

文章编号: 1000-8055(2006)03-0461-06

进口畸变条件下轴流压气机转子 内流的 PIV 研究

李茂义, 陆亚钧, 弓志强, 袁巍

(北京航空航天大学 航空航天大学能源与动力工程学院
航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘要: 用 50% 堵塞比的插板畸变屏模拟低速轴流压气机进口流场畸变, 用 PIV (粒子图像速度场仪, Particle Image Velocimetry) 技术测量均匀和畸变进气条件下压气机转子叶片通道内的流场结构。实验表明, 进气畸变条件下压气机流场在转子叶片通道内不同的周向位置会产生四种不同的流动结构状态, 同时, 进气畸变大大增加了漩涡扰动、流动亏损和转子叶排气流分离的强度, 这样必然会对压气机的性能产生很大的影响。实验也验证了经典平行压气机理论的缺陷。

关键词: 航空、航天推进系统; 进气畸变; 轴流压气机; 转子叶片通道; PIV 技术; 流场结构

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

PIV Investigation of the Internal Flow in an Axial Flow Compressor Rotor under Inlet Distortion

L IM ao-yi, LU Ya-jun, GONG Zhi-qiang

(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Flow field structure in the rotor blade passage of a low speed axial flow compressor both under uniform inlet flow and distorted flow simulated by adding baffles with 50% blocking ratio was investigated using PIV (Particle Image Velocimetry) technique. Experimental results indicate that there are four different flow field structure types in the compressor rotor passage at different circumferential positions under inlet distortion. Inlet distortion makes the intensity of vortex disturbance, velocity decrement and separation in the rotor passage rise greatly. This will affect the performance of compressor heavily. The experiment also testifies the limitation of the classical parallel compressor theory.

Key words: aerospace propulsion system; inlet distortion; axial flow compressor;
rotor blade passage; PIV technique; flow field structure

收稿日期: 2005-06-11; **修订日期:** 2005-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助(50476003)

作者简介: 李茂义(1974-), 男, 山西闻喜人, 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重点实验室硕士生, 主要从事叶轮机气动热力学的研究

从气动方面讲,压气机内部的流场结构对压气机的性能及稳定性有直接的影响。早在20世纪70年代,人们就认识到了压力畸变会使发动机性能恶化^[1]。进口流场畸变改变了压气机的原设计流动条件,使压气机叶栅进气攻角偏离设计值,引起气流分离,降低了压气机的失速裕度和性能^[2,3]。在压气机前安装旋转栅栏式总压畸变发生器,栅栏正转(与转子同向旋转)时,减少了压气机的喘振裕度,反转时,对喘振裕度影响较小,甚至提高了压气机的喘振裕度^[4]。目前,国内外对在进气畸变条件下压气机内部的流场结构的实验研究比较少,然而只有了解进气畸变时压气机内部的真实的流场结构和流动机理才能有目的地控制和利用压气机的进口畸变。实验采用50%堵塞比的插板式畸变板模拟低速轴流压气机进口流场畸变,并用PⅣ技术对均匀和畸变进气转子叶片通道内的流场结构进行测量。

经典的平行压气机理论把一台进口有周向畸变的压气机看作是进口低流量有畸变子压气机和进口正常流量未畸变子压气机,各子压气机出口静压相同,彼此之间无任何联系(没有动量和质量交换),并且各子压气机均按未畸变的压气机特性线工作。实验验证了经典平行压气机理论的缺陷。

1 实验设备及仪器

该实验的主要设备有低速单级轴流压气机实验台和PⅣ测量装置。低速单级轴流压气机实验台的结构简图如图1所示。实验台几何参数为:19片转子叶片,13片静子叶片,机匣内径 D 为450 mm,轮毂比为0.75。实验台主要设计参数:设计流量为2.88 kg/s,设计总压升为1 500 Pa,设计效率为83%,设计转速为3 000 r/min。

测量流场的实验装置由激光发射器、同步器、CCD摄像机、轴编码器、数据采集系统等组成。PⅣ系统的控制及分析软件为TSI公司的Insight 3G。详细介绍PⅣ原理的文献比较多,这里不作详细介绍。

2 实验方案

如图1(a)所示,畸变板安放在距离转子叶片 $2D$ 的位置,流量测量界面为距离畸变板 $3D$ 处的 $0-0$ 截面上。为了减少叶尖二次流的影响,速度场的测量位置选在转子叶片75%叶高处。进气畸变时分别在非畸变区、畸变区及过渡区选取3个测量位置,过渡区的测量位置在偏向非畸变区一侧,

