

文章编号 : 1673—2677 (2007) 04—0065 - 04

PC 机群网络并行计算在 油藏数值模拟中的应用

李 勇¹, 胡永乐¹, 李保柱¹, 姚 军²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2 中国石油大学, 山东 东营 257061)

摘 要:基于 Windows 系统的 PC 机群并行计算环境, 介绍了在解决油藏数值模拟问题过程中应用的并行计算技术。对一个隐压显饱、三维三相的黑油数值模拟软件的核心计算求解部分进行了并行化处理, 利用消息传递界面 (MPI) 库实现了并行过程中的所有消息的传递功能。对枣园油田模型进行了测试, 2 个 PC 的加速比达到 1.86, 4 个 PC 的加速比达到 2.76。

关键词:并行计算; PC 机群; 油藏数值模拟; 矩阵分解

中图分类号: TE319

文献标识码: A

油藏数值模拟是利用计算机模型研究和解决具体的油气田开发问题, 其研究的起点是已知的油藏模拟器。随着精细油藏数值模拟研究的深入, 求解问题的规模大, 求解时间长, 单处理机的模拟时间是无法忍受的。并行计算技术可以有效地解决该问题。

本文对 PC 机群网络并行计算环境建立和并行化技术进行了深入的研究, 研制开发了三维三相黑油数值模拟并行化软件。利用 MPI 的非阻塞通讯技术实现了所有数据的传递。本文提出了油藏数值模拟串行软件并行化的便利方法, 对现场模型的测试结果表明该方法是成功的。

1 黑油模型的数值求解

黑油模型已经非常成熟, 这里就不再详细介绍。将黑油模型利用 MPES 有限差分法离散后整理可得一个七对角方程如下:

$$\begin{aligned} A_{Tijk} p_{oij(k-1)}^{n+1} + A_{Sijk} p_{oi(j-1)k}^{n+1} + A_{Wijk} p_{oi(i-1)jk}^{n+1} + E_{ijk} p_{oijk}^{n+1} + \\ A_{Eijk} p_{oi(i+1)jk}^{n+1} + A_{Nijk} p_{oi(j+1)k}^{n+1} + A_{Bijk} p_{oij(k+1)}^{n+1} = B_{ijk} \quad (1) \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} A_{Tijk} &= T_{wij(k-\frac{1}{2})} L_{B_{wijk}} + 0.5 B_g (R_{swij(k-1)} - R_{swijk}) \\ &\quad + T_{oij(k-\frac{1}{2})} [B_{oijk} + 0.5 B_g (R_{soij(k-1)} - R_{soijk})] \\ &\quad + T_{gij(k-\frac{1}{2})} B_{gijk} \\ A_{Sijk} &= T_{wi(j-\frac{1}{2})k} L_{B_{wijk}} + 0.5 B_g (R_{swi(j-1)k} - R_{swijk}) \\ &\quad + T_{oi(j-\frac{1}{2})k} [B_{oijk} + 0.5 B_g (R_{soi(j-1)k} - R_{soijk})] \\ &\quad + T_{gi(j-\frac{1}{2})k} B_{gijk} \\ A_{Wijk} &= T_{wi(i-\frac{1}{2})jk} L_{B_{wijk}} + 0.5 B_g (R_{sw(i-1)k} - R_{swijk}) \\ &\quad + T_{oi(i-\frac{1}{2})jk} [B_{oijk} + 0.5 B_g (R_{so(i-1)k} - R_{soijk})] \\ &\quad + T_{gi(i-\frac{1}{2})jk} B_{gijk} \\ A_{Bijk} &= T_{wij(k+\frac{1}{2})} L_{B_{wijk}} + 0.5 B_g (R_{swij(k+1)} - R_{swijk}) \\ &\quad + T_{oij(k+\frac{1}{2})} [B_{oijk} + 0.5 B_g (R_{soij(k+1)} - R_{soijk})] \\ &\quad + T_{gij(k+\frac{1}{2})} B_{gijk} \\ A_{Nijk} &= T_{wi(j+\frac{1}{2})k} L_{B_{wijk}} + 0.5 B_g (R_{swi(j+1)k} - R_{swijk}) \\ &\quad + T_{oi(j+\frac{1}{2})k} [B_{oijk} + 0.5 B_g (R_{soi(j+1)k} - R_{soijk})] \\ &\quad + T_{gi(j+\frac{1}{2})k} B_{gijk} \\ A_{Eijk} &= T_{wi(i+\frac{1}{2})jk} L_{B_{wijk}} + 0.5 B_g (R_{sw(i+1)k} - R_{swijk}) \\ &\quad + T_{oi(i+\frac{1}{2})jk} [B_{oijk} + 0.5 B_g (R_{so(i+1)k} - R_{soijk})] \end{aligned}$$

