

全隐式油藏模拟软件的并行计算及应用

杨耀忠

(胜利油田有限公司地质科学研究院, 山东东营 257015)

摘 要: 本文在深入研究迭代解法的基础上,对全隐式油藏模拟形成的线性代数方程组进行了预处理方法、节点排序方法等求解方法的优化,优化出适于并行的最佳解法。以优化后的预处理正交极小化算法为基础,对多层二维二相全隐式模拟模型进行了以层为单位的粗粒度并行任务划分。油田大规模实例计算表明并行化的多层二维二相全隐式模拟模型形成的软件具有较高的并行效率,满足油田实际应用的需要。

关键词: 模型; 优化; 并行; 粗粒度; 并行效率

中图分类号: TE319 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0429-04

The Parallel Calculation and Application of the Full-Implicit Reservoir Simulation Software

YANG Yao-zhong

(Geological Scientific Research Institute of Sheng Li Oilfield Company Ltd., Dong Ying, Shandong 257015, China)

Abstract: The paper optimizes the pretreatment method of the matrix and the compositor method of the nodes etc about the linear algebra equation group formed by full-implicit reservoir simulation and produce the best solution fitting for parallel on the base of deep research about iterative solution. At the base of optimized ORTHOMIN method, the two dimension two phase full-implicit model with multi-layers has been paralleled as coarse granularity. The calculating outcome of large scale reservoir simulation indicates that the paralleled multi-layer two dimension two phase model possesses upper parallel efficiency and meets the practical application demands of the oilfield.

Key words: model; optimal; parallel; coarse granularity; parallel efficiency

1 引言

多层二维二相油藏数值模拟数学模型是由多孔介质中流体渗流的达西定律导出。由连续性方程、状态方程及初始边界条件导出的偏微分方程是非线性偏微分方程,采用全隐式方法求解。基于五点差分格式,离散后的差分方程最终形式为大型稀疏块状五对角线性代数方程组。

略去毛管力影响,考虑重力的油水两相流动的连续性方程、状态方程分别表示如下。

连续性方程:

$$-\nabla \cdot (h_o \mathbf{V}_o) = h \frac{\partial (\phi_o S_o)}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\nabla \cdot (h_w \mathbf{V}_w) = h \frac{\partial (\phi_w S_w)}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{V}_w = -\frac{KK_{rw}}{\mu_w} \nabla (P - \rho_w g Z) \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_o = -\frac{KK_{ro}}{\mu_o} \nabla (P - \rho_o g Z) \quad (4)$$

状态方程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial \phi}{\partial t} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial P}{\partial t} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} + \frac{\partial P}{\partial t} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial P} \quad (5)$$

以上方程化简合并后得二维二相基本流动方程:

$$\nabla \cdot [\nabla P - (\rho_o \nabla G_o + \rho_w \nabla G_w)] = \frac{\partial}{\partial t} \left(h \frac{\partial P}{\partial t} \right) \quad (6)$$

$$\nabla \cdot [f (\nabla P - \nabla G_w)] = \phi h \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (7)$$

式中:

$$\rho_o = \rho_o + \rho_w, \quad \rho_o = \frac{Kh}{\mu_o} K_{ro}, \quad \rho_w = \frac{Kh}{\mu_w} K_{rw}$$

$$G_o = \rho_o g Z, \quad G_w = \rho_w g Z$$

$$f = \frac{c}{\rho_o + \rho_w} + S_w \phi_w + (1 - S_w) \phi_c, \quad f = \frac{w}{\rho_o + \rho_w}$$

边界条件: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$

初始条件:

$$P(X, Y, 0) = P_o(X, Y)$$

$$S(X, Y, 0) = S_o(X, Y),$$

$$S(X, Y, 0) = 1.0,$$

油区

水区

式中:

$$i, i = \frac{2}{i+j}, \quad o_i, j = \frac{2}{o_i + o_j}, \quad w_i, j = \frac{2}{w_i + w_j}$$

$$b_i = \frac{i h_i}{t_m} X^2, \quad l_i = \frac{\phi h_i}{t_m} X^2$$

$$f_{i,j} = \begin{cases} f(S_w) & , P_j > P_i \\ f(S_w) & , P_j = P_i \\ 1.0 & , \text{注水井} \\ f_i & , \text{生产井} \end{cases}$$

$$q_i = \begin{cases} > 0 & , \text{注水井} \\ = 0 & , \text{非井点或关井} \\ < 0 & , \text{生产井} \end{cases}$$

