

文章编号: 1001-1749(2023)02-0192-10

基于稀疏贝叶斯的分频蚂蚁追踪技术 在裂缝刻画中的应用

韦 豪^{a,c}, 王元君^{a,b}, 周怀来^{a,b,c}, 王 肖^{a,c}

(成都理工大学 a. 地球物理学院,

b. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,

c. 地球探测与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059)

摘要: 在裂缝预测方法中,分频处理是常用的裂缝预测方法之一,这对时频分析方法的抗噪性和分辨率都有很高的要求。这里用稀疏贝叶斯方法(Sparse Bayesian Learning, SBL)对地震信号进行子波重构,该方法在地震模型设置时,将噪声模型考虑其中,再用威格纳分布(Wigner-ville Distribution, WVD)进而得到地震信号的时频分布,称之为稀疏贝叶斯时频分析方法(SBL-WVD)。该方法不仅有很好的抗噪性,还拥有较高的时频分辨率。考虑到高频相干对中小尺度裂缝带预测效果较好,而蚂蚁追踪技术对裂缝地刻画更清晰,因此采用分频相干以及蚂蚁追踪这种综合方法对裂缝进行预测。应用到绥中某工区发现:该方法对中小尺度裂缝刻画清晰,在实际应用中取得良好的效果,为后期的储层识别提供借鉴。

关键词: 稀疏贝叶斯时频分析方法(SBL-WVD); 倾角导向相干; 蚂蚁追踪技术; 裂缝预测

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-1749.2023.02.08

0 引言

在油气勘探中,深层地震数据受噪声干扰较大,这对于小尺度裂缝预测与刻画带来巨大困难。地震信号在向下传播时除了因为能量扩散而导致信号衰减,还会受到潜山的影响,对地震信号进行屏蔽。而深层油气藏的勘探与开发是当前油气勘探的重点,因此中深层裂缝预测与识别变得尤为关键。

传统的线性时频分析方法 Gabor 变换、小波变换、S 变换等会受海森堡测不准原理影响,时间分辨率与频率分辨率相互受限,应用在裂缝预测中也会受到影响。结合裂缝发育的特征,裂缝预测需要更高的时频分辨率,且要较高的信噪比,以保证结果的

准确性。E. P. Wigner^[1]提出了二次型 Wigner 分布,该方法拥有很高的时频分辨率,但算法本身又存在交叉项问题,且无法通过算法改进彻底消除^[2]。为了减小交叉项的干扰,后续科学家取不同指数型的核函数或者在算法中加入窗函数来约束 WVD 时频分布,但都是以牺牲信号分辨率为代价^[3]。Liu J^[4]将匹配追踪与 WVD 结合,有效地消除了 WVD 分布的干扰项;L. Deng^[5]利用稀疏贝叶斯对地震信号进行重构,验证了稀疏贝叶斯重构法拥有很好抗噪性和较快的计算速度;纪永祯^[6]将稀疏贝叶斯与 WVD 结合得到地震信号的时频分布,验证了该时频方法的可行性。贝叶斯时频分析方法相较于传统时频方法,不仅具有很高的时频聚集性还有一定的抗噪性,满足裂缝预测的要求。

收稿日期: 2021-12-01

基金项目: 四川省科技计划重点研发项目(2021YFG0257); 国家自然科学基金(42204138)

第一作者: 韦豪(1994-),男,硕士,主要研究方向为油气地球物理,E-mail:1690253995@qq.com。

通信作者: 周怀来(1978-),男,教授,主要从事油气勘探教学及科研工作,E-mail:271980681@qq.com。

相干技术能够分析地震信号之间的连续特征,通常与分频方法联合预测裂缝展布特征。Bahorich^[7]首次将相干算法运用到地震数据中,该方法应用在地震信号中抗噪性差,且分辨率也不是很高;Marfurt^[8-9]在第一代相干的基础上提出了第二代相干算法,提高了相干属性的抗噪性以及纵向分辨率;Gersztenkorn^[10]基于特征值协方差矩阵提出了第三代相干算法,进一步提高了相干属性的分辨率;王西文^[11]利用小波分频技术与相干技术相结合,实现对小断层的精细解释;徐德奎^[12]等对相干方法进行改进,以倾角方位角约束相干属性,有效减少断层主次不分情况,使得复杂断裂预测更加精确。因此,倾角导向相干对复杂裂缝带的识别更明确。

为了实现对小尺度裂缝的识别,许多作者将蚂蚁追踪技术引入到地震资料处理中,该技术是根据仿生蚂蚁原理,在地震体中设置电子蚂蚁,沿着断层层面进行探索,当“蚂蚁”聚集较多时,可以在剖面上明显地展现断面尺度及构造特征。张瑞等^[13]利用分频蚂蚁追踪技术有效识别深层礁滩复杂断层周围的伴生褶皱断层;马艺璇等^[14]等通过匹配追踪分频相干体的蚂蚁追踪技术实现对塔河复杂裂缝区域裂缝预测。研究发现:将分频倾角相干技术与蚂蚁追踪相结合,能有效实现裂缝精细刻画。

结合前人研成果^[15-19],笔者先对地震数据进行倾角导向滤波处理,再结合稀疏贝叶斯对滤波数据体进行分频处理,以C3相干算法求得相干数据体,并结合井资料以及地震解释资料优选蚂蚁追踪参数,得到最终分频裂缝蚂蚁体,结合地震响应特征以及沿层切片特征从而分析出裂缝所在位置。结果表明,该方法能够很好地刻画全频数据难以刻画的深层小裂缝,验证了本文方法在实际工区应用的准确性。

