

# Seismic Characterization Technology and Application of Low-Grade Faults

Weiping Zhao, Hongjun Fan, Wentao Cai, Fei Chen

Research Institute, CNOOC, Beijing  
Email: zwpcug@163.com

Received: Aug. 10<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 24<sup>th</sup>, 2020; published: Aug. 31<sup>st</sup>, 2020

---

## Abstract

Regional macroscopic fault system analysis is the focus of the exploration stage. In the stage of oil field project design, implementation and adjustment, it is necessary to further deepen the understanding of faults, especially the identification of low-grade faults. Accurate and reasonable fault identification is the key factor to carry out the structure of oil and gas field and determine the injection-production well network. The conventional fault identification is usually done manually on the 3D seismic data body or only by means of the variance body for macroscopic guidance, so the accuracy is difficult to meet the development needs. In this study, we applied a median filter and spectral whitening to enhance the data quality and remove noise resulted from acquisition and processing effects. We focus on coherence and curvature attributes extracted from the post-stack 3D seismic data acquired in A Oilfield. On this basis, the ant cube is calculated to describe the fault and fracture zone of low order stage. A total of 27 faults have been identified in the study area; the direction is mainly in North East-South West. Seismic data conditioning and seismic attribute analyses applied to the 3-D seismic data effectively increase our understanding of the reservoir complex and help detect and identify low-grade faults and fracture zones in the study area.

## Keywords

Low-Grade Fault, Fault Enhancement, Coherence, Curvature, Ant Cube

---

# 低序级断层地震描述技术与应用

赵卫平, 范洪军, 蔡文涛, 陈 飞

中海油研究总院有限责任公司, 北京  
Email: zwpcug@163.com

收稿日期: 2020年8月10日; 录用日期: 2020年8月24日; 发布日期: 2020年8月31日

## 摘要

区域宏观断裂系统分析是勘探阶段的研究重点,在油田方案设计、实施、调整阶段,需要进一步加深对断层的认识,尤其是低序级断层的识别。准确合理的断层识别是落实油气田构造和确定注采井网的关键因素。常规的断裂识别通常是在三维地震数据体上进行人工识别或者仅借助于方差体进行宏观指导,精度难以满足开发需求。在本研究中,采用中值滤波和谱白化技术来提高数据质量,消除采集和处理带来的噪声。重点研究了A油田的叠后三维地震数据中提取的相干性和曲率属性,在此基础上计算蚂蚁体以描述低序级的断层和裂缝带。研究区共识别出27条断层,主要呈北东-南西走向。对三维地震资料的解释性处理和属性分析,有效地提高了我们对储层复杂性的认识,有助于探测和识别研究区的低序级断层和裂缝带。

## 关键词

低序级断层,断层增强,相干体,曲率体,蚂蚁体

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

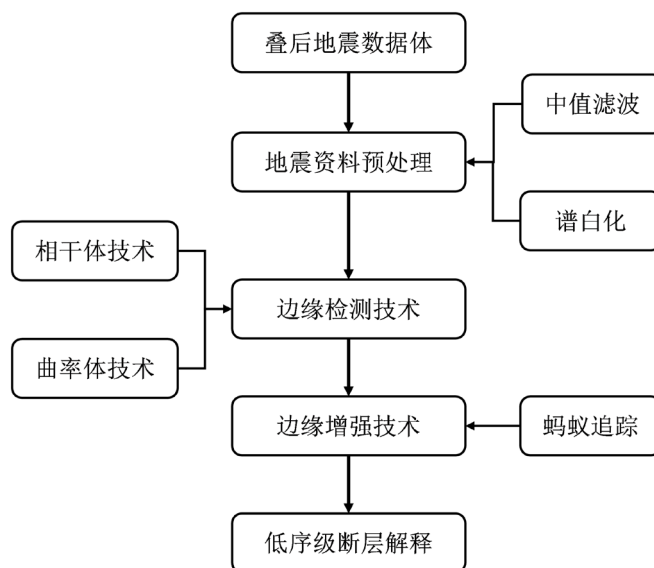
随着地震技术水平的提高和油田研究的深入,油田研究的重点更多地转向储层研究,但是在油田开发实施过程中,构造问题仍然是不可忽视的问题,尤其是低序级断层的研究,该研究关系到油田开发的效果和风险的规避。传统的断裂研究主要采用相干体或方差体技术进行大尺度的断裂识别,其优点是能较好地识别宏观断裂系统,缺点是对次一级的小断裂难以很好的识别[1] [2] [3] [4] [5]。蚂蚁追踪技术作为一种全新的技术,在小断层识别上,算法更加先进,识别率更高,已经逐渐在各油田进行推广应用,取得了较好的效果。

