

文章编号:1000-8055(2011)01-0085-07

带尾缘吹气的动静干涉流动的实验

吴亚东¹, 田 杰², 竺晓程², 杜朝辉^{1,2}

(1. 上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240;

2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 采用声学麦克风和粒子图像速度仪等实验研究手段, 分析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与动叶相互干涉的声学特性和流场特性. 得到了不同尾部吹气量下动静之间流场的速度矢量变化以及静子尾迹在动叶流道中的传播特性. 比较了静子尾缘纯尾迹与弱尾迹、无动量亏损尾迹以及喷射等尾迹形态与动叶相互干涉的流场, 分析了静子尾缘吹气使静子尾缘达到无动量亏损尾迹状态, 改善了动叶的进气气流角. 通过对比气动性能以及噪声性能, 说明静子尾缘吹气后动叶的气动性能变化不大, 能降低离散频率噪声.

关 键 词: 尾缘吹气; 尾迹; 无动量亏损尾迹; 粒子图像速度仪; 静动干涉; 流场测量

中图分类号: TH432.1

文献标识码: A

Experimental investigation on stator-rotor interaction flow with trailing edge blowing stator

WU Ya-dong¹, TIAN Jie², ZHU Xiao-cheng², DU Zhao-hui^{1,2}

(1. School of Aeronautics and Astronautics,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Mechanical Engineering,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The mixed flow field and noise characteristic of the stator wake interaction with rotor with/without injection through a slit along the stator's rear end was investigated using noise measurement equipments and particle image velocimetry. In the velocity fields, the spreading characteristics of the wakes across the rotor row were gained. The interaction flow field between pure wake and rotor was compared with the flow field between weak wake, momentumless wake, jet and rotors. The results show that the momentumless wakes make the inlet flow of the rotor more uniform, and improve the inlet flow angle of the rotor. By comparing aerodynamic and aeroacoustic performance, the trailing edge blowing up to momentumless wake can reduce BPF (blade-passing-frequency) noise, and has little effect to the aerodynamic performance.

Key words: trailing edge blowing; wake; momentumless wake;

PIV (particle image velocimetry); stator-rotor interaction;

flow field measurement

轴流风机是现代工业中常用的通风设备, 在风机的上游经常存在进口导叶或者电机支架, 在

导叶和支架的尾部会产生低速低压的尾迹脉动区, 尾迹区对下游的风机的气动性能和噪声性能

收稿日期: 2009-12-09; 修订日期: 2010-06-28

基金项目: 中国博士后基金(20090460621); 上海市青年科技启明星计划(08QA14038)

作者简介: 吴亚东(1980-), 男, 湖北黄梅人, 博士后, 主要从事叶轮机械非定常流动及气动噪声问题的研究.

产生影响,会造成叶片的疲劳损失^[1-5].通过控制和改善尾迹区的流动,可以提高叶轮机械的性能.在国外很早就开始了这方面的研究,Smith^[6],Adamczyk^[7],Deregel 等人^[8]针对尾迹掺混带来的损失进行了研究,通过减小轴向间距、增大叶片负荷等手段,可以有效地减少进出口间尾迹带来的掺混损失.改善尾迹流动常用的一些控制措施有:抽气和吹气等方法.国内外很多学者研究了尾缘吹气以及其对叶轮机械的影响,Cimbala 和 Park^[9-10]是尾缘吹气技术的先行者,他们在上世纪 90 年代初进行了平板翼型尾缘吹气的实验研究,通过热线以及显示技术研究发现通过尾缘吹气能够消除尾迹区的速度亏损以及降低尾迹区的速度波动. Brookfield 等人^[11]最先在叶轮机械中应用尾缘吹气,并给出了重要的结论:尾缘喷气能够降低动静干涉噪声,由于他们的研究,航空发动机上逐步采用尾缘吹气技术降低噪声. Virginia 理工大学的 Leitch 等人^[12]研究上游静叶尾迹吹气后对于减小下游动叶非定常力的效果,研究表明静叶出口总压分布均匀,并且对流量没有影响.王掩刚等^[13]进行了涡轮叶片尾缘喷气与主流掺混及干扰研究,通过实验和数值研究,发现尾缘吹气消除了尾缘处的旋涡,并对涡轮性能有所提高.张伟昊等^[14]使用实验和数值的方法研究了尾迹与涡轮叶栅边界层的相互作用,利用尾迹与边界层相互作用的非定常效应可以明显提高低压涡轮叶栅气动负荷.

