

基于 PIV 测试的螺旋离心泵内部流动特性研究*

权辉^{1,2} 李仁年^{1,2} 苏清苗³ 韩伟^{1,2} 蒋雷^{1,2} 金毅^{1,2}

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050;
3. 兰州华宇航天技术应用有限责任公司, 兰州 730000)

摘要: 为了研究螺旋离心泵内部流体流动机理,通过对螺旋离心泵改造和透明化处理,应用 PIV 测试技术,取螺旋离心泵轴截面和径向截面分阶段获得各截面上速度变化,进而得到各个截面上的流动信息,揭示螺旋离心泵内部流动状态。结果表明:整个轴向截面中,物理参量扰动大于径向截面,尤其在叶轮流道的轴截面,有明显的涡旋出现。在深入蜗壳的叶轮流道中,涡旋数量明显增加,这是因为该区域的流体方向在叶轮旋转和蜗壳使其变化过程中,同时受力分配促进了这种变化;在径向截面上,能明显看到速度方向和流线沿一个方向旋转,同时,流体均有由中心向外运动的趋势,这是叶轮螺旋段螺旋推进作用后又一个重要组成部分离心段的离心力作用决定的,叶轮的螺旋段螺旋推进作用和离心段的能量转换相互配合,构成了螺旋离心泵工作的过程。

关键词: 螺旋离心泵 内部流动特性 截面 粒子图像测速

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0028-05

Internal Flow Characteristic of Screw Centrifugal Pump Based on PIV

Quan Hui^{1,2} Li Rennian^{1,2} Su Qingmiao³ Han Wei^{1,2} Jiang Lei^{1,2} Jin Yi^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China
2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou 730050, China
3. Lanzhou Huayu Space Technology Applications Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to research the internal flow mechanism of screw centrifugal pump, the PIV testing technology was used after the pump was improved with the transparent handling. The velocities of shaft section and radial section at different stages were obtained. The flow of each section was received and then the internal flow in screw centrifugal pump was revealed. The results showed that the perturbation of physical parameters at the whole shaft section was bigger than the one at radial section. The vortex was appeared obviously at shaft section of impeller passage and the vortex volume increased significantly in the impeller passage which was deep into volute. With the depth of the fluid flow, it caused fluid force reallocation by the spiral vane segment. At radial section, velocity was rotated along with the direction of the flow line. Simultaneously, there was a trend that fluid moved from the center to the outside due to the centrifugal force from the centrifugal section, which played an important role after the spiral section. The spiral propulsion of spiral section and the energy conversion of centrifugal section were cooperated with each other to make up the working process of screw centrifugal pump.

Key words: Screw centrifugal pump Internal flow characteristic Section Particle image velocimetry

引言

螺旋离心泵作为一种具有特殊结构的新型杂质泵,它将螺旋泵与离心泵二者的优势融合为一体,其

独特的结构可将两者的优势充分发挥。相比其他杂质泵,螺旋离心泵具有良好的无堵塞性、吸入性能、调节性能和抗汽蚀性能,并具有无过载、效率高及高效区宽等优点^[1-2]。

收稿日期: 2014-05-27 修回日期: 2014-07-03

* 国家自然科学基金资助项目(51079066,51209113)和甘肃省自然科学基金资助项目(0906ZTB093)

作者简介: 权辉, 博士生, 主要从事水力机械及多相流研究, E-mail: quan2010@163.com

通讯作者: 李仁年, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械理论与设计研究, E-mail: lirn@lut.cn

