

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, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.024

Liu H W, Li B, Liu H, et al. The algorithm of high order finite difference pre-stack reverse time migration and GPU implementation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(7):1725~1733, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.024

地震叠前逆时偏移高阶有限差分算法及 GPU 实现

刘红伟^{1,2}, 李 博^{1,2}, 刘 洪¹, 佟小龙³, 刘 钦³

1 中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院油气资源研究重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 北京吉星吉达科技有限公司, 北京 100029

摘 要 叠前逆时偏移技术是解决地震成像问题的有力工具, 但由于计算量大、成像噪音以及存储量大等原因没有得到广泛的应用. 本文给出了逆时偏移的实现过程, 分析了高阶有限差分格式的稳定性与频散关系. 针对叠前逆时偏移计算量大的问题, 使用图形处理器(Graphic Processing Unit, 简称 GPU)实现算法加速, 比传统的 CPU 计算速度提高了一个数量级. 文中对理论模型进行了计算, 并与单程波偏移方法做比较, 结果表明: 叠前逆时偏移有效突破了成像倾角限制, 对垂直断层、盐丘空腔内幕等特殊构造成像效果均有显著提高. 本文尚未涉及成像噪音去除以及存储量等问题, 笔者将另文阐述.

关键词 稳定性, 频散关系, 叠前逆时偏移, GPU 加速

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.024

中图分类号 P631

收稿日期 2010-01-27, 2010-05-25 收修定稿

The algorithm of high order finite difference pre-stack reverse time migration and GPU implementation

LIU Hong-Wei^{1,2}, LI Bo^{1,2}, LIU Hong¹, TONG Xiao-Long³, LIU Qin³

1 Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Graduate University, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Beijing Geostar Science and Technology Co. Ltd, Beijing 100029, China

Abstract Pre-stack reverse time migration (RTM) is a very useful tool for seismic imaging. But it has not been widely used because of the highly intensive computation cost, imaging noise and massy memory demand. In this paper, we illustrate the implementation process of RTM and analyze the stability condition and dispersion relation of finite difference (FD) method. For the problem of intensive computation cost, we use the Graphic Processing Unit (GPU) architecture to realize RTM and get an order of magnitude higher speedup ratio compared to the traditional CPU architecture. Compared to the one way wave equation migration methods, RTM does not have the imaging dip limit and the imaging effect is significantly improved. The test on vertical fault and BP models proves this conclusion. The problems of imaging noise removing and massy memory demand will be discussed in other papers.

Keywords Stability, Dispersion relation, Pre-stack Reverse time migration, GPU accelerating

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB209603), 国家自然科学基金重点项目(40830424), 国家科技重大专项(2008ZX05008-006-003), 塔中 72 井区碳酸盐岩油气藏地球物理探测方法研究项目联合资助.

作者简介 刘红伟, 男, 1982 年生, 中国地质与地球物理研究所站博士后, 主要从事地震成像方面的研究. E-mail: liuhw@mail.iggcas.ac.cn

1 引言

逆时偏移的历史可以追溯到 1978 年. 1978 年 Hemon^[1] 阐述了用有限差分法求解波动方程实现逆时偏移的思想, 但没有强调这种方法的潜力. 而真正将逆时偏移引入地震勘探这一领域的是 1983 年几位科学家独立的科研工作: Baysal 等^[2] 采用拟谱法实现逆时偏移, 他的方法规定了波场传播算子的符号, 成像角度限制在 90° 以内; McMechan 等^[3] 采用时间和空间域二阶有限差分法求解全声波方程, 突破了倾角的限制; Loewenthal 等^[4] 在频率波数域利用指数解析解求解波动方程, 计算速度快, 但是只适合常速介质; Whitmore 等^[5] 利用逆时偏移结果拾取层位, 更新速度模型, 迭代求取速度. 所有这些方法最初都是用做叠后偏移. 由于逆时偏移计算量及存储量巨大, 无法适应工业生产的需要, 逆时偏移一直没有在工业界得到广泛应用. 相反, Kirchhoff 积分法以及单程波方法由于其在计算量以及存储量方面的优势一直占据着地震偏移领域的主导地位. 近年来, 由于计算机技术的飞速发展以及对复杂构造油气藏成像要求的提高, 逆时偏移重新被认识开发. 目前, 逆时偏移技术已经从叠后走向叠前, 从二维走向三维^[6], 从声波方程走向弹性波方程^[7], 从各向同性介质走向 TTI (Tilted Transversely Isotropic, 倾斜横向各向同性) 介质^[8-11].

国内对逆时偏移的研究可追溯到 20 世纪 90 年代, 邓玉琼等^[12] 将弹性波有限元反时偏转法用于同时对合成地表反射数据和合成 VSP 反射数据进行偏移, 不但可以改正因使用范围有限的地表数据而导致的弯曲畸变, 反射点也可被恰当地成像于他们的真实深度处; 王山山等^[13] 采用混合法求解双程无反射波动方程, 这个方法沿 x 方向使用伪谱法, 沿 z 方向采用有限元法, 沿时间方向有限差分, 是算法灵活性, 计算效率以及内存需求的一种折中的选择; 底青云等^[14] 开展了弹性波有限元逆时偏移技术研究; 张美根等^[15] 将弹性波有限元叠前逆时偏移技术应用到各向异性介质; 王童奎等^[16] 用谱元法求解波动方程实现叠前逆时偏移; 薛东川等^[17] 采用最大振幅成像条件替代最小走时成像条件; 杜启振等^[18] 将叠前逆时偏移技术应用到横向各向同性介质弹性波多分量数据, 陈可洋^[19] 用高阶有限差分法求解波动方程实现叠前逆时偏移.

