

文章编号: 0253-2697(2000)02-0056-06

优化和并行一个油藏数值模拟 软件中的解法器

莫则尧¹ 刘兴平¹ 彭力田² 韩大匡²

(1. 北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088; 2. 石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要: 在当前共享存储对称多处理(SMP)并行机上,基于指导语句的并行程序设计模式,讨论了多功能油藏数值模拟软件中求解超过百万节点规模的解法器(MFS)的并行和优化技术。首先,结合当前微处理器的高性能特征,为了提高Cache命中率,改进了数据和循环结构,并组织了MFS的性能优化,在R5000上获得了20%的性能提高,并消除了并行化将可能引入的Cache一致性冲突;然后,基于循环合并、区域分解和大粒度流水线并行技术,实现了MFS的并行化;最后,在POWER CHALLENGE R8000的6台处理机和R10000的8台处理机上,对三维三相50万和100万节点规模问题,分别组织了数值实验,并取得了超过60%的并行效率。

主题词: 解法器;优化;并行化;数值模拟;软件

中图分类号: TE319 **文献标识码:** A

1 前言

油藏数值模拟软件中,解法器部分涉及求解油藏模拟方程离散化后得到的大型稀疏线性代数方程组,它们占据了超过80%的计算量,其性能好坏直接决定了油藏模拟的速度和质量。超过百万节点的并行三维多相油藏数值模拟,至少需要内存2.4GB,在目前条件下,单处理机的模拟时间是难以忍受的,并行是必由之路^[1]。

当前基于共享存储、由高性能微处理器构成的对称多处理机系统(SMP)能扩展到十几个或几十个CPU,提供每秒几十亿到百亿次的浮点运算速度,并提供基于指导语句的共享存储并行程序设计模式,方便了大型应用程序的并行化,为一般应用单位提供了一种理想的高性能并行计算平台。

本文主要讨论在SGI SMP POWER CHALLENGE系列并行机上,基于指导语句,优化和并行化一个求解超过百万节点规模的多功能油藏数值模拟软件中解法器(MFS)^[2]的过程中,所提出和获得的一些成功的方法和经验。首先,基于当前微处理器的高性能特征,讨论了解法器MFS的一些主要特征及其串行优化;然后,基于循环合并、区域分解和大粒度流水线并行技术,讨论了解法器MFS的并行化;最后,给出了对某三维三相油藏数值模拟50万和百万节点规模问题,所获得的并行计算性能。

2 微处理器的高性能特征

目前高性能微处理器的浮点峰值性能可达100-1000MFLOPS,它们主要依赖于^[3-6]:

(1)多级存储结构 为了缓减CPU中整数和浮点运算功能部件处理速度和内存访问速度之间的不匹配,提高芯片集成度,通常在CPU芯片中采用多级存储结构:运算部件从寄存器中获取指令和操作数,而寄存器中指令和数据分别取自一级指令Cache和一级数据Cache,一级Cache中内容取自CPU芯片外的二级Cache,

基金项目: 国家自然科学基金资助(69903001);国家重点基础研究专项经费资助。

作者简介: 莫则尧,男,1971年7月生。1997年毕业于国防科技大学计算机系,获博士学位。现任北京应用物理与计算数学研究所副研究员。
通讯处:北京8009信箱计算物理实验室。

而二级 Cache 中内容则通过总线或网络取自内存。处理机按某种协议以 Cache 线为单位,映射内存中数据到二级 Cache,以及映射二级 Cache 中数据到一级 Cache。由寄存器至内存,存储内容逐渐增加,而访问速度逐渐减少,价格也逐渐便宜。例如,R10K 微处理器,一级数据和指令 Cache 均为 32KB,Cache 线大小为 32B,二级 Cache 为 2MB,采用 2-way 集相关 Cache 映射策略,它们的访问速度之比为 15:10:1。

