

中心进气转静盘腔一维流动模型的改进

林立¹, 谭勤学², 吴康², 任静²

(1. 福州大学 石油化工学院 节能技术研究中心, 福州 350116;

2. 清华大学 机械工程学院 热能工程系, 北京 100084)

摘 要: 采用数值模拟方法, 对动盘面边界层夹带流量进行分析, 以改进转静盘腔一维流动模型的计算精度。结果表明: 边界层速度分布的 $1/7$ 幂律假设低估了自由盘边界层夹带流量, 从而影响了一维流动模型对源区边界的计算精度; 传统的关联式未能有效地归纳不同工况下转静盘腔内动盘面边界层夹带流量, 从而影响了一维流动模型对核心区气体转速的计算。通过归纳数值模拟结果中的自由盘和转静盘腔内动盘面边界层夹带流量, 对传统一维流动模型中源区边界及核心区气体转速的计算提出修正, 并对修正后的一维流动模型进行实验验证, 表明该修正明显改进了一维模型对腔内径向压差的计算精度。

关键词: 转静盘腔; 一维流动模型; 自由盘; 边界层夹带流量; 旋流系数

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Improvement on one-dimensional flow model of rotor-stator cavity with central inlet

LIN Li¹, TAN Qin-xue², WU Kang², REN Jing²

(1. Energy-saving Technology Research Center,

School of Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Department of Thermal Engineering,

School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The boundary layer entrainment mass flow of rotary disk was analyzed numerically in order to improve the performance of one-dimensional (1-D) flow model of rotor-stator cavity. The numerical results show that, $1/7$ power law assumption of boundary layer velocity distribution underestimates the boundary layer entrainment mass flow of free disk, affecting the calculation of source region boundary position; the traditional correlations can not correlate the numerical results of boundary layer entrainment mass flow on rotary disk under different conditions well, affecting the calculation of swirl ratio in core region of 1-D flow model. Correlations of boundary layer entrainment mass flow on free disk and rotary disk in rotor-stator cavity were brought out by investigating the numerical results, and 1-D flow model was corrected accordingly. Moreover, the corrected 1-D flow model was verified by experiments, showing that the corrections improved the accuracy of 1-D flow model with respect to the radial pressure difference calculation.

Key words: rotor-stator cavity; one-dimensional flow model; free disk; boundary layer entrainment mass flow; swirl coefficient

收稿日期: 2014-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(51076076)

作者简介: 林立(1985—), 男, 福建福州人, 讲师, 博士, 主要从事传热强化研究及工业节能研究。

符号表

a	盘面内径	$V_{\phi, \text{rotor}}$	动盘面周向速度
b	盘面外径	$V_{\phi, \infty}$	边界层外气体周向速度
c	式(11)中旋转雷诺数的指数	V_r	气体径向速度
C_m	$M/(0.5\rho\omega^2r^5)$, 盘面转矩系数	x	r/b , 无量纲径向坐标
C_w	$m/(\mu r)$, 无量纲质量流量	x_e	源区边界无量纲径向坐标
$C_{w, \text{rotor}}$	无量纲动盘面边界层夹带流量	x'_e	修正的源区边界无量纲径向坐标
$C_{w, \text{stator}}$	无量纲静盘面边界层夹带流量	y	壁面法向坐标
$C_{w, \text{freedisk}}$	无量纲自由盘边界层夹带流量	α	式(2)中计算边界层径向速度所需系数
f, f_1, f_2	代指某种函数形式	β	ω/Ω , 旋流系数
$\dot{m}$	质量流量	β^*	封闭转静盘腔内的气体旋流系数
M	盘面转矩	δ	边界层厚度
p_s	静压	ϵ_m	计算盘面转矩系数所需的系数
Q	体积流量	ϵ_n	计算动盘面夹带流量所需的系数
r	径向坐标	ζ	y/δ , 无量纲壁面法向坐标
R	数值模拟自由盘的外径	μ	气体动力黏度
Re_ϕ	$\rho\Omega r^2/\mu$, 旋转雷诺数	ρ	气体密度
s	转静盘腔轴向间距	ω	气体转速
s_c	盘腔外缘轴向间隙	Ω	动盘转速
V_ϕ	气体周向速度	λ_t	$C_w Re_\phi^{-0.8}$, 湍流流动参数

转静盘腔是燃气轮机二次空气系统中的重要组成部分. 对于腔内流动的准确计算, 将直接关系到轮缘密封分析、动叶冷却分析以及轴向力的计算, 因此对于整机的稳定运行是十分重要的. 国内外学者在过去的半个多世纪中对转静盘腔流动进行了大量的研究工作, 积累了丰富的实验数据, 并建立起相对完善的理论体系.

