

不同流量工况下斜流泵内部流场 PIV 试验

施卫东<sup>1,2</sup> 季磊磊<sup>1,2</sup> 李伟<sup>1,2</sup> 邵佩佩<sup>1,2</sup> 李维强<sup>1,2</sup> 蒋小平<sup>1,2</sup>

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 镇江 212013)

**摘要:** 为了探索斜流泵的内部流动特性并优化斜流泵设计, 基于粒子图像测速技术 (PIV) 对斜流泵内部流场进行测量, 分析了不同相位叶轮截面处的流线和速度分布以及小流量工况下的涡量分布。研究表明, 在小流量工况下, 由于受到叶片压力面旋涡流动和吸力面脱流的影响, 叶轮内部的流动呈现径向运动趋势, 且流动紊乱; 随着流量增大, 叶轮流场流线逐渐向轴向方向移动并沿着轮毂轮廓线流动, 在大流量工况下叶片压力面附近靠近端壁处形成明显的旋涡结构。0.6 倍流量工况下, 当叶轮进口进入拍摄断面时, 在叶轮内部形成一个顺时针旋转的负涡; 当叶轮出口进入拍摄断面时, 在导叶进口外缘出现正向涡量集中区域, 且随着叶轮的转动该区域向导叶进口方向移动; 当叶片出口远离拍摄断面时, 在导叶进口处出现负涡量区, 揭示了斜流泵叶轮和导叶动静相干过程中能量损失的内在原因。

**关键词:** 斜流泵; 多工况; 涡量; 粒子图像测速

**中图分类号:** TH313      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0027-07

PIV Experiment on Internal Flow Field of Mixed-flow Pump  
under Different Flow Conditions

Shi Weidong<sup>1,2</sup> Ji Leilei<sup>1,2</sup> Li Wei<sup>1,2</sup> Shao Peipei<sup>1,2</sup> Li Weiqiang<sup>1,2</sup> Jiang Xiaoping<sup>1,2</sup>

(1. *Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*

2. *National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

**Abstract:** In order to explore the internal flow characteristics of mixed-flow pump and optimize and improve the design method of the mixed-flow impeller and guide vane, the internal flow field of mixed-flow pump was measured based on the particle image velocimetry (PIV). The streamline and velocity distribution of impeller section at different phases and the vorticity distribution under small flow rate conditions were analyzed. The results showed that radial trend of flow was appeared in the impeller due to influence of vortex flow on the blade pressure surface and flow separation of suction surface under small flow rate conditions, and the flow was turbulent. With the increase of flow rate, the streamline was turned gradually in the axial direction and flows along with the contour line of hub. Under the large flow rate conditions, the vortex structures near blade pressure surface and close to the wall were obvious. At 0.6 times of the working condition, when impeller inlet came to the shooting section, clockwise rotation vortex was formed within the impeller; when impeller outlet came to the shooting section, the positive vorticity concentrated area appeared near the guide vane inlet edge and this region was moved in the inlet direction with rotation of impeller. When the blade outlet kept away from the shooting section, the negative vorticity concentrated area was appeared near the guide vane inlet. The causes of mixed-flow pump energy

收稿日期: 2015-12-25    修回日期: 2016-02-16

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51409127、51579118)、国家博士后科学基金项目 (2013M541614)、江苏省博士后基金项目 (1301062C)、江苏省六大大人才高峰项目 (HYZB-002)、镇江市农业支撑项目 (NY2013031)、江苏高校优势学科建设工程项目和江苏大学高级专业人才能科研启动基金项目 (13JDG105)

**作者简介:** 施卫东 (1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: wdshi@ujs.edu.cn

**通信作者:** 李伟 (1979—), 男, 副研究员, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: lwjiangda@ujs.edu.cn

loss were revealed during the process of rotor-stator interaction between impeller and guide vane. The research results provided reference for revealing the internal flow characteristics and expanding the operation ranges of the mixed-flow pump.

**Key words:** mixed-flow pump; multi-conditions; vorticity; particle image velocimetry

## 引言

斜流泵叶轮内部流动状况直接影响整台泵的性能<sup>[1-4]</sup>,对泵的安全运行、噪声振动、过流部件的磨损等都有重要影响。因此,研究斜流泵内叶轮和导叶处的流场,对深入研究斜流泵内部流动规律,改进斜流泵设计具有重要意义。

