

文章编号: 1000-8055 (2001) 01-0028-05

数值模拟二维喷管激波/湍流 附面层干扰流动

王国庆, 梁德旺

(南京航空航天大学 动力工程系, 江苏 南京 210016)

摘要: 采用可压缩性修正两方程湍流模型, 数值模拟了 3 种不同波前马赫数的跨声速二维喷管内激波/湍流附面层干扰流动, 对流场中时均参数和脉动参数的计算结果与实验值进行了比较。结果表明可压缩性修正的两方程湍流模型准确地模拟了正激波/湍流附面层干扰流动的时均参数和脉动参数, 无分离和有分离的激波/湍流附面层干扰流动的基本规律。

关键词: 可压流; 湍流; 激波边界层干扰; 数值计算

中图分类号: O 357. 42

文献标识码: A

1 引言

在激波/湍流附面层干扰区域由于激波的存在, 沿着流动方向流动参数变化剧烈如激波前后压力梯度很大, 同时引起可压流体特性的一些变化。Sarkar S^[1]发现随着湍流马赫数 M_a 的增大流体参数的脉动量也逐渐增大, 并引起湍流结构及湍流动力性能的变化, 考虑湍流马赫数将有利于处理流体可压缩性影响。Wilcox D C^[2], Zeman O^[3], Sarkar S^[1, 4]各自提出了关于流体可压缩性的膨胀耗散模型或压力—膨胀模型。本文采用同时含有膨胀耗散模型和压力—膨胀模型的可压缩性修正两方程湍流模型^[5]模拟Delery J^[6, 7]中 3 个状态下的喷管内激波/湍流附面层干扰流动。

2 数值方法及算例

本文采用时间相关法求解雷诺时均 N-S 方程, 其中空间采用格心格式的有限体积法, 时间采用三步龙格—库塔法 (CFL 数为 2.5), 粘性项的计算采用中心格式, 对流项采用二阶和四阶人工粘性项 ($K^{(4)} = 1.0$, $K^{(2)} = 0.5$) 的 Jameson^[8]

方法, 并采用当地时间步长等加速收敛技术。湍流模型选用可压缩性修正的 Launder/Sharma $k-\epsilon$ 模型^[9]、双层 $k-\epsilon$ 模型^[10], 标准 $k-\omega$ 模型^[11]以及 Wilcox $k-\omega$ 模型^[11] 4 个可压缩性修正两方程湍流模型^[5]。

本文算例采用 Delery J^[6, 7] 3 种不同波前马赫数的激波/湍流附面层干扰流动实验中的几何型面及实验结果。该喷管长 900 mm, 宽 120 mm, 高 100 mm, 并认为宽为 60 mm 截面上的流动近似为二维流动。为方便起见, 将 3 种激波/湍流附面层干扰流动现象分别称为: 未分离状态 (Incipient Separation), 分离状态 (Separation), 大分离状态 (Large Separation)。以未分离状态和大分离状态喷管为例, 图 1 给出了其计算网格示意图。

文中 3 个算例进出口均为亚声流动, 以双层 $k-\epsilon$ 模型为例表 1 给出该算例中各流动状态下进出口条件参数值。其中 3 种状态相同的来流条件为: 总压 $p_t = 96000$ Pa, 总温 $T_t = 300$ K, 附面层厚度 $\delta_\infty = 0.1$ mm, 湍流度 $T_u = 0.3\%$, 其他条件如表 1 所示。

