

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.013

超厚叶片低比转数无过载排污泵数值计算与 PIV 实验*

陈斌^{1,2} 张华¹ 施卫东¹ 张德胜¹ 徐焰栋¹

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

【摘要】 通过增加叶轮叶片的厚度来控制过流断面面积,从而实现低比转数排污泵的无过载特性。从样机的外特性实验结果可以看出:当过流断面面积趋于平缓变化时,流量达到1.5倍设计流量,泵的轴功率曲线即出现极值点,机组表现出明显的无过载性能。通过PIV内部流场测试技术与CFD数值计算手段,对垂直于轴线方向并通过叶轮出口宽度中间位置的截面进行了实验与预测,结果表明:设计工况下,数值计算结果不仅在外特性上与实验结果相符合,其内流场的计算也与PIV实验结果相一致;同时叶轮流道内部由于科氏力的作用导致压力面的相对速度小于吸力面,叶轮流道内整体流场分布均匀,无明显脱流和漩涡;由于叶轮与蜗壳之间存在动静干涉问题,导致各个叶轮流道之间的流动并不呈绝对的轴对称分布。

关键词: 排污泵 低比转数 超厚叶片 无过载 数值计算

中图分类号: TH312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0074-05

Numerical Calculation and Experiment of Non-overload Low Specific Speed Sewage Pump with Super-thick Blades

Chen Bin^{1,2} Zhang Hua¹ Shi Weidong¹ Zhang Desheng¹ Xu Yandong¹

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

2. Nanjing Lanshen Pump Corp., Ltd., Nanjing 211500, China)

Abstract

The flow section area was controlled by increasing thickness of centrifugal impeller blade, so as to realize the non-overload characteristics of low specific speed sewage pump. It was shown from the external characteristic experimental results of prototype when the flow section area changed gently, the extreme point of shaft power curve appeared, and the units showed an obvious non-overload performance after the flow rate attained to 1.5 times of the designed flow. The experiments and prediction were also conducted to the section which perpendicular to the axis and passing by neutral position of impeller outlet. The experimental results showed that under the designed working conditions, the external characteristic experimental results were not only consistent with the computational results, but the PIV experimental data also had very good agreement with the internal flow field computation. At the same time, in the impeller channel, the relative velocity of pressure side was less than suction side due to the Coriolis effect, the flow field distributed uniformity with no obvious flow separation and vortex. The flow of each impeller channel was not in absolutely axial symmetrical distribution because of the rotor-stator interaction between the impeller and volute.

Key words Sewage pump, Low specific speed, Super-thick blade, Non-overload, Numerical calculation

收稿日期: 2011-12-16 修回日期: 2011-12-26

* 江苏省企业院士工作站项目(BM2009525)

作者简介: 陈斌, 博士生, 南京蓝深制泵集团股份有限公司高级工程师, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: chenbin21cn@21cn.com

通讯作者: 施卫东, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: wdsh@ujs.edu.cn

引言

低比转数离心泵具有流量小、扬程高的特点^[1]。但其轴功率曲线随着流量的增大而急剧上升,运行范围较窄,容易烧毁电动机。因此,无过载性能对于低比转数离心泵来说尤为重要。目前,堵塞法^[2]作为一种常用的低比转数离心叶轮的设计方法,已经取得一定的成效。对于排污泵,通过能力为一重要参考指标,减小叶轮出口宽度来限制过流断面的方法,显然不适用于排污泵的设计。通过增加叶片厚度,可以有效限制过流断面,而保证一定的流道宽度,有利于杂质的通过。然而,采用增加叶片厚度来堵塞流道的方法,会加剧叶轮出口在圆周方向上流动的不均匀性,导致叶轮与蜗壳之间的动静干涉,而诱导压力脉动、振动、噪声问题更为明显。因此对超厚叶片叶轮内部流场的研究具有重要意义。

