

文章编号:1000-8055(2009)11-2483-07

用 PIV 技术测量径向进气旋转盘腔内的流动

于 霄^{1,2}, 罗 翔¹, 徐国强¹, 孙纪宁¹

- (1. 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;
2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 将 PIV (particle image velocimetry, 粒子图像测速仪) 技术应用于多功能旋转换热实验台, 测量了不同工作状态下降向进气旋转盘腔间的速度场。介绍了实验装置、实验方法和误差分析方法; 给出了旋转盘腔间速度场的瞬时值和平均值, 测量结果表明了 PIV 技术能够测量复杂旋转盘腔间的流场, 并定量分析影响因素 (旋转雷诺数和流量系数) 对速度场的影响; 同时, 分析得出激光反光的控制和示踪粒子的均匀稳定散播是实验成功的关键因素。

关 键 词: PIV (粒子图像测速仪); 旋转腔; 径向进气; 瞬时速度; 平均速度

中图分类号: V231. 3

文献标识码: A

Particle image velocimetry (PIV) measurements of the flow in a rotating cavity with a radial inflow

YU Xiao^{1,2}, LUO Xiang¹, XU Guo-qing¹, SUN Ji-ning¹

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

2. Shenyang Aeroengine Design and Reserch Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Particle image velocimetry (PIV) was applied to a multifunctional rotating facility, the velocity distributions in the rotating cavity with a radial inflow of fluid had been measured in different working conditions. The experimental facility, experimental method and error analysis were introduced. The instantaneous and ensemble-average velocity fields in the rotating cavity had been discussed in this paper. And the results show PIV can be used to analyze the velocity field in a complex rotating cavity and the influence of non-dimensional mass flow-rate and rotating Reynolds number. At the same time, the light reflection control and the symmetrical and steady dispersion of tracer particles are the key factors of the PIV measurement.

Key words: PIV (particle image velocimetry); rotating cavity; radial inflow;
instantaneous velocity; ensemble-average velocity

在实际航空发动机的内流冷却系统 (internal cooling system) 中, 冷却空气在不同形式和结构的复杂盘腔间流动, 同时盘腔高速旋转, 使盘腔间

的流动形态复杂、影响因素众多、压力损失很大; 如果同时考虑由于温度差异引起的浮力对流动的影响, 则理论分析和数值计算都非常困难, 如果能

收稿日期: 2009-04-29; **修订日期:** 2009-10-13

基金项目: “凡舟”青年科研基金 (20070401)

作者简介: 于霄 (1972 -), 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 北京航空航天大学博士生, 主要从事航空发动机内流与传热研究。

够获得旋转盘腔内的真实流场情况,就能为理论分析和数值计算提供可靠的技术支持,进而提高对复杂盘腔间流动的研究水平.

为定量的研究复杂流动机理,国内外发展了旋转探针、热线风速仪、粒子成像测试技术、高频动态响应探针和壁面动态压力测量等一系列测试技术.研究表明:对于空间结构复杂并且高速旋转的盘腔,最为合适的方法是非接触式的光学测量技术,常用的是 LDA (laser Doppler anemometry,激光多普勒测速仪) 和 PIV (particle image velocimetry).

LDA 测量的精度比较高,但测得的是单点的流动速度,即便是三维的 LDA 测得的也是平均意义下的速度场分布,如果需要得到速度场的瞬态分布,研究非定常流场,则 PIV 技术具有独特的优越性.

对于径向进气旋转盘腔间流场的研究,国内外的研究主要是应用 LDA^[1-7] 和热线风速仪^[8],给出的多是局部点的平均效果,本文将 PIV 技术应用于径向进气旋转盘腔的速度场测量,基于瞬态流场的测量结果,分析旋转盘腔中的流动特点,以及旋转雷诺数和流量系数的影响规律.

