

DOI:10.11720/wtyht.2014.3.27
郭恺, 娄婷婷. 双复杂介质条件下的反 Q 滤波偏移延拓算子研究[J]. 物探与化探, 2014, 38(3): 571–576. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.3.27>
Guo Kai, Lou Tingting. A study of inverse Q continuation operator in dual complexity media[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(3): 571–576. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.3.27>

双复杂介质条件下的反 Q 滤波偏移延拓算子研究

郭恺¹, 娄婷婷²

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油物探技术研究院, 江苏 南京 211103; 2. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 青岛 266555)

摘 要: 地下介质的非弹性吸收衰减效应造成地震资料中深层信号频带窄、能量弱、成像困难, 因此需要对地层的非弹性吸收衰减进行补偿。在已有的补偿方法基础上, 基于单程波方程, 采用与品质因子和频率相关的复速度代替介质真实速度, 将粘滞传播算子在频率—空间域采用连分式展开, 得到相移项和补偿项, 针对连分式的误差, 在频率—波数域进行补偿校正, 并用逐步累加法解决起伏地表问题。该方法提高了成像精度, 有效补偿了由于地层非弹性吸收造成的振幅和频率损失。模型试算和实际资料处理表明, 该方法具有一定的适应性和实用性。

关键词: 非弹性吸收; 品质因子; 复速度; 双复杂介质; 反 Q 滤波偏移

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2014)03-0571-06

随着地震勘探的不断深入, 勘探目标越来越深、勘探环境越来越复杂, 造成常规手段成像质量差、精度低, 同时受人工震源能量有限和介质的非弹性吸收衰减效应的影响, 地震勘探的有效深度受到了很大限制^[1-5]。常规手段是在偏移成像前应用静校正技术处理复杂地表问题, 应用反 Q 滤波方法补偿非弹性吸收衰减, 这两种方法都是在偏移成像之前单独进行的, 没有考虑波的传播路径和传播效应, 而地表问题和非弹性吸收衰减都跟波路径密切相关^[6-12], 因此, 这两种方法无法得到准确的结果。

Reshef^[1] 提出了“逐步—累加”的概念, Beasley^[13-14] 提出“零速度层”的概念, Yilmaz^[15-16] 提出了“叠前层替代”的概念, 何英等^[17-18] 提出了“波场上延”的概念。Dia 和 West 等^[5] 推导出了纵波波动方程反 Q 偏移算法。Wang^[4] 提出了一种稳定的反 Q 滤波偏移算法。Mittet 等^[2, 16-17] 推导了基于粘滞标量方程和粘滞声波方程的有限差分外推方法。杨午阳^[3] 实现了二维 F-X 域粘弹性波动方程振幅补偿偏移算法。在已有的理论基础上, 基于单程波方程, 采用与品质因子和频率相关的复速度代替介质真实速度, 分别在频率—空间域得到波场延拓算子,

在频率—波数域得到误差补偿算子, 实现了双复杂介质条件下的反 Q 滤波叠前深度偏移。模型试算和实际资料处理表明, 该方法能够有效地补偿地层非弹性吸收造成的能量衰减和频率损失, 具有一定的实用性。

1 方法原理

1.1 反 Q 滤波算子

声波介质中二维单程波波动方程的下行波方程为^[15-16]

$$\frac{\partial p_D}{\partial z} = i \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} p_D,$$

(1)

式中: p_D 为下行波场; ω 为频率; v 为介质速度; x 为横向距离; z 为纵向深度。

根据 Wang 的理论, 要想描述粘声介质的地层吸收效应, 则需把实际速度替换为与品质因子和频率有关的复速度, 设其倒数为 T , 满足公式

$$T = \frac{1}{\bar{c}} = \left(1 - \frac{i}{2Q}\right) \frac{1}{v} \left(\frac{\omega}{\omega_k}\right)^{-\gamma},$$

(2)

式中: $\bar{c}$ 为复速度, ω_k 为参考频率, Q 为地层品质因

子, $\gamma = \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{1}{2Q}\right) \approx \frac{1}{\pi Q}$ 。

