

文章编号: 1671-8585(2007)03-0200-07

小波变换在合成道与井旁道对比中的应用

刘 斌¹, 李振春¹, 韩文功²

(1. 中国石油大学地球资源与信息学院, 山东东营 257061; 2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司, 山东东营 257000)

摘要: 针对地震与测井资料在时间、相位、频率和振幅等方面的差异, 采用小波变换的 Mallat 算法对测井资料进行重采样, 并把制作的合成地震道与井旁地震道进行多尺度分解, 然后采用最小平方算法求取不同尺度空间的匹配滤波因子, 再利用最小熵滤波方法来校正这些滤波因子, 最终重构合成道信号。通过迭代计算, 达到与井旁地震道的对比。实际资料的试处理验证了所用方法和算法的有效性。

关键词: 合成地震道; 井旁地震道; 匹配; 对比; Mallat 算法; 最小平方方法; 最小熵滤波

中图分类号: P631.445

文献标识码: A

随着地震勘探的不断深入和各项技术的不断完善, 现在已经由以前只依赖于某单一资料阶段逐渐过渡到多种资料的联合处理解释阶段, 而地震资料与测井数据之间的匹配对比问题已成为地震岩性解释、油藏描述、储层反演以及储层监测综合过程中的主要问题。测井的纵向分辨率很高, 而在横向上探测范围却很小; 地震在横向上可连续追踪地层信息, 但其垂向分辨率却受到记录频带的限制而远远低于测井信息。测井和地震所提供的信息在横向上和纵向上都不匹配, 因此不能直接用于对比, 故需先解决地震和测井资料的匹配问题^[1~3]。本文采用的多尺度分析可以在一定范围内校正地震与测井在时间、相位、频率和振幅等方面的差异。

1 方法原理

1.1 Mallat 算法

1988 年, Mallat 在构造正交小波基时提出了多分辨率分析, 将此之前的所有正交小波基的构造统一起来, 并为此后的构造设定了框架。在这一框架下, Mallat 给出了信号和图像分解为不同频率通道的算法及其重构算法, 即所谓的 Mallat 算法, 其简洁的数学形式如下。

1) 分解算法。

$$\begin{cases} C_{m+1} = HC_m \\ D_{m+1} = GC_m \end{cases} \quad (1)$$

其塔式分解过程可表示为

$$C_m \begin{matrix} \nearrow D_{m+1} \\ \longrightarrow C_{m+1} \end{matrix} \begin{matrix} \nearrow D_{m+2} \\ \longrightarrow C_{m+2} \end{matrix} \begin{matrix} \nearrow \dots \\ \longrightarrow \dots \end{matrix} \begin{matrix} \nearrow D_{m+k} \\ \longrightarrow C_{m+k} \end{matrix} \quad (2)$$

2) 重构算法。

$$C_m = H^* C_{m+1} + G^* D_{m+1} \quad (3)$$

其塔式重构过程可表示为

$$\begin{matrix} D_{m+k} & \searrow & D_{m+k-1} & \searrow & \dots & \searrow & D_{m+k} & \searrow & C_m \\ C_{m+k} & \longrightarrow & C_{m+k-1} & \longrightarrow & \dots & \longrightarrow & C_{m+k} & \longrightarrow & C_m \end{matrix} \quad (4)$$

式中: H^* 和 G^* 分别是 H 和 G 的共轭转置矩阵; C_m 和 D_m 分别为 2^{-m} 分辨率下的离散逼近和离散细节。若把 C_0 定义为待分解的数字信号 f , 则根据式(1)和式(3)可分别实现信号 f 的多分辨分解及其重构, 且 C_m 可理解为信号 f 的相对低频成分, 即多分辨分解后的粗框部分; D_m 可理解为信号 f 的相对高频成分, 即多分辨分解后的细节部分^[4~6]。Mallat 算法应用到地震资料处理时, 通常是根据问题的需要, 对细节部分进行分析、加工处理及依式(3)重构, 以达到对实际地震记录进行处理的目的。

1.2 最小平方(LS)法计算匹配滤波因子

设合成地震道与井旁地震道分别表示为

$$\begin{aligned} X_i &= [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}]^T \\ Y_i &= [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iM}]^T \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

式中: i 为地震道道号; M 为最大采样点数。

把 X_i 和 Y_i 组合成新的矢量

$$\begin{aligned} X &= [X_1, X_2, \dots, X_N]^T \\ Y &= [Y_1, Y_2, \dots, Y_N]^T \end{aligned}$$

