文章编号: 1674 - 5086(2009)06 - 0080 - 05

# 双重介质油藏数值模拟并行算法研究

伍轶鸣<sup>1</sup>,李 勇<sup>2</sup>,李保柱<sup>2</sup>,姚 军<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学 (武汉)资源学院,湖北 武汉 430074;

2 中国石油勘探开发研究院油气田开发所,北京 100083; 3.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 东营 257061)

摘 要: 裂缝型碳酸盐岩油藏非均质性极强,数值模拟运算时间长,迫切需要一种切实可行的解决方法。介绍了区域 分解法在数值模拟中的应用方法,提供了油藏数值模拟串行算法并行化的一般策略与方法。基于已开发的双重介质 油藏数值模拟串行算法及建立的 Windows平台 PC集群网络并行计算环境,利用消息传递界面 (MPI库)实现了并行 过程中所有消息的传递功能。通过对国内某实际碳酸盐岩油田的模拟表明,并行后的算法是成功的,2个 PC加速比 高达 1.86.4个 PC达到 3.46.8个 PC达到 6.89。通过模拟还发现 并行数值模拟时 存在最佳的子区域规模和数目。 该算法解决了大规模碳酸盐岩油藏数值模拟时间长的问题,具有实际的应用价值。

关键词: 双重介质;油藏数值模拟;区域分解法;并行计算; PC集群

中图分类号: TE319 文献标识码: A DOI: 10.3863/j issn 1674 - 5086.2009.06.017

# 引 言

目前的高性能计算由以前传统大型机独占天下 转变为向两个方向发展,一个为继续在大型高端服务 器方向发展:另一个是在低端也就是微机集群上快速 发展,并行技术对微机集群的高性能计算发展作了很 大贡献。目前的并行技术发展的已经相当成熟,依据 并行技术建立起来的并行环境也已经相当稳定。 Windows系统实现并行计算一般通过 MPI (Message Passing Interface)和 PVM (Parallel Virtual Machine)两 种方式进行。 PVM 应用早,缺少统一的标准,适用于 异种机环境,性能较低,函数功能也不如 MPI丰富; MPI所有版本都共同遵守一个广泛支持的标准,提供 大量的函数功能,发展很快,目前 MPI的版本有 LAM、 MPICH、CHMP和 MVICH等。

精细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,其求解问题的规模大、求 解时间长。碳酸盐岩油藏的数值模拟更加复杂,求解 变量是单重介质油藏的两倍,且由于油藏非均质性极 强,经常出现收敛性不好等问题,单处理机的模拟时 间是无法忍受的,迫切需要采用并行计算技术来解决 该问题。目前,国内对碳酸盐岩油气藏数值模拟方法 研究较多[1-3],较少涉及并行算法[4-6];而国外在数 值模拟并行计算方法方面研究较深入<sup>[7-12]</sup>。

本文在先前研究完成的三维三相黑油双重介质 油藏数值模拟串行软件的基础上,采用区域分解法, 对双重介质油藏数值模拟的并行化技术进行了深入 的研究。基于建立的 PC集群网络并行计算环境,利 用 MPI的 MPICH版本的非阻塞通讯技术实现了所 有数据的传递,研制开发了三维三相双重介质油藏 数值模拟并行化软件,提出了双重介质油藏数值模 拟串行软件并行化的便利方法,现场模型的测试结 果表明该方法是成功的。

#### 1 双重介质黑油模型的求解

#### 1.1 模型的基本假设

(1) 双重介质中的裂缝和基岩为相互独立而又 互相联系的水动力学渗流系统,两种连续介质在空 间上是重叠的,岩块为主要储油空间,裂缝为主要渗 流诵道。

(2) 岩块中的流体和裂缝交换并通过裂缝渗 流,同时岩块间也存在流体渗流,而向井底供液只能 通过裂缝。

\* 收稿日期: 2008 - 11 - 03 基金项目: 国家"十五 重大攻关项目"中国油气资源发展关键技术"(2001BA605A - 03 - 01)。 作者简介: 伍轶鸣 (1967 - ),男 (汉族),陕西富平人,博士研究生,主要从事油气藏工程研究工作。

