

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

基于 MPI 和 OpenMP 的三维弹性波方程混合并行有限差分算法*

杨书博^{1,2} 乔文孝^{1,2} 车小花^{1,2†}

(1 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249)

(2 北京市地球探测与信息技术重点实验室 北京 102249)

摘要 三维弹性波方程有限差分模拟具有大计算量和大内存消耗的特点,在常规计算机上使用传统算法往往无法满足计算要求。该文以高性能计算机集群为平台,基于 MPI 和 OpenMP 混合编程技术,构建了一种新型三维弹性波方程并行有限差分算法。该算法基于 MPI 将总任务分配给多个进程,同时,在每个进程中基于 OpenMP 将子任务分配给多个线程。各个进程具有独立的内存空间,各个线程共享所在进程的内存空间。充液井孔声场的数值模拟结果表明,与基于 OpenMP 的并行有限差分算法相比,基于 MPI 和 OpenMP 的混合并行有限差分算法可以利用计算机集群的多个节点进行并行计算,既极大地提高了计算速度,又有效地降低了单个节点的内存消耗。

关键词 声波测井,有限差分,信息传递接口,共享存储并行编程,并行计算

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)01-0075-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.011

A hybrid parallel finite difference algorithm for 3D elastic wave equation based on MPI and OpenMP

YANG Shubo^{1,2} QIAO Wenxiao^{1,2} CHE Xiaohua^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

(2 Key Laboratory of Earth Prospecting and Information Technology, Beijing 102249, China)

Abstract The finite difference simulation of 3D elastic wave equation has the characteristics of large computing amount and large memory consumption. It is almost impossible to complete computing tasks by using traditional algorithms on conventional computers. Based on a high performance computer cluster, we propose a new parallel finite difference algorithm for 3D elastic wave equation with the MPI and OpenMP hybrid programming technology. Based on MPI, this algorithm distributes the total task into multiple processes. At the same time, based on OpenMP, this algorithm distributes the subtask of each process into multiple threads. Each process has its independent memory space, and each thread shares the memory space of the process. Numerical simulation results of a fluid-filled borehole model show that compared with the parallel finite difference algorithm based on OpenMP, the hybrid parallel finite difference algorithm based on MPI and OpenMP can use multiple nodes of the computer cluster to complete computing tasks in parallel. Therefore, the hybrid parallel algorithm can greatly improve the computing speed and effectively reduce the memory consumption of a single node.

Key words Acoustic logging, Finite difference, MPI, OpenMP, Parallel computing

2017-10-31 收稿; 2017-12-01 定稿

*国家自然科学基金项目(11734017, 11374371), 国家科技重大专项(2017ZX05019001, 2017ZX05019006), 中国石油科技创新基金项目(2016D-5007-0303), 中国石油大学(北京)基金(2462015YQ0516, 2462016YJRC020)

作者简介: 杨书博(1994-), 男, 河南开封人, 博士研究生, 研究方向: 声波测井。

†通讯作者 E-mail: aclab@cup.edu.cn

1 引言

弹性波方程的有限差分法开始于20世纪70年代初, Alterman等^[1]做了开创性的工作, 使用显式有限差分格式获得了层状介质二阶弹性波方程的离散数值解。Madariaga^[2]首次提出了利用一阶应力-速度弹性波方程组来实现交错网格有限差分模拟的方法。Virieux^[3-4]发展了这一方法(Stress-velocity finite difference, SVFD), 采用二阶精度的差分算子近似空间偏导数和时间偏导数, 完成了对非均匀弹性介质的SH和P-SV波的应力-速度方程组的正演计算, 成为弹性波数值模拟的经典之作。Randall等^[5]针对轴对称模型提出了二维柱坐标系SVFD方法, 分别研究了单极声源和多极声源在井孔中激发的声场。Randall^[6]和Leslie等^[7]提出了直角坐标系下2.5维SVFD方法, 模拟了轴向均匀介质、非轴对称井孔中多极声场。Cheng等^[8]和Liu等^[9]利用三维直角坐标系SVFD方法数值模拟了各向同性、各向异性介质的井孔中单极声源和多极声源激发的声场。Chen等^[10]利用三维柱坐标系SVFD方法模拟了井孔中弹性波的传播和散射, 研究了测井仪器对单极声源和偶极声源在井孔中激励波形的影响。张海澜等^[11]对声波测井的有限差分方法进行了总结, 模拟了多种复杂情况下的井孔声场。由于地下岩石通常是非均匀、各向异性、粘弹性、多相和不规则的介质, 为了适应这些特点, 后来又发展了一系列复杂的有限差分方法。