目前,国内外对叶轮内部流场的研究手段主要包括:数值计算与实验^[2-11]。Stickland等利用PIV测量了离心泵内部流动情况,获得了相对速度的矢量图和速度云图,并与CFD计算结果进行了比较^[2];张德胜等利用CFD数值分析手段对轴流泵进行了环量分析,并与五孔探针实验进行了对比^[3-4];Dong、Pedersen、Feng等分别对离心泵进行了PIV内部流场测试,并各自取得一定的成果^[5-7];邵春雷等利用PIV对半开式离心叶轮进行了测试,结果发现在小流量下压力面附近出现回流现象等,并对实验误差进行了分析^[8];赵斌娟等对双流道泵进行了数值计算,并将结果与PIV实验进行了对比,结果表明数值计算与PIV测试结果一致^[9-10]。但对于具有超厚叶片形式的低比转数离心叶轮的内部流场测试国内外的研究都比较少,主要还是集中在CFD数值分析上,因此对该形式的叶轮进行内部流场PIV实验显得尤为必要。本文在前期成功研发具有超厚叶片形式的低比转数无过载潜水排污泵的基础上,针对比转数 $n_s=60$ 的无过载排污泵进行模型缩放及结构改造,以获得适用于PIV实验研究的水泵模型,并利用CFD数值计算及PIV实验手段对其进行研究。

1 实验装置

1.1 测试系统

实验用的PIV系统采用美国TSI公司的商用三维PIV系统,其主要组成部分包括:美国NewWave公司的YAG200-NWL型脉冲激光器;610015型光臂;610035型同步器;两只630059 POWERVIEW

4MP型跨帧CCD相机、图像采集卡及光学透镜组等。

外触发同步系统包括:轴编码器、联轴节、同步触发控制器和光纤传输转换器。

后处理数据分析系统包括Insight 3G及Tecplot 2008软件;最后利用自编程序将测量得到的绝对速度转换成相对速度。

实验中以平均直径为 $10\ \mu\text{m}$ 左右的 Al_2O_3 作为示踪粒子,该粒子具有比表面积大、密度较小、散射性和跟随性好等优点。

以电测法作为实验中输入功率的测试手段,利用带二次显示仪表的电磁流量计测试流量大小,泵段进、出口分别各用一只压力变送器测试进、出口压力,并以江苏大学自主研发的数据采集系统进行压力采集。最后将采集到的数据全部输入到计算机中进行处理。实验系统如图1所示。

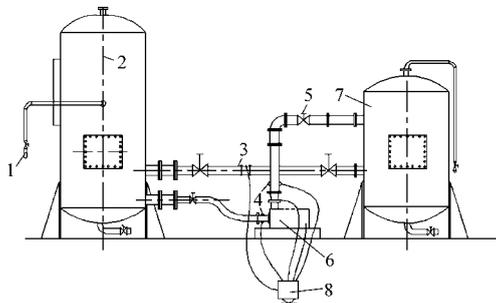


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Test-bed system

1. 进水口 2. 进口罐 3. 流量计 4. 测压管 5. 阀门 6. 实验泵 7. 稳压罐 8. 工控机

1.2 实验模型

原始模型设计参数为:流量 $Q=150\ \text{m}^3/\text{h}$,扬程 $H=48\ \text{m}$,转速 $n=1\ 450\ \text{r}/\text{min}$ 。其主要过流部件包括:进口喇叭管、叶轮及蜗壳。将原始模型按照比例(0.48)进行缩小,缩小及结构改造后的PIV测量用泵主要包括:采用对数螺旋线设计的半螺旋形吸水室,具有超厚叶片的三通道闭式叶轮及截面为犁形的压水室。其中吸水室为铸件,材质为铝;而叶轮与蜗壳为数控加工而成,保证了与数值计算模型的一致性,材质均为有机玻璃。实验泵总装图及实物模型分别如图2、3所示。

本实验将针对具有超厚叶片形式的三通道闭式叶轮,利用PIV测试技术手段对额定转速下的设计工况点进行内部流场测量。测量位置为垂直于轴线并且过叶轮出口宽度中间位置的截面。

