文章编号:1673-5005(2009)05-0050-06

基于虚拟偏移距方法的转换波保幅叠前偏移

张丽艳,刘 洋,陈小宏

(中国石油大学 CNPC 物探重点实验室,北京 102249)

摘要:以单程波方程为基础推导转换波保幅的虚拟偏移距(POM)方法的权函数,在 POM 道集映射过程中直接实现 保幅。保幅的 POM 叠前偏移方法不但简化了转换波的处理流程,提高了覆盖次数和信噪比,而且在偏移过程中体现 出来了对振幅的定量分析。结果表明,无论是水平层还是大倾角地层转换波的 POM 法都能使构造进行准确成像,并 且使偏移后的振幅体现反射系数的信息。

Converted wave amplitude-preserving prestack migration by pseudo-offset migration

ZHANG Li-yan, LIU Yang, CHEN Xiao-hong

(CNPC Geophysical Exploration Key Laboratory in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Converted-wave amplitude-preserving weighting function by pseudo-offset migration (POM) was deducted based on single way wave equation, and amplitude-preserving was performed in the mapping POM gathers directly. Amplitude-preserving POM prestack migration not only simplifies conventional processing procedure and improves fold and signal-to-noise ratio, but also achieves amplitude quantitative analysis during migration. The results show that the converted-wave POM can accurately image the structure for whether flat layers or dipping layers, meanwhile the reflectivity could be indicated by the amplitude peak value of migrated section.

Key words; amplitude-preserving; converted wave; pseudo-offset migration (POM); prestack migration

由于转换波勘探具有成本低、获取地下信息量 大的特点,已逐渐成为地震勘探领域研究的热点。 在纵波弱波阻抗界面和气云带影响的深层界面,可 以利用转换波勘探解决成像问题,所以转换波成像 已越来越受到地球物理学界的重视^[1]。随着 AVO 技术的发展和要求的提高,使得在地震成像的过程 中不但需要进行构造成像,而且要求振幅保真。保 幅叠前偏移指在进行构造偏移的同时消除地震波传 播过程中的几何扩散等因素对地震数据的影响,使 偏移后的振幅反映反射系数的信息,而反射系数是 利用地震资料分析岩石物理参数的基础。所以,保 幅偏移对于 AVO 和偏移后的振幅解释有特别的意 义^[2]。目前国内外已有一些学者研究了保幅叠前 偏移方法^[3-12],但都是针对纵波的。虽然转换波叠 前偏移方法甚多^[13-17],但都是非保幅的。为此,笔 者推导转换波共炮检距的保幅偏移的权函数,并在 此基础上实现基于虚拟偏移距偏移(pseudo offset migration,POM)方法的转换波保幅叠前偏移。

1 POM 的基本原理

POM 方法是 Wang and Pham (2001) 提出的一 种不同于常规叠前偏移的转换波偏移方法,它使转 换波处理流程得以简化。POM 通过一种映射关系 将输入道集转化为真正的共成像点道集,具有很高 的覆盖次数和信噪比,从而使得速度分析能得到更 准确的偏移速度。POM 方法是建立在 Kirchhoff 叠

基金项目:中国石油天然气集团公司科技开发项目(06B10501)

作者简介:张丽艳(1980-),女(汉族),黑龙江绥化人,博士研究生,从事多波多分量资料处理和地震成像等方面研究。

收稿日期:2008-12-06

前偏移基础之上,它们的实现主要分两步:第一是把 输入地震道集映射到共转换散射点(CCSP)道集;第 二是对共 CCSP 道集进行求和来完成转换波叠前偏 移。

POM 方法在映射过程中满足的条件是总旅行 时不变和 snell 定律。如图 1 所示。





Fig. 1 Geometry of the pseudo-offset method

对于给定的散射点根据其实现的条件映射出相 应的虚拟偏移距,从而形成 POM 道集,最终在此基 础上实现叠前偏移和速度分析。POM 道集的旅行 时方程是由双平方根方程来控制的。文献[15]中 已经给出了水平层介质 POM 道集不依赖于偏移的 初始速度,倾斜层的 POM 道集依赖于模型的初始参 数。

2 保幅偏移的原理

2.1 纵波 POM 保幅偏移的原理

2000 年 Zhang Yu 给出了纵波单程波方程通过 对波场的重新分解最后得出保幅偏移的公式,同时 也证明了波动方程保幅偏移的新近解与 Kirchhoff 保幅叠前偏移是等价的^[67]。根据 Geiger 提出的近 似^[11],共炮检距保幅偏移的权函数为

$$W_{\rm co} \approx \frac{4t_{2i}}{t} \sqrt{1 - \frac{(2h)^2}{(\tilde{c}_0 t)^2}}.$$
 (1)

