

文章编号: 1671-8585(2009)02-0112-07

多道最小平方方法匹配地震、测井数据建模

汪浩¹, 黄旭日^{1,2}

(1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东东营 257061; 2. 北京旭日奥油能源技术有限公司, 北京 100101)

摘要:介绍了一种用多道最小平方方法构建多个井旁道与单个非井旁道之间的关系,并用褶积算子替代权系数来建立空间关系的方法。该方法充分发挥了测井资料纵向分辨率高和地震资料横向分辨率高的优点。将这两种不同分辨率、不同空间覆盖尺度的数据联合,建立储层的地质模型。模型试验和实际应用的结果都表明,本方法对提高模型数据精度有一定的效果,也证明了此方法的可行性。

关键词:多道最小平方方法; 储层建模; 地震; 测井

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

在油气田的勘探评价和开发阶段,储层研究以建立定量的三维储层地质模型为目标,这是油气勘探开发深入发展的要求,也是储层研究向更高阶段发展的体现。我国大部分油气田已陆续进入开发中后期,剩余资源开发较为困难。地面地震资料因地面接收干扰严重,高频成分在中深层衰减和吸收作用较大,得到的叠后剖面频率尤其是中深层频率偏低,而测井数据的高频信息要丰富得多,如何把测井数据中的高频信息补偿到地震数据中去,实现拓宽地震资料的频带、提高地震资料分辨率,是一个一直在研究的课题。不同尺度或分辨率数据之间的匹配处理方法,可应用于测井数据和地震数据联合解释储层的细微特征^[1],达到认识油藏小尺度特征的目的。

在油田开发方案设计阶段,要求建立高精度的地质模型,其精度和正确性直接涉及数值模拟的计算、储量计算、油藏管理和石油工业下游的工程建设等^[2]。近来,人们提出了直接用地震和井信息建模的方法,如宋海渤^[3]提出了用测井资料与地震数据相匹配建立储层模型的方法,但其算法最终采用了平均多井信息的思想,采用平均就会损失较多测井信息。如何充分利用地震及测井信息,同时保持空间参数求取的稳定仍有许多工作要做。这里介绍一种匹配多道信息的方法。

1 原理简介

确定性建模是对井间未知区域给出确定性的预测结果,即从已知确定性资料的控制点(井点)出发,推测出点间(井间)确定的、唯一的和真实的储层参数^[4]。从本质上讲,确定性建模就是进行油气

藏属性的空间插值(预测估计)^[5]。克里金估计就是一种常用确定性建模方法。自从 20 世纪 60 年代初期,法国的 G. Matheron 教授提出区域化变量理论并创立地质统计学以来,克里金估计方法已经得到了广泛应用^[6,7]。下面简单介绍普通克里金估计的思想。

设 $\{Z(x) | x \in D\}$ 是研究的油藏空间属性,将其看成是分布在空间范围 D 内的二阶平稳随机场。若已获得观察数据 $\{Z(x_i) | i=1, 2, \dots, N\}$, 则可利用已知数据估计未知位置 $x \in D$ 处的值 $Z(x)$, 采用线性平均:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

即用变量 $Z^*(x)$ 来预测变量 $Z(x)$ 。

在这里我们不用克里金的方法计算 λ_i , 而尝试用地震数据计算得到权系数 λ_i 。我们知道,地震数据体本身的变化是一个空间变化关系的数据载体,这个关系可以是相关、振幅谱等地震本身的信息,它反映了地质体在空间上的变化。在已知地震数据的前提下,可以得到它的空间变化特征,从而反推出储层的空间变化规律。式(1)中的 λ_i 可以通过地震数据体求得。

如图 1 所示,已知点 a, b, c 三处的地震数据和点 a, b 处的测井数据,应用地震数据体建立点 a, b 与 c 处的关系,然后利用这个空间关系由点 a, b 处的测井数据得到点 c 处的伪井数据。

收稿日期: 2008-11-25; 改回日期: 2008-12-18。

第一作者简介: 汪浩(1984—), 男, 中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业在读硕士研究生, 主要研究方向为地震资料综合解释。

