

# 二维水动力模型的并行计算研究

左一鸣<sup>1</sup>, 崔广柏<sup>2</sup>

(1. 水利部太湖流域管理局水利发展研究中心, 上海 200434; 2. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 建立了二维水动力并行模型; 针对 MPI 不能实现进程迁移现状, 自主开发了并行通讯平台, 平台机群负载均衡采用基于蚁群算法的人工智能算法, 并根据模型需要制定了相关通讯协议; 对长江内江段进行数值模拟, 结果表明当网格数一定时, 存在一最优客户端数, 当客户端数小于最优客户端数时, 并行算法所需时间小于串行算法时间, 并随着客户端数增加, 所需时间也逐渐减少; 反之, 所需时间则逐渐增大。

**关键词:** 二维水动力模型; 并行计算; 浅水方程; 有限体积法; 蚁群算法

**中图分类号:** TV133.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2008)06-0846-05

对于河道二维水动力数值模拟问题, 模型网格经常达到几万甚至几百万。但是采用单个计算机需要的时间长, 内存容量的限制, 一些大的计算模型需要几天甚至几周时间, 这样就给模型的率定带来了巨大的困难, 从而使得分析人员不得不减小计算规模, 将网格划分更粗, 但这样导致计算结果可靠性降低。如何在现有软硬件基础之上, 提高计算速度缩短计算时间具有重要现实意义。近年, 有不少水力学研究者在并行计算应用方面开展了大量研究工作。如 G. Mahinthakumar<sup>[1]</sup>等使用有限元方法对包含非线性生物调节反应等多种生物物理化学反应的地下水流动及输移系统进行了并行计算。S. E. Howington 等<sup>[2]</sup>还开发了地下水与地表水相互作用联合模型。江春波等<sup>[3]</sup>的二维浅水流动的有限元并行数值模拟, 崔占峰等<sup>[4]</sup>分蓄洪区洪水演进的并行计算方法研究。但其大都采用有限元方法, 对有限体积并行方法研究目前尚未见到, 且基于 MPI(Message Passing Interface) 或 PVM(Parallel Virtual Machine) 等商业并行平台, 该平台并未实现进程迁移的功能。当并行计算时, 网络中某客户端由于突发情况(死机, 非正常情况关机), 异常退出计算将导致脏数据的产生; 针对以上情况, 本文自主开发一个并行通信平台, 采用 CS(Client-Server) 方式, 服务器端对网络环境进行监控和控制实现进程迁移, 当网络计算发生意外时, 实时将未完成计算的网格转移到其它客户端继续计算, 保证数据的正确性。

本文采用 Delphi 语言进行编程、SQL Server 2000 数据库、基于 TCP/IP 自定义通讯协议, 在 Windows 2000/XP 微机集群上实现并行水动力模型数值模拟。

## 1 平面二维水力基本方程及数值格式

守恒型二维浅水方程应用散度定理在任意单元  $\Omega$  上进行积分离散, 求得 FVM 的基本方程:

$$A \frac{dq}{dt} = - \sum_{j=1}^m T(\bar{n}^j)^{-1} f(\bar{q}) L^j + b(q) \quad (1)$$

式中  $A$  为单元  $\Omega$  的面积;  $m$  为单元边数;  $L^j$  为单元中第  $j$  边的长度,  $b(q)$  为源汇项;  $T(\bar{n}^j)^{-1}$  分别为坐标旋转变换矩阵的逆矩阵, 式(1)采用显格式时间离散, 求解的核心是  $f(q)$  的计算, 其可通过解算局部一维黎曼初值问题的外法向数值通量得到。本文采用具有高性能的 Osher 格式求解黎曼问题<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2007-06-11

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50239030)

作者简介: 左一鸣 (1979 - ), 男, 江西南昌人, 博士, 主要从事水资源及地理信息系统的应用研究。

E-mail: zymxyc2071@tom.com

## 2 并行算法实现

### 2.1 蚁群算法简介

蚁群算法是由 Dorigo<sup>[6,7]</sup>提出的解决组合优化问题的一种多 agent 方法。其模拟自然界中蚂蚁觅食路径的搜索过程。蚂蚁在寻找食物时,能在其走过的路径上释放信息素(pheromone),蚂蚁在觅食过程中能够感知信息素的存在和强度,并倾向于朝信息素强度高的方向移动。当大量蚂蚁不断地从蚁巢通往食物时,相同时间内相对较短路径上通过的蚂蚁较多,该路径上累积的信息素强度也较大,后来蚂蚁选择该路径的概率也相对较大,最终整个蚁群会找到最优路径。