收稿日期: 2006-11-06; 改回日期: 2006-12-26。

第一作者简介: 刘斌(1978—), 男, 中国石油大学(华东)地球物理系, 在读硕士, 主要从事地球物理资料联合反演与综合解释理论与方法的研究工作。

基金项目: 国家自然科学基金(40474041)、国家 863 专题(2006AA06Z206)、CNPC 中青年创新基金(04E7040)、中原油田、江苏油田博士后科研工作站和 CNPC 物探重点实验室中国石油大学(华东)研究室资助。

利用小波分析中的 Mallat 算法分别对 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 作多分辨率分解,则可获得不同尺度空间各自的粗框和细节部分,即

$$\mathbf{X} = C_N \mathbf{X} + \sum_{m=M}^N D_m \mathbf{X}$$

$$\mathbf{Y} = C_N \mathbf{Y} + \sum_{m=M}^N D_m \mathbf{Y}$$

$M < N \in \mathbf{Z}$, \mathbf{Z} 为整数集

当分辨率为 2^{-m+1} 时,各自对应的细节部分分别为 $D_m \mathbf{X}$ 和 $D_m \mathbf{Y}$,粗框部分分别为 $C_N \mathbf{X}$ 和 $C_N \mathbf{Y}$,现存在一个匹配滤波算子 P 使得目标泛函 $E = \|\mathbf{Y} - P\mathbf{X}\|$ 极小^[7],这样就可以通过极小化泛函组

$$E_{i,j} = \|Y_{i,j} - P_{i,j} X_{i,j}\| \quad (5)$$

得到一算子族 $\{P_{i,j}\}$ 构成的算子 $P = \{P_{i,j}\}$ 。

这里为简便起见,我们用 $Y_{i,j}$ 代替 $D_m \mathbf{Y}$,用 $X_{i,j}$ 代替 $D_m \mathbf{X}$,其中 $\{P_{i,j}\}$ 为细节部分匹配滤波器。为求上式极小,考虑到离散化处理,求一长度为 L 的匹配滤波器 $\{P(m)\}$, $m=1, 2, \dots, L$,使得

$$E = \sum_k [Y(k) - \sum P(m)X(k-m)]^2 \quad (6)$$

为极小。计算泛函 E 关于 $P(n)$ 的 Frechet 导数 $\frac{\partial E}{\partial P(n)}$, $n=1, 2, \dots, L$ 。令 $\frac{\partial E}{\partial P(n)}=0$,则有

$$\sum_k [Y(k) - \sum P(m)X(k-m)] \cdot [-X(k-n)] = 0 \quad n=1, 2, \dots, L \quad (7)$$

化简得

$$\sum_k Y(k)X(k-n) - \sum_k \left[\sum_m P(m)X(k-m)X(k-n) \right] = 0 \quad n=1, 2, \dots, L \quad (8)$$

因此,得到关于求解匹配滤波器 $\{P(m)\}$ 的 L 个方程的方程组

$$\sum_m P(m) \left[\sum_k X(k-m)X(k-n) \right] = \sum_k Y(k)X(k-n) \quad n=1, 2, \dots, L \quad (9)$$

求解方程组得到 $\{P(m)\}$,这样就可以用来匹配合成地震道与井旁地震道的细节部分。

同理,可依次求取不同分辨率下对应的匹配滤波器。

1.3 最小熵滤波校正匹配滤波因子

利用最小熵滤波可以消除信号的无序性,使熵达到最小,突出信号的尖峰值,使用这种方法的目的使我们所关心的同相轴更加清晰,更容易对比,进而实现匹配。所以在上述工作的基础之上,

用最小熵滤波来校正匹配滤波因子,然后用校正过的匹配滤波因子采用前面介绍的小波变换方法重构地震道。

若匹配滤波因子为 $p_k (k=1, 2, \dots, M)$,滤波器的输出为 h_{ij} ,则

$$h_{ij} = \sum_k p_k x_{i,j-k} \quad j=1, 2, \dots, M \quad (10)$$

随着输出 h_{ij} 中尖峰的减少,结果就会变得越来越简单,Wiggins^[8]制定了一个判断简化程度的标准 Γ

$$\Gamma = \sum_i \Gamma_i$$

$$\Gamma_i = \sum_j h_{ij}^4 / \left(\sum_j h_{ij}^2 \right)^2 \quad (11)$$

改变滤波因子 p_k ,求出 Γ 的最大值,就可以得到最小熵滤波器。

用下面求解方法^[9~11]可以得到 M 个方程

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial p_k} = 0 = \sum_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial p_k} =$$

$$\sum_i \left[4 \sum_j h_{ij}^3 / \left(\sum_j h_{ij}^2 \right)^2 - 4 \left(\sum_j h_{ij}^4 \right) \left(\sum_j h_{ij} \right) / \left(\sum_j h_{ij}^2 \right)^3 \right] \frac{\partial h_{ij}}{\partial p_k} \quad (12)$$

