

基于矢量波场分离弹性波逆时偏移成像

李振春, 雍 鹏, 黄建平, 李庆洋, 谷丙洛

(中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

摘要:在传统的弹性波逆时偏移中,通过 Helmholtz 分解获取的横波的极性随入射方向改变,导致转换波的成像值也随入射方向发生极性变化(极性反转),多炮叠加后转换波成像同相轴将受到破坏。在传统波场分离基础上,对标量势(纵波)与矢量势(横波)分别进行梯度和旋度处理,得到矢量纵波与矢量横波。针对矢量纵横波波场,引入内积成像条件进行偏移成像,通过这种成像方法无需对转换波成像进行极性校正。波场分析结果表明,该方法既适用于同类波高精度成像,也适用于转换波成像。模型实验结果表明了本文方法的正确性和适应性。

关键词:弹性波逆时偏移;极性反转;波场分离;内积成像条件

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A

引用格式:李振春,雍鹏,黄建平,等.基于矢量波场分离弹性波逆时偏移成像[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):42-48.

LI Zhenchun, YONG Peng, HUANG Jianping, et al. Elastic wave reverse time migration based on vector wavefield separation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(1):42-48.

Elastic wave reverse time migration based on vector wavefield separation

LI Zhenchun, YONG Peng, HUANG Jianping, LI Qingyang, GU Bingluo

(School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: With the advances of seismic acquisition, seismic imaging has migrated from using single-component data alone to multi-component elastic wave imaging. Because of its high precision imaging ability, reverse-time migration (RTM) has been widely applied to complex structure imaging. However, S-mode polarization changes via incident direction, which will cause polarity reversal, and this polarity reversal will seriously damage the continuity of reflection events in conventional PS imaging as well as SP imaging after stacking over multiple shots. In the conventional elastic RTM, Helmholtz decomposition is used to obtain the scalar potential (P-wave) and the vector potential (S-wave). In this paper, we introduce gradient and curl operators to the scalar potential and the vector potential, respectively. Consequently, we can obtain vector P-waves and S-waves. As for the vector wavefield, we introduce an inner product imaging condition to the elastic RTM, which can avoid using extra polarity correction. Wavefield analyses show that this method is applicable not only to primary imaging (PP and SS) but also to converted wave imaging (PS and SP). The effectiveness and feasibility of our new imaging method in simple and complex models are illustrated in numerical examples using synthetic data.

Keywords: elastic wave reverse time migration; polarity reversal; wavefield decomposition; inner product imaging condition

逆时偏移^[1-3]采用全波算子,能够处理强速度变化与陡倾角成像,已经逐步成为地下复杂构造成像的重要手段。多分量地震数据更能代表地震波传播的物理规律,因而相比声波逆时偏移,弹性波逆时偏移能够提供更多的地质信息。逆时偏移主要包括两大

步骤:构建震源波场与检波波场,利用成像条件提取成像值。波场的构建通常是通过数值求解波动方程,有限差分法是一种广泛使用的偏微分方程数值解法^[4-5]。由于弹性波逆时偏移使用多分量数据进行成像,因此成像条件也比较多。其中一种简单的成像条

收稿日期:2015-07-21

基金项目:大地测量与地球动力学国家重点实验室重点基金项目(SKLGED2015-5-2-EZ);国家“973”项目(2014CB239006, 2011CB202402);国家自然科学基金项目(41104069,41274124)

作者简介:李振春(1963-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为地震波正演及偏移成像。E-mail:leonli@upc.edu.cn。

