

地震波质心频率变化规律

王宗俊*^① 范廷恩^① 马淑芳^① 范洪军^① 张会来^① 马媛媛^②

(^①中海油研究总院,北京 100028; ^②中国石油大学(北京)信息学院,北京 102249)

王宗俊,范廷恩,马淑芳,范洪军,张会来,马媛媛. 地震波质心频率变化规律. 石油地球物理勘探,2015,50(5): 861-872.

摘要 文中阐述了地震波吸收衰减的基本理论,将质心频移式分为高斯型质心式、匹配型质心式、雷克型质心式、加权型质心式、加权型质心变式、脉冲型质心式和泰勒型质心式,通过模型及实际测试,得到如下认识:①当传播时间较小时,质心频率随传播时间(距离)近似呈线性衰减;当传播时间较大时,质心频率随传播时间(距离)近似呈双曲衰减。②衰减速度由品质因子 Q 决定,即 Q 值越大,衰减越慢,反之亦然。③高斯型、泰勒型质心式 Q 值曲线在传播时间较小时具有较高精度,随着传播时间的增加逐渐偏离真实值;加权型质心式 Q 值曲线对源谱的拟合要求较高,即当拟合效果较好时,精度较高,且基本不受传播时间影响,当拟合效果较差时,误差较大;雷克型、脉冲型质心式和加权型质心变式 Q 值曲线的精度相对较低。

关键词 质心频移式 质心频率 线性衰减 双曲衰减 品质因子

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.05.008

1 引言

地震波在地下传播过程中会发生能量衰减,衰减方式主要分为固有衰减和非固有衰减两类。其中非固有衰减与地震波的运动学特征有关,如几何扩散、反射/透射损失等;固有衰减与地震波的动力学特征有关,主要为吸收衰减。地层的吸收衰减不仅减弱了地震波能量,还降低了子波主频和带宽,影响中深层的地震成像精度和分辨率^[1]。品质因子 Q 是表征地层吸收衰减性质的常用参量,也是反 Q 滤波、流体检测、储层预测等处理、解释工作的重要属性^[2]。

质心频移法是提取 Q 值的常用方法,该法利用地震波传播过程中地震子波的质心频率逐渐降低这一特征提取 Q 值。由于质心频率的估算具有统计意义,一般认为该方法的鲁棒性较好。如武银婷等^[3]认为,质心频移法在识别薄层界面时较谱比法、振幅衰减法更准确;曹思远等^[4]通过含噪模型测试

发现,统计属性类方法在抗噪性方面具有一定优势。经过近20年的不懈努力,质心频移法已经发展为一类独立方法,许多学者基于不同的假设或近似提出了不同的质心频移法。最早由Quan等^[5]在1997年提出质心频移式,假设初始地震子波为高斯谱,在衰减过程中谱宽度不变,质心频率降低。由于高斯谱是对称谱,而实际地震子波是非对称谱,因此质心频移法在理论上具有不可预测的误差。高静怀等^[6]基于匹配地震子波的假设,通过推导质心频率式估算 Q 值,其中需要利用四参数理论子波逼近实际地震子波。Tu等^[7]在对比质心频移法和峰值频率法的基础上,综合两者的优势,将质心频率进行换算得到峰值频率,进而利用峰值频移法估算 Q 值,该方法实际上是利用基于雷克子波的质心频移式计算 Q 值。为了消除由高斯谱与实际地震子波谱的差异引起的理论误差,Hu等^[8]基于双参数加权指数子波提出了新的质心频移式。魏文等^[9]基于脉冲谱的假设,得到估算 Q 值的质心频移公式。赵宁等^[10]、曹思远等^[11]为了规避质心法对震源的假设,从数学近

*北京市朝阳区太阳宫南街6号院中国海洋石油大厦(芍药居)B座507,100028。Email: wangzj@cnooc.com.cn

本文于2014年6月27日收到,最终修改稿于2015年7月21日收到。

本研究受中国海洋石油总公司重大专项课题“海上开发地震技术集成及应用研究”(CNOOC-KJ125ZDXM06LTD-10-KFSC-14)资助。

似的角度重新推导了质心频移式,得到由 K 阶属性组合法估算 Q 值的公式,其中一阶属性组合式即为质心频移式;通过进一步的数学近似后发现,一阶属性组合式等价于 Quan 等^[5]提出的质心频移式,从而使传统的质心法摆脱了高斯谱的假设条件,从理论上证明了传统方法对任意震源的适用性。当然,近似条件是否满足是影响该方法适用性的主要因素。

综上所述,前人提出的质心频移法^[5~11]基于震源假设或数学近似,其本质都是利用质心频率移动这一特征估算 Q 值。因此考察地震波传播过程中质心频率的衰减规律,对于 Q 值估算具有重要的理论和实际意义。

2 基本原理

2.1 地震波吸收衰减

假设初始地震子波谱为 $U(f, 0)$, 经过传播时间 t 后变为 $U(f, t)$ 。为简便起见,假设地层为常 Q 介质,不考虑相位因素。根据 Futterman 衰减模型,则有

$$U(f, t) = c(t)U(f, 0)\exp\left(-\frac{\pi ft}{Q}\right) \quad (1)$$

式中 $c(t)$ 为与频率无关的能量衰减(几何扩散、反射/透射损失等非固有衰减)因子。

2.2 质心频移式

对于任意频谱 $U(f, t)$, 定义其质心频率为 $f_{c,t}$ 、方差为 σ_t^2 , 即

$$f_{c,t} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} fU(f, t)df}{\int_{-\infty}^{\infty} U(f, t)df} \quad (2)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (f - f_{c,t})^2 U(f, t)df}{\int_{-\infty}^{\infty} U(f, t)df} \quad (3)$$

假设 $U(f, 0)$ 为高斯函数(地震子波谱表达式及具体推导见附录,下同),则有

$$f_{c,t} = f_{c,0} - \frac{\pi\sigma_0^2 t}{Q} \quad (4)$$

假设 $U(f, 0)$ 为匹配地震子波,则有

$$f_{c,t} \approx f_{c,0} - \frac{\delta^2}{4\pi Q} t \quad (5)$$

式中 δ 为初始子波匹配参数。文献^[12]、文献^[13]

给出了式(5)的高阶形式,其中还有另一个匹配参数 σ , 因此高阶形式的系数过于复杂,这里采用较为简洁的低阶近似式,并不影响定性分析。经进一步研究发现,匹配子波是在高斯谱的基础上加入了相位因子,只是式(5)的质心频率估算区间为 $[0, \infty)$, 而式(4)的质心频率估算区间为 $(-\infty, +\infty)$ 。式(5)在一定程度上考虑了实际地震子波为非对称谱这一特征,当振幅谱在 $[0, \infty)$ 区间上为对称谱时,式(4)等价于式(5)。在下面的模型测试中,对两式的结果不作区分。