粒子图像测速技术(PIV)是一种现代显示技术,它是激光技术、现代光学、电子技术以及信息处理技术相结合的成果,兼有定量测量和定性显示的能力。它能够获取观察域内某一时刻的整个流动信息,进而得到流场的速度矢量分布,已广泛应用于非定常三维复杂流动结构的实时显示和测量中<sup>[5-8]</sup>。迄今为之,国内外学者采用不同的方法对叶片式机械内部流动进行了大量的研究<sup>[9-12]</sup>。陈斌等<sup>[13]</sup>通过对低比转数潜水排污泵的内部流场进行PIV试验,发现在不同流量工况下,叶片压力面一侧均存在一定脱流现象,叶片出口的“射流-尾迹”现象也最为明显。杨华等<sup>[14]</sup>采用二维PIV对离心泵蜗舌附近旋转叶轮内的流场进行了测量,研究表明小流量工况时蜗舌对离心泵叶轮内部相对速度场影响最大。WU等<sup>[15]</sup>对设计流量下的离心泵内部流动进行了PIV试验,发现采用荧光粒子可以得到流场更加清晰的图像,同时还采用了DES数值方法对测量结果进行检验。但是,目前为止,关于斜流泵(混流泵)压力脉动方面的研究较多<sup>[16-20]</sup>,而关于其内部流动测试方面的研究相比离心泵和轴流泵方面的研究却较少。李伟<sup>[21]</sup>研究了斜流泵启动过程瞬态非定常内流特性,发现斜流泵启动过程的瞬态效应是叶轮加速度、管阻特性、流体惯性与内部流动结构共同作用的结果。席光等<sup>[22]</sup>利用PIV技术对设计流量及变流量工况下叶轮内部的流动进行了测量,研究表明混流泵在小流量工况下在叶顶和中间叶高截面内会出现回流现象。NAGAHARA等<sup>[23]</sup>利用高速摄影机及粒子跟踪速度仪(PIV)对斜流泵进口处的水下旋涡运动及旋涡周围速度分布进行了观察与测量,描述了旋涡强度和旋涡对水力性能影响之间的关系。

本文结合粒子图像测速技术,通过试验研究,分析了不同流量工况下三叶片斜流泵叶轮在不同相位下内部流场的变化规律,探讨流量变化对斜流泵叶

轮和导叶内流场的影响。

## 1 试验模型与装置

### 1.1 研究模型

本文试验所采用的高比转数斜流泵模型如图1所示,比转数 $n_s = 829$ ,叶轮叶片数 $Z = 3$ ,导叶叶片数 $Z_d = 5$ ,转速 $n = 1\,450\text{ r/min}$ ,叶顶间隙 $t = 0.25\text{ mm}$ 。泵进口段直径 $D_1 = 200\text{ mm}$ ,出口段直径 $D_4 = 250\text{ mm}$ 。设计流量 $Q = 456\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程 $H = 3\text{ m}$ ,工作介质为常温清水。

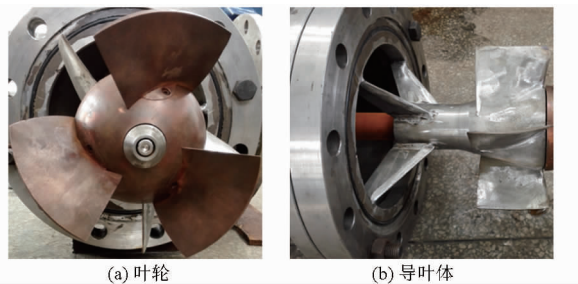


图1 斜流泵模型图

Fig.1 Model pictures of mixed-flow pump

叶轮和导叶部分外壳体采用折射率与清水相近的全透明有机玻璃材质制造,为了减小由光线在外壳外表面和内壁2次折射所带来的试验误差,将外壳设计成外方内圆形,使其便于试验拍摄。PIV试验模型如图2所示。为避免激光在叶轮表面造成漫反射而影响图像拍摄,在叶轮和导叶表面喷上黑色喷漆吸收激光,使得光源能够顺利清晰地射入所要观察和研究的流场区域。

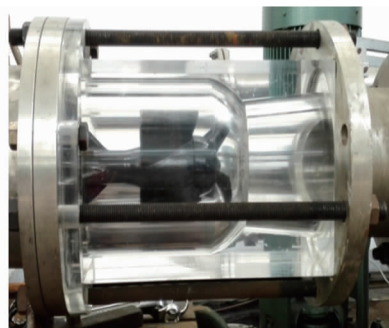


图2 PIV试验模型

Fig.2 Chamber model for PIV test

### 1.2 试验台

试验测量在江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心实验室的 $\Phi 250\text{ mm}$ 不锈钢轴(斜)流泵闭式试验台上进行,该试验台专门用于斜流泵、轴流泵

模型泵段及模型装置试验,试验装置系统如图 3 所示。转矩转速仪测量模型泵的轴转速、转矩和轴功率,进、出口压差传感器测量泵的扬程,涡轮流量计测量泵的流量,数据由计算机自动采集。转速仪和流量计测量误差分别为  $\pm 0.2\%$  和  $\pm 0.5\%$ ,压力变送器精度等级为 0.4 级,试验台达到 1 级精度要求。

