

液体发动机燃烧室 流场模拟的并行 SIMPLE 算法*

赵文涛 王正华 杨晓东

(国防科技大学并行与分布处理国家重点实验室, 长沙, 410073)

摘 要: 用串行和并行 SIMPLE 算法对液体火箭发动机燃烧室内的复杂流动进行了数值模拟。控制方程组用欧拉坐标系下的 N-S 方程组描述。在并行虚拟机环境下研究了交错网格系统中参数的传输和接受模式, 从计算结果可以看出并行计算的效率较高, 是解决此类复杂流动大规模数值模拟问题的有效手段之一。

主题词: 液体推进剂火箭发动机, 燃烧室, 并行计算, 流场仿真

分类号: V 434. 22

PARALLEL SIMPLE ALGORITHM FOR COMPLEX FLOW SIMULATION IN LIQUID ROCKET ENGINE CHAMBER

Zhao Wentao Wang Zhenghua Yang Xiaodong

(National Laboratory for Paralled & Distributed Processing,
National Univ. of Defence Technology, Changsha, 410073)

Abstract: The complex flow was simulated with sequential and parallel SIMPLE algorithm in the combustion chamber of liquid rocket engine. The controlling equations were described under the Euler coordinate. The sending and receiving mode of flow fields parameters in the staggered grid were studied. The results show that parallel computation efficiency is reasonably high and parallel computing is a useful method to such large scale numerical simulation problem of complex flow.

Subject terms: Liquid propellant rocket engine, Combustion chamber, Parallel computing, Flow field simulation

1 引 言

在传热传质和燃烧的数值模拟方面广泛采用的解压力耦合方程的半隐方法 SIMPLE 法, 可以解决工程设备、环境科学以及人体科学中碰到的大量问题。为了提高计算效率, 很有必要将 SIMPLE 算法并行化。本文针对液体火箭发动机燃烧室内复杂流动的数值模拟, 在多维喷雾两相燃烧过程数值模拟的基础上^[1], 在并行虚拟的环境下研究了并行 SIMPLE 算法^[2, 3], 从

* 收稿日期: 1998-12-03, 修回日期: 1999-03-15

而大大缩短大规模计算问题的墙上时间。

2 串、并行 SIMPLE 算法和 PVM 环境

控制方程:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v_r \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v_\theta \Phi}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v_z \Phi}{\partial z} = S_\Phi \quad (1)$$

$$\Phi = [1 \quad v_r \quad v_\theta \quad v_z \quad e]^T \quad (2)$$

上两式中 $\rho, v_z, v_r, v_\theta, e$ 分别是密度, 轴向、径向和切向的速度以及总能量; S_Φ 是由压力项和粘性项组成的源项。

将方程 (1) 进行离散处理后, 可得在控制容积中参量的表达形式:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_T \Phi_T + a_B \Phi_B + b \quad (3)$$

本文首先由方程 (3) 用串行的方法编制了计算燃烧室复杂流场的程序, 然后再将其并行化。

由于 SIMPLE 算法与其它大多数算法的不同点在于该方法使用了交错网格系统, 即流场中的速度及其它标量场参数分别存储于三套 (二维) 或四套 (三维) 不同的网格上。对于二维情况, 以速度和压力的控制容积为例, 由图1可以看出, u 和 v 的控制容积与主控制容积各有半个网格错位^[4]。由于这个特点, 使得整个计算域内速度和其它标量场总的计算节点数目不同, 所以将 SIMPLE 算法并行化时, 要特别注意处理机之间的数据传输, 必须做到交错位置上的流场参数传输和接受匹配准确。并行数值模拟是在网络机群环境下进行的, 操作系统为 Linux, 主频为 166 MHz, 内存为 64 M 的 8 台 Pentium 586, 微机由传输速率为 10 M 的以太网通过 24 端口 Hub 互相连接。

