

# 涡轮盘腔内流动和传热的数值模拟

西北工业大学 王美丽\* 周彬 刘松龄

【摘要】 将实际涡轮盘腔简化为转子系统,并用混合长度模型、N-S方程和能量方程模拟了该系统的流场和温度场,采用SIMPLE法数值计算了自由转盘周围的温度场;封闭转子—静子腔内的流场和温度场;有入流和出流的转子—静子腔内的流场。计算结果与实验值符合较好,因而为数值模拟涡轮盘腔内的流场和换热打下了基础。

主题词: 涡轮 转子 流场 传热 数值模拟

分类号: V232.3 TK124

## 1 引言

自由转盘是涡轮盘腔的最简模型,Northrop和Owen用实验测得了不同盘温分布时自由转盘表面 $Nu$ 数的径向分布<sup>[1]</sup>。当圆盘在有限的腔体内旋转时,就构成了转子系统,Chew<sup>[2]</sup>和Morse<sup>[3]</sup>利用不同的湍流模型计算了腔内流场。在国内,周彬曾计算了转子系统的层流流场<sup>[4]</sup>。本文采用混合长度模型和SIMPLE法计算了N-S方程,得到了自由转盘表面的 $Nu$ 分布;封闭转子—静子腔内的流场和温度场;有入流和出流的转子腔内的流场。

## 2 控制方程

实际涡轮盘工作时高速旋转,腔内多数流动为复杂的三维非定常可压缩湍流流动。但为了抓住腔内气流的基本规律,将盘腔内流动简化为轴对称的定常不可压湍流流动。略去质量力后,运动方程和能量方程在柱坐标系中可写成下列通式<sup>[5,6]</sup>:

$$\partial(\rho u)/\partial z + (1/r)\partial(r\rho v)/\partial r = \partial(\Gamma\partial\varphi/\partial z)/\partial z + (1/r)\partial(r\Gamma\partial\varphi/\partial r)/\partial r + S_\varphi \quad (1)$$

其中 $\varphi$ 在各方程中分别表示轴向速度 $u$ 、径向速度 $v$ 、环量 $F$  ( $F = wr$ ,  $w$ 为切向速度)和温度 $T$ ,连续方程中 $\varphi = 1$ ;  $\Gamma$ 表示粘性扩散系数,能量方程中, $\Gamma = \mu/\rho r + \mu_t/\rho r$ ,其它方程中 $\Gamma = \mu_e$ ;  $S_\varphi$ 表示源项,  $S_{连续} = 0$ ;  $S_T = 0$ ,  $S_u = -\partial p/\partial z + \partial(\mu_e \partial u/\partial z)/\partial z + (1/r)\partial(r\mu_e \partial v/\partial r)/\partial r$   $S_v = -\partial p/\partial r + \rho F^2/r^3 - 2\mu_e v/r^2 + \partial(\mu_e \partial u/\partial r)/\partial z + (1/r)(r\mu_e \partial v/\partial r)$ ,  $S_F = -(2/r)\partial(F\mu_e)/\partial r$  计算中取的边界条件见文献[6]。

## 3 湍流模型

计算中采用了Koo sin lin<sup>[2]</sup>提出的计算旋转流场的混合长度模型,模型表达式如下:

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho l^2 \{ (\partial u_s / \partial \eta)^2 + [r \partial(F/r^2) / \partial \eta]^2 \}^{1/2} \quad (3)$$

其中 $l$ 为混合长度, $u_s$ 是 $r-z$ 平面上平行于壁面的速度, $\eta$ 是离壁面的垂直距离。在紧靠壁面

$$\text{区域:} \quad l = 0.42\eta[1 - \exp(-\eta\tau_r/26)] \quad (4)$$

$$\text{在边界层外区域:} \quad l = 0.085\delta \quad (5)$$

此处,  $\eta = \eta\sqrt{\tau_w}/(\sqrt{\rho} \cdot \nu)$ ,  $\tau_r = \tau/\tau_w$ ;  $\delta$  是边界层厚度, 其定义为平行于壁面的速度梯度减为 19 的点到壁面的距离,  $n$  值可在 0—1.5 之间取<sup>[6]</sup>。