收稿日期: 2007 - 06 - 08

作者简介: 李勇 (1982 -), 男, 2005 年毕业于中国石油大学油气田开发工程专业, 现在中国石油勘探开发研究院攻读博士学位, 从事碳酸盐岩油藏数值模拟研究。

$$E_{ijk} = - \left[\begin{matrix} A_{Tijk} + A_{Sijk} + A_{Wijk} + A_{Eijk} \\ + A_{Nijk} + A_{Bijk} + \frac{(V_p(C_t)_{ijk}^n}{\Delta t} \end{matrix} \right]$$
$$B_{ijk} = - W_{ijk} - \frac{(V_p C_t)_{ijk}^n}{\Delta t} p_{oijk}$$
$$W_{ijk} = (B_w - R_{sw} B_g)_{ijk} (G_w + Q_w)_{ijk} + (B_o - R_{so} B_g)_{ijk} (G_o + Q_{vo})_{ijk} + B_{gijk} L_{G_g} + Q_{vg}$$

对上式可以利用预处理共轭梯度法等进行求解,而对饱和度方程则显式求解。

2 三维三相黑油串行软件剖析

在将串行软件并行化之前,首先要清楚整个串行软件的流程。清楚其流程后,需剖析模型运行的各个阶段所花销的 CPU 时间。对枣园油田的一个现场模型进行了测试,结果如图 1 所示,对不同的模型进行测试,所得到的结果可能略有不同。由结果可知,模型运算的时间主要开销在方程的形成与求解部分,这部分所花销的时间占到整个程序运行时间的 90%以上。因此,并行主要针对该部分。对数据的输入、物质平衡检验等部分没有并行。

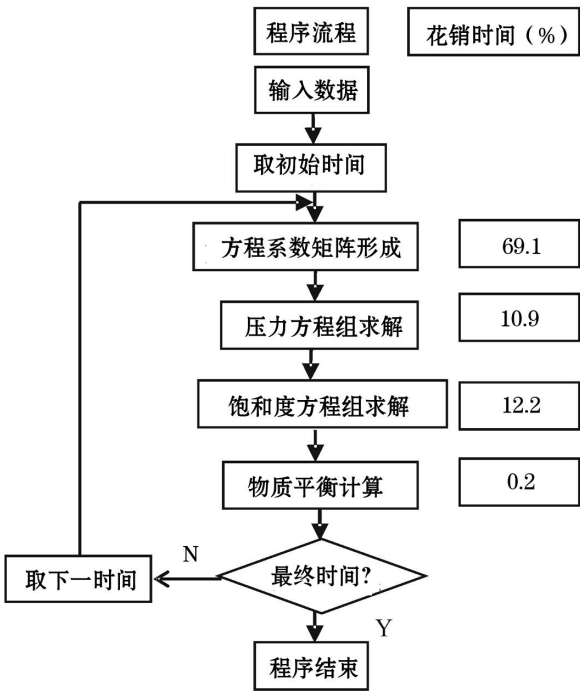


图 1 黑油模型串行程序流程与各阶段花销时间

3 PC 机群网络并行环境的建立

这里介绍的是 MPICH 在 Win2000 或 NT 环境

下的实现。其建立步骤如下:

3.1 操作系统等的配置

安装的操作系统需为 Win2000 或 NT,配置 TCP/IP,将各个 PC 设置为同一域,确保各个 PC 之间可以互相访问。

进行网络的安装,确定每台机器的安装网卡,配置网线及 Hub 等,使用交换机替代 Hub 最好。

3.2 MPICH 的安装与配置

按照 MPICH 的默认安装即可。各个 PC 节点设置为相同的管理员用户名和密码(也可以不同,通过文件来调用),并在各个 PC 上通过 MPRegister.exe 注册该用户名和密码。在主节点上启动 MPICH Configuration tool 来选择并设置该 PC 机群中的节点。经过以上操作以后就可以启动 MPRun.exe 来执行并程序。执行之前确定主节点的服务里启动了 MPICH。

3.3 编译环境的配置

MPICH 提供了 C 语言和 Fortran 语言的接口。可以使用 Visual C++ 6.0 和 Visual Fortran 6.0 进行软件开发,其并行编译环境配置方法相同。这里大体介绍一下 Visual C++ 6.0 的配置。

