是(图 2):

σ_1 轴: 倾向 68.7° , 倾角 88.4° ; σ_2 轴: 倾向 225.8° , 倾角 1.4° ; σ_3 轴: 倾向 315.8° , 倾角 0.6° .

初值估计时的试验次数取 100, 随机数初值取 123, 计算结果为:

σ_1 轴: 倾向 55.0° , 倾角 90.0° ; σ_2 轴: 倾向 225.4° , 倾角 0.0° ;

σ_3 轴: 倾向 315.4° , 倾角 0.0° ; $R = 0.31851$.

表 1 断层擦痕数据

编号	断 层 面			擦 痕		断 层 性 质*
	走向(°)	倾角(°)	倾向	侧伏角(°)	侧伏向	
1	45	54	SE	90	W	N
2	45	54	N	90	E	N
3	135	54	N	90	E	N
4	135	54	S	90	W	N
5	90	60	S	77	E	N
6	90	30	S	68	E	N
7	90	60	N	77	W	N
8	90	30	N	68	W	N
9	0	30	E	77	S	N
10	0	60	E	68	S	N
11	0	30	W	77	N	N
12	0	60	W	68	N	N

* N 表示正断层.

所选出的 13 条断层中, 有 12 条是我们给出的数据.

二、潮汕盆地构造应力场

目前, 人们对于岩石圈应力状态的了解水平还很低, 实测数据则更为缺少. 因此, 利用多种手段来获取构造应力场的信息, 是一项十分重要和艰巨的工作, 潮汕盆地和周围地区是花岗岩区, 脆性破裂发育, 是进行擦

痕分析重塑构造应力场工作的良好场所. 为此, 我们在潮汕地区的野外考察工作中, 测量了大量的断层擦痕, 利用 Etchecopar 断层擦痕分析程序进行了分析应力场方面的尝试. 但是, 由于野外工作的复杂性和工作条件的限制, 这些工作还是遇到了不少困难: 一是在野外测到发育清晰, 能够准确判别断层运动性质的断层擦痕并不多; 再者, 由于多期次的构造运动, 同期的断层擦痕是很难鉴定的, 还有在大断裂带上的测量数据, 我们也作了剔除, 只取发育在小断层和断裂带附近微破裂的擦痕数据. 因些, 断层擦痕的数据分析, 还不足以勾划出全区构造的应力场, 我们只能就几个点的应力状态来推测全区应力场的概貌.

根据野外观察, 我们至少可以将测得的擦痕分为两期. 最新一期擦痕的特征是: 断层面新鲜, 擦痕清晰具有指示滑动方向的明显特征: 如阶步、钉头痕等, 有的还发育有断层泥. 我们将最新一期的擦痕认作是新构造运动期以来形成的.

图 3 给出了断层擦痕测量的测点位置. 表 2 给出了最新一期断层擦痕的分析结果. 由结果分析, 潮汕地区新构造时期大体存在四种应力状态类型:

(1) σ_1 轴近直立, σ_2 , σ_3 轴近水平, R 值小于 0.5, 属于这种应力状态的为第 7 测点和第 10 测点, 它们分别位于潮汕盆地揭阳附近的沉降中心和诏安盆地的沉降中心位置.

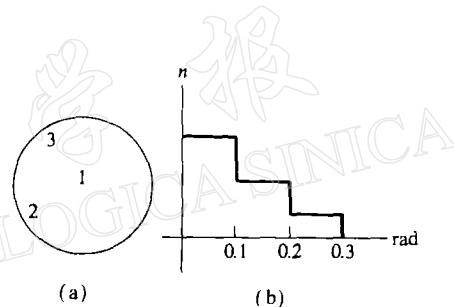


图 2 (a)三个应主力轴的吴尔夫网投影
(b)擦痕计算直方图

表 2 断层擦痕的分析结果

组号	应力主轴	倾向(°)	倾角(°)	R 值	投影图	测点
1	σ_1	193.7	36.4	0.91597		1
	σ_2	302.1	23.7			4
	σ_3	57.1	44.6			5
2	σ_1	334.9	8.4	0.87149		2
	σ_2	72.2	40.7			3
	σ_3	235.4	48.1			
3	σ_1	21.6	37.2	0.56053		6
	σ_2	208.1	52.6			
	σ_3	114.0	3.1			
4	σ_1	198.5	75.0	0.40595		7
	σ_2	319.0	7.8			
	σ_3	50.8	12.8			
5	σ_1	291.4	14.6	0.85505		8
	σ_2	44.5	56.3			
	σ_3	192.9	29.6			
6	σ_1	192.9	69.3	0.26320		10
	σ_2	15.8	20.7			
	σ_3	57.1	44.6			
7	σ_1	132.3	37.4	0.20919		13
	σ_2	20.1	26.2			
	σ_3	264.5	41.3			14
8	σ_1	171.6	6.7	0.94976		15
	σ_2	262.5	7.4			
	σ_3	39.9	80.1			

注：投影图中 1, 2, 3 分别代表最大、中等和最小主压应力在吴尔夫网投影图上的位置。

由于擦痕的测量工作都是在地表进行的，因此，我们认为计算的应力状态也是地表面的应力状态。这样竖直向的主应力 $\sigma_1 \approx 0$ ，则有 $\sigma_2 < 0$, $\sigma_3 < 0$ ，均为拉应力。所以，对于盆地沉降中心来说，是处于一种强烈的拉张环境中。

