

带分流叶片离心叶轮非定常流场的实验研究

姜华^{1,2}, 宫武旗¹, 张炜¹, 席光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 热膜传感器, 测量了带有分流叶片离心压缩机叶轮出口和扩压器进口 3 个叶高位置的流动, 分析了沿叶高方向主叶片和分流叶片对非定常流动的影响. 结果表明: 该叶轮中间叶高处主叶片和分流叶片对流动影响的差别最大, 叶轮出口主叶片尾迹区比分流叶片尾迹区的径向速度减小 62%, 切向速度增大 2%, 绝对气流角减小 8° 左右; 扩压器进口两区域流动差别有所减弱, 但仍较明显. 各叶高处非定常流动以主叶片或分流叶片一次叶片通过频率为基频, 基频和其二阶谐波的影响均较大, 高于二阶以上谐波的影响很小. 主叶片和分流叶片流动区域雷诺应力差别较大, 在叶轮出口中间叶高处最大雷诺应力相差超过 68%. 通过实验发现, 气流角沿叶高变化超过 10°, 表明二维叶片扩压器冲击分离等损失可能会较大, 有必要设计三维叶片扩压器.

关键词: 离心压缩机; 非定常; 径向间隙; 热膜

中图分类号: V211.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0014-05

Experimental Investigation of the Unsteady Discharge Flow in a Centrifugal Impeller with Splitter Blades

JIANG Hua^{1,2}, GONG Wuqi¹, ZHANG Wei¹, XI Guang¹

(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 discharged flow characteristic from an unshrouded centrifugal impeller with splitter blades is experimentally investigated. The effects of the main blade and the splitter blade on the unsteady flow quantities are analyzed. An X-type hot-film anemometry is used to measure the flow quantities at the impeller outlet and diffuser inlet in three spanwise positions. The result shows that the difference between the splitter and main blade effects on flow becomes most significant at the mid-span position. At the impeller outlet near the main blade wake region, the radial velocity reduces by 62%, the tangential velocity increases by 2%, and the absolute flow angle decreases by about 8 degrees, comparing with that near the splitter blade wake region. At the diffuser inlet, the difference between the splitter and the main blade wake regions is still visible though it has been weakened. The base frequency of the unsteady flow is a main blade or a splitter blade passing frequency. The base and second harmonics exert dominating effects on the unsteady flow. Reynolds stress levels in the discharged flow from the main blade are higher than that from the splitter blade. Especially in the mid-span region, the Reynolds stress difference reaches to 68%. The absolute outflow angle changes more than 10 degrees in the spanwise, which indicates that separating or rushing loss may be produced in the present two-dimensional vaned diffuser, so a three-dimensional vaned diffuser seems to become necessary.

Keywords: centrifugal compressor; unsteady; radial gap; hot-film

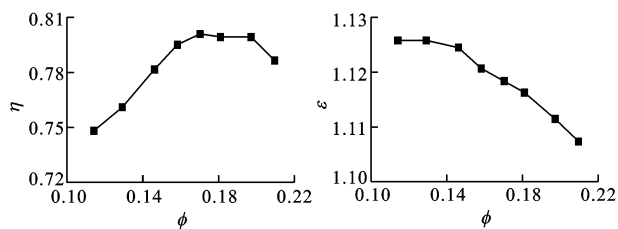
目前,已有学者利用热线对离心叶轮出口流动进行了一些实验研究,其中 Inoue 等人^[1]用单丝对离心叶轮出口二维流场进行测量,以研究扩压器对叶轮出口流场的影响,Pinarbasi^[2]采用热线研究了离心压缩机叶片扩压器内的三维流场,Gao^[3]利用热线研究了叶轮引起的非定常相干流动.但是,在这些实验研究中,均极少关注分流叶片对叶轮出口流场的影响,而由于分流叶片可以减小进口段的阻塞,提高叶轮出口的滑移系数,故在离心压缩机中得到了广泛采用.1992年,Miyamoto 等人^[4]使用五孔探针带分流叶片的离心叶轮内部流场进行了测量,得到了一些有益的结论;刘瑞韬等人^[5]对带分流叶片的高转速离心压气机进行了数值模拟,分析了分流叶片不同起始位置及不同周向位置对压气机内三维黏性流场及整级性能的影响.目前虽已开展了一些对分流叶片的研究,但大多采用数值模拟^[5-6],实验研究较少,而采用X热膜这种具有较高精度的测量仪器对非定常流场进行研究的则更少.通过对非定常量进行分析,可以更好地理解分流叶片对叶轮出口非定常流动的影响,从而为改善叶轮出口流场,创造良好的扩压器进口条件,提高压缩机整体性能提供设计依据.为此,本文使用X热膜对叶轮出口非定常流动进行研究,并得到了一些有价值的实验结果.

