

# 双流道及双叶片式叶轮内流场的 PIV 测量与比较<sup>\*</sup>

赵斌娟 袁寿其 刘厚林 陈汇龙 刘 栋

**【摘要】** 为研究双流道叶轮与普通叶片式叶轮的内部流动区别,设计制作了满足粒子图像测速仪(PIV)测量要求的模型泵,模型泵的叶轮有双流道和双叶片2种形式。用PIV分别测量了双流道叶轮和双叶片叶轮的内部流动,并自编程对测量所得绝对速度进行分解,得到相对速度。由测量结果可知:在双叶片叶轮内,流体基本沿叶片吸力面流动,叶片压力面上的相对速度较低,在压力面出口出现了速度很低的回流区,有明显“射流-尾迹”特征。双流道叶轮内流动也不均匀,但没有出现明显的回流区,流态较好。流量改变时2种叶轮内的流动变化规律一致,随着流量增大,相对速度逐渐增大、绝对速度减小,设计工况下叶轮内的流态最好,小流量工况下流动扩散严重。

**关键词:** 叶轮 双流道 双叶片 PIV 测量

**中图分类号:** TH311 **文献标识码:** A

## PIV Measurement and Comparison of Inner Flow inside the Double-channel and Two-blade Impeller

Zhao Binjuan Yuan Shouqi Liu Houlin Chen Huilong Liu Dong  
(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

In order to study the flow characteristics inside the double-channel impeller, a testing pump was designed and produced according to the special requirements for PIV measurement with two different impellers, i. e., the double-channel impeller and the two-blade impeller. The absolute flow fields inside the two impellers were measured respectively by PIV, and transferred to relative flow fields by special developed code. The results indicated that in the two-blade impeller, the fluid mainly flowed along the suction side, the velocity is very small on the pressure side, and a typical jet-wake flow has been observed. In the double-channel impeller, the flow has better flow pattern without obvious back-flow area. Under different operating conditions, the flow inside two impellers changed identically, with the increase of flow rate, the relative velocity became larger, while the absolute velocity became smaller. For both impellers, the best flow pattern has been observed under the design condition, and serious dissipation occurred under the smallest flow rate working condition.

**Key words** Impeller, Double-channel, Two-blade, PIV measurement

### 引言

双流道叶轮又称无叶片叶轮,从叶轮的进口至出口是两个对称的弯曲流道,叶轮出口宽度大,因此

过流抗缠绕、无堵塞性能好,通过能力很强,已成为固液两相流泵常用的叶轮型式之一<sup>[1]</sup>。但是,由于其开发历史较短,且设计方法与普通叶片式叶轮有很大差异,其设计理论很不完善,工程中的多数设计

收稿日期: 2008-01-08

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50509009)和江苏省自然科学基金资助项目(项目编号:BK2007095)

赵斌娟 江苏大学能源与动力工程学院 讲师 博士, 212013 镇江市

袁寿其 江苏大学校长 教授 博士生导师

刘厚林 江苏大学流体机械工程技术研究中心 研究员

陈汇龙 江苏大学能源与动力工程学院 副教授

刘 栋 江苏大学能源与动力工程学院 博士生

是建立在经验基础之上,以至于设计出的双流道泵效率低、耐磨性差,且存在严重的振动和噪声。

目前,国内外研究叶轮机械内部流动的方法主要有 3 种:试验研究、数值模拟和理论分析,其中尤以试验研究和数值模拟为热点。近年来,随着计算流体力学和计算机技术的发展,对双流道叶轮内部流动进行数值模拟的研究较多<sup>[2~5]</sup>;而受试验条件的限制,对双流道叶轮内部流动进行测量的研究还很少<sup>[6]</sup>。

