

自动拾取的成像空间域走时层析速度反演

秦 宁*^① 李振春^① 杨晓东^②
周 卿^① 陈富强^① 桑运云^①

(^①中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580; ^②中国石化胜利石油管理局石油开发中心,山东东营 257000)

秦宁,李振春,杨晓东,周卿,陈富强,桑运云. 自动拾取的成像空间域走时层析速度反演. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 392~398

摘要 本文研究了一种成像空间域走时层析速度反演方法,利用波动方程双平方根算子叠前深度偏移提取的角度域共成像点道集(ADCIGs)作为速度分析道集,并基于剩余曲率自动拟合策略获取高精度的走时差。文中不仅给出 ADCIGs 道集剩余曲率自动拟合拾取的主要思路,而且给出成像空间域层析反演的实现。模型和实际资料试算验证了该方法具有较高的反演精度和计算效率。

关键词 速度分析 角度域共成像点道集 走时层析 自动拾取 成像空间域

中图分类号: P631 **文献标识码**: A

1 引言

叠前偏移速度分析的精度和叠前偏移算法选取正确与否是决定偏移成像成败的关键^[1]。在众多的地震速度分析和反演方法中,以波形反演技术理论具有最高的速度反演精度,但是在震源子波未知、低波数约束信息存在较大误差的条件下,容易陷入局部极值,并且计算成本很高,限制了其在油气田工业生产中的应用。偏移速度分析方法能够较为准确地得到速度场中的层位构造信息,但是对低波数细节反演精度不高。至于层析速度反演,利用偏移和层析交替迭代的思想^[2]进行速度反演,能够分别恢复速度场中的高波数信息和低波数信息,反演精度较高,并且计算稳定、高效。权衡上述各法的计算效果和计算效率,笔者认为层析速度反演方法是目前高精度速度分析的有力工具。

选取合理的分析道集对于速度分析至关重要。如今,用于速度分析的道集主要有 CMP 道集、CIP 道集(或 CRP 道集)、CFP 道集和 CRS 道集等^[3],不同道集对应的速度分析方法也不尽相同。角度域共成像点道集(ADCIGs,简称角道集)能够较为准确

地反映速度和深度的耦合关系,成像假象少^[4],因此基于角道集的速度分析方法是近年来众多学者研究的热点。Prucha 等^[5]利用波动方程双平方根算子提取角道集并将其应用于速度分析;Clapp 等^[6]利用角度域 CRP 道集实现反射层析偏移速度分析;Liu 等^[7]推导了剩余时差与剩余速度的关系式,并提出了基于反射角道集的偏移速度分析方法;Xu 等^[8]利用 Kirchhoff 偏移方法提取角道集,为复杂介质偏移速度分析提供了有力工具;Sava 等^[9,10]提出了时移成像条件,通过倾斜叠加得到时移角道集并用于偏移速度分析。此外,张凯等^[1,11]、Liu 等^[12]也对基于角道集的速度分析方法进行了较为深入的研究。

本文研究了一种基于自动拾取的成像空间域走时层析速度反演方法,选取由波动方程叠前深度偏移提取的角道集作为分析道集,并设计了一种角度域共成像点道集(ADCIGs)剩余曲率的自动拟合拾取方法以获取走时差。一方面,ADCIGs 道集是在深度偏移以后得到的,对速度变化比较敏感,能够避免多路径带来的假象干扰,利于进行层析反演;另一方面,ADCIGs 道集反映的是地下成像点的偏移深度与局部入射角之间的关系,与之对应,恰好可以将

* 山东省青岛市经济技术开发区长江西路 66 号中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,266580。Email:geoqin@163.com

本文于 2011 年 6 月 3 日收到,最终修改稿于 2012 年 2 月 24 日收到。

本研究由国家自然科学基金(40974073)、国家 863 课题(2009AA06Z206)和中国石油大学(华东)研究生创新基金项目(CXZD11-01)资助。

层析中复杂的反射分解为上行和下行两个透射,简化了问题,提高了计算精度和计算效率。模型试算和实际资料处理均表明,该方法具有较高的速度反演精度,并且计算效率高,工作量小。