三维弹性波方程有限差分模拟由于受庞大计算量和存储量的制约, 常规计算机往往无法满足计算要求。目前, 借助高性能计算机集群(PC-Cluster)进行并行计算已经成为地球物理领域的共识。PC-Cluster通常由几十个甚至上千个计算节点组成, 每个节点包含若干个CPU核, 各CPU核共享该节点的内存。并行算法的实现主要有两种方式^[12-15]: 一种是基于分布式存储的消息传递的方式, 如

MPI(Message passing interface)等; 另一种是基于共享式存储的共享变量的方式, 如OpenMP(Open multi-processing)等。MPI是实现多进程并行的应用程序编程接口, 其优点是功能强大、可移植性强; 缺点是各个进程需要频繁进行数据通信、内存开销大、编程复杂、不能有效发挥计算机集群的每个节点多个内核的优势。OpenMP是实现多线程并行的应用程序编程接口, 各线程间无需进行大量的数据通信, 只需进行少量的启动、同步、销毁等通信。其优点是计算效率高、内存开销小、编程简单; 缺点是不能有效发挥计算机集群的多节点的优势。每个计算节点上可以启动多个进程, 每个CPU核上也可以启动多个线程。因此, 如何通过进程和线程的合理配置和管理, 充分发挥计算机集群多节点多内核的特点, 是提升并行效率的关键。

传统的基于OpenMP的并行有限差分算法仅能利用PC-Cluster的一个节点, 无法发挥PC-Cluster的多节点的优势进一步提高计算速度, 特别是当程序的内存消耗超过该节点内存时, 将无法进行计算。本文基于MPI和OpenMP的混合编程技术, 构建了一种新型并行有限差分算法。在充分利用MPI的多进程并行性和易移植性前提下, 有机地结合了OpenMP的多线程并行性和易编程性, 通过多节点并行计算, 既极大地提高了计算速度, 又有效地降低了单个节点的内存消耗。该算法与坐标系和介质参数无关, 适用于任意坐标系(柱坐标系和直角坐标系等)下、各种介质(各向同性介质、各向异性介质、粘弹性介质等)的弹性波方程, 本文以三维直角坐标系下各向同性介质的弹性波方程为例来说明该算法的实现过程。

2 三维弹性波方程有限差分算法

在三维直角坐标系下, 各向同性介质的一阶应力-速度弹性波方程组为

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z},\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ \frac{\partial v_y}{\partial y} \\ \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \\ \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式(1)~(2)中, v_x 、 v_y 和 v_z 分别为 x 、 y 和 z 方向上质点振动速度; σ_{xx} 、 σ_{yy} 和 σ_{zz} 分别为 x 、 y 和 z 方向上的正应力; σ_{xy} 、 σ_{yz} 和 σ_{xz} 为剪切应力; ρ 为介质的密度; λ 和 μ 是介质的拉梅系数。

采用交错网格如图1所示, 各速度分量和应力分量交错分布在空间网格上, 相邻分量之间相差半个网格。在时间上各分量也是交错分布的, 即相邻的速度分量和应力分量之间相差半个时间步长。密度的采样位置与同方向的速度分量相同。弹性系数中与正应力有关的, 其采样位置与正应力的相同; 与切应力有关的, 其采样位置与同方向的切应力相同。

