

文章编号: 0253-2697(2016)06-0777-10 DOI:10.7623/syxb201606008

基于匹配追踪谱分解的时频域 FAVO 流体识别方法

李 坤¹ 印兴耀² 宗兆云²

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室 山东青岛 266071)

摘要:基于 Morlet 小波的快速动态匹配追踪高分辨率谱分解算法,对比研究了短时傅立叶变换、S 变换、连续小波变换及匹配追踪 Wigner-Ville 分布的时频分辨特征。在此基础上,为充分利用叠前地震资料中蕴含的振幅和频率信息,将快速匹配追踪谱分解方法与体现流体因子的频变 AVO(FAVO)反射特征方程相结合,并依靠匹配追踪算法的高时频分辨特性,发展高分辨率时频域 FAVO 直接反演方法,该方法将常规谱均衡过程构建于目标泛函中,减少了频散属性提取过程的中间环节,避免了在消除“子波叠印”时引入的累计计算误差。模型测试和实际资料处理表明,该频散属性反演方法有助于精细刻画油气藏位置,是一种可靠性较高的储层流体类型检测方法。

关键词:频变 AVO 反演;匹配追踪;时频分辨率;频变流体因子;流体识别

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

Time-frequency-domain FAVO fluid discrimination method based on matching pursuit spectrum decomposition

Li Kun¹ Yin Xingyao² Zong Zhaoyun²

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Shandong Qingdao 266071, China)

Abstract: A study is performed on the rapid dynamic matching pursuit algorithm with high-resolution spectrum decomposition based on Morlet wavelet, while a comparison is conducted on the time-frequency resolution characteristics of short-time Fourier transform, S transform, continuous wavelet transform and matching pursuit Wigner-Ville distribution. On this basis, rapid matching pursuit spectrum decomposition method is used in combination with the reflection characteristic equation of frequency-dependent AVO (FAVO) displaying fluid factor, so as to make full use of the amplitude and frequency information in pre-stack seismic data. Then, the time-frequency-domain FAVO direct inversion method with high resolution is developed depending on the high time-frequency resolution property of matching pursuit algorithm. In this method, the conventional spectral balancing process is built in objective functional, so as to reduce the intermediate links of dispersion attribute extraction process and avoid the accumulated calculation errors introduced in the process of eliminating “wavelet superimposition”. Model tests and actual data processing demonstrate that such dispersion attribute inversion method is helpful to precisely describe the positions of hydrocarbon reservoir, and identified as a highly reliable method for determining reservoir fluid type.

Key words: FAVO inversion; matching pursuit; time-frequency resolution; frequency-dependent fluid factors; fluid discrimination

引用:李坤,印兴耀,宗兆云.基于匹配追踪谱分解的时频域 FAVO 流体识别方法[J].石油学报,2016,37(6):777-786.

Cite:Li Kun, Yin Xingyao, Zong Zhaoyun. Time-frequency-domain FAVO fluid discrimination method based on matching pursuit spectrum decomposition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 777-786.

地震信号在地下复杂介质传播过程中,信号的频率统计特性是随时间发生变化的,即地震信号本身是一种非平稳或时变信号,为了更有效地揭示地震数据中所包含的时间和频率信息,国内外发展了很多针对非平稳地震信号的时频分析方法,如短时傅立叶变换(STFT)、连续小波变换(CWT)、S变换(ST)、Wigner-Ville分布(WVD)、匹配追踪时频表征(MP)等,相关

技术已经广泛应用于地震资料精细解释、薄层厚度估计以及储层流体检测等^[1,2]。

目前在众多谱分解算法中匹配追踪谱分解算法的时频分辨率最高,Marfurt等^[3]最早提出了基于 Gabor 型时频原子的经典匹配追踪自适应分解算法。针对匹配追踪算法巨大计算量的问题,国内外学者提出了大量快速算法,逐渐由贪婪算法过渡到快速动态算

基金项目:国家自然科学基金(石油化工联合基金)重点项目(No. U1562215)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB228604)资助。

第一作者及通信作者:李 坤,男,1989 年 11 月生,2013 年获中国石油大学(华东)学士学位,现为中国石油大学(华东)硕士研究生,主要从事地球物理反演理论与方法在油气勘探领域的研究。Email:likunupc@126.com

法^[4-7]。此外,张繁昌等^[8]提出了基于 Morlet 小波字典的复数域双参数快速匹配追踪算法,进而减小了动态匹配搜索参数的个数,提高了计算效率。

地震信号在地下复杂介质传播过程中通常会发生速度频散和能量衰减现象,这种特性在含烃储层中变得尤为突出。为了充分利用地震波衰减和频散属性进行储层特征描述,Wilson 等^[9]联合瞬时谱分解与 Smith-Gidlow 反射特征方程,提出了频变 AVO 反演方法;Wu 等^[10]基于平滑伪 Wigner-Ville 分布 (SP-WVD) 算法实现了频变 AVO (FAVO) 反演方法,并且将该方法应用到实际地震资料处理中;张世鑫等^[11]研究了基于叠后反演的纵波速度频散属性计算方法,并依据 Shuey 近似公式提出了纵波速度频散梯度的概念。此外,在反演策略上,郝前勇等^[12]发展了时间域多尺度 FAVO (频变 AVO) 反演方法;Zhang 等^[13,14]提出了流体敏感的频变流体因子的概念^[15-18],并基于 Russell 近似公式研究了时间域多尺度 FAVO 频变流体因子提取方法。

笔者在前人研究的基础上,将联合匹配追踪高分辨率谱分解方法和流体因子 FAVO 反射特征方程,推导时频域 FAVO 直接反演目标方程,并且将谱均衡过程构建于反演目标方程中,减少了频散属性反演过程的中间环节,避免选取弹性标准层时引入的人为误差,进而削弱谱均衡过程对频变流体因子提取造成的累计误差。此外,为更好地刻画油气藏的边界范围,研究了高分辨率动态匹配追踪谱分解算法,并通过理论模型对比其与经典时频分析方法的时频分辨率特征。研究表明,匹配追踪 Wigner-Ville 分布实现信号的自适应分解,继承 Wigner-Ville 分布高时频聚集能力的优势,并且有效地解决 Wigner-Ville 分布交叉项干扰 (CII) 的问题。

为了验证匹配追踪高分辨率时频域 FAVO 直接反演方法的可靠性,分别对一维和二维地震模型进行试算,结果表明,该方法有助于精确刻画油气藏边界,提高储层流体识别的精度。将该方法应用于实际地震资料处理,频变流体因子反演结果与测井综合解释结果有较高的一致性,验证了本方法的可行性与实用性。

1 基于匹配追踪谱分解的频变 AVO 反演方法

1.1 基于 Morlet 小波的匹配追踪谱分解原理

匹配追踪算法将信号在超完备时频原子库(字典)中进行分解,将地震信号自适应地表示为匹配原子的线性组合形式^[19]。其中,原子库是由一系列时频原子

组成的完备集合,时频原子是通过时窗函数做伸缩变换(频率调制)、时移以及相位调制得到的。常用的时频原子为高斯类时频原子,但在实际信号处理中,创建超完备子波库所使用的基本子波与原信号越相似,则分解效果越好。Morlet 等^[20]引入了 Morlet 小波,由于 Morlet 小波与地震信号具有较好的相似性^[21],因此可以利用 Morlet 小波作为母小波创建子波字典。根据小波字典的创建过程,Morlet 小波字典中的时频原子 $m_\gamma(t)$ 可以表述为:

$$m_\gamma(t) = \left(\frac{2\ln 2}{\pi}\right)^{1/4} \sqrt{\omega} \exp[-\ln 2\omega^2(t-u)^2] \cdot \exp\{i[2\pi\omega(t-u) + \varphi]\} \quad (1)$$