Daily 等^[1-2]通过实验研究发现根据边界条件的不同, 转静盘腔内可能出现 4 种不同流态形式, 并给出了盘面转矩系数的关联式. Owen 等^[3]总结了 Sussex 大学在盘腔方面的研究成果, 提出转静盘腔一维流动模型, 并获得广泛的应用. Dadkhah^[4]在此基础上, 对大量实验和数值结果进行拟合, 提出了核心区气体转速的关联式, 但未能从机理上给予解释. Micio 等^[5-6]研究表明 Owen 模型对动盘面边界层夹带流量的计算与数值模拟结果存在明显偏差. Poncet 等^[7-9]和 Debuchy 等^[10-11]采用“当地流量系数”这一新的无量纲参数对腔内流动进行分析, 并基于此提出核心区气体转速的关联式. 纵观近年研究, 如何进一步提高一维流动模型的计算精度, 是目前关于转静盘腔流动研究的一个重要方向^[12-17].

Owen 提出的转静盘腔一维流动模型计算方便, 但在定量上存在较大偏差, 由于其能较好地描述腔内流动的物理现象, 因此本文选其作为研究工作的基础, 结合对数值模拟结果的分析, 提出改

进方案.

1 转静盘腔经典一维流动模型

中心进气转静盘腔流态如图 1 所示, 由源区和核心区组成, 腔内径向压差主要来自核心区气体旋转的贡献, 因此对核心区的大小及气体转速的计算是一维流动分析的关键.

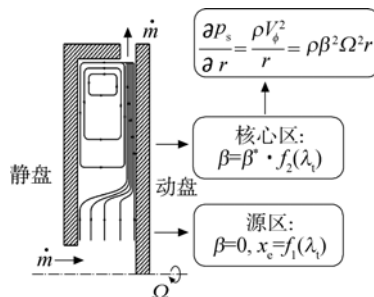


图 1 转静盘腔经典流动模型

Fig. 1 Classical flow model in rotor-stator cavity

Owen 根据壁面边界层速度分布的 $1/7$ 幂律假设, 如式(1)和式(2)所示, 推导得到盘面转矩系数的计算式(3), 以及盘面边界层夹带流量计算式(4)和式(5), 式中系数 ϵ_m , ϵ_n , α , γ 均是 β 的函数, 具体函数形式可参见文献[3]. 令来流流量等于自由盘边界层夹带流量, 即可由式(4)推导得转静盘腔内源区边界的计算式, 如式(6)所示; 令来流流量等于动静盘面边界层夹带流量之差, 即可由式

(4)和式(5)推导得转静盘腔内核心区内旋流系数的计算式,如式(7)所示.特别地,本文将式(4)~式(7)称为转静盘腔传统一维流动模型.该模型在定性上能较好地描述腔内流动特征,但在定量上仍与实验结果有较大差距,其根源在于 $1/7$ 幂律分布的假设与实际边界层速度分布存在较大的差别,相应的,基于该假设得到的式(3)~式(7)不可避免地也与实验结果存在一定偏差(如本文第2节中图3与图4所示).

本文将通过数值模拟,对式(4)和式(6)提出修正,使改进后的一维模型既有明晰的物理意义,又有较好的计算精度.

$$V_{\phi} = V_{\phi, \text{rotor}} - (V_{\phi, \text{rotor}} - V_{\phi, \infty}) \zeta^{1/7} \quad (1)$$

$$V_r = \alpha(V_{\phi, \text{rotor}} - V_{\phi, \infty}) \zeta^{1/7} (1 - \zeta) \quad (2)$$

$$C_m = \epsilon_m Re_{\phi}^{-0.2} \quad (3)$$

$$C_{w, \text{rotor}} = \epsilon_n Re_{\phi}^{0.8} \quad (4)$$

$$C_{w, \text{stator}} = -\frac{49\pi}{60} \alpha \gamma Re_{\phi}^{0.8} \quad (5)$$

$$x_e = \left[\frac{\lambda_t}{0.219} \right]^{1/2.6} \quad (6)$$

$$\frac{\beta}{\beta^*} \approx \left\{ 3.35 - 2.35 \left[1 + 4.5 \left(\frac{\lambda_t}{x^{13/5}} \right) \right]^{1/2} \right\}^{5/4} \quad (7)$$

