

# 实用 S 形进气道内部流动特性研究

北京空气动力研究所 马汉东\*\* 汪翼云

【摘要】 根据 Yang J Y 的思想构造了一种求解湍流  $k-\epsilon$  模型方程的有限差分格式—湍流 U- 格式。采用此种方法以及一种完全 N-S 方程解算器对变截面 S 形弯曲进气道内部旋涡湍流运动进行了研究, 通过大量型号设计与计算证明了本套方法可以正确地描述流场中的分离、二次旋涡等重要物理现象。作为一种特例, 本文给出了一种 S 形进气道内部流动的数值模拟结果, 并与圆截面 S 形弯管的计算结果进行了定性比较。

主题词: 进气道 流动特性 数值模拟

分类号: O 355

## 1 引言

目前, S 形进气道内部流动特性研究主要是采用实验方法。在数值模拟方面, 国内已做了一定的研究工作<sup>[1-3]</sup>。国外对一些基本外形也做了相应的研究, Towne<sup>[4]</sup>采用 PN S 方程求解了圆形截面 22.5 弯曲管道不可压流动, Loeffler<sup>[5]</sup>中求解薄层 N-S 方程和湍流代数方程数值模拟了矩形横截面 S 形弯曲扩张管道亚跨声速流动, 在网格点  $49 \times 29 \times 15$  下所需 CPU (CRA Y- 1M) 为 11 小时, 这也是国内计算机条件所难以承受的。本文采用雷诺平均 N-S 方程作为流动的控制方程, 采用改进型 Beam - Warming 格式求解, 并在文献[6]中进行了严格校核, 从而形成内流模拟解算器; 而对湍流附加粘性, 本文选用湍流  $k-\epsilon$  模型作为封闭方程。对于此方程, 其它文献一般直接选用 S M P L E、A F 或者 Beam - Warming 等格式进行求解<sup>[7]</sup>, 这样显得不太经济。本文根据 Yang J Y 的思想<sup>[8]</sup>发展了一种数值求解格式—湍流 U- 格式, 它较为简单方便。最后本文给出了一种 S 形进气道内部流动的模拟结果, 限于型号背景, 文中适当作了一些技术处理, 略去了外形尺寸, 计算参数亦非设计工况, 但仍然可以看出本方法的数值模拟能力。本文的工作以及实际设计中所作的一些考核验证表明: 本方法能够为型号设计提供详细的流场结构及参数, 且能够满足设计中的基本需求。

## 2 湍流 $k-\epsilon$ 模型方程和湍流 U- 格式及求解步骤

采用 Jones 和 Launder 所发展的  $k-\epsilon$  两方程模型, 在一般曲线坐标系,  $X_i = (\xi, \eta, \zeta)$ ,  $x_i = (x, y, z)$  中, 其守恒形式可以写为:

$$\partial_t q + \partial_i (F_i - F_{vi}) = S \quad (1)$$

$$\text{其中: } q = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho k \\ \rho \epsilon \end{bmatrix}, \quad F_i = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho U_i k \\ \rho U_i \epsilon \end{bmatrix}, \quad U_i = u_j \partial_j X_i, \quad F_{vi} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \mu_k \nabla X_i \cdot \nabla X_j \partial_j k \\ \mu_\epsilon \nabla X_i \cdot \nabla X_j \partial_j \epsilon \end{bmatrix}$$

$$S = \frac{1}{J} \left[ \begin{array}{c} P - \rho \epsilon \\ C_1 \frac{\epsilon}{k} P - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} + \rho \epsilon_{II} \end{array} \right], \quad J = \frac{\partial X}{\partial x_i}, \quad \mu_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \mu_\epsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$$

采用了 Einstein 求和约定。湍动能生成项  $P$  为:

$$P = \left[ 2\mu_t \left( S_{ij} - \frac{1}{3} S_{II} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] S_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad S_{II} = \nabla \cdot \vec{V} \quad (2)$$

$\delta_{ij}$  为 Kronecker 函数, 湍流附加粘性  $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 。各种常数取值如下:  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ ,  $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ 。方程(1)的边界条件为: 进口:  $k = \alpha U^2$ ,  $\epsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / (K \delta)$ ,  $\alpha$  为常数,  $K = 0.42$ 。壁面: 壁面函数法。出口:  $\partial k / \partial \xi = 0$ ,  $\partial \epsilon / \partial \xi = 0$ 。

