

文章编号:1000-8055(2012)01-0152-08

多级轴流压气机转子通道流场的 PIV 测量

王志强, 胡 骏

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 在四级低速大尺寸轴流压气机实验台上, 基于粒子图像测速仪 (particle image velocimetry, 简称 PIV) 系统, 发展了适用于多级叶轮机械转子内部全通道流场测量的 PIV 技术. 自行研制了光学潜望镜和锁相触发装置, 并在第 3 级转子的外机匣处开设了测量窗口. 在设计工作点, 对第 3 级压气机转子叶片全通道的流场进行了详细测量, 获得了 8 个不同叶高截面处的二维速度矢量场. 实验结果与三维定常 Navier-Stokes (N-S) 方程计算结果的对比分析表明: PIV 测量结果合理地反映了转子通道内部的流场结构, 第 3 级转子叶尖部分存在尺寸大、影响区域广的叶尖泄漏涡, 泄漏涡控制了叶尖区域的流场, 而气流在通道其余部分的流动状态较好, 不存在明显的低速区.

关 键 词: 压气机; 转子通道; 流场测量; 粒子图像测速仪 (PIV); 泄漏流

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

PIV investigation of the internal flow in a multi-stage compressor rotor

WANG Zhi-qiang, HU Jun

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: PIV (particle image velocimetry) was utilized to measure the flow field of the blade passage in a rotor of multistage turbomachinery, and was successfully applied to a four-stage large-scale low-speed compressor facility. In order to apply the PIV to compressor facilities, a light sheet periscope probe and a phase-lock system have been developed. The flow field of the third stage rotor blade passage has been measured at the design condition. Compared with the 3-D (three-dimensional) steady Navier-Stokes (N-S) solution, the measurements at the compressor design point show that the PIV measurement results reflect the flow structure of the third stage rotor blade passage reasonably. There is a big tip leakage vortex, which occupies the tip region of the rotor blade passage. There is no abnormal velocity filed and no obvious flow separation phenomenon at the other region of the rotor blade passage.

Key words: compressor; rotor blade passage; flow field measurement; PIV (particle image velocimetry); leakage flow

减小压气机内部的流动损失, 提高压气机效率, 改进压气机设计方法的关键是深入、透彻地了解其内部流动现象的本质、流场结构和损失机理. 除了利用飞速发展的计算机和计算技术对压气机

内部流动进行数值模拟之外, 最主要的还是要依靠不断发展的测试仪器和流场测试技术进行深入、细致的实验研究. 实验测量是最基本的研究方法, 是验证数值计算结果和分析流动特性的有效

收稿日期: 2011-02-18; 修订日期: 2011-06-29

作者简介: 王志强 (1981—), 男, 江苏太仓人, 讲师, 博士, 主要从事叶轮机气动力学研究.

手段,具有不可替代的作用^[1]。

由于压气机内部结构特殊,导致其内部流动极其复杂,从而给流场测试带来了相当大的困难。压气机内部流场测量的主要困难在于实验件空间的限制,结构上的困难,探针对流场的干扰以及测试设备的精度等^[2]。将激光技术与计算机辅助技术相结合的流场显示、测量方法是从上世纪70年代开始应用于压气机内部流场测量的,由于其是非接触测量,具有不会破坏和干扰流场的优点,所以受到越来越多的关注,并逐渐得到了广泛的应用。

采用非接触式的光学测量方法,从速度测量的原理可划分为^[3]:①依赖时间位移转换的测试方法;②利用多普勒效应的测试方法。近年来发展的一种新的动态全流场非接触式测试技术——粒子图像测速法(PIV)就属于第一类情况,它是通过测量给定时间间隔内流体微元的位移,按照速度的定义直接计算出速度矢量。它是一种非接触式的全流场瞬态测量技术,可同时获得流场中多点流体或粒子速度矢量,从而节约了大量的测试时间,且其测量精度和空间分辨率与 LDV(laser doppler velocimetry)很接近。由于它的诸多优点,使得其在压气机内流场测量中的应用也越来越多。早在上世纪90年代,国外就已经将 PIV 技术应用于叶轮机械内部流场的测量中:Paone N 等人^[4]采用 PIV 技术测量得到了离心压气机叶片通道内部的速度场;Wernet M P 等人^[5]成功地将数字 PIV 技术用于跨声速轴流压气机叶片通道内部流场的测量,获得了瞬时和时均速度矢量图,随后又采用三维 PIV 技术测量了某低速轴流压气机转子叶片的叶尖泄漏流^[6];Tisserant D 等人^[7]采用数字 PIV 技术测量了亚声速轴流风扇的内部流场;Sanders A J 等人^[8]采用 PIV 技术测量跨声速轴流压气机内部上游转子叶片尾迹对下游静子叶片的非定常影响。国内也已有将 PIV 技术应用于压气机内部流场测量方面的报道:北京航空航天大学的刘宝杰等人^[9-10]采用数字 PIV 技术分别测量了某单级跨声风扇转子尖部的非定常二维和三维流场;李茂义等人^[11]采用 PIV 技术测量了在进口畸变条件下的某单级低速轴流压气机转子通道内流场。目前,国内主要是在单级压气机实验台上实现了内流场的 PIV 测量,并且也主要是针对叶尖区域的流场,而对于结构相对复杂的多级轴流压气机转子内部全通道流场的 PIV 测量,则未见相关报道。

