

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.012

基于 PIV 测试的径向入流旋转盘腔流动特性研究

孙肇林, 魏嵩, 严佳玺

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:将 PIV 技术应用于压气机径向入流的简单盘腔中,使用实验研究旋转雷诺数和流量系数对于盘腔内部旋流数以及流场的影响,得到入口旋流数 C_{in} 随罗斯比数 R_o 变化以及非线性修正系数 K_f 随湍流参数 λ 变化的拟合公式;提出 OWEN 等人模型的修正方法,使其可以更好地应用于工程。研究发现:旋转雷诺数的增大会导致旋流数变化趋势减慢,使得整个流场实现更稳定的分层;流量系数的增大会导致旋流数变化趋势加快,同时会使流场中的粒子以更为规则的方式沿转盘旋转方向运动。

关键词:压气机;粒子图像测速;旋转盘腔;旋流数

中图分类号:TH138 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)06-0062-06

Study on Flow Characteristics of Radial Inflow Rotating Disk Cavity Based on PIV Test

SUN Zhaolin, WEI Song, YAN Jiaxi

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:By applying PIV technology to a simple disk cavity with radial inflow, studies the influence of rotating Reynolds number and flow coefficient on the swirl number and flow field in the disk cavity, obtaining the fitting formula of the inlet swirl number C_{in} with R_o and the nonlinear correction coefficient K_f . Thus an method for modifying the nonlinear model is proposed for better application in engineering. It is found that the increase of the rotating Reynolds number will lead to the decrease of the cyclone number, making the entire flow field achieve more stable stratification. And the increase of the flow coefficient will result in the increase of the cyclone number, and meanwhile make the particles in the flow field move in a more regular way along the rotation direction of the rotating disk.

Keywords:compressor; PIV; rotating disk cavity; number of swirls

0 引言

压气机引气作为空气系统的源头,其工作特性对冷却空气的品质及对热端部件的冷却效果具有重要影响^[1]。内部引气系统从两级压气机盘间引气,经过两个盘之间的鼓筒引气孔径向流向盘心,并经盘间空腔向后或向前流出,这种形式的盘腔流动被国内外研究学者称为径向进气旋转盘腔。高速旋转盘腔内的流动复杂,影响因素众多,阻碍着流体的径向流动,导致径向引气过程中气流压力和引气量急剧下降^[2-3]。这一现象直接导致用于冷却密封的空气品质降低,制约了发动机性能的提升。在实际应用中有很多小型的发动机没有充足的空间来安装减涡器。在工程中对盘腔内部的流动进行正的预估是十分必要的。OWEN 等^[4]建立了自由涡模型和非线性模型来预估盘腔内部的旋流数分布,在湍流参数 λ 为 0.007~0.140

的范围内具有很高的精度。但是由于圆盘附近非线性惯性和离心力与线性科里奥利力相比通常可以忽略不计的假设,导致在湍流参数 λ 大于 0.2 之后的精度下降。因此针对传统简单盘腔建立更准确的预测模型非常有意义。

粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 是获取盘腔内旋流数的有效试验手段,国内外学者^[4-10]为进一步研究盘腔内部的流动细节,把流动可视化技术应用在旋转盘腔当中来获取内部的流场结构和速度场分布。本文将 PIV 技术应用于径向入流的旋转盘腔当中,重点分析转速和流量对于盘腔内的旋流数和正面速度云图、正面实物图的影响以及流量转速之间对于旋流数的耦合影响。

