

doi: 10.11720/wtyht.2017.4.18
吴吉忠.一种角度域叠前时间偏移方法[J].物探与化探,2017,41(4):700-706.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.18
Wu J Z.An approach of prestack time migration in dip angle domain[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(4):700-706.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.18

一种角度域叠前时间偏移方法

吴 吉 忠

(中国石油冀东油田勘探开发研究院,河北 唐山 063004)

摘 要:提出的角度域叠前时间偏移方法,能够在偏移成像过程中直接生成倾角域成像道集,在倾角成像道集上确定真地层倾角与倾角成像区,获得的最终叠加剖面在保证构造正确成像的同时避免了过大偏移孔径带来偏移噪声的弊端,提高了剖面的信噪比。应用本文方法在南堡凹陷马头营凸起地区取得了较好的应用效果,表明该方法对于信噪比较低、偏移噪声大的地区具有较大的工业应用价值。

关键词:叠前时间偏移;倾角域成像道集;真地层倾角;偏移孔径;偏移噪声

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)04-0700-07

0 引言

目前工业界普遍采用共偏移距域叠前时间偏移进行叠前成像处理,实现了 CMP 道集(共中心点道集)到 CRP 道集(共反射点道集)的转换,该类方法是一种成像与速度分析的重要手段,对于一类倾角、断层较为复杂但横向速度变化不是很剧烈的构造有较好的成像,且具有较高的计算效率,速度模型可通过速度扫描的方式获取。偏移孔径是影响叠前时间偏移成像的重要因素,较好的偏移孔径对压制偏移噪声和减少偏移计算量具有重要作用,较小的偏移孔径虽然可以减少偏移计算量,但存在着陡倾角构造无法正确成像的风险,过大的偏移孔径在带来偏移噪声的同时又增加了额外的计算量。在实际生产中,受限于偏移算法的实现方式,在一个偏移作业中总是选取一个统一的偏移孔径,为了保证所有构造的成像,偏移孔径往往都要偏大,这不可避免的导致偏移噪声存在于 CRP 道集上,而常规的 CRP 道集切除只是对动校与拉伸畸变进行了处理,偏移噪声的存在导致了最终叠加剖面信噪比的降低。

通常,偏移孔径的范围是根据地层倾角事先给定的,但在成像前获取准确的地层倾角是十分困难

的。基于地层倾角与偏移孔径的关系,很多学者利用地层倾角来限制偏移孔径,进而达到提高成像信噪比的目的,刘合年等通过地层倾角确定用于成像的叠前数据范围的方式来实现偏移孔径的优化^[1],Audebert 等通过出射角与剖面上反射层倾角约束的方式来实现^[2],Alexander Klovov 等在深度域通过倾角成像道集部分叠加来达到偏移孔径最优选取的目的^[3]。关于地层倾角的求取,可以在波动理论框架下利用波场局部方向分解得到^[4],或者在射线理论框架下采用计算旅行时的空间梯度得到^[5],也可以采用倾角扫描的方式获取地下的地层倾角^[6-8],但若扫描时窗内有多个同相轴,且每个同相轴对应的倾角不同,则扫描结果会出现不稳定的现象,倾角扫描对数据的信噪比也有一定要求,信噪比较低则会对结果产生较大误差。

笔者提出的角度域叠前时间偏移方法,可以直接生成倾角域成像道集,在倾角成像道集上确定真地层倾角与倾角成像区,获得的最终叠加剖面在保证构造正确成像的同时避免了过大偏移孔径带来偏移噪声的弊端,提高了剖面的信噪比。该方法包含两步操作,第一步是生成共反射点位置对应的倾角成像道集,第二步是在倾角成像道集上确定倾角成像区,并水平叠加得到最终偏移成像剖面。该方法

通过倾角成像道集的最优部分叠加,达到了偏移孔径优化的效果,避免了叠前成像过程中孔径不易求准的弊端,也解决了偏移孔径过大带来的偏移噪声导致叠加剖面信噪比降低的问题,通过在渤海湾盆地南堡凹陷复杂构造成像中的应用,证明了该方法的有效性。

