

基于蚁群算法的地震断层识别方法^①

叶 涛^{②*} 陈 雷^{③**} 徐 刚^{***}

(* 青海民族大学计算机学院 西宁 810007)

(** 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院油气资源研究重点实验室 北京 100029)

(*** 中油国际(乍得)有限责任公司 恩贾梅纳 999052, 乍得)

摘 要 研究了地震断层识别,针对现有断层识别方法准确度较低的问题,提出了一种新的基于蚁群算法的地震断层识别方法。此方法可以准确地定位断层的位置并且将它们提取出来。该方法首先将地震层位视为连通区域,并用连通标注方法将其提取出来;接着找出每个层位在水平方向的端点,然后将整个地震剖面划分成多个矩形块,将每个矩形块最上面的一个水平端点作为蚂蚁的巢穴,最下面的一个水平端点作为食物,在蚂蚁由巢穴出发寻找食物的过程中,将地震剖面视作三维地形,在三维地形中使用地震样点的幅度值作为某一位置的高度;最后在每一个矩形块中所搜寻到的从巢穴到食物的最短路径就是断层的位置。实验结果验证了所提方法的有效性。

关键词 断层识别, 蚁群算法, 地震剖面, 连通区域

0 引 言

断层识别是地震解释中的重要环节,准确的识别对石油和油气勘探有着重要的实际意义。断层是指层位不连续的区域。传统的断层识别方法是手工在剖面中先选出层位不连续的样点,再将这些点连成线。此方法可准确识别出断层,但较为费时,且主观性强。为克服手工断层识别方法的不足,20 世纪早期开始,自动断层识别方法被相继提出。这些方法通常是利用中样点间的相关系数、梯度及方差等不连续性特征对断层进行识别。如 Bajorich 等人以归一化互相关为基础提出了第一代相干体算法,简称为 C1^[1],通过三个地震道之间的相关性大小来识别断层,优点是计算简单、快速,不足是易受相干噪声干扰。针对 C1 的不足,Marfurt 等人提出了第二代相干体算法,简称为 C2^[2],此方法将地震道间的

互相关计算扩展为立方体或椭圆体内的多个地震道,优点是抗噪声能力较强,对大断层的识别率较高,不足是均值效应明显,小断层识别率低,耗时较长。针对 C2 的不足,Gersztenkom 等人提出了第三代相干体算法,简称为 C3^[3],此方法被应用在了地质分析软件 Petrel 中,先计算三维相干窗口内各道地震数据协方差矩阵的特征值,然后基于地震数据的主要变化由较大特征值决定的原理,用最大特征值在所有特征值中的比例作为互相关值,优点是速度较快、抗噪声能力较强,不足是相干窗口大小难以选择、断层位置模糊,均值效应仍然存在。

Gibson 等人提出了基于最大可信度优先策略的断层识别方法^[4,5],先利用相干体作为不连续特征来确定断层面模型,然后利用最大可信度优先的策略识别断层,此方法提高了准确度,但计算复杂度较高,效率较低。Wang 等人提出了一种基于 Hough 变换的断层识别方法^[6],先使用文献[2]中的方法

① 青海省自然科学基金(2017-ZJ-912)和青海民族大学网络与信息安全科研创新团队专项资金资助。

② 男,1972,博士生,副教授;研究方向:网络安全可视化,模式识别与计算机视觉。

③ 通信作者,E-mail: ch913@126.com

(收稿日期:2017-05-30)

来计算不连续性特征,然后对不连续特征进行阈值化以增强似断层区域,再使用 Hough 变换^[7,8]检测断层的线性特征并通过地质约束条件将错误断层滤除,最后将所得断层片段连接并标注,这种方法对较大断层的识别准确度较高,但微小断层丢失严重。为了进一步提高准确性,Wang 等人提出了基于追踪向量的断层识别方法^[9],此方法借用视频编码中参考帧和预测帧的概念定义在三维地震数据体中定义参考剖面 and 预测剖面,然后使用文献[6]中的方法识别出参考剖面中的断层线并将这些断层线垂直投影到参考剖面上,再在预测剖面上基于最大不连续性优化规则将双向投影后的断层线进行优化组合来实现断层识别。此方法准确度较高,但由于要先在多个参考剖面中进行断层检测,所以增加了计算量,效率不高。Browaeys 提出采用复数地震道来计算相邻两道数据间的相关性以实现断层识别^[10]。基于文献[10]中的方法,Wang 等人提出了一种基于方向的复值相干属性算法对断层进行识别^[11],先利用实数地震道的赫尔伯特变换得到复数地震道的虚部,再在不同方位角上计算相邻加权复数地震道之间的相关系数,最后,利用各方位角上所得方向复数相关系数的最小值对断层进行识别。此方法的优点是克服了相干体算法对方向利用不足、抗噪能力差的问题,但由于加权复数地震道是某一方向上多个复数地震道的加权组合,故均值效应仍然存在。

Randen 等人提出了基于蚁群算法^[12,13]的断层识别方法^[14],称为蚂蚁追踪算法,此方法也被应用在了地质分析软件 Petrel 中,并荣获了《世界石油》杂志 2005 年“最佳勘探技术奖”,它通过蚂蚁在地震数据三维属性体中的似断层面上的爬行来实现断层的识别,Pedersen 等人对蚂蚁追踪算法做了具体的解释^[15,16],这种方法精度较高,可识别出细微的断层,噪声抑制能力较强,但由于它对以一定概率属于断层的区域都进行追踪,所以可信度较低,另外,因是在三维属性体中进行蚂蚁追踪,故计算量较大,耗时较高。针对此问题,严哲等人提出了基于方向约束蚁群算法的断层识别方法^[17],先在二维地震剖面中基于地震属性计算出蚂蚁的追踪方向,然后让蚂蚁优先在追踪方向上对断层进行追踪以实现断层

