

一种改进的蚁群算法在断层自动追踪中的应用

赵俊省, 孙赞东

中国石油大学(北京)地质地球物理综合研究中心, 北京 102249

摘要 断层属性体是自动解释断层的基础,但这些属性也包括来自地层成层性和各种噪声产生的假象,这些假象使得断层位置和断层系统交切关系变得模糊不清,很难准确识别和拾取断层。与噪声不同的是,断层线的延伸均有一定的方向。基于此特点,本文通过计算数据块的梯度方向约束蚂蚁追踪的范围,根据计算数据块的方向一致性区分断层和噪音,用蚁群算法在相干数据体或其他断层增强数据体中自动识别和追踪断层。此外,使用 Zhang-Suen 算法对蚁群追踪到的断层数据体中断层线进行细化处理,得到可以应用于地震解释的断层线。通过数值模型,验证了该方法在自动追踪断层和抑制影响断层识别的线性噪声中应用的可行性和有效性。实际地震资料的断层自动提取的结果表明,基于梯度方向约束的群算法是一种有效的断层追踪方法,在提高计算效率、减小计算量和抑制线性噪声方面具有一定优越性。

关键词 蚁群算法;断层;自动追踪;相干属性;梯度

中图分类号 TE19

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.27.009

Application of an Improved Ant Colony Algorithm in Fault Automatic Tracking

ZHAO Junsheng, SUN Zandong

Laboratory for Integration of Geology & Geophysics, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The attribute of faults is the basis on fault automatic tracking. However, the attributes include some false information from stratification and noises, which make the position and intersection relationship of fault system not clear, and it is difficult to identify and take up the fault. Furthermore, the fault extension has a certain direction, which is different from noise. Based on this characteristics, the gradient direction of the block is calculated to constrain the ant tracking range, and the consistency of direction is calculated to differentiate between the fault and the noise. Finally, faults will be tracked automatically in the coherence data volume or other fault enhanced data volume by ant colony algorithm. In addition, automatic tracking faults are refined by Zhang-Suen algorithm to obtain the fault line that can be applied to seismic interpretation. The results of numerical model show that this method is feasible and available in the automatic tracking fault and suppression of noise. Field data processing results also show that algorithm based on constraints of the gradient direction is an effective method to trace the fault, and has certain advantages in improving calculation efficiency, decreasing calculation amount and reducing noise.

Keywords ant colony algorithm; fault; auto tracking; coherence attribute; gradient

0 引言

断层的人工解释是一项非常复杂而又繁琐的工作。首先在二维地震垂直剖面上标注反射层的断点,再根据前后相邻剖面的对比来推断断层面的形态,最终的断层面结果要综合地震剖面及相干水平切片的信息。人工解释既费时费力,同时解释结果的可靠性还与解释人员的专业水平及经验有关,

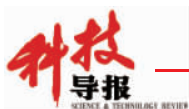
带有一定的主观性。如何找到一种客观的自动断层解释方法是当前研究的难点。

自从相干体等一系列增强不连续性的属性体(曲率、方位角等)相继出现,为了缩短解释周期,克服断层解释中的主观性,断层的自动或者半自动识别技术逐渐引起了关注。

2001年,Randen等^[1]提出“人工蚂蚁”的方法压制不连续

收稿日期:2013-03-28;修回日期:2013-07-22

作者简介:赵俊省,博士研究生,研究方向为三维地震资料解释与储层预测研究,电子信箱:zjs988o@126.com



属性体中的噪音。2003年, Gibson等^[2]提出使用相干体来衡量不连续性,进而使用确定的断层模型通过最大可信度优先(Highest Confidence First, HCF)提取的策略提取断层面。2005年, Dorn等^[3]使用融合了地质先验知识的信号处理技术来实现断层的自动提取(AFE); Tingdahl等^[4]首先计算断层的混合属性,然后使用人工神经网络生成断层概率体,从而实现断层的半自动识别; Jacquemin等^[5]使用双霍夫变换(Double Bough Transform)进行断层的自动提取。2006年, Jeong等^[6]基于GPU使用交互式操作进行断层识别。

断层自动检测不仅在理论上不断发展,而且国外有关公司还开发了多套自动或半自动断层解释软件。如美国Paradigm公司的自动断层识别系统,根据三维相干数据以及方位角、倾角等属性自动提取断层曲面。英国GSS公司的SVI Pro软件应用图像处理和模式识别技术提取反射界面的终止点,再结合其他地质属性解释断层。美国Landmark公司推出了GeoProbe软件,主要特点是交互式的断层解释,通过剖面、水平切面上的人工断层解释结果,辅以曲面的自动插值生成三维断层面。德康公司开发的d-Tect软件可以将多种地震数据属性混合显示,并对断层作出综合评价。