收稿日期: 2000- 03- 20; 修订日期: 2000- 10- 20

基金项目: 国家教育部“优秀跨世纪人才”基金资助项目; 江苏省教委“青蓝工程”资助项目

作者简介: 王国庆 (1973-), 男, 南京航空航天大学能源与动力学院博士研究生

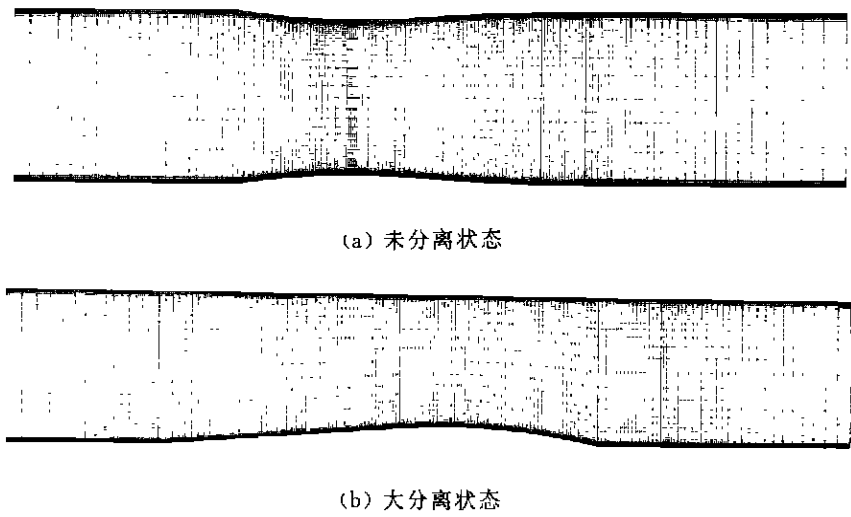


图 1 计算网格

表 1 各流动状态下的进出口边界条件

流 动 状 态	进口截面参数		出口截面参数
	$M a_{\infty}$	Re_1 (1/m)	静压 p_b /Pa
未分离状态	0.67	$1.16\text{E}+07$	$6.2\text{E}+04$
分离状态	0.55	$1.02\text{E}+07$	$6.3\text{E}+04$
大分离状态	0.62	$1.11\text{E}+07$	$6.0\text{E}+04$

状态流场中的最大马赫数最大, 而未分离状态和大分离状态的几乎相同。由 3 种状态下喷管型面知道未分离和分离状态的喷管几何型面在激波/附面层干扰区为凹, 而大分离状态喷管几何型面为凸。由此说明激波诱导附面层分离因素有波前最大马赫数及流体流经的型面。

表 2 各状态流场中最大马赫数

流场最大马赫数	未分离状态	分离状态	大分离状态
实验值	1.40	1.60	1.42
计算值	1.398	1.576	1.397

3 计算结果

激波前的最大马赫数反映了激波的强度, 因此比较 3 种状态下流场中实验结果和计算结果的最大马赫数值, 如表 2 所示。计算结果与实验结果吻合较好, 同时还可以知道在 3 种状态中分离