(2)多个功能部件 为了提高 CPU 的处理速度,一般将其计算功能区别开来,分别由不同的部件来完成,而且当前超标量和指令流水线技术可使这些功能部件并行完成同一项工作。例如,R10K 微处理器内部含 2 个地址计算、2 个整数计算、1 个浮点加、1 个浮点乘和 1 个浮点除等功能部件,它们都可以并行工作。如果应用软件运行中,浮点功能部件始终保持忙碌,则可达处理器的浮点峰值性能。

由此可见,为了使应用软件能在当前高性能微处理器上发挥较高性能,基于给定的数值算法,在了解优化编译器具体功能的条件下,必须仔细组织数据结构和程序设计模式,尽量保证较高的寄存器内数据重用率和一级 Cache 命中率,并实现多个功能部件之间和浮点运算指令之间的流水线,获得较高的指令级流水线并行度。

除了在单处理机获取高性能外,在共享存储环境下,基于指导命令组织并行计算时,还存在一个影响并行性能的关键因素,就是多处理机对共享变量的交叉引用导致的 Cache 一致性和内存访问冲突。因此,为了获取较高的并行计算性能,必须尽量结合物理问题,划分区域,让处理器分别处理不同的区域,减少交互访问。

数值实验采用的 4 种微处理器及其性能参数在表 1 列出,3 台共享存储 SMP 并行机分别为 SGI CHALLENGE L R4400(8 个 R4400 处理器,内存 512MB)、SGI POWER CHALLENGE XL R8000(6 个 R8000 处理器,内存 2GB)和 SGI POWER CHALLENGE XL R10000(8 个 R10000 处理器,内存 3GB),油藏数值模拟涉及的规模分别为 5 万、50 万和 100 万节点,分别需内存 150MB、1.6GB 和 2.4GB。

3 解法器 MFS 的优化

多功能三维油藏数值模拟软件解法器 MFS 涉及的数据结构为

$$\begin{pmatrix} W & H \\ G & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} wx \\ gx \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} wf \\ gf \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中,W 是井方程系数矩阵,为对角阵;G 和 H 分别是节点方程与井方程、井方程与节点方程的耦合系数矩阵,是不规则的稀疏矩阵;A 是节点方程系数矩阵,为七对角阵;wx 和 gx 分别是井方程、节点方程未知向量;gf 和 wf 分别是节点方程、井方程产生的约束向量。并且,每个节点含 3 个相变量,分别对应油、气和水,故系数矩阵的每个元素为 3×3 矩阵。

解法器 MFS 首先对输入节点进行红黑排序,并形成约化方程组;然后采用 ORTHOMIN 迭代算法和 ILU(0)预条件技术近似求解该约化方程组;最后将约化方程组近似解回代,得到整个方程组的近似解。本文只注重解法器的优化和并行,而不改变迭代算法和预条件技术,有关它们的讨论请参考文献[7]。

从高性能角度出发,解法器 MFS 具有优点:第一,模块性好,语句精简,几乎所有计算量均集中在几个矩阵-矩阵、矩阵-向量和向量-向量运算符程序中,而这些子程序均基于连续的加-乘指令 MADD,且绝大多数连续 MADD 指令间的操作数是独立的,易于实现多个功能部件之间和多条指令之间的流水线并行;第二,对每个节点涉及的 3×3 子矩阵运算,直接写出数组地址索引,有利于预先为浮点运算准备操作数,实现指令级并行;第三,约 60%以上计算量可向量化,适合在向量机上并行。

但是,该软件也存在以下不适合于当前微处理器高性能特征的缺点,主要有:

表 1 4 种 SGI 微处理器比较

Table 1 Comparison of four types of SGI microprocessors

微处理器	R4400	R5000	R8000	R10000
峰值性能(MFLOPS)	150	180	360	390
一级 Cache	32KB	32KB	64KB	32KB
映射策略	直接	直接	4-Way	2-Way
二级 Cache	1MB	1MB	2MB	1MB

