

一种稳定高效的等效Q值反Q滤波算法及应用

吴吉忠*^① 杨晓利^① 龙洋^②

(^①中国石油冀东油田勘探开发研究院,河北唐山 063004;

^②Civil Engineering Institute of University of Ottawa, Ottawa, K1N 6N5, Canada)

吴吉忠,杨晓利,龙洋. 一种稳定高效的等效Q值反Q滤波算法及应用. 石油地球物理勘探, 2016, 51(1): 63-70.

摘要 提出了一种基于等效Q值的反Q滤波算法,在补偿高频耗散能量的同时,对速度频散造成的相位畸变也进行了校正。该算法通过光滑的阈值控制增益函数实现稳定性控制,在补偿高频时,引入了一种变频带的计算方法,压制由于频率域的折返效应产生的高频噪声。与一般品质因子Q不同,由于在每一样点的吸收补偿是由该点的Q值唯一决定的,可利用扫描方法直接求取等效Q值。对Q扫描后的叠后反射数据采用对数谱比求频率导数的算法求取等效Q值场,避免了薄层调谐对频谱的不利影响。理论测试与实际资料应用的结果表明,等效Q值反Q滤波算法对含噪地震数据是稳健的,可在保持信噪比的同时提高地震资料的分辨率。

关键词 反Q滤波 高分辨率 等效Q值 复数相速度 薄层调谐

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.01.009

1 引言

地下介质是一种黏弹性介质,当地震波在地下传播时,高频能量耗散,相位产生畸变,地震数据的分辨率会大幅度降低。反Q滤波可以看作是地震波的逆向传播,是将地表记录到的数据反向延拓并剔除地球介质对入射地震波所产生的层状Q值滤波作用。反Q滤波是一种补偿地层的黏弹性衰减、提高地震资料分辨率的有效方法。

Futterman^[1]提出了Q的吸收衰减表达式,描述地震波的能量衰减和速度频散。该表达式基于Q与频率无关的假设,在此假设基础上前人利用VSP资料与地面地震资料求取品质因子Q并用于反Q滤波,对地震资料进行振幅补偿提高地震资料的分辨率,该方法效果良好,应用较广^[2-4];在反Q滤波相位频散校正时^[2-4]通常采用高截频对应的实相速度,但高截频对应的实相速度不易求取,因此限制了频散校正方法的实用性。

在反Q滤波中,补偿算子的稳定性与计算效率一直是研究人员关注的热点。Hale^[5]根据Futter-

man^[1]数学模型,基于最小相位假设,提出了一种反Q滤波方法,通过级数展开近似补偿高频成分,但由于运算量较大,限制了该方法的推广应用;Hargreaves等^[6]提出了波场延拓反Q滤波算法,该算法利用快速傅里叶变换实现,其计算速度较快,可以有效地校正速度频散引起的相位畸变,但为了追求算法的稳定性而忽略了振幅效应。在此基础上,Wang^[7,8]提出了一种稳定高效的反Q滤波方法,可以同时补偿振幅衰减与校正相位,该方法对信噪比较高的数据补偿效果较好,对中深部信噪比较低的数据补偿能力有限。Tonn^[9]详细比较了不同的品质因子估算方法;现今应用比较多的是谱比法和频移法^[10],该法更多地应用于VSP数据以及井间数据中,由于成本高,限制了其在常规地震资料处理中的应用。因此,人们提出了利用地面地震数据求取Q的方法^[11,12],但由于要考虑薄层调谐的影响,仅利用地面地震数据建立等效Q值模型非常困难。

为此,本文提出一种基于等效Q值的反Q滤波算法,在补偿高频耗散能量的同时,对速度频散造成的相位畸变进行校正,采用主频对应的实速度取代高截频对应的实速度。该法通过光滑的阈值控制增

* 河北省唐山市路北区新华西道101号冀东油田勘探开发研究院,063004。Email: wjzkg@163.com

本文于2014年9月4日收到,最终修改稿于2015年10月30日收到。

益函数实现稳定性控制。在补偿高频时,引入了一种变频带的计算方法,压制由于频率域的折返效应所产生的高频噪声。与一般品质因子不同,引入了等效Q值的概念。在每一样点的吸收补偿由该点的等效Q值唯一确定,可利用扫描方法直接求取等效Q值。对Q扫描后的叠后反射数据采用对数谱比求频率导数的算法求取非均匀Q值场,避免了薄层调谐对频谱的不利影响^[13]。

2 方法原理

2.1 等效Q值和地震波幅值衰减与频散

在研究地震波耗散时,普遍做法是引入复数相速度。品质因子Q是地震波每个周期内总能量与耗散能量之比,是复数相速度中的一个描述参数。在地震资料处理中,Q通常被假定不随频率变化或随频率弱变化。基于这个观点,选择一个与频率无关的Q更切合实际。基于 Futterman^[1]与 Kjartansson^[14]的研究,与频率有关的复数相速度表达式为

$$\frac{1}{c(\omega)} = \frac{1}{v_r(\omega)} - \frac{j}{2Q} \quad (1)$$

$$v_r(\omega) = v_r(\omega_c) \left[1 + \frac{1}{\pi Q} \ln\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \right] \quad (2)$$