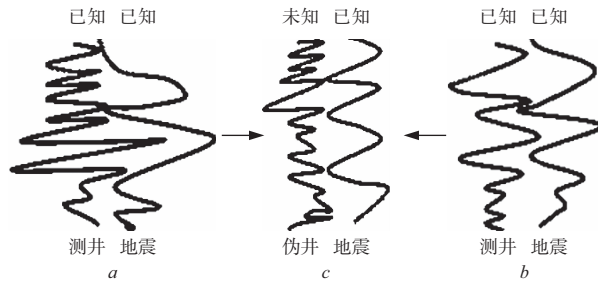


图 1 方法图示

通过寻找地震数据之间的关系,分别得到其他道与所求道的一个权系数 λ_i ,然后根据这个权系数来求此处的伪井数据,即

$$L_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i L_i \quad (2)$$

权系数 λ_i 可以通过地震反演的波阻抗或其他反演数据体得到。测井数据的主频比地震数据的主频高得多,基于样点对样点计算的权系数 λ_i 可能不是最优的。一般而言,对于任意一种测井特性,我们都可以认为测井曲线的每个样点与一段连续的地震样点相关联^[8]。为此,我们采用褶积算子 ω_i 来替换一般的权系数 λ_i ,则式(2)变为:

$$E_k = S_{c,k} - \sum_{j=0}^m \omega_{1,j} S_{1,k-j} - \sum_{j=0}^m \omega_{2,j} S_{2,k-j} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, l) \quad (5)$$

平方误差为

$$E_k^2 = S_{c,k}^2 + \left(\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} S_{1,k-i} \right) \left(\sum_{j=0}^m \omega_{1,j} S_{1,k-j} \right) + \left(\sum_{i=0}^m \omega_{2,i} S_{2,k-i} \right) \left(\sum_{j=0}^m \omega_{2,j} S_{2,k-j} \right) - 2S_{c,k} \left(\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} S_{1,k-i} + \sum_{i=0}^m \omega_{2,i} S_{2,k-i} \right) + 2 \left(\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} S_{1,k-i} \right) \left(\sum_{i=0}^m \omega_{2,i} S_{2,k-i} \right) \quad (6)$$

总的平方误差为

$$E^2 = \sum_{k=0}^l \left[S_{c,k}^2 + \left(\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} S_{1,k-i} \right) \left(\sum_{j=0}^m \omega_{1,j} S_{1,k-j} \right) + \left(\sum_{i=0}^m \omega_{2,i} S_{2,k-i} \right) \left(\sum_{j=0}^m \omega_{2,j} S_{2,k-j} \right) - 2S_{c,k} \left(\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} S_{1,k-i} + \sum_{i=0}^m \omega_{2,i} S_{2,k-i} \right) + 2 \left(\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} S_{1,k-i} \right) \left(\sum_{i=0}^m \omega_{2,i} S_{2,k-i} \right) \right] \quad (7)$$

交换求和次序

$$E^2 = \sum_{k=0}^l S_{c,k}^2 + \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \omega_{1,i} \omega_{1,j} \left(\sum_{k=0}^l S_{1,k-i} S_{1,k-j} \right) + \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \omega_{2,i} \omega_{2,j} \left(\sum_{k=0}^l S_{2,k-i} S_{2,k-j} \right) - 2 \sum_{i=0}^m \omega_{1,i} \left(\sum_{k=0}^l S_{c,k} S_{1,k-i} \right) - 2 \sum_{i=0}^m \omega_{2,i} \left(\sum_{k=0}^l S_{c,k} S_{2,k-i} \right) + 2 \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \omega_{1,i} \omega_{2,j} \left(\sum_{k=0}^l S_{1,k-i} S_{2,k-j} \right) \quad (8)$$

从上式可以看出:为了让误差减小,应该尽可能地增加井旁道,因为最差的结果是增加的井旁道对最小误差没有影响,当增加井旁道的褶积算子是一个零向量时,误差是不会增大的。当 E^2 最小时,有

$$\frac{\partial E^2}{\partial \omega_{1,n}} = \frac{\partial E^2}{\partial \omega_{2,n}} = 0 \quad (n = 0, 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

$$L_c = \sum_{i=1}^n \omega_i L_i \quad (3)$$

假设地震数据(如波阻抗)处理正确并反映地下地质结构的情况下,则井点的地震数据和测井数据都是相同地质结构的反映,因此二者满足相同的结构,故有

$$S_c = \sum_{i=1}^n \omega_i S_i \quad (4)$$

式中: S_c 为待估点处的地震数据; S_i 为井位置的地震数据。

若已知 S_c 和 S_i , 褶积算子 ω_i 就可以从上式求出,再用式(3)即可得到待估计点的伪井数据。褶积算子 ω_i 的正确求取是本方法的关键步骤。

2 多道最小化均方误差求取褶积算子

褶积算子 ω_i 可采用多道最小化均方误差法^[9,10]求取。考虑用两个井旁道来计算褶积算子。这时将有两个褶积算子: $\omega_{1,j}$ 和 $\omega_{2,j}$ ($j = 0, 1, 2, \dots, m$)。 k 时刻的误差为