在分布式并行计算中,分配和调度问题是并行程序区别于串行程序的一个主要特征,它可研究如何把多个程序或一个程序的可并行部分在依据资源的当时处理能力以及资源的负载变化情况下,随时调整相关数据,使得任务的总体执行时间最小并尽量达到任务负载均衡的分布到各处理机。初始时将蚂蚁散布在各资源上,所有资源需要提供处理机能力和通信能力等参数,可以据此建立资源的初始的信息素。每只蚂蚁独立工作,求得一组任务调度方案,并选择最优调度方案进行系统调度。本文有关蚁群调度算法在模型中的应用另文详述。

### 2.2 并行求解思路

在计算每个单元的水位、流量时只需用到与之三条边相邻的单元的水位、流量及高程等信息。如果能将相邻单元的以上信息传给该单元则每个单元就能独立进行计算,从而达到并行的效果。基于以上思路,采用 SPMD(single program multiple data)并行编程模型,即每个客户端运行相同的水量数值模型模拟不同的计算片区,服务器端负责对计算片区进行划分,并将划分结果发送给相应的客户端并将每个片区边界单元的信息传递给相邻的片区,使之每个片区都能单独进行计算,从而达到并行的效果。

### 2.3 并行求解流程

本模型分为服务器端和客户端两部分。

(1) 服务器端首先收集参与并行计算的客户端计算机,向各客户端发送一定数量的指令收集其负载。然后根据各客户端当前负载将计算区域的网格按蚁群算法负载均衡策略进行分配。

(2) 沿河道横向画  $N - 1$  条直线将三角网划分  $N$  部分( $N$  为客户端数),使得每部分的单元数近似等于按权重计算的单元数。

(3) 将每部分的单元号、左右边界相邻单元号下发给相应的客户端。

(4) 在每个计算时段初请求左右边界相邻单元号属性信息。

(5) 每个客户端进行该部分数值计算。

(6) 重复步骤 4、5 直到所有计算时段计算完毕。

当计算尚未完毕时,若此时有客户端退出,分配给其的单元尚没有计算,则导致其它单元也无法获得其信息,从而不能计算下去。模型此时将由服务器向连接的各客户端发送本时段重新计算指令,客户端收到后立即停止当前计算,并等待重新接收计算网格信息。

### 2.4 进程迁移

进程迁移是指将一个正在运行的作业进程从系统的一个结点迁移到另一个结点,“迁移后的进程能从原来进程的断点处继续往下执行”,其行为和结果与没有发生迁移一样。根据这一特性集群系统就能够把重负载节点的进程迁移到轻负载节点上执行,动态地改变系统的负载分布,高效地完成大吞吐量的计算。因此“进程迁移”成为提高集群系统整体性能和增强系统容错能力的关键技术之一。

当前主流并行平台 MPI, PVM 尚未实现进程迁移功能,并行计算时,当网络中某客户端由于死机、非正常情况关机等突发状况,异常退出计算,将导致脏数据的产生。为防止产生脏数据,本模型实现了进程迁移,实时将未完成计算的网格转移到其它客户端继续计算,保证了数据的正确性。

当进行进程迁移时,为使计算机之间能够正常通信,交换计算数据,特针对该模型制定了以下通讯协议。

表1~表3为二维水量水质并行模型的主要通讯协议。

表1 服务器下发片区三角形索引

Table 1 Server send region s triangle indexes protocol

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
			消息头	
23	命令 ID	1	整型	01
24	三角形索引列表		字符串	客户端分别接受该片区所有三角形索引、左边界三角形索引、右边界三角形索引

表2 进程迁移指令

Table 2 Process migration protocol

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	Int	9

表3 时段计算完毕指令

Table 3 Period of time compute complete protocol

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	Int	11
24	计算时间	17	String	

## 2.5 并行算法性能量度

(1) 并行加速比 加速比是一个评价在并行系统上求解一个问题能获得多大利益的指标。设  $T_s$  为用串行计算机求解某个计算问题所需的时间,  $T_p$  为用  $P$  个处理器求解该问题所需时间。则并行加速比可以简单定义为

$$S_p = T_s / T_p$$

(2) 并行效率 并行效率用来度量并行系统中处理器能力发挥程度。并行算法的效率定义为加速比与处理器个数的比率:

$$E_p = S_p / P$$

显然,  $0 < E_p < 1$  对  $P$  个处理器来说, 最理想的情况是, 加速比为  $P$ , 并行效率为 100%。

## 3 实例计算分析

### 3.1 区域概况

长江内江段如图1所示, 距长江河口约 372 km, 距上游感潮界点大通水文站约 348 km, 属长江下游潮流区, 全年以雨洪径流为主, 同时受海洋潮汐影响, 汛期影响小, 枯期影响大。在一个水文年中, 枯季潮差较大, 汛期潮差较小。受上游径流控制, 年内水位变幅较大, 汛枯期分明, 5~10月为汛期, 11月至翌年4月为枯季。



