

不同导叶预旋角下离心压缩机的时序效应

姜华^{1,2}, 席光¹, 宫武旗¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安科技大学能源学院, 710054, 西安)

摘要: 使用 X 热线热膜技术, 在设计流量下研究了 3 个不同进口导叶预旋角的时序效应对离心压缩机非定常流场的影响. 结果表明: 时序效应会影响离心压缩机叶轮出口和扩压器进口的流场, 该影响将随着叶轮出口的距离增加而减弱. 对应不同的进口导叶预旋角, 时序效应对离心压缩机非定常流场的影响有所不同. 对于不同的导叶时序位置, 进口导叶 0° 预旋角下集平均径向速度发生变化的流动区域范围最大, -20° 预旋角下的其次, 20° 预旋角下的最小. 不同的导叶时序位置的集平均绝对气流角在较大范围内存在差别, 其中 0° 预旋角下集平均绝对气流最大变化角为 1.6° , 20° 预旋角下的最大变化角为 0.9° , -20° 预旋角下的最大变化角为 1.2° . 不同导叶时序位置的扩压器进口时均绝对气流角在 0° 预旋角下相差 1.3° , 在 20° 预旋角下相差不足 0.5° , 在 -20° 预旋角下相差 0.84° .

关键词: 离心压缩机; 非定常; X 热膜; 预旋; 气流角

中图分类号: V211.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0120-05

Clocking Effect under Different Inlet Guide Vanes Prewhirl Angles in a Centrifugal Compressor

JIANG Hua^{1,2}, XI Guang¹, GONG Wuqi¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The stator clocking effect on the flow filed at three inlet guide vanes (IGV) prewhirl angles are experimentally investigated under design condition in a centrifugal compressor by X-type hot-wire/hot-film anemometry. The results show that stator clocking enables to changes the rotor discharge and the downstream stator inlet flow. The influence weakens when the distance from the rotor outlet increases. The magnitude of the clocking effect is different for different inlet guide vanes prewhirl angles. The flow range where the ensemble-averaged radial velocity changes at different stator clocking positions gets the widest under 0° prewhirl angle, next under -20° , then under 20° . The absolute flow angle changes evidently at different clocking positions. At different clocking positions, the maximum variations of unsteady absolute flow angles are respectively 1.6 , 0.9 and 1.2 degree under 0° , 20° and -20° prewhirl angles. The variations of time-average absolute flow angle at different clocking positions are respectively 1.3 , less than 0.5 and 0.84 degree under 0° , 20° and -20° prewhirl angles.

Keywords: centrifugal compressor; unsteady; X-type hot-wire/hot-film; prewhirl; flow angle

利用非定常效应进一步改善气动性能是叶轮机械气动设计体系从定常向非定常转变的主要研究内

容, 国内外众多研究也表明非定常效应蕴含着很大的潜力. 时序(clocking)效应是利用流动的非定常性

对流场的有益影响来改善叶轮机械的气动性能的。目前,轴流式压缩机的时序效应已通过实验和数值模拟的方式得以证实^[1-5],但离心压缩机的时序效应研究并不多见^[6]。

时序效应是进口导叶(IGV)尾流和下游叶片扩压器势流效应共同作用的结果,进口导叶预旋角的变化会使来流预旋条件和进口导叶的尾迹结构发生变化。

本文主要讨论不同进口导叶预旋角,即在不同的导叶尾迹结构下,时序效应对离心压缩机非定常流场的影响,明确不同来流条件对时序效应的影响。

1 实验方法

实验在 1.5 级低速离心压缩机实验台上进行,该压缩机由进口导叶、叶轮、叶片扩压器和蜗室组成。进口导叶有 15 个叶片,预旋角和周向位置可以调整。叶轮是三元半开式离心叶轮,直径为 796 mm,有 20 个后弯叶片,其中 10 个为分流叶片。扩压器有 13 个翼型叶片,扩压器叶片进口的安装角为 17°。实验台详细结构可参阅文献[7-8]。

在实验叶轮转速为 3100 r/min、流量系数 $\phi=0.185$ 的工况下,通过改变进口导叶周向位置(导叶时序位置),分别对进口导叶预旋角为 20°、0°和 -20°的 3 个导叶时序位置的非定常流场进行了测量。导叶时序位置定义为进口导叶相对于一个导叶栅距周向旋转的角度位置。非定常测量位置是在叶轮出口(扩压器叶片延长线处)和扩压器入口(距离扩压器叶片进口缘约 1/4 栅距处)2 个测量截面的 3 个叶高方向上,即 3 个轴向位置:10%(近轮盖侧)、50%(中间)和 90%(近轮盘侧)叶高。不同导叶时序位置的静叶排间相对周向位置如图 1 所示。

