

火箭发动机两相喷雾燃烧的 并行虚拟机仿真*

赵文涛 王正华 刘 仲 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: 采用计算流体动力学方法对液体火箭发动机内部多维喷雾两相燃烧过程进行了数值模拟。气相控制方程组用欧拉坐标系下的 Navier-Stokes 方程组描述, 液相控制方程组在 Lagrangian 坐标系下进行描述。气、液两相作用通过方程组的源项互相耦合, 编制了串行和并行程序, 并在并行虚拟机环境下进行了测试。计算结果显示并行计算的效率较高。

主题词: 液体推进剂火箭发动机, 两相燃烧, 并行处理, 数值仿真

分类号: V434.1

SIMULATION ON TWO-PHASE SPRAY COMBUSTION IN ROCKET ENGINE UNDER PVM ENVIRONMENT

Zhao Wentao Wang Zhenghua Liu Zhong Yang Xiaodong

(National Lab. for Parallel and Distributed Processing, National Univ.
of Defence Technology, Changsha, 410073)

Abstract: The multi-dimensional two-phase spray combustion process in liquid rocket engine was simulated. The gas controlling equations were described under the Euler coordinate. The liquid phase controlling equations were described under the Lagrangian coordinate. The two phase influences of gas and liquid were considered through the sources of equations. The sequential and parallel codes were written and were tested under parallel virtual machine environment. The results showed that parallel computation efficiency was reasonable.

Subject terms: Liquid propellant rocket engine, Two phase combustion, Parallel processing, Numerical simulation

1 引 言

液体火箭发动机内部存在着复杂的两相湍流与燃烧过程, 在用数值模拟进行稳态、非稳态和燃烧稳定性分析时, 常遇到计算量大和计算时间长等问题。并行虚拟机 PVM (Parallel Virtual Machine) 能把一组计算机虚拟成单个的并行计算机, 即可用多个计算机来解决大型科学与工程计算问题。应用 PVM 就可以将火箭发动机内部流场的仿真过程分布在不同的计算机上进行计算, 从而使单个计算机上的计算量和计算时间减少, 使整个程序运行的墙上时间大大下降。

* 收稿日期: 1998-11-20, 修回日期: 1999-04-12

2 控制方程

气相控制方程组、源项表达式及喷雾运动方程分别为：

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

$$\varphi = [l \quad v_r \quad v_\theta \quad v_z \quad e \quad Y_i]^T \quad (2)$$

$$S = \begin{bmatrix} \sum_k n_k \dot{m}_{\text{vap},k} / dV \\ \sum_k (n_k \dot{m}_{\text{vap},k} v_{r,p,k} - \frac{1}{6} \pi \rho_{p,k} d_{p,k}^3 n_k \frac{dv_{r,p,k}}{dt}) / dV \\ \sum_k (n_k \dot{m}_{\text{vap},k} v_{\theta,p,k} - \frac{1}{6} \pi \rho_{p,k} d_{p,k}^3 n_k \frac{dv_{\theta,p,k}}{dt}) / dV \\ \sum_k (n_k \dot{m}_{\text{vap},k} v_{z,p,k} - \frac{1}{6} \pi \rho_{p,k} d_{p,k}^3 n_k \frac{dv_{z,p,k}}{dt}) / dV \\ S_e \\ S_{Y_i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{3}{8} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{C_D}{r_p} |\mathbf{v} - \mathbf{v}_p| (\mathbf{v} - \mathbf{v}_p) \quad (4)$$

采用氢氧化学反应和蒸发控制的燃烧模型，在燃烧室入口处为气氢和液氧两相流。

3 数值方法和并行计算环境

采用预测校正的 MacCormack 格式对液体火箭发动机内部喷雾两相燃烧的复杂多维流场进行数值模拟。并行数值模拟在 Pentium 586 网络机群环境下进行，8 台微机由传输速率为 10 M 的以太网通过 12 端口的 Hub 互相。在这样的并行虚拟机环境下，应用程序采用消息传递机制实现并行计算，通过发送和接受消息，应用程序的多个任务可以互相协作，并发地解决一个大计算量问题。

