

二次空气系统中轴向旋转孔流阻特性的数值研究

张 伟、蓝吉兵、赵旭洋、隋永枫

(杭州汽轮动力集团有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘 要:通过计算流体动力学(CFD)研究了燃气轮机二次空气系统中轴向旋转孔的进口圆角比、长径比、压比和进口气流冲角对轴向旋转孔流量系数 C_d 的影响。计算结果表明,当孔的进口圆角比 $r/d < 0.2$ 时孔圆角的变化对流量系数影响显著,长径比、压比对进口有/无圆角的孔的流量系数影响规律不同,长径比越大时进口气流冲角对流量系数的影响越小,进口圆角比也会影响进口气流冲角对流量系数的影响规律。依据数值计算结果,对典型的旋转孔流量系数估算公式进行了修正,提高了经验公式的计算精度。

关 键 词:轴向旋转孔;流量系数;经验计算公式;数值计算;二次空气系统

中图分类号:TK477 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.09.018

[引用本文格式]张 伟,蓝吉兵,赵旭洋,等. 二次空气系统中轴向旋转孔流阻特性的数值研究[J]. 热能动力工程,2021,36(9): 139-145. ZHANG Wei, LAN Ji-bing, ZHAO Xu-yang, et al. Numerical study on flow resistance characteristics of axial rotating orifice in secondary air system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 139-145.

Numerical Study on Flow Resistance Characteristics of Axial Rotating Orifice in Secondary Air System

ZHANG Wei, LAN Ji-bing, ZHAO Xu-yang, SUI Yong-feng

(Hangzhou Steam Turbine Power Group Co. Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310000)

Abstract: The influence of inlet fillet ratio, length-diameter ratio, pressure ratio and flow resistance characteristics of axial rotating orifice in gas turbine secondary air system are studied by CFD numerical method. The calculation results show that when the inlet fillet ratio $r/d < 0.2$, the change of the fillet has a significant effect on the flow coefficient. The influence of length-diameter ratio and pressure ratio on flow coefficient of the inlet with or without fillet is different. With the increase of orifice length, the discharge coefficient is less affected by incidence. The inlet fillet also affects the influence law of the impact angle of inlet flow on the flow coefficient. Based on the numerical analysis results, the typical correlations for the discharge coefficient of axial rotating orifices be modified, significantly improve the accuracy of the correlations.

Key words: axial rotating orifices, discharge empirical formula, numeric calculation, secondary air system

引 言

现代燃气轮机通过复杂的二次空气流路,将压气机的中间级或压气机出口产生的高压空气输送到高温涡轮中冷却涡轮叶片。孔结构是实现二次空气系统流量控制的关键结构,在燃气轮机运行过程中

固定不变,对燃气轮机整体性能或高温部件寿命有重要影响。

尽管三维 CFD 已被广泛地应用于燃气轮机设计,高效、高精度的一维设计工具在二次空气系统设计中依然十分重要^[1-2]。孔结构作为二次空气系统的重要组成部分,其流阻特性的预测精度显著影响一维设计工具的精度。到目前为止,已经有众多学

者进行了大量的实验或数值研究,研究表明,孔的进口几何形状、孔长和孔的进口气流方向等会影响流线形状和分离区的形成,进而影响孔的流量系数。McGreehan^[3]研究了雷诺数对静止孔流阻特性的影响,Lichtarowicz 等人^[4]研究了静止孔长径比 $L/d < 10$ 且无进口圆角时的流阻特性,Hay 等人^[5]研究了静止孔的进口形状对孔流阻特性的影响,研究表明圆角能使节流孔流量系数增大 33% 左右。Zimmermann 等人^[6]通过研究表明,长径比 $L/d > 6$ 后压比对进口有圆角的孔的流阻特性无影响,压比 $P_{1t}/P_{2s} > 2$ 后压比对孔流阻特性的影响基本消失。在流阻特性预测方面,Wittig 等人^[7]根据实验结果给出了一组预测流量系数的经验公式。Idris^[8-9]对轴向旋转孔进行了数值研究,建立了考虑进口圆角比、长径比、压比和进口气流冲角等因素的孔流量系数预测模型。Hüning^[10]对大量孔流阻特性相关的研究进行了对比分析,结果表明,不同的实验测量结果间存在约 5% 的偏差。朱鹏飞^[11]通过 CFD 方法扩展了参考文献[8-9]建立的流量系数预测模型的应用范围,以适应不同类型轴向孔的模拟。国内外众多学者也开展了大量类似的实验或数值研究^[12-14]。