本文介绍了在南京航空航天大学低速大尺寸压气机实验台上,采用数字 PIV 技术,成功地实现了多级轴流压气机转子内部二维流场的可视化测量。测量的对象是某四级重复级轴流压气机的第3级转子叶片通道。为了完成测量,对 TSI (Trust Science Innovation)公司制造的通用 PIV 测量系统进行了适用性改造,自行设计制作了光学潜望镜、锁相触发装置等关键部件。

1 实验装置

1.1 低速轴流压气机

该实验是在南京航空航天大学的低速大尺寸轴流压气机实验台上进行的。该低速压气机为带进口导向器的四级重复级压气机,各级的叶片形状和叶片数都是相同的,转子叶片数为60,静子叶片数为80。该压气机采用等内外径设计,外径为1500 mm,轮毂比为0.88,设计转速为900 r/min,转子叶片的叶尖间隙约为叶片高度的2.2%。为了测量第3级转子叶片通道内部的流场结构,在第3级转子的外机匣开设了测量窗口,并加工制造了光学玻璃视窗。

1.2 PIV 系统

本文使用的 PIV 系统是美国 TSI 公司的产品,该系统能用于一个空间的二维或三维速度场的瞬态测量,测量对象为气体或水流流动。该系统由以下主要部件组成:双 YAG(钕铝石榴石)脉冲激光器,片光源透镜组,专用于 PIV 测量的 Power View 2M CCD(charge-coupled device)相机,其分辨率为1600 像素×1200 像素,高速图像数据接口板,同步控制器,INSIGHT 6.0 立体图像分析系统以及计算机系统。

1.3 光学潜望镜

由于 PIV 系统自带的光臂比较粗大,不能将其插入压气机机匣内,即使能插入机匣内,也会对流场产生很大的影响。因此,必须对 PIV 系统的导光臂进行必要的适应性改造。本文设计了一个较细小、简洁的光学潜望镜,用于将激光器产生的钕离子-钕铝石榴石(Nd:YAG)脉冲激光束转换成片光,并射入叶片通道内的测量区域。该光学潜望镜的基本机构如图1所示,它的上端和 PIV 系统的光臂通过螺纹相连接,通过压气机外机匣上的安装座,下端伸入流场中。中间装有安装盖,可以将其固定在安装座上。通过调整安装盖的位置,可以调整潜望镜伸入流场部分的长度,这样就可

以照亮叶片通道中不同径向位置处的流场. 其内部光路如图 2 所示, 从导光臂射出的约 9 mm 直径的束光进入光学潜望镜, 在潜望镜前端装有球面组合透镜, 用于将入射大光束减小至细管可传输的光束尺寸并用于形成光片束腰. 在导管端面装有形成片光及 90° 转向的光学组镜, 可以将光束转换成光片, 并将光片转向 90° 射出, 射出光片的扇形角约为 60° , 在测试目标区域, 光片的厚度约为 1 mm 左右, 可以满足二维 PIV 测量的要求. 并且通过调节潜望镜前端球面组合透镜的相对位置, 改变激光的束腰, 从而可以改变射出的光片在测试区域的厚度, 使其能更好的满足测试的要求. 光片厚度的调节范围可在 1~8 mm 以内, 所以该光学潜望镜也可以满足三维 PIV 测量的要求.