(1) 数据结构不利于提高 Cache 命中率和并行化时降低 Cache 一致性冲突。例如, 系数矩阵和解向量采用如下的数据结构

DIMENSION CC (NDIM, NEQS) (2)

即在数组第一维放网格节点, 第二维放每个网格点的相变量。矩阵、向量运算时, 以第一维网格点为外层循环变量, 第二维网格点相变量为内层循环变量, 依次对每个网格点相变量进行处理, 但 FORTRAN 语言规定数组从低维至高维连续存放。从而, 内层循环连续访问的相变量在内存空间中不具有连续性。例如, 要求连续访问的 $CC(I, 1)$ 与 $CC(I, 2)$ 在内存空间地址相差 $NDIM$ 个字! 故串行 MFS 模块中矩阵、向量运算的数据访问不具有连续性, 可能降低 Cache 访问命中率, 从而降低解法器性能。并且, $NEQS$ 越大, 性能下降越剧烈。

此外, 一级 Cache 中数据访问是以 32B 或 64B Cache 线为单位进行的, 一旦某条 Cache 线中的某个数据在某个处理器中进行了修改, 则位于其它处理器中的该条 Cache 线将被丢弃。故共享存储并行计算通常要求尽量减少处理器对共享数据的交叉引用。具体到 MFS, 并行时为了加大粒度, 必须按第一维网格点来分配每个循环的计算。故该类数据结构必定加大共享变量的交叉引用概率, 加剧 Cache 一致性和内存访问冲突, 当处理器个数较多时, 将大幅度下降并行计算性能。

(2) 由于 MFS 追求模块化, 必定丧失一些合并循环、重复利用寄存器中数据来提高性能的机会。并且, 受算法的限制, 多数矩阵、向量循环计算中每条 MADD 指令的操作数只利用一次就丢弃, 而 R10000 在每个 cycle 只能进行一个浮点存/取操作, 故这些运算是访存受限的, 至多可发挥峰值性能的 50%!

总体而言, 解法器 MFS 的性能是较好的, 对 5 万节点, 在 R4400 和 R10000 上, 测试表明, 均能发挥单机浮点峰值性能的 15% 以上, 这对大型实际科学和工程应用程序是不多见的。继承 MFS 的优点, 对它组织了如下优化。

(1) 改变系数矩阵和向量的数据结构, 使之适合高性能特征。具体地, 第一维存放每个网格点的相变量, 第二维存放网格点, 即

DIMENSION CC (NEQS, NDIM) (3)

这样, 在矩阵、向量运算循环中, 数组第二维(网格点)成为外层循环变量, 第一维(相变量)成为内层循环变量, 保持了数据访问的连续性, 提高 Cache 命中率。同时, 并行计算数据分割时, 也能保证相邻数据分配到同一个处理器, 减少 Cache 一致性冲突。

但是, 该优化要求在 MFS 入口处对系数矩阵 CC 、 TT 、右端项 X , 在出口处对近似解 X 进行数据转换, 引入额外开销。我们通过在 SGI 微处理器 R4400、R5000、R8000 和 R10000 上, 对 5 万、50 万和 100 万节点规模的数值实验表明, 该转换所需计算时间相当于 1.25 次 ORTHOMIN 迭代。因此, 串行计算时, 只有当优化所得的好处能抵销该额外开销时, 优化才是成功的。

(2) 对某些循环进行了优化, 使之更适合指令级并行。表 2 列出了 5 万节点规模时, 解法器 MFS 优化前、后, 在 R4400、R5000、R8000 和 R10000 上分别计算 30d 所需的 CPU 时间(单位为 s)。可以看出, 在 R4400 和 R5000 上, 性能提高是明显的, 分别达到 15% 和 20%, 因为它们均采用直接 Cache 映射策略, Cache 容量小, 原数据结构导致的 Cache 命中