虽然这些研究已覆盖了影响轴向旋转孔流阻特性的关键因素,但大多试验或数值研究都集中在长径比较小情况,较少完备地对比区别孔的进口有无圆角孔和无圆角的时长径比、压比、进口气流冲角等对孔流阻特性的影响。同时,部分研究选择的特征参数在一维计算时不容易获得,影响经验公式的实际应用。为解决以上问题,本文将使用 CFD 方法对轴向旋转孔展开研究,并尝试建立精度更高、通用性更好的轴向旋转孔流阻特性预测模型。

1 理论模型

孔的流阻特性通常使用流量系数 C_d 描述,流量系数一般定义为:

$$C_d = \frac{W_{\text{real}}}{W_{\text{id}}} \quad (1)$$

式中: W_{id} —通过孔的理想流量; W_{real} —通过孔的实际流量。

理想流量按等熵膨胀过程计算,同时为了防止某些特别情况下(如孔旋转时)出现 $C_d > 1$ 的不合理现象,Dittmann 等人^[12]建议使用相对参数计算理想流量,理想流量计算公式为:

$$W_{\text{id}} = A \frac{p_{1,t,\text{rel}}}{RT_{1,t,\text{rel}}} \left(\frac{p_{2s}}{p_{1,t,\text{rel}}} \right)^{1/\gamma} V_{\text{id},\text{rel}} \quad (2)$$

$$V_{\text{id},\text{rel}} = \sqrt{\frac{2\gamma RT_{1,t,\text{rel}}}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{p_{2s}}{p_{1,t,\text{rel}}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right)} \quad (3)$$

式中: A —孔的通流面积; $T_{1,t,\text{rel}}$ —孔的进口相对总温; $p_{1,t,\text{rel}}$ —孔的进口相对总压; p_{2s} —孔的出口静压; γ —比热比; R —气体常数; $V_{\text{id},\text{rel}}$ —沿孔轴线的气流理想速度。

若考虑旋转孔进口来流的切向速度,旋转孔的相对总温、总压计算公式:

$$T_{1,t,\text{rel}} = T_{1,t} \left(1 + \frac{(\omega r_1)^2 - 2\omega r_1 V_{1\varphi}}{2c_p T_{1,t}} \right) \quad (4)$$

$$p_{1,t,\text{rel}} = p_{1,t} \left(\frac{T_{1,t,\text{rel}}}{T_{1,t}} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (5)$$

式中: $T_{1,t}$ —孔的进口的绝对总温; $p_{1,t}$ —孔的进口的绝对总压; c_p —等压比热容; ω —孔旋转速度; r_1 —孔的进口的旋转半径; $V_{1\varphi}$ —孔来流的切向速度。该公式考虑了孔的进口气流预旋和孔自身旋转速度对理想流量计算的影响。

Idris^[9]建立的流量系数计算经验公式考虑了多个因素的影响,计算公式为:

$$C_d = 1 - f_1 f_{2,r/d} f_{2,L/d} f_3 (1 - C_{d,Re}) + \Delta C_{d,i} \quad (6)$$

式中: f_1 $f_{2,r/d}$ —进口圆角比(r/d)对流量系数影响的修正系数; $f_{2,L/d}$ —长径比(L/d)对流量系数影响的修正系数; f_3 —压比(P_{1t}/P_{2s})对流量系数影响的修正系数; $C_{d,Re}$ —考虑了雷诺数影响后孔的流量系数; $\Delta C_{d,i}$ —孔的进口气流冲角(i)对流量系数影响的修正项。图 1 为进口气流冲角的示意图,其计算方式如下:

$$i = \tan^{-1} \left(\frac{\omega r_1 - V_{1\varphi}}{V_{\text{id},\text{rel}}} \right) \quad (7)$$

