

张智, 刘有山, 徐涛等. 弹性波逆时偏移中的稳定激发振幅成像条件. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3523-3533, doi:10.6038/cjg20131027.

Zhang Z, Liu Y S, Xu T, et al. A stable excitation amplitude imaging condition for reverse time migration in elastic wave equation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(10): 3523-3533, doi:10.6038/cjg20131027.

弹性波逆时偏移中的稳定激发振幅成像条件

张 智¹, 刘有山^{2, 3}, 徐 涛², 白志明²

1 桂林理工大学广西矿治与环境科学实验中心, 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 桂林 541004

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 本文针对弹性波逆时偏移, 提出稳定的激发振幅成像条件. 在震源波场的正向传播过程中, 计算每个网格点的能量, 并保存最大能量密度的时刻和相应的波场值; 在检波器波场的逆时传播过程中, 在每个网格点提取最大能量密度时刻的检波器波场值, 并利用保存的最大能量震源波场做归一化, 获得角度依赖的反射系数成像剖面. 相比于归一化互相关成像条件, 该成像条件在震源波场的正向传播过程中无需存储波场快照, 节省大量磁盘空间和 I/O 吞吐任务, 提高了计算效率; 相比于弹性波的激发时间成像条件, 该成像条件自动校正了水平分量在震源两侧的极性反转, 在多炮叠加时避免振幅损失. 数值试验表明, 与归一化成像条件相比, 稳定激发振幅成像条件具有更小的计算量, 偏移剖面的低频假象更弱, 水平分量的成像能力更优, 具有更高的空间分辨率.

关键词 弹性波, 逆时偏移, 成像条件, 能量密度, 稳定激发振幅, 激发时间, 归一化互相关

doi:10.6038/cjg20131027

中图分类号 P315

收稿日期 2013-01-05, 2013-04-20 收修定稿

A stable excitation amplitude imaging condition for reverse time migration in elastic wave equation

ZHANG Zhi¹, LIU You-Shan^{2,3}, XU Tao², BAI Zhi-Ming²

1 Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin, 541004, China

2 State key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A stable excitation amplitude (SEA) imaging condition for the elastic wave equation is proposed. In the propagation of the source wavefield extrapolation along a positive time axis, the energy density for total grid points are computed at each time-step, and the traveltimes as well as wavefield values corresponding to the maximum energy density are saved as the excitation criterion. While in the propagation of the receiver wavefield extrapolation along a negative time axis, the excitation criterion is applied to obtain the imaging profiles at each grid point that satisfies the image time at each time step. Then the receiver wavefield is normalized by the source wavefield to form the angle-dependent reflection coefficient profiles. Compared to the normalized correlation (NC) imaging condition, the SEA imaging condition can eliminate the need of the hard

基金项目 国家自然科学基金(41274070, 41174075, 41074033, 41174043), 深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-02-02, SinoProbe-03-02) 联合资助.

作者简介 张智, 男, 1975 年生, 副教授, 主要从事深部地球物理场正反演研究. E-mail: zhangzhi@glite.edu.cn

disk, which saves a large volume of hard disk space (especially for three dimensions) and avoid a lot of I/O tasks. Consequently, the computational efficiency is enhanced significantly due to the application of SEA imaging condition. Compared to the excitation traveltime (ET) imaging condition in elastic media, the polarity reverse of horizontal component at opposite sides of the source will be corrected automatically to enhance the imaging when it involves in the stacking of many shot profiles, which is beneficial from the normalized amplitude (i. e. the angle-dependent reflection coefficients). Numerical tests validate the feasibility of the SEA imaging condition. When comparing the NC imaging condition with the SEA imaging condition in the numerical tests, the latter has a small computational amount than the former, and the latter can produce less low-frequency artifacts, and also has better imaging capability as well as higher spatial resolution than the former.

Keywords Elastic wave equation, Reverse time migration, Imaging condition, Energy density, Stable excitation amplitude, Excitation time, Normalized correlation

1 引言

在勘探地震学领域,地震偏移成像技术是获取地下构造形态有效的途径之一^[1-6],其中,叠前深度域偏移是最为精确的成像手段之一.与基于射线理论的波动方程积分解法,以及基于波动理论的微分波动方程单程波解法相比,逆时偏移方法为基于波动理论的双程波算子,具有精度高、相位准确和不受横向变速和高陡倾角的影响,并且可以利用回转波等进行成像,包含了全波场信息,解决了常规偏移所面临的成像难题^[6-10],具有正确的运动学和动力学信息^[11].

叠前逆时偏移的成像原理是由 Claerbout 等(1977)提出的反射地震图成像原理演变而来^[12],包括波场外推和成像条件的运用两个主要环节.成像条件至关重要,它直接关系到成像的质量和计算效率.常用的成像条件包括零延迟互相关^[7,13-14]、激发时间^[15]、振幅比^[12,16]、倾斜校正^[17]和坡印廷^[18]成像条件,以及针对成像假象提出的基于单程波^[19]、双程无反射地震波^[20]等成像条件^[13-38].已有许多学者对这些成像条件在保幅^[21-23]、分辨率^[11]、计算效率^[24-25],以及在成像剖面中由直达波等产生的低频噪音做了比较深入的讨论^[21,26-27].其中,激发时间成像条件,无需存储震源波场,但仅仅利用了初至或者最大振幅波场,且成像剖面在量纲上不是反射系数,图像不够清晰.在互相关成像条件计算过程中,由于震源波场与检波器波场的计算顺序相反,需要存储正传的波场快照,因此需要巨大的硬盘空间和大量的 I/O 读写硬盘的开销,尤其对于三维问题,其所

需要的硬盘存储和读写开销的成本是非常巨大的.为了克服这个困难,有些学者提出一些策略,包括保存边界处的波场值、或采用检查点法、或使用随机边界条件等^[24-28,28-30],并在检波器波场的逆传的同时,对震源波场进行重建.这些策略通过增加计算量来节省硬盘空间.尽管互相关成像条件具有实现简单、稳定等特点,是最主要的成像条件之一.但是成像剖面低频假象严重,偏移剖面在量纲上不是反射系数,同时需要硬盘存储震源的波场快照,在利用成像条件时又需要读取震源波场的波场快照,严重降低了逆时偏移的效率.

针对互相关成像条件的巨大硬盘需求和 I/O 吞吐开销问题,Nguyen 和 McMechan(2013)提出了在声波方程逆时偏移中的激发振幅成像条件^[31],它可以看做互相关成像条件的特例,等效于在成像时刻用检波器波场与单位脉冲的震源波场进行互相关并做归一化,利用了地震资料中信噪比最高的那部分波场信息^[31].相比于归一化互相关成像条件,该成像条件无需任何硬盘存储,从而避免大量的硬盘读写操作,大大提高了计算效率;相比于(弹性波的)激发时间成像条件,由于该成像条件用最大能量震源波场做归一化,自动校正了水平分量在震源两侧的极性反转,在多炮叠加时避免振幅损失,并且得到角度依赖的反射系数剖面.但是,该成像条件目前仅用在声波逆时偏移中,将其直接用在弹性波中还存在一定的不稳定性问题.

