

# 零流量工况下双叶片泵内部流场三维 PIV 测量\*

王凯 刘厚林 袁寿其 谈明高 杨东升

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

**【摘要】** 采用三维 PIV 测试技术对一比转数为 111 的双叶片泵零流量工况下的内部流动进行了测量。采用基于光纤制作的外触发同步系统和等效标定方法等关键技术来保证三维 PIV 测试精度。在 Visual C++ 2005 平台下, 根据速度三角形, 编写了三维 PIV 速度合成程序, 将测量的绝对速度与圆周速度合成得到相对速度。结果表明: 隔舌对叶轮内绝对速度场影响较大; 叶轮流道内 3 个测量平面上都存在较大范围的漩涡区, 但漩涡的大小、位置有所不同; 蜗壳扩散段存在低速区域, 该区域的绝对速度小于 0.62 m/s, 且存在漩涡现象; 3 个测量平面上, 叶轮流道内、蜗壳扩散段及隔舌附近区域的轴向速度各不相同。

**关键词:** 双叶片泵 零流量工况 内部流场 三维 PIV 漩涡

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0061-05

## 3-D PIV Test of Inner Flow in a Double-blade Pump under Zero Flow Rate Condition

Wang Kai Liu Houlin Yuan Shouqi Tan Minggao Yang Dongsheng

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

Inner flow in a double-blade pump impeller, whose specific speed is 111, was measured under zero flow rate condition by using 3-D PIV test technology. In order to ensure the accuracy of 3-D PIV test, the external trigger synchronization system which was made with fiber optic and equivalent calibration method was applied. In Visual C++ 2005 platform, according to the velocity triangle, 3-D PIV velocity synthetic procedure was compiled to obtain the relative velocity synthesized by the absolute velocity and the circular velocity. The results showed that volute tongue had greater impact on the absolute velocity field within the impeller. There were vortices regions at three measurement surfaces within impeller, but the sizes and locations of vortices were different. Moreover, there was a low velocity region at the volute diffuser, the absolute velocity values in the region were less than 0.62 m/s, and there were vortices at the volute diffuser. The axial velocities values of impeller passage, volute diffuser and region near volute tongue were different at three measurement planes.

**Key words** Double blade pump, Zero flow rate condition, Inner flow, 3-D PIV, Vortex

### 引言

目前, 普遍采用 CFD 技术和现代流场显示技术来研究泵内的流动特征<sup>[1~10]</sup>。粒子成像测速仪

(particle image velocimetry, 简称 PIV) 是 20 世纪 80 年代后期发展并逐渐成熟的一种非接触式瞬态流场测试技术, 具有全流场快速测量、直观、不干扰流场等优点, 近年来在泵内部流动研究中得到了广泛的

收稿日期: 2010-09-06 修回日期: 2010-11-08

\* 国家自然科学基金资助项目(51079062)、国家杰出青年科学基金资助项目(50825902)、江苏省“333 高层次人才培养工程”科研项目和江苏省“六大人才高峰”资助项目

作者简介: 王凯, 博士生, 主要从事泵 CAD 与内流测试研究, E-mail: wangiak@yahoo.com.cn

通讯作者: 刘厚林, 研究员, 博士生导师, 主要从事泵现代设计理论与方法研究, E-mail: liuhoulin@ujs.edu.cn

应用。目前双叶片零流量工况下内部流动规律尚未被研究,本文采用 3-D PIV 对零流量工况下双叶片泵叶轮和蜗壳的内部流动进行测试。

## 1 试验装置

### 1.1 试验台与 PIV 系统

双叶片泵内流测试试验台如图 1 所示,主要测试设备有:变频控制柜、三相异步电动机、电磁流量计、压力变送器、三相 PWM 专用测试仪等。

试验用的 PIV 系统(图 2)是美国 TSI 公司 2009 年商用三维 PIV 系统,主要包括:美国 NewWave 公司的 YAG200-NWL 型脉冲激光器、610035 型同步器、630059 POWERVIEW 4MP 型跨帧 CCD 相机、图像采集及数据分析系统 Insight 3G,内置 Tecplot 软件、610015 型光臂以及片光源透镜组等。

