

中心频率法估算地层吸收参数

魏文*^① 李红梅^① 穆玉庆^② 王树刚^① 王红^①

(^①中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东东营 257022; ^②中国石化胜利油田西部新区研究中心, 山东东营 257022)

魏文, 李红梅, 穆玉庆, 王树刚, 王红. 中心频率法估算地层吸收参数. 石油地球物理勘探, 2012, 47(5): 735~739

摘要 本文针对储层含气性检测, 提出了利用中心频率估算地层吸收参数(地层Q值)的方法。该方法首先利用S变换对地震信号进行时频域转换, 得到能量分布函数; 然后基于该函数, 计算中心频率及其与地层Q值之间的关系, 获得地层等效Q值, 进而得到单套地层Q值。模型正演表明, 含气层中心频率变小, 在地层Q值参数剖面上表现为强吸收异常, 从而验证了应用中心频率法估算地层Q值检测气层的可行性。将该方法应用于东营凹陷永安地区实际资料中, 估算的地层Q值比较真实地反映了地层吸收特征, 提高了气层检测的精度。

关键词 品质因子 吸收衰减 S变换 中心频率 气层检测

中图分类号: P631 **文献标识码**: A

1 引言

实际地层介质并非是理想的完全弹性介质。当地震波在地层中传播时引起的能量衰减方式有两类: 一类是与地震波传播特性有关的衰减, 包括球面扩散、散射及透射损失等, 这部分能量在地震资料处理时已对其进行补偿; 另一类是地层本身的固有衰减, 即地层的吸收, 这种介质本身所固有的吸收特性通常用品质因子Q来描述^[1,2], Q值与介质的结构、孔隙度以及孔隙流体的性质密切相关。

在由固态、液态、气态物质构成的多相介质中, 对吸收性质影响最显著的是气态物质, 在岩石孔隙饱和液中掺入少量气态物质, 可以明显提高对纵波能量的吸收, 导致地震波的高频成分很快衰减, 因此地层吸收参数是检测储层含气性的一个重要参数^[3~6]。

当储层含气后, 地震资料的振幅和频率都有一定的反映, 振幅有异常, 在频率特征上通常都有反映, 而振幅没有异常, 在频率特征上也会有所反映, 因此利用地震资料检测储层含气性时, 频率特征比振幅特征的应用范围更广泛。本文通过S变换, 基

于地震频谱信息, 利用中心频率估算地层吸收参数(地层Q值), 实现对储层含气性的检测。

2 方法原理

假设震源为理想脉冲源, 地层品质因子Q为常数, 同时忽略散射引起的衰减, 那么在一维黏弹性介质中, 地震波 $U(\omega, z)$ 沿 z 轴增大方向以角频率 ω 传播时, 其传播方程^[7]为

$$|U(\omega, z)| = \exp\left[\frac{i\omega z}{c(\omega)}\right] \exp\left[-\frac{\omega z}{2Qc(\omega)}\right] \quad (1)$$

式中: ω 是角频率; z 是传播距离; $c(\omega)$ 是相速度。

由于 $z=tc(\omega)$, $\omega=2\pi f$, 则式(1)可表示为

$$U(\omega, t) = \exp(i2\pi ft) \exp\left(-\frac{\pi ft}{Q}\right) \quad (2)$$

将式(2)进行S变换^[8], 得到

$$S(\tau, f) =$$

$$\frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{\pi ft}{Q}\right) \exp\left[-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}\right] dt \quad (3)$$

根据文献[9], 已知 $\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ax^2) dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$, 则

式(3)可表示成

* 山东省东营市北一路210号胜利油田分公司物探研究院综合室, 257022。E-mail: weiwen. slyt@sinopec. com

本文于2011年9月20日收到, 最终修改稿于2012年7月3日收到。

本研究受国家科技重大专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术”(2011ZX05006-002)资助。

$$S(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{f^2}{2}\left(t-\tau+\frac{\pi}{Qf}\right)^2\right] \times \exp\left[-\frac{f^2}{2}\left(\frac{2\pi\tau}{Qf}-\frac{\pi^2}{Q^2f^2}\right)\right] dt = \exp\left[-\frac{f^2}{2}\left(\frac{2\pi\tau}{Qf}-\frac{\pi^2}{Q^2f^2}\right)\right] \quad (4)$$

其振幅谱为

$$A_s(t, f) = |S(t, f)| = \exp\left(-\frac{\pi ft}{Q} + \frac{\pi^2}{2Q^2}\right) \quad (5)$$

