

文章编号:1000-8055(2011)04-0954-07

进口导叶预旋对扩压器内部非定常 流场影响的实验

周莉, 张鑫, 蔡元虎

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 在不同的进口导叶预旋角度和方向下, 采用热线风速仪对扩压器内部非定常流场进行了测量, 采用锁相采样-集平均技术对热膜测量的瞬时信号进行处理, 研究了进口导叶预旋角度和方向对扩压器内部非定常流场的影响。结果表明, 扩压器内部大部分湍流强度均有所增加; 扩压器内的非定常性受导叶尾流及大尺度涡团的非定常影响而减小, 且负预旋角度下非定常性的减小程度小于正预旋角度下非定常性的减小程度; 扩压器内部的非定常流动的基本频率降低。

关 键 词: 进口导叶预旋; 热线风速仪; 扩压器; 非定常性; 非定常流场; 基本频率

中图分类号: TH211.73

文献标志码: A

Experimental investigation of the influence of inlet guide vane prewhirl on the unsteady flowfield in the vaned diffuser

ZHOU Li, ZHANG Xin, CAI Yuan-hu

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Experimental investigation of unsteady flow in the vaned diffuser of a centrifugal compressor stage was performed under different inlet guide vane (IGV) prewhirl angles and directions in this paper. Detailed instantaneous flow was measured at several different measuring positions using a hot-wire anemometer with the phase-locked ensemble-averaged technique, the influence of the IGV prewhirl angle and direction on the unsteady flowfield in the vaned diffuser was studied. In the existence of IGV prewhirl angle, the results show that the turbulence intensity increases at most of the position in the vaned diffuser; the unsteadiness in the vaned diffuser reduces due to the influence of the IGV wake and large size vortice, and the amplitude of the reduction under the negative IGV prewhirl is smaller than that under positive IGV prewhirl angle; the base frequency of the flow in the vaned diffuser decreases under the IGV prewhirl.

Key words: inlet guide vane (IGV) prewhirl; hot-wire anemometer;
vaned diffuser; unsteadiness; unsteady flowfield; base frequency

由于离心叶轮机中转子和静子之间径向间距一般很小, 转子叶片尾迹的混合过程很快, 所以

在离心式机械中必须同时考虑尾流效应和势流效应, 相应的动静干涉现象更加复杂。由于重要的实

收稿日期: 2010-04-27; 修订日期: 2010-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(50906071); 航空科学基金(2008ZB53014); 教育部高校博士点新教师基金(200806991061); 西北工业大学“翱翔之星计划”

作者简介: 周莉(1978—), 女, 河南信阳人, 副教授, 博士, 主要从事热机气动热力学研究。

践应用和干涉现象固有的复杂性,目前,针对级环境下叶轮与扩压器叶片之间的相干非定常流动开展了很多研究^[1-6],研究重点集中在叶轮与叶片扩压器之间的非定常耦合对整机的性能及流场的影响上.但在工程应用中还通常通过调节进口导叶(inlet guide vane,简称IGV)的预旋角度以扩大压气机稳定工作范围和改善非设计状态的性能.许多学者对叶轮进口流场结构的重要性进行了研究,结果表明叶轮上游的部件影响着叶轮进口的流场^[7-9].作者还对进口导叶/叶轮/扩压器三部件之间的非定常流动进行了数值模拟和性能测量^[10-12],结果表明进口导叶预旋角度对扩压器内部的非定常流动有重大的影响,通过进口导叶预旋角度和扩压器安装角度的匹配,可以重新组织离心压气机内部的流场.因此,在进口导叶预旋角度存在时,对压气机级环境下扩压器内部非定常流动进行细致的实验研究,认识进口导叶尾流与叶轮及扩压器相干非定常作用机制,对压气机的非定常设计有重要的指导意义.本文在不同的进口导叶预旋角度和方向下,采用热线风速仪对扩压器内部非定常流场进行了测量,研究了进口导叶预旋角度和方向对扩压器内部非定常流场的影响.