渤海A油田位于渤海中部海域石臼坨凸起中部,西临秦皇岛油田,北靠京唐港。区域上,郟庐断裂的西支呈北东向穿过该区,由于盆地构造运动持续不断以及压扭应力作用强烈,使得断裂系统比较复杂,构造相对破碎。油田主力油组主要发育在明化镇组下段,沉积环境以浅水三角洲相和河流相为主,埋深在800~1350米。在油气田勘探开发过程中,断层识别至关重要,因为断层控制油气藏的形成、分割流体系统影响注采井网部署,因此断层解释的准确性和合理性直接影响构造成图的精度和开发方案的设计。针对研究区断裂复杂的特点,作者对原始地震资料采用断层增强的解释性处理,然后提取相干体等边缘检测属性体,得到宏观断裂发育展布特征,最后采用先进的蚂蚁追踪技术,精细刻画影响油田开发的小断层。

## 2. 低序级断层地震描述技术

人们早就认识到,地震属性可以揭示隐藏在地震数据中的特征。在数以百计的地震属性中,相干性或相似性和曲率被证明是解释结构不连续性的最有效的属性。本研究的目的是利用地震属性系统地确定A油田的断层和裂缝,并更好地理解它们与储层的关系。

在本研究中,表征和增强断层解释的程序包括地震信号特征增强处理和地震属性分析。所使用的工作流程详见图1。



**Figure 1.** Workflow used in the processing A Oilfield data conditioning and seismic attribute analysis

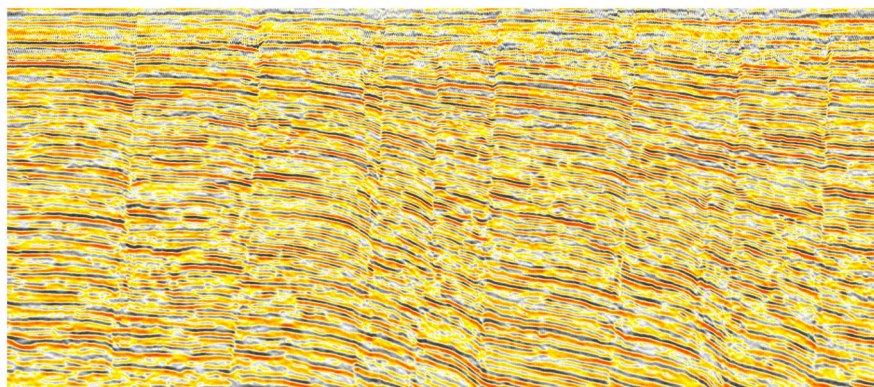
**图 1.** A 油田地震增强处理和断层地震属性分析流程

## 2.1. 叠后断层增强技术

由于原始地震数据存在噪声，如果直接在原始地震数据体上进行断层识别会产生较大误差，因此，在进行断层自动识别之前，应该首先要对三维地震数据体进行地震边缘增强处理[6]。

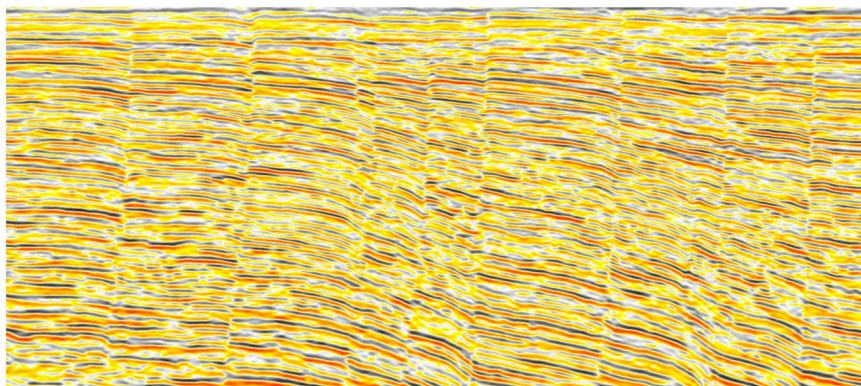
本研究中用于检测不连续性的地震属性通常对噪声敏感。以前的研究表明，根据地震数据计算的大多数属性仅与输入的质量相匹配。由于地震数据采集和处理过程中的诸多因素，数据质量随深度的增加而降低。尽管对叠前地震数据进行了仔细的处理，随机噪声、采集相关噪声和处理相关噪声仍然存在于叠后地震数据中。在任何属性分析之前，必须去除采集和处理过程中产生的不必要的信号(噪声)，并提高数据分辨率。我们使用数据谱白化方法来增强数据的分辨率。数据谱白化主要利用低频中包含的信息对高频进行校正和预测，提高地震数据的分辨率，而不会给原始数据增加任何噪声。中值滤波器也应用于叠后数据，并用作噪声滤波器。在提取属性以提高分辨率之前，每次都使用了上述两个处理环节[7]。