1 实验设备以及测量手段

1.1 试验设备介绍

1) 旋转试验台

第一作者简介:孙肇林(1998—),男,辽宁沈阳人,硕士,研究方向为涡轮机械内流,13624017370@qq.com。

本文旋转试验台如图 1 所示,由旋转盘腔和集气腔、转轴 PIV 拍摄系统、信号采集系统、供气系统以及粒子供入系统所构成。

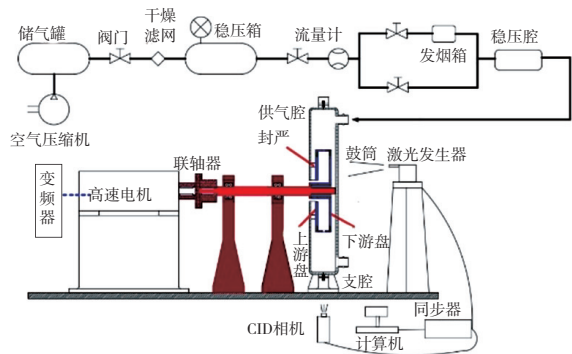


图 1 实验系统示意图

在该试验段中,上游盘、下游盘和鼓筒围成了旋转盘腔,鼓筒上沿周向有均匀布置的鼓筒孔,位于盘腔的中间平面上。图中金属盘与有机盘之间的间距为 50 mm,进气孔的孔径为 10 mm,个数为 12 个。图 2 所示为本试验中盘腔试验件的剖视三维模型,图 3 为旋转试验段的二维示意图。

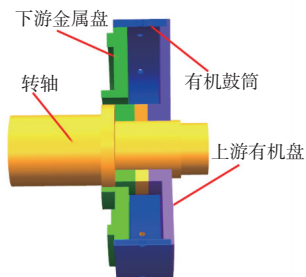


图 2 试验件三维剖视图

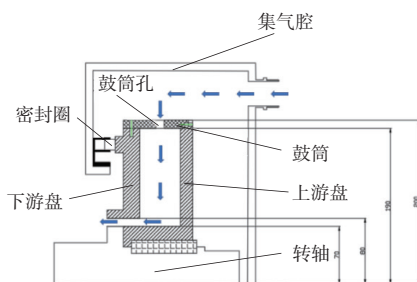


图 3 实验模型示意图

2) 常规信号采集系统

本试验需要常规的压力、温度以及流量的测试系统,用来测量集气腔、供气管路等静止件内的流场状态。本试验中信号采集装置的名称、量程与精度如表 1 所示。实验操作台如图 4 所示。

表 1 实验设备

实验设备	量程	精度
K 型热电偶	150 K~700 K	$\pm 0.75\%$
CYG1601 压力传感器	0~200 kPa	$\pm 1\%$ FS
涡街流量计	7~100 m ³ /h	$\pm 1\%$ FS
光电激光转速测量器	0~99 999 r/min	$\pm 0.04\%$

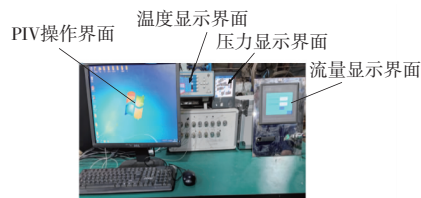


图 4 实验操作台

3) PIV 拍摄系统

PIV 测试设备硬件系统包括照明激光器、同步控制器、图像采集板(放置于计算机内)、高速数字相机和计算机。在流场中布撒大量示踪粒子跟随流场运动把激光束经过组合透镜扩束成片光照明流场,使用数字相机拍摄流场照片,得到前后两帧粒子图像。对图像中的粒子图像进行互相关计算,得到流场一个切面内定量的速度分布。PIV 系统实物如图 5 所示。

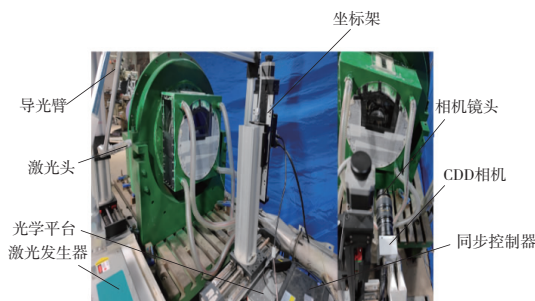


图 5 PIV 系统实物图

4) 粒子发生系统

粒子发生系统由小型空气压缩机、粒子发生器、示踪粒子组成。PIV 系统中小型空气压缩机的作用是给粒子发生器提供充足的气流和压力来确保液体粒子可以雾化。

1.2 实验方案

1) 光路位置

光路测量位置如图 6 所示。从盘腔的侧面进行激光打光,在盘腔正面拍摄,拍摄的平面为 $r-z$ 平面。在图 6(b)的模型示意图中浅灰色平面为实验中的激光平面,其中深灰色方框为实验的观察窗口(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

