

# 双叶片离心泵滑移系数修正实验\*

王凯 吴贤芳 陈新响 周孝华

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

**摘要:** 采用 PIV 技术对一双叶片离心泵叶轮出口处的滑移速度进行了实验研究, 得到了 7 个工况、6 个相位下的滑移系数, 发现随着流量的增大 6 个相位下的平均滑移系数呈递减的趋势变化。采用斯托道拉公式、威斯奈尔公式、斯基克钦公式分别计算了双叶片离心泵的滑移系数, 并与各个工况下的实验值进行了比较。根据实验值对计算误差最小的威斯奈尔公式进行了修正, 并重新设计一个双叶片叶轮进行了验证。研究结果表明 7 个工况下修正后的滑移系数计算误差均在 3.5% 以内, 其最大误差为 3.23%。

**关键词:** 双叶片离心泵 滑移系数 粒子图像测速 修正系数

**中图分类号:** TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0061-06

## Correction Experiment of Slip Factors in Double-blade Centrifugal Pump

Wang Kai Wu Xianfang Chen Xinxiang Zhou Xiaohua

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

**Abstract:** Slip velocity of impeller outlet for a double-blade centrifugal pump was studied with PIV technology and slip factors of six blade phases at the seven conditions were obtained. It is found that average slip factor at the six blade phases gradually decreased with the increase of flow rate. Slip factors of the double-blade centrifugal pump were calculated with Stodola formula, Weisner formula and Stechkin formula and all the results were compared with experimental values at the seven conditions. Weisner formula, whose calculation errors were the smallest, was corrected on the basis of experimental values. And a double-blade impeller was redesigned to verify correct formula. The results showed that the calculation errors of corrected slip factors at the seven conditions were less than 3.5% and the maximum error was 3.23%.

**Key words:** Double-blade centrifugal pump Slip factor Particle image velocimetry Correction coefficient

### 引言

由于受到叶轮叶片数有限的影响, 出口相对速度产生了滑移, 造成液体在离心泵叶轮出口的旋转不足, 该现象称为离心泵叶轮内的流动滑移。目前, 普遍采用的滑移系数计算公式<sup>[1-4]</sup>主要有斯托道拉公式、威斯奈尔公式、斯基克钦公式。斯托道拉公式和威斯奈尔公式仅考虑轴向漩涡对出口相对运动的影响, 斯基克钦公式则假设叶轮中液体的流动不产生偏离。与叶轮内流体的真实流动相比, 这 3 个公

式计算出来的滑移系数都存在一定的误差。

迄今为止, 对离心泵滑移系数的研究, 仅用探针测量出叶轮出口处的绝对速度<sup>[5-10]</sup>, 然而探针影响了叶轮出口处的流场。粒子图像测速 (Particle image velocimetry, PIV) 技术是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应用<sup>[11-15]</sup>。

双叶片离心泵是一种无堵塞泵, 其叶轮采用双叶片结构, 流道对称、叶片排挤小, 轴向漩涡流动较

收稿日期: 2012-07-17 修回日期: 2012-08-10

\* 国家自然科学基金资助项目 (51079062, 51179075, 51109095, 51209105)、江苏省科技支撑 (工业) 项目 (BE2012129) 和江苏大学高级专业人才培养启动基金资助项目 (12JDG045)

作者简介: 王凯, 助理研究员, 主要从事离心泵多工况水力优化设计方法及 PIV 试验研究, E-mail: wangkai@ujs.edu.cn

为明显。因此,本文采用 PIV 技术对一双叶片离心泵叶轮出口处的滑移速度进行测量,得到其不同工况下的滑移系数,并在此基础上对计算误差较小的滑移系数计算公式进行修正。

## 1 实验装置

### 1.1 实验台

双叶片离心泵外特性实验台如图 1 所示。主要设备有: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(安装在变频控制柜中)等。实验时,通过变频控制柜对电动机进行无级调速,流量由电磁流量计测得,扬程由压力变送器获得,功率由三相 PWM 专用测试仪测得。

