

# 长短叶片离心泵叶轮内部流动的 PIV 测量\*

陈松山 周正富 葛强 耿卫明 闻建龙 罗惕乾

**【摘要】** 设计了一副长短叶片各5个间隔布置的离心泵叶轮,应用二维粒子图像速度仪(2D-PIV)成功测试了大流量、设计流量和小流量3种工况下长短叶片同一叶槽内的瞬时流场。测试结果充分揭示了长短叶片叶轮内速度矢量场特征及长叶片吸力面、压力面和短叶片压力面、吸力面相对速度随叶轮半径的变化规律。分析了3种工况下相对速度沿圆周方向的变化规律。

**关键词:** 离心泵 长短叶片 PIV 测量 流场

**中图分类号:** TH311; TV136<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A

## PIV Measurement of Internal Flow in Centrifugal Pump Impeller with Splitters

Chen Songshan<sup>1,2</sup> Zhou Zhengfu<sup>1</sup> Ge Qiang<sup>1</sup> Geng Weiming<sup>1</sup> Wen Jianlong<sup>2</sup> Luo Tiqian<sup>2</sup>  
(1. Yangzhou University 2. Jiangsu University)

### Abstract

A five-bladed centrifugal pump impeller with five splitters was designed for the experiment. Detailed 2D-PIV measurements of flow fields about three different fluxes inside the same rotating blade-to-blade passage have been successfully performed in conjunction with the overall pump performance measured separately. The complex internal flow patterns were acquired and the relative velocity varying law near the suction surfaces and pressure surfaces of long blades and the operation sides and opposite sides of short blades were also revealed. Blade-to-blade distributions of the relative velocity about three fluxes were obtained at different radial stations.

**Key words** Centrifugal pump, Impeller with splitters, PIV measurement, Flow field

### 引言

长短叶片离心泵研究始于20世纪70年代,前苏联 Хлопенков П Р<sup>[1]</sup>设计了两段变曲率大出口角( $\beta_2 = 90^\circ$ )长短叶片复合式叶轮,研究表明:泵扬程明显增加,效率在大流量区提高5%~15%,气蚀、噪声也得到改善。Веселов В П 按文献[1]中建议,对 $n_s = 34$ 的 ЦНА2/60 型泵加大出口角 $\beta_2$ 至 $90^\circ$ 和 $130^\circ$ ,研究也得出了类似的结论。我国博山水泵厂最

早对离心泵叶轮长短叶片间隔布置进行过研究;此后,王集村、查森、梁永仪、袁寿其等对长短叶片偏置进行了试验研究,也证实了增加短叶片后可改善低比转数泵性能。王乐勤、朱祖超等<sup>[2~4]</sup>采用长、中、短叶片结合,研制了低温(高温)高速复合式叶轮离心泵等。齐学义<sup>[5]</sup>、徐洁<sup>[6~7]</sup>则从势流理论和数值计算上进行了分析。综上所述,国内外学者基于离心泵传统的设计方法、设计经验、势流分析及外特性试验研究取得一些有价值的成果;但分流短叶片的几何参

收稿日期:2005-08-12

\* 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(项目编号:06KJB470126)和江苏省重点实验室开放基金资助项目(项目编号:KJS02025)

陈松山 扬州大学能源与动力工程学院 副教授 博士生(江苏大学),225009 扬州市

周正富 扬州大学能源与动力工程学院 硕士生

葛强 扬州大学能源与动力工程学院 副教授 博士生(河海大学)

耿卫明 扬州大学能源与动力工程学院 硕士生

闻建龙 江苏大学能源与动力工程学院 教授 博士,212013 镇江市

罗惕乾 江苏大学能源与动力工程学院 教授 博士生导师

数合理确定仍未真正解决。这就需要对长短叶片离心泵内部的流场结构和能量损失的发生机理进行深入研究。

试验测试是研究泵内部流场最基本和可信的研究方法。随着近代光学、激光技术、计算机技术、图象处理技术的发展,在 20 世纪 80 年代末、90 年代初发展起来的基于 Lagrange 质点运动研究流体运动的非接触式瞬态流场测试技术 PIV (particle image velocimetry)<sup>[8~9]</sup>,克服了接触式单点测量设备的局限性,可在同一时刻记录整个片光面(light sheet)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流场的一种先进测试手段<sup>[10~13]</sup>。本文用 PIV 对一副长短叶片各 5 个间隔布置的离心泵叶轮内流场进行测量,获得了 3 种不同工况下长短叶片叶轮同一叶槽内的速度场。