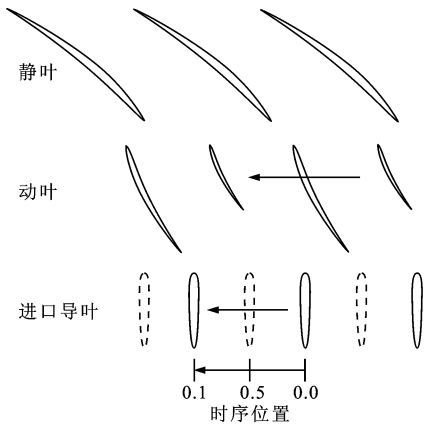


图 1 不同导叶时序位置的静叶排间相对周向位置

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,具体方法可参阅文献[9]。X 热膜速度和方向校准曲线如图 2 所示,其中 E 为电压, u_{cal} 和 α_{cal} 分别为校准速度和角度,热膜的响应频率为 120 kHz。

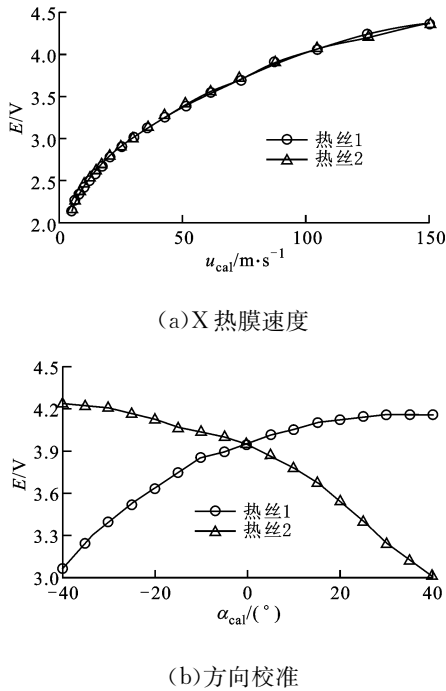


图 2 X 热膜速度和方向校准曲线

集平均定义为

$$\tilde{c}_i(t_i) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M c_{mi}(t_i) \tag{1}$$

式中: M 为集平均样本数(1 900); t_i 为采样时间,其对应不同的叶轮旋转位置。实验不确定性因素为:±1%的集平均速度;±0.6°的气流角。

2 不同进口导叶预旋角下时序效应对流场的影响

西安交通大学席光课题组^[10]在进口导叶预旋角分别为 20°、0°、-20°下,通过改变导叶 clocking 位置研究了时序效应对流场性能的影响,同时发现:时序效应会影响效率,即不同进口导叶预旋角、不同时序位置,效率变化有所不同,最高和最低效率对应的导叶时序位置有所不同。时序效应也会影响压力比,但影响得比较小。本文主要研究在一定设计流量、不同进口导叶预旋角下,离心压缩机时序效应对流场的影响。

2.1 对集平均速度的影响

图 3~图 5 给出了进口导叶预旋角在 0°、20°和

-20° 下,叶轮出口和扩压器进口在50%叶高上的集平均径向速度。图中: $\bar{c}_r$ 为径向集平均速度, u_2 为叶轮出口圆周速度; τ_{rotor} 为一个叶片通过了一个周期。从图中可以看出:叶轮出口的主流区与尾迹区的气流速度差值较大;在扩压器进口处,由于间隙区内气流速度不一,主流、尾迹区的气流速度值逐渐接近,二者间差值较小。主叶片主流区的径向速度小于分流叶片主流区的径向速度,主叶片尾迹区径向速度比分流叶片尾迹区径向速度小得很多,说明主叶片径向速度亏损较大。在分流叶片主流至主叶片主流的区域中,速度波动较为平缓,说明该通道内的径向速度分布较为均匀,径向速度分布的非定常性较小;在主叶片主流至分流叶片主流的区域中,速度波动很大,说明该通道内径向速度分布的非定常性很大。在叶轮出口到扩压器进口的间隙区内,主叶片尾迹的衰减要大于分流叶片尾迹的衰减。