近年来, 国内外的逆时偏移研究成功的案例并

不多见, 重要的原因是逆时偏移研究耗费巨大, 30 余年来, 缺乏一种快速的、适合工业生产规模的逆时偏移实现方法. 正如前文提到的, 逆时偏移的一大瓶颈是计算量太大. 与单程波方法相比, 单程波方法沿着深度方向递推, 只需要计算地震数据有限频带内的信息; 逆时偏移沿时间方向递推, 由于算法稳定性以及频散关系等要求, 时间递推步数要远大于单程波深度递推时所需要的频率数目. 如何提高逆时偏移的计算效率成为逆时偏移能否大规模应用的重要环节. 目前, 逆时偏移提速主要有两种方法: 从算法角度减少计算量和高性能并行计算. 减少计算量的方法主要有: Yue Wang^[20] 提出一种变时间步长和空间网格大小的方法; Guan 等^[21] 提出了一种分段多步偏移方法, 将偏移区域在深度方向按照构造特征划分为几个连续的空间, 对每个空间依次偏移, 并在空间拼接区域保存波场信息用于下一个空间的偏移, 这种做法的优点是对每个偏移空间所选择的网格以及时间步长可以不同, 而且不同的空间可以选择不同的偏移方法, 可以显著降低计算量; Zhang 等^[22] 通过引入复波场以及平方根算子将二阶声波方程降为类似于单程波的时间一阶导数的偏微分方程, 采用可分近似求解, 算法突破了稳定性及频散的影响, 时间步长可以取到 Nyquist 频率, 是一种高效率高精度的算法; Robert Soubaras 等^[23] 指出单步法计算过程中拟微分算子难以合成的缺点并采用双步法方程克服了这一缺点, 同时保持了单步法在时间步长方面的高效性. 逆时偏移提速的另一种方法依靠计算机硬件性能的提高: Matthew H Karazincir 等^[24] 比较了伪谱法和高阶有限差分两种方法, 高阶有限差分计算量小, 不存在 Fourier 变换产生的噪音, 从稳定性的角度比较, 时间间隔可以更大, 并且便于并行实现, Villarreal 等^[25] 利用这一思想, 采用大规模集群并行实现波动方程有限差分法正演模拟; 多核处理器 (如 Cell, FPGA 以及 GPU) 的出现, 为 RTM 提供了新的机遇, Araya-Polo M 等^[26] 首先用 Cell 处理器实现了三维逆时偏移, Micikevicius P^[27] 给出了利用 GPU 实现高阶有限差分的算法; Darren Foltinek 等^[28] 在利用 GPU 实现逆时偏移方面做了有益的尝试. 本文的一项主要工作就是围绕利用 GPU 加速逆时偏移展开.

GPU 的全称是图形处理器 (Graphic Processing Unit), 是 NVIDIA 公司推出的一款用于计算机显示的设备, 俗称“显卡”. 2006 年 NVIDIA 公司发布了统一计算设备架构平台 CUDA (Compute Unified

Device Architecture), 可让开发商编写指令程序, 以便让 GPU 执行通常由 CPU 执行的计算任务. 由于 GPU 在科学计算方面的巨大优势以及在计算机中的重要作用, GPU 的含义可能扩展为通用处理器 (General Purpose Unit). 和传统的集群相比, GPU 具有计算核心多, 硬件成本低, 省电, 省空间等优点, 目前已经广泛应用于生命科学、医学设备、工业生产、电子设计自动化、制造、金融和通讯等行业. 在石油天然气行业, 国际上 Hess、CGGVeritas、Chevron、Headwave、Acceleware、Seismic city 等公司和组织都在致力于这方面的研究. 中国科学院地质与地球物理研究所刘洪研究员与吉星吉达公司共同合作开发的非对称走时叠前时间偏移 GPU 算法^[29, 30]已经在胜利、大庆等油田投入生产, 效果良好. GPU 已经逐渐成为下一代高性能计算的首选工具.

本文首先给出了波动方程的高阶有限差分解法, 并分析了算法稳定性条件以及频散关系; 然后介绍了逆时偏移的实现过程以及 GPU 实现流程; 最后对脉冲响应、垂直断层以及 BP 模型做了测试, 通过与单程波方法比较, 阐明了逆时偏移方法对陡倾构造成像方面的优势.

2 波动方程高阶有限差分解

三维均匀横向各项同性介质声波方程如下:

$$\frac{\partial p^2}{\partial t^2} = v^2 \left(\frac{\partial p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial p^2}{\partial y^2} + \frac{\partial p^2}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

式中速度变量 v 是空间变量的函数, 我们采用规则网格高阶有限差分解法求解声波方程.

2.1 差分格式

规则网格中心差分系数的求解通常借助泰勒展开, 生成系数矩阵, 利用 Cramer 求取系数. 以二阶导数为例, 要求 $2n$ 阶差分格式的系数, 需要求解以下系数矩阵:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2^2 & \cdots & \cdots & \cdots & n^2 \\ 1 & 2^4 & \cdots & \cdots & \cdots & n^4 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ 1 & 2^{2n-2} & \cdots & \cdots & \cdots & n^{2n-2} \\ 1 & 2^{2n} & \cdots & \cdots & \cdots & n^{2n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ A_{n-1} \\ A_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

应用 Cramer 法则可以解此方程, 主要涉及两个 Vandermonde 行列式的求解. 差分系数有如下

形式:

$$A_l = \frac{(-1)^{l+1} \prod_{i=1, i \neq l}^n i^2}{l^2 \prod_{i=1}^{l-1} (l^2 - i^2) \prod_{i=l+1}^n (i^2 - l^2)}, \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

以 x 方向的空间导数为例, 差分格式如下:

$$\frac{\partial p^2}{\partial x^2} = \sum_{j=1}^{N/2} A_j \frac{p_{i+j}^n - 2p_i^n + p_{i-j}^n}{dx^2} = \sum_{j=-N/2}^{N/2} \frac{C_j}{dx^2} p_{i+j}^n, \quad (4)$$

其中,

$$C_{-l} = C_l = A_l, \quad C_0 = -2 \sum_{l=1}^n A_l. \quad (5)$$

差分格式的求取还有另外一种更为简洁的方法, Bengt Fornberg^[31]利用递推法推导了高阶规则网格与交错网格、中心差分以及单边差分格式, 通过与求解系数矩阵求得的系数比较, 二者完全相同, 文中我们采用递推法推导了 2~20 阶差分格式的系数, 从算法稳定性以及频散关系的角度考虑, 时间方向采用二阶差分格式, 空间采用高阶差分格式.