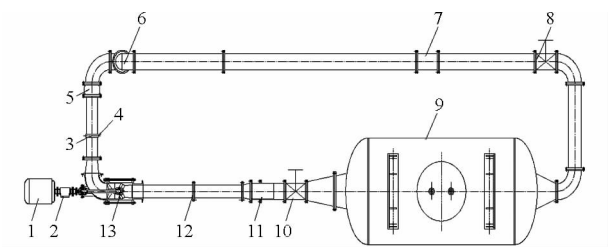


图 3 试验系统管路图

Fig. 3 Pipe diagram of test system

1. 电动机 2. 转矩转速仪 3. 出口测压段 4. 排气孔 5. 橡胶软接头 6. 增压泵 7. 涡轮流量计 8. 出口闸阀 9. 水箱  
10. 进口闸阀 11. 伸缩管 12. 进口测压段 13. 模型泵

1.3 试验装置

PIV 测量试验中,采用美国 TSI 公司的商业 PIV 系统,主要装置及设备包括 YAG200 – NML 型脉冲激光器、PIV 专用 630059POWVIEW 4MP 型跨帧 CCD 相机、610035 型同步控制系统、610015 – SOL 型光臂及其片光源系统、图像采集分析软件 Insight 3G 等。在外特性测量中使用了转矩转速传感器、压力变送器、涡轮流量计、HSJ – 2010 型水力机械综合测试仪、TPAM – V (转矩型) 泵产品测量仪等试验仪器和设备。试验中选择流体跟随性较好、品质较高的固体三氧化二铝粉作为示踪粒子。图 4 是模型泵 PIV 拍摄截面的示踪粒子原始图片。

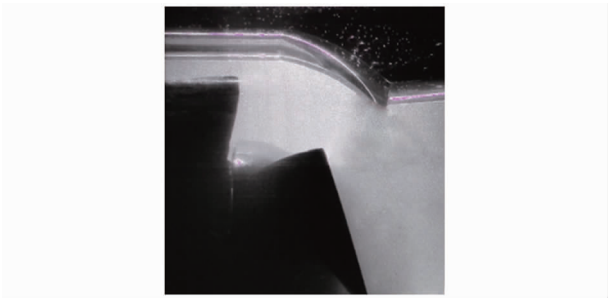


图 4 示踪粒子原始图

Fig. 4 Original figure of tracer particle

2 试验方法

2.1 外特性试验

按要求连接好所有设备,启动泵类产品测试系统并调试好软件,开始记录数据。将进、出口调节阀全开,开启增压泵,待增压泵频率达到 10 Hz 以上时再缓慢开启试验泵。通过变频器调节泵转速,转速达到 1 450 r/min 并稳定后接着通过增压泵将流量

调至大流量工况处。通过出口调节阀来控制泵运行的流量,每隔一个流量区间调节一次,当各参数变化不大时,开始记录试验数据,共测试 23 个工况点。为尽可能减小测量中的随机误差,关闭电源停机,待管路内流体重新稳定,进行上述 6 次重复性试验,并记录试验数据,最后取所得值的算术平均值作为试验所得实际值。

2.2 PIV 试验

本试验所用斜流泵模型叶片数为 3,沿圆周均匀分布,故选取一个流道时间为总拍摄时间,即叶轮转过 120°,约为 13.79 ms。在总时间内,叶轮每转过 10°为一个拍摄断面,约间隔 1.149 ms,每个断面拍摄 200 帧流场图像,共拍摄 13 个断面(图 5)将这些相位位置分别记为 0T、1T、2T、3T、4T、5T 一直到最后的 12T,在后面的结果分析时,只选取某些关键相位进行分析。使用 Insight 3G 软件将所获取的 200 帧粒子的绝对速度场图像进行速度场自相关处理,得到每张图上的瞬时相对速度矢量,而后导入 Tecplot 软件中计算处理,得到各个瞬时流场的相对速度场等。PIV 试验时需要注意的事项及试验步骤参照文献[24]。

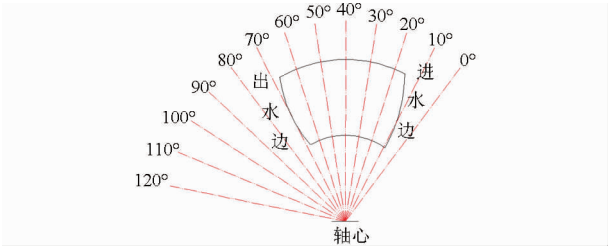


图 5 试验拍摄断面图

Fig. 5 Cross-sections under test

3 试验可靠性分析

为了准确地得到泵的外特性结果,对模型泵进行多次重复性试验,最终得到外特性试验结果如图 6 所示。可以看出,所进行的 6 次试验所得的扬程和效率曲线趋势基本完全一致,证明了本次试验可重复性好,试验所得结果可靠性高。此外,由试验可知,模型泵最高效率点所对应流量约为 433 m<sup>3</sup>/h,与之相应的扬程为 3.22 m,效率为 75.9%。