假设 $U(f, 0)$ 为雷克子波,则有

$$f_{c,t} \approx f_{c,0} - \frac{\pi^{\frac{3}{2}} f_{c,0}^2 t}{8Q} \quad (6)$$

假设 $U(f, 0)$ 为加权指数子波,则有

$$\frac{1}{f_{c,t}} = \frac{1}{f_{c,0}} + \frac{\pi}{(n+1)Q} t \quad (7)$$

式中 n 为子波匹配参数。对式(7)进行近似换算,则有

$$f_{c,t} \approx f_{c,0} - \frac{\pi f_{c,0}^2 t}{(n+1)Q} \quad (8)$$

假设 $U(f, 0)$ 为脉冲信号,则有

$$\frac{1}{f_{c,t}} = \frac{2\pi t}{Q} \quad (9)$$

若 $\frac{\pi ft}{Q} \ll 1$, 根据泰勒近似,则有

$$f_{c,t} \approx f_{c,0} - \frac{a}{b} \frac{\pi\sigma_0^2 t}{Q} \quad (10)$$

式中 a 和 b 是指数函数在给定区间上的一次拟合系数,即 $e^{-x} \approx b - ax$ 。特别地,当 $a=b$ 时,式(10)同式(4)。式(10)还有另外两个意义:①从数学近似的角度证明了式(4),使质心法规避了震源谱的假设条件,从而更具有普适性;②从理论上讲,式(10)中的质心频率估算不需要全频段波谱信息,适用于任意频段区间,而其他各式则只在全频段估算的情况下才成立。

2.3 特征分析

为区分上述质心频移式,称式(4)~式(10)分别为高斯型质心式、匹配型质心式、雷克型质心式、加权型质心式、加权型质心变式、脉冲型质心式和泰勒型质心式。分析式(4)~式(10)可知,质心频率随传播时间(或距离)的变化规律具有较好的一致性,可分为两大类。第一类为线性衰减型,包括式(4)~式(6)、式(8)和式(10),其质心频率随时间呈线性递

减趋势,衰减速度(即斜率)与 Q 值及初始子波参数有关,且斜率与 Q 值呈正比关系。换言之,不论采用哪种方法估算 Q 值曲线,在绝对数值上可能存在差异,但趋势应大体一致。第二类为双曲衰减型,包括式(7)和式(9),其质心频率的倒数随时间呈线性递增趋势,递增速度与 Q 值呈反比关系。实际上,这两类规律不存在严格界限,如式(7)与式(8)在一定条件下是等价的。

3 模型测试

选取单层均匀介质对式(4)~式(10)进行模型测试。地层速度为 2000m/s, Q 值为 100,通过正演生成 VSP 下行波场(这里不考虑反射等因素的影响),检波点间距为 10m,深度从 0 递增到 2000m,地震波传播最大时差为 1000ms。为不失一般性,这里选择四个具有一定代表性的理论光滑子波作为地表初始子波,分别为尖脉冲子波、偏度为负的宽带 B 样条子波^[14]、高斯函数、偏度为正的宽带 B 样条子波。通过不同理论子波生成的正演记录,考察质心频率随传播时间的衰减规律,并讨论 Q 值反演公式的适用性。

3.1 尖脉冲子波

图 1 为尖脉冲子波正演记录,由图中可见,随着传播时间(道号)的增加,各频率成分衰减越来越严重,且高频的衰减速度快于低频(图 1b)。图 2 为尖脉冲子波质心频率—传播时间曲线,由图中可见:①真实质心频率—传播时间曲线(蓝色,下称真实曲线)随着传播时间的增大呈递减趋势,理论质心

率—传播时间曲线(红色,下称理论曲线)均存在不同程度的误差。②线性衰减型理论曲线均出现负质心频率现象,且传播时间越大,误差越大(图 2a、图 2b、图 2d、图 2f),其中高斯型质心式(图 2a)和泰勒型质心式理论曲线(图 2f)形态基本一致,当传播时间较小(小于 10^2 ms 量级)时与真实曲线吻合较好,前者在 150ms 处开始出现较大误差,后者在 200ms 处开始出现较大误差;雷克型质心式理论曲线(图 2b)误差稍大,与真实曲线的逼近效果不理想,在小时差段的斜率也不能很好地表征真实衰减速度;加权型质心变式理论曲线(图 2d)与真实曲线偏差最大,这是由于脉冲谱的主频和传播时间均较大,不满足加权型质心变式的近似条件所致。③双曲衰减型理论曲线(图 2c、图 2e)较好地避免了负频率现象,如加权型质心式理论曲线(图 2c)在 [600ms,1000ms] 区间上较好地逼近了真实曲线,但在 [0,400ms] 区间的误差略大;脉冲型质心式理论曲线(图 2e)的误差较加权型质心式理论曲线(图 2c)大,尽管初始子波满足脉冲型质心式的假设,但受采样定理影响,无法获得全频段信息,只能利用局部频段成分进行积分运算,导致理论曲线趋势相近但绝对数值存在一定误差。

根据式(4)~式(10),通过拟合质心频率—传播时间曲线的斜率(或曲率)估算 Q 值。图 3 为根据真实质心频率—传播时间曲线(图 2 中蓝线)反演的 Q 值,由图中可见:①高斯型质心式(图 3a)和泰勒型质心式 Q 值曲线(图 3f)在浅层(小于 200ms)具有较高精度,随着传播时间增加,在深层(大于 200ms)的 Q 值误差逐渐增大,这与泰勒近似条件

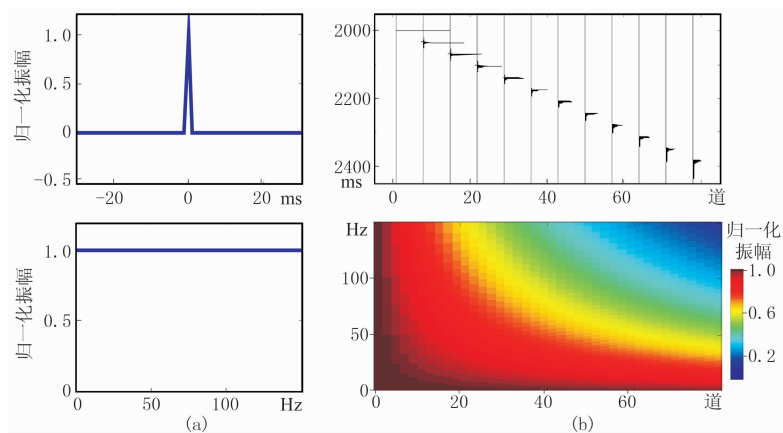


图 1 尖脉冲子波正演记录

(a)尖脉冲子波(上)及振幅谱(下);(b)由图 a 数据正演得到的下行衰减波场(上)及振幅谱(下)

