

乘方和 QUICK 格式在非对称扩压器内 流动计算的比较

西安交通大学 徐惊雷* 黄淑娟 徐 忠

【摘要】 采用 Speziale 的非线性 $k-\epsilon$ 模型计算了非对称扩压器内的流动,着重用数值方法考察了两种典型的对流差分格式(乘方格式和 QUICK 格式)对模型预测性能的影响,得出两种紊流模型对对流差分格式并不敏感的结论。

主题词: 扩压器 紊流 数学模型 数值计算

分类号: V211.3

1 控制方程及数学、物理问题描述

由 Speziale^[1,2]提出的非线性 $k-\epsilon$ 模型是根据非线性连续介质力学对线性本构关系的反思而得到的,它能够较好地反映法向雷诺应力,使计算结果能够更好地模拟实际流动情况。但是,有关非线性 $k-\epsilon$ 模型对不同对流差分格式的敏感性问题,目前尚未有人讨论过,而这一问题却是使用此模型时不可避免的问题。因此,本文以非对称扩压器为例,选择了两种典型的对流差分格(即乘方格式和 QUICK 格式),着重讨论了不同对流差分格式的影响。

定常、时均及不可压缩的流动控制方程组可以统一用张量形式表示为^[3]:

$$\nabla \cdot (\bar{U} \varphi - \Gamma \varphi \nabla \varphi) = S \varphi$$
$$\varphi = \begin{Bmatrix} 1 \\ U^i \\ k \\ \epsilon \end{Bmatrix} \quad \Gamma \varphi = \begin{Bmatrix} 1 \\ v + v_i \\ v + v_i / \sigma_k \\ v + v_i / \sigma_\epsilon \end{Bmatrix} \quad S \varphi = \begin{Bmatrix} 0 \\ S1 + S2 + S3 + S4 + S5 + S6 + S7 \\ P_k - \epsilon \\ C_1(\epsilon/k)P_k - C_2\epsilon^2/k \end{Bmatrix}$$

$$S1 = U^j U^k \Gamma_{jk}^n, \quad S2 = (1/\bar{g})(\partial/\partial x^j)(\bar{g} \Gamma \varphi g^{jk} U^m \Gamma_{mk}^i), \quad S3 = \Gamma \varphi g^{jk} U_{,n}^i \Gamma_{jn}^i$$

$$S4 = -(2/3)g^{ij}k_{,j}, \quad S5 = -(1/\rho)g^{ij}(\bar{q}/\partial x^j), \quad S6 = g^{ij}U_{,q}^j v_{k,j}, \quad S7 = R_{ij}^{ij}$$

代表由非线性模型产生的附加源项^[3]。式中所需的模型常数为: $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$; $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ 。壁面处采用壁面函数法进行。

当采用乘方格式时,某个节点 P 的周围 4 个节点对它的 4 个影响系数分别为:

$$a_E = D_A(|P_{\Delta E}|) + \max(-F_e, 0), \quad a_W = D_W(|P_{\Delta W}|) + \max(F_w, 0)$$

$$a_N = D_N(|P_{\Delta N}|) + \max(-F_n, 0), \quad a_S = D_S(|P_{\Delta S}|) + \max(F_s, 0)$$

当采用 QUICK 格式时,节点 P 周围的 4 个影响系数为:

$$\begin{aligned}
 aE &= \max \left[\left\{ D_e + \frac{3}{4}F_e \right\}, \left\{ D_e - \frac{3}{4}F_e - \frac{1}{8}F_w \right\}, \left\{ D_e - \frac{3}{4}F_e \right\}, \left\{ D_e + \frac{3}{4}F_e - \frac{1}{8}F_w \right\} \right] \\
 aW &= \max \left[\left\{ D_w - \frac{3}{4}F_w \right\}, \left\{ D_w + \frac{3}{4}F_w + \frac{1}{8}F_e \right\}, \left\{ D_w + \frac{3}{4}F_w \right\}, \left\{ D_w - \frac{3}{4}F_w + \frac{1}{8}F_e \right\} \right] \\
 aN &= \max \left[\left\{ D_n + \frac{3}{4}F_n \right\}, \left\{ D_n - \frac{3}{4}F_n - \frac{1}{8}F_s \right\}, \left\{ D_n - \frac{3}{4}F_n \right\}, \left\{ D_n + \frac{3}{4}F_n - \frac{1}{8}F_s \right\} \right] \\
 aS &= \max \left[\left\{ D_s - \frac{3}{4}F_s \right\}, \left\{ D_s + \frac{3}{4}F_s + \frac{1}{8}F_n \right\}, \left\{ D_s + \frac{3}{4}F_s \right\}, \left\{ D_s + \frac{3}{4}F_s + \frac{1}{8}F_n \right\} \right]
 \end{aligned}$$

