

文章编号: 1001-1986(2019)06-0174-06

蚂蚁属性优化断层识别技术

李宏伟, 白雪莲, 崔京彬, 万忠宏, 袁世洪, 楚万长

(中国石油集团东方地球物理公司物探技术研究中心, 河北 涿州 072750)

摘要: 在震地地质勘探领域, 蚂蚁属性越来越普遍地用于断裂系统的快速识别, 而在实际应用过程中, 基于三维地震数据提取的蚂蚁属性, 不论是沿层切片(平面)还是剖面上往往显示杂乱无章, 对断裂系统的刻画与地震同相轴的分布特征并不对应, 致使实际应用效果较差。针对此普遍存在的现状, 研发出一套蚂蚁体断层快速识别的技术系列: 首先, 根据地质目标, 优化蚂蚁属性的终止标准值, 应用蚂蚁细线体的信息素二值化技术使蚂蚁体聚焦和收敛; 然后, 通过断层自动分离对断面的尺度与偏角等参数进行分析, 有效定义生成断面的规则及断面间的关系; 最终, 利用三维可视化平面-立体联立解释技术, 直观判断出研究区断裂系统空间分布的合理性, 进行断面细化编辑与调整, 自动按所需间隔提取断棱数据, 从而实现断层的自动追踪解释。通过应用此技术系列, 在研究区断裂系统识别, 尤其是大尺度断层快速自动追踪方面取得了很好的效果, 快速、准确地建立起了研究区断层解释格架。应用蚂蚁属性进行断层识别是一套技术系列, 利用典型剖面进行试验、优化计算参数是关键, 遵循这一思路计算出的全区蚂蚁属性, 才能获得良好的断层识别效果。

关键词: 蚂蚁体; 相干; 方差; 终止标准; 蚂蚁细线体; 断层识别

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.026



Fault identification technology of ant attribute optimization

LI Hongwei, BAI Xuelian, CUI Jingbin, WAN Zhonghong, YUAN Shihong, CHU Wanchang

(Research & Development Center of BGP, CNPC, Zhuozhou 072750, China)

Abstract: In the field of seismic geological exploration, the ant attributes is more and more widely used for rapid identification of fault system, and in the process of practical application, ant attributes based on 3D seismic data extraction are displayed either along strata slice(plan) or in section, the features of fault system and distribution characteristics of seismic events is not corresponding to the actual situation, the application effect is poorer, fault interpretation work is given priority to with manual interpretation backbone profile, unable to realize fault automatic tracking. In view of this widespread situation, this paper studies and analyzes the actual data and finds that simply extracting the attribute of ant body for fault interpretation cannot ensure the accuracy of fault identification. Therefore, a set of techniques for rapid fault identification of ant body was developed. First of all, according to the geological target optimization of ant attribute of termination criteria, application of the thin ant body of binarization technology makes the ant pheromone focus and converge, and then the fault surface and angle were analyzed by automatic fault separation, the rule of fault surface and the relationship between fault surfaces were effectively generated and defined, the final use of 3D visualization plane-solid simultaneous interpretation technology determined directly the rationality of the spatial distribution of fault system in the study area, sections were carefully edited and adjusted refiningly, fault edge was extracted automatically according to the needed intervals, so as to realize the automatic tracking of fault interpretation. Through the application of this series of techniques, good re-

收稿日期: 2019-03-11

基金项目: 国家科技重大专项课题(2017ZX05018-001); 中国石油集团软件开发重大专项项目(2016E-1004)

Foundation item: National Science and Technology Major Project(2017ZX05018-001); Major Software Development Project of CNPC(2016E-1004)

第一作者简介: 李宏伟, 1973 年生, 男, 四川泸县人, 硕士, 工程师, 从事地震资料解释与综合研究。E-mail: lihongwei2011@cnpc.com.cn

引用格式: 李宏伟, 白雪莲, 崔京彬, 等. 蚂蚁属性优化断层识别技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 174-179.