2 数值模拟方法验证

本节以自由盘为对象考察数值方法适用性,数值模拟的计算域如图2所示,为轴对称的二维问题.计算域采用六面体网格,沿周向拉伸3层共计 1.5° ,网格节点数约为45.48万,保证盘面 y^+ 小于1.采用shear stress transport(SST)湍流模型(个别工况亦采用了 $k-\epsilon$ 和RNG(renormalization-group) $k-\epsilon$ 进行对比).文献[3]中关于自由盘的流动实验数据主要是盘面转矩系数和边界层内的速度分布,可用于校验数值计算方法.本文选用文献[3]的盘面转矩系数实验关联式,如式(8)

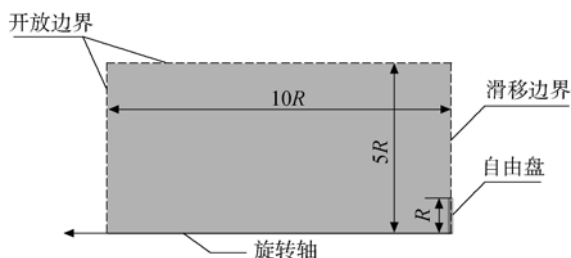


图2 自由盘数值模拟计算域

Fig. 2 Computational domain of free disk numerical simulation

所示,和文献[18]测量的自由盘边界层速度分布,与数值模拟结果进行对比.

图3给出了数值模拟得到的盘面转矩系数随旋转雷诺数的变化规律.总体而言,SST模型的计算结果与实验关联式吻合最好,偏差均小于5%,而 $k-\epsilon$ 模型计算结果较实验关联式偏低约7%,RNG $k-\epsilon$ 模型的结果偏低超过10%,基于 $1/7$ 幂律速度分布假设的结果,式(3)亦较实验关联式偏低约10%.

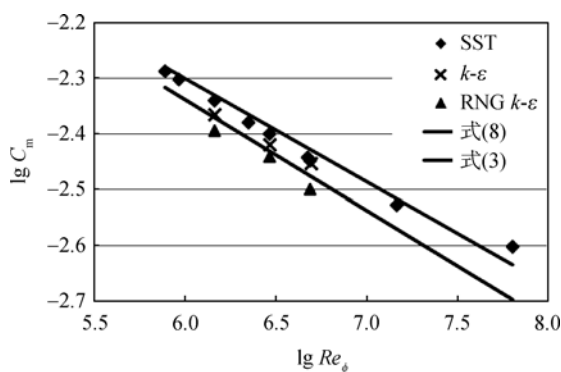
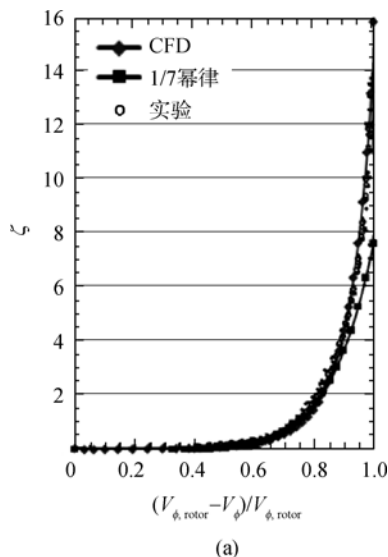


图3 数值模拟的自由盘转矩系数与关联式的对比

Fig. 3 Comparison of torque coefficients between computational results and correlations

图4为对参考文献[12]中某工况进行数值模拟得到的边界层速度分布,总体而言,SST模型的结果与实验吻合很好,只是在径向速度分布上存在一些偏差;而 $1/7$ 幂律分布与实验结果存在较大偏差,特别地,边界层内周向速度分布的差别将导致 $1/7$ 幂律假设在计算盘面转矩系数时产生偏差,而边界层内径向速度分布的差别将导致该幂律假设在计算边界层夹带流量时产生偏差.