图 2, 图 3 和图 4 分别为未分离、分离和大分离状态下沿程壁面压力分布图。图中横坐标为沿

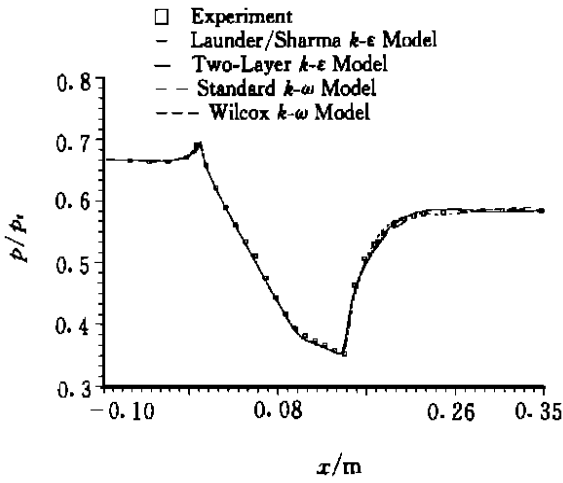


图 2 未分离状态沿程压力分布图

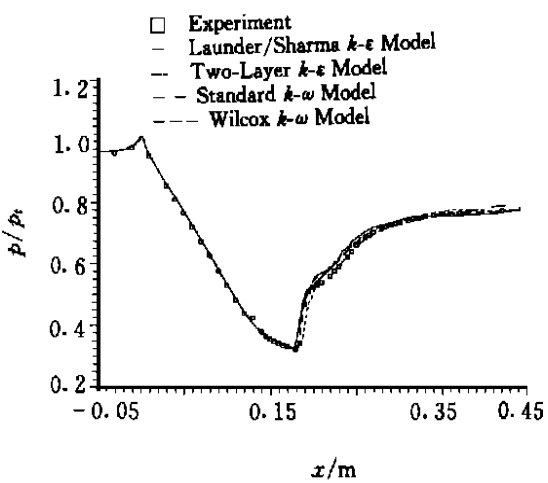


图 3 分离状态沿程压力分布图

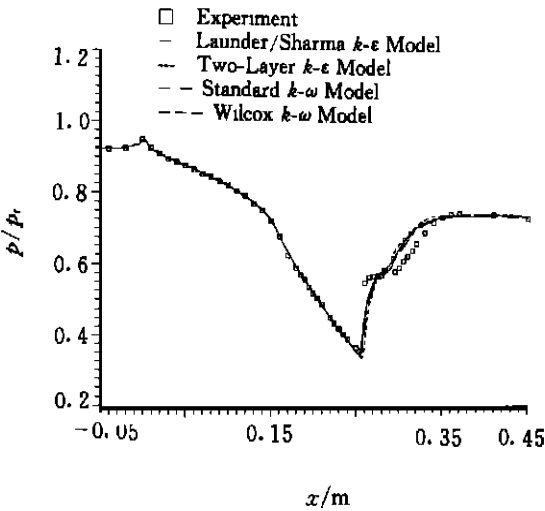


图 4 大分离状态下壁面压力分布图

流动方向距进口的距离 x ，纵坐标为壁面静压 p 与来流总压 p_i 之比 p/p_i ；空心方块为实验结果，实线及虚线为计算结果。由图 2 和图 3 可见，计算结果很好地模拟了整个壁面压力分布。在图 4 中的激波/湍流附面层干扰区域，计算结果与实验结果基本吻合。主要因为本文用的可压缩性修正两方程湍流模型没有考虑型面凹凸对附面层发展的影响以及两方程湍流模型对激波/湍流附面层干扰区域的模化有待改进，同时激波/湍流附面层干扰区域的时均速度 u 分布、横向湍能 k 分布及横向雷诺应力 τ 分布模拟也反映了这一点。

图 5 为未分离状态横向时均速度 u 分布图，横坐标为时均速度 u 与附面层边缘处时均速度 u_e 之比 u/u_e ，纵坐标为距壁面的距离。在干扰前（如 $x = 0.12884 \text{ m}$ ）与干扰后（如 $x = 0.27896 \text{ m}$ ），速

