

基于改进的广义S变换求取地层品质因子Q值

付勋勋*^① 徐峰^① 秦启荣^① 李培^② 邵晓州^①

(^①西南石油大学,四川成都 610500; ^②福建地震灾害预防中心,福建福州 350003)

付勋勋,徐峰,秦启荣,李培,邵晓州. 基于改进的广义S变换求取地层品质因子Q值. 石油地球物理勘探,2012, 47(3):457~461

摘要 地层的品质因子Q值对衡量地震波传播过程中的能量衰减以及地震资料的处理、解释有重要意义。在实际生产中求取品质因子最实用的方法是频谱比法,但传统的频谱比法面临时窗选取等问题。本文利用改进的广义S变换时频特性及与傅里叶谱相联系的特性,提取地层上、下界面对应的瞬时频谱,并通过拟合振幅比与频率的关系得到地层的品质因子Q值。数值模拟及实际资料处理均证明了该方法的有效性。

关键词 品质因子Q值 改进的广义S变换 频谱比法

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

地震波在地层中传播时,由于波动能量被介质吸收,致使产生波的衰减^[1~3]。地震波的衰减通常用地层品质因子Q来度量。实验室和实际数据测量结果都表明,品质因子与岩石物性、流体类型及流体饱和度等因素有关^[4,5]。因此,Q可作为油气储层识别和烃类检测的一个判断标志。

对于品质因子的估计,前人提出了多种方法。在时间域中一般用脉冲幅度衰减、脉冲上升时间、脉冲展宽等途径来计算Q值^[6~8]。这些方法都需要利用脉冲幅度,然而地震脉冲的幅度经常受到散射、几何扩散及其他因素的影响,导致时间域估计的Q值精度低。频率域中^[9~11],通常有对数谱比法(LSR)、中心频率偏移法(CFS)和峰值频率偏移法等。这些方法均用一个时间窗截取一段地震记录为基础,一旦时间窗的类型和长度选择不合适就可能使谱估计不准确,从而影响品质因子估计精度。

在实际生产中求取品质因子最常用的方法是频谱比法,其基本思路是首先用一个时间窗截取地层顶底界面对应的地震记录,然后分别计算其对应的

傅里叶谱,再通过拟合频率与振幅比之间的关系求出Q值。这种方法依赖于诸多因素,如时窗类型和长度、线性回归时所选择的频率范围等。尽管人们对频谱比法提出了多种改进,但这种方法仍然只适用于大套地层(厚层)的品质因子估计。

频谱比法面临的核心问题就是时频分辨率的问题,如果能用一种恰当的时频分布来计算地震波入射到地层上界面和透射出该地层下界面对应的瞬时频谱,就可以克服传统的频谱比法的缺点。

时频分析技术的发展为克服频谱比法的缺点提供了有力支持。Taner提出了地震子波为脉冲时,在时频域估算Q值的思想^[12]。近些年,刘希强^[13]研究了利用高斯线调频连续小波变换在时频域提取衰减因子;Li等^[14]用Wigner-Ville分布(WVD)研究了地震波衰减,然而WVD有交叉项的干扰;Li等^[15]研究了震源子波为尖脉冲条件下小波域估算Q值的方法。

S变换(ST)^[16,17]是一种介于短时傅里叶变换(STFT)和小波变换之间的一种非平稳信号分析的处理方法。同小波变换、短时傅里叶变换相比,S变换有其独特的优点,如S变换时频谱分辨率与频率相关,不但有多分辨率分析特性,而且与傅里叶谱直

* 四川省成都市新都区西南石油大学博士09级,610500。Email:fuxunxun@126.com

本文于2011年7月25日收到,最终修改稿于2012年2月27日收到。

本研究受国家科技专项(2008ZX05046)资助。

接相联系。S变换窗函数的形态固定,很多学者对其进行了改进^[18-20]。本文采用文献[18]提出的改进的广义S变换(NGST),利用该方法的时频分析特性,提取地层上、下界面对应的瞬时频谱,然后通过拟合频率与振幅比的关系在时频域计算地层的Q值。

