

旋流式模型泵内部三维湍流场的测量

杨敏官, 高波, 顾海飞, 李辉

(江苏大学能源与动力工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 为获得旋流泵内部三维湍流场的真实情况, 设计制造了模型泵并构造了试验装置. 运用激光多普勒测速仪(LDA), 对旋流泵最优工况下的无叶腔及叶轮内部速度场进行了测量, 得到周向速度、轴向速度、径向速度及其对应的均方根脉动速度分布等. 测量结果表明: 旋流泵内流场是强制涡旋和自由涡旋的叠加, 同时存在循环流与贯通流, 与前人提出的流动模型相吻合; 无叶腔与叶轮内周向速度分布差异较大; 在叶轮进口处, 液流已有预旋, 流动撞击损失较大; 该型泵内湍流脉动呈各向同性. 所得结果不仅可用于验证数值计算结果的准确性, 而且为旋流泵内部两相流场的深入研究打下基础.

关键词: 旋流泵; 测量; 湍流; 脉动速度; LDA

中图分类号: TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-6254(2008)01-0060-05

Measurement on 3D turbulent flow field in vortex pump

YANG Min-guan, GAO Bo, GU Hai-fei, LI Hui

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: In order to get the 3D turbulent flow structures in vortex pump, a test rig was set up. A special model pump was also designed. Laser Doppler Anemometry (LDA) was used to measure the velocity in volute and impeller of the pump. Three velocity components magnitudes were obtained, so was the mean square root fluctuating value. The internal flow consists of forced vortex and free vortex. Velocity distributions in volute are different from those in impeller. The liquid has been pre-swirled at the inlet of impeller. Impact loss is considerable there. Turbulent fluctuating shows isotropic characteristics. The measured data can be used to validate the numerical simulation results.

Key words: vortex pump; measurement; turbulence; fluctuating velocity; LDA

旋流泵以其输送固体颗粒或细长介质时所具有的无堵塞性, 广泛应用于污水处理、固体物质水力输送^[1]. 但该型泵效率较低(一般 < 60%), 究其原因, 与其内部流动规律密切相关. Schivley G P, Lubie-niecki 运用毕托管测量了无叶腔内部流场, 并进行了理论分析^[2]; Hideki O 对泵的外特性及内流场同时进行研究, 揭示了泵结构与外特性之间的关系, 提出了一种旋流泵设计方法^[3]; Masanori A 在内流场和泵特性研究基础上对汽蚀性能进行了研究, 对泵

的性能进行了预测^[4-7]. 陈红勋对叶轮内部流速场和叶片表面压力进行测试, 结合数值计算的结果, 建立了流动模型^[8].

前人对旋流泵的研究已经取得了一定的成果, 但由于试验手段的局限性, 对该型泵内部三维湍流场的特性研究大都以数值模拟为主.

本研究以自行设计制造的模型泵为研究对象, 运用先进的激光多普勒测速仪(LDA)对其无叶腔及叶轮内部流场进行测量, 获得周向速度、轴向速度、径向

收稿日期: 2007-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50476068); 江苏省研究生培养创新工程项目(CX07B_093z)

作者简介: 杨敏官(1952—), 男, 江苏常州人, 教授, 博士生导师(sepe@ujs.edu.cn), 主要从事流体力学性能及多相流动的研究.

高波(1983—), 男, 江苏镇江人, 博士研究生(gao_sanpi@163.com), 主要从事流体力学性能及多相流动的研究.

速度及其对应的均方根脉动速度分布等重要信息. 根据试验结果,对其内部三维湍流场进行分析,为数值计算中湍流模型选择及结果验证提供依据.

1 试验装置及设备

1.1 试验装置

试验装置如图1所示.为解决叶轮内部旋流场测量时的周向定位问题,安装了轴编码器^[9]. 转速转矩仪测量泵轴转速、扭矩和轴功率,泵扬程由进出口压力传感器测量,流量由涡轮流量计测量.

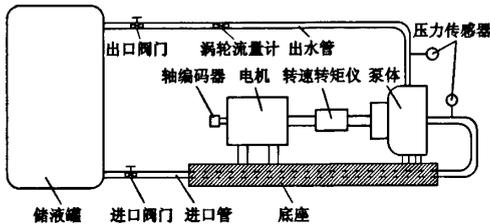


图1 旋流泵测试实验台示意图
Fig.1 Vortex pump test-bed

模型泵叶轮采用放射型直叶片,叶轮直径120 mm,叶轮出口宽度24 mm,8枚叶片;无叶腔宽度40 mm,采用环形压水室结构. 泵前盖与泵体侧开有测量窗口(如图2所示),选择优质光学玻璃取代常用的有机树脂材料,目的是获得较理想的信噪比.