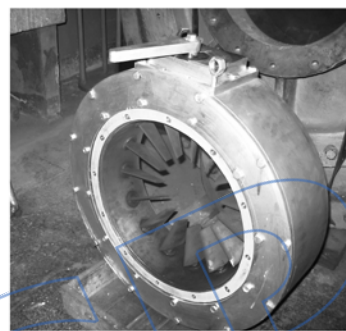
1 实验台位及测试方法

实验是在文献[11]中的实验台位上进行,实验装置为一开式低速离心压缩机,主要结构如图1所示.进口导叶的叶片数为15,当进口导叶处于闭合位置时,各个导叶叶片彼此重叠,使得流动路径完全堵塞.实验叶轮采用半开式现代三元叶轮,直径为796 mm,共20个后弯叶片.离心叶轮后的扩压器采用翼型叶片,叶片数为13.本次实验工况所对应的叶轮转速为3000 r/min,流量为2.66 m³/s.

本次实验选用了Dantec公司的智能型恒温式热线热膜风速仪(Dantec 90N10)作为测试仪器,以高频响的X型热膜探针(Dantec 55R54)作为敏感元件来测量扩压器内部非定常流场.测量平面有5个,其中1个位于叶轮和扩压器的径向间隙内,另外4个位于叶片扩压器内部.在第1个到第3个测量截面上,沿周向均布了3个测孔,在第4个和第5个测量截面上,沿周向均布了5个测孔.具体测点位置如图2所示.在叶高方向(即轴向)分布了10个测量位置(从轮盘到轮盖).



(a) 叶轮及扩压器



(b) 可调进口导叶

图1 实验装置实物照片

Fig. 1 Test rig of the centrifugal compressor stage

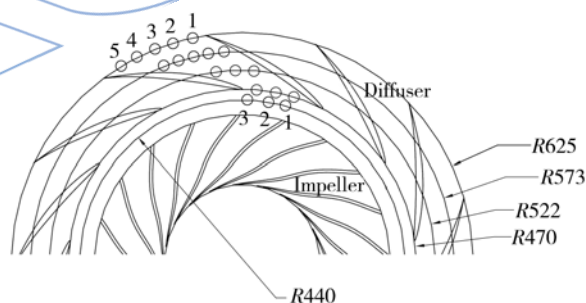


图2 测点布置图(单位:mm)

Fig. 2 Measuring position arrangement (unit:mm)

采用锁相采样-集平均技术对热膜测量的瞬时信号进行处理,采样频率为120 kHz,采样时间为0.02 s,每组数据采样500次.根据标定比较,本文估计实验不确定性如下:平均速度为 $\pm 1\%$;流动角为 $\pm 0.6^\circ$;湍流强度为 $\pm 5\%$;探针位置为 ± 0.1 mm.

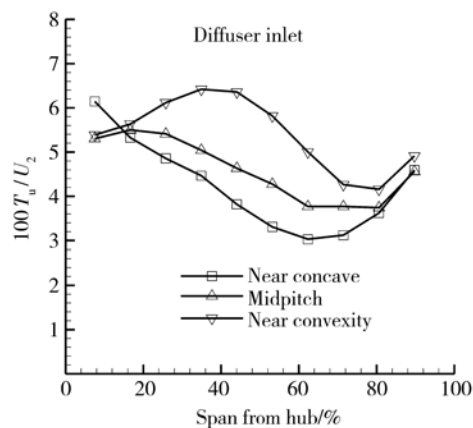
2 实验结果分析

2.1 湍流强度及非定常度分布

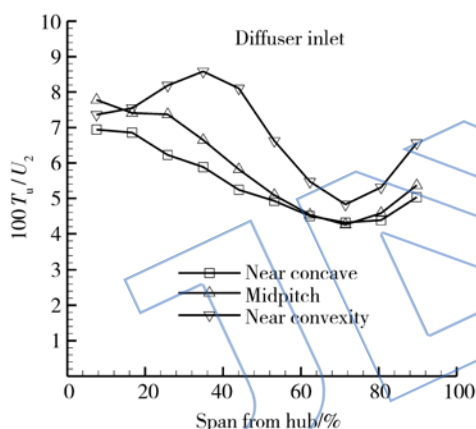
图3和图4给出了进口导叶为正、负预旋 30° 时扩压器进出口湍流强度的分布图,其中 U_2 为

