

文章编号: 1000-8055(2010)01-0053-05

高位进气径向出气转静系静盘压力研究

全永凯, 孙纪宁, 罗 翔

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 用实验的方法获取了高位垂直进气径向出流的静盘表面压力分布和转静腔内的旋流系数. 实验结果表明: 在低于 0.6 倍半径的范围内, 沿半径增大方向静压随之增大; 在射流孔处压力降至最低, 而后又突然升高并逐步趋于平稳; 静盘表面压力随着流量的增加而增加, 随着旋转雷诺数的增加而降低; 在旋转雷诺数小于等于 2.6×10^6 、流量系数小于等于 4.50×10^{-4} 的范围内两盘间可以形成稳定的旋转核心. 此外, 在实验范围内, 流量系数和旋转雷诺数对旋流系数值的影响较小.

关 键 词: 转静系; 高位进气; 压力分布; 旋流系数

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Pressure measurements on a static disk with high positioned inflow and radial outflow under rotor-stator system

QUAN Yong-kai, SUN Ji-ning, LUO Xiang

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: The pressure distribution of a static disk and relative rotational speed in the rotor-stator cavity were experimentally investigated. Results show that the static pressure increases with the radial accretion within 0.6 radius range, and the lowest value of pressure appears at the ejection hole and then increases sharply to the moderate stage along the radial direction. The pressure upon the static disk increases with the augmentation of flow rate, and decreases with the increase of rotational Reynolds number. A steady rotational core can be formed when the value of rotational Reynolds number is less than 2.6×10^6 and the mass flow rate less than 4.50×10^{-4} . In addition, the variations of mass flow rate and rotational Reynolds number have little influences on the relative rotational speed.

Key words: rotor-stator system; high-positioned inflow; pressure distribution; relative rotational speed

在旋转盘腔的研究中, 由于流动结构复杂, 问题难度较大. 如果了解盘腔内整个盘面的压力分布, 便可以对其流动进行分析, 达到另辟蹊径的效果. 此外更为重要的一点是静盘压力是计算涡轮轴向力的一个重要参数. 因此, 有关涡轮盘腔内压力分布的研究便显得十分重要了.

Bayley 等通过研究指出^[1], 转静系中静止罩

对腔体内的压力分布影响不大; Owen 用线性 Ekman 层方程求解了径向出流转静系旋转盘腔中的核心流动^[2]; Kilic 等研究了以不同速度旋转的两盘间的流动情况^[3], 分析了两盘转速比、湍流度等参数对旋流系数的影响. Boutarfa, Owen 等应用激光多普勒技术研究了盘腔轴向贯通流动中浮升力对流动的影响^[4-5], 指出旋转核心的转速随

收稿日期: 2008-12-18; 修订日期: 2009-05-12

作者简介: 全永凯(1983-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士生, 主要从事旋转涡轮盘腔流动与换热方面的研究.

着加热盘与冷气间温差的增大而减小. 国内的吴宏、徐国强等对高位垂直进气转静系盘腔内的流动与换热进行了研究^[6-9], 用数值的方法分析了旋流系数的分布规律; 陶智等利用粒子图像测速技术(简称 PIV)对高位垂直进气的转静系旋转盘腔流场进行了测试^[10], 对核心流动进行了分析. 本文研究的主要特点是通过压力的测量来分析盘腔内的流动.

1 实验模型

实验模型主要由转盘、静盘、静盘盘罩等部分组成, 如图 1 所示.

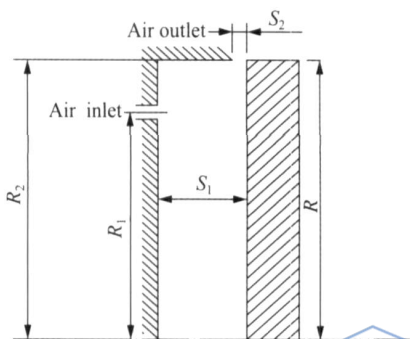


图1 实验模型

Fig. 1 Experimental model

图 1 中 S_1 为转静盘间隙; S_2 为出气间隙; R 为转盘半径; R_1 为静盘进气孔位置.