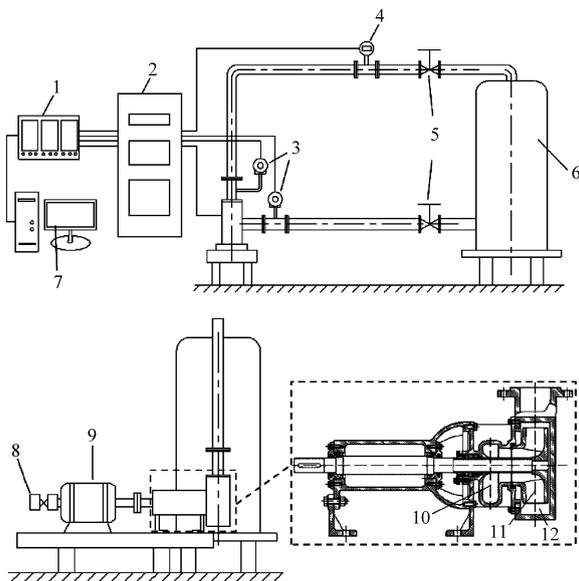


图 1 双叶片离心泵外特性实验台示意图

Fig. 1 Sketch of test bench

1. 数据分析仪 2. 变频控制柜 3. 压力变送器 4. 电磁流量计
5. 闸阀 6. 水箱 7. 计算机 8. 轴编码器 9. 电动机 10. 半螺旋形吸水室 11. 叶轮 12. 蜗壳

### 1.2 实验用泵

泵的吸水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铸造而成,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。实验用泵的剖视图如图 2 所示,其主要设计参数如表 1 所示。

### 1.3 外特性

该泵在转速为 1 000 r/min 下的外特性曲线如图 3 所示。图中  $H$  为扬程, $\eta$  为效率, $P$  为功率。

## 2 内流测试方案

### 2.1 PIV 测试系统

图 4 为本次实验的 PIV 系统原理图,其中 PIV 系统由美国 TSI 公司生产,主要包括:美国 NewWave

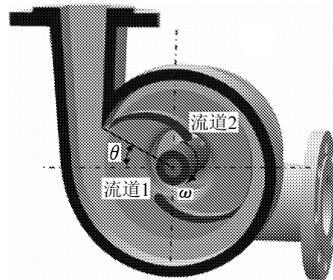


图 2 实验用泵剖视图

Fig. 2 Cutaway view of test pump

表 1 主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters

| 设计参数                        | 数值    | 设计参数                       | 数值    |
|-----------------------------|-------|----------------------------|-------|
| 设计流量 $Q_d/m^3 \cdot h^{-1}$ | 34.5  | 扬程 $H/m$                   | 4.4   |
| 转速 $n/r \cdot min^{-1}$     | 1 000 | 比转数 $n_s$                  | 117.6 |
| 吸水室进口直径 $D_s/mm$            | 80    | 叶轮进口直径 $D_1/mm$            | 90    |
| 叶轮出口直径 $D_2/mm$             | 201.2 | 叶轮出口宽度 $b_2/mm$            | 44.6  |
| 叶片进口安放角 $\beta_1/(^\circ)$  | 21.4  | 叶片出口安放角 $\beta_2/(^\circ)$ | 23.8  |
| 叶片包角 $\varphi/(^\circ)$     | 177.5 | 蜗壳基圆半径 $D_3/mm$            | 212   |
| 蜗壳进口宽度 $b_3/mm$             | 77    | 蜗壳出口直径 $D_d/mm$            | 80    |