新建一个工程,通常为 Win32 Console Application。设置该工程的属性:多线程设置;附加头文件路径设置,将 mpich 头文件路径加入工程;附加库文件路径设置,将 mpich 的 *.lib 库文件路径加入工程;在 link 选项卡中,选择“All Configurations”,添加“ws2_32.lib”;分别将“mpichd.lib”和“mpichd.lib”库文件添加到“Win32 Debug”和“Win32 Release”的 link 选项卡的“Object/library modules”中。配置完工程属性后,只需将文件加入到工程中即可编译执行。

4 矩阵分解并行算法

区域分解方法是把一个定义在大的复杂区域上的问题转换为一些小的简单区域上的问题来迭代求解,而且该方法最适合在并行计算机上进行求解。在油藏数值模拟中主要通过有限差分法将模型离散,转换为大型稀疏矩阵的求解,而区域分解技术在离散形式下便是一种形式自由的矩阵分解。

矩阵分解法包括无重叠矩阵分解法和有重叠矩阵分解法两类。这里只介绍无重叠矩阵分解法,有重叠矩阵分解法类似。如图 2 所示,将区域进行

一维块分解。一维块分解比较方便,相邻区域传递次数少该分解后对应的方程为

$$AX = D$$

(2)

其中

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix}$$

求解 (1) 的并行迭代求解步骤如下:

(1) 给出初始值 $x_1^0, x_2^0, x_3^0, x_4^0$;

(2) 对 $n = 1, 2, \dots$, 并行求解子问题

$A_i x_i^n = D_i$, 使用预处理共轭梯度法求解该方程组。

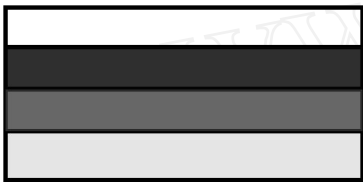


图 2 一维块分解

5 并行策略与方法

5.1 并行的基本策略

采用 MP 编程中的主从设计模式,对黑油模型进行并行化。数据由 Master 主机进行发送和收集。具体来说可以由从进程承担压力线性方程组的求解等计算任务,每个 PC 处理一个子问题,在每个迭代步计算结束后进行相邻网格数据的传递并执行同步操作。而由主进程来承担输入、输出、井的处理和求解过程的计算任务等。并行程序采用流行的 MP 标准信息传递界面,进程间通讯效率高,且可在不同的系统环境下源码移植。在 Windows 环境下的黑油模型并行程序被成功的移植到 Linux 系统下。

5.2 数据通信考虑——非阻塞通信技术

主进程与每一个从进程均需要数据传递。从进程启动后的把所有不依赖于时间的数据一次性从主进程接受过来;每一时间步计算结束之前,主进程应自从进程接收网格压力、饱和度和油气比变量用于物质平衡分析和可能的打印输出。在每一时间步的开始和结束处设置同步点。

为了提高并行计算的性能,让通信与计算重叠是一种有效途径。在单线程环境中,非阻塞通信方式是达到通信与计算重叠的一个重要方法。非阻

塞点到点通信由两部分组成,一部分是启动操作,它启动非阻塞通信。另一部分是完成操作,它完成一次非阻塞通信。具体为:MPI_SEND 启动一个标准通信的发送,它调用以后立即返回,它只表示该消息可以被接收;MPI_RECV 启动一个标准通信的接收操作,它调用以后立即返回,它只表示符合要求的消息可以被接收;非阻塞通信的完成需要利用 MPI_TEST 和 MPI_WAIT 来测试和完成。为了实现计算和通信的最大重叠,应该尽早开始通信,尽早完成通信,而且通信时尽可能的集中通信。

在使用 MP 进行通信时,一个值得注意的问题是有关 Fortran 程序中数组的存放方式。因为在数值模拟软件中经常使用三维数组,而三维数组的元素的排列顺序是:第一维的下标变化最慢,最右边的下标变化最快。这样对于油藏数值模拟来说,即同层的参数时先 X 方向排列后在 Y 方向排列,然后再按层顺序排列。而在程序并行时,由于每个 PC 处理的数据对应于不同的油藏区域,每一时间步迭代完后计算出的值在进程上的存放并不是连续的,因此需要将数据全部传递过去,否则收到的数据将是错误的数

5.3 并行的正确性验证

在并行时,正确性检查是非常重要的。主要通过三部分数据进行对比,这三部分数据是串行执行的数据、并行执行的各个进程的数据和并行执行数据传递后的主进程的数据;整个系统并行是否正确,主要看并行执行后计算的数据和原串行程序的数据是否相同,如图 3 所示。并行的正确性验证主要是通过将传递和计算的主要数据以文件的形式输出来对比判断其正确性。并行的正确性验证这部分是非常重要的,同时又是比较花时间的。因此建议在进行串行程序并行化时最好找一个小规模问题作为数据输入源。