当流线有曲率时, 混合长度应当考虑曲率的影响, Koo<sup>[2]</sup>建议对转盘盘腔内的流动用下面的修正公式:

$$l = l_0(1 - 5R_i) \quad (6)$$

$$\text{其中:} \quad R_i = \partial F / r^3 \cdot \partial F / \partial r \{ (\partial / \partial r)^2 + r [\partial (F / r^2) / \partial r]^2 \}^{-1} \quad (7)$$

$l_0$  由 (4) 式、(5) 式求出。

为了克服数值计算收敛困难, (7) 式仅用在边界层内部, 当  $\eta > \delta$  时,  $R_i$  仍取  $\eta = \delta$  处的  $R_i$  值。为避免  $\mu_t$  在流场内不连续, 流场中任一点  $\mu_t$  值由按三个不同表面算出的  $\mu_t$  值按下式加权平均得出:

$$\mu_t = \frac{(\Delta z_1 \Delta z_2)^{n_1} \mu_{t,3} + (\Delta z_1 \Delta r)^{n_2} \mu_{t,2} + (\Delta z_2 \Delta r)^{n_3} \mu_{t,1}}{(\Delta z_1 \Delta z_2)^{n_1} + (\Delta z_1 \Delta r)^{n_2} + (\Delta z_2 \Delta r)^{n_3}} \quad (8)$$

其中  $\Delta z_1$ 、 $\Delta z_2$ 、 $\Delta r$  分别表示该点到三个表面的距离,  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  可在 1—3 之间取。在计算采用四周密、中间疏的非均匀网格, 节点数为  $54 \times 64$ , 采用 SMPLE 法计算。

## 4 计算结果及分析

### 4.1 转子—静子腔内流场计算结果与分析

计算了不同轴向间距的封闭腔内的流场及非封闭腔内的流场。图 1 给出了  $Re_\theta = 6.9 \times 10^5$ , 轴向间距  $G$  分别为 0.0685 和 0.0225 时, 无量纲切向速度, 无量纲径向速度沿轴向的变化曲线; 由图可看出: 当  $G = 0.0685$  时, 两盘之间存在径向速度为零, 无量纲切向速度约为 0.43 的区域, 即“刚性旋转核”; 当轴向间距减小到 0.0225 时, “刚性核”消失, 两边界层相互交汇, 与 Daily 等的实验结果<sup>[6]</sup>相符。

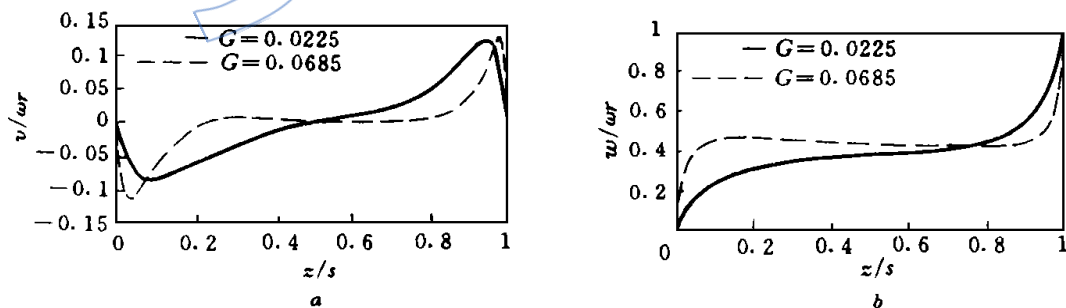


图 1 封闭转子—静子腔轴向间隙对速度分布的影响

具有轴向入流和径向出流的转子—静子腔内的流动较为接近实际涡轮盘腔内的流动。本文在计算中保持轴向间距不变, 分别计算了不同密封间隙  $G_c$ , 旋转雷诺数  $Re_\theta$  和流量系数  $C_w$  时的速度场, 并把  $x = r/b = 0.81$  的切向速度计算结果与 Phade U P 和 Owen J W<sup>[7]</sup> 的实验值作了比较, 基本相符, 结果如图 2 所示。把该结果与封闭腔内的切向速度分布比较可发现核区无量纲切向速度由 0.42 降到 0.3—0.2, 这主要由于从密封间隙流出流体造成了动量矩损失的缘故; 由该图还可看出, 在其它条件保持不变, 密封间隙系数  $G_c$  的变化对切向速度沿轴向分

