

基于染色算法的 VTI 介质地震波数值模拟及偏移成像

高彬¹, 呼少平¹, 陈忠杰¹, 张池¹, 庞少东²

(1. 陕煤集团神木张家峁矿业有限公司, 榆林 719099;

2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 西安 710077)

摘要: 各向异性偏移成像技术在高精度地球物理勘探中扮演着重要角色。为了提高声学 VTI(垂直对称轴横向各向同性)介质的成像精度, 笔者在波场外推中采用了一种改进的纯 P 波方程, 相速度分析验证了改进方程的精度优势; 采用混合法(有限差分+伪谱法)对改进方程进行了求解。相比于传统拟声波方程, 改进的纯 P 波方程在产生高精度 P 波响应的同时能够有效消除干扰, 进一步地考虑到逆时偏移剖面中深部成像能量较弱的问题, 将染色算法推广到 VTI 纯 P 波逆时偏移。在模型深部选取用于参考的目标区域, 基于染色算法的地震波传播仅在该区域产生响应, 由此获得更丰富的波场信息。模型算例表明, 基于染色算法的 VTI 纯 P 波偏移成像技术能够在保证原始成像精度的前提下, 对深部介质结构产生更高精度的成像结果。

关键词: 各向异性; 纯 P 波; 逆时偏移; 染色算法

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.06.04

0 引言

在地球勘探领域, 大量的外业实验和室内测试证明, 地球介质是普遍存在各向异性的。因此研究地震波在地下介质中传播及偏移成像处理时, 应该对介质各向异性予以充分考虑, 这对于高精度地震勘探技术的发展具有重要意义^[1-2]。

各向异性弹性波方程形式复杂、多波场信息相互融合、求解过程计算量较大, 因此在实际应用中存在诸多困难。与之相比, 各向异性声波方程能够较好地规避上述问题, 在理论研究和实际应用中更受青睐。在正演模拟和偏移成像方面, 常用的各向异性声波方程主要是基于伪声学近似构建的, 即在原始各向异性频散关系中设置横波速度为 0 而简化得到^[2-7]。这类方程称之为伪声波方程, 其优点是形

式简单、计算高效、在诸多方面得到应用与发展; 缺点是物理含义不明确, 在参数选取不符合假设条件时容易产生不可避免地数值干扰及不稳定^[2-7]。为了解决伪声波方程的问题, 各向异性纯 P 波方程得到发展^[8-16]。相比于前者, 纯 P 波方程通过解耦精确各向异性频散关系而来, 因此具有更明确的含义^[8]。但是方程中包含复杂的拟微分算子, 常规数值方法难以直接求解。发展至今, 针对各向异性纯 P 波方程的数值求解, 目前的常用方案有三类: 第一类是采用泰勒级数对解耦的纯 P 波频散进行展开, 采用有限差分或伪谱法对其进行数值求解^[8-11]; 第二类是采用优化算法对纯 P 波频散关系进行近似, 后续求解过程与第一类方法类似^[13-15]。第三类是采用谱类算法直接对纯 P 波频散关系进行求解, 这类方法虽然精度较高, 但是计算效率和后续应用的灵活性较低^[16]。因此, 各向异性纯 P 波方程发展至

收稿日期: 2023-08-24

基金项目: 中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金项目(2022XAYJS06); 陕西省自然科学基金重点研发计划项目(2022SF-046)

第一作者: 高彬(1979—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事煤矿开采技术管理与研究工作, E-mail: nttgb1979@126.com。

今,仍然是不断追求求解精度和效率的同步提升,以及后续在偏移成像中的应用。

基于双程波动方程的逆时偏移成像技术不受地层倾角和偏移孔径的限制,能够对回转波、棱柱波和多次波进行成像,且能获得较为准确的运动学和动力学信息,因此成为研究重点。针对逆时偏移成像方法的发展,目前的研究主要包括以下方面:压制成像噪音的滤波技术和行波分离技术、观测系统照明补偿、VSP(垂直地震剖面)成像、考虑地层吸收衰减的补偿成像、面向地质目标体成像、各向异性成像、弹性波成像、基于反演框架的最小二乘逆时偏移等^[17-30]。上述改进的逆时偏移成像技术能够显著提高传统成像方法的精度和效率,在此基础上先进的成像技术在近年来得到显著发展。

为了进一步提高各向异性偏移成像的精度,在前人的研究基础上,笔者开展了基于染色算法的 VTI(垂直对称轴横向各向同性)介质改进纯 P 波数值模拟及偏移成像。首先,改进了基于泰勒展开的纯 P 波方程,继而结合有限差分 and 伪谱法进行求解,相速度分析表明改进策略具有较高精度。其次,在 VTI 纯 P 波偏移成像中引入染色算法,能够在目标区域提取更丰富的波场信息,从而达到对偏移剖面中深层能量的有效补偿,对目的层进行更高精度成像。基础理论和多个模型算例验证了该方法的有效性。

1 VTI 介质纯 P 波方程及其数值解法

在各向异性波场模拟及偏移成像中,传统基于声学假设的伪声波方程在波场模拟结果和成像剖面中容易引起伪横波干扰及数值不稳定。为了解决这些问题,学者们发展了多种类型的纯 P 波方程。笔者将发展一种改进的纯 P 波方程进行波场模拟及成像。

首先从 VTI 介质中精确的纯 P 波频散关系出发,其形式如下^[1]:

$$\frac{V^2(\theta)}{v_{p0}^2} = \frac{1}{2} + \epsilon \sin^2 \theta + \frac{1}{2} (1 + 2\epsilon \sin^2 \theta) \times \sqrt{1 - \frac{2(\epsilon - \delta) \sin^2 2\theta}{(1 + 2\epsilon \sin^2 \theta)^2}} \quad (1)$$

