

粒子图像技术测量带尾缘吹气静子尾迹特征^{*}

吴亚东, 竺晓程, 杜朝辉

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘 要: 采用粒子图像测试技术 (PIV Particle Image Velocimetry) 和热线相结合的方法, 对静子尾缘有无吹气条件下尾迹区流场进行测量, 得到了不同尾部吹气量下的静子尾迹区的流场, 通过测量得到了尾迹区的流动显示、速度矢量图和涡量图, 并根据无动量亏损厚度确定了纯尾迹、弱尾迹、无动量亏损尾迹和射流四种尾迹流动特征。同时对 PIV 测试结果和热线测试结果进行了对比, 两个实验结果比较吻合, 验证了 PIV 实验的准确性, 实验结果认为无动量亏损尾迹区与纯尾迹流动相比具有速度周向变化小和脉动小等特点。

关键词: 压气机; 尾流; 尾缘吹气⁺; 粒子图像测试⁺; 测量

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2008) 02-0230-05

PIV investigation on the wake of stator with trailing edge blowing

WU Ya-dong ZHU Xiao-cheng DU Zhao-hui

(School of Mechanical Engineering Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030 China)

Abstract The mixed flow field of the stator wake with and without injection was measured by PIV (Particle Image Velocimetry) and HWA (Hot wire Anemometer), and the flow fields have been gained in the wake of the stator with and without mass injection through a slit along the stator rear end. According to the flow visualization, velocity fields and vorticity contour maps, four wake spreading characteristics: pure wake, weak wake, momentum less wake and jet were obtained through adjusting the mass injection on the base of momentum thickness. Meanwhile, the comparisons between PIV and HWA were also made. According to comparisons, the experimental results are in well agreement. It is proved that the experiment is correct. The two experimental results show that the momentum less wake have the characteristics of small velocity fluctuation and pulsation.

Key words Air compressor; Wake; Trailing edge blowing⁺; Particle image velocimetry; Measurement

1 引 言

在压缩机、风机等叶轮机械的流动中, 叶片尾缘压力面和吸力面处存在边界层的分离, 在尾部形成速度亏损区的尾迹区。尾迹区流动是一种复杂的三维流动现象, 在多级叶轮机械中, 上游尾迹和下游叶片的相互作用引起叶轮机械的叶片表面非定常力的脉动, 从而引起气动和声学性能的变化, 影响叶轮机械的性能。通过控制和改善尾迹区的流动, 可以提高叶轮机械的性能, 常用的一些控制措施有抽气和吹气等方法。在翼型尾部吹气是常采用的方式, 根据尾部吹气量的大小, 可分为纯尾迹、弱尾迹、无动量亏损尾迹

和射流四种尾迹流动特征。1991年 Cimbala 和 Park 对二维无动量亏损尾迹作了详细的实验研究, 他们研究了二维平板模型的四种种尾迹特征, 并使用可视化技术手段捕捉到了以上四种尾迹特征的流态^[1], 在研究不同模型结构的无动量亏损尾迹时, 发现尾迹特征和模型的尺寸结构有很大关系^[2]。2000年 Siriviente 等人研究了自推进体 (Self-propelled body) 的无动量亏损尾迹, 通过调节尾缘喷气使其产生的推力抵消流体流过翼型产生的阻力^[3]。Leitch 对翼型尾缘吹气进行了实际应用的研究, 其研究发现吹气量为风机流量 1% 时风机的气动性能没有影响, 而声学测试显示吹气对于 BPF (叶片通过频率) 及其一阶谐波有明显

* 收稿日期: 2007-04-23 修订日期: 2007-07-03。

基金项目: 国家自然科学基金 (50406017)。

作者简介: 吴亚东 (1980—), 男, 博士生, 研究领域为叶轮机械内部复杂流动与气动噪声。

Email: yadongwu@sjtu.edu.cn

的减小,静动干涉效应也减弱^[4]。Sell研究了叶栅尾部不同几种吹气方式对叶栅性能的影响,研究发现无动量亏损尾迹对风机的性能有很大的改善^[5]。Feng和Keen等通过控制静子尾缘吹气,改善叶轮机械内部静动干涉引起的非定常流动以及干涉噪声^[6-7]。在国内一些学者采用吹气混合模型的数值方法研究了涡轮冷却叶片尾缘吹气对流动的影响,西北工业大学的王掩刚进行了涡轮叶片尾缘喷气与主流掺混及干扰研究^[8]。