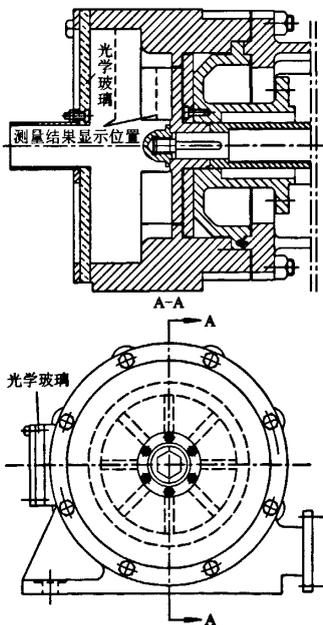


图2 泵结构示意图
Fig.2 Pump structure

在泵的最优工况下进行测量,泵的运行参数,流量 $Q = 9.6 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 17.2 \text{ m}$,转速 $n = 2\,956 \text{ r/min}$,比转速 $n_s = 66$. 工作介质为清水.

1.2 试验设备

激光多普勒测速基本原理为:利用接收到的运动粒子的散射光的多普勒频移获得速度信息. 本试验采用 Dantec 公司生产的 LDA 系统对模型泵内部流场进行测量. 氩气激光功率为5 W,产生的绿光波长514.5 nm,蓝光波长488.0 nm,光束直径均为1.35 mm,光束间距38 mm. 布拉格单元频移为40 MHz^[10].

2 试验方法

测量点分布在泵体第VI断面上. 试验所使用的三维 LDA 测量系统采用发射与接收双探头结构,利用两种光路布置来获得一点的三维速度信息. 根据旋流泵内部流场的特点,分为径向速度测量模式和轴向速度测量模式,对应的接收模式为前侧向接收(有效散射角 70°)和后侧向接收(有效散射角 150°),两种模式下都能得到周向速度信息. 输送介质中自带的微粒可作为示踪粒子使用,无需再另加粒子^[11].

3 试验结果及分析

下面给出图2所示的测量位置处(分别为无叶腔、叶轮宽度的中心)的测量结果(见图3~图7). 图中横坐标 r/R_2 表示相对叶轮外径的无量纲数(其中 r 表示以泵轴心线为基线的半径, R_2 为叶轮外径), v_θ, v_x 及 v_r 分别表示周向、轴向及径向的速度, $-RMS$ 表示对应的脉动值. $0.2\theta, 0.5\theta, 0.8\theta$ 分别表示从叶片工作面起,工作面与背面的夹角 θ 的0.2倍,0.5倍和0.8倍处.

3.1 无叶腔内速度分布

图3为无叶腔内的周向速度及其对应的脉动速度分布曲线. 在 $r/R_2 = 0.3 \sim 0.7$ 范围内,周向速度曲线几乎成直线上升,呈现出强制旋涡的流动特征,周向的脉动速度却相反,呈递减趋势;在 $r/R_2 = 0.7$ 附近,液流速度达到极大值,脉动速度在此附近达到极小值,流动在此区域较平稳;当 $r/R_2 > 0.7$ 后,周向速度由极大值开始下降,呈现出自由旋涡的特征. 这是由于无叶腔内流体受到了叶轮中流出流体的干扰,发生能量传递,造成流动损失,并且因为已靠近叶轮外缘,叶轮提供的动量对液流的作用已逐渐减弱直至消失,所以周向速度开始下降. 同时这也导致

了脉动速度的递增.

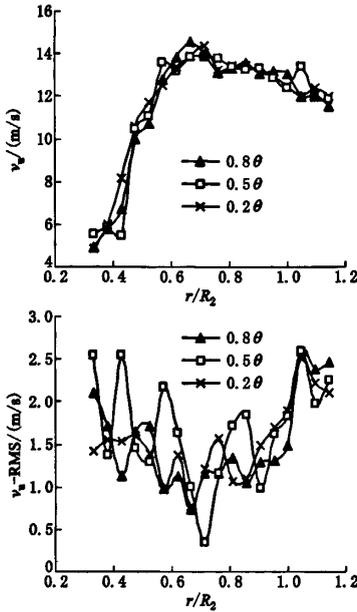


图3 无叶腔内周向速度及其脉动速度分布
 Fig.3 Circumferential velocity component and fluctuating distributions in volute

图4 为无叶腔内轴向速度及其对应的脉动速度分布曲线.