其中, $V(\theta)$ 为 VTI 介质相速度值, θ 代表沿对称轴方向的相角, v_{p0} 为垂向的 P 波速度, ϵ 和 δ 为 Thomsen 各向异性参数^[31]。

精确的纯 P 波频散关系式(1)中包含根号项,常规方法难以直接进行求解。因此通常采用不同的数值近似方法对其进行展开处理。以最常使用的一阶泰勒级数展开策略为例,方程(1)可以近似为^[9]:

$$\frac{V^2(\theta)}{v_{p0}^2} \approx 1 + 2\epsilon \sin^2 \theta - \frac{2(\epsilon - \delta) \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{1 + 2\epsilon \sin^2 \theta} \quad (2)$$

需要注意的是,若是将上式转换到频率-波数域,其右端第三项包含复杂的空间-波数域算子,采用有限差分或伪谱法难以求解。Zhan 等^[11]在上式右端第三项中令分母项 $\epsilon = 0$,进一步得到简化的相速度关系式如下:

$$\frac{V^2(\theta)}{v_{p0}^2} \approx 1 + 2\epsilon \sin^2 \theta - 2(\epsilon - \delta) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (3)$$

上式的形式更简单,便于后续的波场模拟和偏移成像。但是各向异性参数较强时,上式容易产生较大的近似误差。因此,笔者借鉴一种新的近似方式,将右端分数项的分母展开为^[15]:

$$1 + 2\epsilon \sin^2 \theta = \frac{1}{2} + \frac{1 + 4\epsilon \sin^2 \theta}{2} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{1 + 8\epsilon \sin^2 \theta + 16\epsilon^2 \sin^4 \theta}}{2} \quad (4)$$

在大多数情况下,各向异性参数 ϵ 相对较小。基于此,可以在方程(4)中令 $8\epsilon \sin^2 \theta \approx 4\epsilon$ 及 $16\epsilon^2 \sin^4 \theta \approx 4\epsilon^2$,上式进一步简化为:

$$\frac{V^2(\theta)}{v_{p0}^2} \approx 1 + 2\epsilon \sin^2 \theta - \frac{4(\epsilon - \delta)}{1 + \sqrt{1 + 4\epsilon + 4\epsilon^2}} \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (5)$$

上式为笔者所发展的改进纯 P 波相速度公式。

为了验证不同相速度公式的精度,采用不同的各向异性参数对其进行计算和分析。将公式(1)中描述的相速度值标记为精确相速度,公式(3)中描述的相速度值标记为 Zhan 等^[11]相速度,公式(5)中描述的相速度值标记为本文相速度。图 1 展示了四组不同各向异性参数所计算的相速度曲线,背景速度场 $v_{p0} = 2800$ m/s,各向异性参数 ϵ 和 δ 均在图上有描述,横轴为相角,变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。观察图中计算结果可知,在各向异性参数相对较小时,与精确的相速度值相比,两种不同的近似公式均具有较高的精度。当各向异性参数增大时,两种近似公式的计算结果均出现不同程度的误差,但是整体而言,笔者的改进公式比传统的近似公式具有更高的精度,上述结论证明了改进公式的可靠性。