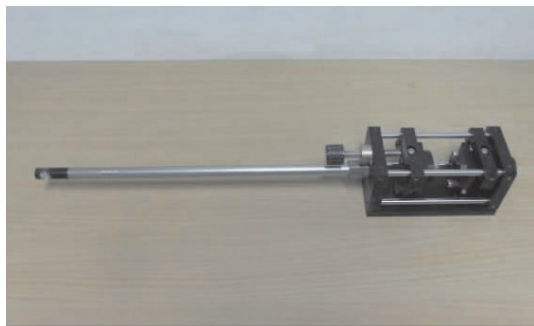


图 1 光学潜望镜

Fig. 1 Light sheet periscope probe

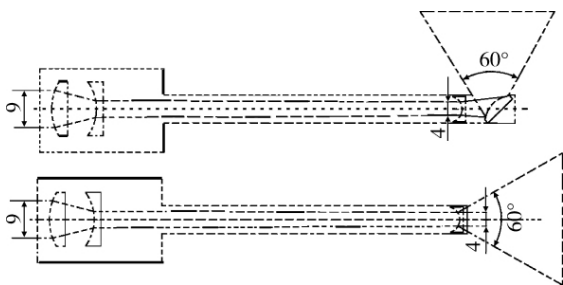


图 2 光学潜望镜内部光路图(单位:mm)

Fig. 2 Beam path in the light sheet periscope probe(unit:mm)

1.4 锁相触发装置

由于压气机转子是转动部件, 为了实现转子通道内流场的 PIV 测量, 必须使得所测转子叶片通道通过测量窗口的频率与 PIV 系统激光脉冲发射频率相同, 并控制两者的相位差. 为此, 本文设计了一套简易的锁相触发装置. 该装置可根据压气机驱动电机上的光电编码器输出的脉冲信号, 进行计数及延时触发. 本文实验时, 设定当压气机每转一圈时, 该锁相装置输出一个 5 V 的晶

体管—晶体管逻辑电平(TTL)正跳变脉冲给 PIV 系统的同步控制器, 当同步控制器收到这个外触发命令时, 就控制 PIV 系统的其他部件按照其内部设定的时序进行工作, 从而实现转子叶片通道内的图像采集. 同时为了确保所测截面为本文所需要的两个叶片的通道内部, 该装置还具有延时触发功能, 并且延时时间可调, 从而确保了实验的顺利进行.

2 实验方案

2.1 光路布置

与文献[5]、文献[6]采用的光路布置方案不同, 本文将光学潜望镜放置在所测区域的下游, 激光从下游射向被测流场区域, 这样就能消除光学潜望镜的尾迹对测试流场的影响. 同时为了尽量减小光学潜望镜的势扰动对测试区域流场的影响, 光学潜望镜被布置在所测区域下游 35 mm 的位置处, 测试区域离光学潜望镜的最短距离约为潜望镜直径的 3 倍. 所以这样的光路布置方案对所测流场的干扰是很小的.

本文所采用的 PIV 测试方案如图 3 所示, 光学潜望镜在第 3 级静子叶片的通道中部处插入流道, 从激光器中产生的激光片光通过 PIV 系统自带的导光臂以及光学潜望镜射入到第 3 级转子叶片的通道内, 片光的入射角度与叶片的安装角接近, 这样就可以使光束最大限度的照亮所测叶高截面处的转子叶片通道流场, 同时光平面是与测量窗口平行的, 片光所照亮的那个通道正好位于测量窗口处, 这样在机匣外正对着窗口的 CCD 相机就可以清楚地拍下流场画面. 通过调节光学潜望镜插入机匣的深度, 可以测量不同叶高截面的流场信息. 本文共测量了转子叶片通道 8 个叶高的近 S_1 截面, 测量截面位置的分布如图 4 所示,