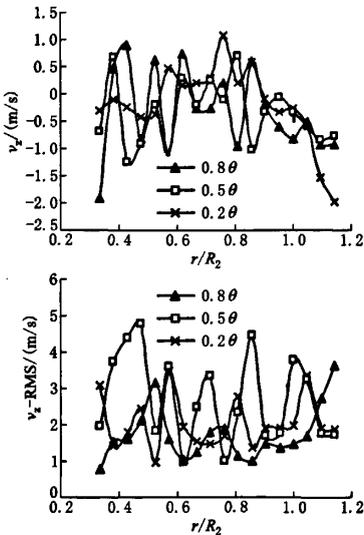


图4 无叶腔内轴向速度及其脉动速度分布
 Fig.4 Axial velocity component and fluctuating distributions in volute

从分布曲线可知,轴向速度在无叶腔中波动较大,时正时负,速度脉动较大,但从分布趋势看,轴向速度分布还是具有一定规律,液流在 $r/R_2 < 0.8$ 区域内流向叶轮,一般地, $r/R_2 < 0.4$ 区域多为进口区

域, $r/R_2 = 0.4 \sim 0.8$ 区域为循环流区域,脉动速度分布变化趋势不明显;在 $r/R_2 > 0.8$ 后,液流轴向速度几乎为负,说明在此区域内,液流是由叶轮流出,部分为循环流,部分为贯通流.

无叶腔中的径向速度及其对应的脉动速度分布曲线如图5所示.

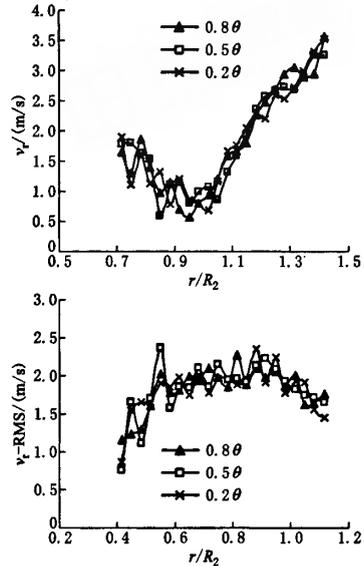


图5 无叶腔内径向速度及其脉动速度分布
 Fig.5 Radial velocity component and fluctuating distributions in volute

从图示的径向速度分布曲线可知,在 $r/R_2 = 0.7 \sim 1$ 范围内,径向速度呈递减趋势,对应的脉动速度逐渐增加,此区域存在循环流,液流由径向折向轴向流动,所以径向速度减小;在大于叶轮外径区域,径向速度又逐渐增大,速度脉动值开始减小,原因是此区域以贯通流为主,液流由叶轮流出,流向出口.从三维脉动速度曲线分布可知,叶轮流道中部对应的无叶腔速度脉动较大.

3.2 叶轮内速度分布

图6所示为叶轮内的周向速度及其对应的脉动速度分布曲线.从曲线可知,在叶片进口附近,即 $r/R_2 = 0.3 \sim 0.4$ 范围内,由于叶片的作用,液流周向速度上升很快,并且大于相同半径上的圆周速度.从速度三角形分析可知,在此范围内,液流角大于叶片进口安放角,液流的相对速度方向偏向于叶片的背面,说明叶片进口处液流已有预旋.由此可知,此处流动损失较大,速度脉动值呈递减趋势.在 $r/R_2 = 0.4 \sim 0.5$ 范围内,周向速度达到极大值,脉动速度达到极小值, $r/R_2 > 0.5$ 后,周向速度开始逐渐减小,相应的

脉动值逐渐增加. 液流流出叶轮后与蜗壳壁面发生碰撞, 此处速度脉动值较大.

图7为叶轮内的轴向速度及其对应的脉动速度分布曲线. 叶轮内轴向速度分布与无叶腔中分布基本相似, 但也有其特点: 液流一般在 $r/R_2 < 0.7$ 区域流入叶轮, $r/R_2 > 0.7$ 后开始流向无叶腔. 脉动速度分布同无叶腔中脉动速度对应, 仍为流道中部脉动速度较大.