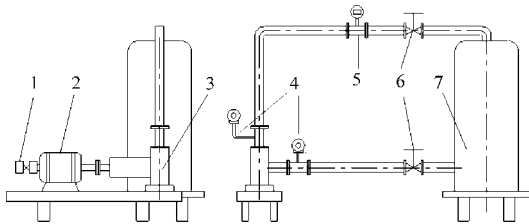


图 1 试验台

Fig. 1 Experimental rig

1. 轴编码器 2. 电动机 3. 泵 4. 压力变送器  
5. 电磁流量计 6. 闸阀 7. 水箱

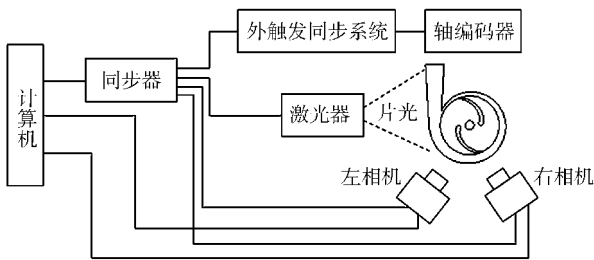


图 2 3-D PIV 系统示意图

Fig. 2 3-D PIV system diagram

### 1.2 外触发同步系统

在 PIV 试验过程中,采用变频控制柜调节电动机转速,发出的电信号严重干扰外触发脉冲信号,因此,采用光纤技术制作外触发同步系统。该系统由同步触发控制器和光纤传输转换器两部分组成,如图 3 所示。同步触发控制器对输入的轴编码信号进行滤波、计数、延时和触发信号输出(通过光纤接口输出);而光纤传输转换器则把通过光纤发来的触发脉冲信号转换为 TSI 同步器需要的电平信号。

### 1.3 试验用泵

双叶片模型泵的结构如图 4 所示,其结构形式与普通离心泵不同,其泵轴穿过吸水室。为便于 PIV 测量,泵轴与进水端位于泵的同侧。泵的吸水

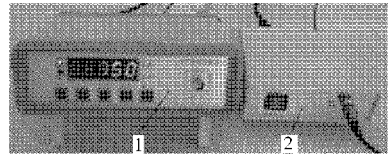


图 3 外触发同步系统

Fig. 3 External trigger synchronization system

1. 同步触发控制器 2. 光纤传输转换器

室采用半螺旋形吸水室,材质为不锈钢;叶轮和蜗壳均采用有机玻璃加工,其中蜗壳采用等速度矩法设计,断面是矩形,型线为对数螺旋线。

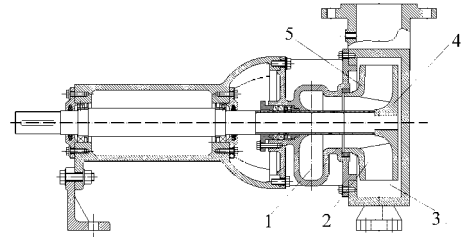


图 4 双叶片泵的结构图

Fig. 4 Structure of double-blade pump

1. 半螺旋形吸水室 2. 叶轮 3. 蜗壳  
4. 叶轮后盖板 5. 叶轮前盖板

试验用双叶片泵的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters

参数	数值	参数	数值
流量 $Q/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	25.86	扬程 $H/\text{m}$	2.68
转速 $n/r \cdot \text{min}^{-1}$	750	比转数 $n_s$	111
吸水室进口直径 $D_s/\text{mm}$	80	叶轮进口直径 $D_j/\text{mm}$	90
叶轮出口直径 $D_2/\text{mm}$	200	叶轮出口宽度 $b_2/\text{mm}$	47
叶片进口安放角 $\beta_1/(\circ)$	18.3	叶片出口安放角 $\beta_2/(\circ)$	30
蜗壳基圆半径 $D_3/\text{mm}$	212	蜗壳进口宽度 $b_3/\text{mm}$	77

## 2 试验方案

测量平面如图 5a 所示,其中平面  $B-B$  是叶轮中间断面;平面  $A-A$  靠近叶轮前盖板,距叶轮中间断面 20 mm;平面  $C-C$  靠近叶轮后盖板,距叶轮中间断面 20 mm。PIV 测量区域为图 5b 中的区域 I 和 II。

选用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末作为示踪粒子,并采用 Scheimpflug 方式布置两台 CCD 相机。