图1 研究区域图

Fig. 1 Research region photo

### 3.2 模型率定与验证

模型按照确定的两个口门(引航道上断面、焦南闸断面)边界条件进行控制, 模拟洪季大潮, 观测全潮潮位过程与实测资料进行对比, 并通过调整边界使模型中的潮位过程与原型相接近。

本次模拟采用4月份观测的水位数据, 由于只有28h的水位资料, 故将前14h水位资料用来率定, 后14h作为验证。糙率系数根据地形取为0.02~0.08, 其中深泓区为0.025, 浅滩区由于有水生植物的滞流作用, 糙率取为0.08; 紊动粘性系数取为 $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ , 风拖曳系数取为 $C_D = 1.0 \times 10^{-3}$ 。图2, 图3为监测断面实测水位与计算水位比较图, 如图所示能较好地拟合实际的水位过程。图4为计算区域涨急流场图, 如图所示位于中泓的主流区流速较大, 浅滩区由于植物的阻流作用, 流速较小。

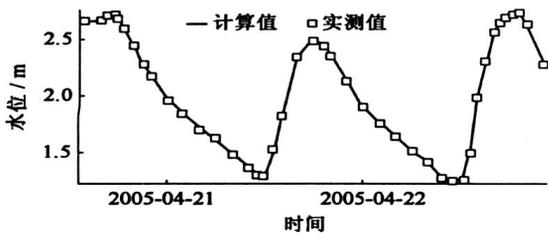


图2 引航道上断面水位过程线

Fig. 2 Yinhangdao up-section water level calibration and validation

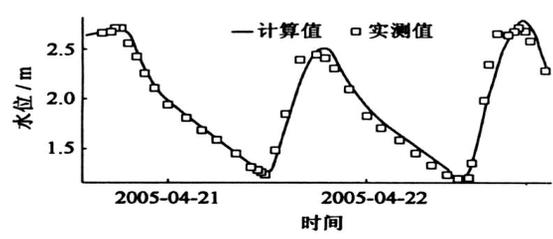


图3 引航道下断面水位过程线

Fig. 3 Yinhangdao downr section water level calibration and validation

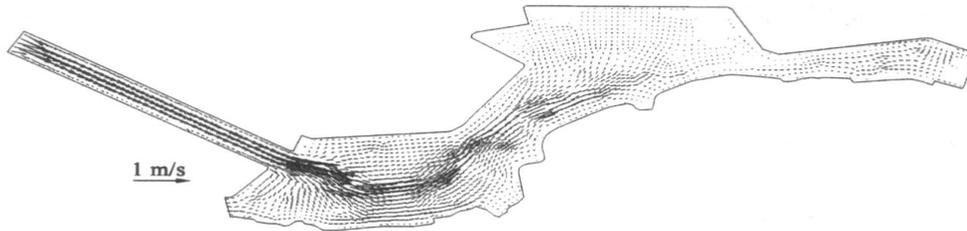


图4 计算区域涨急流场图

Fig. 4 Flow field of flood tide

### 3.3 并行效果分析

模型单元数目达到了8787个,为了进行并行计算,系统采用蚂蚁算法自动对计算区域(图5)进行划分,划分的子区域数为2~4。图6为根据蚁群算法将计算区域划分为4个子区域的划分图。计算时间段为2005年4月21日7:00:00至2005年4月22日11:00:00,时间步长为1s。表4是1~4个子区域时,在不同台数的计算机上进行计算所消耗的时间。并在此基础上计算出加速比和并行效率。

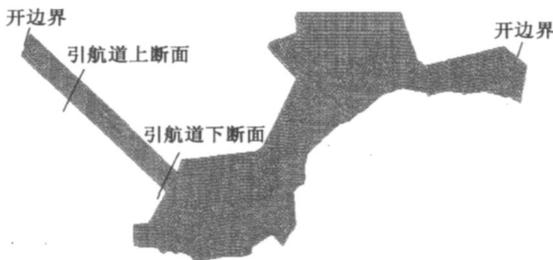


图5 计算区域网格模型

Fig. 5 Region grid model chart

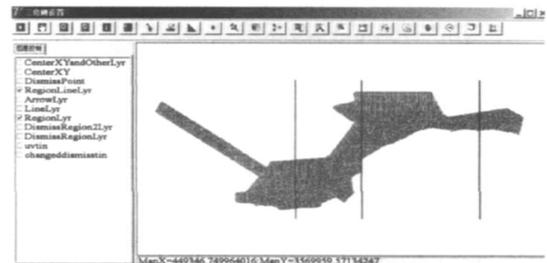


图6 划分4个区域的网格部分

Fig. 6 Grid chart for divided four part region

表4 计算耗时表

Table 4 Machine time-consuming value

计算机台数	计算所需时间/s	加速比	并行效率/%
1	9962		
2	5778	1.72	86
3	3686	2.70	90
4	6343	1.57	39.3

