

文章编号: 1000-8055(2006) 03-0497-05

模型加力室大涡模拟的并行计算

邵茂敏, 颜应文, 刘 勇, 赵坚行
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 采用基于MPI(消息传递库)的并行算法,在贴体网格下对带V形槽稳定器模型加力燃烧室紊流化学反应流场进行数值模拟,湍流模型采用 k 方程亚网格尺度模型,燃烧模型采用亚网格EBU模型,采用热通量辐射模型估算辐射通量。在程序设计中,采用动态内存分配、分区算法和多点重合交错网格系统,并行计算的结果与单机运行结果的对比表明计算结果是正确的,可以明显的提高运算效率,是解决复杂燃烧流动大规模数值模拟的有效手段。

关键词: 航空、航天推进系统; MPI(Message Passing Interface); 大涡模拟; 并行计算; 加力燃烧室
中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A

Parallel Computation for Large-Eddy Simulation of a Model Afterburner

SHAO Mao-min, YAN Ying-wen, LIU Yong, ZHAO Jian-xing
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Large-Eddy Simulation (LES) of turbulent chemically reacting flows in the model afterburner with V-gutter flame holder was carried out using parallel algorithm based on the MPI (Message Passing Interface) library. The k -equation subscale grid model was used to simulate the turbulent viscosity. The chemical reaction rate was determined by the subgrid EBU combustion model and the heat flux model was employed for the heat flux. In the computer cluster, overlapping grid method was applied to treat the staggered grid in the common boundary. The dynamic memory allocation was used to reduce memory usage. The parallel computing and sole computing results were compared. It shows that parallel computation procedure can correctly simulate the chemically reacting process in the model afterburner. Also, the computation time consumed is dramatically reduced. Parallel computation is proved to be an effective way to simulate the turbulent flows and combustion process in the complex geometry combustor.

Key words: aerospace propulsion system; MPI(Message Passing Interface);
large-eddy simulation; parallel computation; afterburner

加力燃烧室是军用发动机的重要部件之一,它可加大发动机的推力和增强飞机的飞行机动性能,采用高精度和高速的数值模拟方法研究其反

应流场特征对其设计和评估具有重要的意义。本文采用大涡模型(LES)模拟加力燃烧室的反应流场,大涡模拟对大尺度涡旋运动进行直接计算,对

收稿日期: 2005-06-04; 修订日期: 2005-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助(5176017)

作者简介: 邵茂敏(1979-),男,江苏通州人,南京航空航天大学能源与动力学院硕士生,主要从事燃烧的数值模拟研究。

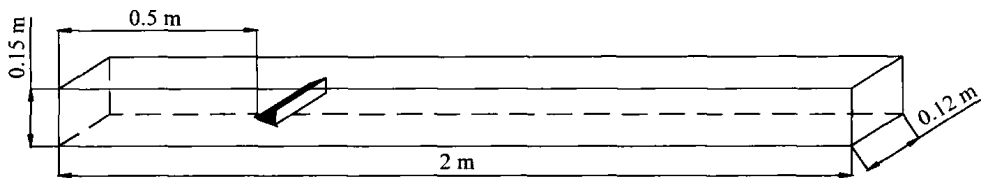


图1 模型加力燃烧室示意图

Fig.1 Schematic of afterburner with V-gutter flame stabilizer

小尺度涡旋运动通过数学模型来描述,因而对流场模拟具有较高的计算精度。在实际工程问题复杂流场的模拟中会涉及到大量的网格点,对计算速度和存储也有较高要求,目前这类问题的模拟一般都在超级计算机或者机群上进行。机群并行计算系统相对来说具有较好的性价比和可扩展性,尤其适合处理中等粒度的计算问题。本文采用MPI作为并行平台,对带V形槽稳定器模型加力燃烧室内的紊流化学反应流流动进行大涡模拟,计算结果与单机的结果进行比较表明并行计算是高速有效的,可以明显的提高运算效率,是解决复杂燃烧流动大规模数值模拟的有效手段。

1 控制方程及其差分格式

本文的模拟对象为带V形槽稳定器的模型加力燃烧室(如图1所示)。所研究的气流为完全发展的紊流预混可燃混气(煤油+空气)。

1.1 基本控制方程

经滤波后,在贴体坐标系下大涡模拟的基本控制方程为^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi}(\rho U \Phi) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho V \Phi) = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\Gamma^\Phi}{J} (\alpha \Phi_\xi - \beta \Phi_\eta) \right] + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\Gamma^\Phi}{J} (-\beta \Phi_\xi + \alpha \Phi_\eta) \right] + S^\Phi(\xi, \eta) \quad (1)$$