通讯作者:黄建平(1982-),男,副教授,博士,研究方向为地震波正演及偏移成像。E-mail:jphuangchina@gmail.com。

件是直接将震源波场与检波波场的各分量分别进行互相关成像^[6],由于纵横波耦合在一起,导致串扰噪声^[7]。另外一种广泛使用的成像方式是先进行纵横波场分离^[7],然后再使用成像条件进行成像。纵横波分离通常采用 Helmholtz 分解^[8],对原始波场(位移场或速度场)分别取散度与旋度,得到原始波场的标量势与矢量势,分别代表纵波与横波^[9]。对震源波场中的 P 波与检波波场中的 S 波进行互相关成像得到 PS 成像剖面。相似地,可以得到 PP、SP 和 SS 成像剖面。由于矢量势(S 波)存在极性反转,在转换波(PS、SP)成像剖面中,同相轴也存在极性反转。多炮叠加后,同相轴的连续性将遭到严重损坏^[7]。很多学者对此提出了一些解决手段:如角度域成像^[7,10-11]和计算反射波传播方向进行极性校正^[12-14]。前者计算较为准确,但计算量较大;后者计算量较小,但由于在复杂地区地震波传播方向难以精确计算,因而精度较差。Duan 和 Sava^[15]提出了一种基于地层倾角与波传播方向进行极性校正的方法,改进了转换波成像效果,但提前计算地层倾角,增加了计算量。笔者利用一阶弹性波方程实现波场构建,在传统的 Helmholtz 分解得到的标量势与矢量势基础上,对标量势与矢量势分别进行梯度运算和旋度运算得到矢量纵波与矢量横波。传统分离方式得到的矢量势横波随入射方向发生极性变化,在矢量的纵横波波场中,纵波与横波的极性都随着入射角方向发生改变,且矢量纵横波极性变化是一致的。据此针对矢量的纵横波波场,提出一种内积的成像条件从矢量纵横波中提取成像值。

1 方法原理

弹性逆时偏移主要包含两步:首先,构建震源波场与检波波场;然后,使用成像条件提取成像值。

1.1 二维波动方程

二维的弹性波一阶速度-应力方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z}, \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z}, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right). \end{cases} \quad (1)$$

式中, v_x 、 v_z 为质点速度; σ_{xx} 、 σ_{zz} 、 σ_{xz} 为应力分量; ρ 为密度; λ 、 μ 为拉梅常数。

本文中采用时间 2 阶、空间 10 阶精度的交错网格有限差分法对式(1)进行差分离散,获取震源波场与检波波场。在进行波场模拟时,由于人工截断边界会导致边界反射,采用完全匹配层(PML)吸收边界^[16-17],以压制边界反射提高模拟区域的精度与信噪比。

1.2 弹性波波场分离

利用式(1)得到震源波场与检波波场的矢量速度波场,矢量速度场的各分量均包含了 P 波与 S 波。若直接将其各分量分别进行互相关成像,会因为多种混合的波型产生串扰假象。此外,这种成像方式难以给出明确的物理含义。为此,Yan 和 Sava 提出在互相关成像之前,利用 Helmholtz 分解从矢量波提取纯纵波分量与横波分量。

$$\varphi = \nabla \cdot \mathbf{v}, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\psi} = \nabla \times \mathbf{v}. \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{v} = (v_x, v_z).$$

注意,采用散度算子得到的纯纵波 φ 实际上是标量势,采用旋度算子得到的纯横波 $\boldsymbol{\psi}$ 为矢量势。为了方便讨论,在波数域对式(2)与(3)进行表达:

$$\tilde{\varphi} = i\mathbf{k} \cdot \tilde{\mathbf{v}} = i\mathbf{k}_p \cdot \tilde{\mathbf{v}}, \quad (4)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\psi}} = i\mathbf{k} \times \tilde{\mathbf{v}} = i\mathbf{k}_s \times \tilde{\mathbf{v}}. \quad (5)$$

式中, $\tilde{\mathbf{v}}$ 为原始波场 \mathbf{v} 在波数域的形式; $\tilde{\varphi}$ 与 $\tilde{\boldsymbol{\psi}}$ 分别为 φ 与 $\boldsymbol{\psi}$ 在波数域的形式; \mathbf{k} 为地震波的传播单位矢量; \mathbf{k}_p 与 \mathbf{k}_s 分别为纵、横波的传播单位矢量。图 1 所示的几何关系中, \mathbf{p}_p 、 \mathbf{p}_s 分别代表纵横波中质点的振动方向。在震源两侧波场和传播方向的 x 分量的极性出现反转,不妨令左右两侧反射波场分别为

$$\mathbf{v}_l = (v_x, v_z),$$

$$\mathbf{v}_r = (-v_x, v_z).$$

传播方向分别为

$$\mathbf{k}_l = (k_x, k_z),$$

$$\mathbf{k}_r = (-k_x, k_z).$$

二维情况下纵横波只含有一个分量,将波场变量带入式(4)、(5),震源左右两侧的纵波数值相同,而两侧的横波数值相差一个负号。

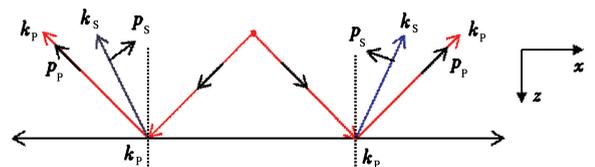


图 1 平层模型波场极性反转解释

Fig. 1 Polarity reversal analysis of layer-model

若直接使用互相关成像,由于横波存在极性反

转,在多炮叠加时转换波的成像剖面(PS、SP)中的反射同相轴将会因极性反转受到破坏。需要注意的是,在三维情况横波有3个分量,纵波只有一个分量,因此通过这种波场分离方式难以给出转换波成像条件以及相应的物理含义。