由于无法将标定靶盘放在泵体内进行三维标定,因此采用等效标定方法对其进行标定,即把标定靶盘放在泵体外的水箱内进行标定,如图 6 所示。标定水箱由水箱和挡板组成,由有机玻璃加工而成,其材质与蜗壳和叶轮相同,水箱的壁厚与蜗壳的相等,挡板的厚度与叶轮后盖板相等。

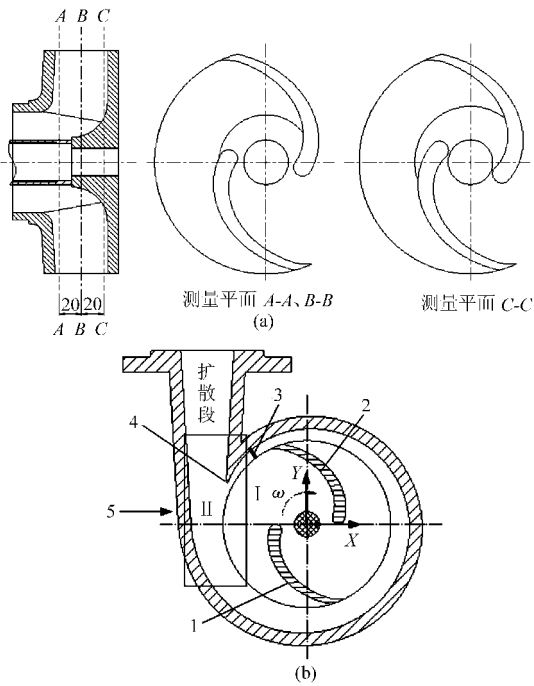


图5 测量平面和测量区域  
Fig. 5 Test surfaces and regions  
(a) 测量平面 (b) 测量区域

1. 压力面 2. 吸力面 3. 隔舌0断面 4. 隔舌 5. 片光

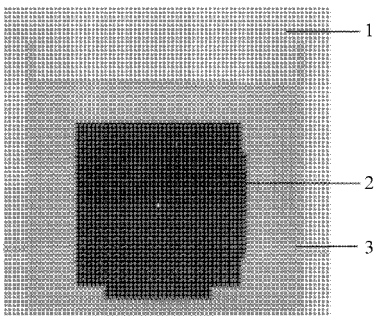


图6 三维标定图  
Fig. 6 3-D calibration  
1. 挡板 2. 标定靶盘 3. 水箱

### 3 试验结果及分析

在 Insight 3G 软件中设置相关试验参数, 采用粒子图像序列采集方式, 每个工况采集 20 组互相关图像。然后, 运用互相关技术对不同工况下的 20 对图像进行处理, 并采用“Standard Deviation”、“Local Mean”、“Smoothing”、“Median Test”与“Secondary Peak”5 种修正技术对粒子图像进行修正。最后将得到的 20 个速度向量文件导入 Tecplot 软件中进行平均处理。

#### 3.1 绝对速度分布

双叶片泵叶轮内区域 I 的绝对速度分布如图 7 所示。从图中的速度矢量中可以看出: 在叶轮 I 区域内存在一个高速区域, 位于叶片进口-压力面至叶片出口-吸力面之间。除了靠近隔舌(图 5b)的区域

外, 叶轮出口处绝对速度的方向与叶轮旋转方向基本一致, 流体基本沿叶轮出口边的切向甩出, 这是因为绝对速度是由圆周速度和相对速度合成得到, 而圆周速度比相对速度大得多。

图 7 还给出了区域 I 的流线分布。从图中可以看出: 在零流量工况下, 隔舌对叶轮内的流场影响较大, 尤其是在叶轮中间断面上, 叶轮内的液体绕着隔舌流动, 从而在隔舌附近的区域形成了绕流。