式中: $c(\omega)$ 是复数相速度; $v_r(\omega)$ 是实相速度; j 是虚数单位; ω_c 是高截频,当频率大于 ω_c 时,实相速度趋于常数。选取主频 ω_0 作为研究对象,当 $\frac{1}{Q} \ll 1$ 时,做如下代换,消去 ω_c 项,式(2)变为

$$v_r(\omega) = v_r(\omega_0) \frac{1 + \frac{1}{\pi Q} \ln\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}{1 + \frac{1}{\pi Q} \ln\left(\frac{\omega_0}{\omega_c}\right)} \approx \frac{v_r(\omega_0)}{1 - \frac{1}{\pi Q} \ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),得

$$\frac{1}{c(\omega)} = \frac{1}{v_r(\omega_0)} \left(1 - \frac{j}{2Q} \right) \left[1 - \frac{1}{\pi Q} \ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \right] \quad (4)$$

式中: $v_r(\omega_0)$ 是主频 ω_0 对应的实相速度。文中把主频 ω_0 当作参考频率,而不是一般情况下的高截频 ω_c ,这是因为从记录到的地震数据中获取与主频相对应的实相速度更具有可行性。

偏移叠加数据体可看作垂直入射和出射的反射地震信号,因此可用一维介质理论处理叠加数据体。

若将非均匀介质分为若干均匀介质层,基于弹性波理论,频率域的入射波场可以表示为

$$\begin{aligned} \tilde{P}(\omega, z = \sum_{i=1}^n \Delta z_i) &= S(\omega) \exp\left(-j \sum_{i=1}^n \Delta z_i \frac{\omega}{c_i(\omega)}\right) \\ &\approx S(\omega) \exp\left\{-j\omega \sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{v_i} \left[1 - \frac{1}{\pi Q_i} \ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) - \frac{j}{2Q_i} \right]\right\} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\tilde{P}(\omega, z)$ 是深度 z 处的频率域波场; Δz_i 是各层介质的厚度; n 是目的层以上层状介质的层数; $c_i(\omega)$ 是各层介质的复数相速度; v_i 为各层介质的实相速度; Q_i 为各层介质的品质因子; $S(\omega)$ 是震源子波的傅里叶变换。

若用垂直旅行时 T 表达深度,有 $\Delta \tau_i = \Delta z_i / c_i$,

得到 $T = \sum_{i=1}^n \Delta \tau_i$,则式(5)可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{P}(\omega, T) &= S(\omega) \exp\left\{-j\omega T \left[1 - \frac{1}{\pi Q_{\text{eff}}} \ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \right] - \frac{\omega T}{2Q_{\text{eff}}}\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 Q_{eff} 是文中引入的等效Q值,其表达式为

$$\frac{1}{Q_{\text{eff}}} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \tau_i}{Q_i} \quad (7)$$

引入等效Q值并用垂直旅行时表达深度,使式(6)的弹性波波场传播表达式仅与单个参数 Q_{eff} 有关,可用扫描方法获得等效Q值。式(6)中的 $\exp\left[j \frac{\omega T}{\pi Q_{\text{eff}}} \ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right]$ 是频散项,而 $\exp\left(-\frac{\omega T}{2Q_{\text{eff}}}\right)$ 是幅值衰减项。

2.2 基于非均匀Q值的反Q滤波

式(6)给出了垂直入射的下行波场,同理可得反传的记录波场为(即深度延拓)

$$\tilde{U}(\omega, T) = \tilde{f}(\omega) \exp\left\{j\omega T \left[1 - \frac{1}{\pi Q_{\text{eff}}} \ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \right] + \frac{\omega T}{2Q_{\text{eff}}}\right\} \quad (8)$$

式中 $\tilde{f}(\omega)$ 是单个成像道的时域信号的傅里叶变换。

一般情况下震源子波 $S(\omega)$ 是未知的。对式(6)和式(8)应用反褶积成像条件,可得到反Q滤波补偿后的成像道为

$$\begin{aligned} I(\tau) &= \sum_{\omega} \text{Re}\left\{ \tilde{f}(\omega) \exp(j\omega \tau) \times \right. \\ &\quad \left. \exp\left[-\frac{j\omega \tau}{\pi Q_{\text{eff}}} \ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right] \exp\left(\frac{\omega \tau}{2Q_{\text{eff}}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中:用双倍旅行时替代 T ,即 $\tau = 2T$; Re 代表取实

部; $I(\tau)$ 为成像道幅值。式(9)与常规反 Q 滤波有些相似,不同之处在于:① Q_{eff} 是随 τ 变化的;②增加了一个频散校正项。

2.3 振幅补偿与相位频散校正

利用一组合成地震记录讨论文中反 Q 滤波算法对振幅的补偿与相位频散的校正。图 1a 是不含噪声的原始合成地震记录,采样间隔是 1ms,对原始合成地震记录用 $Q=50$ 进行吸收衰减,在吸收衰减的同时考虑频散效应,得到图 1b 对应的合成地震记

录,从图 1b 上可以看出,振幅能量变弱,子波波形变宽,相位发生畸变。对图 1b 的合成地震记录采用常规反 Q 滤波,并给定 $Q=50$,得到图 1c 对应的补偿结果。由于常规反 Q 滤波没有考虑频散效应,可以看出振幅能量虽然得到有效恢复,但相位没有得到校正。最终利用文中的反 Q 滤波算法,同样给定 $Q=50$,得到图 1d 对应的结果,可以看出振幅能量恢复的同时,相位的畸变也得到了校正,达到了预期的效果。