2 数值计算模型

为符合实际情况,采用全流场计算,计算区域包

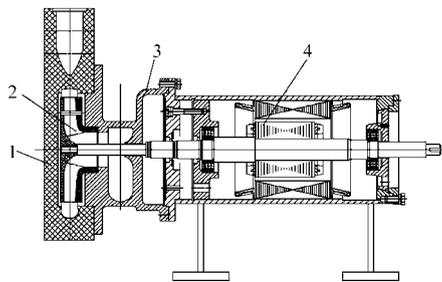


图2 PIV实验用泵总装图

Fig. 2 General assembly drawing of the pump used in the PIV experiment

1. 蜗壳 2. 叶轮 3. 吸水室 4. 电动机

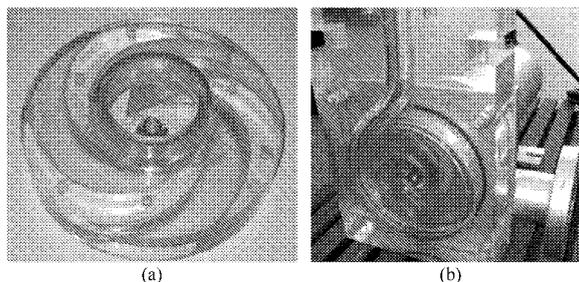


图3 叶轮零件及实验模型

Fig. 3 Impeller part and the experimental model

(a) 叶轮零件 (b) 实验模型

括叶轮内部、吸水室、压水室以及叶轮与泵体之间的间隙。由于口环处的间隙较小,而口环处的泄漏对泵的外特性及内部流场形态的影响至关重要,因此口环处的网格划分对本次数值计算的意义重大。另外,考虑到六面体网格的计算精度高于其他类型网格,对全流场进行六面体网格划分。隐藏掉叶轮前盖板与泵体之间间隙后的整体网格如图4所示。

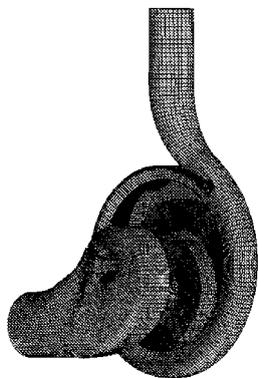


图4 隐藏掉叶轮前盖板与泵体之间间隙后的整体网格图

Fig. 4 Mesh of pump with the former cavity being hiding

计算采用时均 N-S 方程作为基本控制方程,调用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型。采用二阶精度上风格式、基于微元中心有限体积法空间离散。并通过 SIMPLICE 算法实现压力速度的耦合求解。以进口速度、出口压力作为基本边界条件,所有壁面旋转与否完全按照实际情况设置。

3 实验与数值计算结果分析

3.1 外特性分析

实验中通过调节出口阀门开度来控制流量的变化,从关死点附近开始一直到功率出现极值点为止,整个性能曲线的取值点为 22 个,通过出口调节阀调节到每个流量点的时候,泵至少运行 1 min 以上,完全达到稳定运行后进行数据采集。从图 5 实验外特性曲线可以看出:在小流量区域内,随着流量的增加扬程下降缓慢,这也是低比转数离心泵的一个特点,但在此区域内并没有出现明显的驼峰,而功率曲线上升较快;在设计工况点附近,流量-效率曲线表现平缓,说明具有超厚叶片形式的低比转数排污泵叶轮具有较宽的高效区和工作范围;在大流量区域,扬程下降较快,导致了功率随着流量增加而上升的趋势变缓,流量继续增加之后,功率曲线的斜率接近零,并在 $1.5Q_0$ 之后出现极值点,即达到无过载性能。

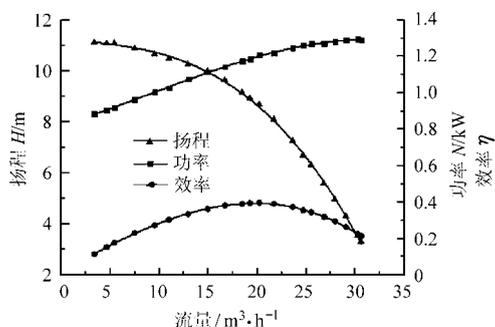


图5 泵外特性曲线

Fig. 5 External characteristic of the pump

由于实验采用电测法测功,因此换算出的效率为机组效率,而数值计算的效率为水力效率,因此不具有可比性。这里只对扬程进行对比,扬程实验值为 8.94 m,数值计算为 9.39 m,误差为 5%,可以发现 CFD 数值计算的扬程比实验扬程略高,其主要原因是:①数值计算中认为吸水室进口处来流是均匀的,而实际实验中并没有办法保证来流的均匀性。②由于吸水室为铸件,因此表面粗糙度并非一致,而数值计算过程中,认为壁面的粗糙度是一致的,且其大小由经验估算而得。③外特性实验过程中的取值是多次实验结果的平均值,而数值计算是叶轮转到某一位置时刻的定常计算结果。综上所述,数值计算与实验在外特性的比较上存在一定的误差,此次实验与数值计算的扬程误差值为 5%,在可以接受范围内,说明采取全流场的数值计算方法是可靠的。

