

火箭冲压发动机反应流场数值模拟*

马智博 张振鹏

蔡 选 义

(北京航空航天大学宇航学院, 北京, 100083) (洛阳光电技术发展中心, 洛阳, 471009)

摘 要: 用耦合算法求解三维定常椭圆型 N-S 方程组, 计算了火箭冲压发动机内部的湍流反应流场。用有限体积法离散控制方程, 用块隐式法求解离散后的代数方程组。湍流流动用 $k-\epsilon$ 模型描述, 湍流燃烧采用掺混控制的局部瞬时不混合模型。实践表明, 尽管密度场变化剧烈, 仍能快速收敛。算例中网格点数为 $39 \times 13 \times 18$ 。计算出的燃烧效率符合实验结果。

主题词: 冲压火箭发动机, 反应流, 流动分布, 数值仿真

分类号: V235.21

NUMERICAL SIMULATION OF REACTING FLOWS IN DUCTED ROCKET COMBUSTOR

Ma Zhibo Zhang Zhenpeng

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

Cai Xuanyi

(Luoyang Electro-Optical Technology Development Center, Luoyang, 471009)

Abstract: A solution algorithm based on coupled solution of the fully elliptic three-dimensional steady-state Navier-Stokes equations was developed for the calculation of turbulent reacting flows occurred in ducted rockets. The governing partial differential equations were discretized by finite volumes and the nonlinear algebraic equations were solved by a block-implicit algorithm. Turbulence was represented by the $k-\epsilon$ model and chemical reaction was assumed to occur in one step at an infinite rate, controlled by mixing of fuel and oxidant streams. It is demonstrated that the strategy of coupled solution is rapidly convergent even in the presence of significant density variations. Calculations with grids as large as $39 \times 13 \times 18$ have been made successfully in modest computer time. The combustion efficiency calculated is in good agreement with experimental data.

Subject terms: Ducted rocket engine, Reacting flow, Flow distribution, Numerical simulation

1 引 言

火箭冲压发动机内部的掺混补燃机理及流场数值模拟, 国外虽已开展多年^[1], 但仍需建立准确的湍流流动和湍流燃烧模型, 寻找方便快捷的数值计算方法。作者曾研究了适用于补燃室流动特征的 $k-\epsilon$ 湍流模型和快速求解强椭圆性 N-S 方程的块隐式法, 并将其成功地运用到

* 收稿日期: 1997-11-01, 修回日期: 1998-02-25

无反应的湍流掺混流场的计算上^[1,2]。本文简要介绍湍流燃烧模型以及用上述方法对补燃室反应流场的计算。

2 湍流燃烧模型

火箭冲压发动机中,燃料和空气分别从不同的位置进入补燃室,燃烧速度很快,符合扩散火焰的假设,应该用湍流扩散火焰模型来描述。在湍流扩散火焰模型的快速反应假定之下,又划分为 $k-\epsilon-\bar{f}$ 模型(火焰面模型)和 $k-\epsilon-\bar{f}-g$ 模型(局部瞬时不混合模型)。火焰区取样分析和理论计算与实验结果的对比,证明 $k-\epsilon-\bar{f}-g$ 模型更准确地反映了实际情况。使用这一模型时,需要用 β 函数来构造密度、温度、总焓等流场变量对于混合分数 f 的概率密度分布函数,然后根据这些分布通过卷积来求得各变量的平均值^[3],计算十分繁琐。为简化计算,本文先确定 $p(f)$ 为城墙式分布,然后根据 g 值确定 f 的两个可能的取值 f_- 和 f_+ ,以及时间分数 α ,之后通过代数关系求得其它变量的均值。实践证明这一方法简单易行,又能够保证很高的精度。

需要指出的是,用有限体积法求解 $\bar{f}$ 的通量方程时,微元体虽小,但仍不能代表数学意义上的空间点,微元体内的 $\bar{f}$ 是由对流通量和扩散通量共同决定的,所以严格的讲,我们实际上已经作出了补燃室内的燃烧过程是由掺混控制的这一假设。