“人工蚂蚁”(artificial ants)断层自动识别技术,由Randen等在2001年的SEG年会上首次提出,并在2002年和2003年由Pedersen等进行了进一步的阐述^[7]。这种断层自动识别方法主要由3个部分组成:首先由三维地震数据体生成突出振幅空间不连续性的断层增强属性体,包括倾角方位角属性、混沌属性、方差属性和边缘增强属性,然后针对这些属性的特点使用“人工蚂蚁”对其进行处理,以达到压制噪音和非断层响应的目的,最后实现断层的提取。此项技术是目前比较成熟的断层自动识别技术之一,已经被应用到商业软件Petrel当中,并在世界范围内得到了广泛的应用,对其他的断层自动识别方法也有很好的借鉴意义。但是随着这项技术的商业化,它的具体实现过程并不为人知,对此技术的改进和发展起到了负面的影响。

为了精确地解释断裂系统,克服相干等断层增强属性体中包括了来自地层成层性和各种噪声产生的假象,较为准确地提取出断层,本研究以蚁群算法为基础,用梯度方向来约束蚂蚁追踪的范围和方向,并通过计算数据的方向一致性来区分蚂蚁追踪点是噪音还是断点。并把该算法应用在模型和实际资料中,以验证该方法在断层自动提取应用中的可行性和有效性。

1 蚁群算法基本原理

蚁群算法是意大利学者Dorigo等^[8-10]受蚂蚁觅食过程中路径选择行为的启发而提出的一种仿生进化算法。经观察发现,蚂蚁在搜索食物过程中总能够找出到食物源的最优路径,当该路径被阻断后,能很快绕开障碍并再次找到最优路径。

仿生学家经过研究发现,蚂蚁虽然没有视觉,但是蚂蚁

能够找到食物,原因就在于蚂蚁行走的时候会在经过的路径上释放一种称之为信息素(Pheromone)的化学物质。当蚂蚁走到一个新的点或者遇到障碍的时候,会随机选择一个方向运动,同时还释放信息素,并且蚂蚁能够感知这种物质的存在及其强度,以此指导自己运动的方向。信息素随着时间推移而消散。经过相同的时间间隔后,由于经由短路径的蚂蚁更多,导致短路径上遗留的信息素的浓度较高。当下一个蚂蚁达到该位置的时候受较强的信息素的刺激会以较大的概率选择信息素更浓的方向,这样就形成了一个正反馈机制:越来越多的蚂蚁会选择信息素浓度较高的那个方向,而这个方向上的信息素也会不断增加,对应的信息素少的路径因为被越来越少的蚂蚁经过而使得信息素慢慢挥发掉,最终整个蚁群会找到最优的路径。即使中间过程中突然有障碍出现,蚂蚁也能很快地重新找到路径。蚂蚁的这种行为称之为自催化行为(Auto Catalytic Behavior),其原理就是正反馈机制。

可以看出,虽然单个蚂蚁的力量是有限的,但是通过它们之间的互相协作和配合,最终使得整个蚁群具有很大的自组织性。

人工蚁群算法描述如图1所示^[7],假定BH间的距离为1个单位长度,而BC间为0.5个单位长度,即BH=DH=1, CB=DC=0.5。假设初始时刻有20个蚂蚁从A点出发到食物的位置E点,以后每个时刻都会有20个蚂蚁从A点出发,并且每个蚂蚁在1个时间间隔内移动1个单位长度,在移动的时候每个蚂蚁会在时刻t释放信息素,信息素的浓度与蚂蚁所走的路径成反比^[10]。

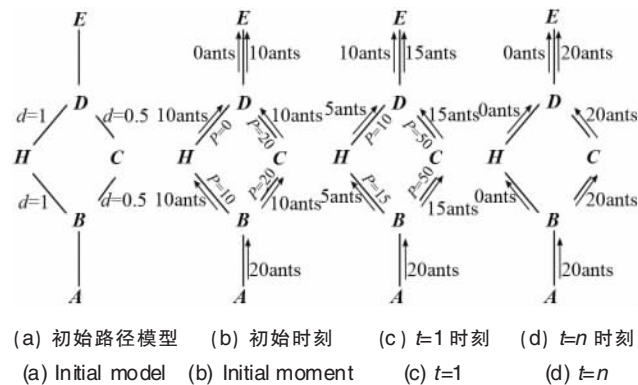


图1 人工蚁群模型

Fig. 1 Artificial ant model

在t=0时刻,图中路径BCD是路径BHD长度的一半,并且两条路径上都没有信息素,因此蚂蚁以相同的概率选择这两条路径,两条路径各有10只蚂蚁选择。在t=1时刻,由于路径ABCDE的长度相对较短,路径上的10只蚂蚁都已经到达E点,并在路径上留下的信息素浓度为P=20,而路径ABHDE上的蚂蚁才刚到达H点,在走过的路径上留下的信息素浓度为P=10。同时又有20只蚂蚁从A点出发,而蚂蚁再选取路