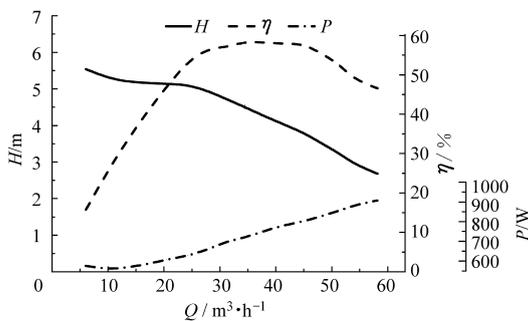


图 3 外特性曲线

Fig. 3 Energy performance curves

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。

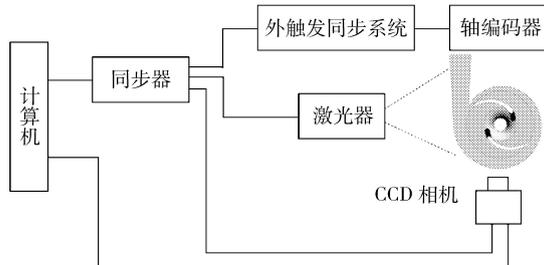


图 4 PIV 系统示意图

Fig. 4 Sketch of PIV systems

### 2.2 测量区域

选择叶轮中间截面为测量平面。PIV 测量区域为叶轮通道 1 和通道 2 (图 2)。正对隔舌处叶片吸力面与横轴之间夹角  $\theta = 28^\circ$ 。

## 2.3 叶片相位布置

本试验共测量7个工况,分别为 $0.2Q_d$ 、 $0.4Q_d$ 、 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 $1.0Q_d$ 、 $1.2Q_d$ 、 $1.4Q_d$ 。每个工况测量6个不同的相位,分别为 $0$ 、 $T/6$ 、 $T/3$ 、 $T/2$ 、 $2T/3$ 、 $5T/6$ ,相位差为 $30^\circ$ (图5)。 $t=0$ 时, $\theta$ 为 $28^\circ$ (图2)。相位差在Insight 3G软件中通过脉冲延迟时间来设置,在 $1000\text{ r/min}$ 下叶片转过 $30^\circ$ 为 $5\text{ ms}$ 。

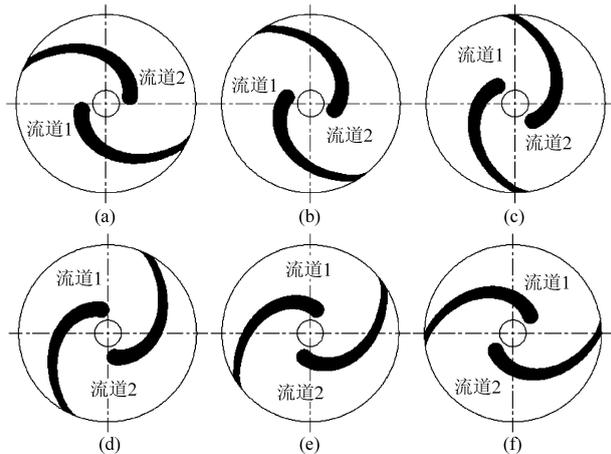


图5 叶片相位示意图

Fig. 5 Sketch of blade phase

(a)  $t=0$  (b)  $t=T/6$  (c)  $t=T/3$   
(d)  $t=T/2$  (e)  $t=2T/3$  (f)  $t=5T/6$

PIV实验选用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末为示踪粒子。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 数据采集及速度处理方法

(1)在Insight 3G软件中设置相关实验参数,并采用粒子图像序列采集方式,每个测量区域采集100组互相关图像。实验参数设置为:脉冲间隔 $400\ \mu\text{s}$ ;脉冲延迟 $100\ \mu\text{s}$ ;查问区域 $32\text{ 像素} \times 32\text{ 像素}$ 。

(2)采用外触发同步系统进行相位锁定,保证拍摄的100组图像中叶片均在同一位置。采用互相关技术对不同工况下的图像进行处理,并通过Standard Deviation、Local Mean、Median Test、Secondary Peak技术对粒子图像进行修正,从而得到相应的速度向量文件。

(3)根据速度三角形,编写离心泵PIV测量速度处理软件,以便得到叶轮出口处的速度向量文件。图6给出了设计工况下 $t=0$ 时叶轮出口处 $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$ 的速度随采样数的变化情况。从图中可以看出,在湍流状态下双叶片离心泵内各测点的速度是随时间变化而变化的。为了便于研究叶轮出口处的非定常湍流流动,假设叶片的扰动是周期性变化的<sup>[15]</sup>,并采用流场平均法将测量得到的100组速度场进行算术平均。叶轮出口处绝对速度分布以及

