

二维含动边界流场的并行计算

张 军¹, 谭俊杰², 任登凤²

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要 将并行计算方法应用于含运动边界流场的数值模拟, 采用弹簧方法生成非结构运动网格, 并行程序结构采用主从模式, 主进程只负责数据的发送和接收, 每个从进程的计算任务对应一个子区域. 通过守恒型 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 方程的求解, 对 NACA0012 翼型振动问题进行了数值模拟, 并对不同分区数目情况下的计算时间、并行计算加速比和并行计算效率进行了比较. 算例结果表明, 随着分区数的增加, 进行计算 CPU 的效率先增加后下降, 而并行计算的加速比不断增加.

关键词 流场; 动边界; 非结构网格; 运动网格; 并行计算; 数值模拟

中图分类号 O35 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2007)04-0460-04

在工程问题中, 存在很多含运动边界的流场, 如流体结构的耦合问题、自由液面流动问题. 处理这些问题的一种常用方法就是采用运动网格方法^[1], 对含动边界的流场进行数值模拟. 大型科学计算要解决的问题非常复杂, 采用并行计算方法可以很好地解决科学计算需求和现有单机计算性能不能达到要求的矛盾^[2].

国外^①^[3]对含动边界流场的并行数值模拟方法进行了研究, 并将该方法应用于很多复杂流场的数值模拟. 国内^[4-6]对含动边界流场的数值模拟问题进行了研究, 但目前主要侧重于方法研究, 而对数值模拟方法在复杂工程中的应用研究还不多. 国内^[7-8]对并行计算方法也进行了研究, 如文献[7]对基于非结构混合网格的三维高超音速流场进行了并行计算数值模拟, 文献[8]对三维流体界面不稳定性并行计算方法进行了研究. 但是, 国内对并行计算的研究主要侧重于以 Euler 方法为基础的数值模拟, 也就是说在对流场进行数值模拟时网格是静止不动的, 而对基于非结构动网格的并行计算方法的研究还不够充分.

本文采用基于格心的有限体积方法求解守恒型的 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 方程, 通过 Jacobi 迭代方法求解节点位移线性方程组, 并得到了下一个时刻每个节点的位置. 控制面通量的计算采用 HLLC 方法, 空间离散采用 MUSCL 方法, 时间离散采用四阶 Runge-Kutta 方法. 采用 C++ 进行编程实现, 并行通信语言采用 MPI 标准通信库函数. 本文对不同分区数目情况下的 NACA0012 翼型振动问题进行了数值模拟, 并取得了较好的模拟结果.

1 弹簧近似方法

弹簧近似方法 (spring analogy method, 简称为 SAM) 主要有 2 种, 即节点弹簧方法和线段弹簧方法, 本文采用的是线段弹簧方法. 在线段弹簧方法中, 节点的位移通过迭代方程 (1) 来计算.

$$\delta_i^{n+1} = \frac{\sum_{j=1}^{\eta_i} k_{ij} \delta_i^n}{\sum_{j=1}^{\eta_i} k_{ij}} \tag{1}$$

$$k_{ij} = \alpha (x_i - x_j)^2 + (\gamma_i - \gamma_j)^2 \tag{2}$$

收稿日期 2006-11-06
基金项目 国家自然科学基金资助项目(10476011)
作者简介 张军(1978—), 男, 江苏江都人, 助理研究员, 博士, 主要从事计算流体力学研究.

① TOMARO R F, WITZEMAN F C, STRANG W Z. A solution on the F-18C for store separation simulation using Cobalt60. AIAA Paper 99-0122, January 1999.

式中: k_{ij} ——节点 i 和节点 j 之间的弹簧倔强系数; x_i, y_i ——节点 i 的 x, y 坐标; x_j, y_j ——节点 j 的 x, y 坐标; η_i ——节点 i 的相邻节点的数目; n ——迭代的次数; δ_i ——节点的位移矢量; ϕ, ψ ——自适应参数,由用户自己给定,本文分别取为 1 和 -0.5.