实验件主转盘是由不锈钢 (1Cr18Ni9 Ti) 加工而成的厚 $\delta = 25$ mm、半径 $R = 400$ mm 的圆盘. 静盘是由 45 # 钢加工的厚 $\delta = 5$ mm, 半径 $R_2 = 405$ mm 的圆盘. 本实验采用高位进气的模型, 在静盘表面 $R_1 = 320$ mm 处沿圆周开了 144 个 $\phi 5$ mm 的轴向通气孔, 同时加工一组内径为 $\phi 800$ mm、宽分别为 20, 30, 40, 50, 60 mm 的盘罩. 实验过程中, 将静盘和盘罩一同固定在静盘支架上, 并通过使用不同宽度的盘罩来调节转盘和静盘的间隙, 以实现不同转静间隙下的实验测量.

静盘表面的测压点分布: 在迎风面开设了 25 个 $\phi 2$ mm 的取压孔; 在两个射流孔心布置 2 个总压测点; 在静盘出气口处布置 2 个总压测点; 在盘罩轴向布置 4~12 个静压测点. 如图 2 所示.

实验时用铜管从静盘背面插入取压孔, 铜管另一侧与压力传感器相连, 本实验所用的压力传感器为 Honey Well 公司产的 24pc 微压力传感器, 量程为 6.895 kPa, 精度为 0.25 %, 信号由 AD-AM-4018 采集.

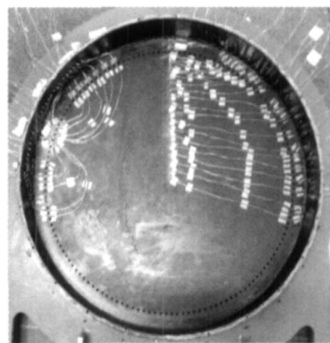


图2 压力测点分布图

Fig. 2 Measuring pressure point distributed

本实验是在北京航空航天大学能源与动力工程学院航空发动机气动热力科技重点实验室的高速综合旋转换热实验台上进行的.

2 数值模拟

首先以图 1 为实验结构模型, 应用计算流体力学 (CFD) 计算对某一工况的流场结构进行分析.

1) 控制方程

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_j} = 0$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \\ - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned}$$

因本文研究的是稳态流动, 因此方程中 $\frac{\partial}{\partial t} = 0$.

2) 边界条件

入口条件: 给定入口冷气流量 $\dot{m} = 1100$ kg/h.

出口条件: 充分发展段的压力条件.

静盘边界无滑移条件: $u = 0, v = 0, w = 0$.

转盘边界条件: $u = 0, v = 0, w = \omega r$ (r 为径向位置). 给定转盘转速 $n = 2500$ r/min.

3) 湍流模型以及网格划分

采用 SST(剪切应力输运) 模型、计算网格数为 $r \times \phi \times z = 180 \times 10 \times 45$.

因为所研究的是高位垂直进气径向出流模型, 因此腔内高、低半径间流体的掺混较少, 可以将 $x < 0.6$ (其中 $x = r/R$, 为无量纲径向位置) 的低半径处作为封闭腔处理.

图 3 为转静盘间 (即 rz 平面) 的流线图. 可以看出, 射流孔上面有一个逆时针旋转的涡, 下面有两个转向相反的涡^[4]. 且在两盘中心的低半径处

存在着核心流动.

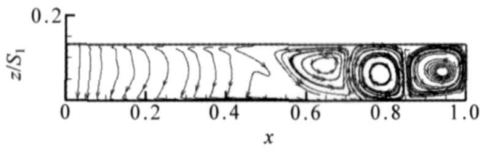


图 3 矩形腔内的流场分布
($Re_{\omega} = 2.6 \times 10^6$, $C_w = 4.50 \times 10^4$)
Fig. 3 Flow field in the rectangular cavity
($Re_{\omega} = 2.6 \times 10^6$, $C_w = 4.50 \times 10^4$)

定义旋流系数 β 为气体的切向速度 $v_{\theta,c}$ 与转盘的半径处切向速度之比,它反映了旋转盘带动其周围气体一起旋转的能力.

$$\beta = \frac{v_{\theta,c}}{\omega r} = \frac{\omega r}{\omega r} = \omega \tag{1}$$

其中 $v_{\theta,c}$ 为气体的切向速度 (m/s); ω 为转盘旋转角速度 (rad/s); ω 为气体的旋转角速度 (rad/s).

图 4 为 $x < 0.6$ 范围内不同径向位置空气的旋流系数随轴向位置变化的数值计算结果.