如图1(b)所示。

PⅣ测试系统如图2所示,在距离转子大约 $0.8D$ 的位置放置一个与轴向夹角为的反光镜,在反光镜前方开一个狭窄的长方形孔,打入片光,通过反光镜反射到转子叶片通道。在转子的轴上安装一个轴编码器,轴编码器可以锁定转子的相位,保证了每个工况测量的是同一个转子叶片通道内的流场。考虑到转子及轮毂反光,将其全部涂成黑色,为了有良好的透光度将转子外的机匣加工成有机玻璃机匣。

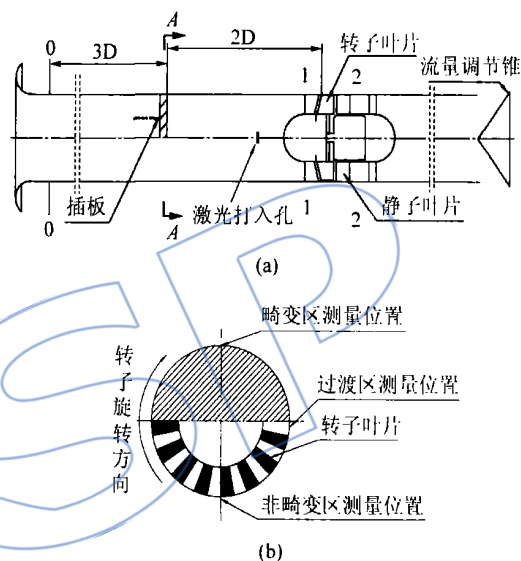


图1 低速单级轴流压气机实验台结构简图

Fig 1 Configuration of the one-stage low speed axial flow compressor

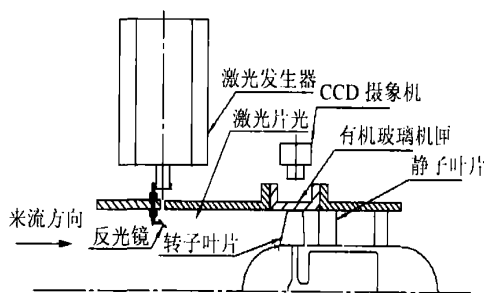


图2 PⅣ测试系统示意图

Fig 2 Layout of the PⅣ system

实验采用固体示踪粒子取得了较好的成像效果。

3 数据处理结果及分析

实验测量了均匀和畸变流场在流量 $m = 2.75$ kg/s和流量 $m = 2.40$ kg/s(该流量为均匀进气时