2.2 稳定性分析

采用状态传递矩阵特征值^[32]方法, 可以求得时间域二阶差分, 空间域高阶差分格式的稳定性条件为:

一维情形:

$$dt \leq \frac{2dx}{v_{\max} \sqrt{-C_0 + 2 \sum_{l=1}^N C_l (-1)^{l+1}}} = \text{coeff}1d \frac{dx}{v_{\max}}, \quad (6)$$

二维情形:

$$\begin{aligned} dt &\leq \frac{2\Delta s}{\sqrt{2} v_{\max} \sqrt{-C_0 + 2 \sum_{l=1}^N C_l (-1)^{l+1}}} \\ &= \text{coeff}2d \frac{\Delta s}{v_{\max}}, \quad \Delta s = \min(dx, dz), \end{aligned} \quad (7)$$

三维情形:

$$\begin{aligned} dt &\leq \frac{2\Delta s}{\sqrt{3} v_{\max} \sqrt{-C_0 + 2 \sum_{l=1}^N C_l (-1)^{l+1}}} \\ &= \text{coeff}3d \frac{\Delta s}{v_{\max}}, \quad \Delta s = \min(dx, dy, dz). \end{aligned} \quad (8)$$

将稳定性条件系数作为方程维数及空间差分阶数的函数, 如图 1 所示: 阶数越高, 维数越高, 则稳定性条件系数越小, 相应的时间步长越小, 导致计算量与存储量越大. 从而可以得出结论: 进行数值模拟

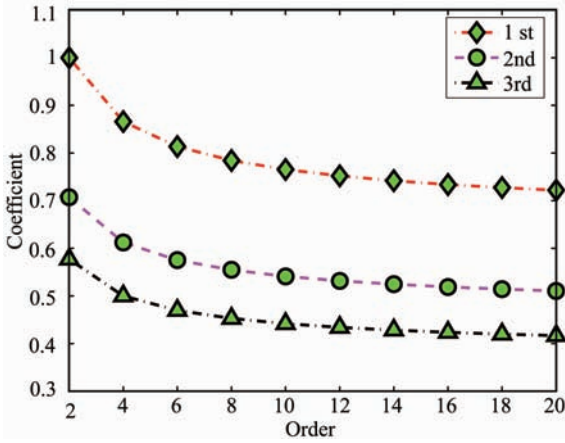


图 1 时间二阶差分, 空间高阶差分格式稳定性条件系数
Fig. 1 The stability condition coefficients when 2nd order in time direction and high order in space direction is used

$$\frac{v}{v_0} = \sqrt{-\frac{1}{2\pi^2} \sum_{n=1}^{N/2} A_n \left(\frac{\cos(2\pi n \cos\theta(dx/\lambda)) - 1}{(dx/\lambda)^2} + \frac{\cos(2\pi n \cos\theta(dz/\lambda)) - 1}{(dz/\lambda)^2} \right)}. \quad (10)$$

从(10)式可以发现, $v < v_0$ (v_0 是源点的速度), 也就是说, 由于空间离散造成的数值频散在波形上作为尾巴而出现. 空间差分引起的数值频散由三个因素决定: 一是地震波传播方向, 在 $dx = dz$ 的情况下, 角度为 45° 时数值频散最小, 如图 2a 和图 3a 所示; 二是空间差分精度, 随着空间差分精度的提高, 差分解法产生的数值频散会逐渐减小, 如图 2 所示. 因此, 可通过提高差分精度的办法来减小数值频散; 三是一个波长内离散点数目, 对任意阶空间差分精度, 一个波长内离散点数目越少, 数值频散越严重, 如图 2b 所示. 也就是说, 在相同的网格间距情况下, 子波频率越高, 介质速度越低, 频散越严重. 因此, 海水

时, 从二维到三维, 不仅仅是计算的空间网格点数增加, 时间递推的步数也增加.

2.3 频散关系

差分算子对微分算子的近似会造成数值频散, 时间方向和空间方向的差分都是如此. 下面, 我们以二维声波方程空间差分为例推导频散关系.

二维空间高阶差分格式如下:

$$\frac{\partial p^2}{\partial t^2} = v_0^2 \sum_{n=1}^{N/2} A_n \left(\frac{p_{i+n,j}^m - 2p_{i,j}^m + p_{i-n,j}^m}{dx^2} + \frac{p_{i,j+n}^m - 2p_{i,j}^m + p_{i,j-n}^m}{dz^2} \right). \quad (9)$$

将 $p(t, x, z) = \exp[i(\omega t - k \cos\theta x - k \sin\theta z)]$ 以及 $\omega^2 = k^2 v^2$ 带入上式, 可得频散关系:

以及陆地表层低降速带以及高频子波对地震波模拟结果有很大影响, 这一结论可以解释文献[20]中变时间步长和空间网格大小的方法. 在实际应用中, 应根据不同的地质模型以及数据频率信息来选择不同的差分精度.

