

文章编号: 1000-8055(2010)09-2091-06

# 低比转速泵叶轮流道内部流动的 PIV 试验

邵春雷, 顾伯勤, 黄星路, 周剑锋  
(南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 210009)

**摘 要:** 介绍了粒子图像测速仪(PIV)、泵试验装置和试验方案. 采用 PIV 技术, 对 3 种流量下叶轮流道内部 3 个不同测量平面上的流动进行了试验研究, 获得了速度矢量分布. 探讨了速度分布沿叶轮周向和轴向的变化规律以及流量对速度分布的影响. 结果表明, 随着流量的减小, 吸力面速度略有减小, 压力面速度变化较为明显, 当流量达到额定流量的 0.6 倍时, 在压力面附近存在回流现象; 在叶轮出口处, 流量对相对速度方向没有明显影响; 叶轮流道内部速度沿轴向分布均匀, 绝对速度沿半径方向呈增加趋势, 无量纲绝对速度的周向分量  $v_u/v$  从压力面到吸力面呈下降趋势, 且随流量的减小而增大. 研究结果为叶轮设计以及离心泵内部流动的试验研究提供了借鉴.

**关 键 词:** 叶轮; 粒子图像测速仪; 内部流动; 离心泵; 低比转速

中图分类号: O35; TH 311

文献标识码: A

## Experimental study on flow in the impeller of low specific speed pump using particle image velocimetry

SHAO Chunlei, GU Boqin, HUANG Xinglu, ZHOU Jianfeng

(College of Mechanical and Power Engineering,  
Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Particle image velocimetry (PIV) system, pump experimental facility and test scheme were introduced. An experimental investigation of flow in the impeller was conducted at three different flow rates on three measurement planes by means of PIV. The velocity vector distribution was obtained. The velocity distribution in circumferential and axial directions and the influence of flow rate on the distribution were investigated. The results indicate that, the velocity near the suction surface decreases slightly, and that near the pressure surface changes dramatically with decreasing flow rate. The fluid flows back near the pressure surface when the flow rate reaches 0.6 $Q_d$ . At the outlet of impeller, the flow rate has no significant influence on the direction of relative velocity. The velocity in the impeller passage distributes homogeneously in axial direction. The absolute velocity shows an increasing trend in radial direction. The circumferential component of nondimensional absolute velocity decreases from the pressure surface to the suction surface, and also increases with the decline of flow rate. The results provide valuable information for the design of impeller and experimental study on flow in the centrifugal pump.

**Key words:** impeller; particle image velocimetry (PIV); internal flow;  
centrifugal pump; low specific speed

收稿日期: 2009-08-23; 修订日期: 2010-01-11

基金项目: 南京工业大学青年教师学术基金(39702008); 中国石油化工集团公司科技开发项目(309007)

作者简介: 邵春雷(1981-), 男, 江苏通州人, 讲师, 博士, 主要从事流体测控技术和流体机械研究.

叶轮是离心泵中主要的过流和做功部件,其内部流动复杂,水力损失较吸水室和压水室内的水力损失大,叶轮的结构对泵的扬程、流量、效率和抗汽蚀性能等均有重要影响。叶轮结构设计及叶片空间形状的确定是设计过程中的重要环节,优化叶轮的设计需要对叶轮内部流动进行研究<sup>[1]</sup>。近年来,随着计算流体动力学和计算机技术的发展,对叶轮内部流动进行数值模拟的研究较多<sup>[2-5]</sup>,受试验条件的限制,对低比转速泵叶轮内部流动尤其是直径较大的叶轮内部流动进行测量的研究还很少。文献[6-8]为研究泵内部流动测量提供了有价值的参考,但所设计的模型泵与真实泵在结构上存在较大偏差,测试结果并不能完全反应泵内流动的实际情况。

本文研究低比转速泵叶轮流道内部流动的测试方法,采用粒子图像测速仪( particle image velocimetry, 简称 PIV )<sup>[9]</sup>, 对不同流量下叶轮流道内部流场进行测量, 分析内部流动现象和演化规律, 为叶轮设计理论和方法的改进以及离心泵内流动的试验研究提供借鉴。