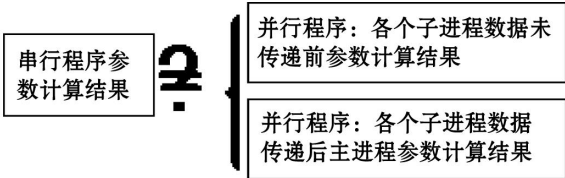


图 3 并行程序的正确性验证

6 模型计算与结果分析

经过多次测试,改造后的并行程序计算结果与

原串行程序的计算结果相同。以枣园油田 Z - V (3, 4, 5 + 6 + 7)储集层参数分布为依据,建立模型如下:

模型 I 3层,平面网格 24 ×10,总网格数为 720 个,井 30口。

模型 II 3层,平面网格 80 ×50,总网格数为 12000个,井 30口。

模型 III 3层,平面网格 200 ×200,总网格数为 120000个,井 30口。

模型 IV: 3层,平面网格 300 ×200,总网格数为 180000个,井 30口。

模型 V: 3层,平面网格 400 ×300,总网格数为 360000个,井 30口。

利用编制的并行黑油数模软件对以上五个模型进行求解,我们分别在 1个、2个和 4个 PC上对其进行测试与分析。其结果如表 1所示。

表 1 压力方程组形成与求解部分的加速比

PC个数	模型号				
	I	II	III	IV	V
2个 PC上的加速比	0.78	1.86	1.81	1.80	1.80
4个 PC上的加速比	0.70	2.76	2.62	2.61	2.59

对模型 I的测试结果可以看出,并程序所用时间多于串行所用时间,原因是对于小规模问题不适合用并行计算来求解。因为对于 PC机群系统来说,其并程序设计的原则就是加大计算时间相对通信时间的比重,减少通信的次数甚至以计算换通信。对于小规模问题来说,其每一时间步计算所花的时间很少,而利用并行求解的时候,其通信次数和大规模问题相同,也需要进行同步等待等,而每一次通信启动时间是很多地,故并行后程序所花的时间反而比串行程序还要多。

在对原先串行程序的测试中,当网格数目达到 10000个以上以后,并行改造部分所占整个串行程序的比例基本保持在 70%。因此对于整个程序,若按理想情况来看,2个 PC的加速比为 1.538,4个 PC的加速比应为 2.105。而改造后的整个程序的加速比如表 2所示。根据结果的对比可以看出该串行程序的并行改造是成功的。

表 2 整个程序的加速比

PC个数	模型号			
	II	III	IV	V
2个 PC上的加速比	1.47	1.45	1.44	1.45
4个 PC上的加速比	1.72	1.75	1.74	1.73

7 结论

本文给出了 Windows系统下网络并行计算环境的建立的一般方法;通过对三维三相黑油模型串行软件的剖析,给出了串行软件并行化的一般方法和策略。通过 MPI利用非阻塞通信技术实现了程序中数据的通信传递;使用主从设计模式完成了整个串行软件的并行化设计。对枣园油田的模型测试表明我们并行后的黑油模型软件是成功的,对并行化部分 2个 PC加速比最高达到 1.87,4个 PC上达到 2.76。该软件解决了大规模油藏数值模拟模拟时间长,浪费人力资源的现象,具有实际应用价值。

符号注释:

下标中的 α_g, w 分别表示油、气及水的参数;下标 i, j, k 代表模拟网格的序号; P 为压力, atm ; T 为传导系数; Q 为井的产量, m^3/d ; t 为时间, d ; R_{so} 为溶解气油比; R_{sw} 为溶解气水比; B 为体积系数; V_p 为网格的体积, m^3 ; C_t 为压缩系数, atm^{-1} 。

参考文献:

[1] 都志辉. 高性能计算之并行编程技术——MPI并行程序设计 [M]. 北京:清华大学出版社, 2001

[2] 陈国良. 并行计算——结构、算法、编程 [M]. 北京:高等教育出版社, 1999

[3] 康立山, 等. 数值解高维偏微分方程的分裂法 [M]. 上海:上海科学技术出版社 1990

[4] Zhang, K, Y. S. Wu, C. Ding, K. Pnuess, and E. Elnnoth Parallel Computing Techniques for Large - Scale Reservoir Simulation of Multi - Component and Multiphase Fluid Flow [J]. Lawrence Berkeley National Laboratory, SPE 66343 2001