采用类似的推导方法, 可以推导出时间差分引起的数值频散关系如下:

$$\frac{v_0}{v} = \frac{T}{\pi dt} \sqrt{-2 \sum_{n=1}^{N/2} A_n \left(\cos 2n\pi \frac{dt}{T} - 1 \right)}, \quad (11)$$

可以发现 $v > v_0$, 由于时间离散造成的数值频散在波形上在正常到达时之前出现. 时间差分引起的数值频散由两个因素决定: 差分精度越高, 一个时间周

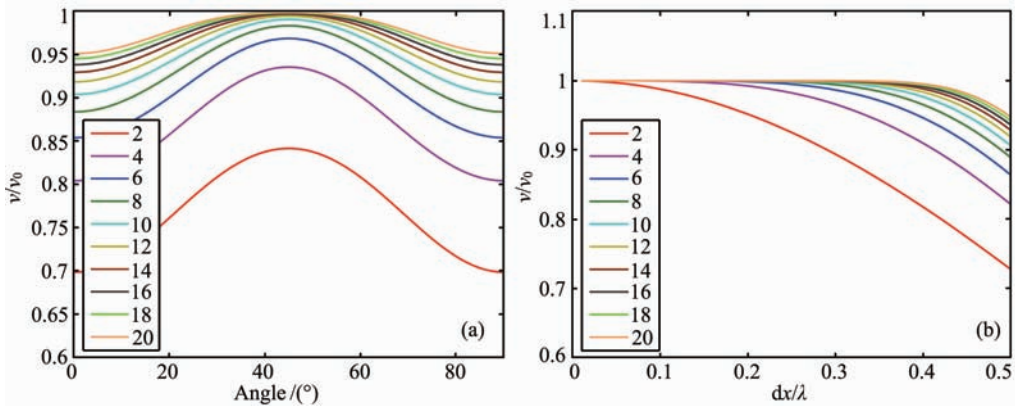


图 2 (a) 当 $dx = dz$, 并且一个波长内网格点数为常数不同阶数差分格式频散关系随传播角度的变化图; (b) 当 $dx = dz$, 并且传播角度为常数时不同阶数差分格式频散关系随一个波长内网格点数的变化图.
Fig. 2 (a) is the dispersion relation verses propagation angles when $dx = dz$ and the number of grid points in a wave length is constant; (b) is the dispersion relation verses the number of grid points in a wave length when $dx = dz$ and the propagation angle is constant.

期内离散点数目越多,由时间离散造成的数值频散越低.也就是说,时间递推步长必须满足稳定性条件与频散关系两方面的要求.在逆时偏移中,由于算法稳定性的要求, dt 一般很小,时间方向二阶差分精度足以满足频散关系的要求,地震波传播中的数值频散主要是由空间离散造成的,因此,空间方向要采

用高阶差分格式.

图 3 是一个简单的常速模型,震源位于地表中央处,模型速度为 3000 m/s, $dx=dz=12.5$ m,地震波主频为 20 Hz,时间导数采用二阶差分.图 3a 是空间导数二阶差分的结果,频散严重;图 3b 是空间导数十二阶差分的结果,频散得到了有效的压制.

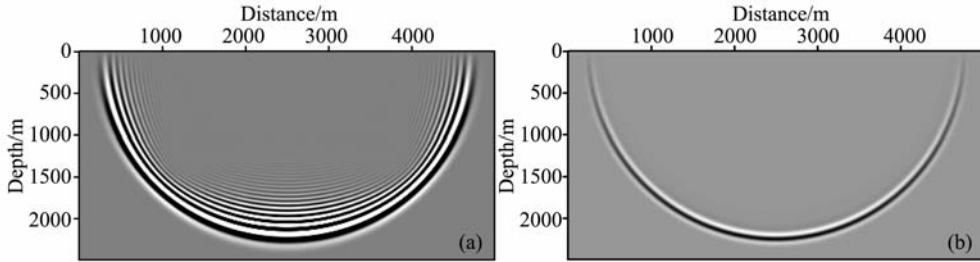


图 3 空间导数二阶差分的结果(a)及空间导数十二阶差分的结果(b)

Fig. 3 (a) is the result using the 2nd order finite difference to calculate the spatial derivative; (b) is the result using the 12th order finite difference to calculate the spatial derivative

3 叠前逆时偏移实现过程及 GPU 加速

炮域叠前逆时偏移的实现过程包括三个步骤:首先炮点波场沿时间正方向传播到最大时刻并将中间结果保存下来;然后检波点波场数据沿时间反方向传播,并读取炮点相应时刻的波场值;最后应用合适的成像条件,将所有炮的偏移结果累加得到最终偏移结果.波场传播采用上文中介绍的时间域二阶差分、空间域高阶差分格式. Sandip Chattopadhyay 等^[33]对逆时偏移成像条件做了比较系统和全面的介绍,本文中我们选用互相关成像条件,原因是互相关成像条件容易实现,便于并行,不存在稳定性问题,并且可以处理多波至问题,不会丢失波场信息.

$$\text{image}(x, z) = \sum_{\text{time}} S(x, z, t) R(x, z, t), \quad (12)$$

式(9)和式(12)表明,波场传播和应用成像条件时空间中每个网格点都是解耦的,即独立的.所有网格点可以并行计算.并行粒度很小,每个线程只计算一个网格点或者几个网格点的值,与 CPU 集群适合粗粒度并行不同,GPU 计算核心多,对这种细粒度并行的问题更有优势.实验过程中选用的 GPU 型号是 Tesla S1070^[34],它由四块 Tesla 1060 显卡组成,每块显卡有 240 个计算核心和 4GB 的显存,选用的 CUDA 版本是 2.3.1^[35].作为对比,CPU 的型号是 Pentium(R) Dual-Core CPU E5200 @ 2.50 GHz,配有 2GBDDR2 内存.

图 4 是 CPU/GPU 协同计算实现逆时偏移的

流程图,计算密集的波场传播与成像部分借助 GPU 并行计算,中间结果需要借助通讯保存在 CPU 内存或硬盘上.需要指出的是,运用空间高阶差分法需要大量的内存读写,以三维 8 阶差分格式为例,每计算一个网格点的值需要读取网格点周围 25 个网格点的数据,内存读取冗余度(read redundancy)很高.针对这一问题,我们采用文献[25]中的方法,运用矩阵分片的思想,借助 GPU 共享存储器(share memory)机制重用内存数据,可以大幅度降低内存读取冗余度.

