

文章编号: 1000-8055(2008)10-1888-04

S 弯扩压器中四种湍流模型的比较

张丽芬, 刘振侠, 吕亚国
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 采用 Realizable $k-\varepsilon$, S-A (Spalart-Allmaras), SST (Shear stress transport 剪切应力输运), RSM (Reynolds stress equation model 雷诺应力模型) 四种湍流模型对 S 弯扩压器内的分离流动进行了模拟, 分析了不同湍流模型对计算结果的影响。将不同轴向位置的表面压力系数、分离区的大小、马赫数等三个量的实验值与计算值进行了比较, 结果表明: 分离区湍流模型对表面压力分布影响较大, 未分离区不同湍流模型模拟精度相当; S-A 模型对分离区的模拟较保守, RSM 模型对分离的模拟精度较高, SST 与 RSM 模拟结果很接近; 各湍流模型计算的高速区域均比实验值大。扩压器的平均总压恢复系数受湍流模型影响不大, 和实验结果吻合较好。

关 键 词: 湍流模型; S 弯扩压器; Realizable $k-\varepsilon$; S-A (Spalart-Allmaras); SST (Shear stress transport 剪切应力输运); RSM (Reynolds stress equation model 雷诺应力模型)
中图分类号: V211.48; V211.3 **文献标识码:** A

Comparison of four turbulence models in diffusing S-duct

ZHANG Li-fen, LIU Zhen-xia, LÜ Ya-guo

(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Four turbulence models: Realizable $k-\varepsilon$, S-A (Spalart-Allmaras), SST (Shear stress transport) and RSM (Reynolds stress equation model), were compared by simulating separated flow in a diffusing S-duct. The numerical results show the capability of each turbulence model in dealing with separation. Before separation, the predicted results agree well with experiment for four models, but in separated region, the turbulence model has important effect in simulating separation. SST model is compared to RSM in simulating separation and pressure coefficient, however not as clearly as RSM. S-A model under predict the separation and the separated region is smaller than experiment. Mach number is higher than experimental data for four models. Pressure recoveries are similar for different models, and are within 0.7 % agreement with experimental data.

Key words: turbulence model; diffusing S-duct; Realizable $k-\varepsilon$; S-A (Spalart-Allmaras); SST (Shear stress transport); RSM (Reynolds stress equation model)

由于气动和隐身方面的优点, S 弯扩压器在飞机进气道设计中得到了广泛应用, 如美国代号“全球鹰”的无人机, F-16, F-18 战斗机。但是由于

扩压作用和复杂的形状, 使得管道上壁或者下壁极易出现分离, 分离流动增强了出口旋流、降低了总压恢复系数。在数值计算中如何准确地模拟分

收稿日期: 2007-10-15; 修订日期: 2008-02-20

作者简介: 张丽芬(1980-), 女, 河北石家庄人, 博士生, 主要从事内流气动力学研究。

联系人: 刘振侠 029-88494394, E-mail: zxlou@nwpu.edu.cn

离流动和湍流模型有很大关系. 文献[1]研究了超声速大迎角分离流中三种湍流模型的模拟能力, 比较了不同湍流模型对空间主体涡和近壁二次分离涡的模拟精度, 发现在中等分离流动下, SST (Shear stress transport) 和 RSM (Reynolds stress equation model) 的计算精度相当. 文献[2]对比了三种湍流模型的模拟能力, 结果表明大攻角、大分离的流动 J-K92 模型体现出更好的模拟能力. 文献[1-2]中考察的是湍流模型模拟外流场的能力, 而在 S 弯扩压器的内流中既有附面层分离引起的分离涡, 也有管道曲率引起的横向截面上的对涡, 湍流模型影响会是什么样的? 这是本文关注的焦点, 基于这样的想法, 本文考察了 Realizable $k-\varepsilon$, S-A (Spalart-Allmaras), RSM, SST 四种湍流模型在模拟 S 弯扩压器分离流动的差异, 通过比较选择了适合的湍流模型.

1 湍流模型

S-A^[3]模型是应用广泛的一方程模型, 相对于两方程模型计算量小, 对于带有分离的流动, S-A 会抑制分离, 计算精度有所降低. Realizable $k-\varepsilon$ ^[4]是在标准 $k-\varepsilon$ 基础上将 C_μ 表示为湍流时间尺度与应变张量和旋转张量的函数, 可应用于管道内流动、边界层流动、带有分离的流动等. SST 湍流模型综合了 $k-\omega$ 在近壁模拟和 $k-\varepsilon$ 在外部模拟的优点, 既能够模拟大分离的流动, 又克服了模拟对自由流条件比较敏感的缺陷, 提高了模型的稳定性^[1]. 以上三种湍流模型均是基于 Boussinesq 的涡粘假设. 而 RSM 模型则直接求解雷诺方程中湍流脉动应力项, 由于雷诺应力模型抛弃了 Boussinesq 假设中各向同性湍流动力粘度及湍流应力与时均速度梯度呈线性关系的假设, 因而不均匀的、各向异性的湍流运动尤其能显示其优越性^[5].

