

# 三步法三维叠前拉东投影偏移

黄新武<sup>1)</sup> 吴律<sup>2)</sup> 牛滨华<sup>1)</sup> 罗大清<sup>3)</sup>

(1)中国地质大学,北京,100083 2)石油大学,北京,102200;  
3)中石化股份有限公司发展计划部,北京,100029)

**摘要** 对地下地质构造正确成像是地震勘探的最终目的,由于三维地震资料采集不可能都沿垂直构造走向的方向进行,这就为地震资料的三维处理带来了许多困难。本文将三维叠后拉东投影偏移思想应用于三维叠前处理,提出了三维叠前投影偏移算法。利用拉东投影变换的原理,将整个三维叠前数据体投影到一系列各方向的径向线上,各方位角的构造都包含在其中某条或多条径向剖面上。投影完成后,形成一系列的独立的二维叠前测线,于是可采用二维叠前偏移成像方法来实现各径向线的叠前偏移,当各径向剖面偏移完成后,在切片上进行反投影,从而最终形成三维叠前偏移结果。实际应用表明,用该方法进行三维叠前深度偏移时,深度偏移剖面对横向分辨率有所提高,对陡地层和小断层的成像效果有所改善。

**关键词** 地震偏移 拉东投影 三步法 径向剖面 反投影

## Three-Pass 3-D Pre-Stack Migration by Radon Projection

HUANG Xinwu<sup>1)</sup> WU Lu<sup>2)</sup> NIU Binhua<sup>1)</sup> LUO Daqing<sup>3)</sup>

(1)China University of Geosciences, Beijing, 100083; 2)University of Petroleum, Beijing, 102200;  
3)China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing, 100029)

**Abstract** The main aim of seismic exploration is to correctly image the underground structure. As the azimuth of data collection is not always vertical or parallel to the structure trend, there are many difficulties in 3-D seismic processing, especially in 3-D pre-stack processing. A new imaging method, i. e., Radon projection 3-D pre-stack migration, is presented to solve this problem. It extends the 3-D migration by Radon projection to pre-stack imaging. The full 3-D pre-stack data volume is projected onto a series of pre-stack radial lines, which migrate with common 2-D pre-stack migration. Then, the reverse projection on time slice is applied to getting the 3-D migrating volume. A real data example shows that this method can improve horizontal resolution of imaging section and get better images for steep formations and small faults.

**Key words** seismic migration Radon Projection three-pass radial section reverse projection

## 1 引言

对地下地质构造正确成像是地震勘探的最终目的,因而地震偏移成像成为地震资料数字处理中的重要环节。为了对地下复杂构造正确成像,地震偏移成像技术已逐渐由二维发展到三维,由叠后处理发展到叠前处理,并在实际资料处理中得到了广泛和成功的应用。

目前大部分处理模块以二维为前提,并假设三维资料的纵测线或横测线与地下地质构造的走向垂

直或平行。由于三维地震资料采集不可能都沿垂直构造走向的方向进行,这就为地震资料的三维处理带来了许多困难。

Biondi等(1994)曾提出了一种新的部分偏移算子——方位角校正,即AMO法。该方法通过旋转方位角并修改三维叠前数据的炮检距来重新组合三维叠前数据。Biondi等(1995,1996)针对该共方位角数据体提出了相应的向下延拓方法,对一系列的具有共方位角的平行线做三维叠前Stolt相移法偏移。Biondi等提出的AMO算子只能把三维叠前数

本文由国家“863”青年基金课题“滩浅海地区高精度静校正方法研究”(2001AA616010)和国家自然科学基金项目“T1介质中与自由表面相关多次波的产生与衰减”(49974028)资助。

第一作者:黄新武,1972年生,从事地震波成像、多次波压制、近地表校正方法研究,E-mail:huangxw@cugb.edu.cn。

据体改变为共方位角以形成单一方位角的数据体,它不能保证方位角与地下所在地质构造走向相垂直或平行。Pan等(1989,1991)提出在垂直不均匀介质中精确的两步法全倾角(大于 $90^\circ$ )的三维偏移。对于垂向速度变化的介质,他们推导出一个精确的两步法全倾角三维偏移算子。Pan等(1989,1992,1993)又提出利用投影对二维真倾角剖面进行有效的三维滤波,利用投影方法把三维数据体转化为径向剖面,每个径向剖面只含有沿径向倾斜的能量。这样可以用任何二维时间偏移算法对径向剖面进行偏移,而不受反射面方位角的有害影响。而后在时间切片上进行反投影,从而形成三维偏移结果。徐基祥等(1996,1998)应用拉东投影变换的思想,实现了一种三维快速投影时间偏移方法,并处理了实际资料。