关于无动量亏损尾迹的测量,前期主要是采用热线测试技术和可视化技术^[1-3]。近年来发展的激光测量技术的应用,为研究叶轮机械的流动规律提供了有力的工具,PV技术是在流场显示基础上,利用高速发展的计算机图像处理技术对流场显示进行量化的测量,从而实现对流场的瞬态测量。PV测量技术能测量得到某一瞬态位置时的整场流动信息,能很好地应用于非定常流动的研究。

本文借助PV测量技术,研究了静子尾缘在以上四种不同尾迹流动情况下的发展规律,探讨了尾缘吹气气流和主流的掺混机理。对静子尾缘吹气的深入研究为静子尾缘吹气对叶轮机械的气动和噪声性能的影响提供可靠的实验数据。

2 实验装置与测量方法

本文研究的静子模型如图1所示,静子模型由平板模型发展而来,前缘倒圆,静子厚度20 mm,叶高115 mm,中间开3 mm厚的窄缝,窄缝占据85%叶高。模型的方形槽中插入吹气用的薄铜管,铜管使用压气机供气。铜管上打了四排每排90°分布直径2.5 mm的吹气孔,每个孔间隔5 mm。

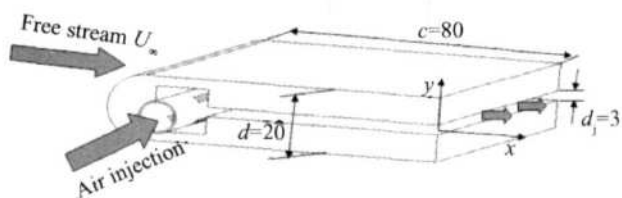
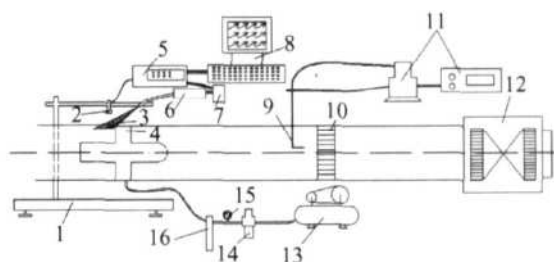


Fig 1 Stator model

实验是在上海交通大学轮机实验室直径500 mm标准风洞上进行的,实验台结构如图2所示。实验使用辅助风机调节流量,流量使用毕托管进行测量。CCD和激光光导臂固定在 DANTEC 三维坐标转换系统上,移动精度为0.5 mm。静子吹气由空压机经过减压阀后供气,通过调节减压阀稳定压力,压力

表和流量计控制吹气的压力和流量来调节尾缘吹气量。为了便于测量,测量部分的机匣换成透光性好的有机玻璃。图3中给出了PV测量系统实际应用中的情况。



- 1) DANTEC coordinate traverse system; 2) CCD; 3) Light sheet; 4) Stator; 5) PV hub2100; 6) Laser optical system; 7) Disynty pulse DN; YAG laser; 8) PC; 9) Pitot static tube; 10) Honey comb; 11) Precise differential pressure manometer; 12) Auxiliary fan; 13) Air compressor; 14) Relief valve; 15) Pressure meter; 16) Glass rotameter