令 $u_i = \sum_j h_{ij}^2 = n \times$ (第 i 个输出的方差) (因为 $(h_{ij})_{av} \approx 0$)

$$\sum_i (u_i^{-2} \sum_j h_{ij}^3 - u_i^{-1} \Gamma_i \sum_j h_{ij}) x_{i,j-k} = 0 \quad (13)$$

因此,利用方程(10)可以求出

$$\sum_i \left[u_i^{-1} \Gamma_i \sum_j \left(\sum_l p_l x_{i,j-l} x_{i,j-k} \right) \right] = \sum_i \left(u_i^{-2} \sum_j h_{ij}^3 x_{i,j-k} \right) \quad (14)$$

交换等式左边的求和顺序

$$\sum_l p_l \left[\sum_i u_i^{-1} \Gamma_i \left(\sum_j x_{i,j-l} x_{i,j-k} \right) \right] = \sum_i \left(u_i^{-2} \sum_j h_{ij}^3 x_{i,j-k} \right) \quad k=1, 2, \dots, N \quad (15)$$

在式(15)中,滤波因子包含在 u_i , Γ_i , h_{ij} 中,所以可以直接求解这个方程组以获得滤波器,进而校正匹配滤波因子。

2 应用实例

合成地震记录来自测井资料,其纵向分辨率远高于地震资料的分辨率,而地震资料横向的连续性显示了它在面上的优势。综合 2 种资料各自的优点,消除两者在尺度、频率、相位和振幅上的差

异^[12],以实现2种资料的匹配对比。

首先,我们要对反射系数进行重采样^[13,14],采用小波变换法,其效果在参考文献[14]中已有论述,这里不再赘述。

本文利用小波变换法对某实际资料进行了分析处理,其过程为:对由小波变换重采样的反射系数制作合成地震记录^[15],然后利用小波变换的多尺度特性对合成地震记录与井旁地震记录进行多尺度分解^[16,17],并对其分解出来的不同频率成分采用最小平方算法迭代求取不同尺度空间的匹配

滤波因子,再利用最小熵滤波方法来校正这些滤波因子,并将校正过的各匹配滤波因子分别应用于小波分解后的合成地震记录,最后重构合成地震信号,以达到与井旁地震道的匹配对比^[18~21]。

为了说明本文采用的小波变换匹配方法的有效性,我们给出了图1、图2和图3。图1为未经匹配的合成道与地震道剖面。图2是用常规方法实现合成地震道与井旁地震道匹配的剖面。图3是用小波变换法实现合成地震道与井旁地震道匹配的剖面。