3 控制方程

定常反应流基本方程可以写成如下通用的形式:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \Phi - \Gamma_\Phi \nabla \Phi) = S_\Phi$$

式中 Φ 表示因变量, Γ_Φ 和 S_Φ 分别表示对应于 Φ 的交换系数和源项, $\vec{V}$ 表示速度矢量,其 3 个分量分别表示为 u, v 和 w 。交换系数和源项由表 1 所示。混合分数 f 定义为:

$$f = \frac{(m_{fu} - m_{ox}/S) - (m_{fu} - m_{ox}/S)_A}{(m_{fu} - m_{ox}/S)_B - (m_{fu} - m_{ox}/S)_A}$$

式中, m 代表质量百分比,下标 ox 和 fu 代表氧化剂和燃料, S 代表化学当量比, A 和 B 分别代表对应于纯氧化剂和纯燃料的混合状态。

g 定义为混合分数 f 的脉动均方值,即 $g = \bar{f}^2$,由于发动机为圆柱形,所以控制方程都用圆柱坐标系来表示。

湍流粘性系数 $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 和湍流模型有关的各常数项分别为: $C_\mu = 0.09, C_1 = 1.47, C_2 = 1.92, C_{g1} = 2.8, C_{g2} = 2.0, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, \sigma_f = 0.6, \sigma_g = 0.6, \sigma_h = 0.6$

密度的计算使用完全气体状态方程: $\rho = Mp/RT$, M 为混合物平均相对分子质量,由下式给出

$$\frac{1}{M} = \frac{m_{fu}}{M_{fu}} + \frac{m_{ox}}{M_{ox}} + \frac{m_{pr}}{M_{pr}}$$

m 代表质量百分比,三个下标分别代表燃料,氧化剂和产物。

混合物质量定压热容为: $C_p = \sum_i m_i C_{pi}$, 其中 $C_{pi} = a_i + b_i T + c_i T^2$

在能量方程中,总焓定义为:

$$h = m_{fu} H_{fu} + C_p T + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) + k$$

其中 H_{fu} 为单位质量燃料完全燃烧所施放的热能。

Table 1 Exchange coefficients and additional source terms

Φ	Γ_Φ	S_Φ
1	0	0
u	$\mu_l + \mu_t$	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)$
v	$\mu_l + \mu_t$	$\frac{\rho w^2}{r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\mu r \frac{\partial}{\partial r} (w/r) \right) - 2 \frac{\mu}{r} \left(\frac{\partial w}{r \partial \theta} + \frac{v}{r} \right)$
w	$\mu_l + \mu_t$	$-\frac{\rho v w}{r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{r \partial \theta} \right) + \frac{\mu}{r} \left(r \frac{\partial (w/r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{r \partial \theta} + \frac{2v}{r} \right) \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r} \right) \right)$
k	$\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$p_k - \rho \epsilon$ $p_k = \mu \{ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{r \partial \theta} + \frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{r \partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{r \partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right)^2 \}$
ϵ	$\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$C_{1k} p_k \epsilon / k - C_{2k} \rho \epsilon^2 / k$
$f >$	$\mu_l + \mu_t / \sigma_f$	0
g	$\mu_l + \mu_t / \sigma_g$	$C_{g1} P_g - C_{g2} \rho \epsilon g / k$ $P_g = \mu \left\{ \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{r \partial \theta} \right)^2 \right\}$
h	$\mu_l + \mu_t / \sigma_h$	0

4 计算方法与算例

采用有限体积法和交错网格系统离散控制方程，通量项的离散使用高精度的乘方定律格式。边界条件的处理见文献 [2]。由质量方程和三个动量方程组成的 N-S 方程组用块隐式法求解，其它标量偏微分方程用点迭代法求解。详细的算法这里不再赘述。