1 方法原理

1.1 稀疏贝叶斯分频原理

地震信号是由地震子波与反射系数卷积得到,而实际地震信号中也包含许多噪声。在假设地震信号模型时,参考 Ji S^[20]介绍的贝叶斯框架下多维信号重构方法,笔者将随机噪声当做模型的一部分,定义地震信号 S 的重构表达式为式(1)。

$$S = WR \quad (1)$$

其中: S 为非稳态地震数据(包含噪声); W 为子波库; R 为子波分解系数。

稀疏贝叶斯框架下地震信号先验信息如下:

$$p(R | h) = (2\pi)^{-K/2} \prod_{k=1}^K h_k^{1/2} e^{(-h_k r_k^2/2)} \quad (2)$$

其中: $h = [h_1 h_2 \cdots h_K]^T$; $K = n * I * J$, K 表示子波稀疏化后的个数, n 为子波库 W 中每列子波的个数, I 为子波中主频的总数, J 为子波中相位总数;子波分解系数服从零均值高斯分布,方差为 h_k^{-1} 。

假设地震信号有噪声且服从零均值方差为 σ^2 的高斯分布,其似然函数为式(3)。

$$p(S | R, \sigma^2) = (2\pi)^{-M/2} |\sigma^2 \mathbf{I}|^{1/2} e^{-\frac{(S-WR)^T (S-WR)}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

其中: $|\ast|$ 为行列式; \mathbf{I} 表示单位矩阵。

根据贝叶斯估计后验分布正比于先验信息和似然函数的乘积,且与边缘似然函数成反比,那么可以得到后验分布公式为:

$$p(R | S, h, \sigma^2) = \frac{p(S | R, \sigma^2) p(R | h)}{p(S | h, \sigma^2)} \quad (4)$$

在式(4)中,边缘似然函数 $p(S | h, \sigma^2)$ 的结果为常数,那么后验分布公式可简写为式(5)。

$$p(R | S, h, \sigma^2) = C * (2\pi)^{-K/2} * \left[\sum_{\mu} |^{-1/2} e^{-\frac{(R-\mu)^T \Sigma^{-1} (R-\mu)}{2}} \right] \quad (5)$$

其中: $\Sigma = (H + \sigma^{-2} W^T W)^{-1}$; $\mu = \sigma^{-2} \Sigma W^T S$; $H = \text{diag}(h_1 h_2 \cdots h_K)$; Σ 为协方差矩阵; μ 为待估计参数后验概率均值; C 为常数。

在后验分布中,子波分解系数由子波参数 h 和噪声方差 σ^2 来确定,边缘似然函数是用各个子波的正态分布 $p(S | R, \sigma^2)$ 作为各自概率的权重进行求和。对边缘似然函数取最大值得到子波分解系数的均值及方差,该方法称为第二型最大似然估计,边缘似然函数表达式为式(6)。

$$p(S | h, \sigma^2) = \int p(S | R, \sigma^2) p(R | h) dR = (2\pi)^{-M/2} |\mathbf{Q}|^{-1/2} e^{-\frac{S^T \mathbf{Q}^{-1} S}{2}} \quad (6)$$

其中: $\mathbf{Q} = \sigma^2 \mathbf{I} + W H^{-1} W^T$, 利用式(6)得到子波分解系数的均值 h 以及方差 σ^2 代入后验分布公式(5)中,可以得到贝叶斯估计的后验概率均值 μ 的值。再以该后验概率作为先验重新计算边缘似然函数中的参数值,重新计算新的后验概率分布。依照这样的循环,迭代该计算过程,直到子波分解系数均值 h 满足阈值或满足迭代次数。便可得到子波分解系数矩阵 R 。

单道地震信号中各子波时频谱的叠加就是该地震道的时频谱。具体做法为:用子波分解系数确定对应子波,先对单个子波做威格纳分布,然后将子波

时频结果叠加一起,从而得到地震道的时频谱。设稀疏矩阵中非零系数的数量为 M ,第 m 个子波定义为 $T_m (1 \leq m \leq M)$,地震道的时频结果为 U ,其表达式为式(7)。

$$U = \sum_{m=1}^M WVD(T_m) \quad (7)$$

式中: $WVD(T_m)$ 为对 T_m 做威格纳分布处理,将 M 个子波时频结果叠加得到该道地震信号的时频谱 U 。

1.2 多属性综合蚂蚁体

倾角导向滤波技术是以倾角信息作为滤波引导,然后再进行构造导向滤波处理。可以对叠后地震数据同相轴进行平滑处理,除了可以提升地震信号的信噪比还可以保留横向断层的信息。构造导向滤波是基于非线性偏微分方程中热传导方程的求解过程,同样也是一种基于各向异性的平滑算法。其表达式为:

$$\frac{\partial s(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}[\mathbf{S} \nabla s] \quad (8)$$

其中: $s(x, y, t)$ 为地震波振幅; \mathbf{S} 为结构张量其表达式为:

$$\mathbf{S} = G_\sigma * (\nabla s_\sigma \nabla s_\sigma^T) \quad (9)$$

式中: G_σ 为表示尺度为 σ 的高斯函数。

当 $t=0$ 时,地震振幅初值为式(10)。

$$s(x, y, 0) = s_0(x, y) \quad (10)$$

将初值式(10)代入构造导向滤波式(8)从而得到构造导向滤波体。为了使得岩性边界以及构造处更加明显,再加入平滑因子 $\epsilon \in [0, 1]$ 进行优化:

$$\frac{\partial s(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}[\epsilon \mathbf{S} \nabla s] \quad (11)$$

倾角约束指的是将构造导向滤波中的结构张量 \mathbf{S} 替换为具有地震波同相轴倾角信息的构造特征张量 \mathbf{D} :

$$\mathbf{D} = \text{Adiag}(c_1 c_2) A^T \quad (12)$$

式中: $A = (\omega_1 \omega_2)$, $\omega_1 = W_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$, $c_1 = 1$, $c_2 = 1 + (1/\epsilon - 1)e^{-1/k^2}$ 。