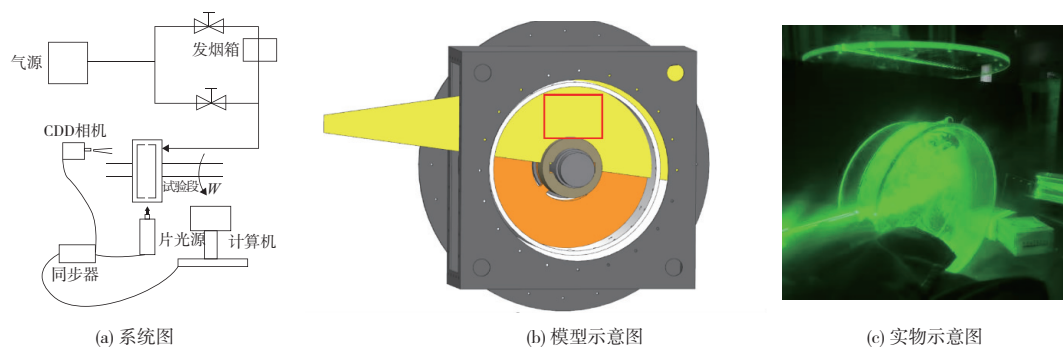


图6 光路测量位置

2) 实验工况

为了研究流量和转速对于盘腔内部旋流数和流场的影响,本文设计了24组工况,试验工况范围参考实际运行工况,按照相似原理模化得到,所遵循的相似准则为湍流参数。具体工况如表2所示。

表2 实验工况

参数名称	参数值
流量/(kg/s)	0.008~0.013
转速/(r/min)	90~960
盘间间隙/mm	50
孔径/mm	10

实验结构为直型孔、盘间隙为50 mm、孔径为

10 mm。在气动方面则有3个流量与8个转速共24种组合方式,本文一共设计了24个实验工况。

2 实验结果及分析

2.1 转速对于内部流场结构的影响

1) 转速影响的速度云图和正面实物图

图7所示为流量系数为848.5、不同旋转雷诺数下的正面速度云图对比和正面实物图对比,旋转雷诺数从113 246~226 493。在云图当中横坐标表示数据点位于的横向相对位置,纵坐标表示数据点位于的径向相对位置。不同颜色的区域表示速度不同。在正面实物图当中白色的区域为流体中示踪粒子被激光照亮的部分,可以表征流体的流动情况。