将式(2)代入式(1),得

$$\frac{\partial p_D}{\partial z} = i \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} p_D = \frac{i\omega}{c} \sqrt{1 + \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} p_D \quad (3)$$

上式用连分式展开得

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_D}{\partial z} = i \frac{\omega}{c} & \left(1 + \frac{a \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}{1 + b \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} \right) p_D = \\ & i \frac{\omega}{c} p_D + i \frac{\omega}{c} \frac{a \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}{1 + b \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} p_D, \end{aligned} \quad (4)$$

第 1 部分 第 2 部分

再分为两步求解,第 1 部分的解为

$$\begin{aligned} p_D(x, z + \Delta z, \omega) &= p_D(x, z, \omega) \times \\ \exp \left[i \frac{\omega \Delta z}{v} \left(\frac{\omega}{\omega_k} \right)^{-\gamma} \right] &\exp \left[i \frac{\omega \Delta z}{v} \left(\frac{\omega}{\omega_k} \right)^{-\gamma} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

第 1 项 第 2 项

式中:第 1 项是相移项,用来校正频散效应,第 2 项是振幅补偿项,用来补偿地层吸收效应。

第 2 部分有限差分项的解为

$$[I - (\alpha + \beta_1) T_x] p_D^{m+1} = [I - (\alpha + \beta_2) T_x] p_D^m, \quad (6)$$

式中: $\beta_1 = \frac{b}{\omega^2 \Delta x^2 T^2} - i \frac{\alpha \Delta z}{2\omega \Delta x^2 T}$, $\beta_2 = \frac{b}{\omega^2 \Delta x^2 T^2} + i \frac{\alpha \Delta z}{2\omega \Delta x^2 T}$, $\alpha = \frac{1}{6}$,其中 a 和 b 的值由表 1 确定。对于上行波,延拓算子是相同的,只需改变 i 前的符号即可。

表 1 最优化连分式系数

阶数	最大优化角	a	b
2	45	0.5	0.25
2	65	0.478240600	0.376369527
5	80	0.040315157	0.873981642
		0.457289566	0.222691983
6	87	0.004210420	0.972926132
		0.081312882	0.744418059
		0.414236605	0.150843924
		0.000523275	0.994065088
8	89	0.014853510	0.919432661
		0.117592008	0.614520676
		0.367013245	0.105756624
		0.000153427	0.997370236
10	90	0.004172967	0.964827922
		0.033860918	0.824918565
		0.143798076	0.483340757
		0.318013812	0.073588213

1.2 误差补偿算子

以下行波的二维情况为例,不作任何近似展开时的波场延拓算子:

$$\frac{\partial p_D}{\partial z} = i \frac{\omega}{c} \sqrt{1 + \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} p_D, \quad (7)$$

连分式展开后的波场延拓算子:

$$\frac{\partial p_D}{\partial z} = i \frac{\omega}{c} \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}{1 + b_i \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} \right) p_D, \quad (8)$$

原根式与连分式之差即为有限差分算子的误差:

$$Q = \sqrt{1 + \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} - \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}{1 + b_i \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} \right), \quad (9)$$

这里采用上式的低阶方程($n=1$),则误差表示为

$$Q = \sqrt{1 + \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} - \left(1 + \frac{a \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}{1 + b \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} \right), \quad (10)$$

将上式转换为频率—波数域形式

$$\tilde{Q} = \sqrt{1 - \frac{c^2}{\omega^2} k_x^2} - \left(1 - \frac{a \frac{c^2}{\omega^2} k_x^2}{1 - b \frac{c^2}{\omega^2} k_x^2} \right). \quad (11)$$

综上,带误差补偿的频率—空间域波场延拓算子为

$$\frac{\partial p_D}{\partial z} = i \frac{\omega}{c} \left(\sqrt{1 + \frac{c^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} + Q \right) p_D, \quad (12)$$

其中补偿部分在频率—波数域中实现

$$\tilde{p}_D(k_x, z + \Delta z, \omega) = e^{iQ\Delta z} \tilde{p}_D(k_x, z, \omega), \quad (13)$$

