

DOI:10.11720/wtyht.2014.3.28
郭见乐.基于粘滞性声波方程的吸收补偿方法[J].物探与化探,2014,38(3):577-581.http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.3.28
Guo Jianle.The absorption compensation research based on viscolasti acoustic wave equation[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(3):577-581.http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.3.28

基于粘滞性声波方程的吸收补偿方法

郭 见 乐

(中国石化胜利油田分公司 物探研究院,山东 东营 257000)

摘 要: 通常地层介质都是粘滞性的,由于地层的吸收作用,地震波在向下传播过程中能量被衰减,特别是高频能量的衰减,使反射信号频带宽度变窄。为了补偿被吸收的能量,笔者采用粘滞声波方程波场延拓方法进行能量吸收和衰减补偿。首先,从粘滞性波动方程波场延拓函数理论出发,推导了波场延拓函数稳定性条件;其次,对其有效性进行了测试和分析;最后,通过设计数值模型进行正演模拟对比试验,证明了基于粘滞性声波方程的吸收补偿方法能够很好地对粘性介质吸收衰减进行能量补偿,改善处理效果。

关键词: 粘滞声波方程,能量衰减,吸收补偿,波场延拓

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2014)03-0577-05

在地震勘探中决定地震分辨率的关键取决于所获得反射信号的有效频带宽度,由于地层的吸收作用,信号在向下传播过程中能量被衰减,特别是高频成分的衰减,使反射信号频带宽度变窄。因此,补偿能量的扩散和衰减,提高反射信号的高频能量,拓展地震记录的有效频带宽度,对提高地震分辨率具有重要意义,这是高分辨率勘探技术进一步发展所必须要解决的关键问题之一。

实际地下地层是粘滞性的,地震波在传播过程中,由于不同地层的吸收作用,衰减掉了一部分能量。但是,随着地震勘探技术的发展,要求反射信号具有更高的分辨率和保真度,所以,在进行波场归位时就要充分考虑到能量的补偿。

多年来,关于能量衰减的补偿问题一直都是业界研究的课题。最早的粘滞性补偿方法就是反 Q 滤波,而这种方法考虑的只是一维传播,由于能量的衰减不只是因波场传播所造成的,所以,该方法不能做到能量完全补偿^[1];之后,宋守根^[2]和 Hokstad K^[3] 等人在粘弹性介质中基于克希霍夫积分方程波场重建原理来推导多分辨率波场重建方程,使地震成像具有更高的分辨率;杨午阳等人^[4-5] 也提出了一种在叠前偏移成像中考虑振幅补偿的方法。近几年,何红兵等人^[6] 将品质因子和单程波延拓算子相结合并把弹性波动方程延拓推广到粘滞性介质单程

波动方程波场延拓;由于 Q 值很难估计及粘弹性波动方程偏移技术难以实现的问题,Zhang Yu 等人^[7] 提出了利用 Q -RTM(逆时偏移)方法来进行能量补偿;A.A. Valenciano 等人^[8] 也使用粘滞声波波动方程傅里叶有限差分方法来进行能量补偿。

虽然,研究人员在能量补偿方面做了大量的研究工作,取得了一定的进展,有了一些效果,但也存在一些不足。鉴于地层都是粘滞性介质,为使补偿效果更佳,笔者采用基于粘滞声波波动方程的能量补偿方法,并给出了粘滞性声波方程延拓算子的稳定性条件,数值正演模拟试验证明该方法能有效地对地震波能量在地层中的吸收衰减进行补偿。

1 粘声波动方程波场延拓函数

研究证明地震波的应力和应变关系是线性的,满足波尔茨曼叠加原理。利用波尔茨曼叠加原理,粘滞声波方程可以写成

$$\frac{\partial^2 U(\omega, x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U(\omega, x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U(\omega, x, y, z)}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{M(\omega, x, y, z)/\rho} P(\omega, x, y, z) = 0, \quad (1)$$