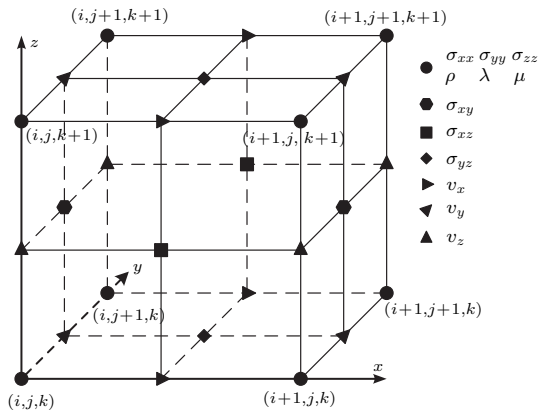


图1 三维直角坐标系交错网格示意图

Fig. 1 3D Cartesian coordinate system staggered grid

为了减弱数值频散和保证计算稳定性, 空间步长和时间步长应满足:

$$\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} < \frac{v_{\min}}{2f_{\max}},$$

$$\Delta t \leq \frac{\min(\Delta x, \Delta y, \Delta z)}{\sqrt{3}v_{\max}}, \quad (3)$$

式(3)中, v_{\max} 和 v_{\min} 分别为计算模型速度的最大值和最小值, Δx 、 Δy 、 Δz 分别为 x 、 y 、 z 方向的空间

步长, Δt 为时间步长, f_{\max} 为声源覆盖的最高频率。

3 基于MPI和OpenMP的三维弹性波方程混合并行有限差分算法

利用交错网格有限差分进行弹性波方程数值模拟具有以下特点: (1) 在时间域中, $n + 1/2$ 时刻的速度分量波场值由 $n - 1/2$ 时刻的速度分量波场值和 n 时刻的应力分量波场值计算得到, $n + 1$ 时刻的应力分量波场值由 n 时刻的应力分量波场值和 $n + 1/2$ 时刻的速度分量波场值计算得到; (2) 在空间域中, 速度和应力分量在任意网格点处的波场值只由各自周围有限个网格点上的波场值计算得到; (3) 计算空间内部(包括PML)所有网格点各分量的计算方法相同。由此可知, 计算任务具有良好的局部性和并行度, 可以将其分解为若干个并行执行的子任务。

3.1 实现方法

假设计算模型的总规模为 N , x 、 y 、 z 方向的网格点数分别为 N_x 、 N_y 、 N_z , 则

$$N = N_x \times N_y \times N_z, \quad (4)$$

共开辟 P 个进程, 基于MPI将总模型沿 x 、 y 、 z 方向分别分解为 P_x 、 P_y 、 P_z 个区间, 则

$$P = P_x \times P_y \times P_z, \quad (5)$$

每个进程中的网格规模为 N/P , 各个进程均具有自己独立的内存空间。同时, 每个进程中开辟 T 个线程, 基于OpenMP将每个进程中的子模型沿 x 方向分解为 T 个区间, 则每个线程中的网格规模为 $N/P/T$, 各个线程共享所在进程的内存空间。

在利用空间 $2N$ 阶有限差分进行数值模拟时, 每个进程中的子模型均需沿 x 、 y 、 z 方向划分出 N

个网格点组成过渡层。每个进程在每个时间步长计算出该进程子模型的波场值(包括应力分量和速度分量)后,必须与其相邻的进程通过过渡层进行数据通信(发送或接收)。基于MPI对总模型进行空间分割时通常包括两种方式,一种是三维空间分割方式,另一种是一维空间分割方式,分别如图2和图3所示,图中浅灰色区域表示数据发送源地址,深灰色区域表示数据接收目的地址,数据按箭头方向传递。采用三维空间分割方式时,通过过渡层传输的数据总量为

$$W_1 = 2[N_x \times N_y \times (P_z - 1) + N_x \times N_z \times (P_y - 1) + N_y \times N_z \times (P_x - 1)]. \quad (6)$$

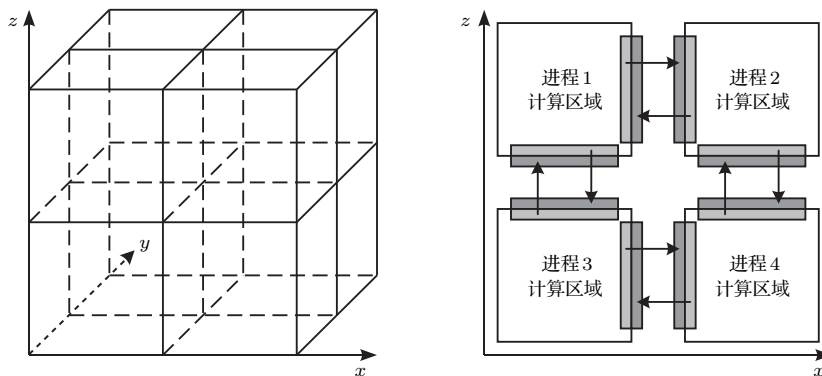


图2 三维分割模式及其相邻进程数据通信示意图

Fig. 2 Three-dimensional split mode and its data communication between adjacent processes