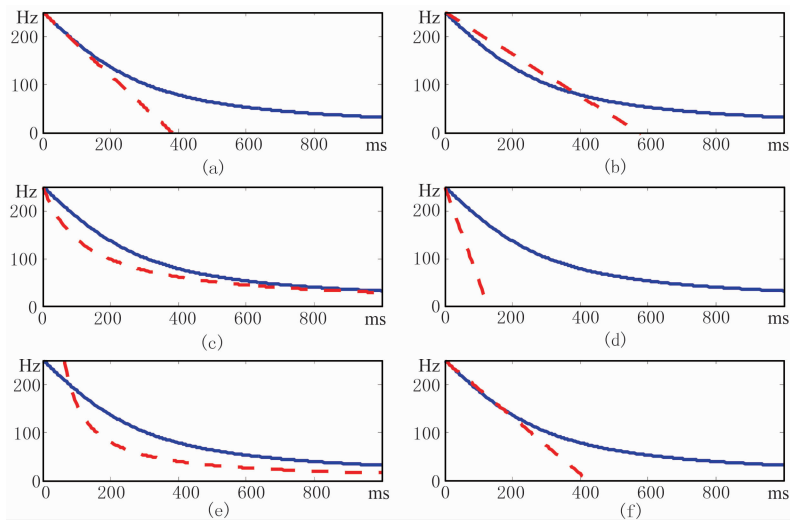


图 2 尖脉冲子波质心频率—传播时间曲线

(a)高斯型质心式；(b)雷克型质心式；(c)加权型质心式；(d)加权型质心变式；(e)脉冲型质心式；(f)泰勒型质心式
 蓝线为按式(2)计算出的真实质心频率—传播时间曲线,红线为按式(4)~式(10)正演出的理论质心曲线
 (无物理意义的负频率部分未显示),图 5、图 8、图 11 同

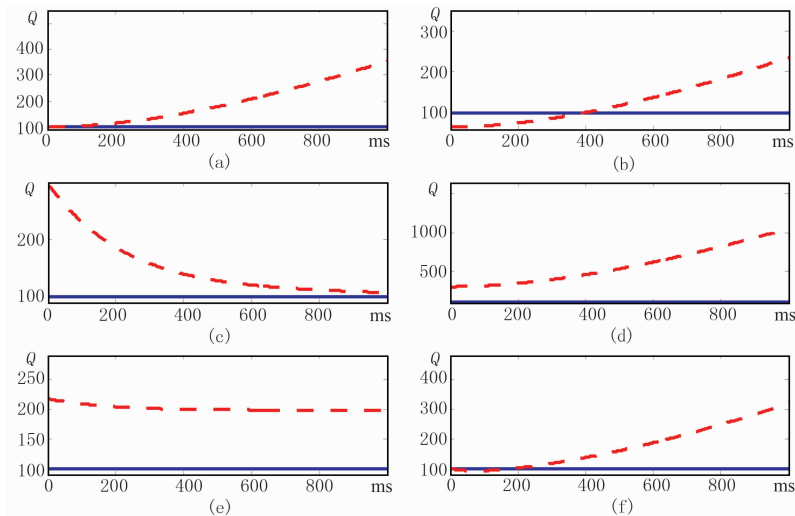


图 3 根据真实质心频率—传播时间曲线(图 2 中的蓝线)反演的 Q 值曲线

(a)高斯型质心式；(b)雷克型质心式；(c)加权型质心式；(d)加权型质心变式；(e)脉冲型质心式；(f)泰勒型质心式
 选取源谱($t_1=0$)到目的层($t_2=0\sim 1s$)之间的曲线进行斜率(或曲率)拟合,其中蓝线为模型
 真实 Q 值(100)曲线,红线分别为估算的各种质心式的 Q 值曲线,图 6、图 9、图 12 同

(传播时间与频率设定在较小的范围内)有关；②雷克型质心式(图 2b)、加权型质心变式(图 2d)、脉冲型质心式 Q 值曲线(图 2e)存在较大误差；③加权型质心式 Q 值曲线(图 2c)在深层趋向于真实曲线,但在浅、中层的 Q 值估算结果可信度较低,表明加权指数型子波对光滑谱的理论逼近效果不佳。

3.2 偏度为负的宽带 B 样条子波

图 4 为偏度为负的宽带 B 样条子波正演记录。由图中可见,宽带 B 样条子波振幅谱的非对称性较强,即偏度负值较大(图 4a 下)。

图 5 为偏度为负的宽带 B 样条子波质心频率—传播时间曲线。由图中可见,各理论曲线存在不同程度的误差,表现为:①高斯型质心式(图 5a)、泰勒型质心式理论曲线(图 5f)在浅层(小于 200ms)与真实曲线的逼近效果较好,随着传播时间的增加逐渐偏离真实曲线;②雷克型质心式(图 5b)、加权型质心变式(图 5d)、脉冲型质心式(图 5e)理论曲线与真实曲线的整体匹配性较差;③加权型质心式理论曲线(图 5c)与真实曲线的逼近效果最好,表明加权型质心式在源谱得到较好拟合的前提下具有较高的精

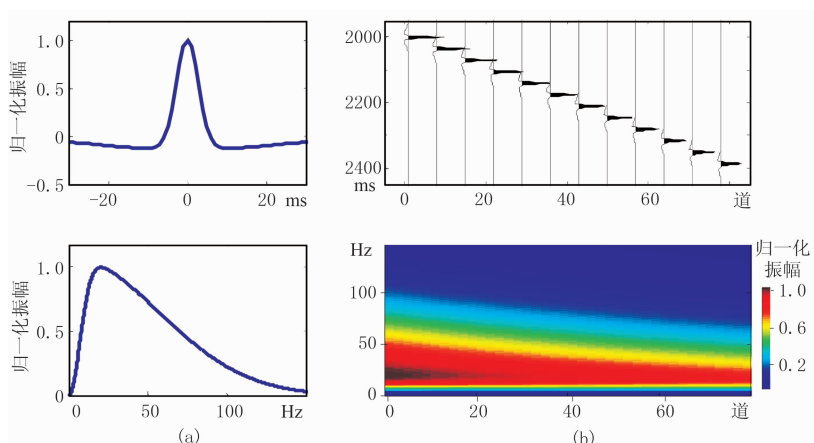


图 4 偏度为负的宽带 B 样条子波正演记录

(a) 偏度为负的宽带 B 样条子波(上)及振幅谱(下); (b) 由图 a 数据正演得到的下行衰减波场(上)及振幅谱(下)

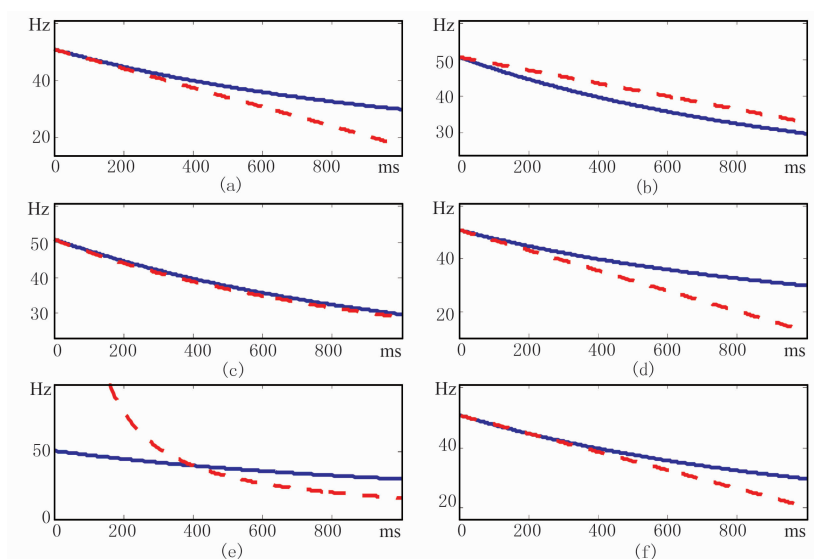


图 5 偏度为负的宽带 B 样条子波质心频率—传播时间曲线

(a) 高斯型质心式; (b) 雷克型质心式; (c) 加权型质心式; (d) 加权型质心变式; (e) 脉冲型质心式; (f) 泰勒型质心式

度,且不受传播时间影响。

图 6 为根据真实质心频率—传播时间曲线(图 5 中蓝线)反演的 Q 值。由图中可见:①高斯型质心式(图 6a)、泰勒型质心式 Q 值曲线(图 6f)在浅层具有较高的精度(误差控制住 10% 以内);②雷克型质心式(图 6b)、加权型质心变式(图 6d)、脉冲型质心式(图 6e) Q 值曲线误差较大,基本不可信;③加权型质心式 Q 值曲线(图 6c)的精度最高,误差基本控制在 15% 以内。

