

# 井震联合地震道多尺度反演

张玉芬, 罗延钟, 凌 峰

(中国地质大学地球物理系, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 多尺度(多分辨率)反演是近几年才提出的一种加快收敛速度, 克服局部极小值影响, 搜索全局最小极值点的反演策略. 将垂向上分辨率较高的测井资料和横向上连续性较好的地震资料在地质理论指导下进行联合地震道反演, 同时将小波变换多尺度分析(多分辨率分析)思想应用于上述反演中, 实现对地震道多尺度(多分辨率)反演. 理论和实际资料的处理均表明, 这种反演方法具有收敛速度快, 反演精度较高、适应能力较强的特点.

**关键词:** 测井资料; 地震资料; 地震道; 多尺度(多分辨率)反演; 高分辨率; 高信噪比.

**中图分类号:** P315.9 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2001)05-0533-05

**作者简介:** 张玉芬(1957—), 女, 副教授, 2000年毕业于中国地质大学, 获地球探测与信息技术专业博士学位, 主要从事石油地震勘探、地震薄互层处理等方面的教学和研究工作.

## 0 引言

目前我国东部的地震勘探工作已进入到精细地震勘探研究阶段. 经验表明<sup>[1~3]</sup>, 基于分辨率较低的普通地震记录的直接反演, 其精度和分辨率都不能满足油田开发的需要. 在室内处理中, 提高地震资料分辨率的途径之一, 就是测井资料和地震资料联合的地震道反演<sup>[1~6]</sup>. 本文基于此思想, 充分利用已知测井资料丰富的高频信息和完整的低频成分来补充实际地震记录有限带宽的不足, 将低分辨率的实际地震记录反演成具有较高分辨率的近似反射系数序列, 为进一步开展波阻抗、层速度反演、岩性反演以及薄储层的追踪、对比、预测提供较可靠的地震依据. 同时, 也为了防止反演结果落入局部极值, 把小波变换的多尺度思想引入反演中<sup>[7~9]</sup>, 进行地震道多尺度(多分辨率)反演. 实际资料的处理结果表明, 这是一种较有效的反演方法. 有关测井资料和地震资料联合地震道反演的基本原理和实现过程, 笔者曾在文献<sup>[1]</sup>中有过较详细的论述, 这里不再赘述, 本文仅给出地震道多尺度反演的基本原理和实现过程.

## 1 地震道多尺度反演的基本原理

多尺度(多分辨率)反演是近几年才提出的一个加快收敛速度, 克服局部极小值影响, 搜索全局最小极值点的反演策略. 多尺度反演是把目标函数分解成不同尺度(或频带)的分量<sup>[9,10]</sup>, 根据不同尺度上目标函数的特征, 逐步搜索全局最小点. 由多尺度反演搜索全局极小值的过程<sup>[10]</sup>可见: 对目标函数进行多尺度分解后, 随着尺度参数的增大, 目标函数的复杂性降低, 其形态更趋于波形的总体趋势, 这时目标函数的极值点数较少且分得较开. 这主要是因为多尺度分解是对原始数据在尺度意义上的进一步逼近(平滑), 使得很多局部极小值在更大尺度上退化为一个平凡的点, 从而减少了局部极小值的干扰. 这时, 我们用一般的方法就可以比较容易地搜索出大尺度(总体趋势)上的全局极小点. 随着尺度的减小, 目标函数的细节部分逐步得到恢复, 这时由于我们已经将模型的总体趋势求出, 其反演相当于在全局极小附近进行修正、迭代, 故能比较容易地搜索到该尺度上的“全局极小点”. 依此方法, 不断加入高频细节信息, 调整全局最小点, 最终当尺度降至目标函数的原始尺度时, 对应搜索出的最小点就是真正的全局极小值点. 由以上分析可见, 从本质上讲, 多尺度反演方法并不是一种独立的反演方法, 而只是在原

来的方法上加入多尺度反演思想. 其目的是为了给出一个好的反演方向和反演环境(减少噪声参与反演), 以增加反演的稳定性和收敛速度.

