

广义线性纵横波联合反演的 GPU 加速

崔 栋*^① 张玉洁^② 宋建国^③ 邵 丽^④

(^①中国石油勘探开发研究院,北京 100083; ^②中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029;

^③中国石油大学(华东),山东青岛 266555; ^④新疆油田公司采气一厂,新疆克拉玛依 834000)

崔栋,张玉洁,宋建国,邵丽. 广义线性纵横波联合反演的 GPU 加速. 石油地球物理勘探,2015,50(4):650-657.

摘要 文中进行了广义线性反演(GLI)的 GPU 加速研究,通过理论分析和模型数据检验表明,通过应用 L_1 模稀疏脉冲反褶积,数据质量得到了显著提高。该方法不仅对多波数据适用,对单一纵、横波数据都可以进行反演。反演结果表明:①应用 L_1 模稀疏脉冲反褶积可以在反演前消除子波的效应,从而使 GLI 在反射系数层面上发挥更好的作用。②将 GPU 并行计算技术整合到反演过程中,能够极大地提高计算速度和效率,对单个角度域共成像点道集(ADCIG)的加速达数百倍以上;在处理海量的叠前反演数据时,这种优势将更加明显。③在反演中采用并行计算,必须摒弃细粒度的任务设计思路,采用较粗粒度的设计,才能尽量减少延迟,提高计算效率。

关键词 纵横波联合反演 稀疏脉冲 广义线性反演 GPU 计算效率

中图分类号:P631 **文献标识码**:A **doi**: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.04.011

1 引言

随着勘探技术的进步,地震勘探及其相关的采集、处理、解释技术已经从二维发展到三维、从叠后发展到叠前、从单纯的纵波单分量发展到多波多分量。AVO 技术利用振幅随炮检距变化对地下储层进行含油气分析、孔隙流体识别,还可以通过提取一系列 AVO 属性进一步提高识别精度。AVO 技术的理论基础是 Zoeppritz 方程,由于计算能力的限制,一直采用一系列近似公式进行计算。时至今日,AVO 技术仍然是被广泛应用的较为成熟的储层地球物理技术。广义线性反演方法则对 Zoeppritz 方程进行了一阶近似,虽然对计算速度有影响,但是确保了计算精度。近年来,由于多波多分量技术的发展,多波联合 AVO 反演的优势得到了体现。对于给定的岩性,纵、横波速度和密度可以被用于描述岩石物性和孔隙流体性质。

Cooke 等^[1]提出了广义线性反演(Generalized Linear Inversion, GLI)方法,并首次将该理论应用于地球物理反演。Macdonald 等^[2]、Russell^[3]进一步讨论了 GLI,并用于直接反演 Zoeppritz 方程。

尽管 GLI 方法相对复杂一些,但是该法对 Zoeppritz 方程的描述更为精确,能得到更可信的反演结果。Rijssen 等^[4]和 De Haas 等^[5]的研究表明,多波多分量数据能够极大地提高弹性参数的估计精度。

如今,CUDA(Compute Unified Device Architecture)已经在石油工业、气象、生物等计算密集型行业中取得了良好的应用。Micikevicius^[6]提出了适用于二维、三维的高效 CUDA 有限差分算法,从而正式拉开了图形处理器(Graphic Processing Unit, GPU)在地球物理领域大规模应用的序幕。成像算法的大数据量、大运算量很适合 GPU 发挥其高效运算的特点。如张兵等^[7]利用 CUDA 实现了裂步傅里叶叠前深度偏移,刘伟峰等^[8]进行了 GPU 有限差分正演模拟,李博等^[9]利用 GPU 实现了叠前时间偏移,刘红伟等^[10]提出了 GPU 叠前逆时偏移高阶有限差分算法。虽然 AVO/AVA 反演算法在每个单元的计算中通常需要很小的计算量,但是由于数据是海量的,必然造成海量计算,它与成像、波场延拓具有不同的特点,即 AVO/AVA 反演同样也是一种耗时的计算过程,因此 AVO/AVA 反演的加速势在必行。