2 ADCIGs 道集剩余曲率自动拟合拾取方法

基于自动拾取的成像空间域走时层析速度反演方法,其中比较关键的步骤就是走时差的拾取。此外,拾取过程既要保证拾取精度要求,又要避免较大的拾取工作量。本文利用拾取的 ADCIGs 道集剩余曲率获得深度残差,然后根据转换关系式将深度残差转换为走时差。由于 ADCIGs 道集是叠前深度偏移后得到的,成像假象少,能够较为准确地反映速度与深度的耦合关系,对速度变化比较敏感,所以基于 ADCIGs 道集能够获得精度较高的走时差,可为后续(layer析反演提供高精度的输入数据。

基于 ADCIGs 道集获取用于层析反演的走时差,需要拾取 ADCIGs 道集的剩余曲率。一般来说,获取剩余曲率的方法分为:手动拾取和自动拾取两种。手动拾取可以加入处理人员的地质判断,但是拾取过程繁琐,工作量大;自动拾取方法大多精度不高,有时也要加入一些人为修正处理,但是拾取简单,快捷。

本文提出的 ADCIGs 道集剩余曲率自动拟合拾取方法,是在常规自动拾取方法的基础上,利用 ADCIGs 道集剩余曲率与角度的关系式,拟合拾取每个角度对应的剩余曲率。与常规的自动拾取方法不同,该方法不受网格剖分精度的影响,能够获得精确的 ADCIGs 道集的剩余曲率,利于后续的高精度

走时差的计算。

ADCIGs 道集中各个角度对应的偏移深度可以表示为

$$z_a = z_0 \sqrt{\gamma^2 + (\gamma^2 - 1) \tan^2 \beta} \quad (1)$$

式中: z_0 为零炮检距(即零角度)处的偏移深度; γ 为偏移深度与真实深度的比值; β 为 ADCIGs 道集中的人射角度。据此可以得到 ADCIGs 道集的剩余曲率 Δz 为

$$\Delta z = z_0 [\sqrt{\gamma^2 + (\gamma^2 - 1) \tan^2 \beta} - 1] \quad (2)$$

其中

$$\gamma = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{(z_{ai}/z_0)^2 + \tan^2 \beta_i}{1 + \tan^2 \beta_i}} \quad (3)$$

式中: β_i 为控制点 i 对应的人射角度; z_{ai} 为控制点 i 对应的偏移深度。ADCIGs 道集剩余曲率自动拟合拾取的主要思路是:①选取深度窗,确定零角度偏移深度 z_0 ,利用互相关方法求取所选 M 个控制点的偏移深度 z_{ai} ($i=1, M$);②根据式(3)利用控制点的 (β_i, z_{ai}) 求取;③将 γ 代入式(2)即可求得拟合的剩余曲率 Δz 。

现利用图 1 的凹陷模型进行 ADCIGs 道集剩余曲率自动拟合拾取的试算,采用真实速度的 85% 提取 ADCIGs 道集,深度采样间隔为 10m,选取其中三个位置处 ($x=1500, 2500, 3500\text{m}$) 的剩余曲率同相轴进行放大显示。图 2 为利用剩余曲率自动拟合拾取方法与常规互相关拾取方法,分别对凹陷模型的第一层和第三层进行拾取的结果。从图中可以看出,常规互相关方法由于受到网格精度的限制,拾取的偏移深度只能取得深度采样间隔的整数倍,会出现不同角度对应同一偏移深度的情况;而剩余曲率自动拟合拾取方法,不受网格精度的限制,符合