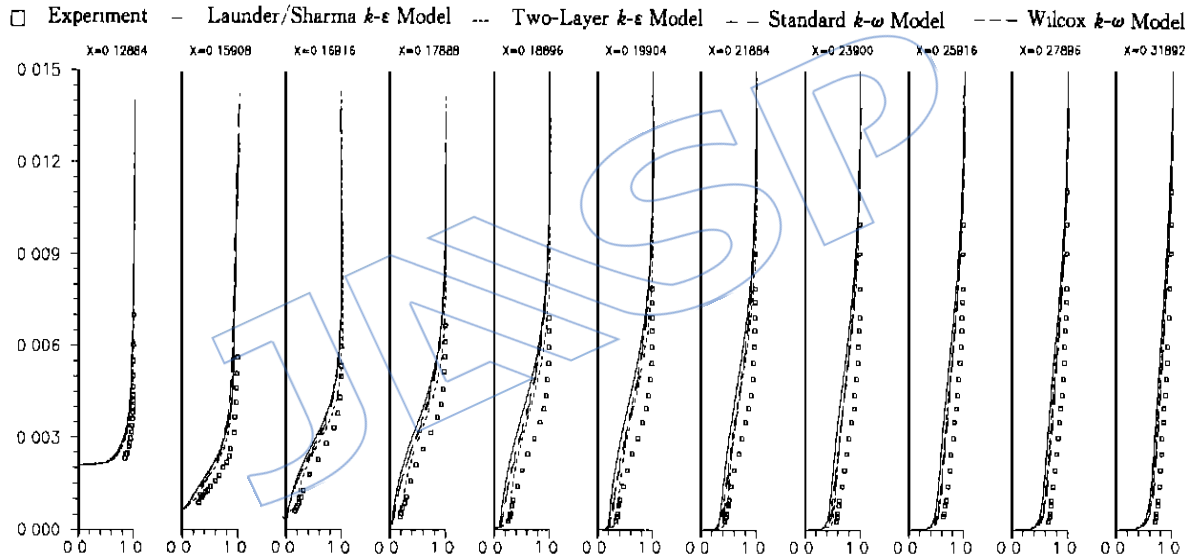


图 5 未分离状态横向速度 u 分布

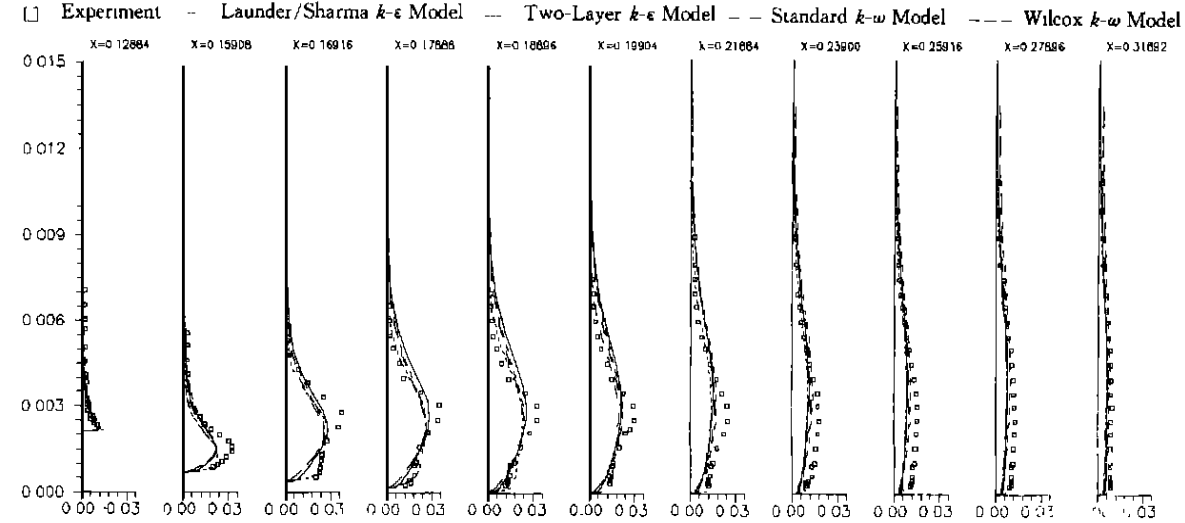


图 6 未分离状态横向湍能 k 分布

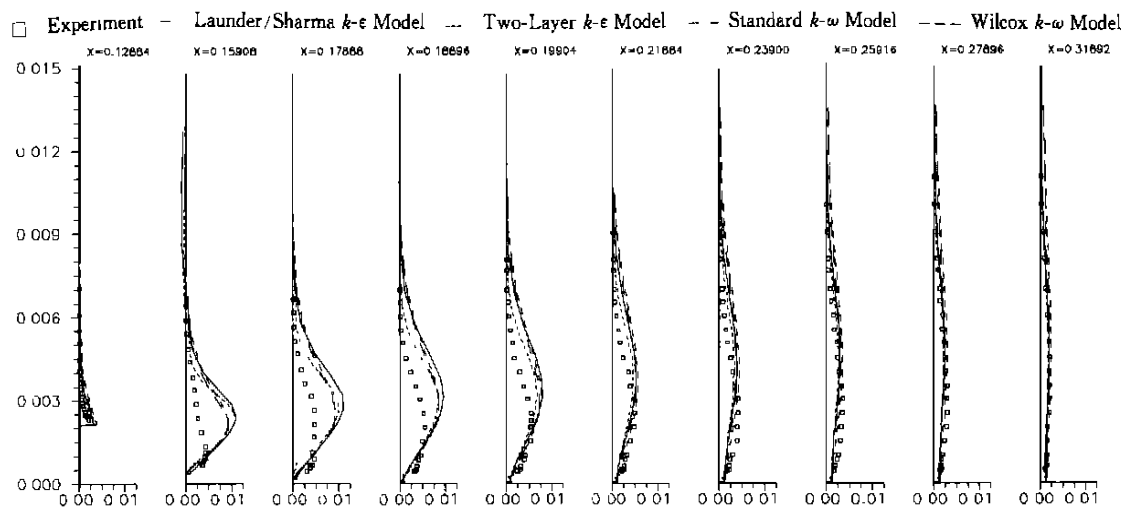


图 7 未分离状态横向雷诺应力 τ 分布

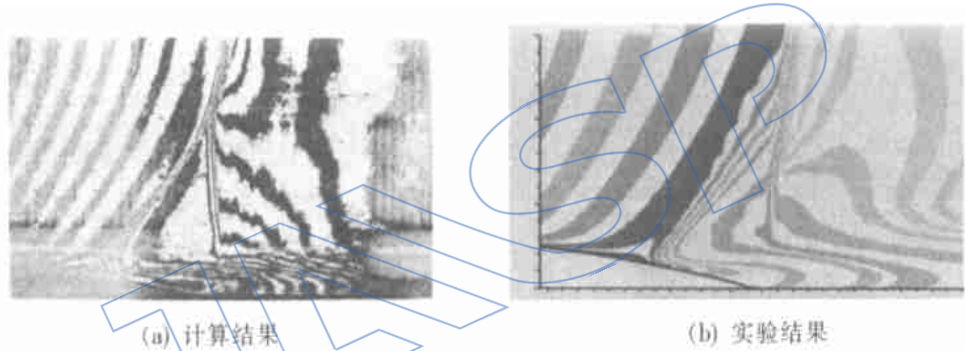


图 8 等密度线图

度 u 的计算结果与实验值吻合得很好; 在干扰区内, 横向时均速度 u 的计算结果稍为偏小。

图 6 为未分离情况横向湍能 k 分布图, 横坐标为湍能 k 与滞止马赫数 a_i 的平方之比 k/a_i^2 ; 纵坐标为距壁面的距离。计算结果较好地模拟了湍能 k 的横向变化规律, 各截面上横向湍能 k 的计算结果与实验值吻合得较好。