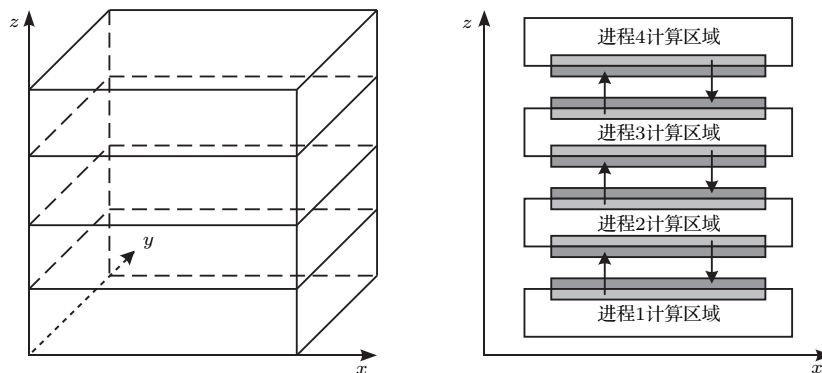


图3 一维分割模式及其相邻进程数据通信示意图

Fig. 3 One-dimensional split mode and its data communication between adjacent processes

3.2 程序设计流程

基于MPI和OpenMP的三维弹性波方程混合并行有限差分算法的程序设计流程如图4所示,具体步骤为:(1)开始程序,调用MPI_INIT、MPI_COMM_RANK和MPI_COMM_SIZE函

采用一维空间分割方式时,通过过渡层传输的数据总量为

$$W_2 = 2(N_x \times N_y)(P - 1), \quad (7)$$

当 $N_x = N_y = N_z = 100$ 和 $P_x = P_y = P_z = 3$ 时, $W_1 = 120000$, $W_2 = 520000$;当 $N_x = N_y = 25$, $N_z = 1600$ 和 $P_x = P_y = P_z = 3$ 时, $W_1 = 352500$, $W_2 = 32500$ 。由此可知,通过过渡层传输的数据总量与模型的空间网格分布以及开辟的进程个数有关,合理选择空间分割方式,能够有效提高计算速度。由于OpenMP采用的是共享式存储方案,故每个进程中的各线程之间无需进行大量的数据通信,只需进行少量的启动、同步、销毁等通信。

数,初始化MPI,获取进程总数和进程序号。(2)划分模型,各进程读取模型参数,包括地层参数、声源和接收器参数等,并为各变量分配内存空间。(3)时间循环开始,各个进程内利用OpenMP并行计算波场。(4)进程之间通过阻塞式标准消息发

送 (MPI_SEND) 和接收 (MPI_RECV) 函数进行数据的交换,更新每个进程中的波场信息。(5) 判断时间循环是否结束。如果没有结束,则转至步骤(3)

