

时频谱熵属性在春光油田储层预测中的应用研究

肖 学¹, 田仁飞², 赵乾辰¹

(1. 中石化河南油田分公司勘探开发研究院, 河南 郑州 450018; 2. 成都理工大学地球物理学院, 四川 成都 610059)

摘要: 为了识别岩性油藏薄储层中的油水分布, 发展了高精度时频谱熵的计算方法。通过对比分析短时傅里叶变换、连续小波变换、Wigner-Ville 变换、S 变换的时频方法基础上, 论证了改进的广义 S 变换可获得更高时间分辨率的时频谱熵。利用时频谱熵方法研究了春光油田的沙湾组油水识别效果, 其结果表明: 时频谱熵能够有效地区分含油、含水储层, 与实际钻井成果一致。进一步验证了该方法相对于传统储层预测方法, 在岩性油藏检测中具有更大的优势和更好的识别能力。

关键词: 广义 S 变换; 时频谱熵; 含油储层预测; 春光油田; 岩性油藏

中图分类号: P631 文献标志码: A

Time-frequency spectrum entropy for reservoir prediction of Chunguang Oilfield

XIAO Xue¹, TIAN Renfei², ZHAO Qianchen¹

(1. Exploration and Development Research Institute of Henan Oilfield Company, SINOPEC, Zhengzhou 450018, China; 2. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to identify the distribution of oil and water in thin lithologic reservoirs, it is developed a calculation method for high precision time-frequency spectrum entropy. By comparing and analyzing short-time Fourier transform, wavelet transform, Wigner-Ville transform and S transform, it is concluded that the improved generalized S transform can obtain time-frequency spectrum entropy with higher time resolution. The effect of oil-water identification for Shawan Formation in Chunguang Oilfield was studied by using the time-frequency spectrum entropy method. The results show that time-frequency spectrum entropy can effectively distinguish oil-bearing and water-bearing reservoirs, which is consistent with actual drilling results. It is further verified that the time-frequency spectrum entropy method has more advantages and better recognition ability in lithologic reservoir detection than the traditional reservoir method.

Key words: generalized S transform; time-frequency spectrum entropy; oil bearing reservoir prediction; Chunguang Oilfield; lithologic reservoir

春光油田位于准噶尔盆地车排子凸起区域, 纵向上在沙湾组发育多套岩性油气藏, 利用地震振幅类属性^[1]、电阻率参数^[2]能够较好的识别该类岩性储层, 但油水识别困难。因此, 有必要发展适合春光油田的储层预测油水识别方法。储层中含流体(油或水)后会改变地震信号的频谱特征, 这种频谱特征的变化可用熵表示。从信息角度看, 熵表征信号的微小变化的有序状态, 有序信号具有小的熵值, 而无序信号具有较大的熵值^[3]。储层含油气后, 熵值会增大。时频谱熵是不同频率的熵的融合体, 对信号的无序反应灵敏, 该参数在储层预测^[4]、滚动轴承故障识别^[5]中取得了较好的应用效果。然而, 现有的时频谱熵计算方法由于精度不高、分辨率较低, 为

了获得高精度的时频谱熵, 设计一种高精度的时频分析方法至关重要。改进广义 S 变换是在 S 变换^[6]的基础上, 通过拓展广义 S 变换中的小波基函数为任意可变的函数来提高时频分辨率, 而通过调节广义 S 变换中的参数因子使其能够获得更高精度的时频分辨率, 具有灵活性^[7-8], 为此, 我们结合信息熵的算法, 发展了基于改进广义 S 变换的高精度时频谱熵算法, 并将其用在春光油田 C22 井区的含油储层预测中, 获得了较好的实际应用效果。