2 基本理论

2.1 地层Q值与频谱之间的关系

地震波在地层内传播过程中,其振幅发生衰减。在波垂直穿过厚度为 Δz 的水平地层情况下,振幅谱的变化可以由关系式

$$A(\omega, z + \Delta z) = A(\omega, z) e^{\beta(z+\Delta z) - \beta(z)} e^{-\alpha(\omega, z)\Delta z} \quad (1)$$

表示。其中 $\alpha(\omega, z)$ 为深度范围 $z \sim (z + \Delta z)$ 的吸收系数; ω 为角频率; $\beta(z)$ 为与频率无关的振幅衰减效应,这些因素可能由几何扩散、透射损失等造成。

令 $B = \log A$,在 $\Delta z \rightarrow 0$ 的情况下,式(1)可以写成

$$\frac{dB(\omega, z)}{dz} = \frac{d\beta(z)}{dz} - \alpha(\omega, z) \quad (2)$$

将关系式 $\alpha = \omega/(2cQ)$ (其中 c 是相速度, Q 是品质因子)代入式(2),并对两边求积分(积分范围取 $z_0 \sim z$),得到

$$B(\omega, \tau) = B_0(\omega) + \beta(\tau) - \omega \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{d\tau'}{2Q(\tau')} \quad (3)$$

式中:定义 $B_0(\omega) = B_0(\omega, z_0)$; $\beta(z_0) = 0$ 。

如果已知旅行时 τ_0 、 τ_1 以及相应的振幅谱 $A_0(\omega)$ 、 $A_1(\omega)$,式(3)可以改写成

$$\log \frac{A_1(\omega)}{A_0(\omega)} = \beta - \frac{\omega \Delta \tau}{2Q} \quad (4)$$

其中: $\Delta \tau = \tau_1 - \tau_0$ 。式(4)描述了频谱比法求Q值的基本原理:通过拟合两个时刻地震波的频谱比与频率的线性关系得到地层的Q值。

2.2 通过改进的广义S变换求地层的品质因子Q值

传统的频谱比法求Q值,其基本思路是首先用一个时间窗截取地层顶底界面对应的地震记录,然后分别计算对应的傅里叶谱,通过拟合频率与振幅比之间的关系求出Q值。地震信号是典型的非平稳信号,传统的频谱比法是以一段地震记录的频谱来代替某一时刻的频谱,时频分辨率低。

针对频谱比法时频分辨率低的问题,如果能用一种恰当的时频分布计算地震波入射到地层上界面

和透射出该地层下界面时对应的瞬时频谱,就可以克服传统的频谱比法的缺点。

2.2.1 改进的广义S变换

地震波在地层传播过程中,各种频率成分都要经受地层的吸收衰减,高频成分较低频成分而言衰减程度更严重,因而导致地震记录的主频偏低。标准S变换的窗函数是固定的,不能随信号本身的特点而调整。然而高频成分的变化对地层吸收衰减特性更为敏感,因此时频分析时应该根据信号本身的特点调节时频分辨率。本文引用一种改进的广义S变换新方法,能满足分析吸收衰减需要。

该方法采用宽度可变的高斯窗函数,即

$$G(t, f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s} |f|^r} \exp\left(-\frac{t^2}{2s^2 f^{2r}}\right) \quad (5)$$

式中 s 和 r 均为调节因子。设时间序列为

$$h(t) \in L^2(R)$$

其中 $L^2(R)$ 表示实数域上的平方可积函数空间,则改进的广义S变换表示为

$$\text{NGST}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi s} |f|^r} \times \exp\left[-\frac{(\tau-t)^2}{2s^2 f^{2r}}\right] \exp(-i2\pi ft) \right\} dt \quad (6)$$

无损的反变换表达式为

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \text{NGST}(\tau, f) \exp(-i2\pi ft) d\tau \right] \times \exp(i2\pi ft) df \quad (7)$$

由式(5)、式(6)可以看出,改进的广义S变换中高斯窗函数随频率调节,且 $\exp(-i2\pi ft)$ 不随高斯窗函数平移。也就是说,同小波变换相比改进的广义S变换不但有多尺度聚焦性,而且与其傅里叶谱直接联系。