径时会优先选择信息素浓度较高的路径。因此,根据两条路径上的信息素的浓度,有 15 只蚂蚁选择路径 *ABCDE*。同样在 1 个时刻后这条路径上的蚂蚁也全部到达 *E* 点,且留下浓度为 $P=30$ 的信息素。而此时初始时刻选择路径 *ABHDE* 的 10 只蚂蚁才刚到达 *E* 点,该条路径上的最大信息素浓度为 $P=15$ (图 1(c))。随着时间的推移,路径 *ABCDE* 上的信息素浓度越来越高,而选择这条路径的蚂蚁也越来越多。这个过程会持续到所有的蚂蚁都选择了最短的路径为止,此时整个蚁群会找到最优的路径,并且此后全部沿着这条最短路径移动 (图 1(d))。

2 蚁群算法用于断层识别的算法描述

地震数据的断层增强属性体是断层处表现为局部极小或极大的属性体,与噪声点不同的是,断层沿一定的方向具有延伸性,而噪声点则表现为较差的方向一致性。因此,本文提出一种基于梯度方向约束蚁群算法,用于断层自动追踪和识别。

2.1 追踪方向的确定

事实上,三维相干数据体可以看作是一定数量的水平切片或是垂直剖面按一定间隔的组合。因此,组成三维数据体的水平切片或垂直剖面就可以看成是二维数据,本算法在这些二维数据体上操作。

首先,将二维数据分成 $M \times N$ 个小数据块(每个小数据块的大小为 $n \times n$,也是每只蚂蚁的初始分布范围),同时放入 $M \times N$ 只蚂蚁。每个数据块中按下面的概率选择数据点作为初始点放入蚂蚁,概率计算公式为:

$$P_i = \frac{1 - C_i}{\sum_{j=1}^K (1 - C_j)} \quad (1)$$

其中, P_i 为第 i 个数据点被选中的概率; K 为小数据块中数据点的个数; C_i 和 C_j 分别为小数据块中 i 点和 j 点的相干值。由式(1)可知,蚂蚁的初始位置与数据块中数据点的相干值有关,数据点的相干值越小,被选中的几率越大。

确定了蚂蚁的初始位置后就可以计算各个数据块的梯度方向,然后用梯度方向来约束蚂蚁的追踪范围。对于数据块的方向估计有很多种方法,研究者经过对比认为,基于梯度的方法更能准确细致地刻画出数据块的主方向。因此,本文对方向估计方法将不再做过多的对比,而选用基于梯度的方向场估计方法。

首先根据式(1)找到的初始点为中心取一个大小为 $m \times m$ 的小数据块。根据式(2)计算数据块中各个数据点的梯度;根据式(3)计算数据块的梯度。则数据块的梯度主方向可表示为式(4)^[11-12]。

$$\begin{bmatrix} G_x(x,y) \\ G_y(x,y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} GB_x \\ GB_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^m (G_x^2(x,y) - G_y^2(x,y))^2 \\ \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^m 2G_x(x,y) - G_y(x,y) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{GB_x}{GB_y} \right) \quad (4)$$

其中, $G_x(x,y)$ 和 $G_y(x,y)$ 分别为数据块中每个数据点沿 x 方向和 y 方向的梯度; $f(x,y)$ 为数据点的属性值; GB_x 和 GB_y 分别为数据块沿 x 方向和 y 方向的梯度; θ 为数据块的梯度方向。

主方向确定后就不再改变。蚂蚁的搜索范围被限定在追踪方向左右一定角度范围内。在断层追踪过程中,方向起到约束追踪范围的作用,避免冗余计算。在断层增强属性体中,大倾斜地层的响应与断层相似,因此,若数据块的梯度主方向落在某个邻域内,就认为是大倾角地层而非断层引起的响应,这种情况就可以停止追踪。