2 并行计算方法

本文采用 C++ 语言进行编程实现.采用 C++ 编程,可以使并行程序的设计变得简单,使整个程序可读性强、移植性好、并行效率高、易于再次编程开发.并行通信语言采用 MPI 标准通信库函数^[9],MPI 方法是目前最常见的且使用最广泛的并程序序设计方法.

将计算区域分区,子区域“内边界”值由相邻区域对应网格前一次的值来确定,对每个子区域独立进行显式求解.为了保证程序的可靠性,采用就绪通信模式进行并行通信,程序结构采用主从模式.本文使每个子区域对应一个子任务,每个子任务对应一个处理器节点,采用纯节点并行计算模式进行分区并行计算,因而是粗粒度区域并行计算模式^[2].如果流场子分区数目为 N ,并行计算需要的处理器数目 $P = N + 1$,其中第 0 号处理器(对应于第 0 号进程)专用于数据传输,不进行流场计算.采用这种思想进行并行计算程序设计,很容易处理分区数目较多的情况.在每个迭代步加入同步控制语句,以使各个子任务的信息通信实现同步;采用“先进先出”的同步等待控制语句,以减少通信时间.

并行计算效率的定义.设一个并行系统有 P 个处理器,并行计算时间 T_p 、串行计算时间 T_s 和并行加速比 S 的定义为

$$S = T_s/T_p$$

(3)

进行计算 CPU 的效率 E_j 定义为

$$E_j = S/N$$

(4)

并行计算效率 E 的定义为

$$E = S/P$$

(5)

3 算 例

本文通过二维 ALE 方程的求解来模拟 NACA0012 翼型绕流问题,外边界采用无反射边界条件.来流马赫数 $Ma = 0.755$,攻角 $\alpha = 0.016^\circ$.先将翼型静止时的流场计算收敛,将收敛的流场作为翼型振动流场数值模拟的初始条件.

绕 1/4 弦作俯仰振动的 NACA0012 翼型绕流,采用 Runge-Kutta 方法对上述绕流问题进行数值模拟.攻角 $\alpha(t)$ 的变化规律是

$$\alpha(t) = \alpha_m + \alpha_0 \sin \omega t$$

式中:攻角的平均值 $\alpha_m = 0.016^\circ$,振幅 $\alpha_0 = 2.51^\circ$,角频率 $\kappa = \frac{\omega c}{2U_\infty} = 0.1628$,弦长 $c = 1.0$, U_∞ 表示自由来流的速度,来流马赫数 $Ma = 0.755$.计算了 4 个周期.

本算例中,网格的点数为 26 627,网格单元数(即三角形个数)为 52 550.流场不同分区数目时的网格如图 1 所示, $t = 0$ 时的流场等密度云图如图 2 所示,NACA0012 翼型振动时升力系数随攻角的变化曲线如图 3 所示.

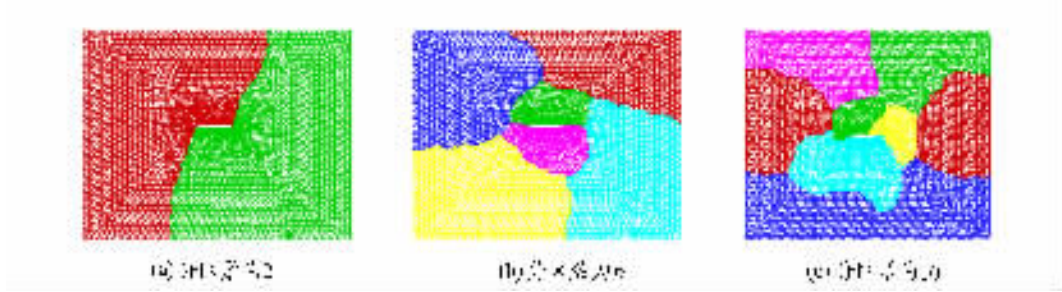


图 1 流场不同的分区数目网格

Fig.1 Meshes for flow field divided into different numbers of sub-domains

计算结果与文献[3]的计算值及文献[3]引用的实验结果基本吻合,这说明本文的并行计算结果是可以接受的.