叶轮顶部的周向速度, T_u 为湍流强度. 从图中可以看出, 当进口导叶为负预旋 30° 时, 扩压器进出口平面各个测点处的湍流强度均有所增加, 扩压器进口平面上仍然是靠近凸面测点上的湍流强度较大, 在扩压器出口平面各个测点之间湍流强度

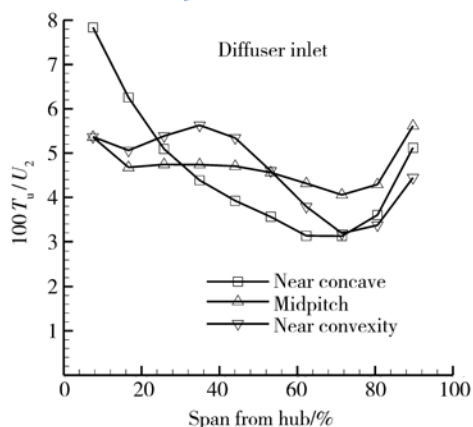
的差别比进口导叶为零预旋时大. 当进口导叶为正预旋 30° 时, 扩压器进出口平面大部分测点处的湍流强度也有所增加, 但增加的幅度很小, 在扩压器进口平面上靠近凸面测点处的湍流强度反而所降低, 此时进口平面上沿叶高方向不存在某个



(a) 进口导叶为零预旋

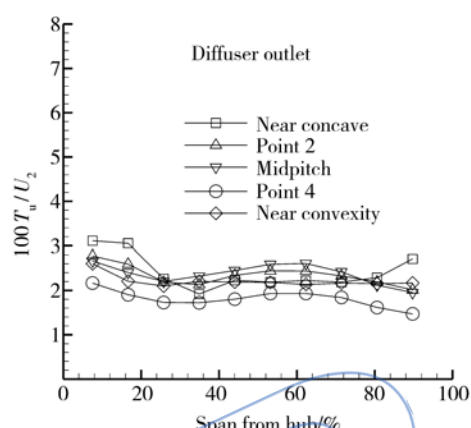


(b) 进口导叶为负预旋 30°

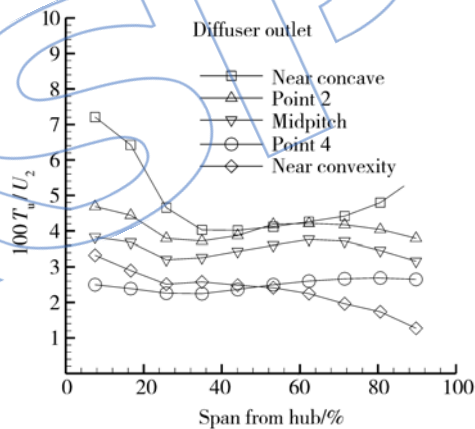


(c) 进口导叶为正预旋 30°

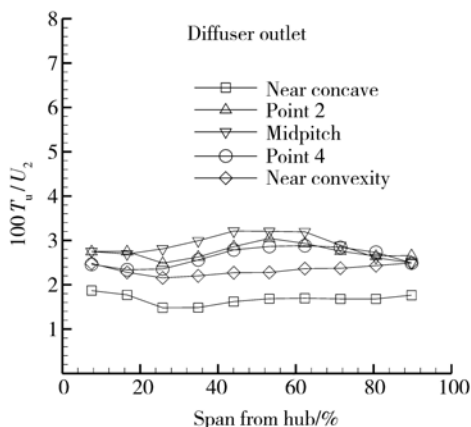
图3 不同预旋角度下扩压器进口平面的湍流强度分布
Fig. 3 Time-averaged turbulence intensity on diffuser inlet plane under different IGV prewhirl angles



(a) 进口导叶为零预旋



(b) 进口导叶为负预旋 30°



(c) 进口导叶为正预旋 30°

图4 不同预旋角度下扩压器出口平面的湍流强度分布
Fig. 4 Time-averaged turbulence intensity on diffuser outlet plane under different IGV prewhirl angles

测点上具有明显高的湍流强度.在出口平面上具有最小湍流强度的测点是靠近凹面的测点,其同进口导叶为零预旋下相比,湍流强度也有所降低.

