

文章编号: 1000-8055(2009)01-0157-05

吸水室内部流动的粒子图像测速试验

邵春雷, 顾伯勤, 陈 晔

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 210009)

摘 要: 介绍了粒子图像测速(PIV)系统、泵试验装置和试验方案。利用 PIV 技术,对 5 种流量下泵吸水室内部流场进行试验研究,获得了速度矢量分布,计算得到吸水室出口断面特征参数和入口断面上的瞬时体积流量。结果表明,吸水室入口处速度分布较为均匀,出口处速度分布不均匀,且有偏流现象存在;在所研究的范围内,随着流量的增加,出口断面轴向速度分布均匀度提高,速度加权平均偏流角减小;吸水室内的瞬时体积流量存在明显的脉动特征,在较长时间内,呈正态分布,相对脉动幅值在 6%之内,其平均值与涡轮流量计所测值相一致。PIV 技术可用于瞬时体积流量的测量以及流场非稳态特性的研究。

关 键 词: 吸水室; 粒子图像测速; 内部流动; 体积流量

中图分类号: O35; TH311

文献标识码: A

Experimental study on flow in the pump sump using PIV

SHAO Chun-lei, GU Bo-qin, CHEN Ye

(College of Mechanical and Power Engineering,
Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Particle image velocimetry (PIV) system, pump experimental facility and test scheme were introduced. An experimental investigation of pump sump internal flow was performed at five different flow rates by means of PIV. The velocity vector distribution was obtained, and the characteristic parameters on the outlet section and the instantaneous volume flow rate on the inlet section were calculated. The results indicate that, the velocity distribution is uniform in the inlet and non-uniform in the outlet, and biased flow phenomenon appears in the outlet of the pump sump. Under the scope of the investigation, axial velocity distribution uniformity on the outlet section is improved and the velocity-weighted average bias angle decreases with the increase of flow rate. The instantaneous volume flow rate is impressively pulsatile and presents the Gaussian distribution, and the relative pulsation amplitude is within 6%. The mean flow rate in a longer period agrees with the flow rate measured by the turbine flowmeter. This confirms that the PIV system can be applied to measure the instantaneous volume flow rate and investigate the unsteady characteristics.

Key words: pump sump; particle image velocimetry (PIV); internal flow; volume flow rate

吸水室是离心泵进口法兰至叶轮进口的过流部分,其作用是把液体引向叶轮^[1]。直锥形吸水室是所有吸水室中形状最为简单的一种,它常用于

单级单吸离心泵。由于吸水室的进口速度较小,相应水力损失也较叶轮和压水室内的水力损失小。离心泵设计时,通常假设吸水室内流速均匀分布

收稿日期:2007-12-27; 修订日期:2008-02-27

作者简介:邵春雷(1981-),男,江苏通州人,博士生,主要从事流体测控技术和流体机械研究。

且流动平行于轴线.实际上,整个吸水室内流速并不是均匀分布的,且出口处有一定的横向速度存在.常用的流量计可以测出泵的平均流量,但无法用于瞬时流量的测量.实验流体力学则是离心泵吸水室内瞬时体积流量测量以及流场非稳态特性研究的重要方法.

粒子图像测速(PIV)技术是近二十几年发展起来的一种非接触、瞬时、动态、全流场的直接速度场测量技术,其主要特点是可在同一时刻记录下整个测量平面内的相关信息,从而可以获得流动的瞬时速度场,即使在流场分布不均匀以及存在脉动的情况下,也可以进行高精度的测量,获取更多的流场信息.它是研究复杂流场的一种重要手段^[2-3].目前,尚未见有关 PIV 用于吸水室研究方面的报道.

本文采用 PIV 技术,对不同流量下吸水室内部分流场进行测量,分析了内部流动现象和演化规律,并计算得到瞬时体积流量等相关参数,对其内部流动的瞬时特性进行了研究,为吸水室设计理论和方法的改进以及离心泵内流动的实验研究提供了借鉴.

1 试验装置

1.1 PIV 系统

PIV 的基本工作原理如图 1 所示,在流场中撒布合适的示踪粒子,用脉冲激光片光源照射所测流场区域,通过成像记录系统摄取两次曝光的图像,再用粒子图像相关的方法处理 PIV 图像,获得每一查询区中粒子图像的平均位移,由此确定流场的速度.

