

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.07.005

低比转数潜水排污泵的内部流场 PIV 试验研究

陈斌^{1,2}, 张华¹, 施卫东¹, 巴延庆², 董绵杰²

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 南京蓝深制泵集团股份有限公司, 江苏 南京 211500)



陈斌

摘要: 针对低比转数潜水排污泵的研究现状进行调研后发现, 目前主要的研究手段以数值计算为主, 缺乏对其内部流场的可视化试验研究, 因此, 为揭示低比转数潜水排污泵内部流场的物理结构及流场演化过程, 针对一比转数 $n_s = 60$ 的潜水排污泵进行结构改造后, 以透明的有机玻璃材料代替传统的金属材料, 以空心玻璃球作为示踪粒子, 进行了不同工况下的二维 PIV 测试. 试验结果表明: 在科氏力的作用下, 叶片进口吸力面上的相对速度大于压力面上的, 而叶片出口则相反; 在大流量工况下叶片进口边的速度梯度最大, 叶片出口的“射流-尾迹”现象也最为明显; 在不同流量工况下, 叶片压力面一侧均存在一定脱流现象, 该脱流区域随流量的减小向叶片出口方向移动, 并逐渐形成一个与叶片旋转方向相反的旋涡; 当流量为 $0.2Q_d$ 时, 该旋涡位于叶片流道出口中心, 并堵塞了大部分流道.

关键词: 潜水排污泵; 低比转数; PIV; 射流-尾迹; 脱流

中图分类号: S277.9; TH312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)07-0575-05

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.

PIV experimental study on flow field in submersible sewage pump with low specific speed

Chen Bin^{1,2}, Zhang Hua¹, Shi Weidong¹, Ba Yanqing², Dong Mianjie²

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Nanjing Lanshen Pump Co. Ltd., Nanjing, Jiangsu 211500, China)

Abstract: After the state-of-the-art investigations into low specific speed submersible sewage pumps were reviewed, it was found that the studies mainly focused on numerical calculations, while there is a lack of internal flow field visualization investigations. Therefore, the internal flow field in a submersible sewage pump with specific speed of 60 was measured by means of a 2D-PIV under different operating conditions to reveal the flow structure and development in the impeller from the inlet to the outlet. The pump original structure was modified with a transparent plexiglas to replace the conventional metal material, and the hollow glass spheres were severed as seeding particles for the PIV measurements. The experimental results show that the relative velocity on the blade suction surface near the blade inlet is greater than that on the blade pressure surface while this velocity profile is reverse near the blade outlet due to the Coriolis effect. The velocity gradient at the blade inlet is the largest, and the jet-wake phenomenon at the blade outlet is the most obvious at high flow rates. A flow separation was observed on the blade pressure surface at various flow rates; meanwhile, it moved towards the blade outlet and

收稿日期: 2012-11-09; 网络出版时间: 2013-07-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20130711.1047.002.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAF14B01); 江苏省第八批“六大人才高峰”项目(2011-ZBZZ002)

作者简介: 陈斌(1971—), 男, 江苏靖江人, 高级工程师(chenbin21cn@21cn.com), 主要从事流体机械及工程研究.

张华(1988—), 男, 江苏南京人, 博士研究生(通信作者, zhh091088@126.com), 主要从事流体机械及工程研究.

gradually developed into a vortex rotating in the direction of opposite blade rotation with decreasing flow rate. At $0.2Q_d$ operating point, the vortex is in the center of flow passage at the blade outlet and blocks most of the passage.

Key words: submersible sewage pump; low specific speed; particle image velocimetry; jet-wake; flow separation

低比转数排污泵被广泛应用于污水处理厂及市政工程等领域. 目前国内使用的排污泵多存在效率低、易过载等问题, 因此, 提高效率、解决易过载等问题成为学者关注的重点. 丛小青等^[1-3]从理论上推导了排污泵产生无过载轴功率的条件, 并通过正交试验研究了泵设计参数对性能的影响; 施卫东等^[4]对一新型排污泵进行优化设计, 取得了较好的无过载性能且高效区宽. 受污物通过能力的影响, 低比转数排污泵的设计存在诸多难点, 并且试验成本较高、设计周期较长. 目前, 国内的研究主要集中于理论推导和 CFD 数值计算等, 对低比转数排污泵内部流场的试验研究相对较少. 陈斌等^[5]结合 CFD 数值计算与 PIV 技术研究了设计工况下超厚叶片形式排污叶轮, 验证了数值计算的正确性, 但并未进行系统深入研究. Wang 等^[6], Kadambi 等^[7]和 Stickland 等^[8]也分别对双叶片泵、料浆泵和普通离心泵进行 PIV 试验研究, 并各自取得了相关成果.