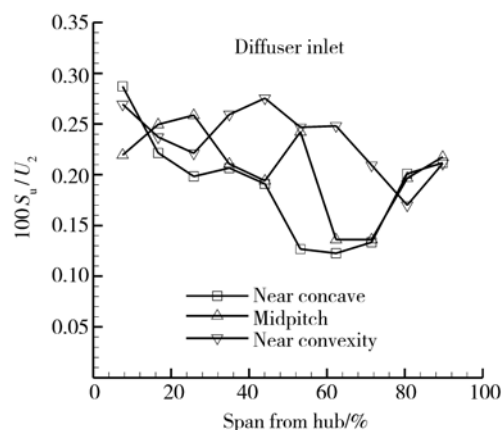
图5和图6给出了进口导叶为正、负预旋 30° 时扩压器进出口非定常度的分布图,非定常度 S_u 的定义见文献[3].从图中可以看出,当进口导叶为正、负预旋 30° 时,扩压器进口平面各个测点处的非定常度均有所降低,且进口导叶为正预旋 30° 时非定常度降低的幅度比进口导叶为负预旋 30° 时大,扩压器进口平面上在大部分叶高处仍然是靠近凸面测点上的非定常度较大,在其他叶高处靠近凹面和中间测点处的非定常度分别对应进口导叶为正、负预旋 30° 而具有三个测点中最高非定常度.在扩压器出口平面各个测点之间进口导叶为正、负预旋 30° 下的非定常度同进口导叶为零预旋时差别不大,且各个测点之间的非定常度交织在一起.当进口导叶为正预旋 30° 时,扩压器出口平面上具有最小非定常度的测点是靠近凹面的测点,其同进口导叶为零预旋下相比,非定常度有所降低.因而当进口导叶具有较大的预旋角度时,扩压器内的非定常性受导叶尾流及大尺度涡团的非定常影响而减小,且负预旋角度下非定常性的减小程度小于正预旋角度下非定常性的减小程度.

2.2 时间平均流场分布

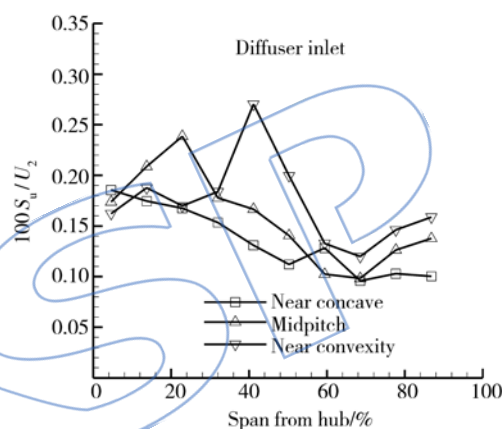
图7给出了进口导叶为正、负预旋 30° 时扩压器进出口无量纲速度的分布图,由图可见当进口导叶为正预旋 30° 时,离心压缩机的质量减小,扩压器进出口平面的速度减小;相反进口导叶为负预旋 30° 时,扩压器进出口平面的速度增大.同进口导叶为零预旋时相比,进口导叶存在预旋时,不但速度的大小发生改变,而且扩压器内速度的高速区也发生了迁移.当进口导叶从负预旋 30° 变化到正预旋 30° 时,扩压器进口平面处的高速区均靠近轮盘并向着凹面迁移,且在进口导叶为正预旋 30° 时,进口平面上在靠近凸面侧还存在另外一个较高的速度区域.在扩压器出口平面上,进口导叶为负预旋 30° 时的高速区位置同零预旋时大致相同,当预旋角度变为正预旋 30° 时,高速区向着凸面迁移.