3.3 高斯函数、偏度为正的宽带 B 样条子波

图 7~图 9 分别为高斯函数正演记录、质心频率—传播时间曲线及根据真实质心频率—传播时间曲线反演的 Q 值曲线,图 10~图 12 分别为偏度为

正的宽带 B 样条子波正演记录、质心频率—传播时间曲线及根据真实质心频率—传播时间曲线反演的 Q 值曲线。由图 7~图 12 得到的认识与图 1~图 6 相同,这里不作赘述。

综合四组模型的测试结果发现:①高斯型、泰勒型质心式 Q 值曲线在传播时间较小(如小于 200ms)时具有较高的精度,误差一般控制在 10% 以内,随着传播时间的增加逐渐偏离真实值,结果不再可信;②加权型质心式 Q 值曲线对源谱的拟合要求较高,当拟合效果较好时,精度较高,且基本不受传播时间影响,当拟合效果较差时,误差较大;③雷克型、脉冲型质心式和加权型质心变式 Q 值曲线的精度相对较低。

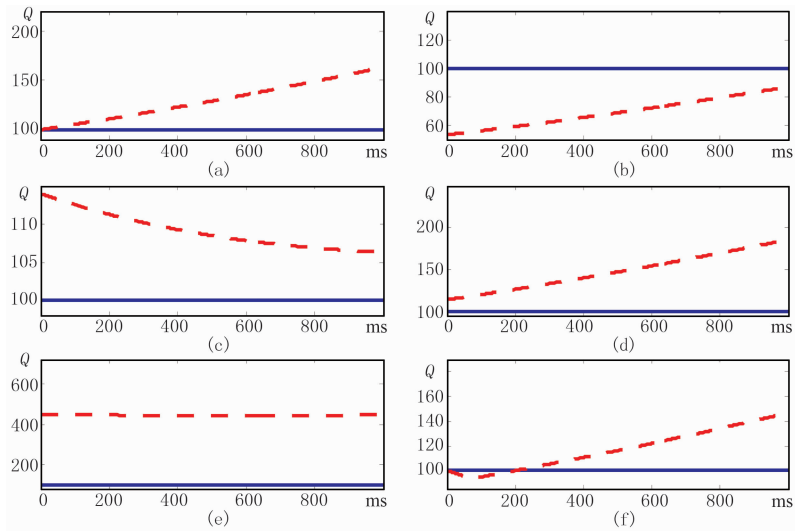


图 6 根据真实质心频率—传播时间曲线(图 5 中的蓝线)反演的 Q 值曲线

(a)高斯型质心式; (b)雷克型质心式; (c)加权型质心式; (d)加权型质心变式; (e)脉冲型质心式; (f)泰勒型质心式

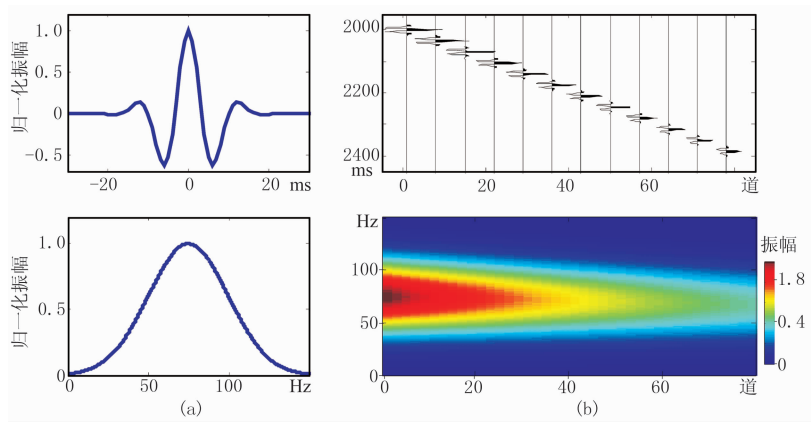


图 7 高斯函数正演记录

(a)高斯函数(上)及振幅谱(下); (b)由图 a 数据正演得到的下行衰减波场(上)及振幅谱(下)