(2) σ_3 轴为最陡立轴，R 值较大，接近于 1，属于这种应力状态的有第 1, 2, 3, 4, 5, 15 测点。它们都位于盆地的沉降区范围之内，但在盆地的沉降中心之外。

由于 R 值较大，接近于 1，因此， $\sigma_1 \approx \sigma_2$ 。虽然， σ_1 , σ_2 的量值可以同时很大，但考虑到构造的环境，这种应力状态对于潮汕盆地来说应是一种较弱的甚至接近于无应力状态的挤压环境。因为潮汕地区，北西向的断裂现代为张性断裂，因此，北东 - 南西向的压应力不会很大。

(3) σ_2 为最陡立轴，R 值变化较大，属于这种应力状态的为第 6 测点和第 8 测点，它们都位于盆地边缘。

这种应力状态随 R 值变化较大。当 R 接近于 0，则 $\sigma_2 \approx \sigma_3$ ，这时就为 σ_1 方向的单向压缩状态。当 R 接近于 1，则 $\sigma_1 \approx \sigma_2$ ，这时就为 σ_3 方向的单向拉伸状态。

(4) σ_3 轴为最陡立轴，R 值较小，属于这种应力状态的为第 13, 14 测点，它们远离盆地沉降区。

这种应力状态, 表示一种压性的环境, 但具有一个主压方向, 即 σ_1 方向。随着 R 值的减小, σ_1 和 σ_2 的差值增大, 当 $R=0$ 时, 就成为单向压的状态。

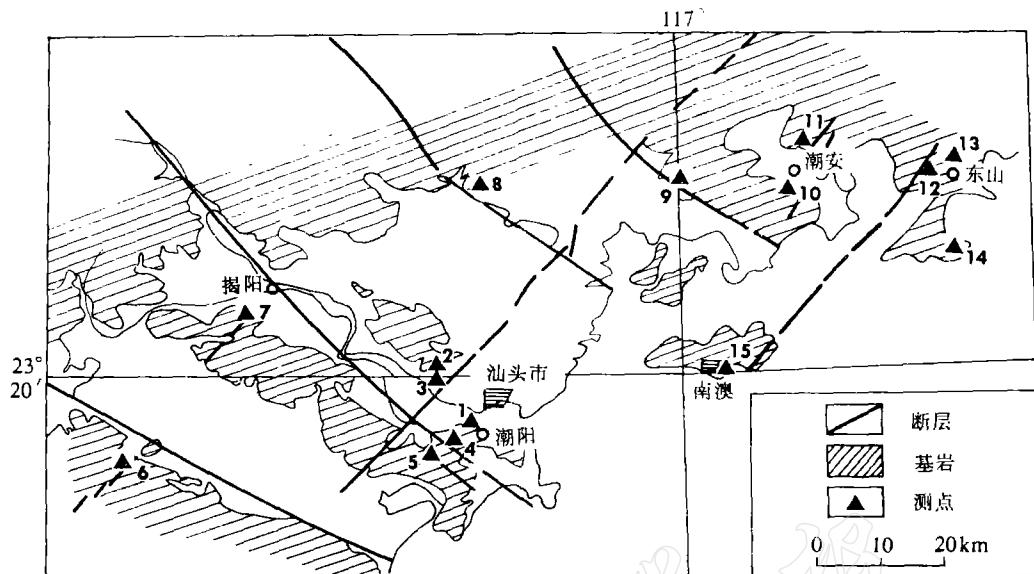


图3 断层擦痕野外测量点位置图

综上所述, 潮汕地区各测点的应力状态是与它的构造部位紧密相关的, 由盆地的沉降中心到远离沉降区的地方, 水平构造应力由引张状态逐渐转为压性状态。这种应力状态的转变实际上代表了构造力成份的转变, 表明了盆地区内垂向构造力的存在, 这种垂向构造力就是盆地底部上地幔物质上隆引起的上拱力, 从而造成了盆地的引张环境。也就是潮汕盆地新构造时期受菲律宾板块向亚洲大陆俯冲区域性 NWW 向挤压为主, 叠加着盆地内上地幔上拱垂向作用力。

本文得到王仁教授的指导和帮助, 谢富仁同志参加了野外工作, 在此一并深表谢意。

参 考 文 献

- 石田晴久, 1986. 微型计算机程序设计, 374. 国防工业出版社, 北京。
- 肖普,T. E. 著, 杨泮池译, 1985. 计算机方法实用指南, 220. 煤炭工业出版社, 北京。
- Brooks S., 1958. A discussion of Random methods for seeking Maxima. *Operation Research*, 6, 244—251.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. and Daignieres, M., 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault stration analysis. *Jour. Struc. Geol.*, 3, 51—56.
- Linnik, Y. V., 1963. *Metode des Moindres Carrés Elements de la Thaorie du Traitement Statistique des Observations*. Dund, Paris.
- Marquardt, D. W., 1970. Generalized inverse, ridge regression biased linear estimation and non-linear estimation. *Techonometrics*, 12, 591—612.
- Rosenbrock, H. H., 1960. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *Comput J.*, 3, 175—184.