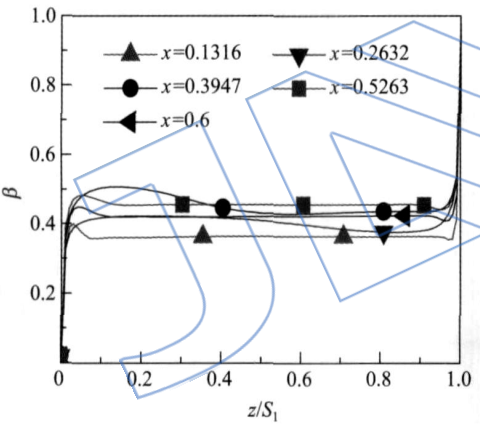


图 4 不同径向位置的旋流系数随轴向位置分布
Fig. 4 β distribution for various radial positions at various axial positions

由图 4 可见 (其中 z 为轴向位置), 此工况下两盘之间确实存在着一个旋转核心, 并且相同径向位置 (除两盘表面附近) 上的旋流系数可以看成常数. 当 $x < 0.6$ 时, 旋流系数 β 在 $0.36 \sim 0.46$ 之间.

3 实验结果分析

3.1 压力场分析

定义无量纲参数

流量系数 $C_w = \frac{\dot{m}}{\mu R};$

旋转雷诺数 $Re_{\omega} = \frac{\rho \omega R^2}{\mu};$

间隙比 $G = S_1 / R.$

其中 $\dot{m}$ 为冷气质量流量 (kg/s); μ 为气体黏性系数 (kg/(m·s)); R 为静盘有效半径 (m); ρ 为冷气密度 (kg/m³); ω 为转盘旋转角速度 (rad/s); S_1 为转静盘间隙 (m).

图 5 和图 6 为静盘压力随流量系数以及旋转雷诺数的变化分布结果.

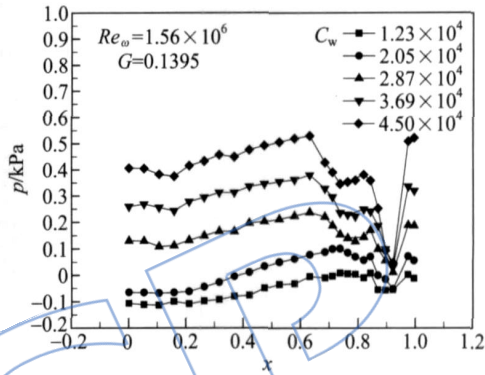


图 5 定旋转雷诺数下静盘压力变化
Fig. 5 Pressure distribution for stator disk at $Re_{\omega} = 1.56 \times 10^6$

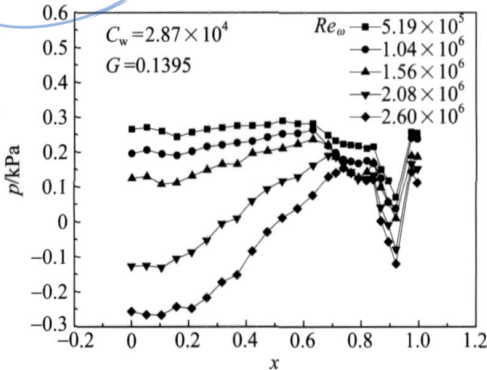


图 6 定流量系数下静盘压力变化
Fig. 6 Pressure distribution for stator disk at $C_w = 2.87 \times 10^4$

由图 5 和图 6 可见: ①在同一转速下, 静盘压力 p 随流量的增加而增大. 这是因为随着流量的增大, 流体受阻加大, 为了出流腔内外必须建立更大的压差, 因此流量增大腔内压力 p 提高. ②相同流量系数下, 静盘压力 p 随旋转雷诺数 Re_{ω} 增大而降低. 这主要是由于 Re_{ω} 的提高使得旋转盘的泵效应增强, 径向出流增大, 而且由于黏性作用的存在, 转盘附近的流体转速也随之增大, 导致静压 p 降低. ③在 $x < 0.6$ 的范围内, 沿半径增大方向静压 p 随之增大, 在射流孔处压力降至最低,

而后又突然升高并逐步趋于平稳.这是因为射流孔处冷气流速最大,所以静压最小,而在射流孔以上部分由于存在着一个逆时针旋转的涡,如图3所示,回流在高半径处滞止,造成冲击点上方的静压增大.