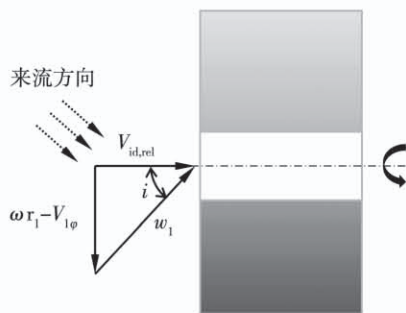


图 1 孔的进口气流冲角的示意图

Fig. 1 Diagram of the orifice inlet airflow angle of attack

2 CFD 模型

2.1 几何模型及边界设置

根据某燃气轮机涡轮盘上孔的实际结构,本文研究的轴向旋转孔如图 2 所示。几何模型由进口段、旋转孔和出口段三部分组成。图中 r_1 为轴向旋转孔的旋转半径, d 为孔的直径, r 为孔的进口圆角半径, L 为孔轴向长度。

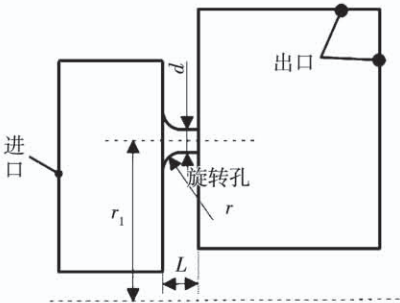


图 2 轴向旋转孔几何模型

Fig.2 Geometric model of the axial rotating orifice

为减少网格量,计算模型为 60° 扇形结构,计算域设成旋转域,工质为理性气体。在进口(图 2)设置总温总压,出口(图 3(a))为开放边界,设置静压,扇形的半径所在面设为周期性交界面(图 3(b)),转盘和轴向孔的壁面为无滑移面(图 3(c)),绝对粗糙度假设为 0.2 mm ,进口段的内外圆弧面和出口段的内圆弧面设为滑移面(图 3(d))。

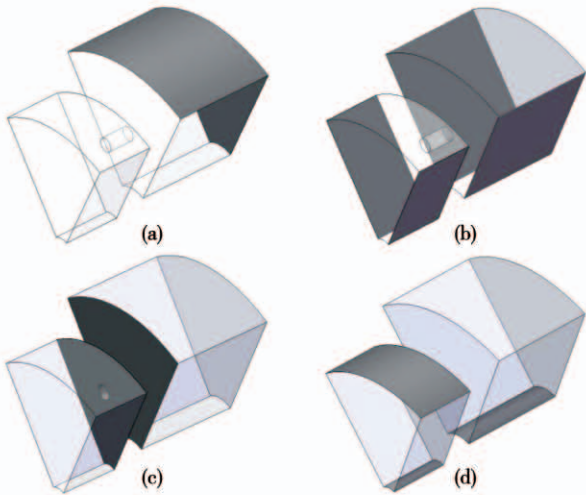


图 3 计算模型边界设置情况

Fig.3 Boundaries applied to the CFD model

2.2 网格划分及参数设置

使用 Meshing 软件进行非结构化网格划分。为

提高计算精度和保证计算效率,经过网格敏感性分析确定全局网格最大尺寸为 1 mm ,孔的壁面最大网格尺寸为 0.2 mm ,并对转盘面和孔的内壁面添加边界层网格,底层网格高度为 0.01 mm ,网格增长率为 1.2 。图 4 为模型的网格示意图。

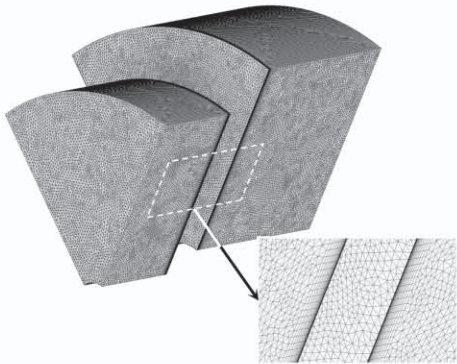


图 4 计算模型的网格示意图

Fig.4 Mesh diagram of the CFD model

使用 ANSYS-CFX19.1 求解模型,当连续方程、动量守恒方程和湍流方程的残差小于 10^{-5} ,进出口质量流量差值小于 1% 时,认为计算达到收敛,模型计算工况的参数设置如表 1 所示。