式中: U, V, α, β 和 γ 的意义可参考文献[1]。而 Φ 为通用变量(可代表速度 u 和 v ,压力修正值 P ;能量 E 和成分 y_m ,辐射通量 R_x 和 R_y 等)。

1.2 数学模型

采用 k 方程亚网格尺度模型^[2]确定亚网格紊流粘性,用亚网格EBU燃烧模型^[3]对能量方程中源项化学反应速率 w_m 进行封闭。采用辐射通量模型计算辐射。

1.3 差分格式与数值解法

本文在贴体坐标系下采用交错网格,在控制

容积内离散控制方程,差分格式选用混合格式,采用SIMPLE算法对控制方程进行求解。有关差分格式与数值方法的详细介绍可见文献[1, 4]。

2 并行方法

2.1 并行平台

目前并行平台有多种,包括工作站群机(NOW)、对称多处理机(SMP)及大规模并行处理机(MPP)等。本文采用机群(Windows操作系统,内存512 MB)进行并行计算,进程间的通讯通过调用MPI并行库^[5]来实现。

2.2 计算分区

根据本文计算问题的特点,我们采用几何分区(只在 X 方向进行分区)的方法来实现并行计算。根据处理机的台数 and 问题的计算规模相应地将计算域划分为等量大小相等的子区域,然后给每个处理机分配一个子区的计算任务。并程序程序设计采用Master/Slave与Slave/Slave混合模式,由主处理器读取整个求解域的网格数据,然后向各个子处理器(包括它自身在内)分发,各处理器进行流场的初始化,然后进入同步点,而后同时进行流场计算。区域间的信息交换由进程间通讯来实现。

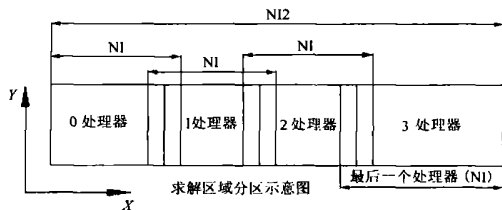


图2 4个处理器的并行计算

Fig.2 Parallel computing with four processors

计算过程中采用了动态内存分配,假设处理器数目为 N ,则前 $(N-1)$ 个处理器处理的分区长度是一样的,而最后一个处理器处理的分区长度则会依处理器个数的不同而与前面的处理器有所

不同。采用动态内存分配的好处是显然的, 可以有效地减少计算中内存的使用量, 提高程序的运行速度。下图(图2)示意性地画出了4个处理器的情形。

2.3 区域边界处理方法

采用几何分区进行计算时区域边界的处理是影响结果及并行效率的关键。进口条件只需在第一个处理器中设定。由于对火焰稳定器这一区域需要特殊处理, 与串行程序相比, 在进行并行程序设计时, 要对火焰稳定器的位置进行各种可能的判断, 以确定它落在哪个处理器中。

入口边界条件: 流向速度 u 采用七分之一次方指数分布, 横向速度 v 为零。

出口边界条件: 采用Sommerfeld 辐射开边界条件^[6], 然后采用流量守恒对出口速度进行修正。

区域边界信息的交换完全在进程间进行。将整个计算区域几何划分后, 按一定规律进行编号, 每个子区域都可以通过自己的区域号推算出相邻的区域号并查到进程号。这样每个计算循环完成本区域的计算后, 就向相邻的区域发送边界点信息并接收来自邻区域的边界信息, 然后进行相应点的相关量的更新及物理边界条件的处理。

3 计算性能与计算结果分析

本程序分别进行了单机版与多机版的运行。在5台奔4, 2.0 GHz, 100 Mb 网络的windows 平台上进行了数值计算, 可以看出, 完成每步的迭代时间随CPU 个数的增加而明显减少(如图3)。