对于上行波,误差补偿是相同的,只需改变 i 前的符号即可。

1.3 起伏地表延拓算子

起伏地表下的频率—波数域深度外推算子为

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{out}(k_x, z + \Delta z, \omega) &= \\ e^{-ik_x \Delta z} &[\tilde{p}(k_x, z, \omega) + \tilde{p}_{in}(k_x, z, \omega)], \end{aligned} \quad (14)$$

上式表示在某一深度的总波场等于原向下延拓的波场和新加入的波场之和,其中 $\tilde{p}_{in}$ 项是在这一深度处新加入的波场值,在起伏地表以上的部分,该波场值等于零,在延拓到地表以下时,该波场值不为零。

2 模型试算

对加拿大逆掩断层起伏地表模型进行试算,图 1 是速度场模型,图 2 是起伏地表高程,模型正演采

用右边放炮模式,总计 240 炮,每炮 96 道,每道 750 个采样点,时间采样率为 4 ms,记录长度为 6 s,道间距为 25 m,CDP 间距为 25 m,深度采样间隔为 4 m,最大深度为 3 000 m。根据速度场采用李氏经验公式计算相应的品质因子 Q 值,品质因子 Q 的分布场见图 3。

从常规波动方程叠前深度偏移结果(图 4)与反 Q 滤波叠前深度偏移结果(图 5)对比可以看出,两者都可以很好地处理起伏地表,此外,由于地层吸收衰减效应,有效波能量随着深度的增加逐渐减少,常规偏移无法对其进行有效补偿,造成中深层同相轴模糊、振幅不一致等现象,反 Q 滤波偏移能够根据地下 Q 值分布,结合深度信息对有效能量进行地层吸收衰减补偿。由图中箭头处可以看出,经补偿后,同相轴更加连续清晰,恢复到真实形态,同时剖面相对振幅值恢复一致。对比两者的频谱图(图 6 和图 7)可以看出,经补偿后,带宽由原先的 48 Hz 变为了