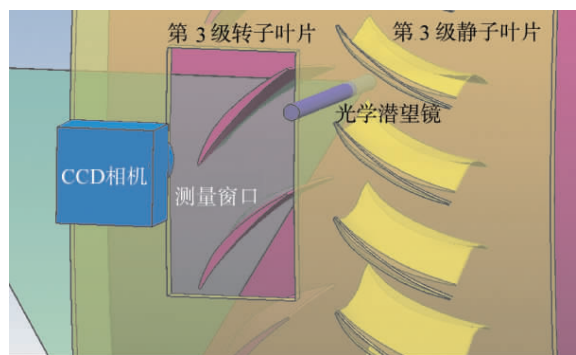


图 3 PIV 测试方案

Fig. 3 PIV test scheme

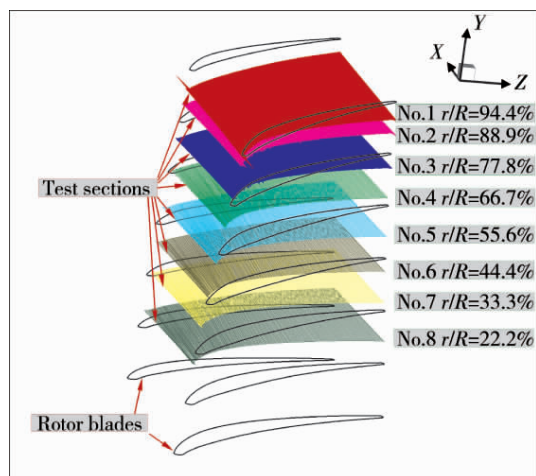


图 4 测量截面位置示意图

Fig. 4 Radial position of the test sections

截面 1 和截面 2 之间间隔为 5 mm,其余各相邻截面之间的间隔均为 10 mm.

2.2 示踪粒子投放

在应用 PIV 系统进行流动测量时,示踪粒子的选择及其散播方式会影响到在目标区域能否获得均匀且密集度适宜的粒子分布,进而影响到能否顺利得到 PIV 测量结果.在本文的实验中,采用油液作为示踪粒子,其大小在 $10\mu\text{m}$ 以内.由于压气机尺寸较大,需要大量的油烟,才能使得目标区域内有合适的粒子密集度.实验过程中,将油液放入舞台烟机生成油烟.在实验台的远前方开始播撒,油烟扩散后,通过实验台前部的喇叭口吸入压气机内部,并在流道目标区域形成密集度合适且分布均匀的粒子.

2.3 测量精度分析

PIV 测量系统受多种因素的影响,其测量误差也是多方面的.比如,由图像采集和分析中的噪声引起的随机误差;由于粒子形状不规则,尺寸不均匀和 CCD 的有限分辨率等因素引起的系统误差;由于示踪粒子跟随性引起的跟随性误差;当流动存在加速度时,由粒子的 Lagrange 速度导出测点的 Euler 速度时产生的加速度误差;以及光线穿过弧形的有机玻璃产生的折射误差等.要准确分析每种因素对测量误差的影响是一件很复杂、很困难的事情.

本文的测量过程中,通过合理地设置系统参数,尽量地减小系统误差,保证测量精度.由于 PIV 测量时必然存在着随机误差,对于瞬态速度场的测量结果,这种误差是不能消除的.而本文测量时,对于每个测量截面,都锁相采集了 100 组不

同时刻的流场照片,并对每组照片进行互相关分析,获得各瞬时的速度场,然后将各时刻的瞬时速度场进行平均,从而得到了时间平均的速度场.在数据处理时,采用了多重网格法,先后采用的查问区窗口大小分别为 $32\text{ 像素} \times 32\text{ 像素}$ 和 $16\text{ 像素} \times 16\text{ 像素}$.在这种情况下,测量结果的随机误差很小,是可以忽略的.

参考其他文献对 PIV 测量误差的估算结果^[10,12],对本文测量误差的估算认为,对于流动的二维性较好的主流区,其测量结果的综合误差在 5% 以内;而对于存在明显三维效应的叶尖区域流场(见下文的实验结果分析),其测量结果的综合误差应该在 8% 以内.

3 数值模拟

为了与 PIV 测量结果进行对比分析,本文采用全三维黏性流场数值模拟的手段,计算获得了该四级低速压气机在设计点工作状态时的流场信息.计算使用了商用 NUMECA 软件的 FINE/Turbo 模块,采用时间推进法求解三维雷诺平均的 N-S(RANS)方程,采用二阶精度的中心差分格式进行空间离散,时间项采用四阶 Runge-Kutta 法迭代求解,湍流模型为一方程的 S-A(Spalart-Allmaras)模型.计算采用多重网格法,结合当地时间步长及隐式残差光滑等加速收敛技术.计算域的网格划分,采用了结构化的 HOH 型网格,叶尖间隙处使用了蝶形网格技术,第一层网格厚度为 0.008 mm ,计算的总网格量约为 330 万.转/静子交接面采用了混合平面法,壁面处理采用了绝热无滑移条件.

4 结果及分析

由于 PIV 测量得到的是绝对速度矢量场,为了便于分析,本文根据转子转速,以及测量截面的径向位置,将绝对速度矢量场换成相对速度矢量场.图 5 给出了在低速压气机的设计工作点状态,根据 PIV 测量结果,换算得到的第 3 级转子叶片通道内 8 个叶高截面上的二维相对速度矢量场,图中横坐标为叶片的额线方向,纵坐标为轴线方向,矢量颜色代表速度大小,叶片的运动方向为从右向左.为了便于对比分析,图 6 画出了根据全三维黏性流场 CFD(computational fluid dynamics)计算结果得到的与试验测量截面相同位置处的 8 个叶高截面上的二维相对速度矢量场.

