

doi:10.11720/wtyht.2015.1.26

张慧,蔡其新,秦广胜,等.GPU 并行加速的多步逆时偏移在东濮前梨园地区的应用[J].物探与化探,2015,39(1):161-165.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.1.26>

Zhang H, Cai Q X, Qin G S, et al. The application of GPU accelerated multi-step reverse time migration to the Dongpu oilfield[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 161-165. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.1.26>

GPU 并行加速的多步逆时偏移在东濮前梨园地区的应用

张慧,蔡其新,秦广胜,高爱荣,林玉英
(中国石化中原油田分公司 物探研究院,河南 郑州 450000)

摘 要: 为了解决东濮油田复杂断块成像难题,笔者采用了多步逆时偏移成像方法,并使用了 GPU 进行并行加速。经过 GPU 并行加速的多步逆时偏移成像方法解决了 RTM 计算效率低的应用限制问题,并成功应用于复杂断层成像处理中。通过对前梨园三维地震资料的偏移成像处理,验证了逆时偏移成像技术在处理东濮地下复杂小断块和兰聊大断层上具有成像优越性;偏移效率分析试验证明了基于 GPU 并行加速的逆时偏移成像方法,能有效地提高计算效率 75 倍。

关键词: 东濮油田;逆时偏移;GPU;多步法;偏移成像

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)01-0161-05

东濮凹陷位于渤海湾盆地西南端,是渤海湾盆地富含油气的凹陷之一,也是中原油田主要的产油区。前梨园洼陷是东濮凹陷勘探程度相对较低的地区之一,位于东濮凹陷的东部。该区油藏以构造—岩性复合油气藏为主,其次为岩性油气藏。前梨园洼陷构造上是受兰聊断层控制的东断西超的半地堑,因此构造特点为断层多,断块复杂。

经过 30 余年的勘探开发,东濮凹陷进入了勘探开发的中后期,在构造复杂带、转换带、断层夹缝带及复杂多变的薄互层储层圈闭中进一步挖掘勘探潜力,实现增储上产的需求,对地震勘探的精度要求越来越高^[1],这就要求进一步提高复杂断块区的偏移成像精度,从而提高复杂断块油气田的勘探开发效益。

在油田多年的资料处理中,一直是以叠前时间偏移为主,尤其是克希霍夫时间偏移^[2-4]。经过处理人员的努力和对方法的不断改进,得到的成像结果基本可以满足勘探需求的。但是随着勘探范围的深入和精细构造解释的需要,现有的成像方法存在一定理论和应用上的不足。目前的复杂块和断阶带构造成像精度相对较低,造成了地震解释多解性强,

地层识别困难,井震识别断层不一致的问题^[5]。

为了解决复杂断块成像问题,笔者对逆时偏移技术进行了研究。目前逆时偏移成功的案例多在国内外海上油田^[6-10],对于东濮凹陷断块油气藏的情况是否也合适?逆时偏移的经济效益和偏移消耗是否平衡?逆时偏移需要考虑两方面的问题,一是精确的偏移速度场,二是庞大的计算量^[11-12]。东濮凹陷地震处理速度数据较为全面,钻井密度较高,对该区的地质认识已经比较清楚,这是速度场研究的有利条件。另一方面,东濮油田位于中国东部平原地区,表层构造比较平缓,速度较低,这在一定程度上增加了逆时偏移的计算量。原因在于逆时偏移在波场外推时考虑到计算的稳定性和频散问题,需要满足最短波长原则^[13-14],东濮地区表层速度在 2 000 m/s 左右,如果选用 30 Hz 的偏移主频,则偏移网格不能超过 6.6 m。这个偏移网格相对来说是比较苛刻的,所需要的计算耗时和计算量也是比较大的。

为了平衡计算效果和计算效率,笔者采用 Guan H^[15]提出的多步法逆时偏移成像方法。在表层速度较低、构造较平缓的区域采用单程波偏移,对中深层复杂断裂发育地区采用常规逆时偏移。

同时,在逆时偏移成像部分采用了交错网格高阶有限差分方法求解波动方程,并将方程中的波场变量导数求解在 GPU 上进行计算加速,实现了基于 GPU 并行加速的多步法逆时偏移成像。