其中: U 是频域波场扰动函数, ω 为角频率, ρ 是密度, $M(\omega, x, y, z)$ 是模量,和弹性波的区别在于模量是复数,且与频率有关。

粘滞介质中频率—空间域双程波动方程为

$$\frac{\partial^2 U(z, \omega)}{\partial z^2} + K_c^2 U(z, \omega) = 0, \quad (2)$$

其中: z 为传播距离, K_c 是复波数。因式分解后, 有

$$(\partial/\partial z + iK_c)(\partial/\partial z - iK_c)U(z, \omega) = 0, \quad (3)$$

则下行波方程为

$$(\partial/\partial z + iK_c)U(z, \omega) = 0, \quad (4)$$

上行波方程为

$$(\partial/\partial z - iK_c)U(z, \omega) = 0. \quad (5)$$

对于一维问题, 仅考虑上行波, 则有单程上行波传播的解析解

$$U(z + \Delta z, \omega) = U(z, \omega)e^{iK_c \Delta z}. \quad (6)$$

延拓过程实际上是补偿过程, 单道地震波吸收与衰减补偿隐含上下行波具有相同的路径。可以仅用上行波的波场外推来实现单道的吸收与衰减补偿。另外, 单道补偿不涉及速度的横向变化问题, 因此, 在时间域进行波场外推的单道补偿比较方便, 但要用时间域表示的层速度和品质因子 Q (可以逐层变化)。复波数 $K_c(\omega)$ 可以定义为

$$K_c(\omega) = \omega/v(\omega) = k_\omega - il_\omega, \quad (7)$$

在时间域, 把复波数具体形式代入式(6), 这里, 用 τ 代替 z , $\Delta\tau$ 代替 Δz , 可得

$$U(\tau + \Delta\tau, \omega) = U(\tau, \omega)e^{i(k_\omega - il_\omega)\Delta\tau} = U(\tau, \omega)e^{ik_\omega \Delta\tau} e^{-l_\omega \Delta\tau}, \quad (8)$$

用上式就可实现单道补偿。显然, 前一个指数项控制地震波的传播, 后一个指数项控制地震波振幅随频率的变化。对于下行波的传播, 同样有方程

$$U(\tau + \Delta\tau, \omega) = U(\tau, \omega)e^{-i(k_\omega - il_\omega)\Delta\tau} = U(\tau, \omega)e^{-ik_\omega \Delta\tau} e^{-l_\omega \Delta\tau} \quad (9)$$

来描述。上述两式中取 $l_\omega > 0$ 。

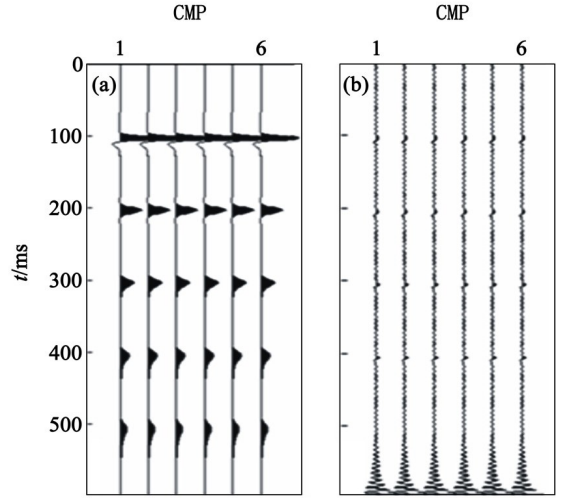
2 波场延拓函数稳定性条件

2.1 稳定性分析

图 1 为吸收衰减正演模拟及补偿, 其中图 1a 是采用主频为 65 Hz 的最小相位 Ricker 子波, 在时间 $t = 100, 200, \dots, 500$ ms 处设计反射界面, 取品质因子 $Q = 20$, 得到疏松介质的吸收衰减正演记录和补偿。对图 1a 中的正演记录进行补偿处理, 结果为图 1b, 表明在 500 ms 以下存在大量人为高频噪声, 致使有效信号受到压制。从图 2 中的频谱分析中可以看出, 直接进行吸收补偿记录的高频谱能量很强, 频谱能量分布不正常。