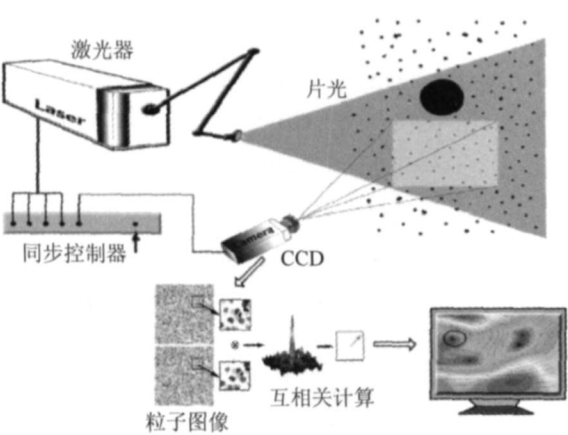


图 1 PIV 测量系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of PIV measurement system

本文所使用 PIV 系统主要硬件为:美国 New-Wave 公司制造的 Solo200XT 型双脉冲式激光

器,单脉冲能量 200 mJ,频率 15 Hz,脉冲宽度小于 8 ns,双脉冲时间间隔小于 1 μs,片光厚度 0.5~6 mm 可调;美国 Redlake 公司制造的 ES2001 型互相关 CCD,1 600 (H) ×1 200 (V) pixel,8~12 bit,电子快门,30 帧/s,支持连续采集、外触发采集、外控制采集和 PIV 采集 4 种工作模式,配备尼康(NIKON) 50 mm/F1.4 镜头;丹麦 FINN MEN GLE 公司制造的 SM-SYNC10 型同步控制器.试验所用的示踪粒子为白色 Al₂O₃ 粉末.使用的主要软件为北京立方天地科技发展有限责任公司开发的 MicroVec V2.0,它集成了实时粒子图像测速计算、粒子跟踪测速计算、浓度场分析和粒径分析等功能模块^[4].

1.2 试验模型

试验模型为一设计流量 $Q_d = 25 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H_d = 32 \text{ m}$,转速 $n_d = 1\,450 \text{ r/min}$,低比转速模型泵(图 2).该模型泵由 IS80-50-315 型离心式清水泵改形设计而成.模型泵采用矩形蜗壳、圆柱形叶片、半开式叶轮结构.吸水室和蜗壳为有机玻璃制成,其余为不锈钢.吸水室外部安装一个 150 mm × 150 mm × 230 mm 的方形有机玻璃光学补偿盒,测量时将其内部充满水,以抵消因光折射引起的测量误差.模型泵的主要尺寸列于表 1.

表 1 试验泵主要尺寸
Table 1 Main dimensions of the test pump

名称	数值
泵进口直径 D_{in}/mm	80.0
泵出口直径 D_{out}/mm	50.0
叶片进口直径 D_1/mm	80.0
叶片出口直径 D_2/mm	315.0
叶片进口宽度 b_1/mm	20.0
叶片出口宽度 b_2/mm	20.0
叶片包角 $\phi/^\circ$	120.0
进口安放角 $\beta/^\circ$	27.0
出口安放角 $\beta/^\circ$	35.0
叶片厚度 t_b/mm	5.0
叶片长度 l/mm	218.0
蜗室基圆直径 D_3/mm	324.0
蜗室进口宽度 b_3/mm	38.0
蜗舌安放角 $\phi_0/^\circ$	10.0