根据 Yang J Y 的思想, 我们可以构造如下差分求解格式:

$$[I + \beta \Delta \tau (A_1^+ \delta_\xi A_1 + A_1^- \delta_\xi A_1)] \delta q^* = \text{RHS} \quad (3a)$$

$$[I + \beta \Delta \tau (A_2^+ \delta_\eta A_2 + A_2^- \delta_\eta A_2)] \delta q^{**} = \delta q^* \quad (3b)$$

$$[I + \beta \Delta \tau (A_3^+ \delta_\xi A_3 + A_3^- \delta_\xi A_3)] \delta q^n = \delta q^{**} \quad (3c)$$

$$q^{n+1} = q^n + \delta q^n \quad (3d)$$

其中:

$$A_i = \begin{bmatrix} U_i & 0 \\ 0 & U_i \end{bmatrix}, \quad A_i^\pm = \begin{bmatrix} U_i^\pm & 0 \\ 0 & U_i^\pm \end{bmatrix}, \quad U_i^\pm = \frac{|U_i| \pm U_i}{2|U_i|}$$

$\beta$  为格式参数 ( $\beta = 0.5$ , Grank-Nicolson 格式,  $\beta = 1$ , 向后欧拉格式)。方程(3a)中 RHS 包含了对流和扩散项的差分, 对流项采用三阶偏心迎风差分, 扩散项采用标准的中心差分格式。可以看出由于很好地利用了  $k$ - $\epsilon$  方程系数矩阵的特殊性质, 方程(3a)-(3c)为简单的三对角线方程, 用追赶法即可方便快速地求解, 而且格式中未包含有任何人工粘性, 因此又具有很好地通用性。由于格式显隐部分都含有迎风特性, 所以简称该格式为湍流 U- 格式。

雷诺平均 N-S 方程采用 Beam-Warming 改进型格式进行数值求解, 所不同的是层流粘性被有效粘性所替代, 这种有效粘性包含了湍流所引起的附加粘性。对平均流场而言, 壁面仍假定是绝热的且不可穿透, 压力则由法向动量方程求解, 详细过程可见文献[6]。湍流  $k$ - $\epsilon$  方程采用上述湍流 U- 格式求解, 它滞后于流场的数值求解, 即认为  $k$ - $\epsilon$  方程中的流动参数皆为已知量, 湍流动能及耗散方程也分别予以求解。因此, 每个时间层只须求解标量的三对方程组, 由此求得的附加粘性再用于雷诺平均

N-S 方程。如此循环往复直至收敛。

### 3 数值结果及分析讨论

本文的研究对象为实用进气道外形, 采用 TTM 技术生成计算网格。计算条件为:  $M a_\infty = 0.6$ ,  $Re = 537380$ ,  $P_b/P_\infty = 0.4$  (非设计工况), 计算中对进气道作适当延长, 以减少边界条件对出口流场的影响。实际计算中给出了详细的数值计算结果。这里, 仅就所感兴趣的一些结果作以简单分析讨论。

图 1 是纵向对称平面上的速度矢量。在第一弯段上部可以清晰地看到分离; 在第二弯段出口以及延长段下部也有轻微的分

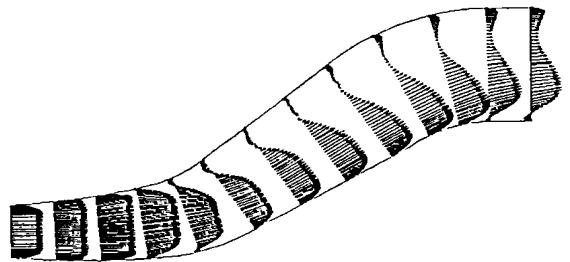


图 1 纵向对称面速度矢量

第一弯段上部可以清晰地看到分离; 在第二弯段出口以及延长段下部也有轻微的分

度剖面则发生较大的变形,它们与进气道内部的二次旋涡有着密切的关系。矩形横截面 S 形弯管内流也有类似的流动现象<sup>[6]</sup>。

图 2、3 是两个典型截面上的二次流流谱。图 2(a)和图 3(a)为本文计算的速度矢量,图 2(b)和图 3(b)为其对应的截面流线。它们分别位于中部截面和延长段出口截面上。可以看出,前后截面上的二次旋涡旋转方向刚好相反,且出口截面二次流流谱更为复杂,在上部出现了一对螺旋点,对称线上出现了鞍点,下部旋涡仍然很强,在这两个截面之间,二次旋流呈现出彼次消涨变化的复杂流态,这正是 S 形弯管流动的典型特征之一。