文中在国内其他学者将 PIV 测试技术成功应用于泵领域^[9-12]的基础上, 针对一低比转数潜水排污泵, 应用 PIV 技术进行不同工况下试验研究, 以揭示排污泵内部流场物理结构及瞬态演变过程, 为排污泵的优化设计提供一定参考.

1 试验模型

原型泵性能设计参数分别为流量 $Q_d = 150 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 $H_d = 48 \text{ m}$, 转速 $n = 1450 \text{ r/min}$, 比转数 $n_s = 60$. 原型泵的外径为 385 mm , 考虑到 PIV 试验中模型加工成本及材料(有机玻璃)所承受的最大压力, 将原型泵按照 0.48 比例进行缩放. 缩放后的模型泵几何参数分别为叶片数 $Z = 3$, 叶轮外径 $D_2 = 185 \text{ mm}$, 叶片出口宽度 $b_2 = 20.02 \text{ mm}$, 叶片包角 $\phi = 195^\circ$, 叶片进口角 $\beta_1 = 14^\circ$, 叶片出口角 $\beta_2 = 17^\circ$. 最终 PIV 试验用泵的叶轮和蜗壳实体如图 1 所示. 另外, 由于 PIV 试验中, 要获得叶轮内部全流场的瞬时信息, 因此, 需要将泵段进行改装, 最终的过流部件包括半螺旋形吸水室、叶轮及蜗壳. 来流从水箱进入位于电动机一侧的半螺旋形吸水室, 然后进入叶

轮(叶轮入口朝向电动机), 最终通过蜗壳流出. 泵段的总装图如图 2 所示. 照相机从电动机的反方向进行拍摄.

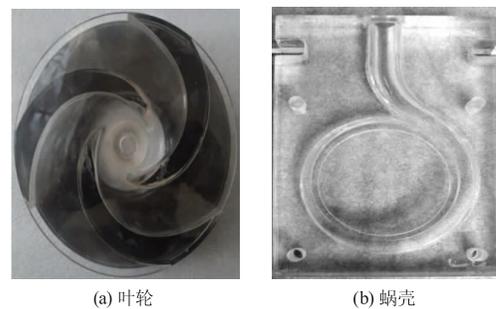


图 1 PIV 试验用泵的叶轮与蜗壳
Fig. 1 Impeller and volute of pump for PIV experiment

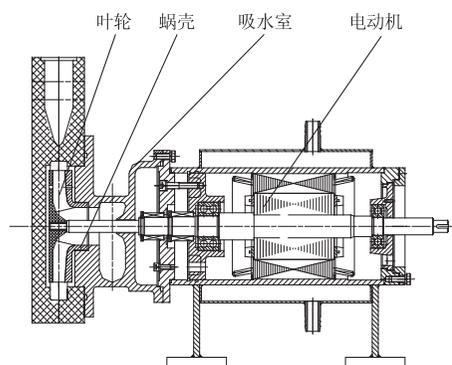


图 2 PIV 试验用泵总装图
Fig. 2 General assembly drawing of pump for PIV experiment

2 试验方法

2.1 外特性试验

模型泵进出口各采用 1 只 WT-1511 型智能电容型压力变送器进行压力采集, 流量的采集使用带二次仪表的电磁流量计. 由于试验泵采用变频启动, 因此选择 PF9833 型三相 PWM 专用测试仪进行电流、电压及功率的采集. 最终将这些采集设备连接到泵类产品测试系统.

2.2 PIV 试验

试验采用美国 TSI 公司生产的商用三维 PIV 系统, 其主要包括光源系统(YAG200-NWL 型脉冲激

光器、610015 - SOL 型导光臂和镜头组)、图像采集系统(高速图像采集板卡和 630059 型跨帧 CCD 相机)、同步控制系统(内触发和外触发模式)和后处理系统(Insight 3G、Matlab 和 Tecplot2008)等。

本试验进行 2D-PIV 采集,以轴编码器、联轴节、同步触发控制器和光纤传输转换器的综合使用完成同步效果. 试验现场如图 3 所示.