2 计算方法

控制方程为直角坐标系下的三维非定常 N-S 方程组, 采用控制容积法离散微分方程, 对流项采用二阶迎风格式, 扩散项采用中心差分, 压力速度耦合采用 SIMPLE 方法. 连续、动量、能量方程耦合求解, 变步长以加快收敛, 计算采用商用软件 FLUENT 完成.

3 计算对象与网格

本文计算对象是一个横截面为圆形的 S 形扩

压器, 其进口直径 D_1 为 20.4 cm, 出口直径 D_2 为 25.1 cm, 中心线是由两个在同一平面上半径 R 为 102.1 cm 的 30° 圆弧构成, 为了减小进出口边界的影响, 计算域分别向两侧延伸了 $3.75 D_1$ ^[6], 如图 1 所示. 图 1 中 a 截面位于进口前 $D_1/2$ 处, 其中心点作为参考点, 实验测量的壁面压力分别在图中 b, c, d 三个截面上进行, e 截面位于出口后 $D_1/2$ 处.

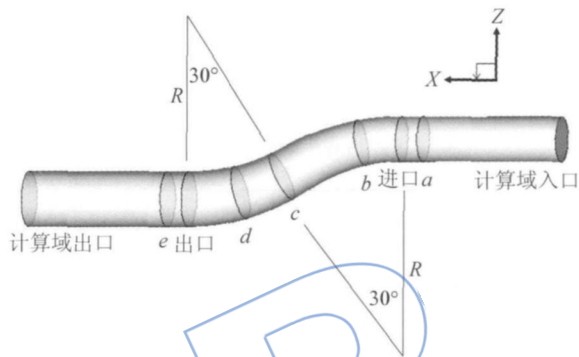


图 1 S 弯扩压器模型图

Fig. 4 Geometry of the diffusing S-duct

采用结构化网格, 贴近壁面处第一层网格离开壁面的距离为 $2.4 \times 10^{-3} D_1$, 共 8 层, 增长比例 1.2, 边界层网格高 0.825 cm, 网格总数 20 万, 对称及出口截面的网格如图 2.

计算条件为: 入口来流 $Ma_\infty = 0.6$, $p_0 = 101000 \text{ Pa}$, $T_0 = 298 \text{ K}$, 出口给定压力出口边界条件.

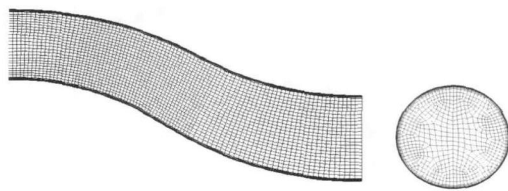


图 2 对称及出口截面网格图

Fig. 2 Grids at symmetrical section and exit

4 结果分析

4.1 壁面压力比较

壁面压力采用无量纲的压力系数, 定义如下

$$C_p = \frac{p - p_{\text{ref}}}{p_{0,\text{ref}} - p_{\text{ref}}}$$

其中 $p_{0,\text{ref}}$ 为参考点的总压, p_{ref} 为参考点的静压, 参考点为 a 截面的中心点. 比较了沿程 b, c, d 三个截面 (如图 1) 的壁面压力系数, 由于管道是对称的, 只比较了管道一侧壁面的压力系数, 如

图 3.