式中,*t*_{2i} 为虚拟深度对应的垂直双程旅行时;*t* 为总旅行时;*h* 为半炮检距;*c*₀ 为速度。式(1) 是一简化的公式,是基于实用的基础之上的。

纵波的 POM 方法的保幅叠前偏移的公式主要 通过权函数在映射后的 POM 道集上进行补偿。通用 的权函数可以作为输入道集、映射的 POM 道集、输 出道集,表示为

式中,h 为炮检距;t 为输入双程旅行时;h_P 为虚拟偏 移距;k₁,k₂ 分别为系数;a_i(i = 1,…,8) 为指数,可 以为任何的正实数(包括零,零是指有效地消除某 一特定域的权)或者某个域内其他参数的函数。在 某个道集域内进行偏移时,应通过调节该道集域内 的指数以得到最佳的权函数。

2.2 转换波 POM 保幅偏移的原理

由于转换波 POM 保幅偏移是建立在转换波共 炮检距偏移的基础之上,而共炮检距偏移的权函数 是共炮偏移权函数和共检波点偏移权函数之和,所 以首先推导转换波共炮保幅偏移公式。

根据波场延拓成像,应用反褶积成像条件:

$$R(x_{\rm S},x_{\rm I}) = \frac{1}{2\pi} \int d\omega \frac{P_{\rm L}(x_{\rm I},x_{\rm G},\omega)}{P_{\rm D}(x_{\rm G},x_{\rm I},\omega)}.$$
 (3)

式中, $R(x_s, x_1)$ 为成像点的反射系数; $P_U(x_1, x_c, \omega)$ 为上行波; $P_D(x_s, x_1, \omega)$ 为下行波;下标"S"表示炮点,"G"表示检波点,"I"表示成像点。

 $P_{p}(x_{s}, x_{l}, \omega)$ 分别满足单程波方程^[10-11]:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial z} - \Lambda - \Gamma\right) P_{U}(x_{1}, x_{G}, \omega) = 0, \\ P_{U}(x_{1}, 0; x_{G}, \omega) = P(x_{S}, x_{G}, \omega); \\ \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial z} + \Lambda - \Gamma\right) P_{D}(x_{S}, x_{1}, \omega) = 0, \\ P_{U}(x_{C}, 0; x_{U}, \omega) = \delta(x_{U} - x_{C}). \end{cases}$$
(4)

式中, $P(x_s, x_c, \omega)$ 为观测到的波场;算子 $\Lambda \to \Gamma$ 是速度的函数。

用 Kirchhoff-Helmholtz 积分来求出共炮偏移公 式(3)的渐近解表达式。公式(3)中 $P_{\rm D}(x_{\rm S}, x_{\rm I}, \omega)$ 用 2-D 正向传播的自由空间的 Green 函数 \vec{G} 表示为^[11]

$$P_{\rm D}(x_{\rm S}, x_{\rm I}, \omega) = \vec{G}(x_{\rm S}, x_{\rm I}, \omega) \approx \frac{\sqrt{2\pi\sigma_{\rm SI}}}{\sqrt{i\omega}} \frac{\exp(-i\omega r_{\rm SI}/v_{\rm P})}{4\pi r_{\rm SI}}.$$
(6)

式中, σ 表示球面扩散; r_{sl} 为成像点到炮点的距离。 $P_{u}(x_{l}, x_{c}, \omega)$ 用 Rayleigh II 积分重构为

$$P_{U}(x_{1}, x_{C}, \omega) = 2 \int_{x_{g}} dx P(x_{S}, x_{C}, \omega) \frac{\partial}{\partial n_{C}^{*}} \overleftarrow{G}(x_{1}, x_{C}, \omega).$$
(7)

公式(7)中的2-D 反向传播的自由空间 Green 函数 G 对于转换波可表示为

$$\overline{G}(x_1, x_G, \omega) \approx \frac{\sqrt{2\pi\sigma_{1G}}}{\sqrt{-i\omega}} \frac{\exp(i\omega r_{1G}/v_{SV})}{4\pi r_{1G}}.$$
(8)