表 1 数值模型计算工况的参数设置

Tab.1 Work condition parameters of CFD model

参 数	数 值
旋转速度/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	$0 \sim 24\,000$
流体工质	理想气体
湍流模型	SST
出口静压 P_{2s}/kPa	101.325
进口总温 T_{1t}/K	288
孔通流半径 d/mm	10
孔旋转半径 r_1/mm	60
进口圆角比 r/d	$0 \sim 0.2$
长径比 L/d	$0.2 \sim 10$
压比 P_{1t}/P_{2s}	$1.05 \sim 2.0$

2.3 数值计算精度校核

为验证 CFD 方法的计算精度,表 2 给出了使用 CFD 计算 $L/d = 1.8$, $P_{1t}/P_{2s} = 1.6$, $r/d = 0$ 和 0.1 时轴向孔的流量系数与文献[10]中数据的对比。由表 2 可知, $r/d = 0$ 时 CFD 计算的 C_d 与文献值最大偏差为 5.7% ,平均偏差为 2.3% ; $r/d = 0.1$ 时 CFD 计算的 C_d 与文献值最大偏差为 6.7% ,平均偏差为

3.6%。对比结果表明,本文所用 CFD 方法具有足够计算精度。

表 2 相同几何条件 CFD 计算的 C_d 与文献数据对比
Tab.2 C_d calcauted by CFD under the same geometric conditions compared with the literature data

流量系数 C_d	文献值	CFD 计算值	偏差值/%
$r/d=0$	0.838	0.818	2.4
	0.817	0.818	-0.1
	0.865	0.818	5.7
	0.830	0.818	1.5
$r/d=0.1$	0.904	0.932	-3.0
	0.870	0.932	-6.7
	0.931	0.932	-0.1
	0.893	0.932	-4.2

3 计算结果分析

本文比较了进口圆角比 r/d 、长径比 L/d 、压比 P_{1t}/P_{2s} 和旋转对轴向旋转孔流阻特性的影响。

3.1 孔进口圆角影响

图 5 和图 6 分别比较了 L/d 为 0.4 和 1.25 时, r/d 变化对轴向孔流量系数的影响,并将 CFD 计算值、Idris^[9] 经验公式计算值与 Dittmann^[12] 实验值进行了比较。通过对比可以看出,CFD 计算值与实验值基本吻合,最大偏差约 4.3%,经验公式计算值与实验值偏差明显,对 $L/d=0.4$ 的短孔,两者最大偏差可达 13%。从计算结果还可以看出, L/d 越小时 r/d 对流量系数的影响越大。当 $L/d=0.4$, $r/d<0.1$ 时, r/d 变化对流量系数影响明显,最大可使流量系数增加 40%~50%。

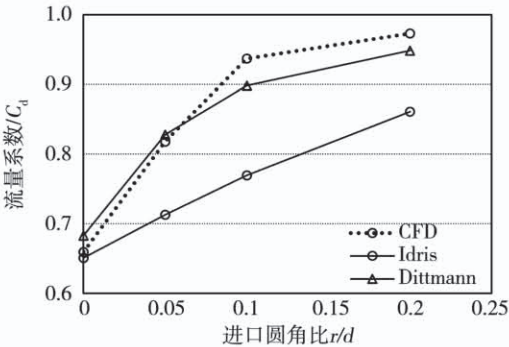


图 5 $L/d=0.4$ 时 r/d 变化对 C_d 影响
Fig.5 Effects of orifice r/d on C_d for $L/d=0.4$

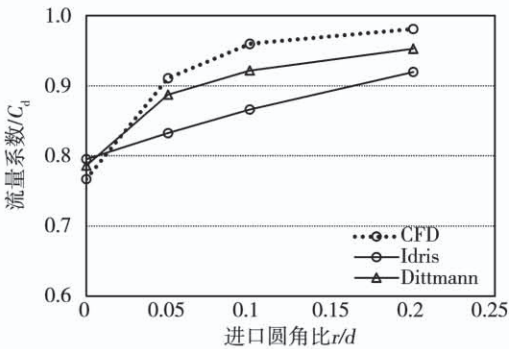


图 6 $L/d=1.25$ 时 r/d 变化对 C_d 影响
Fig.6 Effects of orifice r/d on C_d for $L/d=1.25$