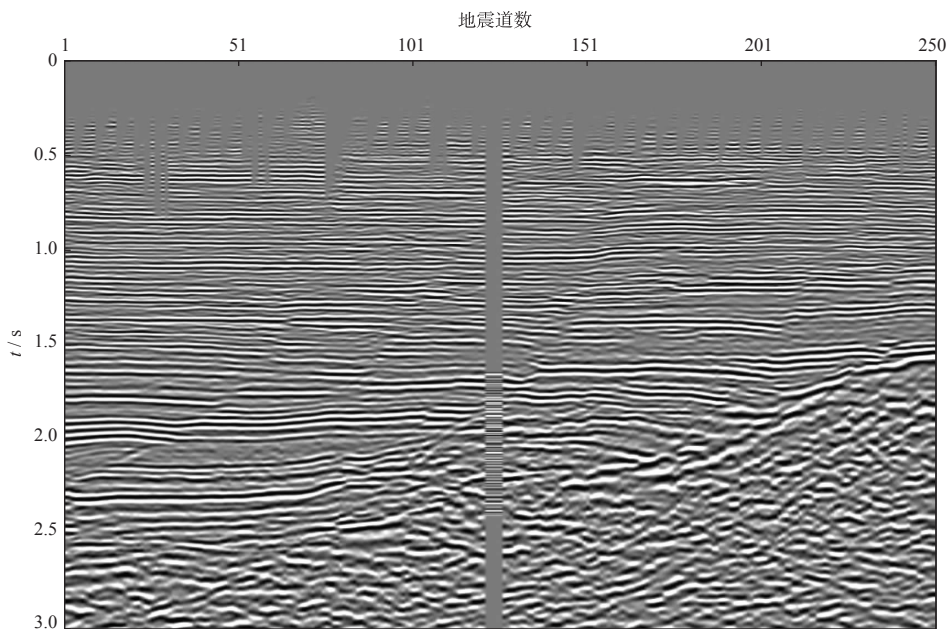


图1 未经匹配的合成地震道与井旁地震道

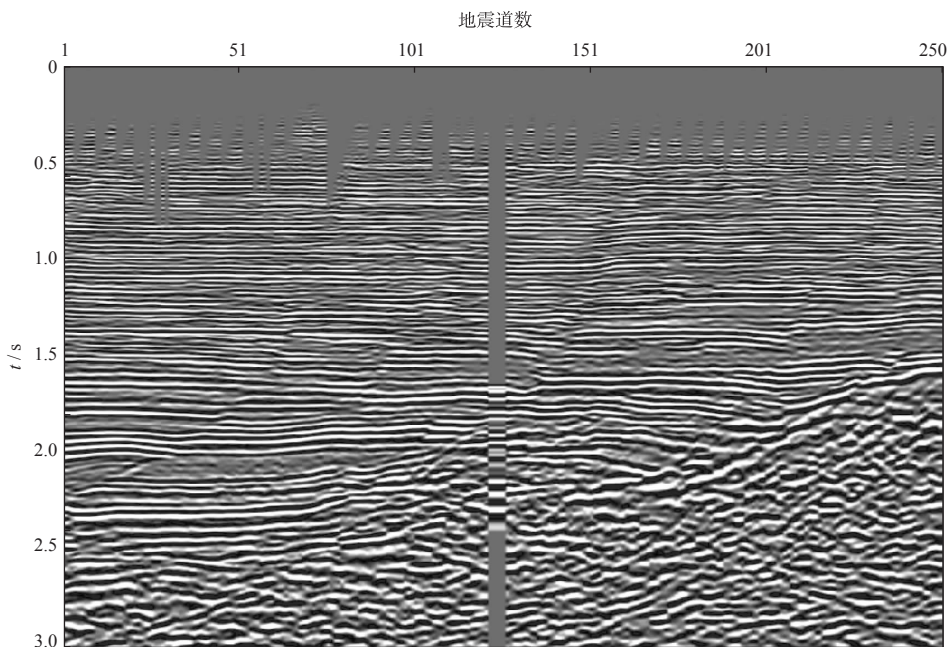


图2 常规方法匹配后的合成地震道与井旁地震道

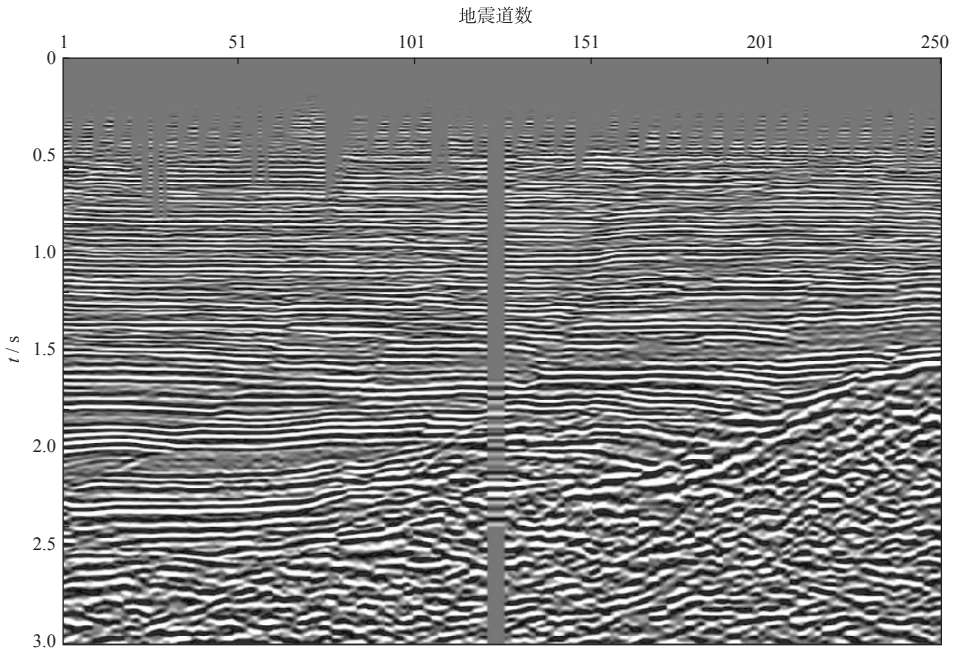


图 3 小波变换方法匹配后的合成地震道与井旁地震道

对比这 3 张图可以看出,小波变换方法相对于常规方法有一定的优势。我们不妨把合成记录分为上、中、下 3 部分,常规方法(图 2)在中部出现了同相轴对应关系不明显的现象,尤其在下部合成道相对于井旁道出现了一定量的时移,没有做到上、中、下完全兼顾,而小波变换方法(图 3)具有时变