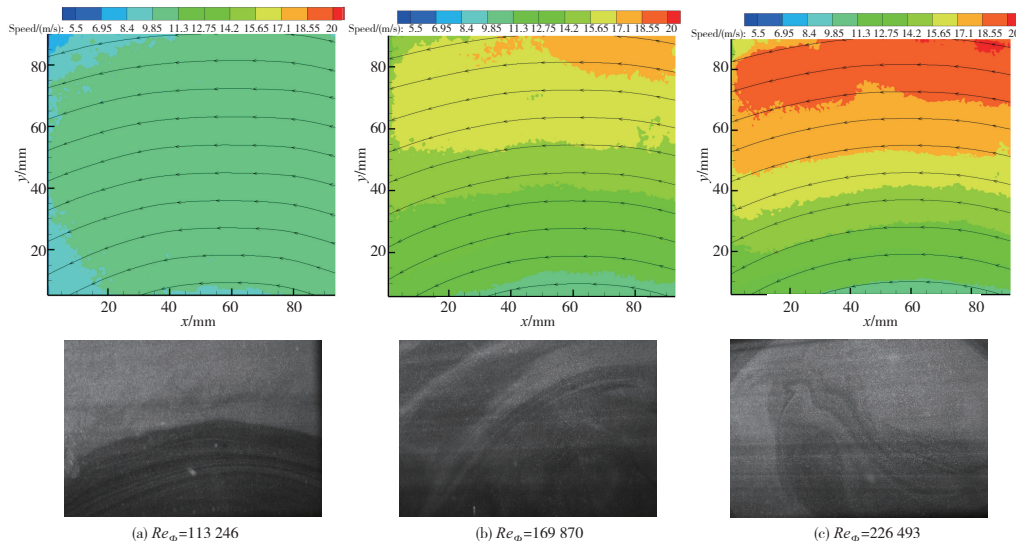


图7 流量系数为848.5、不同旋转雷诺数下的正面速度云图和正面实物图的对比

从图7中可以看到,盘腔内流线均是沿逆时针方向进行转动的。这是因为整个盘腔是以逆时针方向进行转动的,并且所选取的拍摄部位位于盘腔的上半部,盘腔中转盘的内壁面会带动内部流体进行转动。从图中还可以看到,不同旋转雷

诺数下盘腔内速度分布和正面的流动图像有较大差异。在旋转雷诺数较大的工况下,云图中的速度分布分层明显,有着较为清晰的颜色分界线,正面实物图中黑色区域与白色粒子明显掺杂。在旋转雷诺数较小的工况下,云图中速度的分布无明显

显分层,无清晰的颜色分界线。正面实物图中黑色区域与白色粒子区域有着清晰的分界线。这是因为在第一张图中流场存在微弱的径向入流,此时转速小,旋转效应弱,空气的黏性可以平衡科氏力。随着转速的增大,科氏力增大,此时需要很强的剪切力来平衡科氏力,同时增大的科氏力会抑制流体的震荡,使得整个流场实现更稳定的分层

2) 转速影响的实验数据速度散点图与理论非线性曲线作比较

图 8 所示为流量系数为 2 312 下的旋流数曲线对比,旋转雷诺数从 22 682~234 383。

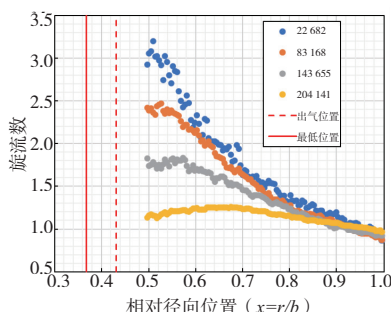


图 8 流量系数为 2 312、不同旋转雷诺数下旋流数沿径向位置的分布趋势

从图 8 中可以看到,盘腔内旋流数沿径向分布趋势基本呈现出随半径降低而增大,并在最高径向位置处趋于一致的特征,这是因为共性特点。这表明随着径向位置的下降,流体的切向速度会越来越大于转盘的速度,使流体的切向速度超过当地转盘的旋转速度,甚至数倍于当地转盘的旋转速度,形成快速旋转核心。从图 8 中还可以看到,不同旋转雷诺数下盘腔内的旋流数分布有较大差异。旋转雷诺数较大的工况下,旋流数沿径向分布呈现出随半径降低先增大后减小并且旋流数变化缓慢的特征。旋转雷诺数较小的工况下,旋流数沿径向分布呈现出随半径降低而增大并且旋流数快速变化。随着转速的增大,在盘腔中非线性曲线与实验数据重合的区域变大,说明此时盘腔内部强制涡的区域变化。而强制涡相比于自由涡而言,其速度变化率要小得多,这可以说明转速越大,在相同径向位置的旋流数越小。

图 9 为 OWEN 文献中流量系数为 309、旋转雷诺数为 6×10^5 下的实验数据与理论曲线对比。

OWEN 适用的范围是湍流参数 λ 在 0.007~0.140,而在更大的气动工况下的实验没有涉及,这影响了工程应用。为了加强该模型的工程应用,选择对方程中的非线性项进行合理调整,这个