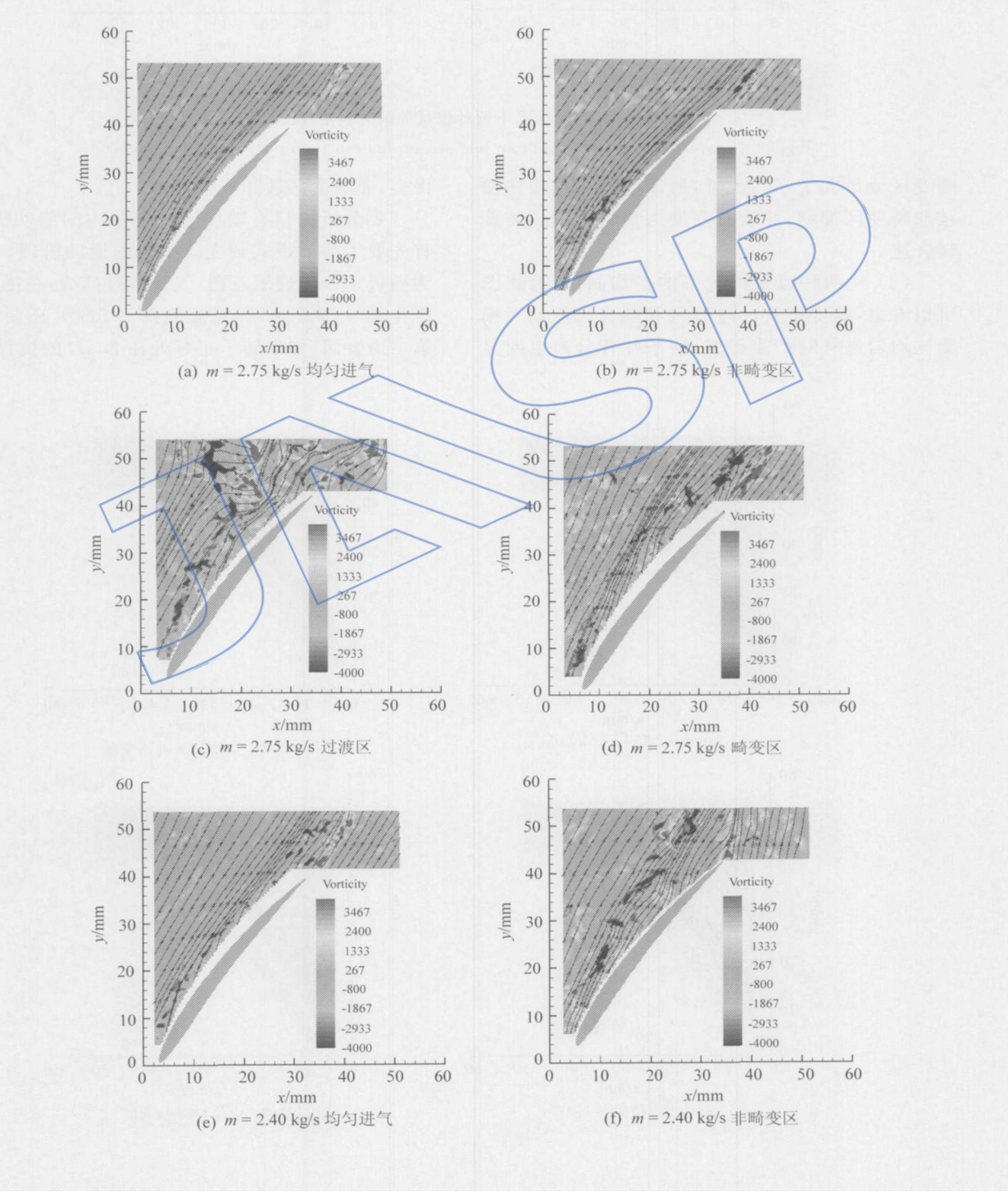
的近失速流量)时转子叶片通道内的速度场,并将所测绝对坐标系下的速度场转换为相对坐标系下的速度场。每个工况采集了 80 个瞬时速度场,将其平均得到平均速度场。图 3 为相对坐标系下的某一瞬时涡量、流线图,图 4 为相对坐标系下的平均涡量、流线图。

比较以上图片可以看出:

(1) 在 $m = 2.75 \text{ kg/s}$ 时,均匀来流情况下,流动很平滑,略微可看到一些尾迹;进口有畸变情

况下,流线已明显变得扭曲,畸变区叶背分离及尾迹亏损加重,过渡区拍摄到了一幅转子叶背大尺度分离的图片,非畸变区缓和一些。

(2) 在 $m = 2.4 \text{ kg/s}$ 时,可以看出均匀进气情况下,流线略有扭曲,出现了比较明显的尾迹,流动损失加大。进气畸变情况下,几乎每一幅图像叶背都已经发生了不同程度的分离,整个转子叶片通道的流动已经很混乱,流线已严重扭曲。过渡区拍摄到了一幅有明显漩涡的图片,因为此时非