目前地震资料处理由传统的时间偏移转向深度成像是一种发展方向。将三维的优势和叠前深度偏移的优势结合起来,使得三维叠前深度偏移成为复杂构造准确成像的最理想的方法。但它要求偏移速度场有相当高的精度,而如何精确地确定叠前深度偏移速度场,已成为三维叠前深度偏移成败的关键。也正是因为这一点,使得三维叠前深度偏移计算量巨大,实际的三维叠前深度偏移成像工作也一般在并行机上进行。

笔者提出了一种新的实现三维叠前偏移成像的方法,该方法利用三维拉东投影将整个三维叠前数据体投影到一系列各方向的径向线上,各方位角的构造都包含在其中某条或多条径向剖面上。这样就可将三维叠前成像问题转化为一组二维叠前成像问题来解决,可完成三维叠前时间和深度域偏移成像,从而使得三维叠前深度偏移成像可以在中、小型计算机上进行。

## 2 方法和原理

应用拉东投影,本偏移成像方法由三步构成:首先将三维叠前数据体投影为一组径向二维叠前数据,然后对各径向数据进行二维叠前偏移成像,最后将径向偏移结果反投影回三维空间,从而最终获得三维叠前投影偏移结果。主要包括NMO校正、共炮点道集的拉东投影变换、共径向接收点道集的拉东投影变换、逆NMO校正、二维叠前偏移和二维径向偏移剖面的反拉东投影六部分。下面详细介绍三维叠前拉东投影偏移的方法原理。

### 2.1 部分正常时差校正(NMO)

正投影前对叠前道集资料进行部分NMO校正,即对所有的道集均用同一个动校正速度来进行部分NMO校正,使道集内同相轴曲率减小,避免正投影过程中产生较强的能量拉伸和端点效应。

### 2.2 共炮点道集(CSP)的拉东正投影

将经过部分NMO校正后的三维叠前数据重新选排成共炮点道集数据,然后利用三维叠后投影思想,对每个共炮点道集在时间切片上进行三维叠后投影。共炮点道集切片投影示意图如图1所示,其中S为炮点,矩形 $G_1, G_2, G_3, G_4$ 代表由接收该炮记录的检波器所构成的接收区域; $O(x_0, y_0)$ 为极坐标系的原点; $G_r$ 为投影后极坐标系下径向线上的径点。设想在 $G_r$ 处有一个检波点接收由炮点S激发所产生的地震波,根据时间域拉东投影变换原理, $G_r$ 处记录 $u_{G_r}(x_s, y_s, r_{G_r}, \theta_{G_r}, t)$ 可表示如下:

$$u_{G_r}(x_s, y_s, r_{G_r}, \theta_{G_r}, t) = \iint_{G_1, G_2, G_3, G_4} \delta(x_s - x_g, y_s - y_g, t) \delta[(x_g - x_0) \cos \theta_{G_r} + (y_g - y_0) \sin \theta_{G_r} - r_{G_r}] dx_g dy_g \quad (1)$$

其中 $\theta_{G_r}$ 为径向接收点 $G_r$ 所在径向线的方位角; $d(x_s, y_s, x_g, y_g, t)$ 表示由炮点S激发的共炮点道集数据; $x_g, y_g$ 为道集内各检波点的坐标; $r_{G_r}$ 为极坐标系下径向接收点 $G_r$ 到极坐标原点 $O(x_0, y_0)$ 的距离。双重积分的区域为矩形区域 $G_1, G_2, G_3, G_4$ 。