超完备时频原子库 \mathbf{D} 可以表示为:

$$\mathbf{D} = \{m_\gamma(t)\} = \{m_{\gamma=(u,\omega,\varphi)}(t)\}_{\gamma \in \Gamma} \quad (2)$$

非平稳地震信号 $s(t)$ 可以表示为匹配原子的线性展开式:

$$s(t) = \sum_{n=1}^M a_n m_{\gamma_n}(u, \omega, \varphi) + N_0, m_{\gamma_n}(u, \omega, \varphi) \in \mathbf{D} \quad (3)$$

经典匹配追踪算法核心是迭代的全局寻优贪婪算法,即估计信号 $s(t)$ 在字典 \mathbf{D} 中元素上的投影从而实现迭代分解,并通过设置合理的迭代次数或终止阈值,实现对原始信号进行重构。令原子 $m_{\gamma_1} \in \mathbf{D}$, 则地震信号 $s(t)$ 可以被分解为沿 m_{γ_1} 方向以及垂直方向的分量之和:

$$s(t) = \langle s, m_{\gamma_1} \rangle m_{\gamma_1} + R_1 s \quad (4)$$

现假设经过了 N 次迭代映射,获得残差信号为 $R_N s$, 则第 $N+1$ 次迭代算法具体为:

$$R_N s = \langle R_N s, m_{\gamma_{N+1}} \rangle m_{\gamma_{N+1}} + R_{N+1} s \quad (5)$$

因此,可通过求解内积 $\langle R_N s, m_{\gamma_{N+1}} \rangle$ 的最大值,逐次搜索出与原信号 $s(t)$ 统计特性最相似的时频原子。

全局最优搜索方式(GOS)会不惜将庞大的时频字典 \mathbf{D} 中所有原子搜索一遍。针对匹配追踪算法巨大计算量的问题,首先考虑对时频字典中时间参数 \mathbf{D} 的约束,多原子局部最优搜索方式即是每次迭代过程限制在多个时间位置附近,即残差信号瞬时振幅达到某个阈值范围的时间点对应时频搜索的中心^[7,8];其次,由于在匹配追踪之前的原始信号在任意时刻的瞬时频率和瞬时相位等先验信息皆给出了此时间点比较准确的频率和相位特征^[19,21],从而进一步限制了频率和相位的匹配范围。因此,快速匹配追踪算法的参数搜索方式可表示为:

$$\gamma_n = \{u_0, \omega \in U[\omega(u_0), \delta_\omega], \varphi \in U[\varphi(u_0), \delta_\varphi]\}, \\ u_0 = \{t_0 : A(t_0) = \max[A(t)]\} \quad (6)$$

$A(t)$ 、 $\omega(t)$ 和 $\varphi(t)$ 3 个原子参数均可在其搜索领域内进行搜索寻优,相比全局贪婪搜索方式大大提高了计

算效率。

由于 WVD 具有最高的时频分辨率,且建立在匹配追踪算法将非平稳地震信号分解为一系列时频原子线性组合的基础上,从而地震信号的时频能量谱 $W_f(t, \omega)$ 可以表示为匹配原子 WVD 的叠加形式:

$$W_f(t, \omega) = \sum_{n=1}^M a_n^2 \text{WVD}[m_{\gamma_n}(t, \omega)] \quad (7)$$

匹配追踪 Wigner-Ville(MP-WVD)时频表征方法由于不涉及到窗函数的概念,因此不存在时频分辨率矛盾的问题,并且有效地解决 WVD 交叉项干扰(CII)问题。

为验证基于 Morlet 小波动态匹配追踪 WVD 时频表征方法的应用效果,设计了由 11 个 Morlet 小波组成的一维理论信号,如图 1(a)中蓝线所示,动态匹配追踪算法搜索结果见图 1(b)—图 1(d),图 1(a)中红色虚线为匹配追踪(MP)重构信号。此外,为研究匹配追踪算法的时频分辨特性,对比分析了短时傅立叶变换(STFT)、S 变换(ST)、连续小波变换(CWT)以及 MP-WVD 的时频谱计算结果(图 2)。由图 2 可见,MP-WVD 时频谱的时频分辨率远远优于常规时频分析方法,该方法的时频能量聚集能力最强,可以清晰地

对原子时间和频率信息进行定位,为高分辨率时频域 FAVO 直接反演奠定了数据基础。

1.2 频变 AVO 反演原理 (FAVO)

Zhang 等^[13]基于中观尺度 White 模型分析了各弹性参数因孔隙所含流体类型不同引起的频散程度差异大小,研究表明,Gassmann 流体项相比其他弹性参数的频变现象更加明显。Russell 等^[22]研究了孔隙介质的 AVO 理论,提出了利用 Gassmann 流体项表示的 Zoeppritz 方程近似式:

$$R_{pp}(t, \theta) = A(\theta) \frac{\Delta f}{f}(t) + B(\theta) \frac{\Delta \mu}{\mu}(t) + C(\theta) \frac{\Delta \rho}{\rho}(t) \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} A(\theta) &= \left(\frac{1}{4} - \frac{\gamma_{\text{dry}}^2}{4\gamma_{\text{sat}}^2} \right) \sec^2 \theta \\ B(\theta) &= \frac{\gamma_{\text{dry}}^2}{4\gamma_{\text{sat}}^2} \sec^2 \theta - \frac{2}{\gamma_{\text{sat}}^2} \sin^2 \theta \\ C(\theta) &= \frac{1}{2} - \frac{\sec^2 \theta}{4} \end{aligned} \quad (9)$$

由于地震波在含流体介质中传播时会发生频散现象,其中密度项不随频率的变化而变化,因此可以将上式扩展为:

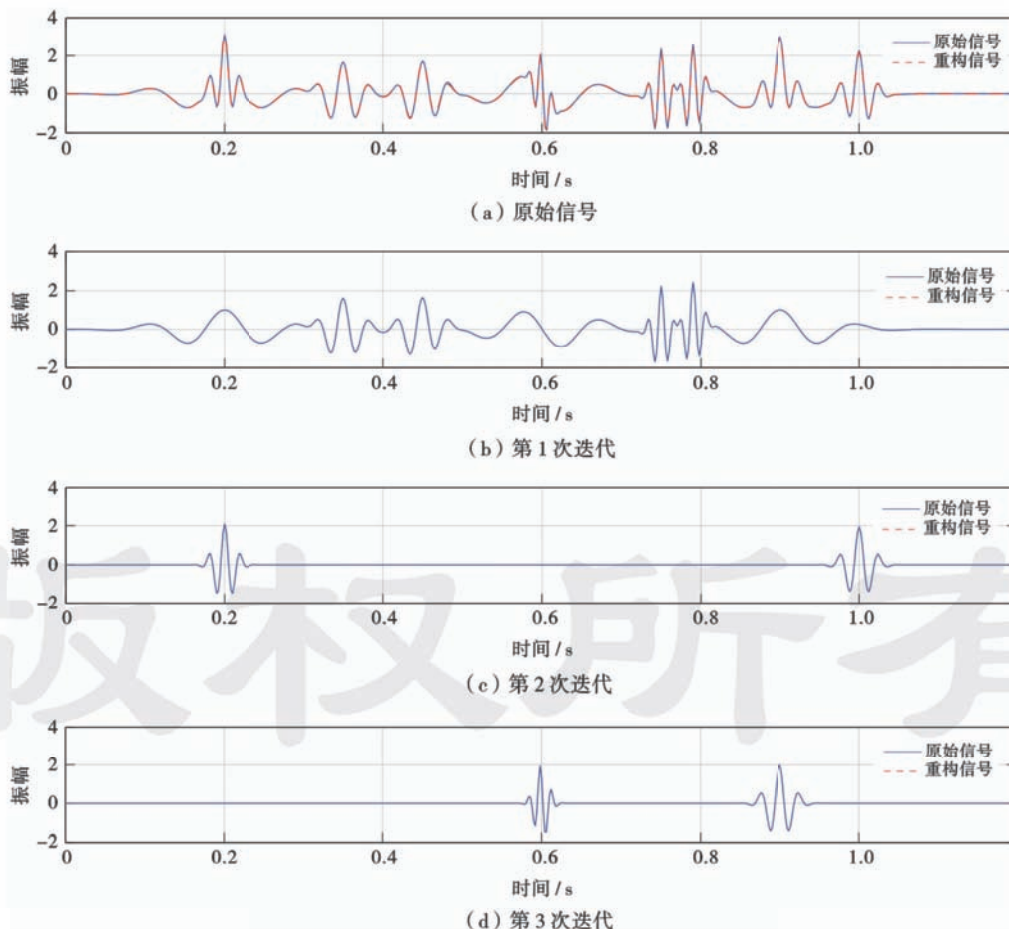


图 1 动态匹配追踪算法搜索结果

Fig. 1 Searching results of dynamic matching pursuit algorithm

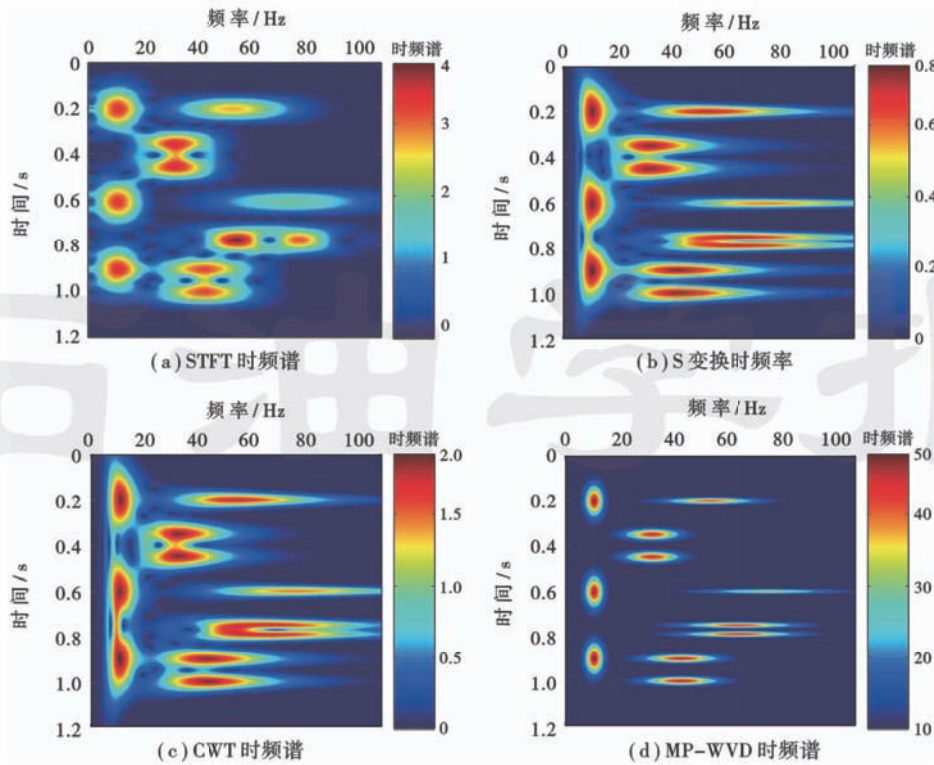


图2 不同时频分析方法得到的时频谱对比

Fig. 2 Estimated time-frequency spectrums with different time-frequency analysis methods

$$R_{pp}(t, \theta, \omega) = A(\theta) \frac{\Delta f}{f}(t, \omega) + B(\theta) \frac{\Delta \mu}{\mu}(t, \omega) + C(\theta) \frac{\Delta \rho}{\rho}(t) \quad (10)$$

假设已知地震波的主频为 ω_0 , 且令 ω_0 作为参考频率, 则将上式在参考频率 ω_0 处线性泰勒展开, 得到:

$$R_{pp}(t, \theta, \omega) \approx A(\theta) \frac{\Delta f}{f}(t, \omega_0) + (\omega - \omega_0) A(\theta) D_f + B(\theta) \frac{\Delta \mu}{\mu}(t, \omega_0) + (\omega - \omega_0) B(\theta) D_\mu + C(\theta) \frac{\Delta \rho}{\rho}(t) \quad (11)$$

其中,

$$D_f = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\Delta f}{f} \right) \quad (12)$$

$$D_\mu = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\Delta \mu}{\mu} \right)$$

为进一步明确地震波频散的意义, 将上式重新整理得到:

$$R_{pp}(t, \theta, \omega) \approx R_{pp}(t, \theta, \omega_0) + \alpha(t, \theta, \omega) \quad (13)$$

假设弹性层情况下 $R_{pp}(t, \theta, \omega) = R_{pp}(t, \theta, \omega_0)$; 则对应频率 ω 处的频散程度大小 $\alpha(t, \theta, \omega)$ 为:

$$\alpha(t, \theta, \omega) = (\omega - \omega_0) A(\theta) D_f + (\omega - \omega_0) B(\theta) D_\mu \quad (14)$$

考虑 Robinson 褶积模型^[23], 即自激自收的地震波场 $s(t)$ 相当于子波 $w(t)$ 与地层反射系数的褶积, 其

对应时频域的表达式为:

$$S(t, \theta, \omega) \approx W(t, \theta, \omega) R_{pp}(t, \theta, \omega) + N_o(t, \theta, \omega) \quad (15)$$

此外, 考虑地震波的频散效应, 将式(11)代入式(15), 得到:

$$S(t, \theta, \omega) \approx W(t, \theta, \omega) [R_{pp}(t, \theta, \omega_0) + \alpha(t, \theta, \omega)] + N_o(t, \theta, \omega) \quad (16)$$

上式在频率为 ω_i 和 ω_0 时的表达式为:

$$S(t, \theta, \omega_0) \approx W(t, \theta, \omega_0) R_{pp}(t, \theta, \omega_0) + N_o(t, \theta, \omega_0) \quad (17)$$

$$S(t, \theta, \omega_i) \approx W(t, \theta, \omega_i) [R_{pp}(t, \theta, \omega_0) + \alpha(t, \theta, \omega_i)] + N_o(t, \theta, \omega_i) \quad (18)$$