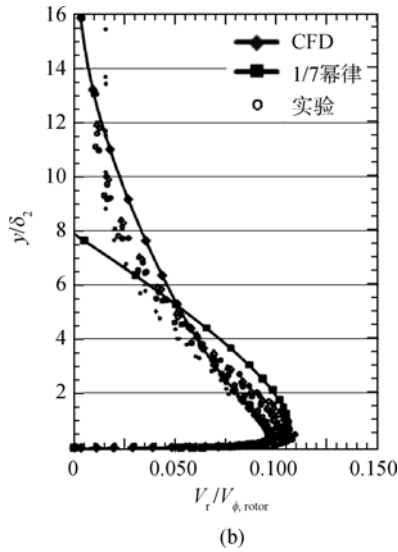


图 4 自由盘面边界层速度分布

Fig. 4 Velocity distribution in free disk boundary layer

$$C_m = 0.0655 Re_\phi^{-0.186} \quad (8)$$

综上, SST 湍流模型可以较好地捕获自由盘边界层的流动特性, 因此本文后续的计算分析均采用 SST 湍流模型. 本节的结果同时显示了 1/7 幂律速度分布假设在边界层定量分析上存在明显的偏差, 而这也将导致基于该假设的转静盘腔一维流动模型计算精度的不足, 本文后续部分拟结合数值计算结果对其进行修正.

3 源区边界计算的修正

由图 4 可知 1/7 幂律假设在定量描述自由盘边界层速度分布上与实验有较大差别, 这将导致其在计算边界层夹带流量上的偏差. 图 5 给出了自由盘边界层夹带流量随旋转雷诺数的变化规律, 由于实验中难以测量边界层夹带流量, 因此图 5 仅给出了数值模拟结果与关联式结果的对比. 由图 5 可知, 与数值模拟结果相比, 1/7 幂律假设的结果明显低估了边界层内的流量, 两者的相对偏差随 Re_ϕ 增大而增大, 当 Re_ϕ 达 10^7 时, 基于 1/7 幂律假设的结果仅是数值模拟的 57.6%.

根据数值模拟结果可拟合得到自由盘边界层夹带流量关系式, 如式(9)所示, 进一步可推导得到相应的源区边界计算式, 如式(10)所示. 图 6 给出了其与式(6)的对比, 两者相对偏差也是随 Re_ϕ 增大而增大, 当 Re_ϕ 达 10^7 时, 式(6)比式(10)大 24%. 本文将式(10)作为源区边界的修正计算式, 修正的效果将在第 5 节中考察. 式(10)的适用范围与式(6)相同, 通常需满足以下条件:

1) 低位进气且来流无旋的转静盘腔.

2) 动盘面湍流边界层不与静盘面边界层融合.

$$C_{w, \text{freedisk}} Re_\phi^{-0.91} = 0.0646 \quad (9)$$

$$x'_e = (C_{w, \text{freedisk}} Re_\phi^{-0.91} / 0.0646)^{1/2.82} \quad (10)$$

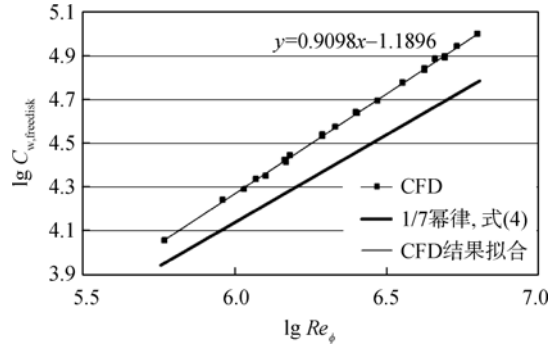


图 5 无量纲自由盘边界层流量与旋转雷诺数关系

Fig. 5 Relationship between non-dimensional boundary layer entrainment mass flow of free disk and rotational Reynolds number

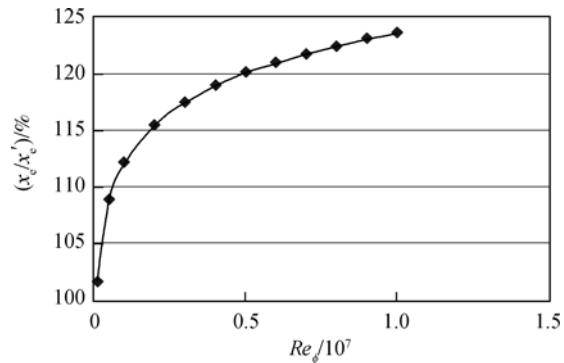


图 6 式(6)与式(10)的源区边界计算对比

Fig. 6 Difference between Eq. (6) and Eq. (10) on computation of source region boundary