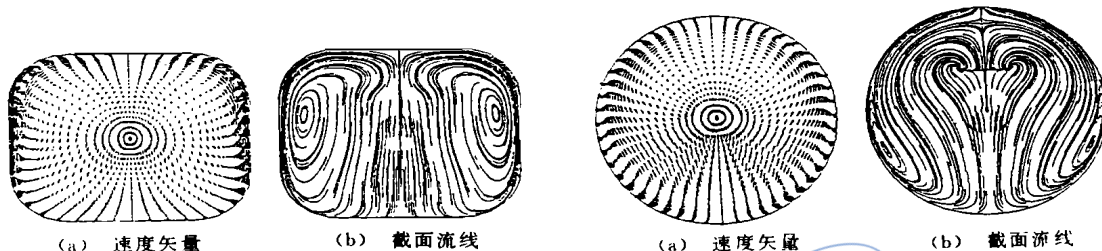


图 2 中部截面二次流流谱

图 3 出口截面二次流流谱

与文献[4]给出的圆截面 S 形弯管流动计算结果<sup>[4]</sup>比较,从流动形态上讲,它与本文计算结果基本一致,但在出口截面上,本文计算的下部二次旋涡更为明显。

实际工作中,我们还对其它一些更为复杂的进气道内流场进行了数值模拟,结果对比分析表明:本文的计算方法是可行的。

## 参 考 文 献

- 1 张书诚等 S 型进气道的数值模拟研究 航空学报, 1986, 7(1): 169- 174
- 2 林麒, 郭荣伟 S 弯管中可压三元紊流控制方程和数值计算 航空学报, 1986, 7(2): 161- 168
- 3 郑小清, 沈慧利 大攻角下前机身—进气道组合体的流场计算 航空学报, 1990, 11(3): 161- 168
- 4 Towne C E. Application of Computational Fluid Dynamics to Complex Inlet Ducts NASA TM - 83548, 1984
- 5 Loeffler A L. A Navier- Stokes Code for S- Shaped Diffusers- A Review International Journal for Numerical Methods in Fluids 1988, 8(4): 463- 474
- 6 马汉东等 S 形扩张管道三维流场的数值模拟 计算物理, 1995, 12(1): 37- 40
- 7 Koul U K. An Implicit Finite- Difference Code for a Two- Equation Turbulence Model for Three- Dimensional Flow. NASA TM 86752, 1985
- 8 Yang J Y, Lombard C K. Uniformly Second Order ENO Schemes for the Euler Equations AIAA: 87- 1166- CP

(责任编辑 魏星禄)

## EFFECTS OF DISTURBANCE WAVES ON ROTATING STALL STABILITY OF AXIAL COMPRESSOR

**Cao Renjing**

(Institute of Energy and Environmental Science, Shantou University, Shantou 515063)

**Zhou Sheng**

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

**ABSTRACT** A 2-D rotating stall stability model considering the inlet and outlet flow angles and unsteady loss of axial flow compressor was proposed, for which numerical analysis has been conducted. The calculated results show that the disturbance waves at the upstream of compressor have influence on the rotating stall stability. The configuration of the compressor produces a strong impact on the propagation speed of the disturbance waves.

**Key Words** Axial flow compressors Rotating stall Disturbances

## AN INVESTIGATION ON FLOW BEHAVIOUR IN AN S-SHAPED DUCT

**Ma Handong and Wang Yiyun**

(Beijing Institute of Aerodynamics, Beijing 100074)

**ABSTRACT** A new efficient finite-difference scheme for solving turbulence  $K-\epsilon$  equations-Turbulence U-scheme has been developed. This method was combined with the solver of Navier-Stokes discretized by a modified Beam-Warming scheme to investigate three-dimensional turbulent internal flow in S-shaped duct. Many numerical experiments and practical applications show that this method provides detailed flow field and parameters for engineering design. As a special example, a numerical simulation has been completed for an S-shaped duct including separation, secondary flow, vortices etc. The comparison of its results with the flow patterns in the circular section S-shaped duct shows a good agreement in essence.

**Key Words** Numerical simulation Air inlets Flow characteristics

## IDENTIFICATION OF GEAR TRANSMISSION SYSTEM WITH A ROTOR ON DYNAMIC NATURAL CHARACTERISTIC

**Shao Renping, Shen Yunwen, Liu Geng**

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Xu Min**

(Chinese Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001)

**ABSTRACT** A gear transmission system with a helicopter rotor was experimentally investigated and on-line identified during its operation, and the results were compared with its theoretical analysis. It is found that the gear transmission system with a rotor differs from other gear transmission system by such natural characteristics, that its dynamic characteristics change with its rotational speed. Its changing law has also been obtained, which provides basis for the dynamic modeling analysis and the dynamic design of the system and an effective analytical approach of the gear transmission system.

**Key Words** Gears Rotor wings Dynamic properties