1 方法原理

1.1 多步法逆时偏移成像

多步法逆时偏移是 Guan H 在 2008 年提出的方法,其主要思想是根据偏移模型的地质特点,将速度模型分成 2~3 块不等的深度区,分别进行逆时偏移或多种偏移方法的处理(图 1)。首先在区域 I 应用 RTM,并将震源记录和检波点记录外推至区域 I 和区域 II 的交界深度处作为区域 II 的输入数据,然后在区域 II 进行 RTM;同样将震源记录和检波点记录外推至区域 II 和区域 III 的交界深度处作为区域 III 的输入数据,然后在区域 III 进行 RTM。

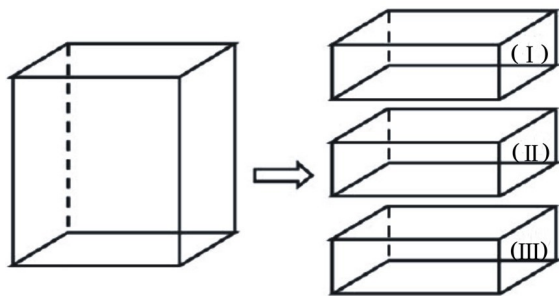


图 1 多步法逆时偏移速度分区示意^[15]

多步法逆时偏移提高了计算效率,减少了内存需求。因为偏移的网格尺寸是由偏移速度场的最小速度决定的,因此随着区域深度的增加,可以采用更大的偏移网格。较大的偏移网格在提高计算效率的同时,还可以减少存储震源波场数据的大小,同时减少内存存储量。

多步法偏移方法还可以在不同的速度区域使用不同的成像方法,笔者采用的步骤如下。

(1) 根据东濮地下构造的特点将偏移速度场分成两个区域:表层构造平缓、速度偏小的区域和中深层断块发育、速度较高的区域;深度分界线为 1 200 m,1 200 m 以上为区域 I 采用 10 m 网格剖分,1 200 m 以下为区域 II 采用 20 m 网格剖分。

(2) 对区域 I 进行偏移成像,进行常规克希霍夫积分偏移。偏移后将接收面下延至分界面处,得到在分界面处接收的野外炮集记录。

(3) 对区域 II 进行常规逆时偏移成像。

(4) 叠加两部分偏移结果,得到完整的偏移结

果。

1.2 RTM 算法的 CPU/GPU 异构并行实现

GPGPUs 是最新的一种高性能计算平台,目前最高端的 GPU(Tesla K20x)拥有 2 688 个核,文中使用的 M2095 型号显卡也拥有 512 个核心。GPU 中大量的计算单元使其具有海量计算的能力,可极大地提升计算效率。

逆时偏移成像部分主要利用高阶有限差分方法求解声波波动方程,三维声波方程的一阶应力—速度方程形式可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial t} = -\rho c^2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}, \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}, \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: v_x, v_y, v_z 是质点速度, P 为法向应力, c 为速度, ρ 为密度。从方程组中可以看出,主要的工作量也是最耗时的工作量集中在在一阶波场导数计算上^[16-18]。因此将计算波场变量的空间导数部分交给 GPU 进行细粒度并行计算。

使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,内存读取冗余度很高。针对这一问题,利用 GPU 片内访问速度最快的共享内存代替全局内存来减少 I/O,可以极大地节省计算时间。

在开辟共享内存数组时,一般将数组尺寸定义为 16×16 ,但是在有限差分求解中,每一个网格点的计算都需要周围几个点的参与,因此需要在数组外进行扩边,扩边的大小和有限差分阶数有关。假设有限差分求解阶数为 $2 \times m$ (m 为偶数),则开辟共享内存数组尺寸为 $[16+2 \times m, 16+2 \times m]$ 。以 8 阶差分格式为例,需开辟共享内存数组尺寸为 $[16+2 \times 4, 16+2 \times 4]$,设定计算线程块(Block)大小为 16×16 ,并根据计算数组大小得到 Grid 大小,即 Block 的维度。通过这种三维结构体的索引,将计算数组和计算线程联系起来,完成向共享内存数组的数据拷贝和扩边。如图 2 所示,数组主体部分为当前线程块需要计算的数据,扩边区域为两个线程块之间共享的数据,扩边宽度为差分格式长度的 $1/2$ 。这种共享内存的利用降低了反复从全局内存中读取数据造成的读取冗余。