为了避免极性反转,本文中在传统 Helmholtz 分解得到的标量势(纵波)与矢量势(横波)的基础上,提出使用梯度算子与旋度算子分别作用标量势 φ 与矢量势 $\boldsymbol{\psi}$,得到矢量的纯 P 波波场和矢量的纯 S 波波场^[9]。

$$\mathbf{P} = \nabla \varphi, \quad (6)$$

$$\mathbf{S} = \nabla \times \boldsymbol{\psi}. \quad (7)$$

式中, \mathbf{P} 与 \mathbf{S} 分别表示矢量纵波与矢量横波。

通过式(6)与式(7)将得到矢量的 P 波与 S 波波场,后面将利用该矢量波场进行逆时偏移成像,以解决转换波成像中的极性反转。本文中波场分离方式在波数域可表示为

$$\tilde{\mathbf{P}} = -\mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \tilde{\mathbf{v}}) = -k_p(\mathbf{k}_p \cdot \tilde{\mathbf{v}}_p), \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \tilde{\mathbf{v}}) = \mathbf{k}_s \times (\mathbf{k}_s \times \tilde{\mathbf{v}}_s). \quad (9)$$

式中, $\tilde{\mathbf{P}}$ 与 $\tilde{\mathbf{S}}$ 分别为矢量 P 波与矢量 S 波在波数域中表示形式。本文的波场分离方式可以看做 Zhang 和 McMechan 方法^[18]在空间域的实现。直接在空间域实现避免了傅里叶变化带来的巨大计算量。为了方便讨论,将二维情况下的本文波场分离方式在波数域展开可得

$$\tilde{P}_x = -(k_x^2 \tilde{v}_x + k_x k_z \tilde{v}_z), \quad (10)$$

$$\tilde{P}_z = -(k_x k_z \tilde{v}_x + k_z^2 \tilde{v}_z), \quad (11)$$

$$\tilde{S}_x = -(k_z^2 \tilde{v}_x - k_x k_z \tilde{v}_z), \quad (12)$$

$$\tilde{S}_z = -(k_x^2 \tilde{v}_z - k_x k_z \tilde{v}_x). \quad (13)$$

针对图1所示的观测系统,带入波场变量与波矢量,左右两侧的矢量纵波与横波的各个分量的极性是一致的。事实上,在图1所示的几何系统中,根据梯度、散度、旋度的性质可知,矢量势横波 $\boldsymbol{\psi}$ 的方向垂直于剖面,而通过式(6)、(7)的分解,矢量纵波与横波的方向与原始的波场中的质点的振动方向 \mathbf{p}_p 、 \mathbf{p}_s 是一致的。

1.3 内积成像方式

针对得到的矢量 P 波与矢量 S 波,同时为了补偿深部的照明不足与压制噪声,笔者给出一种震源归一化的内积成像条件

$$I_{pp}(\mathbf{x}) = \frac{\int \mathbf{P}^s(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{P}^i(\mathbf{x}, t) dt}{\int \mathbf{P}^s(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{P}^s(\mathbf{x}, t) dt}, \quad (14)$$

$$I_{ps}(\mathbf{x}) = \frac{\int \mathbf{P}^s(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{S}^i(\mathbf{x}, t) dt}{\int \mathbf{P}^s(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{P}^s(\mathbf{x}, t) dt}, \quad (15)$$

$$I_{sp}(\mathbf{x}) = \frac{\int \mathbf{S}^s(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{P}^i(\mathbf{x}, t) dt}{\int \mathbf{S}^s(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{S}^s(\mathbf{x}, t) dt}, \quad (16)$$

$$I_{ss}(\mathbf{x}) = \frac{\int \mathbf{S}^s(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{S}^i(\mathbf{x}, t) dt}{\int \mathbf{S}^s(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{S}^s(\mathbf{x}, t) dt}. \quad (17)$$