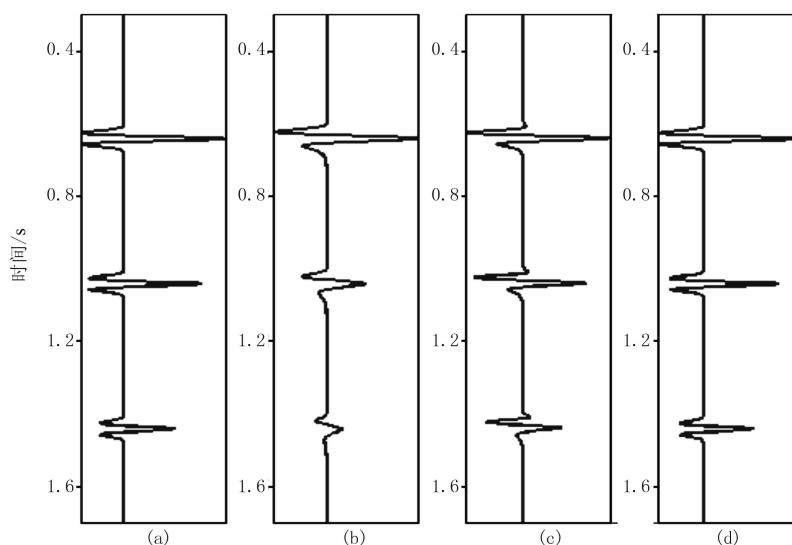


图 1 反 Q 滤波前、后效果对比

(a)原始合成记录;(b)吸收衰减合成记录;(c)常规反 Q 滤波;(d)本文方法

2.4 稳定性控制

反 Q 滤波是通过设计一个补偿算子,在频率域对地震数据进行高频补偿。有效信号得到补偿的同时,噪声也会得到加强,这使得算法表现出固有的不稳定性。为了使噪声得到有效压制,需要设计一个适用于高频的补偿算子。其中一种途径是对补偿算子使用带限滤波器^[15],但此类方法会引起高频损失。Wang^[7,8]给出了一种控制高频损失的稳定性方法,该方法通过对地震记录振幅的幅度小于背景噪声的有效信号自动进行限制,减弱补偿强度达到稳定性控制。地震记录不同深度处的子波频带均有一定程度的拓宽,但对深部信噪比低的地震记录补偿力度会变弱,从而造成了深层界面处的空间子波压缩程度低,分辨率改善不明显。文中通过引入一个光滑的阈值控制的增益函数达到稳定性控制的目的。当补偿因子小于设定的阈值时该增益函数与精确补偿因子完全一致,当大于阈值时便逐渐

光滑地过渡为一个与阈值有关的常量,在压制噪声的前提下,尽可能地补偿高频耗散信息。增益函数表述为

$$\phi(\eta) = \begin{cases} \exp(\eta) & \eta \leq \ln(G) \\ G[1 - \ln G - 2.5(\ln G)^2] + \\ \quad G(1 + 5\ln G)\eta - 2.5G\eta^2 & \ln(G) < \eta \leq \ln(G) + 0.2 \\ 1.1G & \eta > \ln(G) + 0.2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\phi(\eta)$ 为补偿因子; $\eta = \omega t / (2Q)$; G 为给定的阈值。在实际运算中先计算出 $\phi(\eta)$ 并储存到一个一维表中,直接根据相应索引调用即可,避免了大量的重复计算,可以显著地提高计算效率。

图 2 是精确补偿因子与稳定性控制增益函数的对比。实际数据处理中阈值 G 取 2000,从图 2a 可以看出,增益函数光滑渐变到一个常量而不是趋向于无穷大,图 2b 放大显示了图 2a 在阈值附近的光滑渐变过程。

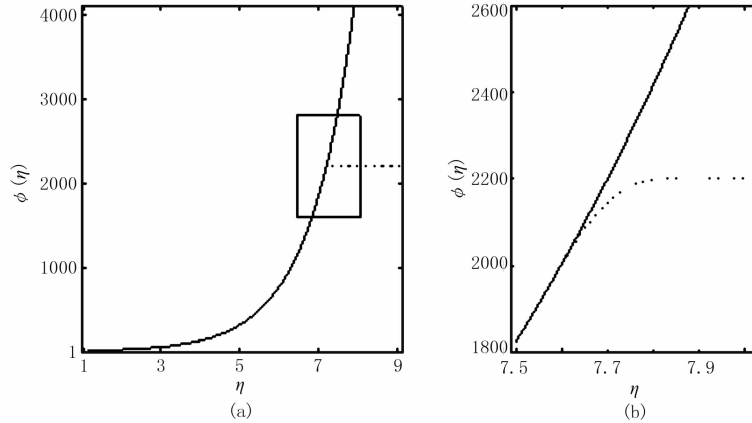


图2 精确补偿因子与稳定性增益函数对比
虚线代表稳定性增益函数,实线代表精确补偿因子

2.5 压制高频折返噪声

式(9)的计算采用离散的频率值,频率采样是由快速傅里叶算法决定的。设满足快速傅里叶算法的时间采样点数为 S_0 ,令 $\Delta\tau$ 是成像道双程旅行时的时间采样率,则频率采样为 $\Delta\omega = 2\pi/(S_0\Delta\tau)$ 。令偏移叠加数据体的有效频带的下限是 ω_{\min} ,而期望通过黏性吸收补偿达到的频带上限是 ω_{\max} ,可通过求整得到整数 l_1 和 l_2 ,使得 $l_1\Delta\omega$ 和 $l_2\Delta\omega$ 与 ω_{\min} 和 ω_{\max} 最接近, $\tau = k\Delta\tau$, 则式(9)的离散表达式为