当对所有的共炮点道集数据均做上述投影过程后,所得的叠前数据体将如图2所示(在某一时间切片上)。

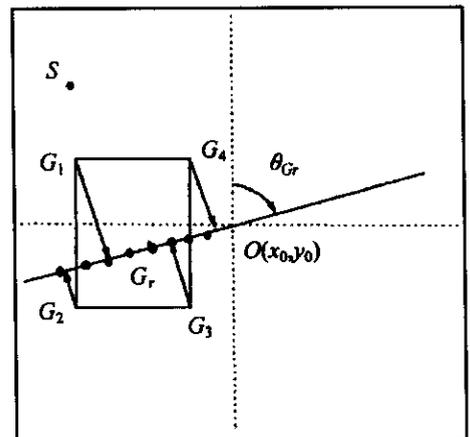


图1 共炮点道集切片投影示意图

Fig. 1 Projection of CSP on time slice

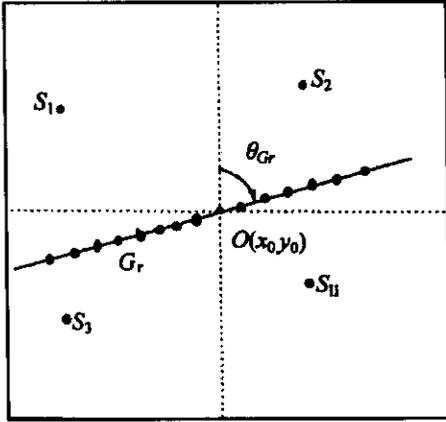


图 2 共炮点道集切片投影结果

Fig. 2 Data after projection of CSP on time slice

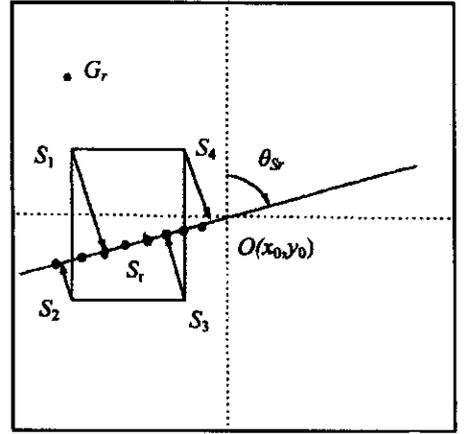


图 3 共径向接收点道集切片投影示意图

Fig. 3 Projection of CRP on time slice

2.3 共径向接收点道集(CRP)的拉东正投影

当对所有的共炮点道集数据都进行上述投影后,则对于径向线上的某一个接收点 \$G\_r\$,一定会同时接收到若干个炮点激发的记录。根据炮点和接收点互换原理,可将径向点 \$G\_r\$ 接收的多个炮点的记录看成是由 \$G\_r\$ 点激发,而在对应的各炮点处接收的记录。这样,可将经过共炮点道集投影后的数据体重新选排成共径向接收点 \$G\_r\$ 道集,然后就可进行三维叠后投影。在某时间切片上,投影示意图如图 3 所示。投影后,由径向炮点 \$S\$ 激发而在共径向接收点处接收的记录可用公式(2)表示如下:

$$u_{S_r, G_r}(r_{S_r}, r_{G_r}, \theta_{S_r}, \theta_{G_r}, t) = \iint u_{G_r}(x_s, y_s, r_{G_r}, \theta_{G_r}, t) \delta[(x_s - x_0) \cos \theta_{S_r} + (y_s - y_0) \sin \theta_{S_r} - r_{S_r}] dx_s dy_s \quad (2)$$

其中 \$\theta\_{S\_r}\$ 为径向炮点 \$S\_r\$ 所在径向线的方位角, \$u\_{G\_r}(x\_s, y\_s, r\_{G\_r}, t)\$ 表示经过共炮点道集投影后在径向接收点 \$G\_r\$ 处接收的共径向接收点道集记录。\$x\_s, y\_s\$ 为道集内各炮点的坐标, \$r\_{S\_r}\$ 为极坐标系下径向炮点 \$S\_r\$ 到极坐标原点 \$O(x\_0, y\_0)\$ 的距离。双重积分的区域为矩形区域 \$S\_1 S\_2 S\_3 S\_4\$。