粒子图像测速仪(PIV)测量技术一直为叶轮机械内部流动的研究提供了重要的支持,许多学者利用 PIV 技术进行叶轮机械内部流动的研究.利用 PIV 测试捕捉上游叶片尾迹与下游叶片相互干涉的流动是其项研究最可靠的手段,而且是计算流体动力学(CFD)研究的重要验证手段. Sanders 和 Treml 等人^[15-16]使用 PIV 对进口导叶的尾迹与下游叶片相互作用进行了测量,得到了尾迹在动叶内传播的时序变化以及尾迹速度脉动情况,研究结果对于设计优化叶片的安装角度有重要帮助.

本文借助实验研究手段,分析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与动叶相互干涉的声学特性和流场特性.着重研究基于 PIV 测量得到的不同尾迹与动叶相互干涉的流场,探讨了尾迹和动叶干涉的机理,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资料.

1 实验装置

本文研究的静子模型如图 1 所示,静子模型前缘倒圆,厚度为 20 mm,叶高为 115 mm,中间开 3 mm 厚的窄缝.模型的方形槽中插入吹气用的铜管,铜管使用压气机供气.静子尾缘的供气由压缩机压缩空气后进入高压气缸中进行储存,一方面保证气源稳定,另一方面保证吹出气流平稳.从气缸出来的气体油水分离器以及干燥装置进行过滤和干燥,然后经减压阀后供气,压力表和流量计用于计量吹气的压力和流量.

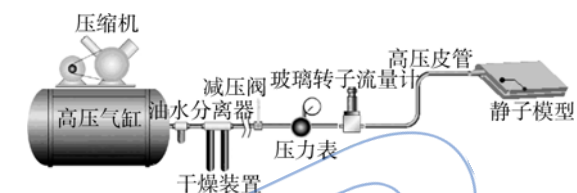


图1 静子模型以及供气装置

Fig. 1 Stator model and air-supply equipment

动叶是由 5 个等厚平板圆弧型叶片组成,设计转速为 1440 r/min,叶轮的轮毂比为 0.35,叶片在中径处的进口安装角为 25°,如图 2 所示.

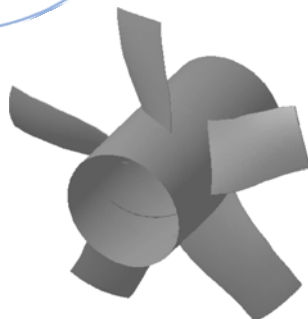


图2 动叶三维模型

Fig. 2 Rotor model

声学实验是在上海交通大学气动消声室内进行的,其尺寸为 6 m×4.4 m×3.82 m.消声室的背景噪声和截止频率分别为 17 dB 和 165 Hz.声学测量装置采用 Brüel & Kjær 2144 型声学分析仪,以及 Brüel & Kjær 2230 精密型声级计.

PIV 测量实验是在上海交通大学教育部重点实验室的直径 500 mm 标准风洞上进行的,实验台按照 GB1236-2000^[17]搭建,采用进气实验装置.图象传感器 CCD(charge coupled device)和激光光导臂固定在 BOSCH 三维坐标转换系统上,移动精度为 0.5 mm.为了便于测量,测量部分的机匣换成透光性好的有机玻璃,如图 3 所示.



图 3 PIV 实验装置

Fig. 3 PIV experiment rig

PIV 实验使用 Dantec 公司生产的二维 PIV 系统,采用两台独立双谐振脉冲式钇铝石榴石激光器,形成一个具有 1.0 mm 厚度和 14° 张角的片光源,激光器的最大工作频率为 10 Hz,每个脉冲能量达到 200 mJ,脉冲宽度在 5.0 ns 到 10.0 ns 之间.采用 PIV2100 同步控制器进行相机和激光的同步控制.采用 Flowmap 图像控制系统来控制协调各组成部件间的工作以及得到最后的结果.本实验采用的图像传感器是高分辨率 8 位 Kodak Megapplus ES 1.0 互/自相关数字相机,相机分辨率为 $1018 \text{ 像素} \times 1008 \text{ 像素}$,测量时调节镜头保证图像传感器相机的焦平面和被测量平面一致.利用 PIV 系统外部触发功能,采用红外光纤信号触发器实现叶片周向锁相.本次测量的典型空间分辨率为 2 mm,对于主流和大尺度旋涡的速度测量结果的精度估计为 $2\% \sim 3\%$.