非线性项出现在方程的 $\frac{30}{490\pi\alpha_0(\beta)\gamma_0(\beta)}$ 项。

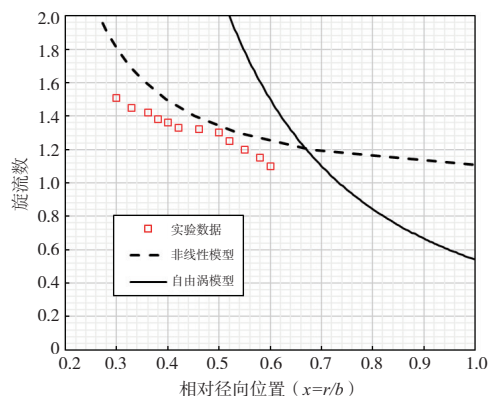


图 9 OWEN 文献中流量系数为 309、旋转雷诺数为 6×10^5 下的实验数据与理论曲线对比

从图 9 中可以看出图中非线性曲线会高于实验数据的位置。这是因为 OWEN 文献认为圆盘附近非线性惯性和离心力与线性科氏力相比通常可以忽略不计。在这些条件下,边界层方程(称为旋转参考系)简化为黏性力和科氏力之间的平衡,得到的方程通常称为“线性 Ekman 层方程”。速度的切向分量在核心,但在 Ekman 层之外,可以表示为

$$\beta(x) = 1 - \lambda x^{-\alpha} \quad (1)$$

在线性模型的基础上 OWEN 进行进一步的提升得到非线性模型,非线性模型是用来描述核心区内部的旋流数分布的,方程如下:

$$\beta(x) = 1 - \operatorname{sgn}(Q) \left(\frac{30}{490\pi\alpha_0(\beta)\gamma_0(\beta)} \right)^{5/8} |\lambda T|^{5/8} x^{-13/8} \quad (2)$$

对于非线性曲线每一种工况都有对应的 K_i 值非线性曲线的表达式为

$$\beta(x) = 1 - \operatorname{sgn}(Q) K_i^{5/8} |\lambda T|^{5/8} x^{-13/8} \quad (3)$$

OWEN 非线性模型只考虑了 Ekman 边界层的黏性,认为核心区的流体为无黏流体。为了进一步加强工程应用的实用性,本文把核心区流体的黏性考虑进去,即距离边界层不同位置的流体受到壁面的带动作用是不同的。把 $\frac{30}{490\pi\alpha_0(\beta)\gamma_0(\beta)}$ 定义为 K_i ,同时对于每种工况下的 K_i 进行手动赋值,可以看到调整后的非线性模型与实验数据更加吻合。

图 10 为流量系数为 2 312、不同旋转雷诺数下实验数据与理论曲线对比。

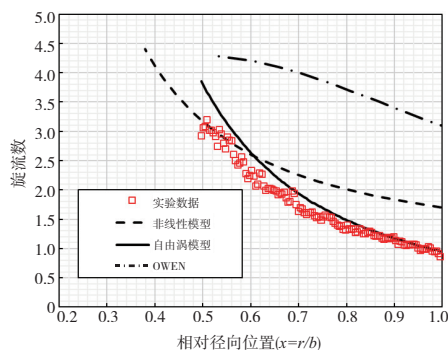
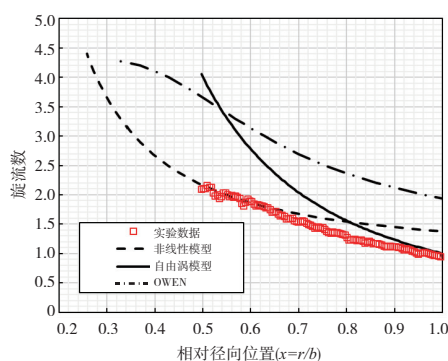
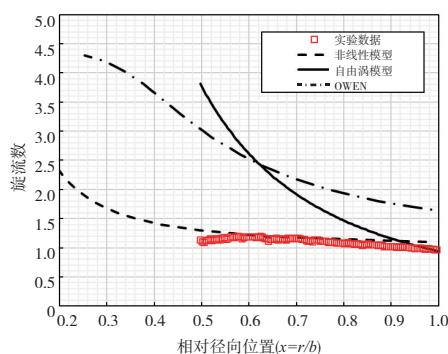
(a) $Re_\phi = 22\ 682$ (b) $Re_\phi = 113\ 411$ (c) $Re_\phi = 234\ 384$