1 实验设备和测量手段

1.1 多功能旋转台

本实验工作是在北京航空航天大学航空发动机气动热力科技重点实验室多功能旋转实验台上完成的.实验台结构如图 1 所示,该实验平台可以完成转速 3000 r/min 以下,流量 1500 kg/h 以内的旋转部件的流动与换热研究.

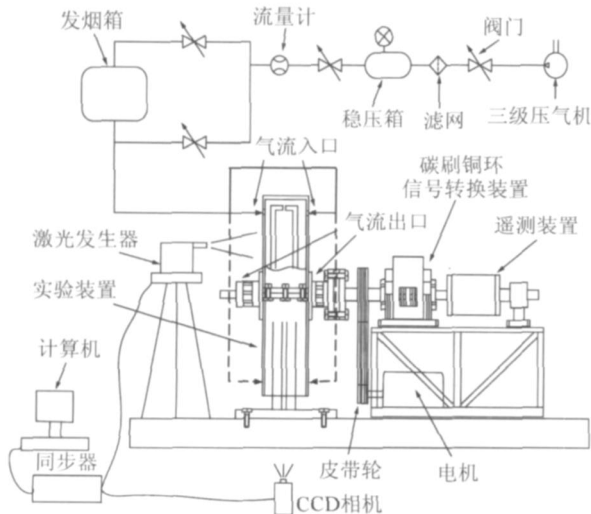


图 1 多功能旋转实验台

Fig.1 Multifunctional rotating facility

压气机供气系统提供的压缩空气经 20 个均布气孔进入实验外壳腔体,再经旋转盘外缘两盘罩间形成的环形缝隙进入旋转盘腔,沿两个同向同速旋转的盘面向内流入,最后在盘心处轴向流出.多功能旋转实验台的动力装置是一台 30 kW 的交流电机.

旋转实验台的径向进气旋转盘腔实验件结构如图 2 所示.

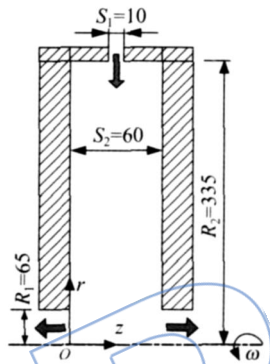


图 2 实验件

Fig.2 Test model

实验旋转盘由厚度 20 mm 透明的有机玻璃加工而成.进口间隙 $S_1 = 10\text{ mm}$,两盘间距 $S_2 = 60\text{ mm}$,旋转盘半径 335 mm.

流量由安装在主通道上的热式气体质量流量计测量,空气流量在 0~1500 kg/h 之间可调.转速由光电式数字转速表测定.

1.2 PIV 系统

PIV 系统主要由激光器、透镜装置、CCD (charge coupled device) 相机、同步控制器、示踪粒子发生器及控制分析软件等组成.本实验 PIV 装置是美国 TSI 公司研制的,是一套基于高性能跨帧 CCD 的数字式 PIV 系统,采用 Scheimpflug 成像方式,详细参数如表 1 所示,安装形式如图 1 所示.

表 1 PIV 系统主要参数

Table 1 Main character of PIV

部件	参数
光源	双腔 Nd:YAG 激光器 150 mJ/Pluse, 频率 30 Hz
跨帧 CCD	1280 pixel × 1024 pixel, 两帧之间的最短时间间隔:~0.5 μs, 采集频率:~3 Hz
同步器	TSI Model 6300
软件	TSI INSIGHT

1.3 示踪粒子

本实验中采用单独设计的示踪粒子发生器.控制发烟箱内的艾草燃烧,产生固体小颗粒作为

示踪粒子,直径在 $2\sim5\mu\text{m}$ 之间.

2 实验方案

2.1 测量位置

受设备能力的限制,本实验采用二维 PIV 测试系统,为了能够真实反应旋转腔中的流场,如图 3 所示,分别测试了互相垂直的 $r\sim z$ 截面和 $r\sim\omega$ 截面的速度场,经过数据处理之后,可以得到速度场的完整信息.