继续循环;如果结束,则由主进程收集各个进程中的波场数据并写入文件。(6) 调用 MPI_FINALIZE 函数退出 MPI, 结束程序。

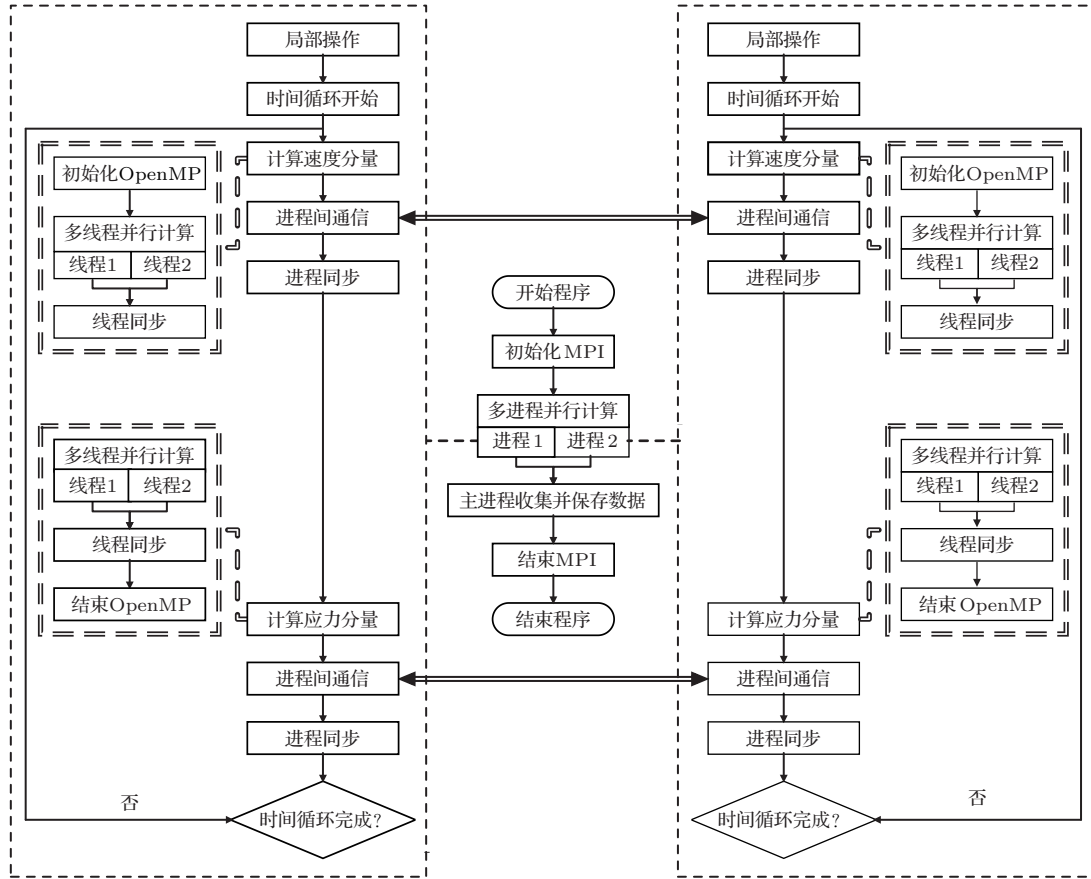


图4 基于MPI和OpenMP的混合并行有限差分算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the hybrid parallel finite difference algorithm based on MPI and OpenMP

4 充液井孔声场模拟算例

4.1 可行性验证

分别采用基于MPI和OpenMP的混合并行有限差分算法、基于OpenMP的并行有限差分算法和实轴积分法计算了如图5所示的裸眼井井孔模型中的声场。计算模型的长(x 方向)、宽(y 方向)、高(z 方向)分别为1 m、1 m、2.5 m,空间步长均为0.005 m;采用完全匹配层边界条件^[16]对计算区域边界的波场进行吸收,PML的厚度均为20层网格,即总的模型网格数为 $240 \times 240 \times 540$;时间长度为4 ms,时间步长为 $0.4 \mu\text{s}$,即时间计算点数为10000;声源函数采用雷克子波,主频为10 kHz;采用爆炸源^[17]作为单极声源的加载方式;井中流体的纵波

速度为1500 m/s,密度为 1000 kg/m^3 ;井外地层的纵波速度为4000 m/s,横波速度为2300 m/s,密度为 2500 kg/m^3 。

本文计算所采用的PC-Cluster为联泰集群高性能服务器,共包含12个节点,每个节点包含8个主频为2.00 GHz的CPU核(Intel Xeon E5-2650, 8核16线程),每个节点的内存为32 G。在利用基于MPI和OpenMP的混合并行有限差分算法进行数值计算时,每个节点上启动一个进程,每个CPU核上启动两个线程,分别采用1个节点、2个节点、5个节点和10个节点对裸眼井井孔模型中的声场进行了计算。为了研究节点个数与计算时间和内存消耗的关系,基于MPI对模型进行空间分割时均采用沿 z 方向的一维空间分割方式。在利用基于OpenMP的并行有限差分算法进行数值