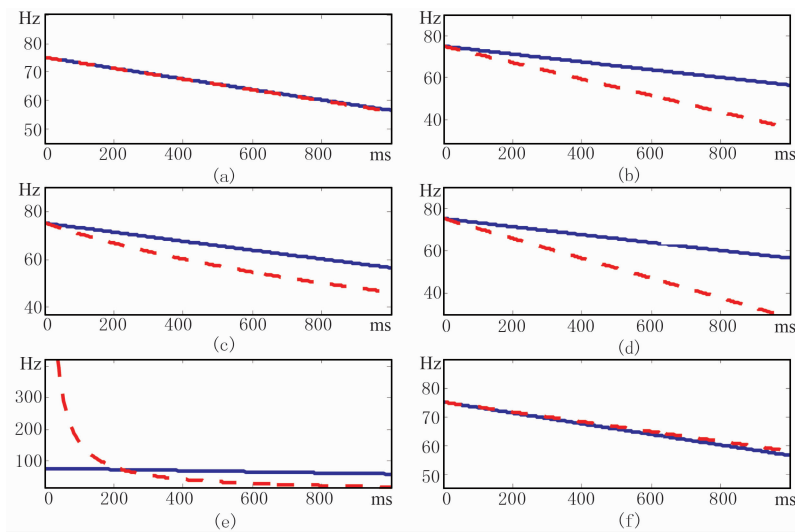


图 8 高斯函数质心频率—传播时间曲线

(a)高斯型质心式; (b)雷克型质心式; (c)加权型质心式; (d)加权型质心变式; (e)脉冲型质心式; (f)泰勒型质心式

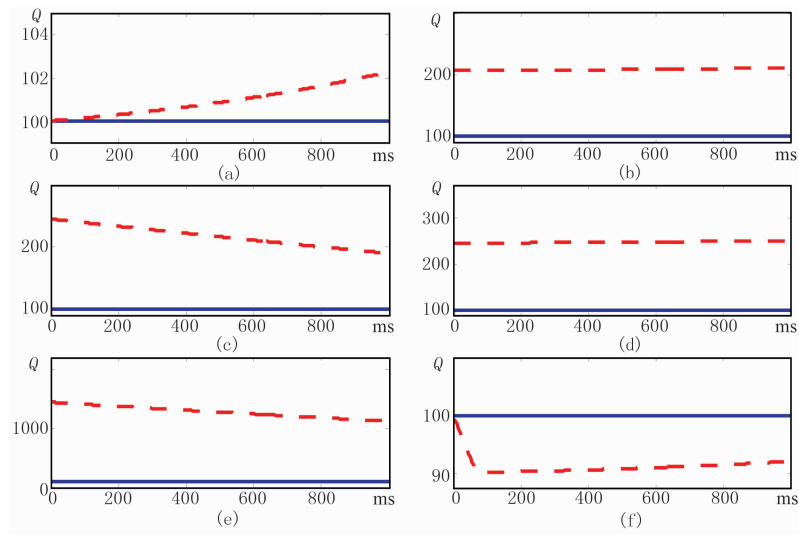


图 9 根据真实质心频率—传播时间曲线(图 8 中的蓝线)反演的 Q 值曲线

(a)高斯型质心式; (b)雷克型质心式; (c)加权型质心式; (d)加权型质心变式; (e)脉冲型质心式; (f)泰勒型质心式

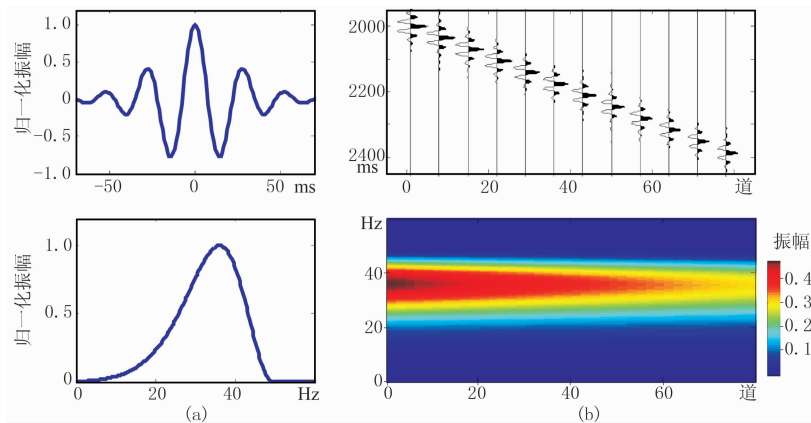


图 10 偏度为正的宽带 B 样条子波正演记录

(a)偏度为正的宽带 B 样条子波(上)及振幅谱(下); (b)由图 a 数据正演得到的下行衰减波场(上)及振幅谱(下)

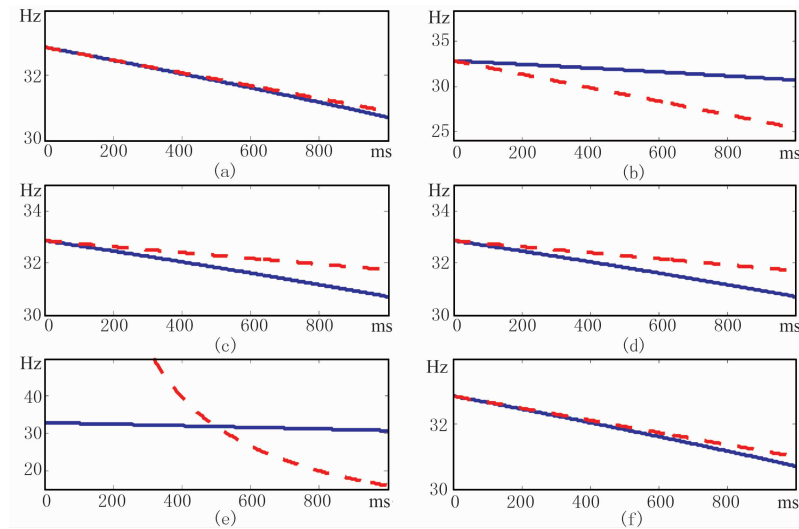


图 11 高斯函数质心频率—传播时间曲线

(a)高斯型质心式; (b)雷克型质心式; (c)加权型质心式; (d)加权型质心变式; (e)脉冲型质心式; (f)泰勒型质心式

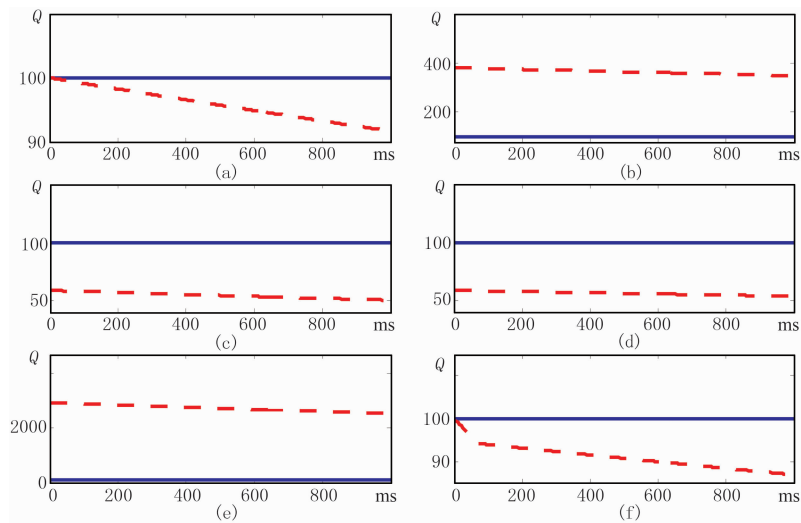


图 12 根据真实质心频率—传播时间曲线(图 11 中的蓝线)反演的 Q 值曲线

(a)高斯型质心式; (b)雷克型质心式; (c)加权型质心式; (d)加权型质心变式; (e)脉冲型质心式; (f)泰勒型质心式

4 实际资料测试

将式(4)~式(10)应用于海上 A 区实际 VSP 记录提取 Q 值。图 13 为 VSP 下行波记录,图 14 为由图 13 数据提取得到的下行衰减波场振幅谱。由图中可见,从浅层到深层的能量、主频及带宽均呈衰减趋势,且高频能量衰减大于低频。图 15 为根据衰减波谱提取的质心频率—传播深度曲线,由图中可见,随着传播深度的增大,质心频率呈衰减趋势,局部存在一定波动。