式中, $I(\mathbf{x})$ 为成像值,其下标第一个字母代表震源波场,下标第二个字母代表检波波场;等式右边的上标 s 、 r 分别代表震源波场与检波波场。时间积分在数值计算中表现为从激发时刻开始,对同一成像点的不同时刻的内积结果进行累加。对于复杂模型,深部通常存在照明不足的问题,使用归一化处理有利于增强深部的能量。例如, $I_{ps}(\mathbf{x})$ 代表矢量 P 波震源波场与矢量 S 波在成像点 \mathbf{x} 处的归一化的成像值(PS 成像结果)。

由于通过矢量的波场分解方式得到的纵横波的极性变化与质点偏振方向有关,这样成像值的极性也与质点偏振方向有关,由于地震勘探的主要能量的入射角都小于 40° ,因此采用内积成像方式不会出现极性反转。

针对矢量纵横波场的内积成像方式将 PP、PS、SP、SS 的成像统一于相同的成像框架中。传统的互相关成像方式中,使用的纵横波是标量势与矢量势,通过 Helmholtz 分解得到 S 波的极性与地震波入射到反射界面的几何关系方向有关。在矢量的纵横波波场中,纵波与横波的极性随着入射角的大小而改变。此外,内积成像条件不仅适用于二维的弹性波逆时偏移,同样适用于三维的弹性波逆时偏移。

2 正演波场分析

为了说明极性反转现象,解释本文波场分离方法,本文中采用一个三层模型,该模型假定密度为常数,横波速度分别为 2000、3000、2000 m/s。纵横波速比为 1.73。模型纵、横向网格点数分别为 301、401,网格间隔为 10 m。三层的层厚分别为 600、1800、600 m。采用炸药震源激发,震源位于模型中心,震源函数为雷克子波。图 2(a)、(b)为通过有限差分正演模拟得到的 v_x 与 v_z 在 0.35 s 时刻的波场快照。从图中可以看到,纵横波耦合在一起。

采用 Helmholtz 分解后,可以得到标量势(纵波)、矢量势(横波),如图 2(c)、(d)所示。由于矢量势与地震波的入射到反射界面的几何关系有关,在图 2(d)中,可以观察到反射横波在震源的左右两侧以及上下两侧出现极性反转。为了说明波场极性,设定震源左上方的反射波场为负,则其右上方的反射波的极性为正;同样可以看到震源下方左、右反射波场分别为正、负。注意到入射纵波(图 2(c))在震源的上、下、左、右区域震源波场具有相同的极性。在传统方法中,直接使用互相关成像,在转换波

成像剖面(入射 P 波与反射 S 波互相关)中因为 S 波的极性变化将会出现极性反转。在实际的地震勘探中使用多炮叠加增加信噪比。由于极性反转,多炮叠加时将会损坏同相轴的连续性。