$p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$ 的平均速度如图6所示, $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$ 的平均速度标准不确定度分别为 $2.91\%$ 、 $2.65\%$ 、 $2.58\%$ 和 $2.22\%$ 。

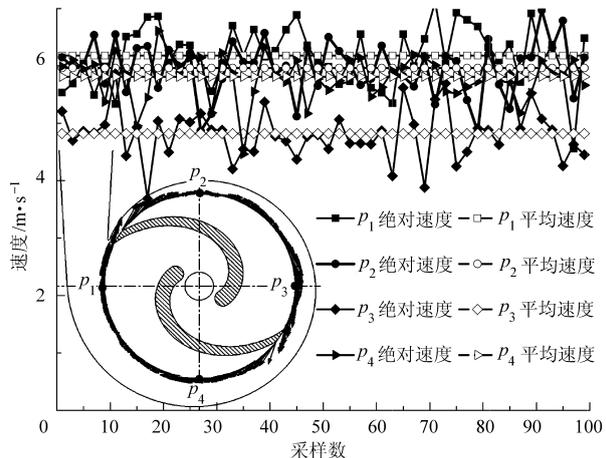


图6  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$ 的速度随采样数的变化

Fig. 6 Velocity variation at  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  and  $p_4$  with sample number

### 3.2 滑移系数计算公式

图7给出了叶轮出口处的速度三角形,则滑移系数 $\sigma$ 的计算公式为

$$\sigma = 1 - \frac{\Delta v_{u2}}{u_2} \quad (1)$$

式中  $\Delta v_{u2}$ ——叶轮出口处的滑移速度

$u_2$ ——叶轮出口处的圆周速度

$$\Delta v_{u2} = u_2 - v_{u2E} - \frac{v_{m2E}}{\tan\beta_2} \quad (2)$$

$$u_2 = \frac{D_2 \pi n}{60} \quad (3)$$

$$v_{u2E} = v_{2E} \cos\alpha_{2E} \quad (4)$$

$$\alpha_{2E} = \arccos\left(\frac{v_{2E}^2 + u_2^2 - w_{2E}^2}{2v_{2E}u_2}\right) \quad (5)$$

式中  $v_{u2E}$ ——叶轮出口处圆周分速度的实验值

$v_{m2E}$ ——叶轮出口处轴面速度的实验值

$\alpha_{2E}$ ——叶轮出口处绝对液流角的实验值

$w_{2E}$ ——叶轮出口处相对速度的实验值

$v_{2E}$ ——叶轮出口处绝对速度的实验值

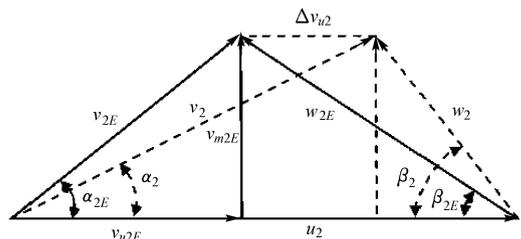


图7 叶轮出口处的速度三角形

Fig. 7 Velocity triangle of impeller outlet

### 3.3 滑移系数的实验结果

图8给出了不同工况下叶轮出口处的绝对液流

角。从中可以看出,不同相位及算术平均后的绝对液流角均随着流量的增大先减小后增大,在设计工况下绝对液流角 $\alpha_{2E}$ 最小。

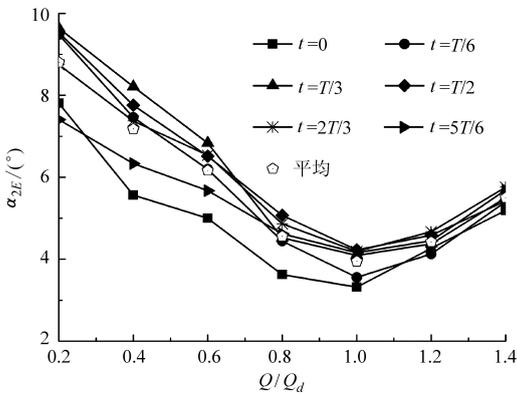


图8 叶轮出口处的绝对液流角

Fig. 8 Absolute flow angle of impeller outlet

为了便于研究叶轮出口处的滑移速度,将6个相位下的滑移速度进行了算术平均化处理。不同工况下叶轮出口处的平均滑移速度 $\Delta v_{n2}$ 如图9所示。从中可以看出,随着流量的增大,叶轮出口处的平均滑移速度逐渐增大。1.0 $Q_d$ 和1.2 $Q_d$ 工况下的平均滑移速度差别较小。