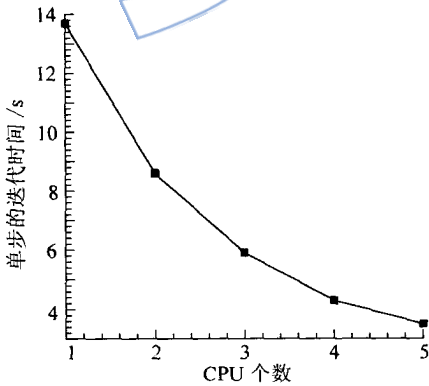


图3 单步的迭代时间与CPU 个数的关系
Fig.3 Iteration time of one step versus number of CPU s

图4为模型燃烧室贴体网格图。本文采用区域法生成网格, 即以稳定器尾缘截面为界把整个加力室分为前后两个区域, 分别生成网格, 第一

个区域网格数为 546×151 , 第二个区域网格数为 1457×191 , 为了改进网格正交性, 合理显示稳定器后的气流结构, 在第二区域径向进行了网格加密(增加了40个网格点)。这样, 第一个区域右端面上前75个网格点(从 $j = 1$ 到 $j = 75$)与第二区域的前75个网格点(从 $j = 1$ 到 $j = 75$)相对应, 而第一区域的后76个网格点(从 $j = 76$ 到 $j = 151$)与第二区域网格的对应关系为(从第二段的 $j = 76 + 40 = 116$ 到 $j = 191$)。这是在两个区域进行数据耦合传递流场参数时需要注意的地方。具体做法是这样的: 首先开辟一个公共数据块, 当计算进行到第一区域的右端面时, 把第二区域左端面的数据传给公共数据块以供第一区域迭代用。同理, 当计算进行到第二区域的左端面时可以采用从第一区域发送到公共数据块中的参数。这样就实现了流场参数的实时更新, 一直计算到流场收敛为止。

图5中的各图(a)~(e)为速度的等值线图, 从图中可以看出, 在稳定器后面随着温度的提高, 速度普遍比稳定器前面的大, 在稳定器后面有一个稳定的回流区, 形成一个稳定的点火源。

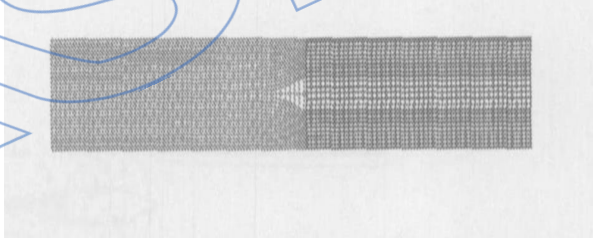


图4 模型燃烧室贴体网格图
Fig.4 Body-fitted grid of the model combustor

由图中还可以看出, 交界面处比较平滑, 可见并行计算并没有带来额外的计算误差。并行计算是有效的(各图中的分隔线表示交界面所在的位置)。

图6为气流温度等值线图, 在稳定器后面因燃油燃烧, 温度升高, 随着轴向长度的增加, 燃烧时间增长, 火焰面不断扩张, 气流温度也相应提高, 在加力室壁面附近因混气没有燃烧, 气流温度较低。

图7为燃油浓度等值线图, 由图可知, 在稳定器后形成的燃烧区, 因混气在此进行燃烧, 燃油浓度降低, 在近壁区因气流温度低, 混气没有燃烧, 燃油浓度基本保持不变, 而在火焰面附近, 燃油浓度急剧变化。

图8为燃烧室出口截面径向温度分布图, 试

验是在学校燃烧与传热实验室进行的。从图中可以看出,数值模拟结果跟实验测量所得温度数据

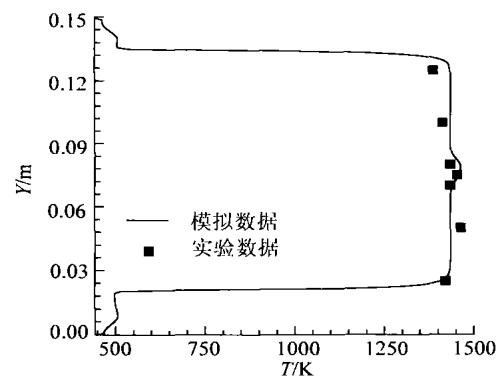


图6 出口截面温度图

Fig. 8 Profile of temperature at the outlet
吻合的比较好,说明了采用大涡模拟能真实地反应加力燃烧室内气流流动和燃烧的过程。

4 结束语

本文采用并行计算对带V型槽稳定器的模

型燃烧室进行了数值模拟。并与原有的串程序运行结果进行了比较。结果表明并行计算不但能较好地反映热态流场,还能极大地提高计算速度,使得在一个较短的时间内完成一个计算规模较大的工程应用问题成为可能。有着广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 赵坚行. 燃烧的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[2] Kim W W, Suresh M. A New Dynamic One-Equation Subgrid-Scale Model for Large Eddy Simulations [R]. AIAA 95- 0356, 1995.

[3] Kim W W, Suresh M, hukamc M. Large-Eddy Simulations of a Gas Turbine Combustor Flow [J]. *Combust. Sci. and Tech.* , 1999, 143: 25~62.

[4] 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政译. 北京: 科学出版社, 1984.

[5] 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, 2002.

[6] Avancha R V R, Pletcher R H. Largr Eddy Simulation of the Turbulent Flow Past A Backward Step[R]. AIAA 2000 - 0542, 2000.