以图2所示四台计算并行计算为例, 在交界面上的数据进行双向传输。由于采用的是交错网格系统, 所以对速度的数据传输应于图中位置在横向和纵向各交错半个网格。

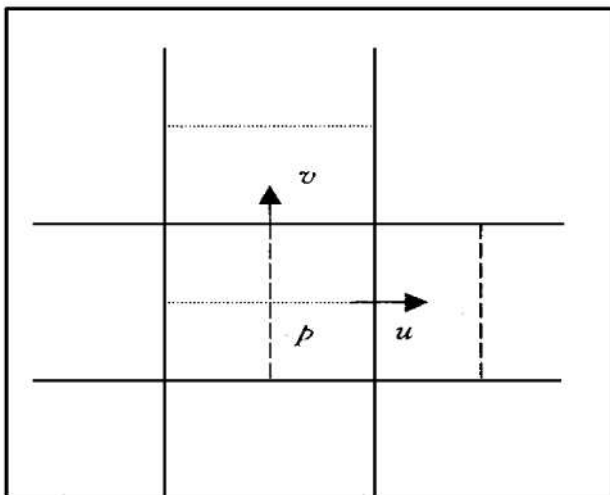


Fig. 1 Staggered grid

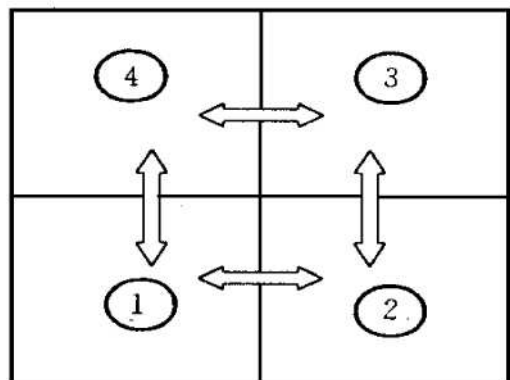


Fig. 2 Data exchanges in parallel computation

3 计算结果和讨论

图3和图4是模拟液体火箭发动机喷注面上喷嘴的分布对流场的影响情况, 串行和并行计算的结果完全相同, 在 2, 4 和 6 台计算机上所测得的加速比分别为 1.584, 3.554 和 5.219。由这

两张图还可以看出,当喷注面上的两排喷嘴位置发生改变时,喷注面附近的流线图发生明显的变化。这为研究液体火箭发动机内部复杂流场提供了有益的分析途径,同时为工程设计提供了定量的结果,可使实际设计更准确更合理。实际发动机头部的喷嘴数目会达到几十甚至上百个,要准确地模拟这么多喷嘴所形成的复杂流场则需要上百到上千台处理机来协同解决,这就为MPP即大规模并行处理在液体火箭发动机内部复杂流场计算中的应用展现出一个十分广阔的前景。

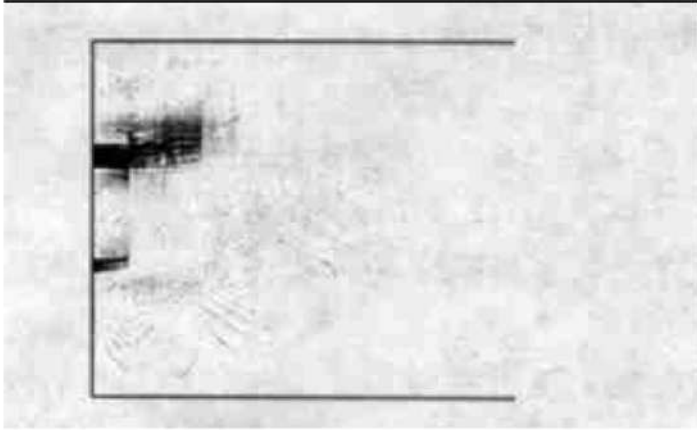


Fig. 3 Flow fields in combustion chamber



Fig. 4 Flow fields in combustion chamber

4 结 论

本文编制了串行和并行SIMPLE算法程序,并针对发动机内复杂流场进行了数值模拟,通过以上的分析和讨论可以得出以下结论:

(1) 在并行虚拟机环境下研究交错网格系统下的数据传输和接受模式时,对速度和标量场参数要分别对待。

(2) 并行处理大大缩短了墙上运行时间,从而提高了计算效率。

(3) 模拟液体火箭发动机内部几十到几百个喷嘴所形成的复杂流场时,需要大规模并行处理技术。

(4) 本文的工作为分析实际情况下的发动机内部流场打下了并行计算的基础,并行处理可以高效地得到数值模拟结果,可以解决在单个计算机上难于处理的大规模计算问题,为工程设计提供重要的辅助手段。

参 考 文 献

- 1 赵文涛,王正华,刘 仲. 火箭发动机两相喷雾燃烧的平行虚拟机仿真. 推进技术, 1999, 20 (4)
- 2 Bell G. Scalable parallel computers: alternatives, issues, and challenges. International J parallel programming, 1994, 22: 3~46
- 3 Pavarino L, Rame M. Numerical experiments with an overlapping additive schwarz solver for 3-D parallel reservoir simulation. The International Journal of Supercomputer Applications, 1995, 9: 3~17
- 4 Spalding D B. A general purpose computer program for multi-dimensional one-and-two phase flow. Math compt simulation, 1981, 23: 267~276