LI Hongwei, BAI Xuelian, CUI Jingbin, et al. Fault identification technology of ant attribute optimization[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 174-179.

sults have been achieved in the identification of fault systems in the study area, especially in the rapid automatic tracking of large-scale faults, and the framework for fault interpretation in the study area has been quickly and accurately established. The application of ant attributes to fault identification is a series of techniques. It is the key to test and optimize the calculation parameters using typical profiles. In order to obtain effective fault recognition results, the ant attributes in the whole area were calculated in accordance with this idea.

Keywords: ant body; coherence; variance; termination criteria; thin ant body; fault identification

随着地震解释技术在能源和开发领域的普及, 属性识别技术作为断层与裂缝识别、储层与油气预测的有效手段, 越来越受到研究人员的重视, 并在实际工作中得到了普遍应用。而其中的蚂蚁体识别技术, 更是在断层的快速自动追踪、微小断层的识别和研究断层间发育关系等方面, 有着明显的优势。

蚂蚁算法是 20 世纪 90 年代中期, 由意大利学者 Marco Dorigo 提出^[1-2], J. C. Parmee 等^[3]将蚂蚁算法首先应用到工程技术设计方面。目前, 蚂蚁算法主要包括 Ant-Q 算法^[4]、最大-最小蚂蚁算法 (MAX-MIN Ant System, MMAS)^[5]、AS 改进算法-ASrank^[6]和多群蚂蚁算法 (Multi Colony Ant Algorithms, MCAS)^[7]。2002 年, 由 S. Pedersen 等^[8]发表了应用蚂蚁追踪进行裂缝识别的方法, D. C. Sun 等^[9]利用谱分解技术与蚂蚁算法结合, A. Aqrabi^[10]利用改进三维 Sobel 滤波方法与蚂蚁算法结合实现了对小断层和裂缝的识别。近年来, 国内对于这一技术越来越重视, 乐群星等^[11]对蚂蚁算法的基本原理进行了分析, 认为随机寻优算法因其正反馈性、多 agent 协同性和并行性, 在很多方面表现出良好的算法性能。赵伟^[12]对三维地震数据进行断层识别的方法, 进行了算法剖析和研究; 王军等^[13]应用纵波振幅方位各向异性与蚂蚁追踪数据体结合, 进行了碳酸盐岩裂缝预测的尝试; 张瑞等^[14]应用分频蚂蚁追踪技术, 在深层地震资料信噪比较低的礁滩储层裂缝预测中取得了很好的效果; 史刘秀等^[15]提出了基于多道局部复值相干的蚂蚁体预测断层技术; 陈志刚等^[16]利用反射强度交流分量滤波技术, 对蚂蚁追踪的效果进行了改进, 提高了断层的识别精度; 张亚春等^[17]在蚂蚁属性体约束下进行了裂缝建模方法研究; 严哲等^[18]、隆雨辰等^[19]通过应用蚂蚁体属性, 对所研究区域的断层及裂缝进行了有效识别。蚂蚁体属性作为断层识别的有效工具, 正在被越来越多的研究人员所重视。然而, 在实际应用过程中, 直接利用简单计算的蚂蚁属性进行断层识别, 却达不到令人满意的效果, 不论是提取地层切片(平面)、还是在剖面上显示, 都显得杂乱无章, 对断裂系统的刻画与地震剖面特征并不对应, 致使实际应用效果较差, 断层解释工作还是以人工解释为主, 无法实现断层的自动追踪。鉴于此, 本文将在剖析蚂蚁

属性算法原理的基础上, 摸索出一套快速、简洁的蚂蚁属性断层自动识别的研究思路, 同时在实际应用过程中, 进行合理地参数优化试验, 蚂蚁属性才能成为断层自动识别、尤其是大尺度断层自动解释的有利工具。