Fig 2 Experiment rig

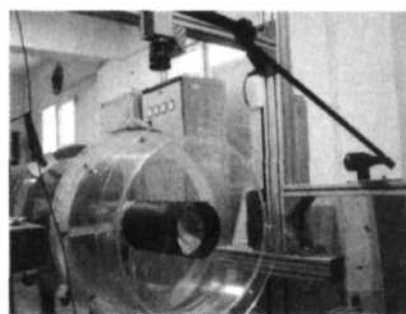


Fig 3 PIV measurement of stator

流场是在来流流量 $109.426 \text{ m}^3/\text{min}$ 测量系统由PV系统、转动机构、粒子发生器三个部分组成。PV系统采用DANTEC生产的PV2100系统,PV系统的操作软件为Flow Map PV系统的图像拍摄系统由激光源、CCD相机组成,双谐振脉冲式ND:YAG激光器为光源,激光器发出的激光束经过圆柱透镜形成一个具有约为1.0 mm厚度和14°张角的片光源,通过光路引入到被测流场。激光器的最大工作频率为10 Hz,每个脉冲能量可高达200 mJ输出的激光束波长为532.0 nm(绿光)。CCD是高分辨率8位Kodak Megaplug ES 1.0互/自相关数字相机,相机分辨率为1018像素×1008像素。在实际测量中,调节镜头保证CCD相机的焦平面和被测量平面一致。粒子发生器采用Antari Z1500 Series烟雾发生器,能产生粒径0.1~0.5 μm的粒子,示踪粒子能反射足够的光,示踪性完全达到实验要求。

3 实验结果与讨论

3.1 实验测量工况的确定

在 PIV 实验前, 首先使用单直丝热线探针测量了来流流量 $109.426 \text{ m}^3/\text{min}$, 测量位置处按静子厚度 d 计算的 Re 为 13 900 静子下游不同尾部吹气下的轴向速度的周向分布, 并计算无量纲化动量亏损厚度 θ/d

$$\frac{\theta}{d} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{U}{U_{\infty}} \right| \left(1 - \frac{U}{U_{\infty}} \right) dy}{d} \quad (1)$$

式中 U 为平均速度, U_{∞} 为来流速度, d 为静子厚度。

调节吹气量, 使其达到纯尾迹、弱尾迹、无动量亏损尾迹和射流四种尾迹流动。没有吹气情况下为纯尾迹特征 ($\theta/d > 0$); θ/d 等于零对应的是无动量亏损尾迹; 弱尾迹介于纯尾迹和无动量亏损尾迹之间 ($\theta/d > 0$ 比纯尾迹情况偏小); θ/d 小于零时是射流流动。

在图 4 中给出了轴向位置 $x = 3d, 10d$ 下, 在 50% 叶高处轴向速度的周向分布, 在图 4(a) 中给出了轴向位置 $3d$ 时的四种不同吹气量下的轴向速度沿周向的分布, 随着吹气量的增加, 尾迹区中速度亏损逐渐减少, 在过了无动量亏损尾迹后, 继续吹气, 尾迹区中的轴向速度大于主流轴向速度变成了射流模式。随着轴向距离的增加, 由于尾迹区中的流动和主流的

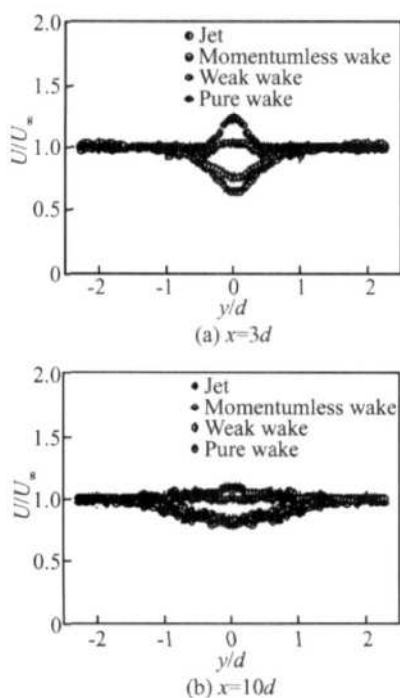


Fig 4 Mean axial velocity profile at different axial positions at 50% spanwise

掺混作用, 使得轴向速度分布逐渐趋于平缓 (如图 4(b) 所示)。

3.2 不同吹气情况下静子下游流场测量

图 5 分别给出了四种尾迹流动下, 采用 PIV 流场测量得到的位于 50% 叶高处平面上的无量纲速度矢量图 (当地速度与来流速度的比值, 速度由轴向速度和周向速度组成) 和相对应的涡量等值线图, 速度矢量图是 PIV 测量结果的多次测量取平均的结果, 每种工况取 100 次平均。图 5(a) 中在纯尾迹下, 静子后有明显的速度亏损区, 涡量图中可以明显观察到沿中心分布的两个方向相反的涡存在。在图 5(b) 中, 在少量吹气的弱尾迹情况下, 叶片尾迹区速度和纯尾迹