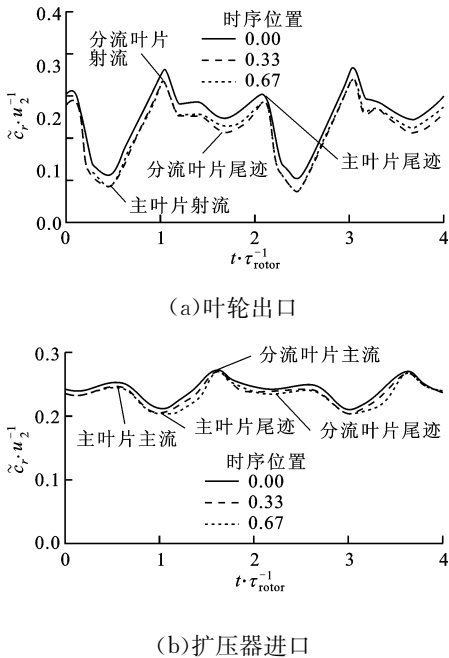


图3 进口导叶预旋角为 0° 、叶轮出口和扩压器进口为50%叶高的集平均速度

从图3可以看出,在预旋角为 0° 、进口导叶时序位置分别为0.67和0.33的情况下,集平均径向速度曲线差别很小。在时序位置为0.0下的径向速度大于时序位置为0.67和0.33的情况,并且整个流动周期内的径向速度变化均比较明显。在叶轮出口处(图3a),平均径向速度为 $0.20u_2$ 。在不同的时序位置,径向速度最大改变量出现在尾迹区附近,改变量超过径向平均速度的10%。在扩压器进口处(图3b),平均径向速度为 $0.25u_2$,时序位置为0.67的径向速度大于时序位置为0.0和0.33的情况。对应

不同时序位置,径向速度改变量超过平均径向速度的4%。

从图4可以看出,在预旋角为 20° 、进口导叶时序位置分别为0.0、0.33和0.67的情况下,集平均速度曲线差别很小。在叶轮出口处(图4a),分流叶片尾迹区附近的径向速度变化比较明显,其他区域3条曲线几乎重合。在扩压器进口处(图4b),主叶片主流区的径向速度变化比较明显。

从图5可以看出,在 -20° 预旋角、3个进口导叶时序位置下,集平均速度变化明显大于 20° 预旋

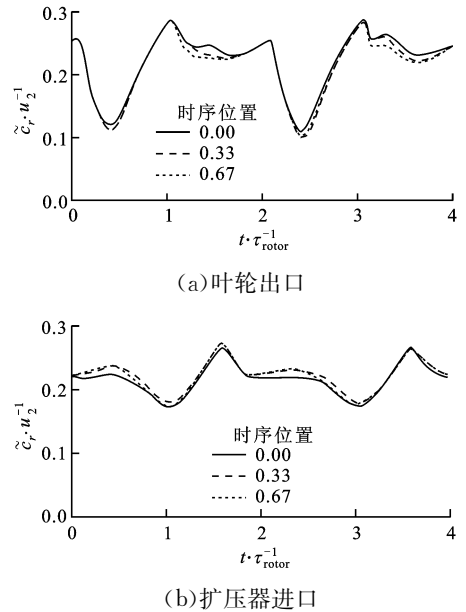


图4 进口导叶预旋角为 20° 、叶轮出口和扩压器进口为50%叶的高集平均速度

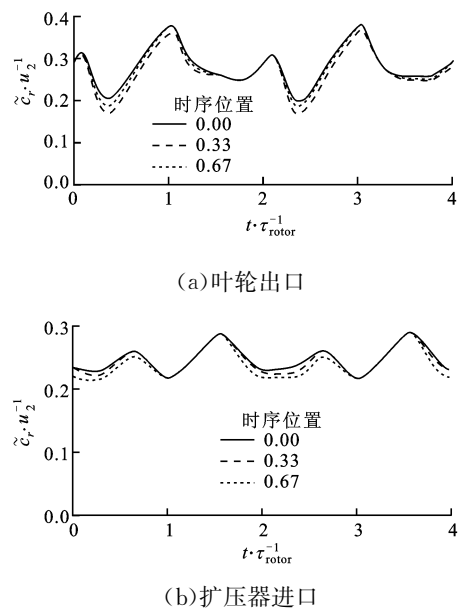


图5 进口导叶预旋角为 -20° 、叶轮出口和扩压器进口为50%叶的高集平均速度

角的情况. 在叶轮出口处(图 5a),主叶片尾迹区至分流叶片主流区的径向速度变化均比较明显,尤其在主叶片尾迹区,不同时序位置下的径向速度改变量超过平均径向速度的 10%. 在扩压器进口处(图 5b),分流叶片尾迹区至主叶片主流区的径向速度变化较为明显,不同时序位置下的径向速度改变量约为径向平均速度的 4%.