从图 5 中可以明显看出,各截面处相对速度

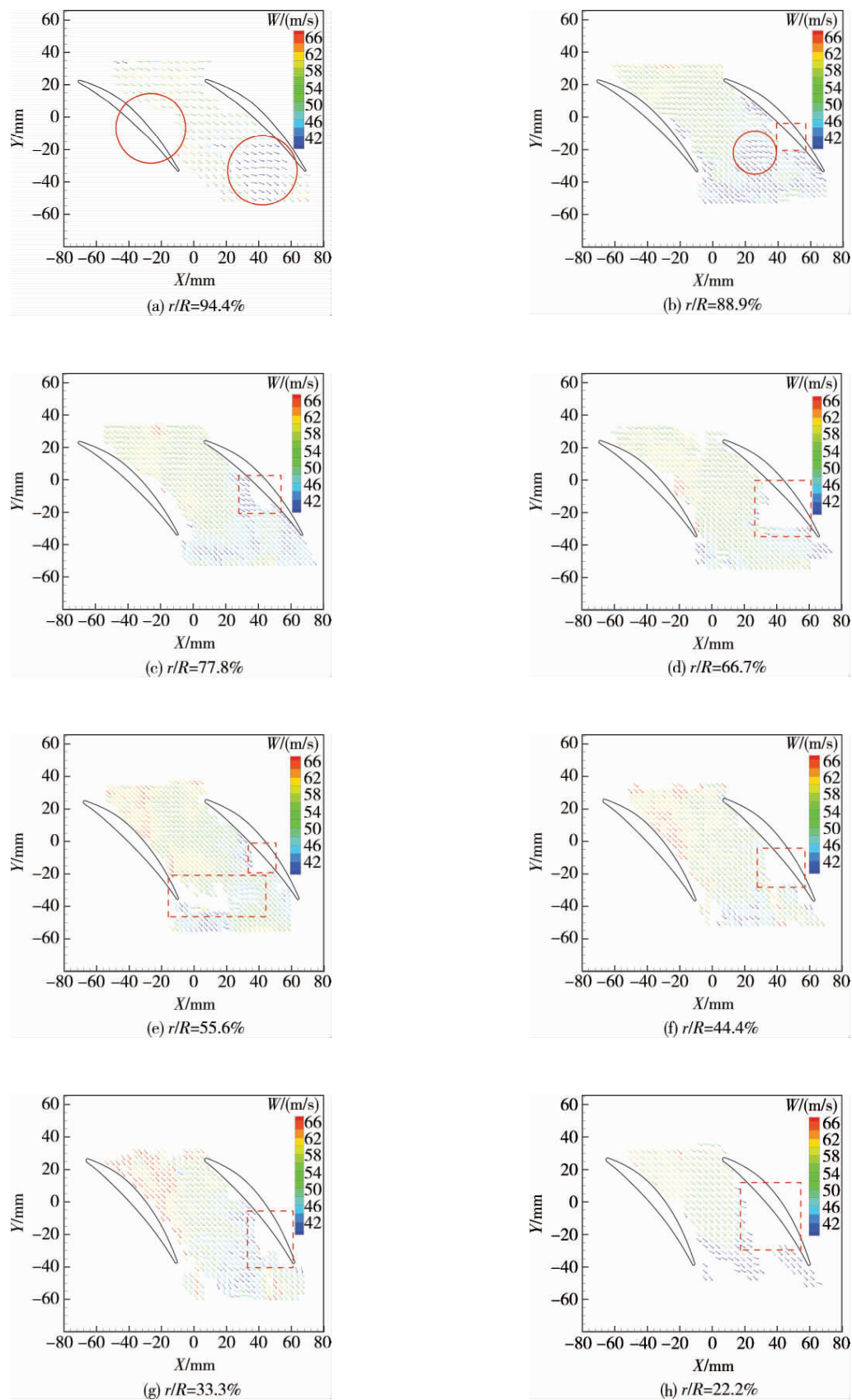


图 5 转子叶片不同测量截面上的二维相对速度矢量场(测量结果)

Fig. 5 Two-dimensional (2-D) relative velocity vector field at 8 different test sections in the third stage rotor blade passage (experiment results)

大小从叶片前缘至吼道处的加速过程,以及从吼道处至尾缘的减速过程,从而也客观地反映了在相对坐标系下,转子叶片通道内气流减速扩压的过程.这说明 PIV 测量结果合理地反映出了转子

叶片通道内的流动情况.对比图 5 和图 6 中各截面上的相对速度分布情况,可以发现计算和 PIV 测量结果所反映的转子叶片通道内的相对速度矢量分布的总体趋势是一致的.