*北京市学院路 20 号中国石油勘探开发研究院物探技术研究所,100083。Email:tsuitung@163.com

本文于 2014 年 5 月 13 日收到,最终修改稿于 2015 年 5 月 26 日收到。

2 广义线性反演(GLI)原理

GLI 是一种基于模型的反演技术,通过对比模

型正演数据与地震数据,在最小二乘意义上,通过不断迭代、求解得到最佳的匹配模型。

Zoeppritz 方程是 AVO/AVA 的基础,其方程形式复杂,表示为

$$\begin{bmatrix} \sin\theta_1 & \cos\phi_1 & -\sin\theta_2 & \cos\phi_2 \\ \cos\theta_1 & -\sin\phi_1 & \cos\theta_2 & \sin\phi_2 \\ \frac{\alpha_2}{\alpha_1}\sin 2\theta_1 & \frac{\alpha_2}{\beta_1}\cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2}{\rho_1}\frac{\beta_2^2}{\beta_1^2}\sin 2\theta_2 & -\frac{\rho_2}{\rho_1}\frac{\alpha_2\beta_2}{\alpha_1^2}\cos 2\phi_2 \\ \frac{\alpha_1}{\beta_1}\cos 2\phi_1 & -\sin 2\phi_1 & -\frac{\rho_2}{\rho_1}\frac{\alpha_2}{\beta_1}\cos 2\phi_2 & -\frac{\rho_2}{\rho_1}\frac{\beta_2}{\beta_1}\sin 2\phi_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_{PP} \\ R_{PS} \\ T_{PP} \\ T_{PS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 \\ \frac{\alpha_2}{\alpha_1}\sin 2\theta_1 \\ -\frac{\alpha_1}{\beta_1}\cos 2\phi_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: θ_1 为纵波反射角; ϕ_1 为横波反射角; θ_2 为纵波透射角; ϕ_2 为横波透射角; α_1, β_1 与 α_2, β_2 分别为界面上、下介质的纵、横波速度; ρ_1, ρ_2 分别为界面上、下介质的密度; $R_{PP}, R_{PS}, T_{PP}, T_{PS}$ 分别为纵波反射系数、横波反射系数、纵波透射系数、横波透射系数。

由式(1)可见,式中存在纵波速度比 $\frac{\alpha_2}{\alpha_1}$ 、横波速度比 $\frac{\beta_2}{\beta_1}$ 、密度比 $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ 和纵横波速度比 $\frac{\alpha_1}{\beta_1}$ 等 4 个独立变量,把反射系数作为目标函数,对式(1)进行泰勒一阶展开,得

$$R_o = R_i + \frac{\partial R(\alpha, \beta, \rho)}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial R(\alpha, \beta, \rho)}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial R(\alpha, \beta, \rho)}{\partial \rho} \Delta \rho \quad (2)$$

式中: R_o 为经地震数据处理后得到的反射系数; R_i 为根据模型正演得到的反射系数。利用 R_o 和 R_i 的差值可以对 GLI 中的模型进行修正,经数次迭代后可达到能够接受的反演精度。

Zoeppritz 方程是一个非线性方程, GLI 方法对其参数的线性程度是有要求的, Macdonald 等^[2]、Menke^[11] 利用残差分布方程图(RFM)方法检验 Zoeppritz 方程的上述 4 个非线性独立变量的线性化程度。检验结果表明,纵横速度比 $\frac{\alpha_1}{\beta_1}$ 的线性程度很差,导致由 GLI 方法反演得到的 $\frac{\alpha_1}{\beta_1}$ 不可信,因此在反演结果中应该舍弃。把式(2)写成矩阵形式,得到

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial R_{PP,1}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PP,1}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PP,1}}{\partial \rho} \\ \frac{\partial R_{PP,2}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PP,2}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PP,2}}{\partial \rho} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial R_{PP,N}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PP,N}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PP,N}}{\partial \rho} \\ \frac{\partial R_{PS,1}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PS,1}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PS,1}}{\partial \rho} \\ \frac{\partial R_{PS,2}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PS,2}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PS,2}}{\partial \rho} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial R_{PS,N}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PS,N}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PS,N}}{\partial \rho} \end{bmatrix}_{2N \times 3} \times \begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \beta \\ \Delta \rho \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} \delta R_{PP,1} \\ \delta R_{PP,2} \\ \vdots \\ \delta R_{PP,N} \\ \delta R_{PS,1} \\ \delta R_{PS,2} \\ \vdots \\ \delta R_{PS,N} \end{bmatrix}_{2N \times 1} \quad (3)$$

式中: δR_{PP} 和 δR_{PS} 为观测得到的反射系数和反演得到的反射系数之差; 方程左边第一个矩阵为由不同角度反射系数对应的模型向量构成的偏导数矩阵——Jacobi 矩阵,在通常情况下,该矩阵会有很大的条件数; $(\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \rho)$ 为反演中的模型扰动向量,每一次迭代都会得到新的模型扰动,将这些扰动加载到初始模型,便可以实现模型更新。式(3)为纵横波联合反演方程。

如果是纵波反演,则采用下式

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial R_{PP,1}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PP,1}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PP,1}}{\partial \rho} \\ \frac{\partial R_{PP,2}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PP,2}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PP,2}}{\partial \rho} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial R_{PP,N}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PP,N}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PP,N}}{\partial \rho} \end{bmatrix}_{N \times 3} \times \begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \beta \\ \Delta \rho \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} \delta R_{PP,1} \\ \delta R_{PP,2} \\ \vdots \\ \delta R_{PP,N} \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (4)$$