对螺旋离心泵内部流动的研究,在定性观察方面,田中等首先采用透明的有机玻璃蜗壳,对螺旋式离心泵的叶轮轮毂附近的流动状态进行了观察,结果证明,在叶轮轮毂处存在大量回流^[3]。依藤等采用油膜法进一步详细观察了泵的内部流动状态^[4]。You-Teak等研究了输送清水介质时螺旋离心叶轮与吸入盖板之间的间隙和叶片子午面对螺旋离心泵运行性能的影响,发现在螺旋离心泵内存在3个明显的回流区域,其中蜗壳向叶轮进口处的回流对泵的性能影响最大,减小叶轮出口至蜗壳进口之间的间隙有利于泵性能的提高^[5-6]。Tatebayashi等通过泵内部的回流,研究了叶片螺旋面对螺旋离心泵外特性的影响^[7]。国内对于螺旋式离心泵的研究始于20世纪90年代后期,郭乃龙等^[8]利用表面油流法对螺旋离心泵内部的水流流动进行了研究,通过流谱分析,揭示了表面奇点、分离线与再附着线等流动特征。李仁年等对螺旋离心泵在含沙水下性能变化和叶轮型线设计方面作了系统的研究^[9]。

本文通过流场瞬态测量诊断手段中的粒子图像测速技术,获得螺旋离心泵内部流动的速度场变化,作为定量研究螺旋离心泵内部流动机理的方法,并由此应用信息与图像处理技术获得涡量和流线等流场参量的变化,作为进一步研究螺旋离心泵内部流体非定常流动的论据。

1 PIV 测试技术原理及系统设计

1.1 PIV 测试技术原理

PIV 测速是基于最直接的流体速度测量方法。在已知的时间间隔 Δt 内,流场中某一示踪粒子在二维平面上运动,它在 x, y 两个方向的位移是时间 t 的函数。粒子图像测速技术原理如图 1 所示。该示踪粒子所在处水质点的二维速度可以表示为^[10]

$$\begin{cases} u = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ v = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} \end{cases} \quad (1)$$

在时间间隔 Δt 无限小时,即可得到该粒子的速度矢量,在通过计算机逐点处理可获得测试流场切面的速度场。

1.2 PIV 测试系统结构

PIV 测试系统主要包括:撒入示踪粒子被测流场、光学照明系统、图像采集和处理系统。

照明部分:采用 DANTEC 公司生产的双脉冲 Vlite-50 的 YAG 激光器,片光厚度 $d = 2 \text{ mm}$;示踪粒子:采用 MV-H2060 型玻璃微珠,粒径为 $20 \sim 30 \mu\text{m}$;成像部分:CCD 相机镜头为 NIKON,相机每

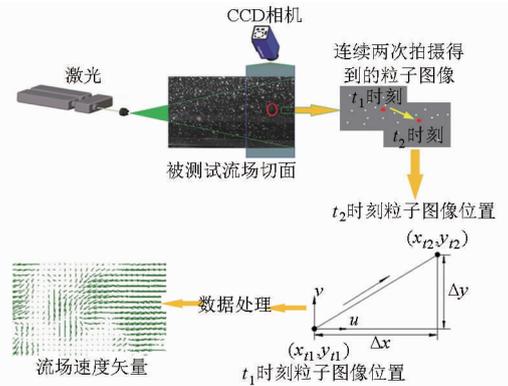


图 1 PIV 测试原理示意图

Fig. 1 PIV testing principle diagram

个像素的物理大小为 $7.4 \mu\text{m}$,相机分辨率为 1600×1200 ;Angtron-RE-38 型同步器。图像处理:Flow manager version 4.50.17 软件处理。帧捕集器将粒子图像数字化,并将连续图像储存到计算机的内存中。分析显示软件分析视频或照相图像,实时显示采样的图像数据,显示速度矢量场。

1.3 螺旋离心泵测试系统设计

鉴于 100LN-7 型螺旋离心泵良好的使用性能,选择 100LN-7 型螺旋离心泵为研究对象,其主要设计参数和叶片几何参数如下:设计流量 $Q = 78 \text{ m}^3/\text{s}$,扬程 $H = 7.3 \text{ m}$,转速 $n = 1455 \text{ r}/\text{min}$,轴功率 $P = 4 \text{ kW}$,效率 $\eta = 62\%$,必需汽蚀余量为 2 m ;叶片数为 1,进出口安放角 β_1, β_2 分别为 $15^\circ, 10^\circ$,叶片包角为 580° 。为了降低拍摄过程中光的散射,测试泵出口蜗壳断面为矩形,蜗壳外部设计为方形。