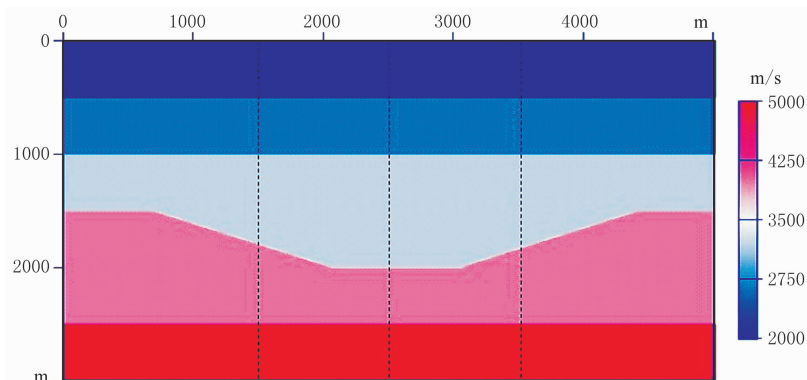


图 1 凹陷模型

模型中三条线对应的位置分别为 $x=1500, 2500, 3500\text{m}$

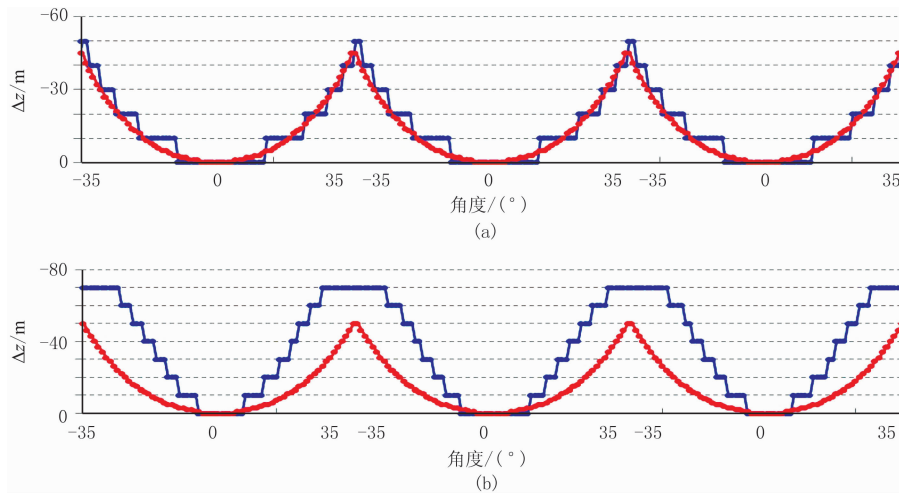


图2 剩余曲率自动拟合拾取方法与常规互相关拾取方法对凹陷模型 ADCIGs 道集拾取结果比较

(a) 第一层拾取的剩余曲率对比; (b) 第三层拾取的剩余曲率对比

图中红线表示剩余曲率自动拟合拾取方法, 蓝线表示常规互相关拾取方法

ADCIGs 道集的剩余曲率规律, 不同的角度对应的偏移深度不同, 尤其对于深层, 这种差异尤其显著。因此该方法对于 ADCIGs 道集剩余曲率的拾取精度较高, 能够为层析反演提供高精度的走时差数据。

3 成像空间域走时层析反演的实现

在走时层析反演中, 观测数据与参考模型的走时差可以通过慢度差沿着射线路径的线性积分得到, 即

$$\Delta t = \int_l \Delta s dl \quad (4)$$

式中: Δt 为走时残差向量; dl 为沿着射线路径 l 的射线段长度; Δs 为参考模型与真实模型的慢度差向量。采用矩形网格离散化后, 可以得到如下的层析反演公式

$$L\Delta s = \Delta t \quad (5)$$

式中: L 为灵敏度矩阵, 其元素对应于射线在网格内的射线路径长度。

成像空间域走时层析反演的实现可以概括为: 利用成像道集获取走时差, 将一系列角度的射线走时差沿着射线路径反投影得到剩余慢度场, 实现速度的更新反演。本文将从走时差的计算、灵敏度矩阵的获取以及层析反演的求解三个方面说明成像空间域走时层析反演的实现。

3.1 走时差的计算

成像空间域走时层析反演利用 ADCIGs 道集的深度残差(即剩余曲率)转换为走时差, 其深度残

差与走时差的转换关系^[13]可以表示为(图3)