2 地震道多尺度反演的实现

多尺度反演的实现主要有以下几步: (1) 把原问题从小尺度空间  $Q_j^{-1}$  分解到大尺度空间  $Q_j^n$  上,  $R: Q_j^{-1} \rightarrow Q_j^n$ ; (2) 在空间  $Q_j^n$  上求解, 即搜索出对应尺度  $2^n$  上目标函数的“全局极小点”; (3) 将大尺度空间  $Q_j^n$  上的解“注入”到小尺度空间  $Q_j^{-1}$  上,  $R^{-1}: Q_j^n \rightarrow Q_j^{-1}$ , 即将求出的空间  $Q_j^n$  上的解与  $Q_j^n$  上的离散细节进行小波重构, 将其结果作为空间  $Q_j^{-1}$  上的初始输入. 依次进行, 尺度递减, 直至尺度递减到原始数据尺度为止.

将上述多尺度反演思想应用到测井资料、地震资料联合的地震道反演中, 笔者将它称为“测井、地震资料联合地震道多尺度反演”. 下面我们将根据测井、地震资料联合地震道反演公式(1)和二进小波域中的褶积模型公式(2)导出“测井、地震资料联合地震道多尺度(多分辨率)反演”的具体公式.

由文献[1, 11]可知, 基于最小二乘解的测井、地震资料联合地震道反演公式为:

$$\Delta \mathbf{r} = (\mathbf{b}\mathbf{b}^T + \gamma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{b}^T (\mathbf{s} - \mathbf{s}^0). \tag{1}$$

式中,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,  $\gamma$  为控制校正方向和步长的任意正数, 即阻尼因子,  $\mathbf{b}$  为地震子波,  $\mathbf{s}$  为实际地震记录,  $\mathbf{s}^0$  为合成地震记录,  $\Delta \mathbf{r}$  为模型的修正量.

由文献[7, 8, 11, 12]经适当地推导可得二进小波域中的褶积模型公式为:

$$\begin{aligned} W_2^j(y(k)) &= W_2^j(r(k) * b(k)) + W_2^j(n(k)) = \\ &W_2^j(b(k)) * r(k) + W_2^j(n(k)) = \\ &W_2^j(r(k)) * b(k) + W_2^j(n(k)), \\ j &= 1, 2, \dots, J, k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \end{aligned} \tag{2}$$

式中,  $W_2^j(y(k))$ ,  $W_2^j(b(k))$  (或  $W_2^j(r(k))$ ) 和  $W_2^j(n(k))$  分别为地震记录  $y(k)$  的小波分解、地震子波  $b(k)$  的小波分解 (或地震反射系数序列  $r(k)$  的小波分解)、测量噪声  $n(k)$  的小波分解.

令  $(\mathbf{b}\mathbf{b}^T + \gamma^2 \mathbf{I}) = \mathbf{G}$ ,  $\mathbf{b}^T (\mathbf{s} - \mathbf{s}^0) = \Delta \mathbf{s}$ , 则式(1)将具有如下的矩阵形式

$$\mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{s}. \tag{3}$$

定义目标函数为

$$Q = [\Delta \mathbf{s} - \mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{r}]. \tag{4}$$

由上式可见, 原问题的解就是要寻找到一个  $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_m)^T$ , 使目标函数  $Q \rightarrow \min$ , 即

$$Q = [\Delta \mathbf{s} - \mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{r}] \rightarrow \min.$$

对目标函数进行多尺度分解则有

$$W_2^j(Q) = [W_2^j(\Delta \mathbf{s}) - W_2^j(\mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{r})] \rightarrow \min. \tag{5}$$

这就使原问题的求解转换为求  $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_m)^T$ , 使

$$W_2^j(\Delta \mathbf{s}) = W_2^j(\mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{r}) = W_2^j(\mathbf{G}) \cdot \Delta \mathbf{r}, \tag{6}$$