收稿日期: 2019-08-05; 改回日期: 2019-11-12。

第一作者简介: 肖学(1966—), 研究员, 主要研究方向为地震地质综合研究。E-mail: xiaoxue2218@sohu.com。

1 基本原理

1.1 时频变换的原理

时频变换作为一种常规的地震信号分析方法在地震储层预测中得到了广泛应用。常用的时频变换方法主要有短时傅里叶变换、连续小波变换、Wigner-Ville变换^[9]。近几年,发展了S变换及其改进算法,由于S变换可以根据信号的特点自适应的调节窗函数,获得较高精度的时频分辨率,因此,在地震信号分析中具有更好的应用效果^[10]。本文主要用到以上时频变换的正变换,下面做简要论述,详细的理论分析和各种时频变换方法的性质、特点等参考文献[6]、[9]^[6,9]。

1.1.1 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换是经典的时频变换方法,它将时间域的信号变换到时频域二维的表达形式,从而获得信号的时频特征。其核心思想是在傅里叶变换的基础上加滑动短时窗(通常加高斯窗),并假定信号在这短时窗中是平稳信号,由此短时傅里叶变换(STFT)定义为

$$\text{STFT}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) g(\tau - t) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

式中,STFT(t, f)为短时傅里叶变换, t 为时间, $s; \tau$ 为时间延迟, $s; f$ 为频率,Hz; $x(\tau)$ 为时间域信号, $g(\tau - t)$ 为窗函数,无量纲。短时傅里叶变换时频分辨率受窗函数长度影响较大,通常要获得较高时间分辨率需要短时窗,而要获得较高频率分辨率需要长时窗。实际应用中,可以根据信号的特征来调整窗函数大小。

1.1.2 连续小波变换

在 $L^2(R)$ 空间,信号 $x(\tau)$ 的连续小波变换定义为

$$\text{CWT}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R x(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

式中,CWT(a, b)为小波变换系数, a 为尺度参数, b 为平移参数, $\varphi(\frac{t-b}{a})$ 为小波基函数,均为无量纲参数。目前,在实际应用中构建的小波基函数较多,在地震信号分析中,我们用morlet小波基函数。通常大尺度,表征信号的低频部分;小尺度,表征信号的高频部分。

1.1.3 Wigner-Ville变换

信号 $x(t)$ 的Wigner-Ville变换可以定义为

$$\text{WV}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

式中,WV(t, f)为Wigner-Ville分布, t 为时间, $s; f$ 为频率,Hz; $z(t)$ 为 $x(t)$ 的解析信号^[9],无量纲。Wigner-Ville分布是一种分析非平稳信号的重要工具,具有较好的时频聚集性,但对于多分量信号受交叉项的影响较为严重,常造成信号的时频特征模糊不清,通过加窗平滑在一定程度上能够改善交叉项的影响。

1.1.4 改进广义S变换

Stockwell在1996年提出了S变换算法,该算法的核心是在地震信号 $x(t)$ 的连续小波变换(CWT)^[11]的基础上,将S变换定义为一个小波变换与特定函数的乘积,并经过重新整理S变换的公式,其表达式为

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} 2e^{-i2\pi f t} dt \quad (4)$$

此后,许多学者在S变换的基础上,针对小波基

函数 $w(t) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\tau^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t}$ 进行拓展到任意可变换形状的一般函数 $h(t)$,提出了广义S变换的一般表达式为

$$\text{GST}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) h(t - \tau) e^{-i2\pi f t} dt \quad (5)$$

式(4)和(5)中, t, τ, f 参数与式(1)一致。为了获得更高的时频分辨率,在广义S变换做了进一步改进,增加了两个调节因子参数,改进的广义S变换公式可以改写为^[7-8]

$$\text{NGST}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi} |f|^r} e^{-\frac{(\tau-t)^2}{2 s^2 f^{2v}}} e^{-i2\pi f t} dt \quad (6)$$