粒子图像测速(PIV)技术是 20 世纪 90 年代后期发展成熟的一种非接触式瞬态流场测试技术,克服了接触式单点测量的局限性,可在同一时刻记录整个片光面的相关信息,获得流动的瞬时速度场、涡量场等,已成为研究叶轮机械内部流动的一种先进测试手段<sup>[7~10]</sup>。因此,本研究设计制作满足 PIV 测量要求的模型泵,测量并比较双流道及双叶片叶轮的内部流动,初步揭示双流道叶轮有别于普通叶片式叶轮的流动特征。

## 1 试验装置

### 1.1 试验用泵

试验用泵为单级悬臂泵,为便于 PIV 测量,泵轴与进水端位于水泵同侧(图 1),其设计流量  $Q_0 = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H = 10 \text{ m}$ ,转速  $n = 1450 \text{ r}/\text{min}$ ,电动机功率  $P = 5.5 \text{ kW}$ 。

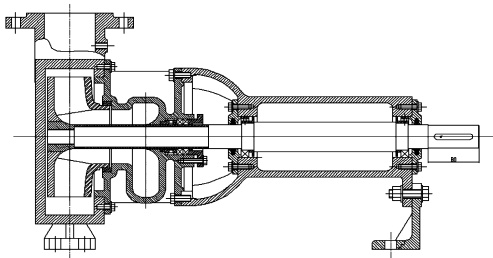


图 1 试验用泵结构图

Fig.1 Testing pump

叶轮和蜗壳均采用有机玻璃,泵体用不锈钢材料制作。叶轮有双流道和双叶片 2 种形式,其结构参数如表 1 所示。蜗壳断面为矩形,型线为对数螺旋线。

### 1.2 PIV 测量系统

本试验所用 PIV 系统是美国 TSI 公司 2000 年的商业产品,由成像系统、分析显示系统和同步控制系统组成。主要性能参数为:双 Yag 激光器及光路调整系统为一体式封装,激光器工作频率为 15 Hz,激光波长 532 nm,单个脉冲能量为 120 mJ,2 个激光器脉冲时间间隔的可调范围为 200 ns~0.1 s,激光束直径 5 mm,脉冲宽度 3~5 ns。PIVCAM10-38

表 1 叶轮主要结构参数对照表

Tab.1 Structural parameters of two impellers

项目	双叶片叶轮	双流道叶轮
进口直径 $D_1/\text{mm}$	90	90
出口直径 $D_2/\text{mm}$	200	200
出口宽度 $b_2/\text{mm}$	47	47
包角 $\varphi/(\text{°})$	140	150
出口安放角 $\beta_2/(\text{°})$	30	12
叶片出口厚度/ $\text{mm}$	6.5	10

快速冲放电互相关 CCD,分辨率为  $1248 \times 1024$  像素,采集速度为 7.5 帧/s。光学元件由 FL1 000 mm 球面镜和 FL25 柱面镜组成,激光束为片光,在 CCD 的采集区域内片光的厚度小于 1 mm,CCD 采集区的大小为  $120 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。PIV 的控制和分析软件是基于 WindowsNT 的 Insight5.0(TSI),采用 PIII 800 处理器,基于 32 像素的查询区可达到 1000 个矢量/s 的处理速度;该软件具有批处理功能,并与 Tecplot 软件匹配形成了较强的后处理功能,包括核查数据,流动特性的计算和显示,对多个图像的矢量进行统计分析等。针对本试验 PIV 系统的配置,根据 PIV 测量原则及模型泵内流速,系统参数选择为:脉冲间隔  $90 \mu\text{s}$ ,脉冲延迟  $250 \mu\text{s}$ ,查询区  $64 \times 64$  像素。测试采用粒子图像序列采集方式,每个测试点捕捉 20 帧共 10 对互相关图像。

### 1.3 示踪粒子的选择

示踪粒子须满足以下要求:① 能够随流体同步流动。② 能够很好地散射激光。③ 制造方便、价格便宜。④ 无毒、无腐蚀性、不摩擦待测仪器。⑤ 不挥发、不爆炸。⑥ 化学性质稳定。基于以上要求,选择平均直径为  $3 \mu\text{m}$  的白色三氧化二铝粉末作为示踪粒子。这种粒子能较好地散射激光,基本能满足上述要求。