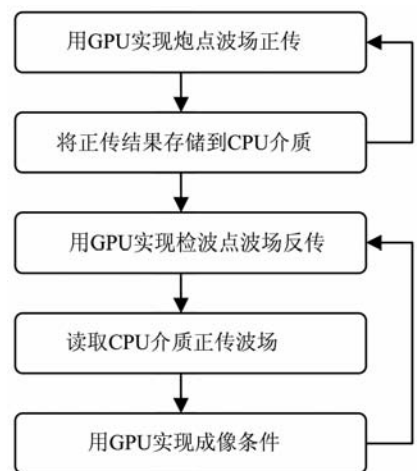


图 4 用 GPU 实现逆时偏移流程图

Fig. 4 The flow chart of RTM using GPU

4 模型试算

我们针对垂向变速介质的脉冲响应,以及垂直断

层和 BP 模型分别使用单程波偏移和逆时偏移方法进行了测试,测试结果如下。

4.1 脉冲响应

Nolet $G^{[36]}$ 指出,对如下线性变速介质:

$$v = v_0 + v' \sin \alpha (x - x_0) + v' \cos \alpha (z - z_0), \quad (13)$$

t 时刻的波前面解析解方程如下:

$$\begin{aligned} & \{x - x_0 + v_0/v' \sin \alpha [1 - \text{ch}(v't)]\}^2 \\ & + \{z - z_0 + v_0/v' \cos \alpha [1 - \text{ch}(v't)]\}^2 \\ & = [v_0/v' \text{sh}(v't)]^2, \end{aligned} \quad (14)$$

式中, v' 是速度梯度, α 是速度梯度方向与 z 方向的夹角。波场 t 时刻波前面是半径为 $v_0/v' \text{sh}(v't)$, 圆心为 $\{x_0 - v_0/v' \sin \alpha [1 - \text{ch}(v't)], z_0 - v_0/v' \cos \alpha [1 - \text{ch}(v't)]\}$ 的圆。

测试过程中,我们选用的是仅在垂直方向存在变速的介质,其中 $v_0 = 1800 \text{ m/s}$, $v' = 2 \text{ m/s/m}$, $dx =$

$dz = 8 \text{ m}$, 震源放在地表模型的中心位置 1036 m 处,选用主频为 20 Hz 的 Ricker 子波为震源,波场在 $t = 0.45 \text{ s}$ 时刻的波前面是一个半径为 924 m, 圆心为 (1036 m, 390 m) 的圆,如图 5 中的白线所示。分别用高阶有限差分逆时偏移和分裂步相移^[37] 单程波偏移方法计算脉冲响应,如图 5 所示。对于横向不变速介质,分裂步相移法得到的脉冲响应走时信息是准确的,和理论解吻合很好,但对于角度大于 90° 的波场无法成像,如图 5b 所示,这是传统单程波方法固有的局限;逆时偏移求解的是全声波方程,没有做任何的近似,突破了 90° 倾角的限制,可以对任意角度成像,如图 5a 所示。

4.2 垂直断层

第二个实验是如图 6a 所示的垂直断层模型,成像难点是断层的垂直部分。我们使用基于 GPU/CPU

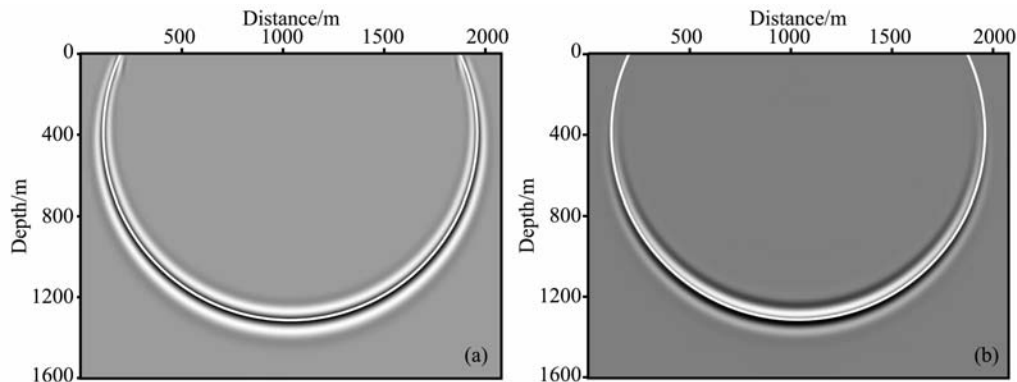


图 5 逆时偏移结果(a)及单程波分裂步相移法的结果(b),图中的白线是理论解

Fig. 5 (a) is the result of reverse time migration; (b) is the result of split step one way wave migration. The white lines indicate the theoretic solution

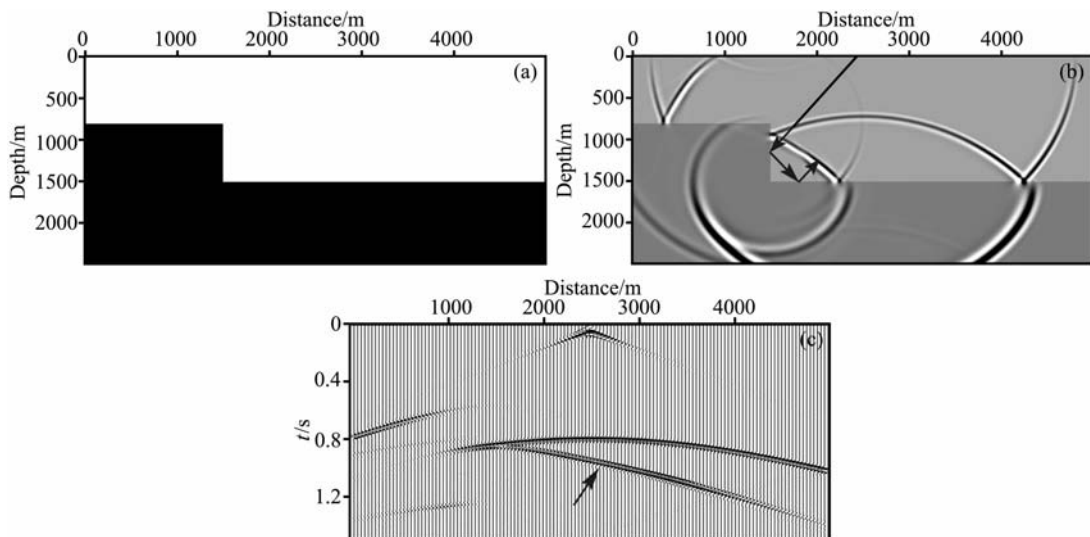


图 6 (a)速度模型;(b)炮点波场某一时刻的波场快照,箭头方向指示了棱柱波的传播路径;
(c)单炮正演记录,箭头指示的同相轴是棱柱波

Fig. 6 (a) is the velocity model; (b) is one snapshot the shot wave-field, the arrows indicate the path of the prismatic wave; (c) is the shot profile, the arrow pointed event is the prismatic wave.