算例所用的模型发动机见文献 [2]，计算条件见文献 [2, 4]，所用燃料为乙烯。图 1~8 示出了不同截面上速度，温度和燃料分数的分布。从流场分布图上看，在燃料和空气剧烈掺混的地方，温度和燃料分数也呈现较大的分布梯度，这在理论上与所用的燃烧模型相一致。燃烧释放的热量引起密度和有效粘性系数的降低，从而改变了速度场的分布，可以看出，反应流产生的回流区比恒温流产生的回流区要大一些。

算例网格点数为 $39 \times 13 \times 18$ ，在速度相当于 586 微机的计算机上耗时不到 30min，即将残差减小到 10^{-3} ，算出的补燃效率为 82.5%。文献 [4] 划分的网格点数为 $24 \times 11 \times 11$ ，用 SIMPLE 法在 IBM3033 大型机上耗时 25min，将残差减小到 10^{-4} ，算出的补燃效率为 84%，而这一算例的实测补燃效率为 84.5%。从补燃效率上看，3 个结果基本一致。

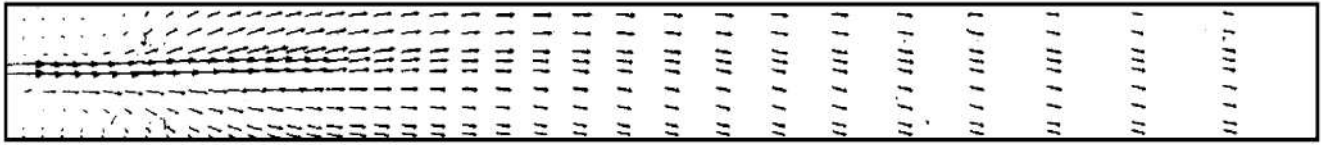


Fig. 1 Flow patterns in $(x-r)$ plane for $\theta=0^\circ$ (reacting flow)



Fig. 2 Flow patterns in $(x-r)$ plane for $\theta=45^\circ$ (reacting flow)

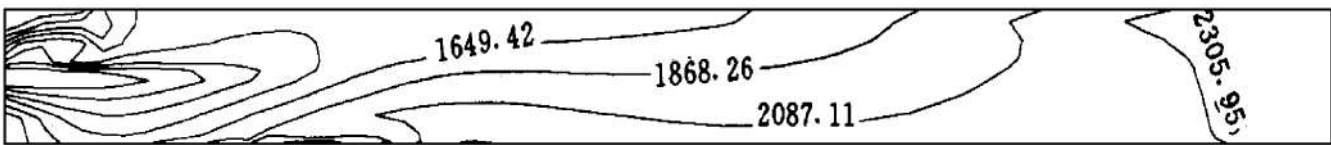


Fig. 3 Temperature (K) distribution in $(x-r)$ plane for $\theta=0^\circ$ (reacting flow)

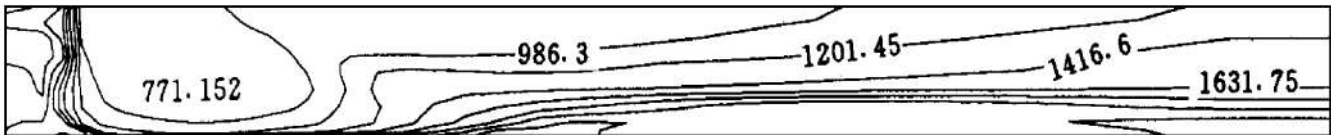


Fig. 4 Temperature (K) distribution in $(x-r)$ plane for $\theta=45^\circ$ (reacting flow)

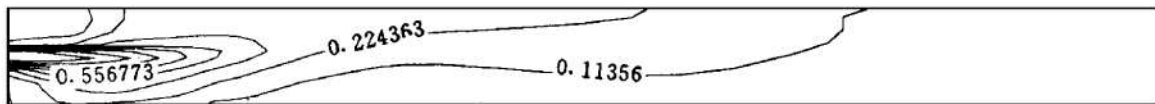


Fig. 5 Fuel Fraction distribution in $(x-r)$ plane for $\theta=0^\circ$ (reacting flow)