计算时,每个CPU核上启动两个线程。令RI代表实轴积分方法;FDTD-OpenMP代表基于OpenMP的并行有限差分算法;FDTD-MPI+OpenMP-1、FDTD-MPI+OpenMP-2、FDTD-MPI+OpenMP-5、FDTD-MPI+OpenMP-10分别代表采用1个节点、2个节点、5个节点和10个节点时的基于MPI和OpenMP的混合同行有限差分算法。

图6为基于MPI和OpenMP的混合同行有限差分算法、基于OpenMP的并行有限差分算法和实轴积分方法计算得到的波形对比图。其中,图6(a)为源距1.5~2.0 m、间距0.1 m的阵列波形对比图;图6(b)为单独显示的源距2.0 m的归一化波形对比图。从图6中可以看出,三种方法计算得到的波形一致性非常好,相互验证了三种方法的正确性;在本文的计算条件下,接收波形包括滑行纵波、滑行横波、斯通利波和伪瑞利波四种模式波;滑行纵波到时最早、幅度最小;滑行横波在滑行纵波之后到达、幅度

大于滑行纵波的幅度;斯通利波和伪瑞利波到时最晚、幅度最大。

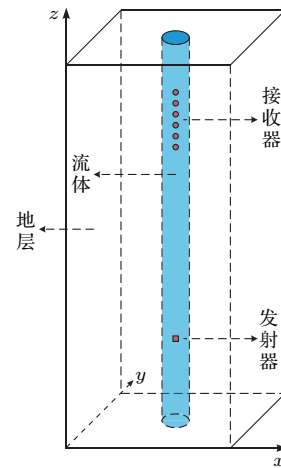
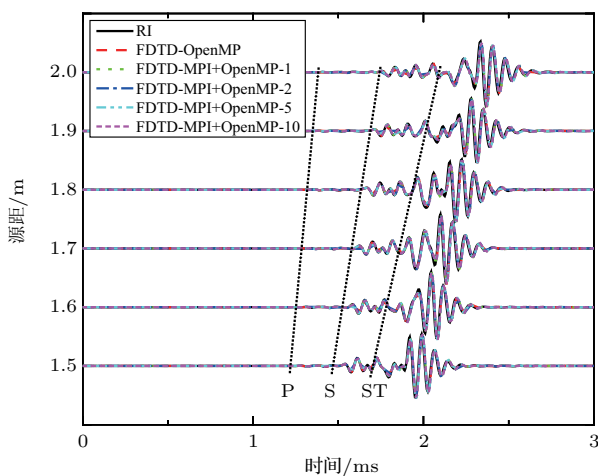
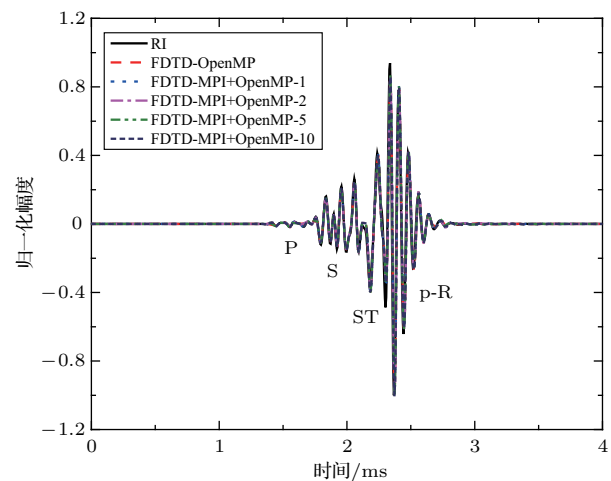


图5 裸眼井井孔模型示意图

Fig. 5 Open hole model



(a) 源距为1.5~2.0 m的波形



(b) 源距为2.0 m的归一化波形

图6 不同方法计算得到的波形对比图

Fig. 6 Waveforms computed by different algorithms

4.2 效果分析

表1为基于MPI和OpenMP的混合同行有限差分算法和基于OpenMP的并行有限差分算法的计算时间与内存消耗对比表。由表1可知,FDTD-OpenMP的计算时间和每个节点的内存消耗均小于FDTD-MPI+OpenMP-1,这是由于采用1个节点时,尽管基于MPI和OpenMP的混合同行有限差分算法不需要进行节点间的数据通信,但仍会执行MPI相关语句,仍会为发