的识别,这种方法可以在二维地震剖面中直接进行断层识别,计算量较小,速度较快,但未能克服蚂蚁追踪算法所存在的可信度较低的问题。本文将二维地震剖面视作三维实际地形,提出了一种新的基于蚁群算法的断层识别方法,并介绍了二维地震剖面三维地形表示原理、基于蚁群算法的地震断层识别方法的原理,给出了实验结果和分析。

1 二维地震剖面三维地形表示

1.1 正层位提取和断层位置定位

1.1.1 基于连通区域标注的正层位提取

在不影响断层结果的前提下,为简化处理过程,我们只将地震剖面中地震波的正半轴部分视作层位,负半轴部分置零。对地震剖面中的正层位进行提取和标注的具体步骤如下:

第一,将小于 0 的地震幅度置为 0,将地震剖面数据转换成二值图像。

第二,用形态学方法对地震二值图像进行滤波。

第三,用连通区域标注方法对层位进行标注。

1.1.2 断层位置定位

因断层就是层位不连续的地方,所以它的位置可通过层位的水平端点来准确定位。端点包括左端点和右端点,可以通过以下两个公式得到:

$$(r_{\text{left}}, h_{\text{left}}) = \min_{L(r, h) = x} h \quad (1)$$

$$(r_{\text{right}}, h_{\text{right}}) = \max_{L(r, h) = x} h \quad (2)$$

其中, r_{left} 和 h_{left} 分别表示左端点的行和列坐标, L 表示标记矩阵,优化的目标函数是 h ,表示列坐标,约束条件是 $L(r, h) = x$,表示 h 必须是在标记矩阵 L 中标号为 x 的点的列坐标, r 是相应的行坐标。公式(2)中变量或者表达式的意义与式(1)中类似,主要的区别是式(1)中以最小化函数作为优化函数,式(2)中以最大化函数作为优化函数。

找出每个连通区域的端点之后,就可以确定断层的位置了。但是,端点不可直接作为断层位置,因为端点属于层位,并不属于断层。本文将与左端点处于同一行,但列坐标比左端点小 1 的点作为断层位置,同样,将列坐标比右端点大 1 的点也作为断层位置,如图 1 所示。

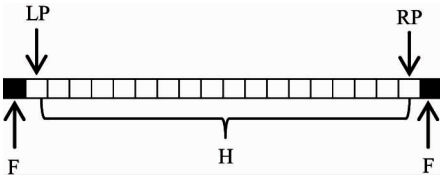


图1 基于正层位端点的断层位置定位原理图

图中, H 表示标记矩阵中的正层位, LP 和 RP 分别表示正层位的左右端点, 两个 F 均为断层位置。

1.2 地震剖面的三维表示

地震剖面通常被认为是二维数据, 但它包含三维信息且事实上是三维数据。这三维分别是采样时间 (sample time)、道号和地震幅度。如果将这三维

数据分别作为水平、垂直和径向坐标, 就可以在三维坐标系统中对地震剖面进行表示了。为了直观地对此进行展示, 本文将地震样点镶嵌到一个网格中并在三维空间中进行了显示, 如图2、图3所示。

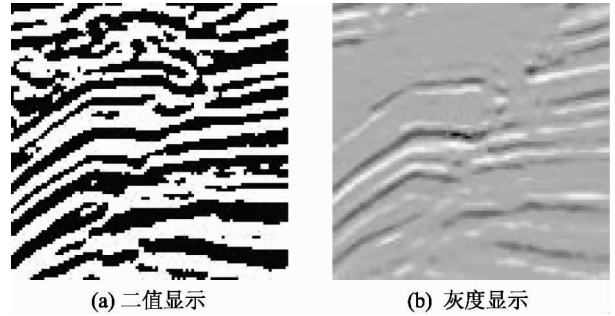


图2 地震剖面数据二维显示

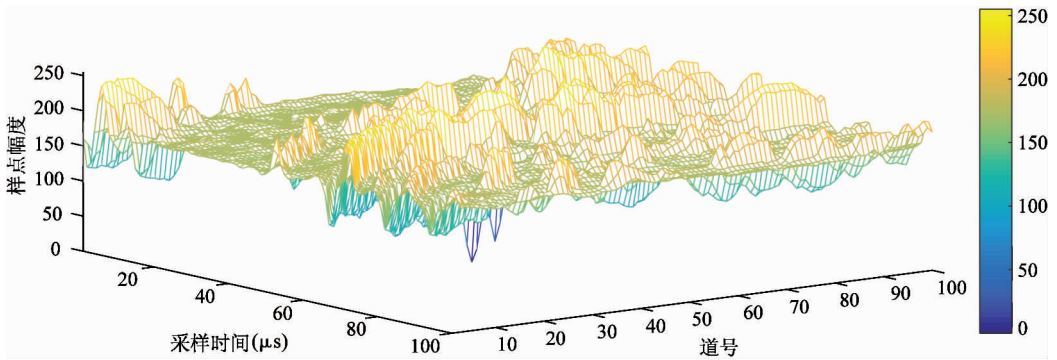


图3 地震剖面数据灰度图像的三维显示

因为地震剖面中样点的幅度是较大范围内的双精度浮点数, 直接将地震剖面作为一幅图像进行显示时, 显示结果会呈现为一幅二值图像, 如图2(a)中所示。为了减少计算量和简化处理过程, 我们将地震剖面数据变换到了灰度范围内, 图2(b)是图2(a)中所示地震剖面所对应的灰度图像。图3是地震剖面灰度图像所对应的三维显示结果。将浮点数字格式的地震剖面数据转换为灰度值的转换方法如下式所示:

$$x_g = \begin{cases} ((x_o - k \cdot S_{\min}) / (S_{\max} - S_{\min})) \times 255, & x_o \geq 0 \\ (-k \cdot S_{\min} / (S_{\max} - S_{\min})) \times 255, & x_o < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, k 为常数, 且 $k \in [0, 1]$, 用于控制三维地形平

均海拔的高低。 x_g 表示灰度值, x_o 是原地震幅度值, $S_{\max}$ 是地震幅度的最大值, $S_{\min}$ 是最小值。

将地震剖面表示成三维实际地形之后, 只需要再确定蚂蚁巢穴和食物的位置, 就可以利用蚁群算法来进行断层识别了。

2 基于蚁群算法的断层识别方法

前面已经确定了断层位置, 但所得断层位置是一些离散的点, 并不能将断层结构很好地反映出来。为获得完整断层, 需要将属于同一断层的离散断层点连接起来。针对此问题, 将地震剖面正层位的灰度图像视作三维地形 (如图4), 利用蚁群算法来对断层进行追踪。

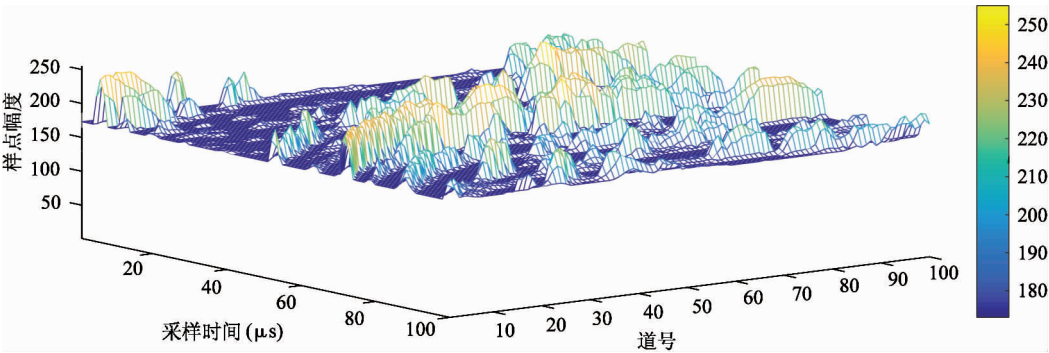


图 4 地震剖面灰度图像的三维显示

2.1 蚁群算法原理

蚁群算法的原理可以通过著名的“双桥”实验来解释。“双桥”实验示意图如图 5 所示。

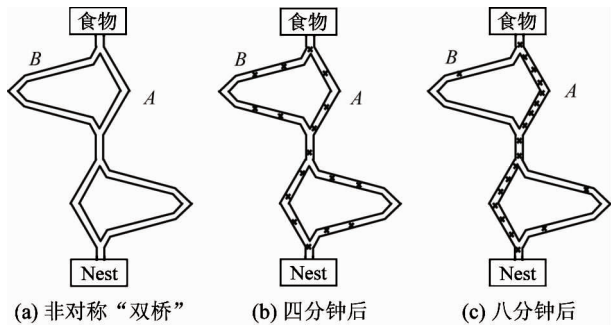


图 5 “双桥”实验示意图

如图 5(a) 所示,实验时在巢穴和食物之间放置了两个桥 A 和 B,然后观察蚂蚁的分布情况,4 分钟后蚂蚁的分布如图 5(b) 所示,8 分钟后如图 5(c) 所示。“双桥”实验证明了蚂蚁在搜寻食物时会最终选择最短路径这一现象。基于“双桥”实验,蚁群算法的数学模型如以下公式所示:

$$P_A(m+1) = \frac{(A_m + k)^h}{(A_m + k)^h + (B_m + k)^h} h \quad (4)$$

$$P_B(m+1) = 1 - P_A(m+1) \quad (5)$$

$$Route(m+1) = \begin{cases} A, & P_A(m+1) > P_r \\ B, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中, m 表示经过两个桥 A 和 B 的蚂蚁总数, A_m 和 B_m 分别是经过 A 桥和 B 桥的蚂蚁数量, $P_A(m+1)$ 表示第 $(m+1)$ 只蚂蚁选择 A 桥的概率, $P_B(m+1)$ 表示第 $(m+1)$ 只蚂蚁选择 B 桥的概率, k 和 h 是与实际数据相关的参数, P_r 表示 0 到 1 之间的一个随

机数, $Route$ 表示存放蚂蚁路径的数组。

2.2 基于蚁群算法的断层识别

2.2.1 基于蚁群算法的断层识别方法原理

基于蚁群算法中蚂蚁可搜寻出巢穴和食物之间最短路径的原理,本文提出了基于蚁群算法的断层识别方法,将地震剖面正层位灰度图像的三维表示视为地形,层位端点视为巢穴或者食物。假设在巢穴位置上放置一定数量的蚂蚁,因为在平面上的路径要比有山峰存在时的路径短,为了尽快地搜寻到食物,蚂蚁将最终会沿着断层爬行,即蚂蚁最终选择的最短路径必然最大可能地经过断层。例如,在图 4 所示地震剖面正层位的顶部层位端点上放置一定数量的蚂蚁后,为了尽快寻找到放置在底部层位端点上的食物,蚂蚁的最终分布将如图 6 中所示。