1 方法原理

1.1 偏移孔径与地层倾角

如图 1 所示, s, r 分别是炮点与激发点, n 为 s 与 r 的中点,设定输入地震数据的半偏移距为 h, ϕ 为 t 深度处的地层倾角, D 为 t 深度处最远成像道对应的成像点, d 为成像点 D 在地面的投影,过点 n 作垂线段与过 D 的水平线段相交于点 N ,则可以推导出:

$$\tan(\phi + \alpha) = \frac{x + h}{v_{\text{rms}} t}, \quad (1)$$

$$\tan(\phi - \alpha) = \frac{x - h}{v_{\text{rms}} t}, \quad (2)$$

其中: t 是成像点对应的的时间深度,为单程旅行时; v_{rms} 为叠加速度; α 是激发点出射的地震波在成像点处的入射角; x 为点 N 与点 D 之间的水平距离,也是时间深度 t 处地层倾角 ϕ 对应的偏移孔径。对式 (1)、(2) 进行联立求解,可得:

$$x = \frac{v_{\text{rms}} t (\tan^2 \phi - 1) + \sqrt{v_{\text{rms}}^2 t^2 (1 + \tan^2 \phi) + 4h^2 \tan^2 \phi}}{2 \tan \phi}, \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出,任一时间深度的偏移孔径在速度与偏移距保持不变的情况下,取决于成像构造的地层倾角,地层倾角越大,所需要的偏移孔径越大。

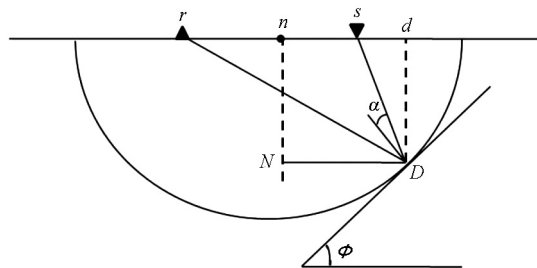


图 1 偏移孔径与地层倾角

1.2 倾角成像道集的生成

1.2.1 地层倾角的计算

生成倾角成像道集首先需要计算反射界面的倾角,可以在波动理论框架下利用波场局部方向分解得到^[4],也可以在射线理论框架下采用计算旅行时的空间梯度得到^[5]。如图 2 所示,在二维情况下,成

像空间散射点 O 处的波传播方向特征可以用入射慢度矢量 $\mathbf{U}_s$ 和散射慢度矢量 $\mathbf{U}_r$ 共同描述^[9]。 $\mathbf{U}_+$ 为入射与散射慢度矢量之和,称之为照明矢量。 $\mathbf{U}_+$ 与 z 轴夹角就是照明倾角 ϕ ,它与反射界面倾角是等值的。 s 与 r 分别代表激发点与接收点。通过计算得到旅行时场的梯度方向,进而可以得到激发点与接收点入射方向的 $\mathbf{U}_s$ 与 $\mathbf{U}_r$,则可得出:

$$\mathbf{U}_s = (\mathbf{U}_{sx}, \mathbf{U}_{sz}) = \left(\frac{\partial \tau_s}{\partial x}, \frac{\partial \tau_s}{\partial z} \right), \quad (4)$$

$$\mathbf{U}_r = (\mathbf{U}_{rx}, \mathbf{U}_{rz}) = \left(\frac{\partial \tau_r}{\partial x}, \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \right). \quad (5)$$

其中 τ_s 与 τ_r 分别为激发点和接收点的旅行时场,利用 $\mathbf{U}_s$ 与 $\mathbf{U}_r$ 可以得到反射界面倾角:

$$\cos \phi = \frac{\mathbf{U}_+ \cdot \mathbf{Z}}{|\mathbf{U}_+| |\mathbf{Z}|}. \quad (6)$$