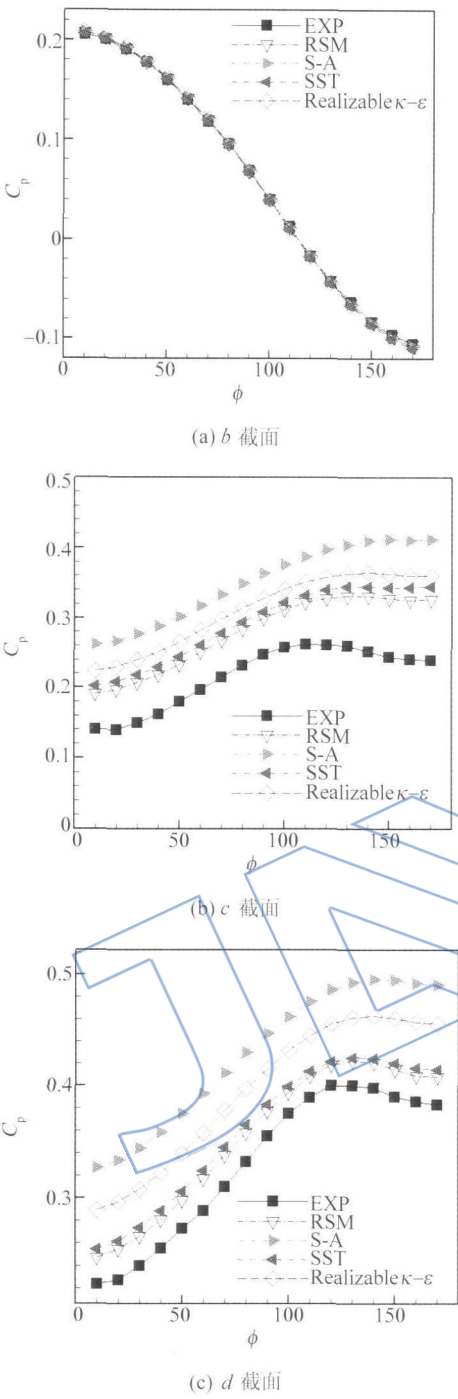


图 3 三个截面压力系数与实验值对比
Fig. 3 Comparison of pressure coefficients at three sections

图 3 中, b 截面不同的湍流模型计算结果与实验值^[6]吻合的非常好;而 c 截面不同湍流模型则表现出较大的差异, RSM 模型与实验值最接近, SST 稍逊于 RSM, Realizable $k-\epsilon$ 比 SST 稍差, S-A 的模拟能力最差; d 截面各模型也表现出一定差异, 但与实验值的吻合程度要比 c 截面好.

这是因为 b 截面在一弯的中间还未发生分离处, 因此不同湍流模型模拟精度相当;而 c 截面位于分离区, 不同湍流模型对分离的捕捉能力不同, 因此表现出较大差异; d 截面位于分离区的尾部, 其分离强度有所减弱, 因此各湍流模型的差异要比 c 截面小.

通过以上分析看出, 在未发生分离的区域, 各湍流模型的模拟精度相当, 在发生分离的区域, 模拟结果受湍流模型的影响较大.

4.2 e 截面马赫数比较

图 4 是四种湍流模型计算的 e 截面马赫数与实验值^[7]的对比, 每张图中左侧为实验值右侧为计算值. Realizable $k-\epsilon$, SST, RSM 三种模型的模拟结果较相似, 马赫数等于 0.3 的等值线与实验值很接近, 而马赫数大于 0.4 的区域比实验值要大. S-A 模型模拟的 e 截面所有马赫数等值线都高于实验值, 这与 S-A 模型对分离涡的模拟较为保守有关.

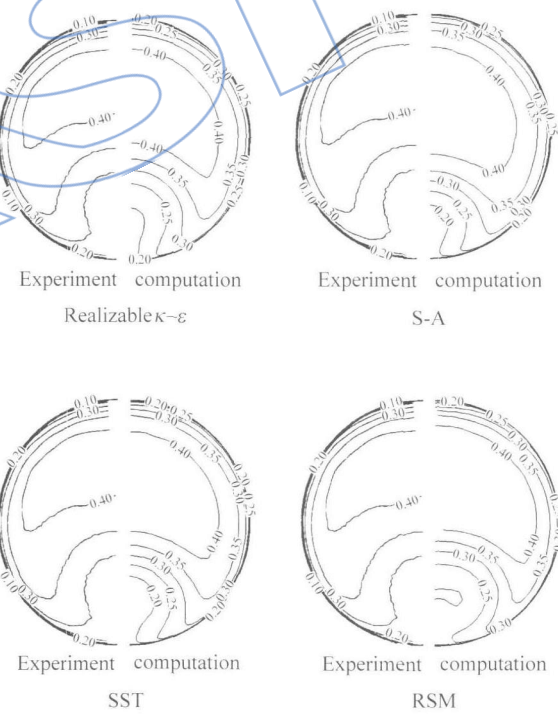


图 4 e 截面马赫数与实验值对比
Fig. 4 Comparison of Mach number at section e

4.3 分离区比较

图 5 是不同湍流模型对分离区域的模拟. 图中看出 S-A 对分离的模拟较保守, 计算得分离区最小, Realizable $k-\epsilon$ 计算的分离区比 S-A 的大, 但比 SST 模拟的分离区要小, SST 与 RSM 模型模拟的分离区的范围较接近.

