

2 数学模型和求解方法

2.1 控制方程及其离散

二维稳态不可压缩的控制方程转换到任意曲线坐标系 (ξ, η) 下时则变成:

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (\rho U \phi) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho V \phi) = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\Gamma}{J} (q_1 \phi_\xi - q_2 \phi_\eta) \right] + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\Gamma}{J} (-q_2 \phi_\xi + q_3 \phi_\eta) \right] + S(\xi, \eta) \quad (1)$$

其中: $U = uy_\eta - vx_\eta$, $V = uy_\xi - vx_\xi$, $J = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$, $q_1 = x_\eta^2 + y_\eta^2$, $q_2 = x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta$, $q_3 = x_\xi^2 + y_\xi^2$, $S(\xi, \eta)$ 是 R 在计算平面 (ξ, η) 上的表达式。

将式 (1) 对图1所示的控制容积 $(\Delta\xi=1, \Delta\eta=1)$ 进行积分, 得离散方程:

$$(\rho U \phi)_e - (\rho U \phi)_w + (\rho V \phi)_n - (\rho V \phi)_s = \left[\frac{\Gamma}{J} (q_1 \phi_\xi - q_2 \phi_\eta) \right]_e - \left[\frac{\Gamma}{J} (q_1 \phi_\xi - q_2 \phi_\eta) \right]_w + \left[\frac{\Gamma}{J} (-q_2 \phi_\xi - q_3 \phi_\eta) \right]_n - \left[\frac{\Gamma}{J} (-q_2 \phi_\xi + q_3 \phi_\eta) \right]_s + S \cdot J \quad (2)$$

式中的 e, w, n, s 分别代表控制容积的东西南北四个界面 (见图1)。差分格式采用混合格式^[4], 整理后得到离散方程:

$$A_P \phi_P = A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + b \quad (3)$$

压力修正方程形式和式 (3) 相同, 源项为下式:

$$b_P = - [(\rho U^*)_e - (\rho U^*)_w + (\rho V^*)_n - (\rho V^*)_s] \quad (4)$$

式中上标 * 表示上一轮迭代的值。

由于采用非交错网格, 压力和速度的耦合采用文献 [5] 的方法处理。

2.2 定解条件

用文献 [6] 对任意曲线坐标系下的壁面函数作分析, 进口条件为: 速度按均匀给定, 湍动能和耗散率按下面的经验公式给出:

$$k_{in} = (u_{in}^2 + v_{in}^2)/200, \quad \epsilon_{in} = C_\mu k_{in}^{3/2}/(0.03L).$$

L 为特征长度, $C_\mu=0.9$, 下标 in 代表进口截面。本文计算区域的出口离稳定器很远, 出口条件为变量沿流线的梯度为零。

2.3 网格分区方法

采用 Rai^[7] 的通量守恒插值方法分区网格, 示意图见图2。图中网格线 $\Lambda\Lambda'$ 为区 I 和区 II 的交界面, (l, m) 和 (j, k) 分别是区 I 和区 II 的节点坐标值, $ABCD$ 是界面上的节点 (j, l) 的控制容积, 线 LL' 是控制容积的界面 AB 的延伸, 点 p, p', q, q' 是两个区容积面的交节点, 点 A, B 分别对应点 p' 和 q' 。沿着容积面 AB 的通量守恒的条件为:

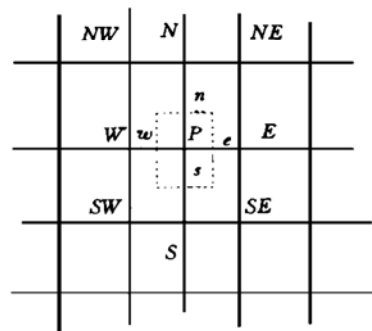


Fig. 1 Control volume of node P

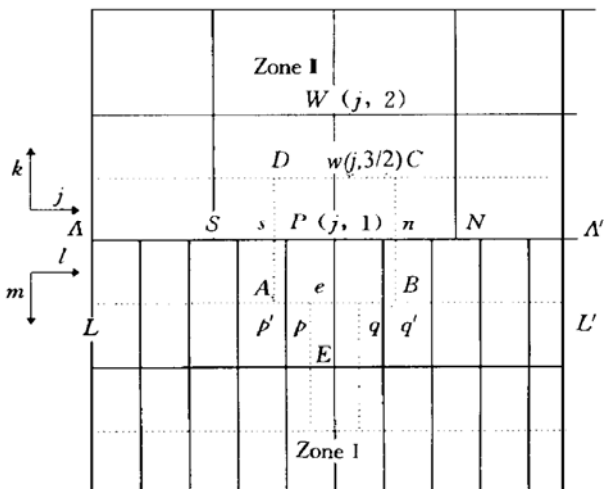


Fig. 2 Interface between zone I and zone II

$$\nabla x_{\text{II}} F_{AB}^{\text{II}} = \int_A^B F^{\text{I}} dx$$

$$\text{或} \quad F_{AB}^{\text{II}} = \frac{1}{\nabla x_{\text{II}}} \int_A^B F^{\text{I}} dx = \sum N F^{\text{I}} = N_{p'p} F_{p'p}^{\text{I}} + N_{pq} F_{pq}^{\text{I}} + N_{qq'} F_{qq'}^{\text{I}}$$

$$N_{p'p} + N_{pq} + N_{qq'} = 1 \quad (5)$$

式中 F 为通量, N 是插值系数, 求解方法见文献 [7]。当计算在 II 区进行时, 控制容积面 AB 上的通量需用 I 区的上一次的迭代值由公式 (5) 求出。当计算在 I 区进行时, 该区的界面上的节点变量值用 II 区界面上的上一次迭代的节点值线性插值得出。在进行迭代计算时必须保证经过界面上的流量守恒。迭代在两个区依次进行, 直到每个区均收敛为止。当采用多于两个区的分区时, 界面上都采用前面的通量守恒插值方法, 依次对每个区迭代完成一个循环, 然后进行下一个循环, 直到每个子区均收敛为止。

2.4 网格的划分

对含有 V 型槽的直通道流场, 由于 V 型槽的夹角一般都小于 90° , 如果采用文献 [1, 2] 中的划分方法, 则网格的夹角小于 45° (见图3)。为此根据 V 型槽的特点提出一种新的划分方法, 考虑两种特殊情况: 当 V 型槽的夹角 $\beta=0^\circ$ 时, 此时 V 型槽与流动方向平行; 当 V 型槽的夹角 $\beta=180^\circ$ 时, 此时 V 型槽与流动方向垂直。由此提出下面两种划分方法:

(1) 当 $90^\circ < \beta < 180^\circ$ 时, 采用文献 [1, 2] 的划分方法;

(2) 当 $0^\circ < \beta < 90^\circ$ 时, 如图4的一种新的方法, 此时网格的正交性优于文献 [1, 2] 的生成方法。

如通道中含有多个稳定器, 由于稳定器之间安放位置的要求, 必须采用多区来划分网格, 至于采用多少个区则根据具体情况作出决定。本文对一含有两个稳定器的通道流场作三个区来划分, 每个区的网格正交性均很好, 网格划分示于图4。图4中的横坐标 X 表示距进口的距离, 纵坐标 Y 表示通道的高度。

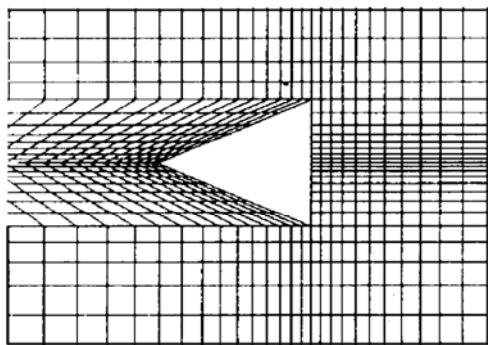


Fig. 3 The grid generation of Ref. [1, 2]