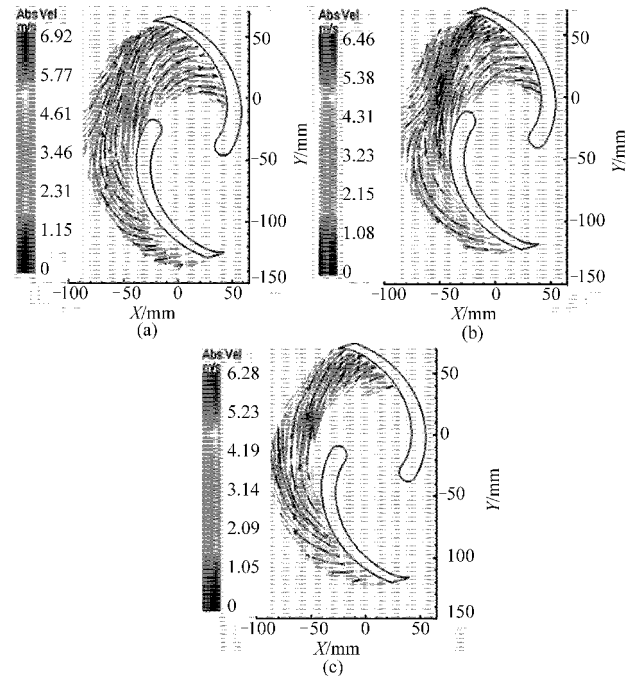


图7 区域 I 的绝对速度分布

Fig. 7 Absolute velocity distribution of region I  
(a) 平面 A-A (b) 平面 B-B (c) 平面 C-C

双叶片泵叶轮内区域 I 的轴向速度(即 Z 向速度)分布如图 8 所示。从图中可以看出, 3 个平面上

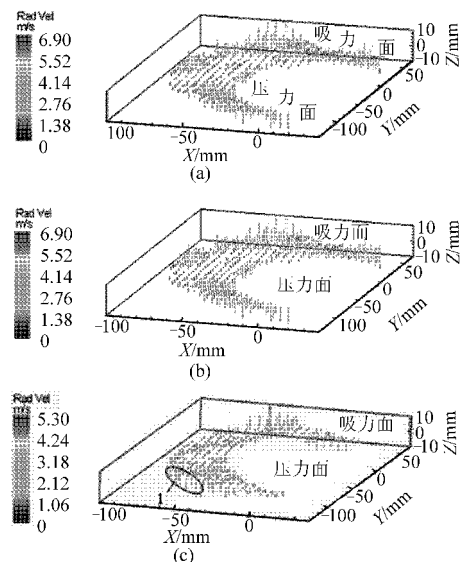


图8 区域 I 的轴向速度分布

Fig. 8 Axial velocity distribution of region I  
(a) 平面 A-A (b) 平面 B-B (c) 平面 C-C



的轴向速度不同。在平面  $A-A$  上, 叶轮出口靠近隔舌的区域存在较大的正的轴向速度, 叶轮出口靠近叶片压力面的区域存在负的轴向速度; 而在平面  $B-B$  上, 这两个区域上轴向速度的方向大致与平面  $A-A$  相同, 但速度值要小得多; 在平面  $C-C$  上, 除了图示圆区(图 8c)外, 其余区域上轴向速度值都比平面  $A-A$  和平面  $B-B$  的小。

图 9 给出了隔舌附近区域 II 的绝对速度矢量图及流线图。从图 9a 平面  $A-A$  的绝对速度分布中可以看出, 在零流量工况下, 蜗壳扩散段靠近隔舌处存在低速区域, 其中右侧绝对速度为零, 该区域产生了漩涡和回流现象; 蜗壳扩散段其余区域的液体则流向蜗壳 0 断面。在平面  $B-B$  上, 蜗壳扩散段存在着漩涡区域, 其最小绝对速度为零, 位于该区域右侧。在平面  $C-C$  上, 蜗壳扩散段隔舌附近已没有回流现象, 液体向蜗壳出口处流动, 该区域绝对速度值比平面  $A-A$  和  $B-B$  高, 最小值为  $0.21 \text{ m/s}$ , 位于该区域的左上侧。