$$I(k\Delta\tau) = \sum_{m=l_1}^{l_2} \text{Re} \left\{ \tilde{f}(m\Delta\omega) \exp(jkm\Delta\omega\Delta\tau) \times \exp \left[-\frac{jkm\Delta\omega\Delta\tau}{\pi Q_{\text{eff}}} \ln \left(\frac{m\Delta\omega}{\omega_0} \right) \right] \times \exp \left(\frac{km\Delta\omega\Delta\tau}{2Q_{\text{eff}}} \right) \right\} \quad (11)$$

式中 k, m 为整数。若不引入补偿因子,式(11)的右端项的模在高频截止点 $m = l_2$ 处已平滑地接近于零,其对应的傅里叶反变换结果 $I(k\Delta\tau)$ 将不产生频率域的折返效应。由于引入补偿因子,式(11)的右端项的模在高频截止点将大于零,此时继续使用式(11)将产生由折返效应产生的高频噪声。为此文中在高频截止点增加光滑的过渡带衰减高频噪声。对成像道超出高频截止点的频率成分,引入衰减带 $\tilde{f}(m\Delta\omega) = \tilde{f}(m\Delta\omega) \exp[-0.06(i - l_2)^2]$

$$i = l_2 + 1, l_2 + m_k \quad (12)$$

在式(11)的频率域累加计算中,高频端衰减带的实际宽度是根据补偿因子的相对大小而变化。令地震资料主频对应的补偿因子为 $a(\omega_0)$,最大频率点对应的补偿因子为 a_{\max} ,据此计算整数 m_k ,即

$$m_k = \text{int} \left\{ \sqrt{\frac{1}{0.06} \ln \left[\frac{a_{\max}}{a(\omega_0)} \right] + 25} \right\} \quad (13)$$

进而计算

$$I_0(k\Delta\tau) = \sum_{m=l_2+1}^{l_2+m_k} \text{Re} \left\{ \tilde{f}(m\Delta\omega) \exp(jkm\Delta\omega\Delta\tau) \times \exp \left[-\frac{jkm\Delta\omega\Delta\tau}{\pi Q_{\text{eff}}} \ln \left(\frac{m\Delta\omega}{\omega_0} \right) \right] \times \exp \left(\frac{kl_2\Delta\omega\Delta\tau}{2Q_{\text{eff}}} \right) \right\} \quad (14)$$

以 $I(k\Delta\tau) + I_0(k\Delta\tau)$ 为更新的成像道,将有效衰减折返效应产生的高频噪声。

2.6 非均匀Q值的拾取

由于在每一样点的吸收补偿是由该点的等效Q值唯一决定的,可利用扫描方法直接求取等效Q值。在利用透射信号,如VSP资料估计Q值时,可利用频谱形状改变等信息确定Q值,因此发展了谱比法等估计算法。由于薄层调谐等现象的存在,将谱比等方法应用于反射地震资料则产生了新的问题,主要原因是此时主频的移动或频谱形状的变化受到黏性吸收和薄层调谐的共同影响,而薄层调谐的影响更大。为此,文中采用谱比的频率导数指标确定等效Q值^[13]。谱比的频率导数指标采用Q扫描的方法对样点分别进行黏性补偿,则每个Q对应样点的短时傅里叶变换的模为 $M(\omega)$ 。而参考点处(假设没有吸收补偿)应用短时傅里叶变换得到的模为 $M_0(\omega)$,则谱比的频率导数指标为

$$\delta = \sum_{\omega} \frac{d}{d\omega} [\ln M(\omega) - \ln M_0(\omega)] \quad (15)$$

与谱比法相比,式(15)的频率导数指标可剔除薄层调谐对谱比计算结果的影响,这是因为薄层调谐项

在求频率导数后变为 $\frac{\Delta\tau}{2\tan(\omega\Delta\tau/2)}$, 算术平均即可剔除该项。为避免求导计算对噪声的放大, 需先对随频率变化的 $\ln M(\omega)$ 、 $\ln M_0(\omega)$ 做中值滤波和平滑等处理, 在求算术平均值前, 也需对导数值做中值滤波。为避免薄层调谐产生的零值所导致的对数计算的不稳定, 式(15)中对数的计算需采用稳定的对数算法, 其核心是利用级数展开近似式, 即

$$\ln x \approx (x-1) - \frac{1}{2}(x-1)^2 + \frac{1}{3}(x-1)^3 \quad (16)$$

令 M_a 是有效频带内模 $M(\omega)$ 的平均值, 当 $M(\omega) \geq 0.22M_a$ 时, 直接计算其对数 $\ln M(\omega)$; 当 $M(\omega) < 0.22M_a$ 时, 令 $g = 5M(\omega)/M_a$, 此时 $g < 1.1$, 可利用式(16)近似计算

$$\ln M(\omega) = \ln(0.2M_a) + (g-1) \left[1 - \frac{1}{2}(g-1) + \frac{1}{3}(g-1)^2 \right] \quad (17)$$