率下降程度大; 而对 R8000 和 R10000, 则性能提高幅度不大, 因为它们分别采用 4-Way 和 2-Way 集相关 Cache 映射策略, Cache 容量大, 串行优化的好处只能用于抵销 MFS 入口和出口处数据转换所引入的额外开销。尽管如此, 数据结构的优化还是必须的, 因为它是缓减了 Cache 一致性和内存访问冲突, 获取并行计算性能的基础。因为, 在 SGI CHALLENGE R4400 上, 对 5 万节点的并行数值实验表明, 当处理器个数为 4 时, 即使采用下部分介绍的并行化技术, 如果不改变数据结构, 所得加速比将不超过 1.5, 效果是很差的。

表 2 解法器 MFS 优化前、后性能比较

Table 2 Performance comparison of solver MFS before and after optimizations

微处理器	R4400	R5000	R8000	R10000
优化前时间(s)	500	487	153	155
优化后时间(s)	419	398	145	158
提高百分比	16%	20%	0%	0%

4 解法器 MFS 的并行化

在共享存储并行机上,基于指导语句,经过串行优化后,解法器 MFS 的并行化具有 2 个难点:第一,如何在破坏原有程序结构的基础上合并循环,减少同步开销,减少共享数据的交叉引用,提高并行计算粒度;第二,ILU (0)预条件的并行,它涉及了近 50%的计算量,且内在并行度较低。为此,分别采用了区域分裂技术和流水线技术,分阶段地组织了解法器 MFS 的并行化,取得了较好的并行计算性能。

以下注重介绍采用的并行化思想和技术途径,至于具体的并行程序设计指导命令和通常的操作,在许多有关指导语句并行程序设计文献中有详细的描述,本文不再讨论。

本部分数值实验列出的加速比均指优化后解法器 MFS 的串行计算与并行计算时间的比值,并行效率为加速比与处理器个数的比值。

4.1 循环合并与区域分裂技术

基于指导命令的共享存储并行程序设计的出发点是将循环体分段,分别交给各个进程在不同处理器中并行完成,而进程的调度和同步是必须花费 CPU 时间的。例如,在 POWER CHALLENGE 系列并行机上,一个循环体的并行需要花费几个或几十个毫秒^[4]。因此,要求循环体具有一定的计算粒度,粒度越大,则并行越有利。同时,还要求连续的并行循环体所访问的数据尽量位于同一个处理器,以减少处理器间数据的交叉访问。这必须以区域分裂思想来指导循环体并行。具体地,分如下几个阶段来逐步提高并行计算性能:

第一阶段:直接并行每个子程序内部循环体。这个阶段比较简单,但效果差。对 5 万节点,在 CHALLENGE L R4400 上,加速比 4 个处理器为 2.0,6 个处理器为 2.4。性能损失主要来源于:(1)ILU (0)预处理固有的串行计算;(2)有些循环体计算量太小,并行的循环体次数太多,并行开销大;(3)连续循环体数据分配时,处理器间交叉引用严重。

第二阶段:基于区域分裂的思想,在矩阵、向量运算符程序一级合并循环体,即不改变串行程序的模块化结构,视进程个数,划分数据区域,将连续的几个矩阵、向量运算符程序合并在一起,形成一个并行循环体。这样,可以扩大并行粒度,减少并行调度和同步的开销,也减少处理器间的数据交叉访问。同样,对 5 万节点,在 CHALLENGE L R4400 上,加速比 4 个处理器上升为 2.6,6 个处理器上升为 3.0。此时,性能损失主要来源于:(1)ILU (0)预处理固有的串行计算;(2)井方程和内积计算阻碍了并行循环体进一步扩大。

第三阶段:用加锁(lock)和解锁(unlock)机制处理共享标量,减少井方程和内积计算循环体的同步。同样,对 5 万节点,在 CHALLENGE L R4400 上,加速比 4 个处理器上升为 2.8,6 个处理器上升为 3.3;对 50 万节点,在 POWER CHALLENGE R8000 上测试,加速比 4 个处理器为 2.7,6 个处理器为 3.2。此时,性能损失瓶颈为 ILU (0)预处理固有的串行计算。