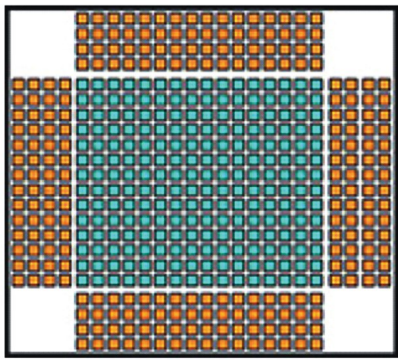


图 2 16×16 的共享数组和 8 阶差分格式的扩边^[19]

1.3 震源重构计算策略

逆时偏移使用的互相关成像条件需要同一时刻的震源正向外推波场和检波点逆向外推波场。这两个波场一个是在时间的正向上进行,一个是在时间的反向上进行,为了能同时得到这两个过程的波场,必须存储其中一个过程的波场。这就需要消耗极大的存储资源,尤其在三维操作中是难以满足的。Eric^[20]归纳总结了 5 种计算策略,震源重构计算策略就是其中一种。

震源重构计算策略是指,利用 GPU 计算正向波场的过程中,将各个边界波场值存储至 CPU 上。在利用 GPU 计算检波点波场的过程中,同时逆向外推震源波场,并在对应时刻将存储在 CPU 上的边界波场值应用到各个边界上,以保证该过程得到的每个时刻的波场值和原来正向外推该时刻的波场一致。震源重构计算策略可以在外推过程中边外推边成像,大幅降低存储要求。

2 叠前逆时偏移成像效果分析

2.1 工区概况

本次处理涉及 2 个三维工区:前梨园北三维工区和文北高精度三维工区。前梨园北工区为 6 线 24 炮采集,道间距 50 m,面元大小为 25 m×25 m,满覆盖次数 30 次。文北工区为高精度采集数据,32 线 10 炮采集,道间距 50 m,面元大小为 5 m×10 m,满覆盖次数 32 次。工区位置见图 3 所示,表 1 为前梨园洼陷目标处理工区野外地震采集的一些主要参数。

2.2 叠前逆时偏移成像效果分析

图 4、图 5 分别为复杂小断块区域和兰聊大断层区域的叠前深度克希霍夫和逆时偏移成像效果对比。克希霍夫积分深度偏移是建立在射线理论基础上的偏移算法,存在焦散、多重路径、干涉现象和走时计算不准确的问题,造成速度分析的多解性,无法实现真正的共反射点叠加,从而对复杂构造难以准

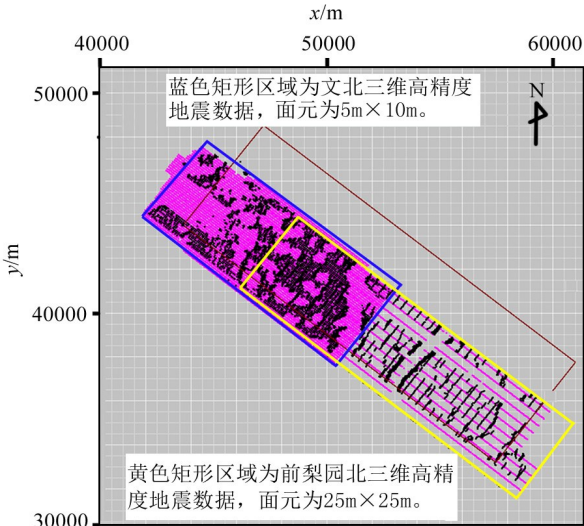


图 3 工区位置

表 1 前梨园洼陷目标处理工区野外地震采集部分参数

工区名	前梨园北	文北
年度	2000~2001	2008~2009
观测方式	6 线 24 炮	32 线 10 炮
记录道数	960 道	4096 道
检波线距	400m	100m
道间距	50m	50m
炮线距	350m	80m
炮点距	50m	80m
观测方式	端点放炮	端点放炮
面元大小	25m×25m	5m×10m
覆盖次数	10×3	8×4
采样间隔	2ms	1ms
记录长度	8s	6s