协同计算的高阶有限差分法正演模拟得到正演数据,图 6b 给出了某一时刻的波场快照,箭头方向指示了棱柱波(Prismatic wave)的传播路径,在剖面上是一条与一次反射波相切的同相轴,如图 6c 中箭头所示.

对于棱柱波,传统的单程波方法是无法成像的,

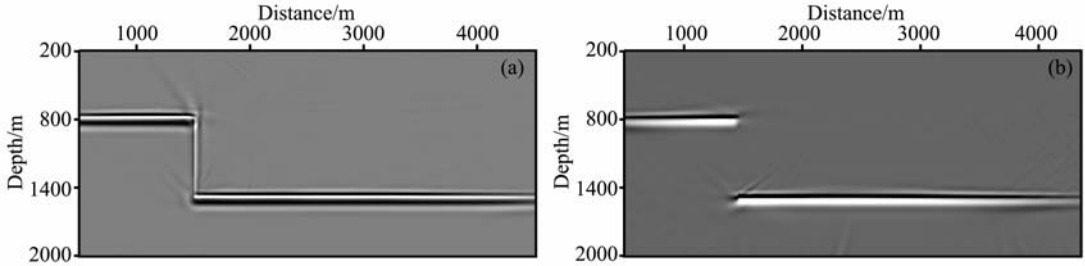


图 7 逆时偏移结果(a)及单程波 Fourier 积分法结果(b)

Fig. 7 (a) is the result of reverse time migration; (b) is the result of Fourier integral one way wave method.

4.3 BP 盐丘模型

BP^[39] 二维模型是 2004 年 6 月由 Frederic Billelte and Sverre Brandsberg-Dahl 在巴黎第 66 届 EAGE 年会上发布的. 这个模型由三部分组成:模型的左侧部分模拟的是穿过墨西哥湾西部(Western Gulf of Mexico)的横切面;中间部分模拟的是墨西哥湾中东部(Eastern/Central Gulf of Mexico)与安哥拉(off-shore Angola)近海岸的地质构造;右侧部分模拟的是里海(Caspian Sea)、北海(North Sea)以及特立尼达岛(Trinidad)的地质构造. 图 8 是中部的速度模型,模型的难点是盐丘内幕构造成像,需要借助上面提到的棱柱波成像.

因为波场传播方向发生了改变,而逆时偏移可以对棱柱波准确成像. 图 7a 是逆时偏移的结果,断层的垂直部分成像清楚;图 7b 是 Fourier 积分单程波^[38]方法的成像结果,这种方法直接运用准确的单程波算子积分,不做任何的近似,是一种可以精确到 90°的单程波方法,但依然无法对断层的垂直部分成像.

图 9(a,b)分别是逆时偏移过程和 Fourier 积分法单程波偏移过程中炮点波场传播的快照,白色箭

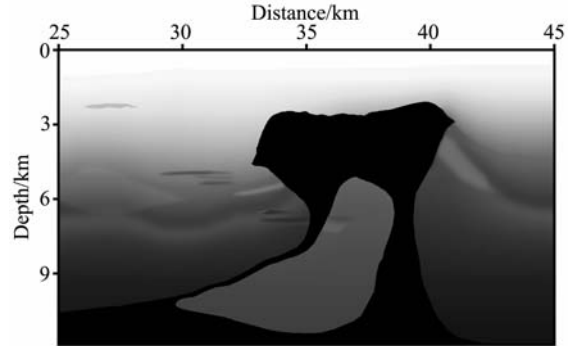


图 8 BP 中部速度模型

Fig. 8 The central part of BP velocity model

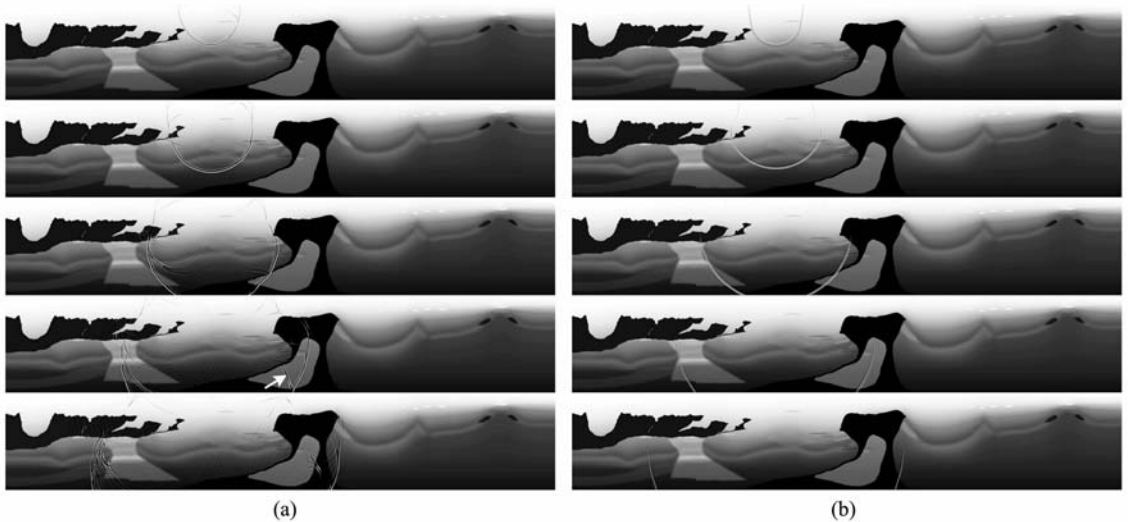


图 9 逆时偏移过程中炮点正传波场快照(a)及 Fourier 积分法单程波偏移过程中炮点波场快照(b),白色箭头指示了棱柱波的传播路径

Fig. 9 (a) is the snapshots of the shot wave-field in reverse time migration, the white arrow indicates the path of the prismatic wave; (b) is the snapshots of the shot wave-field in Fourier integral migration.