探中使用多炮叠加增加信噪比。由于极性反转,多炮叠加时将会损坏同相轴的连续性。

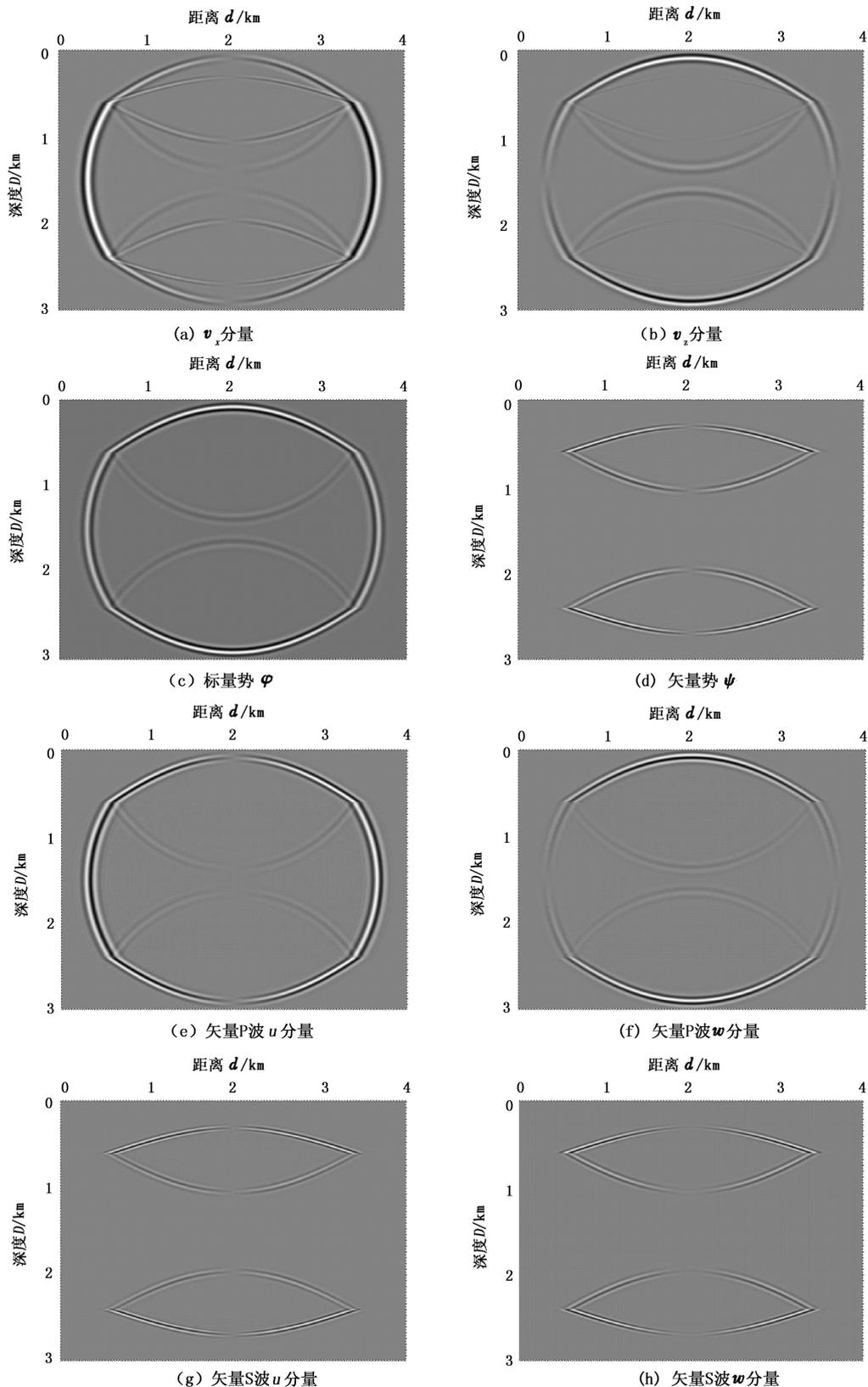


图 2 三层模型波场 0.35 s 时刻的波场快照

Fig. 2 Snapshots of three-layer model at 0.35 s

对标量势、矢量势(图2(c)、(d)所示)分别取梯度算子与旋度算子,将得到矢量P波与矢量S波。在二维情况下,矢量P波具有 u 、 w 两个分量(图2(e)、(f)),矢量S波也包含 u 、 w 两个分量(图2(g)、(h)),这里 u 分量与 w 分量分别表示在 x 与 z 方向的投影。从图中可以看出,通过梯度算子、旋度算子的处理,纵、横波具有相似的极性分布。具体来讲,矢量P、S波的 u 分量均关于震源左右对称,矢量P、S波的 w 分量均关于震源上下对称。在矢量纵横波波场中,波场的大小、极性与入射角的大小有关,与入射方向无关。期望通过内积算子从矢量纵、横波波场中获取反射信息,同时避开转换波成像中的极性反转。

3 数值模拟

为了验证本文成像方法的有效性以及对复杂模

型的适应性,本文中分别对平层模型以及 Marmousi2 模型进行了数值试算。

3.1 层状模型

为了清楚地展示弹性波成像中的极性反转现象,首先使用简单平层模型进行单炮成像。平层模型纵、横向网格点数均为 201,空间采样间隔为 10 m。上、下层纵波速度分别为 2 500、4 000 m/s,纵横波速比为 1.73,假定密度为常数。震源纵横向网格位置为(3,101)。由于正演模拟时采用炸药震源激发,只给出 PS 的成像结果。图 3(a)与图 3(b)分别为传统方法、本文方法的成像结果。从图中可以看到,传统方法成像结果在震源两侧极性发生了反转;而本文方法在震源两侧具有相同的极性。