## 2 试验步骤

测量断面布置在前后盖板中间、距叶轮后盖板 10 mm 处,被测区域如图 2 所示。在转速为  $n = 1000 \text{ r}/\text{min}$  时,分别测量小流量至大流量 3 种工况下试验用泵的内部流场。根据相似原理换算可得该转速下的最佳流量  $Q_0 = 33.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,3 种工况的相对流量( $Q/Q_0$ )分别为 0.5、1.0 和 1.2。

## 3 试验结果及讨论

试验数据的处理步骤如下:先在 Insight 软件中将双叶片叶轮每个测试点的 10 对图像用互相关算法处理出 10 个绝对速度场,再将其平均,得到绝对

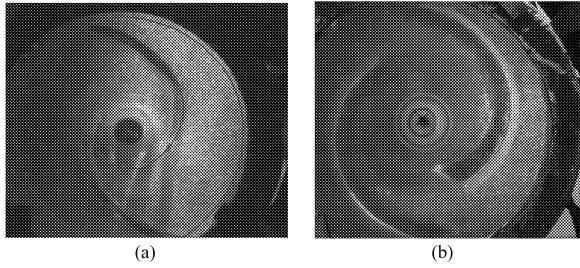


图2 测量区域

Fig.2 Testing area

(a) 双叶片叶轮 (b) 双流道叶轮

时均速度分布,如图3所示。由于叶轮内的流动是一种复合运动,流体随同叶轮绕泵轴转动是牵连运动,流体从旋转着的叶轮由里向外的流动是相对运动,而流体相对于静止的泵体的运动是绝对运动,绝对速度  $V$ 、相对速度  $W$  和牵连速度  $U$  三者的矢量关系为  $V = W + U$ 。自编程序对绝对速度进行分解,得到相对时均速度分布,如图4所示。用相同方法处理双流道叶轮测量数据,进而得到双流道叶轮内部流场的绝对速度和相对速度分布,分别如图5和图6所示。

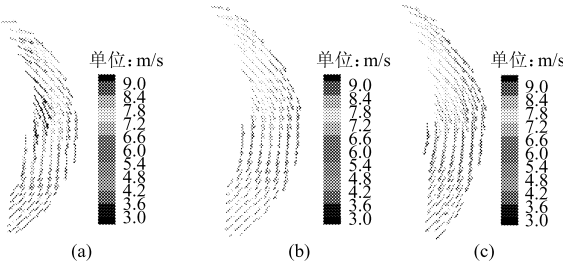


图3 不同流量下双叶片叶轮内的绝对速度矢量图

Fig.3 Absolute velocity vector in two-blade impeller

(a)  $Q/Q_0=0.5$  (b)  $Q/Q_0=1.0$  (c)  $Q/Q_0=1.2$

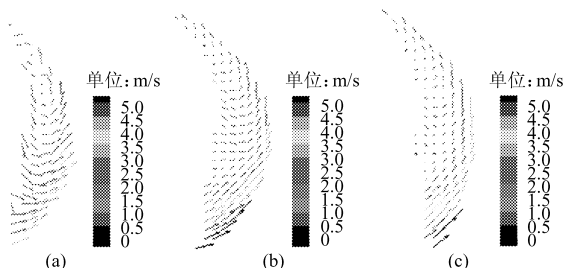


图4 不同流量下双叶片叶轮内的相对速度矢量图

Fig.4 Relative velocity vector in two-blade impeller

(a)  $Q/Q_0=0.5$  (b)  $Q/Q_0=1.0$  (c)  $Q/Q_0=1.2$

考察分析测试结果可以发现双叶片叶轮及双流道叶轮的内部流动既类似又各有特点。从绝对速度分布来看,不论是双叶片叶轮还是双流道叶轮,叶轮出口处绝对速度的方向与叶轮的旋转方向基本一致。原因在于绝对速度  $V$  是牵连速度  $U$  和相对速度  $W$  的合成,而牵连速度相对较大。双叶片叶轮内绝对速度分布十分不均匀,从工作面到背面绝对速