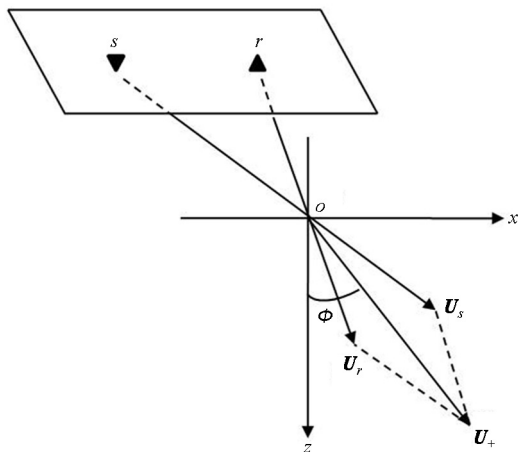


图 2 二维情况下散射点处地震波传播角度示意图解

1.2.2 叠前时间偏移与倾角成像道集

基于单程波方程与稳相点理论,并参照深度偏移相移方法研究叠前时间偏移中走时及振幅的计算^[10,11],若设激发震源是一个时间脉冲,可以得到地层倾角 ϕ 时叠前时间偏移成像结果:

$$I_\phi(x, T) = \sum_\phi \left\{ \frac{Am_r}{Am_s} f(\omega) \sqrt{\omega} \exp\left(-i \frac{\pi}{4}\right) \exp[-i\omega(t_s + t_r)] d\omega \right\}. \quad (7)$$

其中: ϕ 是地层倾角值, x 是成像点对应的地表位置, T 是成像点时间深度, $f(\omega)$ 是单道地震数据在频率—波数域的表达式, ω 是圆频率, i 是虚数单位, Am_s 与 t_s 是炮点至成像点的幅值和走时, Am_r 和 t_r 是求得的检波点至成像点的幅值和走时,在成像过程中利用文中提出的方法计算地层倾角值,将成像结果按倾角排列、部分叠加,最终生成倾角成像道集^[12]。

1.3 真地层倾角与倾角成像区

在倾角成像道集中,横轴代表地层倾角值,纵轴代表时间深度,对于任一成像点而言,最终的成像结果来源于真地层倾角,其他角度的像是没有干涉掉的噪声^[3,5]。在速度正确的情况下,反射波的同相轴形态为拟双曲线形状,并且顶点对应的角度即是真地层倾角,利用此特点,可以在倾角成像道集上确定出地下反射层的真地层倾角,但是在实际应用中由于数据的不规则及速度存在误差,最终的成像结果不仅仅来源于倾角成像道集上真地层倾角位置,真地层倾角附近的部分也对成像结果起到了贡献,文中把倾角成像道集上决定最终成像结果的真地层倾角及其附近的部分称之为倾角成像区,对于任一成像点而言,它的倾角成像区可表达为 $[\phi-\eta_1, \phi+\eta_2]$,其中 ϕ 为真地层倾角值, $\phi-\eta_1$ 为倾角成像区起始倾角值, $\phi+\eta_2$ 为倾角成像区终止倾角值, η_1 与 η_2 分别为倾角变量,当 $\phi-\eta_1$ 与 $\phi+\eta_2$ 选取恰当的时候,成像点处的成像结果趋于稳定并达到极大值^[13,14],利于此特点可以确定倾角成像区的范围。为了阐明文中确定的倾角成像区能够起到对偏移孔径进行优化的作用,用图 3a 所示的地质模型数据进行了说明。该地质模型含有 3 层界面,①与③代表

2 个倾斜层,②代表 1 个水平层,图 3b 代表该地质模型数据对应的倾角成像道集,其中①、②与③分别代表 3 个同相轴,与图 3a 中的地层编号一一对应。下面以地层③为例,在倾角成像道集上,拟双曲线的顶点处对应的角度便是真实的地层倾角,利用上文叙述的方法可以确定倾角成像区为 $[A, B]$,A 与 B 分别是倾角成像区的起始角度与终止角度,常规叠前时间偏移的偏移孔径映射到倾角成像道集上也有类似的成像区带,并且成像区带的起始角度与终止角度分别位于倾角成像道集 0°分界线的两侧,起始角度与终止角度大小一致,均为常规叠前时间偏移给定的地层倾角值,在图 3b 上分别记为 C' 与 C ,由于该角度要比真实的偏大,于是 C' 位于真实地层倾角的左侧,在图 3b 上 $[C', C]$ 部分便是常规叠前时间对应的偏移孔径。通过对比可以看出,最终成像结果对于本文方法而言来源于 $[A, B]$ 部分,而对于常规方法而言则来源于 $[C', C]$ 部分,常规方法为了实现构造的正确成像,将大量的偏移噪声带入了最终成像结果,降低了地震数据的成像品质,而本文方法仅利用 $[A, B]$ 部分进行成像,在保证构造正确成像的同时,避免了大量的偏移噪声进入成像结果,达到了优化叠前偏移孔径的效果^[15]。