头指示了逆时偏移过程中棱柱波的传播过程,单程波方法无法模拟棱柱波,也就无法利用棱柱波成像,因为单程波偏移过程中波场沿 z 方向的传播方向不能改变。

图 10b 是 Fourier 积分单程波偏移方法的结果,盐丘顶部以及低速区成像清楚,但盐丘内壁以及盐丘右侧垂直边界无法成像;图 10a 是逆时偏移的

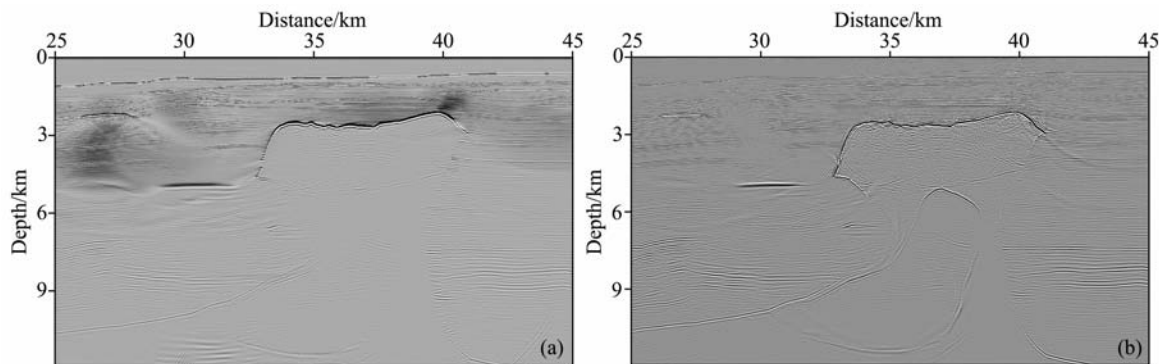


图 10 逆时偏移结果(a)及单程波 Fourier 积分法结果(b)

Fig. 10 (a) is the result of reverse time migration; (b) is the result of Fourier integral one-way wave method

5 结 语

本文介绍了高阶有限差分法求解声波方程的稳定性条件和频散关系,据此给出了叠前逆时偏移的实现过程.通过和单程波方法相比较,逆时偏移突破了 90° 倾角的限制,对垂直断层,盐丘内幕等陡倾构造成像效果显著,是单程波方法无法比拟的.但是逆时偏移计算量大,计算周期长,为此本文选择 GPU 实现算法加速,取得了 30 倍的加速比。

本文关于 GPU 加速的研究仅限于单个 GPU 细粒度并行,对于大规模的三维叠前逆时偏移,单个 GPU 是无法满足生产规模的需要,为此,需要多 GPU 间粗粒度并行、单 GPU 内部细粒度并行的算法,关于这方面的工作正在开展。

计算量大是叠前逆时偏移的瓶颈之一,成像噪声消除以及存储量大等问题是叠前逆时偏移的另外两个瓶颈,将另文阐述。

致 谢 对 BP 公司 Frederic Billette 提供的二维 BP 模型数据,谨致谢意,感谢李幼铭研究员对本文的指导和帮助。

参考文献(References)

- [1] Hemon C. Equations d'onde et modeles. *Geophysical Prospecting*, 1978, **26**: 790~821
- [2] Edip Baysal, Dan D Kosloff, John W C Sherwood. Reverse time migration. *Geophysics*, 1983, **48**(11):1514~1524

成像结果,盐丘内壁以及盐丘右侧垂直边界成像清楚,逆时偏移优势明显。

逆时偏移测试过程中,我们选用了时间 2 阶中心差分,空间 12 阶中心差分算法,分别在 CPU 和 GPU 上测试,测试结果表明,Tesla 1060 的计算速度比 CPU 快 30 倍左右。

- [3] McMechan G A. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values. *Geophysical Prospecting*, 1983, **31**:413~420
- [4] Dan Loewenthal, Irshad R Mufti. Reversed time migration in spatial frequency domain. *Geophysics*, 1983, **48**(5): 627~635
- [5] Whitmore N D. Iterative depth migration by backward time propagation. 53rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1983. 827~830
- [6] McMechan G A, Chang W F. 3D acoustic prestack reverse-time migration. *Geophysical Prospecting*, 1990, **38**(7): 737~756
- [7] Wen-Fong Chang, George A. McMechan. 3-D elastic prestack, reverse-time depth migration. *Geophysics*, 1994, **59**: 597~609
- [8] Houzhu (James) Zhang, Yu Zhang. Reverse time migration in 3D heterogeneous TTI media. *78th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts*, 2008, **27**: 2196~2200
- [9] Robin P Fletcher, Xiang Du, Paul J. Fowler reverse time migration in tilted transversely isotropic (TTI) media. *Geophysics*, 2009, **74**. WCA179
- [10] Tony Huang, Zhang Yu, Zhang Houzhu, et al. Subsalt imaging using TTI reverse time migration. *The Leading Edge*, 2009, **28**: 448~452
- [11] Zhang Yu, Zhang Houzhu. A stable TTI reverse time migration and its implementation. *79th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts*, 2009, **28**: 2794~2798
- [12] 邓玉琼,戴霆范,郭宗汾等.弹性波叠前有限元反时偏移.石油物探,1990, **29**(3): 22~33
- Teng Y Q, Dai T F, John T. Kuo, et al. Pre-stack finite element reverse-time migration for elastic waves. *Geophysical Prospecting for Petroleum*(in Chinese), 1990, **29**(3): 22~33