1.2 裂缝内的渗流方程

$$\begin{cases} \nabla^{2} \left[ \begin{array}{c} - \frac{o}{\rho} KK_{p} \nabla^{2} \left( p_{o} - o gD \right) \right]_{f} + q_{o} + o \left( p_{om} - p_{of} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi S_{o - o} \right)_{f} \\ \nabla^{2} \left[ \begin{array}{c} \frac{KK_{rg} - g}{\mu_{g}} \nabla^{2} \left( p_{g} - g gD \right) \right]_{f} + \left[ R_{so} \frac{KK_{ro} - g}{\mu_{o}} \nabla^{2} \left( p_{o} - o gD \right) \right]_{f} + \\ q_{g} + g \left( p_{gm} - p_{gf} \right) + o R_{so} \left( p_{om} - p_{of} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi S_{g - g} + R_{so} \phi S_{o - o} \right)_{f} \\ \nabla^{2} \left[ \frac{KK_{rw} - w}{\mu_{w}} \nabla^{2} \left( p_{w} - w gD \right) \right]_{f} + q_{w} + w \left( p_{wm} - p_{wf} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi S_{w - w} \right)_{f} \end{cases}$$
(1)

式中

▽<sup>2</sup>—拉普拉斯算子;
 一密度, kg/m<sup>3</sup>;
 *K*—渗透率, µm<sup>2</sup>;
 *p*—压力, MPa;
 □ 医量计量的单位时间;

q—以质量计量的单位时间内单位地层体积内的产出量, kg/(m<sup>3</sup> · s);

- ——双重介质间的传导系数 $, (km \cdot s)^{-1};$
- µ—黏度, mPa・s;
- *t*—时间,d;
- S—饱和度,无因次;

g—重力加速度,g = 9.8 m/ $s^2$ ; D—由某一基准面算起的深度,向下为正,km;  $R_{so}$ —溶解气油比;  $\phi$ —孔隙度,小数。

下标符号意义

o、g.w—油、气及水的参数;

m、f—基岩系统与裂缝系统的参数;

r—相对的。

采用 Gilman & Kazem i方法<sup>/13/</sup>计算孔洞与裂缝间的窜流量,对其进行修改并作全隐式求解。

1.3 基岩内的渗流方程

$$\nabla^{2} \left[ \begin{array}{c} \frac{-}{\mu} KK_{m} \nabla^{2} \left( p_{o} - {}_{o} gD \right) \right]_{m} - {}_{o} \left( p_{om} - p_{of} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi S_{o - o} \right)_{m} \\ \nabla^{2} \left[ \begin{array}{c} \frac{KK_{m}}{\mu_{g}} \nabla^{2} \left( p_{g} - {}_{g} gD \right) \right]_{m} + \nabla^{2} \left[ \begin{array}{c} R_{so} \frac{KK_{m}}{\mu_{o}} \nabla^{2} \left( p_{o} - {}_{o} gD \right) \right]_{m} - \\ {}_{g} \left( p_{gn} - p_{gf} \right) - {}_{o} R_{so} \left( p_{om} - p_{of} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi S_{g - g} + R_{so} \phi S_{o - o} \right)_{m} \\ \nabla^{2} \left[ \begin{array}{c} \frac{KK_{m}}{\mu_{w}} \nabla^{2} \left( p_{w} - {}_{w} gD \right) \right]_{m} - \\ {}_{w} \left( p_{wm} - p_{wf} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi S_{w - w} \right)_{m} \end{array} \right]$$