2.2 转移概率与信息素更新

在追踪过程中,蚂蚁对搜索范围内的所有候选点都能感应到两种信息——信息素和启发信息素,而蚂蚁根据搜索范围内各条路径上信息素和启发信息素的浓度来计算转移概率,然后根据转移概率选择下一节点的位置。转移概率的计算公式为

$$P(i,j) = \frac{\tau^\alpha(i,j) \cdot \eta^\beta(i,j)}{\sum_{i,j \in allowed_k} \tau^\alpha(i,j) \cdot \eta^\beta(i,j)} \quad (5)$$

其中, $P(i,j)$ 为节点 (i,j) 的转移概率; $\tau(i,j)$ 为节点 (i,j) 的信息素浓度; $\eta(i,j) = 1 - f(i,j)$ 为节点启发信息素浓度, $f(i,j)$ 为节点 (i,j) 处的相干值; α 和 β 为信息素和启发信息素的控制因子; $allowed_k$ 表示蚂蚁所经过路径的所有节点。

由于蚁群的搜索范围被限制在一定的范围内,而不是对所有节点的遍历,如果采用经典蚁群算法中的信息素挥发机制,会造成原来访问过路径的信息素随循环次数增加趋向于零,不利于断层线的追踪。同时,在信息素浓度更新过程中限制了信息素浓度的最大值,这样即保存了蚁群已经走过的路径信息,使得算法向更真实的路径收敛,避免了局部收敛过快而导致错误的信息。当所有蚂蚁完成一次搜索后,蚂蚁所走过节点的信息素按下式更新^[11,13]。

$$\tau(i,j) = \begin{cases} \tau(i,j) + \Delta\tau(i,j) & \tau(i,j) + \Delta\tau(i,j) < \tau_{\max} \\ \tau_{\max} & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中, τ_{\max} 为信息素浓度上限; $\Delta\tau(i,j) = \sum_{k=1}^m CL(k)$, 表示第 k 只蚂蚁在此次循环中在此路径上留下的信息量, C 为信息素更新因子, $L(k)$ 为第 k 只蚂蚁在此次循环中所走的路径长度。

在相干属性剖面中除了断层信息外,还存在一些其他的噪声。这些噪声信息有的是随机的、无规律的,也有一些是因地层倾斜引起的与断层相似的响应。因此,蚂蚁在经过噪声区时遗留的信息素很小,而对于长的、主要的断层线,其信息



素较为突出,根据信息素的分布可有效区分边缘和噪声信息。

蚁群追踪断层之前,要设定一个阈值 C_T ,在搜索过程中如果蚂蚁在某一步的搜索范围内所有点的相干属性值都大于这个阈值,就将这一步记为一个异常步,当异常步总数在总步数中所占的比重超过预设值 S_T 时停止搜索。

2.3 断层线细化

使用蚁群追踪方法对断层进行自动追踪后,可以降低噪声的干扰,增强断层连续性,但是追踪结果都是有一定宽度的条带,这给断层面的提取带来困难,无法确定断层的具体位置,这就需要对追踪结果进行断层细化处理。Randen 等^[1]提出了一种断层细化方法,即:不连续面(如断层面)的真实位置对应于增强的断层属性体中属性的极大值面。具体的操作方法是:对蚁群追踪结果中的每一个像素点,寻找它垂直于断层的 n 个邻域像素点,比较次像素点是否为邻域像素点集中的极值点,如果是,保留,否则删除。这种处理方法的难点在于需要事先判断每一条断层的大致走向,还要确定断层上每一点的法线方向。否则,沿着断层走向细化会导致断层变短甚至消失,对于复杂的断层系统,比如在断层相交的情况下,这种方法很难取得准确的效果。

为了有效地解决断层细化的问题,本文对蚁群追踪结果使用图像处理中的细线化技术来实现断层的细化,细化的结果就形成了一个清晰的不连续面分布体。针对不同的应用领域,国内外提出了很多种细化算法,如 Hikitch 细化算法、Deutsch 算法、Zhang 快速细化算法等。本文采用的是 Zhang-Suen 提出的一种图形细化算法^[2]。这种算法计算方便,而且可在完好地保存源图像形状的基础上提取图形的骨架,但是这种算法在图像交叉处的处理不是很理想,容易造成图形变形以及分叉等现象,需要对结果进行进一步地优化处理。以下模型试算及实际资料的应用中的蚁群追踪结果都是经过 Zhang-Suen 算法细化处理后的结果。