为验证改进的广义S变换良好的时频聚焦性,本文产生一个测试信号进行仿真对比试验。图1a是由20,50,70,90,100Hz的频率成分合成的测试信号。对该测试信号分别进行STFT变换、ST变换、NGST时频变换,得到的结果分别如图1b~图1d。比较图1b~图1d可见,由于STFT时窗的尺寸固定,在40~49ms时间段,STFT只能识别20Hz频率成分,无法识别100Hz的频率成分,而ST、NGST能同时识别在这个时间段的20,100Hz的频率成分。在1~100ms时间段,ST时频分布图上虽然识别出了20,100Hz的频率成分(图1c),但是低

频部分时间分辨率较低,有畸变现象。究其原因,是因为 ST 的窗函数是一个固定的形式,不能随信号本身特点而调整。在采用了窗函数可以根据实际信号调节的 NGST 时频分布图上可以看出,在低频段获得了良好的频率分辨率。

通过上述分析可知,改进的广义 S 变换能有效分析信号在时域和频域的局部特性,能对信号特征

进行局部刻画和总体描述,通过时频联合分布更能展现较多的信号特征信息,具有较高的时频分辨率。

表 1 测试信号的时频分布

时间 ms	1~39	40~49	50~100	101~180	181~280	281~500
频率 Hz	20	20,100	20	70	90	50

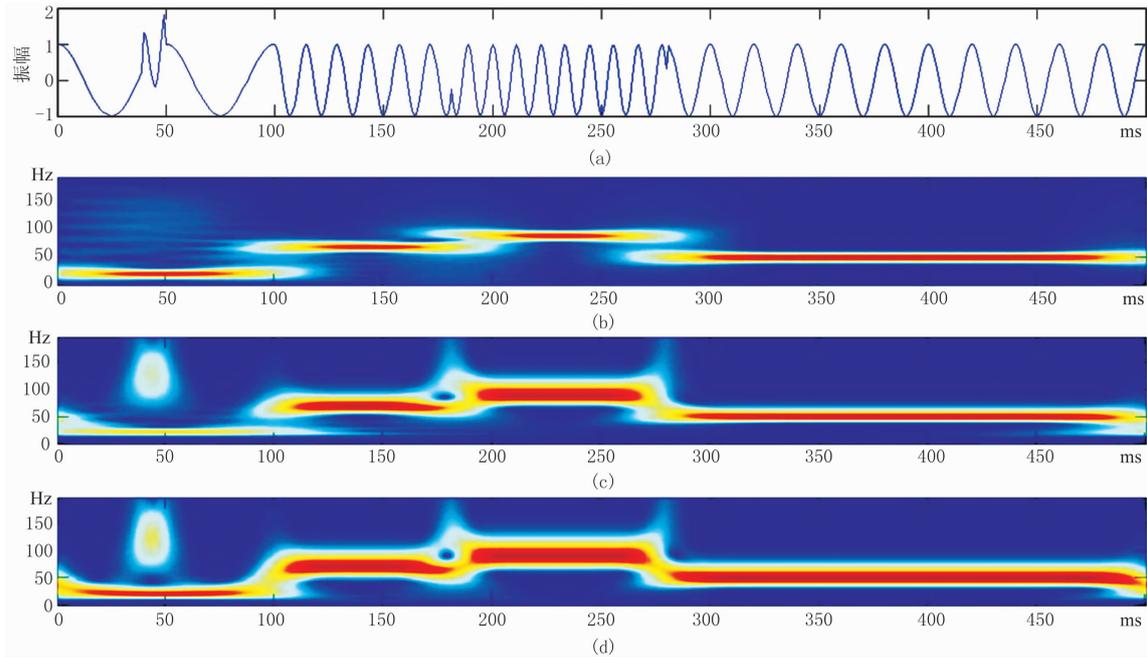


图 1 测试信号(a)及其对应的 STFT(b)、ST(c)、NGST(d)