度显著减小,而双流道叶轮内的绝对速度分布则均匀得多。

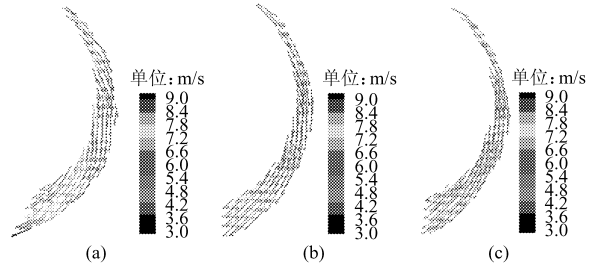


图5 不同流量下双流道叶轮内的绝对速度矢量图

Fig.5 Absolute velocity vector in double-channel impeller

(a)  $Q/Q_0=0.5$  (b)  $Q/Q_0=1.0$  (c)  $Q/Q_0=1.2$

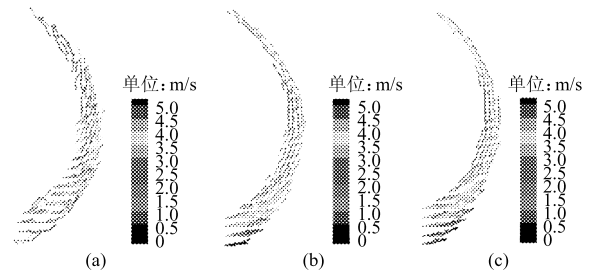


图6 不同流量下双流道叶轮内的相对速度矢量图

Fig.6 Relative velocity vector in double-channel impeller

(a)  $Q/Q_0=0.5$  (b)  $Q/Q_0=1.0$  (c)  $Q/Q_0=1.2$

从不同工况下的绝对速度  $V$  分布来看,无论是双叶片还是双流道叶轮都存在随着流量的增大绝对速度反而减小的现象,这是因为2种叶轮的包角都很大,在测量区域内牵连速度  $U$  和相对速度  $W$  成钝角,随着流量增加,相对速度增大,合成后的绝对速度反而减小,如图7所示。

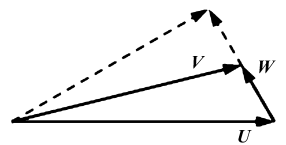


图7 速度三角形

Fig.7 Velocity triangle

从相对速度分布来看,2种叶轮内的流动都有明显的非对称特征,在叶轮进口处,吸力面附近的相对流速高于压力面附近的相对流速,相对流速从吸力面至压力面逐渐减小。但是,随着半径的逐渐增加,靠近压力面的流体的相对速度逐渐增加,而靠近吸力面的流体的相对速度逐渐减小,在叶轮出口处两者的流速差已较入口处大为减小,流动相对均匀。

2种叶轮在压力面上都存在明显的低速区。但是在双叶片叶轮内,流体基本沿吸力面流动,压力面上的流速很小,在压力面的尾部出现了流态很差的回流-旋涡区,有着明显的“射流-尾迹”特征。在双流道叶轮内,流动也不均匀,但是压力面上没有出现明显的回流区,流态较好。这是因为,相对双流道叶轮而言,双叶片叶轮叶槽宽度大,叶片对水流束缚小,所以低速区范围更大,速度梯度更大,水流更加