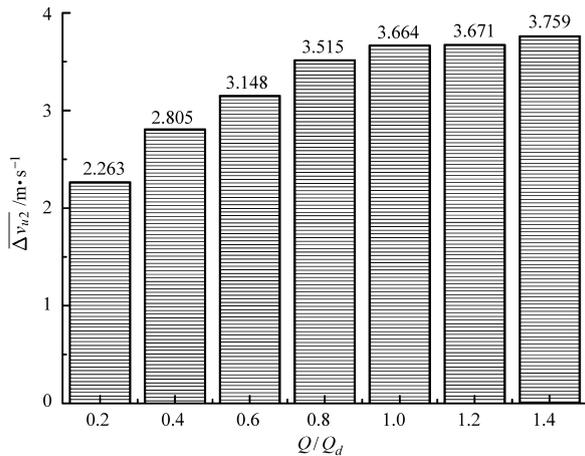


图9 叶轮出口处的平均滑移速度

Fig. 9 Average slip velocity of impeller outlet

图10给出了7个工况下各相位和算术平均后的滑移系数。从图10可以看出,从 $t=0$ 相位到 $t=5T/6$ 相位,滑移系数的变化趋势是先增大后减小,但 $t=5T/6$ 相位的滑移系数要大于 $t=0$ 相位。从滑移系数的平均值可以看出,平均滑移系数随着流量的增大而递减,0.2 $Q_d$ 工况下的滑移系数最大,为0.785。

### 3.4 滑移系数的实验值与理论值比较

3个常用的离心泵滑移系数计算公式为:

斯托道拉(Stodola)公式

$$\sigma_{sd} = 1 - \frac{\pi}{z} \sin\beta_2 \quad (6)$$

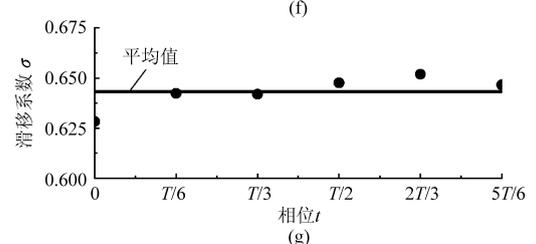
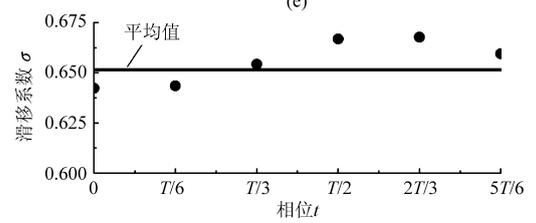
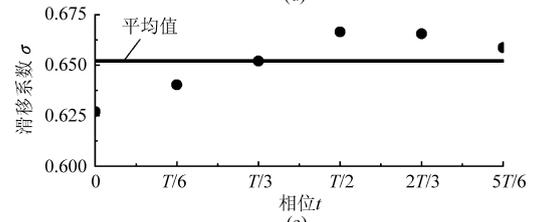
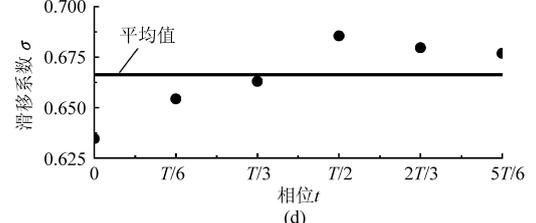
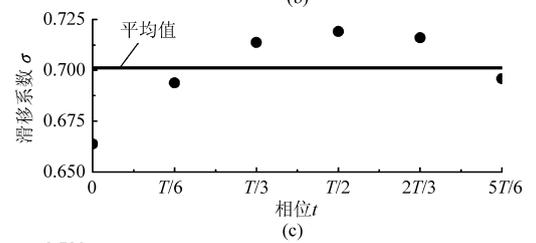
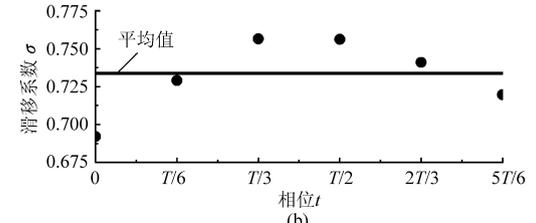
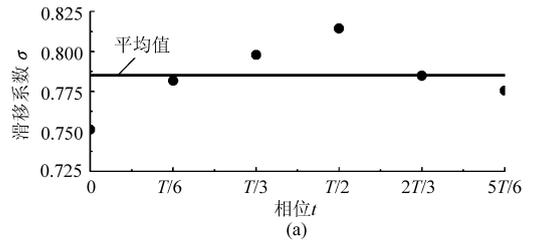