## 1 试验与测试装置

### 1.1 试验泵和循环系统

试验泵采用加大设计流量的方法设计,设计流量  $Q=18.45 \text{ m}^3/\text{h}$ 、转速  $n=1\ 250 \text{ r/min}$ 。长短叶片均为单圆弧圆柱型叶片,短叶片间隔布置,叶轮主要几何参数  $D_1=75 \text{ mm}$ 、 $D_2=180 \text{ mm}$ 、 $b_1=12 \text{ mm}$ 、 $b_2=9 \text{ mm}$ 、 $d_h=40 \text{ mm}$ 、 $D_0=65 \text{ mm}$ 、 $\beta_1=25^\circ$ 、 $\beta_2=33^\circ$ 、 $z=5$ ,符号意义见图 1 所示。

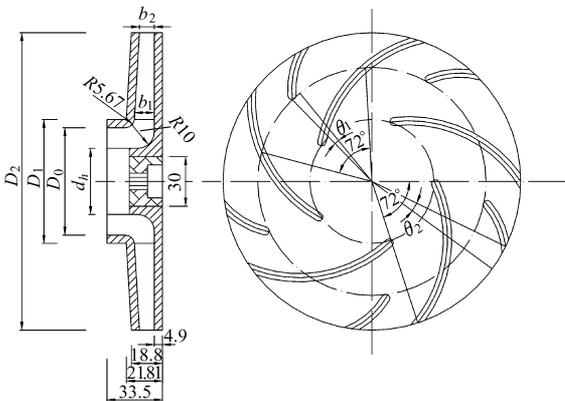


图 1 长短叶片离心泵叶轮

Fig. 1 Centrifugal impeller with splitters

分流短叶片主要几何参数中的短叶片进口、出口位置,包括短叶片进口处截圆直径  $D'$ 、短叶片进口偏置角  $\theta_1$  (短叶片入口在长叶片间位置,用短叶片入口截圆被长叶片骨线截得圆弧的中分点与圆心连线同短叶片入口点与圆心连线的夹角表示)和短叶片出口偏置角  $\theta_2$  (短叶片出口在长叶片间位置,用叶轮外径处长叶片骨线间圆弧的中分点与圆心连线同短叶片出口点与圆心连线的夹角表示)。本试验设计的长短叶片叶轮短叶片进口处截圆直径为  $D'=0.5(D_2-D_1)+D_1$ ;考虑到叶片吸力面的压力低,相

对速度大,工作面则压力高,相对速度小,因此在布置上,短叶片入口适当向长叶片吸力面偏置,取  $\theta_1=5^\circ$ 、 $\theta_2=0^\circ$ 。短叶片出口相对液流角与长叶片相同。

试验在江苏省水利动力工程重点试验室(PIV 室)进行。试验装置包括:2.2 kW 变速电机配 IHF-2.2 K 变频无级调速器、 $\phi 80 \text{ mm}$  的 PVC 管路,受试泵(其叶轮和蜗壳均为透明有机玻璃材料,表面粗糙度达到 3.2,蜗壳采用矩形断面,型线为对数螺线),调节泵工况的闸阀。测试设备包括配 XSL-1A 型数显仪表的 LWGY 型蜗轮流量计、JCL1 型测功扭矩仪和 UNE-11 型差压变送器,如图 2 所示。