1 方法原理

蚂蚁算法原理就是模拟自然界中的蚂蚁, 在觅食过程中, 选择最短路径的蚂蚁, 将比选择较长路径的蚂蚁提前到达。于是, 较短路径将比较长路径用更多的信息素标记, 受信息素影响, 下一只蚂蚁很可能选择较短的路径觅食, 从而达到蚁群全局寻优目的。根据蚂蚁算法的原理, 能够反映断层信息的地震属性体, 在断层处表现为属性值的局部极大或极小。本文中应用的蚂蚁体属性就是基于相干和方差属性, 在断层处表现为相干值的局部极小与方差值的局部极大。基于此特点, 可以使用方向性蚁群算法, 对相干和方差数据体进行断层追踪与识别。将三维相干和方差数据体看成是一定数量的垂直剖面或者是水平切片按采样间隔的组合, 在二维剖面或者切片上随机放置大量的蚂蚁, 然后蚂蚁按照预定规则开始追踪, 蚂蚁追踪的每一条路径都可以看成为似断层, 而信息素的浓度代表着似断层的可信度, 信息素越高, 似断层为真断层的可信度就越高, 反之则越低。本次研究是在中油软件公司研发的 GeoEast 解释系统下完成的。

1.1 蚂蚁初始分布

选择相干或者方差体, 将垂直、水平两个方向上的二维数据, 分为若干个互不相交的 $n \times n$ 的小数据块, 在每块中按照一定的概率放入一只蚂蚁。在这个小块中第 i 个数据点被选中的概率公式为:

$$P_i = \frac{1 - C_i}{\sum (1 - C_j)} \quad (1)$$

式中 C_i 和 C_j 表示归一化后的第 i 个和第 j 个数据点的相干值, 其中 $j=1, 2, \dots, n \times n$ 。由此式可以看出, 相干值越小, 被选中的概率就越大, 避免在其他区域进行无意义的追踪。

1.2 追踪方向估计

①以蚂蚁初始点为中心提取出一个为 $w \times w$ 的

小块。

②使用式(2)计算每个数据点的梯度 $G_x(x,y)$ 和 $G_y(x,y)$:

$$\left[G_x(x,y), G_y(x,y) \right]^T = \left[\frac{\partial I(x,y)}{\partial x}, \frac{\partial I(x,y)}{\partial y} \right]^T \quad (2)$$

式中 $I(x,y)$ 为该点的属性值。

③用式(3)计算此小数据块的梯度 :

$$\left[G_{Bx}, G_{By} \right]^T = \left\{ \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^w \left[\frac{\partial I(x,y)}{\partial x}, \frac{\partial I(x,y)}{\partial y} \right]^T \right\} \quad (3)$$

④用式(4)计算此数据块的主方向 :

$$\theta = \frac{1}{2} \pi + \begin{cases} \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{G_{By}}{G_{Bx}} \right) & G_{Bx} > 0 \\ \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{G_{By}}{G_{Bx}} \right) \pm \pi & G_{Bx} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

1.3 断层线追踪

估计出蚂蚁的追踪方向 θ 后, 就可以确定蚂蚁的候选搜索范围, 蚂蚁开始进行断层追踪。通过追踪步长、正常步数、允许偏差数和终止标准值这 4 个参数来控制蚂蚁追踪。在实际使用中, 需要人为控制的参数是终止标准, 其他参数经过多次试验之后已经在程序中被限定。终止标准设定为当被记录的异常步与蚂蚁所走过的总步数的比值大于终止标准 St , 蚂蚁追踪就被终止, 即 $Step_abnormal/Step_total > St$ 。终止标准 St 的大小直接决定了追踪结果连续性的好坏。 St 越大, 追踪结果连续性就越好; 反之, 追踪结果的连续性就越差。如果没有达到终止标准, 则根据蚂蚁的追踪步长和搜索范围确定蚂蚁的下一步搜索候选节点, 令 R 为当前数据点搜索范围内候选点的集合, 蚂蚁到候选点 $(i,j) \in R$ 的转移概率为:

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

式中 $\tau(i,j)$ 、 $\eta(i,j)$ 和 $\tau(u,v)$ 、 $\eta(u,v)$ 分别表示点 (i,j) 与 (u,v) 的信息素与启发信息, α 与 β 分别为信息素与启发信息的控制因子。启发信息定义为:

$$\eta(i,j) = 1 - c(i,j) \quad (6)$$

式中 $c(i,j)$ 为点 (i,j) 的相干值。通过式(6)可以看出, 在初始信息素相同的情况下相干值越小的点被选中的可能性就越大。根据蚁群算法的正反馈机制, 可以使蚂蚁的搜索路径尽快收敛到断层上。如果所有的蚂蚁都完成追踪, 则转入下一步, 否则继续进行追踪。

1.4 信息素更新

当所有蚂蚁完成一次搜索过程后, 数据点 (i,j) 上的信息素按式(7)更新:

$$\tau_{(i,j)} = \begin{cases} \tau_{(i,j)} + \Delta\tau_{(i,j)}, & \text{if } \tau_{(i,j)} + \Delta\tau_{(i,j)} < \tau_{\max} \\ \tau_{\max} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

其中, τ_{\max} 为信息素上限, $\Delta\tau_{(i,j)}$ 是本次循环中数据点 (i,j) 上信息素的增量。

$$\Delta\tau_{(i,j)} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{(i,j)}(k) \quad (8)$$

其中, m 本次循环经过此路径蚂蚁数量, $\Delta\tau_{(i,j)}(k)$ 表示第 k 只蚂蚁在此次循环中在此路径上留下的信息量, 其取值与蚂蚁搜索的路径长度成正比。

$$\Delta\tau_{(i,j)}(k) = cL(k) \quad (9)$$

式中 c 为信息素更新系数, $L(k)$ 是第 k 只蚂蚁在此次循环所搜索路径的长度, 由于噪声信息是随机的、无规律的, 因此蚂蚁行经该点后遗留的信息素较小; 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。

依次完成上述步骤, 则称为一次迭代过程。如果迭代次数达到设定最大迭代次数, 则转到下一步, 否则迭代次数加 1 并且跳回到追踪方向估计再进行依次计算, 完成多次迭代过程。通过对所有二维相干或方差剖面, 进行方向约束蚁群追踪形成信息素剖面, 最终合成蚂蚁自动追踪三维数据体。

2 应用实例分析

通过对蚂蚁算法原理的分析发现, 在应用蚂蚁体进行断层识别的过程中, 一定要对关键参数进行具体的试验分析, 制定有效的技术思路来进行研究, 才能更快速、准确地识别断层。为了更有效地说明整个蚂蚁体识别断层的过程, 应用实际三维地震数据来进行具体分析。

2.1 提取蚂蚁体属性

在提取蚂蚁体属性前, 先要观察原始地震剖面的断裂信息, 着重观察目的层断裂及其所关注的微小断裂的波组特征。由图 1 可见, A 、 B 、 C 、 D 四

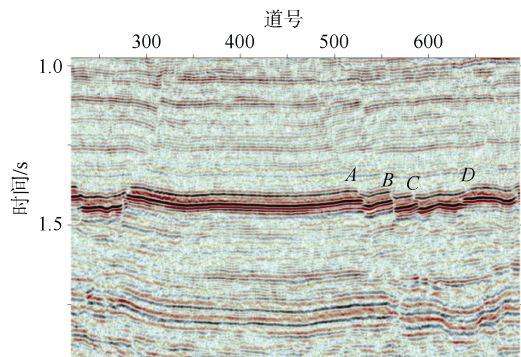


图 1 研究区三维地震主测线剖面
Fig.1 3D seismic profile of the main seismic survey line in the study area