在发动机喷注面附近的流场范围内，存在着气、液两相燃烧过程，而在喷管的收敛和扩张段基本上只存在混合气体流动。这样将串行程序改为并程序时，对气相流场和喷雾流动所采用的数据传输方式不同。气相控制方程在欧拉坐标系下描述，计算任务同时分布在四台微机上运行，相邻两机可以并发地交换数据；而对在拉格郎日坐标系下描述的喷雾运动方程，喷雾运动从喷注面入口开始。随时间推进，首先计算完第一台微机所包含的流场，然后将与第二区相邻的喷雾流场参数传递下去，以计算下面的喷雾流动，这样依次类推，就可以将喷雾运动模拟出来。

4 计算结果和讨论

图 1 和图 2 是二维和三维发动机内部热态流场的等温线纵剖面图，由图可以看出二维和

三维模拟的结果一致, 并且串、并行计算的结果完全相同。例如在燃烧室喷注面附近一个节点上串、并行计算所得的气相温度为 1 976 K, 密度为 1.42 kg/m^3 , 速度为 160.046 m/s , 从图中还可以看出在喷注面附近温度的变化很剧烈, 这与实际情况相符。

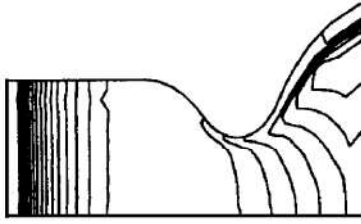


Fig. 1 Temperature contour of two dimensional flow field

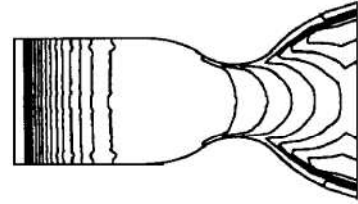


Fig. 2 Temperature contour of three dimensional flow field

图 3 是二维、三维情况下计算所得的轴向方向的马赫数, 由图可以看出发动机内的气流变化很剧烈。图 4 是针对本文所做算例在并行处理环境下进行的测试, 在 2, 4, 6 和 8 机上的加速比分别为 1.711, 3.315, 5.424 和 7.202, 串、并行计算的计算结果完全相同。

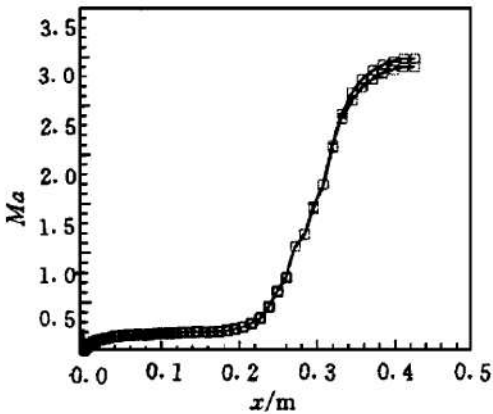


Fig. 3 Axis Mach number in liquid rocket engine

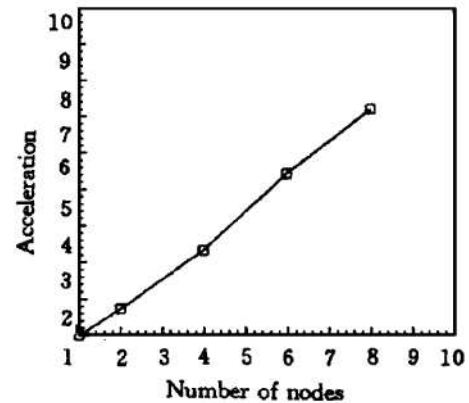


Fig. 2 Speedup ratio of different processors

5 结 论

(1) 在对发动机内流场进行并行计算时, 气相流场可以在不同的处理节点上并发地计算, 而喷雾运动则需在喷注面处开始顺序地计算, 这在某种程度上影响了并行计算效率。

(2) 在 PVM 环境下对程序进行了测试, 串行和并行程序计算的结果完全相同, 并行处理可以大大提高计算效率。

参 考 文 献

- 1 Quinn M J. Parallel computing-theory and practice. McGraw-Hill Inc, 1994.
- 2 Liang P, Ungewitter R. Multi-phase simulation of coaxial injector combustion. AIAA 92-034
- 3 Uenishi K. Three dimensional computations of transverse hydrogen jet combustion in a supersonic airstream. AIAA 87-0089