同时由 P 点 4 个远邻点产生的影响以附加源项的形式合并到原方程的源项中去, 此处不再赘述。以上表达式中各量的具体说明可参见文献[5]。

本文以文献[4]为例, 用数值计算方法计算了非对称直壁扩压器内的流场。其几何参数为: 上壁为平板, 下壁为倾斜角 $\theta = 5.39^\circ$; 介质采用空气。扩压器进口宽度 $H = 1.2 \text{ m}$, $U_{in} = 15 \text{ m/s}$, $Re = 1200000$, 进口阻塞 $2\delta/H = 0.045$ 。由于进口条件对扩压器内部流场影响较大, 故采用文献[4]作法, 在进口处加一扰动涡, $U_p = C \cdot U_{in}(y/h - 0.5)$, C 为扰动系数, $C = -0.05 \sim 0.05$, 文中取 -0.025 。计算网格为 $(201, 20)$, 用微分法生成适体座标, 并且分别向前、向后延伸了 $30H_i$ 和 $20H_{io}$ 。

求解过程采用 SIMPLE 算法, 利用动量插值的概念在同位网格上完成了方程的离散和求解。迭代在 HP-9000 工作站上约需一个半小时, 达到收敛。收敛指标为:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \max(|Q_1 - Q|)/Q \leq 10^{-3}, \quad E_2 = \max(|\sum Q_m|)/Q \leq 10^{-4} \\
 E_3 &= \max(|Q_m|)/Q \leq 10^{-5}
 \end{aligned}$$

分别表示各横截面上计算流量、各节点压力修正方程中源项不平衡量的代数和、各节点上压力修正方程中最大源项不平衡量与进口流量的相对误差。

2 计算结果分析

以下图例当中, 标记 l-e 代表线性模型、乘方格式, l-q 代表性模型、QUICK 格式, n-e 代表非线性模型、乘方格式, n-q 代表非线性模型、QUICK 格式, 并且各坐标量已无量纲化。其中, X_{bar} 和 Y_{bar} 分别代表扩压器流动和截面方向的无量纲长度, 标准长度为 H_i ; U_{bar} , K_{bar} , $\tilde{u}$ 及 $\tilde{v}$ 分别代表用 U_{in} 无量纲化过的主流速度、紊动能、法向雷诺应力。实验点由文献[4]得到。

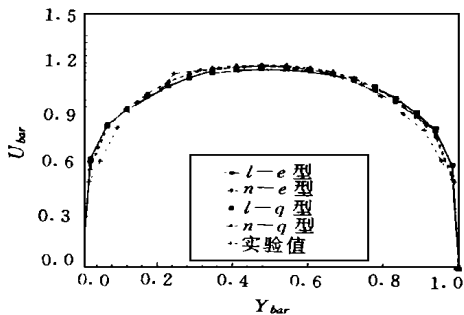


图 1 扩压器中间截面上的主流速度分布上

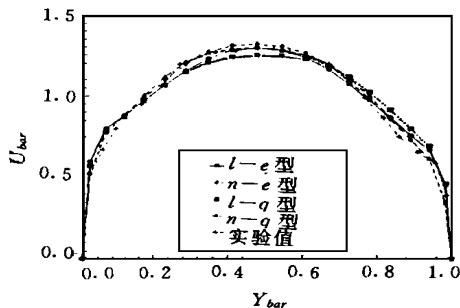


图 2 扩压器出口截面上的主流速度分布

图 1 是扩压器中间截面上的主流速度分布, 从图中可知, 4 种组合情形下的计算结果都与

实验值吻合很好, 仅在靠近壁面附近几个点上稍有差别。图 2 是扩压器出口截面上的主流速度分布, 4 种情形下的计算结果与实验符合很好(图 1 和图 2 中, ● $l-e$ 模型, ◇ $n-e$ 模型, □ $l-q$ 模型, △ $n-q$ 模型, + 实验值)。图 3 是压力恢复系数 C_p 的曲线, 从图中可知, 各种组合情形下的 C_p 值也与实验值吻合较好(除了扩压器进口处几个点上偏差较大外, 其余压力升高范围及趋势完全一样。进口处的偏差可能与扩压器进口处的尖点有关。)从以上分析和对比可推知: 本文在 4 种组合情形下的计算结果是正确的。