点为研究区明显的断层发育区。应用属性分析模块,提取蚂蚁体属性,选取事先提取的、能够反映断裂分布特征的相干体(特征值相干)或者方差体数据作为基础数据,在参数界面上,主要对参数最大、最小终止标准值进行调整;选择某一主测线或任意线的典型剖面进行试验分析,根据地质目标,保留和优化所需要的断层信息。确定参数的原则就是提取的蚂蚁体数据,

在不丢失目的层及所关注的断裂信息的基础上,尽量减少与断裂无关的信息。

由图 2 可见,两种参数试验结果,都能对主要断层进行刻画,相对于图 2a,图 2b(应用优化终止标准值提取的蚂蚁体)对断裂的分布形态刻画得更清晰,同时消除了许多与断裂无关的成分,这样的蚂蚁体才更有针对性,更能有效地识别断层。

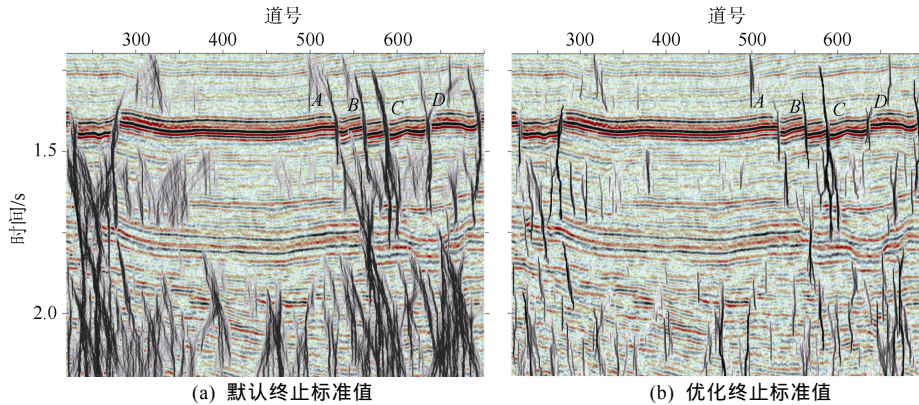


图 2 蚂蚁体终止标准值试验结果剖面对比

Fig.2 Profile comparison of termination criteria value test result of ant body

2.2 蚂蚁体细线化

由于蚂蚁体属性记录的信息,还存在许多与断层无关的似断层点轨迹,需要通过蚂蚁体细线化功能,将蚂蚁体中记录的似断层点集,通过“膨胀、腐蚀”等处理,获得连续而清晰的断层点轨迹,并记录输出成细线化体。这一部分功能主要参数为信息素二值化阈值,即将蚂蚁体二值化为 0、1 的门限值。同样,挑选典型剖面试验线进行参数试验,在蚂蚁体数据的基础上,调整二值化阈值,保留和优化所需要的断层信息。由剖面可见(图 3),蚂蚁体细线化后,A、B、C、D 四个断层发育处,明显使断裂信息更加聚焦,排除了蚂蚁体本身断裂信息的多解性。确定二值化阈值后,应用此参数计算得到整个研究区的蚂蚁细线体。由图 4 地层切片可见,断裂点集分布清晰,已经可以明显地分辨出 A、B 两套断裂的展布形态和发育方向。