$$\Delta t = 2s \Delta z \cos \alpha \cos \beta \quad (6)$$

式中: Δt 为走时差向量; Δz 为深度残差向量; s 为成像点处的局部慢度值; α 为反射层倾角; β 为射线入射角, 对应角度域共成像点道集的角度。

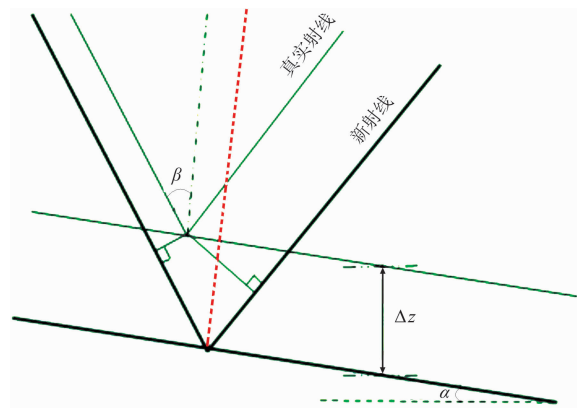


图3 走时差 Δt 与深度残差 Δz 转化关系示意图

3.2 灵敏度矩阵的获取

本文利用常速度梯度法射线追踪求取灵敏度矩阵, 可将复杂的反射问题分解为上行和下行的两个透射进行求解: 从与 ADCIGs 道集对应的地下成像点出发, 利用选定的角度范围以及界面倾角确定射线出射方向, 按照固定步长 dl 进行射线追踪, 求取每条射线在网格内的路径长度, 当射线到达该层顶界面时终止。由于射线追踪步长可以根据灵敏度矩阵的精度要求人为选择, 所以具有很大的灵活性, 并且能够提高计算效率。式(7)是计算灵敏度矩阵元素(射线路径长度)的公式

$$l = \int_{l_1}^{l_2} \| \mathbf{n}(l) \| dl \quad (7)$$

$$\mathbf{n}(l) = \mathbf{n}_0 \left[1 + \frac{l}{v_0} (\boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{n}_0) \right] - \frac{\boldsymbol{\lambda} l}{v_0} - \frac{\mathbf{n}_0}{2v_0^2} l^2 [\boldsymbol{\lambda}^2 - (\boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{n}_0)^2] + O(\boldsymbol{\lambda}^3) \quad (8)$$

式中: l 为网格内的射线路径长度; dl 为射线步长; l_1, l_2 分别为网格内射线段起始和终止路径长度; $\mathbf{n}(l)$ 为当前射线方向向量; \mathbf{n}_0 是初始射线方向向量; v_0 为射线路径上的局部速度; $\boldsymbol{\lambda}$ 为速度梯度。

3.3 层析反演的求解

由于层析反演方程组具有严重的病态性^[14], 为了提高计算的稳定性、减少反演的多解性, 本文采用加入正则化的 LSQR 方法求解层析反演方程组。以下是加入正则化的层析反演方程组

$$\begin{pmatrix} \mathbf{L} \\ \mu \mathbf{\Gamma} \end{pmatrix} \Delta \mathbf{s} = \begin{pmatrix} \Delta t \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中采用加入阻尼系数的一阶导数型正则化矩阵 $\mu \mathbf{\Gamma}$ 。其中, μ 由相应网格内的射线覆盖次数决定, $\mathbf{\Gamma}$ 由横向一阶导数型正则化矩阵 $\mathbf{\Gamma}_h$ 和纵向一阶导数型正则化矩阵 $\mathbf{\Gamma}_v$ 两部分组成。在计算时 $\mathbf{\Gamma}_h$ 是对矩阵的最后一行取向后差分, 其他行取向前差分; $\mathbf{\Gamma}_v$ 是对矩阵的最后一列取向后差分, 其他列取向前差分。

3.4 成像空间域走时层析反演的实现

本文研究的基于自动拾取的成像空间域走时层析速度反演的实现可以分为以下几个步骤: ①基于常规叠加速度分析的层速度场以及叠前深度偏移的初始界面, 建立层析初始速度场; ②利用 ADCIGs

道集自动拟合拾取剩余曲率, 转换为走时差; ③由射线追踪求取灵敏度矩阵; ④加入正则化约束求解层析反演方程组; ⑤根据 ADCIGs 道集的拉平程度以及速度反演的精度要求确定是否需要迭代, 若需要迭代则返回步骤①, 保持上覆层位速度与深度不变, 重新解释当前层及下伏层位的深度与构造形态, 然后按照步骤②~⑤进行速度更新, 否则反演结束, 终止迭代; ⑥误差和灵敏度分析。