当 δ 的绝对值为零或最小时, 表明此时 $M(\omega)$ 得到了有效补偿, 对应的 Q 值便是该样点的等效 Q 值。因此 δ 可作为从 Q 扫描计算中拾取等效 Q 值的指标。

3 理论测试与实际应用

3.1 理论模型测试

建立如图 3 所示的楔状体模型, 利用褶积方法得到楔状体模型的合成地震数据(图 4a), 图 5a 是图 4a 对应的频谱。对图 4a 合成地震数据进行 Q 吸收衰减($Q=60$), 得到了图 4b 所示的吸收衰减数据, 图 5b 是其对应的频谱, 可以看到图 4b 所示数据波形变宽, 频谱变窄, 主频明显降低(图 5b)。利

用 Q 为 100、60、40 三个数值分别对图 4b 对应的吸收衰减数据利用文中反 Q 滤波方法进行黏性补偿, 得到了与三个 Q 值对应的补偿数据(图 4c、图 4d 与图 4e); 图 5c、图 5d 与图 5e 是与其对应的频谱, 可以看出, 当 $Q=100$ 时, 主频率提高、频宽虽有拓宽(图 5c), 但合成地震数据补偿欠缺; 当 $Q=60$ 时, 数据波形与原始数据波形几乎一致(图 4d), 频谱形态也与原始数据频谱一致(图 5d), 说明 $Q=60$ 时反 Q 滤波补偿达到了预期效果; 当 $Q=40$ 时, 得到了图 4e 对应的补偿数据, 图 5e 是图 4e 对应的频谱, 可以看出 $Q=40$ 时过度补偿, 图 4e 出现明显补偿噪声, 图 5e 中的主频向高频端移动, 中低频信息丢失严重。

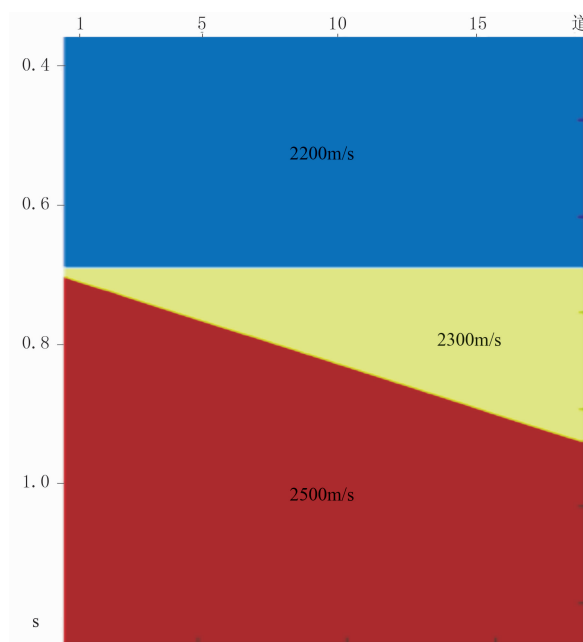


图 3 楔状模型

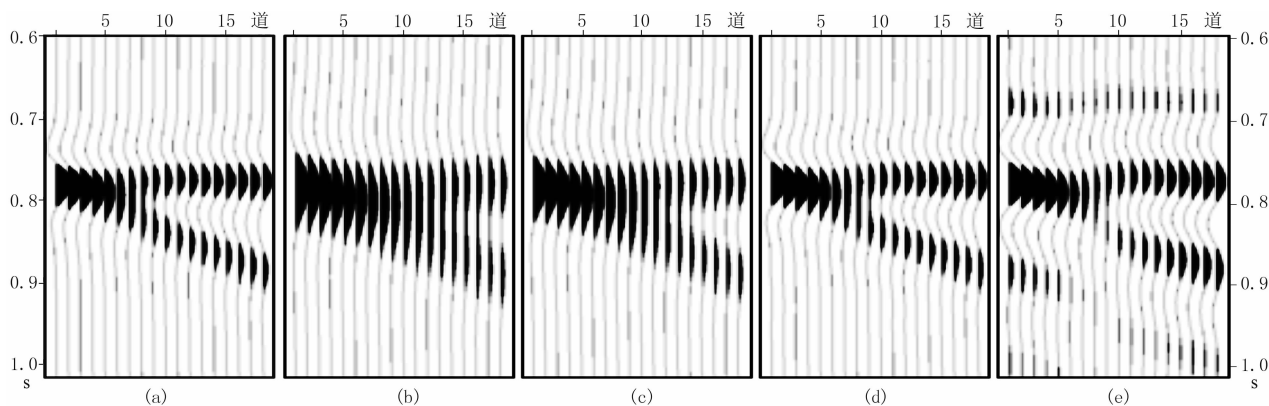


图 4 楔状模型合成记录反 Q 滤波结果对比

(a) 正演数据; (b) $Q=60$ 时吸收衰减数据; (c) $Q=100$ 时反 Q 滤波结果; (d) $Q=60$ 时反 Q 滤波结果; (e) $Q=40$ 时反 Q 滤波结果