图 10 流量系数为 2 312、不同旋转雷诺数下实验数据与理论曲线对比

从图 10 中可以看到,不同旋转雷诺数下实验数据与非线性曲线和自由涡曲线重合部分差异很大。在旋转雷诺数较大的工况下,本文所得到的实验数据与非线性模型曲线重合的部分多,与自由涡模型曲线重合部分少。在旋转雷诺数较小的工况下,本文所得到的实验数据与非线性模型曲线重合的部分少,与自由涡模型曲线重合部分多。可以得出结论:当旋转雷诺数增大时,实验数据与非线性模型曲线重合的部分增加,与自由涡模型曲线重合部分减少。同时可以发现,本文的非线性模型曲线相比于 OWEN 文献中的非线性模型和实验数据更加吻合。

2.2 流量对于内部流场结构的影响

1) 流量对于速度云图和正面实物图的影响

图 11 为旋转雷诺数 $Re_\phi = 169\ 870$ 时的正面速度云图和正面实物图,流量系数从 848~3 485。在云图当中横坐标表示数据点位于的横向相对位置,纵坐标表示数据点位于的径向相对位置,不同颜色的区域表示速度不同。在正面实物图当中白色的区域为流体中示踪粒子被激光照亮的部分可以表征流体的流动情况。

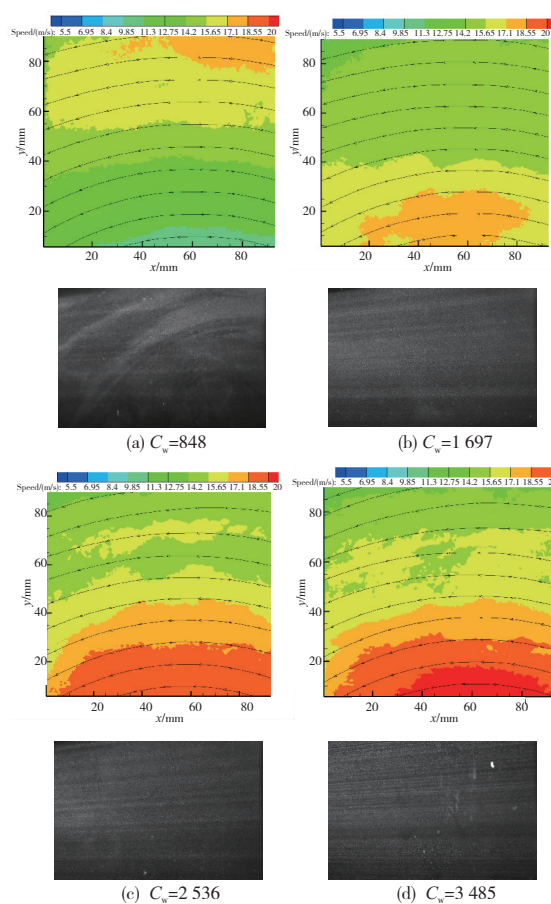


图 11 旋转雷诺数为 169 870、不同流量系数下的正面速度云图和正面实物图对比

从图 11 中可以看到,不同流量系数下的速度云图和正面流动图像有较大差异。随着流量系数的增大,速度云图中的速度分界线出现了下移的现象。正面实物图中,在流量系数较小的工况下,白色的粒子与黑色区域不均匀掺杂,并以一种不规则的方式流动;在流量系数较大的工况下,白色粒子与黑色区域均匀掺杂,并以较为规则的方式流动。

2) 流量影响的实验数据速度散点图与理论非线性曲线作比较

图12所示为旋转雷诺数为113 411时的旋流数曲线对比,流量系数从2 312~3 757。通过实验数据与非线性曲线、自由涡曲线的对比可知,当流量变大时,实验数据与非线性曲线的重叠区域变小,与自由涡曲线重叠区域变大。