2.2.2 基于蚁群算法的断层识别方法步骤

(1) 对地震剖面正半部分的二值图像进行连通区域标注,将标号存储在矩阵 J 中,将每个层位的水平端点存储在二值矩阵 P 中,然后,创建一个与地震剖面大小相同的矩阵 R 用于存储断层识别的结果。通过式(3)将地震剖面转换成灰度图像,只保留地震幅度非负的部分。

(2) 将剖面划分成多个大小为 $m \times n$ 的小块,对每个小块应用蚁群算法进行断层识别。这是因为剖面中可能存在多个断层,需要在多个区域应用蚁群算法对断层进行识别。

(3) 对每个小块在矩阵 P 中的相应部分进行扫描,用 T 和 F 分别表示行坐标最小和最大的端点。如果 T 和 F 之间的端点个数小于 2 或者它们的垂直距离小于阈值(本文设为 5),则认为在当前

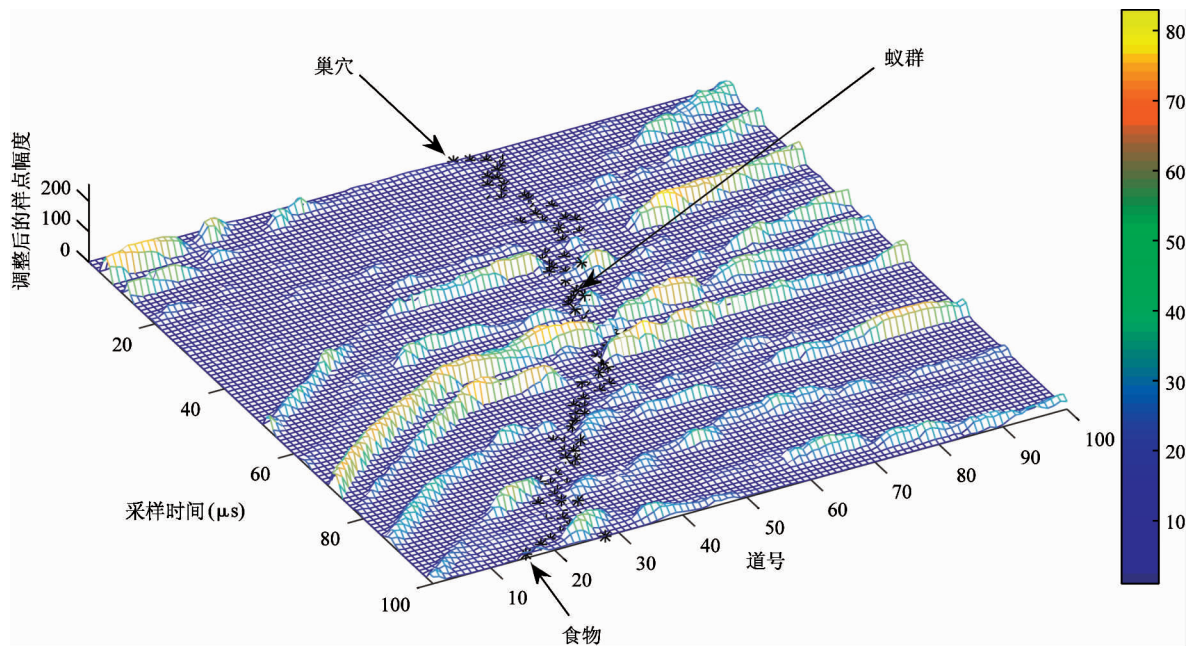


图6 蚂蚁在三维地形中搜寻最短路径的示例

小块中没有断层,将矩阵 $\mathbf{R}$ 中的相应部分赋值为 0, 否则,认为小块中有一个断层并利用 T 和 F 来确定蚂蚁巢穴和食物的位置。如果当前小块的上方没有小块存在,那么就在离 T 最近的点中选取巢穴的位置,否则就结合上面小块中食物的位置来确定当前块中巢穴的位置,如下式所示:

$$N = \min_{N \in W} (\|N - F_{\text{above}}\|^2 + \|N - T\|^2) \quad (7)$$

其中, F_{above} 表示当前小块上面的那个小块中食物的位置, N 表示待确定的当前小块中巢穴的位置, W 表

示当前小块。

(4) 为了更有效地搜索最短路径,将 N 和 F 确定的矩形区域内的地震剖面正半部分作为实际“地形”,其在大为 $m \times n$ 的小块中的位置如图 7(a) 所示。蚂蚁将在此“地形”中搜寻 N 和 F 之间的最短路径,如图 7(b) 所示,矩形的宽度与小块一样,高度由 N 和 F 决定。最短路径确定之后,路径上的像素置为 1,如图 7(c) 中所示。最后,将最短路径在结果矩阵 $\mathbf{R}$ 中进行标注,结果如图 7(d) 所示。