4 模型和实际资料试算

4.1 模型试算

本文利用中国南方 A 探区南方海相碳酸盐岩模型进行试算, 该模型的典型特点是各层的速度值比较大, 集中在 4000~7000m/s。模型的 CDP 范围是 1~1601, 深度采样点数为 638 个, 纵、横向采样间隔分别为 20m 和 10m。层析速度反演利用 160 个地下成像点作为控制点, 每个成像点抽取 71 个角度(角度范围为 $-35^\circ \sim +35^\circ$, 角度间隔为 1°)。利用常规叠加速度分析得到的深度域层速度场作为初始速度场, 按照本文方法进行速度更新。图 4 是利用初始速度场得到的叠前深度偏移剖面以及由此建立的层析初始速度场, 由于速度和深度不准确, 造成偏移剖面上绕射波没有收敛, 深部构造没有很好的成像。图 5 为初始角道集和层析更新后的角道集的比较, 可以看出后者的角道集基本拉平, 同相轴的分辨率得到提高, 深部反射同相轴也显现出来。图 6 为层析更新后的速度场和对应的叠前深度偏移剖面, 与图 7 真实速度场和对应的叠前深度偏移剖面对

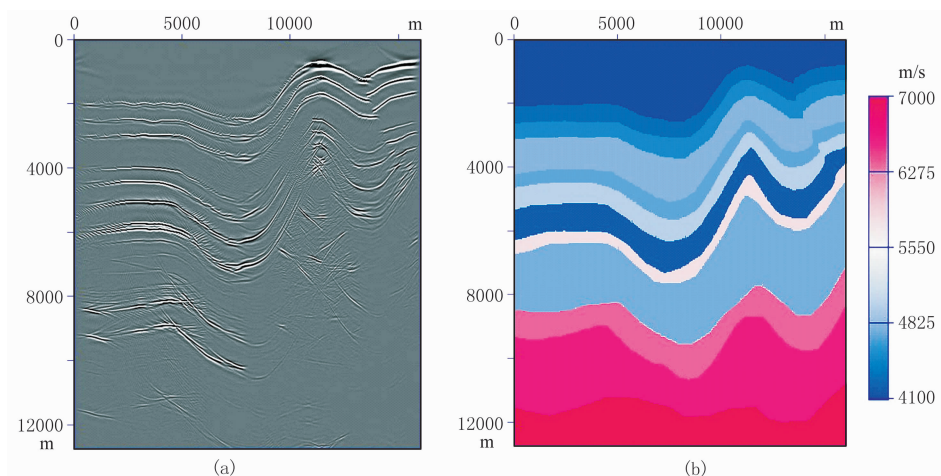


图 4 初始叠前深度偏移剖面(a)和层析初始速度场(b)