3.2 孔长影响

图 7 和图 8 比较了不同 r/d 时 L/d 变化对轴向孔压力分布和流量系数 C_d 的影响。可以看出当孔的进口没有圆角时,随着孔长度的增加,孔的入口附近形成径缩抽吸作用,出现低压区域,在 $L/d\geq 2.5$ 之后低压区域基本不再扩大。当孔的进口有圆角时,在 $L/d\geq 1.0$ 之后低压区域基本不再扩大。

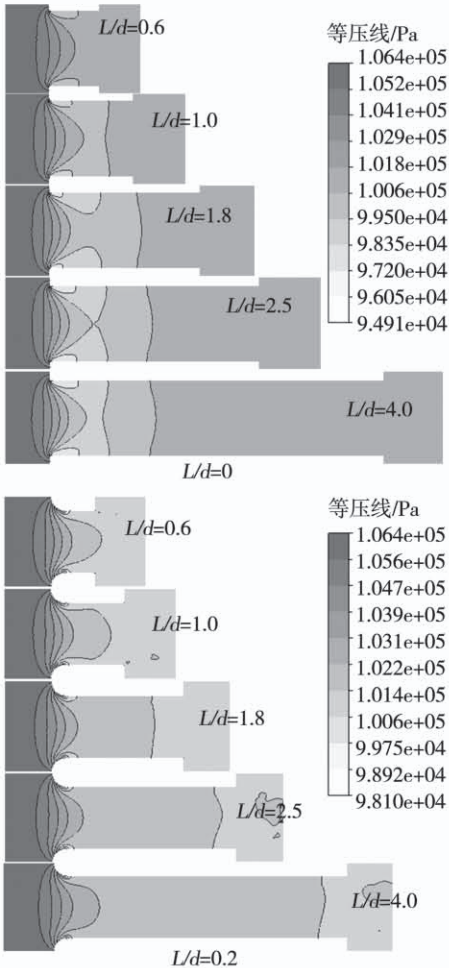


图 7 不同 r/d 时 L/d 变化对孔内压力分布影响
Fig.7 Effects of orifice L/d on the pressure distribution for different r/d

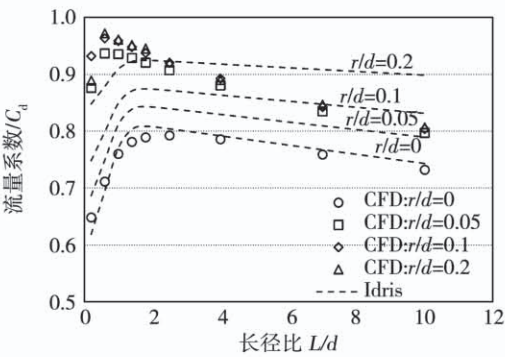


图8 不同 r/d 时 L/d 变化对 C_d 的影响

Fig. 8 Effects of orifice L/d on C_d for different r/d

颈缩形成的低压区会形成抽吸作用,使 C_d 首先随 L/d 增大而快速增大,当孔内的低压区域不再变化后,孔壁的沿程摩阻损失成为主要影响因素,因此 C_d 又随 L/d 继续增大而缓慢减小。相同条件下,有圆角时孔内的流速比无圆角时高,导致有圆角时孔的流量系数下降速度更快。计算结果表明,当 $L/d > 2.5$,圆角变化对流量系数的影响能力基本消失,与Idris^[9]经验公式的计算结果完全不同。

3.3 压比影响

图9为孔进出口压比对轴向孔流量系数的影响,CFD计算结果与现有文献的研究结论一致。在 $1 < P_{1t}/P_{2s} < 2$ 范围内,当孔的进口无圆角时,孔的流量系数随着压比增大而缓慢增加。并且随着 L/d 增大,压比对流量系数影响能力减小,随着压比增加流量系数增加的更加缓慢。当孔的进口有圆角时,压比对孔的流量系数基本没有影响。