式中: P 为油层压力, K 为油层渗透率, K_{ro} 、 K_{rw} 分别为油、水相对渗透率, Z 为油层深度, S_o 、 S_w 分别为油、水饱和度, g 为重力加速度, h 为油层有效厚度, ϕ 为油层孔隙度, ρ_o 、 ρ_w 分别为油、水密度, μ_o 、 μ_w 分别为油、水粘度, c_o 、 c_w 分别为岩石、油、水弹性压缩系数, α_c 为综合弹性压缩系数, α_v 为单位换算系数, t 为时间。

差分方程求解采用已证明是绝对稳定、绝对收敛的全隐式方法。其核心是非线性项系数的处理方面,其泰勒级数展开的一阶导数值用本阶段值,而不用上阶段值。全隐式形式的线性代数方程组可用牛顿迭代法求解,它具有二次收敛的速度。应用牛顿迭代法可推出全隐式差分方程的最终形式为:

$$\begin{bmatrix} k & P_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & S_1 & P_1^k \end{bmatrix} - Q_1 S_1 - \frac{V}{t B_{1k}} \left[S_1 + S_1^k (C_p^k + C_1^k) P_1 \right] = - \begin{bmatrix} k & P_1^k \end{bmatrix} + Q_1 + \frac{V}{t} \left(\frac{S_1}{B_1} \right)^k - \left(\frac{S_1}{B_1} \right)^n \quad (8)$$

其中 l 代表油相或水相, k 代表迭代次数, n 表示上一时间阶段。

基于五点差分格式,离散后的差分方程形式为大型稀疏块状五对角线性代数方程组,表达式如下:

$$b_{ij} P_{i,j-1} + a_{ij} P_{i-1,j} + c_{ij} P_{i,j} + d_{ij} P_{i+1,j} + e_{ij} P_{i,j+1} = f_{ij}$$

矢量式为: $AP = f$

其中 b_{ij} 、 a_{ij} 、 c_{ij} 、 d_{ij} 及 e_{ij} 均为方程组的系数, f_{ij} 为方程右端项,篇幅所限略去。下标 i, j 表示网格所在位置。A 为系数矩阵, P 为要求解的压力矢量, f 为方程右端项矢量。

2 串行解法优化研究

2.1 迭代解法及其并行可行性对比

线性代数方程组解法选择要满足两个条件,首先其串行算法收敛速度最快;其次,这种算法必须易于并行。线性代数方程组的解法有两大类,即直接法和迭代法。对于大型稀疏矩阵求解,直接法所占存储量大,无法适应大模型求解,因此迭代法成为主要求解方式。传统的迭代法有五种,即 Jacobi 迭代法、高斯—赛德尔迭代法 (Gauss—Seidel)、点松弛法 (SOR)、线松弛法 (SSOR) 及共轭梯度法 (CG)。从这五种迭代方法的收敛速度分析,前四种都较低,而共轭梯度法与系数矩阵的条件数相关,条件数越小,收敛性越好。条件数小时,可在几步就达

到高精度的近似解。目前求解油藏模拟方程最流行的是预处理正交极小化算法 (ORTHOMIN 方法),其基本思路是设法降低系数矩阵的条件数,并改变加速的方向来改善收敛速度。特别是当方程组的系数矩阵条件数很大时,用一般分裂法往往收敛非常慢,通过预处理技术,使得矩阵条件数大为降低,再加上正交极小化加速方法而达到快速收敛目的,它是 90 年代以来流行的快速高效油藏模拟解法。下表为不同迭代方法收敛速度及并行性对比,显然预处理正交极小化算法 (ORTHOMIN) 无论从收敛速度还是并行性上都是最佳的。

表 1 不同迭代方法收敛速度及并行性对比

迭代方法对比内容	Jacobi	Gause-seidel	SOR	SSOR	CG	ORTHOMIN
收敛速度	$\frac{1}{2}$	$2h^2$	$2h$ ($h, 0$)	h ($h, 0$)	与系数矩阵条件数相关,越小越好	预处理降低条件数,正交加速达到收敛快速
并行性	易于并行	不适于并行	不适于并行	不适于并行	可并行	可并行

2.2 并行化前预处理方法优化

2.2.1 矩阵预处理方法优化

应用不同的预处理方法,其收敛速度是不同的,为达到并行后有较高的收敛速度,必须对适于并行的不同预处理方法进行优化。以多层二维二相全隐式模型形成的块状五对角线性代数方程组为例,应用近似分解预处理正交极小化法、不完全乔里斯基预处理正交极小化法、线松弛预处理正交极小化法共三种方法进行求解,计算时间对比见图 1。其计算条件为一台 SGI Challenge 单个 CPU 串行计算。从三种预处理方法分析,不完全乔里斯基预处理正交极小化法收敛最快。