如果是横波反演,则采用下式

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial R_{PS,1}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PS,1}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PS,1}}{\partial \rho} \\ \frac{\partial R_{PS,2}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PS,2}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PS,2}}{\partial \rho} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial R_{PS,N}}{\partial \alpha} & \frac{\partial R_{PS,N}}{\partial \beta} & \frac{\partial R_{PS,N}}{\partial \rho} \end{bmatrix}_{N \times 3} \times \begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \beta \\ \Delta \rho \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} \delta R_{PS,1} \\ \delta R_{PS,2} \\ \vdots \\ \delta R_{PS,N} \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (5)$$

值得注意的是,转换波资料的加入,能够在反演过程中加入约束,增加稳定性,减少多解性。

由式(3)~式(5)可以看出,GLI问题最终归结为由一个超定方程组构成的最小二乘问题。反演问题往往是病态、不稳定的。由不同角度反射系数对应的模型向量构成的 Jacobi 矩阵在一般情况下会有非常大的条件数,因此 GLI 也往往是病态的,可以采用奇异值分解法(SVD)解此类超定病态方程组。

3 GPU 加速

传统的 GPU 并行应用方式为细粒度并行方式。如果采用粗粒度并行方式,如一个线程计算一个单炮数据会面临很多问题。首先,不能保证计算速度,单个线程的计算能力肯定不如计算机 CPU;其次,显存的传输、容量是一个大的瓶颈。在传输带宽和存储容量有限的情况下,大数据量的传输将会造成巨大的延迟,得不偿失。

结合前文提到的反演算法,假设每一个角道集中有 M 个角度,每个角度对应 N 个采样点,对每个角道集需要迭代 K 次,则每个点需要计算一次 Zoeppritz 线性方程组,每 M 个角度点需要计算一次超定方程组。相比这些计算量较大的运算过程,数组间的加减乘除运算量可忽略不计。每个角道集需要计算 $M \times N \times K$ 次 Zoeppritz 方程、 $N \times K$ 次超定方程组,计算量庞大。如果采用传统的多线程加速方案完成上述运算,由于计算的规模过小,计算速度反而更慢。在这种情况下,需要提出一种新的并行模式,要求该模式比消息传递接口(Message Passing Interface, MPI)的并行粒度略细,但比传统 GPU 并行模式的并行粒度略粗。

3.1 Batch 并行方式

对于 AVO/AVA 反演这种单元计算量小、但数量庞大的计算问题,可以采用一种新的并行模式——Batch 并行方式,这种并行模式特别适合计算海量的小型线性方程组。该模式的基本思路就在于利用每一个 Block 来模拟“一个 CPU 的核心”,并在 Block 内部进行硬件级别的优化。也就是说,Batch 并行方式是一种中间粒度的并行模式,介于 MPI 并行粒度和 CUDA 典型的细粒度并行模式之间。对于不同的加速问题,灵活采用不同的任务划分,才能取得较好的加速效果。如波场模拟必须使用细粒度任务划分,而反演又必须使用 Batch 方式,才能获得较好的计算性能。利用多线程解单一方程的 SVD 问题,当矩阵规模达到数百阶时,具有很好的加速效果,但是当矩阵规模很小甚至只有几阶时,反而会造成速度的急剧下降,这也是选择 Batch 并行方式的原因。

3.2 利用 Batch 并行进行反演

根据角道集的规模,设定 Grid 和 Block 的尺寸,从而开辟适当数量的线程进行计算(图 1)。对于一个具有 M 个角度、 N 个采样点的角道集,利用 N 个线程进行计算,而这 N 个线程便组成一个 Grid。每个线程会计算 M 个角度的 Zoeppritz 方程,同时利用这 N 个线程承担相应的超定方程组的求解。由于 Zoeppritz 方程的复杂性,采用特殊的初始化方法计算系数矩阵,可以使一个线程负责一个成像点的所有矩阵初始化及相应的 Zoeppritz 方程求解,从而尽量减少使用线程进行逻辑判断,并最大限度地利用多线程浮点计算的优势。

在计算过程中的残差计算、矩阵相减等小计算量工作都会完全在显存内进行。通过计算得到正演模型、计算模型与实际角度域共成像点道集(ADCIG)的残差之后,计算由不同角度反射系数对应的模型向量构成的 Jacobi 矩阵是关键。采用的方法和思想与正演类似,即在每一个时间上的共成像点数据都会形成一个 Jacobi 矩阵,则对于 N_d 个角度、 N_z 个时间采样点的 ADCIG,计算 Jacobi 矩阵只需 N_z 个线程(图 2a)。随后,反演所需的工作只剩下求解 Jacobi 矩阵和残差组成的超定方程组。前文已经介绍了该方程组及相应解法,在这里采用 Batch 方式对 SVD 方法进行加速。与求解 Jacobi 矩阵类似,也只需要 N_z 个线程(图 2b)。