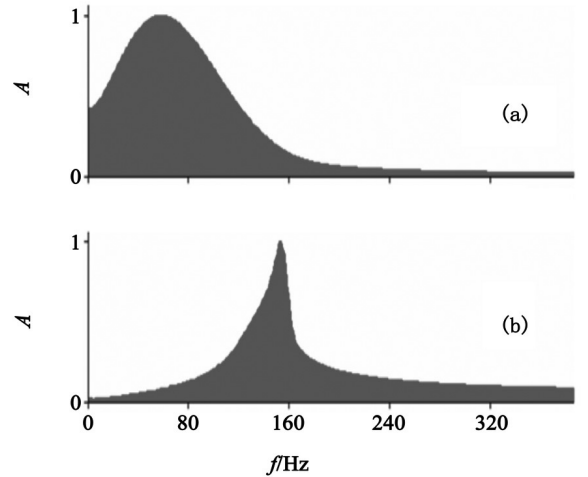
2.2 稳定性条件

研究认为, 在地层内品质因子为常数时, 保持计算稳定^[9]的经验公式为



a—吸收衰减正演记录 ($Q = 20$); b—无特殊处理的吸收补偿记录

图 1 吸收衰减正演模拟及补偿



a—初始子波的频谱; b—直接进行吸收补偿记录的频谱

图 2 频谱分析

$$\Lambda(\omega) = \exp\left(\left|\frac{\omega}{\omega_0}\right|^{-\gamma} \frac{\omega}{2Q} \sum \Delta t\right) \leq e, \quad (10)$$

其中: ω_0 为初始角频率, γ 为半径, e 是指数, Δt 是时间采样, $\Lambda(\omega)$ 为角频率 ω 的振幅补偿因子。

在地震波的正向传播过程中, 经地层吸收后某频率成分的振幅为

$$A_{n\Delta t}(\omega) = A_0(\omega) \prod_{i=0}^{N-1} \exp\left[\left(\left|\frac{\omega}{\omega_0}\right|^{-\gamma} \frac{\omega \Delta t}{2Q_i}\right)^{-1}\right], \quad (11)$$

其中: $A_{n\Delta t}(\omega)$ 是频率为 ω 的地震波传播 $n\Delta t$ 后的振幅, n 为样点数, $A_0(\omega)$ 为其初始振幅, Q_i 为延拓层内的品质因子, N 为地层编号。

地震波在实际传播过程中, 由于近地表疏松介质的吸收作用较强, 则传播一段距离后, 其高频成分几乎衰减为零, 其幅度已经远低于记录的环境噪声水平。若对这部分高频能量进行补偿处理, 必然造

成计算过程的不稳定。为保持计算过程稳定,衰减幅度极大的高频信息就不能按其实际衰减梯度进行

$$\Lambda(\omega)=\begin{cases}\exp\left(\left|\frac{\omega}{\omega_0}\right|^{-\gamma}\frac{\omega\Delta t}{2Q_i}\right),\prod_{i=0}^{N-1}\exp\left[\left(\left|\frac{\omega}{\omega_0}\right|^{-\gamma}\frac{\omega\Delta t}{2Q_i}\right)^{-1}\right]>\varepsilon,\\1,\prod_{i=0}^{N-1}\exp\left[\left(\left|\frac{\omega}{\omega_0}\right|^{-\gamma}\frac{\omega\Delta t}{2Q_i}\right)^{-1}\right]<\varepsilon.\end{cases}$$

(12)

所以,在补偿中,加入上述稳定性条件进行补偿,就能够获得更好的结果。

2.3 有效性测试

图 3 是随频率变化的能量补偿因子曲线立体图,补偿因子曲线在 45 Hz 以下频率成分的补偿因子随时间推移而逐渐增大,超过 80 Hz 以上部分在 120 ms 以后其值基本保持不变。应用式(12)对图 4 中的模拟记录(图 4a)进行相位移法吸收补偿处理,