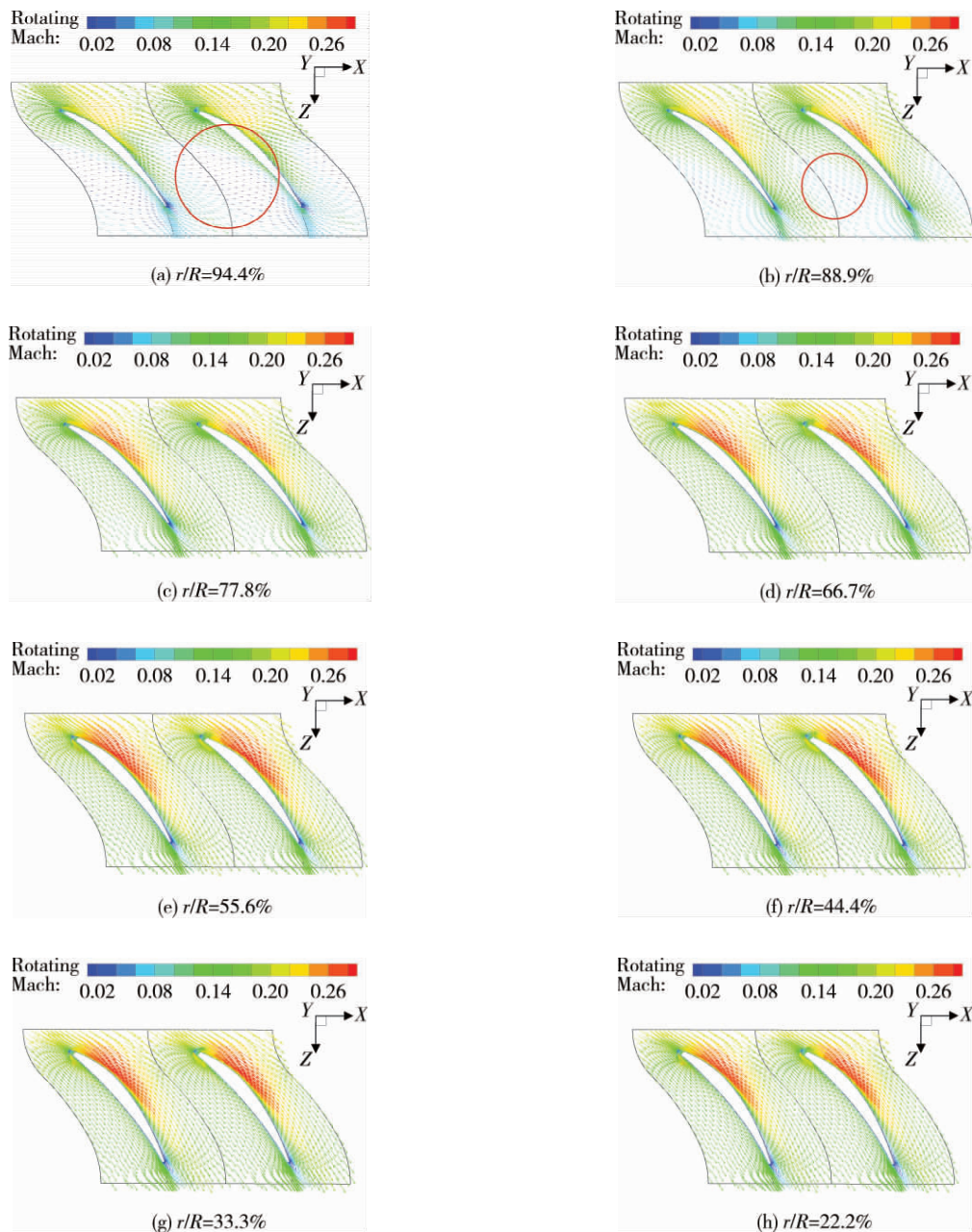


图 6 转子叶片不同测量截面上的二维相对速度矢量场(计算结果)

Fig. 6 2-D relative velocity vector field at 8 different test sections in the third stage rotor blade passage (CFD results)