E^2 对 $\omega_{1,n}$ 求偏微分

$$\frac{\partial E^2}{\partial \omega_{1,n}} = \sum_{j=0}^m \omega_{1,j} \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{1,k-j} + \sum_{i=0}^m \omega_{1,i} \sum_{k=0}^l S_{1,k-i} S_{1,k-n} - 2 \sum_{k=0}^l S_{c,k} S_{1,k-n} + 2 \sum_{j=0}^m \omega_{2,j} \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{2,k-j} \quad (10)$$

$$\frac{\partial E^2}{\partial \omega_{1,n}} = 2 \sum_{i=0}^m \omega_{1,i} \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{1,k-i} - 2 \sum_{k=0}^l S_{c,k} S_{1,k-n} + 2 \sum_{i=0}^m \omega_{2,i} \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{2,k-i} = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{1,k-i} + \sum_{i=0}^m \omega_{2,i} \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{2,k-i} = \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{c,k} \quad (12)$$

同理 E^2 对 $\omega_{2,n}$ 求偏微分

$$\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} \sum_{k=0}^l S_{2,k-n} S_{1,k-i} + \sum_{i=0}^m \omega_{2,i} \sum_{k=0}^l S_{2,k-n} S_{2,k-i} = \sum_{k=0}^l S_{2,k-n} S_{c,k} \quad (13)$$

使用互相关及相关来简化方程,令

$$\begin{aligned} r_{1c}(n) &= \sum_{k=0}^l S_{c,k} S_{1,k-n}, r_{2c}(n) = \sum_{k=0}^l S_{c,k} S_{2,k-n}, \\ r_{11}(n-i) &= \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{1,k-i}, r_{12}(n-i) = \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{2,k-i}, \\ r_{22}(n-i) &= \sum_{k=0}^l S_{2,k-n} S_{2,k-i}, r_{21}(n-i) = \sum_{k=0}^l S_{2,k-n} S_{1,k-i}, \end{aligned}$$

则式(12)和(13)可写成如下的矩阵方程

$$\begin{bmatrix} r_{11}(0) & r_{12}(0) & r_{11}(-1) & r_{12}(-1) & \cdots & r_{11}(-m) & r_{12}(-m) \\ r_{21}(0) & r_{22}(0) & r_{21}(-1) & r_{22}(-1) & \cdots & r_{21}(-m) & r_{22}(-m) \\ r_{11}(1) & r_{12}(1) & r_{11}(0) & r_{12}(0) & \cdots & r_{11}(1-m) & r_{12}(1-m) \\ r_{21}(1) & r_{22}(1) & r_{21}(0) & r_{22}(0) & \cdots & r_{21}(1-m) & r_{22}(1-m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ r_{11}(m) & r_{12}(m) & r_{11}(m-1) & r_{12}(m-1) & \cdots & r_{11}(0) & r_{12}(0) \\ r_{21}(m) & r_{22}(m) & r_{21}(m-1) & r_{22}(m-1) & \cdots & r_{21}(0) & r_{22}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{1,0} \\ \omega_{2,0} \\ \omega_{1,1} \\ \omega_{2,1} \\ \vdots \\ \omega_{1,n} \\ \omega_{2,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1c}(0) \\ r_{2c}(0) \\ r_{1c}(1) \\ r_{2c}(1) \\ \vdots \\ r_{1c}(m) \\ r_{2c}(m) \end{bmatrix} \quad (14)$$