4 试验结果与分析

本次试验共拍摄 13 个断面,由于篇幅的限制,本文选取 2T 截面、4T 截面和 6T 截面 3 个具有代表性的截面位置处流场进行分析。2T 截面为叶轮叶片进口边刚好进入拍摄断面,4T 截面为叶轮叶片中间位置刚好转动至拍摄断面附近,6T 截面为叶轮叶片出口边即将转出拍摄断面。

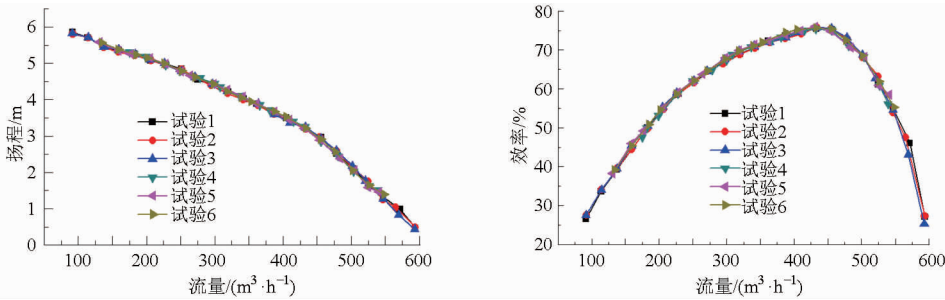


图6 模型泵外特性的重复性试验结果

Fig.6 Repetitive experiment results of external characteristics for model pump

4.1 相位为 2T 截面上的流场分布

图 7 为叶轮相位为 2T 时所拍摄的流场相对速度分布图,此时叶轮进口边已经进入拍摄断面。图中  $X$  为轴向距离, $Y$  为径向距离。从图中可以看出,小流量工况下,斜流泵内部流场比较紊乱,由于叶片压力面附近的旋涡以及叶轮出口靠轮毂附近叶片吸力面的脱流导致叶轮内流体基本沿径向运动,在导叶出口附近存在一个低速区(图中 A);在  $0.6Q_{opt}$  ( $Q_{opt}$  表示设计流量)工况下叶片压力面靠近间隙处流线由压力面通过间隙向吸力面运动(图中 B),可以预测在  $0.4Q_{opt}$  工况下该现象也存在,且从流速和流线趋势看,泄漏量有所增加。随着流量增大,叶轮和导叶内流体的相对速度也增大,叶轮流场流线逐渐向轴向方向移动并基本沿着轮毂的轮廓线流动,导叶出口处低速区逐渐消失,导叶内流线也基本呈轴向均匀分布,流动状态较好。同时,流线扭曲位置逐渐向端壁附近移动,在叶片压力面附近靠近管壁处形成明显的旋涡结构(图中 C),这是由来自上级间隙的叶顶泄漏涡造成的。

4.2 相位为 4T 截面上的流场分布

图 8 为叶轮叶片中间位置进入拍摄断面的流场相对速度分布图。从整体看,4T 截面上的流场分布与 2T 相差不大,但是速度云图显示,相同相位处叶轮内流体的相对速度略有增加。在小流量工况下,

由于叶片压力面附近的旋涡以及叶轮出口靠轮毂附近叶片吸力面的脱流导致导叶进口流线扭曲,叶轮内部流线也都沿径向分布;相比 2T 截面,吸力面脱流范围略有增大且向叶轮出口移动,流线径向偏转程度比相位为 2T 截面略有减轻。在  $0.5Q_{opt}$  流量工况时,叶片压力面靠近间隙处流线由压力面通过间隙向吸力面运动。随着流量增大,叶片压力面附近发生二次流的位置沿径向向外移动,同时在叶轮内存在一个明显的旋涡,相比 2T 截面,此时旋涡的卷吸程度减弱,泄漏涡耗散,沿径向向外移动。