在实际资料处理中,相比于声波逆时偏移只能正确地延拓一种类型的波场,弹性波逆时偏移能获得更加清晰的图像^[32].但是弹性波具有比声波更大的计算量,因此弹性波逆时偏移中的成像条件的效

率尤为重要。为此,本文修正了激发振幅成像条件,使之更加稳定健壮,并运用到二维弹性波的逆时偏移成像中。

2 波场外推

2.1 波动方程

本文采用一阶速度-应力的二维弹性波动方程:

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

其中, v_x, v_z 分别为质点的水平分量和垂直分量的振动速度; σ_{xx}, σ_{zz} 分别为水平和垂直方向的正应力, τ_{xz} 为切应力; ρ 为介质的质量密度; λ, μ 为介质的拉梅常数; t 为时间变量。在波场模拟时, (1) 式被离散成空间为高阶(本文采用 8 阶), 时间为二阶精度的交错网格差分^[39-41], 人工边界采用 PML 吸收边界条件^[42-44] 来压制来自边界的反射波。

2.2 空间滤波

逆时偏移的成像剖面中存在着低频假象^[21,27,34-35], 主要受直达波和震源等的影响。为了高效地去除这部分低频的假象, 本文采用空间高通滤波进行去除^[5]。其滤波系数如下:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

3 成像条件

逆时偏移可以分为三个过程: 1) 震源波场的正向传播, 为初值问题; 2) 检波器波场的逆向传播, 将检波器获得的记录按照时间逆序依次插入到对应的记录位置, 为边值问题; 3) 成像条件的应用。本文重点讨论归一化互相关成像条件和激发振幅成像条件, 以及改进的稳定激发振幅条件。

3.1 归一化互相关成像条件

归一化互相关成像条件是指通过计算震源波场和接收波场的零延迟互相关, 并进行归一化处理^[12]:

$$I(x, z) = \frac{\sum_t S(x, z, t) R(x, z, t)}{\sum_t S(x, z, t) S(x, z, t)}, \quad (3)$$

其中, S, R 分别表示震源波场与检波器波场; \sum_t 分别表示对炮集和时间进行叠加。

3.2 激发振幅成像条件

激发振幅成像条件是指通过在震源波场的正传过程, 在每个时刻计算出网格点的能量密度, 并保存下相应的最大能量密度(见下文)对应的走时和波场值; 在检波器波场的逆传过程中, 利用保存下的走时提取出相应的检波器波场的波场值, 并用保存下的震源波场做归一化, 从而得到角度依赖的反射系数剖面, 它可以为 AVA 的分析提供先决条件^[33,45-47]。

激发振幅成像条件表达式为^[31]

$$I(x, z) = \sum_{\text{shot}} \frac{R(x, z)}{S(x, z)}, \quad (4)$$

其中, S, R 分别表示最大能量密度对应的震源波场和提取出的检波器波场; \sum_{shot} 表示对炮集进行叠加。不同于声波波场, 弹性波的波场值可能在某些网格点始终为 0, 如水平速度分量剖面上通过震源的垂直对称轴, (3) 和 (4) 式则可能被一个很小的数除, 表现数值不稳定。为此, 我们对其进行修正, 并得到如下稳定的激发振幅成像条件。当然, (3) 式也存在同样的问题, 在用到弹性波中需要对其做类似的修正。

3.3 稳定的激发振幅成像条件

$I(x, z) =$

$$\begin{cases} \sum_{\text{shot}} \frac{R(x, z)}{S(x, z)}, S(x, z) \geq \tilde{S} \\ \sum_{\text{shot}} \frac{R(x, z)}{\text{sign}[S(x, z)] \cdot \tilde{S}}, S(x, z) < \tilde{S} \end{cases} \quad (5)$$

其中,

$$\tilde{S} = \text{ave}(|S(x, z)|) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |S(x_j, z_j)|, \quad (6)$$

(6) 式表示对最大能量密度时刻对应的震源波场值取绝对值后再求平均值, N 为二维网格的节点总数。 $\text{sign}[S(x, z)]$ 表示对 $S(x, z)$ 取符号。相比于弹性波逆时偏移的激发时间成像条件, 由于该成像条件用最大能量的震源波场做归一化, 自动校正了水平分量在震源两侧的极性反转, 且在多炮叠加时避免由于极性反转引起的振幅损失。

为了获取成像条件所需要的走时和震源波场, 在震源波场的正向传播过程中, 需要计算能量密度。能量密度^[48]的定义如下:

$$E = K + W = \frac{1}{2} \rho v_i v_i + \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij}, \quad (7)$$

其中, E, K, W 分别表示总能量密度、动能密度和势能密度; $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}$ 分别表示应力和应变张量的各个分量, 重复的哑元表示求和。

由于本文使用交错网格有限差分, 在计算上述能量密度时, 需要在时空上进行插值. 为了提高计算效率, 本文采用线性插值. 在震源波场正传的每个时刻, 计算各个网格点的能量密度, 并与前一时刻保存的该网格点的最大能量密度 E^{i-1} 进行比较, 若当前时刻的能量密度 E^i 大于 E^{i-1} , 则更新 E^{i-1} 、并保存相应的走时 T^{i-1} 及波场值 R_x^{i-1} 和 R_z^{i-1} , 直到最大时刻. 最终可以获得每个网格相应的最大能量密度对应的走时和震源波场值. 当然, 在每个时刻进行能量密度的计算, 略微增加计算量。

4 数值试验

为了验证稳定激发振幅成像条件在弹性波逆时偏移中的有效性, 我们分别在倾斜模型、断层模型和 Marmousi-ii 模型上进行了数值试验。

4.1 倾斜模型

倾斜模型(图 1)的网格数为 1201×601 , 网格间距 10 m, 上层的倾角是 9° ; 各层的密度及其纵横波速度详见图 1. 检波器间距为 10 m; 采用双边接收观测系统, 两侧各布置 150 道检波器; 震源布置在地

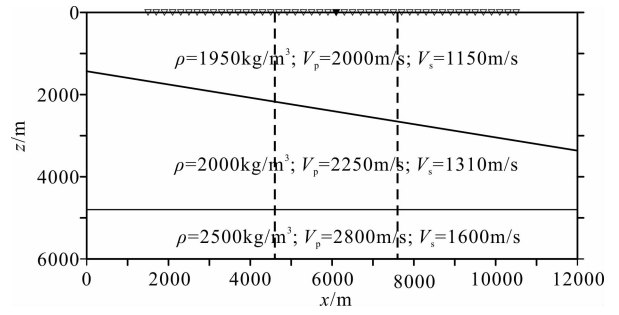


图1 倾斜弹性波模型; 倒三角表示 46 个炮点位置, 黑色实心三角为第 24 炮; 虚线为第 24 炮的偏移孔径
Fig. 1 A elastic wave model with three layer surfaces (include a tilted surface); the inverted triangles denote the 46 shots, the filled one corresponding to the 24th shot; dash lines denote the migration aperture of the 24th shot

表, 炮间距为 200 m, 共 46 炮, 布置范围为 1500 ~ 10500 m; 震源为 10 Hz 的雷克子波的爆炸震源; 波场模拟时间间隔为 1 ms, 波场传播至 6.0 s。

图 2 为第 24 炮, 采用(7)式计算得到的走时和相应的震源波场值. 其中, 图 2a 为第 24 炮的偏移孔径内的速度模型, 图 2b 为计算的走时, 图 2(c, d) 为最大能量密度时刻的震源波场值; 图中虚线表示两个界面的位置。