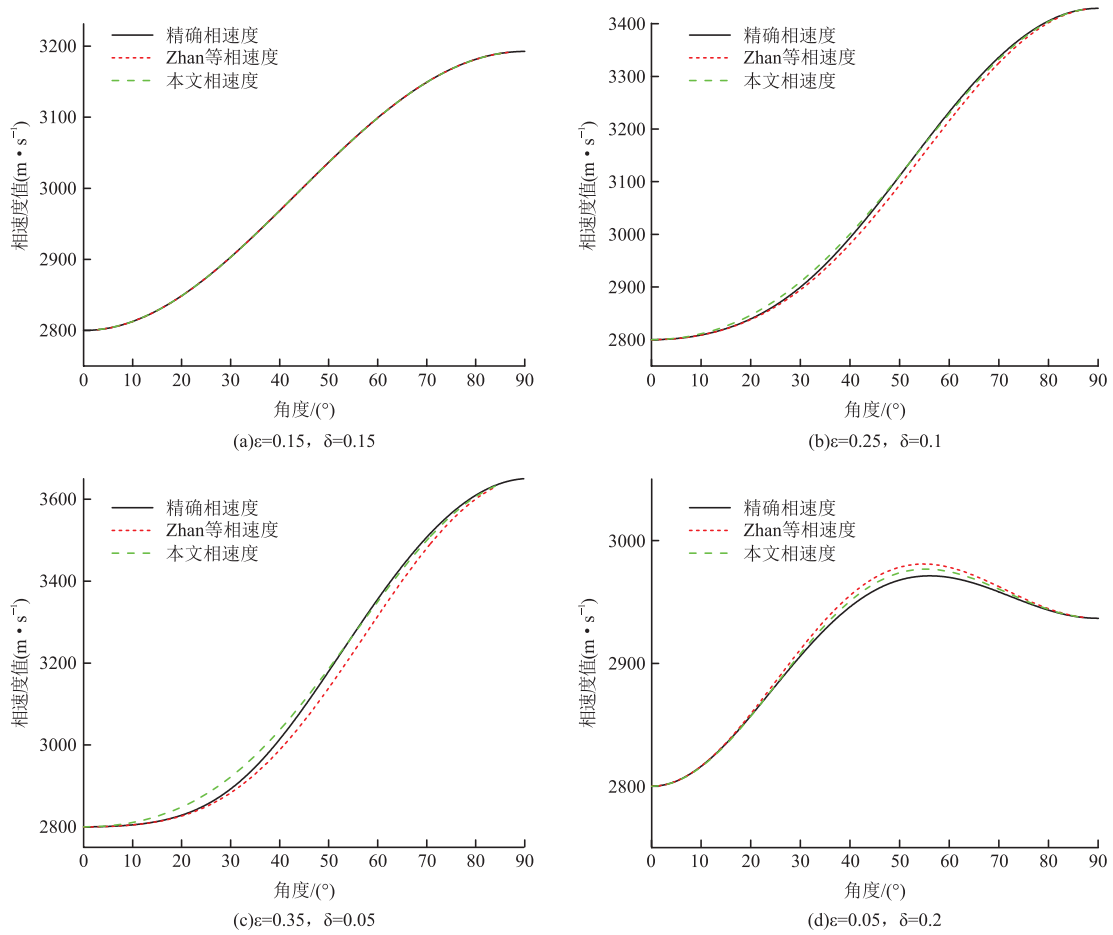


图1 四组各向异性参数模型中不同公式所计算的相速度曲线

Fig. 1 Phase velocity curves computed by different equations in four anisotropic parameter models

在相速度公式的基础上,为了推导改进的纯P波方程,需要采用下述的相速度与频率和波数之间的关系式:

$$\begin{aligned}\sin\theta &= \frac{V^2(\theta)k_x}{\omega} \\ \cos\theta &= \frac{V^2(\theta)k_z}{\omega}\end{aligned}\quad (6)$$

其中, ω 为角频率, k_x 和 k_z 分别为 x 轴和 z 轴方向的空间波数。

将方程(6)带入简化相速度关系式(5)中,整理可得:

$$\begin{aligned}\frac{\omega^2}{v_{p0}^2} &\approx (1+2\epsilon)k_x^2 + k_z^2 - \\ &\frac{4(\epsilon-\delta)}{1+\sqrt{1+4\epsilon+4\epsilon^2}} \frac{k_x^2 k_z^2}{k_x^2 + k_z^2}\end{aligned}\quad (7)$$

将方程(7)转换到时间-空间域,其形式如下:

$$\frac{1}{v_{p0}^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = (1+2\epsilon) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} -$$

$$\frac{4(\epsilon-\delta)}{1+\sqrt{1+4\epsilon+4\epsilon^2}} \times \frac{\frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} U}{\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}} \quad (8)$$

上式即为VTI介质中的改进的纯P波方程,其中符号 U 为纯P波波场,运算符 $\partial^2/\partial x^2$ 和 $\partial^2/\partial z^2$ 为不同方向的空间偏导数。在前人基础上,此处采用有限差分对方程(8)中右端前两项进行计算,采用伪谱法对第三项进行计算,具体递推格式如下:

$$\begin{aligned}U_{j,l}^{g+1} &= 2U_{j,l}^g - U_{j,l}^{g-1} + \left(\frac{v_{p0}\Delta t}{h}\right)^2 \times \\ &\left((1+2\epsilon)f_1 + f_2 - \frac{4(\epsilon-\delta)}{1+\sqrt{1+4\epsilon+4\epsilon^2}} f_3 \right)\end{aligned}\quad (9)$$

其中,角标 j,l 为空间网格索引, g 为时间网格索引。 Δt 为时间步长, h 为空间网格间距,算子 f_1 和 f_2 采用规则网格差分法进行计算,形式如下:

$$\begin{aligned}f_1 &= c_0 U_{j,l}^g + \sum_{m=1}^M c_m (U_{j+m,l}^g + U_{j-m,l}^g) \\ f_2 &= c_0 U_{j,l}^g + \sum_{m=1}^M c_m (U_{j,l+m}^g + U_{j,l-m}^g)\end{aligned}\quad (10)$$

其中 c_0 和 c_m 为高阶差分系数,下角标 j, l 为空间网格索引,上角标 g 为时间网格索引。

方程(9)中的算子 f_3 采用伪谱法进行计算,求解形式如下:

$$f_3 = F^{-1} \left(\frac{k_x^2 k_z^2}{k_x^2 + k_z^2} F(U_{j,l}^g) \right) \quad (11)$$

其中,运算符 F 和 F^{-1} 分别代表傅里叶正反变换算子。

综上所述,基于离散方程(4),即可实现基于改进纯 P 波方程的 VTI 介质地震波场精确高效外推。

采用均匀 VTI 模型对伪声波方程和改进纯 P 波方程的有效性进行测试,其中用于对比的伪声波

方程选用经典的基于横波速度为 0 的伪声波方程^[3]和基于限制性横波速度的伪声波方程^[4]。模型尺寸为 $4\,000\text{ m} \times 4\,000\text{ m}$, 网格间距为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 。震源采用主频 22 Hz 的雷克子波,置于模型中心产生振动。模型速度和各向异性参数分别为 $v_{p0} = 2\,000\text{ m/s}$, $\epsilon = 0.15$, $\delta = -0.1$ 。图 2 展示了三种方程在均匀模型中所计算出的波场切片,观察可知,伪声波方程在产生 P 波响应的同时,在震源附近不可避免地出现了伪横波干扰。相比之下,笔者改进的纯 P 波方程能够产生高精度的 P 波响应,且完全消除了伪横波干扰。