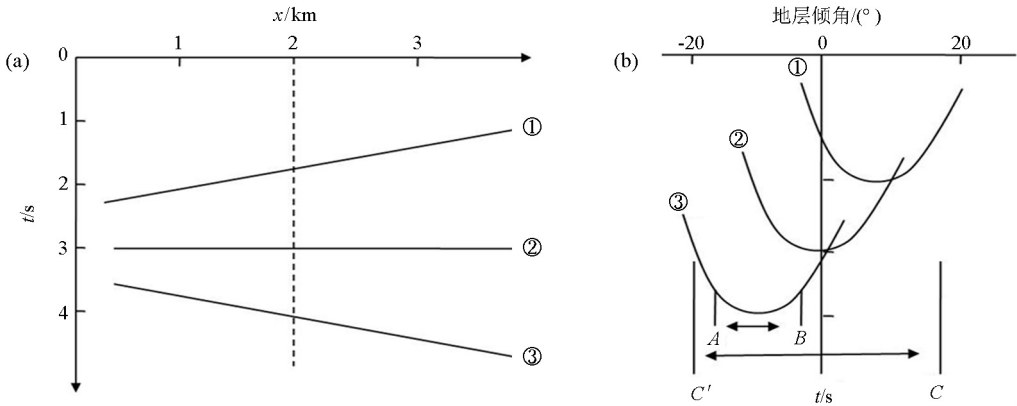


图 3 地质模型(a)与对应的倾角成像道集(b)

1.4 角度域叠前时间偏移处理流程

- 1) 利用偏移速度场,对叠前数据在每个成像点位置求取地震波走时、偏移幅值与倾角大小,并按照倾角排列,部分叠加,得到共反射点位置的倾角道集;
- 2) 针对剖面上若干共反射点位置处的倾角道集,根据双曲顶点的位置拾取出真地层倾角,并确定出倾角成像区;
- 3) 利用已确定的若干共反射点位置的倾角道集对应的倾角成像区,通过插值延拓的方式确定其余共反射点位置的倾角道集对应的倾角成像区;

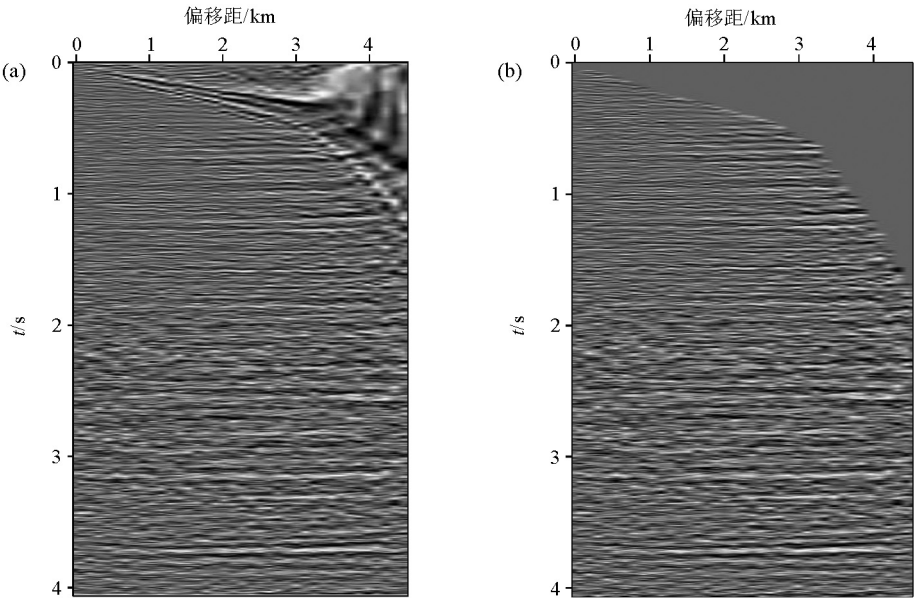
4) 将倾角成像区内的地震幅值进行边界衰减并叠加,得到最终的地震成像剖面。

2 数值试验

文中选取渤海湾盆地南堡凹陷马头营凸起地震数据进行了数值试验,为了进行方法对比,先用共偏移距域叠前时间偏移对该数据进行偏移成像,得到了图 4a 所示的 CRP 道集,然后对中远偏移距动校拉伸造成的畸变进行切除,得到了图 4b 所示的道集,在偏移过程中,为了保证构造的正确成像,偏移