图 3 为对第 24 炮进行空间高通滤波之前的水平(3a, 3c)和垂直(3b, 3d)分量的成像剖面. 其中, 图 3a 和 3b 为归一化互相关成像条件的成像剖面; 图 3c 和 3d 为稳定激发振幅成像条件的成像剖面. 由

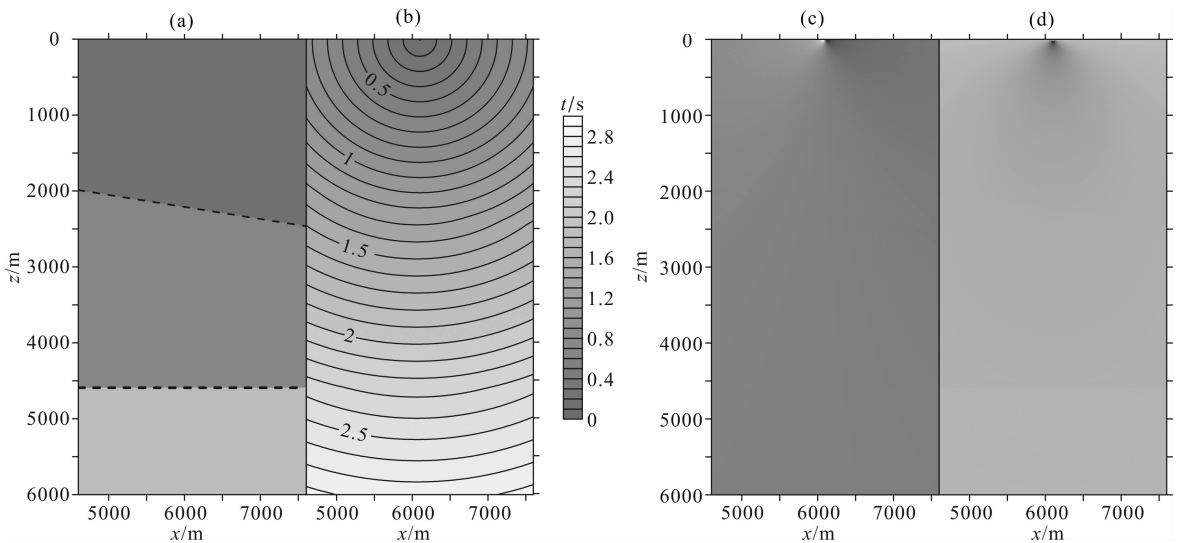


图 2 倾斜模型的第 24 炮的 P 波速度模型(a)、最大能量走时等值线(b), x 分量的震源波场值(c), 及 z 分量的震源波场值(d); 虚线表示界面的位置

Fig. 2 P-wave velocity (a), maximum energy traveltime contour (b), source wavefield of x component (c), and source wavefield of z component (d) of the 24th shot in the model with a tilted surface; dash lines denote the location of the two surfaces in the model

于长时程计算,来自边界的虚假反射、以及层间反射波等导致部分虚假反射同相轴(图 3 中箭头标注的位置).从图中可以看到,归一化互相关成像条件的成像剖面存在严重的低频假象,如图中椭圆标注范围,垂直分量尤为明显;而激发振幅成像剖面的低频假象比前者弱.从分辨率上看,激发振幅成像条件的分辨率高于归一化互相关成像条件的,尤其表现在垂直分量上,这是因为前者的偏移剖面在量纲上为

反射系数,后者的偏移剖面在量纲上为反射系数的平方;从成像能力方面来看,激发振幅成像条件的水平分量优于互相关成像条件的;但是两种成像条件得到的垂直分量的偏移剖面都存在严重的低频假象,这与直达波的切除有着密切的关系;水平分量中存在明显的假象.

图 4 是对图 3 进行空间高通滤波后的结果.从图中可见,空间高通滤波能高效地去除成像剖面上

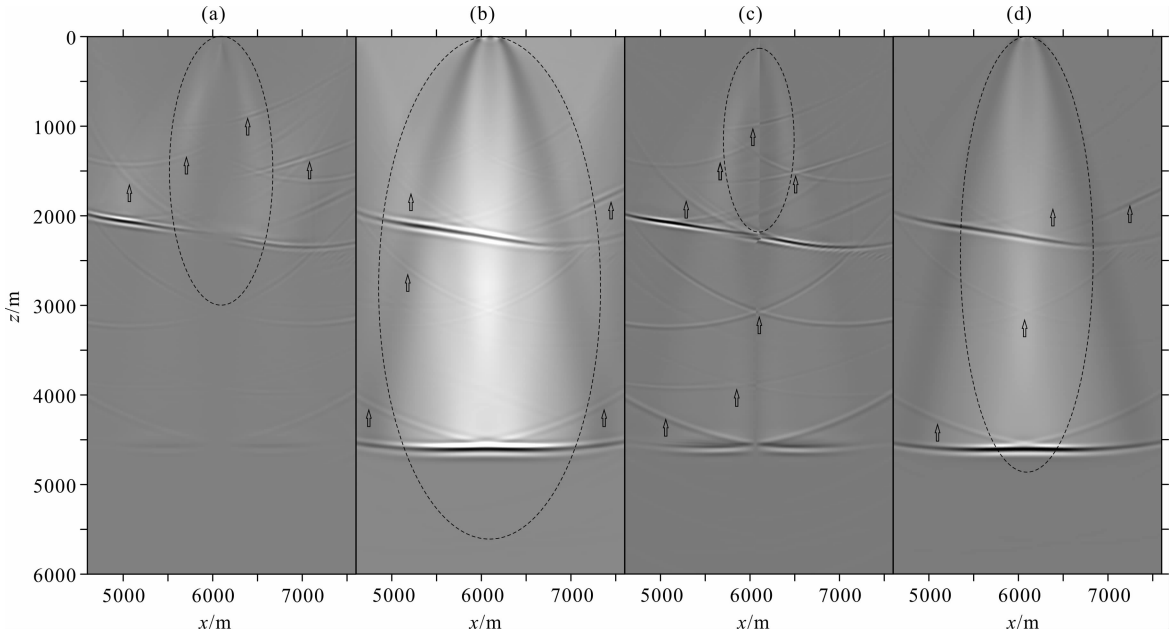


图 3 倾斜模型的第 24 炮成像剖面;归一化互相关成像剖面

(a)水平分量;(b)垂直分量;稳定激发振幅成像剖面;(c)水平分量;(d)垂直分量.

Fig. 3 Imaging profiles of the 24th shot in the model with a tilted surface

(a) and (b) are the horizontal and vertical component imaging profile from the normalized correlation imaging condition, respectively; (c) and (d) are the horizontal and vertical component imaging profile from the stable excitation amplitude imaging condition, respectively.