4.3 相位为 6T 截面上的流场分布

图 9 为叶轮叶片靠近出口边位置进入拍摄断面的流场相对速度分布图。从整体看,6T 截面上的流场分布与上述 2 个截面流场分布相差不大,但在 6T 截面上,流体在叶轮内的相对速度又有所增加,而导叶内的速度变化不大。在小流量工况下,叶片吸力面脱流形成的旋涡使得该处的流线依然扭曲,但与 4T 截面相比,旋涡中心向导叶内部移动。在 6T 截面上,叶轮内部沿径向分布的流线与 4T 截面相比径向偏转程度略有减轻。流量增大使得叶轮内部流动变得稳定,流线分布更为均匀,但此相位处的间隙泄漏量较弱,相同流量下流线扭曲位置较 2T 和 4T 相位处更加靠近端壁,在大流量工况下旋涡结构卷吸程度明显减弱,泄漏涡扩散严重,涡强度减弱。

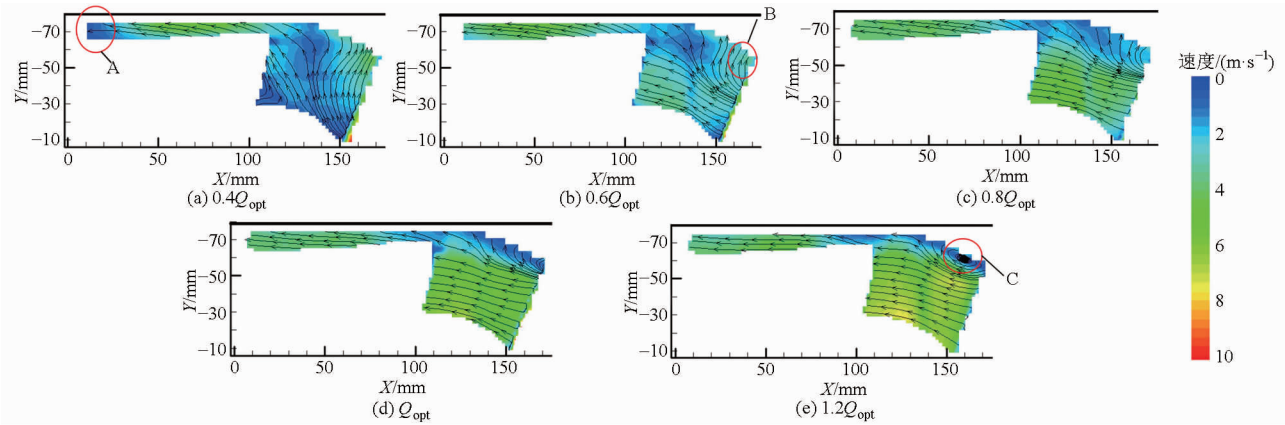


图7 相位 2T 处 PIV 测量结果

Fig.7 PIV measurement results at phase 2T

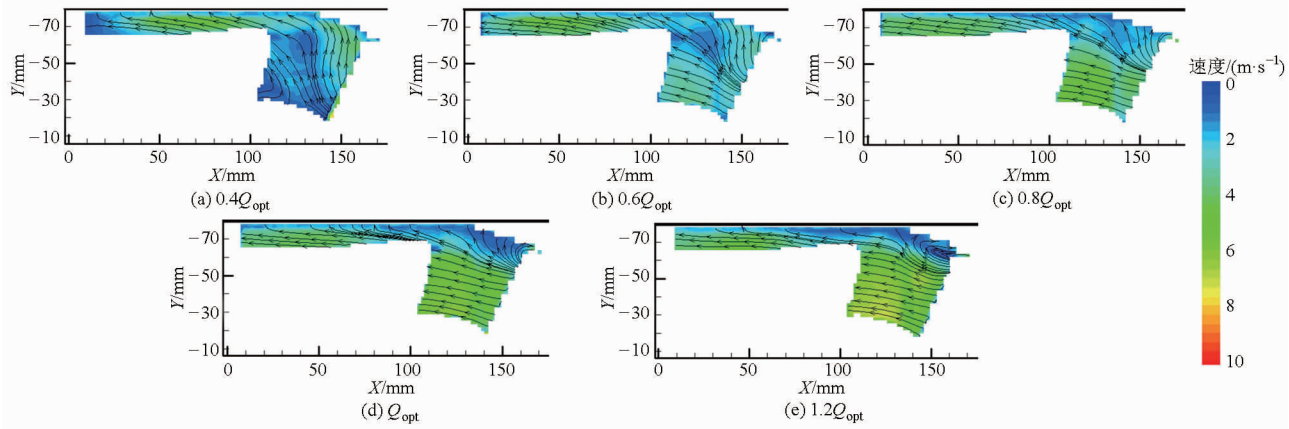


图 8 相位 4T 处 PIV 测量结果  
Fig.8 PIV measurement results at phase 4T

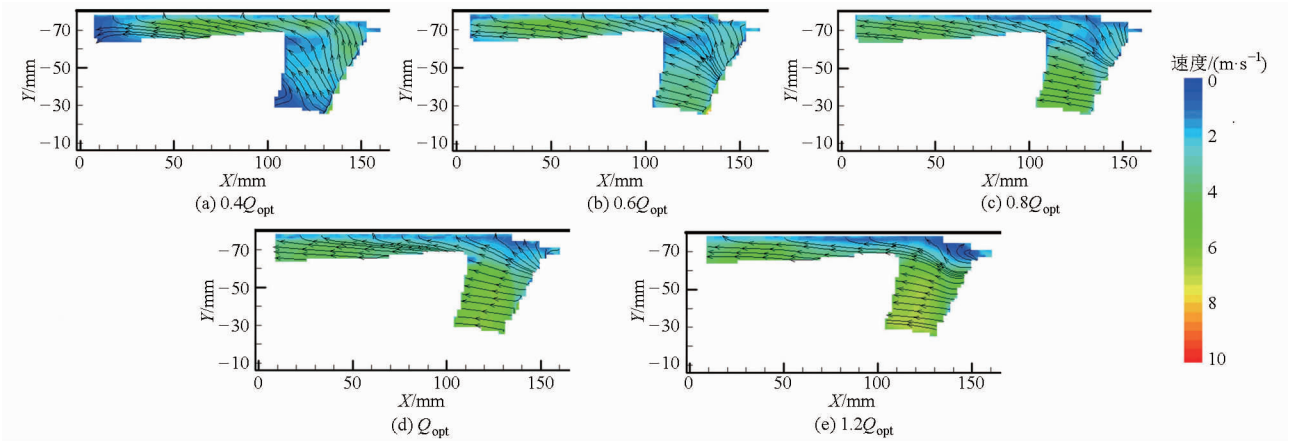


图 9 相位 6T 处 PIV 测量结果  