为了更加简单直观地说明式(18)所阐述的频变AVO反演主要原理, 图3展示式(18)包含的4个主要部分, 分别为频变叠前地震道集的时频谱 $S(t, \theta, \omega_i)$ [图3(a)], 地震子波频谱 $W(t, \theta, \omega_i)$ [图3(b)], 反射系数的时频谱 $R_{pp}(t, \theta, \omega_0)$ [图3(c)]以及含流体介质引起的局部频散效应 $\alpha(t, \theta, \omega_0)$ [图3(d)]. 通过式(18) $\times W(t, \theta, \omega_0)$ - 式(17) $\times W(t, \theta, \omega_i)$ 可得:

$$W(t, \theta, \omega_0) S(t, \theta, \omega_i) - W(t, \theta, \omega_i) S(t, \theta, \omega_0) = W(t, \theta, \omega_0) W(t, \theta, \omega_i) \alpha(t, \theta, \omega_i) \quad (19)$$

假设在具有 N_s 个采样点、2 个人射角度、 K 个频率的情况下, 式(19)以矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} W_1^0 S_1^0 - W_1^1 S_1^0 \\ W_2^0 S_2^0 - W_2^1 S_2^0 \\ \vdots \\ W_p^0 S_p^0 - W_p^1 S_p^0 \\ W_1^0 S_1^0 - W_1^2 S_1^0 \\ \vdots \\ W_p^0 S_p^0 - W_p^2 S_p^0 \\ \vdots \\ W_p^0 S_p^K - W_p^K S_p^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1^0 W_1^1 \Delta F^1 A_1^1 & W_1^0 W_1^1 \Delta F^1 B_1^1 \\ W_2^0 W_2^1 \Delta F^1 A_2^1 & W_2^0 W_2^1 \Delta F^1 B_2^1 \\ \vdots & \vdots \\ W_p^0 W_p^1 \Delta F^1 A_p^1 & W_p^0 W_p^1 \Delta F^1 B_p^1 \\ W_1^0 W_1^2 \Delta F^2 A_1^2 & W_1^0 W_1^2 \Delta F^2 B_1^2 \\ \vdots & \vdots \\ W_p^0 W_p^2 \Delta F^2 A_p^2 & W_p^0 W_p^2 \Delta F^2 B_p^2 \\ \vdots & \vdots \\ W_p^0 W_p^K \Delta F^K A_p^K & W_p^0 W_p^K \Delta F^K B_p^K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_\mu \end{bmatrix} \quad (20)$$

为了简洁且适合讨论反演问题,将式(20)改写成矩阵表达形式:

$$S = G * \begin{bmatrix} D_1 \\ D_\mu \end{bmatrix} \quad (21)$$

本文在贝叶斯参数估计理论框架下^[16,17],利用基于 Cauchy 约束的贝叶斯 FAVO 反演方法求解上述反演方程,便可得到每个采样点处频变流体因子 $D_1(t)$ 、频变剪切模型 $D_\mu(t)$,令 $m = [D_1 \ D_\mu]^T$ 则目标泛函 $F(m)$ 可以表示为:

$$F(m) = (Gm - S)^T (Gm - S) + 2\sigma_n^2 \sum_{i=1}^{N_s} \ln(1 + m_i^2 / \sigma_m^2) \quad (22)$$

针对上述弱非线性目标泛函最优化问题本文选用反复加权最小二乘法(IRLS)求解。

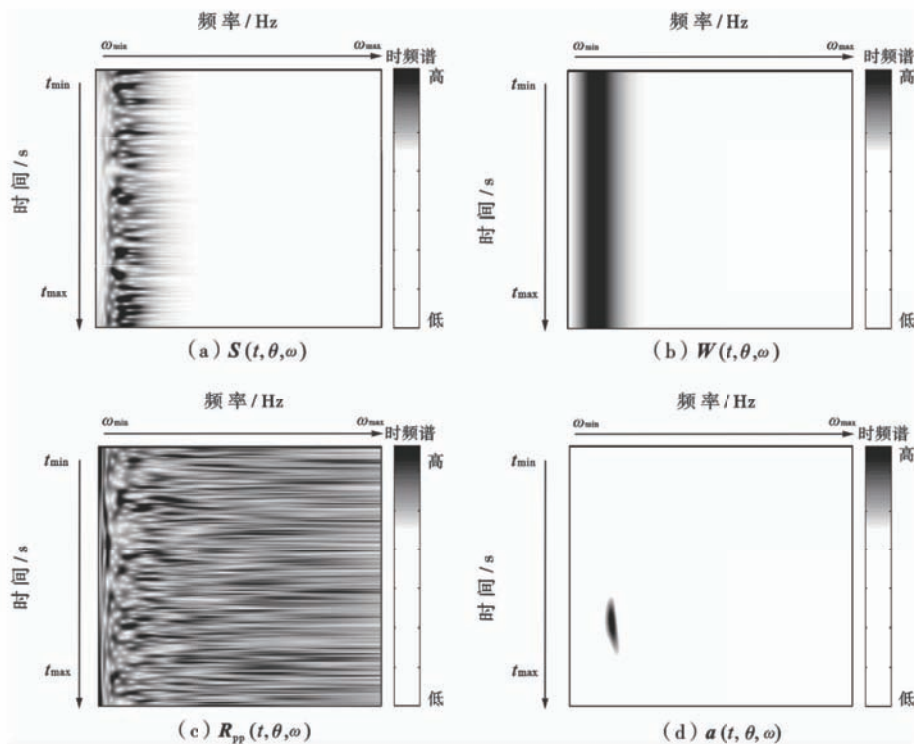


图 3 时频域 FAVO 直接反演原理示意

Fig. 3 Frequency-dependent AVO inversion in time-frequency domain

2 模型试算

为了验证基于 MP-WVD 的高分辨率时频域 FAVO 直接反演的可行性与稳定性,分别进行一维和二维地震模型试算,此外,笔者详细分析不同谱分解方法在 FAVO 直接反演中的反演效果以及地层分辨率特点,从而进一步确认 MP-WVD 方法在高分辨率时频域联合反演中的有效性。

2.1 一维模型试算

采用一维过井旁道地震数据开展 FAVO 直接反演,如图 4(a)—图 4(c)所示为叠前部分角度叠加道集,图 4(d)为叠前小角度地震数据的 MP-WVD 时频分

析结果,红色矩形框指示区域为实际含油气储层发育位置。已知地震子波峰值频率在 42 Hz,对比图 4(d)中从浅层到深层的时频谱能量分布得出,含油气储层发育位置存在相对明显的低频能量异常现象,瞬时频率在 30 Hz 附近,整体频率大小向低频方向移动。然而含水层(1.1s 附近)以及其他非储层位置的频率特征却基本保持一致,没有明显的频率差异特征。

根据上述构建的 FAVO 直接反演方程,将地震子波的频率域响应直接融合到反演目标方程中,进而提取高分辨率频变流体因子 D_1 ,如图 5 所示。图 5(a)为基于高分辨率 MP-WVD 方法得到的小角度叠前地震道集的单频瞬时谱分量,分析得到,油气藏位置不仅仅

表现为明显的“亮点”型振幅异常特征,而且存在相对较强的频变现象。图 5(b)—图 5(d)分别为利用 MP-WVD 算法、CWT、STFT 得到的归一化 FAVO 反演结果,可以看到,基于匹配追踪算法得到的频变流体因

子属性的时间分辨率最高,可以有效地识别出油气藏位置。然而由于 CWT、STFT 本身时频分辨能力的限制,导致频变属性的时间域宽度增大,进而引起含油气储层边界的分辨能力降低。

