

匹配追踪时频分析及其在油气检测中的应用

孙万元,张会星,杜艺可

(中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室,山东 青岛 266100)

摘要:地震波穿过地下含油气区时会表现为低频能量相对增强、高频能量相对减弱,准确提取地震波的低频能量和高频能量可以实现地下岩石的含油气性检测。利用短时傅里叶变换、S变换和引入尺度参数的匹配追踪算法对合成信号进行了试算,结果表明,引入尺度参数的 Morlet 小波匹配追踪算法不仅算法速度快,而且有更好的时频分辨率;通过对实际地震资料的匹配追踪计算,表明该算法也适用于实际资料;利用匹配追踪算法较准确地提取地震波的低频和高频能量,并对实际资料进行了含油气性预测,取得了与钻井一致的结果。

关键词:匹配追踪;时频分析;油气检测;Morlet 小波

中图分类号:P631.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)04-0051-07

Matching Trace Time-frequency Analysis and Its Application in Oil Gas Detection

SUN Wanyuan, ZHANG Huixing, DU Yike

(Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education,
Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: The seismic waves will comparatively enhance the low frequency energy and weaken the high frequency energy when propagating through the subsurface oil-gas-bearing media zone. Accurately extracting low frequency energy and high frequency energy of the seismic waves can realize the detection of the oil-gas-bearing nature of strata underground. In this paper, the synthetic signal was calculated by means of the short-time Fourier transform, S transform and introducing the matching trace algorithm with the scale parameters. The results show that the matching trace algorithm by introducing Morlet wavelet with the scale parameters not only holds a high speed but also has better time-frequency resolution. The application of field seismic data shows that the matching trace algorithm can achieve a good match of the field seismic data. The low frequency energy and high frequency energy of the seismic waves were exactly extracted by means of the matching trace algorithm and the prediction of oil-gas-bearing nature was conducted by using field data, conforming to the actual drilling data.

Key words: matching trace; time-frequency analysis; hydrocarbon detection; Morlet wavelet

地震波在地下岩层中传播时会发生频散和衰减现象,地震波的衰减由多种原因引起,如球面扩散、介质散射、介质粘弹性的吸收等。相关研究^[1-4]表明,岩石中流体的存在同样导致地震波发生衰减,且此衰减与地震波频率有关,研究这种由流体存在引起的地震波衰减可以预测地下岩石的含流体性。张会星等^[5]通过求解描述固体和流体同时存在的 Biot 双相介质地震波方程,发现含流体介质中地震波不同频率成分的能量会发生与频率近似成正比衰减的现象。因此,分析地震波的衰减特性对检测流体具有重要意义。时频分析可

收稿日期:2011-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(40804021,40839901);煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题项目(2007-03)。

作者简介:孙万元(1986—),男,山东日照人,硕士研究生,主要从事双相介质理论及油气检测方法的研究。

E-mail:wanyuansun@163.com.

张会星(1973—),女,河北石家庄人,讲师,博士,主要从事双相介质理论及地震资料反演方法的研究。

E-mail:zhhuixing@sina.com.

以揭示地震信号中包含了多少频率成分以及不同频率成分随时间的变化特性^[6],通过时频分析提取不同频率成分的地震波能量可以达到检测油气的目的^[5]。

对地震信号进行时频分析的方法有多种,如短时傅里叶变换^[7](short-time Fourier transform, STFT),小波变换^[8](wavelet transform, WT),S变换^[9](S transform, ST)等。Mallat等^[10]在1993年提出了匹配追踪的方法,Liu等^[11]进一步提出了基于Morlet小波的匹配追踪分解方法,并表明此方法能够对地震信号进行很好地匹配。目前,匹配追踪方法主要应用在地震信号的时频分析^[12]和地震资料的偏移中^[13]。为得到Morlet小波与地震信号的最佳匹配,本研究将尺度参数引入匹配追踪算法中,利用匹配追踪方法优越的时频分析特性,提取特定频率成分的地震波能量,将其应用于油气检测中。

1 匹配追踪基本原理及算法流程

Morlet等^[14]在1982年提出了Morlet小波公式

$$m(t) = \exp\left[-\left(\frac{\ln 2}{\pi}\right) \frac{\omega_m^2 (t-u)^2}{\sigma^2}\right] \exp[i(\omega_m(t-u) + \phi)] \quad (1)$$