PIV 测量时使用的示踪粒子,采用的是舞台烟雾发生器添加示踪粒子,舞台烟雾的基本成分是一种油烟,能产生足量粒子,烟雾粒子粒径可达 $10 \mu\text{m}$ 量级,烟雾比较干净,对环境和设备污染极小,示踪性好,可满足 PIV 常规测量需要^[18].

实验在动叶的设计工况下测量,测量了叶片 6 个不同位置 50% 叶高处尾迹与动叶相互干涉的流场,测量位置如图 4 所示,图中 P1~P6 表示动叶位置.通过锁相技术,使动静叶相对位置固定.

2 实验结果以及分析

2.1 实验测量工况的确定

根据静子尾缘的尾迹状态确定实验工况,按照静子尾缘尾迹区的动量亏损厚度,将静子尾缘的尾迹状态划分为纯尾迹、弱尾迹、无动量亏损尾迹和射流四种尾迹特征.具体参考文献^[19]的方法.

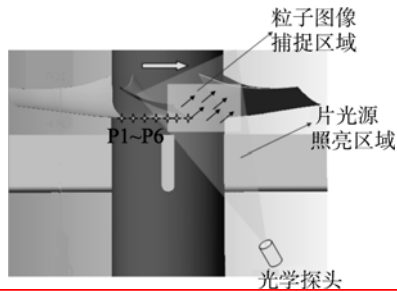
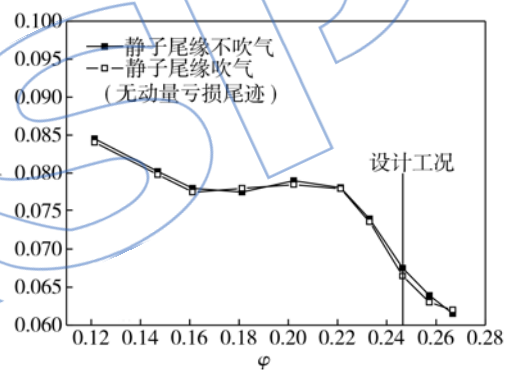


图 4 PIV 测量时叶片 6 个测量位置

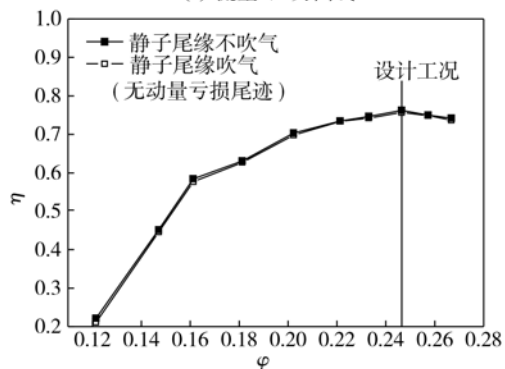
Fig. 4 Six rotor measurement positions of PIV test

2.2 气动性能以及噪声特性

图 5 以流量系数为横坐标给出了风机在有无尾缘吹气下的压力和效率曲线,设计工况点基本上在最高效率点.从图中可以看出,由于静子尾缘吹气的质量很小,不到风机流量的 2%,所以静子尾缘吹气对风机的性能基本没什么影响.



(a) 流量-压力曲线



(b) 流量-效率曲线

图 5 风机系统的性能曲线

Fig. 5 Performance curve of stator-rotor system

将图 3 所示的实验装置置于气动消声室中,可测量静子尾缘在有无吹气情况下,动静叶的噪声特性.在实验过程中,旋转部件和地面的接触采用了隔振处理以减小振动噪声的影响,另外,测量前测量了电机空转时的噪声,其值为 42 dB,其值和被测噪声值相差至少 10 dB 以上,根据声学知