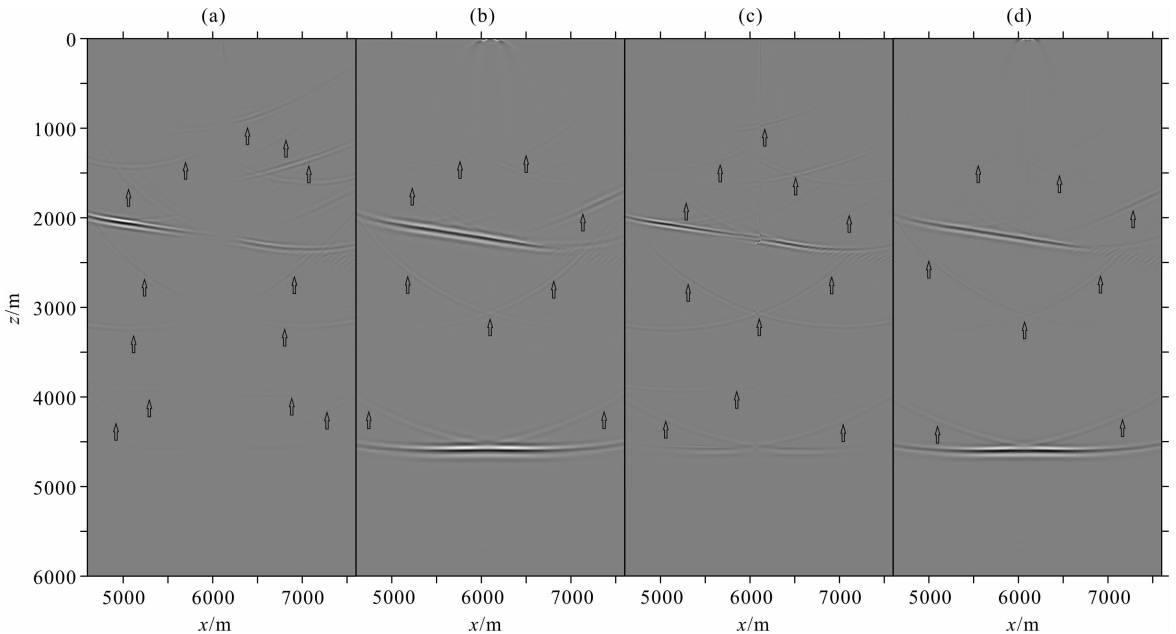


图 4 图 3 中的偏移剖面的空间高通滤波结果

Fig. 4 Results of Fig. 3 after spatial high-pass filter

的低频假象. 稳定激发振幅成像条件的水平分量的假象比归一化互相关成像条件的更为严重(如箭头所示),但是前者的分辨率高于后者;并且两种成像条件的垂直分量获得了更加清晰的图像.

图 5 为倾斜模型的 46 炮的叠加结果. 从图中可见,由两种成像条件获得的垂直偏移剖面的界面形态比较清晰. 由于两端叠加次数仅为 1,两端的图像不如中间部分(多次叠加)清楚. 对比图 5c 和 d,不难发现图 5c 中的第二个界面比图 5a 更加清晰(上述 4 幅图使用了相同的增益). 但是,在水平分量偏移剖面上存在较明显的串扰假象(箭头所指位置)^[49].

4.2 断层模型

为了验证该成像条件在复杂模型中的有效性,我们在断层模型(图 6)上进行了数值试验. 该断层模型的网格为 1201×601 ,网格间距为 10 m;检波器

间距为 10 m;采用双边接收观测系统,两侧各布置 200 道检波器;震源布置在地表,炮间距为 100 m,共 81 炮,布置范围为 2000~10000 m;震源为 10 Hz 的雷克子波,为爆炸震源;波场模拟时间间隔为 1 ms;波场传播计算到 6.0 s. 纵、横波速度和密度见图 6 所示.

图 7 为断层模型的 81 炮叠加结果(未滤波). 从图中可见,稳定激发振幅成像条件能够获得与归一化互相关成像条件相当的图像,尤其是断层模型的底部的两个界面,垂直分量能够获得比水平分量更加清晰的图像,且稳定激发振幅成像条件的水平分量的图像比归一化互相关成像条件的清晰. 总体上,归一化成像条件得到的偏移剖面低频假象更为严重. 同样,在偏移剖面上存在较弱的串扰假象(箭头所指位置)^[49].

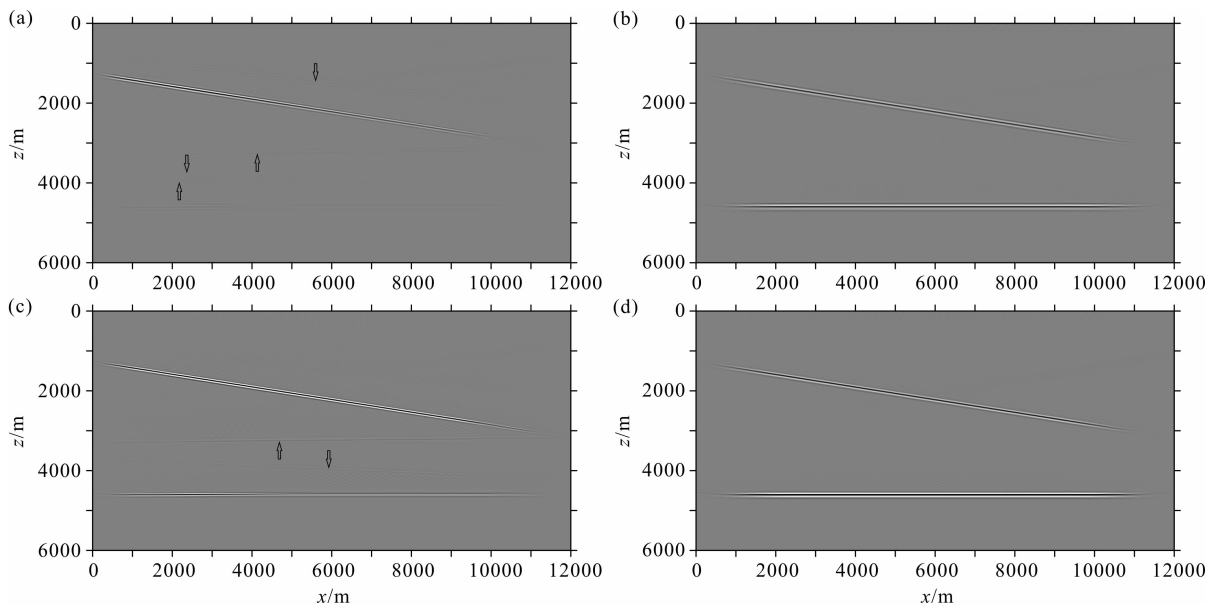


图 5 倾斜模型 46 炮叠加成像剖面(滤波);归一化互相关成像剖面
(a)水平分量;(b)垂直分量;稳定激发振幅成像剖面;(c)水平分量;(d)垂直分量.

Fig. 5 Stacked imaging profiles from 46 shots (filtered) in the model with a tilted surface

(a) and (b) are the horizontal and vertical component imaging profile from the normalized correlation imaging condition, respectively; (c) and (d) are the horizontal and vertical component imaging profile from the stable excitation amplitude imaging condition, respectively.