4 核心区旋流系数计算的修正

式(7)对核心区的计算是基于动静盘面边界层夹带流量和核心区旋流系数的关系, 即式(4)与式(5). 由于静盘面边界层夹带流量通常较小, 相应地, 其对核心区 β 的影响也较小, 因此本节仅考虑无量纲动盘面边界层夹带流量 $C_{w, \text{rotor}}$ 与核心区 β 的关系, 参考式(4)和式(9), 选择将其表示为式(11)的形式.

$$C_{w, \text{rotor}} Re_\phi^c = f(\beta) \quad (11)$$

对图 7 所示转静盘腔进行数值模拟, 计算域为圆周的 1/240. 入口给定流量和总温 (300 K), 出口给定相对压力 0 Pa (参考压力为 101 325 Pa), 壁面为绝热, 分析不同转速和流量下的结果.

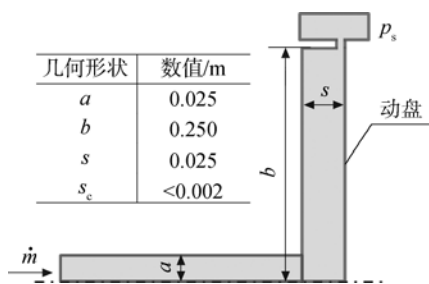


图7 数值模拟的转静盘腔模型

Fig. 7 Rotor-stator cavity for numerical simulation

图8显示了旋流系数对动盘面边界层夹带流量的影响,与图5相似,仅关注数值模拟结果与关联式结果的对比。由图可见,当 $\beta < 0.25$ 时Owen的传统一维流动模型明显低估了动盘面边界层夹带流量,而当 $\beta > 0.25$ 时其与实验吻合较好。而且采用 $C_{w, \text{rotor}} Re_{\phi}^{-0.8}$ 归纳处理动盘面流量时,数据呈现较大的分散性(当 $\beta < 0.25$ 时)。

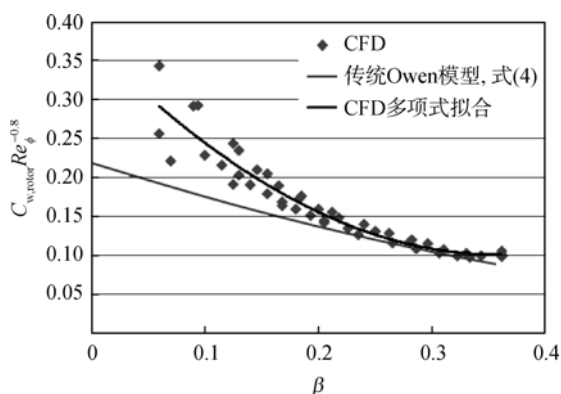


图8 核心区内旋流系数对动盘面边界层夹带流量的影响

Fig. 8 Effect of β on boundary layer entrainment mass flow of rotary disk in core region

经尝试,式(10)中取 $c = -0.85$ 可较好地归纳 $\beta < 0.25$ 时动盘面边界层夹带流量结果,如图9所示。综合考虑图8与图9,本节提出采用式(12)描述核心区气体转速与动盘面边界层夹带流量的关系,其适用于边界层外旋流系数满足公式要求的一般动盘面。由式(12)可知,当动盘面边界层夹带流量等于自由盘流量时, $\beta \neq 0$,这实际上是由于低半径区域环形涡的存在,加强了源区与核心区在周向上的动量交换,使得源区边界处气体具有一定的转速,如图10所示,这与图1所示理想流态有明显区别,而该效果受盘腔几何结构及来流条件的影响较大,本文未对其做进一步的修正。将式(12)与式(5)联立即可计算得核心区的旋流系数 β ,改进的效果将在第5节中考察。

$$C_{w, \text{rotor}} = \begin{cases} Re_{\phi}^{0.85} (0.99\beta^2 - 0.75\beta + 0.19) & 0 \leq \beta \leq 0.25 \\ Re_{\phi}^{0.80} (0.26\beta^2 - 0.46\beta + 0.22) & 0.25 < \beta < 0.4 \end{cases} \quad (12)$$