为便于 PIV 测试,对部分零部件进行了改造,进口部分(包括进口段、盖板)、叶轮和出口部件的蜗壳采用有机玻璃,使其具有很好的可视度。图 2 为螺旋离心泵及 PIV 测试平台。

1.4 测试流场环境

将整个测试区域、激光和 CCD 相机用 $5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ 的遮阳布遮起来,被测环境的光线尽可能处理得比较暗,以降低光的反射、散射等现象;为减小测试泵的振动,测试泵用地脚螺栓固定在水泥地面上,有效降低图像背景噪声大等现象。

通过以上处理,将测试环境对 PIV 的测试影响减小到最低,很好保证了 PIV 测试的成像质量。

2 螺旋离心泵 PIV 测试内容及方案

2.1 螺旋离心泵测试内容

通过 PIV 测试获得各截面流场信息。参考国内外泵内流场的测试方案^[11-14],测量窗口选择在同一回转面上的几个位置,包括:锥形吸入室、压水室以及泵前后盖板,具体见图 3。

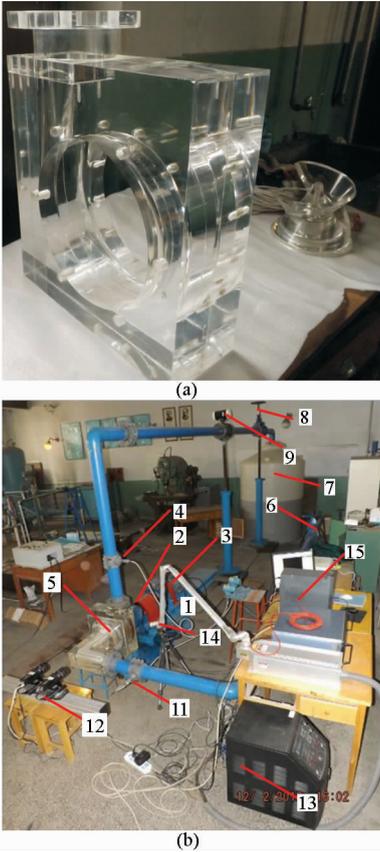


图2 螺旋离心泵及 PIV 测试实验平台
Fig. 2 PIV test experiment platform of screw centrifugal pump

(a) 透明部件 (b) PIV 测试平台

1. 100LN-7 型透明螺旋离心泵 2. 扭矩仪 3. 电动机 4. 进口测压装置 5. 进口水管 6. 闸阀 7. 蓄水桶 8. 手动调节阀 9. 电磁流量计 10. 出口管道 11. 出口测压装置 12. CCD 相机 13. 激光发射器 14. 激光头 15. PIV 图像处理系统

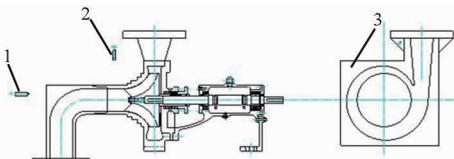


图3 螺旋离心泵测试示意图

Fig. 3 Test schematic diagram of screw centrifugal pump

1. 激光器 2. CCD 相机 3. 透明蜗壳

2.2 螺旋离心泵测试方案及截面

实验方案主要包括测量窗口和测试基准面设置。

2.2.1 方案 I —— 轴向入射测量方案

CCD 相机置于泵体径向窗口位置,垂直于片光源位置进行拍摄,通过径向移动片光源位置,可以照亮叶片表面不同半径方向的截面,可获得轴向和切向二维速度场,如图 4 所示。