进口、中间和出口 3 个截面上法向雷诺应力的均方根 $\tilde{u}$ 和 $\tilde{v}$ 的计算结果参见图 4~图 6。由于没有具体

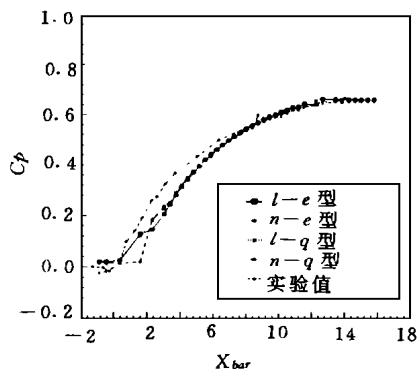


图 3 压力恢复系数 C_p

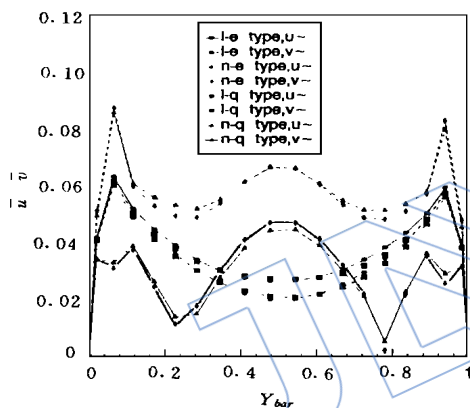


图 4 进口截面法向雷诺应力

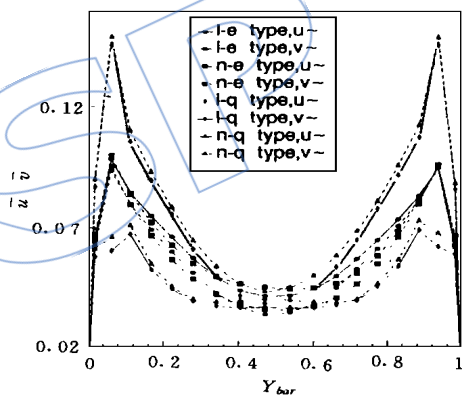


图 5 中间截面法向雷诺应力

的实验结果作定量比较, 因此仅作定性分析。从 3 个截面上的法向雷诺应力分布的趋势, 可以得出如下结论: (1) 只要采用非线性 $k-\epsilon$ 模型, 不论采用何种对流差分格式, 都能明显地反映紊流的各向异性。进口、中间及出口截面上同一点的 $\tilde{u}$ 和 $\tilde{v}$ 的最大差值可分别达到 0.055, 0.084 和 0.1 左右; 而采用线性模型时, 各截面上的 $\tilde{u}$ 和 $\tilde{v}$ 就很接近, 最大差值仅有 0.007 左右。此外, 非线性模型得出的 $\tilde{u}$ 和 $\tilde{v}$ 的最大差值在紊流各向异性电子出版系统强烈的壁面附近, 与物理实际相符; 而线性模型得出的最大差值却位于主流区中部, 壁面附近 $\tilde{u}$ 约等于 $\tilde{v}$ 。可见, 非线性模型的确能反映出紊流的各向异性; (2) 当采用同一种紊流模型、不同的对流差分格式时, 得到的结果

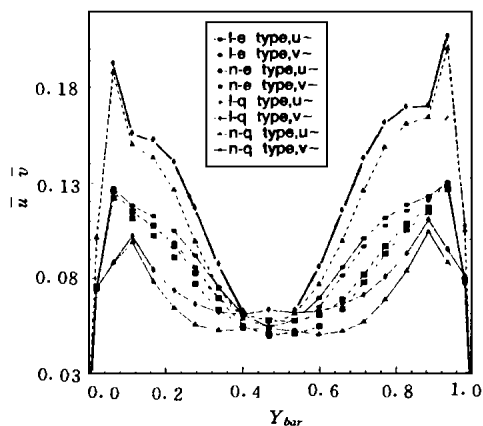


图 6 出口截面法向雷诺应力

变化趋势和大小基本相同, 这表明这两种紊流模型对对流差分格式的选用并不敏感, 至少在定性是完全相同; (3) 随着流动的进行, 紊流越来越强烈, $\tilde{u}$ 和 $\tilde{v}$ 的绝对值增大, 这也与实际的物理事实相一致。