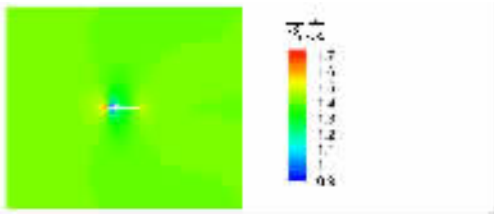


图 2 $t=0$ 时的流场等密度云图
Fig.2 Isodensity of
flow field for $t=0$

表 1 给出了不同分区数目的计算时间、并行计算加速比和并行计算效率的比较结果.从表 1 可以看出,本算例当分区数为 2 时,进行计算 CPU 的效率达到最大值 1.4,随着分区数目的增加,进行计算 CPU 的效率下降,当分区数为 10 时,下降到最小值 1.18.因为当系统规模扩大时,处理器个数 P 增加,系统额外开销时间会随之增加,从而会导致进行计算 CPU 的效率下降.虽然进行计算 CPU 的效率随着分区数目的增加而下降,但是并行计算的加速比却不断增加,当分区数为 10 时,达到 11.77.

当流场分区数目为 2 时,并行计算效率为 0.93,这时只有 2 个 CPU 进行计算,需要的通信量较小,专门负责通信 CPU 的空闲时间很长,从而导致并行计算效率较低.当流场分区数目从 2 增加到 6,通信量越来越大,专门负责通信 CPU 的效率得到提高,从而并行计算效率也得到提高,达到 1.12.但是,随着流场分区数目的进一步增加,用于通信等的额外开销时间大大增加,并行计算效率随之降低.

4 结 论

本文采用并行计算方法对含动边界的流场进行了数值模拟,并对不同分区数目情况下的并行计算加速比和并行计算效率进行了研究.在本文的算例中,进行计算 CPU 的效率随着分区数的增加而下降,当分区数达到最大时,进行计算 CPU 的效率最小.这是因为在系统规模扩大时,处理器个数 P 增加,系统额外开销时间会随之增加,从而导致进行计算 CPU 的效率下降.虽然进行计算 CPU 的效率随着分区数的增加而下降,但是并行计算加速比却不断增加,当分区数达到最大时,并行计算加速比也达到最大.并行计算效率随着分区数的增加,先增加后减小.这是因为负责通信 CPU 的效率增加会导致并行计算效率增加,通信等额外开销时间的增加会导致并行计算效率降低,刚开始分区数较小时,前者占有优势,从而导致并行计算效率增加,随着分区数的增加,前者对并行计算效率的影响越来越小,甚至导致并行计算效率下降,而后者对并行计算效率的影响越来越大,从而导致并行计算效率降低.

参考文献:

[1] 张军,谭俊杰,任登凤.副油箱从机翼分离流场的数值模拟[J].自然科学进展,2006,16(8):1033-1037.
[2] 兰黔章,吕晓斌.三维 Euler 方程的分区和并行计算[J].力学学报,2001,22(4):433-438.
[3] LUO Hong,BAUM J D,LOHNER R. A fast ,matrix-free implicit method for compressible flows on unstructured grids[J]. Journal of

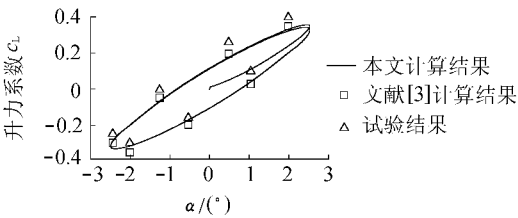


图 3 NACA0012 翼型振动时升力系数随攻角的变化
Fig.3 Lift coefficient versus angle of attack
for NACA0012 aerofoil vibration