送缓冲区和接收缓冲区等变量开辟内存空间。而FDTD-OpenMP的计算时间和每个节点的内存消耗均大于FDTD-MPI+OpenMP-2、FDTD-MPI+OpenMP-5和FDTD-MPI+OpenMP-10,且随着节点个数的增多,计算时间和每个节点的内存消耗逐渐减小。即,与基于OpenMP的并行有限差分算法相比,基于MPI和OpenMP的混合同行有限差分算法可以利用计算机集群的多个节点进行并行计算,既极大地提高了计算速度,又有效地降低了

单个节点的内存消耗。

特别是对于本文计算所采用的PC-Cluster, 当总的模型网格数大于 $800 \times 800 \times 800$ 时, 程序的内存消耗将超出单个节点内存(32 G), 无法利用FDTD-OpenMP进行计算; 而利用FDTD-MPI+OpenMP-10计算网格数为 $800 \times 800 \times 800$ 的模型时, 每个节点的内存消耗约为5 G, 满足计算需求。即, 基于MPI和OpenMP的混合并行有限差分算法, 更适合于大型地质模型的正演模拟。

对于基于MPI和OpenMP的混合并行有限差分算法, 定义计算加速比为节点数是1时的计算时

间除以节点数是 N 时的计算时间; 定义计算效率为计算加速比除以节点数。由表1可知, 随着节点个数的增多, 计算加速比逐渐增大, 但计算效率逐渐降低, 其原因在于: (1) 消息传递速度不同, 同样大小的消息在同一个CPU不同计算核心中的传递速度远高于不同节点之间通过网络的传递速度; (2) 节点个数增加, 绝对通信量增加; (3) 网络带宽有限, 如果同一时刻网络中的消息过多, 易引起网络阻塞。因此, 通过进程和线程的合理配置和管理, 处理好节点个数与网络带宽的关系, 是提升并行效率的关键。

表1 采用不同节点数时的计算时间与内存消耗对比表

Table 1 Computing time and memory consumption when using different numbers of nodes

算法	计算时间/h	计算加速比	计算效率	每个节点的内存消耗/M
FDTD-OpenMP	27.8	—	—	2587
FDTD-MPI+OpenMP-1	31.5	1	1	3361
FDTD-MPI+OpenMP-2	17.4	1.81	0.91	1853
FDTD-MPI+OpenMP-5	8.7	3.62	0.74	977
FDTD-MPI+OpenMP-10	6.1	5.16	0.52	679

5 结论

弹性波方程正演模拟在声波测井的理论研究与实际应用中都发挥着重要作用, 本文以高性能计算机集群为平台, 基于MPI和OpenMP混合编程技术, 构建了一种新型三维弹性波方程并行有限差分算法。

(1) 分别采用基于MPI和OpenMP的混合并行有限差分算法、基于OpenMP的并行有限差分算法和实轴积分法计算了裸眼井井孔模型中的声场, 接收波形具有非常好的一致性, 验证了混合并行算法的正确性。

(2) 与基于OpenMP的并行有限差分算法相比, 基于MPI和OpenMP的混合并行有限差分算法可以利用计算机集群的多个节点进行并行计算, 极大地提高了计算速度, 又有效地降低了单个节点的内存消耗, 使得大型地质模型的正演模拟成为了可能。

(3) 基于MPI和OpenMP的混合并行有限差

分算法的并行效率不仅取决于程序的编写方式(如模型的空间分割方式、数据的存储方式等), 还依赖于计算机集群的网络环境以及进程和线程的配置和管理方式。综合考虑各种因素的影响, 才能使并行效率达到最优化。

参 考 文 献

- [1] Alterman Z, Karal F C. Propagation of elastic waves in layered media by finite difference methods[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1968, 58(1): 367-398.
- [2] Madariaga R. Dynamics of an expanding circular fault[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1976, 66(3): 639-666.
- [3] Virieux J. SH-wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method[J]. Geophysics, 1984, 49(11): 1933-1942.
- [4] Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method[J]. Geophysics, 1986, 51(4): 889-901.
- [5] Randall C J, Scheibner D J, Wu P T. Multipole borehole acoustic waveforms: synthetic logs with beds and borehole washouts[J]. Geophysics, 1991, 56(11): 1757-1769.