$$(2)$$

对渗流方程通过差分网格离散后,得到其全隐 式数值模型。三相状态时,求解变量为 pof, Swf, Sgf, pom, Swm, Sgm;两相状态时,求解变量为 pof, Swf, Pof (裂 缝的泡点压力), pom, Swm, Pom (岩块的泡点压力)。通 过整理,可得 6个求解方程,因此方程是封闭的。对 形成的非线性方程组采用块状矩阵预处理共轭梯度 法进行求解,在求解过程中需采用特定的处理对稳 定性进行控制。对于并行数值模拟算法来说,需要采 用区域分解法,对整个油藏进行区域划分,每个区域 形成自己的线性方程组,各个区域之间设置一定的 边界条件,模拟过程中,边界条件参数在各个 PC之 间互相传递,整个软件主模块流程图如图 1所示。



© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(4)

#### 区域分解法 2

区域分解法<sup>[14-15]</sup> (Domain Decomposition Method, 简称 DDM)主要有 3种类型:(1)带有重叠区域的区 域分解法 (DDM-1); (2) 不带重叠区域的区域分解 法 (DDM-2); (3) 带虚拟成分的区域分解法 (DDM-3)。本文采用 DDM-2方法,把大的油藏分成若干小 的不重叠的油区,每台 PC同时处理一个或多个油 区。DDM 求解油藏问题并行度较高,为粗粒度并行, 子区域之间只需在对应的线性方程组求解完成后交 换一次信息,通信量不大,其完成时间取决于最后完 成的任务所用时间。为了提高效率,一是采用高效的 算法,使得各子区域收敛速度均很快;二是采用负载 平衡的分区方法,使得每个处理机完成任务所需时 间大致相等。

对于 DDM-2方法,即当区域划分无重叠时,可 构造子结构算法,它是一种矩阵结构分析方法,简单 地说,是对矩阵系统进行分块并确定求解顺序,最后 归结为容量方程求解。为简化容量方程的求解引入 了迭代子结构方法。

子结构算法建立在区域划分无重叠基础上 (如 图 2所示),将区域 划分成两个子区域 和 ,  $_{1}$   $_{2}$  =  $_{1}$  (公共人工边界),然后对  $_{1}$   $_{2}$ 和  $_{1}$ 进行一致网格剖分,网格节点编号顺序是先 ,内节 点,再,,内的节点,最后为,,上的节点。考虑在开 上的一般二阶椭圆型方程的 Dirichlet问题 区域



图 2 无重叠型区域划分

Fig. 2 Non-superposition domain decomposition

其中

∂ , 为 的闭区间 ) 上一致正定 ,  $D_{ii}$  为 D 对 = x的二阶导数,  $D_i$ 为 D对 x的一阶导数, d是 上的 一致连续函数, i = 1, 2, ..., n,则式 (3) 的离散化形

A

$$\cdot X = f$$

其中  $\begin{array}{ccc} 0 & A_{22} \\ A_{B1} & A_{B2} & A \end{array}$  $U_1$ 

f为在 Dirichlet边值条件移到方程右端后的新 右端项,  $A_{11}$ 为微分算子 *L*限制在 \_\_L的离散算子,  $A_{IB}$ 为 小内部的  $U_1$ 与边界 小上的  $U_B$  偶合成的矩 阵, A<sub>B</sub>为算子 L限制的 1上的离散算子,将它分成  $A_B^1$ 和  $A_B^2$ ,  $A_{B1}$ 为边界 」上的  $U_B$  与 」内部的  $U_1$ 偶 合成的矩阵。对式 (4) 进行块 Gauss消去,得

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{B}} = \mathbf{f}_{\mathbf{B}} \tag{5}$$

$$\begin{split} \mathbf{S}^{(1)} &= \mathbf{A}_{B}^{(1)} - \mathbf{A}_{B1} \cdot \mathbf{A}_{11}^{-1} \cdot \mathbf{A}_{1B}, \\ \mathbf{S}^{(2)} &= \mathbf{A}_{B}^{(2)} - \mathbf{A}_{B2} \cdot \mathbf{A}_{22}^{-1} \cdot \mathbf{A}_{2B}, \\ \mathbf{S} &= \mathbf{S}^{(1)} + \mathbf{S}^{(2)}, \\ \mathbf{f}_{B} &= \mathbf{f}_{B} - \mathbf{A}_{B1} \cdot \mathbf{A}_{11}^{-1} \cdot \mathbf{f}_{1} - \mathbf{A}_{B2} \cdot \mathbf{A}_{22}^{-1} \end{split}$$