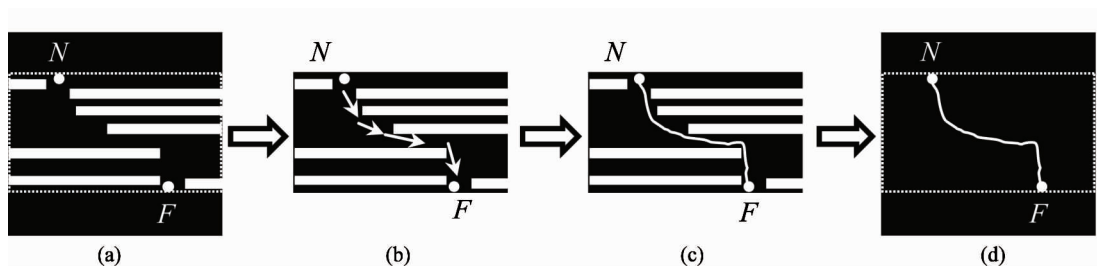


图7 地震剖面正半部分小块中断层识别过程示意图

(5) 在矩形区域内搜寻最短路径的过程如下:

首先,将矩形区域内的地震剖面正半部分视作三维地形,如图 6 所示;接着,创建一个大小为 $r \times n \times 255$ 的三维信息素数组,将其视作 r 个大小为 $n \times 255$ 的二维数组的集合;然后,迭代地搜寻 N 与 F 之间的

最短路径,最大迭代次数可自定义。每次迭代后都会产生一条由 N 到 F 的路径,路径中有 r 个点, N 和 F 之外的点均是蚂蚁根据其前一个点选择得到的,具体过程如图 8 所示。

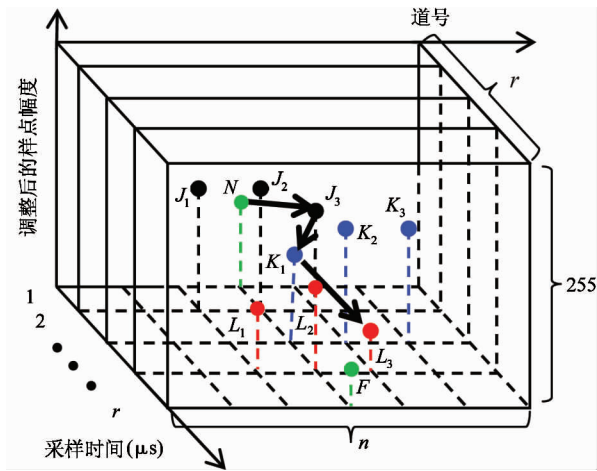


图 8 蚂蚁搜寻最短路径的示意图

其中 $J_1 \sim J_3$ 是从 N 到 F 的路径中第二个点的候选点, 同样, $K_1 \sim K_3$ 和 $L_1 \sim L_3$ 分别是路径上第三个和第四个点的候选点。每个候选点的采样时间坐标比前一个点大 1, 道号相对于前一个点的偏移范围是 $-1 \sim 1$ 。开始时, 蚂蚁被放置在 N 处, 然后, 蚂蚁会对点 $J_1 \sim J_3$ 进行比较, 以使路径最短, 在比较的过程中, 每个点的启发值如以下公式所示:

$$\eta = \begin{cases} \frac{\theta}{abs(h_{cur} - h_{pre}) \times d}, & h_{cur} < h_{pre} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$d = \sqrt{\varepsilon + (h_{cur} - h_{pre})^2 + (x_{cur} - x_{pre})^2} + \sqrt{\phi + (h_{cur} - h_B)^2 + (x_{cur} - x_B)^2} \quad (9)$$

其中, h_{cur} 表示当前点的地震幅度, h_{pre} 和 h_B 分别表示前一个点和食物处的地震幅度, x_{cur} 表示当前点的道号, x_{pre} 和 x_B 分别表示前一个点和食物处的道号, θ 、 ε 和 ϕ 是常数, η 表示待选点的启发值。从前一个点 (如 N) 到候选点 (如 $J_1 \sim J_3$) 的转移概率可用下式计算

$$P_{ij} = \frac{\tau(x_j, y_j, h_j) \times \eta_j}{\sum_{l=1}^3 \tau(x_l, y_l, h_l) \times \eta_l} \quad (10)$$

其中, $j = 1, 2, 3$, P_{ij} 表示从前一个点 i 到候选点 j 的转移概率, 如果到某个候选点的转移概率大于 0 和 1 之间的一个随机数, 就选择这个点作为路径上的点。例如, 图 8 中点 J_2 、 K_1 和 K_3 均是用此方法选择得到的。路径上每个点对应的信息素的更新方式如

下式所示:

$$\tau(x, y, h) = (1 - \rho) \times \tau(x, y, h) \times \Delta\tau(x, y, h) \quad (11)$$

其中, ρ 为信息素挥发因子, $\Delta\tau(x, y, h)$ 为点 (x, y, h) 处的信息素增量, 它是所有经过点 (x, y, h) 的蚂蚁在此点释放的信息素总量, 计算如下式所示:

$$\Delta\tau(x, y, h) = \omega \times \xi_t \quad (12)$$

其中, ξ_t 表示进行第 t 次迭代之后所得最短路径的适应度, 其计算方法如下式所示:

$$\xi_t = \sum_{i=2}^r (\lambda \times \sqrt{1 + (x_i - x_{i-1})^2 + (h_i - h_{i-1})^2} + \mu \times h_i) \quad (13)$$