解方程(14)就可以得到褶积算子 ω_1 和 ω_2 。

式(12)和(13)很容易扩展到用多个井旁道计算褶积算子 ω 的情况,例如:用 3 个井旁道计算褶积算子,有

$$\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{1,k-i} + \sum_{i=0}^m \omega_{2,i} \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{2,k-i} + \sum_{i=0}^m \omega_{3,i} \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{3,k-i} = \sum_{k=0}^l S_{1,k-n} S_{c,k} \quad (15)$$

$$\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} \sum_{k=0}^l S_{2,k-n} S_{1,k-i} + \sum_{i=0}^m \omega_{2,i} \sum_{k=0}^l S_{2,k-n} S_{2,k-i} + \sum_{i=0}^m \omega_{3,i} \sum_{k=0}^l S_{2,k-n} S_{3,k-i} = \sum_{k=0}^l S_{2,k-n} S_{c,k} \quad (16)$$

$$\sum_{i=0}^m \omega_{1,i} \sum_{k=0}^l S_{3,k-n} S_{1,k-i} + \sum_{i=0}^m \omega_{2,i} \sum_{k=0}^l S_{3,k-n} S_{2,k-i} + \sum_{i=0}^m \omega_{3,i} \sum_{k=0}^l S_{3,k-n} S_{3,k-i} = \sum_{k=0}^l S_{3,k-n} S_{c,k} \quad (17)$$

3 模型试验

建立了一个二维模型测试上述方法的可行性。模型大小为 61×300 的网格。模型的孔隙度和波阻抗分布图如图 2、图 3 所示。以孔隙度模型中的

第 1 道、第 16 道、第 46 道和第 61 道作为已知的测井数据,波阻抗模型作为已知的地震数据进行计算,用协克里金方法计算的孔隙度结果如图 4 所示。用本文介绍的多道褶积算子计算的孔隙度结果如图 5 所示。计算中褶积算子的长度取为 51 个样点。

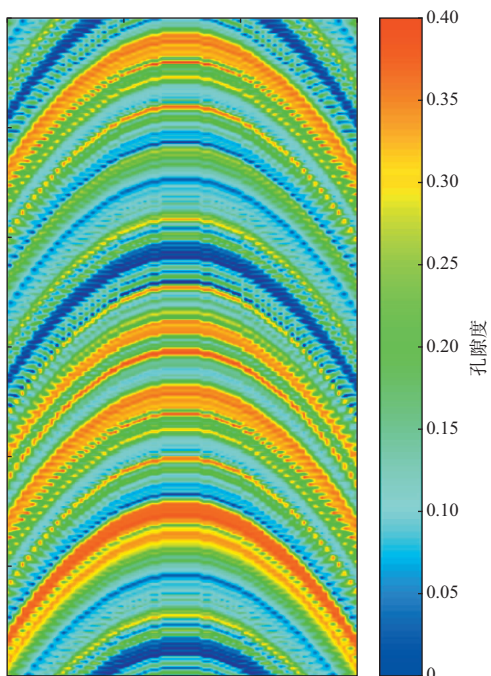


图 2 模型的孔隙度分布

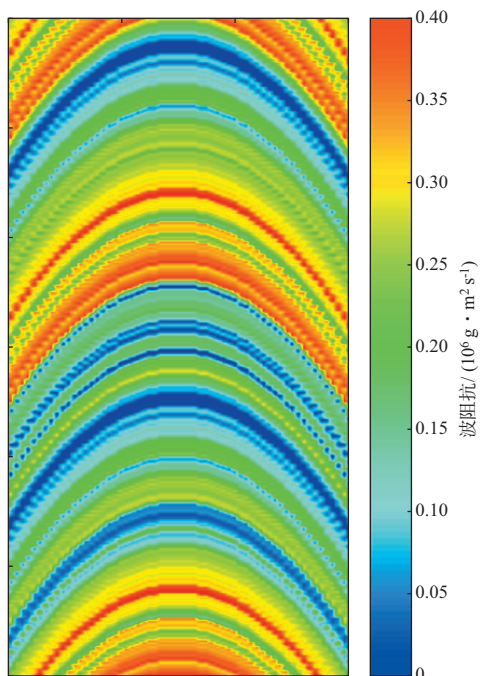


图 3 模型的波阻抗分布

协克里金方法计算的结果在井位置与真实值比较接近,但是随着与井距离的增大,计算的孔隙度值与真实值的误差也随着增大,在两井的中间位置误差最大。协克里金方法效果不好的原因可能是模型变差函数很难与试验变差函数拟合,从而造成了离井距离较远的地方误差较大。

用多道褶积算子计算的孔隙度模型结果与模型比较接近,但深度方向上的 0 到 50 样点之间的孔隙度分布与模型的孔隙度误差较大。这是因为

数据体的上边界没有数值,造成计算结果的前 51 个样点(褶积算子的长度 $m=51$)误差较大。在实际应用中,可以采用增大时窗的方法消除这种影响,即向上增加 m 个样点进行计算,然后在计算的结果中去掉前 m 个样点。