1 实验台和实验方法

实验是在西安交通大学流体机械国家专业实验室的“离心式压缩机动静相干非定常流及其激振实验装置”上进行的.实验台为一开式的1.5级低速离心压缩机,其主要结构可参阅文献[7-8].压缩机由进口导叶、叶轮、叶片扩压器和蜗室组成.叶轮是一个典型的三元半开式离心叶轮,有20个后弯叶片,其中10个为分流叶片,直径为796 mm.扩压器有13个翼型叶片,扩压器叶片的进口安装角为17°.进口导叶有15个叶片,从进口导叶来的空气轴向进入叶轮.分流叶片长度为主叶片的2/3,实验叶轮转速为3 100 r/min,流量为2.6 m³/s.

图1给出了该实验台的总体性能曲线,其中动态测量是在流量系数 $\phi=0.185$ 的工况下进行的.

非定常测量选择了位于叶轮出口(测点1)和扩压器进口(测点2)的两个径向位置.选择测点1来观察叶轮出口的流动变化情况,选择测点2来观察扩压器进口的流动变化情况.探针在这两个位置的3个叶高方向进行了相应的测量,即3个轴向位置:



(a)效率 η 随 ϕ 的变化

(b)压比 ϵ 随 ϕ 的变化

图1 实验台总体性能曲线

10%、50%和90%叶高处.

采用锁相采样-集平均技术^[1,9]对热膜测量的瞬时信号进行处理,集平均量平均了2 400个点的1 900个记录,相应于2 400个叶轮位置.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 集平均速度和功率谱密度分布

图2为测点1的不同叶高处随时间变化(用一个叶片的通过周期归一化时间坐标,即 t/t_{rotor})的归一化集平均速度(径向 $\tilde{c}_r/u_2$ 、切向 $\tilde{c}_\theta/u_2$ 和绝对 $\tilde{c}/u_2$)和相应的功率谱图,可以看出沿着叶高方向,从轮盖到轮盘,各集平均速度分量逐渐降低,近盖侧和中间叶高处各集平均速度分量比较接近,近盘侧各集平均速度分量比近盖侧和中间叶高处降低幅度较大,并在分流叶片通过区出现回流.这是由于为提高近盖侧叶轮做功能力,实验叶轮采用了特殊的设计,使得近盖侧速度获得较大提高,做功能力明显增强,但同时却造成近盘侧流动变差.

叶轮的20个叶片中有10个为分流叶片,则不分主叶片和分流叶片时一次叶片通过频率 $f_1=1\,033$ Hz,区分主叶片和分流叶片时一次叶片通过频率 $f_2=507$ Hz.从各速度分量的功率谱图中,可以看出非定常流动以 f_2 为基频(一阶谐波),基频和其二阶谐波 f_1 的影响均较大,高于二阶以上谐波的影响很小.

在叶轮出口10%叶高处,二阶谐波 f_1 所产生的影响最大,基频 f_2 和其他更高阶谐波的影响对流动影响不大;在50%叶高处,二阶谐波 f_1 所产生的影响仍然最大,此时基频 f_2 对流动的影响变大,不能忽略;在90%叶高处,基频 f_2 所产生的影响较大,其高阶谐波所产生的影响很小.可见,在轮盖处主叶片和分流叶片对流动影响差别不大,中间叶高

处主叶片和分流叶片对流动影响差别已经增大,到90%叶高处,分流叶片流动区相对平稳.从轮盖到轮盘,周期性的非定常强度逐渐减小.