因此,能量分布函数可定义为

$$E_s(t, f) = A_s^2(t, f) = \exp\left(-\frac{2\pi ft}{Q} + \frac{\pi^2}{Q^2}\right) \quad (6)$$

地震能谱中心频率 f_m ^[10,11] 定义为功率谱的频率加权累加和与总能量的比值,它反映了信号能量按频率分配的特点,高频能量强,则中心频率高;高频能量弱,低频部分能量强,则中心频率低,即此时的高频成分吸收衰减严重。其计算公式为

$$f_m = \frac{\int_0^{\infty} E_s(t, f) f df}{\int_0^{\infty} E_s(t, f) df} = \frac{\int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{2\pi ft}{Q} + \frac{\pi^2}{Q^2}\right) f df}{\int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{2\pi ft}{Q} + \frac{\pi^2}{Q^2}\right) df} = \frac{Q}{2\pi t} \quad (7)$$

式(7)表明中心频率 f_m 与地层 Q 值成正比关系。文中通过地震资料中心频率估算的 Q 值是地层的等效品质因子,单套地层的品质因子可通过式(8)求取^[12],即

$$\frac{t_2}{Q_2} = \frac{t_1}{Q_1} + \frac{t_2 - t_1}{Q_2} \quad (8)$$

式中: t_1, t_2 分别为地震波通过目的层顶、底界面时所用的传播时间; Q_1, Q_2 分别为 t_1, t_2 时刻的等效品质因子; Q_2 为 t_1 与 t_2 之间的品质因子。

在对地震数据处理时,可以通过以下步骤从浅到深估算每个时间采样点的等效品质因子,实现单套地层品质因子的转换。

(1)对地震数据逐道进行 S 变换,得到时频域能量分布。

(2)假设地震数据从浅到深时间采样点分别为 $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ (n 为正整数),根据时频域能量分布和中心频率的定义,计算拾取 $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ 对应的中心频率,并利用式(7)估算出 $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ 对应的等效品质因子。

(3)将 t_1, t_2 时刻等效品质因子代入式(8),计算

得到 t_1, t_2 之间地层品质因子,依次类推,将 t_{n-1}, t_n 时刻等效品质因子代入式(8),计算得到 t_{n-1}, t_n 之间地层品质因子,并按此过程依次得到两两时刻之间的单套地层品质因子。

(4)在地层品质因子参数剖面上,记录 $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ 时间采样点品质因子为对应的单套地层品质因子值,如: t_n 时刻品质因子记为 t_{n-1}, t_n 之间地层品质因子。

3 模型正演

通常情况下,地层含气与不含气所引起的地震波吸收衰减特征存在明显差异。为了研究地层含气与不含气引起的地震波吸收衰减变化特征,并验证中心频率法估算的地层 Q 值检测气层的可行性,设计一个三层水平层状模型,其地层参数如图 1 所示,其中上覆及下伏地层的 Q 值均为 300,中间砂岩地层含气部位的 Q 值从 5 开始以增量 10 逐渐增大至 155,含水部位的 Q 值为 300。

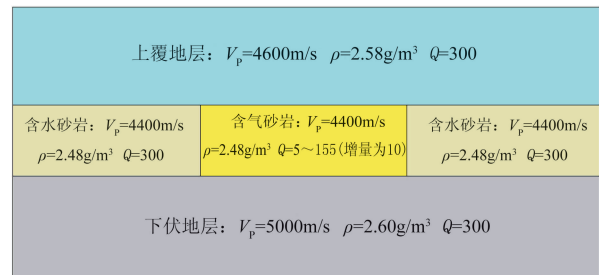


图 1 三层水平层状模型

利用单程波法地震正演模拟制作反射合成记录。图 2 为含气层 Q 值为 5 时对应的正演模拟记录及吸收衰减分析。现选取气层段(图 2b)进行研究,从含气地层顶、底地震频谱分析看,地震波经过气层之后,地震能量吸收衰减严重,导致气层底部的地震主频降低、频带变窄,中心频率变低,在利用中心频率估算的地层 Q 值剖面上(图 2c),气层段 Q 值较小,表现为强的吸收衰减特征。

在有效频带范围内,以地震主频为界,将频谱分为高频段和低频段,在主频两边相同频宽内,高频段能量取值为主频与较高频率之间的能量平均;低频段能量取值为主频与较低频率之间的能量平均。图 3 为中心频率与能量随气层 Q 值的变化曲线。由图 3a 可以看出,当含气层 Q 值从 5~155 变化时,随