观察图 5、图 6 中 $r/R=94.4\%$ 以及 $r/R=88.9\%$ 两个叶高截面处的速度矢量分布可以发现,这两个截面的叶片通道出口处存在大面积的低能流体积聚区域,且低速区内气流的速度方向也与主流方向不同,存在着明显的回流.低速区的

范围在叶尖处最大,朝叶根方向逐渐减小,直至消失.图 6 给出的计算结果显示,在 $r/R=94.4\%$ 截面,低速区几乎占据了整个叶片通道.图 5 给出的测量结果显示,其叶尖区域的低速区虽然没有像计算结果那样占据整个叶片通道,但也至少占据

了60%以上的通道面积.从图5、图6中还可以明显地看到低能流体是从叶片的吸力面发展到通道中部的,然后在相邻叶片的压力面尾缘处堆积起来.低速区的存在,明显阻碍了气体的流动,限制了叶片通道的流通能力.同时由于低能流体在叶片压力面的积聚,必然会减小叶片吸力面与压力面之间的压差,从而造成叶片卸载,限制了叶片对气流的加功能力.

根据文献[13]计算给出的叶尖泄漏涡的形态、特征以及文献[14]给出的实验结果可以推断, $r/R=94.4\%$ 以及 $r/R=88.9\%$ 两个叶高截面处的低速区域应该是由叶尖泄漏涡造成的,并且轴向速度越低说明该区域的泄漏流动越强.但是,由于叶尖泄漏涡内的速度方向与主流方向相差较大,且存在较大的径向旋流,而本文主要测量的是周向和轴向的二维速度矢量场,没有进行三维流场测量,所以无法清楚地捕捉到叶尖泄漏涡的空间三维结构.

从测量结果可以大致推测,转子叶片叶尖泄漏涡起始于约40%轴向弦长处,向下游及中径的发展扩散中,逐渐向相邻叶片的压力面靠近,在80%轴向弦长处,其影响区域最大,横向约占据至少60%的通道面积,径向约占20%叶高,所以在 $r/R=94.4\%$ 以及 $r/R=88.9\%$ 两个叶高截面的通道出口处都捕捉到了低速区.随着向下游的扩散,及其与主流的相互掺混,泄漏涡逐渐耗散减弱.

从图5中还可以看到,与其他测量截面相比,叶尖部分两个截面上的来流速度明显偏小,而且通道出口处的相对速度的方向明显偏离了叶片的几何出口角.这是因为受叶尖泄漏堵塞的影响,叶尖部分的气流流量明显小于其余截面处,使得叶片叶尖部分的来流攻角偏大,从而导致落后角也相应地增大,同时也会增大这部分区域的流动损失.

转子叶片其余各测量截面处的相对速度矢量分布较为规则,不存在大尺度的二次流现象,没有大面积的低能流体堆积区,也没有明显的流动分离现象,说明在设计工作点,转子叶片除叶尖部分的其余叶高区域内,气流的流动状态较好.另外,由于转子叶尖泄漏涡的存在,堵塞了叶尖区域的通道,迫使气流都汇集到叶片的中下部,增加了叶片中下部通道的来流流量,从而使得转子叶片中下部的来流攻角小于其设计值,这也是叶尖以下区域气流流动状态较好的一个重要原因.

从图5中还可以发现,除叶尖处的测量截面外($r/R=94.4\%$ 叶高),其余各截面处的测量结果均显示,在转子叶片通道中部,紧靠压力面的一侧都存在一块未测得流场参数的空白区域(图中虚线方框所示),观察各截面处的该空白区域的大小,可以发现该空白区域的大小是随着径向高度的增加而逐渐减小的.另外, $r/R=55.6\%$ 叶高截面的尾缘处也存在一块未测得流场参数的空白区域,并且该区域周围的相对速度矢量也存在着明显的异常.通过与图6中CFD计算结果的对比可以发现,图6中这些位置处并不存在异常流动现象,说明这很有可能是测量本身的问题造成的.分析测量得到的原始照片,可以判断这主要是由于测量时自制的光学潜望镜存在一定的漏光,漏出的光线射到了内机匣上,然后又被反射到所要测量的视场中,从而破坏了相应区域的视场,导致PIV实验未能测出该块区域的流场.随着测量截面径向位置的增加,所测视场与内机匣的距离增加,反射光线对视场的干扰逐渐减弱,所以径向位置越高的测量截面上未测得流场参数的空白区域也就越小.