确成像。从两种成像方法得到的对比剖面中可以看出,图 4b 中逆时偏移对复杂小断块成像更为精确,断块边界刻画清晰,断点归位准确。另外,逆时偏移对东濮兰聊大断层的准确归位是一个很好的解决方法,图 5b 中逆时偏移对兰聊大断层的成像更精确,断面归位准确,断层两侧地层接触关系清晰。

2.3 叠前逆时偏移成像效率分析

逆时偏移在生产中无法大规模推广应用的一个重要原因是偏移成本太高。逆时偏移依赖于基于全波动方程的波场外推技术,需要满足一定的稳定性条件和频散条件,因此计算网格受限于偏移频率和最小偏移速度。如果计算网格选取过小会极大地增加偏移耗时,如果计算网格选取过大则会降低最终的成像精度,因此在偏移成像过程中,需要平衡成像结果精度和偏移计算量之间的关系。笔者选择了使用 MPI+CUDA 并行的逆时偏移成像方法提高计算效率,并利用内存优化减小数据 I/O。

从东濮前梨园三维地震数据中选取单炮,测试并行后的逆时偏移算法和并行后进行内存优化的逆

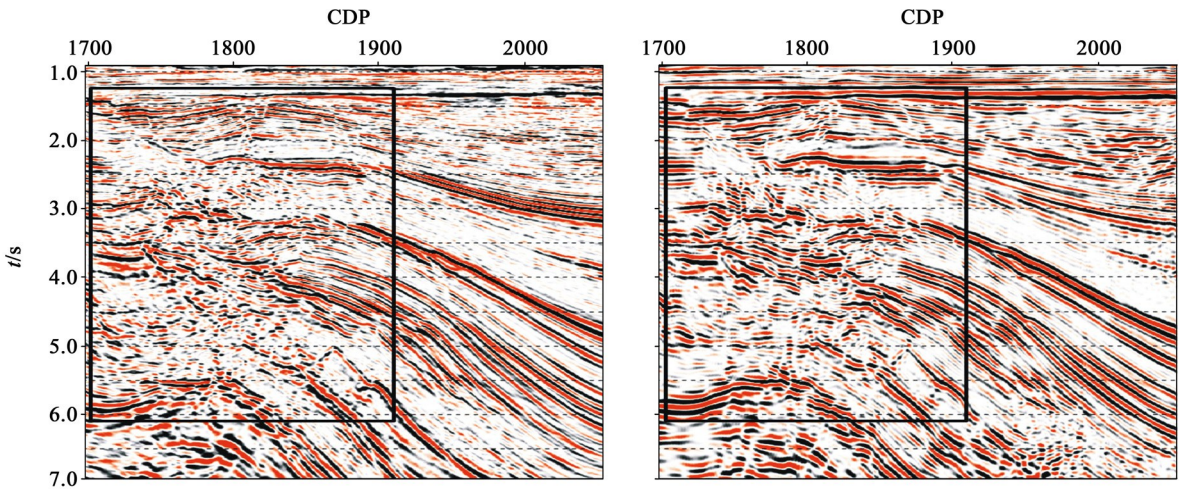


图 4 复杂小断块区域叠前深度克希霍夫(左)和逆时偏移(右)成像效果对比

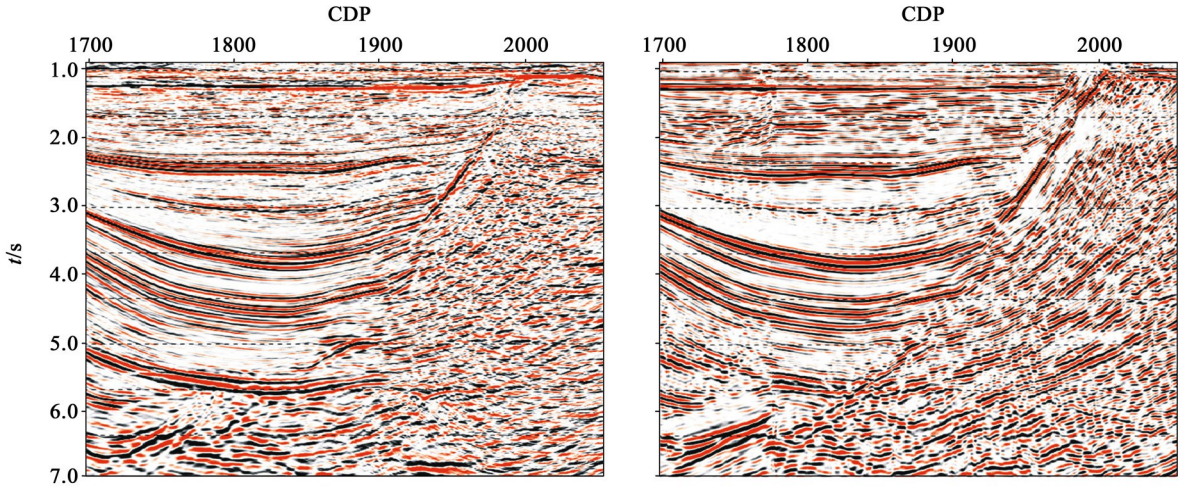


图 5 兰聊大断层区域叠前深度克希霍夫(左)和逆时偏移(右)成像效果对比

时偏移算法效率,选取的单炮炮检关系如图 6 所示。其中 CPU 计算和 GPU 计算均使用单节点。GPU 使用 Tesla M2090 显卡,含有 512 个计算核心;CPU 型号为 Intel(R) Core(TM) i7-2600,8 核心。考虑到 CPU 的计算能力,采用较低的偏移主频,可以在一定程度上减小计算量,但相应的偏移成像精度也会受到影响。在子波主频 20 Hz,20 m 空间采样,1 ms 时间采样下,采用 3 种策略进行计算,不同处理器计算耗时如下。