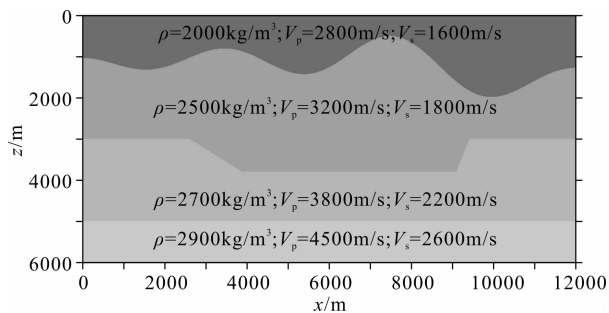


图 6 断层模型

Fig. 6 The velocity of the fault model

4.3 Marmousi-ii 模型

为了进一步验证稳定的激发振幅成像条件在非均匀的复杂模型中的有效性,我们将该成像条件应用到石油工业界的标准测试模型——Marmousi-ii 弹性波模型中,并与经典的归一化互相关成像条件进行对比研究. 其中,图 8 是 Marmousi-ii 的 P 波速度模型,黑线框内为原始的 Marmousi 声波模型部分. 图 9 是 Marmousi-ii 弹性波模型的构造单元和岩性解释剖面图. 相比于原始的 Marmousi 声波速

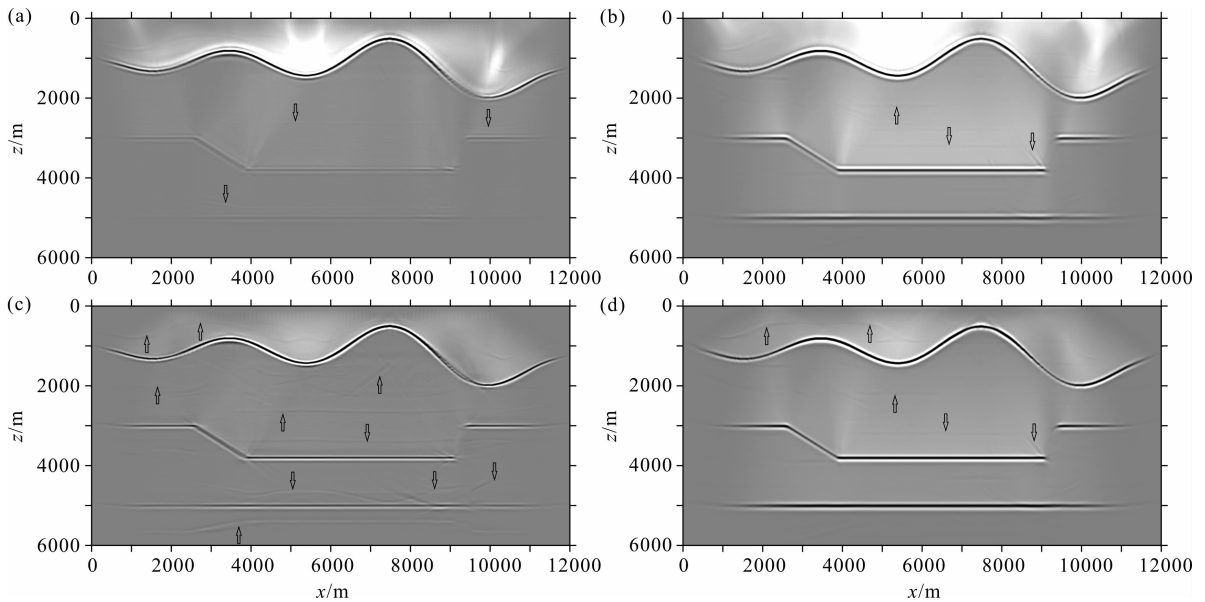


图7 断层模型的81炮叠加成像剖面(未滤波);归一化互相关成像剖面

(a)水平分量;(b)垂直分量;稳定激发振幅成像剖面:(c)水平分量;(d)垂直分量.

Fig. 7 Stacked imaging profiles from 81 shots (unfiltered) in the fault model

(a) and (b) are the horizontal and vertical component imaging profile from the normalized correlation imaging condition, respectively;

(c) and (d) are the horizontal and vertical component imaging profile from the stable excitation amplitude imaging condition, respectively.

度模型, Marmousi-ii 模型延伸的更长, 顶部的水层进一步加厚, 并且增加了几个储层和零 P 波阻抗的砂体(图 9).

Marmousi-ii 模型的网格点数是 13601×2801 , 受计算条件的限制, 我们将其在纵、横向上每间隔 5 个采样点进行抽稀, 最终有 2721×561 个网格点. 稳定的激发振幅成像条件和归一化的互相关成像条件均采用双边接收的观测系统, 两侧各布置 250 道, 炮间距为 100 m, 炮点的布置范围为 2500~24700 m. 纵横向网格间距均为 10 m, 时间采样间隔为 1 ms、震源为 10 Hz 的雷克子波(爆炸震源), 震源和检波器均布置在水面, 共激发了 223 炮, 波场传播计算到 10 s. 由于逆时偏移算法具有很好的并行性, 每个进程可以承担一定炮数的偏移任务, 最后再收集进行叠加. 为此, 该算例使用基于 MPI 通信的并行程序. Marmousi-ii 模型使用 16 个进程在 Dell Precision T5600 WorkStation (linux 系统) 上进行偏移, 偏移结果见图 10. 由于两端仅叠加一次, 因此两端的图像不如中间清晰.

从图 10 可以看出, 总体上, 稳定的激发振幅成像条件获得了具有与归一化成像条件相当清晰的偏移剖面, 但是后者的低频假象比前者更为严重. 两者的水平分量偏移剖面在陡倾构造附近(见断层附近)更加清晰, 而垂直分量偏移剖面在低角度构造附近(见左下部分的盐岩上界面)能够获得非常清楚的构

造形态, 并且四个剖面对(5000 m, 1700 m)处的含气砂岩通道处有很好的响应.

我们将 Marmousi-ii 模型中最为复杂的部分(水平方向在 10000~20000 m 之间, 垂直方向在 1000~4000 m 之间)进行放大比较. 从图 11 可见, 激发振幅成像条件在断层附近能够获得更加清晰的图像, 这可能归因于它总是利用波场中信噪比最高的波场信息.

4.4 计算效率对比

为了对比上述两种成像条件的计算效率, 分别统计了上述三个模型的计算时间和对硬盘的需求量(表 1、2). 倾斜模型和断层模型在 Lenovo ThinkCentre M8300t(Corel i7, 3.40 GHz)上测试运行, 使用了有限差分串行程序; Marmousi-ii 模型在 Dell Precision T5600 WorkStation (Xeon-8 核, 2.70 GHz) 上测试运行, 使用了有限差分并行程序.