4.2 流水线并行技术

ILU (0)预理由两个子过程完成:RSLUN 子过程负责 ILU 预条件矩阵的形成,RSFBN 子过程负责 ILU 预处理稀疏线性代数方程组系统的求解。RSLUN 所占计算量相当于 2-3 个 ORTHOMIN 迭代,且大部分可以通过循环体并行化,故没有对它的固有串行部分组织并行化;而每次 ORTHOMIN 迭代,RSFBN 约占 50%的计算时间,因此对它进行并行化的成功与否直接决定了并行解法器的性能。

假设拥有 P 个高性能微处理器 PE_1, \dots, PE_P ,并要求在最短的时间内完成 N 个任务 W_1, \dots, W_N 。其中,每个任务可分解为 P 个子任务,用 $W_{I,J} (I=1, \dots, P; J=1, \dots, N)$ 表示,而这些子任务具有如下串行依赖关系:

$$W_{I,J} = F(W_{I,J}, W_{I,J-1}, W_{I-1,J}) \quad I = 1, \dots, P; J = 1, \dots, N \quad (4)$$

$F()$ 为某函数,且设

$$W_{I,0} = W_{0,J} = 0 \quad (I=1, \dots, P; J=1, \dots, N) \quad (5)$$

如果被式(4)的串行依赖关系迷惑,则所有子任务只能按顺序 $W_{1,1}, W_{2,1}, \dots, W_{p,1}, W_{1,2}, \dots, W_{p,N-1}, W_{1,N}, \dots, W_{p,N}$ 串行完成;但利用式(5)的边界初始 0 结构,其实可以组织并行计算。具体地,规定 PE_i 负责所有子任务 $W_{i,j} (j=1, \dots, N)$ 的计算,并按图 1 所示算法 1 进行。显然,算法 1 非常类似向量机上的流水线向量处理技术,故称之为大粒度并行流水线技术。

估计流水线并行技术带来的性能,假设所有子任务花费的 CPU 时间近似相等,为一个时间步,则显然串行计算需 NP 个时间步;又设采用流水线并行技术后,每个子任务增加的通信开销为 C 个时间步,则并行计算只需 $(N+P-1) \times (1+C)$ 个时间步。故所得加速比为:

$$S_p = \frac{NP}{(N+P-1) \times (1+C)} = \frac{P}{\left(1 + \frac{P-1}{N}\right) \times (1+C)}$$

其实,通信开销 C 的大小是相对的,它与每个任务的计算粒度成反比,即计算粒度越大, C 越小。因此,若选择足够多的子任务,即 $N \gg P$,且每个子任务均具有较大计算粒度,即 $C \ll 1$,则获取的并行计算性能是显著的。

在循环合并、区域分裂技术基础上,基于大粒度流水线并行技术,通过充分挖掘 ILU (0) 预处理稀疏线性系统的 0 结构,进一步组织了子过程 RSFBN 的并行计算,获得了超过 16% 的性能提高。

5 数值实验与性能测试

通过前两个部分的性能优化和并行化,获得了性能较高的并行解法器,称之为 PMFS。由于 PMFS 没有改变 MFS 的数值算法,故排除舍入误差的影响,它必定将与 MFS 取得一致的数值模拟结果。具体地,对某三维三相模型,在 POWER CHALLENGE R10000 上:5 万节点规模时,使用 8 台处理机,全过程并行数值模拟取得了与串行模拟一致的正确物理结果;百万节点规模时,10 个周期的并行和串行数值模拟所取得的物理结果正确性误差小于 1%。至于在全过程数值模拟中,PMFS 相对于 MFS 所取得的加速比,限于并行机无法长时间独占的现实条件,无法准确获得。但是,它们类似于下面将要给出的单个时间步长情形。