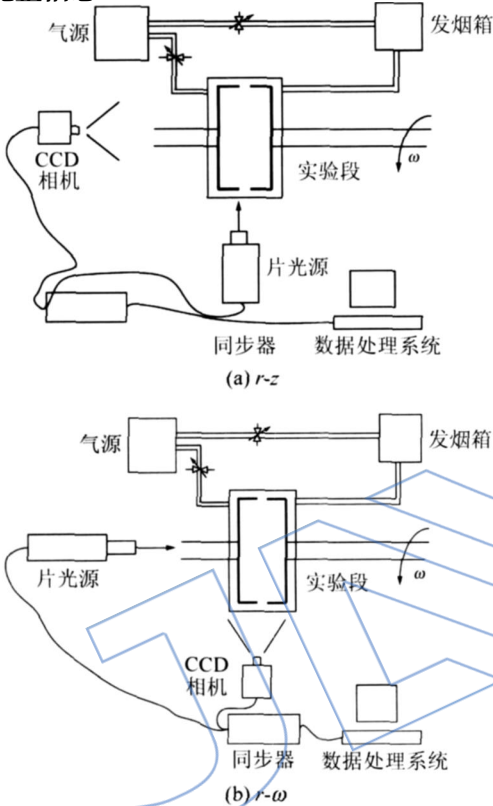


图 3 PIV 测试位置图

Fig. 3 Position for PIV test

2.2 测量状态

为了获得流量系数 C_w ($C_w = m/\mu R$, 式中 m 为进气流量, μ 为气体动力黏度) 和旋转雷诺数 $Re\omega$ ($Re\omega = \omega R^2/\nu$, 式中 ω 为转盘角速度, ν 为运动黏度) 对速度场的影响规律,实验对不同流量和不同转速下的速度场进行了分别测量,测试状态如表 2 所示.

表 2 测试状态
Table 2 Test conditions

$C_w/10^3$	$Re\omega/10^5$		
	0.795	2.38	3.97
3.12	√	√	√
6.65	√	√	√
13.2	√	√	√

注:表中所示旋转雷诺数分别对应转速 100, 200 r/min 和 300 r/min;流量系数分别对应进口速度 2 m/s 和 3 m/s.

2.3 测试的关键技术

对于结构和流动都非常复杂的旋转盘腔而言,影响 PIV 测试的因素很多,实验中发现:粒子体积分数的控制和激光照明的处理是实验成败的关键.

1) 实验中选用了直径在 $2\sim5\mu\text{m}$ 的艾草灰,而没有采用雾化液滴,既保证了粒子的跟随性,又保证了示踪粒子不会沾染在旋转盘面而影响测量精度.

同时采用了多路供气的方法,设计了体积分数调节气路,使示踪粒子的体积分数可以长时间保持在一个合适的范围.

2) 由于是径向进气的旋转盘腔,所以实验件的外罩和旋转盘都会对激光造成衰减,同时产生反光,进而影响成像质量.本实验中采用高档有机玻璃加工外罩和实验盘,所有观察窗口都采用光学玻璃,增强透光性,同时对反射部位进行遮挡和涂黑处理,极大地提高了成像质量,但仍然有部分状态和部分位置得不到数据或者数据明显偏差较大.

2.4 数据处理

图像采集、速度场生成以及速度场坏点的识别和插值采用的是 TSI 公司的 INSIGHT 软件,在图像处理中,采用互相关的分析方法,查问域选用的是 $32\text{pixel}\times32\text{pixel}$.

所需要的总体平均速度场采用了自编程序进行后处理.

3 实验结果和分析

3.1 误差分析

速度场测试的精度取决于粒子位移测量的精度和脉冲时间间隔的控制精度.测量误差有的是可以避免的,如选择合适的粒子并控制其散播密度;有的则不可避免,如查问单元内的速度梯度及信号峰值位置的准确确定过程中的误差等.所以对 PIV 测试系统应有详尽的精度估计.