归一化成像条件需要存储波场快照, 其硬盘存储空间和 I/O 吞吐操作是巨大的; 而稳定激发振幅成像条件仅需在每个时间步计算能量密度, 而其所需要的额外计算量却很小. 值得指出的是, 由于 Marmousi-ii 模型的偏移是在工作站 Dell Precision T5600 进行, 使用了最大 16 个进程, 每个进程最多计算 14 炮, 表中的平均每步耗时为总耗时除以 14. 在单台电脑上运行归一化互相关成像的并行程序, 在波场快照的 I/O 吞吐操作时, 各个进程会相互争

表 1 CPU 耗时统计

Table 1 The statistic for CPU time consuming

成像条件	归一化互相关成像条件	稳定激发振幅成像条件	耗时比	
倾斜模型	CPU 耗时 (h)	69.81	34.62	
	总炮数(炮数)	46	46	2.02
	平均每炮耗时 (min/炮)	91.05	45.16	
断层模型	CPU 耗时 (h)	77.96	39.10	
	总炮数(炮数)	81	81	2.00
	平均每炮耗时 (min/炮)	57.74	28.96	
Marmousi-ii 模型	CPU 耗时 (h)	182.40	12.08	
	总炮数(炮数)	223	223	15.10
	平均每炮耗时 (min/炮)	781.71	51.77	

表 2 硬盘需求情况统计

Table 2 The statistic for hard disk occupation

成像条件	倾斜模型	断层模型	Marmousi-ii 模型
归一化互相关成像条件	8.09 GB	10.78 GB	84.16 GB
稳定激发振幅成像条件	0 GB	0 GB	0 GB

夺资源,因此其耗时比可能是不客观的,若在多节点的并行机上进行,这个比值可能会降低.受计算条件的限制,对于 Marmousi-ii 模型,我们每隔 2 个时间间隔存储波场快照,同样在逆传的过程中每隔 2 个时刻利用成像条件.即使如此,每炮存储波场信息所需要的硬盘空间为 5.26GB,而 16 个进程需要的硬盘空间多达 84.16GB.

5 结论和讨论

本文修正了激发振幅成像条件,使其在弹性波逆时偏移中更加稳健.相比于弹性波的归一化互相关

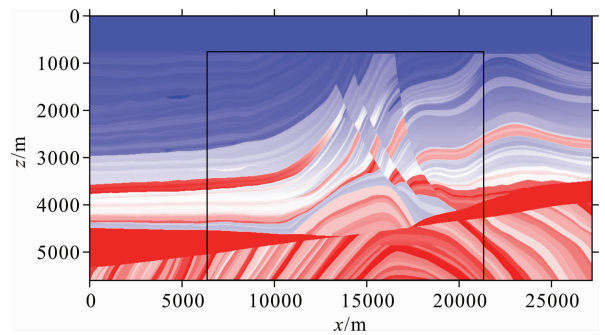


图 8 Marmousi-ii 的 P 波速度模型

Fig. 8 P-wave velocity of the Marmousi-ii model

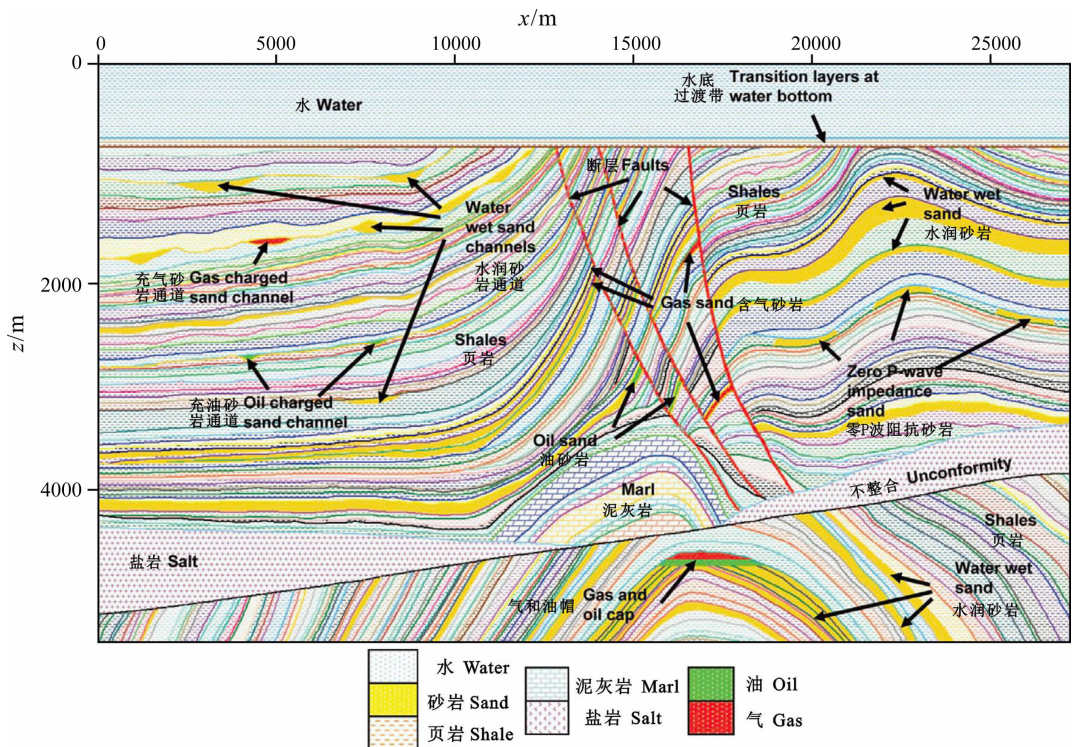


图 9 Marmousi-ii 模型的构造单元和岩性解释图

Fig. 9 Structural elements and lithologies interpreted map of the Marmousi-ii model

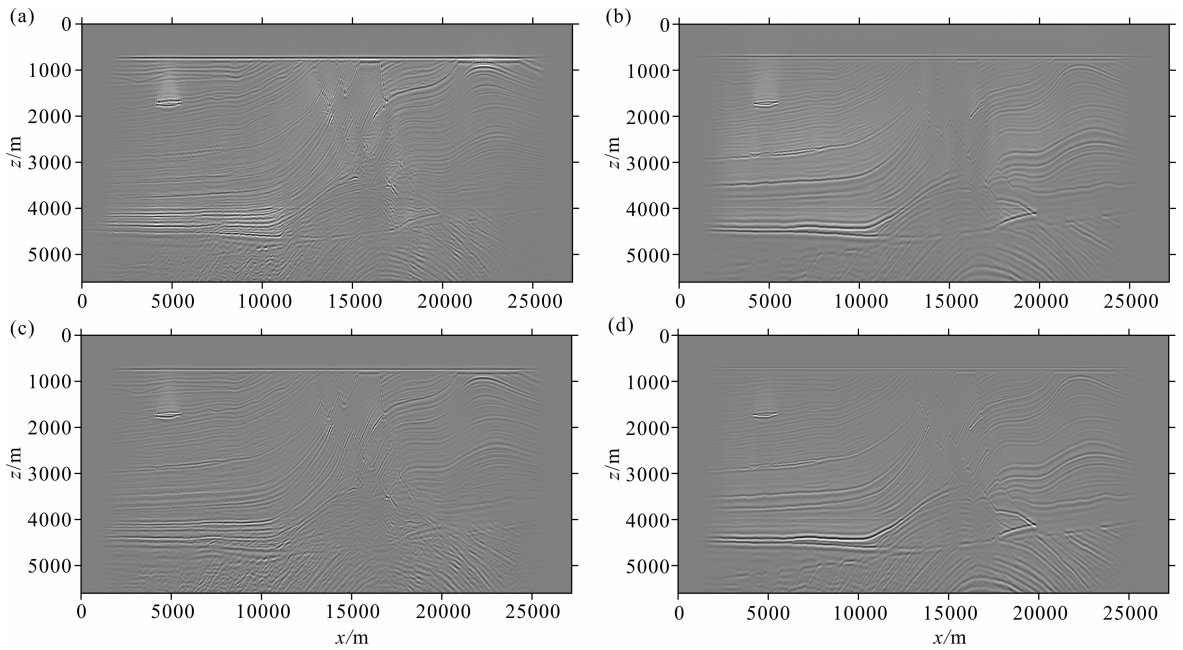


图 10 Marmousi-ii 模型的 223 炮叠加成像剖面(滤波);归一化互相关成像剖面

(a)水平分量;(b)垂直分量;稳定激发振幅成像剖面;(c)水平分量;(d)垂直分量.