[5] Ma Zhiyuan et al Simulation of Black Oil Reservoir on Distributed Memory Parallel Computers and Workstation Cluster[J]. SPE 29937 1995

APPLICATION OF DRILLING FLUID TECHNOLOGY FOR HORIZONTAL WELLS IN THE BLOCK 7 OF BAIZHONG IN KARAMAY OILFIELD / *Ran Zhao - hui, Zhou Lin, Cui Yu - juan, Guo Hai - zhou* Drilling Company of CNPC Xinjiang Petroleum Bureau, Karamay 834000 / *Xinjiang ShiYou TianRan Qi*, 2007, 3 (4) : 60 ~ 64

Abstract: Drilling fluid technology for horizontal wells has been selected for being used in the block 7 of Bai Zhong in Karamay Oilfield, based on the comprehensive analyses of the geologic characteristics, the reservoir characteristics, and the special key points of drilling engineering for horizontal wells. Of the horizontal wells drilled with the application of drilling fluid technology, well bore stability, hole cleaning, the drag and torque, protection of the reservoir and mud losses have been solved completely. With the progress of drilling operation, the drilling fluid technology for horizontal wells does become more effective to make the drilling speed faster. In 2006, there are 54 horizontal wells being drilled successfully in the block 7 of Bai Zhong in Karamay Oilfield by using the kind of drilling fluid technology for horizontal wells.

Key Words: Drilling fluid technology for horizontal wells; the Block 7 of Bai Zhong in Karamay Oilfield

PARALLEL COMPUTING TECHNIQUE ON PC CLUSTERS FOR THREE - DIMENSIONAL AND THREE - COMPONENT RESERVOIR SIMULATION / *Li Yong, Hu Yong - le, Li Bao - zhu, et al* Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina / *Xinjiang ShiYou TianRan Qi*, 2007, 3 (4) : 65 ~ 68

Abstract: In this paper, it is simply introduced that how to build the parallel computing environment on PC clusters based on Windows OS, and presented the parallel computing techniques in detail in the solution of reservoir simulation. Based on an implicit, three - dimensional, three - phase black - oil reservoir simulator, the paper focused on the parallel of the numerical intensive linear solver. A message passing interface (MPI) library was adopted for the functional of all message passing. Numerical tests for Zao Yuan Oil Field were performed on PC clusters.

Key Words: Parallel Computing; PC Cluster; Reservoir Simulation; Matrix Decomposition

SAFETY CONTROLLING SYSTEM OF BOILER SMOKE INJECTION DEVICE SYSTEM / *Cui Pingzheng, Weng Li Yan, Chang Yong, Jiang Jia* Department of Mechatronics, Xinjiang Petroleum College, Urumqi 830000 / *Xinjiang ShiYou TianRan Qi*, 2007, 3 (4) : 69 ~ 71

Abstract: The device for injecting boiler smoke into formation to recover oil not only can improve recovery rate but also can make use of waste smoke. In the light of safety, PLC Control System is adopted and its orders can be sent automatically.

Key Words: the smoke of boiler; technical device; PLC; Safety Controlling system

THE RESEARCH AND APPLICATION OF NEW OPERATING METHOD IN FLUE GAS EXPANDER - MAIN AIR BLOWER SET OF FCCU / *Li Jian - xin, Lu Junpin, et al* Combined workshop one, Karamay petrochemical Company, CNPC, Karamay, Xinjiang 834000 / *Xinjiang ShiYou TianRan Qi*, 2007, 3 (4) : 72 ~ 75

Abstract: A new method of operation for power saving of gas expander^{3/} main air blower in FCCU is put forward in this paper. Based on the security of service, Experiment of the new method is carried out and the optimum matching value of gas expander and main air blower is obtained. For analyzing the effect of the new method to equipment, Calculation in the optimum matching value is executed. Energy consumption of FCCU is reduced obviously.

Key Words: FCCU; Flue gas expander^{3/} Main air blower; Energy conservation; The optimum matching value

THE COMPULSION ELECTRIC CURRENT CATHODIC PROTECTION IS A CATHODE POLARIZATION PROTECTION METHOD. / *Jiang Chun - hua, Zhang Xuan* Equipment Design Institute, Xinjiang Times Petroleum Engineering Company Ltd. Karamay, Xinjiang 834000 / *Xinjiang ShiYou TianRan Qi*, 2007, 3 (4) : 76 ~ 79

Abstract: In cathodic protection design, the anode bed is a key part. Whether its design is reasonable and whether its construction accords to the requirement affect the cathodic protection system directly, which also are