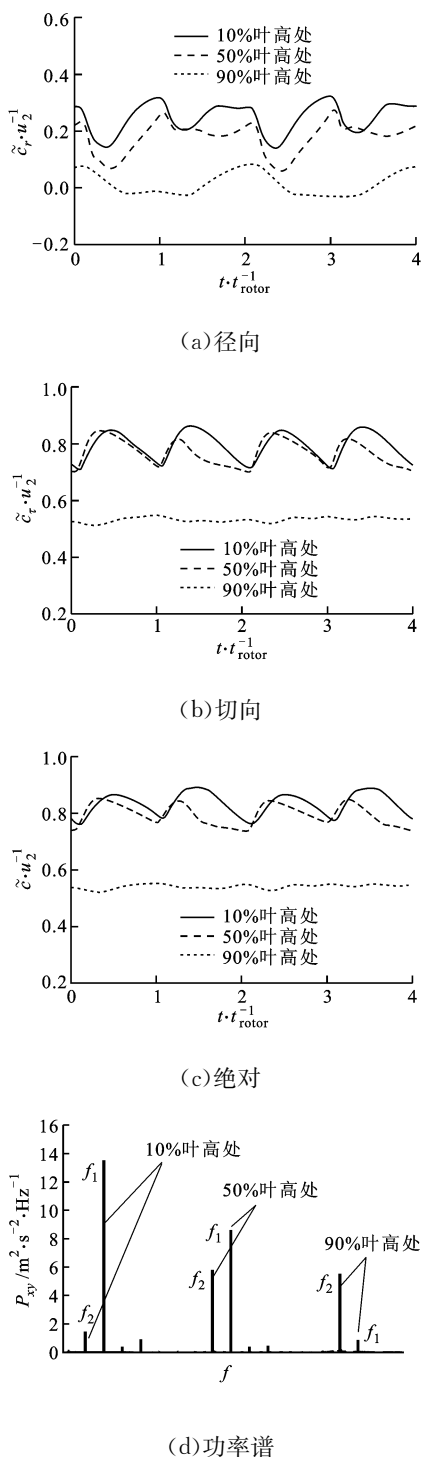


图2 测点1处不同叶高的集平均速度和功率谱图

图3为测点2的不同叶高处集平均速度和相应的功率谱图,可以看出集平均速度沿叶高的分布规律与叶轮出口处基本相同,并且基频 f_2 和其二阶谐波 f_1 的影响仍然都较大,高于二阶以上的谐波影响

仍然很小.与叶轮出口相比,扩压器进口功率谱密度明显降低,叶轮旋转周期性对流动的影响依然存在,但强度已经减弱.从图3还可以看出:在10%叶高处,二阶谐波 f_1 所产生的影响仍然最大;在50%叶高处,基频 f_2 所产生的影响变为最大,此时二阶谐波 f_1 对流动的影响相对变小,但不能忽略;在90%叶高处,基频 f_2 所产生的影响仍然可见,而其各高阶谐波的影响已可忽略.