式(6)中,频率 $f \neq 0$,参数 S 和 r 均为调节因子,无量纲,且 $S > 0, r > 0$ 这就是改进的广义S变换。

1.1.5 时频变换对比分析

为了验证改进的广义S变换在时频分辨率上比其他时频分析方法更具优势,我们利用单道地震信号对比分析了短时傅里叶变换(STFT)、连续小波变换(CWT)、Wigner-Vile变换和S变换,其结果如图1。图1中短时傅里叶变换由公式(1)计算,时窗为高斯窗函数,时窗大小按照计算信号1/6长度自动调节;连续小波变换由公式(2)计算,采用MATLAB软件包自带的函数CWT,尺度长度256,用morlet作为小波基函数;Wigner-Vile分布由公式(3)计算,未加滑动时窗做平滑处理;S变换由公式(4)计算;广义S变换

由公式(5)计算,利用频率窗宽度随频率 f 呈反比变化高斯窗函数^[8];改进的广义S变换采用公式(6)计算,经过试验,当 s 和 r 调节因子均为0.5具有较好的时间分辨率。从图1可知:S变换在时频分布图上能量相对集中,图像也比较光滑;而Wigner-Vile变换受交叉项影响较大;短时傅里叶变换时间分辨率较低,主要受时窗大小影响较为严重;小波变换纵向时间分辨率较低,而横向频率分辨率较高。总体而言,S变换可以通过改变小波基函数获得较高的时间、频率分辨率,这在地震信号时频变换应用中展现了较好的优势。进一步对S变换进行改进,其计算利用式(6),通过调节 s 、 r 因子和优选一般形式的基函数,可以提高时频分辨率,体现了广义S变换的灵活性。为了突出对薄储层识别能力,参数选择时候更多考虑突出时间分辨率。由图2可知:改进的广义S变换能量更为集中,横向时间轴也可以分离(图中虚线方框内),因此,改进的广义S变换具有更高的时间分辨率,更适合薄储层的地震响应特征的计算,即使频率分辨率有一定降低,但仍满足高精度时频谱熵属性的计算。

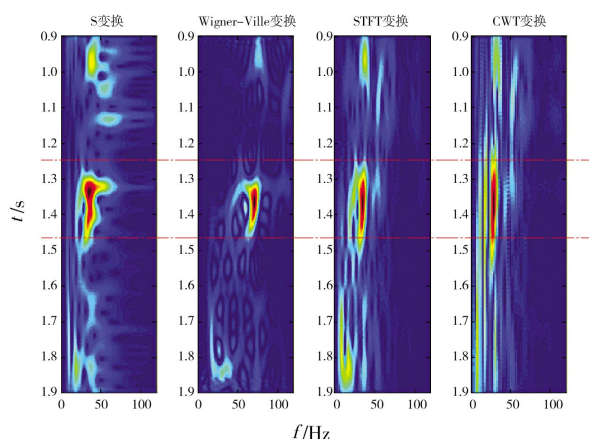


图1 几种时频变换对比

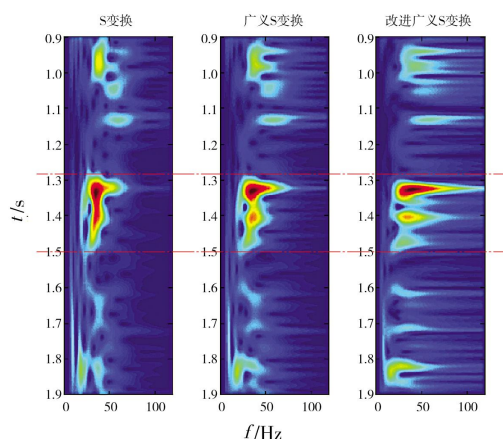


图2 改进广义S变换时频对比

1.2 时频谱熵算法原理

利用公式(7)计算地震信号每一时间点的瞬时能量谱,在地震信号有效频带范围内,利用概率密度函数为^[4]

$$p(i) = \frac{s(f_i)}{\sum_{k=1}^N s(f_k)} \quad (7)$$

式(7)中, $S(f_i)$ 是 f_i 的能量, $P(i)$ 是对应的概率密度, N 是信号通过改进的广义S变换后频率成分的所有点数,均为无量纲参数。

通过对地震信号采用时频变换后,利用式(7)得到概率密度函数,根据谱熵的定义,时频谱熵的计算公式为

$$H = - \sum_{k=1}^N p^k \log(p^k) \quad (8)$$

式(8)中, H 为时频谱熵, p 为概率密度函数, k 为时间样点,均为无量纲参数。利用公式(8)计算所有地震信号的时频谱熵后,可以根据储层与非储层的时频谱之间的差异进行储层含油性预测。