其中: k 为一致性参数 $k = (\lambda_1 - \lambda_2)$; λ_1, λ_2 为结构张量 \mathbf{S} 的特征值; θ 为倾角计算得到的真倾角。将倾角控制的构造特征张量代入构造导向滤波公式中:

$$\frac{\partial s(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}[\epsilon \mathbf{D} \nabla s] \quad (13)$$

然后用地震振幅初值 $s_0(x, y)$ 代入,便可得到倾角导向滤波体。

在裂缝预测中通常将构造导向滤波与相干技术

相结合^[21]。倾角约束下的导向滤波相干体制作流程为:先对地震数据进行倾角扫描,然后用倾角体数据作为构造导向的初值进行滤波处理。经过倾角约束与滤波处理后,不仅有效过滤了噪声,还能约束地震数据的横向展布,使得层位更加连续,断层更清晰^[22]。对该滤波体再进行分频相干处理,便可得到倾角约束下的相干体(倾角导向相干),而在分频相干处理过程中,分频的选择影响着整个裂缝预测的效果,通常会先对工区数据进行频谱分析,结合工区频率分布情况选择恰当的分频体进行优选。

蚂蚁追踪技术是在地震数据体中设置大量“电子蚂蚁”,当蚂蚁自身满足预设条件阈值会进行标记,其他“蚂蚁”也会跟进识别追踪,不满足预设条件阈值则不作标记。所标记区域就是断层裂缝处,且“蚂蚁”标记信息越多,刻画越明显。蚂蚁追踪需要设置六个参数:①初始边界,定义了每只蚂蚁的活动范围;②偏离角度,蚂蚁追踪过程中能发生偏转的角度范围;③搜索步长,每只蚂蚁一次搜索的步长;④允许的非合法步数,蚂蚁未搜索到断层时所允许走的步数;⑤允许的合法步数,搜索到断层时所需要的最少步数;⑥终止标准,蚂蚁追踪过程中非法步数的比例。在实际蚂蚁追踪过程中,初始边界控制着对大小断裂的识别能力,边界值越大对大断裂识别越好,边界值越小对小裂缝识别效果越好。偏离角度控制着裂缝刻画的连续性程度。搜索步长的大小影响着蚂蚁追踪的计算速度,非法步数与合法步数控制着裂缝刻画的数量,终止标准是电子蚂蚁停止追踪的阈值。这六个参数的设置需要结合工区资料反复调试。

蚂蚁追踪除了设置六个参数,还需结合工区资料对裂缝进行产状控制。产状控制就是对裂缝参数的分角度、倾角以及方位角进行约束。不同的目的层的裂缝倾角以及方位角都有一定的范围,通过对裂缝倾角范围的界定,帮助电子蚂蚁减少不必要的追踪路径,使得最终成果图中裂缝显示更加清晰。产状控制的核心在于地震解释资料与井资料相结合,以实际的裂缝分布情况作为约束,以减少其他方向上的噪声干扰,而在构造导向滤波前的倾角约束,并非进行倾角筛选,而是对所有倾角信息进行扫描,将扫描倾角信息作为结构张量相,进而求出倾角导向滤波体。

综合上述技术方案,笔者对中小尺度裂缝识别流程为:先对叠后三维地震数据做倾角导向滤波处

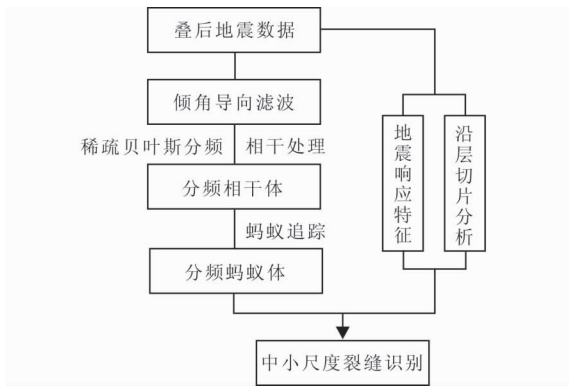


图 1 中小尺度裂缝识别流程图

Fig. 1 Flow chart of small and medium-sized crack identification

理,并对该滤波体进行分频相干处理,对比优选出最佳相干属性,并以此属性作为蚂蚁追踪的初始数据,充分利用倾角导向相干体中裂缝特征明显以及蚂蚁追踪裂缝刻画清晰的优势,突出深层中小尺度

裂缝。蚂蚁追踪的计算速度较慢,调试参数过程中计算量较大,笔者参考李楠等^[23]高清蚂蚁体制作方法及张光辉等^[24]优化的蚂蚁追踪方法,结合地震相应特征、沿层切片特征,以及井资料信息实现对中小尺度裂缝的识别。技术流程图如图 1 所示。

2 模型测试

2.1 稀疏贝叶斯时频方法抗噪性测试

首先设计一个噪声模型,测试稀疏贝叶斯重构法的抗噪能力。选择 5 个雷克子波组成模拟信号,然后加入一个随机高斯噪声,这里选择随机噪声能量与原始信号能量一致,也就是信噪比为“1”。其中 5 个雷克子波的频率分别为 6 Hz、10 Hz、14 Hz、22 Hz、26 Hz,时移分别为 20 ms、100 ms、120 ms、250 ms、300 ms。如图 2(a)为子波合成记录,图 2(b)为加入高斯噪声后的模拟数据。