提取 Q 值的思路为:首先,选取一段质心频率—传播时间(深度)曲线,拟合出斜率(或曲率);其次,分别按式(4)~式(10)的解析关系换算得到该层

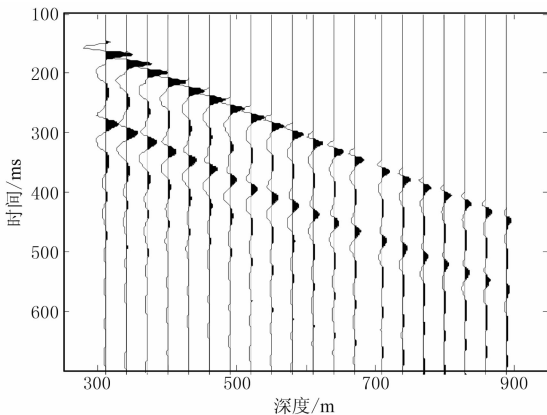


图 13 VSP 下行波记录

共 120 道,对应深度为 300~900m,检波点间距为 5m,采样间隔为 1ms,记录总长度为 5s

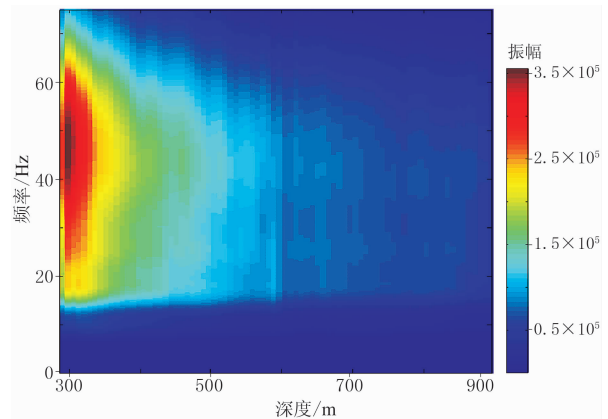


图 14 由图 13 数据正演得到的下行衰减波场振幅谱

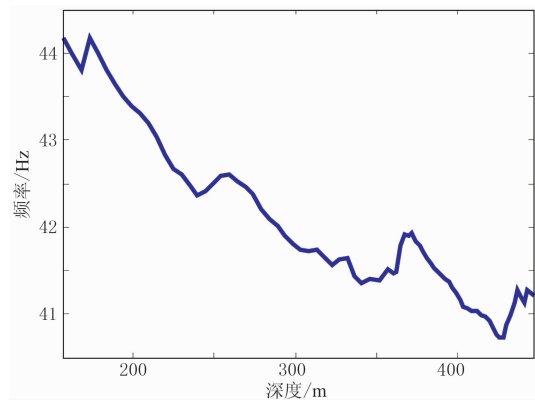


图 15 根据衰减波谱提取的质心频率—传播深度曲线

的 Q 值;最后,滤除奇异点,对 Q 曲线进行光滑。其中质心频率—传播时间(深度)曲线的局部拟合在一定程度上降低了曲线波动对 Q 值估算的影响。图 16 为根据图 15 数据反演的 Q 值。由图中可见,不同质心式 Q 值的绝对数值存在一定差异,如脉冲

型质心式 Q 值曲线的值域为 $[1000, 2000]$ (图 16e), 其他 Q 值曲线的值域均为 $[70, 300]$ (图 16a~图 16d, 图 16f), 但各 Q 值曲线的相对趋势基本一致。 Q 值曲线的上述特点是由各质心式具有相似的 Q 值与斜率(或曲率)换算关系、不同的换算系数所决定的。

根据模型测试结果可知, 高斯型、泰勒型质心式 Q 值曲线可信度相对较高, 故选取泰勒型质心式 Q 值对过井二维剖面进行反 Q 滤波处理。图 17 为反 Q 滤波前、后剖面的井震结果对比。由图中可见: 反 Q 滤波前存在复合波, 分辨率较低, 同相轴与井上记录(剖面中间 8 道)匹配度较低(图 17a); 反 Q 滤波后剖面的复合波分离, 同相轴增多, 横向连续性增强, 分辨率提高(图 17b 虚线矩形框), 同相轴与井上记录匹配度较高, 相位得到较好的校正(图 17b 实线

椭圆框)。根据笔者经验, 在 Q 值高于 150 的情况下, 一定范围内的 Q 值波动对于反 Q 滤波效果影响不大。需要指出, 上述结果并不意味着由泰勒型质心式估算的 Q 值是最精确的, 只是说明利用文中方法可合理地估算 Q 值的范围。

图 18 为反 Q 滤波前、后目的层记录的井震结果对比, 其中反 Q 滤波前井震结果的相关系数为 0.55(图 18a), 反 Q 滤波后井震结果的相关系数达到 0.68(图 18c), 表明反 Q 滤波后井震匹配度得到较大提高。图 19 为反 Q 滤波前、后的瞬时能量对比, 由图中可见, 反 Q 滤波前记录的瞬时能量随时间呈逐渐减小趋势, 反 Q 滤波后记录的能量得到较好补偿, 且不同深度的能量一致性也得到改善。上述结果说明了反 Q 滤波处理的可靠性, 从侧面也说明了估算的 Q 值的趋势较合理。