的特点,能同时兼顾振幅匹配和相位匹配,克服了常规方法的不足,效果相对比较明显。

在小波变换匹配处理过程中,其多尺度分解曲线见图 4 和图 5,它们给出了多尺度 4 层分解的粗框部分 a_1, a_2, a_3, a_4 及其对应的细节部分 d_1, d_2, d_3, d_4 。

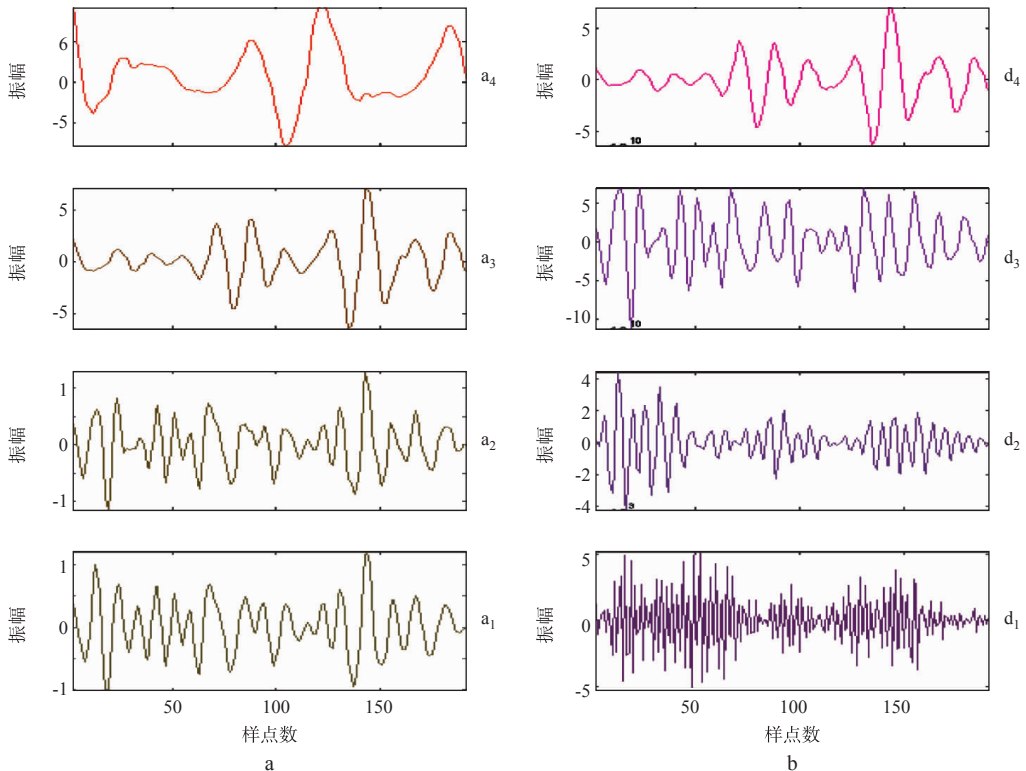


图 4 井旁地震道多尺度分解曲线

a 粗框部分; b 细节部分

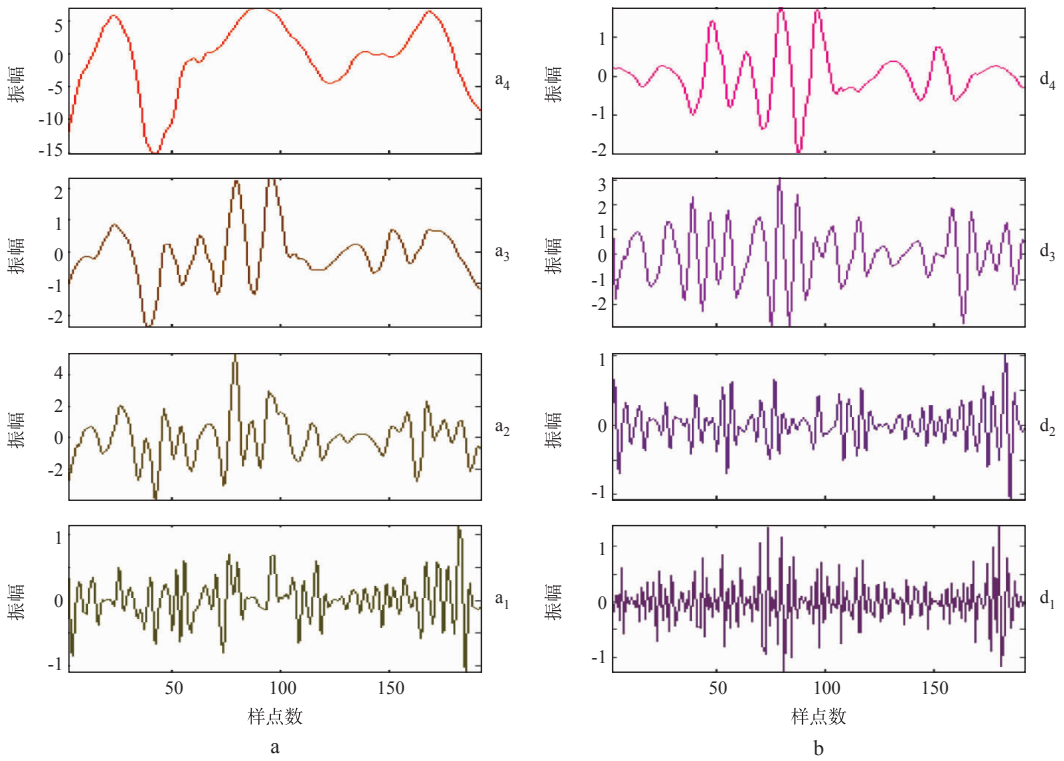


图 5 合成地震道多尺度分解曲线
a 粗框部分; b 细节部分

由于各分辨率下匹配滤波因子求解方法相同,为简单起见,我们只给出对应于 2^{-1} 分辨率下的匹配滤波因子,利用这些匹配滤波因子对小波分解后的合成道进行最小熵滤波,同时校正匹配滤波因子。图 6a 是通过最小方法求得,没有经过最小熵滤波校正的匹配滤波因子,图 6b 是图 6a 经过最小熵滤波校正后的匹配滤波因子。

这样,我们就可以用校正过的匹配滤波因子来重构合成道,以实现与井旁地震道的最佳匹配。

为了对比最小熵滤波校正滤波因子的效果,我们给出经最小熵校正滤波因子后合成道与井旁道

匹配的剖面图(图 7),并且用互相关曲线对比说明其匹配效果(图 8)。

图 8 是采用不同方法匹配后的合成地震道与井旁道的互相关曲线,图 8a 是常规方法匹配后合成道与井旁道的互相关曲线,图 8b 是小波变换匹配后合成道与井旁道的互相关曲线,图 8c 是经过了最小熵滤波校正匹配后合成道与井旁道的互相关曲线。