式 (5) 即为容量方程,  $S_xS^{(1)}$ ,  $S^{(2)}$  为容量矩阵。 所以,求解式(4)归结为求解式(5),然后并行求解

$$\mathbf{A}_{11} \cdot \mathbf{U}_1 = \mathbf{F}_1 + \mathbf{A}_{1B} \cdot \mathbf{U}_B \tag{6}$$

• f<sub>2</sub>

$$\mathbf{A}_{22} \cdot \mathbf{U}_2 = \mathbf{F}_2 + \mathbf{A}_{2\mathbf{B}} \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{B}} \tag{7}$$

上面只是介绍了将一个区域分为两个子区域时 的特例。对于实际油藏,在采用 DDM 法时,需要根 据划分区域的情况进行扩展。

#### 3 并行策略与方法

为了尽可能减少并行编码的工作量,采取主从 模式 (Master/Slave)的并行实现策略。具体来说 .由 从进程承担压力线性方程组的求解等计算任务,而 由主进程来承担输入、输出、井的处理、求解过程的 控制以及计算等任务。由于进程间通讯效率高,且 可在不同的系统环境下源码移植,并行平台采用流 行的 MPI标准消息传递界面。在 MPI下,可用同一 个可执行码通过逻辑控制实现主从方式,其并行编 程模式为单程序多数据流<sup>[16-17]</sup> (Same Processor Multiple Data,简称 SPMD)的模式,即在不同 PC机 上同一个程序运行不同的数据,其流程如图 3所示。



程序运行过程中,主进程与每一个从进程均要 发生数据传递。从进程启动后的第一件任务是把所 有不依赖于时间的数据一次性从主进程接收过来; 每一时间步结束之前,主进程自从进程接收网格压 力、饱和度和气油比等变量用于物质平衡分析和可 能的打印输出。在并行过程中,首先实现虚拟并行, 然后再实现真实并行。

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种重要方法。非阻塞 点到点通信由两部分组成,一部分是启动操作,即启 动非阻塞通信;另一部分是完成操作,即完成一次非 阻塞通信。在 MPI中,非阻塞点到点发送操作子程 序有 MPI\_ISEND、MPI\_WA IT及 MPI\_TEST等。在 并行化过程中,数据的传递采用非阻塞点到点发送 方法<sup>[18-19]</sup>。

## 4 计算结果与分析

基于实验室组建的 8台 PC集群网络并行计算 环境,在原先编写的天然裂缝性油藏数值串行模拟 器基础上,利用非重叠区域分解法进行区域划分,采 用 MPI消息传递界面将数据进行传递,实现对原串 行软件并行化。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近(并行程序 的非线性方程组求解采用区域分解法)。以某碳酸 盐岩油田储集层参数分布为依据,建立 3个不同网 格数目的计算模型,模型参数如下:

模型 H12层,平面网格 50 ×50,总网格数为

30 000个,井 15口。

模型 II:12层,平面网格 100 ×100,总网格数为 120 000个,井 15口。

模型 III: 12层, 平面网格 300 ×300, 总网格数 为 1 080 000个, 井 15口。

利用编制的并行黑油数模软件对以上 3个模型 进行求解,分别在 1,2,4和 8台 PC机上对其进行测 试与分析。每个 PC机处理一个子区域时其加速比 结果如图 4所示,对模型 III,每台 PC机处理 1,2,4, 8,16个子区域时其对应的加速比及采用 ECL IPSE 软件并行模块计算结果如图 5所示。