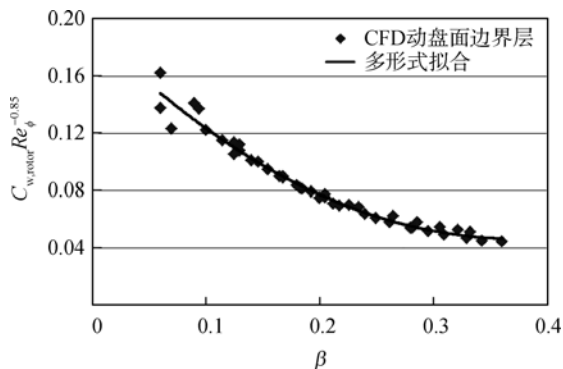


图9 核心区内旋流系数与动盘面边界层夹带流量的关系

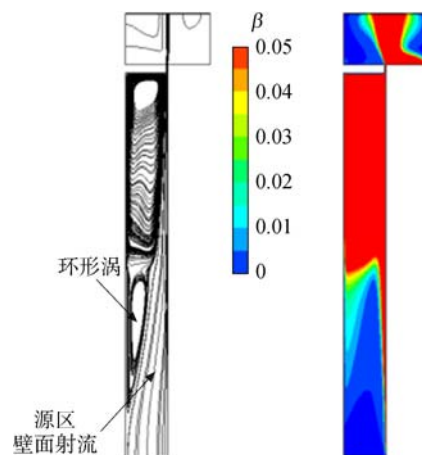
Fig. 9 Relationship between β and boundary layer entrainment mass flow in core region

图10 低半径处环形涡对源区的影响

Fig. 10 Effect of circular vortex at low radius on source region

5 一维模型改进的实验验证

本文第3、第4节分别对转静盘腔一维流动模型中源区边界及核心区旋流系数的计算提出修正,式(10)、式(12)和式(5)共同构成了改进的一维流动模型,适用范围与式(10)相同。本节通过实验考察上述改进对计算精度的影响。转静盘腔实验段如图11所示,外缘环罩为不锈钢条,固定在静盘上,实验段内沿径向共布置了6个壁面静压孔,工况如表1所示。

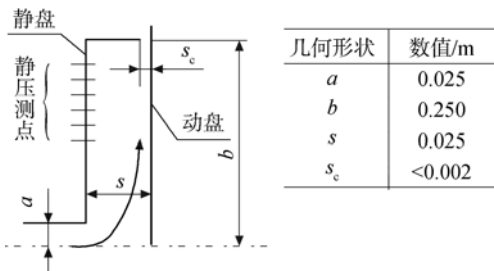


图 11 转静盘腔实验模型示意图

Fig. 11 Schematic diagram of rotor-stator cavity experiments model

表 1 转静盘腔实验工况

Table 1 Boundary conditions of experiments

工况 编号	Ω / (r/min)	Q / (m ³ /h)	工况 编号	Ω / (r/min)	Q / (m ³ /h)
1	1000	14.1	8	1300	33.1
2	1300	14.5	9	1500	34.3
3	1600	15.0	10	1300	40.2
4	1000	26.1	11	1600	40.4
5	1300	26.3	12	1750	39.0
6	1600	26.6	13	1900	40.6
7	800	33.9			

图 12 给出了工况 13 中转静盘腔内静压的径向分布. 尽管测量的相对偏差较大(因为径向压差的绝对值较小),但仍能明显地看出修正后的一维模型对静压径向分布的预测较传统 Owen 模型更接近实验结果. 从压力梯度可近似判断腔内源区边界的位置,如图中箭头所示,正如第 3 节中的分析,传统 Owen 模型高估了源区边界位置,这正是造成其低估腔内径向压差的主要原因之一,修正对此有明显改善.

由图 12 可知,在低半径区域,数值模拟、一维模型和实验结果的压力分布存在明显差别,这是由于在低半径区域存在如图 10 所示的环形涡流动结构. 由于式(12)的推导未考虑该效应,因此修正的一维模型虽然较传统一维模型有明显改进,但仍和数值模拟结果有一定差别. 而数值模拟结果和实验结果之间存在较大偏差,主要原因有两个:一是该工况下的实验测量存在较大的相对误差;二是该工况下来流冲击动盘面的作用较强,有利于低半径区域环形涡的形成和保持,流动具有较强三维特性和非定常特性,本文所用的数值方法对其流动特征的模拟还不完善.

图 13 给出了工况 3 转静盘腔内静压的径向

分布,图中 p_{ref} 表示参考静压. 与图 12 类似,修正的一维模型较传统的 Owen 模型更接近实验结果,而在低半径区域由于环形涡的存在,数值模拟、一维模型和实验结果之间存在一定偏差,但三者的相对偏差要小于图 12 所示的工况 13. 这是由于工况 3 的流量较小,由式(10)可知,工况 3 中腔内源区所占空间要明显小于工况 13,此时腔室内的径向压差主要来自核心区径向压力梯度的贡献,而源区(近似地可以认为低半径区域)内静压梯度对整个腔室压力分布的影响则小得多. 此外,由于来流减小,冲击动盘面的效果削弱,相应地,低半径区域的流动更为温和,一定程度上有利于数值模拟更好地捕获该区域流动特征,因此工况 3 数值模拟和实验结果吻合较好.