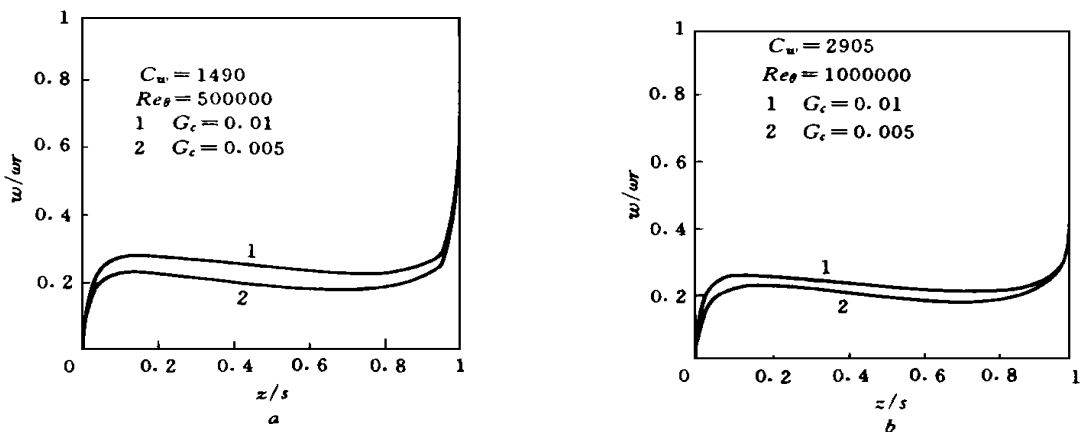


图2 封闭间隙对切向速度的影响

布影响不大。

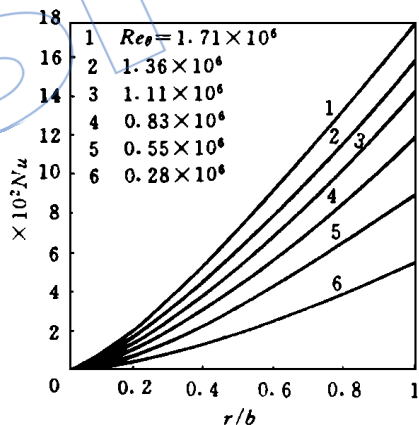
#### 4.2 腔内温度场的计算结果与分析

换热系数的确定是给出盘表面换热边界条件的必要条件。定义盘表面努谢尔特数  $Nu$  为:

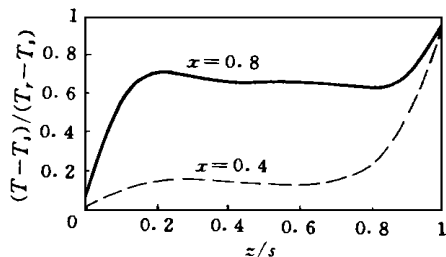
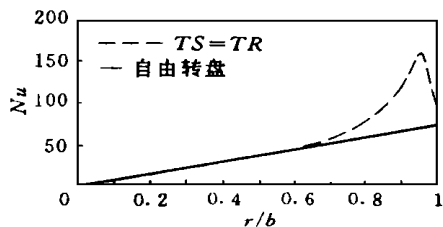
$$Nu = r q_w / [k(T_w - T_c)] \quad (9)$$