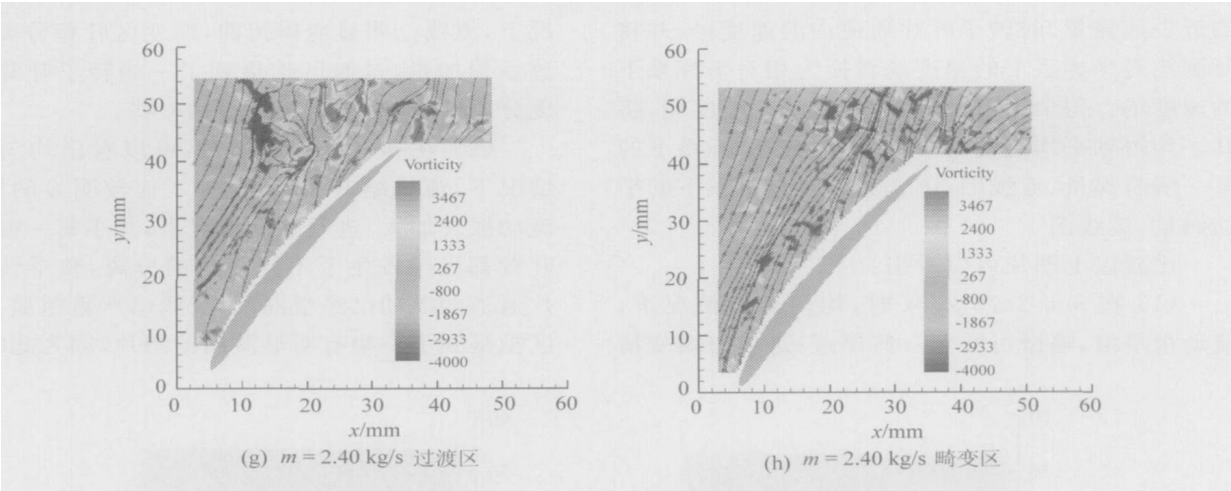


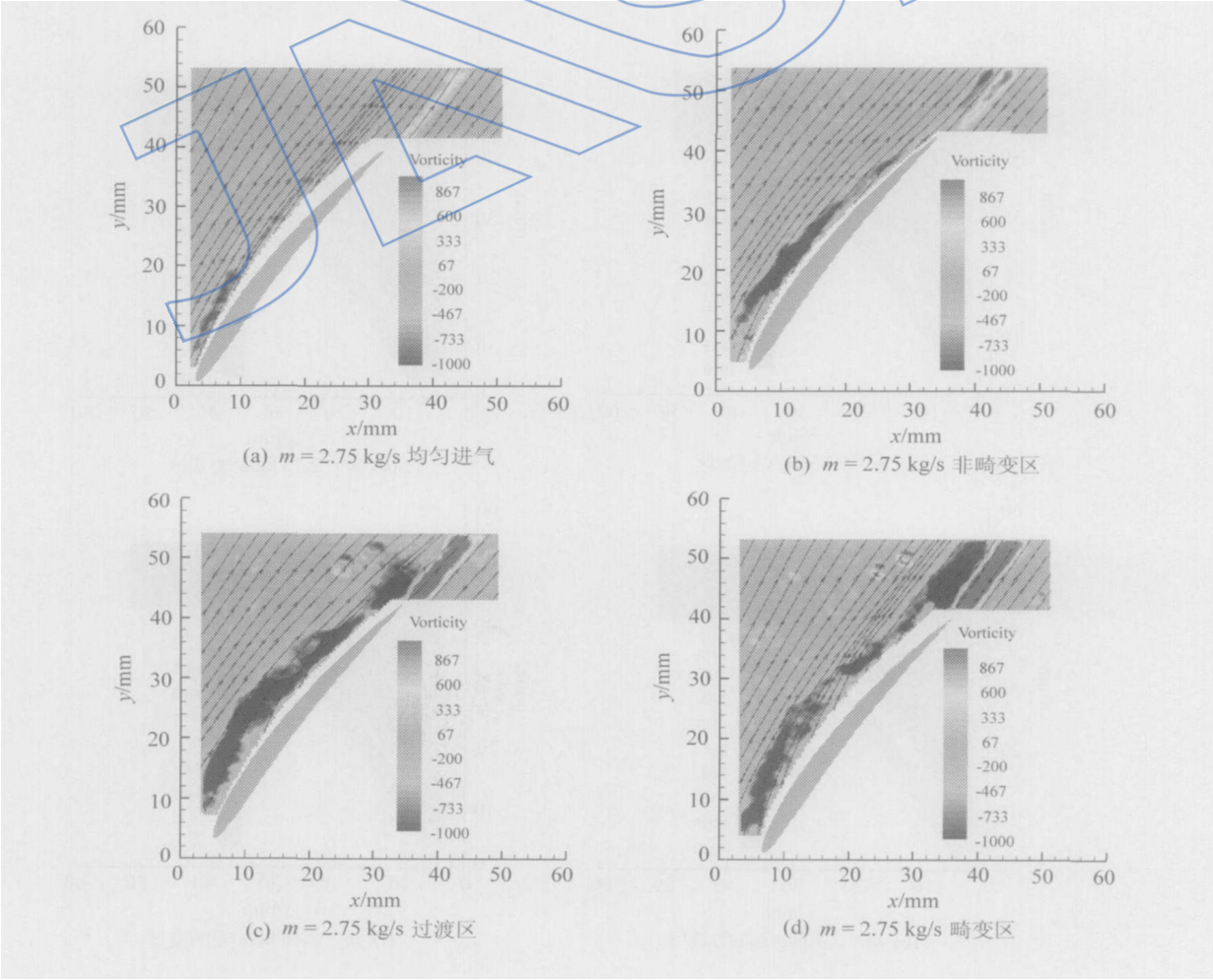
图3 相对坐标系下两种流量的瞬时涡量、流线图

Fig 3 Instantaneous vorticity contour and stream lines in the rotor frame of reference

畸变区流量大于平均流量, 所以这种情况很快便被非畸变区抑制, 并没有发展为整台压气机的旋转失速。

(3) 从两种流量情况下的平均涡量、流线图可以看出, 畸变进气的过渡区和畸变区流动亏损要比均匀进气时严重得多, 转子叶背分离也明显

得多, 非畸变区缓和一些。
要分析进口有畸变时压气机内的流动机理, 首先要了解插板式畸变发生器的流动机理。图5为插板工作机理示意图。气流流过插板, 在插板后产生第一道漩涡, 气流流到约2.5D处还要产生第二道漩涡, 如果转子正好处在2.5D的位置, 该