图10 不同工况下的滑移系数

Fig. 10 Slip factors at different flow rates

- (a) 0.2 $Q_d$  (b) 0.4 $Q_d$  (c) 0.6 $Q_d$  (d) 0.8 $Q_d$   
(e) 1.0 $Q_d$  (f) 1.2 $Q_d$  (g) 1.4 $Q_d$

威斯奈尔(Weisner)公式

$$\sigma_w = 1 - \frac{\sqrt{\sin\beta_2}}{z^{0.7}} \quad (7)$$

斯基克钦 (Stechkin) 公式

$$\sigma_{sk} = \frac{1}{1 + 2 \frac{\pi R_2^2}{3zR_2^2 - R_1^2}} \quad (8)$$

式中  $R_1, R_2$ ——叶片进、出口半径  
 $z$ ——叶片数

采用上述 3 个公式计算 7 个工况下双叶片离心泵滑移系数,如图 11 所示。威斯奈尔公式得到的滑移系数与实验值较为接近。由此可知,斯托道拉公式和斯基克钦公式不适用叶片数较少的双叶片离心泵滑移系数的估算。

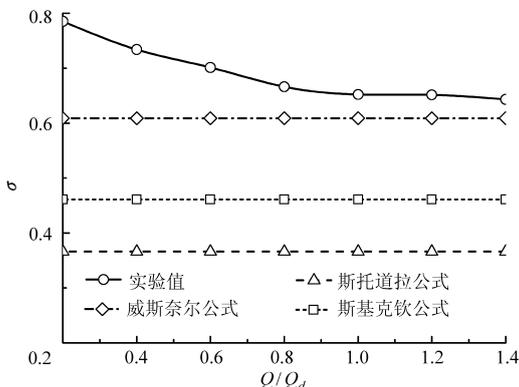


图 11 实验值与计算值比较

Fig. 11 Comparison with experiment and calculation

### 3.5 滑移系数的修正公式及验证

对与实验值误差较小的威斯奈尔公式进行修正,将液流角修正系数和滑移速度修正系数融入威斯奈尔公式中,修正公式为

$$\sigma'_{w,i} = k_{\sigma,i} \left( 1 - \frac{\sqrt{\sin(k_{\beta,i}\beta_2)}}{z^{0.7}} \right) \quad (9)$$

其中

$$k_{\beta,i} = \frac{\beta_{2E,i}}{\beta_2}$$

式中  $k_{\beta,i}$ —— $i$  工况下的液流角修正系数  
 $\beta_{2E,i}$ —— $i$  工况下相对液流角的实验值  
 $k_{\sigma,i}$ —— $i$  工况下的滑移速度修正系数