3.2 内部流场分析

由于叶轮内部的流场属于复杂的三元非定常粘性湍流流场,即便叶轮旋转过程中回到与蜗壳相对

位置不同的不同时刻,叶轮流道内的流场也不能保证完全相同,另外,由于进口来流的不完全均匀性及示踪粒子的跟随性误差、实验系统误差、人为误差等原因,需要对同一相对位置下的叶轮内部流场进行多次拍摄。本次实验采用两只相机进行三维实验,每只相机各拍摄120张图像,即60对互相关图像。利用Insight软件对图像分别进行互相关处理并合成60个瞬时绝对速度场。再利用Tecplot软件对其进行平均处理,得到该叶轮流道内的平均绝对速度场。

离心泵叶轮内的流动是一种复合运动,流体一方面随着叶轮绕轴作牵连运动,另一方面流体随旋转着的叶轮作由里向外的相对运动,二者的合成为绝对速度。实验中直接得到的为绝对速度,而为了更加直观地观察叶轮内部的流态,相对速度矢量分布显得更有意义。绝对速度 V 、相对速度 W 和牵连速度 U 三者的矢量关系为

$$V = U + W \quad (1)$$

根据式(1),通过编写程序对绝对速度和牵连速度进行矢量合成,最后得到相对速度。本次实验中对设计流量下叶轮出口位置大部分位于蜗壳第4与第5断面之间的流道进行分析,其相对速度矢量图如图6所示。

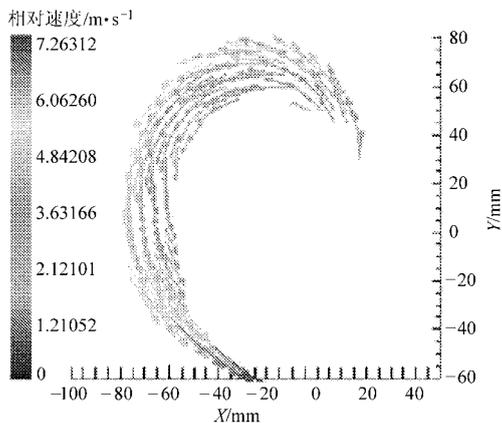


图6 设计流量下的PIV相对速度矢量图

Fig. 6 Distribution of relative velocity vector by PIV experiment at the designed condition

从图6中可以看出,具有超厚叶片形式的低比转数叶轮在设计工况下,叶轮内部没有出现明显的脱流和漩涡现象;另外这种采用堵塞法设计的叶轮随着半径的增大,叶片厚度急剧增加,使得沿着流方向过流断面面积增加缓慢,即在同一流量下的同一时刻,同一叶轮流道内的轴面速度变化不大,而流体的圆周速度随着半径的增加呈比例增加,且随着包角的变化叶片安放角度变化平缓,因此相对速度随着半径的增加而增大。从图6中也可以看出,吸力面的相对速度要大于压力面的相对速度,这是因

为在科氏力的作用下,叶轮流道中存在一个与叶轮旋转方向相反的漩涡运动,即可以近似认为科氏力使得吸力面的流体运动速度增加,而使得压力面的速度减小;液体由于受到惯性作用,努力保持原有的运动方向,因此流体在叶轮出口有偏向压力面的趋势,导致相对速度大小沿周向不等值分布,压力面出口边速度最大。

在相同流量下对实验泵进行全场数值计算,并与PIV实验拍摄的同截面进行对比分析(相同截面下数值计算的相对速度矢量如图7所示)。从图中可以看出,数值计算与PIV实验的相对速度最大值略有差别,但相同叶轮流道中的相对速度分布趋势基本相同,可以验证CFD数值计算在具有超厚叶片形式的低比转数排污泵中的应用是可行并且可靠的,对以后该形式叶轮的开发设计具有一定的指导意义。另外,从CFD结果图中可以看出,整个叶轮流道的流动并不是呈绝对的轴对称分布,叶轮各个流道的出口由于和蜗壳之间存在动静干涉问题,导致各个叶轮流道出口的速度分布存在一定的差异。