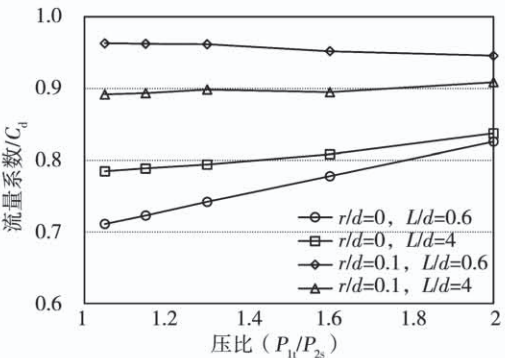


图9 孔进出口压比变化对 C_d 的影响

Fig. 9 Effect of orifice pressure ratio on C_d

3.4 旋转影响

图10给出了轴向旋转孔的进口无圆角时,不同 L/d 下进口气流冲角 i 对流量系数 $\Delta C_{d,i}$ 的影响。从计算结果可以看出,当孔的长径比在 $0.6 < L/d < 2.5$ 范围内时,进口气流冲角对孔流量系数的影响程度基本相同;当 L/d 继续增大后,随 L/d 增大进口气流冲角对流量系数的影响逐渐减小。当进口气流冲角较大时,相同进口气流冲角下随 L/d 增大可使 $\Delta C_{d,i}$ 增大0.1左右,还使孔的总流量系数 C_d 增大10%以上。

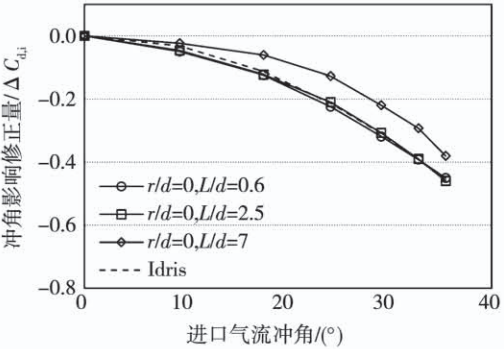


图10 $r/d=0$, L/d 不同时进口气流冲角变化对 $\Delta C_{d,i}$ 影响

Fig. 10 Effects of orifice incidence on $\Delta C_{d,i}$ for different L/d and $r/d=0$

图11给出了当轴向旋转孔的进口圆角比 r/d 分别为0.1和0.2时,不同 L/d 下进口气流冲角对 $\Delta C_{d,i}$ 的影响。由计算结果可以看出,当 $L/d < 0.6$, $i < 10^\circ$ 或者 $L/d > 2.5$, $i < 18^\circ$ 时,轴向旋转孔的进口气流冲角对孔的流量系数基本没影响。当孔的长径比 L/d 改变时,随着 L/d 的增大,进口气流冲角对孔流量系数的影响逐渐减小。当 $r/d=0.2$, $L/d > 2.5$ 后,长径比继续变化,将不再引起孔流量系数修正项 $\Delta C_{d,i}$ 的变化。

由图10和图11可知,Idris^[9]建立的预测进口气流冲角影响附加项 $\Delta C_{d,i}$ 的公式对无圆角轴向旋转孔附加项预测的准确性相对较好,但对有圆角轴向旋转孔附加项预测的准确性比较差,该公式未能考虑 L/d 变化对 $\Delta C_{d,i}$ 的影响。

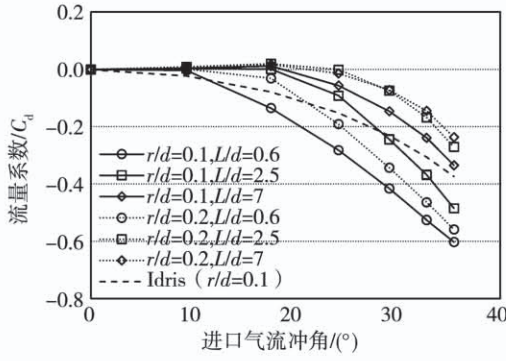


图 11 $r/d=0.1$ 和 $0.2, L/d$ 不同时进口
气流冲角变化对 $\Delta C_{d,i}$ 影响

Fig. 11 Effect of orifice incidence on $\Delta C_{d,i}$
for different L/d and $r/d=0.1/0.2$

4 经验模型建立

基于数值计算结果,结合 Idris^[9] 建立的预测旋转孔流量系数的经验公式,本文建立了针对轴向旋转孔流量系数预测的经验公式, C_d 按照公式(6)计算。计算公式(6)中各修正系数或修正项的计算方式如下。