由上述分析可以看出,在 0°预旋角、不同时序位置下,进口导叶的集平均径向速度发生变化的流动区域范围最大,-20°预旋角下的其次,20°预旋角下的最小. 在 0°、-20°预旋角下,进口导叶 3 个时序位置的集平均径向速度变化的最大幅度基本相同,在 20°预旋角、不同时序位置下的集平均径向速度变化的最大幅度较小. 不同时序位置的集平均径向速度在叶轮出口处变化幅度明显大于扩压器进口处的情况,这表明时序效应随着离开叶轮出口距离的增加而减弱.

2.2 对集平均绝对气流角的影响

图 6 给出了各预旋角下的扩压器进口为 50% 叶高和导叶时序位置分别 0.0、0.33、0.67 的集平均绝对气流角,图中 $\bar{\alpha}$ 为集平均绝对气流角,从图中可以看到如下结果.

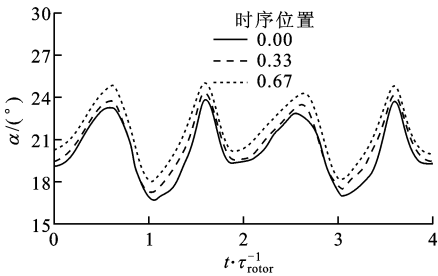
(1)0°预旋角、3 个导叶时序位置下的集平均绝对气流角在较大范围内存在着差别,其中主流区与叶片尾迹区的气流角相差 1.6°. 当导叶时序位置为 0.0 时,集平均绝对气流角最小,其次为导叶时序位置为 0.33 的情况,最大的为导叶时序位置为 0.67 的情况.

(2)在 20°预旋角下,集平均绝对气流角只在叶片主流区存在着差别. 当导叶时序位置为 0.33 和 0.67 时,对应的气流角较为接近,其相比导叶时序位置为 0.0 时的气流角大 0.9°.

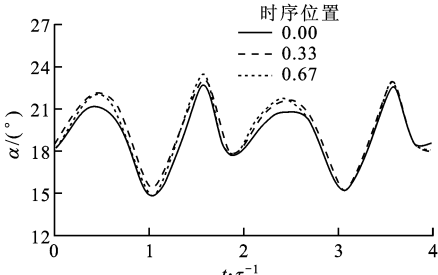
(3)在 -20°预旋角下,集平均绝对气流角在分流叶片尾迹区至主叶片主流区也存在着差别,分流叶片尾迹区和主叶片主流区在 3 个导叶时序位置的气流角相差 1.2°. 当导叶时序位置为 0.0 时,集平均绝对气流角最大,其次为导叶时序位置为 0.33 的情况,最小的为导叶时序位置为 0.67 的情况.

2.3 对时间平均绝对气流角的影响

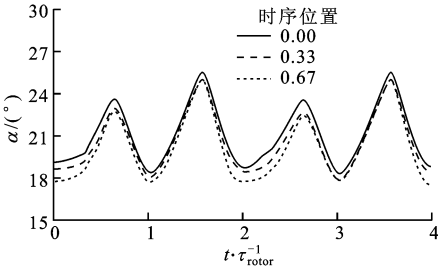
表 1 给出了扩压器进口在 3 个预旋角、不同导叶时序位置下的时均绝对气流角. 从表中可以看出: 0°预旋角、3 个导叶时序位置下的时均绝对气流角相差 1.3°,其中导叶时序位置为 0.0 和 0.33 的时均绝对气流角比较接近,而与导叶时序位置为 0.67 相



(a)0°预旋角



(b)20°预旋角



(c)-20°预旋角

图 6 扩压器进口在 50%叶高的集平均绝对气流角差较大;20°预旋角、3 个导叶时序位置下的时均绝对气流角相差不足 0.5°;-20°预旋角、3 个导叶时序位置下的时均绝对气流角相差 0.84°.