本实验中由于示踪粒子尺寸在 $2\sim5\mu\text{m}$ 之间,流量和转速相对较小,粒子跟随性很好,所以粒子产生的跟随性误差可以忽略不计.另外由于测量的视场较大,本实验把每个测试面都分段测量然后连接在一起,所以虽然是全场测量,各点测试精度仍然可以达到 $1\%\sim2\%$.由于旋转盘腔内测量情况复杂,同时反光等的环境噪声因素影响较大,加之流动复杂,存在不同尺度的涡旋,所以,

在本次测量中,对于主流和大尺度漩涡的测量精度估计在 5 %以内.

3. 2 测量结果

径向进气旋转盘腔的流动被称为源-汇流动 (source-sink flow),流动结构如图 4 所示,流体从源区(source region)进入旋转腔,然后形成两个埃克曼层(Ekman-layer),再经汇区(sink region)流出旋转腔,源区、汇区和埃克曼层之间是无黏核心区(core region). 标准的源-汇在流量很小的情况下才能稳定存在,大多数情况都是源区充满旋转腔.

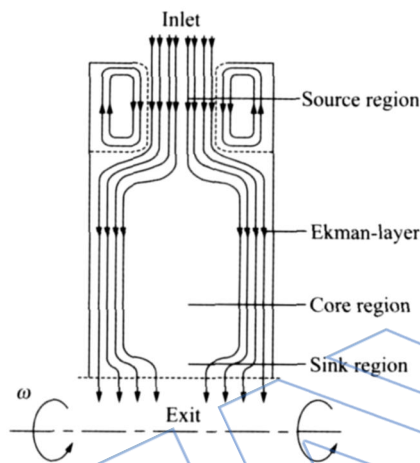


图 4 源-汇流动
Fig 4 Source-sink flow

图 5 为不同流量不同转速下 r - z 面的流线图 (图中的位置与图 2 中坐标定义相对应),从图中

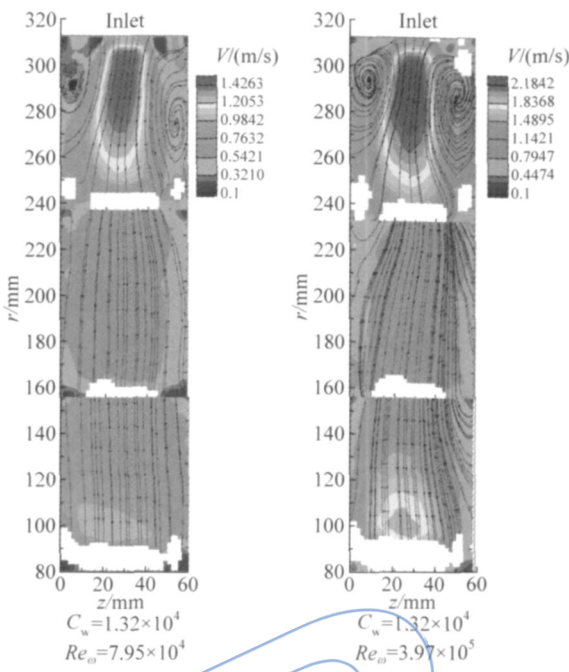
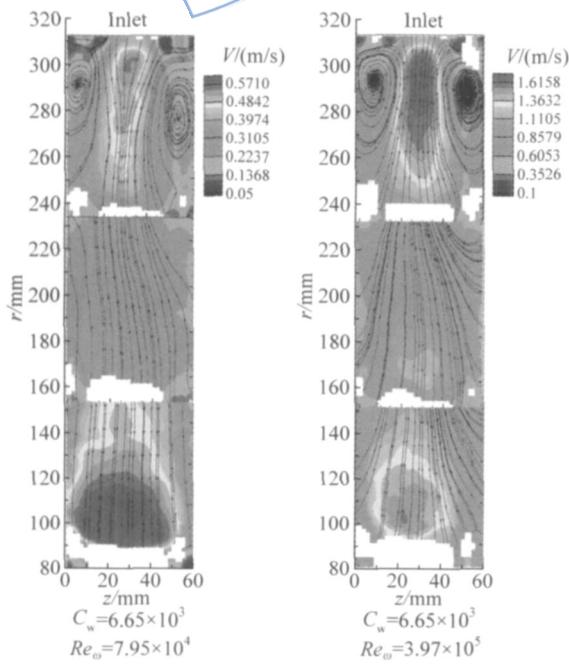