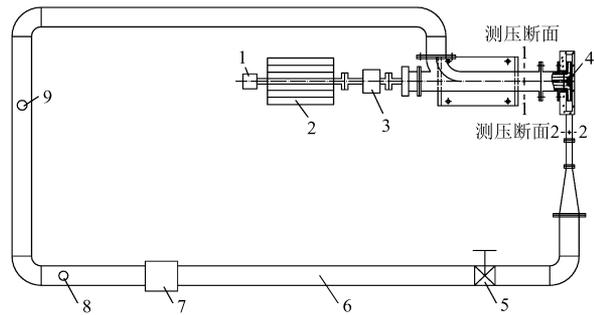


图 2 水泵试验装置示意图

Fig. 2 Sketch of experimental apparatus

1. 光电编码器 2. 电动机 3. 测功扭矩仪 4. 受试泵 5. 调节阀 6. 回水管道 7. 蜗轮流量计 8. 进水管 9. 排水管

### 1.2 PIV 测试系统

试验使用的 PIV 系统由美国 TSI 公司生产,由成像系统、分析显示系统和同步控制系统所组成,如图 3 所示。

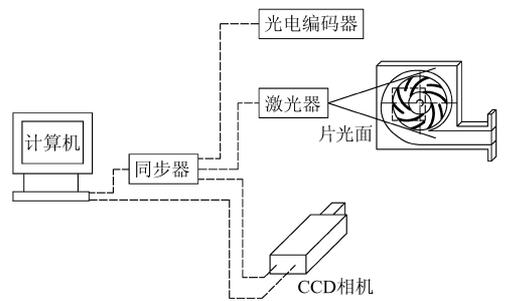


图 3 试验泵与 PIV 测量系统

Fig. 3 Test pump and PIV measurement system

#### (1) 成像系统

光源采用脉冲式双 Nd:Yag 激光器,工作频率 15 Hz,每个脉冲最大能量 50 mJ,两脉冲时间间隔可调范围 200 ns~0.5 s,输出的激光束波长 532 nm (绿光);片光光学元件包括柱面镜和球面镜,片光厚度约为 1.0 mm 的采集区域大小约为 100 mm×100 mm;记录媒介采用 RS-170CCD 互/自相关相机,分辨率为 1 000 像素×1 016 像素,采集速度可达 30 帧/s。

## (2) 分析显示系统

对查询区采用互相关分析法<sup>[14~15]</sup>。试验图像分析由随 PIV 配套的 Insight3.2 数据采集和处理软件实现,它是通过计算查询区域(32 像素×32 像素)互相关函数,利用互相关函数最大值的位置来确定查询区域中心的平均相对位移,从而获得图像上粒子的二维位移分布,计算二维速度场。

## (3) 同步控制系统

同步控制系统(同步器)是整个 PIV 系统的控制中心,用于图像的捕捉和激光脉冲的时序控制。在同步器上可设置激光的工作方式(双脉冲)、CCD 的工作方式、脉冲的延迟时间和双脉冲的时间间隔等。系统工作时,是由与电机同轴旋转的光电编码器每一转产生一外触发脉冲,经相机触发延迟时间(camera trigger delay time)后,同步器 TTL 相机触发(synchronizer TTL camera trigger),且发出 CCD 的帧同步信号(camera strobe out),同步器通过捕捉 CCD 的脉冲信号,然后根据所设定的脉冲延迟时间(pulse delay time)和脉冲间隔时间来控制激光器双脉冲(laser pulses)的。

PIV 测速是通过示踪粒子 Lagrange 速度间接反映需测流场,这就要求示踪粒子具有良好的流动跟随性和对特定波长激光较高的散射率,而且测量区粒子浓度应均匀、适当。本试验采用粒径  $1.76 \mu\text{m}$  左右的三氧化二铝粉末。

## 2 试验方案

测试长短叶片叶轮离心泵在转速  $1\ 250 \text{ r/min}$

时的外特性。在外特性测试基础上,用 PIV 测试小流量至大流量 3 种工况( $Q/Q_d$  分别为 1.8、1.0、0.57)下,叶轮前后盖板中间垂直于转轴平面的一长短叶片叶槽内的流场。激光脉冲经光臂、柱面镜和球面镜产生片光面与测量面重合,CCD 相机与测量面垂直。

试验中采用与电机同轴旋转的光电编码器作为外触发,激光延迟时间取  $250 \mu\text{s}$ ,按粒子位移  $1/4$  规则,脉冲间隔时间  $100 \mu\text{s}$ 。叶轮槽道的测量位置可由相机触发延迟时间调整。粒子图像采用序列采集,每测试点捕捉 15 次共 30 帧,先用 Insight3.2 软件平均后处理出绝对速度矢量,再由 Tecplot9.0 进行相对速度场分析。