图 3 PIV 试验拍摄现场
Fig. 3 Photography of PIV test rig

PIV 试验要求示踪粒子的物理属性(密度、沉降性、跟随性及对光源的散射性等)与水接近,因此综合考虑,选择空心玻璃球作为示踪粒子. 空心玻璃球直径为 20 ~ 60 μm ,密度为 1.05 g/cm^3 . 所拍摄的光源及粒子效果如图 4 所示.

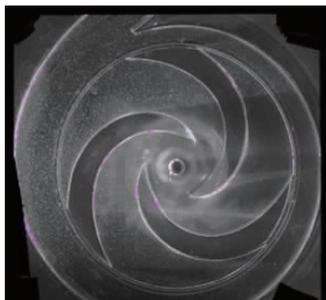


图 4 光源及示踪粒子
Fig. 4 Light source and seeding particle

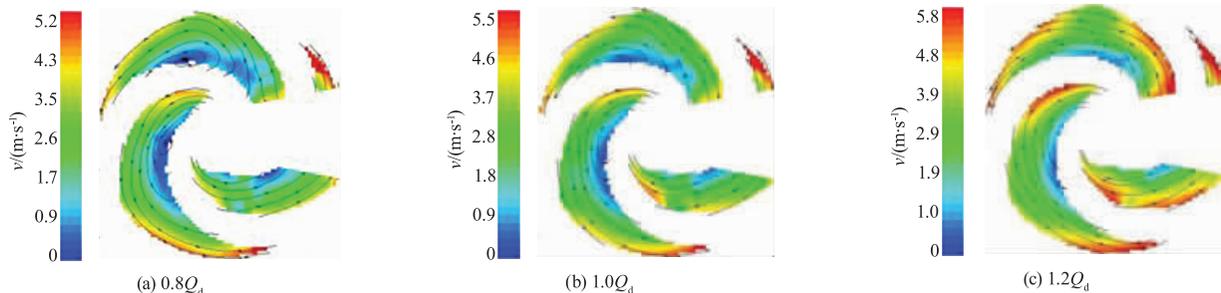


图 6 设计工况附近的相对速度云图及二维流线图
Fig. 6 Relative velocity contour and streamlines near design condition

由图 6 可以看出:在各个流量下,叶轮压力面附近均出现一定的脱流现象,且 1.2 Q_d 流量下脱流程

3 试验结果

3.1 外特性分析

外特性试验过程从关死点开始,对 18 个工况点的数据进行测量,每个工况点至少稳定 1 min 以上开始进行数据采集,功率采集为变频之后的功率,外特性试验结果如图 5 所示.可以看出:试验中的最高效率为 41.23%,该工况下的流量、扬程分别为 24 m^3/h 和 9.34 m,比转数 $n_s = 80.8$. 从试验结果可知,最高效率点偏向大流量工况,这是因为在水力模型设计之初采用了加大流量设计法,另外,试验中的效率为机组效率,并未扣除电动机损耗,且试验泵段比常规潜水排污泵增加了半螺旋吸水室过流部件,不仅吸水室自身存在一定的水力损失,还容易导致叶轮进口来流的不均匀,从而使得泵整体效率下降较多.

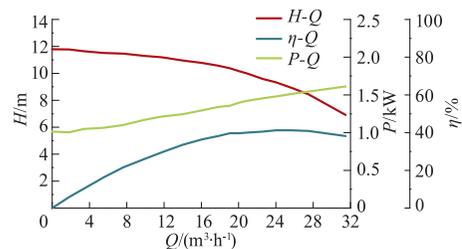


图 5 外特性试验曲线
Fig. 5 Experimental performance curves of pump

3.2 PIV 结果分析

3.2.1 相对速度场

在旋转的叶轮中,不仅存在离心力的作用,还存在流体的惯性力. 图 6 为设计工况附近叶轮的相对速度云图及二维流线.