3.2 旋流系数

本实验工况和结构决定了该流动不能按照库塔流动来看待,也不属于自由盘流动,两盘边界层不会相互影响,特别是低半径($x < 0.6$)处更是如此.略去高半径处射流控制的复杂流动区域,对低半径($x < 0.6$)进行 Batchelor 流动分析. Batchelor 流动时,在转盘和静盘两个表面附近形成各自独立的边界层.在两个边界层之间有一个流体核心,它以低于 ω 的某一角速度 ω_c 旋转,因此常称为旋转核心.

假设两盘间的旋转核是无黏的,且其径向速度 $v_r = 0$,则控制流体流动的动量方程变为

$$\frac{dp}{dr} = \rho v_{\theta,c}^2 / r \quad (2)$$

即

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho(\omega_c r)^2}{r} = \rho \omega_c^2 r \quad (3)$$

从 r_1 到 r_2 积分

$$p_2 - p_1 = \frac{\rho \omega_c^2 (r_2^2 - r_1^2)}{2} \quad (4)$$

令 $\beta = \frac{\omega_c}{\omega}$,得

$$\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho \omega^2 R^2} = \left[\left(\frac{r_2}{R} \right)^2 - \left(\frac{r_1}{R} \right)^2 \right] \beta^2 \quad (5)$$

取 $r_1 = 0$,即认为自盘心到某一半径处盘腔内具有旋转核心,计算出

$$\beta = \frac{\sqrt{2(p - p_0)}}{\sqrt{\rho \omega r}} \quad (6)$$

其中 p 为静盘表面压力(静压:Pa); p_0 为盘腔出口压力(Pa).

图7和图8显示了不同工况下根据公式(6)计算出的不同半径处的 β 值.

由图7和图8可见,两盘之间存在着旋转核心.并且在小流量和大转速情况下, β 值在 $x < 0.6$ 的区域内分布于0.30~0.43之间,且曲线平稳,这一方面与计算结果一致,另一方面也与文献[6]

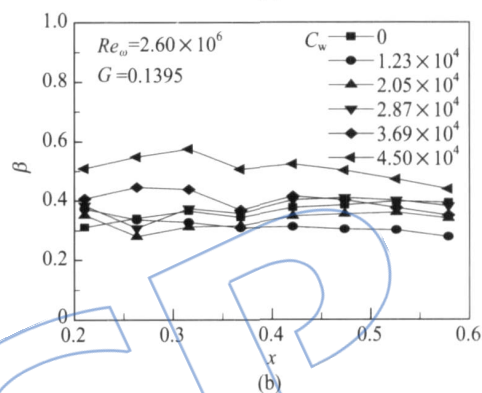
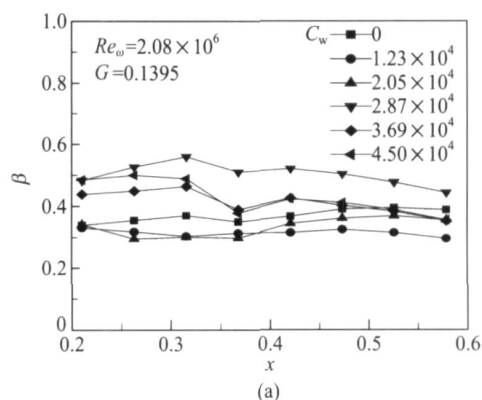


图7 不同流量系数下 β 值的径向分布

Fig. 7 Distribution of β for various C_w

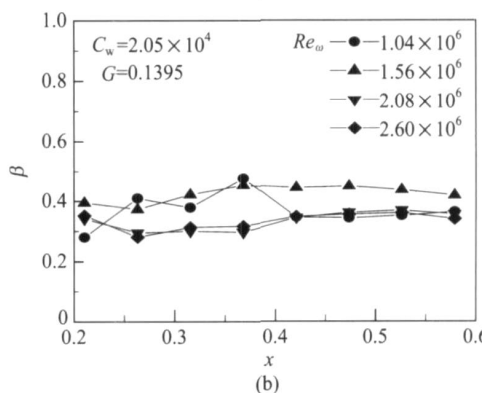
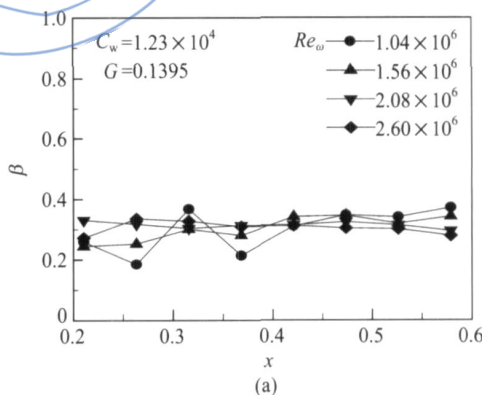