孔径都要比实际需求偏大,过大偏移孔径带来的偏移噪声存在于 CRP 道集上,从近偏移距道集到中远偏移距道集都有分布,常规的道集切除办法无法解决 CRP 道集存在偏移噪声的问题,后期的去噪处理虽然可以对偏移噪声进行压制,但从保幅性角度看,后期去噪对有效信号有一定损害。将所有切除后的 CRP 道集水平叠加起来就得到了最终的叠加剖面,

如图 5 所示。应用本文提出的角度域叠前时间偏移方法,按照文中所述的流程,得到了倾角域成像道集,如图 6a 所示,针对剖面上若干共反射点位置处的倾角道集,根据双曲顶点的位置拾取出真地层倾角,并确定出倾角成像区的范围,图 6a 上左右两条黄色折线包围的部分便是某共反射点位置对应的倾角成像区,将倾角成像区以外的干扰信号切除,得到



a—原始 CRP 道集;b—切除动校拉伸畸变后的 CRP 道集

图 4 CRP 道集切除前后对比

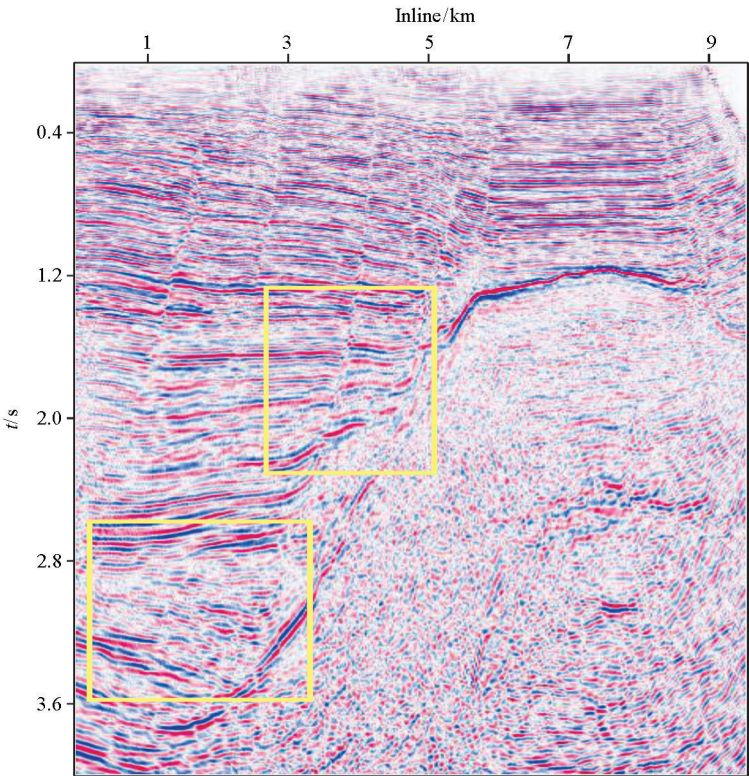
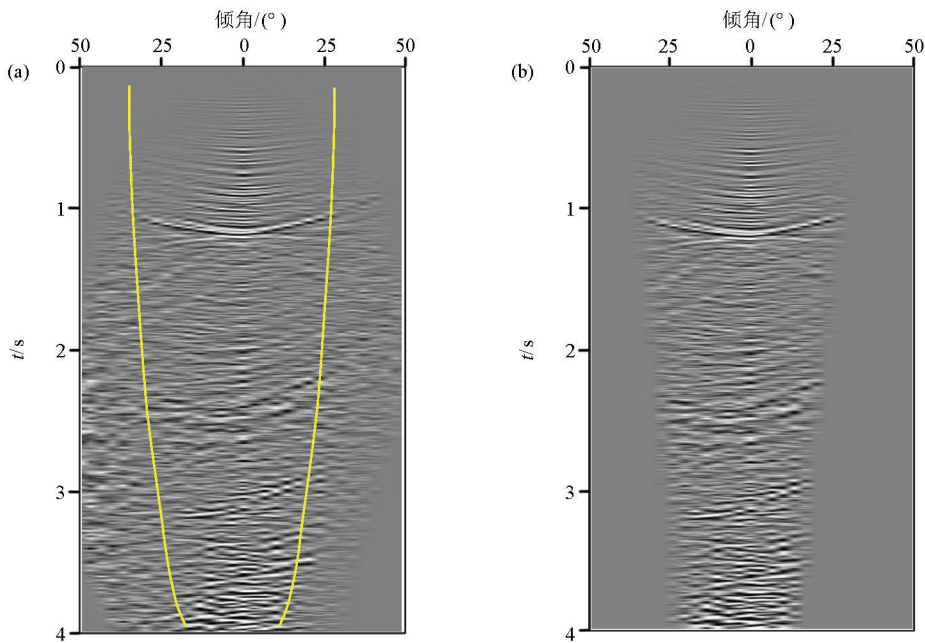