2.3 频谱分析

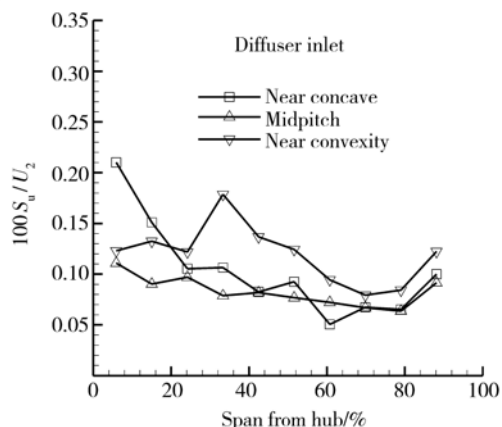
当进口导叶为零预旋时,扩压器进口平面能量谱密度最大值所对应的频率为叶轮叶片通过频率,为了研究进口导叶预旋角度对非定常流动基



(a) 进口导叶为零预旋



(b) 进口导叶为负预旋 30°



(c) 进口导叶为正预旋 30°

图5 不同预旋角度下扩压器进口平面的非定常度分布
Fig. 5 Unsteady intensity on diffuser inlet plane under different IGV prewhirl angles

本频率的影响,图8和图9给出了进口导叶为正、负预旋 30° 时扩压器进出口中间测点在 54.3% 叶高处频谱图.从图中可见,当进口导叶存在预旋角度时,扩压器内非定常流动的基本频率减小,在进口导叶为负预旋 30° 时,能量谱密度最大值所

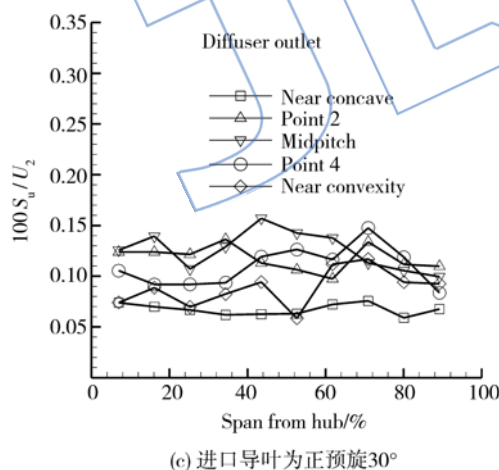
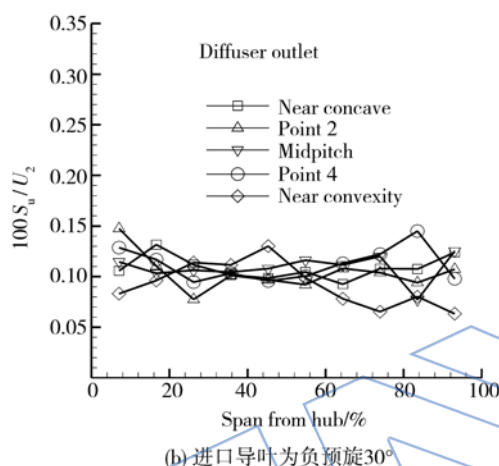
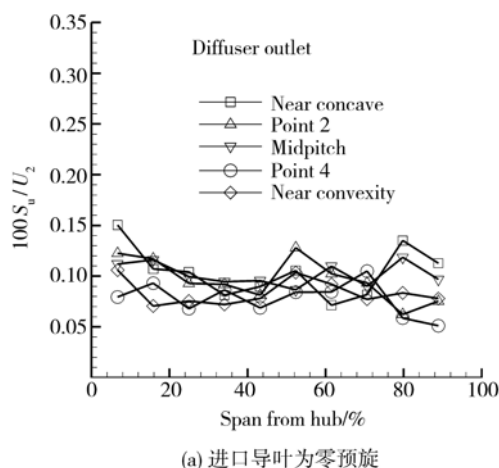


图6 不同预旋角度下扩压器出口平面的非定常度分布
Fig. 6 Unsteady intensity on diffuser outlet plane under different IGV prewhirl angles