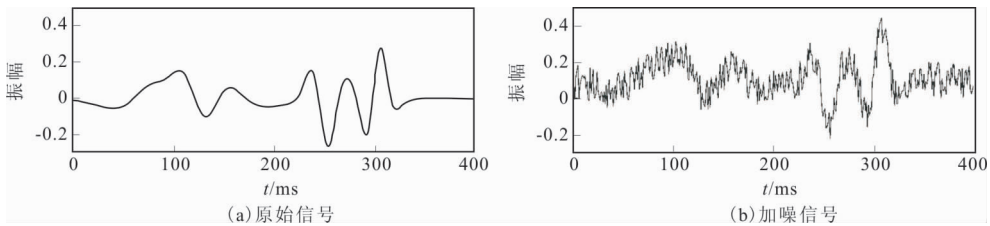


图 2 原始信号与加噪信号图

Fig. 2 Original signal and noisy signal

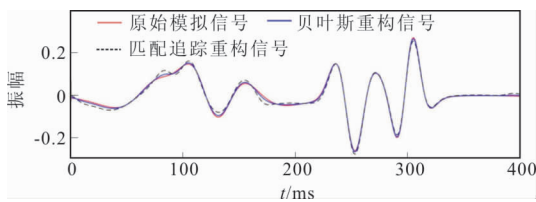


图 3 原始模拟信号与重构信号对比图

Fig. 3 Comparison between noiseless analog signal and reconstructed signal

对上述加噪后的模拟信号用匹配追踪方法与稀疏贝叶斯方法进行信号重构。对比两种重构方法的抗噪能力,得到重构信号(图 3)。从图 3 中可以看出,稀疏贝叶斯方法重构得到的信号与原始模拟信号更加匹配,而匹配追踪方法得到的信号相较于稀疏贝叶斯方法误差更大,信号偏离更多。说明稀疏贝叶斯重构方法得到的重构结果受噪声影响更小,重构效果也更好。

2.2 时频聚集性检测

对图 2(b)合成信号分别做匹配追踪时频分析以及稀疏贝叶斯时频分析得到时频结果(图 4)。从图 4 可以看出,当时深为 250 ms、300 ms 时,两种时频方法都有很明显的时频聚集特征,而在 100 ms、125 ms 处,匹配追踪方法在该处的时频特征不太明显,与预设参数存在一定偏差。稀疏贝叶斯时频方法在该处时频能量更集中,分辨率也更高,与预设 5 个雷克子波的时移及频率都相对应。由此可见,稀疏贝叶斯时频分析方法相较于匹配追踪方法对信号的时频处理效果更好。

3 应用效果

3.1 井旁地震道时频特征

为了验证稀疏贝叶斯时频分析方法的有效性,笔者以绥中某工区深层碳酸盐岩为例进行试算。该

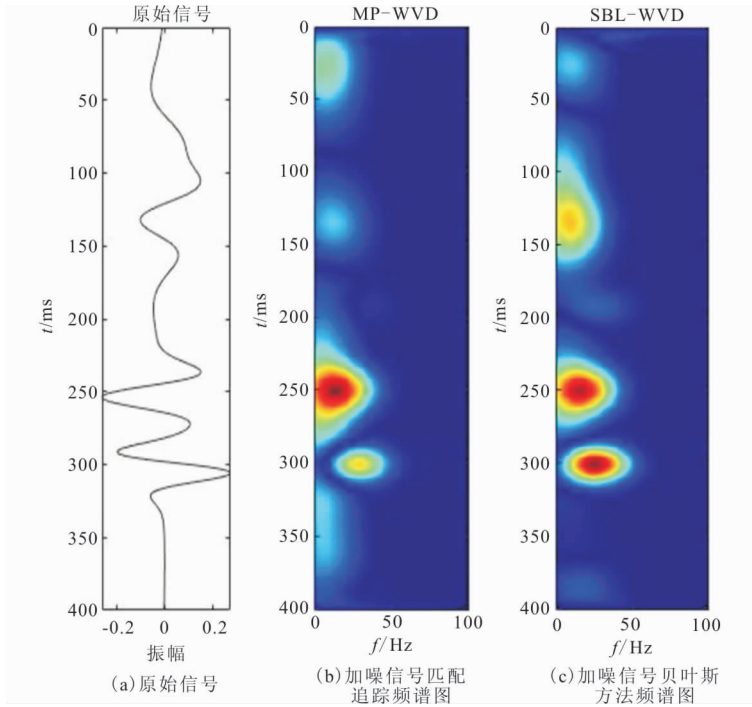


图4 模拟信号时频分析效果对比图

Fig. 4 Comparison of time—frequency analysis effect of analog signal

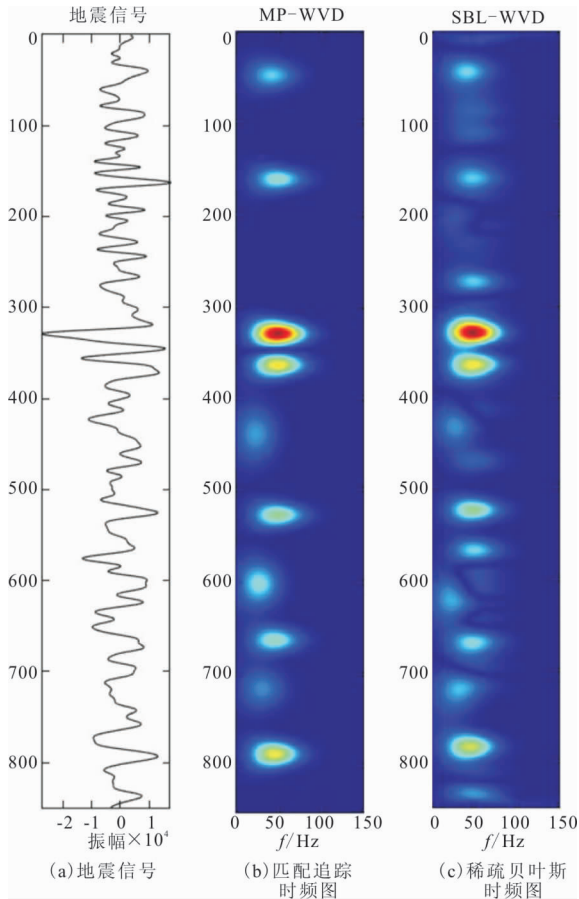


图5 井旁地震道时频分析效果对比图

Fig. 5 Comparison of time—frequency analysis results of seismic channels near wells