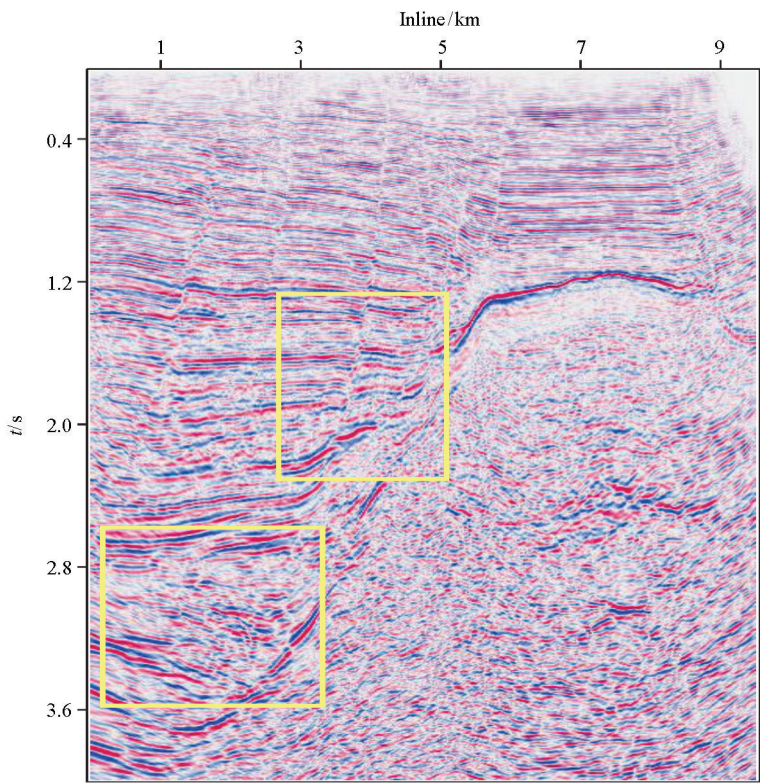
图 5 常规叠前时间偏移剖面

了如图 6b 所示的只保留有效信号的倾角成像道集。图 7 是利用本文方法得到最终的地震成像剖面。为了便于细节对比,在图 5 与图 7 上选取了中浅层与深层两个时窗(黄色矩形框)进行局部对比,图 8 展示的是中浅层时窗局部细节对比,其中图 8a 是常规叠前时间偏移剖面,图 8b 是本文方法得到的剖面,

通过对比可以看出,图 8b 信噪比有所提高,同相轴变得更加光滑、连续性更好,断点收敛更加干脆,地层之间接触关系也更加明确,这表明本文提出的角度域叠前时间偏移方法在控制偏移噪声方面较传统方法有一定优势,对偏移孔径过大引起的偏移噪声压制较好。