图 5 r - z 面流线图
Fig. 5 Streamline at r - z plane

可以清晰的看到源区充满了旋转腔,源区有清晰的回流区; PIV 实验显示的流动形态与图 6 中 CFD 计算的结果非常相似,(为方便实验,实验中出口条件与数值模拟中略有差异,造成了出口处数值上的差异,并不影响主要流动规律)证明了数值计算和理论分析的准确.

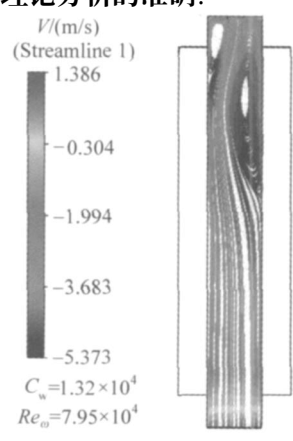


图 6 CFD 计算流线图
Fig 6 Steamline of CFD

图 7 为不同流量不同转速下 r - ω 面的流线图,从图中清晰的看到,随转速的提高,由于黏性的作用盘腔内流体沿切向的速度分量增加较大,随切向的速度分量的增加,离心力和径向哥氏力增加,对流体的径向内流产生很大的阻力.

流量系数的增加使惯性力的影响加强,削弱

由于黏性力引起的强烈旋转,减小流体的切向速度分量,一定程度上能够减少离心力和径向哥氏力的影响。

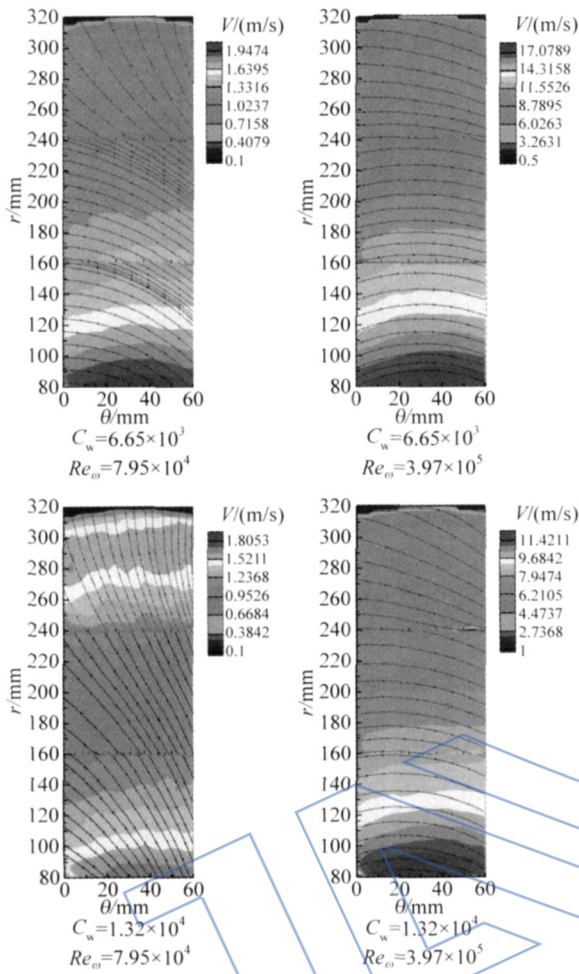


图 7 $r-\omega$ 面流线图

Fig. 7 Streamline at $r-\omega$ plane

工程中将旋转盘腔中流体当地速度切向分量与转盘当地圆周速度的比值称为旋流系数，

$$\beta = \frac{V_{\phi}}{\omega r}$$