3 模型试算及实际应用与分析

3.1 模型试算

为了验证蚁群算法在断层自动追踪应用中的可靠性和有效性,设计了一个如图 2(a) 的所示相干剖面。模型中共有 5 条断层,除断层 3 和断层 5 外其他 3 条断层都有中断,其中断层 4 和断层 5 相交,但是断层 5 在相交处中断,并且断层 5 和其他断层的倾向相反。相干剖面中除有线性噪声干扰外无其他噪声。

使用蚁群算法对断层自动追踪,追踪结果如图 2(b) 所示。通过追踪结果可以看出,相干剖面中的主要断层都可以通过蚁群算法追踪出来;蚁群追踪对线性噪声有一定程度的压制,但是还不能完全去除。图 2(b) 所示的追踪结果与图 2(a) 所示的相干剖面相比,断层 3 和断层 4 的一部分没有有效的连接,通过试验发现是由于噪声的干扰,在追踪过程中蚂蚁过早地达到了停止标准,而没有实现断层的有效连接。通过降低终止标准,这两部分也可以实现有效的追踪(图 3

(b))。断层 1、断层 2 和断层 4 的中断部分由于间隔较长,所以在追踪结果中没有被有效地连接起来,但是各条断层的主要特征仍然表现得较好。此外,经过细化处理后,蚁群追踪的断层剖面变为更加连续单像素剖面,但是由于算法的原因在一些线性干扰与断层线的交点处出现分叉现象,对断层线的准确识别和描述有一定的影响,因此仍需要进一步的优化细化算法。

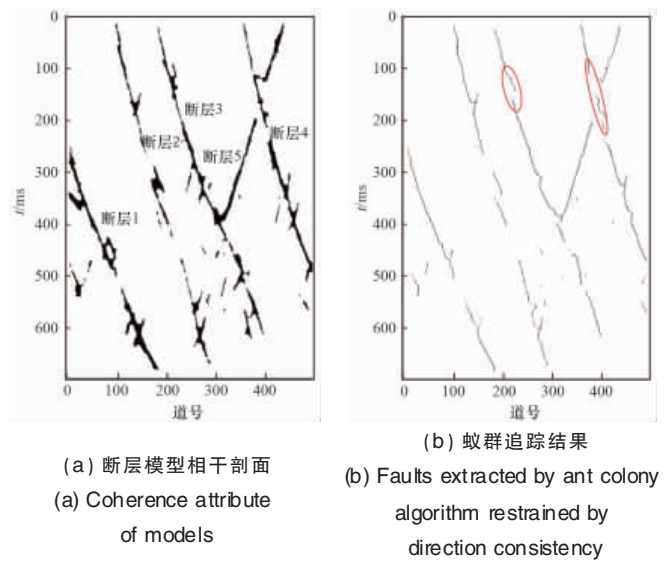


图 2 断层模型追踪结果验证

Fig. 2 Verification of ant tracking result of fault model

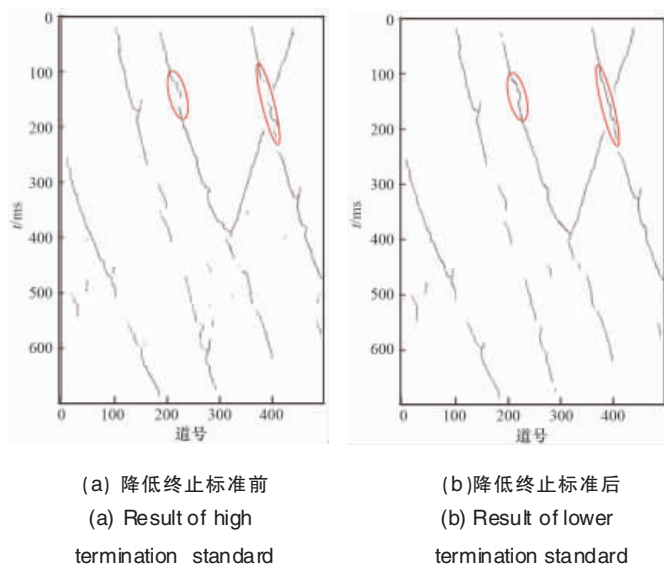
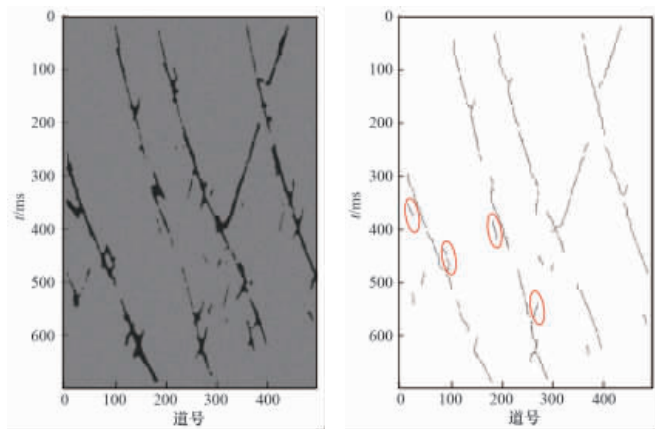