图 2 是渤海 A 油田原始地震剖面图，可以看出噪音较强，使得断层断点被模糊化了，通过断层增强处理技术之后，一定程度突出了断点信息，如图 3 所示，断面更为清晰。



**Figure 2.** Raw seismic data

**图 2.** 原始地震数据



**Figure 3.** Seismic data smoothing (fault strengthening)  
**图 3.** 地震平滑处理(断层加强)

## 2.2. 相干体技术

相干体技术是 20 世纪 90 年代兴起的一种定量计算波形相似度的技术,通过地下断层或者岩性变化,导致地震体的波形产生变化,局部波形不连续,从而在相干数据中产生异常,突出不连续性。通过相干属性,可识别出断层、裂缝、岩性变化等地质现象,对复杂断裂系统中低序级断层的解释及落实断层组合提供强大工具。

相干体利用倾角和方位角进行计算,量化了空间和时间内局部地震波形相似性。该计算过程提供了准确的地震波形空间变化的图像,可以很容易地与地质特征和沉积环境相关联。断层和断裂系统现在可以在空间上成像,并直接从相干体三维空间中获取信息,而不需要在选定的剖面上进行繁琐和极其主观的解释,然后连接所有解释的断层线以实现完整的断面图。相干体计算结果的质量取决于选择指定倾角约束、时间和空间步长和处理算法的最佳参数[8]。

图 4 是在断层增强处理基础上提取的相干体沿层切片,从切片上可以看出大的断层均被很好的刻画出来了,但是伴生的一些小断层却不是很清晰,这就需要做进一步处理。



**Figure 4.** Plane slice of coherence cube  
**图 4.** 相干体平面沿层切片属性

## 2.3. 曲率体技术

曲率属性作为地震几何属性的一种,近年来在地震资料解释方面得到了迅速的发展和应用。曲率属性用于描述地质体的几何变化,与地震反射体的弯曲程度相对应,对岩层的弯曲、褶皱和裂缝、断层等反应敏感,是寻找地层构造特征的有效手段。

在一般意义上, 曲率是衡量一个表面在某一特定点上有多大程度变形的指标。表面变形越大, 其曲率越大。通过将这种被认为是弯曲和褶皱的结构变形的定量观测与更传统的断层图像相结合, 地球科学家可以使用建立良好的结构变形模型与良好的控制相结合, 来预测古应力和有利于自然裂缝形成的区域[9]。曲率属性往往从地震振幅数据体中提取, 需要注意参数的设置。首先需要解释人员对地震体最大倾角和倾角扫描步长进行参数设置, 另外需要一个带通滤波器, 用于去除不必要的高频和低频信息。用于比较相邻地震道的纵向时窗需合理设置, 用于描绘细微的构造空间变化特征, 过大或过小的时窗均不推荐。基于地下地质结构、断层发育模式和断距大小能产生不同的曲率属性, 选取合适的纵向时窗, 以获得最佳的结果。

平均曲率属性(图 5)包含了大量不连续信息, 边缘检测效果较好, 方向为北东-南西走向。这种方式不仅放大了构造解释中的断层, 而且针对微小层面的变形也有所刻画, 是对地震综合解释的一定补充。