图 4 加速比随 PC机数目的变化曲线

Fig 4 Acceleration rate relation with PC cluster number





由图 4可见, PC数目一定时,加速比随子域规 模的变化曲线非单调变化;采用 2台 PC时,子域规 模较大,不利于负载均衡,从而影响了加速比(图 5)。由图 5可知,对一给定的 PC集群环境和油藏 模型,存在一个最佳的子区域数目,子区域数目过 少,则子区域的规模较大,负载平衡效果不好;子区 域数目过多,则子区域规模较小,相关子区域间数据 传输次数增多,数据传输耗费的时间也就增加。在 实际模拟中,首先需对不同的子区域数目所用时间 进行对比,以选择最佳的子区域规模和数目。从结 果对比还可以看出本方法与 ECL IPSE 商业软件计 算效率相当,在某些情况下本文方法效率更高(见 图 5)。

#### 5 结 论

(1)提出了一种利用区域分解法实现油藏数值 模拟串行软件并行化的方法,给出了串行软件并行 化的一般方法和策略。

(2) 通过对实际某碳酸盐岩油田的三个模型的 模拟,证明并行后的算法是成功的,2个 PC加速比 高达 1.86,4个 PC达到 3.46,8个 PC达到 6.89;并 行数值模拟时,存在最佳的子区域规模和数目。该 算法解决了大规模碳酸盐岩油藏数值模拟时间长的 问题,具有实际的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 彭小龙,刘学利,杜志敏,缝洞双重介质数值模型及渗流特征研究[J].西南石油大学学报(自然科学版), 2009,31(1):61-64.
- [2] 张锦良,张烈辉,何国良,等.一类变形双重介质渗流
   模型解的存在性分析 [J].西南石油大学学报,2007, 29(1):123-125.
- [3] 何国良,向开理.变形双重介质分形油藏渗流数学模型及压力动态特征[J].西南石油学院学报,2002,24
   (4):24-27.
- [4] 杨耀忠,韩子臣.多层二维二相油藏数值模拟并行技术术[J].油气地质与采收率,2001,8(6):52-54.
- [5] 舒继武. 一类大规模油藏数值模拟问题的有效并行计算[J]. 电子学报, 1999, 27(11): 90 92
- [6] 熊玉庆. OiCL:一个面向油藏数值模拟并行计算的通 信库 [J]. 计算机学报, 2000, 23 (7): 744 - 749.

- [7] Zhang K, Wu Y S, Ding C, et al Parallel computing techniques for large- scale reservoir simulation of multi- component and multiphase fluid flow [J]. SPE 66343, 2001.
- [8] Ma Zhiyuan, Jing Fengjiang, Xu Xiangming, et al Simulation of black oil reservoir on distributed memory parallel computers and workstation cluster[J]. SPE 29937, 1995.
- [9] Wei Liu, Jianwen Cao, A lberto Mezzatesta, et al Parallel reservoir simulation on shared and distributed memory system [J]. SPE 64797, 2000.
- [10] Dogru A H, Li K G A massively parallel reservoir simulator for large scale reservoir simulation [J]. SPE 51886, 1999.
- [11] Hermes C E and Koo J A. PC/Workstation cluster computing engineering/simulation applications environment for reservoir[J]. SPE 28265, 1994.
- [12] Killough J E, Commander D E Scalable parallel reservoir simulation on a windows NT TM - based work station cluster[J]. SPE 51883, 1999.
- [13] Gilman J R and Kazemi H. Inprovements in simulation of naturally fractured reservoirs[J]. SPE 10511, 1982.
- [14] 康立山. 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: 275 277.
- [15] 刘青昆,归丽忠,舒继武,等.区域分解法解黑油数值 模拟问题改进的并行计算 [J].南京大学学报(自然 科学),2003,39(2):230-237.
- [16] 陈国良.并行计算——结构、算法、编程 [M].北京: 高等教育出版社,1999:152-190.
- [17] 都志辉.高性能计算之并行编程技术 ——MP 并行程 序设计 [M].北京:清华大学出版社,2001:85-120
- [18] 吕屏,马远乐,赵刚.化学驱软件中化学平衡的并行
  计算[J].清华大学学报(自然科学版),2002,42
  (10):1328-1330
- [19] 赵国忠.串行油藏模拟器并行化的一种便利途径
   [J].数值计算与计算机应用,2002,15(4):310-315.