- [6] Randall C J. Multipole acoustic waveforms in nonaxisymmetric boreholes and formations[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 90(3): 1620-1631.
- [7] Leslie H D, Randall C J. Multipole sources in boreholes penetrating anisotropic formations: numerical and experimental results[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1992, 91(1): 12-27.
- [8] Cheng N, Cheng C H, Toksöz M N. Borehole wave propagation in three dimensions[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1995, 97(6): 3483-3493.
- [9] Liu Q, Schoen E, Daube F, et al. A three-dimensional finite difference simulation of sonic logging[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1996, 100(1): 72-79.
- [10] Chen Y H, Weng C C, Liu Q H. A three-dimensional finite difference code for the modeling of sonic logging tools[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 103(2): 702-712.
- [11] 张海澜, 王秀明, 张碧星. 井孔的声场和波 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 140-202.
- [12] 都志辉. 高性能计算并行编程技术: MPI并行程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 2-15.
- [13] 张林波. 并行计算导论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 3-60.
- [14] Pacheco P. An introduction to parallel programming[M]. Elsevier, 2011: 15-76.
- [15] Hermanns M. Parallel programming in Fortran 95 using OpenMP[D]. Spain: Universidad Politecnica de Madrid, 2002: 10-29.
- [16] Wang T, Tang X. Finite-difference modeling of elastic wave propagation: a nonsplitting perfectly matched layer approach[J]. Geophysics, 2003, 68(5): 1749-1755.
- [17] Coutant O, Virieux J, Zollo A. Numerical source implementation in a 2D finite difference scheme for wave propagation[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1995, 85(5): 1507-1512.

◇ 声学新闻和动态 ◇

2017年国际超声大会在美国夏威夷顺利召开

2017年12月18日-20日,由夏威夷大学马诺阿分校(UHM)、韩国声学学会(ASK)主办的2017年国际超声大会(2017 International Congress on Ultrasonics)在美国夏威夷火奴鲁鲁召开。本次会议共有来自约50个国家和地区的近300名代表参会。其中,中国代表57名,包括来自中科院声学所、南京大学、北京交通大学、北京工业大学、华北电力大学、哈尔滨工业大学、同济大学、重庆大学、香港理工大学、中国石油大学、华东理工大学、宁波大学等单位的专家和科研工作者。

会议涵盖了从传统超声到新型研究热点等各个领域,在物理声学(Physical Acoustics)、生物医学超声(Biomedical Ultrasound)、工业超声(Industrial Ultrasound)、无损评价(Nondestructive Evaluation)以及新兴领域(Emerging Fields)五方面共设立了44个讨论专题,其中,声超常材料依然是大会的热点。会上,来自夏威夷大学马诺阿分校的W. Au教授与来自香港科技大学的P. Sheng教授分别作了题为“The best sonar system on this planet: the ul-

trasonic sonar of dolphins”与“Optimal Sound Absorbing Structures”的大会主题报告。在专题讨论单元,中国声学学会检测声学分会联合国内外各科研单位,组织了“Reservoir Acoustics and Bore Hole Acoustics Logging”和“Guided waves and their applications in NDT&SHM”两个专题分会,共有25篇会议论文。

在此次会议上,中国的参会代表也积极参加了声子晶体(Acoustic Phononic Crystals)、表面波与导波(Surface Acoustic Waves and Guided Waves)、无损评价和技术(Acoustic Nondestructive Evaluation and Technology)等其他专题讨论组,与国际代表进行了热烈的学术讨论。此次会议为我国参会的超声研究工作者,特别是年轻的学者提供了很好的交流机会。

下一次国际超声大会将于2019年在比利时的布鲁日(2019 ICU Bruges)召开。

(中国声学学会、中国科学院声学研究所 安志武)