

火箭发动机燃烧室内气体非定常流动数值模拟*

刘卫东 王振国 周 进 庄逢辰

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘 要 应用新的 PISO 算法对液体火箭发动机内非定常流动过程进行了数值模拟计算。算法采用一步隐式预测、两步显式校正完成每一时间层计算,而不是通常的多次迭代计算,因而大大缩短计算时间。

关键词 PISO 算法, 计算流体力学, 非定常流动, 火箭发动机

分类号 V434.11

Numerical Simulation of Unsteady Flow in combustion Chamber of Liquid Propellant Rocket Engine

Liu Weidong Wang Zhenguo Zhou Jin Zhuang Fengchen

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract Numerical simulation of unsteady flow in liquid propellant rocket engine is performed with a new PISO algorithm in the present paper. The algorithm yields approximate solutions of the differential equation with one predictor step and two corrector steps at each time level instead of iteration calculation. Therefore, the CPU time cost in the calculation is reduced greatly which made numerical simulations of unsteady flow become practicable.

Key words PISO algorithm, computational fluid dynamics, unsteady flow, rocket engine.

SLMPLE 算法^[1]是目前数值模拟液体火箭发动机液雾燃烧过程的主要方法,该方法对气/液两相流动的处理有独到之处,但在求解非稳态流动时存在难以克服的困难,甚至无法进行计算。在液体火箭发动机实际燃烧流动过程中,常常会出现导致发动机严重毁坏的不稳定燃烧现象,要对这种不稳定燃烧进行数值模拟分析,就必须发展有效的非

* 1995 年 12 月 5 日收稿

定常流动过程数值计算技术。PISO 算法是 R. I. Issa 最初提出的^[2, 3], 算法采用一步隐格式预测、两步或多步显格式校正使每一时间层误差达到希望的精度要求, 因而在计算非定常流动时较大地缩短了计算时间, 使数值模拟一些瞬态流动过程成为现实可行。文献 [4] 已把该方法用于液体火箭发动机不稳定燃烧分析中, 但国内目前有关的研究报道很少见到。本文应用 PISO 算法, 在曲线贴体坐标系非交错网格中, 对发动机燃烧室内无燃烧时的二维非稳态流动过程进行了数值模拟计算。

1 数值算法

1.1 流动控制方程

燃烧室内冷态流动控制 Navier-Stokes 方程在圆柱坐标系下可写成如下形式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u_i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v u_i) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \mu \frac{\partial u_i}{\partial r}) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_h \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \mu_h \frac{\partial h}{\partial r}) \quad (3)$$

其中: 滞止焓 $h = C_p T + \frac{1}{2} u_i u_i$, 气体密度由状态方程计算: $\rho = \frac{P}{RT}$ 。为了方便处理复杂流动边界条件, 上述控制方程进行了坐标变换, 在任意曲线坐标系下的形式为:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{1}{rJ} \frac{\partial}{\partial \xi}(rJ \rho U \phi) + \frac{1}{rJ} \frac{\partial}{\partial \eta}(rJ \rho V \phi) = \frac{1}{rJ} \frac{\partial}{\partial \xi}(rJ \mu_\xi \frac{\partial \phi}{\partial \xi}) + \frac{1}{rJ} \frac{\partial}{\partial \eta}(rJ \mu_\eta \frac{\partial \phi}{\partial \eta}) + S_\phi \beta \quad (4)$$

式中: ϕ 代表不同变量 u, v, h , 而 U, V 是计算平面上的速度, S_ϕ 是方程源项, 包括坐标变换附加源项及原方程写成通用形式后的剩余项。

1.2 PISO 算法迭代方案

预测步 设时间 t^n 层流动参数为 ρ, u, v, h, p 等, 用这些量来计算差分方程的算子系数, 于是方程 (2)、(3) 离散后可写成如下形式。该形式与具体的差分格式无关, 不同的格式只会导致式中的差分算子不同。预测步控制方程隐格式离散如下:

$$(\frac{\rho^n}{\delta t} - A_0) u_i^* = H(u_i^*) - \Delta_i P^n + S_i + \frac{\rho^{n-1} u_i^n}{\delta t} \quad (6)$$

$$(\frac{\rho^n}{\delta t} - B_0) u_i^* = G(h_i^*) + \frac{\rho^{n-1} h_i^n}{\delta t} + (\frac{p^n - p^{n-1}}{\delta t}) \quad (7)$$

其中算子表达式如下:

$$H(u_i^*) = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^*, \quad G(h_i^*) = \sum_{nb} b_{nb} h_{nb}^* \quad (8)$$

算子中系数 A, B 的下标“0”表示中心节点, 下标“nb”表示周围节点, 这些系数与所用的差分格式有关。求解 (6)、(7) 式得到 u^*, v^*, h^* , 新的温度由焓值计算。