其中, i 表示点在路径中的次序, r 表示路径的长度, λ 和 μ 都是常数。

对以上步骤进行多次迭代之后, 蚂蚁就可以搜寻到在小块中从巢穴到食物的最短路径。但是, 最短路径不一定就是断层, 因为巢穴或者食物的位置可能是由噪声引起的。为了判断最短路径是否为断层, 我们设计了判断最短路径是否为断层的判别标准, 如下式所示:

$$\frac{Con}{r} < Th \quad (14)$$

其中, Con 是路径中样点幅度达到最大值的样点个数, Th 是设置的阈值。如果最短路径满足条件式 (14), 则判定为断层, 将其存储到结果矩阵 R 中, 否则, 判定为非断层, 不进行存储。

当对地震剖面正半部分中所有小块进行以上处理之后, 就实现了整个地震剖面中断层的识别。

3 实验和分析

为验证本文基于蚁群算法的断层识别方法的有效性, 本文对中国石油天然气股份有限公司提供的新疆某工区的地震数据进行了实验, 数据大小为 $300 \times 300 \times 1200$ 样点。PC 配置为: Windows7 (64 bit), 内存为 4GB, 实验工具是 Matlab2015a。本文方法在第 127 幅地震剖面上某一矩形块上的结果如图 9 所示, 与现有其他方法在第 127 幅剖面上的断层识别结果对比如图 10 所示。

以上结果中,图 9 中所示是本文方法在第 127 幅地震剖面上某一矩形块上的结果,图 10 是用不同方法在第 127 幅剖面上的断层识别结果对比。图 11 是本文方法和现有其他方法在每幅剖面上的时间消耗对比。

由图 9 可知,采用本文方法将地震剖面的正半部分作为蚂蚁爬行的三维地形时,断层位置信息得以保留,如图 9(b) 所示,保证了断层识别结果的准确性。在蚂蚁搜索从巢穴到食物之间的最短路径时,最初选择的路径不一定为最短路径,但经过多次迭代,搜索出的路径会越来越短,直到路径长度不再变化,如图 9(c) 所示,此时所得的路径最短,如图 9(d) 所示。搜索出最短路径之后,路径在样点时间和地震道号两个维度所确定的二维平面上的投影即为所求断层,如图 9(e) 所示。图 9 所示蚂蚁在地

震剖面矩形块上的断层识别过程,说明了本文算法在含有一个断层的地震剖面矩形块上进行断层识别的可行性和有效性。

由图 10 所示不同方法在第 127 幅地震剖面上的断层识别结果对比可知,C1 方法所得结果的信噪比较低,难以看出断层的形状,断层识别准确度较低。C2 方法所得结果中噪声得以降低,但断层信息依然不明显。C3 方法所得结果中断层信息更加突出,但均值效应较高。复值地震道方法所得结果中,断层较为清晰,准确度较高,但有很多地震层位信息残留。方向复值相关方法比复值地震道方法所得的断层更清晰、准确,但同样存在地震层位信息残留的问题。本文基于蚁群算法的断层识别方法识别出的断层在断层准确度、清晰度等方面,优于现有其他方法,从而验证了其有效性。