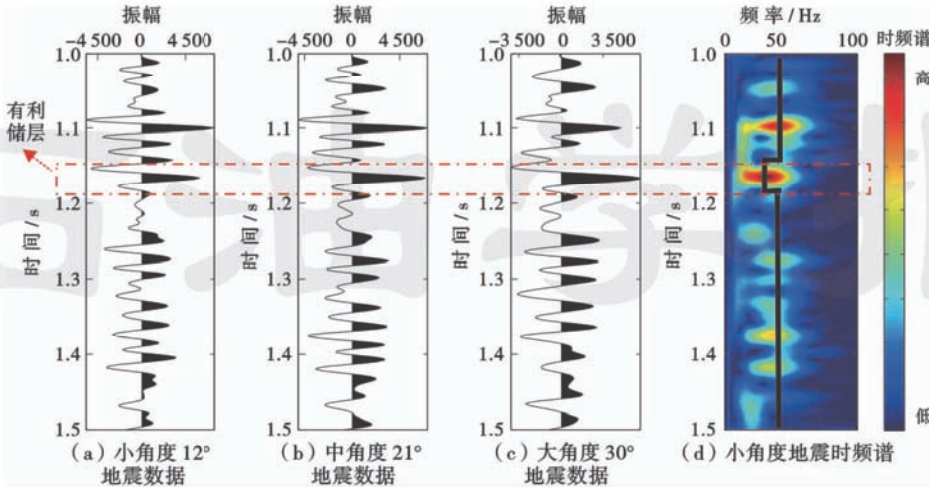


图 4 叠前部分角度叠加地震道集及 MP-WVD 时频分析结果

Fig. 4 Pre-stack angle seismic gathers and the result with MP time-frequency analysis

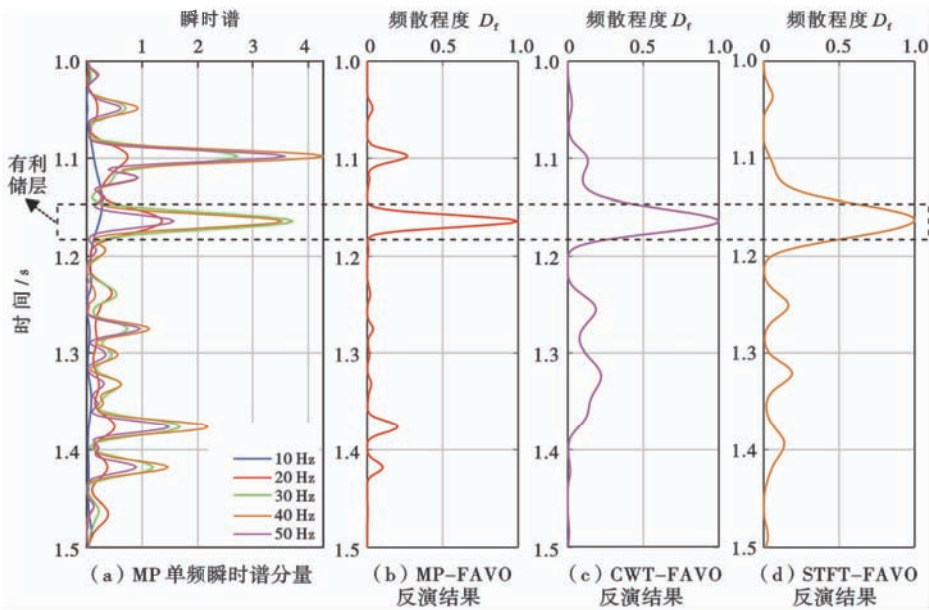


图 5 基于不同谱分解算法得到的一维时频域反演结果

Fig. 5 Estimated frequency-dependent attributes based on different spectral decomposition algorithms

2.2 二维模型试算

为了进一步验证该方法的可行性和反演结果的稳定性,针对 Hampson-Russell 软件中抽取的二维叠前地震道集进行了 FAVO 反演方法试处理。如图 6(a)所示小角度叠加地震剖面,横向上共选取 131 道,纵向上共 175 个采样点,采样间隔为 2ms,虚线所示位置为过气藏测井位置,椭圆形区域为典型的“亮点”型气藏位置。

首先依据地震数据开展 MP 高分辨率时频分析,并结合地震子波的频率域特征,进而确定 FAVO 反演所需的“优势频率段”信息,然后基于谱分解方法将地震数据分解为不同频率的单频瞬时谱分量信息。如图 6(b)、图 6(c)和图 6(d)为利用不同谱分解方法反演得到的二维频变流体因子剖面,图中粉色箭头指示气藏位置,对比 MP 算法、S 变换以及 CWT 反演结果可以看出,MP 算法的气藏分辨率最高,有助于刻画气

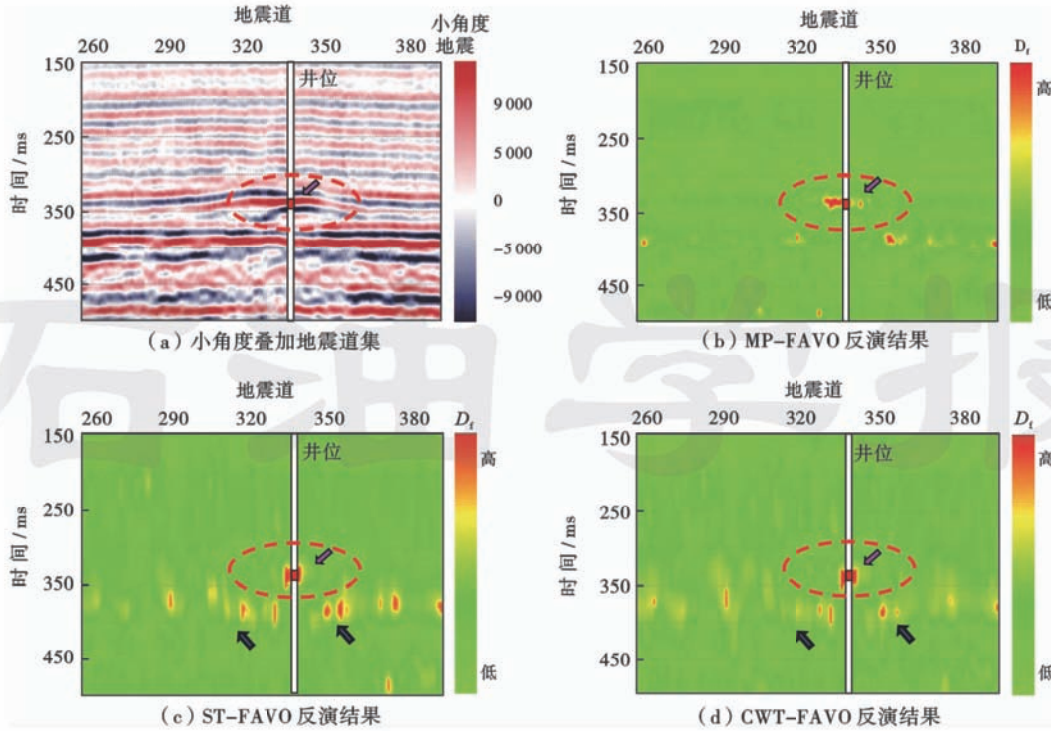


图 6 基于不同谱分解算法得到的时频域反演结果

Fig. 6 Estimated results of frequency-dependent fluid factors based on different spectral decomposition algorithms