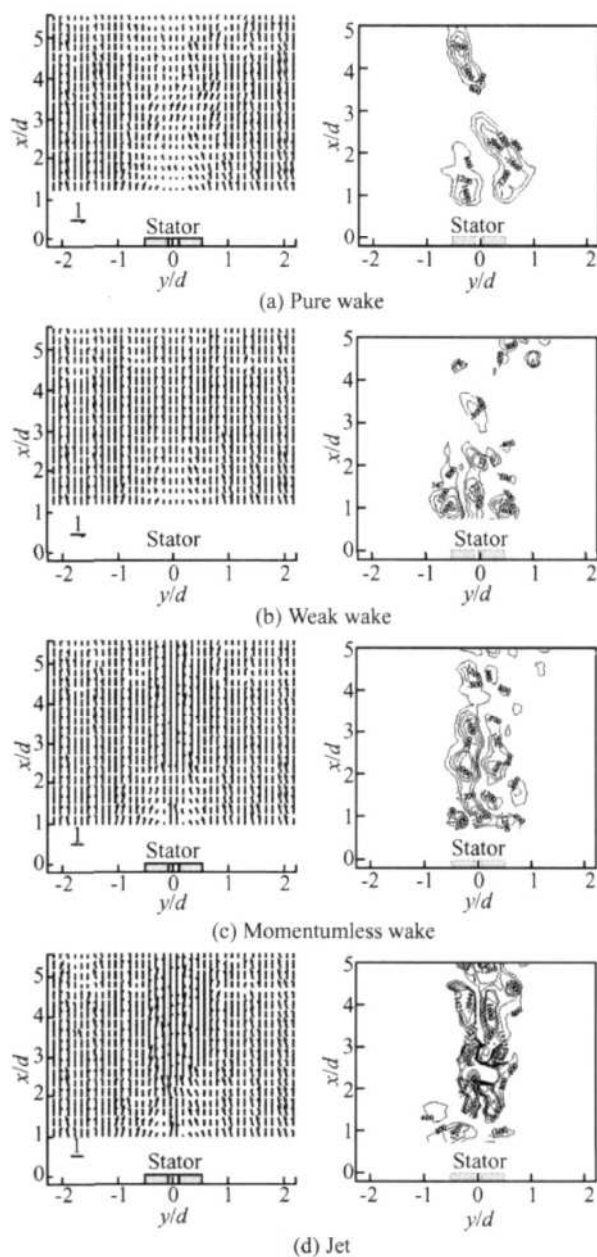


Fig 5 PIV measurement results of stator at different injection

下基本一致,大的涡结构有所破坏。而在图 5(c)中,在无动量亏损情况下,与纯尾迹情况相比尾迹区的速度矢量相对规整,而且由于吹气的影响,涡量图中可以明显观察到与纯尾迹工况下相反的涡分布。这在图 5(d)射流情况下更为明显。

为了考察 PIV 测量精度,图 6 中给出了是无动量亏损尾迹的 PIV 测试结果在轴向 $3d$ 位置处和热线测试的轴向速度周向分布对比图,说明 PIV 测量的结果和热线测量的结果基本一致,PIV 速度测量可以达到热线相近的精度。