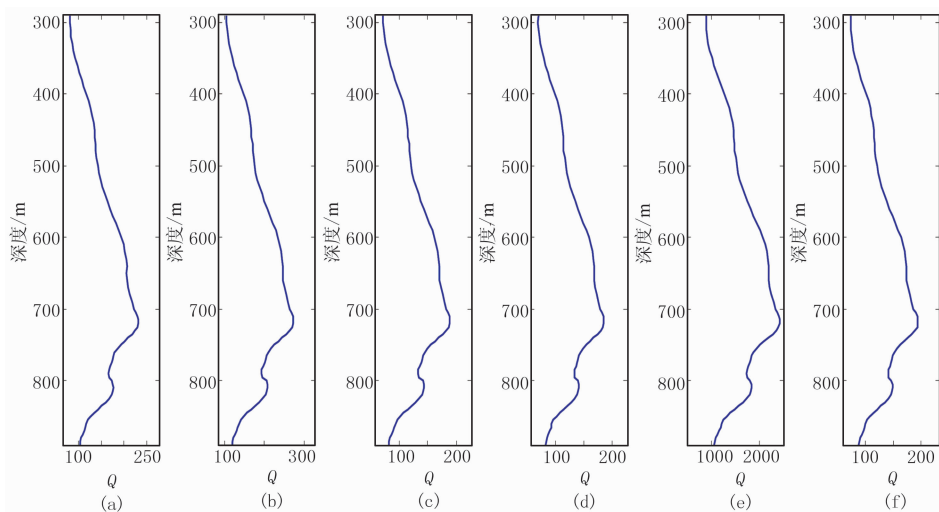


图 16 根据图 15 数据反演的 Q 值

(a)高斯型质心式; (b)雷克型质心式; (c)加权型质心式; (d)加权型质心变式; (e)脉冲型质心式; (f)泰勒型质心式

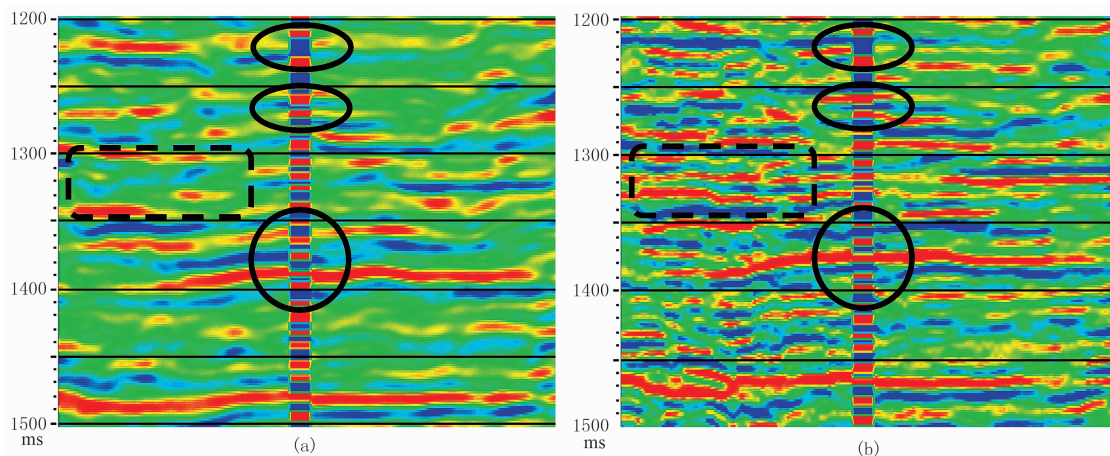


图 17 反 Q 滤波前(a)、后(b)剖面的井震结果对比

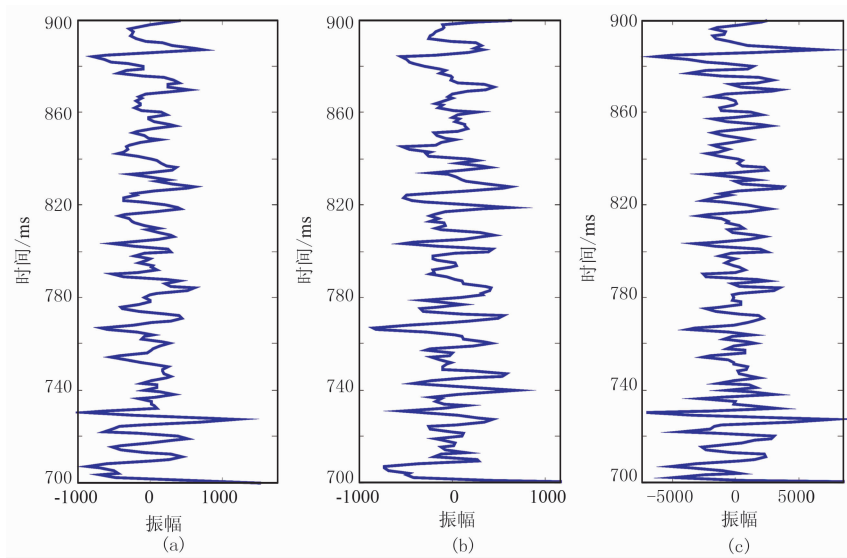


图 18 反 Q 滤波前、后目的层记录的井震结果对比
(a)反 Q 滤波前; (b)VSP 走廊叠加道; (c)反 Q 滤波后

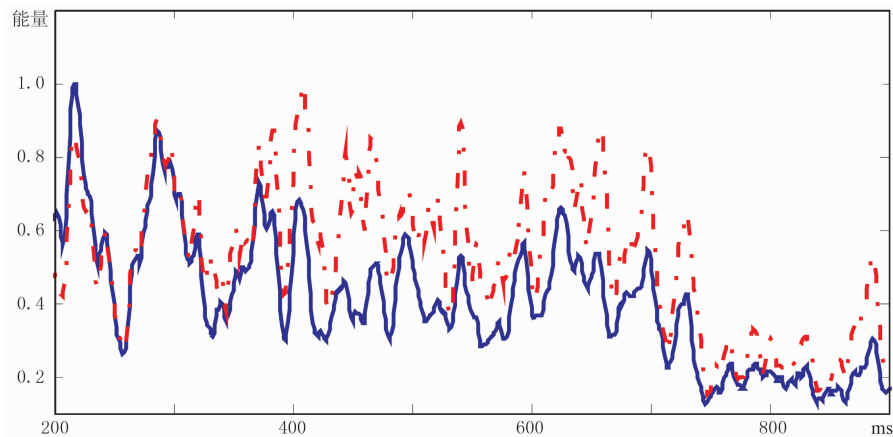


图 19 反 Q 滤波前(蓝线)、后(红线)的瞬时能量对比

5 结束语

理论推导及模型测试表明:地震波在介质中传播时,其质心频率随传播时间(距离)近似呈线性(或双曲)衰减趋势,斜率(或曲率)与地层 Q 值有关,即 Q 值越小,衰减速度越快。即当传播时间较小时,质心频率随传播时间(路程)近似呈线性衰减;当传播时间较大时,质心频率随传播时间(深度)近似呈双曲衰减(避免线性衰减出现负频率现象)。

对比六种质心式的 Q 值曲线发现:高斯型与泰勒型质心式具有相近的适用条件,即当传播距离较短或源谱逼近高斯函数时,其 Q 值曲线具有较高精度,一般适用于层 Q(传播时差小于 100ms)的估算;

加权型质心式 Q 值曲线的精度较依赖于双参数理论子波对源谱的拟合效果,当拟合效果较好时,该 Q 值曲线具有较高的精度,否则可信度较低;由于各种原因导致雷克型、脉冲型及加权型质心变式 Q 值曲线精度较低,如雷克型质心式存在源谱假设、质心-峰值频率换算、泰勒展开等近似条件。

需要说明的是,六种质心式的质心频率随传播时间(深度)的衰减规律几乎一致,文中给出了地层 Q 值与衰减速度的定量换算公式,这些公式只是换算系数存在差异,从而为实际 Q 值估算及质心频率—传播时间曲线的光滑处理提供了理论依据。从某种意义上讲,尽管六种质心式的 Q 值曲线在绝对数值上存在差异,但相对趋势基本一致,其中提取相对准确的质心频率—传播时间(深度)曲线尤为重要。

参 考 文 献

- [1] 马昭军,刘洋.地震波衰减反演研究综述.地球物理学进展,2005,20(4):1074-1082.
Ma Zhaojun, Liu Yang. A summary of research on seismic attenuation. Progress in Geophysics, 2005, 20(4):1074-1082.
- [2] 李振春,王清振.地震波衰减记录及能量补偿研究综述.地球物理学进展,2007,22(4):1147-1152.
Li Zhenchun, Wang Qingzhen. A review of research on mechanism of seismic attenuation and energy compensation. Progress in Geophysics, 2007, 22(4):1147-1152.
- [3] 武银婷,朱光明,刘伊克等.零偏 VSP 反演 Q 值 CFS 方法及影响因素研究.地球物理学进展,2010,25(6):1897-1904.
Wu Yinting, Zhu Guangming, Liu Yike et al. Study on CFS method in Q inversion using zero-offset VSP data. Progress in Geophysics, 2010, 25(6):1897-1904.
- [4] 曹思远,谭佳,高明等.对数谱根式法 Q 值反演.石油地球物理勘探,2014,49(1):161-166.
Cao Siyuan, Tan Jia, Gao Ming et al. Seismic Q estimation with logarithmic spectrum equation root. OGP, 2014, 49(1):161-166.
- [5] Quan Y, Harris J M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. Geophysics, 1997, 62(3):895-905.
- [6] 高静怀,杨森林,王大兴.利用 VSP 资料直达波的包络峰值处瞬时频率提取介盾品质因子.地球物理学报,2008,51(3):853-861.
Gao Jinghuai, Yang Senlin, Wang Daxing. Quality factor extraction using instantaneous frequency at envelope peak of direct waves of VSP data. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3):853-861.
- [7] Tu N, Lu W K. An improved peak-frequency-shift method for Q estimation. CPS/SEG International Geophysical Conference & Exposition, Beijing, 2009, 1218.
- [8] Hu Wenyi, Liu Jonathan, Bear L et al. A robust and accurate seismic attenuation tomography algorithm. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30:2727-2731.
- [9] 魏文,李红梅,穆玉庆等.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.
Wei Wen, Li Hongmei, Mu Yuqing et al. Estimation of stratigraphic absorption parameter based on center frequency method. OGP, 2012, 47(5):735-739.
- [10] 赵宁,曹思远,王宗俊等.频域统计性属性组合提取品质因子 Q.石油地球物理勘探,2013,48(4):545-552.
Zhao Ning, Cao Siyuan, Wang Zongjun et al. Seismic Q estimation by combinations of frequency statistics attributes. OGP, 2013, 48(4):545-552.
- [11] 曹思远,赵宁,袁殿等.地震波品质因子研究新方法.中国地球物理年会议论文集.安徽合肥:中国科学技术大学出版社,2012,454.
- [12] 赵静,高静怀,王大兴等.利用叠前 CMP 资料估计介盾品质因子.地球物理学报,2013,56(7):2413-2428.
Zhao Jing, Gao Jinghuai, Wang Daxing et al. Estimation of quality factor Q from pre-stack CMP records. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(7):2413-2428.
- [13] Gao J H, Yang S L, Wang D X. Estimation of quality factor Q from the instantaneous frequency at the envelope peak of a seismic signal. Journal of Computational Acoustics, 2011, 19(2):155-179.
- [14] 曹思远,刘兰锋,王鲁.四参数宽带 B 样条子波.石油地球物理勘探,2011,46(2):247-251.
Cao Siyuan, Liu Lanfeng, Wang Lu. Wide-band B-spline wavelet with four parameters. OGP, 2011, 46(2):247-251.