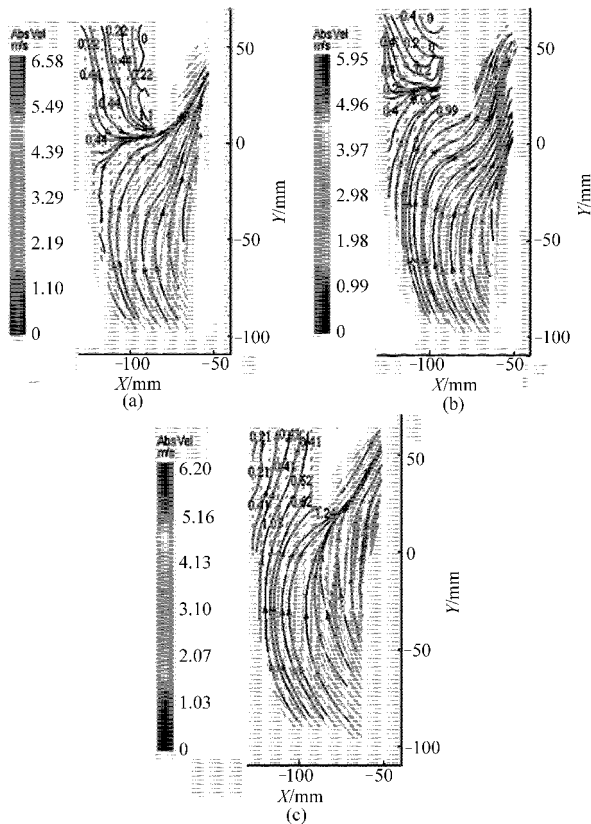


图 9 区域 II 的绝对速度分布

Fig. 9 Absolute velocity distribution of region II  
(a) 平面  $A-A$  (b) 平面  $B-B$  (c) 平面  $C-C$

综上所述, 蜗壳扩散段存在一低速区域, 该区域的绝对速度小于  $0.62 \text{ m/s}$ , 且该低速区域内存在一漩涡。随着轴向位置的不同, 该区域的流动规律有明显变化。

图 10 给出了双叶片泵区域 II 的轴向速度分布。

从图中可以看出: 3 个平面上蜗壳扩散段的轴向速度都很小, 但蜗壳隔舌处区域的轴向速度则很大。在平面  $A-A$  上, 蜗壳隔舌附近靠近扩散段的区域的正向轴向速度最大, 平面  $C-C$  上最小。图 10c 方区存在负向的轴向速度, 平面  $C-C$  上该区域速度值最大, 平面  $A-A$  次之, 平面  $B-B$  上最小。

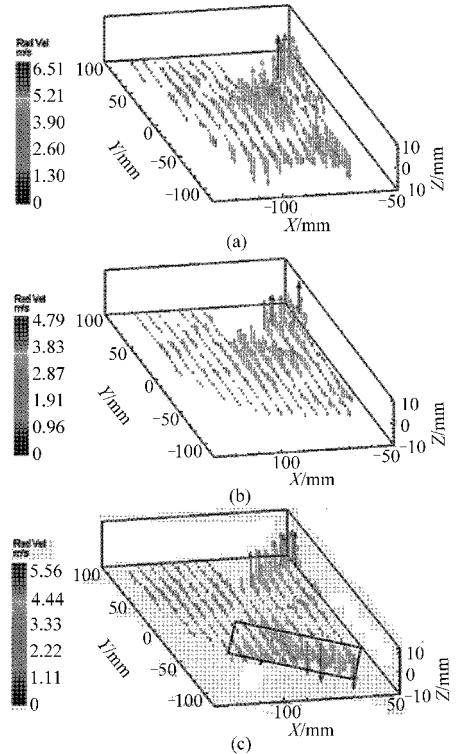


图 10 区域 II 的轴向速度分布

Fig. 10 Axial velocity distribution of region II  
(a) 平面  $A-A$  (b) 平面  $B-B$  (c) 平面  $C-C$

### 3.2 相对速度分布

由于 PIV 得到的是三维绝对速度, 需要对其进行速度合成来得到相对速度。根据速度三角形, 采用 Visual C++ 2005 编写速度合成程序, 并将合成的速度向量文件导入 Tecplot 软件中进行处理。

根据上述方法, 得到了双叶片泵叶轮内区域 I 的相对速度分布(图 11)。从图中的速度矢量中可以看出: 在叶轮区域 I 内存在一个较大范围的低速区域, 位于叶片出口-吸力面附近。从图中流线分布中可以知道: 平面  $A-A$  内存在两个漩涡, 大漩涡位于靠近叶轮出口对着隔舌的区域, 小漩涡位于叶片出口和吸力面处; 平面  $B-B$  内存在一个漩涡, 该漩涡位于流道中间朝着隔舌的区域; 而平面  $C-C$  内也存在着一个较大的漩涡。因此, 叶轮区域 I 内的低速区域上存在着漩涡现象, 但叶轮流道内 3 个平面上漩涡的大小、位置不同。