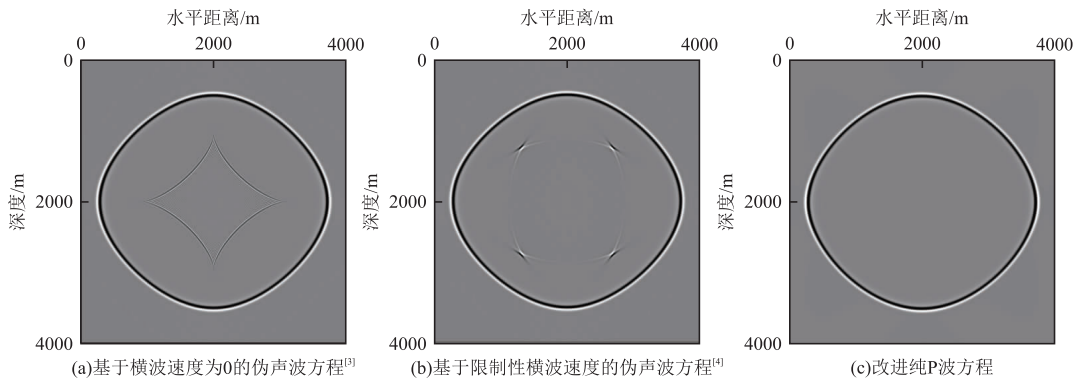


图 2 均匀 VTI 介质模型中不同方程所计算的波场切片

Fig. 2 Wavefield slices computed by different equations in the homogeneous VTI model

2 基于染色算法的波场模拟及偏移成像

在地面偏移成像中,由于深层反射界面距离地表较远,随着地震波传播时间的增加而使地表接收到的深层反射能量减弱。因此,在逆时偏移成像剖面中,所反映出的地层深部成像能量相对较弱。鉴于此,为了提高各向异性成像剖面中深部目标体的成像精度,采用一种称之为“染色算法”的波场外推策略来进行地震波场数值模拟和偏移成像。该算法的核心思想是在地质模型中选取一个目标区域进行标定,而地震波主要在选定的目标区域产生响应,而在非目标区域不产生响应,这样就能完成对目标区域的高精度成像。现有的染色算法主要针对各向同性介质设计的^[26],下面将其推广到 VTI 介质中。

为了便于后续公式推导,首先将改进纯 P 波场外推公式(9)简写为如下形式:

$$U_{j,l}^{g+1} = v_{j,l}^2 U^g + 2U_{j,l}^g - U_{j,l}^{g-1} \quad (12)$$

其中角标 j, l 为空间网格索引, $v = v_{p0}$, $U^g =$

$$(\Delta t/h)^2 \left(\frac{(1+2\epsilon)f_1 + f_2 - 4(\epsilon-\delta)}{1+\sqrt{1+4\epsilon+4\epsilon^2}} f_3 \right),$$

为了实现染色算法,将所有变量推广到复数域,形式如下:

$$\begin{aligned} U_{j,l}^g &= \bar{U}_{j,l}^g + i\tilde{U}_{j,l}^g \\ U^g &= \bar{U}^g + i\tilde{U}^g \\ v_{j,l} &= \bar{v}_{j,l} + i\tilde{v}_{j,l} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, i 为虚数单位,上标 \sim 为实部分量, $\tilde{\sim}$ 为虚部分量。

将方程(13)带入到方程(12)中,可以得到复数域的波场递推格式如下:

$$\begin{aligned} (\bar{U}_{j,l}^{g+1} + i\tilde{U}_{j,l}^{g+1}) &= (\bar{v}_{j,l} + i\tilde{v}_{j,l})^2 (\bar{U}^g + i\tilde{U}^g) + \\ &2(\bar{U}_{j,l}^g + i\tilde{U}_{j,l}^g) - (\bar{U}_{j,l}^{g-1} + i\tilde{U}_{j,l}^{g-1}) \end{aligned} \quad (14)$$

根据上式,可以将波场递推格式分解为实数域和虚数域,形式分别如下:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{j,l}^{g+1} &= \bar{v}_{j,l}^2 \bar{U}^g + 2\bar{U}_{j,l}^g - \bar{U}_{j,l}^{g-1} - 2\bar{v}_{j,l}\tilde{v}_{j,l}\tilde{U}^g - \\ &\tilde{v}_{j,l}^2 \tilde{U}^g \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{j,l}^{g+1} &= \tilde{v}_{j,l}^2 \tilde{U}^g + 2\tilde{U}_{j,l}^g - \tilde{U}_{j,l}^{g-1} - 2\bar{v}_{j,l}\tilde{v}_{j,l}\bar{U}^g - \\ &\tilde{v}_{j,l}^2 \bar{U}^g \end{aligned} \quad (16)$$

在实际应用中,染色体算法通过将虚部速度场赋值为极小量来实现,具体的速度取值如下^[26]:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{j,l} &= v_{j,l}, \tilde{v}_{j,l} = \tilde{v}_{j,l} \times 10^{-6} \text{ (目标区域)} \\ \tilde{v}_{j,l} &= 0 \text{ (非目标区域)} \end{aligned} \quad (17)$$

在各向异性实部波场和虚部波场外推中,速度场的取值按照上式执行,各向异性参数按照实数计算即可。基于方程(15)和(16),可实现基于染色体算法的 VTI 改进纯 P 波外推,能够提取目标体附近的地震波场响应。

在上述理论基础上,基于染色体算法的 VTI 改进纯 P 波逆时偏移成像流程可以分为^[26]:

1) 在复数域,正向外推实部波场 \bar{U}_f 和虚部波场 \tilde{U}_f ;

2) 在实数域,反向外推实部波场 \bar{U}_b ;