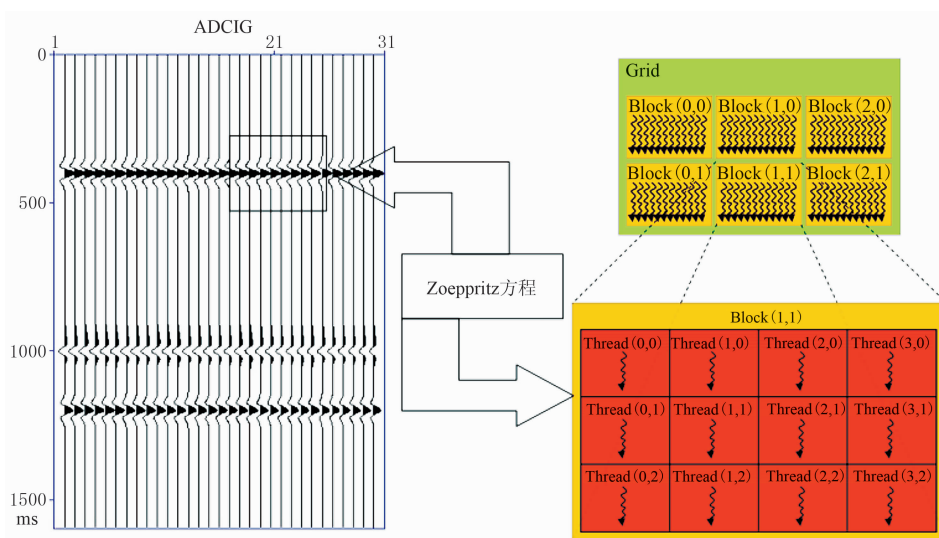


图 1 对模型 AVA 正演过程的 GPU 进行 Batch 加速



图 2 Jacobi 矩阵与超定方程组的 GPU 加速

3.3 GPU 优化效率策略

对于 GPU 运算,提高效率的关键在于增强并行、合理分配资源,做到物尽其用,减少通信,减少数据传输造成的延迟。由于储层反演的计算量是海量的,但海量计算是由很多微量计算叠加形成的。采用一个线程计算一个采样点所有角度数据的策略,就是基于这种考虑。如果令一个线程计算一个成像点的所有计算,则 shared memory 很可能在大角道集时遇到瓶颈。现行的策略可以保证当 ADCIG 很大时,也能够较好地执行 CUDA 加速。

此外,GPU 数据传输存在很大的瓶颈,需要采用异步传输模式。传统的串行传输模式是在读进数据后才开始计算,之后重复这一过程,对硬件的利用率较低;异步传输模式则是在硬件计算的同时读取数据,计算完毕后直接开始下一次计算。图 3 为 Tesla C1060 和 Tesla C2050 数据传输异步并行模式和串行模式总耗时对比。由图中可见:对于单行的执行 kernel,C2050 比 C1060 支持更多的拷贝引擎,C2050 对于设备—主机和主机—设备采用不同的拷贝引擎,C1060 只有一种拷贝引擎。因此 C2050 较 C1060 在数据传输方面有较大改善,并较好地隐

藏了数据传输延迟。由于算法和硬件架构的进步,异步并行可以很好地隐藏大数据量传输带来的延迟,这对于地球物理领域的海量数据处理很有必要。

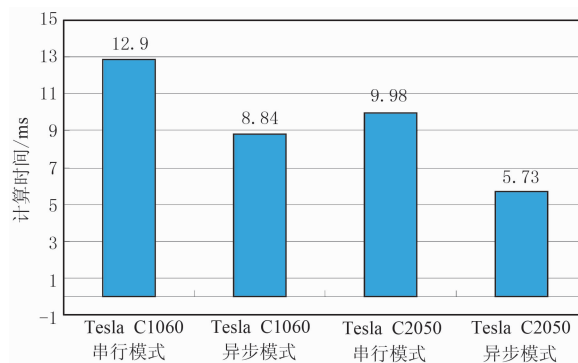


图 3 Tesla C1060 和 Tesla C2050 数据传输异步并行模式和串行模式总耗时对比

4 模型试算

4.1 层状模型

首先采用一个四层水平层状模型反演说明反演与 GPU 加速效果。模型分界面分别位于 200,500,600ms 处,由 AVA 正演得到角道集,对比纵横波联

合反演、纵波反演、横波反演效果。

图 4 为层状模型反演结果,由图中可见:纵横波联合反演(图 4b)和纵波反演(图 4c)能够很好地对纵横波速度和密度进行反演;横波反演(图 4d)可得到较高精度的横波速度和密度信息,很难得到可靠的纵波速度信息。表 1 为三种方法的平均相对误差。由表中可见,纵横波联合反演得到的纵、横波速度的精度最高,纵波反演得到的纵波速度的精度较高,横波反演得到的横波速度的精度较高,三种方法得到的密度精度相当。图 5 为反演的迭代残差收敛