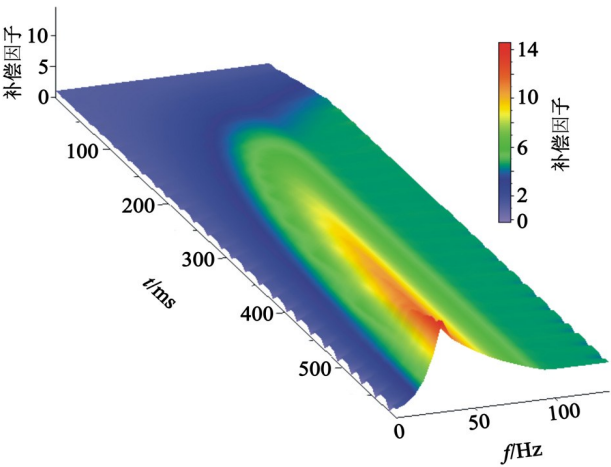
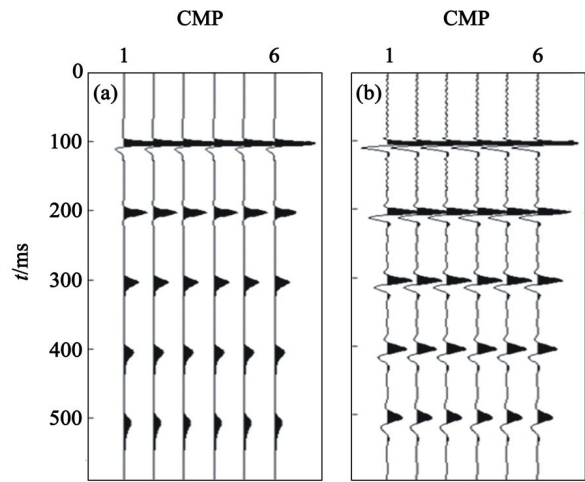


图 3 随频率变化的能量补偿因子曲线立体

补偿。设实际记录中背景噪声能量水平为 ε ,则在每个延拓层内高频补偿的稳定性条件为

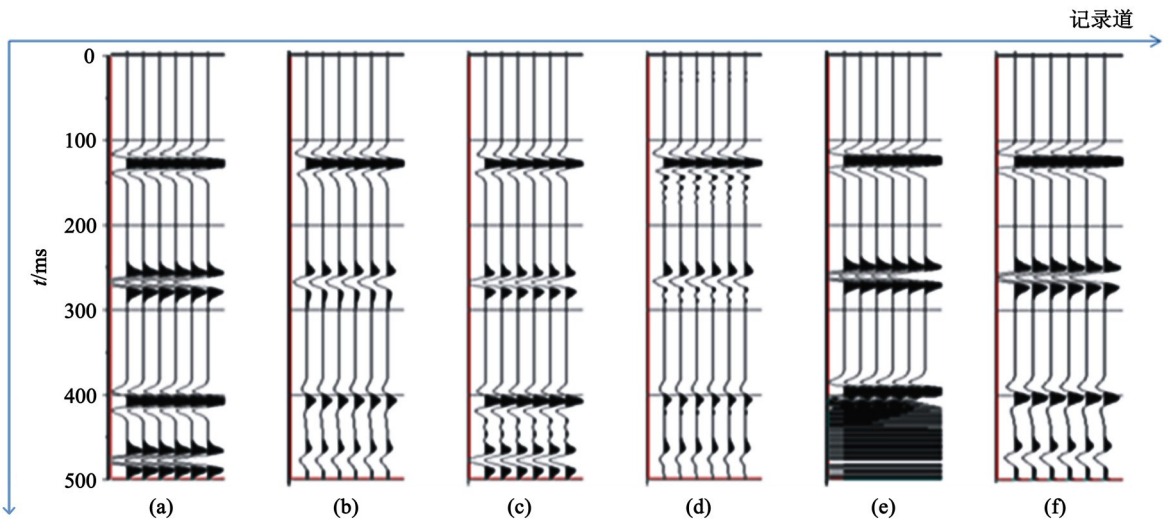
经补偿处理后如图 4b 所示,浅层(100 ms)记录高频成分基本恢复;深层记录高频成分虽未完全恢复,但波形畸变小,可以满足地震处理补偿要求。