图 3 降低终止标准前后蚁群追踪结果对比

Fig. 3 Comparison of ant tracking results before and after lowering termination standard

为了进一步验证算法的抗噪性,在相干剖面中加入方差为 0.2 的高斯噪声(图 4(a)),追踪结果如图 4(b) 所示。相干剖面加入噪声后,主要断层线仍能得到清晰展现,并没有影响各条断层的主要特征。如图 4(b) 所示,加入噪声后算法仍能得到较好追踪结果,随即噪声得到了有效地压制,但是由

于噪声增加的原因,相干剖面中的一些线性噪声并不能完全地被去除,有一部分也被追踪出来,但在可接受范围内,可以通过后期的断层线与地震资料对比分析去除。在计算中可以通过降低一致性判断标准来使得断层线有效地连接,但同时使一些噪声也被当作断层追踪出来,甚至得到错误的结果。在实际断层追踪过程中,宁可牺牲掉少量断层线的连续性也不要错误的结果,因此,在断层追踪前要试验好各个约束参数,在避免错误的追踪结果的前提下,尽量使追踪出的断层更加清晰连续。



(a) 加入方差为 0.2 的高斯噪声后的模型相干剖面
(a) Coherence attribute of models with noises
(b) 蚁群追踪结果
(b) Ants tracking result of model with noises

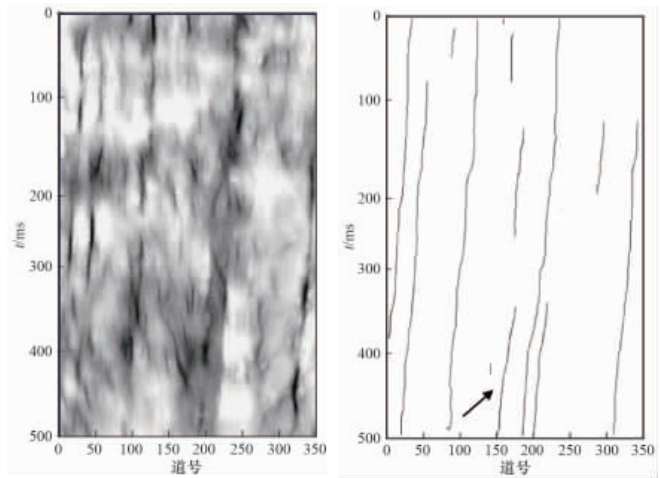
图 4 模型加入噪声后的蚁群追踪结果 (红色圈内为线性干扰)
Fig. 4 Ants tracking results with the model having noises

3.2 实际资料计算及分析

实际地震数据为曙北某工区的三维叠后数据。工区内发育多条断层,并且断层的倾角和断距都比较大。使用相干加强算法获得工区的相干数据体,采用蚁群算法对相干地震数据体进行自动识别断层。通过对比地震剖面 and 相干属性剖面可以看出,CrossLine 2299(工区中联络测线 2299)中几条断层的倾向都大致相同,而在 CrossLine 2246(工区中联络测线 2246)中有一条与其他断层倾向相反的断层,并与它相邻的断层相交后形成了 Y 状断层,而且该区断层都是大倾角断层。由于该区内的地层受断层的切割和压扭,该区断层附近的地层大多为大倾角倾斜地层,而倾斜地层在相干属性剖面上的响应较强,并且与断层的响应相似,严重影响了断层在相干剖面上的识别(图 5(a)、图 6(a))。