情况对比。由图中可见,三种反演结果都收敛,但是收敛速度不同,具体表现为:联合反演(图 5a)、纵波反演(图 5b)的收敛速度相当,大概经过 5 次迭代,误差即可达到稳定、极小;横波反演(图 5c)的误差收敛速度较慢,迭代次数达到 50 次以上误差才能收敛到极小。这是由于单独采用横波反演基本上无法得到纵波信息,从而导致收敛速度较慢。图 6 为 GPU 与 CPU 计算速度对比,由图中可见,对于迭代 5 次的纵横波联合反演而言,CPU 耗时为 440ms, GPU 只需耗时 3.5ms,即加速 100 倍以上。

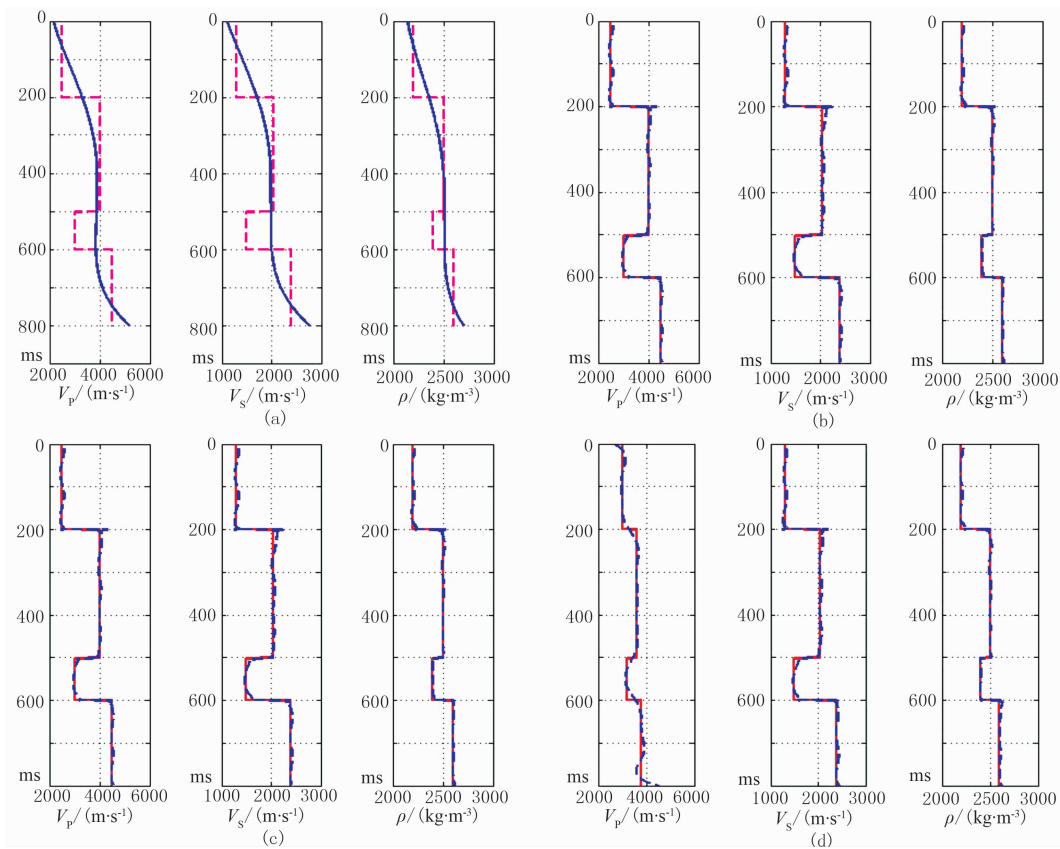


图 4 层状模型反演结果

(a)真实模型与平滑模型;(b)纵横波联合反演;(c)纵波反演;(d)横波反演
红色曲线为真实模型曲线,蓝色曲线为反演模型曲线

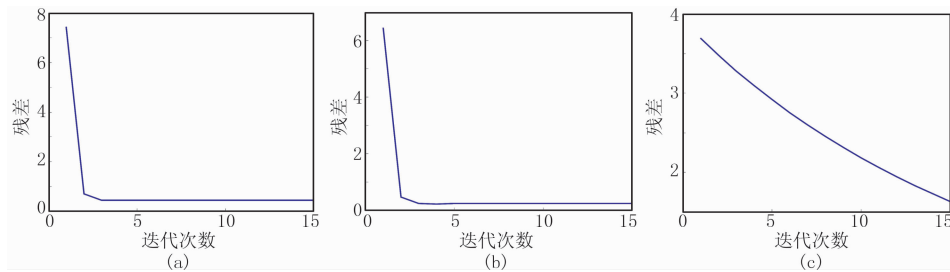


图 5 反演的迭代残差收敛情况对比

(a)联合反演;(b)纵波反演;(c)横波反演

表 1 三种方法的平均相对误差

	纵波速度 %	横波速度 %	密度 %
联合反演	0.0129	0.0086	9.2604×10^{-4}
纵波反演	0.0132	0.0123	9.0727×10^{-4}
横波反演	0.3160	0.0112	0