图 6 为平均曲率属性的剖面图, 可以看到断层的刻画较为清晰, 该区主要呈现相对高角度的断层, 横向上也显示了层面的挠曲特征。

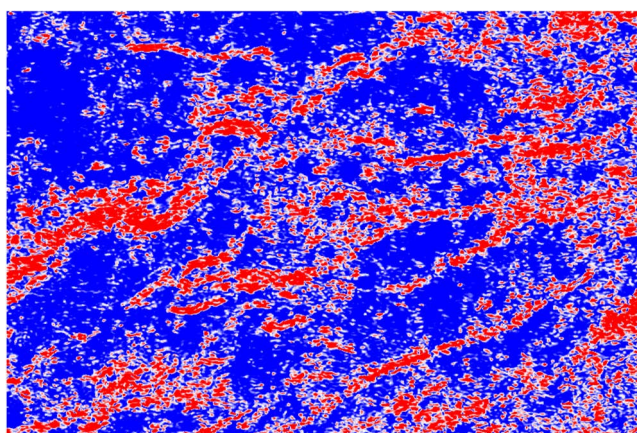


Figure 5. Average curvature attributes slice along layers  
图 5. 平均曲率属性沿层切片

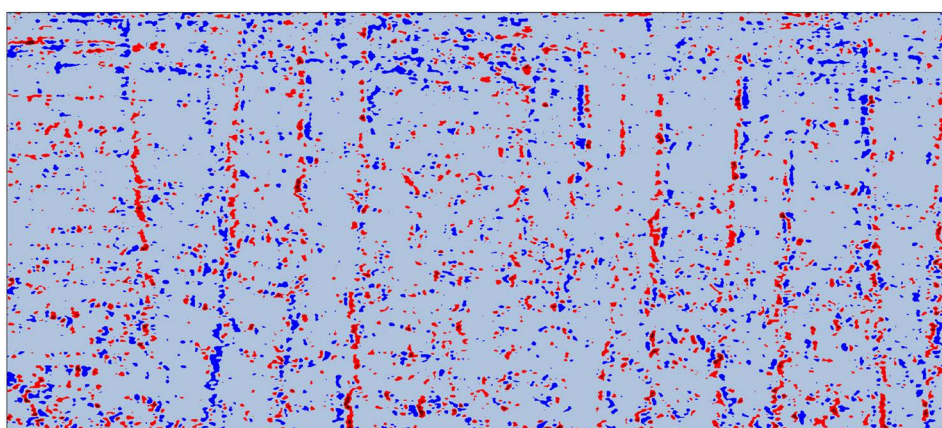


Figure 6. Profile of average curvature attribute  
图 6. 平均曲率属性剖面图

## 2.4. 蚂蚁追踪技术

蚂蚁算法是模拟自然界中真实蚁群的觅食行为而产生的一种新型仿生类优化算法[10]。蚂蚁运动的时候, 将一种叫做外激素的物质留在其行进路径上作为信息进行传输, 此物质能被其它蚂蚁遇到时察觉,

作为运动方向指引,大量蚂蚁的群体行为便显示出信息正反馈特征:蚂蚁选择相应路径概率大小依赖于走过该路径的蚂蚁数量多少。应用于地震资料解释中的原理如下:在地震数据体中播撒大量的蚂蚁作为种子,在属性体中发现满足预设断裂条件的蚂蚁将释放某种信号,引诱其它的蚂蚁集中在该处对其进行追踪,直到完成该断裂的追踪与识别为止。而其它不满足断裂条件的痕迹将不进行标注,如此迭代反复,得到断层清晰、精度高的蚂蚁体。

蚂蚁追踪算法相对于相干体或者方差体算法,更加能突出地震数据相邻道的差异性,即对不连续性更加敏感,因此其精度更高。经过前人研究总结分析得到,计算蚂蚁体最好在相干体或者方差体上做,而不是基于原始地震数据。

利用常规三维地震数据体生成蚂蚁属性体进行断层识别的一般方法和步骤如下[11]:1) 叠后地震资料预处理。主要采用多种滤波方法来增强地震有效信号,如中值滤波、倾角滤波及构造平滑处理技术等,降低噪音干扰,以便为不连续性检测提供高保真的数据基础。2) 地震数据“边缘”检测技术。寻找地震数据中的间断线,借助于一些技术手段对不连续性进行增强,主要包括相干体或方差体技术,形成反映断层宏观特征的数据体。3) 利用蚂蚁追踪算法进一步增强相干体或者方差体的不连续特征,生成边缘加强的蚂蚁数据体。4) 基于研究区的地震剖面特征及蚂蚁体进行断层拾取。5) 依据区域断裂系统样式进行断层组合,剔除噪音,保留可能存在的所有断层。

蚂蚁追踪技术与其他技术一样,参数设置对其计算结果影响很大,好的参数设置能带来高精度的预测结果[12],反之会导致错误的结论与认识,具体参数如下:

- 1) 种子点:初始蚂蚁分布边界。这个参数的大小控制蚂蚁的搜索能力,参数越小则蚂蚁的视野越小,搜索小断层的能力越强,越易识别出断层。
- 2) 觅食路线的偏移度:需根据断层展布规律设置偏移度。一般定义该参数为0~3,数值越大代表搜索范围越大,对于弯曲断层的识别越有利,但是对于比较直的断层不利。
- 3) 蚂蚁搜索的步长:即每次搜索距离的增量。指蚂蚁在觅食过程中,一次能搜索的最大范围。需根据断层的长度来定义,过大过小都会带来信息失真。
- 4) 非法范围:蚂蚁追踪允许的非法步长。参数值越大则搜索范围越大,该参数是保留蚂蚁继续追踪的权限,若超过这个参数值则停止追踪。
- 5) 法定范围:蚂蚁追踪要求的合法步长。此参数是针对非法步长而设置,追踪大断层宜采用大值,反之小断层采用小值更合理。
- 6) 搜索终止的阈值:这个是让蚂蚁停止追踪的参数,如果设置太高就会让蚂蚁经过太多的非法步才停止,其值越大,蚂蚁搜索能力越强,追踪的断层越明显,但同时会出现干扰信息,所以应根据工区特点合理设置。

我们采用前述的蚂蚁算法进行蚂蚁体计算。然而计算过程中参数的设置尤为重要,决定了计算效果的好坏以及细节的刻画能力。通过大量的参数调试和试算,确定了最终合理的参数为:1) 分布边界为4; 2) 觅食偏移度为2; 3) 搜索步长为2; 4) 允许的非法步长为3; 5) 合法步长为3; 6) 搜索截止的阈值为5。

A 油田目的层位明化镇组下段地震反射旅行时主要在0.8~1.5 s,在此时间范围内提取蚂蚁属性体1.0 s等时切片(图7),图中灰色线条代表断裂痕迹,颜色越深断裂可信度就越高。图5中显示A油田主要发育北东方向的大断层及伴生的次级小断裂(断距为10~20米),与区域应力场及认识相吻合,为油田开发方案编制提供了依据,同时断层组合的成果高效、准确,可为深化油藏描述、注采井网部署等工作打下坚实的基础。



Figure 7. Plane slice of ant cube  
图 7. 蚂蚁体平面切片

### 3. 结论

1) 地震数据特征增强处理是提高数据质量和消除随机噪声的关键手段。中值滤波和谱白化显著提高了数据质量,提高了地震资料的分辨率,保留了边缘和结构特征。

2) 相干体技术是一种成熟的断层描述工具,其效果稳定,能刻画宏观断层展布。曲率体属性主要用于描述界面弯曲程度,是相干体刻画断层的有力补充,同时,还能够获取微幅连续界面的倾角和弯曲度信息,对地震综合解释具有重要意义。

3) 蚂蚁追踪技术对识别低序级断层具有巨大的优势,小断层虽然对储层不具有封堵性,但其对储层物性具有一定的改造作用,同时对开发注水效果、油藏渗流通道具有一定的影响,因此,蚂蚁追踪技术值得在开发阶段推广应用。

### 参考文献

- [1] 吴清龙,张延庆,崔全章.小断层综合解释技术在英台地区的应用[J].石油地球物理勘探,2003,38(5):527-530.
- [2] 王彦君,雍学善,刘应如,等.小断层识别技术研究及应用[J].勘探地球物理进展,2007,30(2):135-139.
- [3] 杨春峰,张宏,田小敏,等.相干数据体处理技巧及在精细构造解释中的应用[J].石油物探,2004,43(增刊):107-109.
- [4] 周杰.相干技术在复杂断块地震构造解释中的应用[J].胜利油田职工大学学报,2006,20(5):48-50.
- [5] 蔡涵鹏.方差体的改进算法及在地震解释中的应用[J].煤田地质与勘探,2008,36(1):74-77.
- [6] 胡佳.基于蚂蚁追踪的三维地震图像目标识别研究[D]:[硕士学位论文].成都:电子科技大学,2014.
- [7] 廖龙.基于地震相干体数据的裂缝及断层检测方法研究[D]:[硕士学位论文].成都:电子科技大学,2020.
- [8] 黎小伟,范久霄,刘明汐,等.相干体解释断层方法测试及涇河油田的应用[J].海洋地质前沿,2015,31(12):65-70.
- [9] 柏冠军,赵汝敏,杨松岭,等.地震曲率技术在地震资料解释中的应用[J].中国工程科学,2011,13(5):23-27.
- [10] 张磊.蚂蚁体追踪技术在潜西地区构造解释中的运用[J].江汉石油科技,2013,23(3):24-27.
- [11] 张继标,戴俊生,赵力彬,等.基于蚂蚁算法的断裂自动解释技术在黄珏南地区的应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,36(6):14-20.
- [12] 张淑娟,王延斌,梁星如,等.蚂蚁追踪技术在潜山油藏裂缝预测中的应用[J].断块油气田,2011,18(1):51-54.