1 试验装置

1.1 PIV 系统

PIV 的基本工作原理如图 1 所示。在流场中撒布合适的示踪粒子, 用脉冲激光片光源照射所测流场区域, 通过同步控制器保证激光器和电荷耦合相机同步工作, 将计算机采集的两次曝光的 PIV 图像用互相关的方法进行处理, 获得每一查询区中粒子图像的平均位移, 由此确定流场的速度。

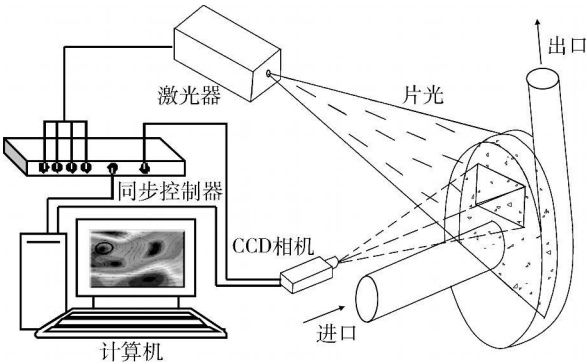


图 1 PIV 测量系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of PIV measurement

本文使用的 PIV 系统主要硬件为 Solo200XT 型双脉冲式激光器、分辨率为 1600 pixel×1200 pixel 的 ES2001 型互相关 CCD ( charge cou

pled device), SM-SYNC10 型同步控制器。使用的 MicroVec V2.0 软件集成了实时粒子图像测速计算、粒子跟踪测速计算、浓度场分析和粒径分析等功能模块<sup>[10]</sup>。试验所用的示踪粒子采用了平均直径为 10 μm 的轻质 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 该粒子的比表面积较大且密度较小, 具有良好的散射性与跟随性, 能比较真实地反映叶轮流道内部的流场。PIV 系统的测量精度为 0.1%<sup>[11]</sup>。

1.2 试验模型

试验模型为一设计流量  $Q_d=25\text{ m}^3/\text{h}$ , 扬程  $H_d=32\text{ m}$ , 转速  $n_d=1450\text{ r/min}$  的低比转速模型泵(图 2)。该模型泵由 IS80-50-315 型离心式清水泵改形设计而成。模型泵采用矩形蜗壳、圆柱形叶片、半开式叶轮结构。吸水室和蜗壳为有机玻璃制成, 其余为不锈钢。模型泵的主要尺寸列于表 1。

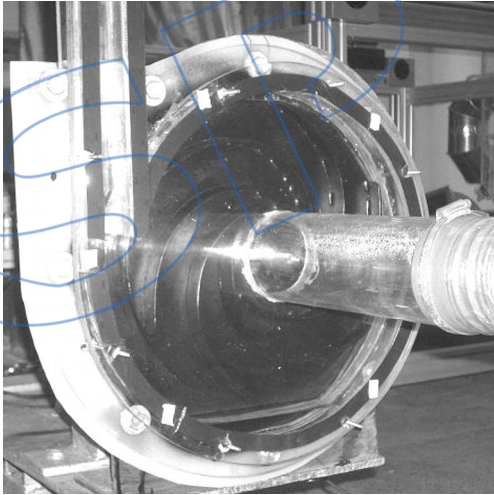


图 2 模型泵

Fig. 2 Model pump

表 1 模型泵主要尺寸

Table 1 Main dimensions of the model pump

| 参数                             | 数值  | 参数                                | 数值  |
|--------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 泵进口直径 $D_{in}/\text{mm}$       | 80  | 进口安放角 $\beta_1/(\text{^\circ})$   | 27  |
| 泵出口直径 $D_{out}/\text{mm}$      | 50  | 出口安放角 $\beta_2/(\text{^\circ})$   | 35  |
| 叶片进口直径 $D_1/\text{mm}$         | 80  | 叶片厚度 $t_b/\text{mm}$              | 5   |
| 叶片出口直径 $D_2/\text{mm}$         | 315 | 叶片长度 $l/\text{mm}$                | 218 |
| 叶片进口宽度 $b_1/\text{mm}$         | 20  | 蜗室基圆直径 $D_3/\text{mm}$            | 324 |
| 叶片出口宽度 $b_2/\text{mm}$         | 20  | 叶片数 $Z$                           | 6   |
| 叶片包角 $\varphi/(\text{^\circ})$ | 120 | 蜗舌安放角 $\varphi_0/(\text{^\circ})$ | 10  |

由于需要兼顾拍摄性能, 以及受有机玻璃加工性能的限制, 模型泵在某些结构上作了必要的简化, 例如: 液体从吸水室进入叶轮的弯曲半径比

真实泵小, 压水室截面采用了水力性能较梯形截面差的矩形截面等, 所以模型泵的水力性能不如真实泵, 但能满足研究要求<sup>[12]</sup>; 而且叶轮和压水室的大部分区域, 吸水室的整个区域都可以进行 PIV 拍摄, 可测量的区域广. 该结构比文献[6-8]中模型泵的结构更为合理.