识,相差 10 dB 以上的噪声,其对总的噪声值影响很小,基本可忽略,所以测量时,背景噪声的影响可忽略.图 6 是测量得到的噪声频谱以及由频谱中提取的离散频率噪声(也称叶片通过频率噪声),从图中可以看出,静子尾缘吹气达到无动量亏损尾迹时,动静叶的宽频噪声变化不大,主要是离散频率噪声的变化.由噪声频谱得到静子尾缘不吹气时总声压级 84.84 dB,而静子尾缘吹气达到无动量亏损尾迹时,系统的总声压级(L_{sp})为 83.98 dB,差别较小,而这差别主要是由离散频率噪声的变化引起的.由此,可以得出,静子尾缘吹气后可以降低动叶的离散频率噪声.主要原因是静子尾缘吹气后能降低动叶入口速度波动,从而降低了静子尾迹对动叶表面非定常脉动的影响,而叶片表面的非定常脉动力是离散频率噪声产生的主要因素.

2.3 PIV 测量结果

锁相平均结果基于 100 幅锁相得到 PIV 瞬态结果,锁相平均结果更能反映尾迹在动叶排内的流动特征,并能消除不稳定因素的影响.图 7 是静子不吹气时,在位置 P1~P6 处尾迹与动叶相

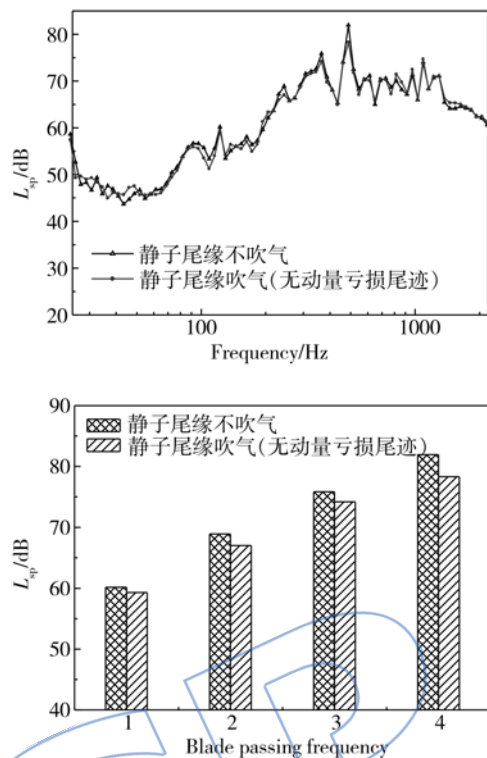


图 6 动静干涉的噪声特性

Fig. 6 Noise characteristic of stator-rotor interaction