其中, ω_m 为平均频率, u 为时间延迟, σ 为尺度, ϕ 为相位,通过4个参数 $\gamma = \{u, \sigma, \omega, \phi\}$ 可以定义唯一的Morlet小波。

匹配追踪就是通过复地震道等方法产生与地震信号局部特征匹配最佳的小波 m_n ,将地震信号表示为一系列Morlet小波的线性组合。经过 N 次迭代地震信号 $f(t)$ 被分解成如下形式:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n m_n(t) + R^{(N)} f \quad (2)$$

其中, a_n 为 m_n 的振幅, $R^{(n)} f$ 为剩余量,当达到阈值后可认为是噪音,特别地, $R^{(0)} f = f$ 。

在将信号分解成一系列的小波 $a_n m_n (n = 0, 1, 2, \dots, N-1)$ 后,可以在时频平面上得到信号 $f(t)$ 的时频谱公式:

$$Af(t, \omega) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{a_n^2}{\|m_n\|} \sqrt{Wm_n(t, \omega)} \quad (3)$$

其中, $Wm_n(t, \omega)$ 是 $m_n(t, \omega)$ 的魏格纳分布:

$$Wm_n(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} m_n(t + \frac{\tau}{2}) \overline{m_n(t - \frac{\tau}{2})} \exp[-i\omega\tau] d\tau \quad (4)$$

其中, $\overline{m_n}$ 是 m_n 的复共轭,将式(4)代入式(3)化简后,便可得到时频谱公式

$$Af(t, \omega) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{a_n}{\|m_n\|} \left(\sqrt{\frac{\pi}{2\ln 2}} \cdot \frac{\sigma_n}{\omega_n}\right)^{\frac{1}{2}} \times \exp\left[-\frac{\pi^2}{4\ln 2} \cdot \frac{\sigma_n^2 (\omega - \omega_n)^2}{\omega_n^2}\right] \times \exp\left[-\frac{\ln^2}{\pi^2} \cdot \frac{\omega_n^2 (t - \mu_n)^2}{\sigma_n^2}\right] \quad (5)$$

基于Morlet小波的匹配追踪算法流程如下:

1) 将实地震道信号通过希尔伯特变换转换成复地震道信号。

2) 将复地震道信号包络最大值处的时间作为时间延迟 u_n ,将此处的瞬时频率作为中心频率 ω_n ,将瞬时相位作为相移 ϕ_n 。

3) 求尺度参数 σ_n, σ_n 通过式(6)求得

$$m_n(t) = \arg \max_{m_n \in D} \frac{|\langle R^{(n)} f, m_n \rangle|}{\|m_n\|} \quad (6)$$

其中, D 是时频原子字典, $\langle f, h \rangle$ 是 f 和 h 的内积, $\|m_n\| = \sqrt{\langle m_n, m_n \rangle}$ 。通过式(6)从尺度参数字典中寻找 σ_n 的最佳值(σ_n 控制Morlet小波的宽度),令Morlet小波在其他参数不变的情况下伸缩,使其与地震信号最大程度的相似,达到与地震信号的最佳匹配。

4) 在求得4个参数的基础上,进行局部微调,以取得最佳匹配效果,为了提高运算效率,微调范围控制在 $[\gamma_n - \Delta\gamma, \gamma_n + \Delta\gamma]$ ^[15], $\Delta\gamma = (\Delta u, \Delta\sigma, \Delta f, \Delta\phi)$, Δu 是时间采样间隔, $\Delta\sigma$ 是尺度采样间隔, Δf 是频率采样间隔, $\Delta\phi = 5^\circ$ 。

5) 求取 m_n 最佳振幅 α_n ,在这里并不取前面复地震道的包络值,而是通过式(7)求得:

$$a_n = \frac{|\langle R^{(n)} f, m_n \rangle|}{\|m_n\|^2} \quad (7)$$

- 6) 计算生成小波的时频谱。
- 7) 从原地震数据中减去上面生成的 Morlet 小波的实部,并将剩余值作为地震信号。
- 8) 重复 1)–7),直到达到指定阈值。
- 9) 将生成的小波时频谱叠加生成信号时频谱。

进行第 n 次迭代 $R^{(n)} f = a_n m_n + R^{(n+1)} f$ 。经过 N 次迭代,达到指定阈值,一般选择 5%,匹配追踪完成。剩余值 $R^{(n+1)} f$ 可以看做是噪音。从生成的时频谱中可以提取所需的地震属性,如特定频率段的地震波能量。