2 应用实例

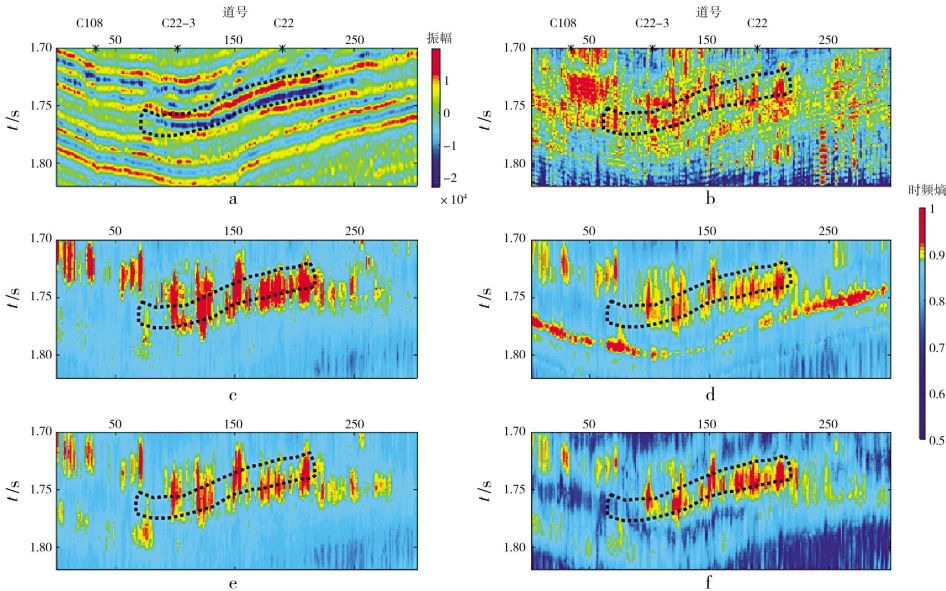
春光油田主要是以岩性油藏为主,位于准噶尔盆地西北部车排子地区^[12]。目标层为沙湾组 T_2 砂组砂体,该储层段砂岩表现出较强的非均匀性,以砂泥互层、泥包砂岩相组合为特征,储层薄、孔隙度高。其中,根据C22井测井解释结果显示:C22井的测井储层解释厚度仅4.5 m,平均孔隙度为28.97%。目前该地区沙湾组的含油砂体、含水砂体的地震响应特征区分不太明显,导致利用地震资料进行油水识别困难。为了探索时频谱熵对油水识别的能力,我们从已知钻井出发,统计了工区已钻7口井沙湾组 T_2 的试油情况,如表1。并提取通过C108、C22-3、C22井的联井地震剖面,如图3a。由图3a和表1可知:C22井沙湾组储层在地震上表现为强振幅特征,而未获得工业油流的C108井目标层段振幅响应较弱。实际钻井表明C22-3为油水分界面,但在图3a的地震剖面上与C22油井地震振幅区分较小。这里,我们利用上述时频谱熵计算原理,计算了多种时频谱熵数据体。由图3的时频谱熵可知:几种时频谱熵的计算方法都能够反映 T_2 储层特征和分布(图中虚线框所示)。但Wigner-Ville变换由于受交叉项影响,时间分辨率较低,其计算时频谱熵的时间分辨率也较低;而连续小波变换计算的时频谱熵 T_2 层下方高值异常(图3d),可能是受 T_2 层下方强反射轴的影响较大,其他几种方法受强轴影响相对较小。综合时间分辨率