从模型和计算结果中抽出第 21 道进行详细对比(图 6),两者的吻合度非常好,相关系数为 0.94,大多数样点的误差非常小。去掉前 51 个点后误差更小(图 7)。

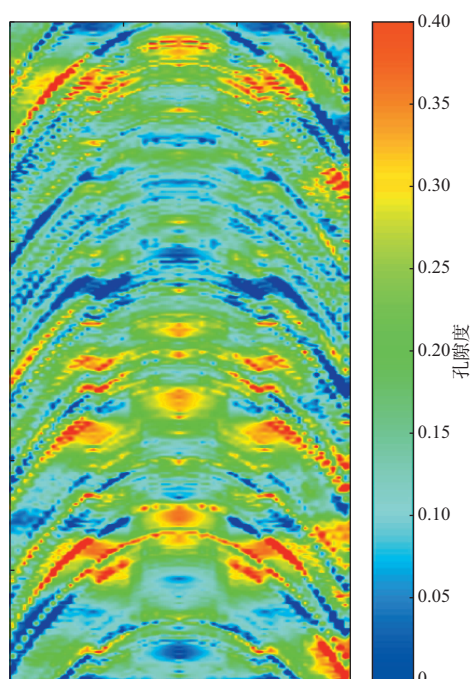


图 4 协克里金插值计算的孔隙度分布

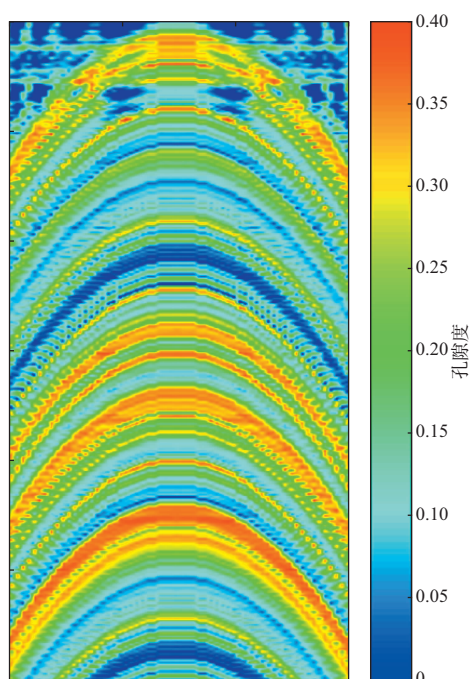


图 5 多道褶积算子计算的孔隙度分布

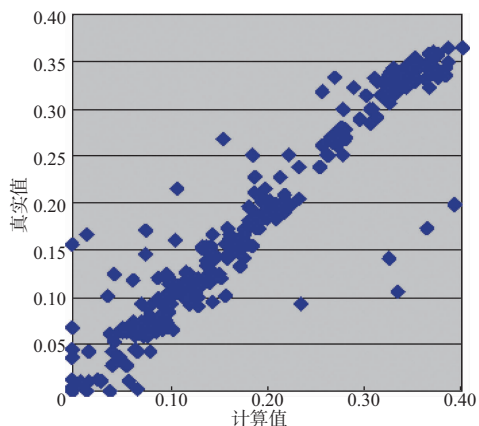


图 6 第 21 道孔隙度计算值与真实值交会分析

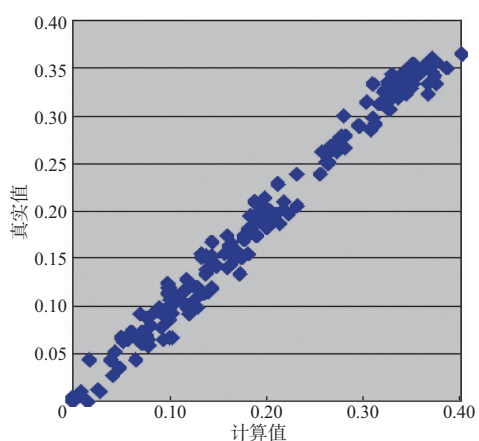


图 7 第 21 道孔隙度计算值与真实值交会分析(去掉前 51 个点)

4 实际应用

我们用 YJ 地区的反演数据和测井数据进行实际试验,来说明该方法的有效性。工区平面如图 8 所示。YJ 地区的有效储层位置比较深,砂泥岩压实效果比较明显,波阻抗反演的效果并不是很好,我们希望用本文介绍的方法处理后分辨率有所提高。每一道数据的处理流程如图 9 所示。具体的处理步骤为:

- 1) 从反演的波阻抗数据体中沿层位提取数据;
- 2) 从已提取的波阻抗数据体提取 3 个井旁道的波阻抗数据;
- 3) 建立每道波阻抗数据与 3 个井旁道波阻抗数据之间的关系,即求出褶积算子;
- 4) 从测井数据中计算出波阻抗数据,并进行重采样,使采样间隔与反演的波阻抗数据相同;
- 5) 用褶积算子和测井数据重构每一道的波阻抗数据体。

处理前后沿层提取的波阻抗平均值如图 10、图 11 所示。从图中可以看出:处理后的波阻抗数据与原来反演的波阻抗数据变化趋势基本一致。

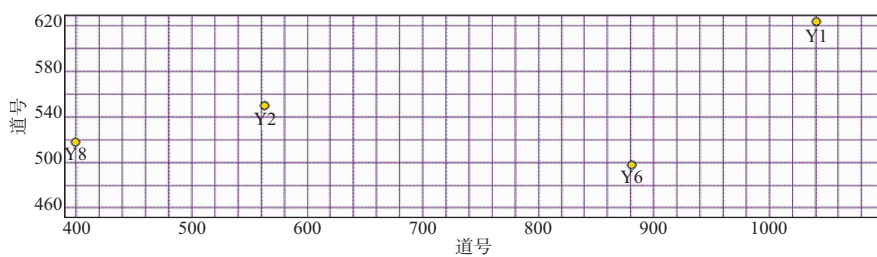


图 8 YJ 地区工区平面

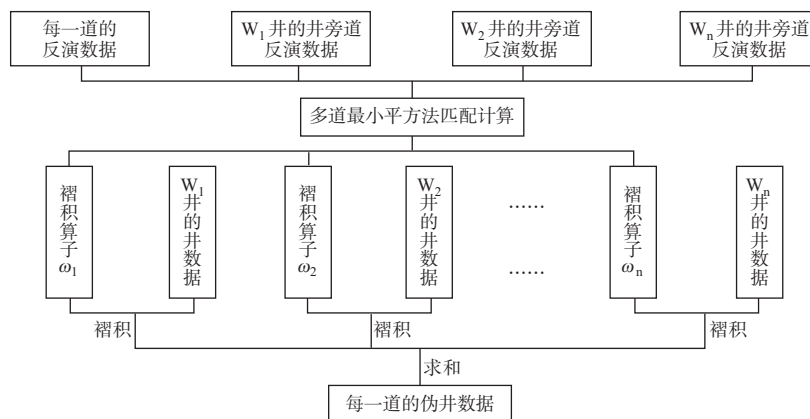


图 9 每一道数据的处理流程

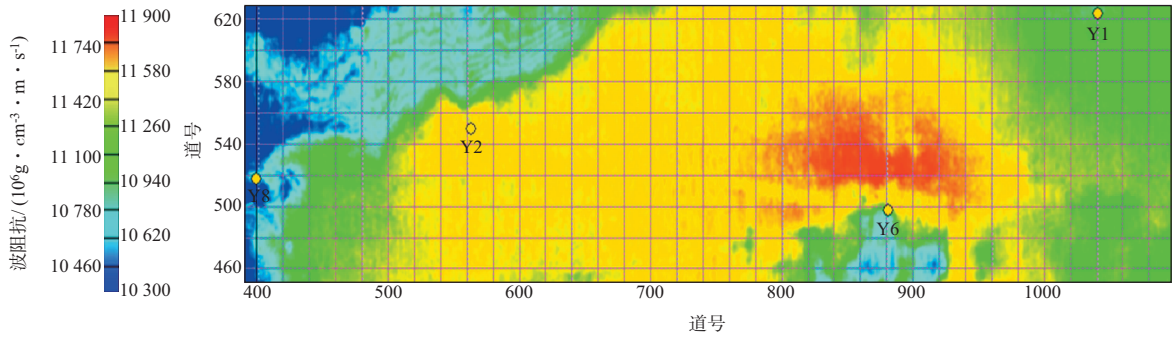


图 10 处理前的波阻抗数据沿层提取的平均值

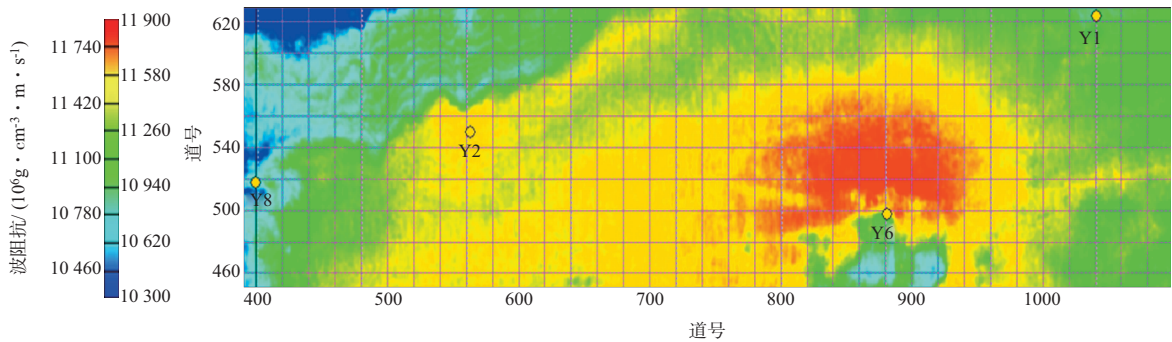


图 11 处理后的波阻抗数据沿层提取的平均值

工区内的 Y8 井未参与计算, 作为验证井。过 Y8 井的波阻抗剖面如图 12、图 13 所示。从 Y8 井测井数据计算得到的波阻抗曲线可以看出 3 931~3 933 ms 及 3 963~3 971 ms 处波阻抗较高, 而反

演的波阻抗较低, 两者误差较大。处理后的数据分辨率得到了提高, 3 931~3 933 ms 处显示出高阻抗的薄层, 3 963~3 971 ms 处波阻抗值也与测井值相吻合。