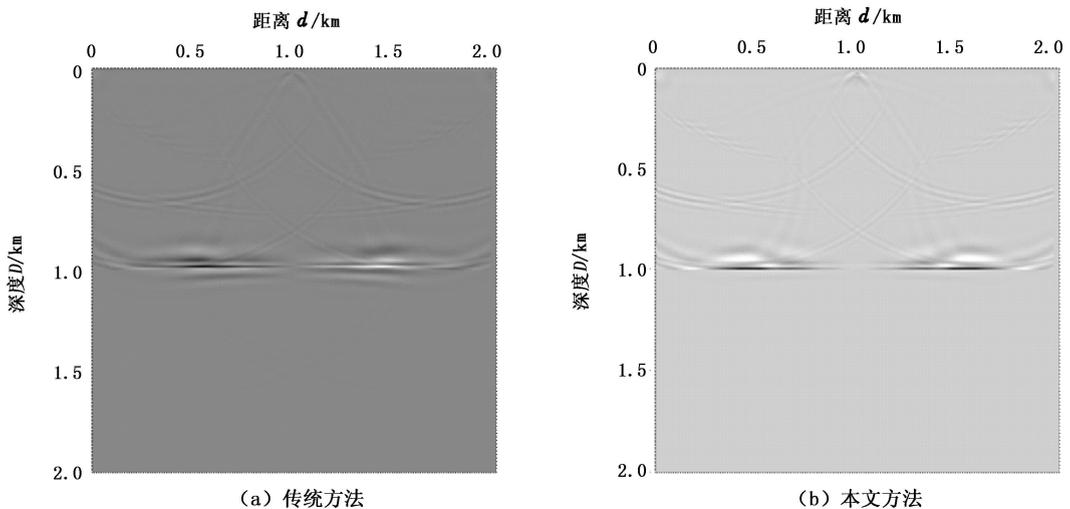


图3 平层模型单炮 PS 成像结果

Fig.3 PS images of layer model with single shot

图4为同一平层模型11炮PS成像结果叠加后的剖面。模拟过程中,横向排列网格点数为101,每一炮排列挪动10个网格点,均采用中心激发的方式。从多炮的叠加剖面中可以看出,传统方法由于极性反转,叠加剖面中的同相轴连续性遭到破坏。采用本文方法避开了极性反转,多炮叠加剖面中同相轴具有较好的连续性,有利于解释人员进行地质解释。

3.2 Marmousi2 模型

图5显示了SEG/EAGE提供的复杂的Marmousi2模型的纵波速度。该模型较为复杂,在模型中部有3条断层,中深部有两个背斜,在左上部有一气藏。模拟中设定纵横波速度比为1.73,密度为常数。模型横向网格点数为1 134,纵向网格点数为

234,采样间隔为10 m。整个成像过程中采用全接收方式,炮点所在网格点横向分布在277~877范围内,每炮的网格间隔数为10,共61炮,采用炸药震源激发。成像过程中采用交错网格有限差分法实现波场延拓。

逆时偏移成像中使用全波动方程模拟波场,可以实现对陡倾角构造的成像,但这也带来低频噪声的问题。本文中采用Laplacian滤波算子^[19]对成像结果进行处理,图6(a)~(d)分别为滤去低频噪声后的PP、PS、SP、SS成像剖面,成像结果表明本文方法对复杂构造具有较好的适应性。从图6(a)、(d)中可以看出,采用本文提出的成像方法实现了同类波(PP、SS)对复杂的3条断层、两个背斜和气藏较为清楚的成像。由于在转换波成像过程中避开了极