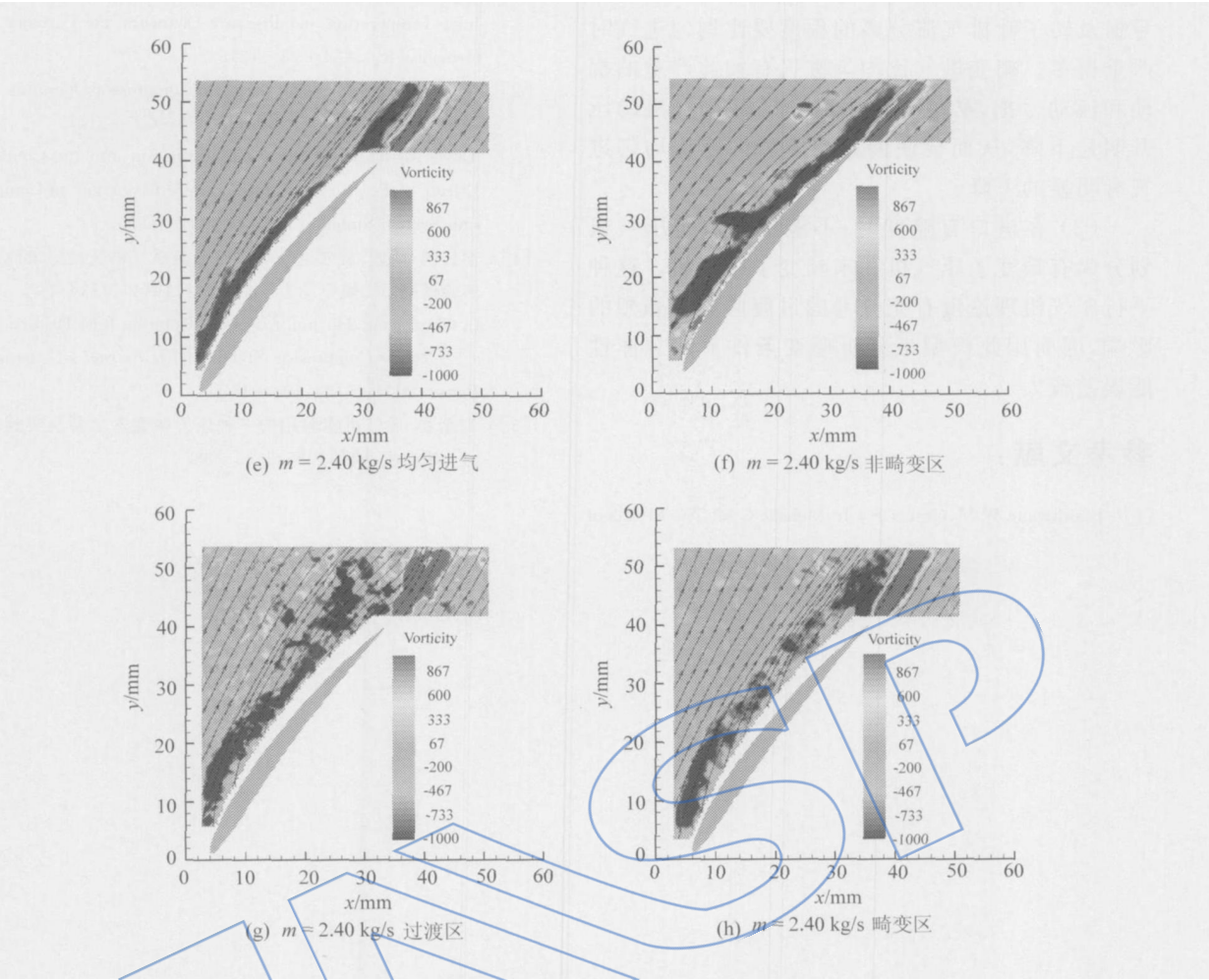


图4 相对坐标系下两种流量的平均涡量、流线图

Fig 4 Average vorticity contour and stream lines in the rotor frame of reference

漩涡产生的不稳定压力场对压气机性能影响最大^[5]。由于畸变区气流速度比较低,畸变区部分必以较大的攻角进入压气机的转子叶排。另外,畸变区为低压区,非畸变区为高压区,由于高低压区的压差,气流必然由高压区向低压区流动,因此在转子进口会产生一侧正预旋角进气和另一侧负预旋角进气,由图 1(b)可知过渡区测量区域在进气负预旋区,在该区域转子叶排气流攻角增大,叶背分离增大;而在正预旋角进气一侧转子叶排气流攻角减小,叶背分离减小。

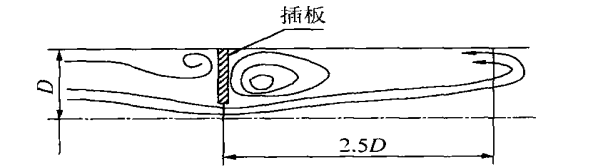


图5 插板工作机理示意图

Fig 5 Work mechanism of added baffle

由过渡区在两个流量时的测量结果可以明显看出,由于流体的粘性,漩涡的扰动以及压力、速度梯度,各子压气机之间存在动量交换;即便是在未畸变子压气机部分流场结构也存在严重差异,未畸变子压气机部分也存在严重畸变。

4 结 论

根据以上的数据处理结果和初步分析,得出以下结论:

(1) 用插板畸变屏,压气机流场在转子叶片通道内不同的周向位置会产生 4 种不同的流动结构状态,即畸变区、非畸变区、进气负预旋区和进气正预旋区。由于畸变区及进气负预旋区转子攻角增大,流动亏损增大,再加上漩涡的扰动,会使的压气机性能下降、失速提前。

(2) 用插板畸变屏,对本次实验的 3 个测量区域而言,过渡区的流动最为混乱;在压气机进口畸变进气时,相同流量下转子叶片通道内的流动亏

损及转子叶排气流分离的程度要比均匀进气时严重得多。畸变进气比均匀进气有如此严重的扰动和流动亏损,必然会使得进气畸变压气机的压升明显下降,从而会使失速裕度和性能比均匀进气有明显的下降。

(3) 在进口有畸变时,不能严格地将压气机划分为有畸变子压气机和未畸变子压气机。这种平行压气机理论没有充分考虑过渡区如此强烈的影响,因而用此模型来分析畸变条件下的总体性能误差较大。

参考文献

[1] Braithwaite W M, Graber F J Jr, Mehalic C M. The Effects

of Inlet Temperature and Pressure Distortion on Turbojet Performance[R]. AIAA 73- 1316

[2] Joubert H. Flowfield Calculation in Compressor Operating with Distorted Inlet Flow [R]. ASME 90- GT- 212

[3] Davis M W Jr. Parametric Investigation into the Combined Effects of Pressure and Temperature Distortion on Compression System Stability[R]. AIAA 91- 1895

[4] 李传鹏, 胡骏. 旋转进气畸变对轴流压气机气动稳定性影响实验研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 433~ 437.
Li Chuanpeng, Hu Jun. Effects of Rotating Inlet Distortion on a 5 - Stage Compressor Stability [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4): 433~ 437.

[5] 赵全春. 压气机实验用的三种压力畸变发生器及实验结果[J]. 航空发动机, 1995, 3: 28~ 38