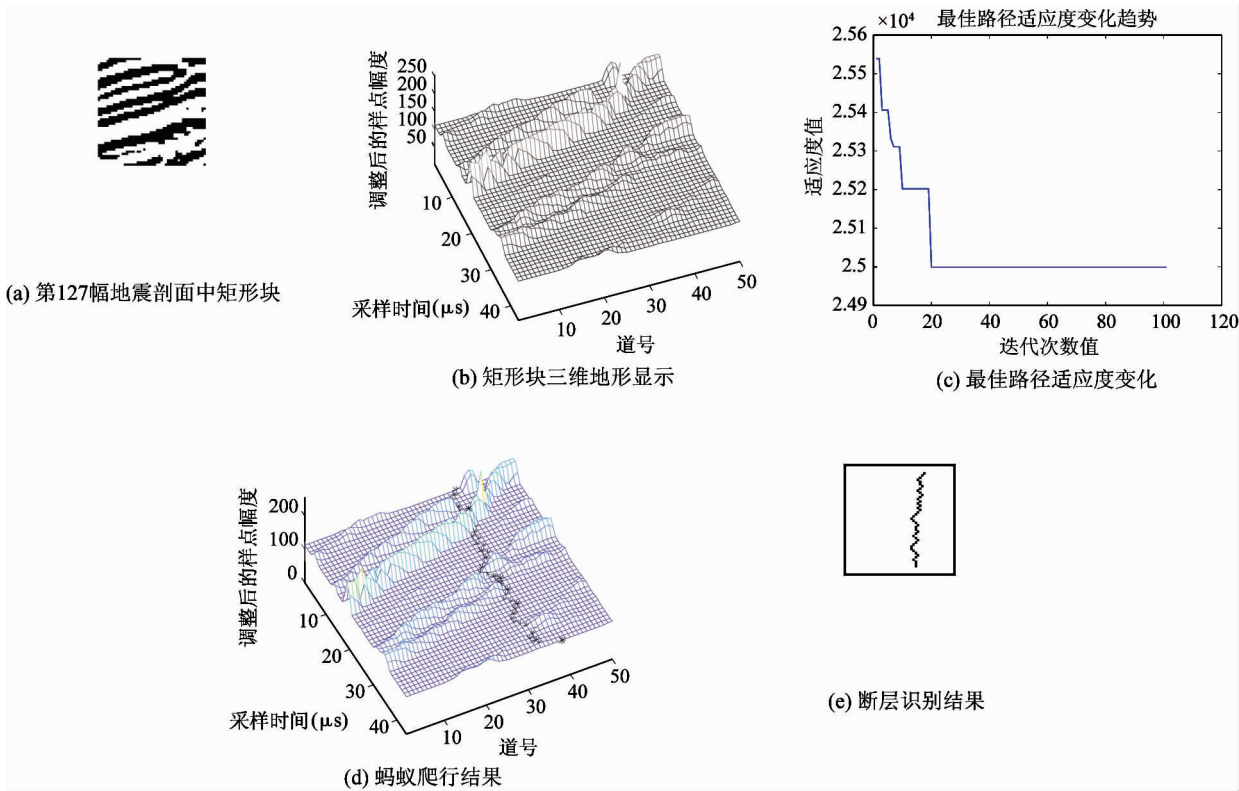


图 9 本文方法在第 127 幅地震剖面上某一矩形块上的结果

另外,由图 11 所示的时间消耗对比图可知,本文基于蚁群算法的断层识别方法运行速度最快,从

而其实时性得以验证。不同方法的平均时间消耗如表 1 所示。

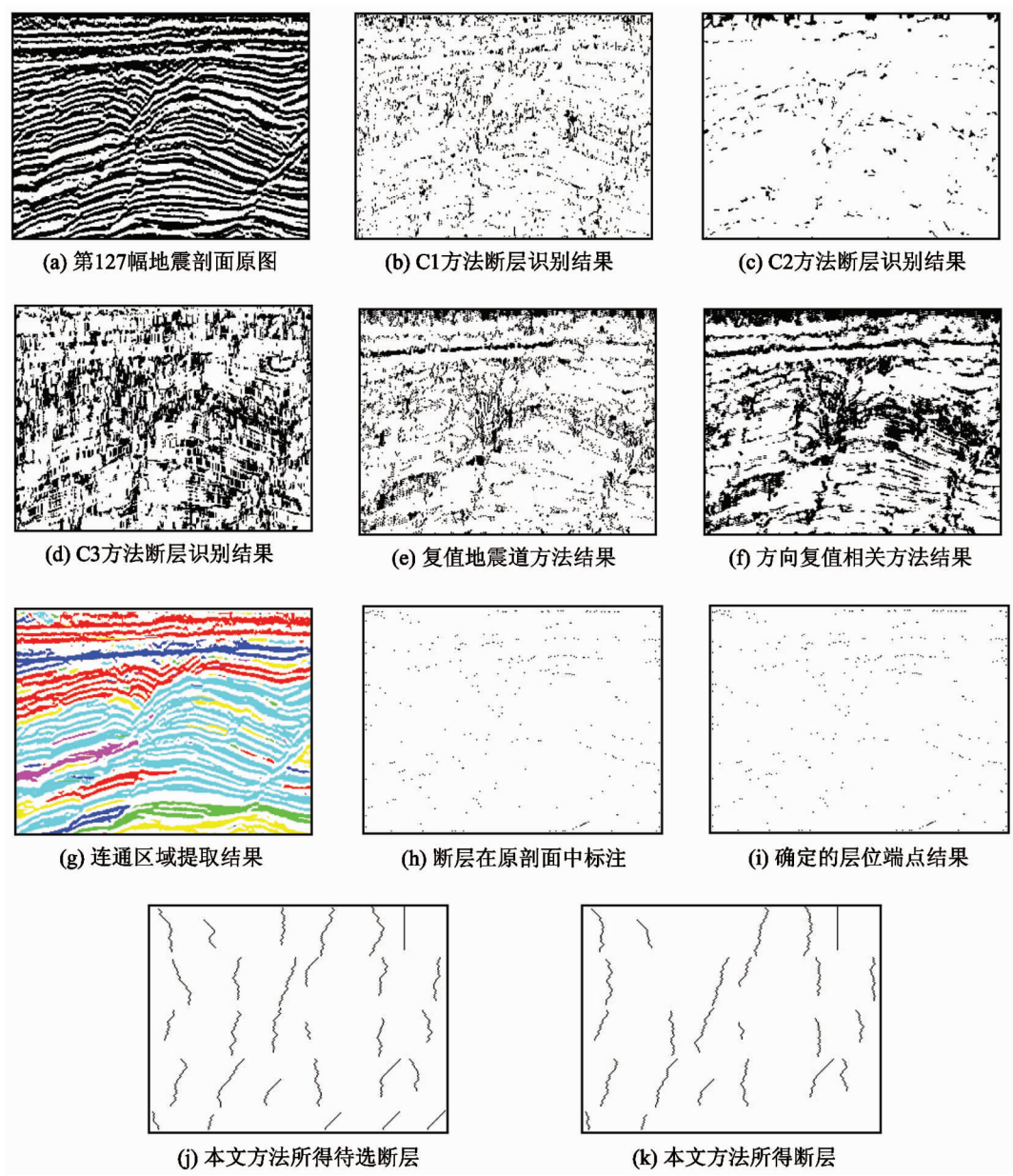


图 10 本文方法与现有其他方法在第 127 幅地震剖面上的断层识别结果对比

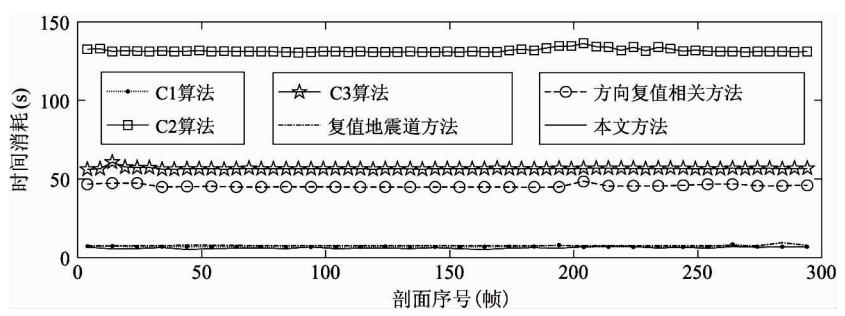


表 1 本文方法与其他方法的平均时间消耗对比

算法	平均时间消耗(s)
C1	6.7969
C2	126.2735
C3	57.0147
复值地震道方法	7.5954
方向复值相关方法	45.3892
本文方法	6.1132