## 3 试验结果与分析

泵的外特性测试结果见图 4;图 5 为 2D-PIV 测得的 3 种不同工况下叶槽内的相对速度矢量和等速度线图;图 6 为不同半径相对速度沿周向的变化曲线。

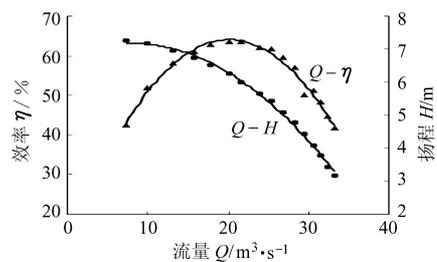


图 4 水泵性能曲线

Fig. 4 Performance curves of test pump

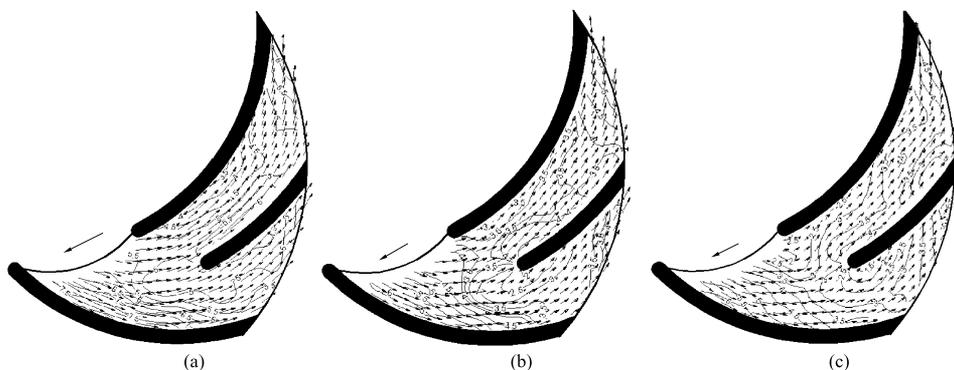


图 5 3 种工况下的相对速度矢量和等速度线

Fig. 5 Relative velocity vectors and velocity contour curves

(a)  $Q/Q_d=1.8$  (b)  $Q/Q_d=1.0$  (c)  $Q/Q_d=0.57$

由图 5、图 6 可得出,3 种工况下的长叶片进口吸力面(SS)相对速度明显大于压力面(PS),入口相对速度比值( $W_{SS}/W_{PS}$ )随流量的减小而增大;压力面相对速度最小值位置因工况不同有所差异,大流量时出现在  $(D_2+D_1)/2$  附近,而随着流量的减小,位置向叶片进口靠近,小流量时压力面进口出现了

一回流低速区;吸力面相对速度最大值均在叶片入口稍后处,长叶片吸力面相对速度随着半径增大是先增后减而压力面则先减后增,在叶片出口,压力面相对速度大于吸力面相对速度,其差值较叶片入口小。

分流短叶片入口吸力面(FSS)明显增速,大流量时相对速度最大值出现在短叶片入口后的  $1/3$  处

叶片长度处,其他两工况则在短叶片入口,短叶片吸力面相对速度在增速后随着半径增大又开始减小,小流量在短叶片吸力面出口出现低速区;短叶片入口压力面(FPS)存在低速区,但随着半径的增加压力面相对速度增大;分流叶槽内相对速度沿圆周变化:随着半径增加,SS至FPS及FSS至PS相对速

度呈现由下降逐渐变为上升的曲线,在分流短叶片出口,FPS侧的相对速度大于FSS侧的相对速度;在叶轮出口附近,SS与FPS间及FSS与PS间相对速度差不大,压力面未出现射流,吸力面边界也未分离,不存在剪切层。图6中曲线上方数字分别表示为1.  $r/r_2 = 0.42$ , 2.  $r/r_2 = 0.56$ , 3.  $r/r_2 = 0.71$ ,