式中,r_{ic}为从接收点到成像点的距离。在的法向导数为

$$R(x_{\rm S}, x_{\rm I}) = \frac{2}{v_{\rm SV}} \int_{x_{\rm C}} dx \left\{ \frac{\sqrt{2\pi\sigma_{\rm SI}}}{\sqrt{2\pi\sigma_{\rm IC}}} \cos\theta_{\rm IC} \right\} \times 2\operatorname{Re}\left[\frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\infty} d\omega(\omega) P(x_{\rm S}, x_{\rm G}, \omega) \exp\left(\mathrm{i}\omega \left(\frac{r_{\rm SI}}{v_{\rm P}} + \frac{r_{\rm IC}}{v_{\rm SV}} \right) \right) \right].$$
(10)

由于 2-D 共炮检距偏移的权函数是共炮偏移权 函数和共检波点偏移权函数之和,所以转换波的 2-D 共炮检距偏移公式为

 $R(x_{1},\xi_{co}) = 2 \int_{\xi_{co}} dx \left\{ \frac{\sqrt{2\pi\sigma_{IS}}}{\sqrt{2\pi\sigma_{GI}}} \frac{\cos\theta_{GI}}{v_{P}} + \frac{\sqrt{2\pi\sigma_{GI}}}{\sqrt{2\pi\sigma_{IS}}} \frac{\cos\theta_{IS}}{v_{SV}} \right\} \times 2 \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\infty} d\omega(\omega) P(x_{g},x_{S},\omega) \exp \left(i\omega \left(\frac{r_{SI}}{v_{P}} + \frac{r_{IC}}{v_{SV}} \right) \right) \right].$

利用纵波和横波的走时 t, 和 tg 来表示,可得到 转换波保幅偏移共炮检距权函数:

 $W_{\rm CO} = \frac{t_{2i} \sqrt{t_{\rm s}}}{v_{\rm SV} t_{\rm g} \sqrt{t_{\rm g}}} + \frac{t_{2i} \sqrt{t_{\rm g}}}{v_{\rm p} t_{\rm s} \sqrt{t_{\rm s}}} = t_{2i} \sqrt{t_{\rm s} t_{\rm g}} \left(\frac{1}{v_{\rm SV} t_{\rm g}^2} + \frac{1}{v_{\rm p} t_{\rm s}^2}\right).$

转换波的 POM 法的保幅叠前偏移是建立在共

炮检距偏移的基础之上的。由于转换波共炮检距偏移公式速度不同,不能简化成以共炮检距为显式参数的形式,也就是在求权函数中 $t_i \, \alpha t_g$ 间接地体现 了炮检距h的信息。所以保幅的 POM 方法的权函数 通过共炮检距偏移也间接体现了虚拟偏移距 h_p 的 信息。虽然对于每个散射点来说都要求出 $t_i \, \alpha t_g$,计 算量比较大,但是最后计算结果的精度也比较高。纵 波的 POM 法的保幅叠前偏移的权函数都是在一定 的近似基础之上得到的,所以它的精度肯定没有精 确的权函数的精度高。但是,由于纵波的 POM 的权 函数基于实用的基础之上,不存在速度不同,所以能 够简化表示成虚拟偏移距 h_p 的函数。

3 计算实例

3.1 脉冲响应

脉冲响应是测试偏移算法的基本模型。图2是 纵波、转换波以及选取偏移孔径控制在 60° 的叠前 偏移脉冲响应。其中纵波速度为 2 500 m/s, 横波速 度为 1 500 m/s。



图 2 纵波、转换波计算的偏移脉冲响应

Fig. 2 Migration pulse response of P-wave and SV-wave

从图 2 中可以看出:纵波的叠前偏移脉冲响应 是一个对称的椭圆,反射点的轨迹从浅到深横向位 置是不变的;转换波的叠前偏移脉冲响应是一个不 对称的准椭圆,这是纵、横波的速度不一致导致的。 在浅层转换点靠近接收点一边,随着深度增加转换 点逐渐向中心点靠近,从浅到深体现了转换点轨迹 的变化过程。