藏的边界位置,提高对含气圈闭识别的精度。分析 ST 和 CWT 的反演剖面[图 6(c)、图 6(d)]可知,ST 和 CWT 反演分辨率相似,并且在气藏下方蓝色箭头所示区域存在大量‘虚假亮点’的干扰,可能是由于 ST 和 CWT 时频分辨率的局限性引起时间和频率定位不准确,导致频变流体因子反演结果出现能量异常高值。

3 实际资料处理

为了进一步验证本方法的实效性,联合匹配追踪谱分解方法对中国东部济阳拗陷勘探工区的实际资料开展时频域 FAVO 直接反演方法应用研究,并且通过与测井解释结果进行比较,进一步说明频变流体因子在储层流体性质直接检测方面的特点。工区内目的层为新近系河流相沉积储层,河道砂发育,属高孔高渗的典型复式油气聚集区。

图 7 为从工区内抽取的过 A 井、B 井的叠前小角度部分叠加地震数据连井线剖面,测试数据共有 252 个 CDP 道集,纵向上 201 个时间采样点,采样频率为 500 Hz,其中 A、B 井在储层位置处均表现出较强的反射同相轴。根据测井解释结果可知 A 井在 1.16~1.17 s 位置解释为含油储层,而 B 井在 1.22~1.23 s 位置却解释为含水储层。考虑到仅仅利用地震振幅信息进行流体检测可能存在多解性,需联合振幅和频率

特征进行频变 AVO 反演提取频变流体因子,以消除流体识别假象。

首先分析地震数据的时频域响应特征,确定频变 AVO 反演中的所需的优势频率成分。通过对 A 井和 B 井井旁道小角度地震数据进行 MP-WVD 时频分析,得到井旁道油藏位置与水藏位置瞬时谱对比结果(图 8)。地震数据在非油藏位置处的主频为 38 Hz[图 8(a)],而油藏位置处的主频比非油藏处主频偏低,降低至 32 Hz 左右,然而含水储层位置处却没有明显的频率异常现象[图 8(b)],因此说明频率异常特性具有区分储层含流体性质的潜力。

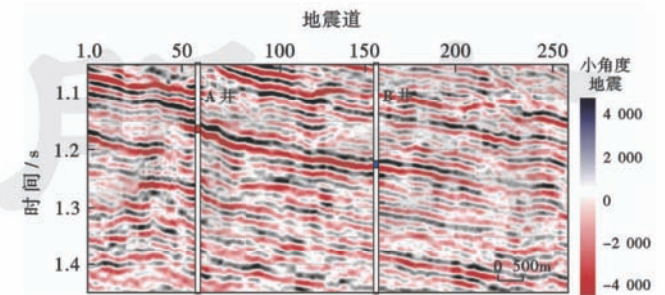


图 7 过 A 井、B 井的叠前小角度叠加地震道集及测井解释结果(测井解释:红色表示油藏,蓝色表示水藏)

Fig. 7 Pre-stack near-angle profiles with two known wells A and B including logging interpretation results

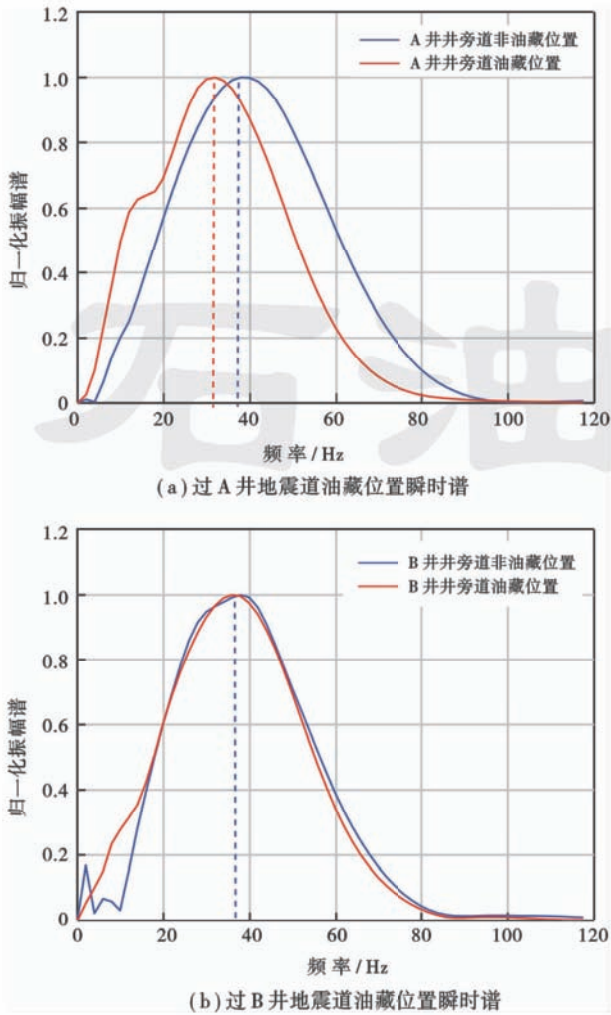


图8 井旁道小角度地震数据油藏位置与水库位置瞬时谱对比结果

Fig. 8 Comparison of instantaneous spectrum of borehole-side gathers at the location of oil with water reservoir

选取 32 Hz 为最优参考频率, 并利用 MP-WVD 高分辨率谱分解方法对小角度部分叠加地震数据提取 10 Hz、20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz 的单频瞬时谱分量, 部分单频分量如图 9 所示, 其中红色实线椭圆区域为油层位置, 虚线椭圆区域为含水层位置。通过比较油层和水层位置的优势能量范围的差异, 可以直接提取 30 Hz 的单频剖面[图 9(b)], 含油储层的能量明显高于含水储层, 进而一定程度上减弱了含水储层位置的强反射影响, 但剖面中仍然存在很多‘虚假亮点’的干扰, 对流体识别的有效性造成干扰。

A 井频变流体因子的异常区域与测井综合解释结果保持较高的一致性, 同样 B 井在含水储层位置没有明显的频变流体因子异常现象(图 10), 分析其原因是由于含油储层造成的频散现象要强于含水储层。相对频变流体因子 D_1 反演结果来看, 由于地震波在含烃储

层中传播时, 剪切模量 μ 随着频率的变化情况不明显。因此, 在频变剪切模量 D_{μ} 剖面中, A 井含油储层和 B 井含水储层位置皆没有出现频变异常现象。总体来讲, 频变流体因子一定程度上降低了流体检测的多解性, 具有储层流体性质直接检测的潜力。但频变流体因子反演剖面中在非含烃区域仍然存在一些微弱的干扰。究其原因, 是由于引起地震波频散现象的因素有很多, 如非含烃低 Q 值地层的影响、薄层调谐效应以及地震数据处理中人为因素的干扰。