2.2.2 方案 II —— 径向入射测量方案

泵进口管为透明有机玻璃,将 CCD 相机置于进口管轴向位置,垂直于片光源位置进行拍摄,通过轴

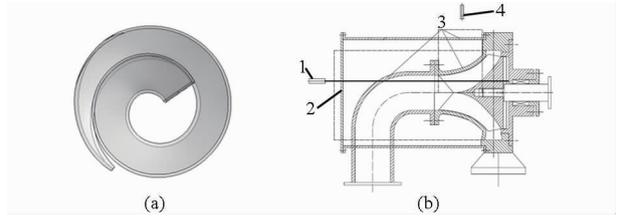


图4 方案 I 轴向入射测量模式

Fig. 4 Axial incident measurement model of scheme I

(a) 照亮与显示叶片区域 (b) 测试实验台结构

1. 激光发射器 2,3. 测试窗口 4. CCD 相机

向移动片光源位置,可以照亮叶片表面不同轴向的轴截面,可获得不同轴截面的径向及切向二维速度场,如图 5 所示。

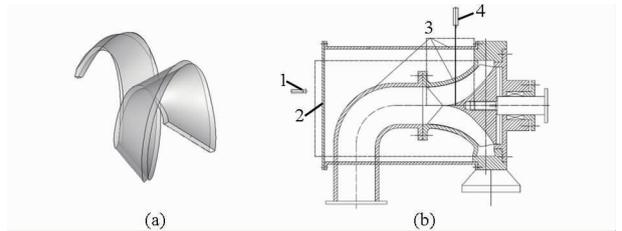


图5 方案 II 径向入射测量模式

Fig. 5 Radial incident measurement mode of scheme II

(a) 照亮与显示叶片区域 (b) 测试实验台结构

1. 激光发射器 2,3. 测试窗口 4. CCD 相机

3 螺旋离心泵流场测试结果及分析

3.1 螺旋离心泵测试截面及处理

为了更好地表征 100LN-7 型螺旋离心泵内部流体流动特性,选取与激光片光源垂直的轴截面和径向截面,通过 PIV 测试技术,获取这些截面上的物理量。选取的截面和其形状如图 6 所示。

3.2 测试结果及分析

图 7~10 是相机拍摄的图像进行处理得到各截面的绝对速度场、涡量特征及流线变化。图 7~8 中,颜色和箭头分别代表绝对速度的大小和方向;为分析流场特征,在速度场的基础上,处理得到流线变化;图 9~10 中,涡量以等值线形式表示。

3.2.1 各截面速度及流线变化

由图 7、图 8 中速度变化可以看出,在轴截面 A~D 的叶轮流道中,流体绝对速度由轴向向径向过渡,液流的轴向速度由大到小,径向速度则相反。而绝对速度变化时因为在螺旋段由于升力的逐渐增大,使得轴向速度增大,而随着离心段的到来,必须完成轴向向径向的过渡,导致绝对速度减小到一定值,随后在离心段,由于离心力的作用,速度有所提高并达到一个稳定值;叶轮上的速度变化比较均匀,呈螺旋状变化,叶片外缘的相对速度要高于轮毂侧的速度,隔舌处有明显的冲击现