和能量聚集度综合考虑,改进的广义S变换计算的时频谱熵属性效果最佳。时频谱熵在区分油水储层也有一定识别能力,如图3f中油水同层C22-3井处于时频谱熵的能量相对较弱区域的边界,道号约80~110可解释为水层;道号约110~240解释为油层,其它为非储层。

表1 工区钻井沙湾组T₂试油情况统计表

井名	试油结论
C22	最高日产油 46.2 t,油井
C22-1	最高日产油 46.2 t,油井
C22-3	日产油 0.3 t、水 15.2 m ³ ,油水井
C22-2	日产水 20 m ³ 、无油,水井
C107	钻井未显示,非储层
C108	钻井未显示,非储层
P10	钻井未显示,非储层

为了更好的展示时频谱熵对储层的识别能力,沿层T₂提取了原始地震资料的瞬时振幅属性 (图4) 和基于改进的广义S变换计算的时频谱熵(图5)。从图4可知: 瞬时振幅属性能够较好的识别储层与非储层,与表1实际钻井结果吻合,但储层中油、水难以区分。由图5中,除了能够较好的区分储层与非储层外,还能够较好的区分含油储层和含水储层,且C22-3处于油水分界面的边界,C22-2时频谱熵为中低值,应为非油层,实际试油为水层,与表1实际试油结果吻合。上述利用时频谱熵检测方法,与瞬时振幅属性的分析结果相比,认为时频谱熵比瞬时振幅属性更能够较好的识别含油储层,具有较好的实用性。



a.地震剖面;b.时频谱熵基于Wigner-Ville变换;c.短时傅里叶变换;d.连续小波变换;e.S变换;
f.改进的广义S变换,虚线框为T₂目标层,储层的地震响应为强波谷特征,时频谱熵归一化到0~1之间,其色标一致。

图3 过C108、C22-3、C22井的联井地震剖面及时频谱熵

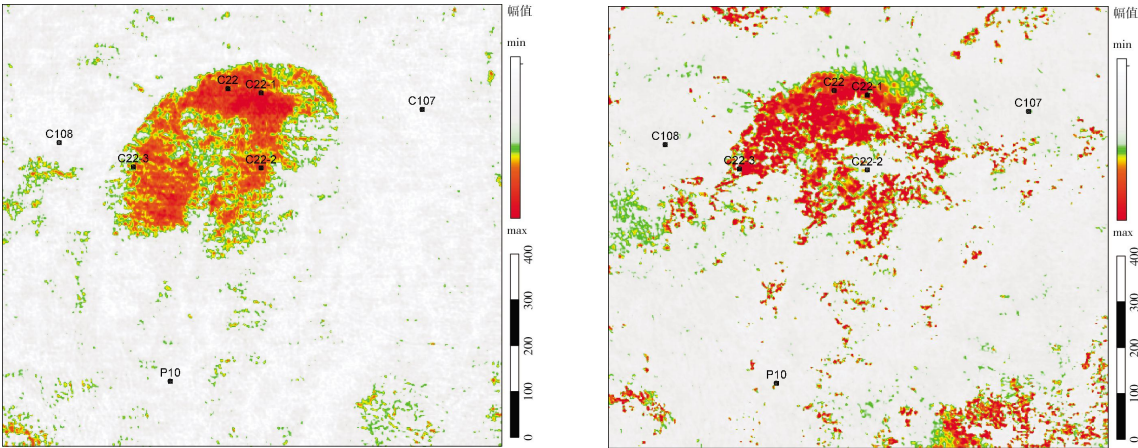


图4 沙湾组沿层瞬时振幅属性

图5 沙湾组沿层时频谱熵

(下转第 41 页)

3 结论与认识

针对工区地震资料特点,有针对性的采用各种新技术,优化处理参数,取得较好的效果。通过层析静校正技术,较好地解决了该区复杂的静校正问题。应用手动与动校拉伸相结合的切除方法和适当调整浅层速度等针对性处理技术,增加了浅层覆盖次数和信噪比,基本解决了超浅层成像问题,同相轴连续性变好。通过叠前相对保幅去噪技术、叠前精细振幅处理和地表一致性预测反褶积技术的应用,在振幅保真前提下适度提高了目的层的信噪比和分辨率。