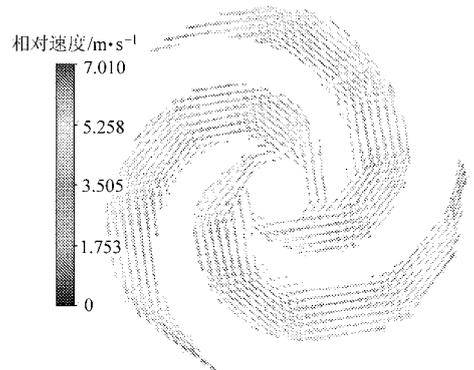


图7 设计流量下CFD相对速度矢量图

Fig. 7 Distribution of relative velocity vector by numerical calculation at the designed condition

3.3 误差分析

CFD方面主要误差分析:

- (1) 数值计算用的压水室模型为铸件,其粗糙度分布不均匀,且大小只能根据经验来衡量。
- (2) 数值计算中认为进口为均匀来流,与实际情况并不完全符合。
- (3) 实验过程中是以多组瞬态下的流场做平均处理得到的,而数值计算中为叶轮在某一位置下的定常计算结果。

PIV实验方面主要误差分析:

- (1) PIV系统本身存在一定的误差,如其中的互相关处理技术。
- (2) 示踪粒子的跟随性误差。
- (3) 实验过程中的光学折射误差,由于示踪粒

子需要进过水(流道内)—有机玻璃(叶轮后盖板)—水(后泵腔内)—有机玻璃(泵体)—空气—相机,因此其间经过多次光学折射,并且水与有机玻璃中并非没有杂质,所以其间的相互作用是非常复杂的。

(4) 标定误差,由于在实验过程中需要将相机整体平移到标定水箱的正面,因此在移动过程中难免会有偏差,而标定的准确结果对实验结果起着决定性作用。

4 结 论

(1) 通过外特性实验可知,具有超厚叶片形式的低比转数排污泵在流量达到 1.5 倍设计流量时,

泵的轴功率即出现极值点,机组表现出明显的无过载性能。

(2) 通过外特性与 PIV 内部流场实验验证:在设计工况下,采用标准 $k-\epsilon$ 对低比转数离心泵进行全流场计算可以取得比较真实的结果。

(3) 具有超厚叶片形式的低比转数排污泵叶轮,在叶轮进口处流体基本沿着吸力面运动,在流道中间吸力面的相对速度大于压力面,在叶轮出口处,压力面的相对速度大于吸力面。

(4) 该形式叶轮在设计工况下,内部速度梯度合理,流场变化平缓,无明显的漩涡和脱流现象,流道内速度矢量基本沿着流线的切线方向。

参 考 文 献

- 袁寿其. 低比速离心泵理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- Stickland M T, Scanlon T J, Fernandez Francos J, et al. A numerical and experimental analysis of flow in a centrifugal pump [C] // Proceedings of the ASME 2002 Fluids Engineering Division Conference/FEDSM2002 - 31175, Montreal, Canada, 2002, 2:703 ~ 708.
- 张德胜,施卫东,关醒凡,等. 轴流叶轮进出口流场的测量[J]. 排灌机械,2009,27(4):210 ~ 214.
Zhang Desheng, Shi Weidong, Guan Xingfan, et al. Measurement on flow field at inlet and outlet of axial-flow pump impeller [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(4): 210 ~ 214. (in Chinese)
- Zhang Desheng, Shi Weidong, Chen Bin, et al. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(1): 35 ~ 44.
- Dong R. Quantitative visualization of the flow with the volute of a centrifugal pump—part A: technique [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1992, 114(3):390 ~ 395.
- 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.
- 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/FEDSM2009 - 78297, Colorado, USA, 2009, 1: 323 ~ 329.
- 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 试验[J]. 航空动力学报,2010,25(9):2 091 ~ 2 096.
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): 2 091 ~ 2 096. (in Chinese)
- 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 Measure 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)
- 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)
- 谭磊,曹树良,桂绍波,等. 离心泵叶轮正反问题迭代设计方法[J]. 农业机械学报,2010,41(7): 36 ~ 39.
Tan Lei, Cao Shuliang, Gui Shaobo, et al. Centrifugal pump impeller design by using direct inverse problem iteration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 36 ~ 39. (in Chinese)