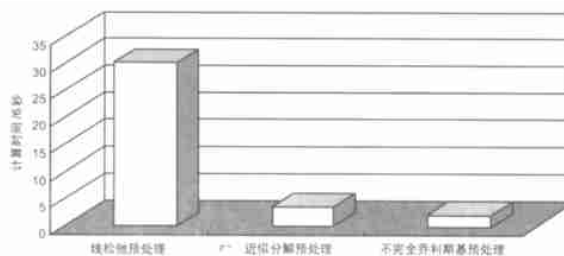


图 1 三种预处理方法计算速度对比

2.2.2 节点排列格式优化

上面的例子是使用正规排序,即标准排列格式。不同的排序格式影响计算的存储量及计算量,而存储量及计算量直接影响并行后收敛速度的快慢及通讯量的大小。常用的排列格式有:标准排列格式、对角排列格式 D2、点交替排列格式 D3 及交替对角线排列格式 D4。Price 与 Coats (1974)^[1] 曾用高斯消去法计算工作量及最小存储量进行了比较表 2。对于 x 方向上总节点数为 I , y 方向上总节点数为 J 的二维网格,不同的排列对应计算量及存储量比较如下:

由表可看出 D4 排列的计算工作量及存储量是最小的,

表 2 不同排列格式对比表

比较指标 排列格式	高斯消去法工作量	最小存储单元
标准排列	U^3	U^2
对角排列 D2	$U^3 - J^4/2$	$U^2 - J^3/3$
点交替排列 D3	$U^3/2$	$U^2/2$
交替对角排列 D4	$U^3/2 - J^4/2$	$U^2/2 - J^3/6$

因此,相应使并行后通讯量减到最低,计算速度可有效提高, D4 排序是最佳排序方法。

综上所述,为了使并行后的多层二维二相全隐式模型具备快速求解的特性,对其预处理方法及节点排序方法进行了优化,推荐使用 D4 排序不完全乔利斯基预处理正交极小化解法。

3 以层为并行单元实现全隐式模拟模型并行化

多层二维二相全隐式模型求解流程如图 2 所示。在模型求解的不同时间步里,需计算的层数是随油层射开信息变化而变化的,而在每一个时间步,需计算的层之间是相互独立的,各层可以按层分配到各处理器上,具有较理想的并行性。

由于层之间相互独立,以层作为独立运算单位参与进程划分进行粗粒度^[2]并行计算。其

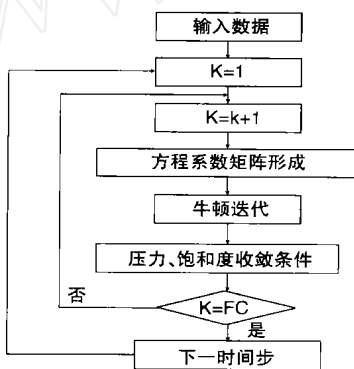


图 2 全隐式模拟模型求解流程

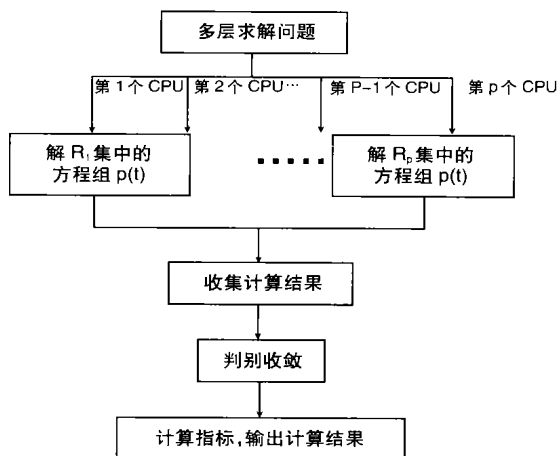


图 3 p 个处理机上并行计算

数据分配方案按层“卷帘”方法分配层数据到各处理机。设有 P 个处理机,在某一时间步内,有 K 层需计算,那么,在第 i 个处理机上分配的层为

$$i = \{ k | (k \bmod p) = i \}, i = 1, 2, 3, \dots, p$$

图 3 为某一时间步,多层二维二相模型问题求解过程在 p 个处理机上的并行过程。

在这种并行方案中,是以可计算层为并行计算粒度,为粗

粒度并行。其主要优点是处理机之间通讯少^[3],只有初始数据分配给结点机和从结点机接收结果数据的通讯时间。其不足是需计算的层数不一定相同,是一个可变量,且各层迭代计算的收敛速度不同,因此容易使处理机负载不平衡。