区为古近系沙河街组,岩性主要为碳酸盐岩及泥岩。根据油气井 T3 资料,在深度为 3 560 m 附近为油气储层,4 200 m 处为断裂构造带,地形复杂。单道样本点较多,为了展现较好的时频谱,选取井旁地震道中含有油气储层以及断裂构造带所在区段的 850 个采样点进行时频分析,其中油气储层在 350 样本点附近,复杂断裂带在 500~750 样本点。用匹配追踪方法以及稀疏贝叶斯时频分析方法分别得到时频谱如图 5 所示。结合图 5(b)、图 5(c)中时频谱分布特征,发现 300~400 样本点区段的时频谱均呈现高频衰减特征,两种时频方法得到的时频特征与井资料预测结果相一致。而在 500~750 样本点区段可以看出两种时频方法结果差异明显,从图 5(b)中可以看出,匹配追踪方法在该区段的频谱特征信息量明显不足,结合地震信号的特征,难以将地层信息完整展现出来,与实际地层情况不相符。相较之下,图 5(c)的稀疏贝叶斯时频方法体现频谱特征的较为详细,与实际地层特征更相符。通过上述时频谱对比发现:匹配追踪方法不能识别复杂地段的全部信息,特别是在深层复杂岩层分布区块,稀疏贝叶斯时频分析方法能更全面地将复杂区块的时频特征展现出来,而匹配追踪方法得到的时频谱确实很多有效信息。所以稀疏贝叶斯时频方法相较于匹配追踪方法拥有更高的纵向分辨率。

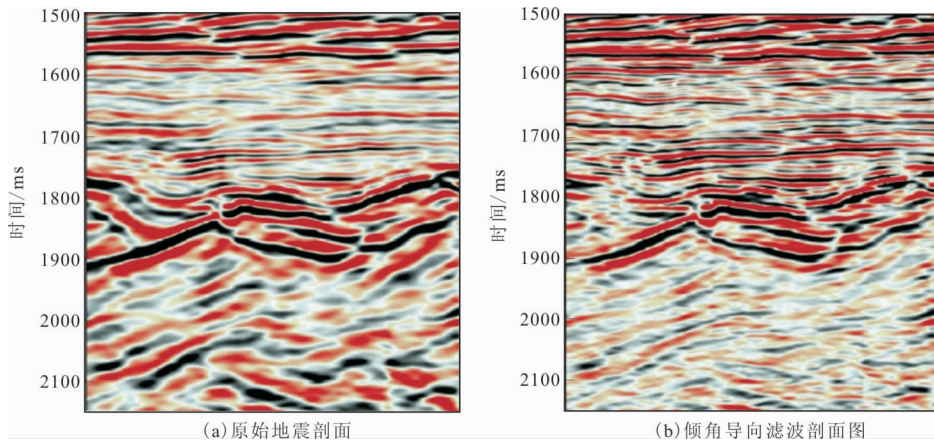


图 6 倾角导向滤波效果图

Fig. 6 Effect diagram of inclination guided filtering

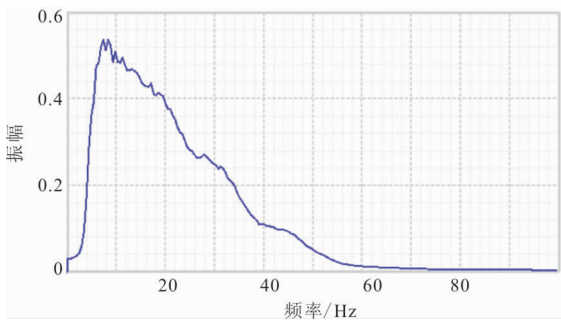


图 7 滤波体频谱图

Fig. 7 Spectrum of filter body

3.2 多属性综合蚂蚁体

先将叠后三维地震数据进行倾角导向滤波处理,改善断层特征。图 6 分别为原始地震剖面与倾角导向滤波处理后的结果。在原始地震剖面中 1 800 ms~1 900 ms 为潜山,通过图 6 可以明显看出,潜山处的断层被划分更加明显,在连续层处也更加连续。在潜山的上方为相对连续的沉积层,从图 6(a)与图 6(b)对比可以发现,倾角导向滤波处理之后,地震数据的分辨率更高,很好的为接下来的分频相干打下良好的基础。

在分频相干处理前,单频数据体的选择也尤为重要,为了选择合适的单频数据,还需要对滤波体做频谱分析。图 7 为工区频谱分布图,地震数据的频率范围为 5 Hz~60 Hz,有效范围为 5 Hz~50 Hz,而地震信号的绝大部分大量信息频率范围为 5 Hz~30 Hz、中小尺度裂缝信息在 30 Hz~50 Hz,为了实现中小尺度裂缝进行预测,选取全频带相干以及 25 Hz 相干作为对比、选取 45 Hz、50 Hz 的高频

相干属性进行优选,得到相干沿层切片(图 8)。

由图 8 可以看出,相干气泡分布相对较为杂乱,只有在断层特征明显的地方相干效果才能分辨;25 Hz 沿层切片中,相干效果改善许多,少了些杂乱气泡,这是低频地震信号对小尺度裂缝过滤的原因,断裂特征较为明显;而图 8 中高频相干切片分别为 45 Hz 和 50 Hz 相干沿层切片,由此可以看出,45 Hz 沿层切片对小尺度的裂缝体现也比较清晰,50 Hz 的相干切片只能体现部分断层的轮廓,细节刻画已经浑浊。因此我们选择 25Hz、45Hz 的单频属性体作为后续蚂蚁追踪的初始数据体。