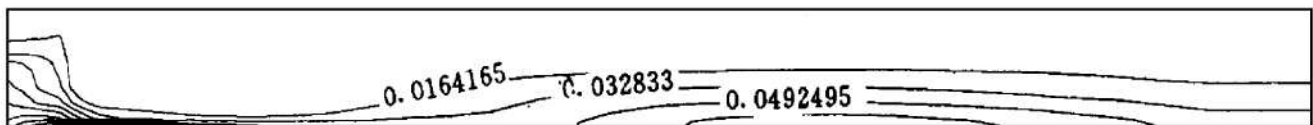


Fig. 6 Fuel Fraction distribution in $(x-r)$ plane for $\theta=45^\circ$ (reacting flow)

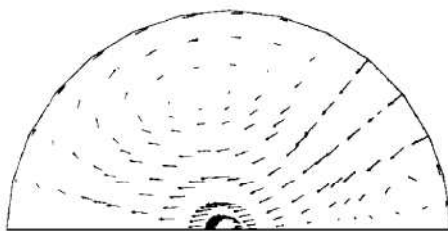


Fig. 7 Flow patterns in $(x-\theta)$ plane for $x=0.12\text{m}$ (reacting flow)

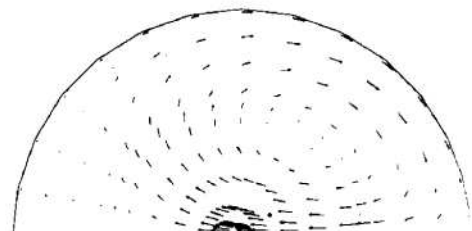


Fig. 8 Flow patterns in $(r-\theta)$ plane for $x=0.8\text{m}$ (reacting flow)

5 结 论

用块隐式法求解椭圆型 N-S 方程可大大加快收敛速度。在组织迭代时采取了合理控制各迭代层收敛精度的措施, 在实践中收到了很好的效果。

作者开发的程序能够在普通微机上对火箭冲压发动机内部的反应流进行快速准确的计算, 为工程设计带来了极大方便。点迭代法在网格很密时, 由于低频误差波的影响, 收敛精度难以提高, 另外在实际的固体火箭冲压发动机中, 贫氧燃料中含有大量的金属颗粒, 所以在此基础上, 还应引进多重网格技术和两相流理论。

参 考 文 献

- 1 马智博, 张振鹏, 蔡选义. 固体火箭冲压发动机补燃室流场的研究与进展. 航空兵器, 1997 (5)
- 2 马智博, 张振鹏, 蔡选义. 火箭冲压发动机掺混流场数值方法研究. 推进技术, 1998, 19 (4)
- 3 Vanka S P. Calculation of axisymmetric turbulent confined diffusion flames. AIAA 85-0141
- 4 Vanka S P. etc. Mixing, chemical reaction and flow field development in ducted rockets. AIAA 85-1271



《推进技术》喜获四连冠

正值《推进技术》发行 100 期之际, 又传喜讯, 在航天工业总公司第六次科技期刊评比中, 《推进技术》以其高质量, 再次被评为优秀科技期刊一等奖。至此, 《推进技术》成为航天科技期刊中唯一连续四次获得一等奖的刊物。此前, 在全国第二届科技期刊评比中, 曾获二等奖, 在航天科技期刊中, 也是最高奖。

多年来, 遵循办刊宗旨, 努力反映我国航天推进领域的最新成就, 为国家的经济建设和国防建设服务, 《推进技术》在国内外都有一定的影响。这些成绩的取得, 除编辑部全体同仁的努力外, 还得到广大作者、编委及读者的大力支持和帮助。航天情报所印刷厂为高质量出版, 作了很大努力, 在此表示感谢。

成绩代表过去, 新的征程已经开始。兄弟刊物的办刊质量提高很快, 有很多方面值得我们学习和借鉴。我们一定百尺竿头, 再进一步, 使办刊质量再上新台阶。

本刊通讯员