它表征的是旋转盘对流体的做功能力,它由转速、入口流量、盘腔形状等因素影响,是判断旋转盘腔流动的重要无量纲参数,应用于分析盘腔的流动损失.如何确定旋流系数是分析盘腔流动的重点,工程设计中采用理论分析和数值计算方法,但多是基于经验数据的处理. PIV 技术测量的图像可以定量分析旋流系数,无疑是旋转盘腔实验技术的重大贡献.图 8 是某状态下的旋流系数分布,图中可以看出,由于黏性的影响,盘带动流体旋转,依据角动量守恒原理,随半径减小,流体的相对旋转速度增加,在一定位置会超过当地盘的转速,形成数倍于当地旋转盘转速的旋转核。

必须指出的是,图 5 和图 7 给出的都是 400

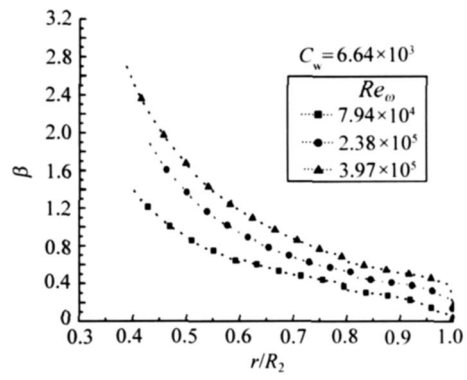


图 8 旋流系数分布图

Fig. 8 Nodimensional core velocity

幅瞬态流场平均的速度场结果,在径向进气旋转盘腔中,详细分析获得的图像数据,发现实验的状态都是非定常的,图 9 给出了某状态下气流进口处平均速度场和瞬态速度场的对比,图 9 (a), (b), (c) 是流动参数稳定后同一位置不同时刻采集的瞬态速度场,分别是第 141, 142, 143 步采集到的图片,每步时间间隔 6 ms,清晰显示了涡从图左边滚动到右边的情形,涡的形状也有变化.图 9 (d) 则是 400 个瞬态结果的平均速度场。