对三维三相油藏数值模拟 50 万和百万节点规模,分别在 POWER CHALLENGE R8000 和 R10000 共享存储并行机上组织了并行性能测试。表 3、表 4 分别列出了对 50 万和百万节点规模,10d 和 1d 的模拟,解法器 PMFS 所需的并行计算时间(单位为 s),以及与优化前原始串行解法器 MFS 比较所得的加速比和并行效率(加速比与处理机个数的比值)。

同时,数值实验表明,并行解法器 PMFS 相对于原始串行解法器 MFS,所需的内存容量没有任何增加,也就是说,PMFS 可在 MFS 能运行的任何共享存储环境中运行,具有很好的移植性。

表 3 50 万节点规模时,并行解法器 PMFS 所得性能

Table 3 Parallel performance for solver PMFS for half million nodes

并行机	MFS	PMFS					
		$P=1$	$P=2$	$P=4$	$P=6$	$P=8$	
R8000	时间(s)	1318	1279	718	410	332	—
	加速比	1.00	1.03	1.84	3.21	3.97	—
	并行效率	1.00	1.03	0.92	0.80	0.66	—
R10000	时间(s)	1259	1326	706	401	314	283
	加速比	1.00	0.95	1.78	3.14	4.01	4.45
	并行效率	1.00	0.95	0.89	0.78	0.67	0.56

PARALLEL ALGORITHM 1:

```
(1)FOR I=1, P DO IN PARALLEL
(2)FOR J=1, N DO
(3)IF (I=1)THEN
(4)WI,J=0;
(5)GOTO (8);
(6)ENDIF
(7)RECEIVE WI-1,J FROM PEI-1;
(8)IF (J=1) THEN
(9)WI,J=0
(10)GOTO (12);
(11)ENDIF
(12)COMPUTE WI,J=F(WI,J,WI-1,J,WI,J-1)
(13)ENDFOR
(14)ENDFOR IN PARALLEL
```

图 1 流水线并行技术示意图

Fig. 1 Sketch of parallel pipeline technique

表 4 100 万节点规模时,并行解法器 PMFS 所得性能
Table 4 Parallel performance for solver PMFS for one million nodes

并行机	MFS	PMFS					
		$P=1$	$P=2$	$P=4$	$P=6$	$P=8$	
R10000	时间(s)	1884	1891	1020	570	435	398
	加速比	1.00	1.00	1.85	3.31	4.33	4.73
	并行效率	1.00	1.00	0.92	0.83	0.72	0.59

6 结 论

本文在当前共享存储对称多处理(SMP)并行机上,基于指导语句并行程序设计模式,对油藏模拟数值软件中解法器 MFS 的串行优化和并行化表明:

1. 串行优化和并行化是完全成功的,取得了满意的性能结果;
2. 结合当前微处理器和共享存储并行机的高性能特征,合理组织数据结构和程序设计模式,对提高数值应用软件的模拟能力是至关重要的;
3. 对一些数值模拟性能好、但并行度又不高的数值算法,充分挖掘其内在并行度,在处理器个数不多的情形下,结合某一类并行计算平台,是可以取得较高性能的;
4. 区域分裂、大粒度流水线并行技术是一种在不改变数值算法条件下,提高并行计算性能的有效方法。

参 考 文 献

- [1] Watts J W. Reservoir simulation: past, present and future [C]. SPE 38441, 1997: 1~24.
- [2] 彭力田等. 多功能油藏数值模拟解法器 MFS 程序结构分析文档[R]. 技术报告,北京石油勘探开发科学研究院, 1997.
- [3] Field M R. Optimizing a parallel conjugate gradient solver [J]. SIAM J. Sci. Comput., 1998, 19(1): 27~37.
- [4] 莫则尧. 大型科学与工程应用程序并行化关键技术研究[D]. 博士后出站报告,北京应用物理与计算数学研究所, 1999: 4~14.
- [5] Perry J. Powerlearn-Achieving high performance and parallelism with SGI Challenge Systems [R]. Technical Report, SGI, March, 1997: 1~34.
- [6] Stalling W. Computer organization and architecture design for performance [M]. Prentice Hall International, Inc., 1997: 97~154.
- [7] Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems [M]. PWS publishing company, 1997: 93~198.