表 1 扩压器进口在不同导叶时序位置下的时均绝对气流角

导叶时序 位置	$\bar{\alpha} / (^{\circ})$		
	0°预旋角	20°预旋角	-20°预旋角
0.0	20.29	18.98	21.13
0.33	20.78	19.40	20.69
0.67	21.67	19.28	20.29

综上可见,在 0°预旋角、不同导叶时序位置下的时均气流角差别最大,-20°预旋角下的其次,20°预旋角下的最小. 这个结论可以与性能曲线对应^[11],即当进口导叶预旋角为 0°、导叶时序位置为 0.67 时,整个流动区域的效率最小,而导叶时序位置为 0.0 和 0.33 时,3 个预旋角下的效率比较接近. 用 X 热线热膜测量仪测量对应流量工况,结果是:0°预旋角、3 个导叶时序位置下的效率差别最

大,达2.2%; 20° 预旋角下,3个导叶时序位置效率几乎相同; -20° 预旋角下,导叶时序位置为0.0的效率比导叶时序位置为0.33和0.67的效率增加约1.4%,而导叶时序位置为0.33和0.67的效率基本相同.可见,在不同进口导叶预旋角下,时序效应对压缩机性能和流场的影响有所不同.

3 结 论

本文采用X热线热膜技术,研究了不同进口导叶预旋角下的时序效应对离心压缩机非定常流场的影响.结果发现,在不同进口导叶预旋角下,时序效应对离心压缩机非定常流场的影响有所不同,主要结论如下.

时序效应会影响离心压缩机叶轮出口和扩压器进口的流场,该影响将随叶轮出口的距离增加而减弱.

0° 预旋角、不同导叶时序位置下的集平均径向速度发生变化的流动区域范围最大, -20° 预旋角下的其次, 20° 预旋角下的最小.在 0° 、 -20° 预旋角下,3个导叶时序位置的集平均径向速度变化幅度很接近, 20° 预旋角、不同时序位置下的集平均径向速度变化幅度比较小.

3个导叶时序位置的集平均绝对气流角在较大范围内存在着差别,其中 0° 预旋角下的集平均绝对气流最大变化角为 1.6° , 20° 预旋角下的最大变化角为 0.9° , -20° 预旋角下的最大变化角为 1.2° .

在 20° 、 0° 、 -20° 预旋角和不同导叶时序位置下,扩压器入口的时均绝对气流角均有改变.在 0° 预旋角下,3个导叶时序位置的时均绝对气流角相差 1.3° , 20° 预旋角下的相差不足 0.5° , -20° 预旋角下的相差 0.84° .

总的来看,在 0° 预旋角下,时序效应对流场的影响最为明显,而在 20° 预旋角下,时序效应对流场的影响最小.

参考文献:

- [1] JOUINI D B M, LITTLE D, BANCALARI E, et al. Experimental investigation of airfoil wake clocking impacts on aerodynamic performance in a two stage turbine test rig [C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003. Atlanta, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2003:351-358.
- [2] BILLIARD N, PANIAGUA G, DENOS R. Impact of

clocking on the aero-thermodynamics of a second stator tested in a one and a half stage HP turbine [J]. Journal of Thermal Science, 2008,17(2):97-110.

- [3] BEHR T, KALFAS A I, ABHARI R S. Stator-clocking effects on the unsteady interaction of secondary flows in a 1.5-stage unshrouded turbine [J]. Journal of Power and Energy, 2007,221(6):779-792.
- [4] JIA Huixia, XI Guang, MULLER L, et al. Effect of clocking on the unsteady rotor blade loading in a low-speed axial compressor at design and off-design operating conditions [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2008,222(6):895-906.
- [5] 贾会霞. 低速轴流压缩机内静叶列时序效应的非定常影响研究 [D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2007.
- [6] 姜华, 席光, 张炜, 等. 离心压缩机静叶间时序效应的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2009,30(6):964-966.
JIANG Hua, XI Guang, ZHANG Wei, et al. Experimental investigation of stator clocking in a centrifugal compressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009,30(6):964-966.
- [7] ZHOU Li, XI Guang, CAI Y H. 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.
- [8] 席光, 周莉, 王志恒, 等. 进口导叶与叶片扩压器匹配的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2006,40(9):993-995.
XI Guang, ZHOU Li, WANG Zhiheng, et al. Experimental investigation to combination of simultaneous adjustment to inlet guide vanes and diffuser [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006,40(9):993-995.
- [9] INOUE M, CUMPSTY N A. Experimental study of centrifugal impeller discharge flow in vaneless and vaned diffusers [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984,106(4):455-467.
- [10] JIANG Hua, XI Guang, ZHANG Wei, et al. An experimental investigation on the clocking effect between inlet guide vanes and vaned diffuser in a centrifugal compressor [C]// 2008 Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Atlanta, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2008:67-74.

(编辑 苗凌 王焕雪)