雷诺数影响的修正:

$$C_{d,Re} = 0.5885 + 372 / Re_d \quad (8)$$

应用范围 $Re_d > 10^4$ 。

进口圆角影响的修正系数:

$$f_1 = 0.008 + 0.992 \exp\left(-12 \frac{r}{d} - 3.5 \left(\frac{r}{d}\right)^2\right) \quad (9)$$

孔长影响的修正系数:

$$f_{2,\frac{L}{d}} = a_1 \exp\left(b_1 \frac{r}{d}\right) \quad (10)$$

$$f_{2,\frac{L}{d}} = \left[1 + 1.3 \exp\left(c_1 \left(\frac{L-r}{d}\right)^2\right)\right] \left(d_1 + e_1 \frac{L-r}{d}\right) \quad (11)$$

式中: a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 —经验系数,当 $r/d=0$ 时,值分别为 1.0, 0, -1.606, 0.435, 0.021; 当 $r/d \neq 0$ 时,值分别为 0.232, 12.3, -4.5, 0.325, 0.19。

进出口压比影响的修正系数:

当 $r/d=0$ 时,

$$f_3 = \left(\frac{C_{d,Re,r,L} - 0.6}{0.263}\right) (C_{1,PR} - C_{2,PR}) + C_{2,PR} \quad (12)$$

式中: $C_{1,PR}, C_{2,PR}$ —以 $P_{1,t}, P_{2,s}$ 为变量的函数,计算方式如下:

$$C_{1,PR} = 0.8454 + 0.3797 \exp\left(-0.9083 \frac{P_{1,t}}{P_{2,s}}\right) \quad (13)$$

$$C_{2,PR} = 6.6687 \exp\left(0.4619 \frac{P_{1,t}}{P_{2,s}} - 2.367 \sqrt{\frac{P_{1,t}}{P_{2,s}}}\right) \quad (14)$$

$$C_{d,Re,r,L} = 1 - f_1 f_{2,\frac{r}{d}} f_{2,\frac{L}{d}} (1 - C_{d,Re}) \quad (15)$$

当 $r/d \neq 0$ 时, $f_3 = 1$ 。

进口气流冲角影响的修正项:

当 $r/d=0$ 时,

$$\Delta C_{d,i} = -0.000324 i^2 \quad (16)$$

当 $r/d \neq 0$ 时,

$$\Delta C_{d,i} = a_2 (1 - \exp((0.02857i)^{b_2})) \quad (17)$$

式中: a_2, b_2 —以 $r/d, L/d$ 为变量的函数,计算方式如下:

$$a_2 = 0.07876 + \frac{0.07218}{\frac{r}{d} \frac{L}{d} + 0.1928} \quad (18)$$

$$b_2 = -1.921 \left(\frac{r}{d} \frac{L}{d}\right)^{-0.281} + 5.736 \quad (19)$$

图 12 给出了使用公式(8)~(17)预测的不同旋转速度下 $L/d=4, r/d=0.1$ 和 0.2 的轴向旋转孔流量系数与 CFD 的计算结果对比。通过对比可以看出,经验公式计算的流量系数与 CFD 的计算结果吻合, $r/d=0.1, L/d=0.4$ 工况最大偏差为 10.5%, $r/d=0.2, L/d=4$ 工况最大偏差 4.7%,基本能满足工程计算的精度要求。

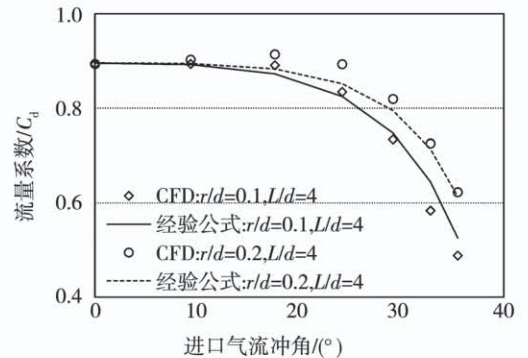


图 12 经验公式计算结果与 CFD 结果对比

Fig. 12 Comparison of CFD and empirical formula
results

5 结 论

本文构造的轴向旋转孔流量系数预测公式计算的流量系数能够与三维数值计算结果很好地吻合,表明该预测公式能够比较可靠地预测不同几何参数下轴向旋转孔的流量系数。

(1) 当短孔的进口圆角比 $r/d < 0.1$ 时, r/d 对流量系数影响明显,可使流量系数增加 40% ~ 50%;当 $r/d > 0.2$ 后,孔的进口圆角比对流量系数影响逐渐消失。