式中,  $W_2^j$  为二进域中小波变换算子, 上式即为地震道多尺度反演公式. 下面将给出最大尺度为  $2^j$  反演实现的具体步骤: (1) 对输入的初始模型  $r^0$ 、实际地震道数据  $\mathbf{s}$ 、地震子波  $\mathbf{b}$  和测井数据  $\mathbf{r}_1$  均作  $2^j$  尺度的小波分解, 得到  $2^j$  尺度下的平滑部分 (低频段) 和细节部分 (高频段) 信息  $C_r, C_s, C_b, C_{r_1}, D_r, D_s, D_b, D_{r_1}$ ; (2) 将  $2^j$  尺度的  $C_r, C_s, C_b, C_{r_1}$  的数据长度插值到原  $2^0$  尺度的数据长度, 因为理论和实际处理均表明, 尺度为  $2^j$  的反射系数与尺度为  $2^j$  的子波褶积得不到尺度为  $2^j$  的合成记录地震道, 所以一切的正演计算必须从  $2^j$  尺度数据长度投影到  $2^0$  尺度的数据长度才能实现; (3) 正演计算理论合成记录、计算  $\Delta \mathbf{s}$  (残差) 和核函数  $\mathbf{G}$ ; (4) 利用(1)式求出  $2^j$  尺度上的模型修正量  $\Delta \mathbf{r}$ ; (5) 修改模型使  $\mathbf{r}^{(k+1)} = \mathbf{r}^k + \Delta \mathbf{r}$  得到新模型; (6) 根据准则判断该模型是否满足要求, 如果满足, 则该模型即为所要求的最佳模型, 直接执行(7), 否则将得到的新模型作为新的初始模型回到(3)步继续迭代, 直到满足条件为止. 在本文中将模型正演地震道和实际地震道的相关度达到给定的值或两者之差小于给定的一个小量时作为判定两者最佳拟合的标准. (7) 将求出的模型值从  $2^0$  尺度数据长度还原到  $2^j$  尺度数据长度; (8) 将求出的  $2^j$  尺度的平滑分量“注入”到  $2^j$  尺度的细节中, 得到  $2^{j-1}$  尺度的初始模型继续反演. 具体做法为, 将求出的  $2^j$  尺度的平滑分量与  $2^j$  尺度上细节分量  $D_r$  进行小波重构得到  $2^{j-1}$  尺度的初始模型. (9) 尺度减 1, 重复上述过程直到  $2^0$  尺度.

至此完成了一个地震道的反演处理, 道循环得到整个剖面的反演结果.

下面对小波变换多尺度方法逐尺度提高反演分辨率的理论基础进行简要剖析.

3 理论分析

由小波变换多尺度(多分辨率)原理<sup>[13]</sup>可知:  
 $V_{j-1}=V_j\oplus W_j=V_{j+1}\oplus W_{j+1}\oplus W_j=L, j\in z,$   
当  $j=1$  时,则有  
 $V_0=V_1\oplus W_1=V_2\oplus W_2\oplus W_1=$   
 $V_3\oplus W_3\oplus W_2\oplus W_1=\dots$   
在实际的地震道反演中,当我们把原问题从  $V_j$  空间分解为  $V_{j+1}\oplus W_{j+1}$  时,由于  $V_{j+1}$  空间仅包含  $V_j$  空间中低波数(或低频)成分,因此,在  $V_{j+1}$  空间中反演出的解应是  $V_j$  空间中原问题在所有模型参数附近局部化的某种趋势解(它不包含  $V_j$  空间中的高频薄层信息). 由于  $V_j$  空间中高波数(高频)成分,即细节信号是包含于  $V_{j+1}$  在  $V_j$  中的正交补空间  $W_{j+1}$  中,故在  $V_{j+1}$  空间中不能得到分辨的有关小尺度上特征(即高频信息),能通过在  $V_j$  空间中的反演而得到分辨. 同样,在  $V_j$  空间中不能得到分辨的更小尺度特征(更高频信息),能通过在  $V_{j-1}$  空间中反

演而得到分辨. 这就是多尺度反演方法逐尺度提高分辨率的原理.