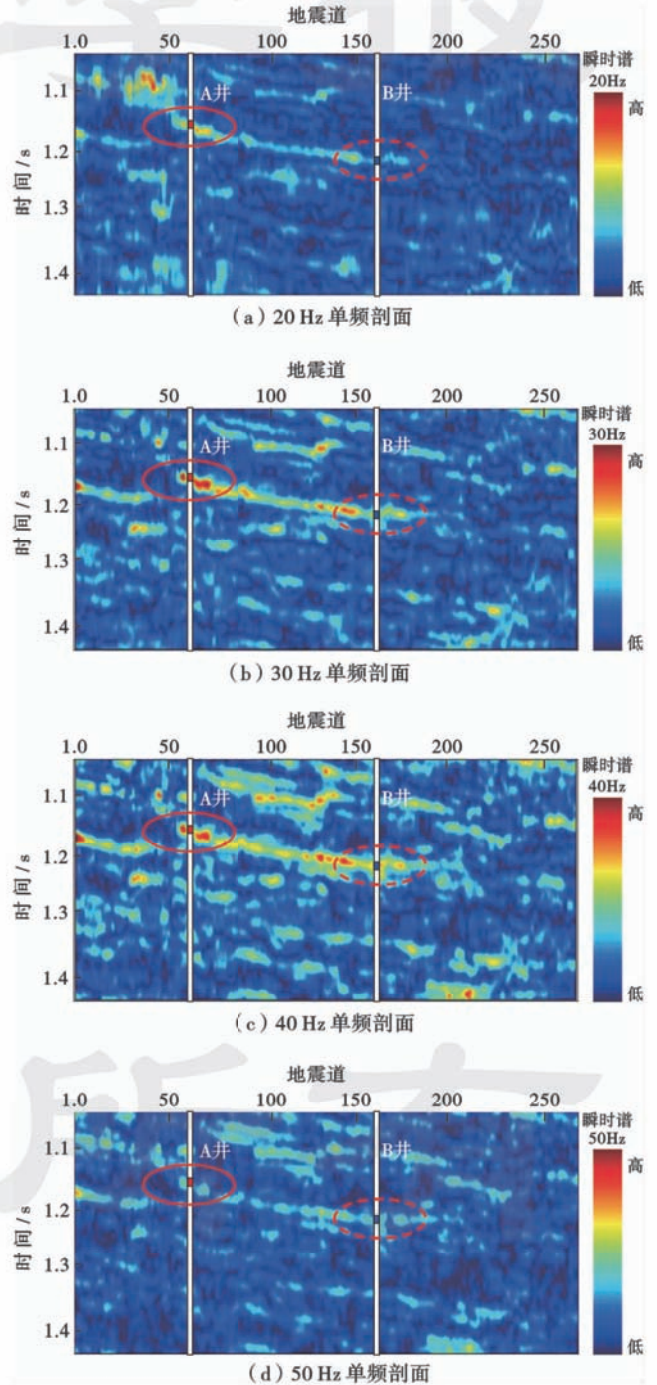


图9 叠前小角度地震数据单频瞬时谱分量剖面
Fig. 9 Iso-frequency instantaneous spectrums of pre-stack near-angle seismic gathers

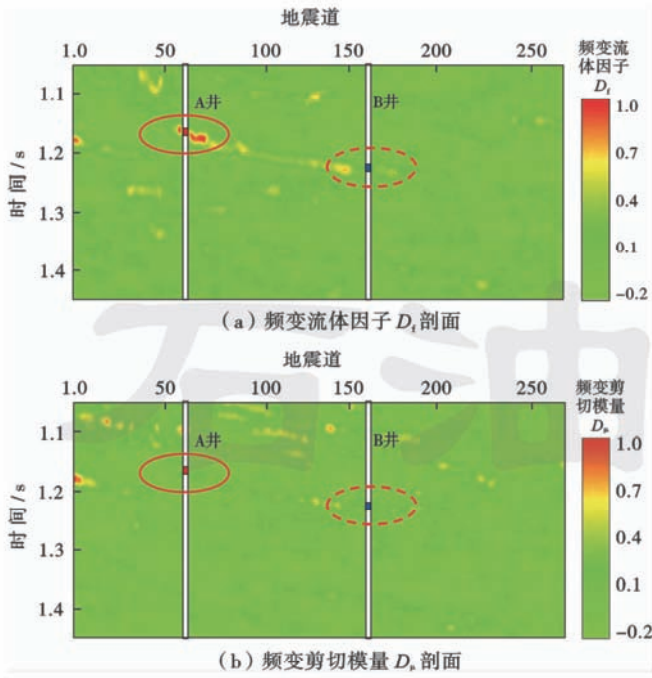


图 10 基于 MP-WVD 高分辨率时频域 FAVO 直接反演结果
Fig. 10 Estimated parameters of high-resolution FAVO inversion based on MP-WVD spectral algorithms

4 结 论

(1) 针对非平稳地震信号的时频分析方法主要包括 3 类:线性时频表示方法,如 STFT、CWT、ST 等;非线性时频分布方法,如 Wigner-Ville 分布与 Cohen 类分布等;匹配追踪时频表征方法(MP)以及反演谱分解算法(ISD)等。理论测试表明,MP-WVD 谱分解方法的时频聚集能力最强,具有最高的时频分辨率。

(2) 高分辨率时频域 FAVO 直接反演方法将谱均衡过程构建于反演目标方程中,减少了频散属性提取过程的中间环节,避免了在消除“子波叠印”时引入的累计误差。实际资料处理表明,将 MP-WVD 高分辨率谱分解算法应用于时频域 FAVO 直接反演中,有助于提高油气储层的边界识别能力,并且该方法充分利用了地震响应的振幅和频率信息,可以有效地检测出储层含流体类型,进一步降低勘探风险。

(3) 引起频率和振幅异常现象的机制有很多,如低 Q 值(非含烃因素)地层引起的固有衰减及频散、薄层调谐效应、人为处理因素等。因此,为消除频变“虚假亮点”干扰导致的储层流体识别的多解性,需综合利用地质、测井以及钻井信息。

符号注释: $m_\gamma(t)$ —Morlet 小波字典中的时频原子; γ —时频原子控制参数, $\gamma = (\mu, \omega, \varphi)$, μ 为时频原子中心时间延迟, s, ω 为地震频率调制, Hz, φ 为相位调