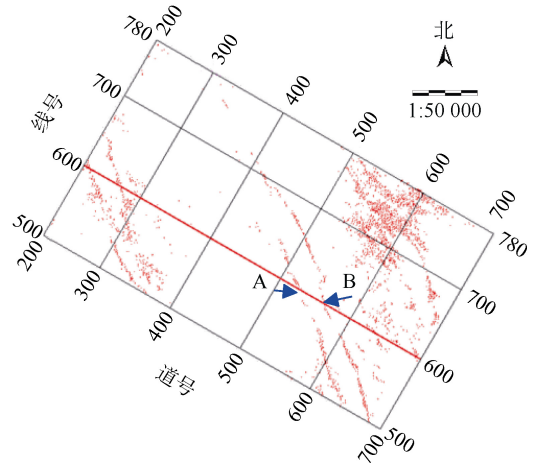


图 4 蚂蚁体细线化地层切片

Fig.4 Stratal slice of thin ant body

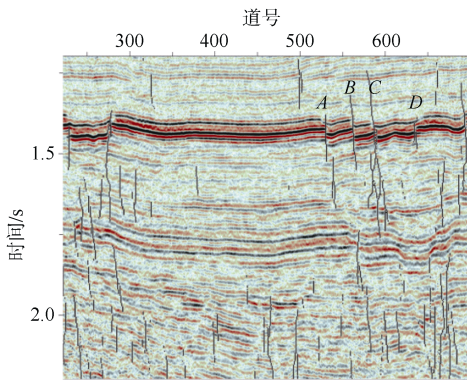


图 3 蚂蚁体细线化剖面

Fig.3 Profile of thin ant body

2.3 断层自动分离

断层自动分离是在蚂蚁细线体数据基础上,从中分离出代表断裂面的断层点集及提取断层产状要素信息。这些点集可在三维可视化场景中进行质控和编辑,最终形成断层。具体步骤为:a. 确定断层相交分离参数范围,将蚂蚁体细线化信息点投影到赤平投影网络的球面坐标系统中,根据可确定研究区断层产状的方位角和倾角范围,从细线化体中分离出满足条件的断层点集。b. 定义点连面规则,设定相邻点线、道和时间三个方向的最大间隔,来控制断层点与点之间的距离,确定二者是否属于一个断面。c. 定义断面间关系,需要设定三项主要参数:①确定相邻断面在线、道和

时间三个方向的最大间隔,大于此间隔的相邻断面不合并;②偏角相邻两断面之间倾角差的绝对值,大于此参数,相邻断面不合并;③断面联合规模参数形成断面的点数小于此值将被删除。**d.** 控制断面规模,形成断面后,保存点数大于此参数的断面,即此值越大生成断面的尺度就越大,反之,则小尺度断面就越多。至此,就完成了断层自动分离的过程。

2.4 断面拆分、合并与断棱提取

自动计算生成断层面之后,还需进行人机交互断面编辑,使得生成的断面间的交切关系更为合理。**a.** 在三维可视化中显示生成的断面,参考相干或者其他能够更好反映断层信息的属性时间切片(图 5),平面体相结合,对各个断层面进行质控,对断层点集进行编辑,剔除异常点,合并或拆分不合理的断面组合,重新生成更符合地质规律的断面关系。**b.** 应用自动提取断棱功能,按照用户自定义的线、道及采样间隔,提取所需的断棱信息(图 6b),最终实现蚂蚁体断层的自动追踪。通过地震剖面与相干属性切片椅状显示可见(图 6a),地震反射同相轴在 A(紫)、B(红)、C(绿)、D(蓝)四条断层处的分布特征,与自动追踪的结果一一对应,断层自动追踪的准确性很高,完全可以满足地震地质解释的要求。

根据以上蚂蚁体断层自动追踪的全过程,总结出整个技术系列的研究思路:**a.** 应用地震数据计算相干

体或方差体;**b.** 在相干体或方差体的基础上,根据地质要求选择试验线优化蚂蚁属性的终止标准值,使生成的蚂蚁体属性能更好地刻画裂缝或断层信息;**c.** 应用蚂蚁细线体的信息素二值化技术使蚂蚁体聚焦和收敛;**d.** 通过断层自动分离技术,有效地定义生成断面的规则及断面间的交叉关系;**e.** 利用三维可视化显示,判断断裂系统空间分布是否合理,并进行相应的断面细化编辑与调整;**f.** 自动按照所需间隔提取断棱数据,从而实现断层的自动追踪解释。按照这一思路进行断裂系统的分析,可以使研究人员尽快地获得研究区的断裂信息,在地震资料解释前期,很快完成断层解释工作,迅速搭建起研究区断裂地层格架,大大节省了断层解释的时间,提高了效率。