对应的频率为 500 Hz, 此时叶轮叶片通过频率 1000 Hz 下的能量谱密度仅为 500 Hz 下的 1/3 左右, 非定常流动的基本频率为 500 Hz; 在扩压器出口平面上, 能量谱密度最大值所对应的频率仍然为 500 Hz, 此时可认为 500 Hz 是进口导叶为负

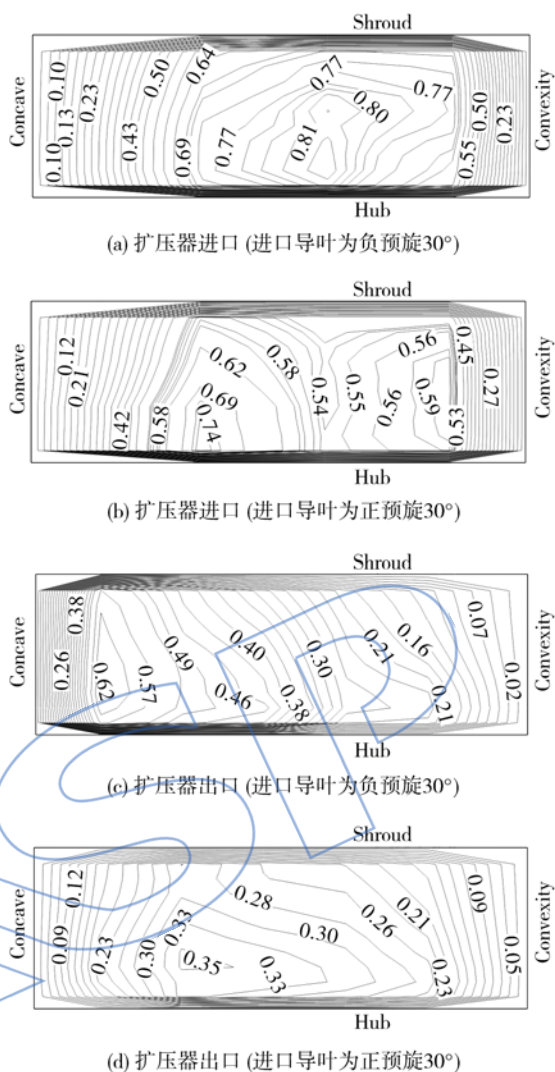


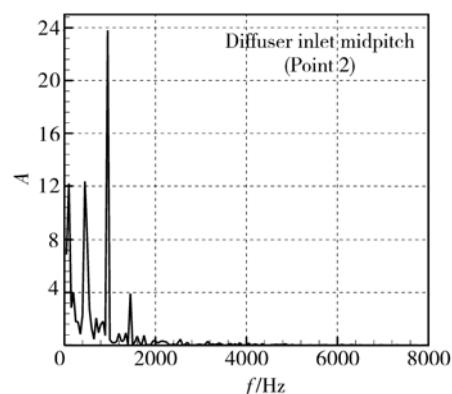
图7 进口导叶为正、负预旋 30°时扩压器进出口的无量纲速度分布

Fig. 7 Velocity distribution on diffuser inlet and outlet planes under different IGV prewhirl angles

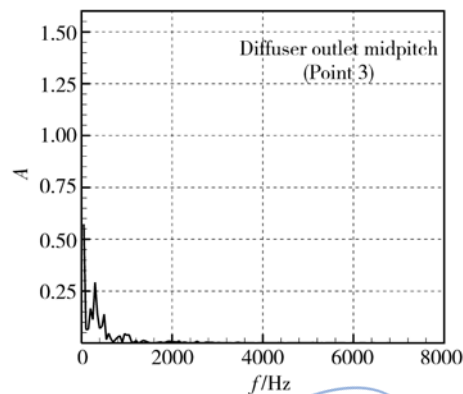
预旋 30°时影响扩压器内部非定常流动的基本频率. 当进口导叶为正预旋 30°时, 在扩压器进口平面上的主导频率仍然为 500 Hz, 而在扩压器出口平面上能量谱密度最大值对应的频率为 250 Hz, 此时其是非定常流动的基本频率. 当离心压缩机级仅包括离心叶轮和叶片扩压器时, 扩压器内部流动的主导频率在扩压器进口平面为叶轮的通过频率 1000 Hz, 此后朝着扩压器出口其流动的主导频率不断衰减^[3]. 这是由于在扩压器通道内, 叶轮的尾流沿流线方向不断衰减, 叶轮的非定常干扰不断减小, 使得流动的波动和能量谱密度最大时所对应的频率逐渐减小. 而进口导叶预旋存在