附录 A 高斯型质心式

记源谱为以下高斯函数

$$U(f, 0) = A \exp\left[-\frac{(f - f_{c,0})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{A-1})$$

式中: A 为归一化系数; $f_{c,0}$ 为质心频率; σ^2 为谱方差。

基于高斯谱的 Q 值反演公式为

$$Q = \pi t \frac{\sigma^2}{f_{c,0} - f_{c,t}} \quad (\text{A-2})$$

对式(B-2)作变换,则有

$$f_{c,t} = f_{c,0} - \frac{\pi\sigma^2}{Q} t \quad (\text{A-3})$$

附录 B 匹配型质心式

记源谱为以下匹配地震子波

$$U(f, 0) = A \left(\frac{4\pi}{\delta^2}\right)^{\frac{1}{4}} \exp\left[-\frac{(2\pi f - \sigma)^2}{2\delta^2} + i\varphi\right] \quad (\text{B-1})$$

式中 A、 φ 、 δ 和 σ 为理论子波的四个待定参数, δ 和 σ 影响谱形状。

匹配型质心式为

$$f_{c,t} \approx f_{c,0} - \frac{k(\eta)\delta^2}{4\pi Q} t \approx f_{c,0} - \frac{\delta^2}{4\pi Q} t \quad (\text{B-2})$$

式中

$$k(\eta) = 1 - \sqrt{2\pi\eta}\Phi^{-1}(2\pi\eta)\exp(-2\pi^2\eta^2)$$

其中 $\Phi^{-1}(\ast)$ 为标准正态分布概率积分函数, 而

$$\eta = \frac{\sigma}{2\pi\delta}$$

附录 C 雷克型质心式

记源谱为以下雷克子波

$$U(f, 0) = A \exp\left[-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right] \quad (\text{C-1})$$

式中 f_0 为子波谱的峰值频率。

基于雷克子波的 Q 值反演公式(峰值频率法)为

$$Q = \pi t \frac{f_p f_m^2}{2(f_m^2 - f_p^2)} \quad (\text{C-2})$$

式中 f_m 和 f_p 分别为源谱和衰减谱的峰值频率。

对于雷克子波,其峰值频率与质心频率存在如下换算关系

$$f_c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} f_m \quad (\text{C-3})$$

将式(C-3)代入式(C-2),得

$$Q = \pi^{\frac{3}{2}} t \frac{f_{c,t} f_{c,0}^2}{f_{c,0}^2 - f_{c,t}^2} \quad (\text{C-4})$$

求解式(C-4)并舍去负根,有

$$f_{c,t} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{\pi^{\frac{3}{2}} f_{c,0}^2 t}{4Q}\right)^2 + 4f_{c,0}^2} - \frac{\pi^{\frac{3}{2}} f_{c,0}^2 t}{4Q} \right] \\ \approx f_{c,0} - \frac{\pi^{\frac{3}{2}} f_{c,0}^2 t}{8Q} \quad (\text{C-5})$$

附录 D 加权型质心式及其变式

记源谱为以下加权指数型子波

$$U(f, 0) = A f^n \exp\left[-\frac{f}{f_0}\right] \quad (\text{D-1})$$

式中 n 和 f_0 为待定系数,分别控制波谱的对称性及主频。

基于加权指数型子波的 Q 值反演公式为

$$Q = \frac{\pi t}{n+1} \frac{f_{c,0} f_{c,t}}{f_{c,0} - f_{c,t}} \quad (\text{D-2})$$

对式(D-2)作变换,有

$$\frac{1}{f_{c,t}} = \frac{1}{f_{c,0}} + \frac{\pi}{(n+1)Q} t \quad (\text{D-3})$$

对式(D-3)取近似,有

$$f_{c,t} = f_{c,0} \frac{1}{1 + \frac{\pi f_{c,0}}{(n+1)Q} t} \approx f_{c,0} - \frac{\pi f_{c,0}^2 t}{(n+1)Q} \quad (\text{D-4})$$

附录 E 脉冲型质心式

记源谱为以下脉冲谱

$$U(f, 0) = A \quad (\text{E-1})$$

脉冲型质心式为

$$\frac{1}{f_{c,t}} = \frac{2\pi t}{Q} \quad (\text{E-2})$$

附录 F 泰勒型质心式

对式(1)中的指数衰减项进行一次展开,得

$$\exp\left(-\frac{\pi f t}{Q}\right) \approx b - a \frac{\pi f t}{Q} \quad (\text{F-1})$$

将式(F-1)代入式(2),得

$$Q = \frac{a}{b} \pi t \left(\frac{\sigma^2}{f_{c,0} - f_{c,t}} + f_{c,0} \right) \quad (\text{F-2})$$

对式(F-2)作变换,有

$$f_{c,t} = f_{c,0} - \frac{a}{b} \frac{\pi t}{Q} \frac{\sigma^2}{1 - \frac{a}{b} \frac{\pi t}{Q} f_{c,0}} \approx f_{c,0} - \frac{a}{b} \frac{\pi \sigma^2 t}{Q} \quad (\text{F-3})$$

(本文编辑:刘勇)

作者简介



王宗俊 工程师,1985年生;2008年本科毕业于中国石油大学(北京)物探系,获学士学位;2011年毕业于中国石油大学(北京)物探系,获硕士学位。主要研究方向为开发地震,如叠前反演、吸收衰减等。现在中海油研究总院从事与地震资料解释相关的科研和生产工作。