2 算法验证

为验证上述算法的正确性,设计一个合成信号进行试算。合成信号由 6 个简单信号组合而成,包含 4 种频率成份:5,20,30,50 Hz,相位有 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$,振幅有 0.5,1,如图 1 所示。图 1(e)是上述子波的叠加结果,作为合成信号。图 2 是利用上述算法进行匹配追踪的结果,其中,图 2(a)是原始合成信号,图 2(b)是信号经匹配追踪后重构的结果,图 2(c)是匹配追踪剩余值,可认为是噪音。从图 2 可以看出对理论信号匹配重构的结果是非常理想的。重构信号和合成信号非常相似,剩余值接近于零。

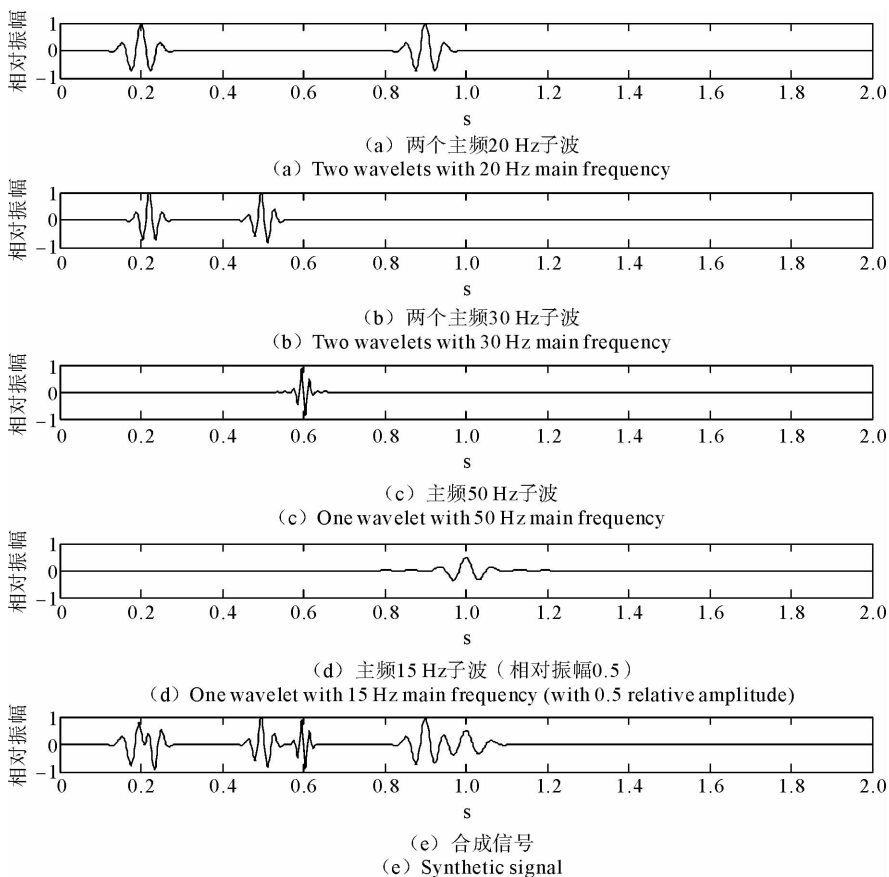


图 1 合成数据图

Fig. 1 The synthetic data

图 3、图 4、图 5 分别是利用匹配追踪、短时傅里叶变换和 S 变换得到的该合成信号的时频谱。比较图 3、图 4、图 5 可以发现匹配追踪时频谱有更好的时频分辨率,能量更集中。在 0.2 s 附近,合成信号分别由主频 20 Hz、时移 0.2 s 和主频 30 Hz、时移 0.22 s 的信号叠加而成,匹配追踪时频谱,能量团集中,明显区分两