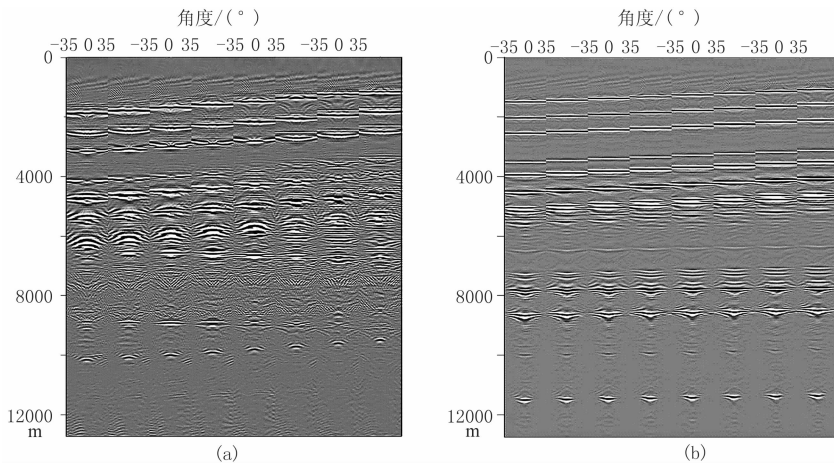


图5 初始角道集(a)和层析更新后的角道集(b)对比

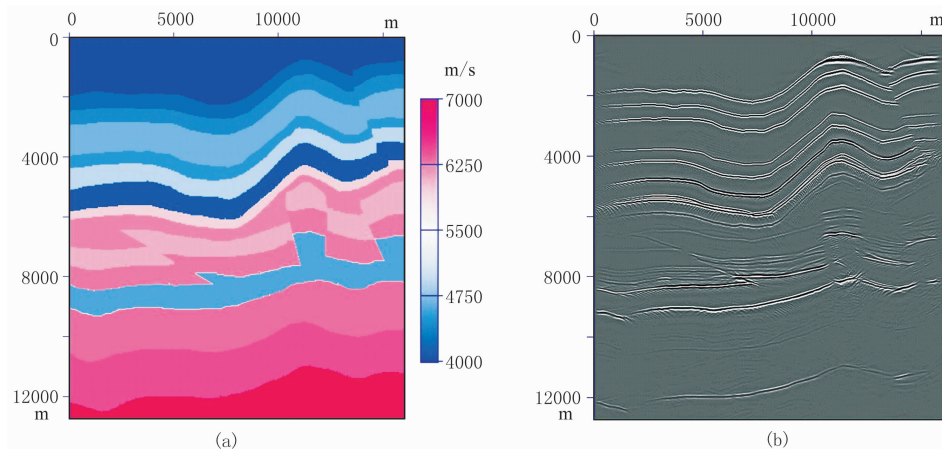


图6 层析更新后的速度场(a)和对应的叠前深度偏移剖面(b)

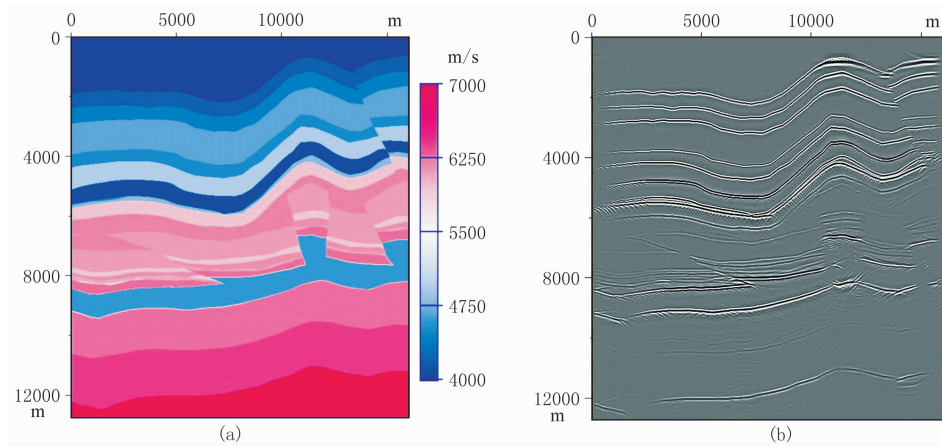


图7 真实速度场(a)和对应的叠前深度偏移剖面(b)

比,速度场除了一些极薄层以外均得到了较好恢复,偏移剖面中绕射波得到了收敛,反射界面基本归位到正确的深度位置,中深层构造均能较好成像。图8为该模型7510m处初始速度、层析更新后的速度与真实速度的对比,可以看出层析更新后的速度

和层位深度已经同真实模型非常接近。该模型试算结果表明,本文方法具有较高的速度反演精度,角道集自动拾取方法能够提高计算效率。

4.2 实际资料处理

文中利用B探区实际资料检验上述方法层析

反演结果。在层析速度反演中,利用 80 个地下成像点作为控制点,每个成像点抽取 71 个角度(角度范围为 $-35^{\circ}\sim+35^{\circ}$,角度间隔为 1°)。图 9 为利用常规叠加速度分析得到的深度域层速度场以及对应的叠前深度偏移剖面,可以看出浅层偏移噪声较大,深部构造成像质量差。图 10 为初始角道集和层析更新后的角道集的比较,可以看出层析后的角道集拉

平度较好,在方框所示的中深部构造位置同相轴更连续,能量更均衡。图 11 为层析更新后的速度场和对应的叠前深度偏移剖面,从成像结果来看,浅层成像质量得到了较大改善,中深层构造均能较好地成像。该实际资料处理结果表明,本文方法具有较高的速度反演精度,能够为后续的偏移和解释提供高质量的速度场。