着 Q 值的增大,中心频率逐渐增大;当 Q 值在 5~50 变化时,中心频率递增梯度明显增大;当 Q 值在 50~155 变化时,中心频率递增梯度趋于平缓。由图 3b 可以看出,当 Q 值在 105~155 变化时,高频段能量高于低频段能量,随着 Q 值的减小,高频段能量减小,低频段能量变化缓慢;当 Q 值在 5~105 变化时,高频段能量低于低频段能量,低频段能量变化缓慢。也就是说,在地震频谱能量变化上, Q 值较

大时,地震波能量的吸收衰减比较微弱,但高频能量的吸收衰减程度低于低频能量,从而导致高频能量比低频能量强;随着 Q 值的减小,由于吸收衰减作用增强,地震波能量总体呈减弱趋势,并逐渐向低频段移动,导致低频能量比高频能量强。综上所述,含气层在中心频率处及地震波的能量方面存在明显的异常特征,从而为对地震资料进行吸收衰减分析提供了依据。

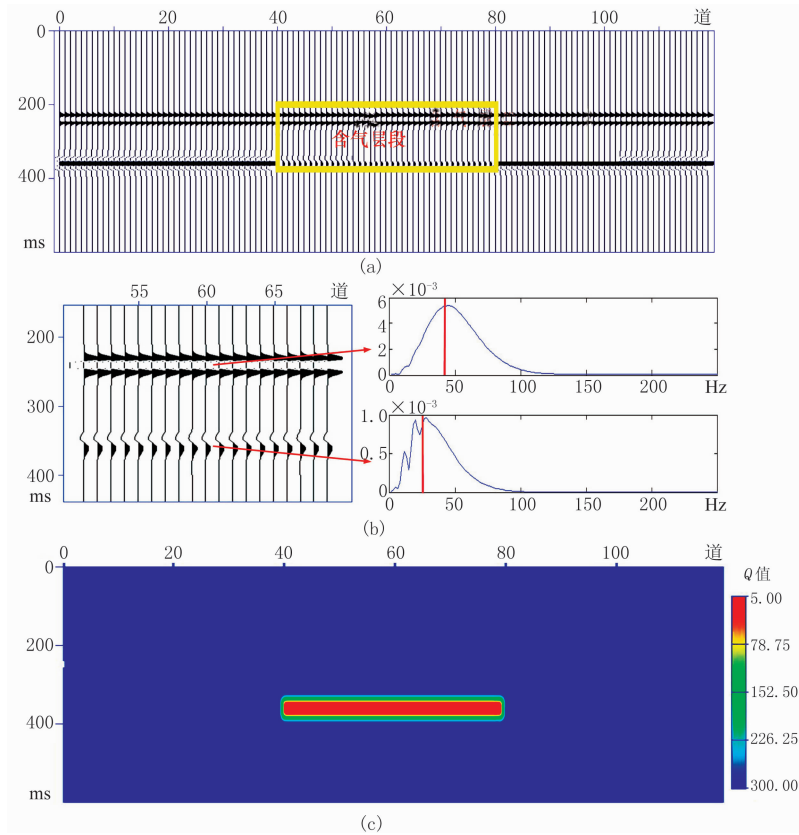


图 2 气层 Q 值为 5 时正演模拟及吸收衰减分析
(a) 正演记录; (b) 气层顶、底频谱分析; (c) 地层 Q 值剖面

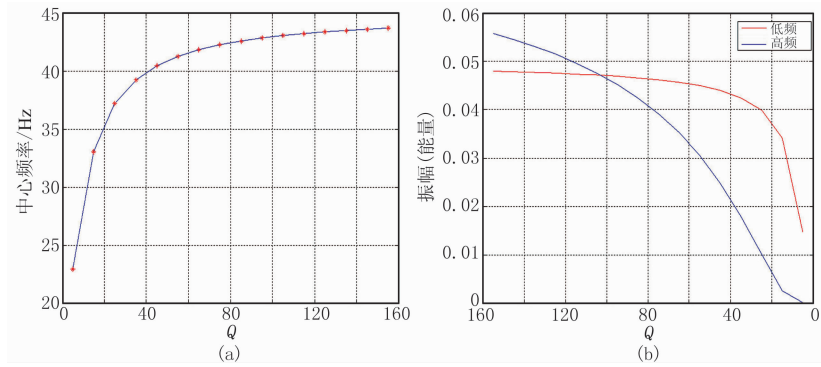


图 3 中心频率与能量随气层 Q 值的变化曲线
(a) 中心频率随 Q 值的变化曲线; (b) 高频与低频能量随 Q 值的变化曲线

4 应用实例

永安地区位于济阳拗陷东营凹陷北部,自1965年勘探以来累计探明天然气含气面积 4.778km^2 ,天然气地质储量约 $3 \times 10^8\text{m}^3$ 。以永55井区为例,该区块沙二下为三角洲沉积,主要以河口坝组成的厚层块状砂岩为主,岩性多为粉、细砂岩,孔隙度、渗透率较高,储层物性好,其中永55井砂岩单层厚