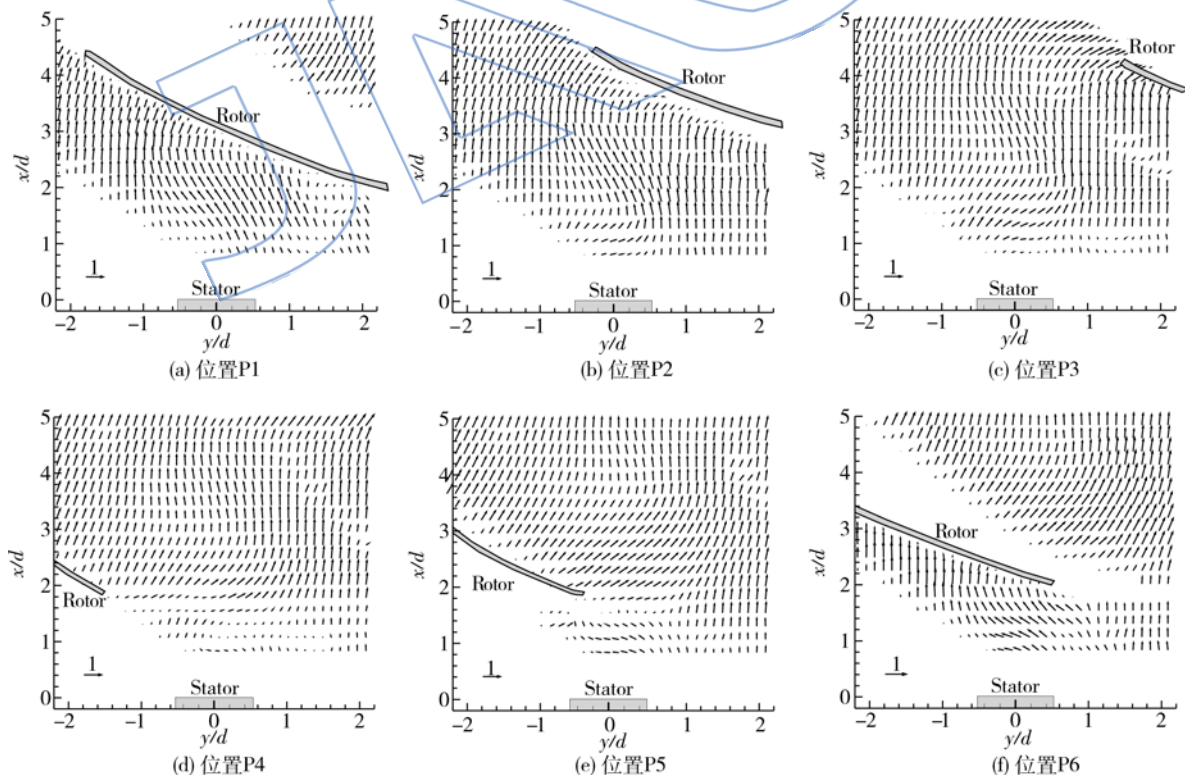


图 7 纯尾迹情况下动叶在不同位置的锁相平均速度矢量图

Fig. 7 Phase-locked average velocity vector at different positions of the rotor under pure wake case

相互作用的流场,由于动叶和上游的静子相对转动,动叶周期性地扫过静子的尾迹,尾迹区速度低速旋涡区域,使动叶的进气气流角产生周期性的变化.图8给出了不同叶片位置时的锁相平均轴向速度等值线图,从图中可以看出,尾迹区有明显的轴向速度亏损区.结合图7与图8可以观察到尾迹向下游运动演变的过程中,扫过吸力面时,由于动叶的吸力面挤压作用,导致附面层内的流体发生了动量交换,静子的尾迹相对传输过程,向动叶压力面方向堆积,动叶的旋转作用将切断尾迹的

传输,尾迹被动叶的压力面收集起来,向下游传播.

图9给出了基于PIV测量得到不同时刻动叶的进气气流角变化,位置位于动静叶之间,静子出口 $1d$ 位置处.从图中可以看出,静子尾缘不吹气时,动叶的进气气流角变化很大,最大达到 56.67° ,说明动叶的进气气流波动较大.而尾缘吹气之后达到无动量亏损尾迹时,动叶的进气气流角变化较小,变化平稳,说明尾缘吹气后动叶的进气气流均匀.