图 7 为未分离状态横向雷诺应力 τ 分布图, 横坐标为雷诺应力 τ 与滞止马赫数 a_i 的平方之比 τ/a_i^2 , 纵坐标为距壁面的距离。在干扰前后, 横向雷诺应力 τ 的计算结果与实验值吻合得很好; 在激波/湍流附面层干扰开始处后几站, 计算结果明显大于实验结果, 然后又与实验结果吻合很好。

图 8 为大分离状态激波/湍流附面层干扰区 (a) 实验流场与 (b) 计算流场的等密度线图。由图 8 可见, 计算结果准确预测了分离的存在并准确模拟了激波根部分离流场的基本结构, 表明可压缩性修正两方程湍流模型对激波诱导大分离流

动模拟效果也比较理想。

4 结束语

本文采用可压缩性修正的两方程湍流模型准确地模拟了未出现分离情况下的激波/湍流附面层干扰流场中的时均参数 (如速度 u 和压力 p) 和脉动参数 (如湍能 k , 雷诺应力 τ), 并较好模拟了存在分离的激波/湍流附面层干扰流动的压力分布及基本流动特征。

参考文献

[1] Sarkar S, Erlebacher G, Hvssaini M Y, Kreiss H O. The Analysis and Modeling of Dilatational Terms in Compressible Turbulence [R]. ICA SE REPORT 89- 79 (1989).

[2] Wilcox D C. Progress in Hypersonic Turbulence Modeling [R]. AIAA- 91- 1785

[3] Otto Zeman. Dilatation Dissipation: The Concept and Application in Modeling Compressible Mixing Layers [J].

- Phys Fluid A 2 (2), 1990: 657- 664
- [4] Sarkar S The Pressure-Dilatation Correlation in Compressible Flows [J]. Phys Fluids A 4 (12), December 1992, P2674- 2682
- [5] 梁德旺, 王国庆 两方程湍流模型的可压缩性修正及其应用 [J]. 空气动力学学报, 2000, 18 (1): 98- 106
- [6] Delery J M, Investigation of Strong Shock-Turbulent Boundary Layer Interaction in 2D-Transonic Flows with Emphasis on Turbulence Phenomena [R]. AIAA Paper 81- 1245
- [7] Delery J M. Experimental Investigation of Turbulent Properties in Transonic Shock/Boundary Layer Interactions [J]. AIAA Journal, 1983, 21: 180- 185
- [8] Jameson A, Schmidt W, Turkel E. Numerical Solution of the Euler Equations by Finite Volume Methods Using Runge-Kutta Time Stepping Schemes [R]. AIAA 81- 1259
- [9] Launder B E, Shama B I Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to Calculation of Flow Near a Spinning Disc [J]. Letters in Heat and Mass Transfer, 1974, 1 (2): 131- 138
- [10] 梁德旺, 吕兵, 关于两方程湍流模型的考虑 [J]. 航空动力学报, 1999, 14 (3): 197- 200
- [11] Wilcox D C. A Half-Century Historical Review of the Model [R]. AIAA Paper 91- 0615

(责任编辑 杨再荣)

Numerical Simulation of Shock/Turbulence Boundary Layer Interaction in Two-Dimensional Nozzles

WANG Guo-qing, LIANG De-wang

(2nd Dept., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Four kinds of two-equation turbulence model ($k-\epsilon$ and $k-\omega$ model) with compressibility modification, including the dilation-dissipation term and pressure-dilation term respectively, coupling with a full Reynolds-averaged Navier-Stokes code were used to simulate numerically the shock/turbulent boundary layer interactions, which occur in three different two-dimensional transonic nozzles with different Mach numbers in front of the shock. The computational results of both the time-averaged parameters, such as the velocity (u , the velocity along the x -coordinate) and the pressure (P , along the lower wall surface), and the pulsating parameters like the turbulent kinetic energy (k) were compared with the experimental results. The computational density contour of large separation case was compared with the experimental density contour. It is shown that when the two-equation turbulence models with compressibility modification are used to simulate the shock/turbulent boundary layer interaction, they predicate not only the distribution of the time-averaged parameters and the pulsating parameters but also the basic feature of the flow with or without separation.

Key words: compressible fluid; turbulence; shock/boundary layer interaction; numerical computation