根据式(9)计算出  $k_{\beta,i}, k_{\sigma,i}$ ,表 2 给出了不同工况下修正系数  $k_{\sigma,i}$  和  $k_{\beta,i}$  的值。为了验证其准确性,重新设计一个双叶片叶轮(几何参数见表 3)并将滑移系数的实验值与修正后的计算值进行分析。除了表 3 标出的叶轮几何参数与图 2 的不同外,叶轮其他几何参数,吸水室和蜗壳的所有参数均相同。实验在同一个实验台上进行,其叶轮是用有机玻璃铸造而成。PIV 数据采集以及处理方法均相同。

PIV 实验得到的滑移系数值和修正后的滑移系数计算值如图 12 所示。修正后的计算误差均在

表 2 修正系数

Tab. 2 Correction coefficients

| 参数             | 工况        |           |           |           |           |           |           |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                | 0.2 $Q_d$ | 0.4 $Q_d$ | 0.6 $Q_d$ | 0.8 $Q_d$ | 1.0 $Q_d$ | 1.2 $Q_d$ | 1.4 $Q_d$ |
| $k_{\sigma,i}$ | 0.510     | 0.399     | 0.333     | 0.248     | 0.215     | 0.234     | 0.258     |
| $k_{\beta,i}$  | 1.094     | 0.979     | 0.909     | 0.830     | 0.799     | 0.812     | 0.805     |

表 3 叶轮几何参数

Tab. 3 Geometric parameters of impeller

| 设计参数                            | 数值 | 设计参数                            | 数值   |
|---------------------------------|----|---------------------------------|------|
| 叶轮进口直径 $D_1$ /mm                | 90 | 叶轮出口直径 $D_2$ /mm                | 200  |
| 叶轮出口宽度 $b_2$ /mm                | 47 | 叶片进口安放角 $\beta_1$ /( $^\circ$ ) | 15.1 |
| 叶片出口安放角 $\beta_2$ /( $^\circ$ ) | 30 | 叶片包角 $\varphi$ /( $^\circ$ )    | 140  |

3.5% 以内,其中 1.2 $Q_d$  工况下,滑移系数的计算误差最大,为 3.23%;0.8 $Q_d$  工况下,滑移系数的计算误差最小,为 0.33%。由此可见,本文对威斯奈尔滑移系数计算公式的修正是可行有效的。

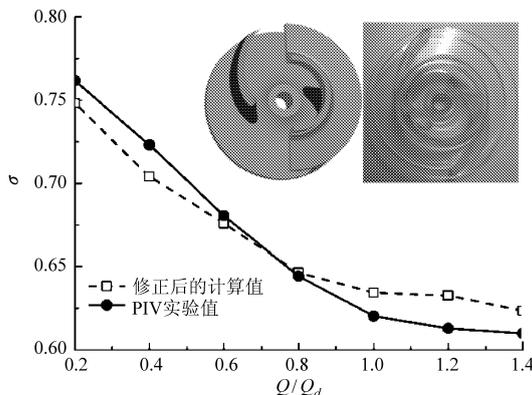


图 12 实验验证结果

Fig. 12 Experimental verification

## 4 结论

(1) 采用 PIV 技术对一双叶片离心泵叶轮内的速度场进行了测量,得到了 7 个工况、6 个相位下的滑移系数,并将 6 个相位下的滑移速度进行了算术平均化处理,结果表明:平均滑移系数随着流量的增大而递减。

(2) 采用斯托道拉公式、威斯奈尔公式、斯基克钦公式计算了双叶片离心泵滑移系数,并与各工况下的实验值进行了比较和分析,结果表明威斯奈尔公式得到的滑移系数计算误差最小。

(3) 根据双叶片离心泵的滑移系数实验值对威斯奈尔公式进行了修正,并重新设计一个双叶片叶轮进行了验证,结果表明 7 个工况下修正后的滑移系数计算误差均在 3.5% 以内。