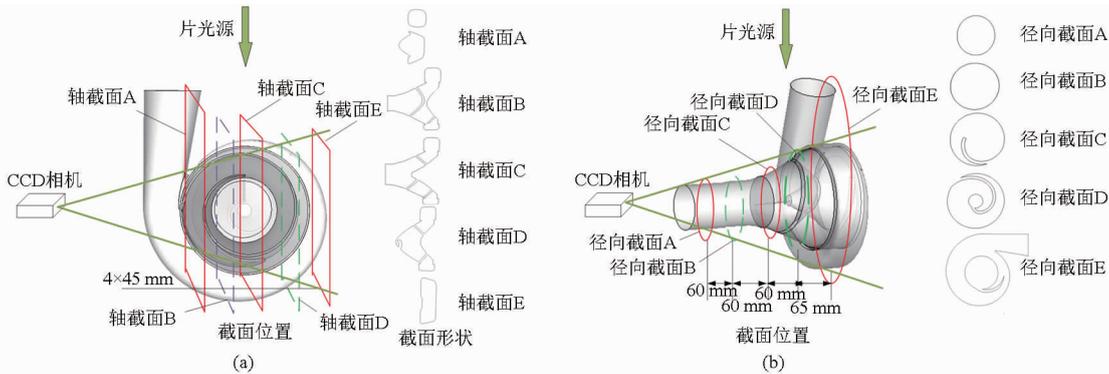


图 6 测试截面选取和截面形状示意图

Fig. 6 Test section selecting and section shape

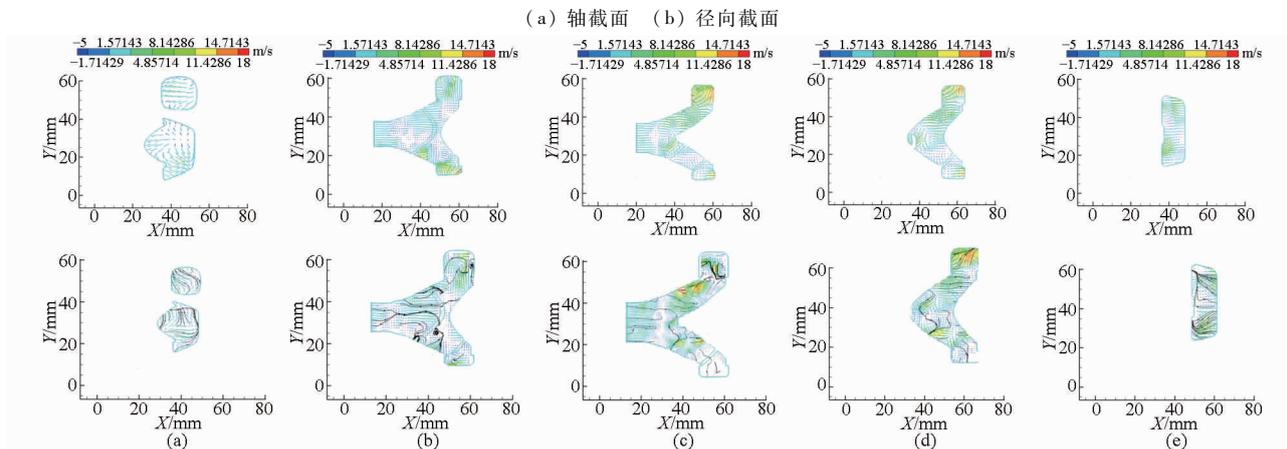


图 7 轴截面速度及流线变化

Fig. 7 Velocity and streamline change in axis section

(a) 轴截面 A (b) 轴截面 B (c) 轴截面 C (d) 轴截面 D (e) 轴截面 E

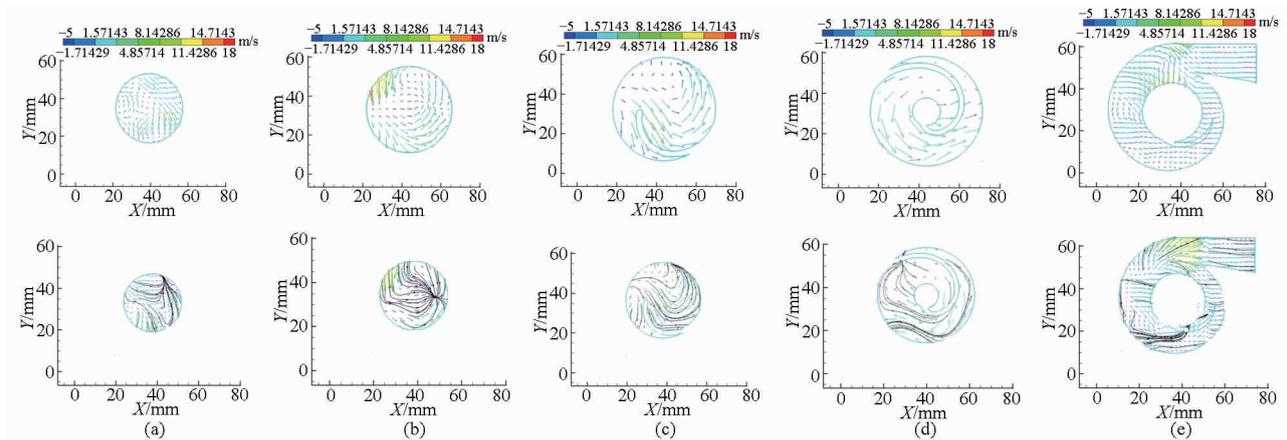


图 8 径向截面速度及流线变化

Fig. 8 Velocity and streamline change in radial section

(a) 径向截面 A (b) 径向截面 B (c) 径向截面 C (d) 径向截面 D (e) 径向截面 E

象,速度场更加紊乱。在轴截面 E 和径向截面中,可以明显看到,截面边缘的速度大于其他位置,主要是离心力的作用,同时,速度发生了相对“阻塞”和“扩散”,这是由于流道过流面积发生变化而引起的。

纵观图 7、图 8 中流线变化可以看出,各个测试截面上的流线均有一定的空白区域,这些区域即为

测试盲区。这主要是测试过程中,这些区域难以获得足够的物理参量,难以根据 PIV 测试算法获得流线;整个轴向截面中,流线扰动大于径向截面,尤其在叶轮流道的轴截面,有明显的涡旋出现,这是因为泵做功的主要部件为叶轮,符合泵的实际运行,在深入蜗壳中的叶轮流道中,涡旋数量明显增加,这是因为该区域的流体方向在叶轮旋转和蜗壳使其改变过