图8 不同旋转雷诺数下 β 值的径向分布

Fig. 8 Distribution of β for various Re_w

中相似工况下得到的结果相符,即实验得到的旋

流系数值要比 0.431 (Owen^[2] 得到层流时无限大圆盘的旋流系数 $\beta = 0.341$, 湍流时 $\beta = 0.431$) 小一些,这主要是由于高位射流的影响,使得核心流动被削弱的原故.在大流量的情况下,流体的径向流动不可忽略,则由公式(6)得出的 β 值存在较大误差,如图 7 所示.

由图 7、图 8 还可以看出,相同旋转雷诺数下,流量系数对 β 值的影响不是很明显;在同一流量的系数下,旋转雷诺数对 β 值的影响也不大,随着旋转雷诺数的增大,核心区 β 值随径向位置的变化更趋于平缓.

4 结 论

1) 本实验中,在 $r/R < 0.6$ 的低半径范围内,沿半径增大方向静压 p 随之增大;在射流孔处压力降至最低,而后又突然升高并逐步趋于平稳.

2) 静盘表面压力 p 随着流量系数的增加而增加,随着旋转雷诺数 Re_{ω} 的增加而下降.

3) 本实验范围内,转静盘间能够形成稳定的旋转核心.在小流量和大转速的情况下尤为明显, β 值分布于 0.30~0.43 之间.

4) 本实验范围内,流量系数以及旋转雷诺数对 β 值的影响相对较小.

参考文献:

- [1] Bayley F J, Owen J M. The fluid dynamics of a shrouded disk system with a radial outflow of coolant[J]. Journal of Engineering for Power, 1970, 92: 335-341.
- [2] Owen J M. An approximate solution for the flow between a rotating and a stationary disk[J]. Journal of Turbomachinery, 1989, 111: 323-332.
- [3] Kilic M, Owen J M. Computation of flow between two disks rotating at different speeds [J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125: 394-400.
- [4] Boutarfa R, Harmand S. Local convective heat exchanges

and flow structure in a rotor-stator system[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2003, 42: 1129-1143.

- [5] Owen J M, Powell J. Buoyancy-induced flow in a heated rotating cavity [J]. ASME Eng. Gas Turbines Power, 2006, 128: 128-134.
- [6] 吴宏, 刘洪鹏, 徐国强, 等. 高位垂直进气转静系盘腔内流场的数值研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, (2): 13-17.
WU Hong, LIU Hongpeng, XU Guoqiang, et al. Numerical study on flow field between rotating and stationary disks with high-positioned air inflow [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, (2): 13-17. (in Chinese)
- [7] 孙纪宁, 陶智, 丁水汀, 等. 高位进气、径向出流的旋转腔内流动与换热的数值研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 586-590.
SUN Jining, TAO Zhi, DING Shuiting, et al. Numerical investigation of fluid flow and heat transfer characteristics within a rotating cavity with a high positioned axial inlet and a radial outlet [J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(5): 586-590. (in Chinese)
- [8] 罗翔, 徐国强, 丁水汀, 等. 高位垂直进气旋转盘非稳态换热的实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(6): 512-515.
LUO Xiang, XU Guoqiang, DING Shuiting, et al. Experiment investigation on transient heat transfer in rotor-stator system with high-positioned air inflow [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(6): 512-515. (in Chinese)
- [9] 徐国强, 詹国治, 丁水汀, 等. 高位垂直进气转静系旋转盘流动与换热计算[J]. 推进技术, 2000, 21(4): 40-43.
XU Guoqiang, ZHAN Guozhi, DING Shuiting, et al. Numerical calculation for flow and heat transfer of a shrouded rotating disk with high-positioned air-inlet [J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(4): 40-43. (in Chinese)
- [10] 陶智, 高娟, 蔡毅, 等. 高位垂直进气转静系旋转盘腔流场的实验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 347-351.
TAO Zhi, GAO Juan, CAI Yi, et al. Experimental investigation of the flow field between a rotating and a stationary disk at high-positioned air inflow [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 347-351. (in Chinese)