## 参 考 文 献

- 1 Igor J Karassik, Joseph P Messina, Paul Cooper, et al. Pump handbook[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2008.
- 2 Gülich J F. Centrifugal Pumps[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- 3 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.
- 4 刘厚林,谈明高. 双流道泵[M]. 镇江:江苏大学出版社,2012.
- 5 Memardefouli M, Nourbakhsh A. Experimental investigation of slip factors in centrifugal pumps[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(5): 938 ~ 945.
- 6 杨敏官,查森,林厚强. 超短叶片离心泵叶轮的滑移系数[J]. 流体工程,1991(6):26 ~ 29.  
Yang Minguan, Zha Sen, Lin Houqiang. Slip factors for super short vanes of centrifugal pump impeller[J]. Fluid Engineering, 1991(6): 26 ~ 29. (in Chinese)
- 7 邹正文,史晓燕,徐奇峰. 离心泵叶轮滑移系数的研究[J]. 水泵技术,2006(1):1 ~ 7.  
Zou Zhengwen, Shi Xiaoyan, Xu Qifeng. Research on slip factors of centrifugal pump impeller[J]. Pump Technology, 2006(1): 1 ~ 7. (in Chinese)
- 8 刘厚林,谈明高,袁寿其,等. 离心泵滑移系数精度的比较[J]. 排灌机械,2006,24(6):4 ~ 6,11.  
Liu Houlin, Tan Minggao, Yuan Shouqi, et al. Precision comparison on slip factor of centrifugal pumps [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(6): 4 ~ 6, 11. (in Chinese)
- 9 邓德力. 离心油泵滑移系数的计算[J]. 流体机械,2008,36(5):51 ~ 53,5.  
Deng Deli. Study on the formula of centrifugal oil pumps' slip factor[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(5): 51 ~ 53, 5. (in Chinese)
- 10 陈颂英,庞雷,曲延鹏,等. 考虑边界层堵塞的离心泵滑移系数修正[J]. 山东大学学报:工学版,2009,39(2):75 ~ 77.  
Chen Songying, Pang Lei, Qu Yanpeng, et al. Modification of the slip factor of a centrifugal pump considering boundary layer clogging[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2009, 39(2): 75 ~ 77. (in Chinese)
- 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):061104.
- 12 Feng J, Benra F, Dohmen H J. Time-resolved particle image velocity (PIV) measurements in a radial diffuser pump [C] // Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2009: FEDSM2009-78297.
- 13 Wu Yulin, Liu Shuhong, Yuan Huijing, et al. PIV measurement in internal instaneous flows of a centrifugal pump[J]. SCIENCE CHINA Technological Science, 2011, 54(2): 270 ~ 276.
- 14 Liu Houlin, Wang Kai, Yuan Shouqi, et al. 3D PIV test of inner flow in a double blade pump impeller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(3): 491 ~ 497.
- 15 杨华,汤方平,刘超,等. 离心泵叶轮内二维 PIV 非定常流动测量[J]. 农业机械学报,2011,42(7):56 ~ 60.  
Yang Hua, Tang Fangping, Liu Chao, et al. 2-D PIV measurements of unsteady flow field inside the rotating impeller of centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 56 ~ 60. (in Chinese)

(上接第 60 页)

- 8 Bingwei Song, Hironori Horiguchi, Zhenyue Ma, et al. Rotordynamic moment on the backshroud of a Francis turbine runner under whirling motion[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(7): 071102.
- 9 倪永燕. 离心泵非定常湍流场计算及流体诱导振动研究[D]. 镇江:江苏大学,2008.  
Ni Yongyan. Research on the unsteady turbulent simulation and the flow-induced vibration in centrifugal pump [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
- 10 Christopher E Brennen, Allan J Acosta. Fluid-induced rotordynamic forces and instabilities[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(1):10 ~ 26.

(上接第 82 页)

- 18 李洪义. 滨海盐土三维土体电导率空间变异及可视化研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.  
Li Hongyi. Three-dimensional variability and visualization of soil electrical conductivity in coastal saline land [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- 19 姚荣江,杨劲松. 基于电磁感应仪的黄河三角洲地区土壤盐分时空变异特征[J]. 农业工程学报,2008,24(3):107 ~ 113.  
Yao Rongjiang, Yang Jingsong. Spatio-temporal variability of soil salinity in the Yellow River Delta using electromagnetic induction [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 107 ~ 113. (in Chinese)
- 20 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993.