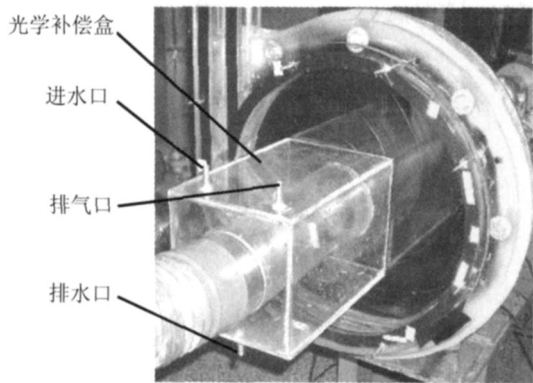


图 2 试验泵
Fig. 2 Test pump

2 试验方案

试验转速为 1 200 r/min. 试验流量为 $0.2Q_d$, $0.4Q_d$, $0.6Q_d$, $0.8Q_d$ 和 Q_d . 片光厚度为 0.5~1 mm, 垂直于光学补偿盒上表面并通过吸水室中心轴线. CCD 轴线垂直于片光面, 距离测量平面 0.6 m 左右, 拍摄区域的大小约为 110 mm × 80 mm, 取景范围对称于吸水室中心轴线, 1 个拍摄区域即可覆盖整个吸水室. 双脉冲激光器设置为内同步工作模式, 工作频率 5 Hz. 流量为 $0.2Q_d$, $0.4Q_d$ 和 $0.6Q_d$ 时, 跨帧延时设置为 800 μ s; 流量为 $0.8Q_d$ 和 Q_d 时, 跨帧延时设置为 400 μ s. CCD 设置为 PIV 工作模式, 一次触发连续采集两幅图像, 每个试验工况采集 100 幅图像. 对相关的两幅图像通过 MicroVec V2.0 软件处理, 得到一组数据文件, 各试验工况下的 100 幅瞬时图像可计算出 50 组瞬时流场数据, 由此可得到速度矢量图.

3 试验结果分析

3.1 吸水室内部流态

对各工况下的 50 组数据进行平均处理, 得到吸水室内部时均速度矢量分布图. 图 3(a)~图 3(e) 分别为流量 $0.2Q_d$, $0.4Q_d$, $0.6Q_d$, $0.8Q_d$ 和 Q_d 时的吸水室内时均速度矢量分布图. 在离心泵试验台上, 吸水室进口前设置有一长度大于 $15D_{in}$ 的直圆管, 基本上保证了离心泵设计进水条件, 即轴向无旋, 速度和压力均匀分布的要求^[5], 故吸水室进口侧速度分布比较均匀(图 3 中右侧). 因吸水室壁面反光, 壁面附近流速较小, 所测得的速度误差相对较大. 由于吸水室出口附近流道拐弯和叶轮旋转对吸水室内部流动的影响, 出口侧(图中左侧)速度分布不均匀, 存在一定的横向速度. 对比 5 幅图可以发现, 随着流量的增大, 横向速度相

对于轴向速度的比值减小, 偏流现象减弱.