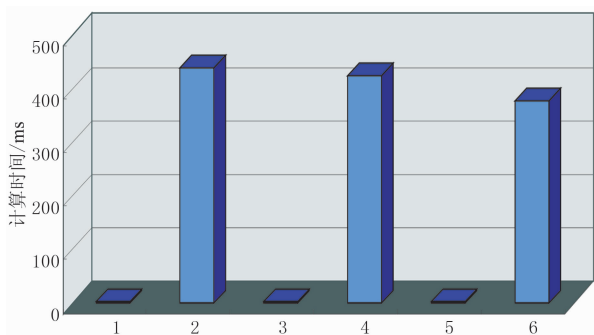


图 6 GPU 与 CPU 计算速度对比

1 为 GPU 纵横波反演; 2 为 CPU 纵横波反演; 3 为 GPU 纵波反演;
4 为 CPU 纵波反演; 5 为 GPU 横波反演; 6 为 CPU 横波反演

4.2 Marmousi 2 模型

Marmousi 2 模型是对 Marmousi 模型的补充, 其添加了一些流体储层信息, 并且充实了纵横波速度、密度信息, 从而能够满足矢量波场成像试验的需求(图 7)。图 7 为 Marmousi 2 模型构造示意图, 由图可见, 在(3000m, 1000m)位置处存在含气砂岩, 为了说明广义线性反演的效果, 选取该含气砂岩作为反演目标。

图 8 为纵波速度、横波速度、密度反演结果, 图 9 为根据图 8 数据得到的纵波阻抗与 NF 流体因子。由图中可见, 反演结果(图 8、图 9) 能够准确地突出含油砂岩。

图 10 为 GPU 与 CPU 计算速度对比。由图可见, 由于数据量变大、角道集规模变大等因素, 加速比相对于层状模型有所下降, 但仍然能够取得较好的加速效果。

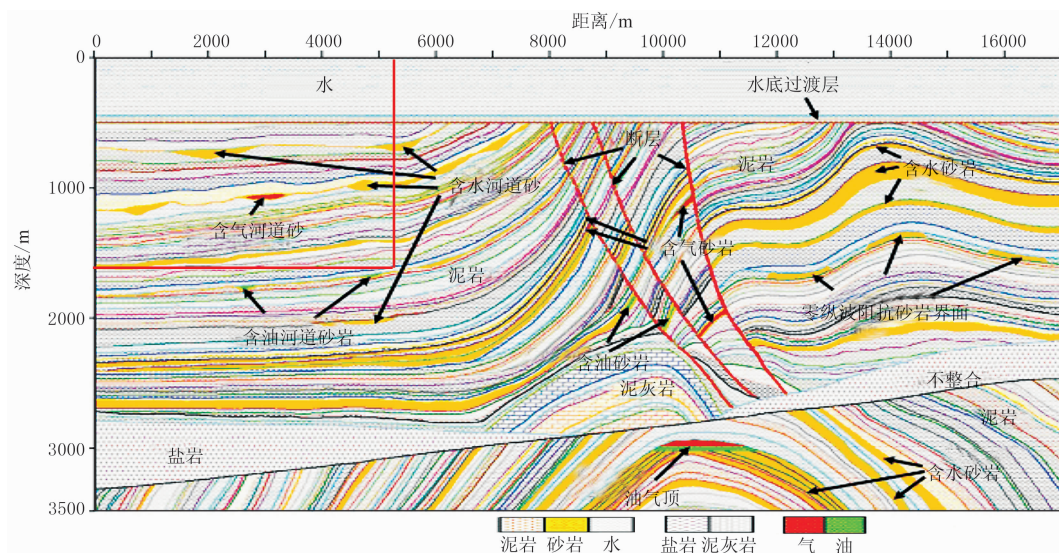


图 7 Marmousi 2 模型构造示意图^[12]