3.2 大倾角模型

该模型为速度变化的具有大倾角的地质模型。 中间层的倾角为45°,模型参数如图3(a)所示。





Fig. 3 Mapping POM gathers and migrated result of the model with dipping angle

CDP 点坐标为 - 910 m 第一个道集映射的是三 个平层;CDP 点坐标在 390 m 第二个道集中间包含 一个倾斜层。在 POM 道集的映射过程中直接将振幅 补偿的权函数体现其中,以避免在映射过程中同一 时间样点的累加现象。在映射道集的过程中为了消 除假频和映射产生的噪声考虑了偏移孔径,偏移孔 径的选择对于倾斜层和水平层来说是不一样的。图 3(f) 是 偏 移 后 的 各 层 的 振 幅 峰 值 曲 线 与 用 Zoeppritz 方程计算的反射系数的对比,其中虚线是 偏移后的沿层振幅峰值,实线是理论计算的反射系 数。振幅峰值曲线两边的抖动现象是由孔径的边界 效应引起的。从图 3(c) ~ 3(f) 可以看出 POM 方法 对转换波保幅偏移的有效性,不但能使构造准确偏 移,还能使偏移后的振幅峰值体现反射系数的信息, 同时也看出保幅的 POM 方法对大倾角地层偏移是 有效的。

3.3 实际资料处理

为了验证该方法的实用性,本文中选择某地区 3D转换波资料中的一条测线进行试处理。结果见图 4。

由图4可以看出:没经过映射道集直接做的转 换波叠前时间偏移的结果(加了瞬时振幅增益) 整 个穹窿构造从左到右都很不清晰,整个剖面的能量 也不均匀;转换波 POM 方法保幅偏移的结果明显好 于常规的转换波偏移结果,穹窿构造很清晰,尤其是 图中所标出的构造倾斜位置能量也比较均匀,中、深 层能量得到了很好的补偿,提高了偏移成像的质量, 同时提高了地震资料的垂向分辨率和横向分辨率。



图4 转换波叠前偏移结果

Fig. 4 Prestack migration result of P-SV wave

4 结 论

(1) 虚拟偏移距法是一种很好的转换波叠前偏移方法,它将输入道集直接映射成为共成像点道集, 简化了转换波的处理流程,提高了覆盖次数和信噪 比,更有利于速度分析。

(2)转换波的相对振幅保持的叠前偏移是以单 程波方程为基础的偏移方法,在偏移过程中体现出 了对振幅的定量分析,为 AVO 的分析和偏移后的振 幅提供了更可靠的信息。

(3)通过将 POM 方法进行保幅映射和成像实 现了转换波偏移过程中对振幅的补偿,无论是水平 层还是大倾角地层都能使偏移后的振幅体现反射系 数的信息,提高了成像质量,对 AVO 属性分析等具 有重要的意义。

参考文献:

- [1] 孙成禹.非零炮检距非涅耳带研究[J].石油大学学报:自然科学版,2005,29(1):26-29.
 SUN Cheng-yu. Study non-zero offset Fresnel zone[J].
 Jounal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science),2005,29(1):26-29.
- [2] SCHLEICHER J, TYGEL M, HUBRAL P. 3-D true-amplitude finite-offset migration [J]. Geophysics, 1993, 58 (8):1112-1126.
- [3] SCHLEICHER J, HUBRAL P, TYGEL M et al. Minimum apertures and Fresnel zones in migration and demigration [J]. Geophysics, 1997, 62(1):183-194.
- [4] SUN J G. Limited-aperture migration [J]. Geophysics, 1997,65(2):584-595.

[5] 田文辉,李振春,张辉,等.起伏地表条件下的波场上 延法叠前深度偏移[J].中国石油大学学报:自然科学 版,2006,30(5):19-23.

> TIAN Wen-hui, LI Zhen-chun, ZHANG Hui, et al. Wave-field up ward continuation pre-stack depth migration based on irregular topography [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(5);19-23.

- [6] ZHANG Y, ZHANG C Q, BLEISTEIN N. Theory of true-amplitude one-way wave equations and true-amplitude common-shot migration [J]. Geophysics, 2005, 70 (4):E1-E10.
- [7] 张字.振幅保真的单程波方程偏移理论[J]. 地球物理 学报,2006,49(5):1410-1430.
 ZHANG Yu. The theory of true amplitude one-way wave equation migration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006,49(5):1410-1430.
- [8] ZHANG Y, KARAZINCIR M, NOTFORS J S, et al. Amplitude preserving v(z) pre-stack Kirchhoff migration, demigration and modeling [C/OL]. EAGE 64th Conference & Technical Exhibition-Florence, Italy, 27-30 May, 2002 [2008-10-15]. http://veritas-web3.veritasdgc.com/Web-Site/VTechDocWeb.nsf/all/361CF5DC7333E46F87256 CA50041FD95/ \$ File/0107.pdf
- [9] ZHANG Y, GRAY S, YOUNG J. Exact and approximate weights for Kirchhoff migration [C]. USA: Society of Exploration Geophysics, 2000:1036-1039.
- [10] GEIGER H D. Amplitude-preserving weights for Kirchhoff prestack time migration [C]. USA: Society of Exploration Geophysics, 2002;1220-1223.
- [11] GEIGER H D. Relative-amplitude-preserving weights for Kirchhoff prestack time migration by the equivalent offset

method [D]. Canada: University of Calgary, 2001.