Fig. 10 Stacked imaging profiles of the Marmousi-ii from 223 shots

(a) and (b) are the horizontal and vertical component imaging profile from the normalized correlation imaging condition, respectively; (c) and (d) are the horizontal and vertical component imaging profile from the stable excitation amplitude imaging condition, respectively.

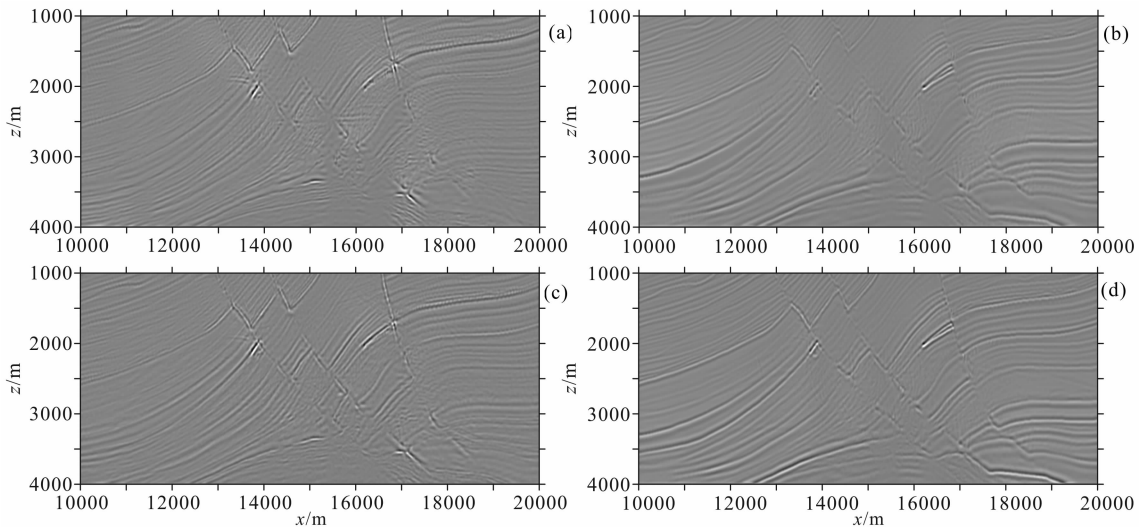


图 11 Marmousi-ii 模型的部分叠加成像剖面(滤波);归一化互相关成像剖面

(a)水平分量;(b)垂直分量;稳定激发振幅成像剖面;(c)水平分量;(d)垂直分量.

Fig. 11 Partial stacked imaging profiles of the Marmousi-ii

(a) and (b) are the horizontal and vertical component imaging profile from the normalized correlation imaging condition, respectively; (c) and (d) are the horizontal and vertical component imaging profile from the stable excitation amplitude imaging condition, respectively.

关成像条件,在成像质量相当的前提下大大节省了存储量,缩短了逆时偏移的总耗时,同时偏移剖面的分辨率较高,低频假象弱,硬盘需求量为零,避免了巨大的 I/O 吞吐开销,提高了计算效率,这在三维计算(或并行计算)中尤其明显.稳定激发振幅成像

利用了波场中信噪比最高的那部分波场(可能是反射波、多次波等)信息,在某些局部区域能够获得相比于归一化互相关成像条件更加清晰的图像.相比于弹性波的激发时间成像条件,稳定激发成像条件使用最大能量的震源波场做归一化,能自动校正水

平分量在震源两侧的极性反转,在多炮叠加时避免极性反转引起的振幅损失.归一化互相关成像条件利用了全波场信息,在某些特殊区域(如丘下构造等),它可能获得比稳定激发振幅更加清晰的图像,这些将有待于进一步研究讨论.对于稳定激发振幅成像条件,若走时和震源波场的振幅能通过射线方法(如高斯束^[50-51]、波前构建法^[52-53])或单频双程波法^[54-56]等手段获取,避免了震源波场的正演过程,可能进一步提高计算效率,但是其成像质量有待于进一步研究讨论.

致 谢 本文得到中国科学院地质与地球物理研究所滕吉文院士和张忠杰研究员的悉心指导,在此表示衷心的感谢.

参考文献(References)

- [1] McMechan G A. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values. *Geophysical Prospecting*, 1983, 31(3): 413-420.
- [2] Loewenthal D, Mufti I R. Reversed time migration in spatial frequency domain. *Geophysics*, 1983, 48(5): 627-635.
- [3] Whitmore N D. Iterative depth migration by backward time propagation. 53rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1983: 827-830.
- [4] McMechan G A, Chang W F. 3D acoustic prestack reverse time migration. *Geophysical Prospecting*, 1990, 38(7): 737-756.
- [5] Mulder W A, Plessix R E. A comparison between one-way and two-way wave-equation migration. *Geophysics*, 2004, 69(6): 1491-1504.
- [6] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C. Reverse time migration. *Geophysics*, 1983, 28(11): 1514-1524.
- [7] Yoon K, Marfurt K J, Starr W. Challenges in reverse-time migration. SEG Int'1 Exposition and 74th Annual Meeting, 2004.
- [8] Zhu J M, Lines L R. Comparison of Kirchhoff and reverse-time migration methods with applications to prestack depth imaging of complex structures. *Geophysics*, 1998, 63(4): 1166-1176.
- [9] Zhang Y, Zhang G Q. One-step extrapolation method for reverse time migration. *Geophysics*, 2009, 74(4): A29-A33.
- [10] Biondi B, Shan G J. Prestack imaging of overturned reflections by reverse time migration. SEG Int'1 Exposition and 72nd Annual Meeting, 2002.
- [11] Chattopadhyay S, McMechan G A. Imaging conditions for prestack reverse-time migration. *Geophysics*, 2008, 73(3): S81-S89.
- [12] Claerbout J M. Toward a unified theory of reflector mapping. *Geophysics*, 1971, 36(3): 467-481.
- [13] Kaelin B, Guitton A. Imaging condition for reverse time migration. SEG New Orleans Annual Meeting, 2006.
- [14] Yan J, Sava P. Isotropic angle-domain elastic reverse time migration. *Geophysics*, 2008, 73(6): S229-S239.
- [15] Chang W F, McMechan G A. Reverse-time migration of offset vertical seismic profiling data using the excitation-time imaging condition. *Geophysics*, 1986, 51(1): 67-84.
- [16] Alejandro A V, Biondi B. Deconvolution imaging condition for reverse-time migration. Stanford Exploration Project, 2002, 112: 83-96.
- [17] Costa J C, Silva Neto F A, Alcantara R M, et al. Obliquity-correction imaging condition for reverse time migration. *Geophysics*, 2009, 74(3): S57-S66.
- [18] Yoon K, Marfurt K J. Reverse-time migration using the Poynting vector. *Exploration Geophysics*, 2006, 37(1): 102-107.
- [19] Liu F Q, Zhang G Q, Scott A M, et al. Reverse time migration using one-way wavefield imaging condition. 77th Annual International Meeting, SEG, Exped Abstracts, 2007, 26(1): 2170-2174.
- [20] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C. A two-way nonreflecting wave equation. *Geophysics*, 1984, 49(2): 132-141.
- [21] Zhang Y, Sun J. Practical issues of reverse time migration: true amplitude gathers, noise removal harmonic-source encoding. CPS/SEG Beijing 2009 International Geophysical Conference & Exposition, 2009, 27(1): 1-5.
- [22] Zhang Y, Xu S, Bleistein N, et al. True-amplitude, angle domain, common-image gathers from one-way wave-equation migrations. *Geophysics*, 2007, 72(1): S49-S58.
- [23] Deng F, McMechan G A. True-amplitude prestack depth migration. *Geophysics*, 2007, 72(3): S155-S166.
- [24] 刘红伟, 李博, 刘洪等. 地震叠前逆时偏移高阶有限差分算法及GPU实现. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1725-1733.
Liu H W, Li B, Liu H, et al. The algorithm of high order finite differenc pre-stack reverse time migration GPU implementation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(7): 1725-1733.
- [25] 刘红伟, 刘洪, 邹振. 地震叠前逆时偏移中的去噪与存储. *地球物理学报*, 2010, 53(9): 2171-2180.
Liu H W, Liu H, Zou Z. The problems of denoise storage in seismic reverse time migration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(9): 2171-2180.
- [26] Loewenthal D, Stoffa P L, Faria E L. Suppressing the unwanted reflections of the full wave equation. *Geophysics*, 1987, 52(7): 1007-1012.
- [27] Fletcher R F, Fowler P, Kitchenside P, et al. Suppressing artifacts in prestack reverse time migration. 75th Annual International Meeting, SEG, Exped Abstracts, 2005, 24(1): 2049-2051.
- [28] Feng B, Wang H Z. Reverse time migration with source wavefield reconstruction strategy. *J. Geophys. Eng.*, 2012, 9(1): 69-74.