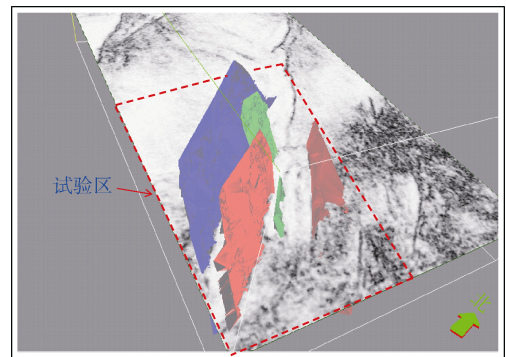


图 5 研究区断层面三维立体显示
Fig.5 3D graphics of the fault surface in the study area

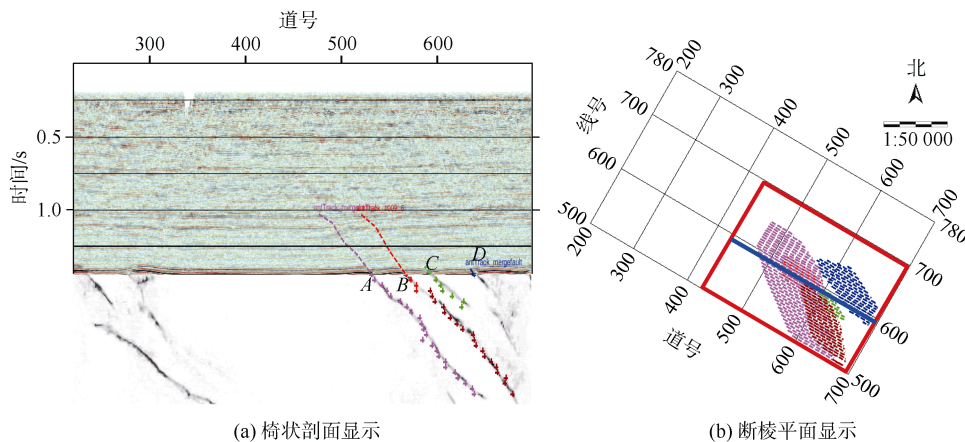


图 6 自动提取断棱剖面和平面对比
Fig.6 Profile and plan comparison of automatic extraction of fault segment

3 结论

a. 利用蚂蚁体进行断层识别是一套技术系列,遵循:提取蚂蚁体属性—蚂蚁体细线化—断层自动分离—断面合并—提取断棱的蚂蚁体自动追踪研究思路,可大幅提高断层识别的准确性。