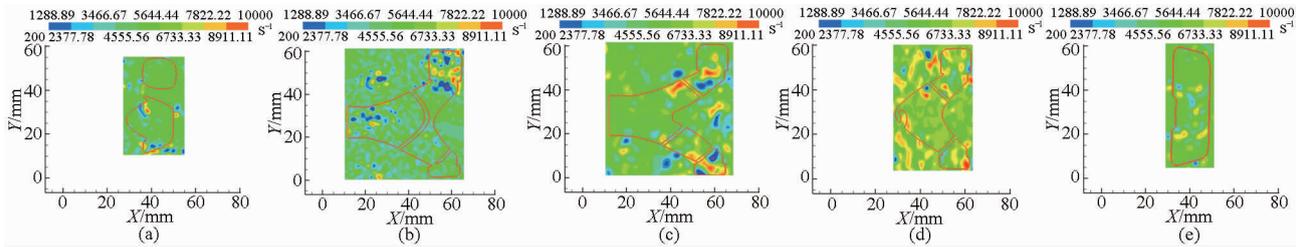


图9 轴截面涡量及流线变化

Fig. 9 Vorticity and streamline change in axis section

(a) 轴截面 A (b) 轴截面 B (c) 轴截面 C (d) 轴截面 D (e) 轴截面 E

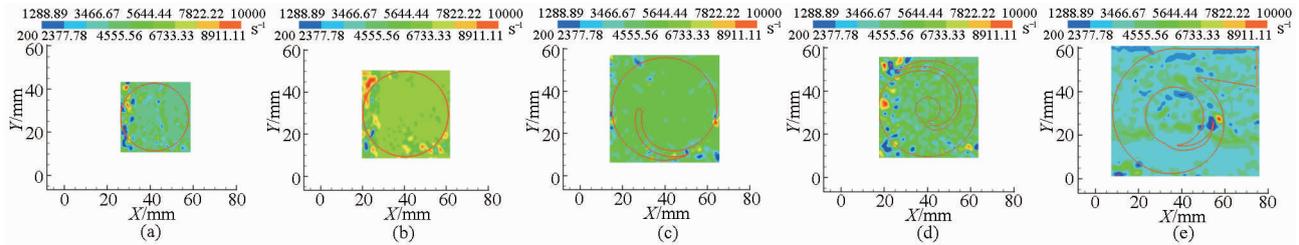


图10 径向截面涡量及流线变化

Fig. 10 Vorticity and streamline change in radial section

(a) 径向截面 A (b) 径向截面 B (c) 径向截面 C (d) 径向截面 D (e) 径向截面 E

程中,受力分配随时发生变化引起的;在径向截面上,能明显看到流线沿一个方向旋转,同时,流体均有由中心向外运动的趋势,这是由螺旋离心泵出口的一个重要组成部分螺旋推进作用决定的,使其流线沿一个方向旋转,而在离心力的作用下,流体又有向外运动的趋势,这正好揭示了螺旋离心泵工作的本质。

3.2.2 径向截面涡量特征

涡量表征旋涡运动的物理量,流体速度的旋度即为该流场的涡量,也就是说,涡旋通常用涡量来度量其大小和方向。在流体中,只要有“涡量源”,就会产生涡旋。根据 PIV 测试的速度场,应用 Tecplot 软件可得出流场的涡量特性,涡量表达式为^[15]

$$\omega_x i + \omega_y j + \omega_z k = \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) k \quad (2)$$

3.2.3 各截面涡量及流线变化

涡量的变化在一定的程度上可以说明螺旋离心泵内部流体非定常流动的特性。由图9、图10可以看出,除叶轮、轮毂以及叶轮头部的涡量变化较为明

显外,其他位置变化不大。对比图7、图8流线变化,在涡量变化较大的地方,均有涡旋出现或者有流线扰动现象,这表明这些位置极易促使涡旋的生成。

4 结论

(1) 叶轮进口段到螺旋段流道中,液流呈螺旋状变化,叶片外缘的速度要高于轮毂侧的速度,隔舌处有明显的冲击现象,速度场更加紊乱。

(2) 螺旋段向离心段过渡后,叶轮伸入蜗壳流道中的流体流线较为混乱,有出现涡旋的趋势以及在某些位置已经出现涡旋。

(3) 轴向截面和径向截面速度参量变化表明叶轮使得流体绝对速度由轴向向径向的过渡,液流的轴向速度由大到小,径向速度则相反。叶轮螺旋段螺旋推进作用后又受重要组成部分离心段的离心力作用,叶轮的螺旋段螺旋推进作用和离心段的能量转换相互配合,构成了螺旋离心泵的工作过程。

(4) 螺旋离心泵由于叶轮包角过大,使得测试区域泵部件曲率变化过大,导致出现测试盲区,难以获得完整的流场信息,这是螺旋离心泵测试技术的难点。

参 考 文 献

- 1 Stahle M, Jackson D. The development of a screw centrifugal pump for handling delicate solids[J]. World Pumps, 1982(2):53-55.
- 2 权辉,李仁年,苏清苗,等.基于型线的螺旋离心泵叶轮做功能力研究[J].机械工程学报,2013,49(10):156-162. Quan Hui, Li Rennian, Su Qingmiao, et al. Research on work capacity of screw centrifugal pump impeller based on profile lines [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(10):156-162. (in Chinese)
- 3 田中和博,荒井通晴,池尾茂.スクリュウ式遠心羽根車のラジアルスラスト[J].ターボ機械,1989,17(4):215-221.