在对相干属性进行蚂蚁追踪前,需要设置好蚂蚁追踪的六个参数,结合高清蚂蚁体追踪技术对本工区的六项参数进行优选。结合地震解释资料,断裂发育带层位起伏大,走滑断层较多,断层倾角在 45°左右,垂直和水平伴生裂缝很少,因此蚂蚁追踪裂缝倾角限制如图 9 所示。在图 9 中阴影部分倾角范围分别为 20°~70°,在进行蚂蚁追踪计算时,阴影部分的倾角及方位角会运算,非阴影部分不会计算。经过上述产状控制,得到蚂蚁体沿层切片如图 10 所示。

由图 10 可以看出,在波峰波谷的交界处常会有伴生裂缝。以上方红色方框为例,框内为波峰波谷交界带,在图 10(b)全频带蚂蚁体沿层切片中,明显看出有一条东北至西南走向大断裂,在这个断裂周围,有些细小繁杂的伴生裂缝,在全频带蚂蚁体中显示并不明显;而在图 10(c)低频带蚂蚁体沿层切片

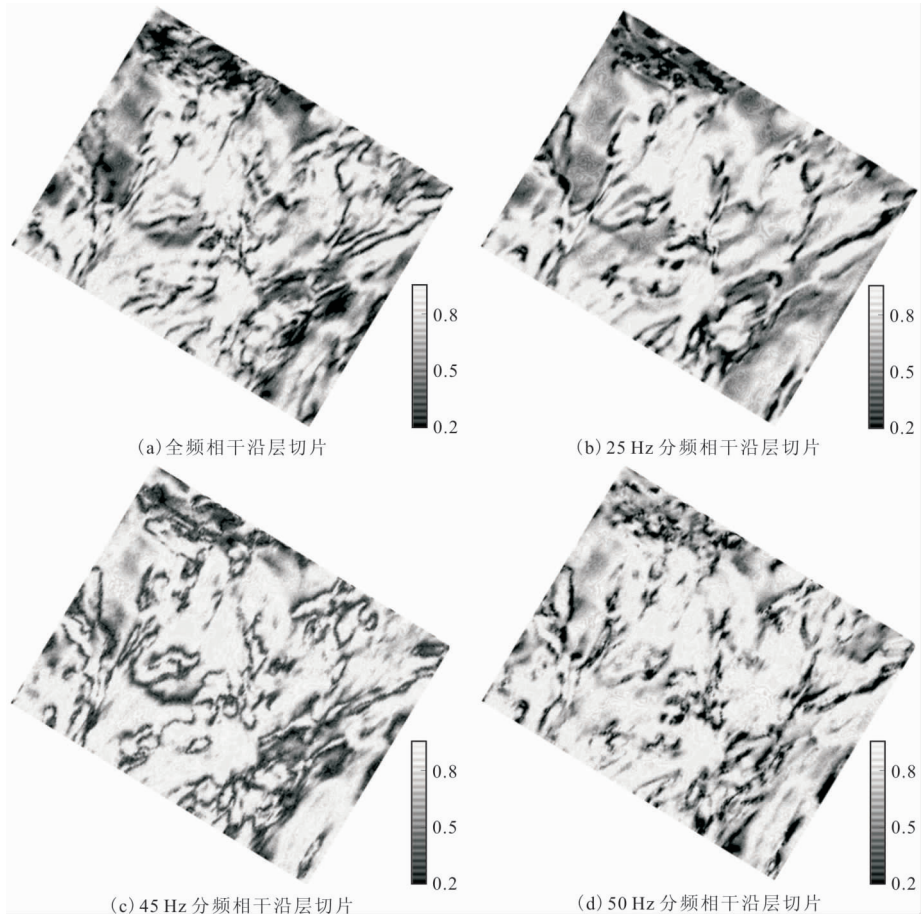


图 8 分频相干沿层切片图

Fig. 8 Slice diagram of frequency division coherence along layer

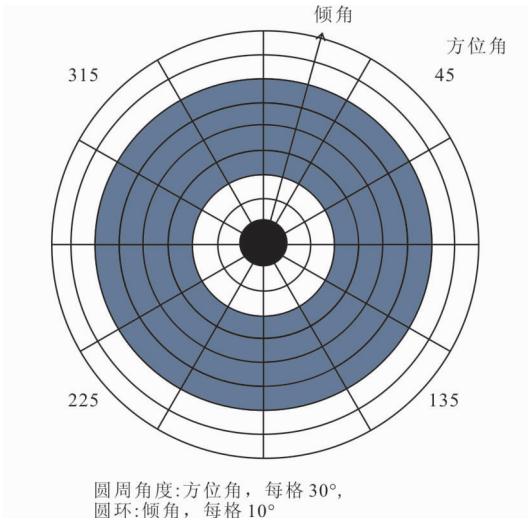


图 9 蚂蚁追踪倾角、方位角范围

Fig. 9 Ant tracking inclination and azimuth range

裂缝刻画结果与低频蚂蚁体沿层切片正好相反,大断裂反而被过滤,两个断裂间的小尺度裂缝刻画更加清楚。而根据 T3 井资料及岩心资料可知,裂缝大多为东北-西南走向,小裂缝大多为依附于大断裂的伴生裂缝。上述成果图得到的分析结果与图 10(a)中的振幅响应特征相一致,说明本文技术方案具有一定可行性,从而达到对整个工区中小尺度裂缝预测地目的。