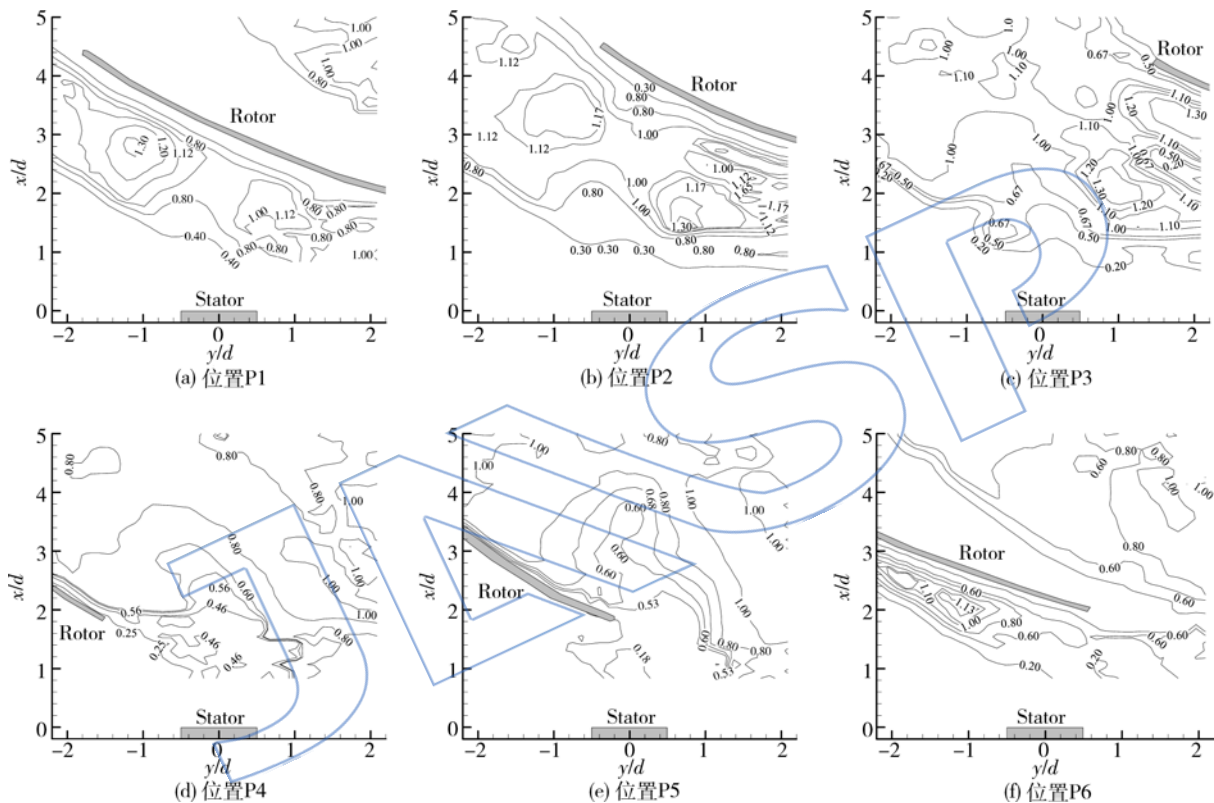


图8 动叶片不同位置时尾迹与动叶干涉的锁相平均绝对轴向速度等值线图

Fig. 8 Axial velocity contour of the wake interaction with the rotor at six different positions

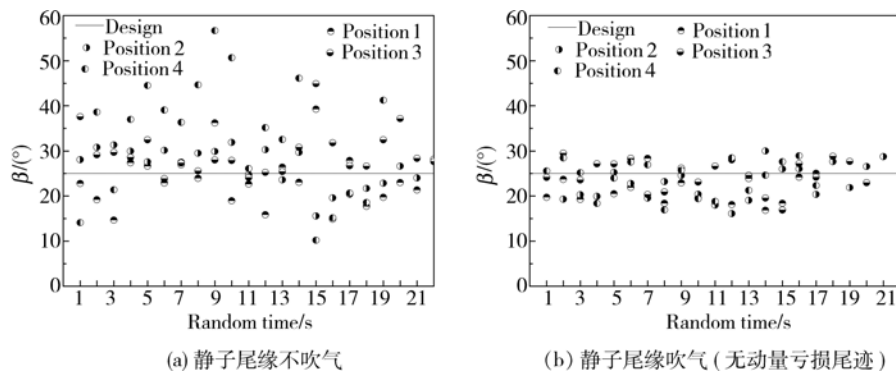


图9 动叶进气气流变化

Fig. 9 Rotor absolute inlet flow angle at $x=1d, y=0$ at different time

图10给出了P2、P4和P6三个位置处静子尾缘在弱尾迹、无动量亏损尾迹和喷射这三种尾迹状态下锁相平均速度矢量图,从图中可以看出,在弱尾迹、无动量亏损尾迹和喷射下都存在尾迹区流动被下游动叶切割的过程。在弱尾迹状态时,在静子尾缘还是存在明显的速度亏损区,尤其是静子的两侧,这部分区域还是存在较大的速度不均匀性。从弱尾迹的轴向速度等值线图也可以看出,相对于纯尾迹流动,轴向速度亏损有所减弱。而继续增加吹气量达到无动量亏损尾迹时,静子尾缘的速度亏损区被尾缘吹气气流完全填平,速

度方向和大小基本均匀一致。静子尾缘吹气气流超过了无动量亏损尾迹所需的气流,在静子尾缘形成喷射气流,喷射气流比主流气流大很多,它对下游动叶的影响比较大。静子尾缘的气流呈现明显的喷射状态,喷射气流将对动叶叶片形成很大的冲击影响,所以在进行静子尾迹流动控制时,需要对尾缘吹气量进行严格控制,避免喷射状态的发生。另外,从图中还可以看出,喷射状态下其尾迹结构以及向下游发展的趋势和无动量亏损尾迹接近。