2.2.2 模型验证

首先合成一个零井源距 VSP 观测系统下的合成地震记录,检验基于改进的广义 S 变换求取地层的品质因子 Q 值的有效性。

图 2 为地质模型及其合成的 VSP 地震记录。每层的 Q 值依次为:30、40、50、70。正演 VSP 资料时,震源采用位于地表处的主频为 40Hz 的雷克子波,采样间隔为 1ms。VSP 资料的正演采用式(1)对应的方法。首先对该道地震数据进行了 S 变换、改进的广义 S 变换。图 3a 为 VSP 合成记录;图 3b 为 ST 得到的时频分布,由图可见,低频端时间分辨率低,有畸变现象;图 3c 为 NGST 得到的时频分布,相对 ST 变换(图 3b)时间分辨率高,无畸变现象。

本文利用 NGST 提取地震波传播到顶底界面时的频谱,拟合振幅比与频率之间的关系,最后根据式(4)计算 Q 值。图 4 为 Q=40、Q=50 对应地层界

面处频谱及振幅比与频率的线性拟合结果。由图可见,振幅比曲线与线性拟合曲线形态大致一致,符合线性分布规律。第二层模型的 Q 值为 40,反演得出的 Q 值为 39.3255,第三层模型的 Q 值为 50,反演的 Q 值为 53.8396。反演结果与模型基本吻合。

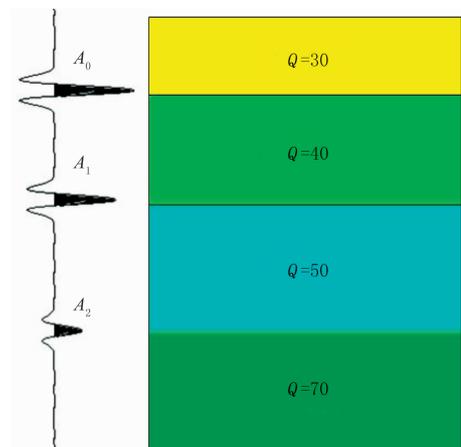


图 2 地质模型(右)及合成 VSP 记录(左)

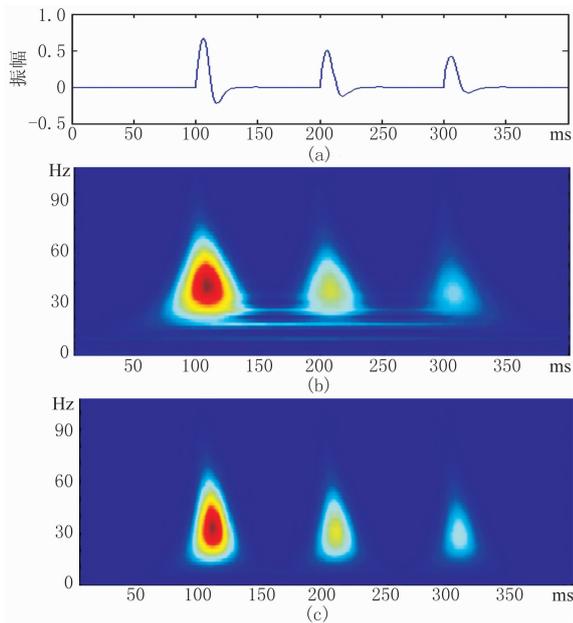


图3 合成 VSP 记录(a)及其对应的 ST(b)、NGST(c)