3) 应用震源归一化互相关成像条件,分别获得两种成像剖面:

$$P_r = \frac{\int \bar{U}_f \bar{U}_b dt}{\int \bar{U}_f \bar{U}_f dt}, P_i = \frac{\int \tilde{U}_f \bar{U}_b dt}{\int \tilde{U}_f \tilde{U}_f dt} \quad (18)$$

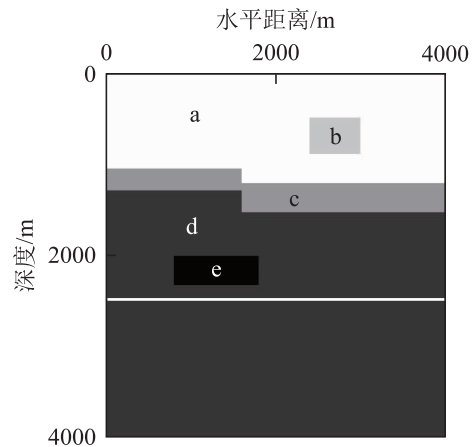
其中, P_r 为实部成像结果,其与标准的成像结果一致; P_i 为虚部成像结果,可以认为是标准成像结果在目标区域的一种补充。将两种成像剖面进行有效结合,能够对地质构造产生更高质量的成像结果。

3 模型算例

3.1 各向异性断层模型

为了验证染色体算法的有效性,采用图 3 所示的

各向异性断层模型进行测试,相关参数在图例中给出。图 4 展示了原始的纯 P 波响应,基于染色体算法的纯 P 波方程计算出的实部波场和虚部波场。观察图中结果可知,与原始波场相比,实部波场具有完全一致的波场特征,而虚部波场主要在选定的目标区域产生响应,由此验证了染色体算法的有效性。在下面的内容中,将采用多个偏移成像算例对其进行进一步验证。



白色线段所示位置为选定的目标区域,深度为 2 480 m

图 3 各向异性断层模型

Fig. 3 Anisotropic fault model

a, b, c, d, e 区域的参数分别为

$$\begin{aligned} v_{p0} &= 2\ 000\ \text{m/s}, \epsilon = \delta = 0, \\ v_{p0} &= 2\ 500\ \text{m/s}, \epsilon = 0.15, \delta = -0.05, \\ v_{p0} &= 3\ 000\ \text{m/s}, \epsilon = 0.22, \delta = -0.04, \\ v_{p0} &= 4\ 000\ \text{m/s}, \epsilon = 0.18, \delta = 0.05, \\ v_{p0} &= 4\ 500\ \text{m/s}, \epsilon = -0.15, \delta = 0.05. \end{aligned}$$

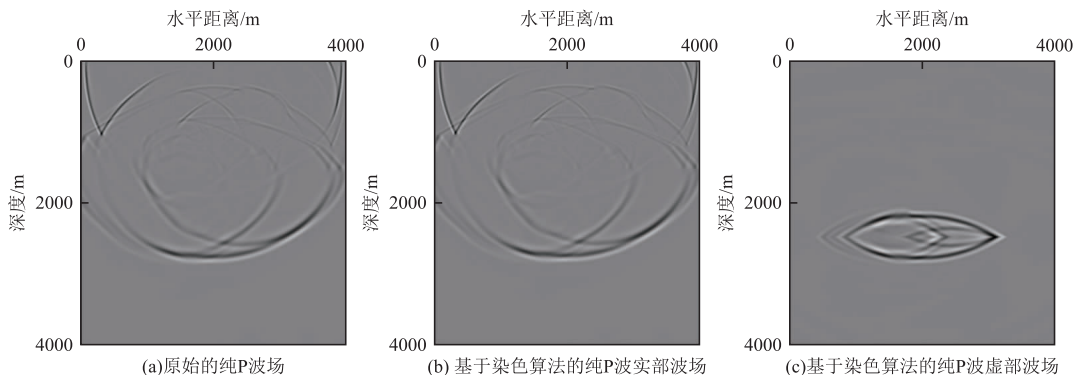


图 4 各向异性断层模型中不同方程计算的波场切片

Fig. 4 Wavefield slices computed by different equations in the anisotropic fault model

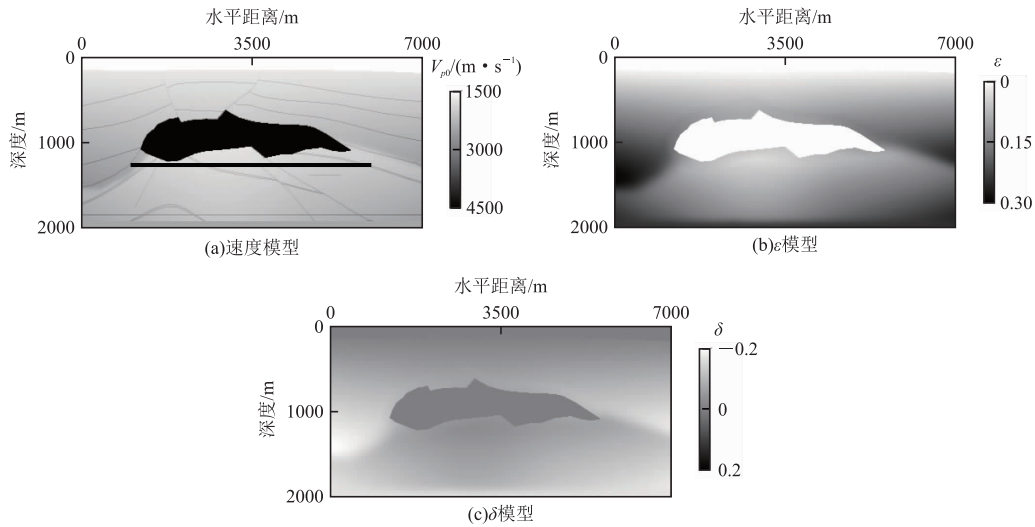
3.2 VTI 介质盐丘模型

首先采用如图 5 所示的 VTI 介质盐丘模型对上述成像方法进行测试,包括速度参数和各向异性

参数,模型大小为 $7\ 000\ \text{m} \times 2\ 000\ \text{m}$,网格间距为 $10\ \text{m}$,时间采样步长为 $0.001\ \text{s}$ 。震源函数选用主频 $26\ \text{Hz}$ 的雷克子波。如图 5(a)所示,选定的目标