度最弱,在 0.8 Q_d 流量下不仅脱流现象最严重,还出现了明显的旋涡,该旋涡的旋转方向与叶轮旋转方

向相反;3种流量下,叶片进口边靠近吸力面处的流动速度要明显高于压力面,在叶片进出口的速度梯度大,且随着流量的减小,该现象有减弱的趋势;在叶轮出口处,在 $1.2Q_d$ 流量时出口速度与圆周方向的夹角最大,在整个叶片流道中,流线基本上沿着叶片的型线方向。

3.2.2 叶轮出口处的速度系数

为了进一步揭示叶轮出口附近的流动特性,以转轴为圆心,半径为80 mm画圆,该圆与叶轮流道有3段交集,取其中正对光源的一段进行分析(为描述方便,将该段曲线取名“出口样条”,“出口样条”与吸力面的交点为A,与压力面的交点为B),并引入2个量纲一的参数分别为

$$r^* = \frac{\theta^* - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}}, \quad (1)$$

$$v_p = \frac{v^*}{\sum_i v_i/n}, \quad (2)$$

式中: $(\theta^* - \theta_{\min})$ 为“出口样条”上任意一点与点A之间对应的圆心角度; $(\theta_{\max} - \theta_{\min})$ 为“出口样条”所对应的圆心角度; v^* 为“出口样条”上所取点的相对速度大小; $\sum_i v_i/n$ 为“出口样条”上所有点的速度平均值.因此, r^* 代表了“出口样条”上任意一点在线条上的位置比例,而 v_p 代表了“出口样条”上任意一点的速度大小与该线条上平均速度大小的比值。

图7为不同流量下靠近叶轮出口的速度系数分

布.可以看出,在3个流量下,叶轮出口附近均存在一定的“射流-尾迹”现象, v_p 沿 r^* 的分布在吸力面附近(r^* 为 $0 \sim 0.5$)变化不大,都处在整个所取样条上速度系数的平均值以下,曲线分布斜率相对平缓.当 r^* 为 $0.5 \sim 1$ 时,随着流量的增大,曲线分布斜率上升明显, $1.2Q_d$ 流量下的斜率约为1。

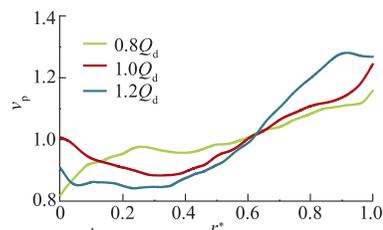


图7 靠近叶轮出口处的速度系数分布

Fig. 7 Velocity coefficient distribution near blade outlet

3.2.3 小流量下的旋涡结构

排污泵运行在小流量时往往振动噪声增大,因此本次试验对 $0.2Q_d \sim 0.6Q_d$ 之间的工况进行了测量,结果如图8所示。

由图可以看出,当流量进一步减小时,2个叶片流道中均出现了1个与叶轮旋转方向相反的旋涡,叶轮内部流场表现出较高的不对称性,位于第二象限的叶片通道的旋涡明显大于第三象限;当流量为 $0.6Q_d$ 时,该旋涡位于叶片2/3处,随着流量减小到 $0.4Q_d$ 时,旋涡运动到叶片出口靠近压力面位置,当流量为 $0.2Q_d$ 时,旋涡基本上处于叶片出口中心,阻塞了大部分流道出口。