第一校正步 经过预测步计算得到的流动参数并不满足连续方程, 因此必须进行校正。在预测步时没有计算压力值, PISO 算法也像 SIMPLE 方法一样采用了压力-速度耦合方式, 利用离散的连续方程和动量方程推导一个压力方程, 用来求解新的压力值。

对连续方程,有:

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \Delta_i(\rho^n u_i^{**}) = 0 \quad (9)$$

对动量方程有:

$$\left(\frac{\rho^n}{\delta t} - A_0\right)u_i^{**} - \Delta_i p^* + S_i^* + \frac{\rho^{n-1}u_i^n}{\delta t} \quad (10)$$

对状态方程,有:

$$\rho^* = \frac{p^*}{RT^*} \quad (11)$$

注意上面(9)、(10)二式都用显格式离散,算子系数仍用 t^n 时间层的参数计算,而不是用预测步得到的新值,这是因为预测步得到的速度场并不满足连续方程。把动量方程(10)写成速度的显式表达式代入连续方程(9),并应用状态方程(11),则可导出压力方程:

$$\begin{aligned} & \left\{ \Delta_i \left(\frac{\rho^n}{\delta t} - A_0 \right)^{-1} - \frac{1}{\delta t} \frac{1}{RT^*} \right\} p^* \\ & = \Delta_i \left\{ \left(\frac{\rho^n}{\delta t} - A_0 \right)^{-1} \left[H^n(u_i^*) + \frac{\rho^n u_i^n}{\delta t} + S_i^* \right] \right\} - \left(\frac{\rho^n}{\delta t} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

这样通过压力方程(12)求解出压力 p^* ,再由状态方程(11)求出密度 ρ^* 。把 ρ^* 、 p^* 代入动量方程求出速度 u^{**} 、 v^{**} ,这时的 u^{**} 、 v^{**} 、 ρ^* 是满足连续方程的,可用来计算能量方程算子系数 B^* 。于是:

$$\left(\frac{\rho^*}{\delta t} - B_0^*\right)h^{**} = G(h^*) + \left(\frac{\rho^n h^n}{\delta t} + \frac{p^* - p^n}{\delta t}\right) \quad (13)$$

第二校正步 为了进一步满足控制方程提高计算精度,又进行了与第一校正步完全类似第二步校正,只是这时离散方程的系数采用第一校正步求出的参数来计算,而不是用 t^n 时间层的值。第二校正步得到的流场参数 ρ^{**} 、 u^{***} 、 v^{***} 、 h^{***} 、 T^{***} 、 p^{**} 则作为 t^{n+1} 时间层的值。

1.3 非交错网格下的压力-速度耦合处理

在 SIMPLE 方法中是采用交错网格来控制计算中经常出现的压力振荡,使得控制方程离散过程十分复杂。本文应用文献[5]中提出的在非交错网格下处理压力-速度耦合的技术,成功地抑制了求解过程出现的压力振荡,得到了与交错网格相同的效果。具体作法是在计算控制容积边界处速度时应用相邻节点的动量方程插值得到。例如控制容积东侧边界处速度为:

$$u_e = \left[\frac{\sum a_{nb} u_{nb}}{a_P} \right]_e - \bar{a}_e (p_E - p_P) \quad (14)$$

式中下标“P”表示控制容积中心,上划线表示在节点 P、E 之间插值。

2 计算结果及分析

在本文的数值计算中,物理平面上的曲线正交贴体网格应用 TTM 法生成。控制方程变换成任意曲线坐标系下形式,数值计算在计算平面内完成。计算边界条件给定入口

压力 p , 径向速度 v , 温度 T , 出口边界所有变量轴向梯度等于零, 壁面给定无滑移绝热条件。对称线给定 $v=0$, 其余变量径向梯度等于零。

本文应用上面介绍的方法对火箭发动机燃烧室内冷态非定常流动过程进行了数值计算。首先得到了稳态流动的流场参数分布(如图 1、图 2), 由图中参数分布看, PISO 在计算稳态流动时毫无问题, 并且流动速度从低 Mach 数到超音速。在稳态解的基础上, 在燃烧室入口