4 方法验证和实际资料的处理

根据上述思想,对某地震测线的一段原始地震记录(图 1a)进行了测井资料(文中使用的测井资料分别在剖面中 CDP18 和 CDP111 道处)和地震资料的联合地震道多尺度反演处理(图 1b). 比较图 1a 和图 1b 可见,测井资料、地震资料联合地震道多尺度反演处理后的剖面,较原始剖面不仅分辨率有了很大的提高,而且剖面的信噪比也没有降低(图 1b).  
为了提高地震道多尺度反演的精度,笔者在进行地震道多尺度反演前,对原始地震道数据利用小波变换方法先进行了去噪和提高分辨率的处理,对反演处理后的结果又利用多项式拟合技术进行了提高信噪比的处理,取得了较好的效果.

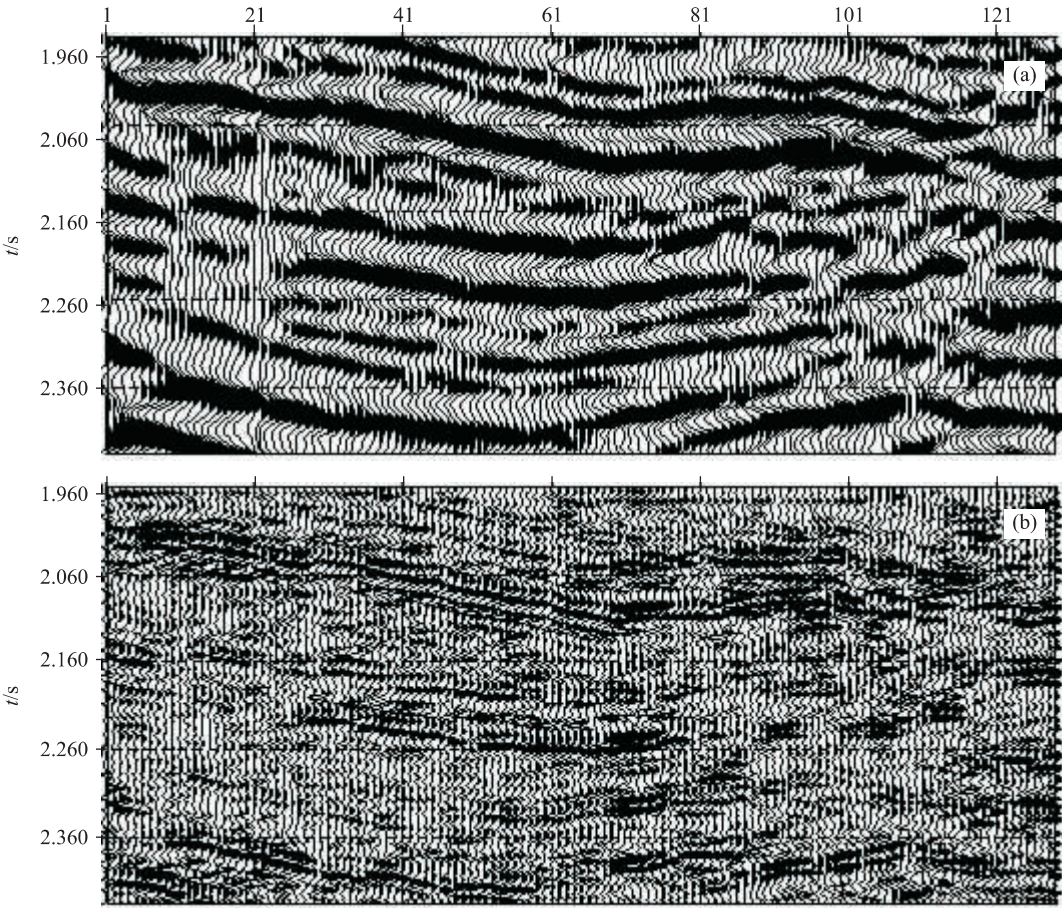


图 1 某地震测线的原始记录片段(a)及地震道多尺度反演处理结果(b)