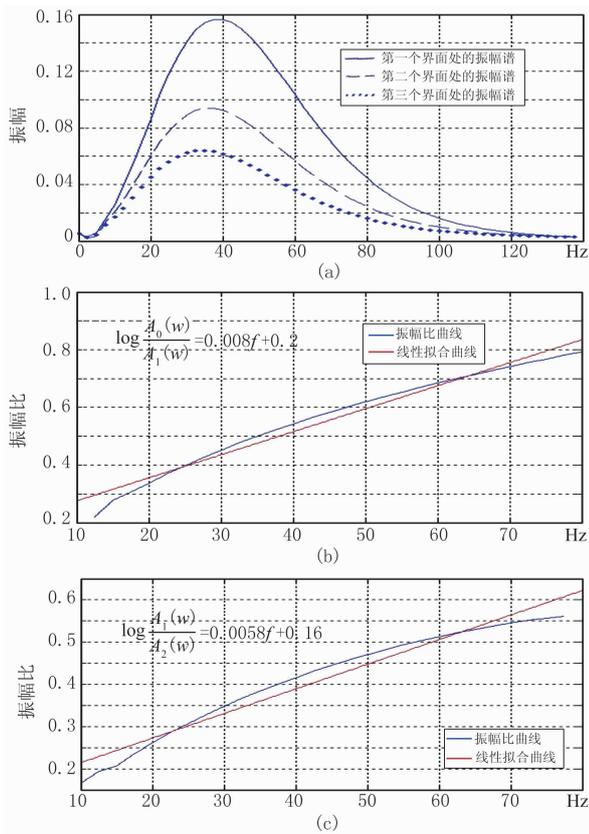


图4 Q=40、Q=50 对应地层界面处频谱及振幅比与频率的线性拟合结果

(a)Q=40、Q=50 对应的地层界面处的频谱；(b)Q=40 地层顶底界面处振幅比与频率的线性拟合；(c)Q=50 地层顶底界面处振幅比与频率的线性拟合

可见,基于改进的广义 S 变换提取介质品质因子 Q 值有效可行。

3 实际资料处理

为了验证本文算法的效果,我们用该方法对 A 工区的实际地震资料进行了处理。在求得每一层的地层品质因子 Q 值后,再对实际地震数据进行吸收衰减补偿,即做反 Q 滤波,反 Q 滤波用 Varela 等^[21]提出的算法。图 5 为处理前、后浅层数据对比结果,从对比结果来看,剖面的分辨率有较大的提高。图 6 为处理前、后数据的频谱,从补偿后的结果可以看出,高频得到加强,频带得到展宽。

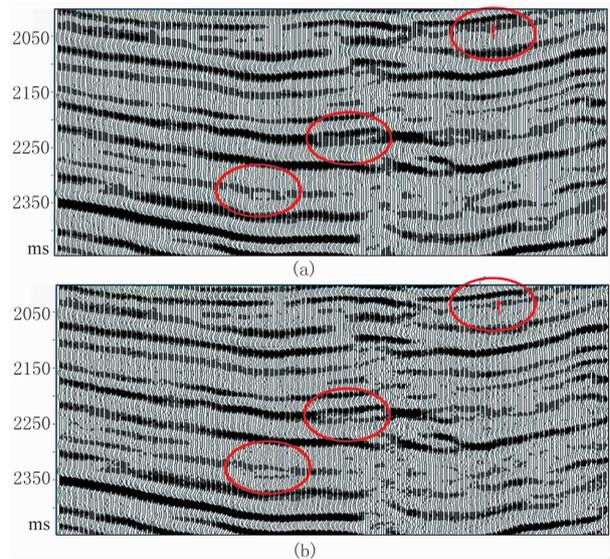


图5 Q 补偿前(a)、后(b)的叠加剖面对比

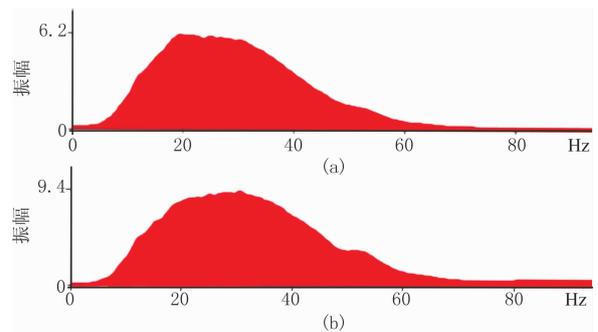


图6 Q 补偿前(a)、后(b)的振幅谱

4 结论

本文针对经典的频谱比法求取地层品质因子 Q

值面临的时窗选取问题,利用改进的广义 S 变换优越的时频分析特性求取介质的 Q 值。改进的广义 S 变换方法充分考虑地层对地震波的吸收作用,更符合通过地震波求取地层品质因子的需要。理论分析和实际数据试算结果表明:

(1)与传统的频谱法相比,时频域求得的地层 Q 值更符合实际情况;

(2)基于改进的广义 S 变换求得地层 Q 值,物理意义更明确;

(3)计算中不用人工开时窗,能够根据信号的频率自动调节窗宽,在高频段具有更高的频率分辨率, Q 值计算精度较高。

参 考 文 献

- [1] 孙成禹. 地震波理论与方法. 山东东营: 中国石油大学出版社, 2007, 124~128
- [2] Aki K and Richards P G. *Quantitative Seismology Theory and Methods*. W H Freeman and Company, 1980, Vol. 1
- [3] Toksoz M N, Johnston D H. *Seismic Wave Attenuation*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1981, 45
- [4] Klimentos T and McCann C. Relationships among compressional wave attenuation, porosity, clay content, and permeability in sandstones. *Geophysics*, 1990, 55(8): 998~1014
- [5] Toksoz M N, Johnston G H and Timur A. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks, 1. Laboratory measurements. *Geophysics*, 1979, 44(4): 681~690
- [6] Tonn R. The determination of seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational method. *Geophysics*, 36(1): 9~18
- [7] Kjartansson E. Constant Q-wave propagation and attenuation. *Geophysics Res*, 1979, 84(B9): 4737~4748
- [8] Bregman N D, Bailey R C and Chapman C H. Traveltime and amplitude inversion in crosshole seismology. *J Geophysics Res*, 1989, 94(B6): 7577~7587
- [9] Dasgupta R, Roger A C. Estimation the Q from surface seismic reflection data. *Geophysics*, 1998, 63(6): 2120~2128
- [10] Quan Y and Harris J M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. *Geophysics*, 1997, 62(3): 895~905
- [11] James Rickett. Estimating attenuation and the relative information content of amplitude and phase spectra. *Geophysics*, 2007, 72(1): 20~27
- [12] Taner M T. *Joint Time / Frequency Analysis Q Quality Factor and Dispersion Computation Using Gabor-Morlet wavelets or Gabor-Morlet Transform*. *Rock Solid Images*, 1983, 1~5
- [13] 刘希强等. 高斯线调频连续小波变换的时频能量衰减因子方法及其应用. 中国地震, 2003, 19(3): 225~235
Liu Xiqiang et al. Time-frequency energy attenuation factor and its application on the basis of Gauss linear modulation frequency continuous wavelet transform. *Earthquake Research in China*, 2003, 19(3): 225~235
- [14] Li Yandong and Zheng Xiaodong Wigner-Ville distribution and its application in seismic attenuation estimation. *Applied Geophysics*, 2007, 4(4): 245~254
- [15] Li Hongbing, Zhao Wenzhi. Measures of scale based on the wavelet scalogram with applications to seismic attenuation. *Geophysics*, 71(5): V110~V118
- [16] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S transform. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1996, 44(4): 998~1001
- [17] 刘喜武等. 基于广义 S 变换研究地震地层特征. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 440~451
Liu Xiwu et al. Study on characteristics of seismic stratigraphy by generalized S transform. *PEG*, 2006, 21(2): 440~451
- [18] 齐春艳, 李彦鹏等. 一种改进的广义 S 变换. 石油地球物理勘探, 2010, 45(2): 215~218
Qi Chunyan, Li Yanpeng et al. An improved generalized S transform. *OGP*, 2010, 45(2): 215~218
- [19] 陈学华, 贺振华. 改进的 S 变换及在地震信号处理中的应用. 数据采集与处理, 2005, 20(4): 449~453
Chen Xuehua, He Zhenhua. Improved S-transform and its application in seismic signal processing. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2005, 20(4): 449~453
- [20] Pinnegar C R, Mansinha L. The S Transform with windows of arbitrary and varying shape. *Geophysics*, 2003, 68(1): 381~385
- [21] Varela C L R, Ulrych J. Modeling of attenuation and dispersion. *Geophysics*, 1993, 58(8): 1167~1173

(本文编辑: 金文昱)