红色方框范围为反演区域

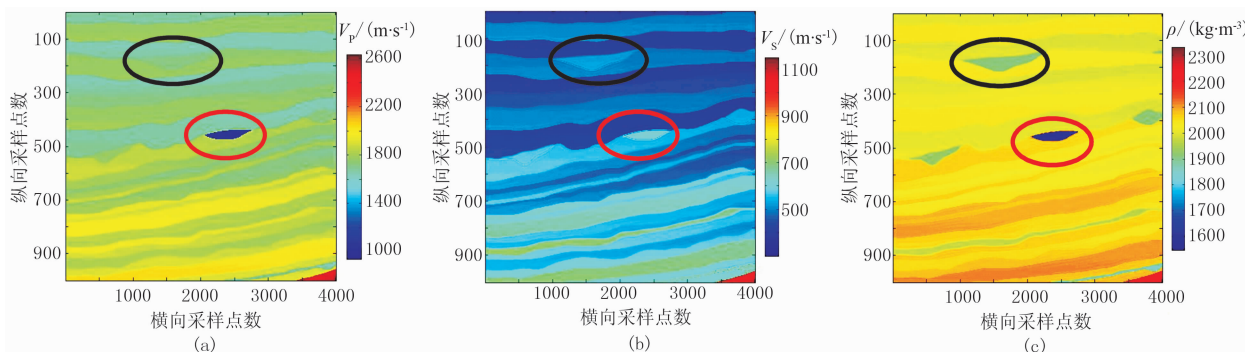


图 8 纵波速度(a)、横波速度(b)、密度(c)反演结果

黑色椭圆区域为含水砂岩, 红色椭圆区域为含油砂岩, 纵、横向采样点间隔均为 1.25m, 图 9 同

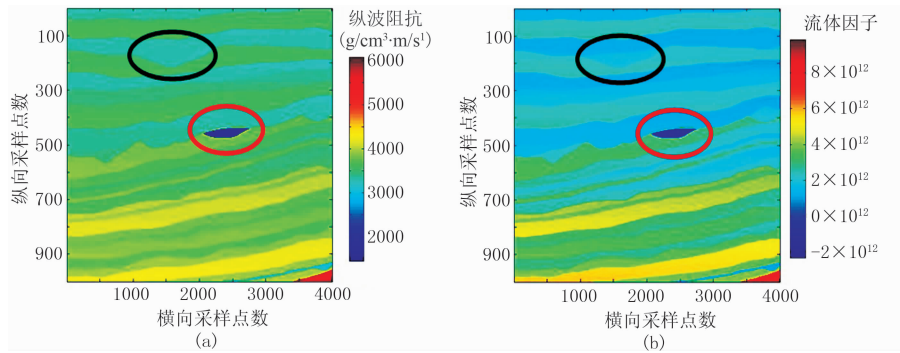


图 9 根据图 8 数据得到的纵波阻抗(a)与 NF 流体因子(b)

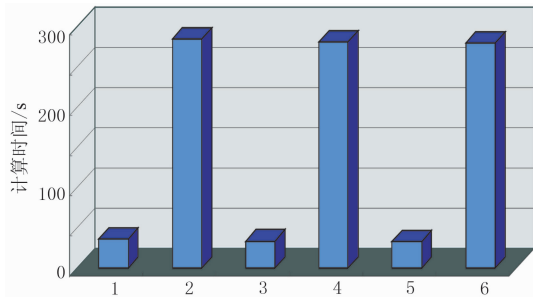


图 10 GPU 与 CPU 计算速度对比

1 为 GPU 纵横波反演; 2 为 CPU 纵横波反演; 3 为 GPU 纵波反演;
4 为 CPU 纵波反演; 5 为 GPU 横波反演; 6 为 CPU 横波反演

5 实际数据应用

A 探区的目标为页岩油气储层,对纵波资料的 ADCIG 使用提取的子波进行 L_1 模稀疏脉冲反褶积,使用广义线性反演方法得到该区纵横波速度、密度信息。图 11 为 A 探区实际数据反演结果与加速比。由图中可见,反演的纵波速度(图 11a)、横波速度(图 11b)和密度(图 11c)分辨率较高,计算速度也有所提高(图 11d)。