(2) 对于 $L/d > 2.5$, $r/d > 0.05$ 的轴向孔,孔的进口圆角变化对流量系数的影响基本消失,流量系数仅随 L/d 增大而近似线性地缓慢减小。

(3) 压比仅对进口无圆角孔的流量系数产生影响,并随孔的长度增加,影响程度逐渐减小;随着 r/d , L/d 增大,轴向旋转孔的进口气流冲角对流量系数的影响逐渐减小;当 r/d 比较大时, L/d 继续变化将不再引起孔流量系数修正项 $\Delta C_{d,i}$ 的变化。

在实际燃气轮机中还存在大量的径向旋转孔,本文依据数值计算建立的轴向旋转孔流量系数经验模型是否能有效地应用于径向旋转孔计算,可进一步进行研究。

参考文献:

- [1] MULLER Y. Secondary air system model for integrated thermomechanical analysis of a jet engine [C]//ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air. 2008:1359-1374.
- [2] BONZANI F, BOZZI L, MANTERO M, et al. 1D tool for stator-rotor cavities integrated into a fluid network solver of heavy-duty gas turbine secondary air system [C]//ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air. 2010, Glasgow, UK.
- [3] MCGREEHAN W F, SCHOTSCH M J. Flow characteristics of long orifices with rotation and corner radiusing [J]. Journal of Turbomachinery, 1988, 110(2): 213.
- [4] A. LICHTAROWICZ R. K. DUGGINS, E. MARKLAND, et al. Discharge coefficients for incompressible non-cavitating flow through long orifices [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 7(2): 210-219.
- [5] HAY N, SPENCER A. Discharge coefficients of cooling holes with

radiused and chamfered inlets [J]. Journal of Turbomachinery, 1992, 114(4): 701-706.

- [6] H. ZIMMERMANN, J. KUTZ, R. FISCHER. Air system correlations: part 2—rotating holes and two phase flow [C]//ASME International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition. 1998, New York, UK.
- [7] WITTIG S, KIM S, JAKOBY R, et al. Experimental and numerical study of orifice discharge coefficients in high-speed rotating disks [J]. Journal of Turbomachinery, 1996, 118(2): 400-407.
- [8] IDRIS A, PULLEN K, BARNES D. An investigation into the flow within inclined rotating orifices and the influence of incidence angle on the discharge coefficient [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy, 2004, 218(1): 55-68.
- [9] IDRIS A, PULLEN K R. Correlations for the discharge coefficient of rotating orifices based on the incidence angle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy, 2005, 219(5): 333-352.
- [10] HÜNING M. Comparison of discharge coefficient measurements and correlations for several orifice designs with cross-flow and rotation around several axes [C]//ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, & Air. 2008, Berlin, Germany.
- [11] 朱鹏飞, 刘振侠, 吕亚国. 考虑入射角影响的旋转孔计算模型 [J]. 推进技术, 2015(8): 101-107.
ZHU Peng-fei, LIU Zhen-xia, LYU Ya-guo. Computational model of rotating orifice considering incidence angle [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015(8): 101-107.
- [12] DITTMANN M, DULLENKOPF K, WITTIG S. Discharge coefficients of rotating short orifices with radiused and chamfered inlets [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4): 1001-1009.
- [13] 聂俊领. 旋转条件下小孔流量系数试验研究与数值分析 [D]. 南京航空航天大学, 2014.
NIE Jun-ling, Numerical study on the discharge coefficient of rotating orifices [D]. NUAA, 2014.
- [14] 刘高文, 张 林, 务卫涛, 等. 长径比对预旋孔流动特性影响的数值研究 [J]. 推进技术, 2013, 34(005): 644-650.
LIU Gao-wen, ZHANG Lin, WU Wei-tao, et al. Numerical simulations on the flow characteristics of the pre-swirl nozzles with different length-to-diameter ratios [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(5): 644-650.

(刘 颖 编辑)