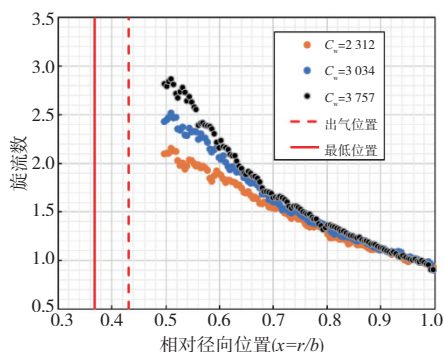


图12 旋转雷诺数为113 411、不同流量系数下旋流数沿径向位置的分布趋势

从图12中看到,不同旋转雷诺数下盘腔内的旋流数分布有较大差异。在流量系数较大的工况下,旋流数沿径向分布呈现出随半径降低而快速增大的特征;在旋转雷诺数较小的工况下,旋流数沿径向分布呈现出随半径降低而缓慢增大的特征,在相同的低径向位置处,流量越大对应的旋流数越大。这是因为在相同的半径位置处 Ωr 是不变的,即旋流数越大的位置其流体的切向速度也越大。在转速相同的情况下流量的上升会导致湍流参数值的上升,并且可以发现随着流量系数的增大,实验数据与自由涡区域的重合程度增大,自由涡入侵能力加强,而自由涡相比于非线性曲线而言,其旋流数的增大速率大,这可以解释流量系数的增大会使相同径向位置的旋流数增大。

2.3 流量和转速耦合的影响

针对流量和转速的耦合作用,本文选取两种无量纲参数,分别为湍流参数 λ 和罗斯比数 R_o 。

图13所示为入口旋流数 C_{in} 随罗斯比数变化,罗斯比数从0.354~5.950。从图13可以得到 C_{in} 随 R_o 变化的拟合公式: $C_{in}=0.921\ 9R_o^{-0.042}$ 。

从图13中可以看到,盘腔中入口旋流数分布趋势基本呈现随着 R_o 增大而减小。这是因为 R_o 的增大会导致入射角的减小,而入射角的减小会使得壁面引导入流部分减少,惯性引导入流部分变大,进而导致入口旋流数变大。这就可以解释 R_o 的增大会导致入口旋流数的减小。

图14所示为非线性修正系数 K_i 随湍流参数 λ

的变化, λ 从0.117~0.351。从图14可以得到 K_i 随 λ 变化的拟合公式: $K_i=1.105\ 6\ln(\lambda)+2.635\ 7$ 。

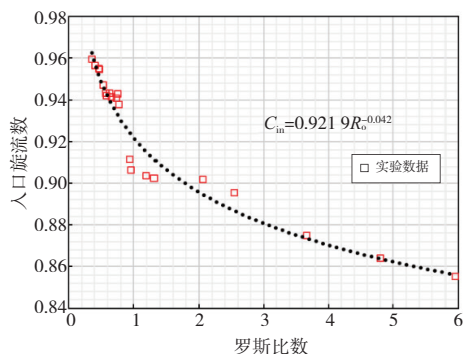


图13 入口旋流数与罗斯比数关系

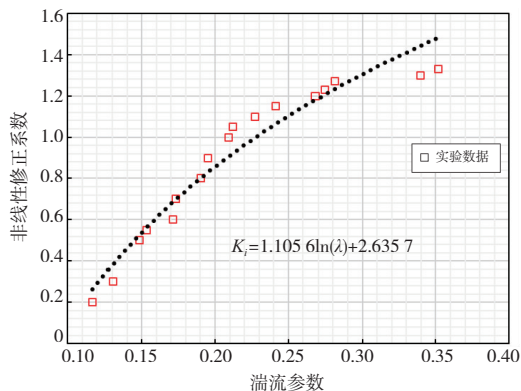


图14 非线性修正系数与湍流参数关系

从图14中可以看到,盘腔中 K_i 分布趋势基本呈现随 λ 增大而增大,并且增大的速率显现先快后慢的特征。

图15为平均旋流数与拟合曲线的关系。经计算可以得出本文的模型与实验的误差为1.915%,OWEN文献中的理论模型与实验的误差为19.248%。综上可以说明,本文的模型大大提升了模型预测的精准性。