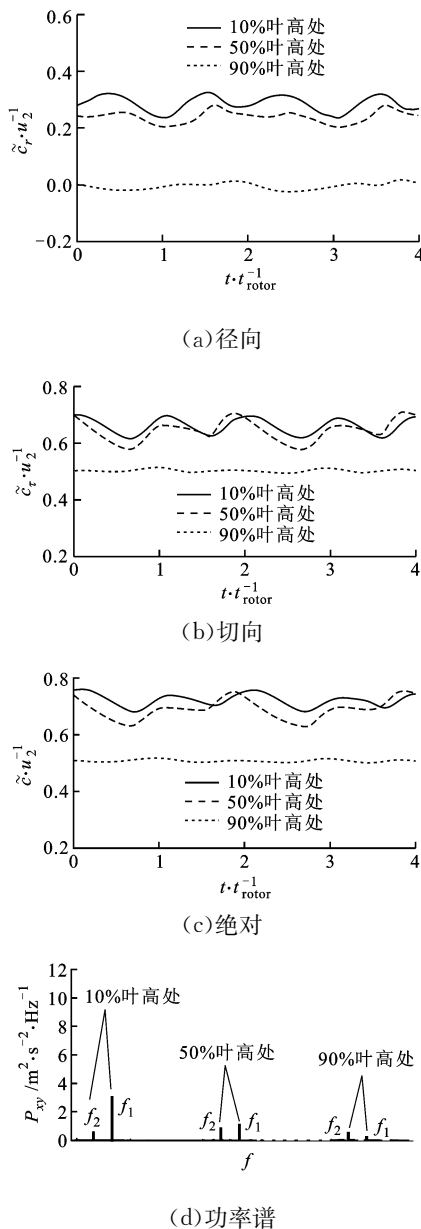


图3 测点2处不同叶高的集平均速度和功率谱图

在叶轮中间叶高处,主叶片和分流叶片对流动影响的差别最大,近盖侧和近盘侧相对较小.中间叶高处叶轮出口主叶片尾迹区比分流叶片尾迹区的径向速度减小62%,切向速度增大2%;在扩压器进口

两者差别有所减弱,但仍较明显,主叶片尾迹区比分流叶片尾迹区的径向速度小 17%,切向速度小 4%。从叶轮出口到扩压器进口,由于径向间隙区流动的参混,以及扩压器势反冲现象的作用,使得叶片尾迹离开叶轮出口后逐渐衰减,到扩压器进口处流动更趋向于均匀,但流动仍有非定常性的特征。

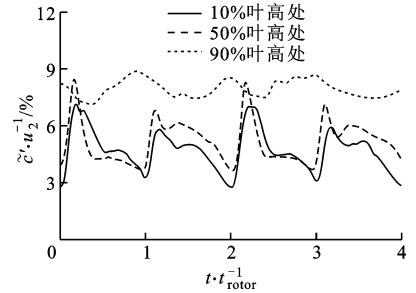
2.2 湍流强度和雷诺应力分布

图 4 给出了测点 1 和测点 2 处不同叶高的归一化湍流强度 $\tilde{c}'/u_2$ 和雷诺应力 $\widetilde{c'_c c'_\tau}/u_2^2$ 。在 10% 和 50% 叶高处,较高的湍流强度均出现在叶片尾迹区偏向压力侧,主叶片区大于分流叶片区,90% 叶高处

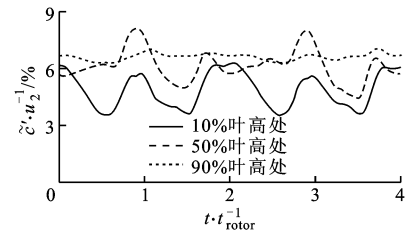
则相反。主叶片区和分流叶片区雷诺应力差别较大,在叶轮出口,近盖侧最大雷诺应力差别达到了 42%,中间叶高处差别达到了 68%,近盘侧达到了 15% 以上,到扩压器进口这种差别依然明显,但幅度降低了。

2.3 集平均绝对流动角分布

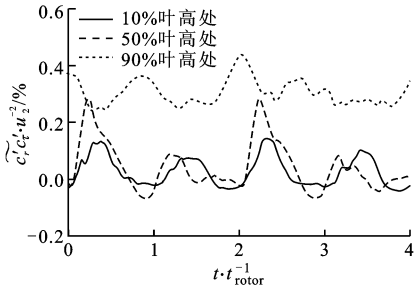
图 5 给出了不同叶高处集平均绝对流动角 $\tilde{\alpha}$ (定义为流动方向与圆周切向夹角)分布,可以看出在叶片尾迹和主流区,绝对流动角改变显著,随叶轮旋转位置的不同周期性改变,这种周期性绝对流动角波动的幅值在各叶高处基本相当。沿叶高方向,从轮盖到轮盘流动角减小,而在 90% 叶高处(近盘侧)绝对流动角极大地减小,因而此处扩压器进口流动严重恶化。主叶片尾迹区流动角比分流叶片尾迹区流动角小,主叶片主流区流动角也小于分流叶片主流区流动角。叶轮出口主叶片和分流叶片流动区域绝对流动角差别较大,在中间叶高处叶片尾迹区相差最大,达到 8° 以上,到扩压器进口两者已经比较接近,相差 2° 左右。气流角沿叶高变化剧烈,表明二维叶片扩压器冲击分离等损失均会较大,缺陷明显,有必要设计三维叶片扩压器。