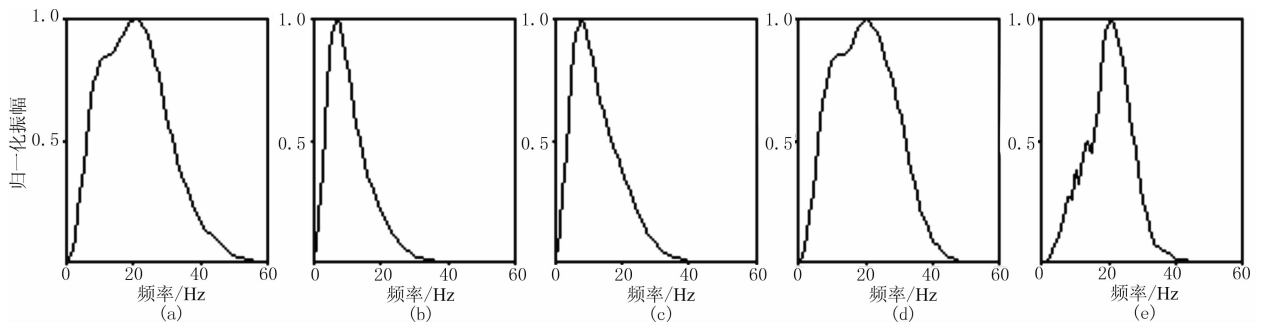


图5 图4数据的频谱

(a)正演数据; (b) $Q=60$ 时吸收衰减数据; (c) $Q=100$ 时反 Q 滤波结果; (d) $Q=60$ 时反 Q 滤波结果; (e) $Q=40$ 时反 Q 滤波

3.2 实际数据应用

将文中反 Q 滤波算法应用于黄骅拗陷北部马头营凸起区块地震资料处理,得到了该工区中部位置一条测线对应的非均匀 Q 值场(图6), Q 值在30~130之间变化。图7是马头营凸起区块常规叠前时间偏移叠加剖面。应用文中提出的反 Q 滤波算法对该剖面进行处理,得到了反 Q 滤波后的结果(图8),与图7相比,反 Q 滤波后的剖面分辨率明显提高,断点更加清晰,而且信噪比没有明显降低,表明文中提出的稳定的反 Q 滤波方法在恢复高频成分的同时,将高频噪声压制在一个较低的水平。图9是图7、图8红色矩形框的局部细节放大,可以看出经过反 Q 滤波后,剖面的信噪比提高,微小细节刻画更加清楚,分辨率提高较为明显。