56 Hz,主频提高了 5 Hz,说明反 Q 滤波偏移能够拓宽频带、提高主频,补偿了有效能量的频率信息。

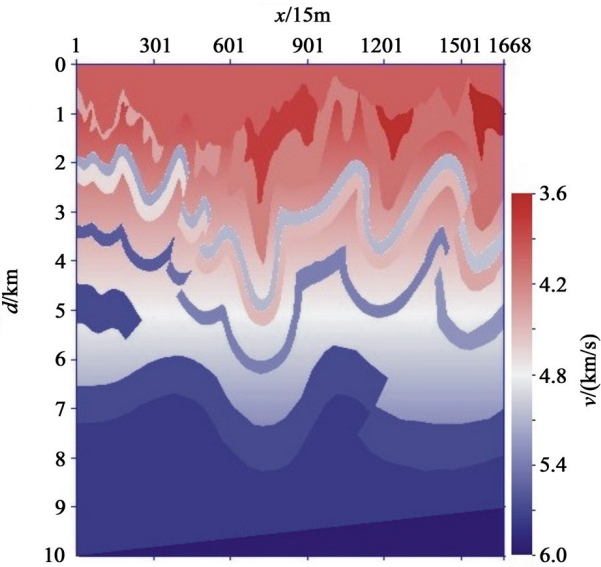


图 1 起伏地表速度场模型

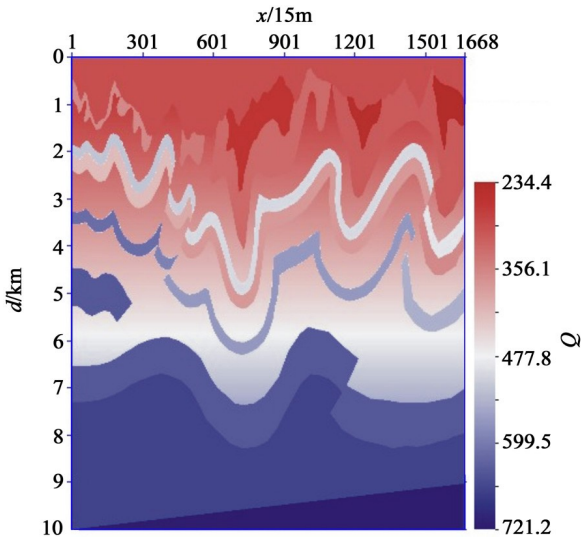


图 3 起伏地表 Q 模型

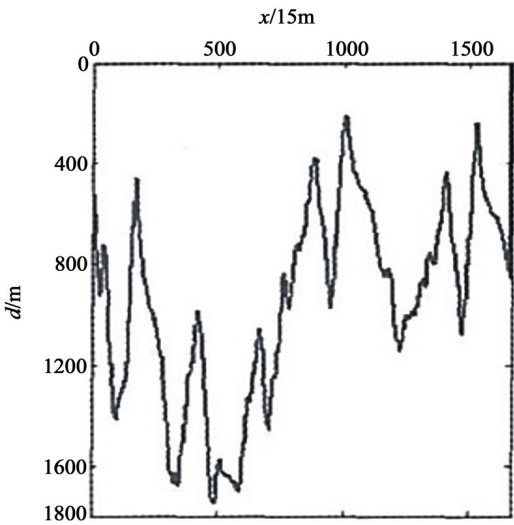


图 2 起伏地表高程

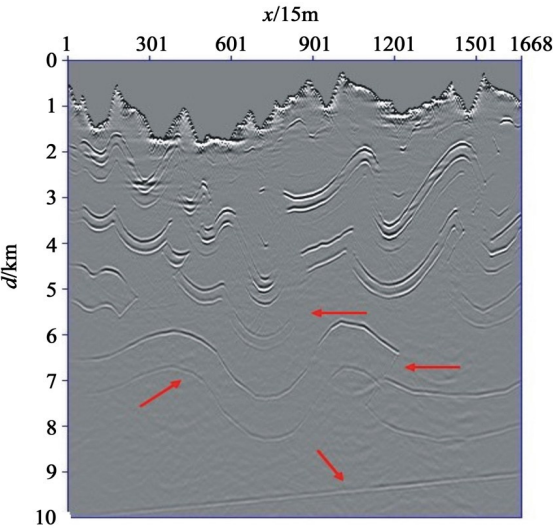


图 4 带误差补偿的常规偏移结果

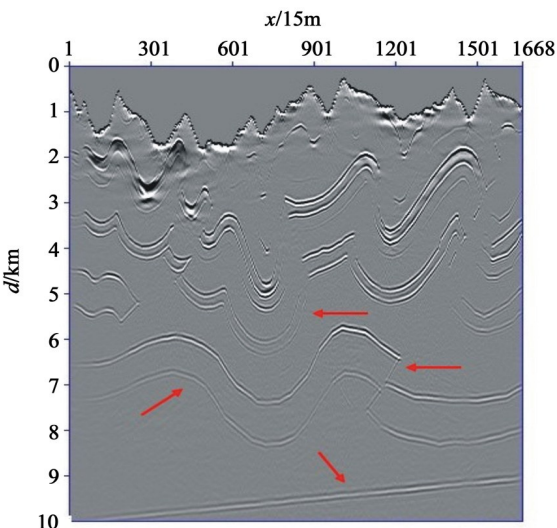


图 5 带误差补偿的反 Q 滤波偏移结果