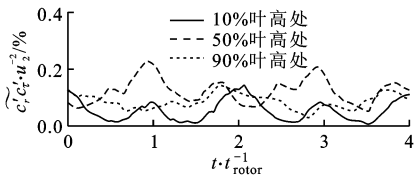
(a)测点 1 湍流强度



(b)测点 2 湍流强度

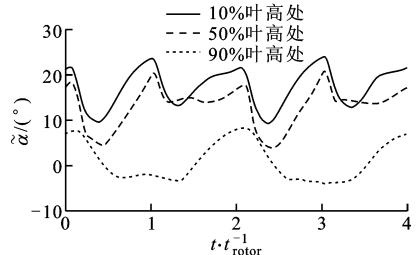


(c)测点 1 雷诺应力

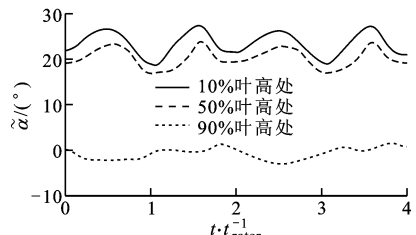


(d)测点 2 雷诺应力

图 4 不同叶高处的湍流强度和雷诺应力



(a)测点 1



(b)测点 2

图 5 不同叶高处集平均绝对流动角分布

3 结 论

本文使用 X 热膜对叶轮出口和扩压器进口不同叶高处的非定常流动进行了测量,研究得到以下结论。

(1)由于叶轮设计中考虑了叶顶间隙泄露的影

响,大大提高了叶轮叶顶的做功能力,实验表明设计方法合理。

(2)非定常流动以主叶片或分流叶片一次叶片通过频率为基频,基频和其二阶谐波的影响均较大,高于二阶以上谐波的影响很小。

(3)中间叶高处主叶片和分流叶片对非定常流动影响的差别最大,叶轮出口主叶片尾迹区比分流叶片尾迹区的径向速度约减小62%,切向速度增大2%;在扩压器进口两者差别有所减弱,主叶片尾迹区比分流叶片尾迹区的径向速度减小17%,切向速度减小4%左右。

(4)主叶片和分流叶片流动区域雷诺应力差别较大,叶轮出口中间叶高处最大雷诺剪应力差别达到了68%。

(5)叶轮出口主叶片和分流叶片流动区域绝对流动角差别较大,在中间叶高处叶片尾迹区相差最大,达到 8° 以上,到扩压器进口两者已比较接近,相差 2° 左右。

(6)气流角沿叶高变化剧烈,超过 10° ,表明二维叶片扩压器冲击分离等损失可能均会较大,有必要设计三维叶片扩压器。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] PINARBASI A. Experimental hot-wire measures in a centrifugal compressor with vaned diffuser[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29: 1512-1526.
- [3] GAO L M, XI G, ZHOU L, et al. Experimental and computational investigation of a centrifugal compressor

stage[J]. Journal of Power and Energy, 2005, 219(1): 25-33.

- [4] MIYAMOTO H, NAKASHIMA Y. Effects of splitter blades on the flows and characteristics in centrifugal impeller[J]. JSME International Series; II, 1992, 35(2): 238-246.
- [5] 刘瑞韬, 徐忠. 叶片数及分流叶片位置对压气机性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 223-225. LIU Ruitao, XU Zhong. Effect of blade number and splitter blade position on the performance characteristic of the compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2): 223-225.
- [6] 王宝潼, 张楚华, 席光, 等. 串联叶片式离心叶轮内流场的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(11): 1275-1283. WANG Baotong, ZHANG Chuhua, XI Guang, et al. Numerical study on internal flows in centrifugal tandem-blade impeller[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(11): 1275-1283.
- [7] ZHOU L, XI G, 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] 周莉. 离心压缩机级内动/静相干非定常流动的数值与实验研究[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2006. (编辑 荆树蓉)

【本刊相关文献链接】

射流式漩涡发生器对离心叶轮性能的影响. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 123-128.

离心叶轮几何形变对气动性能的影响. 西安交通大学学报, 2009, 43(5): 46-50.

轮盖开孔的离心风机流场研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1117-1121.

离心叶轮的速度系数对级性能的影响. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 807-810.

离心压缩机级间加气的出口流场特性. 西安交通大学学报, 2008, 42(3): 273-276.