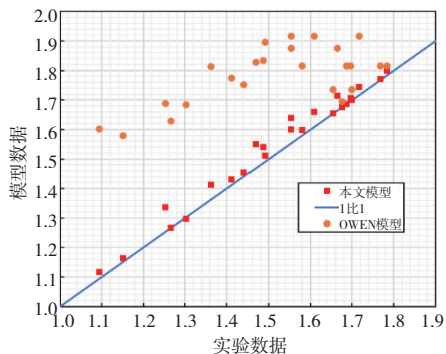


图15 平均旋流数与拟合曲线的关系

(下转第112页)

- 4(2):35-53.
- [11] 张春,袁天宁. 针对动车组全生命周期集成管理的多源异构数据融合框架设计[J]. 计算机与现代化, 2017(10):36-41.
- [12] YU Y, SUN L F, WANG S H. Multipart dynamic data integration scheme of industrial chain collaboration platform in mobile computing environment [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 1550668.
- [13] KALAYC T E, BRICELJ B, LAH M, et al. A knowledge graph - based data integration framework applied to battery data management [J]. Sustainability, 2021, 13(3):1583.

收稿日期:2023-04-20

(上接第 67 页)

3 结语

本文可以得到以下结论。

1) 盘腔内旋流数沿径向分布趋势基本呈现随半径降低而增大并在最高径向位置处趋于一致的特征。

2) 随着旋转雷诺数的增大,旋流数会减小,并且与调整后的非线性曲线重合部分增大。同时增大的科氏力会抑制流体的震荡,使得整个流场实现更稳定的分层。

3) 随着流量系数的增大,旋流数会增大,并且与自由涡曲线重合部分增大。

4) 罗斯比数的增大会导致气流入射角的减小,而入射角的减小会导致壁面引导流入部分减少,惯性入流的部分变大,进而减小入口旋流数。

5) 得到了间隙比为 0.263 时, K_i 和 C_{in} 的经验拟合关系式。

6) 本文的模型与实验的误差为 1.915%, OWEN 文献中的理论模型与实验的误差为 19.248%,大大提升了模型预测的精准性。

参考文献:

- [1] 单晶叶. 核心机之路 第四代大推力军用涡轮风扇发动机发展(下)[J]. 航空档案, 2009(9):56-65.
- [2] WEI S, MAO J K, YAN J X, et al. Experimental study on a hybrid vortex reducer system in reducing the pressure drop in a rotating cavity with radial inflow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 110: 109942.
- [3] WEI S, YAN J X, MAO J K, et al. A mathematical model for predicting the pressure drop in a rotating cavity with a tubed vortex reducer [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2019, 13(1):664-682.
- [4] FIROUZIAN M, OWEN J M, PINCOMBE J R, et al. Flow and heat transfer in a rotating cavity with a radial inflow of fluid part 1: the flow structure [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1985, 6(4):228-234.
- [5] FIROUZIAN M, OWEN J M, PINCOMBE J R, et al. Flow and heat transfer in a rotating cylindrical cavity with a radial inflow of fluid [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1986, 7(1):21-27.
- [6] OWEN J M, PINCOMBE J R. Velocity measurements inside a rotating cylindrical cavity with a radial outflow of fluid [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1980, 99:111-127.
- [7] 罗翔,冯军. (2007). 一级涡轮盘腔内流体速度场的研究[J]. 燃气涡轮试验与研究(04), 32-35.
- [8] 吉洪湖, CHEAH S C, IACOVIDES H, 等. 旋转盘腔流场速度与压力的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 1997, 18(3):300-305.
- [9] 赵亚滨. 用 PIV 测量法研究燃气轮机叶轮与导叶轮间流体的速度场 [J]. 热能动力工程, 1999, 14(4):28-32, 85.
- [10] YAN J X, MAO J K, WEI S, et al. An investigation on the discharge coefficient of compound orifices in rotating disks [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2022, 144(4):041007.

收稿日期:2023-03-24