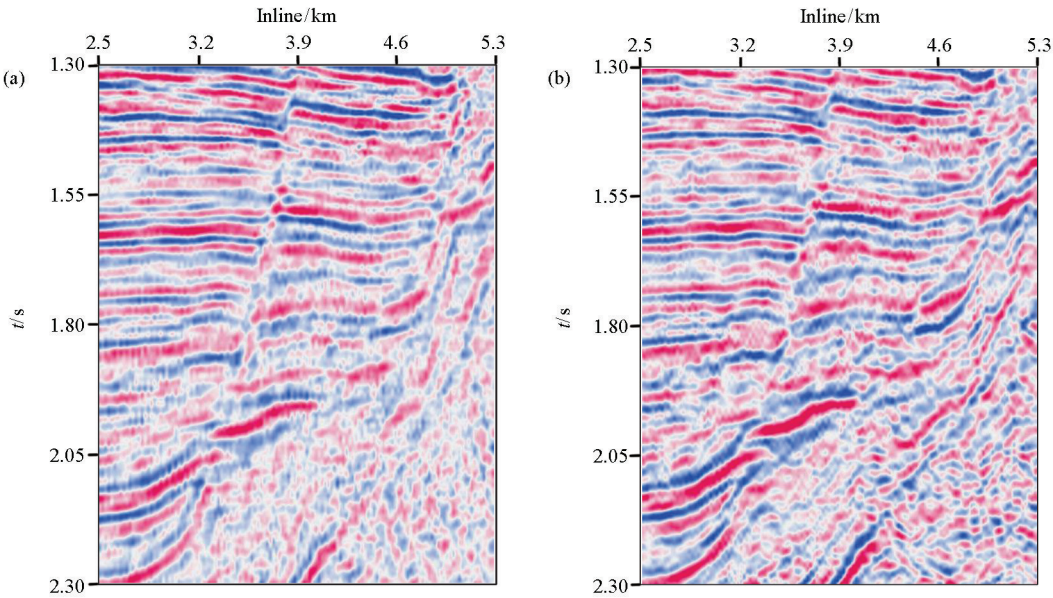
a—倾角成像道集;b—倾角成像区
图 6 倾角成像道集与倾角成像区



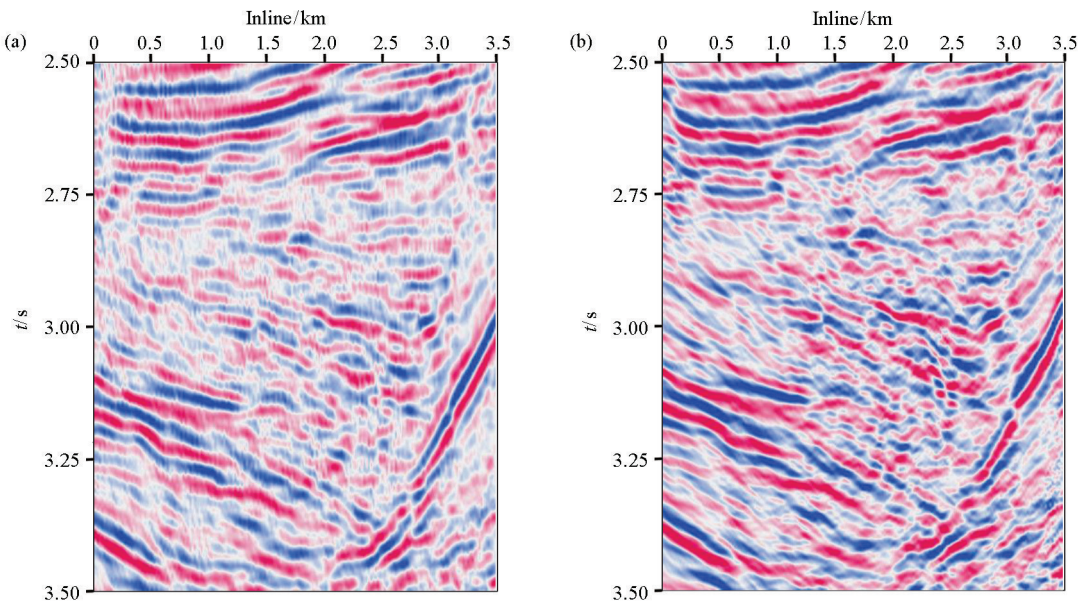
万方数据
图 7 角度域叠前时间偏移剖面

与中浅层相比,深层构造常规叠前时间偏移成像需要更大的偏移孔径,偏移噪声也更加严重。图 9 展示的是深层时窗细节对比,图 9a 是常规叠前时间偏移剖面,信噪比较低,同相轴“毛刺”较多,不利于后期的构造解释与储层预测;图 9b 是本文方法得