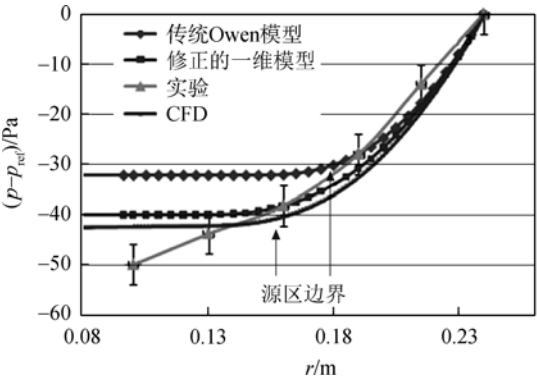


图 12 工况 13 中转静盘腔内静压径向分布

Fig. 12 Radial distribution of static pressure in rotor-stator cavity with boundary condition 13

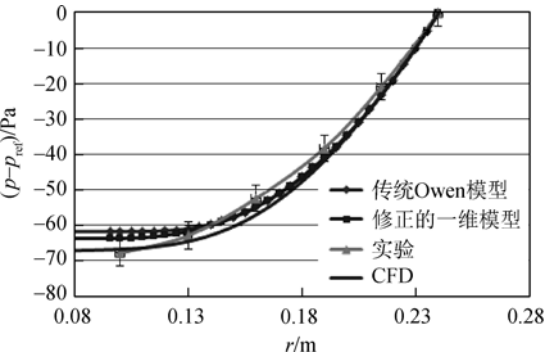


图 13 工况 3 中转静盘腔内静压径向分布

Fig. 13 Radial distribution of static pressure in rotor-stator cavity with boundary condition 3

由图 12 和图 13 可知,对于源区占腔室比例较大的工况,与式(6)和式(4)相比,式(10)和式

(12)能明显改善一维模型对腔室内压力的计算精度;而对于源区占腔室比例较小的情况,传统一维流动模型对腔内压力的计算已具有较好的精度,式(10)和式(12)的修正对精度的改善较为有限。

图14给出了转静盘腔内无量纲径向压差随湍流流动参数的变化规律。由图可知,对于所研究的工况范围,传统Owen模型明显低估了转静盘腔内的径向压差,而本文的修正均提高了一维模型对径向压差的计算精度。图14中修正后的一维模型仍与实验存在一定偏差,这仍然是由于现有一维模型的框架未能考虑低半径处环形涡(图10)的影响,该环形涡的出现增强了源区边界附近气体的转速,从而加大了腔内的径向压差。

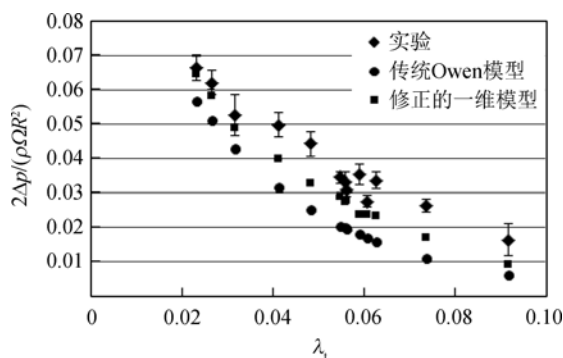


图14 无量纲径向压差随湍流流动参数变化规律

Fig. 14 Relationship between nondimensional radial pressure difference and turbulent flow parameter

6 结 论

本文采用数值模拟分析了中心进气转静盘腔流动特征,重点关注动盘面边界层内夹带流量的变化规律,基于此对转静盘腔传统一维流动模型提出了修正。研究结果表明,边界层内速度分布的 $1/7$ 幂律假设在估算自由盘面边界层夹带流量上存在较大偏差,使得传统的一维模型在计算转静盘腔源区边界上存在偏差;Owen推导的动盘面边界层夹带流量关系式未能有效地归纳各类工况下的数值模拟结果,从而影响传统一维模型在计算核心区气体转速上的精度。本文通过归纳数值模拟结果对源区边界以及核心区气体转速的计算提出了修正,经实验验证,修正在保留原有模型物理意义的基础上,有效地提高了一维模型对腔内静压分布的计算精度。而如何考虑低半径处环形涡对源区的影响以进一步提高一维模型计算精度,将是今后研究工作的重点。