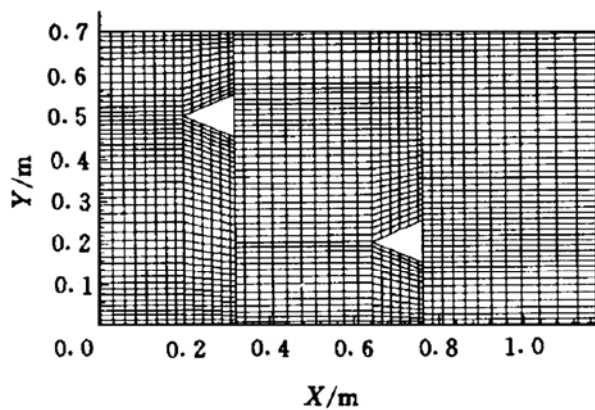


Fig. 4 The grid generation of this paper

3 计算算例

本文对含有两个 V 型槽的直通道的湍流流场进行了计算, 几何结构见图5, V 型槽的夹角 $\beta=45^\circ$, 网格划分示于图4。进口雷诺数: $Re=1.68 \times 10^6$, 计算网格为 81×49 , 流场的几何尺寸为 $9.2\text{m} \times 0.7\text{m}$, V 型槽的高度为 0.1m , 计算出的结果用流线图表示 (见图6)。

从计算出的流线图可以看出随着 V 型槽位置的变化, V 型槽后面的回流区大小发生了变化, 这主要是速度的改变所致。当 δ 增加时, 后面的 V 型槽周边速度变小, 回流区长度也随之减小, 计算结果定性合理。

4 结 论

本文对含有两个 V 型槽的通道湍流流场中网格分区的方法作了讨论, 提出了较为合理的分区划分方法, 它可以根据 V 型槽的具体几何结构灵活地划分网格, 使得网格有较好的正交性以满足曲线坐标系下的数值计算需要。对一含有两个 V 型槽稳定器的直通道冷态湍流流场作了数值计算, 结果合理。