2 试验方案

2.1 光路布置

由于叶片为不锈钢制成, 不能透光, 每次只能对单个叶轮流道进行拍摄. 图 3 显示的是测量某一叶轮流道内流动时所能拍摄的范围. 图中  $L$  代表激光光源, 线段  $LA$  和  $LD$  的夹角  $\gamma$  为片光的发散角. 要使拍摄区域达到最大, 必须满足片光外缘  $LD$  与叶片吸力面弧线  $CD$  在  $D$  点相切. 此时, 光线  $LC$  与叶片压力面相切于  $B$  点, 曲线  $ABC$  后方为阴影区. 单个叶轮流道内最大可拍摄范围为曲线  $ABCD$  所包围的区域.

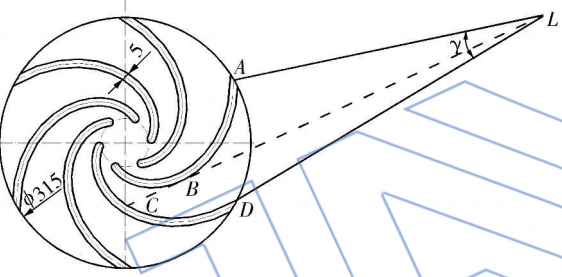


图 3 可拍摄范围(单位: mm)  
Fig. 3 Covering power (unit: mm)

在外同步模式下, 将叶片-蜗舌夹角锁定为  $30^\circ$ , 按照图 1 和图 3 布置模型泵、激光片光和 CCD 相机, 对远离蜗舌的叶轮流道内部流动进行 PIV 测量. 激光片光从蜗壳的侧面射入泵内, 相机垂直于片光从蜗壳正面进行拍摄, 距离测量平面  $0.7\text{ m}$  左右, 拍摄区域的大小约为  $170\text{ mm} \times 130\text{ mm}$ , 基本可覆盖 1 个叶轮流道.

2.2 参数确定及数据处理

试验转速  $n$  为  $1200\text{ r/min}$ . 试验流量  $Q$  为  $0.6Q_d$ ,  $0.8Q_d$  和  $Q_d$ . 片光厚度为  $0.5\sim 1\text{ mm}$ , 片光平面到轮盘的距离  $b$  分别为  $0.1b_2$ ,  $0.5b_2$  和  $0.9b_2$ . 双脉冲激光器设置为外同步工作模式, 采用锁相技术, 由安装在轴上的霍尔传感器产生触发信号, 保证在相同的叶轮蜗壳相对位置下采集图像, 外部分频设置为 5, 即轴每转 5 圈触发一次, 跨帧延时  $40\mu\text{s}$ . CCD 设置为 PIV 工作模式, 一次触发连续采集两幅图像, 各试验工况下采集

100 幅图像.  
采用 MicroVec V 2.0 软件对相关的两幅图像进行处理, 得到一组数据, 各试验工况下的 100 幅瞬时图像可计算出 50 组瞬时流场数据, 将数据作平均处理得到时均速度, 再采用自编程序将得到的绝对速度转换为相对速度.

3 试验结果分析

3.1 流量对速度分布的影响

在  $0.6Q_d$ ,  $0.8Q_d$  和  $Q_d$  三种流量工况下, PIV 测量得到的叶轮中截面上 ( $b=0.5b_2$ ) 的绝对速度场如图 4 所示. 直线  $AE$  上方叶轮流道的部分区