## 4 结论

(1) 隔舌对叶轮内绝对速度场影响较大, 在叶

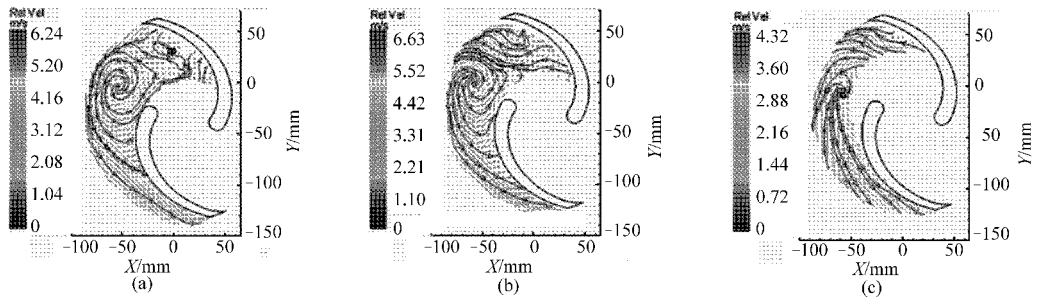


图11 区域I的相对速度分布

Fig. 11 Relative velocity distribution of region I

(a) 平面A-A (b) 平面B-B (c) 平面C-C

轮流道内对着隔舌的区域存在绕流现象。而在叶轮内相对分布上存在着较大范围的漩涡区,但叶轮流道内3个平面上漩涡的大小、位置都有所不同。

(2) 隔舌附近的扩散段存在一低速区域,该区域的绝对速度小于  $0.62 \text{ m/s}$ ,且存在漩涡现象。该

区域的流动规律随轴向位置变化而发生明显变化。

(3) 3个平面上,叶轮流道内的轴向速度值不同,平面A-A上的速度值最大。蜗壳扩散段上3个平面上的轴向速度都很小,而蜗壳隔舌处区域的轴向速度则很大。

## 参 考 文 献

- Feng Jianjun, Friedrich-Karl Benra, Hans Josef Dohmen. Investigation of periodically unsteady flow in a radial pump by CFD simulations and LDV measurements[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2011, 133(1): 011004-1~011004-11.
- Westra R W, Broersma L, van Andel K, et al. PIV measurements and CFD computations of secondary flow in a centrifugal pump impeller[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(6): 0611004-1~0611004-8.
- 朱荣生, 欧鸣雄. 低比转数双吸离心泵回流问题的 CFD 研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 82~85.  
Zhu Rongsheng, Ou Mingxiong. Simulation of reverse flow in low specific speed double suction centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 82~85. (in Chinese)
- 刘厚林, 任芸, 谈明高, 等. 双流道泵内压力脉动的 CFD 计算及测试[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(4): 277~281.  
Liu Houlin, Ren Yun, Tan Minggao, et al. CFD calculation and test of pressure fluctuation in double-channel pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4): 277~281. (in Chinese)
- Pedersen N, Larsen P S, Jacobsen C B. Flow in a centrifugal pump impeller at design and off-design conditions—part I: particle image velocimetry (PIV) and laser doppler velocimetry (LDV) measurements [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1): 61~72.
- Jianjun F, Friedrich K B, Hans J D. Time-resolved particle image velocimetry (PIV) measurements in a radial diffuser pump [C]//Proceedings of ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2009-78297, 2009.
- Yang Hua, Gu Chuangang, Wang Tong. Two-dimensional particle image velocimetry (PIV) measurements in a transparent centrifugal pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 18(1): 98~102.
- 赵斌娟, 袁寿其, 刘厚林, 等. 双流道及双叶片式叶轮内流场的 PIV 测量与比较[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 82~85.  
Zhao Binjuan, Yuan Shouqi, Liu Houlin, et al. PIV measurement and comparison of inner flow inside the double-channel and two-blade impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 82~85. (in Chinese)
- 袁辉靖, 邵杰, 刘树红, 等. 小流量工况下微小型泵内部流场数值模拟及 LIF-PIV 实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(11): 1852~1856.  
Yuan Huijing, Shao Jie, Liu Shuhong, et al. Numerical simulation and LIF-PIV experimental investigation on inner-flow of a mini pump under low flow rate condition [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(11): 1852~1856. (in Chinese)
- 潘光星. 长短叶片离心泵三维湍流数值模拟与 PIV 测试研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.  
Pan Guangxing. Study on 3-D calculation of turbulent flow and measurements of PIV in the centrifugal pump with splitting vanes [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008. (in Chinese)