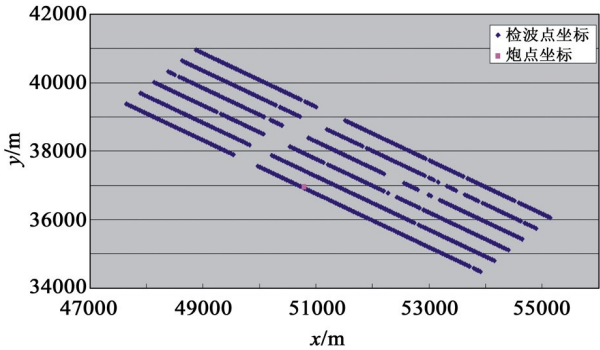


图 6 第 50267 炮炮检关系

策略 1:CPU 单炮偏移耗时为:43 h 28 min 37 s,约 2 608.6 min;

策略 2:GPU 单炮偏移耗时为:2 558.474 s,约 42.65 min;

策略 3:利用共享内存优化后,GPU 单炮偏移耗时为:2 084.961 s,约 34.75 min。

从数据对比中得到,CPU 单炮偏移耗时约为 GPU 单炮偏移耗时的 61.16 倍,是优化内存后 GPU 单炮耗时的 75.07 倍,即文中使用的基于 GPU 的三维叠前逆时偏移成像方法在东濮前梨园地区计算效率是基于 CPU 的逆时偏移成像方法的 75 倍。

3 结论

(1)针对东部平原区,使用基于 GPU 加速的多步法逆时偏移成像方法,可以有效地避免低速层对成像网格的苛刻限制,解决逆时偏移庞大的计算量问题。

(2)逆时偏移算法对东濮地区三维采集数据的

偏移效率证明,基于 MPI+CUDA 并行的叠前三维逆时偏移成像方法克服了技术本身偏移耗时与经济效益不平衡的缺陷。逆时偏移可应用于东濮油田的实际资料处理中,成为常规处理的一步。

(3)逆时偏移的应用效果说明,逆时偏移对复杂小断块和兰聊大断层成像更为精确,断面刻画清晰,断点归位准确。是解决复杂断块油气藏成像的一个很好的方法。

致谢:感谢中原油田物探研究院王东奎高级工程师、张中灵高级工程师、韩磊高级工程师提供的前梨园三维地震资料和偏移速度体。

参考文献:

[1] 汪功怀,秦广胜,蔡其新.东濮凹陷地震速度场建立方法与应用研究[J].中国石油勘探,2011,16(2):38-42.