(收稿日期 1999-03-23 修订日期 1999-09-24 编辑 杨 苗)

版权所有

lem of world level. The research of this paper is a little progress solving the difficult problem.

Key words: waterflooded reservoir; unswept remaining oil; rich area

A STUDY ON DEVELOPMENT CHARACTERISTICS FOR DEFORMED RESERVOIR ACTA 2000,21(2):51~55.

SU Yu-liang (*Petroleum University, Huadong*)

Since the deep-seated reservoir bears high pressure and high temperature, a partial or complete irreversible deformation is generated in the development process of deep-seated reservoir. The deformation apparently influences the reservoir's dynamic characteristic. Using analytical and numerical methods, flowing pressure distribution on variable boundary condition is derived from dealing with one dimension nonlinear-elastic flow mathematical model in deformed media, and compared with the results from general linear-elastic unsteady flow in porous media, and emphatically analysis flowing pressure distribution caused by the variation of permeability. The result shows that, as deformed media's elasticity increase, the formation pressure increase slowly at constant water injection rate and water injection rate increase under constant flowing bottom hole pressure. The formation pressure decrease rapidly at constant oil production and oil production decrease under constant flowing bottom hole pressure. The initial formation pressure should be retained in deformed media reservoir development in order to obtain a higher recovery.

Key words: deformed media; mathematical model; nonlinear analytical solution; numerical solution; development characteristic

OPTIMIZING AND PARALLELING A SPARSE LINEAR EQUATIONS SOLVER PACKAGE FOR RESERVOIR SIMULATING SOFTWARE ACTA 2000,21(2):56~61.

MO Ze-yao (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing*)

Based on the contemporary shared memory Symmetric Multi Processing parallel machines (SMP), and the directive parallel programming platform, this paper discusses optimization and parallelization of a sparse linear equations solver package MFS for reservoir simulation software with more than one million nodes. Firstly, with the high performance characteristics of contemporary microprocessors, we organize the optimization of MFS by adjusting both data and cycle structures for the Cache hit ratio, and improve the performance by 20% for R5000, and moreover, eliminate the potential Cache coherence collision during parallelization. Secondly, we parallelize the solver package MFS with the effective techniques such as cycle combination, domain decomposition and large granularity parallel pipeline. Finally, under POWER CHALLENGE R8000 (6 CPUs) and R10000 (8 CPUs), we organize the numerical experiments for some three-dimensional three-phase problem with half and one million nodes respectively, and the parallel efficiencies are all higher than 60%.

Key words: solver package; optimization; parallelization; numerical simulation; software

LITHOLOGIC OIL RESERVOIR RESEARCH BY MEANS OF RM INVERSION METHOD ACTA 2000,21(2):62~65.

ZHAO Li-min et al. (*Huabei Petroleum Administration*)

In modern oil and gas exploration, it is an effective approach to make use of seismic inversion's data for prediction of reservoir and oil reservoir. That can be enhanced the seismic data's utilization efficiency and improved success ratio in oil and gas exploration. RM inversion has illustrated two characteristics. That is the resolution of the log data's longitudinal direction and seismic data horizon direction is high. The condition is constrained by log data and controlled by seismic interpretation's horizon. At first, the wave impedance's inversion section comes from the seismic trace of well to seismic data base, leading to calculation of wave impedance inversion's data base and prediction of reservoir sandstone body and oil reservoir's area.

In this article, an application example comes from Nugeda area in Erlian Basin, describing stratigraphic and lithological oil reservoir by use of RM inversion.

Key words: petroleum exploration; wave impedance inversion; Nugeda structure; lithologic oil reservoir