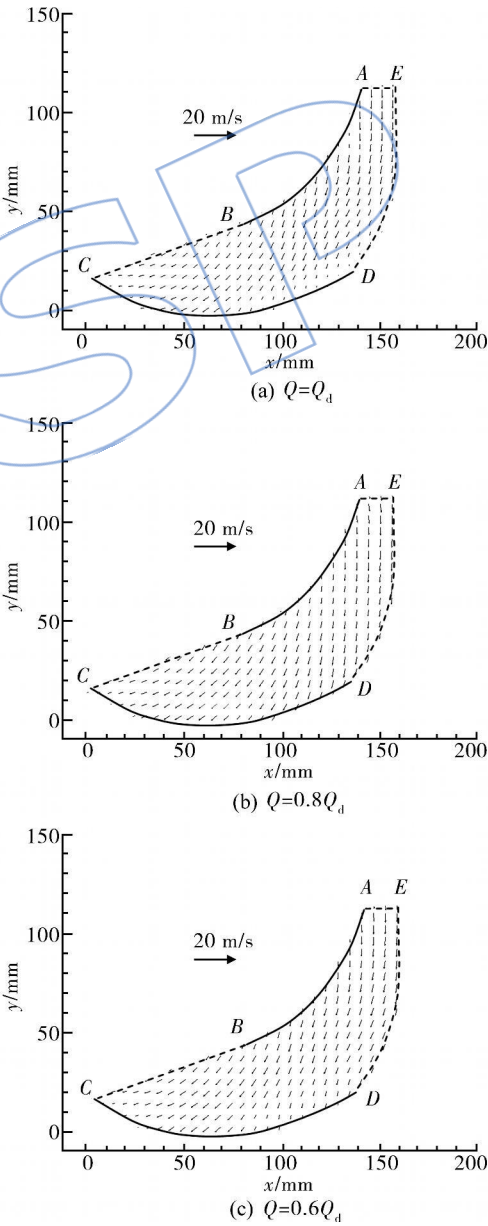


图 4 叶轮流道内部绝对速度变化  
Fig. 4 Evolution of absolute velocity in the impeller passage

域不在拍摄范围之内. 曲线 DE 右侧为压水室, 由于压水室壁面反光及背景光过亮, 该区域显示的速度矢量误差较大. 图中 ABCDE 所围区域外的无效矢量已删除.

由图 4 中速度分布可以看出, 绝对速度的方向与叶轮旋转方向基本一致, 近似垂直于叶轮径向, 在叶轮内沿径向逐渐增加. 流量的改变对绝对速度的变化并无明显的影响, 表明叶轮内部流体的周向速度分量较大, 流体很大程度上跟随叶轮作旋转运动.

3 种流量工况下的相对速度分布如图 5 所示. 图 5(a) 为设计流量工况下的叶轮流道内部相对速度矢量分布. 由图可见, 叶片吸力面附近相对流速比压力面附近相对流速高, 最高流速位于吸力面, 约为  $7.5 \text{ m/s}$ . 随着半径增大, 吸力面相对流速逐渐减小. 从吸力面到压力面相对流速单调下降, 符合有势流动理论假定.

对比不同流量工况下的相对速度分布可以发现, 流量对叶轮出口处的相对速度方向没有明显影响, 流体基本上沿出口边的切线方向甩出, 与叶轮旋转方向相反, 该现象与文献[13]中的描述一致. 随着流量的减小, 吸力面速度略有减小, 压力面速度变化较为明显, 当流量为  $0.6Q_d$  时, 吸力面附近速度约为  $6 \text{ m/s}$ , 在压力面附近出现了回流现象. 在叶轮出口处, 靠近吸力面侧(即图中 D 点上方)的相对速度大于压力面侧(即图中 E 点下方)的相对速度. 采用 Fluent 软件对小流量工况下叶轮内部的流动情况进行模拟, 结果如图 6 所示, 与图 5(c) 对比可以发现, 两者基本吻合. 出现上述现象的原因为, 受科氏力的作用, 叶轮流道中存在一旋转方向与叶轮旋转方向相反的旋涡运动, 流道中流体的相对运动可以近似认为是旋涡运动和流经不动叶轮的贯流两者之叠加, 所以吸力面附近相对流速比压力面附近相对流速高; 流量减小时, 贯流的流速减小, 在压力面附近当贯流的流速小于旋涡运动的流速时, 便出现回流现象. 由于流体的黏性作用, 实际流动情况比无黏流模型分析的结果来得复杂.