图10是应用反 Q 滤波算法前、后(时窗1.0~1.4s)的频谱对比,可见反 Q 滤波后数据的主频提

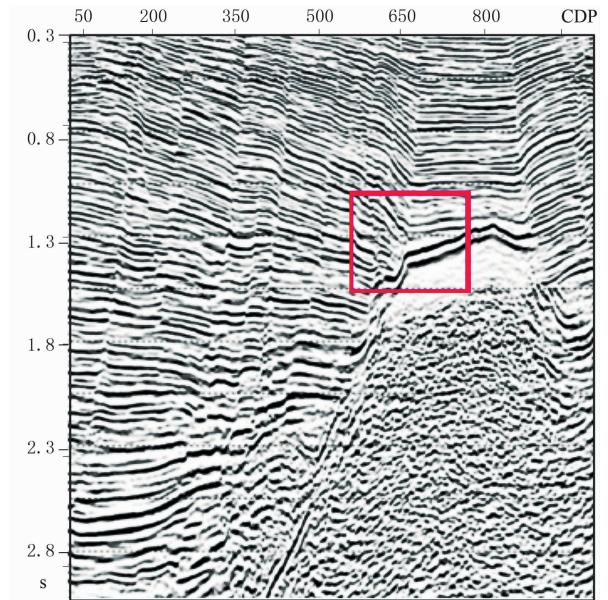


图7 马头营凸起区块常规叠前时间偏移剖面

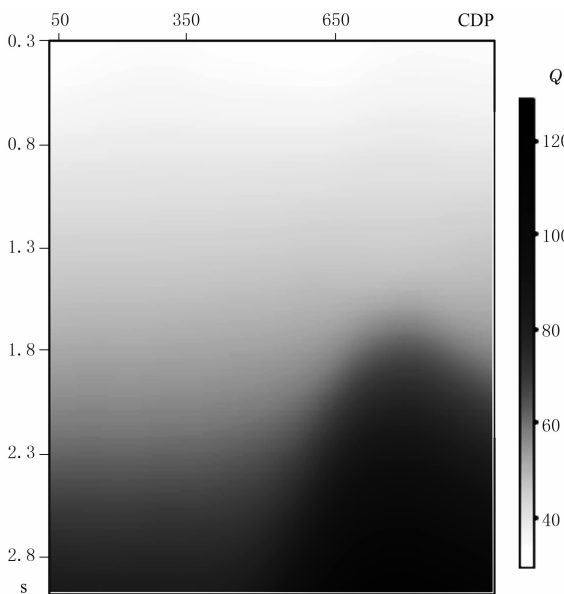


图6 马头营凸起区块非均匀 Q 值场

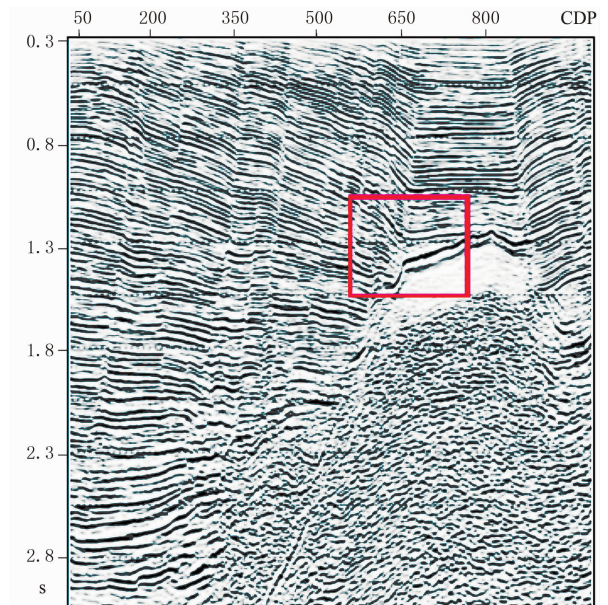


图8 图7反 Q 滤波结果

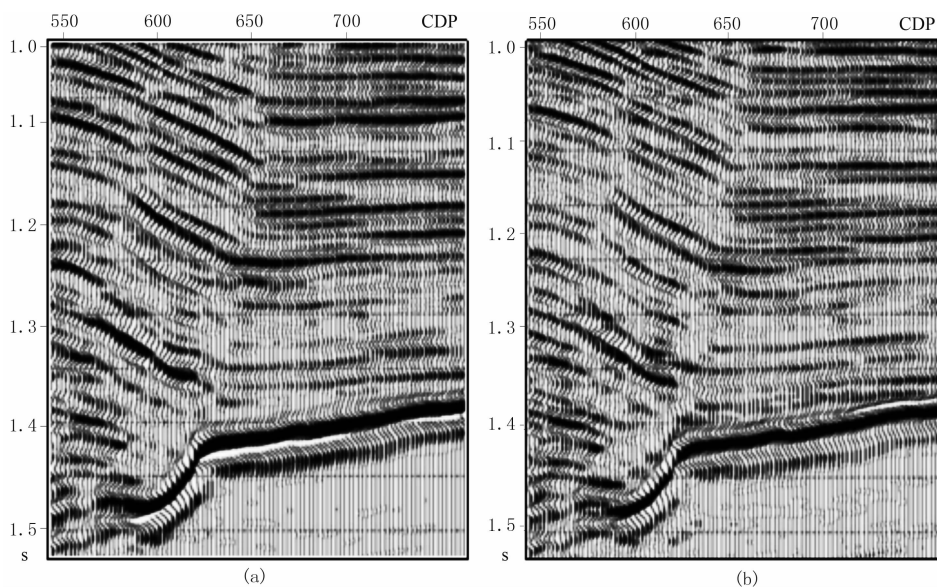


图 9 图 7 与图 8 红色矩形框局部细节放大

(a) 常规叠后剖面; (b) 反 Q 滤波结果

高了 8Hz, 频率成分更加丰富。

对马头营凸起区块其他测线进行上述处理, 得到整个工区的等效 Q 值场, 然后逐测线进行反 Q 滤波, 最终得到反 Q 滤波后的叠后数据体, 对该数据体及反 Q 滤波前、后的叠后数据体分别抽取 1100ms 时的水平切片, 如图 11 所示。可以看出经过反 Q 滤波后, 切片细节更加清晰, 信息更加丰富(图 11b), 有利于后续河道的刻画、砂体追踪。从工区中选取一条过井剖面进行井震对比, 如图 12 所示。可以看出采用文中反 Q 滤波方法后, 目的层的分辨率有所提高, 与井的匹配度也明显改善(图 12 右)。