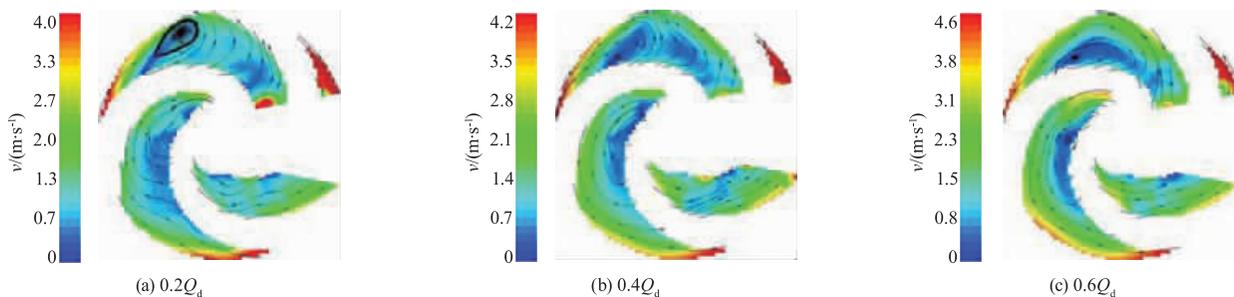


图8 小流量下的相对速度云图及二维流线图

Fig. 8 Relative velocity contour and streamlines at low flow rates

4 结论

1) 通过该试验装置及泵段改造能够取得较好的PIV试验效果。

2) 在不同流量下,叶片吸力面附近的相对速度系数分布受流量影响不大,叶片压力面的相对速度

系数曲线斜率随流量的增大而急剧上升。

3) 在各个流量下,该形式叶轮压力面附近都存在一定的脱流现象.随着流量的减小,该脱流区域不断发展,逐渐形成旋涡,并向叶片出口处移动,当流量为 $0.2Q_d$ 时,其中1个流道出口中心位置出现1个与叶轮旋转方向相反的旋涡,堵塞了大部分流道。

参考文献 (References)

- [1] 丛小青,袁寿其,袁丹青. 无过载排污泵正交试验研究 [J]. 农业机械学报,2005,36(10):66-69.
Cong Xiaoqing, Yuan Shouqi, Yuan Danqing. Research of latin square test on non-overload sewage pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10):66-69. (in Chinese)
- [2] 丛小青,袁寿其,袁丹青,等. 无过载排污泵理论与设计方法研究 [J]. 农业机械学报,2003,34(6):77-80.
Cong Xiaoqing, Yuan Shouqi, Yuan Danqing, et al. Theory and hydraulic design of non-overload sewage pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(6):77-80. (in Chinese)
- [3] 丛小青,袁寿其,袁丹青,等. 无过载排污泵水力设计方法 [J]. 排灌机械,2003,21(4):5-7.
Cong Xiaoqing, Yuan Shouqi, Yuan Danqing, et al. Design method of the non-overload sewage pumps [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2003,21(4):5-7. (in Chinese)
- [4] 施卫东,蒋婷,曹卫东,等. 高扬程无过载潜水排污泵的优化设计与试验 [J]. 农业工程学报,2011,27(5):151-155.
Shi Weidong, Jiang Ting, Cao Weidong, et al. Optimal design and experiment on a high-head non-overload submersible sewage pump [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):151-155. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] Wang Kai, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. Numerical simulation and stereo PIV test of inner flow in a double blades pump [C]//Proceedings of the 2011 ASME - JSME - KSME Joint Fluids Engineering Conference. Hamamatsu, Japan:[s. n.], 2011.
- [7] Kadambi J R, Charoenngam P, Subramanian A. Investigations of particle velocities in a slurry pump using PIV. Part I: The tongue and adjacent channel flow [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2004,126(4):271-278.
- [8] Stickland M T, Scanlon T J, Fernandez-Francos J, et al. A numerical and experimental analysis of flow in a centrifugal pump [J]. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division, 2002, 257(2B):703-708.
- [9] 赵斌娟,袁寿其,刘厚林,等. 双流道泵内非定常流动数值模拟及粒子图像测速测量 [J]. 机械工程学报,2009,45(9):82-88.
Zhao Binjuan, Yuan Shouqi, Liu Houlin, et al. Numerical simulation and particle image velocimeter measurement for unsteady turbulent flow in double-channel pump [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(9):82-88. (in Chinese)
- [10] 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 Agriculture Machinery, 2008, 39(12):82-85. (in Chinese)
- [11] 王凯,刘厚林,袁寿其,等. 零流量工况下双叶片泵内部流场三维 PIV 测量 [J]. 农业机械学报,2011,42(7):61-65.
Wang Kai, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. 3-D PIV test of inner flow in a double-blade pump under zero flow rate condition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2011,42(7):61-65. (in Chinese)
- [12] 邵春雷,顾伯勤,黄星路,等. 低比转数泵叶轮流道内部流动的 PIV 实验 [J]. 航空动力学报,2010,25(9):2091-2096.
Shao Chunlei, Gu Boqin, Huang Xinglu, et al. Experimental study on flow in the impeller of low specific speed pump using particle image velocimetry [J]. Journal of Aerospace Power, 2010,25(9):2091-2096. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)