(编辑:杜增利)

Key words: tight sandstone; gas reservoir, Knudsen number, physical adsorption; diffusion

#### PARALLEL COMPUTING TECHNOLOGY FOR DUAL-POROSITY RESERVO IR NUMERICAL SMULATION

WU Yi-Ming<sup>1</sup>, LI Yong<sup>2</sup>, LI Bao- zhu<sup>2</sup>, YAO Jun<sup>3</sup> (1. Resource Institute, China University of Geoscience, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Oil and Gas Field Development Department, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China; 3. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying Shandong 257061, China) JOURNAL OF SOUTHWEST PETROLEUM UNIVERSITY (SCI-ENCE & TECHNOLOGY EDITION), VOL 31, NO. 6, 80 - 84, 2009 (ISSN 1674 - 5086, in Chinese)

Abstract: The heterogeneity of fractured carbonate reservoir is very strong The simulation of the dual-porosity reservoir spends a lot of time, so it is urgent to find a method to solve it In this paper, the application of domain decomposition in reservoir simulation is introduced A strategy is introduced on parallel serial software. Based on the parallel computing environment on PC clusters with W indows OS and the developed dual-porosity reservoir simulator, a message passing interface (MPI) library is adopted for all messages passing functionality. Numerical tests for a carbonate O ilfield are performed on PC clusters, the speed-up ratio of 2 PC clusters is 1. 86, 3. 46 for 4 PC clusters, and 6. 89 for 8 PC clusters respectively. The result shows that the parallel simulator has extensive applicability and really saves a lot of time for the large scale carbonate reservoir simulation.

Key words: dual-porosity; reservoir numerical simulation; domain decomposition; parallel computing; PC cluster

## NUMERICAL SMULATION OF SINGLE- PHASE FLOW THROUGH POROUS MEDIA IN FRAC-TURE MEDIA UNDER ELECTRIC FIELD

L U Jin-yu<sup>1a</sup>, WANG Dian-sheng<sup>1a</sup>, LU Zhan-guo<sup>1b</sup>, YAN Guo-liang<sup>1a</sup>, X NG Zhao-yu<sup>2</sup> (1. China University of Petroleum: a School of Physics Science and Technology, b College of Petroleum Engineering, Dongying Shandong 257061, China; 2 Luning Transmit Oil Section, Pipeline Storage & Transportation Company, SNOPEC, Zoucheng Shandong 273500, China) JOURNAL OF SOUTHWEST PETROLEUM UNIVERSITY (SCIENCE & TECHNOLOGY ED ITION), VOL. 31, NO. 6, 85 - 88, 2009 (ISSN 1674 - 5086, in Chinese)

Abstract: The single-phase flow through porous media in fracture media under electric field is studied with numerical sinulation A mathematical model describing the flow of single-phase fluid in fracture media under electric field is established based on the equivalent continuum model and the electroosmosis theory, the finite element method for solving the mathematical equations is introduced, three kinds of fracture media models with different fracture apertures are designed, and the effect of electric- field strength, pressure gradient and fracture aperture on flow velocity in fracture media is analyzed respectively in terms of the numerical results. The flow rate can be increased effectively under electric- field, for example, the velocity can be increased by 8.2 times in the fracture media whose aperture is  $5 \times 10^{-5}$  m when electric- field strength is 450 v/m, and the ratio of flow velocity under different electrical fields and zero electrical field decays exponentially with pressure gradient increasing. The results indicate that influence of electric field on flow through porous media is more significant with the decreasing in the pressure gradient and the