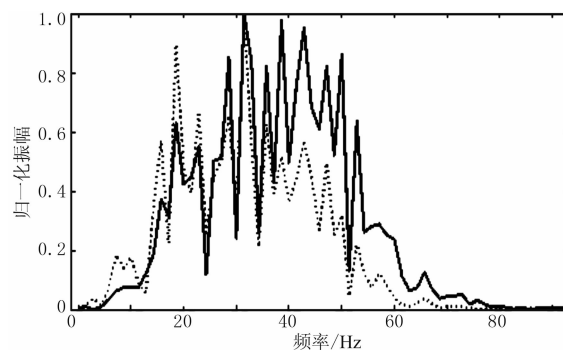


图 10 图 7 数据反 Q 滤波前、后频谱对比
虚线为反 Q 滤波前的频谱, 实线为反 Q 滤波后的频谱

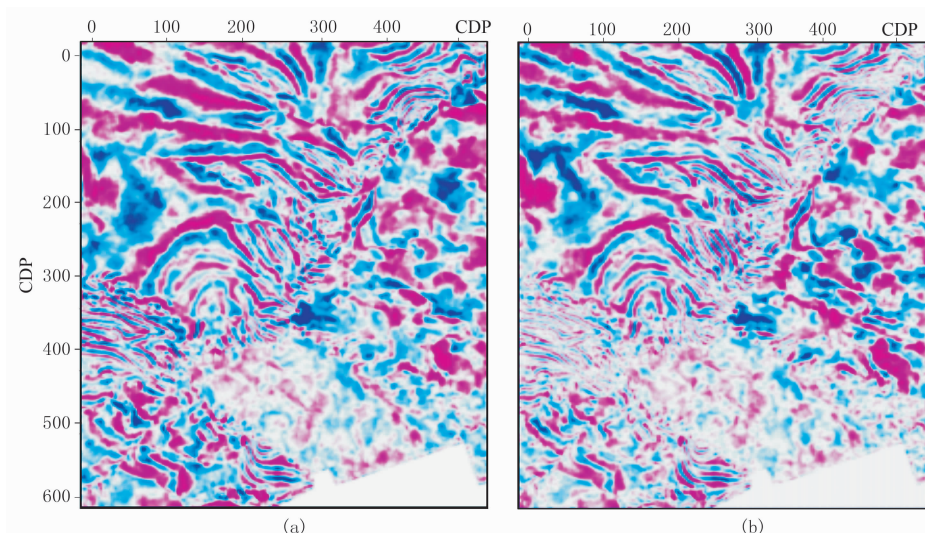


图 11 1100ms 时反 Q 滤波前(a)及反 Q 滤波后(b)数据的水平切片

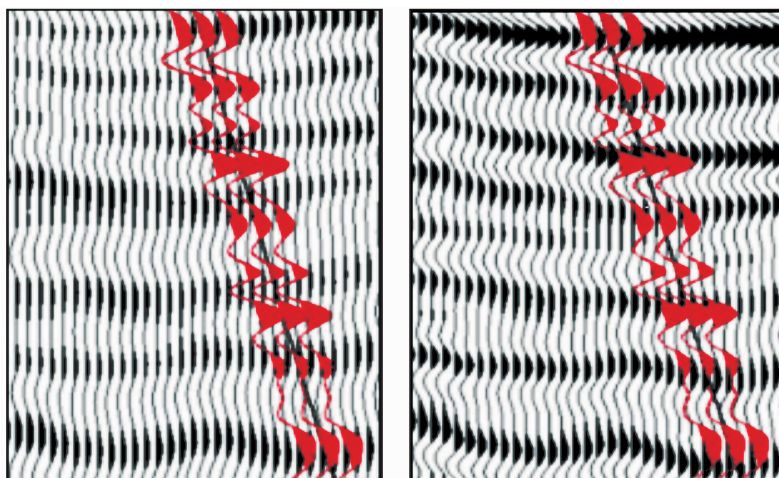


图 12 反 Q 滤波前(左)、后(右)结果与井对比

4 结论

文中提出的基于等效 Q 值的反 Q 滤波算法在补偿振幅衰减的同时,对速度频散造成的相位畸变也进行了校正,采用门限约束的稳定性控制方法,在压制噪声的前提下,尽可能地补偿高频耗散信息。补偿算子采用表驱动的方式,提前将补偿算子存放于一维数组中,使用时根据索引直接调用,避免了大量重复的 e 指数运算,显著地提高了算法的运算效率。理论测试与实际数据应用的结果表明,该算法在压制高频噪声的同时,可以提高地震资料的分辨率,对后续的解释反演等具有重要意义。

参考文献

- [1] Futterman W I. Dispersive body waves. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67(13): 5279-5291.
- [2] Bano M. Q -phase compensation of seismic records in the frequency domain. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 8(4): 1179-1186.
- [3] 常新伟. 衰减与频散的补偿方法. *石油地球物理勘探*, 1996, 31(3): 442-447.
Chang Xinwei. Method for compensating attenuation and frequency dispersion. *OGP*, 1996, 31(3): 442-447.
- [4] 张固澜, 何振华, 王熙明等. 地震波频散效应与反 Q 滤波相位补偿. *地球物理学报*, 2014, 57(5): 1655-1663.
Zhang Gulan, He Zhenhua, Wang Ximing et al. Seismic wave dispersion effects and inverse Q -filter phase compensation. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5): 1655-1663.
- [5] Hale D. Q -adaptive deconvolution. *Stanford Exploration Project Report*, 1982, 30: 133-158.
- [6] Hargreaves N D, Calvert A J. Inverse Q filtering by fourier transform. *Geophysics*, 1991, 56(4): 519-527.
- [7] Wang Y. A stable and efficient approach of inverse Q filtering. *Geophysics*, 2002, 67(2): 657-663.
- [8] Wang Y. Inverse- Q filtered migration. *Geophysics*, 2008, 73(1): 1-6.
- [9] Tonn R. The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: A Comparison of different computational methods. *Geophysical Prospecting*, 1991, 39(1): 1-27.
- [10] Quan Y, Harris J M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. *Geophysics*, 1997, 62(3): 895-905.
- [11] Xin K, Hung B. 3-D tomographic Q inversion for compensation frequency dependent attenuation and dispersion. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2009, 28: 4014-4017.
- [12] Zhang C, Ulrych T J. Estimation of quality factors from CMP records. *Geophysics*, 2002, 67(5): 1542-1547.
- [13] Zhang Jianfeng, Wu Jizhong and Li Xueying. Compensation for absorption and dispersion in prestack migration: An effective Q approach. *Geophysics*, 2013, 78(1): 1-14.
- [14] Kjartansson E. Constant Q wave propagation and attenuation. *Journal of Geophysics Research*, 1979, 84(B9): 4737-4748.
- [15] 陈增保, 陈小宏, 李景叶等. 一种带限稳定的反 Q 滤波算法. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(1): 68-74.
Chen Zengbao, Chen Xiaohong, Li Jingye et al. A band-limited and robust inverse Q filtering algorithm. *OGP*, 2014, 49(1): 68-74.

(本文编辑: 金文昱)

作者简介



吴吉忠 博士, 1985年生; 2008年毕业于中国海洋大学勘查技术与工程专业; 2014年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所地震勘探专业(硕博连读), 获博士学位; 目前就职于中国石油冀东油田勘探开发研究院, 主要从事油田地震勘探方法研究。