Fig. 1 A primary seismic record segment (a) and processed by multi-scale inversion method (b) in some seismic lines

## 5 结论

将垂向上分辨率较高的测井资料和横向上连续性较好的地震资料在地质理论指导下进行联合地震道反演,同时将小波变换多尺度分析(多分辨率分析)思想应用于上述反演中,实现对地震道多尺度(多分辨率)反演.文中实际资料的处理表明,这是目前一种较有效的反演方法.为了进一步了解各种因素(如初始模型、原始地震道数据质量、地震子波类型、主频、小波函数的类型、长度、多尺度反演分解次数和最大分解尺度、反演迭代的次数和阈值、波阻抗初值等)对反演结果的影响,笔者还用理论和实际资料进行了试验处理,得出了一些有意义的结果,因文章篇幅有限,有关影响因素分析将在另篇文章中进行讨论.此处只给出与本文有关的一些结论与建议.

(1)实际资料处理表明,测井、地震、地质资料共同联合地震道反演的关键技术之一,就是如何将测井资料和地震、地质资料有机地组合起来,建立一个具有较宽频带的比较符合实际地质情况的初始模型剖面<sup>[1,2,4~6]</sup>.

(2)高质量的地震道数据是反演成功的基本保证.因此,利用小波变换(或小波包变换)方法对输入的地震道数据先进行去噪和提高分辨率的处理是必要的,也是一种行之有效的方法<sup>[13~18]</sup>.但是具体对小波系数的哪部分做去除(压制),哪部分做补偿,则要根据具体情况以测井中获得的波阻抗或反射系数为依据进行处理,否则将很难有实际性意义.

(3)利用小波变换的多分辨(多尺度)分析特点,在进行地震道多尺度反演时,小波函数的选取对反演结果有很大的影响<sup>[19,20]</sup>,Daubechies10小波较接近于实际地震记录的子波,因此选用该小波进行处理其效果较好.并且其起始反演尺度应根据实际资料情况确定,一般应取地震道数据所对应的尺度,否则会影响反演的收敛速度,有时甚至导致不收敛.

(4)将具有丰富宽高频的测井信息与地震资料结合起来,通过迭代反演,是目前在室内提高常规地震勘探资料分辨率的有效方法之一.该方法的主要优点是:充分利用已知的、实实在在的、具有宽高频的测井信息,去补充实际地震记录有限带宽的不足,因此它的分辨率应是可信的.

虽然根据地震剖面特点在地质理论指导下,笔者比较好地解决了将测井、地震资料有机组合,获得一个比较符合实际地质情况的初始波阻抗剖面的问题<sup>[1]</sup>,但如何解决在构造复杂,断层发育,地层横向

变化较大地区,由井旁道向远道递推,仍然是今后应进一步深入研究的一个问题.

本文方法存在的不足之处是:(1)由于该方法基于线性褶积模型,而线性褶积模型一般要求实际资料中不含有噪声,但实际上这是很难做到的.另外,线性褶积模型与实际地质情况的逼近程度也决定了反演结果的可信度<sup>[21]</sup>;(2)欲进行反演的地震剖面中必须有声波测井资料,否则无法建立初始模型剖面.