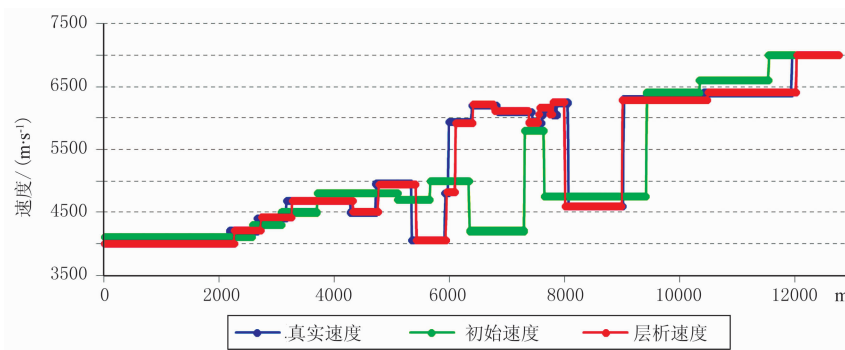


图 8 A 区碳酸盐岩模型 7510m 处初始速度、层析更新后速度与真实速度的对比

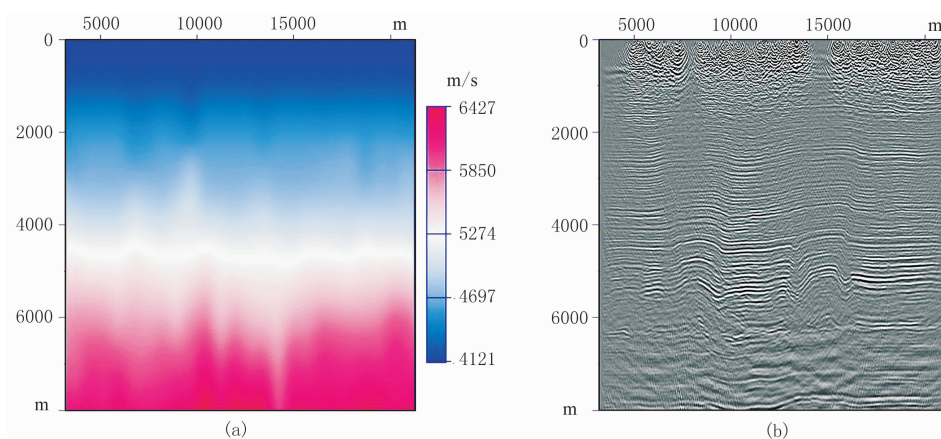


图 9 常规叠加速度分析得到的层速度场(a)及对应的叠前深度偏移剖面(b)