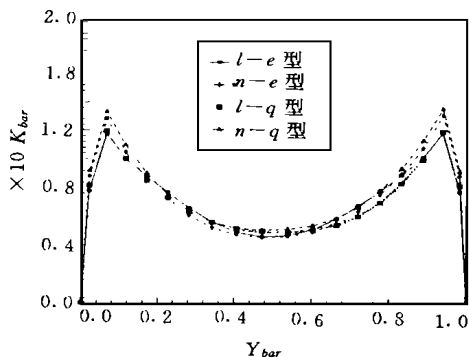


图 7 中间截面上紊动能分布

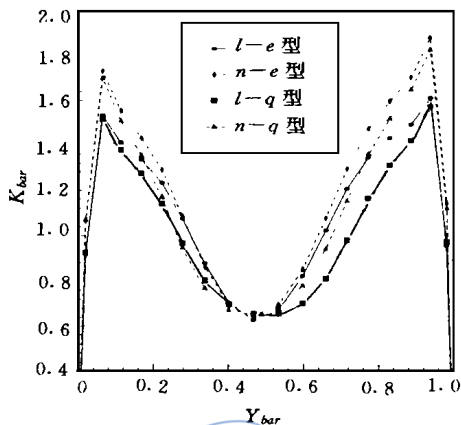


图 8 出口截面上紊动能分布

图 7 和图 8 还给出紊动能 k 在中间和出口截面上的分布曲线, 不论采用何种模型和何种对流差分格式, 它们都呈明显的中间低、两头高的曲线分布, 这也与壁面附近紊动能大于流场中心的紊动的物理事实相符。图上还反映出: 尽管采用不同的对流差分格式时所得到的结果在具体数值上稍有差别, 但是所得曲线一致, 定性上没有差别。至于孰优孰劣, 那就需要用准确详实的紊流实验数据来判定了。

3 结 论

(1) 非线性 $k-\epsilon$ 模型能反映紊流各向异性, 特别是在各向异性强烈的紊流区域更加明显; (2) 采用相同模型、不同对流差分格式时, 所得结果基本相同, 表明线性、非线性两种紊流模型对对流差分格式并不敏感, 至少在本文所讨论的算例中是这样。这就为我们以后使用这种模型扫清了顾虑; (3) 不同紊流模型计算出的压力恢复系数、主流速度分布、紊动能等参数的结果很接近, 但是计算出的法向雷诺应力有区别。

参 考 文 献

- Speziale C G. On Nonlinear $k-\epsilon$ and $k-\epsilon$ Models of Turbulence. J. Fluid Mech, 1987, 178
- Speziale C G, Tuan Ngo. Numerical Solution of Turbulent Flow Past a Backward Facing Step Using a Nonlinear $k-\epsilon$ Model. Int. J. Engg. Sci. 1988, 26(1):
- 赖焕新. 非线性 $k-\epsilon$ 紊流模型及二维复杂流动数值模拟: [硕士论文]. 西安交通大学, 1994
- Ming S Y, Song C S. Numerical Analysis of Turbulent Flow in a Two-Dimensional Nonsymmetry Diffuser. ASME J. Fluid Engg., 1984, 106
- 陶文铨编. 数值传热学. 西安交通大学出版社, 19

that the film cooling effectiveness would be much greater than that found in the downstream of a circular hole.

Key Words Jet Flow fields Experiment

A SURVEY ON PROPELLANT LEAK DETECTION TECHNIQUES FOR LIQUID ROCKET PROPULSION SYSTEM

Wang Jianbo and Yu Daren

(*Dept. of Energy Engineering and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

ABSTRACT The integrity test of Liquid Rocket Engine (LRE) must be carried out before its launch. The tests include the leak detection of liquid propellant and other liquid systems. It is necessary to set up an automated propellant leak detection system. This paper summarizes the leak detection techniques of LRE, which are classified into groups and considered in details. Finally, several prospects of the leak detection techniques are presented.

Key Words Liquid rocket engines Propellants Leakage Fault detection

“POWER- LAW ” AND “QUICK ” SCHEMES IN NUMERICAL STUDY OF NONSYMMETRY DIFFUSER

Xu Jinglei, Shujuan Huang, Xu Zhong

(*Dept. of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*)

ABSTRACT Speziale's nonlinear $k-\epsilon$ model is used to calculate the turbulent flow in nonsymmetry diffuser. Attention is focused on effect of the two typical convective difference schemes, “Power- Law ” and “QUICK ” schemes, on the performance of the models (the standard and nonlinear $k-\epsilon$ models). The results show that both convective difference schemes have little effect on the prediction of the models. So it is no longer to puzzle brain about choice of convective difference schemes, when applying to nonlinear $k-\epsilon$ models.

Key Words Diffusers Turbulent flow Mathematical models
Numerical computation

APPLICATION OF A SECOND- ORDER UPWIND SCHEME TO PISO ALGORITHM

Lin Weidong, Wang Zhenguo, Zhou Jin

(*1st Dept. National University of Defense Technology, Changsha 410073*)

ABSTRACT Numerical simulation of spray combustion in liquid propellant rocket engine with PISO algorithm was implemented. A second- order upwind scheme developed by the authors was combined with the PISO algorithm to ensure the numerical accuracy. The Navier- Stokes equation in cylindrical coordinates was transferred into general curvilinear coordinate system and discretized by finite- volume method with non- staggered grid. The body- fitted grid generated by TTM method was used in the calculation. A stochastic spray model was employed to determine the droplet initial conditions, and the chemical reac-