图 5 为本文的补偿方法与其他补偿方法的对比分析。由这些结果可以看出,常规预测反褶积结果 Gibbs 效应严重,旁瓣较多;常规反 Q 滤波结果在 Q 值较低时,由于没有考虑稳定性条件而在深层失真,而选用较大的 Q 值时补偿作用又很弱;而利用本文



a—吸收衰减正演模拟记录;b—加稳定性处理的吸收补偿记录

图 4 吸收衰减与加稳定性处理的吸收补偿



a—声波记录;b—粘滞声波记录;c—本文方法补偿结果;d—反褶积结果;e—小 Q 值补偿;f—大 Q 值补偿

图 5 不同补偿方法的结果对比

的方法补偿后所得结果比其他几种方法能够最大限度地恢复损失的高频有效信号。所以,加稳定性的吸收补偿方法可以有效地对粘滞性介质进行吸收衰减补偿处理。

3 数值试验

图 6 为进行正模拟试验所建立的深度速度模型和 Q 模型。声波正演模拟的单炮记录如图 7a 所示。图 7b 和图 7c 分别表示为粘滞声波正演模拟的

单炮记录和对粘滞声波模拟记录补偿后的单炮记录。为了更加清楚地对补偿前后的效果进行分析,这里利用频谱分析技术对图 7 正演结果的远道记录进行显示。如图 8a、图 8b、图 8c 分别表示声波记录、粘滞声波记录和补偿后的粘滞声波记录的远道频谱。从频谱特征分布可以清楚地看出,补偿后的粘滞声波记录远道频谱与声波记录频谱形态很相似,能量随频率的变化比较吻合,说明笔者提出的补偿算法是可靠的。