区域位于盐丘体的下部,目的是对其下部地层进行有效成像。图 6 展示了基于染色算法的纯 P 波偏移成像结果,从图 6(a)中可以观察到,实部波场的成像结果在中浅层具有较高精度,剖面整体能量较强,随着深度的增加,成像能量逐渐减弱。相比之下,图 6(b)

中虚部波场的成像结果在选定的目标区域能够产生较强的成像能量,对盐丘下部的断层产生较高精度的成像。整体而言,基于染色算法的虚部波场成像结果可以作为常规成像的一种有效补充,对目标区域产生更高精度成像。



其中图(a)中的黑色线段为预设的目标区域,其水平距离范围为 1 000 m~6 000 m,深度为 1 250 m

图 5 VTI 介质盐丘模型

Fig. 5 The VTI salt model

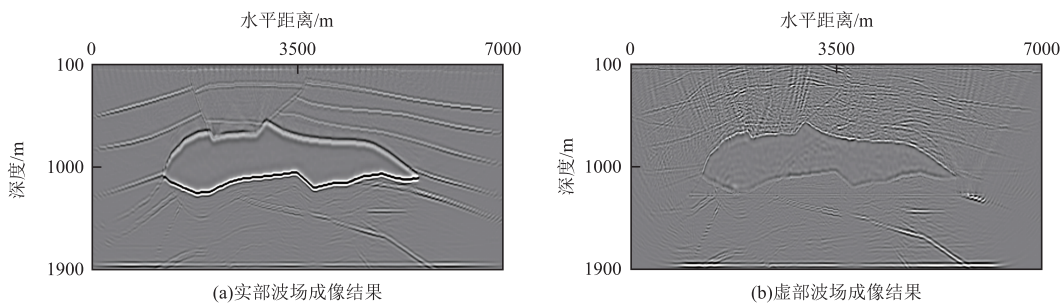


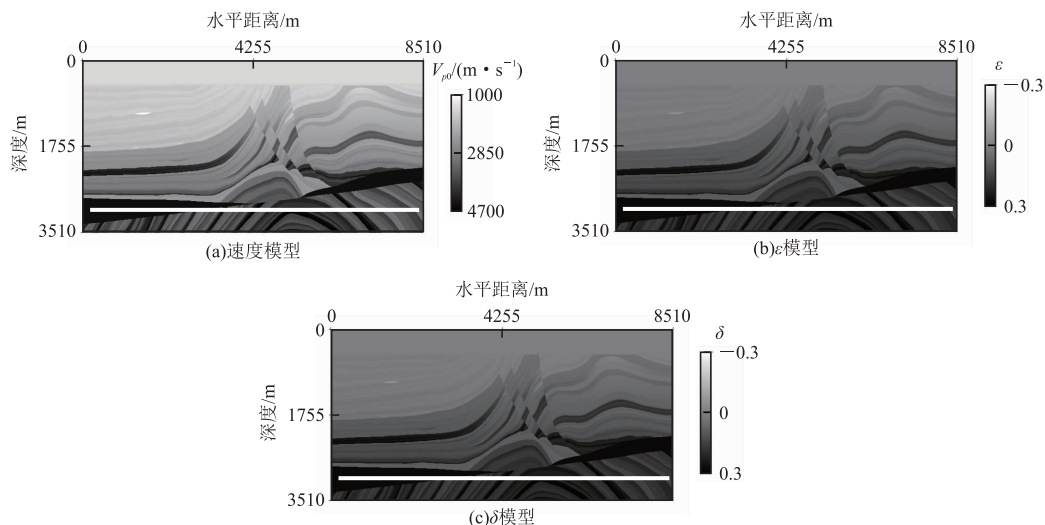
图 6 VTI 介质盐丘模型中基于染色算法的纯 P 波逆时偏移成像结果

Fig. 6 The pure P-wave RTM results based on the staining algorithm in the VTI salt model

3.3 VTI 介质 Marmousi 模型

进一步采用如图 7 所示的 VTI 介质 Marmousi 模型对上述成像方法的有效性进行测试,模型包括速度参数和各向异性参数,模型大小为 8 510 m × 3 510 m,网格间距为 10 m,时间采样步长为 0.000 8 s。震源为主频 20 Hz 的雷克子波。如图 7(a)所示,基于染色算法的成像策略所选取的目标区域位于深部断层发育区域,目的是对深部断层进行有效成像。图 8 展示了针对 VTI 介质 Marmousi 模型的基于染色算法的纯 P 波偏移成像结果,从图 8(a)中可以观察到,实部波场的成像结果在中浅层具有较高精

度,剖面整体能量较强,随着深度的增加,成像能量逐渐减弱,尤其是在深部断层发育区域。相比之下,图 8(b)中虚部波场的成像结果在选定的目标区域能够产生较强的成像能量,对深部断层产生较高精度的成像。当然,在复杂各向异性介质成像中,仅选取了一处目标区域,在实际计算过程中,可以通过设置多个目标区域,对不同介质模型的特殊构造进行更高精度的成像。整体而言,基于染色算法的各向异性偏移成像算法可以作为常规成像方法的一种有效补充,对目标区域产生更高精度的成像。