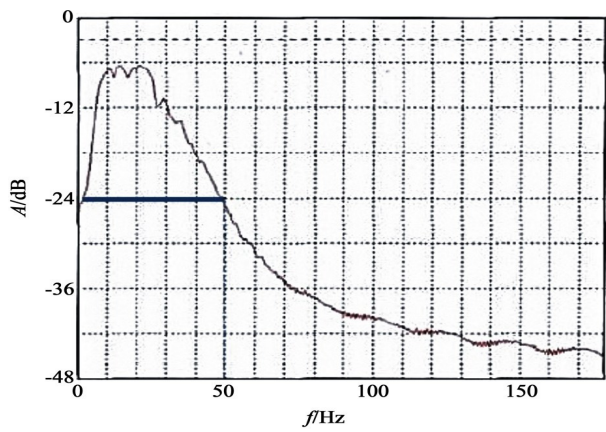


图 6 常规波动方程偏移频谱

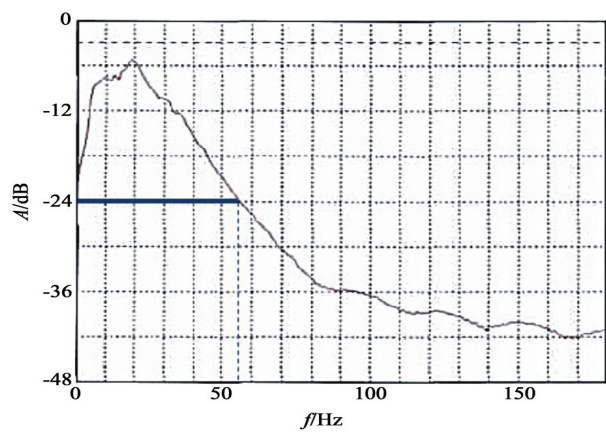


图 7 反 Q 滤波偏移频谱

3 实际资料处理

对某探区实际资料进行偏移处理,以验证上述方法的适应性和实用性。该探区共 24×190 接收道,道间距为 50 m,线间距为 150 m,炮点距为 50

m,炮线距为 250 m,228 次覆盖,面元网格为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 。图 8a 为常规波动方程叠前深度偏移结果,图 8b 为反 Q 滤波叠前深度偏移结果。从两图箭头标识处可看出,反 Q 滤波偏移后同相轴更清晰连续,有效能量得到了很好的补偿。从频谱图(图 9)中可