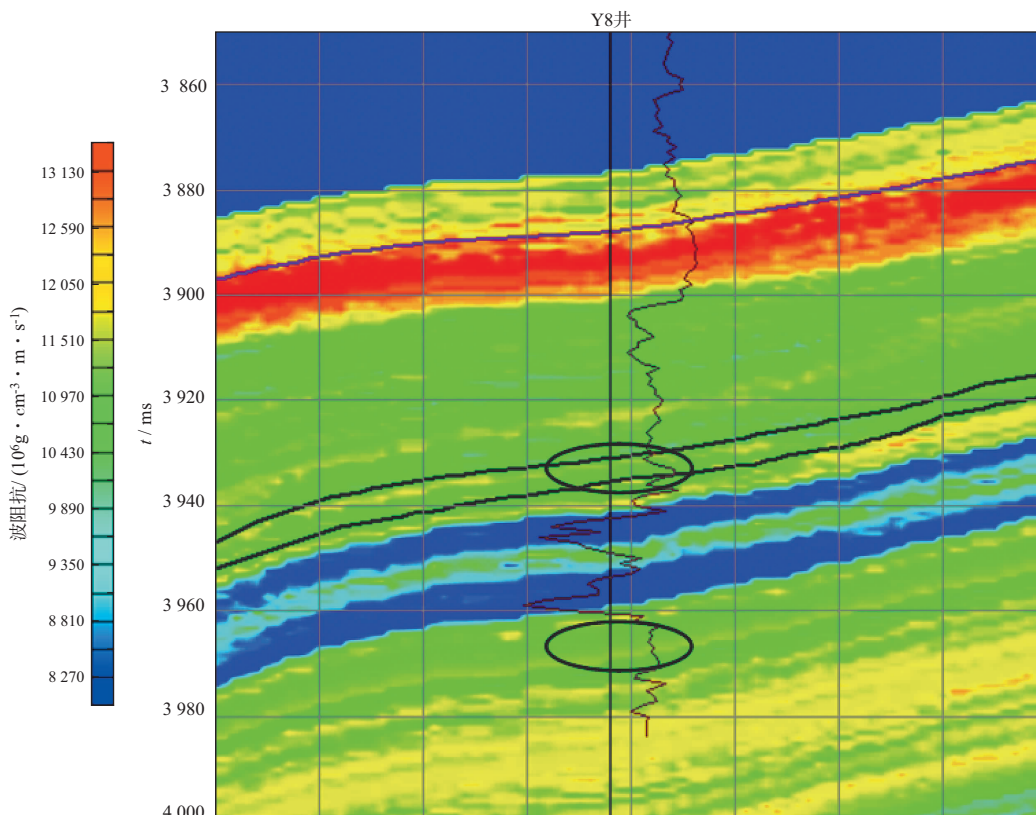


图 12 处理前的波阻抗剖面

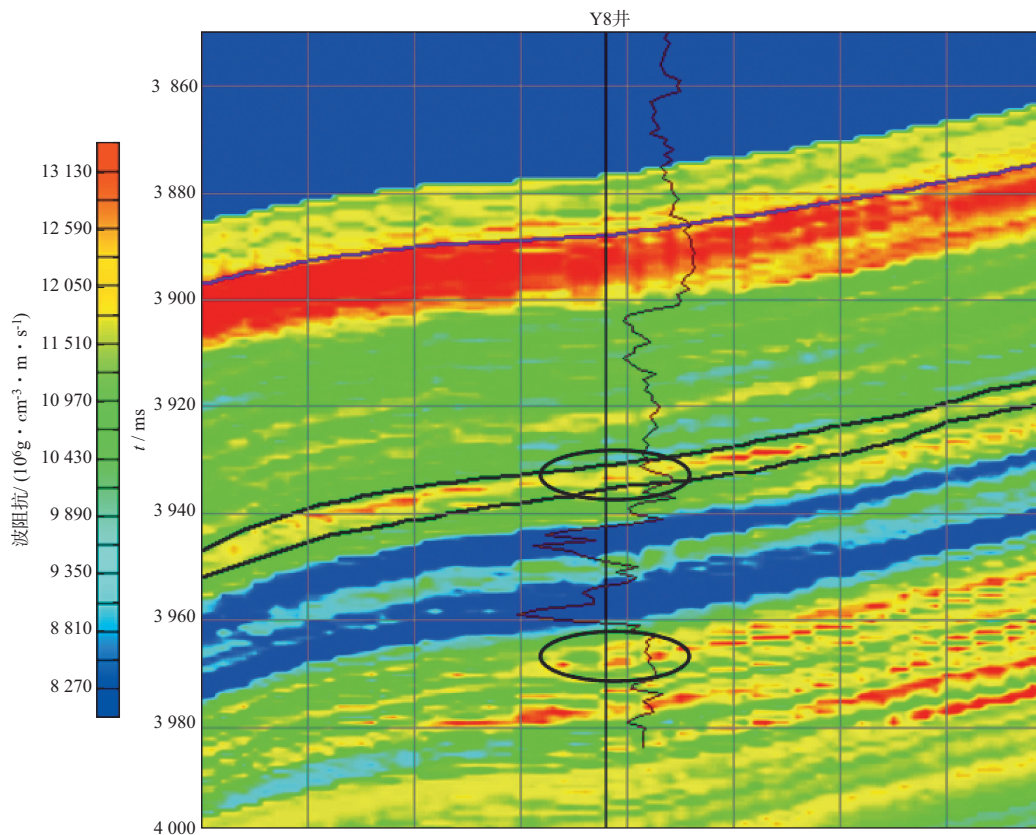


图 13 处理后的波阻抗剖面

5 结论

利用地震数据之间的关系建立多个井旁道与每一地震道之间的关系,再利用包含高频信息的测井数据对地质体模型进行重构是可行的。这种方法能够有效地提高模型的分辨率,可以更准确地描述储层非均质性,且误差较小。但对地质模式如何约束此过程还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Norman K. Using an interactive match filter to advance interpretation[J]. Expanded Abstracts of 76th Annual International SEG Meeting, 2006, 1 068 ~1 072
- 2 尹天放. 油藏地球物理学方法在地质建模中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 61~62
- 3 宋海渤. 井-震联合描述储层性质空间变化的方法研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2008. 26~28
- 4 胡向阳, 熊琦华, 吴胜和. 储层建模方法研究进展[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(1): 107~112
- 5 魏嘉. 地质建模技术[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(1): 1~6
- 6 张团峰, 王家华. 试论克里金估计与随机模拟的本质区别[J]. 西安石油学院学报, 1997, 12(2): 52~55
- 7 李黎, 王永刚. 地质统计学应用综述[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(3): 163~169
- 8 Daniel P H, James S S, John A Q. Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data [J]. Geophysics, 2002, 66(1): 220~236
- 9 沈平平, 刘明新, 唐磊. 石油勘探开发中的数学问题 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 333~335
- 10 吴庆举, 李永华, 张瑞青, 等. 用多道反褶积方法测定台站接收函数[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 792~796

(编辑: 任 鹏)