### 3.2 速度分布沿周向和轴向的变化

因 CCD 相机取景范围有限, 未拍摄到叶片出口尾部压力面附近的流场, 拍摄的区域约为  $r = 0.4r_2 \sim 0.9r_2$ . 取两叶片间叶轮径向  $r = 0.9r_2$  位置处的速度进行分析, 得到该处无量纲绝对速度的周向分量  $v_u/v$  分布如图 7 所示. 3 幅图分别对应轮盘至轮盖间的 3 个测量平面, 它们到轮盘的

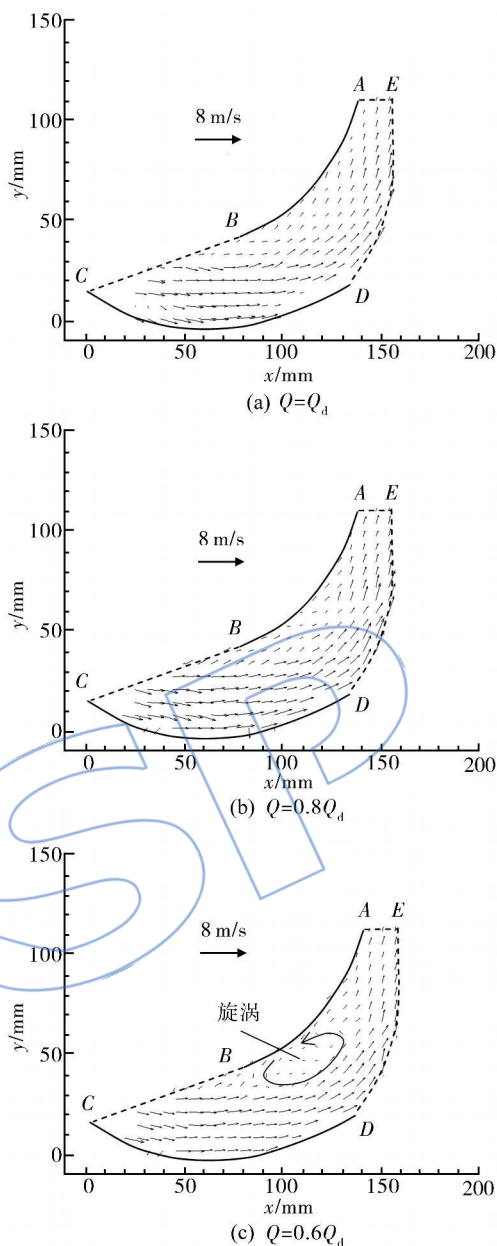


图 5 叶轮流道内部相对速度变化

Fig. 5 Evolution of relative velocity in the impeller passage

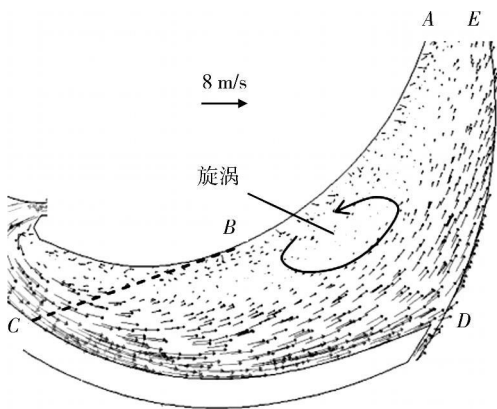


图 6  $0.6Q_d$  时的相对速度矢量

Fig. 6 Relative velocity vector at  $0.6Q_d$

距离分别为  $0.1b_2$ ,  $0.5b_2$  和  $0.9b_2$ . 在每一幅图中, 3 条曲线分别对应  $0.6Q_d$ ,  $0.8Q_d$  和  $Q_d$  三种流量工况.