由上述共炮点道集投影和共径向接收点道集投影可知,当共径向接收点 \$G\_r\$ 的方位角 \$\theta\_{G\_r}\$ 与径向炮点 \$S\_r\$ 所在径向线的方位角 \$\theta\_{S\_r}\$ 相等时,径向炮点 \$S\_r\$ 将与径向接收点 \$G\_r\$ 位于同一条径向线上,从而就形成了二维径向叠前数据。根据这一点,在进行共径向接收点道集投影时,通过使方位角 \$\theta\_{S\_r}\$ 与方位角 \$\theta\_{G\_r}\$ 相等,就可获得一系列经过投影后的二维叠前数

据。由此公式(2)可改写为:

$$u_{S_r, G_r}(r_{S_r}, r_{G_r}, \theta_{G_r}, t) = \iint u_{G_r}(x_s, y_s, r_{G_r}, \theta_{G_r}, t) \delta[(x_s - x_0) \cos \theta_{G_r} + (y_s - y_0) \sin \theta_{G_r} - r_{S_r}] dx_s dy_s \quad (3)$$

2.4 逆 NMO 校正

经过上述两次投影过程后,可得到一系列径向二维叠前数据(在时间切片上如图 4 所示)。将此二维叠前数据重新选排成共中心点道集,然后利用前面的部分 NMO 校正时的动校正速度作逆 NMO 校正,这样就可获得一系列径向炮点和径向接收点位于同一径向线的二维叠前共中心点道集数据。

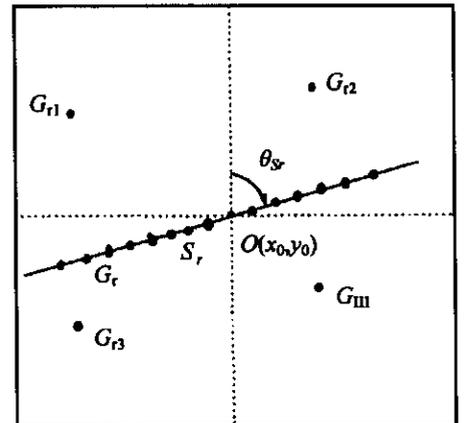


图 4 共径向接收点道集切片投影结果

Fig. 4 Data after projection of CSP on time slice

2.5 径向线的二维叠前偏移

在获得了一系列径向二维叠前数据后,就可利用现有的标准二维叠前处理模块进行信号增强、滤

波和偏移成像等处理,既可实现时间偏移,也可实现深度偏移。

## 2.6 径向偏移剖面的反投影

对各条径向线进行二维叠前偏移成像后,就可获得一系列的径向偏移剖面,然后在每一时间(或深度)切片上进行反拉东投影变换,将柱坐标系 $(r, \theta, t)$ 中的值变换回直角坐标系 $(x, y, t)$ 中,从而最终得到三维叠前偏移数据体 $m(x, y, t)$ 。与拉东正变换相类似,时间(或深度)切片上的拉东反投影变换定义为:

$$m(x, y, t) = \int R(r, \theta_r, t) \delta[(x - x_0) \cos \theta_r + (y - y_0) \sin \theta_r - r] d\theta_r \quad (4)$$

$R(r, \theta_r, t)$ 是上步中二维叠前偏移后方位角为 $\theta_r$ 的真倾角径向剖面的某一切片。实际上可以把反变换看成是将真倾角方向的能量向视倾角方向反投影。

## 3 实际应用

首先,应用三维叠前投影偏移的方法对中国东部地区的某块三维资料进行了三维叠前时间偏移试处理,该三维资料面积约为 $12 \text{ km}^2$ 。图5-a为其中的一条主测线的一步法三维叠后时间偏移剖面;图5-b是该主测线的三维叠前投影偏移剖面。比较2个偏移剖面,从整体上而言,投影偏移的信噪比要高,在剖面的左边一步法存在边界反射,而投影偏移则没有;在图5-a中剖面左边的中深层,对于两方框中的斜层,一步法偏移收敛的效果也不如投影偏移好;在图5-b中剖面右边的中深层,对于方框中的三组斜层,投影偏移成像效果更好,从上到下地层产状比较协调;此外一步法偏移深层画弧也比较严重。