5 结 论

1) 本文采用数字PIV技术,并配合以自行研制的光学潜望镜以及锁相触发装置,对某四级低速轴流压气机的第3级转子叶片通道流场成功地进行了可视化测量,获得了8个不同叶高截面处的二维速度矢量场.

2) 与三维CFD计算结果的对比分析表明:本文采用PIV技术测得的转子通道二维速度矢量场合理地反映了转子叶片通道内的流动情况,这说明本文采用的PIV测量方法是可以应用于多级轴流压气机内部流场测量的.

3) 本文的测量结果表明:转子叶片尖部存在由叶尖泄漏涡导致的低速区.根据低速区的位置和大小,可以推测,叶尖泄漏涡起始于约40%轴向弦长处,在80%轴向弦长处影响范围最大,其影响区域在横向占据约60%的通道面积,在径向约占20%叶高;在转子叶片通道的其余部分,气流的流动状态较好,不存在明显的低能流体积聚区和流动分离区.

4) 由于自制的光学潜望镜存在一定的漏光,漏出的光线经过反射干扰了所测截面的视场,从而影响了测量结果,导致多个测量截面都存在一块未测得流场参数的区域.以后的工作应该改进

光学潜望镜的设计,使其能够更好地应用于压气机内部的 PIV 流场测量。

参考文献:

- [1] 何有世,袁寿其,黄良勇. 流体机械叶轮内部流场测试技术进展[J]. 流体机械, 2004, 32(12): 36-40.
HE Youshi, YUAN Shouqi, HUANG Liangyong. Development on measurement technology in internal flow field of fluid machinery[J]. Fluid Machinery, 2004, 32(12): 36-40. (in Chinese)
- [2] 吴岳庚. 当代压气机试验与测试技术[J]. 科技与实践, 1998(2): 30-39.
WU Yuegeng. Contemporary compressor test and test technology[J]. Technology and Practice, 1998(2): 30-39. (in Chinese)
- [3] 范洁川. 流动显示技术的若干现状与发展[J]. 气动实验与测量控制, 1995, 9(1): 10-17.
FAN Jiechuan. Review on state-of-art and advance of flow visualization[J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1995, 9(1): 10-17. (in Chinese)
- [4] Paone N, Riethmuller M L, Van den Braembussche R A. Experimental investigation of the flow in the vaneless diffuser of a centrifugal pump by particle image displacement velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 1989, 7(6): 371-378.
- [5] Wernet M P. PIV for turbomachinery applications[C]// Optical Technology in Fluid, Thermal, and Combustion Flow III. Bellingham WA, United states; SPIE, 1997: 2-16.
- [6] Wernet M P, Zante D V, Strazisar T J, et al. Characterization of the tip clearance flow in an axial compressor using 3-D digital PIV[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(4): 743-753.
- [7] Tisserant D, Breugelmans F. Rotor blade-to-blade measurements using particle image velocimetry[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119(2): 176-181.
- [8] Sanders A J, Papalia J, Fleeter S. Multi-blade row interactions in a transonic axial compressor Part I: stator particle image velocimetry(PIV) investigation[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(1): 10-18.
- [9] 刘宝杰, 严明, 刘胤, 等. 跨音风扇转子尖部非定常流场的 PIV 初步测量[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 147-152.
LIU Baojie, YAN Ming, LIU Yin, et al. Preliminary PIV measurement of unsteady tip flow in a transonic fan rotor [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 147-152. (in Chinese)
- [10] YU Xianjun, LIU Baojie. Stereoscopic PIV measurement of unsteady flows in an axial compressor stage[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(8): 1049-1060.
- [11] 李茂义, 陆亚钧, 弓志强, 等. 进口畸变条件下轴流压气机转子内流的 PIV 研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 461-466.
LI Maoyi, LU Yajun, GONG Zhiqiang, et al. PIV investigation of the internal flow in an axial flow compressor rotor under inlet distortion [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 461-466. (in Chinese)
- [12] 张志博, 于贤君, 刘宝杰. 压气机转子内部流场 SPIV 测量的精度分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 868-876.
ZHANG Zhibo, YU Xianjun, LIU Baojie. Precision analysis of the flow field measured in compressor rotor by using stereoscopic particle image velocimetry[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 868-876. (in Chinese)
- [13] 邓向阳. 压气机叶顶间隙流的数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2006.
DENG Xiangyang. Numerical investigation on tip clearance flow in compressor [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [14] Mailach R, Sauer H, Vogeler K. Rotating instabilities in an axial compressor originating from the fluctuating blade tip vortex[R]. ASME Paper 2000-GT-506, 2000.