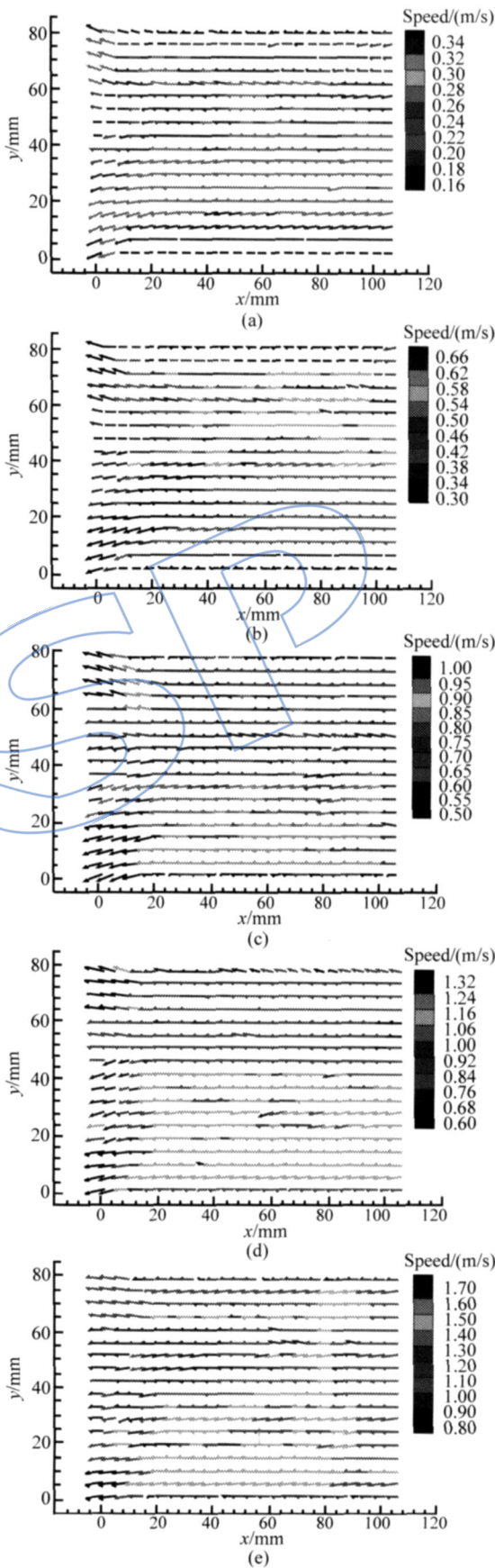


图 3 吸水室内速度矢量分布

Fig. 3 Velocity vector distribution in the pump sump

3.2 吸水室出口断面轴向速度分布均匀度和出口速度加权平均偏流角

吸水室的出口即为叶轮的进口,其轴向速度分布均匀度(反映了叶轮入口进水情况,(值越高,表明叶轮入口水流的速度分布越均匀,其计算公式为^[6]

$$\eta = \left[1 - \frac{1}{v_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{ai} - \bar{v}_a)^2}{n}} \right] \times 100 \quad (1)$$

式中(η 为吸水室出口断面轴向速度分布均匀度,%; $\bar{v}_a$ 为吸水室出口断面轴向速度算术平均值,m/s; v_{ai} 为吸水室出口断面轴向速度,m/s; n 为吸水室出口断面上计算单元个数.

吸水室出口的横向速度影响离心泵的能量特性和汽蚀特性.偏流角(指吸水室出口断面水流轴向速度与实际流速之间的夹角,用于衡量横向速度对出口水流条件的影响程度. θ 值越小,出口水流越接近垂直于出口断面,离心泵的进水条件越好.出口水流速度加权平均偏流角 $\bar{\theta}$ 为^[6]

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{ai} \arctan \frac{v_{ti}}{v_{ai}}}{\sum_{i=1}^n v_{ai}} \quad (2)$$

式中 v_{ti} 为吸水室出口断面各计算单元的横向速度,m/s.

将各试验流量下的吸水室出口断面的速度按式(1)和式(2)进行计算,所得各特征参数列于表 2.

表 2 吸水室出口断面特征参数的统计结果

Table 2 Statistical results of characteristic parameters on the outlet section of pump sump

特征参数	试验流量 $Q/(m^3/h)$				
	5	10	15	20	25
V_{amax} /(m/s)	0.32	0.63	0.91	1.29	1.64
V_{amin} /(m/s)	0.19	0.34	0.72	0.94	1.28
η %	70.76	76.52	83.22	90.45	95.39
$\theta_{max}/(^{\circ})$	22.10	20.09	16.11	11.45	7.01
$\theta_{min}/(^{\circ})$	0.85	0.54	0.62	0.40	0.61
$\bar{\theta}/(^{\circ})$	10.05	9.22	7.06	4.73	2.51

表中 θ_{max} 和 θ_{min} 分别表示最大和最小偏流角, V_{amax} 和 V_{amin} 分别表示最大和最小轴向速度.由表 2 可

见,在试验流量范围内,随着流量的增大,吸水室出口断面轴向速度分布均匀度由 70.76 % 逐渐增大至 95.39 %,出口水流速度加权平均偏流角由 10.05 逐渐减小至 2.51 $^{\circ}$,说明越接近设计工况流速分布越均匀,从图 3 中亦可看出此规律.

3.3 吸水室进口断面流量脉动

沿吸水室进口断面对轴向速度进行积分即可得到瞬时体积流量 $Q(t)$, $Q(t)$ 为时间的函数.为了研究 $Q(t)$ 随时间变化的规律,对 N 个连续瞬时流量取平均值得到平均流量

$$\bar{Q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q(t_i) \quad (3)$$

瞬时流量相对于平均流量的脉动强度为

$$F_i = \frac{Q(t_i) - \bar{Q}}{\bar{Q}} \times 100 \quad (4)$$

流量的相对脉动幅值为

$$F_{max} = \max(|F_i|) \quad (5)$$

表 3 吸水室进口断面特征参数的统计结果

Table 3 Statistical results of characteristic parameters on the inlet section of pump sump

特征参数	试验流量 $Q/(m^3/h)$				
	5	10	15	20	25
$Q_1/$ (m^3/h)	5.24	9.74	14.32	19.18	24.06
$Q_2/$ (m^3/h)	5.21	9.70	14.28	19.08	23.98
δ %	-0.57	-0.41	-0.28	-0.52	-0.33
$F_{max}/\%$	5.6	4.3	5.2	3.7	5.5