其中图(a)中的白色线段为预设的目标区域,其水平距离范围为 100 m~8 400 m,深度为 3 000 m

图 7 VTI 介质 Marmousi 模型

Fig. 7 The VTI Marmousi model

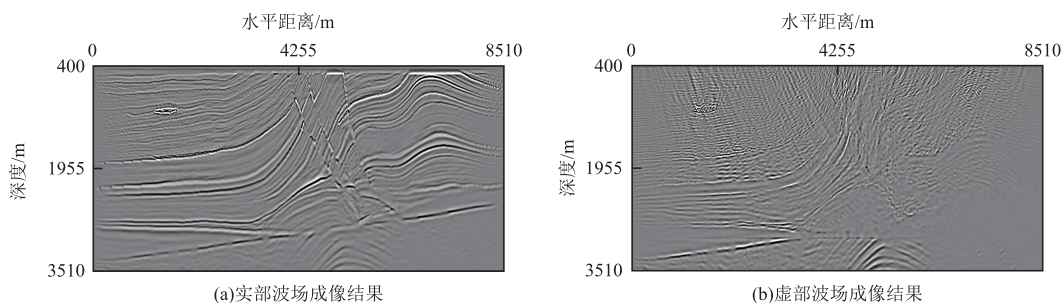


图 8 VTI 介质 Marmousi 模型中基于染色算法的纯 P 波逆时偏移成像结果

Fig. 8 The pure P-wave RTM results based on the staining algorithm in the VTI Marmousi model

4 结论

为了提高各向异性地震成像精度,笔者发展了一种基于染色算法的 VTI 介质改进纯 P 波方程偏移成像技术。首先,针对一阶泰勒级数展开的纯 P 波频散关系进行了近似处理,结合有限差分和伪谱法实现了波场延拓,相速度分析验证了近似方程的精度优势。其次,为了提高逆时偏移成像剖面中深部地层能量,将染色算法推广到 VTI 纯 P 波逆时偏移中,在预设目标区域能够获得更丰富的波场信息。最后,多个模型算例表明,改进的纯 P 波方程能够有效消除干扰,产生高精度 P 波响应。基于染色算法的各向异性偏移成像技术能够有效提高深部目标体的成像精度,可以为传统成像方法提供一种有效补充。

参考文献:

- [1] TSVANKIN I. P-wave signatures and notation for transversely isotropic media: An overview[J]. *Geophysics*, 1996, 61(2): 467.
- [2] ALKHALIFAH T. Acoustic approximations for processing in transversely isotropic media[J]. *Geophysics*, 1998, 63(2): 623.
- [3] DU X, BANCROFT J C, LINES L R. Anisotropic reverse-time migration for tilted TI media[J]. *Geophysical Prospecting*, 2007, 55(6): 853—869.
- [4] FLETCHER R P, DU X, FOWLER P J. Reverse time migration in tilted transversely isotropic (TTI) media[J]. *Geophysics*, 2009, 74(6): WCA179—WCA187.
- [5] 李博, 李敏, 刘红伟, 等. TTI 介质有限差分逆时偏移的稳定性探讨[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1366—1375.

- LI B, LI M, LIU H W, et al. Stability of reverse time migration in TTI media[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(4): 1366—1375. (In Chinese)
- [6] 张岩, 吴国忱. TTI 介质 qP 波逆时偏移中伪横波噪声压制方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 2065—2076.
- ZHANG Y, WU G C. Methods of removing pseudo SV-wave artifacts in TTI media qP-wave reverse-time migration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(6): 2065—2076. (In Chinese)
- [7] 刘文卿, 王西文, 王宇超, 等. 带正则化校正的 TTI 介质 qP 波方程及其逆时偏移方法和应用[J]. 地球物理学报, 2016, 59(3): 1059—1069.
- LIU W Q, WANG X W, WANG Y C, et al. A regularized qP-wave equation for TTI media and its application to reverse time migration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(3): 1059—1069. (In Chinese)
- [8] LIU F Q, MORTON S A, JIANG S S, et al. Decoupled wave equations for P and SV waves in an acoustic VTI media [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009. Society of Exploration Geophysicists, 2009: 2844 - 2848.
- [9] PESTANA R C, URSIN B, STOFFA P L. Separate P- and SV-wave equations for VTI media [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. Society of Exploration Geophysicists, 2011: 163 - 167.
- [10] CHU C L, MACY B K, ANNO P D. Approximation of pure acoustic seismic wave propagation in TTI media[J]. Geophysics, 2011, 76(5): WB97-WB107.
- [11] ZHAN G, PESTANA R C, STOFFA P L. Decoupled equations for reverse time migration in tilted transversely isotropic media[J]. Geophysics, 2012, 77(2): T37.
- [12] 郭成锋, 杜启振, 张明强, 等. 改进的 TTI 介质纯 P 波方程正演模拟与逆时偏移[J]. 地球物理学报, 2017, 60(1): 258—270.
- GUO C F, DU Q Z, ZHANG M Q, et al. Numerical simulation and reverse time migration using an improved pure P-wave equation in tilted transversely isotropic media [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(1): 258—270. (In Chinese)
- [13] LI X Y, ZHU H J. A finite-difference approach for solving pure quasi-P-wave equations in transversely isotropic and orthorhombic media [J]. Geophysics, 2018, 83(4): C161—C172.
- [14] MU X R, HUANG J P, YONG P, et al. Modeling of pure qP- and qSV-waves in tilted transversely isotropic media with the optimal quadratic approximation[J]. Geophysics, 2020, 85(2): C71—C89.
- [15] HUANG J P, MAO Q, MU X R, et al. Least-squares reverse time migration based on an efficient pure qP-wave equation[J]. Geophysical Prospecting, 2024, 72(4): 1290—1311.
- [16] SONG X L, ALKHALIFAH T. Modeling of pseudo-acoustic P-waves in orthorhombic media with a low-rank approximation[J]. Geophysics, 2013, 78(4): C33—C40. .
- [17] SUN J, ZHANG Y. Practical issues of reverse time migration: True amplitude gathers, noise removal and harmonic-source encoding [J]. ASEG Extended Abstracts, 2009, 2009(1): 1.
- [18] YOON K, MARFURT K J. Reverse-time migration using the Poynting vector[J]. Exploration Geophysics, 2006, 37(1): 102—107.
- [19] 康玮, 程玖兵. 叠前逆时偏移假象去除方法[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1163—1172.
- KANG W, CHENG J B. Methods of suppressing artifacts in prestack reverse time migration[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 1163—1172. (In Chinese)
- [20] LIU F Q, ZHANG G Q, MORTON S A, et al. An effective imaging condition for reverse-time migration using wavefield decomposition[J]. Geophysics, 2011, 76(1): S29.
- [21] FEI T W, LUO Y, YANG J R, et al. Removing false images in reverse time migration: The concept of de-primary[J]. Geophysics, 2015, 80(6): S237—S244.
- [22] 胡江涛, 王华忠. 基于解析时间波场外推与波场分解的逆时偏移方法研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2886—2895.
- HU J T, WANG H Z. Reverse time migration using analytical time wavefield extrapolation and separation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2886—2895. (In Chinese)
- [23] 王一博, 郑忆康, 薛清峰, 等. 基于 Hilbert 变换的全波场分离逆时偏移成像[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4200—4211.
- WANG Y B, ZHENG Y K, XUE Q F, et al. Reverse time migration with Hilbert transform based full wavefield decomposition[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(11): 4200—4211. (In Chinese)
- [24] WANG E J, LIU Y. The hybrid absorbing boundary condition for one-step extrapolation and its application in wavefield decomposition-based reverse time migration [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14(5): 1177—1188.
- [25] 薛浩, 刘洋, 蔡晓慧. 基于复数波场分解的 VSP 逆时