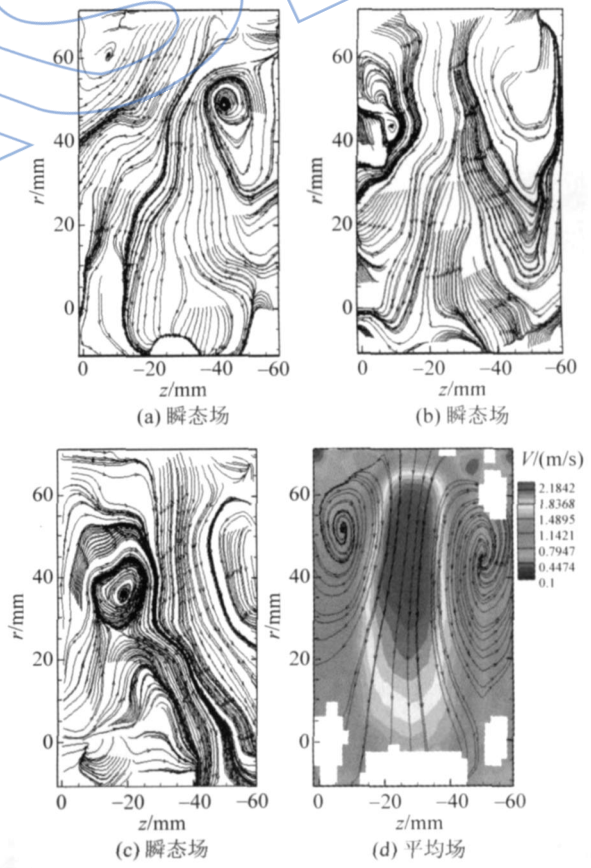


图 9 瞬态场和平均场流线图

Fig. 9 Instantaneous velocity field and ensemble-average velocity field

但是情况并非都是如此有规律,在某些工况下,很难分析出涡的变换规律,总的规律是杂乱无章的,流动表现出强烈的非定常性,只要平均效果才有意义。

对于流动的非定常现象,也可以称之为流动的失稳,有学者认为强烈的湍流性质导致其失稳的固有属性;也有学者认为哥氏力和其产生的浮升力是导致流动失稳的主要因素。综合分析实验数据,可以得出如下结论:在径向内流旋转腔中,流动的稳定性不好,处于临界状态下,当有扰动传入旋转腔内,流动就会失稳。当然所谓扰动,既可以是流量的变换,也可以是旋转的增加。

实践证明仅仅依靠理论分析、数值模拟研究流动是不准确的,PIV测试可以捕捉到流动的瞬态细节,特别是瞬态涡量变化的关键参数,并进行定量分析。对于研究涡的发展变化规律,为分析研究旋转腔流动和传热的非定常规律提供详细的关键数据,这是其它测量方式所不能提供的,是进一步详细分析、优化设计的基础。

4 结 论

本文得到以下主要结论:

1) PIV技术能够应用于复杂旋转腔间流场的测量,结果能够用于分析无量纲参数(旋转雷诺数和流量系数)对速度场的影响,并给出定量结论。示踪粒子的属性、大小、散播密度和激光照明系统的设计是PIV测试的关键技术。

2) 旋转雷诺数和流量系数是径向进气旋转腔流场的主要影响因素,流体切向速度随旋转雷诺数的增加而增加,随流量系数的增加而减少,并沿半径的减小而增大。旋流系数与切向速度的变化规律相同,沿半径减小方向逐渐增大,在某一位置超过1,使流体的切向速度超过当地转盘的

旋转速度,形成快速旋转核心。

3) 径向进气旋转腔间的流场处于临界状态,非常容易失稳,形成非定常流场,应用PIV技术可以获得非定常速度场信息,流场非定常流动的临界值和影响临界值的因素则应结合数值模拟进行综合分析。

参考文献:

- [1] 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: Part 2 - Velocity, pressure and heat transfer measurements[J]. Int. J. Heat and Fluid Flow, 1986, 7(1): 21-27.
- [2] Owen J M, Bilimoria E D. Heat transfer in rotating cylindrical cavities[J]. Journal Mechanical Engineering Science, 1997, 19(4): 175-187.
- [3] Chen J X, Gan X, Owen J M. Flow and heat transfer in enclosed rotor-stator systems [C]// 10th International Heat Transfer conference. Brighton: [n. s.], 1994, 3: 161-166.
- [4] Owen J M, Pincombe J R. Velocity measurements inside a rotating cylindrical cavity with a radial outflow of fluid [J]. J. Fluid Mech., 1980, 99: 111-127.
- [5] Farthing P R, Long C A, Owen J M. Rotating cavity with axial throughflow of cooling air: flow structure[J]. Journal of Turbomachinery, 1992, 114: 237-246.
- [6] Cho H H, Won C H, Ryu G Y, et al. Local heat transfer characteristics in a single rotating disk and co-rotating disks[J]. Microsystem Technologies, 2003, 9(6): 399-408.
- [7] Long C A, Miche N D D, Childs P R N. Flow measurements inside a heated multiple rotating cavity with axial throughflow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28(6): 1391-1404.
- [8] Debuchy R, Dymont A, Muhe H, et al. Inflow between a rotating and a stationary disc[J]. Eur. J. Mech. B/ Fluids, 1998, 17(6): 791-810.