个信号的时移信息和频率信息,短时傅里叶变换能量分散,频率分辨率差,无法区分两个信号的时移信息,S变换能量分散,频率分辨率差,时移信息较好;在 0.5 s 附近,合成信号由相对振幅 1、主频 30 Hz、时移 0.5 s 和相对振幅 1、主频 50 Hz、时移 0.6 s 的信号叠加而成,匹配追踪时频分辨率都非常高,能量集中;短时傅里叶变换能量分散,时间分辨率差,出现了 40 Hz 的假频;S变换时间分辨率较好,频率分辨率较差。在 1.0 s 左右,合成信号由一个相对振幅 0.5、主频 15 Hz、时移 0.9 s 和一个相对振幅 1、主频 20 Hz、时移 1.0 s 的信号构成,匹配追踪时频谱准确呈现了合成信号的频率、时移、振幅信息,能量集中;短时傅里叶变换时频谱时间分辨率很差,能量很分散,只是体现了小能量信号的频率特征;S变换时频谱对该小能量信号时间、频率特征表现都不明显。合成数据检验结果显示,匹配追踪在时频分析中有更准确的分辨率。

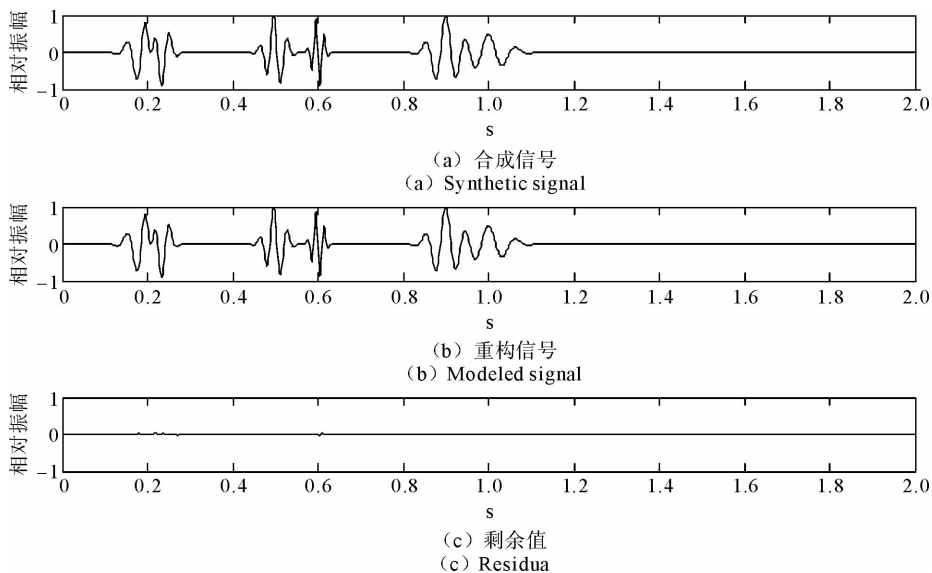


图 2 匹配追踪结果图

Fig. 2 The results of matching trace

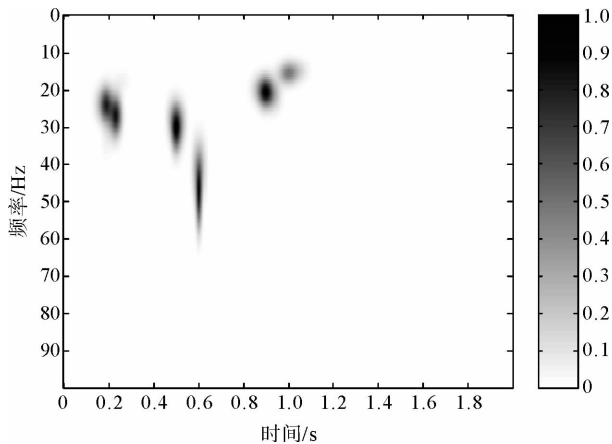


图 3 匹配追踪时频谱图

Fig. 3 The time-frequency spectrum of matchin

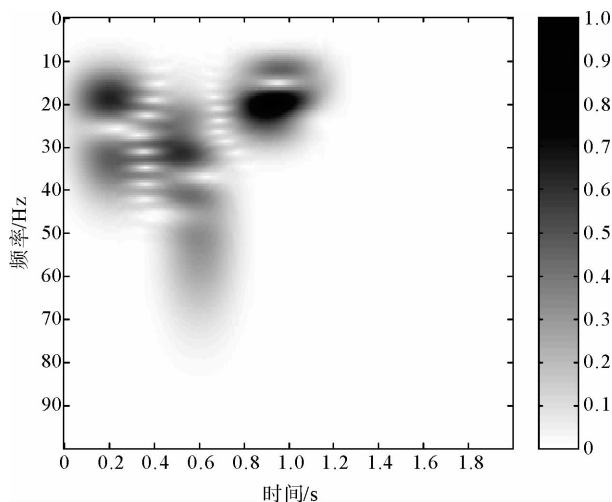


图 4 短时傅里叶变换时频谱图

Fig. 4 The time-frequency spectrum of STFT

3 实际资料试算及应用

图 6 是某地区实际地震资料中的一个剖面,图 7 是对该数据进行匹配追踪后重构的结果,图 8 是匹配追

踪剩余值。比较图 6、图 7、图 8 可以看出:匹配重构结果与原始地震资料基本完全吻合,达到了匹配追踪的预期效果,且达到了 5% 的阈值要求。故上述匹配追踪算法可用于对实际地震数据的最佳匹配。