Fig.9 PIV measurement results at phase 6T

4.4 小流量工况下的涡量分布

图 10 所示为  $0.6Q_{opt}$  流量工况下,不同相位拍摄断面的涡量场分布。相位 0T 时叶轮还未进入拍摄断面,轮毂附近的流线较均匀,但叶轮端壁区的流动较为紊乱,由于逆压梯度的影响在叶轮进口外缘形成一个顺时针旋转的负涡(图中 A)。从相位 2T 时开始,叶轮进入拍摄断面,流体从叶片压力面向叶片吸力面流动,产生间隙泄漏流(图中 B)。当叶轮

转至相位 4T 时,在导叶靠近壁面处有很大区域的负涡量(图中 C),此处是由有机玻璃折射造成的不真实信息。随着叶轮转动到相位 6T 时,叶轮出口边即将离开拍摄面,此截面上涡量分布较为均匀,除反射影响外,涡量基本都为正值,流体流动状态也较好,但在导叶前部观察到一个由径向流动碰到叶轮室反射引起的正向涡量较为集中区域(图中 D)。叶轮继续旋转到相位 8T 时,叶轮出口边已离开拍摄面,

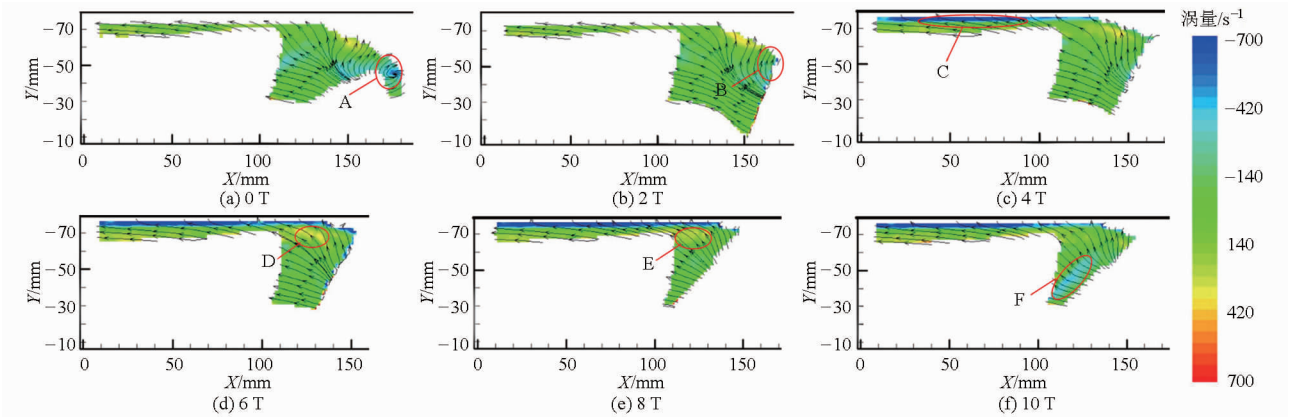


图 10 小流量工况下不同拍摄断面上的涡量分布  
Fig.10 Vorticity distribution at different shooting sections under small flow rate conditions