- Huang Lai, Huang Piwei, Cheng Guibing, et al. Numerical simulation of flow field and leakage rate in labyrinth seal[J]. Hunan Electric Power, 2007, 27(4): 1-4. (in Chinese)
- 8 李志刚, 李军, 丰镇平. 迷宫密封泄漏特性影响因素的研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 16-20.
Li Zhigang, Li Jun, Feng Zhenping. Effects of gap pressure ratio and rotational speed on discharge behavior of labyrinth seal[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(3): 16-20. (in Chinese)
- 9 Kim T S, Cha K S. Comparative analysis of the influence of labyrinth seal configuration on leakage behavior[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(10): 2830-2838.
- 10 Moore J J. Three-dimensional CFD rotordynamic analysis of gas labyrinth seals[J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2003, 125(4): 427-433.
- 11 Ha T W, Choe B S. Numerical prediction of rotordynamic coefficients for an annular-type plain-gas seal using 3D CFD analysis [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(2): 505-511.
- 12 Deng Q H, Niu J F, Feng Z P. Study on leakage flow characteristics of radial inflow turbines at rotor tip clearance[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(8): 1125-1136.
- 13 王文全, 闫妍, 张立翔. 混流式水轮机跨尺度流道内复杂湍流的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(23): 132-138.
Wang Wenquan, Yan Yan, Zhang Lixiang. Numerical simulation of complex turbulence in an across scale flowing passage of Francis turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(23): 132-138. (in Chinese)
- 14 李延频, 南海鹏, 陈德新. 冷却塔专用水轮机的工作特性与选型[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 175-179.
Li Yanpin, Nan Haipeng, Chen Dexin. Performance and type selection of special hydraulic turbine in cooling tower[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 175-179. (in Chinese)
- 15 董彦同, 梁武科. 含减压管的混流式水轮机转轮密封数值模拟[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(2): 224-227.
Dong Yantong, Liang Wuke. Numerical simulation on the Francis hydraulic turbine runner's sealing device & the relief pipes[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(2): 224-227. (in Chinese)
- 16 Jaw S Y, Chen C J. Present status of second-order closure turbulence models. I: overview [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(5): 485-501.

(上接第 32 页)

- 4 依藤. スケリ エー式スラリ ポンプの内部流れの観察[J]. 机论(B 编), 1988, 515: 55-62.
- 5 Yasushi Tatebayashi, Kazuhiro Tanaka, Toshio Kobayashi, et al. Pump performance prediction with tip clearance in screw-type centrifugal pump[C]. ターボ機械, 2003, 31(10): 582-589.
- 6 Svizher A, Cohen J. Holographic particle image velocimetry system for measurements of hairpin vortices in air channel flow[J]. Experiments in Fluids, 2006, 40(5): 708-722.
- 7 Tatebayashi Yasushi, Tanaka Kazuhiro. Influence of Meridian shape on screw-type centrifugal pump performance[C]//Proceedings of the 2002 ASME Joint U. S. -European fluids Engineering Conference, 2002: 769-776.
- 8 郭乃龙, 关醒凡. 表面油流法显示螺旋离心泵内部流动的研究[J]. 农业机械学报, 1997, 28(3): 29-34.
Guo Nailong, Guan Xingfan. Research on internal flow of screw centrifugal based on the display surface by oil flow method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(3): 29-34. (in Chinese)
- 9 李仁年, 陈冰, 韩伟, 等. 变螺距螺旋离心泵叶片型线参数方程的分析[J]. 排灌机械, 2007, 25(6): 1-3.
Li Rennian, Chen Bing, Han Wei, et al. Analysis of vane profile parameter equation for variable-pitch screw centrifugal pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(6): 1-3. (in Chinese)
- 10 Fouras A, Dusting J, Lewis R, et al. Three-dimensional synchrotron x-ray particle image velocimetry[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(6): 64916.
- 11 Novara M, Scarano F. A particle-tracking approach for accurate material derivative measurements with tomographic PIV[J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(8): 1-12.
- 12 Wereley S T, Meinhart C D. Recent advances in micro-particle image velocimetry[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42: 557-576.
- 13 Svizher A, Cohen J. Holographic particle image velocimetry system for measurements of hairpin vortices in air channel flow[J]. Experiments in Fluids, 2006, 40(5): 708-722.
- 14 Novara M, Scarano F. A particle-tracking approach for accurate material derivative measurements with tomographic PIV[J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(8): 1-12.
- 15 王小兵. 基于 PIV 的石油工程中螺旋流动研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2010.