由于是块状大型稀疏五对角线性代数方程组,所以数据存储上采用压缩存储。

因为以太网速度低与传输数据量大的矛盾,因此,采用压缩通讯技术来减少通讯所占用的时间。

多层二维二相模型采用的全隐式方法可以对每一层压力、饱和度进行全隐式联立求解^[4],总体上讲是一个计算压力和计算饱和度同时进行的过程。对各层的压力、饱和度求解可采用优化出的 D4 排序不完全乔利斯基预处理正交极小化算法。

4 实际油藏模拟应用

4.1 地质模型简述

胜坨油田一区沙二 1~3 砂层组及胜坨二区沙二 1~2 砂层组均为大型构造油藏,含油面积分别为 19.8 平方千米和 20.9 平方千米。地质储量分别为 3780 万吨和 3971 万吨,地质研究认为胜坨油田一区沙二 1~3 砂层组纵向上分为 13 个小层,胜坨二区沙二 1~2 砂层组纵向上分为 15 小层。储层沉积类型为河流相沉积,储层均为中、高渗透砂岩,平均渗透率 5 达西。储层参数分布应用测井二次解释的数据,储层非均质性强。两油藏均于 60 年代投入开发,生产历史均达 30 多年,油藏都进入特高含水期开发,平均含水达 93% 左右,寻找油藏剩余油是这类油藏亟待解决的问题。定量研究油藏剩余油的分布状况非常需要进行多节点、大规模的油藏模拟研究,但是串行软件计算周期长,难以解决这种大型问题;并行计算研究剩余油研究必须开展的研究工作。

4.2 模拟并行化的实际应用

以胜坨一区沙二 1~3 砂层组及胜坨二区沙二 1~2 砂层组两个油藏为模拟计算对象,应用地质模型的研究成果形成的模型总节点数分别为 13.8 万及 72.8 万,油藏均为严重非均质,经并行模拟计算,两模型的并行效率的计算结果对比如表 3。

表 3 求解方程组并行效率对比表

油藏名	模型规模 (节点)	2CPU 共享	4CPU 分布共享 (非压缩通讯)	4CPU 分布共享 (压缩通讯)
胜坨一区	138450	88 %	54 %	61 %
胜坨二区	728161	92 %	56 %	64 %

对于胜坨油田二区沙二 1~2 砂层组的全油藏整体模型,其节点数为 72.8 万,全隐式模型串行软件用于方程求解的时间为 10.21 小时,整体运行时间 14.32 小时,采用 4CPU 分布式并行处理软件时,并行求解仅需 4.32 小时,整体运行只需 8.13 小时,节约时间近 6 小时,并行效果相当显著。

5 结论

本文针对多层二维二相模型的全隐式模型开展并行化,研究过程中借鉴隐式压力显式饱和度的研究思路,对迭代解

法及并行方法进行优化. 优化结果 D4 排序不完全乔利斯基预处理正交极小化法计算速度快、适于并行, 计算量及存储量都较小. 对全隐式形成的多层二维二相模型采用按层粗粒度并行的方法实现了并行化. 油藏实例计算表明并行化的多层二维二相全隐式模型具有较高的并行效率, 满足油田实际应用的需求, 但在负载平衡研究方面还需要深入研究.

参考文献:

- [1] Price H S, Coats K H. Direct methods in reservoir simulation [J]. Trans, AIME, 1974, 257: 295 - 298.
- [2] 陈国良. VLSI 计算理论与并行算法 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1991.
- [3] K Hemanth. Parallel reservoir computation [A]. Proceedings 13th Symposium on Reservoir Simulation [C]. San Antonio, TX, USA: SPE29104, 1995. 101 - 110.
- [4] T Kaarstd. A massively parallel reservoir simulator [A]. Proceedings 13th Symposium on Reservoir Simulation [C]. San Antonio, TX, USA: SPE29139, 1995. 467 - 478.

作者简介:



杨耀忠 男, 1966 年生于内蒙兴和, 1986 年毕业于成都地质学院石油系, 1992 年获油气田开发硕士学位, 现任胜利石油管理局地质科学研究院高级工程师、副总工程师, 主要从事油藏地质建模、油藏数值模拟及油藏工程研究工作.