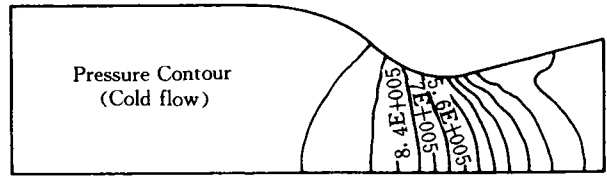


图 1 流场等压线

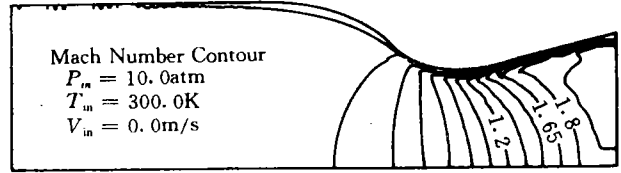


图 2 流场等马赫数线

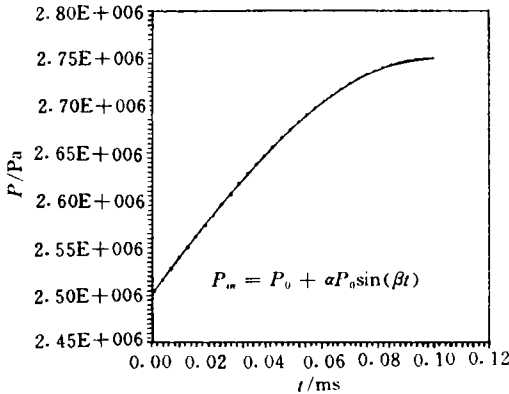


图 3 燃烧室入口压力随时间变化曲线

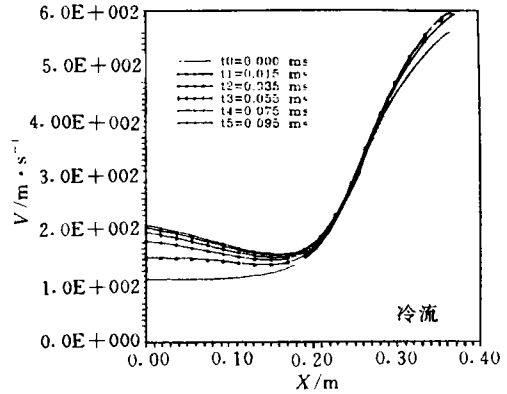


图 4 不同时刻速度沿轴线变化曲线

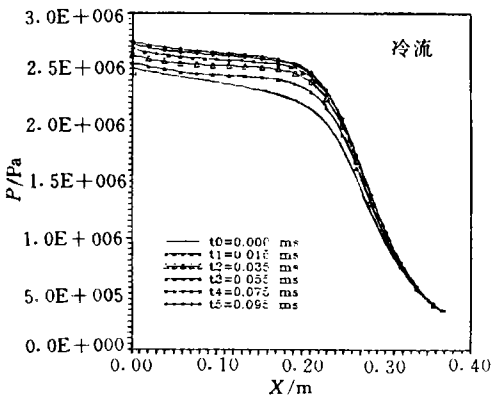


图 5 不同时刻压力沿轴线变化曲线

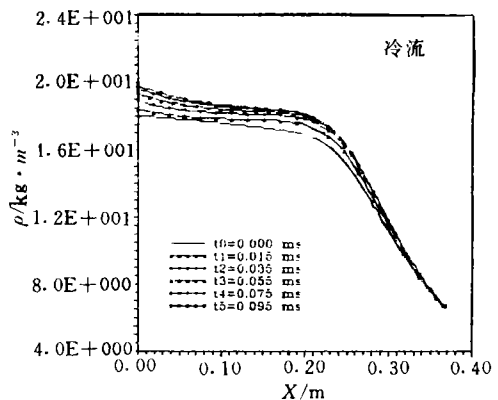


图 6 不同时刻密度沿轴线变化曲线

处加上随时间变化的压力正弦波(如图 3): $p(t) = p_0 + a \sin(\beta t)$, 式中 p 是人口压力, t

是时间, p_0 是稳态流动入口压力, α 、 β 是常系数。图 4、图 5、图 6 分别是燃烧室流动场中压力、密度、速度在各时刻沿轴向分布的变化图。由图可以看出, 当燃烧室头部压力随时间变化时, 压力能迅速传遍整个流动场; 对无燃烧的冷态流动温度场基本不变, 因而由状态方程计算的流体密度随压力变化也迅速。这些计算表明, 采用 PISO 方法计算非定常流动是可行的。

3 结 论

由本文的计算分析可以看到, PISO 算法在计算非定常流动时有明显的优势, 应用预测校正三步替代每一时间层的多次迭代, 节省了计算时间。控制方程的离散可以采用有限控制容积法或其它方法离散。计算表明, PISO 算法的收敛特性与稳定性都比较好。

参 考 文 献

- 1 Patankar S V Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Hemisphere, 1980
- 2 Issa R I Solution of the Implicit Discretized Fluid Flow Equations by Operator-Splitting. J. Comput. Phys., 1986, Vol: 62, pp40-65, pp66-82
- 3 Issa R I Solution of the Implicit Discretized Reacting Flow Equations by Operator-Splitting. J. Comput. Phys., 1991, 93: 388
- 4 Chen C P and Kim Y M. Prediction of High Frequency Combustion Instability in Liquid Propellant Rocket Engine. AIAA 92-3763
- 5 Peric M et al. Comparison of Finite-Volume Numerical Method with Staggered and Collocated Grids. Computer and Fluids, 1988, 16: 389

(责任编辑 石少平)