- [12] 陈建江,印兴耀,张广智.基于贝叶斯理论的振幅随 偏移距变化三参数同步反演[J].中国石油大学学 报:自然科学版,2007,31(3):33-38. CHEN Jian-jiang, YIN Xing-yao, ZHANG Guang-zhi. Simultaneous three-term AVO inversion based on Bayesian theorem [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2007,31(3):33-38.
- [13] WANG S W, BANCROFT J C, LAWTON D C. Converted-wave(P-SV) prestack migration and migration velocity analysis [C]. USA: Society of Exploration Geophysics, c1997;1575-1578.
- [14] BANCROFT J C, GEIGER H D, MARGRAVE G F. The equivalent offset method of prestack time migration [J]. Geophysics, 1998, 63 (6):2042-2053.
- [15] WANG W, PHAM L D. Converted-wave prestack imaging and velocity analysis by pseudo-offset migration [C/OL]. European Association of Geoscientists and

(上接第40页)

- [13] ORTOLEVA P. Basin compartmentation: definitions and mechanisms[J]. AAPG memoir, 1994, 60:39-52.
- [14] 郝芳, 邹华耀, 姜建祥. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. 地学前缘,2000,7(3):11-20.
 HAO Fang, ZOU Hua-yao, JIANG Jian-qun. Dynamics of petroleum accumulation and its advances[J]. Earth Science Frontiers, 2000,7(3):11-20.
- [15] 隋风贵.东营断陷盆地地层流体超压系统与油气运 聚成藏[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28
 (3):17-23.
 SUI Feng-gui. Effect of formation superpressure system

on hydrocarbon migration and accumulation in Dongying fault basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2004,28(3):17-23.

(上接第45页)

 [8] 殷文. 叠前弹性波反演非线性优化方法[J]. 中国石油大 学学报:自然科学版,2008,32(3):45-49.
 YIN Wen. Nonlinear optimization method on prestack elas-

tic-wave inversion [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(3):45-49.

- [9] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: theory and methods [M]. 1 ed. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1980:100-170.
- [10] SHUEY R T. A simplification of the Zoeppritz equations[J]. Geophysics, 1985, 50(4):609-614.

Engineers, 2001, L-12. http://www. pgs. com/upload/ 31116/Download% 20printer% 20friendly% 20version% 20(1496Kb).pdf.

- [16] 殷文. 叠前弹性波反演非线性优化方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(3):45-49.
 YIN Wen. Non linear optim iza tion method on prestack elastic-wave inversion [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32 (3):45-49.
- [17] 陈天胜,刘洋,魏修成. 纵波和转换波联合 AVO 反演 方法研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2006,30(1): 33-37.

CHEN Tian-sheng, LIU Yang, WEI Xiu-cheng. Joint amplitude versus offset inversion of P-P and P-SV seismic data[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2006, 30(1):33-37.

(编辑 修荣荣)

- [16] 王建伟,宋书君,王新征.东营凹陷牛庄洼陷砂岩透 镜体的成藏机理[J].石油学报,2007,28(5):39-59.
 WANG Jian-wei, SONG Shu-jun, WANG Xin-zheng. Petroleum accumulation mechanism of lens-type sandstone in Niuzhuang subsag of Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(5):39-59.
- [17] 查明,陈发景,张一伟. 压实流盆地流体势场与油气 运聚关系——以东营凹陷为例[J].现代地质,1996, 10(1):106-110.

ZHA Ming, CHEN Fa-jing, ZHANG Yi-wei. Fluids potential field and hydrocarbons migration and accumulation in compactional flow basins—an example from Dongying depression [J]. Geoscience, 1996, 10 (1): 106-110.

(编辑 徐会永)

- [11] GASSMANN F. Uber die elastiztat poroser medien: Vierteljahrsschr [J]. Der Naturforsch Gesellschaft Zurich, 1951,96:1-21.
- [12] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in fluidsaturated porous solid 1 : low frequency range [J]. Acoust Soc Am, 1956a, 28:169-178.
- [13] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in fluidsaturated porous solid II: high frequency range [J]. Acoust Soc Am, 1956b, 28:179-191.

(编辑 修荣荣)