其次,应用三维叠前投影偏移的方法对中国西部地区的某块三维资料(以下称工区W)进行了三维叠前深度偏移试处理。该工区野外三维地震满覆盖面积为 $51 \text{ km}^2$ 。该工区是西部某区的一个沉积拗陷,挤压型逆掩断层发育,地震资料的信噪比低。从常规时间偏移剖面上看,侏罗系和三叠系为一短轴背斜,有断距较大的逆断层存在,背斜构造顶部小断层发育,但断层的位置和走向不清,三叠系下伏地层反射不明显。如图6所示为一步法三维叠后时间偏移后的三维数据体。

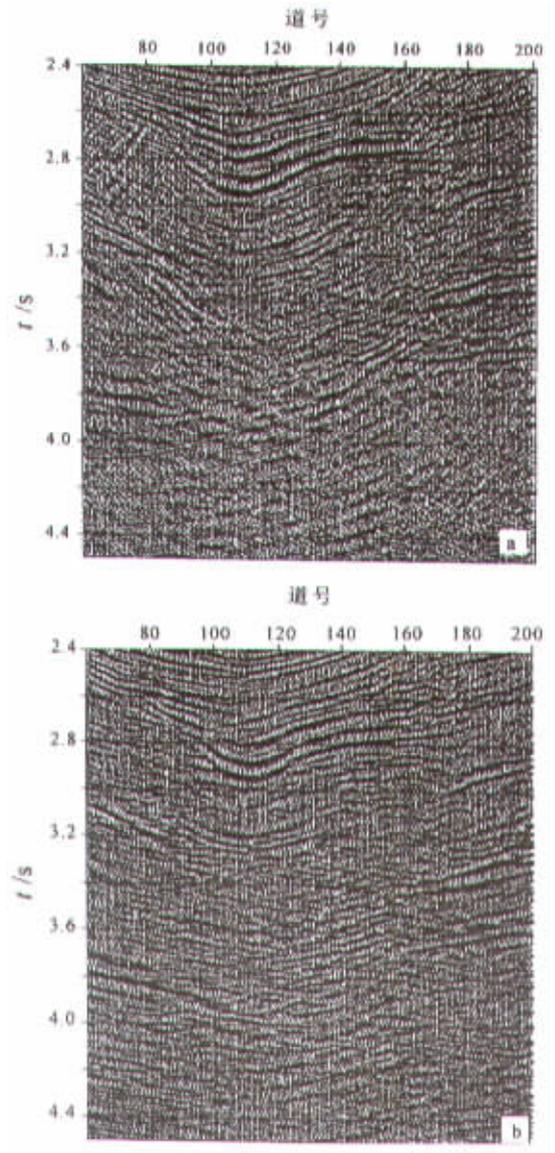


图5 一步法时间偏移(a)与投影法时间偏移(b)比较

Fig. 5 Comparison of one-pass 3d time migration (a) and projection time migration (b)

根据三维叠前投影的方法原理,得到了一系列经过投影后的径向二维叠前数据。在本次试处理中,径向线条数为INLINE线数 $N_x$ 与CROSSLINE数 $N_y$ 之和,即有方位角间隔 $\Delta\theta = \pi / (N_x + N_y)$ 。对于每条径向二维叠前数据进行二维速度分析和速度建模,当深度-速度模型足够精确时,然后使用Kirchhoff积分法实现二维叠前深度偏移。

图7为零度方位角的投影二维叠前径向线的叠前深度偏移剖面。可知在深度偏移上,地层的不整合接触关系非常清晰,逆断层和背斜顶部的小断层的成像也很清楚。

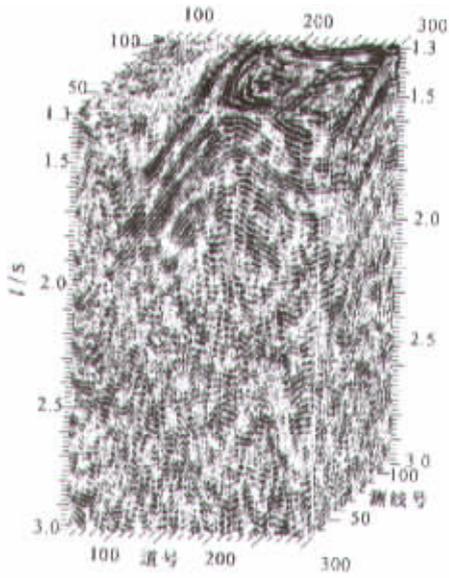


图 6 工区 W 的一步法三维叠—时间偏移数据体  
Fig. 6 One-pass 3D post-stack migrated data of Project W