制因子, t —时间序列, s ; \mathbf{D} —完备时频原子库; Γ —根据原信号的时间、频率以及相位特征所建立的原子参数的集合; $s(t)$ —非平稳地震信号; α_n —原子振幅; N_0 —噪声干扰, M —匹配结果中所包含的原子数目; $R_1 s$ —第一次投影近似后的残差信号; $R_N s$ —第 N 次投影近似后的残差信号; $\langle \cdot \rangle$ —内积运算符; $\langle s, m_\gamma \rangle$ —原始信号 $s(t)$ 与时频原子 m_γ 的内积; γ_n —匹配追踪快速搜索算法的参数搜索方式; u_0 —逐次迭代的最大振幅位置; $U[\omega(u_0), \delta_\omega]$ —以瞬时频率为中心的频率搜索邻域, δ_ω 为频率搜索半径, Hz; $U[\varphi(u_0), \delta_\varphi]$ —以瞬时相位为中心的相位搜索邻域, δ_φ 为相位搜索半径; $A(t)$ —原信号的瞬时振幅; $\omega(t)$ —原信号的瞬时频率, Hz; $\varphi(t)$ —原信号的瞬时相位; $W_f(t, \omega)$ —匹配追踪 Wigner-Ville 时频谱; $R_{pp}(t, \theta)$ —Gassmann 流体项表征的 Zoeppritz 方程纵波反射近似式(Russell 近似公式); γ_{dry}^2 —干岩石纵横波速度比的平方; γ_{sat}^2 —含流体岩石的纵横波速度比的平方; f —Gassmann 流体项, Pa; μ —剪切模量, Pa; ρ —密度, kg/m^3 ; θ —平面纵波入射角, ($^\circ$); ω_0 —地震参考频率, Hz; \mathbf{D}_f —频变流体因子; \mathbf{D}_μ —频变剪切模量; \mathbf{D}_f —频变流体因子列向量; \mathbf{D}_μ —频变剪切模量列向量; $R_{pp}(t, \theta, \omega_0)$ —参考频率 ω_0 下的纵波反射系数; $R_{pp}(t, \theta, \omega)$ —任意频率 ω 对应的纵波反射系数; $\alpha(t, \theta, \omega)$ —频率 ω 处的频散程度大小; $\mathbf{S}(t, \theta, \omega)$ —叠前地震道集的时频谱矩阵; $\mathbf{W}(t, \theta, \omega)$ —地震子波频谱矩阵; $\mathbf{R}_{pp}(t, \theta, \omega)$ —频变反射系数时频谱矩阵; $\boldsymbol{\alpha}(t, \theta, \omega)$ —频散属性的时频谱矩阵; $\mathbf{N}_0(t, \theta, \omega)$ —随机噪声时频谱向量; $\mathbf{S}(t, \theta, \omega_i)$ — ω_i 频率位置对应的叠前地震时频谱矩阵; $\mathbf{W}(t, \theta, \omega_i)$ — ω_i 频率位置对应的地震子波频谱矩阵; $\mathbf{R}_{pp}(t, \theta, \omega_0)$ —参考频率 ω_0 对应反射系数时频谱矩阵; ω_{\min} —地震频带的最小频率, Hz; ω_{\max} —地震频带的最大频率, Hz; t_{\min} —最小时间深度, s; t_{\max} —最大时间深度, s; \mathbf{S}_j^i —频率 ω_i 在第 j 入射角对应单频瞬时振幅向量, $i = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, P$; \mathbf{W}_j^i —第 j 入射角对应子波在频率处的振幅谱矩阵; $\Delta \mathbf{F}^i$ —频率 ω_i 与频率 ω_0 之差组成的对角线矩阵; $\mathbf{A}_j^i, \mathbf{B}_j^i$ —Russell 地震反射近似公式系数矩阵; \mathbf{m} —待反演模型参数向量,由频变流体因子和频变剪切模量组成, $\mathbf{m} = [\mathbf{D}_f \ \mathbf{D}_\mu]^T$; \mathbf{S} —参考频率 ω_0 处不同频率的瞬时谱差异向量; \mathbf{G} —时频域 FAVO 正演矩阵; $F(\mathbf{m})$ —FAVO 反演目标泛函; σ_n —噪声时频谱向量的均方差; σ_m —频变属性向量 \mathbf{m} 的均方差; m_i 为待反演模型参数采样点。

参 考 文 献

[1] 邓继新, Han Dehua, 王尚旭. 基于正演模型的储层谱分解响应特

- 征分析[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 539-543.
- Deng Jixin, Han Dehua, Wang Shangxu. Analysis on spectral decomposition response of reservoir based on forward modeling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(4): 539-543.
- [2] 黄捍东, 向坤, 王彦超, 等. 匹配追踪法在碳酸盐岩流体检测中的应用——以哈萨克斯坦楚-萨雷苏盆地为例[J]. 石油学报, 2015, 36(增刊 2): 184-193.
- Huang Handong, Xiang Kun, Wang Yanchao, et al. Application of matching pursuit method for detection of fluid in carbonate rock: a case study from Chu-Sarysu Basin in Kazakhstan[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(Supplement 2): 184-193.
- [3] Mallat S G, Zhang Zhifeng. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [4] Liu Jianlei, Wu Yafei, Han Dehua, et al. Time-frequency decomposition based on ricker wavelet[R]. SEG-2004-1937, 2004.
- [5] Liu Jianlei, Marfurt K J. Matching pursuit decomposition using Morlet wavelets[R]. SEG-2005-0786, 2005.
- [6] Wang Yanghua. Seismic time-frequency spectral decomposition by matching pursuit[J]. *Geophysics*, 2007, 72(1): V13.
- [7] 张繁昌, 李传辉, 印兴耀. 基于动态匹配子波库的地震数据快速匹配追踪[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 667-673.
- Zhang Fanchang, Li Chuanhui, Yin Xingyao. Seismic data fast matching pursuit based on dynamic matching wavelet library[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(5): 667-673.
- [8] 张繁昌, 李传辉. 地震信号复数域高效匹配追踪分解[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(2): 171-175.
- Zhang Fanchang, Li Chuanhui. Complex domain efficient matching pursuit decomposition of seismic signals[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(2): 171-175.
- [9] Wilson A, Chapman M, Li Xiangyang. Frequency dependent AVO inversion[R]. SEG-2009-0341, 2009.
- [10] Wu Xiaoyang, Chapman M, Wilson A, et al. Estimating seismic dispersion from pre-stack data using frequency-dependent AVO inversion[R]. SEG-2010-0425, 2010.
- [11] 张世鑫, 印兴耀, 张广智, 等. 纵波速度频散属性反演方法研究[J]. 石油物探, 2011, 50(3): 219-224.
- Zhang Shixin, Yin Xingyao, Zhang Guangzhi, et al. Inversion method for the velocity dispersion-dependent attribute of P-wave[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2011, 50(3): 219-224.
- [12] 郝前勇, 张世鑫, 张峰, 等. 基于频变 AVO 反演的频散属性估算方法及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(2): 255-261.
- Hao Qianrong, Zhang Shixin, Zhang Feng, et al. Dispersion attributes estimation based on frequency-dependent AVO inversion and its application in hydrocarbon detection[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(2): 255-261.
- [13] Zhang Zhen, Yin Xingyao, Zong Zhaoyun. A New Frequency-dependent AVO attribute and its application in fluid identification [C]// *Proceedings of the 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013*. London: EAGE, 2013.
- [14] Zhang Shixin, Yin Xingyao, Zhang Guangzhi. Dispersion-dependent attribute and application in hydrocarbon detection[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011, 8(4): 498-507.
- [15] 印兴耀, 曹丹平, 王保丽, 等. 基于叠前地震反演的流体识别方法研究进展[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 22-34.
- Yin Xingyao, Cao Danping, Wang Baoli, et al. Research progress of fluid discrimination with pre-stack seismic inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(1): 22-34.
- [16] Yin Xingyao, Zong Zhaoyun, Wu Guochen. Seismic wave scattering inversion for fluid factor of heterogeneous media[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(3): 542-549.
- [17] Yin Xingyao, Zong Zhaoyun, Wu Guochen. Research on seismic fluid identification driven by rock physics[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(2): 159-171.
- [18] 李景叶, 陈小宏. 基于地震资料的储层流体识别[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 235-238.
- Li Jingye, Chen Xiaohong. Reservoir fluid identification based on seismic data[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(2): 235-238.
- [19] 李传辉. 地震信号快速匹配追踪分解及瞬时谱分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
- Li Chuanhui. Fast matching pursuit decomposition and instantaneous spectral analysis of seismic signals[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2012.
- [20] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. Wave propagation and sampling theory Part II: sampling theory and complex waves[J]. *Geophysics*, 1982, 47(2): 222-236.
- [21] 陈林, 宋海斌. 基于 Morlet 小波匹配追踪算法的地震时频属性提取[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(6): 673-679.
- Chen Lin, Song Haibin. Extraction of seismic time-frequency attribute based on Morlet wavelet match tracing algorithm[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2008, 43(6): 673-679.
- [22] Russell B H, Hedlin K, Hilterman F J, et al. Fluid-property discrimination with AVO: a Biot-Gassmann perspective[J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 29-39.
- [23] Robinson E A. Predictive decomposition of time series with applications to seismic exploration[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1954.

(收稿日期 2015-12-31 改回日期 2016-04-22 责任编辑 宋宁)