- 偏移方法研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 649—657.
- XUE H, LIU Y, CAI X H. Research on VSP reverse time migration based on complex wavefield decomposition method[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(2): 649—657. (In Chinese)
- [26] CHEN B, JIA X F. Staining algorithm for seismic modeling and migration[J]. Geophysics, 2014, 79(4): S121—S129.
- [27] SHI Y, WANG Y H. Reverse time migration of 3D vertical seismic profile data[J]. Geophysics, 2016, 81(1): S31—S38.
- [28] 谷丙洛, 王霖川, 李振春, 等. 井中地震三维高效黏声逆时偏移成像方法及应用[J]. 地球物理学报, 2023, 66(4): 1699—1717.
- GU B L, WANG J C, LI Z C, et al. 3D efficient visco-acoustic reverse time migration in borehole seismic and its application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(4): 1699—1717. (In Chinese)
- [29] 王鸣谦, 张胜寒, 张济东, 等. 基于双相介质弹性波波场分离的逆时偏移方法[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45(1): 1—7.
- WANG M Q, ZHANG S H, ZHANG J D, et al. Pure compressional wave reverse time migration method based on elastic wave field separation in two-phase media[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 45(1): 1—7. (In Chinese)
- [30] 向晨. 基于 Poynting 矢量分解成像条件的最小二乘逆时偏移[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45(2): 1—8.
- XIANG C. Least-squares reverse time migration based on Poynting vector decomposition imaging condition [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 45(2): 1—8. (In Chinese)
- [31] THOMSEN L. Weak elastic anisotropy[J]. Geophysics, 2012, 51(10): 1954—1966.

Numerical modeling and migration imaging for VTI seismic wave based on the staining algorithm

GAO Bin¹, HU Shaoping¹, CHEN Zhongjie¹, ZHANG Chi¹, PANG Shaodong²

(1. Shenmu Zhangjiamao Mining Co., Ltd. of Shaanxi coal group, Yulin 719099, China;

2. China Coal Technology & Engineering Group Xi'an Research Institute(group) Co., Ltd. Xi'an 710077, China)

Abstract: Anisotropic migration imaging technique plays an essential role in high-accuracy geophysics exploration. To improve imaging accuracy in acoustic VTI (Vertical Transversely Isotropy) media, this paper first uses a modified pure P-wave equation for wavefield extrapolation, and phase velocity analysis to validate the accuracy advantage of the modified equation. Then, a hybrid solution (finite-difference method + pseudo-spectral method) is used to compute the modified equation. Compared with the traditional pseudo-acoustic wave equation, the modified pure P-wave equation can generate a high-precision P-wave response while eliminating the pseudo-shear wave interference. Further, considering the weak imaging energy in the deep region of the reverse-time migration (RTM) profile, the staining algorithm is extended to VTI pure P-wave RTM. Selecting the appropriate target region in the deep section of the model and the seismic wave propagation based on the staining algorithm can only produce a response in this region, thus more abundant wavefield information can be obtained. Several modeling examples verify that the VTI pure P-wave RTM technique based on the staining algorithm can result in higher precision imaging results for deep structures while ensuring the original imaging accuracy and can be regarded as an effective supplement for the traditional anisotropic imaging methods.

Keywords: anisotropy; pure P-wave; reverse-time migration; staining algorithm