度可达20m,在1448.4~1453.4m和1463.4~1465.4m段试井为气层,在1471.0~1474.2m井段综合解释为油层,1478.0~1479.0m井段综合解释为油水同层。在过永55井的纯波地震剖面上(图4),含气层段出现平点反射(红框中时间位置为1360ms)。但是,除了气层为强反射特征外,其他非气层位置(图4中蓝框所示)也表现为较强反射特征,这给利用常规地震属性检测该区的气层增加了困难。

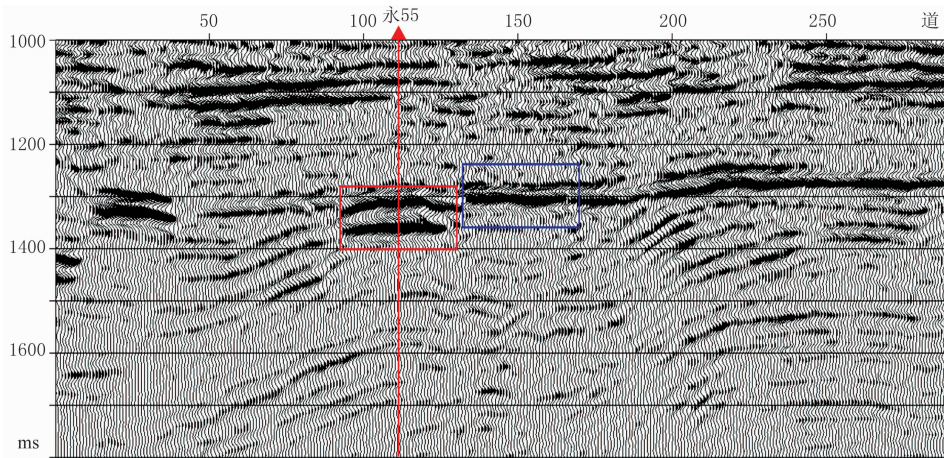


图4 过永55井东西向纯波地震剖面

图5是气层与非气层的频谱曲线。分析过永55井纯波地震剖面的气层(图4中红框)及其右侧非气层(图4中蓝框)的频谱,可以看出气层相对非气层地震主频降低,高频能量衰减严重,导致中心频率减小,这与理论分析结论一致,说明利用中心频率法估算的地层Q值在永55井区检测气层具有可行性。在过永55井的地层Q值剖面上(图6),气

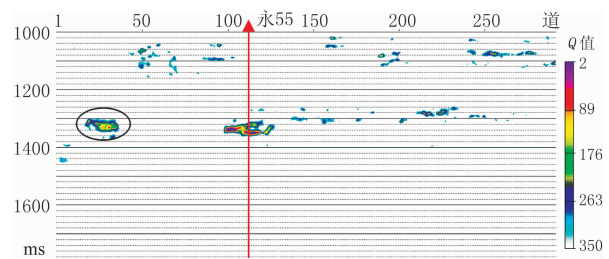


图6 过永55井地层Q值剖面

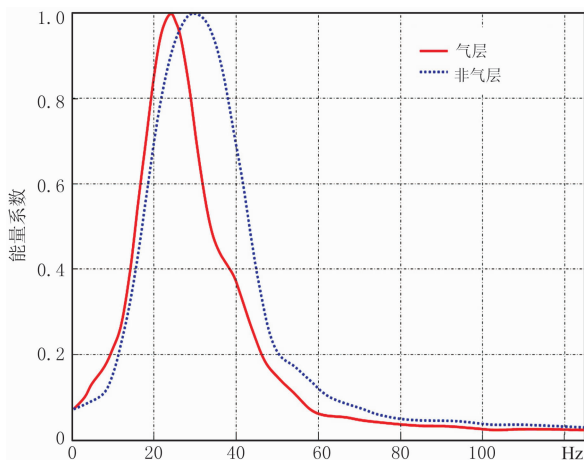


图5 永55井区气层与非气层频谱

层Q值较小,吸收衰减特征十分明显,而非气层表现为弱的吸收衰减特征。另外,在永55井西侧同样存在Q值相对较小的吸收衰减异常区(图6中椭圆所示位置),预测为较有利的含气区域。综上分析,在永安地区的永55井区,应用中心频率法估算的地层吸收参数能够较好地压制非气层干扰信息,突出气层的吸收衰减特征,在气层检测方面取得了较好的应用效果。