时,进口导叶预旋改变了叶轮进口的流动攻角,此时由于在进口导叶叶片后面出现旋涡,同时进口导叶尾流和叶轮尾流相互耦合影响着扩压器内部的流动,两者的双重作用使得该处流动的主导频

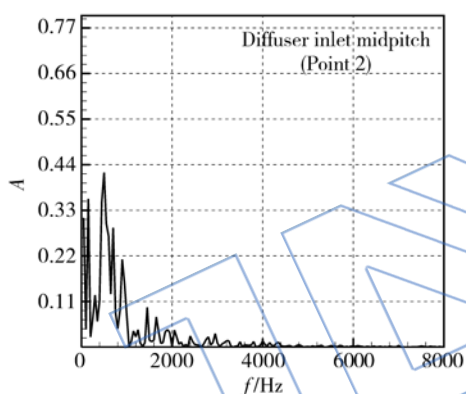
率发生变化.因而当进口导叶预旋存在时,扩压器内部的非定常流动以 $1/2$ 叶片通过频率为基频.由此可见,当进口导叶存在预旋角度时,扩压器内部的非定常流动的基本频率降低.



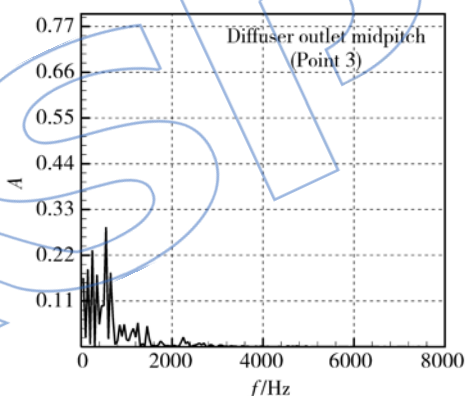
(a) 进口导叶为零预旋



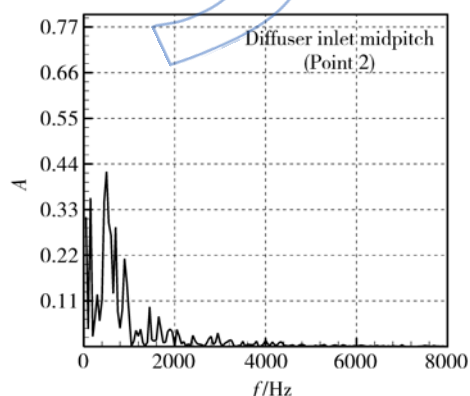
(a) 进口导叶为零预旋



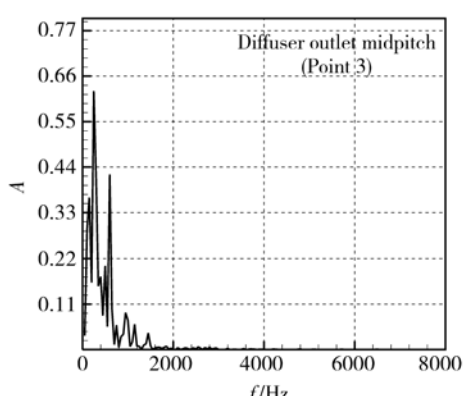
(b) 进口导叶为负预旋 30°



(b) 进口导叶为负预旋 30°



(c) 进口导叶为正预旋 30°



(c) 进口导叶为正预旋 30°

图8 不同预旋角度下扩压器进口平面中间测点在54.3%叶高处的频谱图

Fig.8 Spectrum distribution at the 54.3% span position of diffuser inlet plane under different IGV prewhirl angles