到的剖面,信噪比有显著提高,同相轴连续性更好,波组形态也更趋于真实自然,这表明角度域叠前时间偏移方法对深部构造成像的信噪比改善有一定作用。



a—常规叠前时间偏移剖面;b—角度域叠前时间偏移剖面
图 8 不同偏移方法中浅层时窗细节对比



a—常规叠前时间偏移剖面;b—角度域叠前时间偏移剖面
图 9 不同偏移方法深层时窗细节对比

3 结论

文中提出的角度域叠前时间偏移方法,可以直接生成倾角域成像道集,通过倾角成像道集的最优部分叠加,达到偏移孔径优化的效果,避免了叠前

成像过程中孔径不易求取的弊端,也解决了偏移孔径过大带来的偏移噪声导致叠加剖面信噪比降低的问题。由南堡凹陷马头营凸起实际地震资料的应用可以看出,应用本文方法后剖面信噪比得到了一定改善,成像质量得到提高。本文方法对于信噪比较低、偏移噪声大的地区有着广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 刘和年,王建立,吴蕾,等.地层倾角约束自适应孔径叠前时间偏移[J].石油地球物理勘探,2014,49(5):899-903.

[2] Audebert F,Froidevaux P,Racotoarisoa H,et al.Insights into migration in the angle domain[C]//Expanded Abstracts of 72nd SEG Meeting,2002.

[3] Klovov A,Fomel S.Optimal migration aperture for conflicting dips [C]//Expanded Abstracts of 82nd SEG Meeting,2012.

[4] Prucha M,Biondi B,Symes W.Angle-domain common image gathers by wave-equation migration[C]//Expanded Abstracts of 69th SEG Meeting,1999:824-827.

[5] 徐辉.倾角成像道集中反射波和绕射波特征分析及成像质量改善方法研究[J].石油物探,2015,54(2):133-141.

[6] 安勇.一种改进的频率—波数域倾角扫描去噪方法[J].石油地球物理勘探,2008,43(2):210-212.

[7] Bahorich M S,Farmer S L.3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features[J].The Leading Edge,1995,14(10):1053-1058.

[8] 安勇.利用地震波组特征的精细相干扫描方法[J].石油地球物理勘探,2009,44(4):406-408.

[9] 程玖兵,马在田.针对目标的方位保真局部角度域成像方法[J].OGP,2011,46(3):374-385.

[10] Gazdag J.Wave equation migration with the phase-shift method[J].Geophysics,1978,43(7):1342-1351.

[11] Bleistein N,Cohen J K,Stockwell J W.Mathematics of multidimensional seismic imaging,migration, and inversion [M].New York:Springer-Verlag New York Inc.,2001.

[12] 卢宝坤,张剑锋,蒲泊伶.角度域叠前时间偏移:非均匀介质中的单程波方法[J].地球物理学报,2012,55(11):3795-3804.

[13] Sun J.On the limited aperture migration in two dimensions[J].Geophysics,1998,63(3):984-994.

[14] Sun H,Schuster G T.2-D wavepath migration [J].Geophysics,2001,66(5):1528-1537.

[15] 吴吉忠,刘成权,张建坤,等.倾角域自适应孔径叠前时间偏移[J].石油地球物理勘探,2017,52(3):502-508.

An approach to prestack time migration in dip angle domain

WU Ji-Zhong

(Exploration and Development Institute of Jidong Oilfield,Tangshan 063004,China)

Abstract: This paper proposes an approach to prestack time migration in dip angle domain,which can produce common dip-angle imaging gathers directly.Dip angles and imaging area can be determined on these gathers.The final imaging profile is right without migration noise,which could improve signal-to-noise ratio.This scheme was applied to real data of the Matouying structure in Napu sag,and the good results demonstrate that the approach to prestack time migration in dip angle domain has broad application prospects for low signal-to-noise ratio and big noise area.

Key words: prestack time migration;dip angle gather;dip angle;migration aperture;migration noise

(本文编辑:叶佩)