由以上对比可知,本文所提基于蚁群算法的断层识别方法在有效性和实时性上都优于传统方法。

4 结 论

针对现有断层识别方法准确度较低、时间消耗较长的问题,受蚁群算法中蚂蚁通过信息素机制可以搜寻到巢穴和食物之间的最短路径的启发,本文提出了一种基于蚁群算法的断层识别方法。将地震剖面视作三维的地形,先通过地震剖面中正层位的水平端点来确定蚂蚁巢穴和食物的位置;然后,让蚂蚁从地震剖面每个矩形块中的巢穴爬行到食物,以所得最短路径在地震剖面上的二维投影作为断层;最后,通过实验验证了所提基于蚁群算法的断层识别方法的有效性。对所提算法进行优化,是进一步的研究方向。

参考文献

[1] Bahorich M S, Lopez J, Haskell N L, et al. Stratigraphic and structural interpretation with 3-D coherence[C]. In: Proceedings of the 65th Annual International SEG Meeting, Houston, USA, 1995. 97-100

[2] Marfurt K J, Kirlin R L, Farmer S L, Bahorich M S. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm[J]. *GeoPhysics*, 1998, 63(4): 1150-1165

[3] Gersztenkorn A, Marfurt K J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping[J]. *GeoPhysics*, 1999, 64(5): 1468-1479

[4] Gibson D, Spann M, Turner J. Automatic fault detection for 3D seismic data[C]. In: Proceedings of the VIIth Digital Image Computing: Techniques and Applications,

Los Alamitos, USA, 2003. 821-830

[5] Gibson D, Spann M, Turner J, Wright T. Fault surface detection in 3D seismic data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(9): 2094-2102

[6] Wang Z, AlRegib G. Fault detection in seismic datasets using hough transform[C]. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Florence, Italy, 2014. 2372-2376

[7] AlBinHassan N M, Marfurt K J. Fault detection using Hough transforms[C]. In: Proceedings of the 73rd Annual International Society of Exploration Geophysicists Meeting, Dallas, USA, 2003. 1719-1721

[8] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing (three edition) [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2008

[9] Wang Z, Long Z L, Alregib G, et al. Automatic fault tracking across seismic volumes via tracking vectors[C]. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Image Processing, Paris, France, 2014. 5851-5855

[10] Browaeys T J. Local complex-valued correlation of seismic phases. In: Proceedings of the 80th Annual International SEG Meeting (SEG2010), Denver, USA, 2010. 1423-1427

[11] Wang S X, Yuan S Y, Yan B P, et al. Directional complex-valued coherence attributes for discontinuous edge detection[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 129: 1-7

[12] Colormi A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies[C]. In: Proceedings of ECAL91-European Conference on Artificial Life, Paris, France, 1991. 134-142

[13] Gross S, Aron S, Denenbourg J L, et al. Self-organized shortcuts in the argentine ant[J]. *Naturwissenschaften*, 1989, 76: 579-581

[14] Randen T, Pedersen S I, Sønneland L, et al. Automatic extraction of fault surfaces from three-dimensional seismic data[C]. In: Proceedings of the 71st Annual International Society of Exploration Geophysicists Meeting, San Antonio, USA, 2001. 551-554

[15] Pedersen S I, Randen T, Sønneland L, et al. Automatic

fault extraction using artificial ants[C]. In: Proceedings of the 72nd Annual International Society of Exploration Geophysicists Meeting, Salt Lake City, USA, 2002, 512-515

[16] Pedersen S I, Skov T, Randen T, et al. Automatic fault extraction using artificial ants[J]. *Springer Berlin Heidelberg*, 2005, 7: 107-116

[17] Yan Z, Gu H M, Cai C G. Automatic fault tracking based on ant colony algorithms[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 51: 269-281

A seismic fault recognition method based on ant colony optimization

Ye Tao^{*}, Chen Lei^{**}, Xu Gang^{***}

(^{*} College of Computer, Qinghai Nationalities University, Xining 810007)

(^{**} Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

(^{***} CNC International (Chad) Co. Ltd, N’Djamena 999052, Republic of Chad)

Abstract

The problem of seismic fault recognition is studied, and aiming at the fact that current recognition techniques’ accuracy is lower, a new seismic fault recognition method based on ant colony optimization is proposed. The method can locate faults’ position precisely and extract them from seismic sections. Firstly, the method regards seismic horizons as connected components and uses the way of labeling to extract them. Secondly, it finds out the end point in horizontal direction of each seismic horizon. Thirdly, the whole seismic section is divided into several rectangle blocks, taking one top horizontal end point of each rectangle block as the ant nest and one bottom horizontal end-point of each rectangle block as the food in ant colony optimization. Besides that, the seismic profile is regarded as a three dimension terrain, and the seismic sample amplitude value is used to express the hight of some position. The optimal route in each block is the fault, in which the ant starts from the nest to find foods. The simulation certifies the proposed method’s effectiveness.

Key words: fault recognition, ant colony optimization, seismic section, connected component