### 参考文献:

- [1] 张玉芬,刘春华.多参数约束反演及其应用[J].地球科学——中国地质大学学报,1997,22(2):219—222.
- [2] 张玉芬,李套山,刘小喜,等.多参数约束高分辨率处理方法在东濮凹陷中的应用[J].石油物探,1999,38(1):116—120.
- [3] Zhang Y F, Hong F. A method of improving seismic data resolution comprehensive inversion of well logging and seismic data [J]. Journal of China University of Geosciences,1996,7(2):193—196.
- [4] 张宏彬,何樵登.宽带约束反演[J].石油物探,1995,34(1):1—10.
- [5] Berkhout A J. 利用地质约束条件进行地震数据反演[A];刘怀株,译.见:美国地球物理学会.美国勘探地球物理学家学会第60届年会论文集[C].北京:石油工业出版社,1991.280—283.
- [6] 张玉芬,韩世勤,熊维纲.井约束条件下的地震道反演[A].见:罗延钟.应用地球物理学进展[C].武汉:中国地质大学出版社,1996.64—68.
- [7] 章珂,李衍达,刘贵忠,等.多分辨率地震信号反褶积[J].地球物理学报,1999,42(4):529—535.
- [8] Bunks C, Fatimetou M, Zateski S, et al. Multiscale seismic waveform inversion [J]. Geophysics, 1995, 60(5):1457—1473.
- [9] 侯遵泽,杨文采.中国大陆地壳密度差异多尺度反演[J].地球物理学报,1998,41(5):642—651.
- [10] 朱成宏.叠后地震资料波阻抗多尺度反演[D].武汉:中国地质大学,1998.
- [11] 张玉芬.影响薄互层地震反射特征因素研究和井震联合地震道多尺度反演[D].武汉:中国地质大学,2000.
- [12] Grubb H J, Walden A T. Characterizing seismic time series using the discrete wavelet transform [J]. Geop exploration, 1977, 45:183—205.
- [13] 秦前清.实用小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,1994.29—63.
- [14] 韩世勤,张玉芬.小波变换及其在信号分析中的应用

[J]. 中南民族学院学报(自然科学版), 1996, 15(4): 86—91.

[15] 何光明, 高如曾, 韩德贵, 等. 小波变换在地震资料高分辨率处理中的应用[J]. 石油物探, 1996, 35(2): 44—54.

[16] 章珂, 刘贵忠. 二维小波变换方法的地震信号分时分频去噪处理[J]. 地球物理学报, 1996, 39(2): 261—270.

[17] Goupillaud P, Grossmann A, Morlet J. Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis [J]. Geoexploration, 1984, 23: 85—102.

[18] 刘贵忠, 宗涛, 章珂, 等. 利用纵向小波包变换和横向多项式拟合提高地震信号的信噪比和分辨率[J]. 石油地球物理勘探, 1995, 30(5): 584—593.

[19] 高静怀, 任文秉, 朱光明. 地震资料处理中小波函数的选取研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(3): 389—397.

[20] Daubechies I. Othonormal bases of compactly supported wavelets[J]. Comm Pure Appli Math, 1988, 41: 909—996.

[21] Parker R L. Understanding inverse theory [J]. Ann Rev Earth Planet Sci, 1977, 5: 35—64.

SEISMIC TRACE MULTI-SCALE INVERSION  
USING LOGGING DATA AND SEISMIC DATA

Zhang Yufen, Luo Yanzhong, Ling Feng

(Department of Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Multi-scale (multi-resolution) inversion is an inversion tactics that has been put forward in recent years. Its purpose is to increase inversion convergence rate and decrease the local minimum effect so as to search for the global minimum. In the light of geological theory, high vertical resolution logging data and good transverse continuity seismic data are used to make seismic trace inversion. At the same time, the idea of wavelet transform multi-scale analysis is applied in the inversion, which has achieved seismic trace multi-scale (multi-resolution) inversion. The proccession of theoretical and practical data state that this kind of inversion method has the features of quick convergence rate, high inversion precision and strong ability of accommodation.

**Key words:** logging data; seismic data; seismic trace; multi-scale (multi-resolution) inversion; high resolution; high signal and noise ratio.