为了对比,图 8a、图 8b 和图 8c 都是经过了归一化后的结果。可以看出,经过小波变换匹配滤波后,合成道与井旁道的互相关曲线相似性增大;而

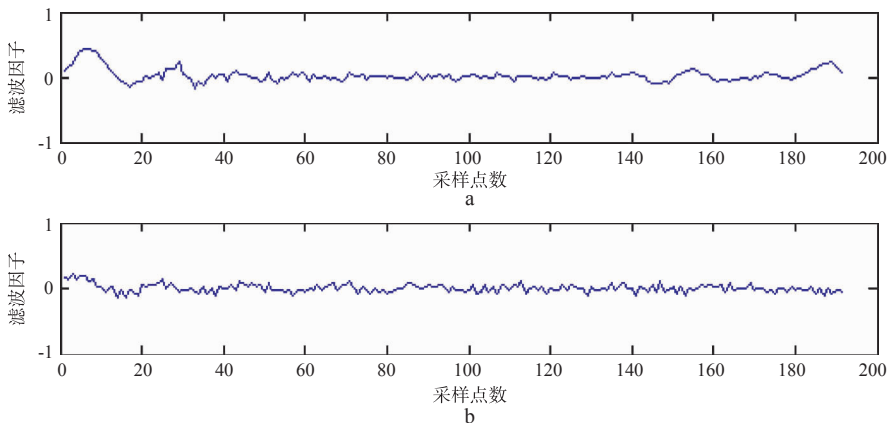


图 6 细节部分匹配滤波因子(归一化后)
a 未经最小熵滤波校正; b 经最小熵滤波校正

且,经过最小熵滤波校正匹配滤波因子后,互相关曲线的相似性也得到了一定程度的改善。说明该

匹配滤波因子选取较为合适。同时也说明这一方法是可行的。

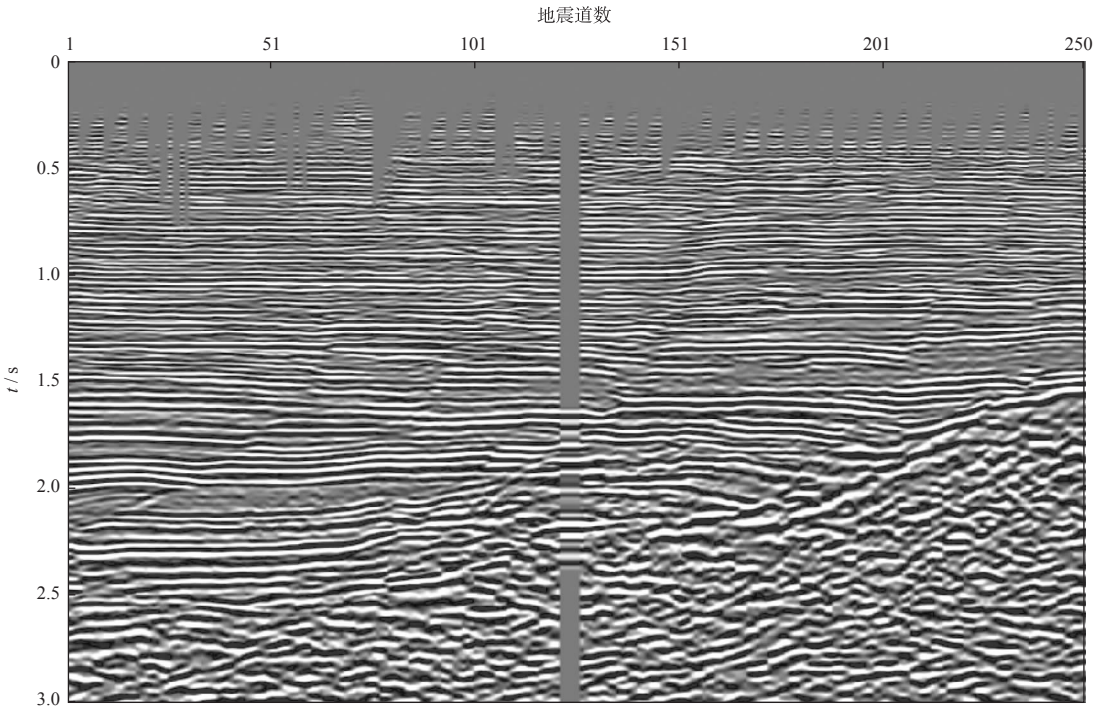


图 7 小波变换方法匹配后的合成地震道与井旁地震道(经最小熵滤波校正滤波因子后)

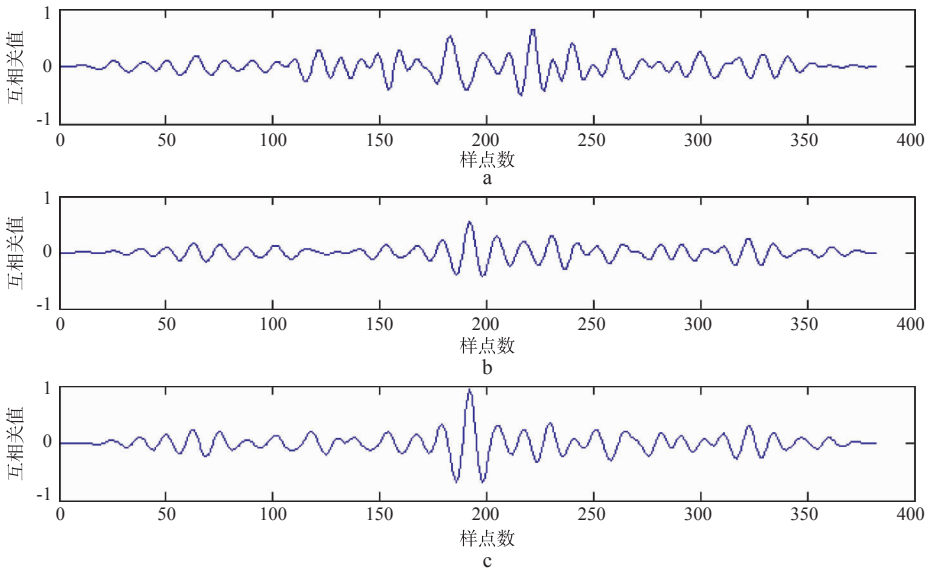


图 8 采用不同方法匹配后的合成地震道与井旁地震道互相关曲线(归一化后)
a 常规方法; b 小波变换; c 最小熵滤波校正

3 结论

本文采用的小波变换方法克服了常规方法的不足,能够对地震信号的整体和局部进行分析,进而利用小波变换方法对信号进行分解和重构,并结合最小二乘法校正不同尺度空间的频率成分,获取