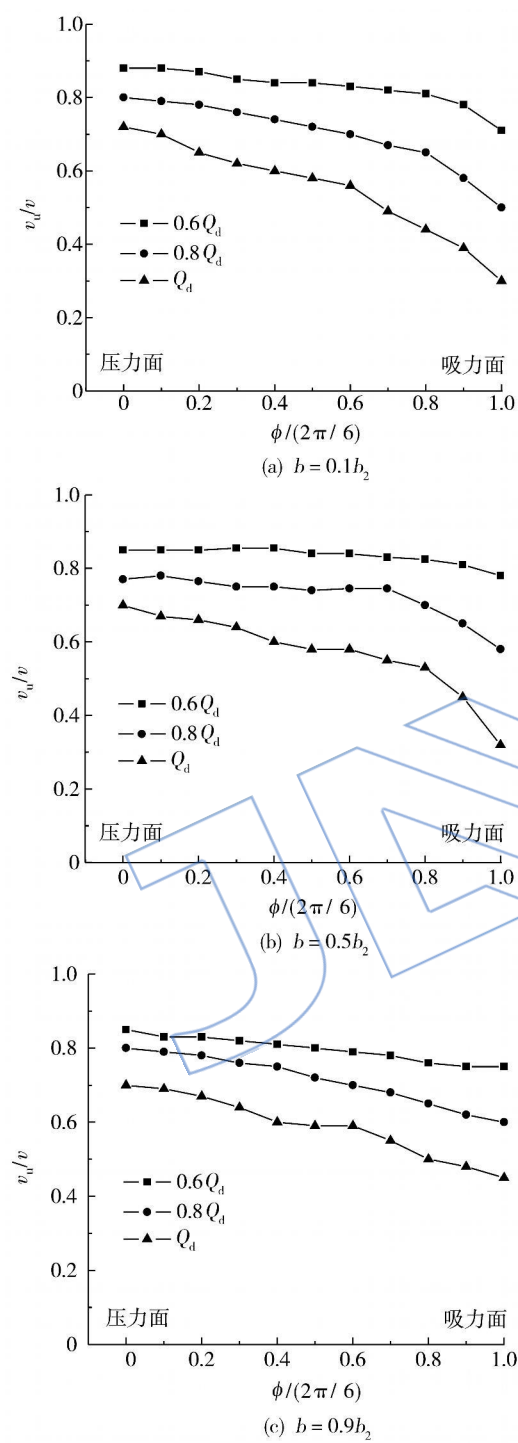


图 7 不同轴向位置  $v_u/v$  随流量的变化  
Fig. 7 Evolution of  $v_u/v$  at various axial positions

比较同一幅图中不同流量工况下的 3 条曲线可以发现, 流量越大, 无量纲绝对速度的周向分量  $v_u/v$  越小, 从压力面到吸力面  $v_u/v$  减小的幅度

越大. 由图 7 可见, 不同轴向平面, 不同流量下的  $v_u/v$  从压力面到吸力面均呈下降趋势, 这一规律与文献[6]得到的结果不完全相同. 该文献研究了 7 叶片数的离心泵在  $0.63Q_d$  和  $0.45Q_d$  流量工况下流场的情况, 得到的  $v_u/v$  从压力面到吸力面略呈上升趋势. 可见, 泵的  $v_u/v$  从压力面到吸力面的变化趋势与泵的结构有很大的关系.

在吸力面附近, 轮盖侧平面上无量纲绝对速度的周向分量  $v_u/v$  沿周向变化缓慢, 而在轮盘侧平面和叶轮中面上其沿周向明显减小. 结合分析拍摄到的原始图像, 可以发现, 在对轮盘侧平面和叶轮中面进行拍摄时, 在叶片的吸力面附近出现了较为严重的反光, 而拍摄到的轮盖侧平面原始图像上反光较弱. 因此可以认为, 图 7(a) 和 (b) 中吸力面附近绝对速度的周向分量  $v_u/v$  迅速减小是由于反光造成的, 与测量平面的不同并无必然联系. 整个叶轮流道内的流场沿轴向的变化并不明显, 故可选择叶轮中面作为代表性截面对流场进行研究.

4 结 论

采用 PIV 技术对低比转速离心泵叶轮内部的流动进行了测量, 研究了速度分布沿叶轮周向和轴向的变化规律以及流量对速度分布的影响. 结果表明, 受科氏力和流体黏性的作用, 吸力面附近的流速大于压力面附近的流速, 随着流量的减小, 叶片吸力面附近相对速度略有减小, 叶片压力面附近相对速度变化较为明显, 当流量小到一定程度时, 在压力面附近出现回流现象. 流量对叶轮出口处的相对速度方向影响不明显. 叶轮流道内部速度沿轴向变化不大, 绝对速度沿半径方向呈增加趋势, 无量纲绝对速度的周向分量  $v_u/v$  从压力面到吸力面呈下降趋势, 且随流量减小而增大. 本文建立的试验方法为离心泵内部流动的试验研究提供了借鉴, 研究结果对低比转速离心泵叶轮的设计和节能增效改造具有参考价值.