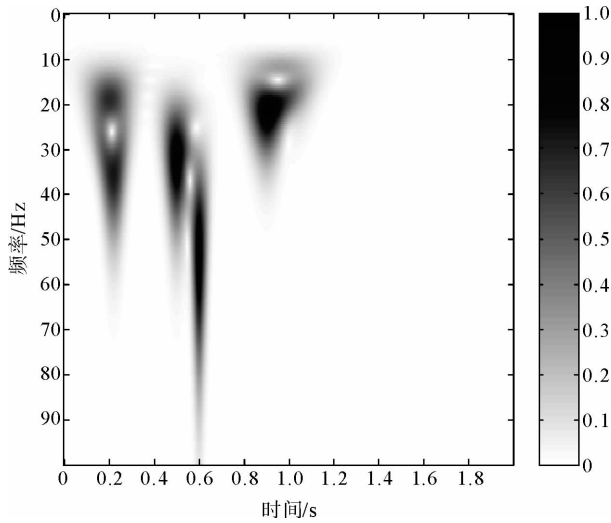


图 5 S 变换时频谱图

Fig. 5 The time-frequency spectrum of S transform

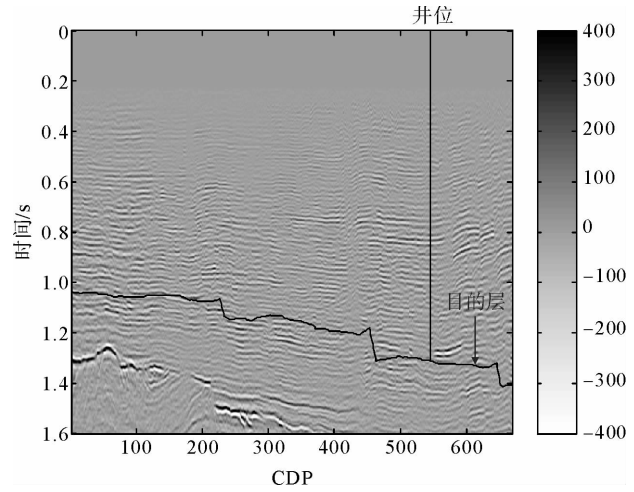


图 6 原始地震剖面图

Fig. 6 The original seismic profile

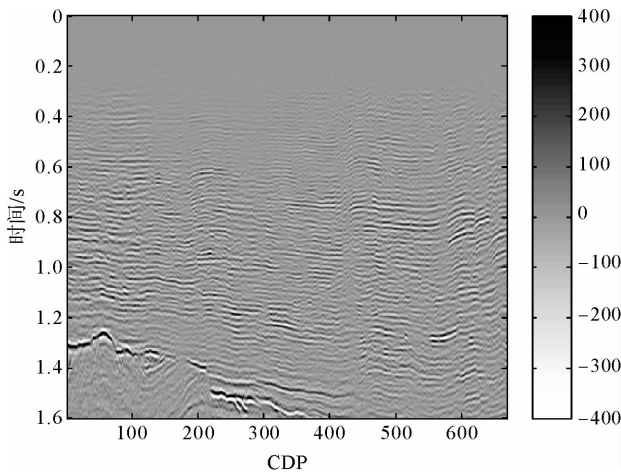


图 7 匹配追踪重构剖面图

Fig. 7 The remodeled profile of matching trace

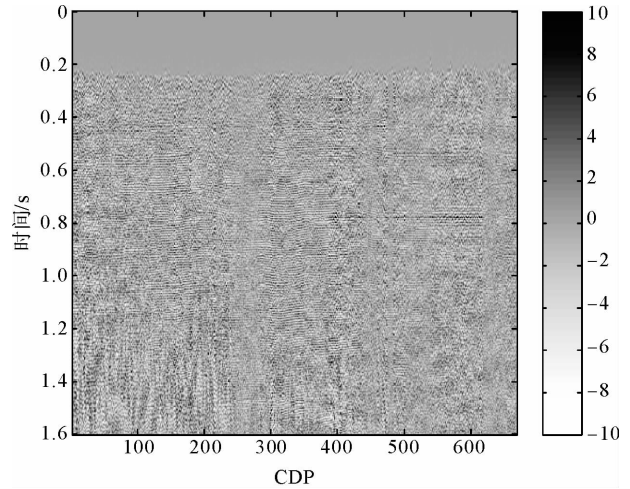


图 8 剩余值图

Fig. 8 The residua

地下岩石含流体时,由于固体和流体的相对运动,使得地震波的能量发生变化,低频能量衰减减小、高频能量衰减增大,与不含流体区相比表现为低频能量相对增强、高频能量相对减弱^[5]。相关研究表明^[16],当地下岩石中所含流体为水时,地震波的能量衰减很微弱。故可根据是否出现低频能量相对增强和高频能量相对减弱预测地下岩石的含油气性。利用本文的匹配追踪算法提取地震波的低频段和高频段能量。