b. 利用典型剖面试验线进行主要参数试验,确定试验参数的原则为:不丢失目的层及所关注的断

裂信息的基础上,尽量减少与断裂无关的信息,达到应用效果后,再应用于整个研究区数据体,进行蚂蚁体属性计算。

c. 蚂蚁体细线化是使蚂蚁体聚焦和收敛的有效手段,断层自动分离能够有效地定义点连面规则及其断面之间的关系。

d. 在蚂蚁体自动追踪断层结果的基础上,利用三维可视化平面—立体联立解释,能够更快速、直观

地判断出, 研究区断裂分布以及断层间空间关系的合理性, 然后, 自动按所需间隔提取断棱, 最终实现断层自动追踪解释用时短、准确性高的目的。

参考文献

- [1] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Positive feedback as a search strategy[R]. Milan: Milan Politecnico di Milano, 1991: 91-106.
- [2] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant System: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern, 1996, 26(1): 29-41.
- [3] PARMEE I C, VEKERIA H, BILCHEV G. Role of evolutionary and adaptive search during whole system, constrained and detailed design optimization[J]. Engineering Optimization, 1997, 29(1/2/3/4): 151-176.
- [4] GAMBARELLA L M, DORIGO M. Ant-Q: A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem[C]//Proceedings of the Twelfth International Conference on Machine Learning. Palo Alto, California: Morgan Kaufmann Publishers, 1995: 252-260.
- [5] STUTZLE T, HOOS H. MAX-MIN ant system and local search for the traveling salesman problem[C]//Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. New York: IEEE Press, 1997: 309-314.
- [6] BULLNHEIMER B, HARTL R F, STRAUSS C. A new rank based version of the ant system: A computational study[J]. Central European Journal for Operations Research and Economics, 1999, 7(1): 25-38.
- [7] MIDDENDORF, MARTIN. Multi colony ant algorithms[J]. Journal of Heuristics, 2002(5): 305-320.
- [8] PEDERSEN S I, SKOV T. Automatic fault extraction using artificial ants[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2002, 21: 512-515.
- [9] SUN D S, LING Y. Application of spectral decomposition and ant tracking to fractured carbonate reservoirs[J]. EAGE Extended Abstracts, 2011, B035: 23-26.
- [10] AQRAWI A. Improved fault segmentation using a dip guided and modified 3D Sobel filter[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30: 999-1003.
- [11] 乐群星, 魏法杰. 蚂蚁算法的基本原理及其研究发展现状[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2005, 18(4): 5-8.
- YUE Qunxing, WEI Fajie. New stochastic optimization algorithm-ant system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics(Social Sciences Edition), 2005, 18(4): 5-8.
- [12] 赵伟. 基于蚁群算法的三维地震断层识别方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [13] 王军, 李艳东, 甘利灯. 基于蚂蚁体各向异性的裂缝表征方法[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5): 763-769.
- WANG Jun, LI Yandong, GAN Lideng. Fracture characterization based on azimuthal anisotropy of ant-tracking attribute bodies[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5): 763-769.
- [14] 张瑞, 文晓涛, 李世凯, 等. 分频蚂蚁追踪在识别深层小断层中的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 350-356.
- ZHANG Rui, WEN Xiaotao, LI Shikai, et al. Application of frequency division ant-tracking in identifying deep minor fault[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 350-356.
- [15] 史刘秀, 王静波, 张如伟, 等. 复值相干模量蚂蚁体技术[J]. 断块油气田, 2015, 22(5): 545-549.
- SHI Liuxiu, WANG Jingbo, ZHANG Ruwei, et al. Ant tracking technology based on multichannel local complex-valued coherence[J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2015, 22(5): 545-549.
- [16] 陈志刚, 吴瑞坤, 孙星, 等. 基于反射强度交流分量滤波的蚂蚁追踪断层识别技术改进及应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 1973-1977.
- CHEN Zhigang, WU Ruikun, SUN Xing, et al. Improvement and application effect of ant-tracking fault identification technique based on reflection strength AC component filtering[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(5): 1973-1977.
- [17] 张亚春, 尹太举, 周文. 在蚂蚁属性体约束下的裂缝建模方法研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2016, 13(14): 16-21.
- ZHANG Yachun, YIN Taiju, ZHOU Wen. The fracture modeling in the constraint of ant tracking attribute[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2016, 13(14): 16-21.
- [18] 严哲, 顾汉明, 蔡成国, 等. 利用方向约束蚂蚁群算法识别断层[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(4): 614-620.
- YAN Zhe, GU Hanming, CAI Chengguo, et al. Fault identification by orientation constraint ant colony algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(4): 614-620.
- [19] 隆雨辰, 李俊, 王志章, 等. 综合蚂蚁体及曲率属性的断裂识别方法及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(4): 6-15.
- LONG Yuchen, LI Jun, WANG Zhizhang, et al. Fracture identification methods and applications of integrated ant body and curvature attribute[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(4): 6-15.

(责任编辑 聂爱兰)