[2] 黄中敏,孟凡冰,王莉,等.叠前时间偏移技术在东濮凹陷应用的认识[J].西南石油大学学报,2008,30(1):58-66.

[3] 秦广胜,蔡其新,张树海.各向异性叠前时间偏移在东濮凹陷的应用[J].中国石油勘探,2009,14(6):65-68.

[4] 马建波,李绍康,银燕惠,等.东濮凹陷高密度各向异性自动速度分析[J].中国石油勘探,2009,14(6):58-66.

[5] 姜忠良,范运臣,王睿祥,等.叠前深度偏移技术在东濮凹陷的应用[J].勘探地球物理进展,2003,14(3):58-66.

[6] Leveille J, Checkles S, Graves J, et al. Reverse time migration of P-wave and C-wave data from a 3D VSP over a deep subsalt prospect in the Gulf of Mexico [J]. SEG Expanded Abstracts, 2006: 344-348.

[7] Jones L F, Goodwin M C, Berranger I D, et al. Application of anisotropic 3D reverse time migration to complex north sea imaging [J]. SEG Expanded Abstracts, 2007: 254-258.

[8] Huang T, Zhang Y, Zhang H Z. Subsalt imaging using TTI reverse

time migration [J]. SEG Expanded Abstracts, 2009: 448-452.

[9] Kwangjin Yoon, Sang S, Jean J, et al. Stability and speedup issues in TTI RTM implementation [J]. SEG Expanded Abstracts, 2010: 3221-3225.

[10] Roy A, Chazalnoel N. RTM technology for improved salt imaging in the Santos Basin, Brazil [C]//Rio de Janeiro: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, 2011: 1812-1816.

[11] 黄元溢, 罗仁泽, 王进海, 等. 几种叠前深度偏移技术效果的对比 [J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 798-803.

[12] 张春燕, 李振春, 孙小东. 逆时偏移方法技术进展综述 [J]. 勘探地球物理进展, 2010, 35(5): 309-317.

[13] 张慧, 李振春. 基于双变网格算法的地震波正演模拟 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(1): 77-86.

[14] Pitarka A. 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1999, 89: 54-68.

[15] Guan H, Kim Y C, Ji J, et al. A multi-step approach for efficient reverse time migration [J]. SEG Expanded Abstracts, 2008: 2341-2345.

[16] 张慧, 李振春. 基于时空双变网格算法的碳酸盐岩裂缝型储层正演模拟 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(3): 51-57.

[17] 周学明, 李庆春, 马婷. 弹性波叠前逆时偏移 [J]. 物探与化探, 2013, 37(2): 274-279.

[18] 张慧, 蔡其新, 秦广胜, 等. 基于 GPU 并行加速的逆时偏移成像方法及应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5): 707-710.

[19] Micikevicius P. 3D finite difference computation on GPUs using CUDA [C]//New York: Proceedings of 2nd Workshop on General Purpose Processing on Graphics Processing Units, 2009: 79-84.

[20] Dussaud E. Computational strategies for reverse-time migration [J]. SEG Expanded Abstracts, 2008: 2267-2271.

The application of GPU accelerated multi-step reverse time migration to the Dongpu oilfield

ZHANG Hui, CAI Qi-Xin, QIN Guang-Sheng, GAO Ai-Rong, LIN Yu-Ying
(Geophysical Research Institute in Zhongyuan Oil Field, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to solve complicated faults imaging problem of the Dongpu oilfield, the authors utilized multi-step reverse time migration method and realized GPU accelerate parallel algorithm for overcoming the low compute efficiency disadvantage of RTM. The GPU accelerated multi-step reverse time migration method was successfully applied to complicated faults imaging processing. The RTM imaging result of Qianliyuan 3D data proved the technological advantage of RTM for complicated small faults imaging and Lanliao dip-angle faults imaging. Migration efficiency analyses demonstrate that RTM based on GPU accelerate algorithm can effectively improve the computational efficiency by 75 times.

Key words: Dongpu oilfield; reverse time migration; GPU; multi-step; migration

作者简介: 张慧(1984-),女,2011年7月在中国石油大学(华东)获得工学博士学位,并进入中原油田博士后科研工作站从事博士后科研工作,目前在中原油田物探研究院勘探新区项目组从事地震处理和叠前深度成像工作。