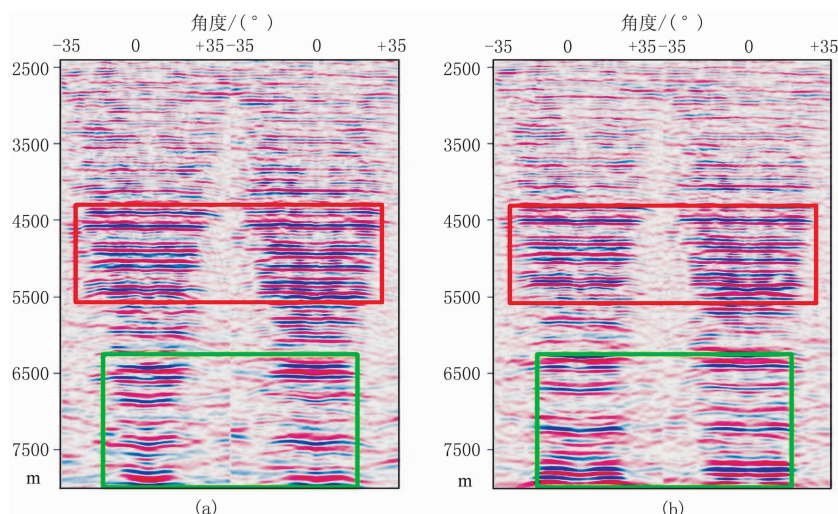


图 10 初始角道集(a)及层析更新后的角道集(b)对比

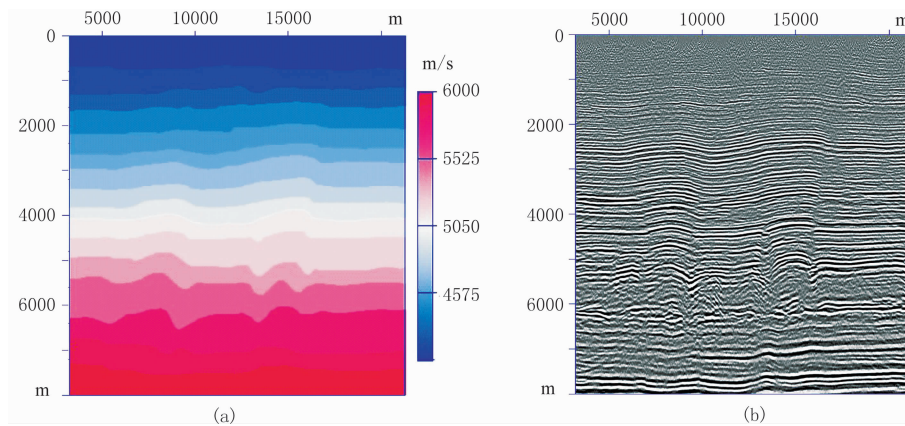


图 11 层析更新后的速度场(a)和对应的叠前深度偏移剖面(b)

5 结束语

本文研究的基于自动拾取的成像空间域走时层析速度反演,利用波动方程双平方根算子叠前深度偏移提取的角道集作为角度域共成像点速度分析道集(ADCIGs),并基于剩余曲率自动拟合方法获取高精度的走时差。一方面,ADCIGs道集对速度变化比较敏感,偏移假象少,并且其局部入射角与射线入射角的对应关系恰好可以将复杂的反射分解为上行和下行两个透射,有利于走时层析的实现。另一方面,ADCIGs道集剩余曲率自动拟合拾取方法,不受网格精度的限制,符合剩余曲率规律,能够提高走时差的计算精度。模型和实际资料试算结果表明,该方法具有较高的速度反演精度和计算效率,能够得到质量较高的叠前偏移结果,但是低信噪比的叠前数据会对层析反演精度产生较大影响,这将成为下一步的研究目标。

参考文献

- [1] 张凯. 叠前偏移速度分析方法研究[博士论文]. 上海:同济大学, 2008
- [2] Peter Mora. Inversion=migration+tomography. *Geophysics*, 1989, 54(12): 1575~1586
- [3] 李振春. 多道集偏移速度建模方法研究[博士论文]. 上海:同济大学, 2002
- [4] Stolk C, Symes W. Kinematic artifacts in prestack depth migration. *Geophysics*, 2004, 69(2): 562~575
- [5] Prucha M, Biondi B, Symes W. Angle-domain common image gathers by wave-equation migration. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1999, 18: 824~827
- [6] Clapp R, Biondi B. Tau domain migration velocity analysis using angle CRP gathers and geologic constraints. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2000, 19:926~929
- [7] Liu W, Popovici A. 3-D migration velocity analysis for common image gathers in the reflection angle domain. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2001, 20:885~888
- [8] Xu S, Chauris H and Lambare G. Common-angle migration: A strategy for imaging complex media. *Geophysics*, 2001, 66(6): 1877~1894
- [9] Sava P, Fomel S. Time-shift imaging condition. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2005, 24: 1850~1853
- [10] Sava P, Fomel S. Time-shift imaging condition in seismic migration. *Geophysics*, 2006, 71(6): S209~S217
- [11] Zhang Kai, Li Zhenchun, Zeng Tongsheng. The residual curvature migration velocity analysis on angle domain common Imaging gathers. *Applied Geophysics*, 2010, 7(1): 49~56
- [12] Liu S, Wang H. Time-shift angle domain common image gathers for migration velocity analysis. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2007, 26: 2797~2801
- [13] 秦宁, 李振春, 杨晓东. 基于角道集的井约束层析速度反演. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(5): 725~731
- [14] Qin Ning, Li Zhenchun, Yang Xiaodong. Tomography velocity inversion by well constraint based on the angle domain common imaging gathers. *OGP*, 2011, 46(5): 725~731
- [15] Aster R, Borchers C, and Thurber C. *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Elsevier Science and Technology Books, 2005
- [16] Donghong Pei. Three-dimensional travelttime tomography via LSQR with regularization. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2009, 28:4004~4008
- [17] Fan Xia, Yiqing Ren and Sheng Wenjin. Tomographic migration velocity analysis using common angle image gathers. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2008, 27: 3103~3106

(本文编辑:金文昱)