不同尺度的匹配滤波因子;最小熵滤波方法的运用进一步校正了匹配滤波因子,使得采用小波变换方法重构后的合成道与井旁道的匹配对比效果有了进一步的改善,进而实现了振幅和相位的同时匹配校正;在对实际资料进行匹配对比过程中,采用迭代算法,提高了对比精度,使合成地震道与井旁地震道取得了较好的一致性效果。

参 考 文 献

- 1 韩行吉, 杨文采, 吴永刚. 地震与声测井资料的匹配[J]. 石油地球物理勘探, 1995, 30(增刊2): 27~33
- 2 谢万学, 王永刚, 邢文军. 井孔与地面地震数据联合反演方法综述[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(1): 1~6
- 3 刘百红, 李建华. 测井和地震资料宽带约束反演的应用[J]. 石油物探, 2004, 43(1): 76~79
- 4 刘贵中, 邸双亮. 小波分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992. 178
- 5 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 271
- 6 Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets[M]. Philadelphia: SIAM, 1992. 341
- 7 沈平平, 刘明新, 汤磊. 石油勘探开发中的数学问题[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 400
- 8 Wiggins R A. Minimum entropy deconvolution[J]. Geoprospection, 1978, 16(1): 21~35
- 9 曹孟起, 周兴元, 王君. 统计法同态反褶积[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(增刊): 1~9
- 10 王锐, 孙成禹, 尚新民. 有限熵反褶积[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(6): 637~641
- 11 李国发, 李观寿, 张立勤. 零相位改进型最小熵反褶积方法[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(3): 359~366
- 12 郝守玲. 声波速度测量的频率和尺度效应分析[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(5): 309~313
- 13 马劲风, 赵圣亮, 曲志浩. 声波测井数据的深度域转换到时间域采样方法研究[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(增刊1): 40~45, 55
- 14 董恩清, 刘贵忠, 张宗平等. 多分辨分析用于测井资料的重采样及合成记录与地震道的匹配[J]. 测井技术, 1999, 23(4): 264~267
- 15 靳玲, 苏桂芝, 刘桂兰等. 合成地震记录制作的影响因素及对策[J]. 石油物探, 2004, 43(3): 267~271
- 16 郭刚明, 时立彩, 高生军等. 小波变换在地震资料处理中的应用效果分析[J]. 石油物探, 2003, 42(2): 237~239, 270
- 17 李春峰. 从多尺度反射系数的角度评估反褶积模型的适用性[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(4): 250~257
- 18 Verhelst F. Integration of seismic data with well-log data; [Dissertation] [D]. Delft: Delft University of Technology, 2000
- 19 Gisolf A. A quantitative analysis of seismic-to-well matching[J]. Expanded Abstracts of the 65th EAGE Conference and Exhibition, 2003, 299
- 20 Hoekstra E V. Multiscale analysis of seismic data by the wavelet transform; [Dissertation] [D]. Delft: Delft University of Technology, 1996
- 21 Herrmann F, Stark C. A scale attribute for texture in well-and seismic data[J]. Expanded Abstracts of 70th Annual International SEG Meeting, 2000, 2 063~2 066
- 3 Berryhill J R. Wave equation datuming before stack[J]. Geophysics, 1984, 49(11): 2 064~2 067
- 4 Morton S A, Ober C C. Faster shot-record depth migration using phase encoding[J]. Expanded Abstracts of 68th Annual international SEG Meeting, 1998, 1 131~1 134
- 5 石建新, 王华忠, 徐兆涛等. 三维 Born 近似波动方程炮域叠前深度偏移[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(3): 32~36
- 6 Romero L A, Ghiglia D C, Ober C C, et al. Phase encoding of shot records in prestack migration[J]. Geophysics, 2000, 65(2): 426~436
- 7 Jing X, Finn C J, Dickens T A, et al. Encoding multiple shot gathers in prestack migration[J]. Expanded Abstracts of 70th Annual international SEG Meeting, 2000, 786~789
- 8 张叔伦, 孙沛勇. 快速面炮叠前深度偏移[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(4): 333~338
- 9 孙沛勇, 张叔伦, 冯恩民. 一种新的相位编码面炮记录叠前深度偏移方法[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(6): 711~714
- 10 Reshef M. Depth migration from irregular surfaces with the depth extrapolation methods[J]. Geophysics, 1991, 56(1): 119~122
- 11 崔兴福, 徐凌, 陈立康. 复杂近地表波动方程波场延拓静校正[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 80~86

(上接第 178 页)