图 6 中箭头所指曲线为目的层,为反演目的层的油气富集区,利用匹配追踪算法提取了 16 Hz 和 50 Hz 的最大振幅作为低频段和高频段地震波能量(图 9、图 10)。图 9 中 A 处圈出区域为目的层的高能量区,此位置对应图 10 中 B 处,而 B 处为低能量区,故可推测此处为油气富集区。经查实,在 CDP545 处有一口井(井位已标于图中),此井的测井资料表明,该井含有 3.2 m 厚的含气砂岩和 7.0 m 厚的含油砂岩,正好与预测情况吻合。故该算法可以用于实际资料的时频属性分析及油气储层的预测。

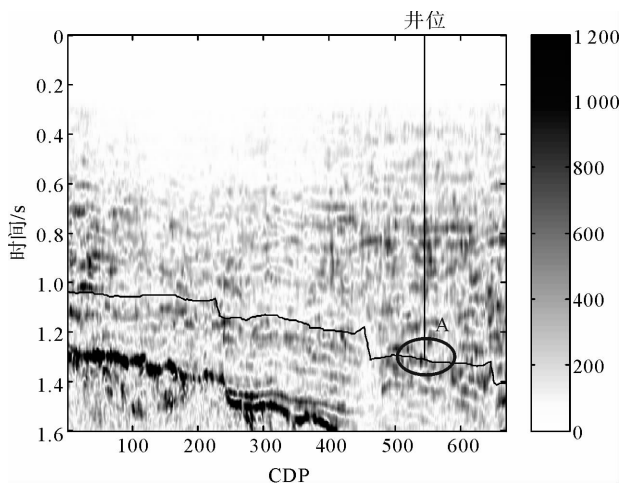


图9 16 Hz地震波能量图

Fig. 9 The energy of 16 Hz seismic waves

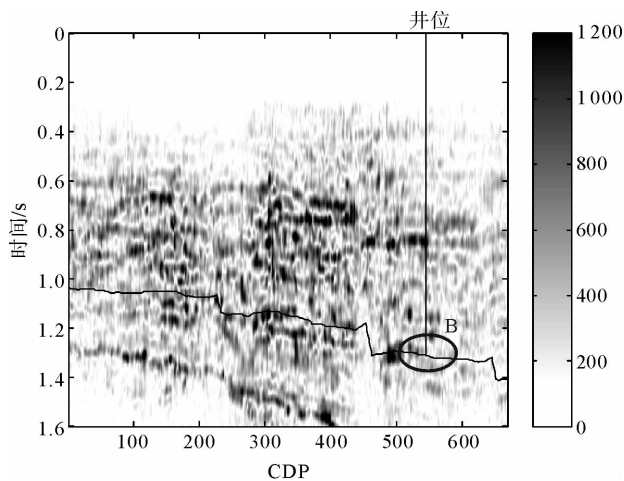


图10 50 Hz地震波能量图

Fig. 10 The energy of 50 Hz seismic waves

4 结论

地下岩石富含油气区会使得地震波低频能量相对增强、高频能量相对减弱,提取地震波的低频能量和高频能量可以检测地下介质的含油气性。合成信号的试算结果表明,与短时傅里叶变换、S变换时频谱相比,引入尺度参数的匹配追踪时频谱有更好的时频分辨率;实际资料的匹配追踪结果表明该算法可以对实际资料进行很好的匹配。利用匹配追踪算法可以较准确地提取不同频率成分的地震波能量并进行油气检测。