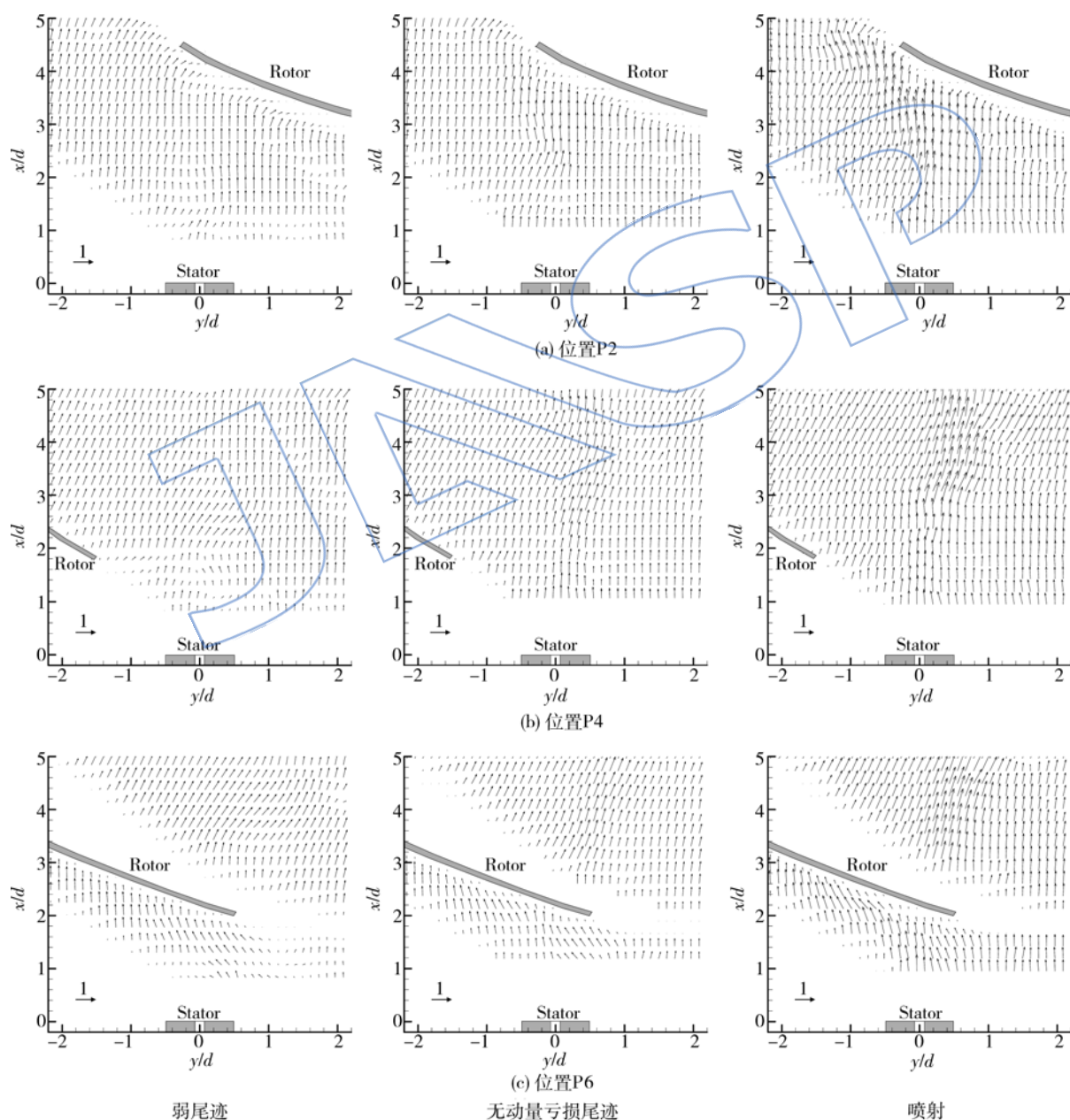


图10 静子尾缘吹气后不同尾迹特征与动叶相互作用速度矢量图

Fig.10 Velocity vector map of different wake interaction with rotor

3 结 论

本文采用实验研究手段,分析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与动叶相互干涉的声学特性和流场特性,并着重比较了纯尾迹和无动量亏损尾迹与动叶干涉的声学特性和流场特性.通过比较,得出以下结论:

1) 尾部吹气改变了尾迹区的流动,无动量亏损尾迹区的速度矢量相对规整,速度波动小,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.并且尾缘吹气对动叶的气动性能影响不大.