4 结论

1) 稀疏贝叶斯时频分析方法相较于匹配追踪方法拥有更高的时频分辨率,更好的抗噪性,有效提高了裂缝预测的精度。

2) 倾角导向相干是利用倾角以及方位角确定相干方向,这样不仅增强裂缝的断裂特征,还能有效区分复杂地层不同尺度断层,使得裂缝预测更加准确。

3) 相较于常规蚂蚁追踪,在蚂蚁追踪时加入产状控制,对裂缝进行产状控制可以有效剔除虚假构

中,大断裂显示依然明显,中间所包含的小裂缝信息并不清晰,这是因为低频地震数据会对细小裂缝进行过滤;而在图 10(d)的高频蚂蚁体沿层切片中,其

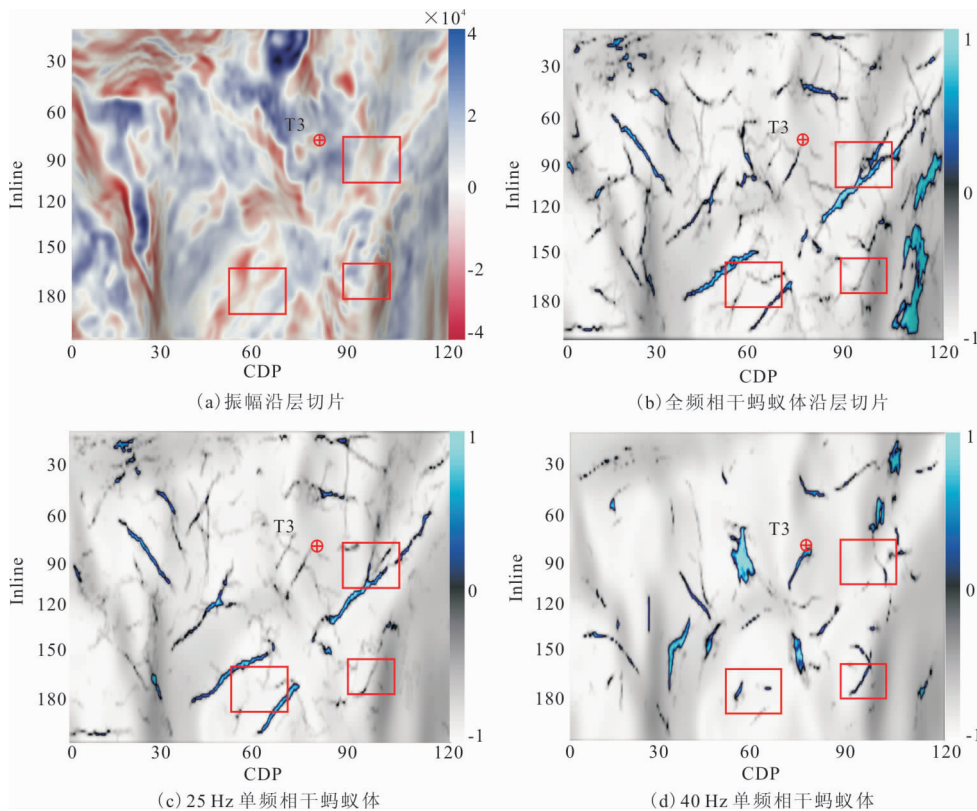


图 10 地震数据沿层切片与单频相干蚂蚁体沿层切片

Fig. 10 Slice along layer of seismic data and slice along layer of single frequency coherent ant body

造,不同地层其地质情况也有区别,裂缝发育情况也有差别。结合已知地层裂缝产状约束蚂蚁追踪倾角参数,使得裂缝预测分布更加贴近真实裂缝发育情况,客观反映断裂发育的真实情况。但是在设置倾角及方位角参数时要格外慎重,应结合实际地震解释资料及应力分析资料等进行综合分析。

参考文献:

- [1] WIGNER E. P. On the quantum correction for thermodynamic equilibrium[J]. Phys. Rev, 1932(40): 749-759.
- [2] 邹红星,戴琼海,李衍达,等. 不含交叉项干扰且具有WVD聚集性的时频分布之不存在性[J]. 中国科学E辑(技术科学), 2001(04): 348-354.
ZOU H X, DAI Q H, LI Y D, et al. Nonexistence of time-frequency distribution without cross term interference and WVD aggregation [J]. Chinese Science E (Technical Science), 2001(04): 348-354. (In Chinese)
- [3] 马世伟. 非平稳信号的参数自适应时频表示及其应用的研究[D]. 上海:上海大学, 2000.
MA S W. Parameter adaptive time-frequency repre-

sentation of non-stationary signals and its application [D]. Shanghai: Shanghai University, 2000. (In Chinese)

- [4] LIU J, WU Y, HAN D, et al. Time-frequency decomposition based on Ricker wavelet [C]. 74th SEG Annual International Meeting, Colorado, 2004: 1937-1940.
- [5] L. DENG, S. YUAN S. WANG. "Sparse bayesian learning-based seismic denoise by using physical wavelet as basis Functions"[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(11): 1993-1997.
- [6] 纪永祯,张渝悦,朱立华,等. 基于SBL-WVD的地震高分辨率时频分析[J]. 石油物探, 2020, 59(01): 80-86+107.
JI Y Z, ZHANG Y Y, ZHU L H, et al. Seismic high-resolution time-frequency analysis based on sbl-wvd [J]. Petroleum Geophysical Prospecting, 2020, 59(01): 80-86+107. (In Chinese)
- [7] MIKE, BAHORICH, STEVE, et al. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features; the coherence cube[J]. Leading Edge, 1995, 14(10): 1053-1058.