表 1 不同分区数目情况下的计算时间、并行计算加速比和并行计算效率的比较

Table 1 Comparison of computation time , parallel computation acceleration rate and parallel computation efficiency under different numbers of sub-domains

流场子分区数目	使用 CPU 的数目	计算时间/ min	并行计算加速比	进行计算 CPU 的效率	并行计算的效率
1	1	1397.00	1.00	1.00	1.00
2	3	499.76	2.80	1.40	0.93
4	5	257.92	5.42	1.35	1.08
6	7	177.44	7.87	1.31	1.12
8	9	138.97	10.05	1.26	1.12
10	11	118.70	11.77	1.18	1.07

Computational Physics ,1998 ,146 :664-690.

[4]王军利 ,白俊强 ,詹浩 .非结构动网格在三维可动边界问题中的应用研究 [J].航空计算技术 ,2005 ,35(3) :12-16.

[5]刘占生 ,张云峰 .拉伸弹簧与扭转弹簧模拟动态网格方法分析与改进 [J].哈尔滨工业大学学报 ,2005 ,37(8) :1098-1102.

[6]郭正 ,谭杰 ,刘君 .振动矩形机翼非线性绕流数值研究 [J].国防科技大学学报 ,2005 ,27(4) :13-17.

[7]WANG Jiang-feng ,WU Yi-zhao .Parallel computation of 3D hypersonic flows on unstructured hybrid meshes[J].Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics ,2005 ,27(3) :200-205.

[8]唐维军 ,赵宁 ,李晓林 ,等 .随机扰动下三维流体界面不稳定性并行计算 [J].计算物理 ,2001 ,18(6) :539-543.

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

Parallel computation of 2D flow fields with moving boundary

ZHANG Jun¹ , TAN Jun-jie² , REN Deng-feng²

(1. College of Aerospace Engineering , Nanjing University of Aeronautics & Astronautics , Nanjing 210016 , China ;
2. College of Power Engineering , Nanjing University of Science & Technology , Nanjing 210094 , China)

Abstract :The parallel computation method was used for numerical simulation of flow field with moving boundary , and unstructured moving grids were generated by spring analogy method. In the parallel structure , the principal and subordinate mode was adopted. The principal program takes charge of data sending and receiving , and the calculation task of each subordinate program is accordant with a sub-domain. By solving the conservative arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) equation , the problem of NACA0012 aerofoil vibration was numerically simulated , and the computation time , parallel acceleration rate , and parallel efficiency under different numbers of sub-domains were compared. Case study shows that , with the increase of the number of sub-domains , the computation efficiency of CPU increases at first and then decreases ; however , the acceleration rate of parallel computation always increases.

Key words :flow field ;moving boundary ;unstructured mesh ;moving grid ;parallel computation ;numerical simulation

.....

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32 - 1521/C , ISSN1671 - 4970 , 季刊 , 自办发行)

《河海大学学报(哲学社会科学版)》以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导 , 坚持实事求是的思想路线 , 贯彻“双百”方针 , 弘扬时代主旋律 , 理论联系实际 , 为社会主义物质文明与精神文明建设服务。

《河海大学学报(哲学社会科学版)》为哲学与社会科学类学术期刊 , 主要刊登哲学、政治学、文学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章。本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考。《河海大学学报(哲学社会科学版)》为中国学术期刊(光盘版) 入编期刊与中国学术期刊网入编期刊。

《河海大学学报(哲学社会科学版)》由河海大学主办 , 每季末出版 , 国内外公开发行。2007 年每本定价 5 元 , 每本邮费 1 元 , 全年订费 24 元。欢迎广大读者直接向编辑部订阅。联系地址 : 南京市西康路 1 号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部 , 邮政编码 210098。联系电话 025-83786376。