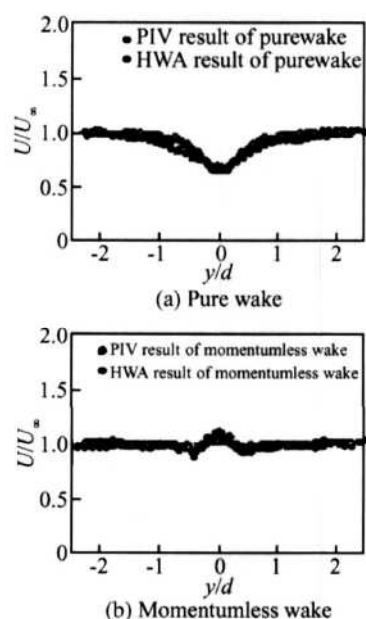


Fig 6 Comparison between PIV and HWA at $3d$ axial position

为了进一步比较吹气对尾迹区流动的影响,在图 7 中给出了用 PIV 拍摄给出了纯尾迹和无动量亏损尾迹下的流动显示图。如图 7(a) 中在纯尾迹下,由于尾迹区流动和主流掺混和卷吸作用,可以观察到不规则界面和大尺度的涡旋结构,其尺度和横向尺度同一量级。并在尾迹区自由剪切湍流层中存在强烈的脉动间隙性。而图 7(b) 中,由于尾部吹气改变了尾迹区的流动,其间隙性和涡几何尺度都有所弱化。

使用热线测量了在 50% 叶高,轴向 $x = 3d$ 和周向 $y = 0$ 处的速度波动频谱。采样频率为 2 kHz 采样数 16 000 对速度进行 FFT 变换,得到了静子纯尾迹和无动量亏损尾迹时的频谱图(在图 8、图 10 中所示),进一步比较纯尾迹和无动量亏损尾迹下流动的脉动性。从纯尾迹的频谱图中,很明显的观察到两个频率峰值,分别是 110.35 Hz、220.70 Hz 这两个频率分别是静子的涡脱落频率及其谐波值。图 9 分别给

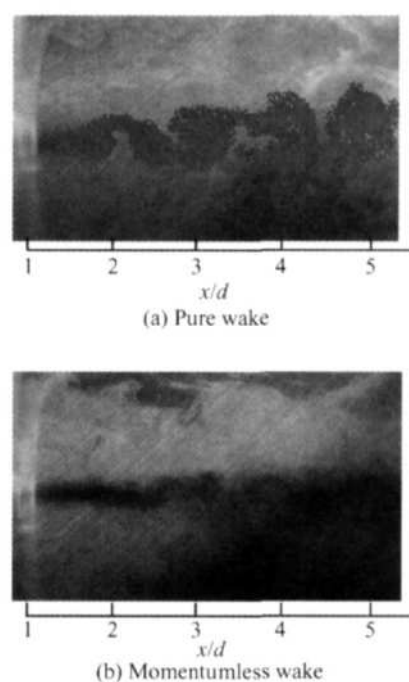


Fig 7 Flow visualization at $x/d = 1 \sim 5$ of different injection

出在两个不同时刻下采用 PIV 测量得到的速度矢量图。纯尾迹下不同时刻尾迹区速度波动较大,而无动量亏损尾迹下,速度方向波动相对较小,基本以轴向为主,并且消除了静子的涡脱离频率,图 10 的速度波动频谱以及图 11 的瞬态结果证明了这点,图 11 是 PIV 测量的两个不同时刻的无动量亏损尾迹瞬态速度矢量图,图中 T 为时间。

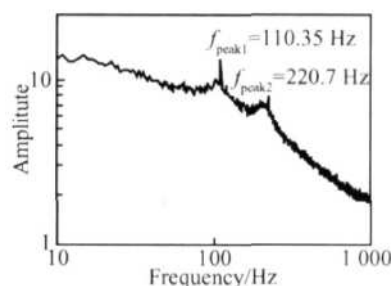


Fig 8 Velocity spectrum of pure wake at $x = 3d, y = 0$

4 结 论

本文使用 PIV 以及热线测量手段成功测量了静子在吹气和不吹气情况下纯尾迹、弱尾迹、无动量亏损尾迹和射流四种尾迹流动,分析各自的流动特点,着重比较了纯尾迹和无动量亏损尾迹。PIV 测量结果和热线测量结果相吻合,通过速度矢量,涡量图和速度频谱的比较,可以认为尾部吹气改变尾迹区的流