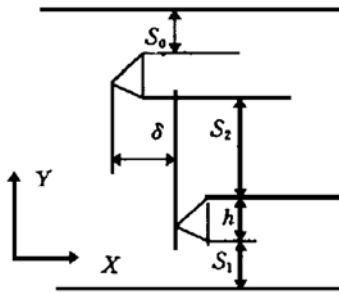


Fig. 5 Configuration of a duct which have two flame holders

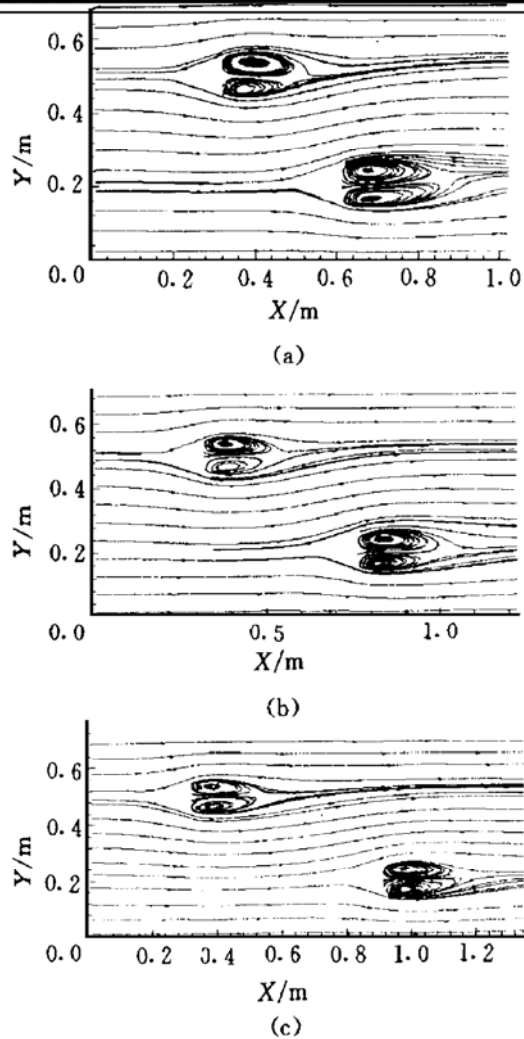


Fig. 6 The streamline of flow field

(a) $S_0=S_1=1.5h$, $S_2=2h$, $\delta=1.5h$

(b) $S_0=S_1=1.5h$, $S_2=2h$, $\delta=3h$

(c) $S_0=S_1=1.5h$, $S_2=2h$, $\delta=4.5h$

参 考 文 献

- 1 Lee D, Lin J S. Computation of nonreacting flows of a two-ring flame stabilizer using a zonal grid method. Numerical Heat Transfer, Part A, 1991, 20: 65~79
- 2 Lee D, Yeh C L. Computation of reacting flame stabilizer flows using a zonal grid method. Numerical Heat Transfer, Part A, 1993, 24: 273~285
- 3 Peric M. Analysis of pressure velocity coupling on non-staggered grids. Numerical Heat Transfer, Part B, 1990, 17: 63~82
- 4 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- 5 Majumdar S. Role of underrelaxation in momentum interpolation for calculation of flow with nonstaggered grids. Numerical Heat Transfer, 1988, 13: 125~132
- 6 Sondak Douglas L, Pletcher Richard H. Application of wall functions to generalized nonorthogonal curvilinear coordinate systems. AIAA Journal, 1995, 33 (1): 33~41
- 7 Rai M M. A conservative treatment of zonal boundaries for Euler equation calculations. J Comput Phys, 1986, 62: 472~503

气膜冷却流场的实验研究和 数值模拟的分析^{*}

徐红洲 王尚锦

(西安交通大学能源与动力工程学院机泵中心, 西安, 710049)

刘松龄 许都纯

(西北工业大学航空动力与热力工程系, 西安, 710072)

摘 要: 用X型双丝热线探头对扇形气膜孔射流下游流场的测量结果表明, 湍流因射流的注入而显著增强, 并存在十分明显的各向非同性。传统的应力和速度梯度的涡粘关系仍然适用于气膜冷却流场, 但应该在不同的方向上分别对湍流粘性系数进行修正。标准 $k-\epsilon$ 湍流模型可成功地模拟孔内流动和流向倾角 α 较小时的掺混气膜冷却流场, 但在 α 较大时的孔中线附近区域内的流场模拟是不成功的, 并导致冷却效率的模拟失败。

主题词: 涡轮叶片, 薄膜冷却, 气体冷却, 喷流试验, 湍流模型, 数值分析

分类号: V232.4, TQ021.3

EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF NUMERICAL COMPUTATION IN THE FLOW FIELD OF FILM COOLING

Xu Hongzhou Wang Shangjin

(SER Fluid-Machinery Engineering Research Center, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an, 710049)

Liu Songling Xu Duchun

(Dept. of Aeroengine, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: An experimental study on velocity and turbulence fields downstream of a single film-hole jet has been completed by using X probe of hot-wire (DISA55M). A fan-shaped hole with flared angle of 15° was adopted in the experiment. Under the influence of jet, the turbulence level is obviously increased and strong anisotropic turbulence exists in the downstream of the hole. In the regions unaffected by the jet, the turbulence can be still regarded as isotropic. The general eddy-viscosity relationships are adaptable yet for simulating the shear stresses in film cooling flow fields. However, the eddy-viscosity variation itself is rather complex in these regions that it requires significant modification in different directions. Compared with experimental data, the calculated results of the standard $k-\epsilon$ turbulence model could be successful in internal flow of the hole and downstream of jet with the small streamwise inclined angle. In the case of large streamwise angle, the velocity and film cooling effectiveness were underpredicted with this kind of turbulence model. It might be necessary to introduce a nonisotropic turbulence model in the simulation of film cooling flow fields.

^{*} 收稿日期: 1997-07-04, 修回日期: 1997-10-20, 本课题获航空工业总公司科技进步三等奖