表 3 中 Q_1 是利用涡轮流量计测得的流量; Q_2 是利用 PIV 测试技术测得的平均流量; $\delta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \times 100$,表示 PIV 测量流量相对于涡轮流量计测量流量的偏差.对比 Q_1 和 Q_2 可以发现,PIV 测试结果与涡轮流量计测得的流量基本一致.两者之间的误差主要是由于吸水室壁面反光导致的部分位置 PIV 所测速度小于实际速度引起的.因此,减弱壁面反光,提高 PIV 拍摄图像的质量,有助于提高测量精度.试验表明,离心泵进口流量存在脉动特征,但相对瞬时流量脉动强度的幅值随流量变化不大,均保持在 6 % 之内.图 4 是试验流量为 25 m^3/h 时,瞬时流量的相对流量脉动强度 F_i 分布直方图.图中的曲线为 F_i 的正态分布曲线,表明测试结果呈正态分布,瞬时流量

脉动各向同性,与湍流性质一致.

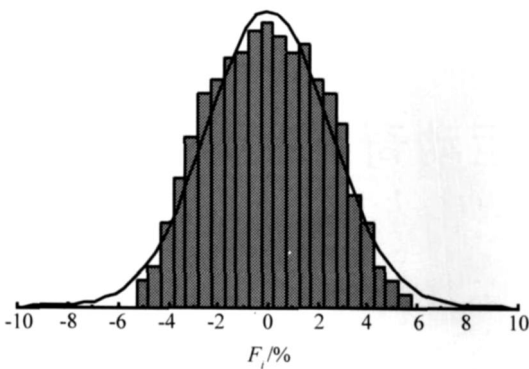


图 4 相对流量脉动强度分布直方图

Fig.4 Histogram of relative flow rate fluctuation intensity distribution

4 结 论

采用 PIV 技术,对不同流量下离心泵吸水室内部流场进行了测量,获得了速度矢量分布.结果表明,吸水室入口处速度分布较为均匀,而出口处流体发生偏流,存在明显的径向速度梯度;在试验范围内,随着流量的增加,出口处轴向速度分布均匀度提高,速度加权平均偏流角减小.试验结果对非设计工况下吸水室内部流动研究及吸水室改进设计具有重要意义.

根据 PIV 所测速度得到了瞬时体积流量等相关特征参数,平均体积流量与涡轮流量计的测量值一致.吸水室内瞬时体积流量具有脉动特征,呈正态分布,相对脉动幅值在 6 %之内,瞬时流量

脉动各向同性,与湍流性质一致.结果表明,PIV 技术可用于瞬时体积流量的测量,为研究流场的瞬时特性对吸水室水力性能的影响提供了方法.

参考文献:

[1] 关醒凡. 泵的理论与设计 [M]. 北京:机械工业出版社,1987.

[2] 陈钊,郭永彩,高潮. 三维 PIV 原理及其实现方法[J]. 实验流体力学,2006,20(4):77-82.

CHEN Zhao, GUO Yongcai, GAO Chao. Principle and technology of three-dimensional PIV [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20 (4) : 77-82. (in Chinese)

[3] Westerweel J, Draad A A, Van der Hoeven J G Th, et al. Measurement of fully developed turbulent pipe flow with digital particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 1996, 20(3) : 165-177.

[4] 邵春雷,顾伯勤,陈晔. 离心泵内部流场测量系统设计及测量方法研究[J]. 流体机械,2007,35(6):45-49.

SHAO Chunlei, GU Boqin, CHEN Ye. Measurement system and measuring method of flow field in centrifugal pump [J]. Fluid Machine, 2007, 35 (6) : 45-49. (in Chinese)

[5] 中华人民共和国国家标准. GB3216-89 离心泵、混流泵、轴流泵和旋涡泵试验方法 [S]. 北京:中国标准出版社,2004.

[6] 鄢碧鹏,朱红耕,袁寿其. 新型肘形进水流道水力特性预测[J]. 农业机械学报,2006,37(2):37-40.

YAN Bipeng, ZHU Honggeng, YUAN Shouqi. Prediction of hydraulic characteristics of new type elbow inlet conduits [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2) : 37-40. (in Chinese)