图9 不同预旋角度下扩压器出口平面中间测点在54.3%叶高处的频谱图

Fig.9 Spectrum distribution at the 54.3% span position of diffuser outlet plane under different IGV prewhirl angles

3 结 论

本文在不同的进口导叶预旋角度和方向下,采用热线风速仪对扩压器内部非定常流场进行了测量,研究了进口导叶预旋角度和方向对扩压器内部非定常流场的影响.在进口导叶出现预旋时,主要结论如下:

1) 扩压器内部大部分湍流强度均有所增加,但靠近凸面的测点在正预旋角度下湍流强度有所减小;

2) 扩压器内的非定常性受导叶尾流及大尺度涡团的非定常影响而减小,且负预旋角度下非定常性的减小程度小于正预旋角度下非定常性的减小程度;

3) 扩压器内部非定常流动的基本频率降低.

参考文献:

- [1] 初雷哲,杜建一,赵晓路,等.叶片倾角变化对扩压器中非定常流动的影响[J].工程热物理学报,2007,28(5):759-762.
CHU Leizhe, DU Jianyi, ZHAO Xiaolu, et al. The effect of different vane incline angle on the unsteady flow in vaned diffuser[J]. Journal of Engineering Thermalphysics, 2007, 28(5): 759-762. (in Chinese)
- [2] 张莉,王启杰,陈汉平.有叶扩压器入口区域非定常流动的实验测量[J].流体机械,2005,33(8):1-3,9.
ZHANG Li, WANG Qijie, CHEN Hanping. Experimental investigation of the unsteady flow in the inlet region of vaned diffuser via PIV[J]. Fluid Machinery, 2005, 33(8): 1-3, 9. (in Chinese)
- [3] 高丽敏,席光,周莉,等.级环境下叶片扩压器流场的实验与数值研究[J].力学学报,2005,37(1):110-119.
GAO Limin, XI Guang, ZHOU Li, et al. Experimental and computational investigation of flows in a vaned diffuser under stage environment[J]. Acta Mechanica Sinica, 2005, 37(1): 110-119. (in Chinese)
- [4] Pinarbasi A. Experimental hot-wire measures in a centrifugal compressor with vaned diffuser[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 1512-1526.
- [5] Marconcini M, Rubecchini F, Arnone A. Numerical analysis of the vaned diffuser of a transonic centrifugal compressor [R]. ASME Paper 2007-GT-27200, 2007.
- [6] Smirnov P E, Hansen T, Menter F R. Numerical simulation of turbulent flows in centrifugal compressor stages with different radial gaps [R]. ASME Paper 2007-GT-27376, 2007.
- [7] Chen Y N, Hagelstein D, Kassens I. Effect of decaying overshoot of the rankine vortex on the axial flow field behind the inlet guide vane of centrifugal compressors [R]. ASME Paper 2000-GT-427, 2000.
- [8] Cui M M. Effect of suction elbow and inlet guide vanes on flow field in a centrifugal compressor stage [R]. ASME Paper 2002-GT-30376, 2002.
- [9] Cui M M. Unsteady flow around suction elbow and inlet guide vanes in a centrifugal compressor stage [R]. ASME Paper 2004-GT-53273, 2004.
- [10] 周莉,席光,蔡元虎.进口导叶/叶轮/扩压器非定常相干的数值研究[J].西北工业大学学报,2007,25(5):625-629.
ZHOU Li, XI Guang, CAI Yuanhu. Numerical investigation of unsteady IGV-impeller-diffuser interaction in a centrifugal compressor [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(5): 625-629. (in Chinese)
- [11] ZHOU Li, XI Guang, CAI Yuanhu. Experimental study on the influence of diffuser and inlet guide vane for the performance of centrifugal compressor [J]. Experimental Techniques, 2008, 32(5): 26-33.
- [12] 周莉,席光,蔡元虎.导叶预旋角对叶轮/扩压器相干影响的数值研究[J].热能动力工程,2007,22(5):484-489.
ZHOU Li, XI Guang, CAI Yuanhu. Investigation of the influence of IGV prewhirl angle on the unsteady impeller-diffuser interaction [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(5): 484-489. (in Chinese)