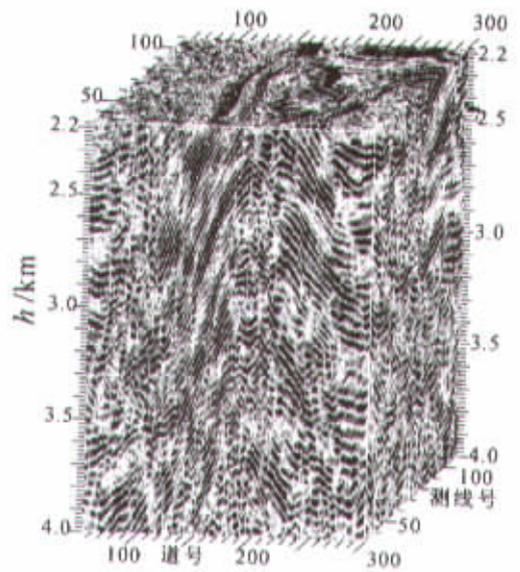


图 8 反投影后得到的三维叠前深度偏移数据体  
Fig. 8 Pre-stack depth migrated data after reverse projection

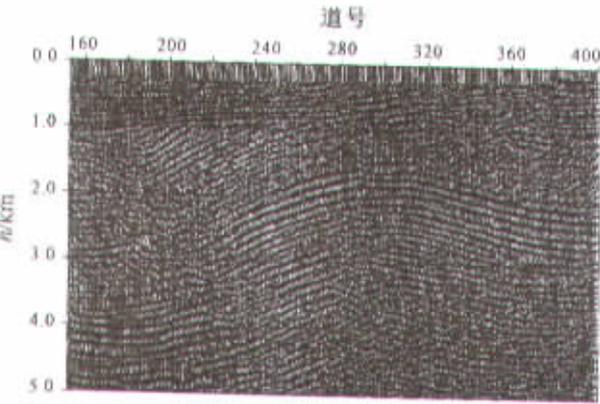


图 7 方位角为零度的投影径向线叠前深度偏移剖面  
Fig. 7 pre-stack depth migration of the radial line azimuth 0

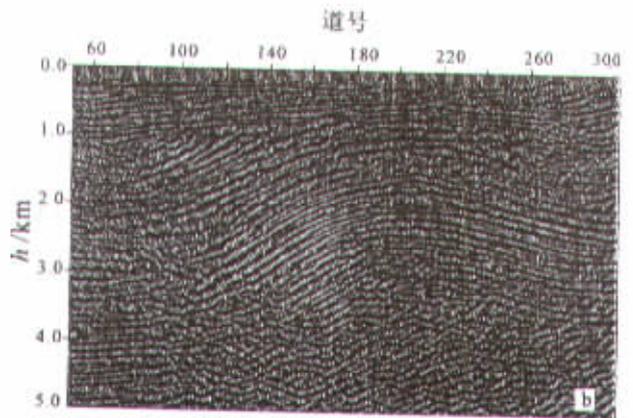
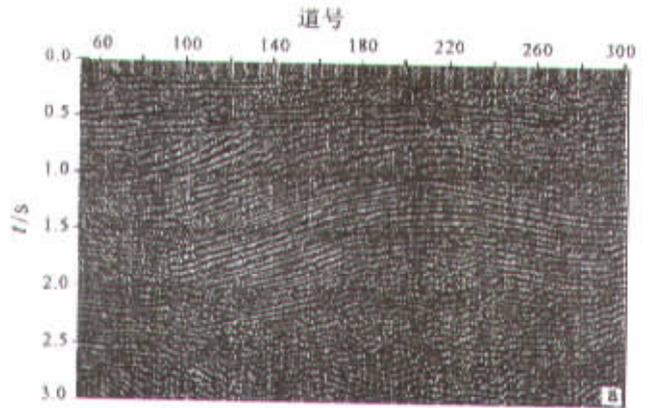