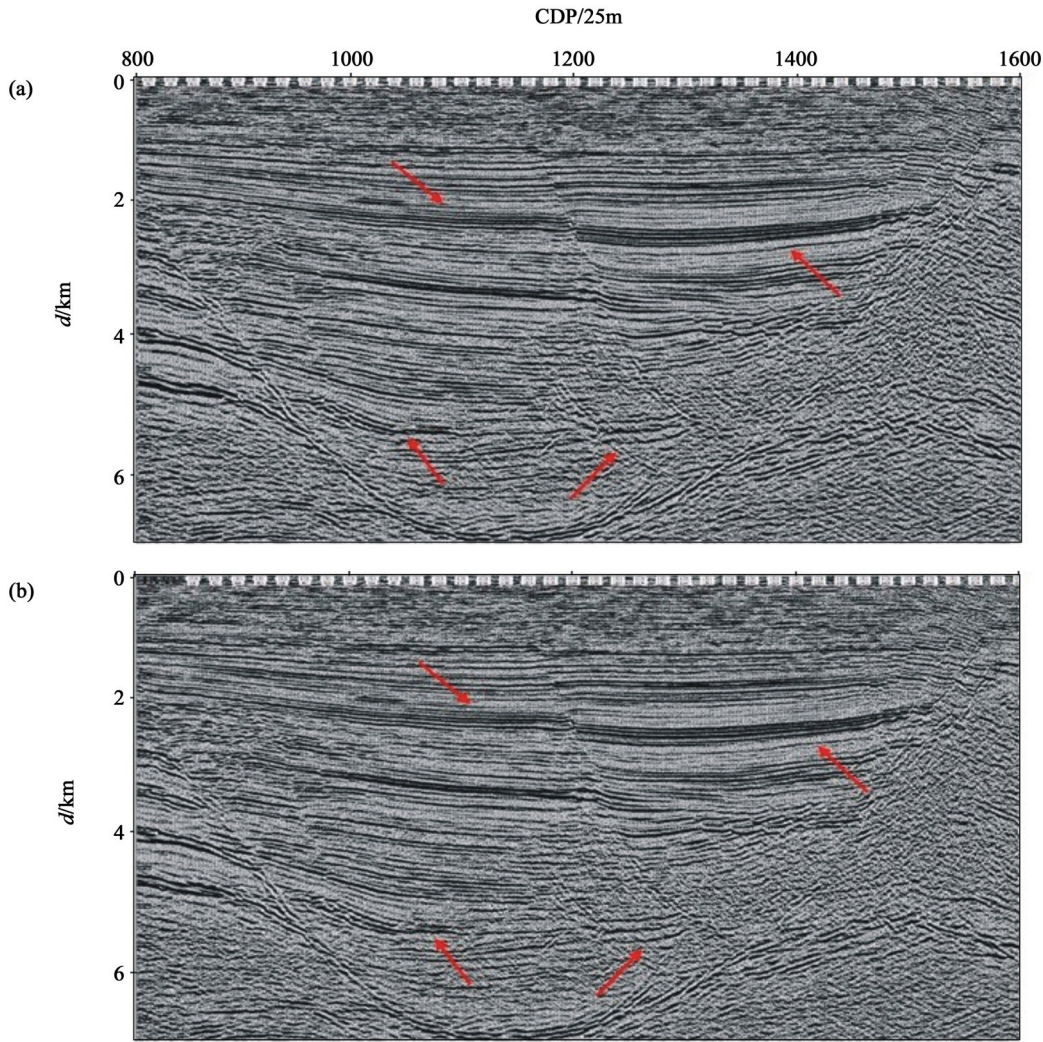


图 8 常规波动方程偏移(a)与反 Q 滤波偏移(b)结果对比

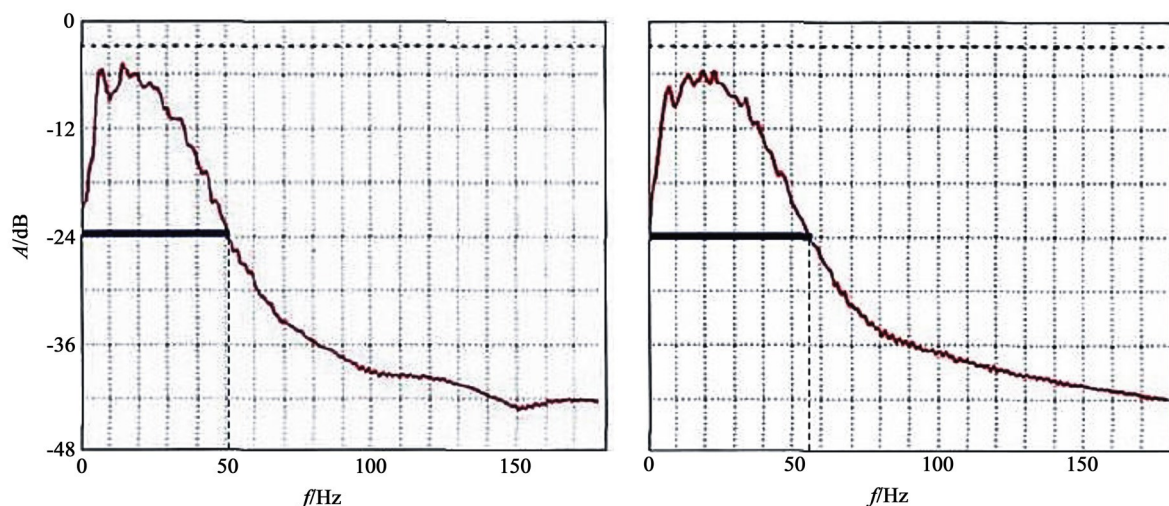


图 9 常规波动方程偏移频谱(左)与反 Q 滤波偏移频谱(右)结果对比

以看出,经反 Q 滤波偏移后主频升高 6 Hz、频带由 50 Hz 变为 57 Hz,频率信息得到了有效补偿,该偏移结果能够为后续 AVO—AVA 分析和反演等提供准确有效的数据。实际资料处理结果表明该方法可以适应复杂的实际资料,有一定的实用性。