参考文献:

[1] 谭磊, 曹树良. 供暖系统混水离心泵叶轮正反问题计算[J]. 流体机械, 2009, 37(7): 18-23.  
TAN Lei, CAO Shuliang. Computer aided design and flow analysis of the mixture water centrifugal pump impeller in heating system[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(17): 18-23. (in Chinese)

- [ 2 ] 康顺, 陈党慧. 用 CFD 研究高压比离心叶轮内的二次流动 [ J ]. 航空动力学报, 2005, 20( 6 ): 1054-1060.  
KANG Shun, CHEN Danghui. Application of CFD in the investigation of the secondary flow in a high speed centrifugal impeller [ J ]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20( 6 ): 1054-1060. ( in Chinese )
- [ 3 ] 张静, 齐学义, 侯伟华, 等. 双流道污水泵叶轮内部三维湍流流动的数值模拟 [ J ]. 农业机械学报, 2009, 40( 1 ): 64-68.  
ZHANG Jing, QI Xueyi, HOU Yihua, et al. Numerical simulation of 3D turbulent flow fields through double channel passage impeller [ J ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40( 1 ): 64-68. ( in Chinese )
- [ 4 ] Guleren K M, Pinarbasi A. Numerical simulation of the stalled flow within a vaned centrifugal pump [ J ]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2004, 218( 4 ): 425-436.
- [ 5 ] Yuan S Q, Zhang P F, Zhang J F, et al. Numerical simulation of 3D dense solid liquid two phase turbulent flow in a nonclogging mud pump [ J ]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17( 4 ): 623-627.
- [ 6 ] Wuibaut G, Bois G, Dupont P, et al. PIV measurements in the impeller and the vaneless diffuser of a radial flow pump in design and off design operating conditions [ J ]. Trans. ASME, J. Fluids Eng., 2002, 124( 3 ): 791-797.
- [ 7 ] Nicholas P, Poul S L, Christian B J. Flow in a centrifugal pump impeller at design and off design conditions: Part 1—Particle image velocimetry ( PIV ) and laser doppler velocimetry ( LDV ) measurements [ J ]. Trans. ASME, J. Fluids Eng., 2003, 125( 1 ): 61-72.
- [ 8 ] 孙蓀. 半开式离心泵内部流场 PIV 试验研究 [ D ]. 扬州: 扬州大学, 2003.  
SUN Sun. The experimental study on the flow fields in an unshrouded centrifugal pump impeller by PIV [ D ]. Yangzhou: Yangzhou University, 2003. ( in Chinese )
- [ 9 ] 陈钊, 郭永彩, 高潮. 三维 PIV 原理及其实现方法 [ J ]. 实验流体力学, 2006, 20( 4 ): 77-82.  
CHEN Zhao, GUO Yongcai, GAO Chao. Principle and technology of three dimensional PIV [ J ]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20( 4 ): 77-82. ( in Chinese )
- [ 10 ] 邵春雷, 顾伯勤, 陈晔. 离心泵内部流场测量系统设计及测量方法研究 [ J ]. 流体机械, 2007, 35( 6 ): 45-49.  
SHAO Chunlei, GU Boqin, CHEN Ye. Measurement system and measuring method of flow field in centrifugal pump [ J ]. Fluid Machine, 2007, 35( 6 ): 45-49. ( in Chinese )
- [ 11 ] 谭晓茗, 张靖周. 自耦合射流流动特性的 PIV 实验研究 [ J ]. 航空动力学报, 2009, 24( 3 ): 558-565.  
TAN Xiaoming, ZHANG Jingzhou. PIV experimental study on flow characteristics of synthetic jets [ J ]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24( 3 ): 558-565. ( in Chinese )
- [ 12 ] 邵春雷. 离心泵内部流动及动态虚拟设计方法研究 [ D ]. 南京: 南京工业大学, 2008.  
SHAO Chunlei. Study on the internal flow and dynamic virtual design method of centrifugal pump [ D ]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2008. ( in Chinese )
- [ 13 ] 袁寿其, 何有世, 袁建平, 等. 带分流叶片的离心泵叶轮内部流场的 PIV 测量与数值模拟 [ J ]. 机械工程学报, 2006, 42( 5 ): 60-63.  
YU AN Shouqi, HE Youshi, YU AN Jianping, et al. PIV measurements and numerical simulations of flow in centrifugal pump impellers with splitting vanes [ J ]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42( 5 ): 60-63. ( in Chinese )