性反转,因此在多炮叠加成像结果中也能清楚地观察到复杂地质构造的形态(图 6(b)、(c)所示)。注意到在成像过程中由于使用炸药震源激发,在 SP 与

SS 剖面中深部构造的成像没有 PP、PS 的成像结果清楚。

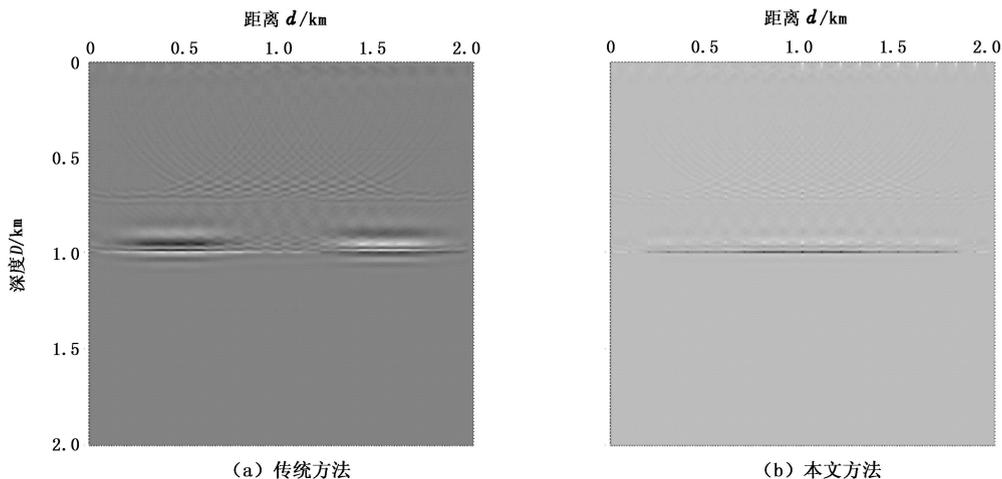


图 4 平层模型 11 炮叠加 PS 成像结果
Fig. 4 PS images of layer model with 11 shots

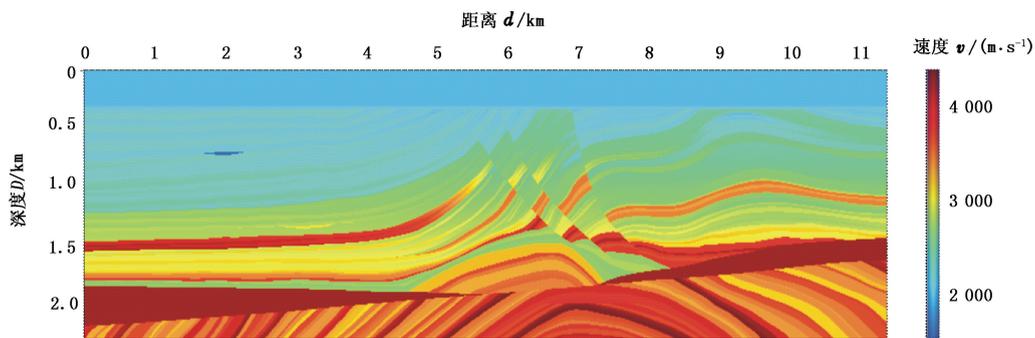


图 5 Marmousi2 纵波速度模型
Fig. 5 P-wave velocity of Marmousi2 model

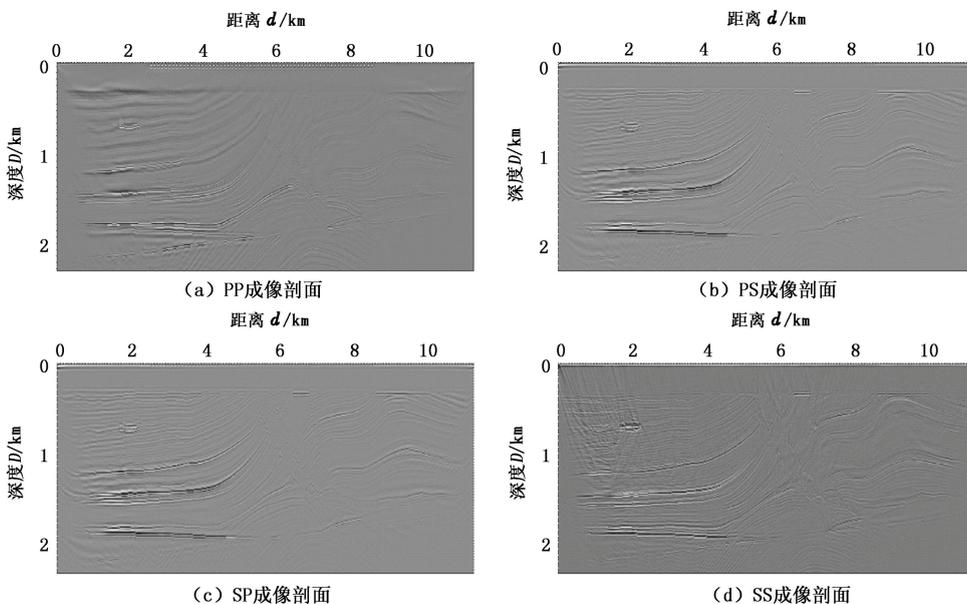


图 6 Marmousi2 模型多炮成像结果
Fig. 6 Images of Marmousi2 model

4 结束语

在传统波场纵横波分离基础上,对标量势与矢量势分别进行梯度和旋度处理,得到矢量的纵波与矢量横波。最后利用该矢量纵横波的极性特征,考虑深部能量补偿,使用归一化的内积成像条件对不同波型进行逆时偏移成像。波场分析结果表明,使用本文成像方法无需进行极性校正,通过对平层和复杂模型成像,验证了本文方法的正确性和适应性。本文成像方法可进一步推广至三维弹性波成像。鉴于本文方法不仅实现了转换波高精度成像,也保证了同类波的高精度成像,同时易于实施,因而本文方法具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] BAYSAL E, KOSLOFF D D, SHERWOOD J W C. Reverse time migration [J]. *Geophysics*, 1983, 48 (11): 1514-1524.
- [2] WHITMORE N D. Iterative depth migration by backward time propagation [C/OL]//1983 SEG Annual Meeting. Las Vegas, Nevada, September 11-15, 1983; SEG Technical Program Expanded Abstracts, c1983; 382-385. [2014-6-12]. <http://library.seg.org/doi/pdfplus/10.1190/1.1851068>.
- [3] MCMECHAN G A. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values [J]. *Geophysical Prospecting*, 1983, 31(3):413-420.
- [4] ALTERMAN Z, KARAL F C. Propagation of elastic waves in layered media by finite difference methods [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1968, 58(1):367-398.
- [5] 方刚, FOMEL Sergey, 杜启振. 交错网格 Lowrank 有限差分及其在逆时偏移中的应用 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(2):44-51.
FANG Gang, FOMEL Sergey, DU Qizhen. Lowrank finite difference on a staggered grid and its application on reverse time migration [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(2):44-51.
- [6] DU Q Z, SUN R Y, QIN T, et al. A study of perfectly matched layers for joint multicomponent reverse-time migration [J]. *Applied Geophysics*, 2010, 7(2):166-173.
- [7] YAN J, SAVA P. Isotropic angle-domain elastic reverse-time migration [J]. *Geophysics*, 2008, 73 (6): S229-S239.