- [8] MARFURT K J, SCHEET R M, SHARP J A, et al. Suppression of the acquisition footprint for seismic sequence attribute mapping[J]. *Geophysics*, 1998, 63(3):1024-1035.
- [9] MARFURT K J, KIRLIN R L, FARMER S L, et al. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm[J]. *Geophysics*, 1998, 63(4):1150.
- [10] GERSZTENKOM A, MARFURT K J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping[J]. *Geophysics*, 2012, 64(5):1468.
- [11] 王西文, 杨孔庆, 刘全新, 等. 基于小波变换的地震相干体算法的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2002(04):328-331+432.
WANG X W, YANG K Q, LIU Q X, et al. Application of seismic coherent volume algorithm based on wavelet transform [J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2002(04): 328-331 + 432. (In Chinese)
- [12] 徐德奎, 王玉英, 郑江峰. 倾角导向的相干加强技术在改善复杂断块地震资料中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(03):1224-1228.
XU D K, WANG Y Y, ZHENG J F. Application of dip guided coherence enhancement technology in improving seismic data of complex fault blocks [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(03): 1224-1228. (In Chinese)
- [13] 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(01):350-356.
ZHANG R, WEN X T, LI S K, et al. Application of frequency division ant tracking in identifying deep small faults [J]. *Advances in Geophysics*, 2017, 32(01): 350-356. (In Chinese)
- [14] 马艺璇, 李慧莉, 刘坤岩, 等. 基于分频相干体的蚂蚁追踪技术在塔河油田断裂刻画中的应用[J]. *石油物探*, 2020, 59(02):258-266.
MA Y X, LI H L, LIU K Y, et al. Application of ant tracking technology based on frequency division coherence in fault characterization of Tahe Oilfield [J]. *Petroleum Geophysical Prospecting*, 2020, 59(02): 258-266. (In Chinese)
- [15] 覃天. 基于小波分频叠前相干噪声压制方法[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(04):1426-1430.
QIN T. Prestack coherent noise suppression method based on wavelet frequency division [J]. *Advances in Geophysics*, 2009, 24(04): 1426-1430. (In Chinese)
- [16] 尹川, 杜向东, 赵汝敏, 等. 小波分频倾角相干在复杂断裂解释中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(02):346-350+6.
YIN C, DU X D, ZHAO R M, et al. Application of wavelet frequency division dip angle coherence in complex fault interpretation [J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2015, 50(02): 346-350 + 6. (In Chinese)
- [17] 姜晓宇, 张研, 甘利灯, 等. 花岗岩潜山裂缝地震预测技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2020, 55(03):694-704+474.
JIANG X Y, ZHANG Y, GAN L D, et al. Seismic prediction technology of granite buried hill fractures [J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2020, 55(03): 694-704 + 474. (In Chinese)
- [18] 陈杰, 李琼, 范欣然, 等. 利用分频相干技术检测页岩裂缝发育带[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(03):356-361.
CHEN J, LI Q, FAN X R, et al. Detection of shale fracture development zone by frequency division coherence technology [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 44(03): 356-361. (In Chinese)
- [19] 严海滔, 周怀来, 牛聪, 等. 同步挤压改进短时傅里叶变换分频相干技术在断裂识别中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(04):860-866+725-726.
YAN H T, ZHOU H L, NIU C, et al. Application of synchronous extrusion improved short-time Fourier transform frequency division coherence technology in fault identification [J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2019, 54(04): 860-866 + 725-726. (In Chinese)
- [20] JI S, XUE Y, CARIN L. Bayesian compressive sensing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(6):2346-2356.
- [21] 雷英成. 倾角扫描地震纹理对比度属性研究及应用[J]. *断块油气田*, 2011, 18(04):465-468.
LEI Y C. Research and application of dip scanning seismic texture contrast attribute [J]. *Fault Block Oil and Gas Field*, 2011, 18(04): 465-468. (In Chinese)
- [22] 秦瑞, 白军, 郑超, 等. 基于分频倾角扫描的相干属性在断层识别中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2016, 38(5):656-659.
QIN R, BAI J, ZHENG C, et al. Application of coherence attribute based on sub dip scanning in fault identification [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration Calculation Technology*, 2016, 38(5): 656-659. (In Chinese)
- [23] 李楠, 王龙颖, 黄胜兵, 等. 利用高清蚂蚁体精细解释复

杂断裂带[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(01): 182—190+12.

LU N, WANG L Y, HUANG S B, et al. Fine interpretation of complex fault zones using high-definition ant bodies [J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2019, 54 (01): 182—190 + 12. (In Chinese)

[24] 张介辉, 谢清惠, 张东涛, 等. 优化的蚂蚁追踪技术在四

川盆地 Y1 井区的应用研究[J]. 石油物探, 2020, 59 (06): 970—977.

ZHANG J H, XIE Q H, ZHANG D T, et al. Application of optimized ant tracking technology in well block Y1 of Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geophysical Prospecting*, 2020, 59 (06): 970—977. (In Chinese)

Application of frequency division ant tracking technology based on Sparse Bayesian in fracture characterization

WEI Hao^{a,c}, WANG Yuanjun^{a,b}, ZHOU Huailai^{a,b,c}, WANG Xiao^{a,c}

(Chengdu University of Technology a. College of Geophysics,

b. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation,

c. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of Education, Chengdu 610059, China)

Abstract: In the fracture prediction methods frequency division processing is one of the commonly used fracture prediction methods, which has high requirements for the noise resistance and resolution of time—frequency analysis methods. This paper uses sparse Bayesian learning (SBL) to reconstruct the wavelet of seismic signals. When setting the seismic model, the noise model is considered, and then the time—frequency distribution of the seismic signal is obtained by Wigner Ville distribution (WVD). This paper is called sparse Bayesian time—frequency analysis method (sbl—wvd). This method has not only good noise resistance and high time—frequency resolution. High—frequency coherence has a better prediction effect on small and medium—sized fracture zones. Furthermore, ant—tracking technology has a more precise description of fractures. Therefore, the comprehensive frequency division coherence and ant trackingis used to predict fractures. When applied to a work area in Suizhong, it is found that this method can predict small and medium—sized fractures. The fracture description is clear, which has achieved good results in practical application and laid a foundation for reservoir identification in the later stage.

Keywords: sparse Bayesian time—frequency analysis method (SBL—WVD); dip steering coherence; ant tracking technology; fracture prediction