- [13] 王山山, 聂勋碧, 邓玉琼. 混合法双程无反射波动方程偏移. 石油地球物理勘探, 1993, **28**(5): 537~542
Wang S S, Nie X B, Teng Y C. Hybrid migration using two-way nonreflecting wave equation. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 1993, **28**(5): 537~542
- [14] 底青云, 王妙月. 弹性波有限元逆时偏移技术研究. 地球物理学报, 1997, **40**(4): 570~579
Di Q Y, Wang M Y. The study of finite element reverse-time migration for elastic wave. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1997, **40**(4): 570~579
- [15] 张美根, 王妙月. 各向异性弹性波有限元叠前逆时偏移. 地球物理学报, 2001, **44**(5): 711~719
Zhang M G, Wang M Y. Prestack finite element reverse-time migration for anisotropic elastic waves. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(5): 711~719
- [16] 王童奎, 付兴深, 朱德献等. 谱元法叠前逆时偏移研究. 地球物理学进展, 2008, **23**(3): 681~685
Wang T K, Fu X S, Zhu D X, et al. Spectral-element method for prestack reverse-time migration. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(3): 681~685
- [17] 薛东川, 王尚旭. 波动方程有限元叠前逆时偏移. 石油地球物理勘探, 2008, **43**(1): 17~21
Xue D C, Wang S X. Wave-equation finite-element prestack reverse time migration. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2008, **43**(1): 17~21
- [18] 杜启振, 秦童. 横向各向同性介质弹性波多分量叠前逆时偏移. 地球物理学报, 2009, **52**(3): 801~807
Du Q Z, Qin T. Multicomponent prestack reverse-time migration of elastic waves in transverse isotropic medium. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(3): 801~807
- [19] 陈可洋. 基于高阶有限差分的波动方程叠前逆时偏移方法. 石油物探, 2009, **48**(5): 475~478
Chen K Y. High order finite difference prestack reverse time migration. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2009, **48**(5): 475~478
- [20] Yue Wang. Reverse-time migration by a variable time-step and space-grid method. *70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 2000, **19**(1): 798~801
- [21] Guan H, Kim Y C, Ji J, et al. Multistep reverse time migration. *The Leading Edge*, 2009, **28**: 442~447
- [22] Zhang Y, Zhang G Q. One-step extrapolation method for reverse time migration. *Geophysics*, 2009, **74**: A29
- [23] Robert Soubaras, Zhang Yu. Two-step explicit marching method for reverse time migration. *78th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts*, 2008, **27**: 2272~2275
- [24] Matthew H Karazincir, Clive M Gerrard. Explicit high-order reverse time pre-stack depth migration. *76th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 2006, **25**(1): 2353~2357
- [25] Villarreal A, Scales J A. Distributed three dimensional finite-difference modeling of wave propagation in acoustic media. *Computers in Physics, American Inst. of Phys.*, 1997, **11**: 388~399
- [26] Araya-Polo M, F Rubio, R de la Cruz, et al. 3D seismic imaging through reverse-time migration on homogeneous and heterogeneous multi-core processors. *Journal of Scientific Programming*, 2009, **17**: 186~198
- [27] Micikevicius P. 3D finite difference computation on GPUs using CUDA. *Proceedings of 2nd Workshop on General Purpose Processing on Graphics Processing Units* Washington, D. C., 2009, 79~84
- [28] Darren Foltinek, Daniel Eaton, Jeff Mahovsky, et al. Industrial-scale reverse time migration on GPU hardware. *79th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts*, 2009, **28**: 2789~2793
- [29] 李博, 刘国峰, 刘洪. 地震叠前时间偏移的一种图形处理器提速实现方法. 地球物理学报, 2009, **52**(1): 245~252
Li B, Liu G F, Liu H. A method of using GPU to accelerate seismic pre-stack time migration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(1): 245~252
- [30] 刘国峰, 刘洪, 李博等. 山地地震资料叠前时间偏移方法及其 GPU 实现. 地球物理学报, 2009, **52**(12): 3101~3108
Liu G F, Liu H, Li B, et al. Method of prestack time migration of seismic data of mountainous regions and its GPU implementation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(12): 3101~3108
- [31] Bengt Fornberg. Generation of finite difference formulas on arbitrarily spaced grids. *Mathematics of Computation*, 1988, **51**(184): 699~706
- [32] 牟永光, 裴正林. 三维复杂介质地震数值模拟. 北京: 石油工业出版社, 2005
Mou Y G, Pei Z L. *Seismic Numerical Modeling for 3-D Complex Media* (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2005
- [33] Sandip Chattopadhyay and George A McMechan. Imaging conditions for prestack reverse-time migration. *Geophysics*, 2008, **73**(3): 81~89
- [34] NVIDIA S1070 Computing System; http://www.nvidia.com/object/product_tesla_s1070_us.html
- [35] CUDA Programming Guide, version 2. 3. 1. NVIDIA Corporation, August 26th, 2009
- [36] Nolet G. *Seismic Tomography with Applications in Global Seismology and Exploration Geophysics*. Boston: D. Reidel Publishing Company, 1998. 323~337
- [37] Stoffa P L, Fokkema J T, R M de Luna Freire, et al. Split-step Fourier migration. *Geophysics*, 1990, **55**: 410~421
- [38] Liu H W, Liu H. The GPU/CPU based Fourier integration depth migration; algorithm and implementation. *8th Biennial International Conference & Exposition, SPG, Extended Abstracts*, 2010, 139
- [39] Billette F, S Brandsberg-Dhal. The 2004 BP velocity benchmark. *67th Annual Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts*, 2005, B035