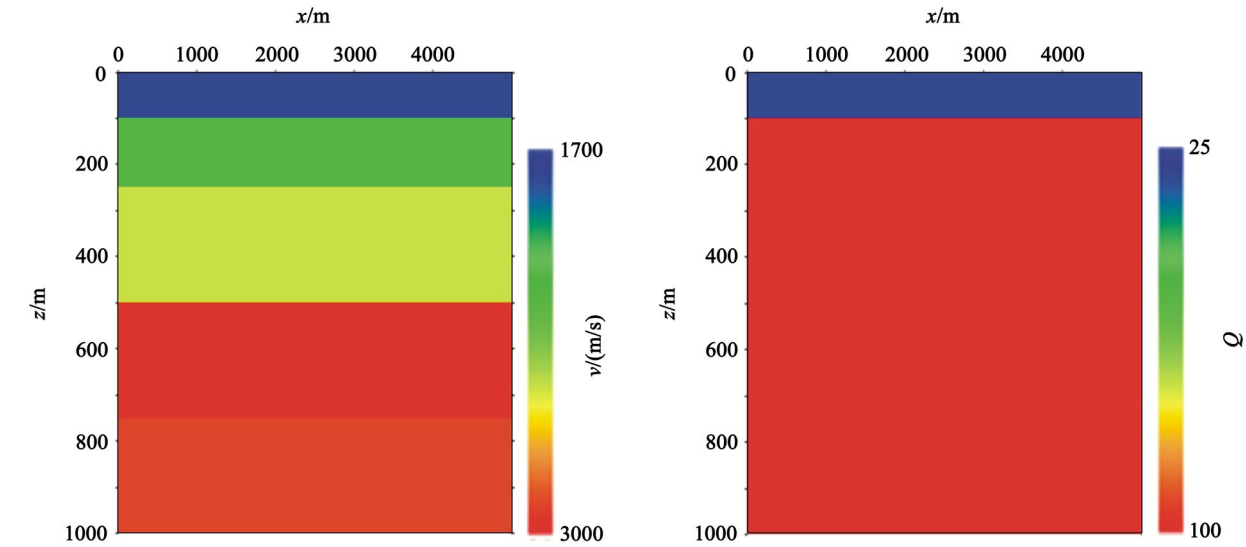
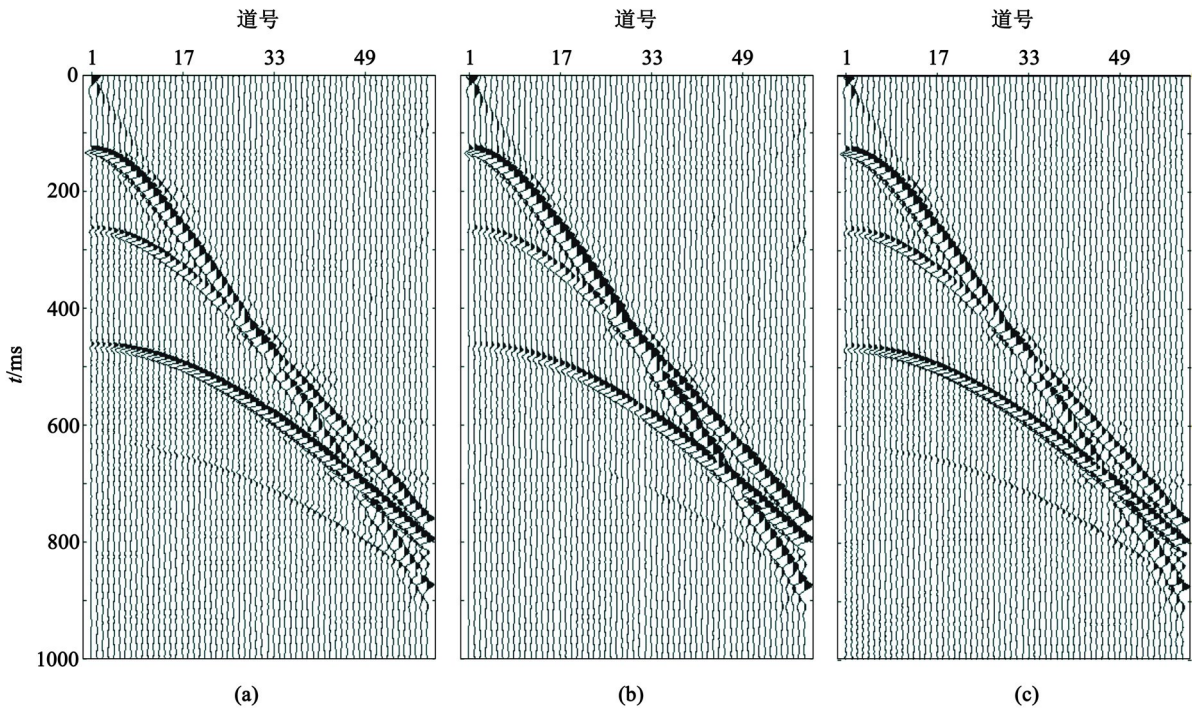
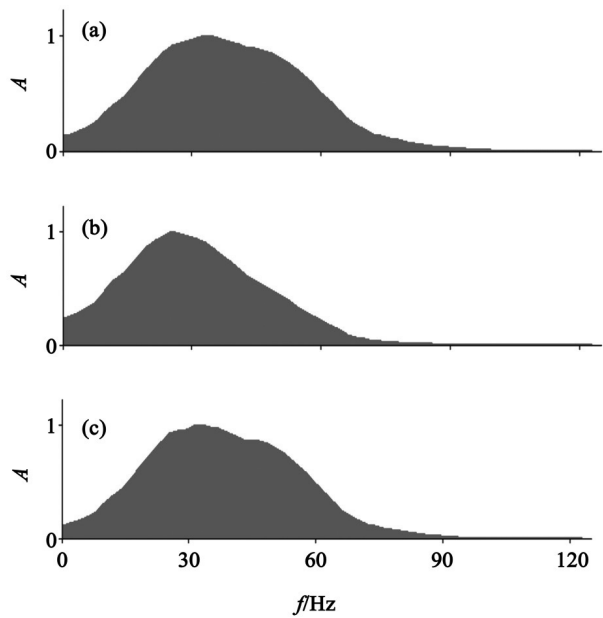