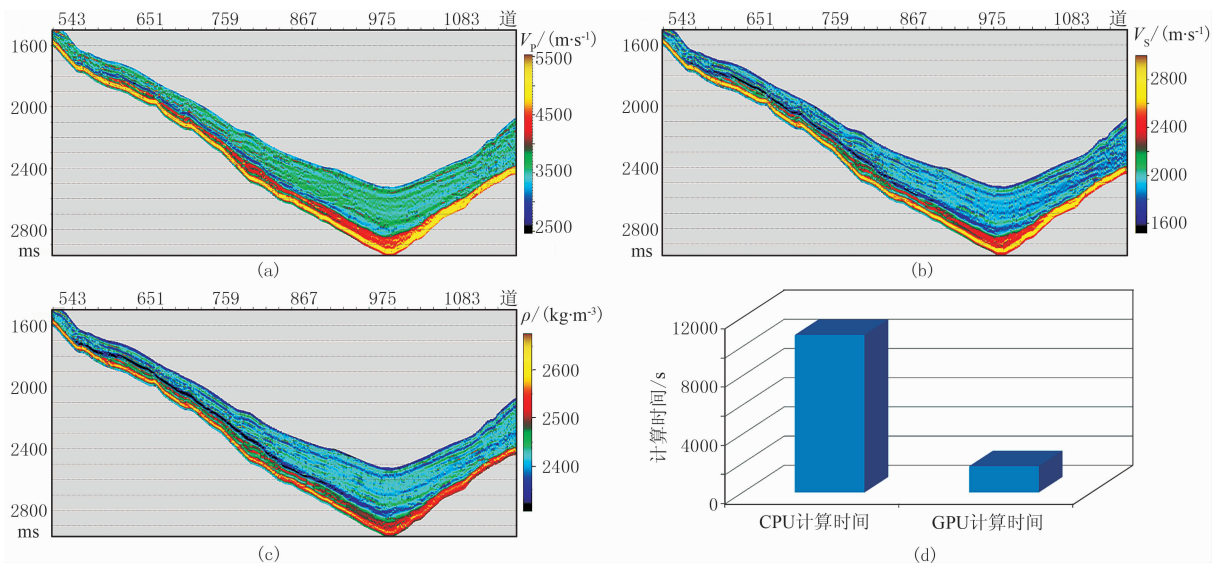


图 11 A 探区实际数据反演结果与加速比

(a)纵波速度;(b)横波速度;(c)密度;(d)加速情况

每条 inline 包含 651 个 CDP 点,反演目标层位于 1.5~3s 范围,每个 ADCIG 共包含 70 个角度

6 结束语

文中进行了广义线性反演(GLI)的 GPU 加速研究,通过理论分析和模型数据检验表明,在应用 L_1 模稀疏脉冲反褶积的基础上,数据质量得到了显

著提高。文中方法不仅对多波数据适用,对单一纵、横波数据都可以进行反演。反演结果表明,由于 GLI 是一种面向模型的反演技术,可以直接得到地下速度、密度信息,因此在勘探开发中会发挥更大作用。通过分析研究,得到以下认识:

(1)GLI 是一种利用 Zoeppritz 方程及其一阶泰

勒展开式进行反演的方法,相对于传统的借助于 Zoeppritz 方程近似式的 AVO 方法,GLI 具有明显的优势,能够更精确、更直观地反演岩石的速度、密度;

(2)稀疏脉冲反褶积假设,反射系数是由一系列大的反射系数叠加在服从高斯分布的小反射系数背景上构成的;应用 L_1 模稀疏脉冲反褶积可以在反演前消除子波的效应,从而使 GLI 在反射系数层面上发挥更好的作用;

(3)将 GPU 并行计算技术整合到反演过程中,能够极大地提高计算的速度和效率,对单个 ADCIG 的加速达数百倍以上。在处理海量的叠前反演数据时,这种优势将更加明显。在反演中采用并行计算,必须摒弃细粒度的任务设计思路,采用较粗粒度的设计,才能尽量减少延迟,提高计算效率。

参 考 文 献

- [1] Cooke D A, Schneider W A. Generalized linear inversion of reflection seismic data. *Geophysics*, 1983, 48(6): 665-676.
- [2] Macdonald C, Davis P, Jackson D. Inversion of reflection traveltimes and amplitudes. *Geophysics*, 1987, 52(5): 606-617.
- [3] Russell B H. *Introduction to Seismic Inversion Methods*. SEG Books, 1988.
- [4] Rijssen E, Herman G. Resolution analysis of band-limited and offset-limited seismic data for plane-layered subsurface models. *Geophysical Prospecting*, 1991, 39(1): 61-76.
- [5] De Haas J, Berkhout A. On the information content of PP, P-SV, SV-SV, and SV-P reflections. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1988, 7: 1190-1194.
- [6] Micikevicius P. 3D finite difference computation on GPUs using CUDA. *Proceedings of 2nd Workshop on General Purpose Processing on Graphics Processing Units*. ACM, 2009, 79-84.
- [7] 张兵, 赵改善, 黄骏等. 地震叠前深度偏移在 CUDA 平台上的实现. *勘探地球物理进展*, 2009, 31(6): 427-

432.

Zhang Bing, Zhao Gaishan, Huang Jun et al. Seismic prestack depth migration on the CUDA platform. *Progress in Exploration Geophysics*, 2009, 31(6): 427-432.

- [8] 刘伟峰, 王永胜, 张天雷等. 使用 GPU 模拟地震波传播的性能研究. *系统仿真学报*, 2009, 21(1): 170-174.
- Liu Weifeng, Wang Yongsheng, Zhang Tianlei et al. Performance study of seismic wave propagation simulation using GPU. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(1): 170-174.
- [9] 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 Bo, Liu Guofeng, Liu Hong. A method of using GPU to accelerate seismic pre-stack time migration. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(1): 245-252.
- [10] 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 Hongwei, Li Bo, Liu Hong et al. The algorithm of high order finite difference pre-stack reverse time migration and GPU implementation. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(7): 1725-1733.
- [11] Menke W. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. International Geophysics Series, New York: Academic Press, 1989.
- [12] Martin G S, Wiley R, Marfurt K J. Marmousi 2: an elastic upgrade for Marmousi. *The Leading Edge*, 2006, 25(2): 156-166.

(本文编辑: 刘勇)

作 者 简 介



崔栋 1986 年生, 博士研究生; 2005 年获中国石油大学(华东)地球物理专业理学学士学位; 2012 年获中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业工学硕士学位。2012 年开始在中国石油勘探开发研究院攻读博士, 主要从事速度建模方法研究。