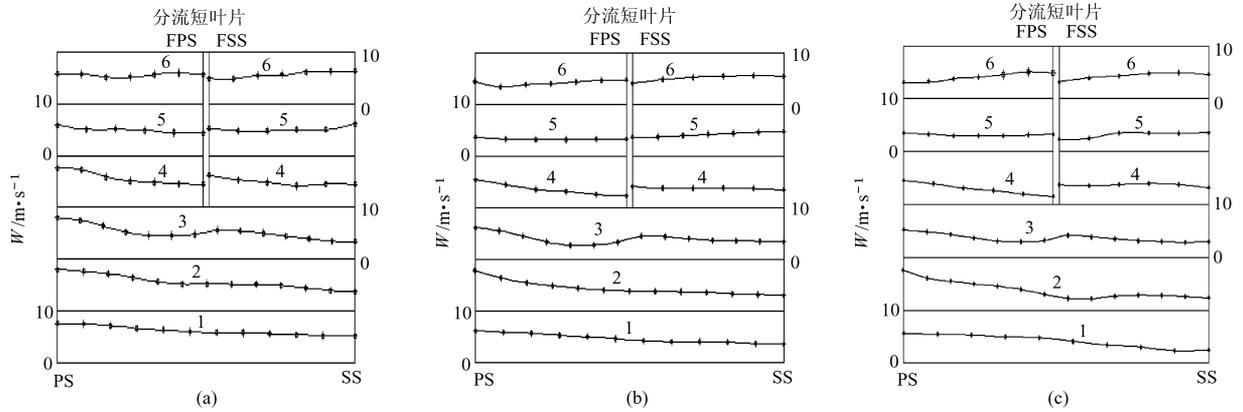


图6 相对速度圆周向变化曲线

Fig. 6 Circumferential variation of relative velocity

(a)  $Q/Q_d=1.8$  (b)  $Q/Q_d=1.0$  (c)  $Q/Q_d=0.57$

4.  $r/r_2=0.81$ , 5.  $r/r_2=0.9$ , 6.  $r/r_2=1.0$ 。

#### 4 结束语

利用PIV技术对长短叶片离心泵叶轮内流场

进行了试验研究,首次获得了长短叶片叶槽内的流速分布,揭示了叶轮内流场的非对称性和非均匀性规律。试验结果表明,PIV测量为长短叶片离心泵深入研究提供一种可行的方法。

#### 参 考 文 献

- 1 Хлопенков П Р. 设计高效离心泵叶轮的物理原理[J]. 排灌机械,1982(1):46~49.
- 2 王乐勤,朱祖超. 低比转速两级复合叶轮高速离心泵的研制[J]. 浙江大学学报,1997,31(5):688~694.
- 3 王乐勤,朱祖超. 低比转速低温高速离心泵复合叶轮的设计与工业应用[J]. 低温工程,1998(3):32~37.
- 4 朱祖超. 超低比转速高速离心泵的理论研究及工程实现[J]. 机械工程学报,2000,36(4):30~34.
- 5 齐学义,倪永燕. 复合式离心泵叶轮短叶片偏置设计分析[J]. 甘肃工业大学学报,2003,29(4):60~63.
- 6 徐洁,谷传纲. 长短叶片离心泵叶轮内部流场的数值计算[J]. 化工学报,2004,55(4):541~544.
- 7 徐洁. 低比转速离心泵复合式叶轮内部流动的数值计算[D]. 兰州:甘肃工业大学,2001.
- 8 Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry[J]. Measurement Science and Technology,1997,8(12):1379~1392.
- 9 Wernet M P. Development of digital particle imaging velocimetry for use in turbo-machinery[J]. Experiments in Fluids,2000,28(2):97~115.
- 10 Choi Y D, Nishino K, Kurokawa J. PIV measurement of internal flow characteristics of very low specific speed semi-open impeller[J]. Experiments in Fluids,2004,37(5):617~630.
- 11 Nicholas Pedersen, 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]. Journal of Fluids Engineering,2003,125:61~72.
- 12 杨华,刘超,汤方平. 离心泵有盖板叶轮内部流场的PIV测量[J]. 农业机械学报,2003,34(2):27~29.
- 13 Wernet M P. New insights into particle image velocimetry data using fuzzy-logic-based correlation/particle tracking processing[J]. Experiments in Fluids,2001,30(4):434~447.
- 14 Westerweel J. Theoretical analysis of the measure precision in particle image velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2000(Suppl.):3~12.
- 15 Melling A. Tracer particle and seeding for particle image velocimetry[J]. Meas. Sci. Technol.,1997,8(12):1406~1416.