图 9 主测线 51 的一步法时间偏移(a)与投影法深度偏移(b)比较

Fig. 9 Comparison of one-pass 3d time migration and projection depth migration

对所有的二维径向叠前数据都做完二维叠前深度偏移,然后利用三维叠后反投影,即可获得偏移后的三维叠前深度偏移数据体(图 8)。

图 9 分别为工区 W 主测线 51 的一步法三维叠后时间偏移剖面与三维叠前投影深度偏移剖面。比较发现,深度偏移的成像效果有所改善,地层的不整合接触关系更清楚,横向分辨率有所提高,背斜顶部的小断层的断点更清晰,有利于提高地震资料解释的准确性。

#### 4 结论与认识

在三维叠后投影的基础上,实现了三维叠前投

影偏移方法。对投影变换的一系列的径向二维叠前数据体,进行二维叠前偏移成像,当各径向剖面偏移完成后,再将柱坐标系下的数据体反投影回直角坐标系,从而最终形成三维叠前偏移结果。本方法的实质是将三维叠前成像问题转化为一系列的二维叠前成像问题来解决,这样就可降低速度分析和速度建模的难度,减小深度偏移的迭代次数和计算量,从而使得三维叠前资料的偏移成像可以在中小型计算机上进行,处理费用大大降低,具有很好的实用价值。

本文是首次用该方法实现了实际资料的三维叠前时间和深度偏移,实际应用表明,深度偏移剖面对横向分辨率有所提高,对陡地层和小断层的成像效果有所改善。

目前,该方法只是进行了一些试处理工作,取得了一定的效果,作为一种非常有实际应用价值的方法,其中的一些问题还有待于更进一步的深入研究和完善。

致谢 论文中所用实际资料由中国石油天然气集团公司提供。感谢国家“863”青年基金课题(2001AA616010)和国家自然科学基金课题(49974028)的资助。

### 参 考 文 献

吴律. 1990.  $\tau$ - $p$  变换及其应用. 北京: 石油工业出版社.  
徐基祥, 吴律. 1996. 双拉东变换二维叠前偏移. 石油地球物理勘探, 31(6): 755~770.  
徐基祥, 吴律. 1998. 拟真三维投影偏移. 石油地球物理勘探, 33

(4): 453~466.

- B Biondi, N Chemingui. 1994. Transformation of 3-D prestack data by azimuth moveout (AMO). 64<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg : Soc. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1541~1544.  
B Biondi, G Palacharla. 1995. 3-D prestack depth migration of common - azimuth data. 65<sup>th</sup> Annual Internat. Mtg. : Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1197~1200.  
B Biondi, G Palacharla. 1996. 3-D prestack migration of common-azimuth data. Geophysics 61 : 1822~1832.  
L Wu, J Xu. 1996. 3-D migration by Radon projection. 66<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg : Soc. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1111~1114.  
N Pan, W S French. 1989. Generalized two-pass three-dimensional migration for imaging steep dips in vertically inhomogeneous media. Geophysics 54 : 544~554.  
N Pan, L Sun, J Cramer et al. 1989. Nonrecursive approach for exact 2-D prestack migration in vertically inhomogeneous media via double p-tau transform. 59<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg : Soc. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1272.  
N Pan, W T Perkins, W S French. 1991. Exact two-pass full-dip (>90 degrees) 3-D migration for vertically inhomogeneous media. 61st Ann. Internat. Mtg : Soc. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1160~1163.  
N Pan, W T Perkins, W S French et al. 1992. Exact and efficient three-pass 3-D time migration for vertically inhomogeneous media. 54<sup>th</sup> Mtg. : Eur. Assn. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 282~283.  
N Pan, W T Perkins, W Lynn et al. 1992. Efficient 3-D filtering using projected 2-D true-dip sections. 62nd Ann. Internat. Mtg : Soc. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1042~1045.  
N Pan, C Bellinger, W Lynn. 1993. Radial projection 3-D time migration: Theory and case history. 55<sup>th</sup> Mtg. : Eur. Assn. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, Session : C 043.