4 结论

波动方程叠前深度偏移是复杂介质构造成像的最有效的手段,既可以适应速度场的剧烈变化,又可以保证对陡倾角地层的成像效果。常规波动方程叠前深度偏移没有考虑地层非弹性吸收的效应,偏移结果的振幅和频率不保真,只能在叠前预处理中的单道上进行反 Q 滤波。但是这种方法得到的补偿结果往往不准确,只有在偏移过程中实现地层的非弹性吸收衰减补偿才符合地层吸收的过程,具有更明确的物理意义。笔者在单程波波动方程的基础上实现了带误差补偿的叠前深度反 Q 滤波偏移,有效地补偿了由于地层非弹性吸收造成的振幅和频率损失。通过模型试算和实际资料处理表明,该方法的理论正确可靠,效果明显,针对实际资料有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 李振春. 地震成像理论与方法[M]. 东营:石油大学出版社, 2007:179-198.
- [2] Varela C L, Rosa A L R, Ulrych J. Modeling of attenuation and dispersion[J]. Geophysics, 1993, 58(8): 1167-1173.
- [3] 杨午阳. 粘弹性波动方程保幅偏移技术研究[D]. 中国地质科学院, 2004.
- [4] Wang Y H. Inverse-Q filter migration[J]. Geophysics, 2008, 73

- (1):1-6.
- [5] Dai N X, Gordon F W. Inverse Q migration[C]//Los Angeles: 64th Annual International Meeting, SEG, 1994. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1822799>.
- [6] 罗银河, 刘江平, 俞国柱. 叠前深度偏移述评[J]. 物探与化探, 2004, 28(6): 540-545.
- [7] Wang Y H. A stable and efficient approach of inverse Q filtering[J]. Geophysics, 2002, 67(2): 657-663.
- [8] 张立彬, 王华忠. 稳定的反 Q 偏移方法研究[J]. 石油物探, 2010, 49(2): 115-120.
- [9] 叶景艳, 姚亚琳, 王燕群. 偏移速度分析与偏移成像[J]. 物探与化探, 2009, 33(6): 674-677.
- [10] 马婷, 周学明. 两种不同求和路径的叠前时间偏移方法[J]. 物探与化探, 2012, 36(2): 321-324.
- [11] 黄元溢, 罗仁泽, 王进海. 几种叠前深度偏移技术效果的对比[J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 798-803.
- [12] 周学明, 李庆春, 马婷. 弹性波叠前逆时偏移[J]. 物探与化探, 2013, 37(2): 274-279.
- [13] Flor A V, reynam C. Pestana. True-amplitude one-way wave equation migration in the mixed domain[J]. Geophysics. 2010, 75(5): 199-209.
- [14] Ye Y M, Li Z C. Preserved amplitude migration based on the one way wave equation in the angle domain[J]. Applied Geophysics, 2009, 6(1): 50-58.
- [15] 张关泉. 波动方程的上行波和下行波的耦合方程组[J]. 应用数学报, 1993, 16(2): 251-263.
- [16] 张宇. 振幅保真的单程波方程偏移理论[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1410-1430.
- [17] Zhang Y, Zhang G Q. Theory of true-amplitude one-way wave equations and true-amplitude common-shot migration[J]. Geophysics, 2005, 70(4): 1-10.
- [18] 刘定进, 印兴耀. 傅里叶有限差分法保幅叠前深度偏移方法[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 268-276.

A study of inverse Q continuation operator in dual complexity media

Guo Kai¹, Lou Tingting²

(1. Sinopec Geophysical Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. College of Earth Resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: Inelastic attenuation characteristics of the layers cause the narrowness of middle and deep signal band, weakness of energy, and difficulty of imaging. It is therefore necessary to compensate the inelastic attenuation of the layers. Based on one-way wave equation, the authors use the complex velocity including quality factor and frequency substitutes for real velocity. Then through expansion viscous continuation operators using continued fraction in F-X domain, the authors obtain phase and compensate term, correct the error caused by continued fraction in F-K domain, and use gradually accumulate method to solve the irregular surface problem. This method could improve the imaging accuracy and compensate the amplitude and frequency attenuation effectively. Model trial and real data processing show that this method has certain adaptability and practicability.

Key words: inelastic attenuation; quality factor; complex velocity; dual-complexity media; inverse Q migration

作者简介: 郭恺(1985-),男,工程师,现主要从事各向异性逆时偏移研究工作。