2) 静子尾缘吹气后,对动静叶辐射的宽频噪声影响较小,而对离散频率噪声有较大影响,能降低离散频率噪声.

参考文献:

- [1] 胡骏,汤国才,于再. 动叶尾迹对静子非定常气动性能影响的研究[J]. 航空动力学报,1999,14(4):387-392.
HU Jun, TANG Guocai, YU Zai. An experimental investigation on compressor rotor-stator interaction [J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(4): 387-392. (in Chinese)
- [2] 王英锋,胡骏,罗标能,等. 上游叶片尾迹对转子叶片非定常表面压力频谱特性影响的研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 693-698.
WANG Yingfeng, HU Jun, LUO Bioneng, et al. Effects of the up-stream blade wakes on the spectrum of rotor blade unsteady surface pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 693-698. (in Chinese)
- [3] Mailach R, Vogeler K. Aerodynamic blade row interactions in an axial compressor: Part II—Unsteady profile pressure distribution and blade forces[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126(1): 45-51.
- [4] 弓志强,陆亚钧,李志平,等. 轴流压气机内导叶/转子干涉对转子流场的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(1): 32-37.
GONG Zhiqiang, LU Yajun, LI Zhiping, et al. Impact of IGV/rotor interaction on rotor flow field in an axial compressor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(1): 32-37. (in Chinese)
- [5] Manwaring S R, Fleeter S. Rotor blade unsteady aerodynamic gust response to inlet guide vane wakes[J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115(1): 197-206.
- [6] Smith L H. Wake dispersion in turbomachines[J]. ASME Transactions Journal of Basic Engineering, 1966, 88(3): 689-690.
- [7] Adamczyk J J. Wake mixing in axial flow compressors[R]. ASME Paper 96-GT-29, 1996.
- [8] Dereguel P, Tan C S. Impact of rotor wakes on steady state axial compressor performance[R]. ASME Paper 96-GT-253, 1996.
- [9] Cimbalá J M, 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.
- [10] Park W J, Cimbalá J M. The effect of jet injection geometry on two dimensional momentumless wakes [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 224: 29-47.
- [11] Brookfield J M, Waitz I A. Trailing-edge blowing for reduction of turbomachinery fan noise [J]. Journal of Propulsion and Power, 2000, 16(1): 57-64.
- [12] Leitch T A, Saunders C A, Ng W F. Reduction of unsteady stator-rotor interaction using trailing edge blowing [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 235(2): 234-245.
- [13] 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): 474-479.
WANG Yangang, LIU Bo, JIANG Jian, et al. Experiment and numerical simulation investigation of turbine blade with trailing edge ejection[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 474-479. (in Chinese)
- [14] 张伟昊,刘火星,李维,等. 尾迹与涡轮叶栅边界层的相互作用[J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 843-850.
ZHANG Weihao, LIU Huoxing, LI Wei, et al. Wake-boundary layer interaction on low pressure turbine cascade blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(4): 843-850. (in Chinese)
- [15] Sanders A J, Papalia J, Fleeter S. A PIV investigation of rotor-IGV interactions in a transonic axial-flow compressor [R]. AIAA-99-2674, 1999.
- [16] Tremblé K M, Lawless P B. Particle image velocity of vane-rotor interaction in a turbine stage [R]. AIAA-98-3599, 1998.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 1236-2000 工业通风机用标准化风道进行性能试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [18] 肖亚克,贾元胜,张孝棣,等. PIV 技术中的示踪粒子发生和布撒[J]. 气动研究与实验, 2005, 22(4): 8-15.
XIAO Yake, JIA Yuansheng, ZHANG Xiaodi, et al. Generation and dispensing of trace particle in PIV technology [J]. Aerodynamic Research and Experiment, 2005, 22(4): 8-15. (in Chinese)
- [19] 吴亚东,竺晓程,杜朝辉. 无动量损失尾迹的实验研究[J]. 实验流体力学, 2007, 22(3): 30-34.
WU Yadong, ZHU Xiaocheng, DU Zhaohui. Experimental investigation on the momentumless wake [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2007, 22(3): 30-34. (in Chinese)