其中  $q_w$  是盘表面的换热量,  $T_w$  为表面温度。

自由转盘表面  $Nu$  计算时取  $T_c = T_\infty$ , 并设盘表面温度分布为  $T_w = T_1 + T_2 x^{0.6}$ ,  $T_1 \neq T_\infty$ , 不考虑耗散项。图3给出了  $Pr = 0.7$  时, 不同  $Re_\theta$  数下盘表面  $Nu$  的计算结果, 并与 Northrop 和 Owen<sup>[1]</sup> 的实验结果作了比较。从图中可看出, 计算值与实验值相符较好, 并且  $Nu$  数随着径向位置和  $Re_\theta$  数增加而增大, 但当  $Re_\theta$  较大时, 接近盘缘区域误差增大, 这可能是没有考虑能量耗散而引起的。

图3  $Nu$  数与  $Re$  的关系 ( $n = 0.6$ )

封闭转子—静子腔内温度场计算中, (9) 式中  $T_c$  为中心处温度。计算中设  $Re_\theta = 5 \times 10^4$ ,  $G = 0.1$ , 转子表面温度  $T_r$  和密封冠温度  $T_s$  相等, 在该状态下, 流动时腔内存在“刚性旋转核”<sup>[4]</sup>。图4给出了不同径向位置时, 腔内温度沿轴向的变化, 从中可看出

图4 封闭转子—静子腔内  $Nu$  沿轴向分布图5 封闭转子—静子腔内  $Nu$  沿径向分布

核区温度沿轴向不变,但沿径向位置的变化而变化,这说明在核区热量传递沿径向进行;图 5 给出转子表面  $Nu$  数沿径向的变化,并与自由转盘表面  $Nu$  分布作了比较。从图中可看出  $Nu$  随着径向位置增加而增加,但在密封冠附近,  $Nu$  降低;图中还可看出,封闭转子表面  $Nu$  比自由转盘表面要大一些。

## 5 结 论

(1) 用 SIMPLE 法和文中给出的混合长度模型可成功地对自由转盘和静子—转子盘腔内的不可压缩流动和换热进行数值模拟。

(2) 在轴向间距较大时,静子—转子盘腔内存在转速约为子转速的 0.43 倍,径向速度为零的“刚性核”,轴向间距较小时,“刚性核”消失。

(3) 有轴向入流和径向出流时,“刚性核”的转速随入流量增大而减小,密封间隙的大小对“刚性核”的转速影响不大。

(4) 在“刚性核”内,温度沿轴向变化不大,因此热量基本上沿径向传递。

(5) 盘腔内转子表面的换热系数较自由转盘为大,换热系数的最大值位于 0.95 外缘半径处。

## 参 考 文 献

- 1 Northrop A, Owen J M. Heat Transfer Measurements in Rotating- Disk System: Part I The Free Disk. Int J. Heat and Fluid Flow, 1988, 9
- 2 Chew J W, Vaughan C M. Numerical Predictions for the Flow Induced by the Enclosed Rotating Disk. ASME, 88- GT- 127, 1988
- 3 Morse A P. Application of a Low Reynolds Number  $k-\epsilon$  Turbulent Model to High- Speed Rotating Cavity Flow. Transaction of the ASME J. of Turbomachinery, 1991, 113: 98- 105
- 4 周彬. 转盘—静子腔内流动的 N- S 方程数值解. [硕士学位论文]. 西北工业大学, 1993
- 5 Owen J M, Rogers R H. Flow and Heat Transfer in Rotating Disk Systems Vol 1, Research Studies Press, Taunton U K, 1989
- 6 王美丽. 用 N- S 方程数值模拟涡轮盘腔内的流动与换热. [硕士学位论文]. 西北工业大学, 1994
- 7 Phadke U P, Owen J M. Aerodynamics Aspects of the Sealing of Gas- Turbine Rotor- Stator Systems, Part I: The Behavior of Simple Shrouded Rotating Disk System in a Quiescent Environment. Int J. Heat Fluid Flow, 1987, 9: 98- 105

(责任编辑 杨再荣)