紊乱,出现回流的可能性大,水力损失大,因此效率相对较低。

对比不同工况下相对速度的分布情况可知,随着流量的增大,2种叶轮被测叶槽内的相对流速逐渐增大。在双叶片叶轮内,小流量工况下,回流-旋涡区的位置相对靠后,范围最大,整个叶槽内的流动最为紊乱;设计工况下,回流-旋涡区范围最小,叶轮出口处流动最为均匀;大流量工况下,回流-旋涡区的位置相对靠前,范围较大。在双流道叶轮内,设计工况时相对速度分布最有规律,偏离设计工况越多,流动分布愈不均匀。

#### 4 结束语

利用粒子图像处理技术,对一组双流道叶轮及双叶片叶轮的内部流动分别进行了测量,结果表明

2种叶轮内的流动都有明显的非对称特征,但是,在双叶片叶轮内,流体基本沿叶片吸力流动,叶片压力面上的流速很小,在压力面尾部出现了速度很低的回流-旋涡区,有着明显的“射流-尾迹”特征;在双流道叶轮内,流态相对较好。流量改变时2种叶轮内的流动变化规律一致,随着流量的增大,相对速度逐渐增大,绝对速度逐渐减小;设计工况下流态最好,小流量工况下流动扩散严重。

测试结果初步揭示了双流道叶轮的内部流动规律,以及它有别于普通叶片式叶轮的流动特征,对改进双流道叶轮设计和提高双流道泵的性能具有参考价值。但是,应当指出,由于叶片表面对激光的直接反射,造成近壁区的流场很难测量。在今后的研究中,采用激光诱发荧光的示踪粒子和相应的滤光镜片,可望得到较好解决。

#### 参 考 文 献

- 1 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社, 1995.
- 2 刘厚林,袁寿其,施卫东,等. 双流道泵叶轮内湍流的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 9~12.  
Liu Houlin, Yuan Shouqi, Shi Weidong, et al. Numerical simulation for incompressible turbulent flow in impellers of double-channel pumps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(2): 9~12. (in Chinese)
- 3 Yuan Shouqi, Zhang Peifang, Zhang Jinfeng, et al. Numerical simulation of 3-d dense solid-liquid two-phase turbulent flow in a nonclogging mud pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(4): 623~627.
- 4 周兵,陈乃祥. 双流道叶轮内部三维定常湍流数值模拟[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2005, 45(8): 1130~1133.  
Zhou Bing, Chen Naixiang. Numerical simulation of 3-D steady turbulent flow in a double channel impeller[J]. Journal of Tsinghua University: Sci. & Tech., 2005, 45(8): 1130~1133. (in Chinese)
- 5 程效锐. 双流道泵内部流场数值模拟及性能预测[J]. 水泵技术, 2006(6): 17~20.  
Cheng Xiaorui. Numerical simulation of inner flow in double-channel pump and performance prediction [J]. Pump Technology, 2006(6): 17~20. (in Chinese)
- 6 赵斌娟. 双流道泵内非定常三维湍流数值模拟及PIV测试[D]. 镇江:江苏大学, 2007.  
Zhao Binjuan. 3-D numerical simulation and PIV measurement for unsteady turbulent flow within double-channel pumps [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007. (in Chinese)
- 7 Hayami H. Flow measurement in a rotation impeller passage using PIV[C] // Proceedings of the Third International Conference on Pumps and Fans, Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 13~19.
- 8 Balzani N. Experimental investigation of the blade-to-blade flow in a compressor rotor by digital particle image velocimetry [J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122: 743~750.
- 9 杨敏官,刘栋,顾海飞,等. 盐析固-液两相流场的PIV测量方法[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2007, 28(4): 324~327.  
Yang Minguan, Liu Dong, Gu Haifei, et al. Using the PIV technology to measure the liquid-solid flow with salt coagulation [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(4): 324~327. (in Chinese)
- 10 杨敦敏,叶海燕,陈刚. 离心泵内固液两相流动的图像测量[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12): 100~104.  
Yang Dunmin, Ye Haiyan, Chen Gang. Image measurement of gas-liquid two-phase flow inside the centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 100~104. (in Chinese)