由于工区激发接受条件差异大,导致全区资料振幅、频率特征差异大,资料一致性难以控制,需要加强局部有利目标区并约束处理研究。

参考文献:

- [1] 朱丹,李邦.鄂尔多斯盆地南部黄土塬区三维地震激发关键技术研究[J].沉积与特提斯地质,2013,33(4):74~79.
- [2] 赵艳平,宁俊瑞,高鸿,等.层析反演静校正技术在鄂尔多斯盆地中黄土塬区的应用[J].中国煤炭地质,2010,22(5):63~66.
- [3] 张恒超.叠前多域去噪技术应用开发研究[D].北京:中国地质大学,2006.
- [4] 李生杰,郑鸿明.复杂地表条件反射振幅一致性校正[J].地球物理学报,2002,45(6):862~869.
- [5] 郭勇,王元波.高分辨率地震资料处理技术[J].大庆石油地质与开发,2002,21(5):58~65.
- [6] 李文莲,邓辉,闫立志.鄂尔多斯盆地北部低信噪比资料的高分辨率处理[J].地球物理学进展,2005,20(4):1059~1066.

(编辑 杨芝文)

(上接第21页)

3 结论

(1)通过对比分析Wigner-Ville变换、S变换、短时傅里叶变换和改进的广义S变换等时频变换方法,由于改进的广义S变换能够通过调节因子参数获得更高的时间分辨率,更能够满足高精度的时频谱熵的计算。

(2)油水识别的关键是具有灵敏度高的地震属性,而时频谱熵能够表征地震信号对油水反应的有序性,岩石中充填不同流体,其时频谱熵不同,时频谱熵的振幅值相对较大更能够刻画储层含油层的地震响应特征。

(3)时频谱熵对地震响应的微弱变化较为灵敏,而引起地震信号变化的因素较多,文中应用实例在受构造影响较小的岩性油藏取得了较好效果。实际应用中需结合工区地质、钻井等资料进行标定,并可进一步拓展到页岩油、页岩气等非常规油气预测中。

参考文献:

- [1] 张江华,向奎马,立群,等.准噶尔盆地车排子地区北部地层岩性油气藏储层预测研究[J].断块油气田,2012,19(4):437~439.
- [2] 杨振峰,田仁飞,肖学,等.拟电阻率重构在岩性油藏油层识别中的应用[J].科学技术与工程,2014,14(7):117~120.
- [3] WILLIAM J. Minimum entropy time frequency distributions

- [J].Signal Processing Letters,2005,12(1):37~40.
- [4] 蔡涵鹏,贺振华,黄德济,等.基于时频谱熵的储层分布检测[J].石油天然气学报,2010,32(2):66~68.
- [5] 王小玲,陈进,从飞云.基于时频的频带熵方法在滚动轴承故障识别中的应用[J].振动与冲击,2012,31(18):29~33.
- [6] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998~1001.
- [7] 高静怀,陈文超,李幼铭,等.广义S变换与薄互层地震响应分析[J].地球物理学报,2003,46(4):526~532.
- [8] 张固澜,贺振华,张彦斌,等.基于改进的广义S变换的低频阴影检测[J].地球物理学进展,2010,25(6):2040~2044.
- [9] 葛哲学. Matlab时频分析技术及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.
- [10] 田仁飞,杨春峰,胡宇,等.识别岩性油藏薄储集层的谱分解技术[J].天然气地球科学,2015,26(2):360~366.
- [11] 刘永春,童敏明,陈琳,等.基于广义S变换的声发射信号去噪研究[J].计算机应用研究,2011,28(12):4535~4536.
- [12] 李延,顾汉明.基于改进的希尔伯特—黄变换的岩性油藏识别方法[J].石油地球物理勘探,2015,50(2):341~345.

(编辑 杨芝文)