- [8] DELLINGER J, ETGEN J. Wave-field separation in two-dimensional anisotropic media [J]. *Geophysics*, 1990, 55 (7):914-919.
- [9] AID K, RICHARDS P G. *Quantitative seismology: theory and methods* [J]. San Francisco, 1980.
- [10] ROSALES D A, FOMEL S, BIONDI B L, et al. Wave-equation angle-domain common-image gathers for converted waves [J]. *Geophysics*, 2007, 73(1):S17-S26.
- [11] YAN R, XIE X B. An angle-domain imaging condition for elastic reverse time migration and its application to angle gather extraction [J]. *Geophysics*, 2012, 77(5): S105-S115.
- [12] SUN R, MCMECHAN G A, LEE C S, et al. Prestack scalar reverse-time depth migration of 3D elastic seismic data [J]. *Geophysics*, 2006, 71(5):S199-S207.
- [13] DU Q, ZHU Y, BA J. Polarity reversal correction for elastic reverse time migration [J]. *Geophysics*, 2012, 77 (2):S31-S41.
- [14] DU Q, GONG X, ZHANG M, et al. 3D PS-wave imaging with elastic reverse-time migration [J]. *Geophysics*, 2014, 79(5):S173-S184.
- [15] DUAN Y, SAVA P. Scalar imaging condition for elastic reverse time migration [J]. *Geophysics*, 2015, 80(4): S127-S136.
- [16] COLLINO F, TSOGKA C. Application of the perfectly matched absorbing layer model to the linear elastodynamic problem in anisotropic heterogeneous media [J]. *Geophysics*, 2001, 66(1):294-307.
- [17] 王永刚, 邢文军, 谢万学, 等. 完全匹配层吸收边界条件的研究 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(1):19-24.
WANG Yonggang, XING Wenjun, XIE Wanxue, et al. Study of absorbing boundary condition by perfectly-matched layer [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2007, 31(1):19-24.
- [18] ZHANG Q, MCMECHAN G A. 2D and 3D elastic wave-field vector decomposition in the wavenumber domain for VTI media [J]. *Geophysics*, 2010, 75(3):D13-D26.
- [19] YOON K, MARFURT K J, STARR W. Challenges in reverse-time migration [C/OL]//2004 SEG Annual Meeting, Denver, Colorado, October 10-15, 2004; SEG Technical Program Expanded Abstracts, c2004; 1057-1060. [2014-12-12]. <http://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.1851068>.

(编辑 修荣荣)