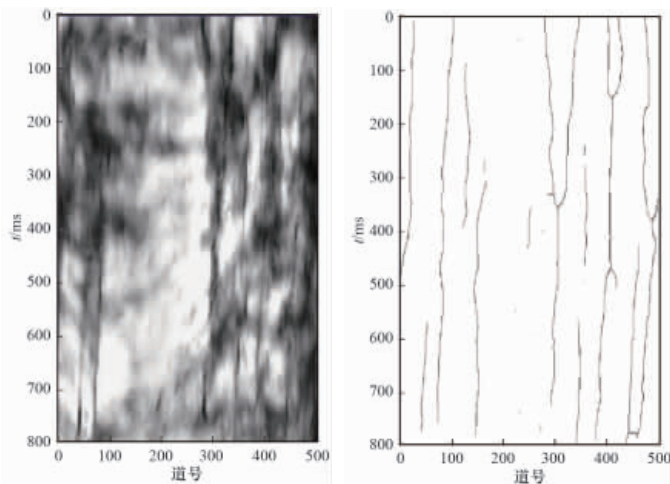
通过蚁群追踪后的相干剖面上主要的断层线变得清晰,噪声得到一定的压制,断层线也相对连续(图 5(b)、图 6(b))。但是由于该区倾斜地层在相干剖面上的响应很强,在蚁群追踪断层的过程中很难将其完全消除。通过对比地震剖面后发现,在蚁群追踪后的相干剖面上仍有这些噪声引起的线性噪

声(图 5(b))。另外,大断层附近的小断层在相干剖面上的响应不是很强,很难被识别出来,所以蚁群追踪后的相干剖面上没有这些小断层显示。



(a) CrossLine 2299 相干加强 (AFE)剖面
(a) Fault enhanced attribute of the CrossLine 2299
(b) CrossLine 2299 蚁群追踪结果剖面
(b) Profile of ant colony automatic fault extraction

图 5 CrossLine 2299 蚁群追踪结果
Fig. 5 Ant tracking result of CrossLine 2299



(a) CrossLine 2246 相干加强 (AFE)剖面
(a) Fault enhanced attribute of the CrossLine 2246
(b) 蚁群追踪结果剖面
(b) Profile of ant colony automatic fault extraction

图 6 CrossLine 2246 蚁群追踪结果
Fig. 6 Ant tracking result of CrossLine 2246

由自动追踪的断层线与地震剖面的叠合图(图 7(b)、图 8(b))可以看出,自动追踪的断层线与地震剖面上显示的断层吻合较好,证明了基于梯度方向的蚁群算法在断层自动追踪中应用的有效性。

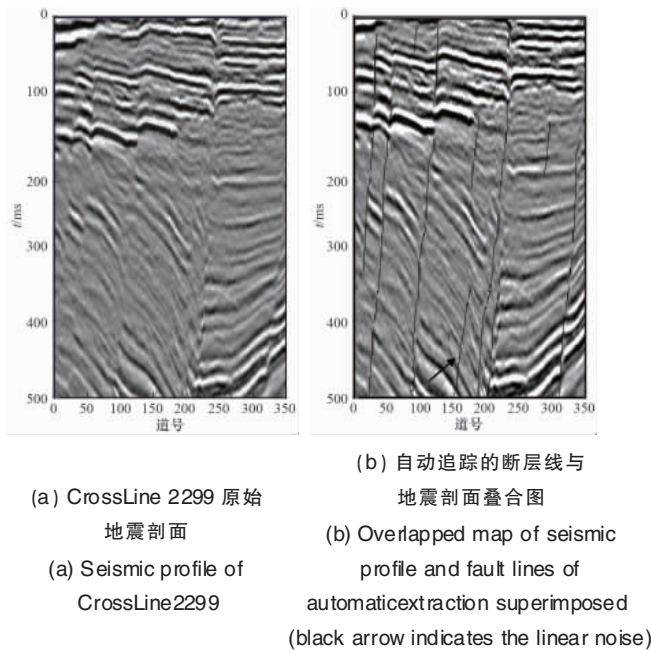
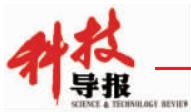


图 7 CrossLine 2299 追踪结果验证
Fig. 7 Verification of ant tracking result of CrossLine 2299

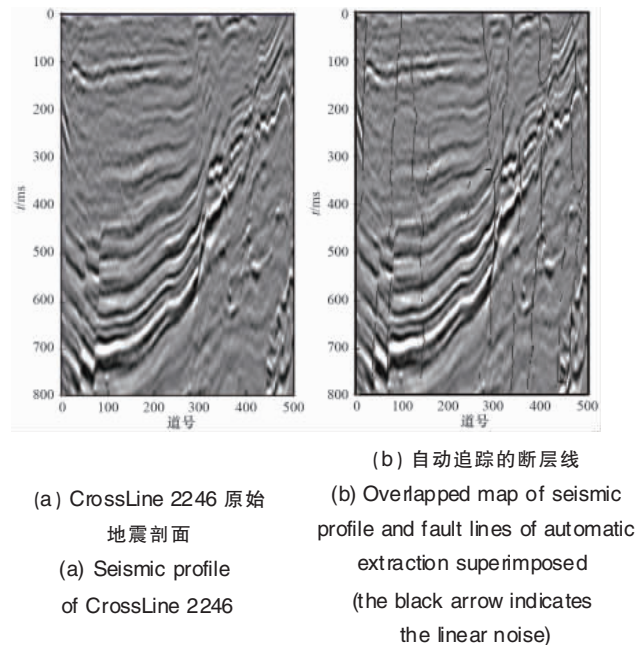


图 8 CrossLine 2246 追踪结果验证
Fig. 8 Verification of ant tracking result of CrossLine 2246