参考文献:

- [1]MULLER T M,GUREVICH B,LEBEDEV M. Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks:A review[J]. Geophysics,2010,75A:147-164.
- [2]PRIDE S R,BERRYMAN J G,HARRIS J M. Seismic attenuation due to wave-induced flow[J]. Journal of Geophysical Research,2004,109:B01201.
- [3]MULLER T M,GUREVICH B. Wave-induced fluid flow in random porous media: Attenuation and dispersion of elastic waves[J]. Acoustical Society America,2005,117:2732-2741.
- [4]杨思通,程久龙,李守军,等. Kelvin-Voigt 黏弹介质地震波衰减影响因素研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(5):1-4.
YANG Sitong,CHENG Jiulong,LI Shoujun, et al. Study on influence factors of seismic wave attenuation in Kelvin-Voigt viscoelastic media[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2010,29(5):1-4.
- [5]张会星,何兵寿,姜效典,等. 利用地震波在双相介质中的衰减特性检测油气[J]. 石油地球物理勘探,2010,45(3):343-349.
ZHANG Huixing,HE Bingshou,JIANG Xiaodian, et al. Utilizing attenuation characteristic of seismic wave in dual-phase medium to detect oil and gas[J]. Oil Geophysical Prospecting,2010,45(3):343-349.
- [6]董建华,顾汉明,张星. 几种时频分析方法的比较及应用[J]. 工程地球物理学报,2007,4(4):312-315.
DONG Jianhua,GU Hanming,ZHANG Xing. A comparison of time-frequency analysis methods and their applications[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics. 2007,4(4):312-315.
- [7]GRIFFIN D, LIM J. Signal estimation from modified short-time fourier transform[J]. IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal processing,1984,32(2):236-243.
- [8]DAUBECHIES I. The wavelet transfor time-frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Transaction on Information Theory,1990,36:961-1004.
- [9]STOCKWELL R G,MANSINHA L,LOWE R P. Localization of the complex spectrum;the S-transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,1996,17(6):998-1001.
- [10]MALLAT S,ZHANG Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions Signal Process,1993,41

(12);3397-3421.

- [11]LIU J, MARTFURT K J. Matching pursuit decomposition using Morlet wavelet[C]//75th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2005, 24:786-789.
- [12]CASTAGNA J P, SUN S J, SIEGFRIED R W. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbon[J]. The Leading Edge, 2003, 22(2):124-127.
- [13]WANG B, PANN K. Kirchhoff migration of seismic data compressed by matching pursuit decomposition[C]//66th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1996, 15:1642-1645.
- [14]MORLET J, ARENS G, FOURGEAU E, et al. Wave propagation and sampling theory part II: Sampling theory and complex waves[J]. Geophysics, 1982, 47:222-236.
- [15]WANG Y H. Seismic time frequency spectral decomposition by matching pursuit[J]. Geophysics, 2007, 72(1):13-20.
- [16]LI Z S. Physical mechanism of seismic attenuation in a two-phase medium[J]. Applied Geophysics, 2008, 5(1):9-17.

(上接第 50 页)

- [12]谢高地,肖玉,甄霖,等.我国粮食生产的生态服务价值研究[J].中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.
XIE Gaodi, XIAO Yu, ZHEN Lin, et al. Study on ecosystem services value of food production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3):10-13.
- [13]刘庆,李伟,陆兆华.基于遥感与GIS的黄河三角洲绿色空间生态服务价值评估[J].生态环境学报,2010,19(8):1838-1843.
LIU Qing, LI Wei, LU Zhaohua. Ecosystem services value assessment of green space in the Yellow River delta based on RS and GIS[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8):1838-1843.
- [14]杜加强,王金生,滕彦国,等.重庆市生态系统服务价值动态评估[J].生态学杂志,2008,27(7):1187-1192.
DU Jiaqiang, WANG Jinsheng, TENG Yanguo, et al. Dynamic evaluation on ecosystem service value of Chongqing city[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7):1187-1192.