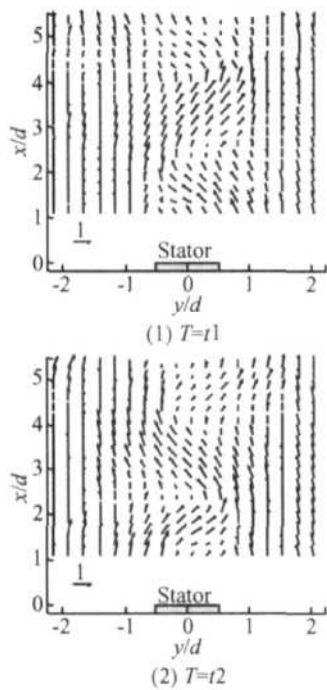


Fig. 9 Velocity field of pure wake at 1 ~ 5d at different times

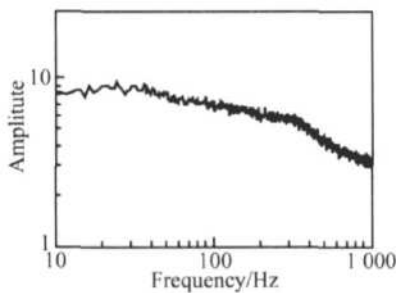


Fig. 10 Velocity spectrum of momentumless wake at $x = 3d, y = 0$

动,无动量亏损尾迹和纯尾迹相比,具有速度矢量相对规整,尾迹区中的涡波动小等特点,这将改善叶轮机械内部流动中上游尾迹对下游叶片的影响。为下一步研究上游尾迹区流动的改变和下游叶片的影响打下基础。

参考文献:

- [1] Cimbal JM, Park W J. An experimental investigation of the turbulent structure in a two-dimensional momentumless wake [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, 213: 479~509.
- [2] Park W J, Cimbal JM. The effect of jet injection geometry on two-dimensional momentumless wakes [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 224: 29~47.

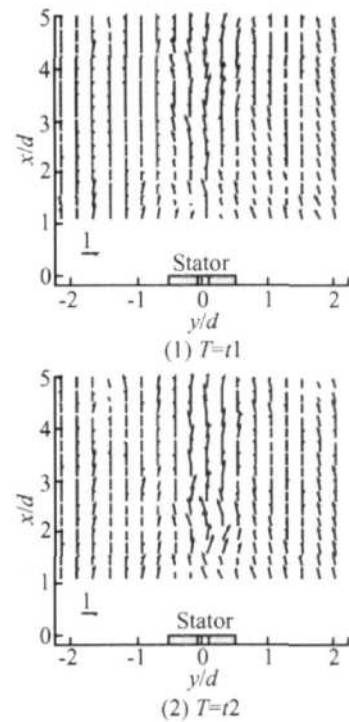


Fig. 11 Velocity field of momentumless wake at 1 ~ 5d at different times

- [3] Sirviente A I, Patel V C. Wake of a self-propelled body. Part I: momentumless wake [J]. *AAIA Journal*, 2000, 38: 613~619.
- [4] Leitch Thomas A, Saunders C A, Ng W F. Reduction of unsteady stator-rotor interaction using trailing edge blowing [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 232: (2).
- [5] Sell J. Cascading testing to assess the effectiveness of mass addition/removal wake management strategies for reduction of rotor-stator interaction noise [D]. *Master's Thesis MIT, Cambridge, MA*, 1997.
- [6] Feng Jiwei. Active flow control for reduction of unsteady stator-rotor interaction in a turbfan simulator [D]. *PhD's Thesis Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, Virginia*, 2000.
- [7] Keen Ernest B. A conceptual design methodology for predicting the aerodynamics of upper surface blowing on airfoils and wings [D]. *Master's Thesis Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, Virginia*, 2004.
- [8] 王掩刚, 刘波, 姜健, 等. 涡轮叶片尾缘开缝喷气的数值模拟和试验研究 [J]. *航空动力学报*, 2006, 21: (3).

(编辑: 郭振伶)