参考文献:

- [1] Daily J W, Nece R E. Chamber dimension effects on induced flow and frictional resistance of enclosed rotating disks[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(1): 217-232.
- [2] Daily J W, Ernst W D, Asbedian V V. Enclosed rotating discs with superposed throughflow; mean steady and periodic unsteady characteristics of induced flow[R]. Cambridge: MIT Department of Civil Engineering, Hydrodynamics Laboratory, 1964.
- [3] Owen J M, Rogers R H. Flow and heat transfer in rotating-disc systems: Volume 1 rotor-stator systems[M]. Taunton, United Kingdom: Taunton Research Studies Press, 1989.
- [4] Dadkhah S. Ingestion and sealing performance of rim seals in rotor-stator wheelspaces[D]. Sussex, United Kingdom: Sussex University, 1989.
- [5] Micio M. Gas turbine secondary air system: experimental analysis and design tools developing[D]. Florence, Italy: University of Florence, 2010.
- [6] Da Soghe R, Facchini B, Innocenti L, et al. Analysis of gas turbine rotating cavities by a one-dimensional model: definition of new disk friction coefficient correlations set[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(2): 021020. 1-021020. 8.
- [7] Poncet S, Chauve M P, Legal P. Turbulent rotating disk flow with inward throughflow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 522(1): 253-262.
- [8] Poncet S, Chauve M P, Schiestel R. Batchelor versus Stewartson flow structures in a rotor-stator cavity with throughflow[J]. Physics of Fluids, 2005, 17(7): 075110. 1-075110. 15.
- [9] Nour F A, Poncet S, Debuchy R, et al. A combined analytical, experimental and numerical investigation of turbulent air flow behaviour in a rotor-stator cavity[J]. Mécanique & Industries, 2009, 10(3/4): 195-202.
- [10] Debuchy R, Della G S, D'Haudt E, et al. Influence of external geometrical modifications on the flow behaviour of a rotor-stator system; numerical and experimental investigation[J]. Journal of Power and Energy, 2007, 221(6): 857-864.
- [11] Debuchy R, Nour F A, Bois G. On the flow behavior in rotor-stator system with superposed flow[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2008(4): 719510. 1-719510. 10.
- [12] 白洛林, 冯青, 刘松龄. 湍流参数对复杂形状涡轮盘腔流场的数值研究[J]. 推进技术, 2003, 24(4): 344-347.
BAI Luolin, FENG Qing, LIU Songling. Numerical investigation of turbulence parameter on flow field of rotating disc cavity with complex geometry[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(4): 344-347. (in Chinese)
- [13] 张崇, 罗翔, 徐国强, 等. 中心进气复杂旋转盘压力特性的实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(4): 385-388.

- ZHANG Chong, LUO Xiang, XU Guoqiang, et al. Experimental study of static pressure characteristics at stator surface in a rotor-stator disk cavity[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(4): 385-388. (in Chinese)
- [14] 周雷声, 冯青, 武亚勇. 旋转涡轮盘腔中等转速下内部流场分布实验[J]. 推进技术, 2006, 27(4): 321-325.
- ZHOU Leisheng, FENG Qing, WU Yayong. Experiment on the velocity of the flow inside rotating disk cavity under mid rotating speed[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(4): 321-325. (in Chinese)
- [15] 李夫庆, 罗翔, 徐国强. 中心进气转静盘腔的冷气流阻特性实验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(6): 1334-1340.
- LI Fuqing, LUO Xiang, XU Guoqiang. Experimental study of flow friction characteristics for a rotor-stator system with centre inflow of cooling air[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(6): 1334-1340. (in Chinese)
- [16] 林立. 燃气轮机转静系盘腔内流动传热机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- LIN Li. Research on the mechanism of flow and heat transfer in rotor-stator cavities in gas turbine[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [17] 吴康. 燃气轮机高温透平转静轮缘封严与入侵流动传热机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- WU Kang. Research on the mechanism of sealing and ingestion in gas turbine rotor-stator rim[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [18] Littell H S, Eaton J K. Turbulence characteristics of the boundary-layer on a rotating-disk[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 266: 175-207.

(编辑: 王碧珺)