4 结论

断层自动追踪是以断层增强数据体为基础,通过计算数据块的梯度方向及数据块的方向一致性约束蚁群的追踪方向和范围的蚁群追踪方法。这种方法可以有效地压制大倾角地层引起的似断层响应和噪声,同时增强了断层响应,避免冗余计算,提高了计算效率,为后期的断层自动提取和分离奠定了很好的基础。此外,可以在一定的地质先验知识的基础上,在梯度方向的约束下进行更为智能的断层追踪,减少断层的解释时间,提高地震资料解释的精度和效率。但是,该

方法也存在一些不足。首先,不同的断层增强属性剖面的特征不同,阈值的选择和追踪步长的设置需要不断地调整试验,才能达到预期的效果,所以对大数据体的连续追踪困难,需要根据不同区块的断层特征分块进行断层自动提取;其次,参数的优化选取是在人工干预下完成的,具有一定的局限性,仍需要进一步研究参数的自动优化选取算法;最后需要说明的是该算法在方向约束的条件下已经减小了蚁群追踪的计算量,增加了计算速度,但仍需研究快速算法,才能在实际的应用中推广。

参考文献 (References)

- [1] Randen T, Pedersen S I, Sønneland L. Automatic extraction of fault surfaces from three-dimensional seismic data[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 2001: 551-554.
- [2] Gibson D, Spann M, Turner J. Automatic fault detection for 3D seismic data [C]. Digital Image Computing Techniques and Applications Conference, Sydney, Australia, December 10-12, 2003: 821-830.
- [3] Dorn G A, James H E. Automatic fault extraction of faults and a salt body in a 3-D survey from the Eugene Island area, Gulf of Mexico[C] AAPG International Conference and Exhibition, Paris, France, September 11-14, 2005: 823-828.
- [4] Tingdahl K M, Rooij M de. Semi-automatic detection of faults in 3D seismic data [J]. Geophysical Prospecting, 2005, 53 (4): 533-542.
- [5] Jacquemin P, Mallet J L. Automatic faults extraction using double hough transform [C]//Expanded Abstracts of the 75th Annual Internat SEG Meeting, Houston TX, USA, November 6-11, 2005: 755-759.
- [6] Jeong W K, Whitaker R, Dobin, M. Interactive 3D seismic fault detection on the Graphics Hardware [C]//International Workshop on Volume Graphics, Boston MA, USA, July 30-31, 2006: 111-118.
- [7] Pedersen S I, Skov T, Randen T, et al. Automatic fault extraction using artificial ants[M]//Mathematical methods and modelling in hydrocarbon exploration and production. Berlin: Springer, 2005: 107-116.
- [8] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V, et al. Distributed optimization by ant colonies [C]//1st European Conference on Artificial Life, Paris, France, December 1-3, 1991: 134-142.
- [9] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (Part B), 1996, 26(1): 29-41.
- [10] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
- [11] 严哲. 三维地震断层自动识别与智能解释 [D]. 北京: 中国地质大学, 2010: 35-41.
Yan Zhe. Fault automatic recognition and intelligent interpretation in 3-D seismic data[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010: 35-41.
- [12] 梅园, 孙怀江, 夏德深. 一种基于梯度的健壮的方向场估计算法 [J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(6): 1022-1030.
Mei Yuan, Sun Huanjiang, Xia Deshen. Journal of Computer Research and Development, 2007, 44(6): 1022-1031.
- [13] Lu D, Chen C C. Edge detection improvement by ant colony optimization[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(4): 416-425.
- [14] Zhang T Y, Suen C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Communication of the ACM, 1984, 27(3): 236-239.
- [15] Gu J, Zhou J. A novel model for orientation field of fingerprints[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New Jersey NJ, USA, June 18-20, 2003: 174-179.
- [16] Ratha N K, Chen S, Jain A K. Adaptive flow orientation based feature extraction in finger print images [J]. Pattern Recognition, 1995, 28(11): 1657-1672.

(责任编辑 侯澄芝)