- [29] Clapp R G. Reverse time migration with random boundaries. 79th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2009, 28: 2809-2813.
- [30] Symes W W. Reverse time migration with optimal checkpointing. *Geophysics*, 2007, 72(5): SM213-SM221.
- [31] Nguyen B D, McMechan G A. Excitation amplitude imaging condition for prestack reverse-time migration. *Geophysics*, 2013, 78(1): S37-S46.
- [32] Chang W F, McMechan G A. Elastic reverse time migration. *Geophysics*, 1987, 52(10): 1356-1375.
- [33] Schleicher J, Costa J C, Novais A. A comparison of imaging conditions for wave-equation shot-profile migration. *Geophysics*, 2008, 73(6): S219-S227.
- [34] 杨仁虎, 常旭, 刘伊克. 叠前逆时偏移影响因素分析. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1902-1913.
Yang R H, Chang X, Liu Y K. The influence factors analyses of imaging precision in pre-stack reverse time migration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(8): 1902-1913.
- [35] Loewenthal D, Hu L Z. Two methods for computing the imaging condition for common shot pre-stack migration. *Geophysics*, 1991, 56(3): 378-381.
- [36] 李文杰, 魏修成, 宁俊瑞等. 叠前弹性波逆时深度偏移及波场分离技术探讨. 物探化探计算技术, 2008, 30(6): 447-456.
Li W J, Wei X C, Ning J R, et al. The discussion of reverse time depth migration wavefield separation for pre-stack elastic data. *Computing Techniques for Geophysical Geochemical Exploration* (in Chinese), 2008, 30(6): 447-456.
- [37] André Bulcao, Djalma Manoel Soares Filho, Webe Joao Mansur. Improved quality of depth images using reverse time migration. 77th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2007, 26(1): 2407-2411.
- [38] Kaelin B, Guitton A. Imaging condition for reverse time migration. In 76th Annual International Meeting Exposition, SEG, Expanded Abstracts, 2006: 2594-2598.
- [39] Virieux J. SH-wave propagation in heterogeneous media; velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 1984, 49(11): 1933-1942.
- [40] Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media; velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 1986, 51(4): 889-901.
- [41] Moczo P, Kristek J, Vavrycuk V, et al. 3D heterogeneous staggered-grid finite-difference modeling of seismic motion with volume harmonic arithmetic averaging of elastic moduli densities. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, 92(8): 3042-3066.
- [42] Hastings F D, Schneider J B, Brochat S L. Application of the perfectly matched layer (PML) absorbing boundary condition to elastic wave propagation. *Journal Acoustical Society of America*, 1996, 100(5): 3061-3069.
- [43] Chew W C, Liu Q H. Using perfectly matched layers for elastodynamics. // Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Baltimore, MD, USA: IEEE, 1996, 1: 366-369.
- [44] Collino F, Tsogka C. Application of the perfectly matched absorbing layer model to the linear elastodynamic problem in anisotropic heterogeneous media. *Geophysics*, 2001, 66(1): 294-307.
- [45] Hanitzsch C. Comparison of weights in prestack amplitude-preserving Kirchhoff depth migration. *Geophysics*, 1997, 62(6): 1812-1816.
- [46] Baina R, Thierry P, Calandra H, et al. 3D preserved-amplitude prestack depth migration and amplitude versus angle relevance. *The Leading Edge*, 2002, 21(12): 1237-1241.
- [47] 贺振华. 反射地震资料偏移处理与反演方法. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
He Z H. Reflection Seismic Data Migration Processing Inversion (in Chinese). Chongqing: Chongqing University Press, 1989.
- [48] Cerveny V, Molotkov I A, Psencik I. Ray Theory in Seismology. Charles: Charles University Press, 1977.
- [49] Poole T L, Curtis A, Robertsson J O, et al. Deconvolution imaging conditions and cross-talk suppression. *Geophysics*, 2010, 75(6): W1-W12.
- [50] Cerveny V. Ray synthetic seismograms for complex two-dimensional three dimensional structures. *J. Geophys.*, 1985, 58: 2-26.
- [51] Cerveny V. Gaussian beam synthetic seismograms. *J. Geophys.*, 1985, 58: 44-72.
- [52] Vinje V, Iversen E, Gjoystdal H. Traveltime amplitude estimation using wavefront construction. *Geophysics*, 1993, 58(8): 1157-1166.
- [53] Lambará G, Lucio P S, Hanyga A. Two-dimensional multivalued traveltime amplitude maps by uniform sampling of a ray field. *Geophys. J. Int.*, 1996, 125(2): 584-598.
- [54] Shin C, Min D, Marfurt K J, et al. Traveltime amplitude calculations using the damped wave solution. *Geophysics*, 2002, 67(5): 1637-1647.
- [55] Shin C, Ko S, Kim W, et al. Traveltime calculations from frequency-domain downward-continuation algorithms. *Geophysics*, 2003, 68(4): 1380-1388.
- [56] 秦义龙, 张中杰, Changsoo S 等. 利用单频双程波动方程计算初至走时及其振幅. 地球物理学报, 2005, 48(2): 423-428.
Qin Y L, Zhang Z J, Changsoo S, et al. First-arrival traveltime and amplitude calculation from monochromatic two-way wave equation in frequency domain. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(2): 423-428.