5 结论

通过模型正演与实际地震资料的应用结果表

明,应用中心频率法估算的地层吸收参数能较好地反映含气地层的吸收衰减特征,可在叠后地震资料上实现储层含气性检测。获得的具体结论有:

(1)含气储层的 Q 值不同引起的地震中心频率变化程度也不同,随着 Q 值的增大,中心频率迅速增大,但增至拐点后,中心频率的变化趋于平缓;

(2)当含气储层 Q 值不同时,地震波高频段能量与低频段能量变化特征不同,随着 Q 值的减小,高频段和低频段能量均有减小的趋势,但在高 Q 值区间高频能量比低频能量强;在中、低 Q 值区间低频能量比高频能量强。也就是说随着 Q 值的减小,高频吸收衰减严重,低频吸收衰减微弱,只有在 Q 值较小的时候吸收衰减程度才比较大;

(3)高保真地震资料处理是计算地层吸收参数的前提,在利用中心频率法估算地层 Q 值时,建议以叠后纯波地震资料为基础资料。

参 考 文 献

- [1] Futterman W I. Dispersive body waves. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67(13): 5279~5291
- [2] 张繁昌,李传辉,吴国忱等. 地层吸收对弹性参数的影响和叠前 QAVO 反演. 物探化探计算技术, 2010, 32(3): 232~240
Zhang Fanchang, Li Chuanhui, Wu Guochen et al. The effect of rock absorption on elastic parameters and pre-stack QAVO inversion. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 32(3): 232~240
- [3] 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. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 343~349
Zhang Huixing, He Binshou, Jiang Xiaodian et al. Utilizing attenuation characteristic of seismic wave in dual-phase medium to detect oil and gas. *OGP*, 2010, 45(3): 343~349
- [4] 张景业,贺振华,黄德济. 地震波频率衰减梯度在油气预测中的应用. 勘探地球物理进展, 2010, 33(3): 207~211
Zhang Jingye, He Zhenhua, Huang Deji. Application of frequency attenuation gradient in prediction of gas and oil potentials. *Progress in Exploration Geophysics*, 2010, 33(3): 207~211
- [5] 苑书金,董宁,于常青. 地震波衰减技术在鄂尔多斯盆地储层预测中的应用. 石油物探, 2006, 45(2): 182~185
Yuan Shujin, Dong Ning, Yu Changqing. The application of seismic attenuation technology for reservoir prediction in Erdos basin. *GPP*, 2006, 45(2): 182~185
- [6] 董宁,杨立强. 基于小波变换的吸收衰减技术在塔河油田储层预测中的应用研究. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 533~538
Dong Ning, Yang Liqiang. Application of absorption and attenuation based on wavelet transform for prediction of reservoir in tahe oilfield. *Progress in Exploration Geophysics*, 2008, 23(2): 533~538
- [7] Aki K and Richards P G. *Quantitative Seismology*. San Fransisco: I W H Freeman and Co, 1980
- [8] 邹文,陈爱萍,贺振华等. 基于 S 变换的地震相分析技术. 石油物探, 2006, 45(1): 48~51
Zou Wen, Chen Aiping, He Zhenhua et al. Seismic facies analysis based on S-transform. *GPP*, 2006, 45(1): 48~51
- [9] 王小杰,印兴耀,吴国忱. 基于叠前地震数据的地层 Q 值估计. 石油地球物理勘探, 2011, 46(3): 423~428
Wang Xiaojie, Yin Xingyao, Wu Guochen. Estimation of stratigraphic quality factors on pre-stack seismic data. *OGP*, 2011, 46(3): 423~428
- [10] 陈遵德. 储层地震属性优化方法. 北京: 石油工业出版社, 1998
- [11] 云美厚,丁伟. 地震子波频率浅析. 石油物探, 2005, 44(6): 578~581
Yun Meihou, Ding Wei. Analysis of seismic wavelet frequency. *GPP*, 2005, 44(6): 578~581
- [12] Hargreaves N D, Calvert A J. Inverse Q filtering by Fourier transform. *Geophysics*, 1991, 56(4): 519~527

(本文编辑:金文昱)