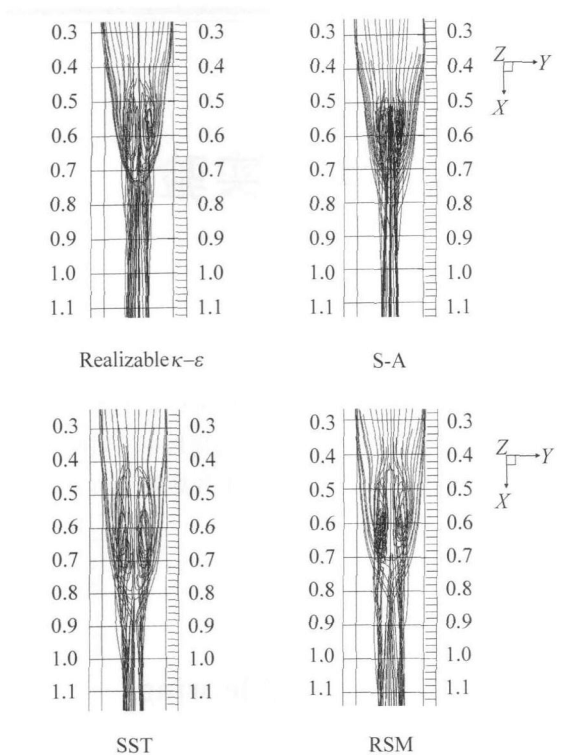


图 5 四种湍流模型计算的分离区

Fig.5 Separated regions for four turbulence models

4.4 总压恢复系数比较

虽然四种湍流模型在分离的模拟方面存在一定的差异,但是计算的平均总压恢复系数和实验值吻合较好,表 1 的计算结果表明计算的 e 截面平均总压恢复系数和实验值误差不超过 0.7 %。RSM 与实验值最接近,SST 次之,Realizable $\kappa\text{-}\varepsilon$ 和 S-A 稍差。

表 1 e 截面平均总压恢复系数

Table 1 Pressure recovery at section e

	实验 ^[8]	Realizable $\kappa\text{-}\varepsilon$	S-A	SST	RSM
平均总压恢复系数/ %	96.55	97.11	97.26	96.96	96.61

5 结 论

- 1) 在四种湍流模型中,RMS 模拟精度最高; SST 与 RSM 的模拟结果非常接近;Realizable $\kappa\text{-}\varepsilon$ 则逊色于 SST 模型;S-A 对分离区的模拟保守,其模拟能力较差。
- 2) 在未发生分离的区域,四种湍流模型的精度相当,在分离区域湍流模型的影响很大。
- 3) 四种湍流模型计算的平均总压恢复系数与实验值吻合较好。
- 4) 通过比较看出,SST 是计算 S 弯扩压器的一个较好的选择。

参考文献

[1] 杨永,段毅,张强. 超声速大迎角分离流中三种湍流模型
的比较研究[J]. 空气动力学学报,2006,24(3) :371-374.
YANG Yong, DUAN Yi, ZHANG Qiang. Comparison of
three turbulence models in supersonic high-attack-angle
separated flows [J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2006, 24
(3) :371-374. (in Chinese)

[2] 肖志祥,李凤蔚. 三种湍流模型模拟能力的对比[J]. 西北
工业大学学报,2002,20(3) :351-355.
XIAO Zhixiang, LI Fengwei. Comparison of predictive ca-
pabilities of three turbulent models[J]. Journal of North-
western Polytechnical University, 2002, 20 (3) :351-355.
(in Chinese)

[3] Spalart P R, Allmaras S R. A one-equation turbulence
model for aerodynamic flows[R]. AIAA-92-0439.

[4] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new $\kappa\text{-}\varepsilon$ eddy
viscosity model for high Reynolds number turbulent flows
[J]. Comput Fluids, 1995,24(3) :227-238.

[5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版
社, 2001.

[6] Wellborn S R, Reichert B A, Okiishi T H. An experimen-
tal investigation of the flow in a diffusing S-duct [R].
AIAA-92-3622.

[7] Harloff G J, Reichert B A, Wellborn S R. Navier-Stokes
analysis and experimental data comparison of compressible
flow in a diffusing S-duct [R]. AIAA-92-2699.

[8] Reichert B A, Wendt B J. Improving diffusing S-duct per-
formance by secondary flow control [R]. AIAA-94-0365.