模型所花费的时间由模型计算所需的时间和通信开销的时间组成。当每增加一台计算机分担的单元数计算所节省的时间大于通信开销的时间,则能提高计算的速度;反之,则会延缓计算的速度。如上所述,对于单元数目8787的有限体积模型,当计算机台数由1增加到3,随着计算机台数增加,计算时间成比例减少。一台 Celon2.8GHz 计算机求解所需时间为 2 h46 min2 s,而3台相同配置计算机

所需时间仅为 56 min26 s,相应加速比为 2.94,并行效率达到了 73.5%。但当计算机台数增加为4时,计算时间反而增大了,说明此时增加的一台计算机分担的单元数计算所节省的时间小于通信开销的时间,因此,在

8787个单元数及当时各客户端负载情况下的有限体积模型计算时, 3台计算机并行计算能取得更好的效果。

## 4 结 论

近些年来, 随着计算机性能价格比不断提高, 构建简单的集群微机系统对于普通用户已成为可能, 由此为快速进行模型计算及参数率定提供了可能。本文采用有限体积显式求解浅水方程, 将求解区域分为若干部分, 每个时间段在各客户端分别求解。在求解单元通量时需要用到相邻单元的属性信息, 由此制定了针对二维水量水质模型的通讯协议, 根据机群负载平衡的调度方案, 将网格按权重分配到各客户端进行单元通量求解。为解决当网络中某客户端由于突发情况(死机, 非正常情况关机), 异常退出计算导致脏数据的产生, 本模型实现了进程迁移, 实时将未完成计算的网格转移到其它客户端继续计算, 保证了数据的正确性。最后将模型应用于内江长江段水流数值模拟, 发现当网格数一定时, 存在一最优客户端数。当实际客户端数大于最优客户端数时, 增加客户端分担的单元数计算所节省的时间小于通信开销的时间, 导致总的计算时间增加。

### 参考文献:

- [1] MAHINTINTHAKUMAR G, SAIED F. Implementation and performance analysis of a parallel multicomponent groundwater transport code [CD-ROM]. Proceedings of 1999 SIAM parallel processing meeting.
- [2] HOWINGTON S E, BERGER R C, HALLBERG J P, *et al.* A model to simulate the interaction between groundwater and surface water [J/OL]. <http://www.hpcmo.hpc.mil/Htdocs/UGC/UGC99/papers/eqml-2/,1999,8>.
- [3] 江春波, 安晓谥, 张庆海. 二维浅水流动的有限元并行数值模拟[J]. 水利学报, 2002(5):65-69. (JIANG Chun-bo, AN Xiao-mi, ZHANG Qing-hai. 2-D shallow water flow simulation using parallel arithmetic for FEM[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(5):65-69. (in Chinese))
- [4] 崔占峰, 张小峰. 分蓄洪区洪水演进的并行计算方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 5(10):24-26. (CUI Zhan-feng, ZHANG Xiao-feng. Research on parallel algorithm of flood routing in flood diversion-detention area[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 5(10):24-26. (in Chinese))
- [5] 谭维炎, 胡四一. 浅水流动计算中一阶有限体积法 Osher 格式的实现[J]. 水科学进展, 1991, 2(3):154-161. (TAN Wei-yan, HU Si-yi. Implementation of first-order finite-volume osher scheme in shallow-water flow computation[J]. Advances in Water Sciences, 1991, 2(3):154-161. (in Chinese))
- [6] DORIGOM, MANIEZZO V, COLORNIA. Ant system: Optimization by a colony of cooperating of agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part B: Cybernetics 1996, 26(1):29-41.
- [7] LIANG Y C, SMITH A E. An ant system approach to redundancy allocation[A]. In proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation[C]. Washington D C: IEEE, 1999. 1478-1484.

## Parallel computation for 2D flow model<sup>\*</sup>

ZUO Yi-ming<sup>1</sup>, CUI Guang-bai<sup>2</sup>

(1. Water Resource Development Research Center of Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China;

2. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This article develops a parallel depth-averaged 2D flow model. Since the message passing interface has not implemented the process transference function, the article researches message parallel platform for the model. The platform adopts ant algorithm to schedule tasks and constitutes message protocol to pass message. After its applying it to changjiang river of neijiang, the results indicate that if machines count is less than the oriental count, the consumed time increases along with the adding machine count and vice versa.

**Key words:** 2D flow model; parallel computing; shallow water equation; finite volume method; ant algorithm

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50239030).