此时在叶轮内流体流动状态基本稳定,导叶前部也存在一正向涡量集中的区域,但相比前一相位,该区域向导叶进口方向移动(图中E)。当叶轮转到相位10T,导叶进口处观察到一个涡量为负值的区域(图中F)。同时叶片出口边外缘受到叶片尾迹影响出现顺时针旋涡。

本文还对  $0.3Q_{opt} \sim 1.2Q_{opt}$  拍摄断面上的涡量进行了分析,发现流量小于  $0.6Q_{opt}$  流量工况时,沿着叶轮进口到出口,压力面下游上级叶片泄漏流造成的涡量从正值逐渐增大,说明旋涡强度在逐渐增强;而流量大于  $0.7Q_{opt}$  流量工况时涡量从负值向零逐渐增大,说明旋涡强度在逐渐减弱,旋涡不断耗散。

## 5 结论

(1)分析 2T、4T、6T 拍摄断面上的流场分布,研究发现,在小流量工况下,由于受到上级泄漏涡以及叶片吸力面脱流的影响,叶轮内流体基本上都是沿

径向流动的;随着流量的增大,各个截面流场的流线分布变得均匀,在设计工况附近流体基本沿着轮毂轮廓流动。在大流量时,受上级叶顶泄漏涡影响在叶片压力面靠近端壁处形成明显旋涡结构。

(2)分析小流量工况下不同断面上的涡量分布,研究发现,当叶轮进口位于拍摄断面附近时,在叶轮进口外缘形成一个顺时针旋转的负涡。当叶轮出口位于拍摄断面附近时,导叶进口外缘存在一正向涡量集中的区域,且随着叶轮的转动该区域向导叶进口方向移动。当叶片出口远离拍摄断面时,在导叶进口处存在一个负涡量区。

(3)揭示了不同工况下斜流泵内部流动特性及叶轮和导叶相干流场的演化过程。研究发现,小流量工况下斜流泵内部流动旋涡结构明显增多,水力损失增加,叶轮和导叶的动静相干对流场影响较大。为了改善斜流泵内部流场和性能,斜流泵需尽量避免在小流量工况下运行并在优化设计时充分考虑动静干涉的影响。

## 参 考 文 献

- 1 潘中永,李俊杰,李晓俊,等.斜流泵不稳定特性及旋转失速研究[J].农业机械学报,2012,43(5):64-68.  
PAN Zhongyong, LI Junjie, LI Xiaojun, et al. Performance curve instability and rotating stall[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5):64-68. (in Chinese)
- 2 施卫东,邹萍萍,张德胜,等.斜流泵性能预测与叶轮进出口环量分析[J].农业机械学报,2011,42(9):94-97.  
SHI Weidong, ZOU Pingping, ZHANG Desheng, et al. Performance prediction and circulation distribution analysis at impeller inlet and outlet of mixed-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):94-97. (in Chinese)
- 3 李伟,杨勇飞,施卫东,等.基于双向流固耦合的混流泵叶轮力学特性研究[J].农业机械学报,2015,46(12):82-88.  
LI Wei, YANG Yongfei, SHI Weidong, et al. Mechanical properties of mixed-flow pump impeller based on bidirectional fluid-structure interaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):82-88. (in Chinese)
- 4 常书平,石岩峰,周晨,等.出口环量分布对混流泵性能的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):89-93.  
CHANG Shuping, SHI Yanfeng, ZHOU Chen, et al. Effects of exit circulation distribution on performances of mixed-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):89-93. (in Chinese)
- 5 刘超,梁豪杰,金燕,等.立式轴流泵进水流场 PIV 测量[J].农业机械学报,2015,46(8):33-41.  
LIU Chao, LIANG Haojie, JIN Yan, et al. PIV measurements of intake flow field in axial-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8):33-41. (in Chinese)
- 6 权辉,李仁年,苏清苗,等.基于 PIV 测试的螺旋离心泵内部流动特性研究[J].农业机械学报,2015,46(4):28-32, 58.  
QUAN Hui, LI Rennian, SU Qingmiao, et al. Internal flow characteristic of screw centrifugal pump based on PIV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):28-32, 58. (in Chinese)
- 7 任芸,吴登昊,刘厚林,等.离心泵内部不稳定流动的 PIV 测试[J].农业机械学报,2015,46(2):46-51.  
REN Yun, WU Denghao, LIU Houlin, et al. PIV experiment on flow instabilities in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):46-51. (in Chinese)
- 8 陈斌,张华,施卫东,等.超厚叶片低比转数无过载排污泵数值计算与 PIV 实验[J].农业机械学报,2012,43(5):74-78.  
CHEN Bin, ZHANG Hua, SHI Weidong, et al. Numerical calculation and experiment of non-overload low specific speed sewage pump with super-thick blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5):74-78. (in Chinese)
- 9 祝磊,袁寿其,袁建平,等.不同型式隔舌离心泵动静干涉作用的数值模拟[J].农业工程学报,2011,27(10):50-55.  
ZHU Lei, YUAN Shouqi, YUAN Jianping, et al. Numerical simulation for rotor-stator interaction of centrifugal pump with different tongues[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10):50-55. (in Chinese)
- 10 李仁年,韩伟,李琪飞,等.间隙对螺旋离心泵性能影响的预测及试验[J].农业机械学报,2007,38(6):79-81.  
LI Rennian, HAN Wei, LI Qifei, et al. Prediction and experiment about the effect of the clearance on performance of screw centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6):79-81. (in Chinese)