图 6 近地表速度(左)和品质因子 Q 模型(右)



a—声波记录;b—粘滞声波记录;c—补偿后的粘滞声波记录

图 7 正演模拟单炮记录



a—声波记录远道频谱;b—粘滞声波记录远道频谱;c—补偿后的粘滞声波记录远道频谱

图 8 正演记录远道频谱分析

4 结论

实际地层介质都是粘滞性的,因此,为了使补偿效果更能符合实际情况,笔者基于粘滞声波波动方程公式推导了粘滞波动方程波场延拓函数,并给出了补偿稳定性条件。通过正演模拟和频谱分析,验证了该方法的有效性,并得到以下两点认识。

(1)推导出了基于粘滞声波方程介质的波场延拓函数,并给出了基于粘滞声波方程的计算稳定性

条件,从而使得强吸收介质的高频能量补偿成为可能。

(2)采用粘滞声波波动方程的波场延拓方法,能够比较好地补偿了因地层介质粘滞性造成的能量衰减损失。

参考文献:

[1] Zhang Baoqing, Li Guofa, Liang Qi. F-X domain explicit viscous acousitic wave-equation migration[C]//SEG Int'l Exposition and 74th Annual Meeting, 2004.

[2] Song S, Zhang R, Ulrych T J. High-resolution wavefield reconstruction in seismic migration for viscoelastic media[J]. Journal of Seismic Exploration, 2000, 9(1): 1-18.

[3] Hokstad K. Multicomponent Kirchhoff migration[J]. Geophysics, 2000, 65(3): 861-873.

[4] 杨午阳, Houzhu Zhang, 茅金根, 等. F-X 域粘弹性波动方程保幅偏移[J]. 石油物探, 2003, 42(3):

[5] Yang Wuyang, Yang wencai. Society of Exploration Geophysicists (SEG) et al. Preserved amplitude migration with viscoelastic wave equation in frequency-space domain[C]//SEG International Geophysical Conference Expanded Abstracts, 2004: 447-449.

[6] 何红兵, 吴国忱, 梁锴, 等. 粘弹性介质单程波法非零偏移距地震数值模拟与偏移[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(4): 1299-1312.

[7] Zhang Yu, Zhang Po, Zhang Houzhu. Compensating for visco-acoustic effects in reverse-time migration[J]. SEG Expanded Abstracts, 2010, 29(1):

[8] Valenciano A A, Chemingui N, Whitmore D, et al. Wave equation migration with attenuation compensation[C]//SPE/EAGE Conference & Exhibition. 2011: 1-5.

[9] Yanghua Wang. A stable and efficient approach of inverse Q filtering[J]. Geophysics, 2002, 67: 657-663.

The absorption compensation research based on viscolasti acoustic wave equation

Guo Jianle

(Geophysical Research Institute of Shengli Oil Field Branch, Sinopec; Dongying 257000, China)

Abstract: Generally, the layer medium are viscous .Due to absorption affect, seismic wave energy ,especially high- frequency energy be absorbed and attenuated in downward propagation, reflection wave signal frequency bands be narrowed. For compensated those absorbed energy , the paper , adopt viscosity wave equation wave field continuation method, used to carry out energy compensation researching, and obtained better effect . At first , the paper from viscosity wave equation wave field continuation function theory , derived wave field continuation function stability condition ;Secondly,author test the method availability;Finally , through forward simulation test , proved absorption and compensation method based on viscosity wave equation can carry on very well compensation of energy attenuation, improved processing effect.

Key words: viscosity acoustic wave equation;energy attenuation;absorption and compensation;wave field continuation

作者简介: 郭见乐(1965-),男,高级工程师,中国地质大学攻读博士后;1987年毕业于华东石油学院勘探系物探专业,长期从事地球物理勘探的研究和地震资料处理方法及技术研究工作。