- 11 袁寿其,胡博,陆伟刚,等. 中比转数离心泵多工况设计[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(5):497-502.  
YUAN Shouqi, HU Bo, LU Weigang, et al. Multi- operating-condition design of centrifugal pump with medium specific speed [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(5): 497-502. (in Chinese)
- 12 施卫东,龙飞,张德胜. 潜水轴流泵内部固液两相流动的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(5):508-512.  
SHI Weidong, LONG Fei, ZHANG Desheng. Numerical simulation of solid liquid two phase turbulent flow in submersible axial flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(5): 508-512. (in Chinese)
- 13 陈斌,张华,施卫东,等. 低比转数潜水排污泵的内部流场 PIV 试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(7):575-579.  
CHEN Bin, ZHANG Hua, SHI Weidong, et al. PIV experimental study on flow field in submersible sewage pump with low specific speed[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(7): 575-579. (in Chinese)
- 14 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)
- 15 WU Yulin, LIU Shuhong, YUAN Huijing, et al. PIV measurement on internal instantaneous flows of a centrifugal pump[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(2): 270-276.
- 16 张德胜,施卫东,王川,等. 斜流泵叶轮和导叶叶片数对压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(2):167-170.  
ZHANG Desheng, SHI Weidong, WANG Chuan, et al. Influence of impeller and guide vane blade number on pressure fluctuation in mixed-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 167-170. (in Chinese)
- 17 施卫东,邹萍萍,张德胜,等. 高比转速斜流泵内部非定常压力脉动特性[J]. 农业工程学报,2011,27(4):147-152.  
SHI Weidong, ZOU Pingping, ZHANG Desheng, et al. Unsteady flow pressure fluctuation of high-specific-speed mixed-flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 147-152. (in Chinese)
- 18 王春林,贾飞,吴志旺,等. 高比转数混流泵非定常流场压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(2):103-108.  
WANG Chunlin, JIA Fei, WU Zhiwang, et al. Pressure fluctuation of unsteady flow in high specific speed mixed-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(2): 103-108. (in Chinese)
- 19 黎义斌,李仁年,王秀勇,等. 低比转速混流泵压力脉动特定的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(3):205-209.  
LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical analysis of pressure fluctuation in low specific speed mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 205-209. (in Chinese)
- 20 黎义斌,李仁年,王秀勇,等. 混流泵内部流动不稳定特性的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(5):384-389.  
LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical simulation of unstable characteristics in head curve of mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 384-389. (in Chinese)
- 21 李伟. 斜流泵启动过程瞬态非定常内流特性及实验研究[D]. 镇江:江苏大学,2013.  
LI Wei. Experimental study and numerical simulation on transient characteristics of mixed-flow pump during starting period[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- 22 席光,卢金铃,祁大同. 混流泵叶轮内部流动的 PIV 实验[J]. 农业机械学报,2006,37(10):53-57.  
XI Guang, LU Jinling, QI Datong. Experimental study on the flow in mixed pump impeller by PIV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 53-57. (in Chinese)
- 23 NAGAHARA T, SATO T, OKAMURA T. Effect of the submerged vortex cavitation occurred in pump suction intake on hydraulic forces of mixed flow pump impeller[C]//CAV2001: 4th International Symposium on Cavitation, 2001:1-8.
- 24 张华. 轴流泵内部流场数值计算及实验研究[D]. 镇江:江苏大学,2012.  
ZHANG Hua. Numerical simulation and experimental research on the internal flow field of axial-flow pump [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- 25 潘强,施卫东,张德胜. 鱼友好型轴流泵流场数值分析与汽蚀性能优化[J]. 农业机械学报,2016,47(4):15-21.  
Pan Qiang, Shi Weidong, Zhang Desheng. Numerical analysis of flow field and cavitation performance optimization of fish-friendly axial-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 15-21. (in Chinese)