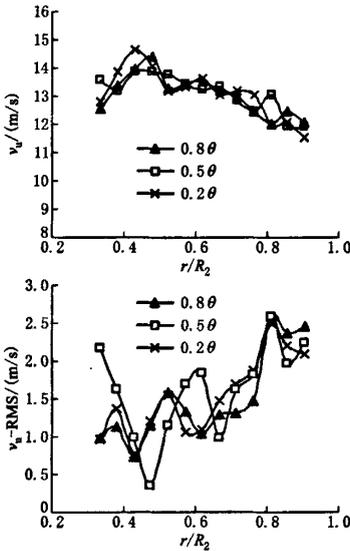


图6 叶轮内周向速度及其脉动速度分布
Fig.6 Circumferential velocity component and fluctuating distributions in impeller

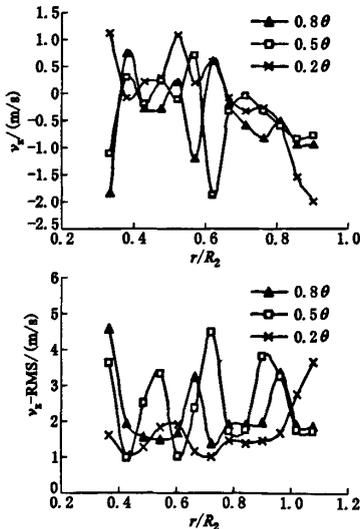


图7 叶轮内轴向速度及其脉动速度分布
Fig.7 Axial velocity component and fluctuating distributions in impeller

由于试验装置和光路布置的局限性, 叶轮内径向速度测量范围有限, 测点仅分布于叶轮出口附近, 所以这里未给出径向速度分布曲线. 此项工作将在下一步研究中完善.

比较三维均方根脉动速度值可知, 无叶腔与叶轮内的周向、轴向和径向的速度脉动值在同一量级, 且相差较小, 可以认为旋流泵内三维速度脉动呈各向同性. 这为泵内流场数值计算时湍流模型的选择提供了依据.

4 结论

运用激光测速技术测量旋流泵内部流场的流动规律, 获得了泵内三维速度分布及相应的脉动速度值. 从以上分析可以得出以下结论:

- 1) 旋流泵内流场是强制涡旋和自由涡旋的叠加, 同时存在循环流与贯通流, 与前人提出的流动模型相吻合.
- 2) 无叶腔与叶轮内周向速度分布差异较大. 在叶轮进口处, 液流已有预旋, 流动撞击损失较大; 受循环流影响, 轴向速度波动较大; 径向速度呈现先减小后增大的变化规律.
- 3) 该型泵内三维湍流脉动呈各向同性. 可为数值计算中湍流模型的选择提供依据.

在本研究的基础上, 可以进一步深入研究旋流泵内部两相流场的运动规律.

参考文献 (References)

[1] 汪永志, 施卫东, 董颖. 旋流泵的研究现状与展望 [J]. 排灌机械, 2004, 22(2): 8-11.
WANG Yong-zhi, SHI Wei-dong, DONG Ying. Present status and development prospect of vortex pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2004, 22(2): 8-11. (in Chinese)

[2] 沙毅, 杨敏官, 康灿, 等. 污水渣浆旋流泵设计及特性试验 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26(2): 153-157.
SHA Yi, YANG Min-guan, KANG Can, et al. Design and performance experiment of sewage and slurry vortex pump [J]. *Journal of Jiangsu University: National Science Edition*, 2005, 26(2): 153-157. (in Chinese)

[3] Hideki O, Yukitoshi N, Kazuaki S, et al. A study on performance and internal flow pattern of a vortex pump [J]. *Bulletin of the JSME*, 1978, 21(162): 1741-1749.

- [4] Masanori A. Studies on the vortex pump (1st report) [J]. *Bulletin of the JSME*, 1983, 26(213):387-393.
- [5] Masanori A. Studies on the vortex pump (2nd report) [J]. *Bulletin of the JSME*, 1983, 26(213):394-398.
- [6] Masanori A. Studies on the vortex pump (3rd report) [J]. *Bulletin of the JSME*, 1983, 26(216):1014-1019.
- [7] Masanori A. Studies on the vortex pump (4nd report) [J]. *Bulletin of the JSME*, 1983, 26(216):1020-1025.
- [8] Chen Hongxun. Research on turbulent flow within the vortex pump [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2004, 16(6):701-707.
- [9] 杜朝辉, 竺晓程. 激光测速技术及其在叶轮机械旋转流动中的应用 [J]. *热力透平*, 2003, 32(4):205-211.
- DU Zhao-hui, ZHU Xiao-cheng. Laser velocimeter and its application to rotating flow measurement in turbomachinery [J]. *Thermal Turbine*, 2003, 32(4):205-211. (in Chinese)
- [10] 岑旗钢, 王贞涛, 闻建龙. 切削加工喷雾冷却雾化特性的试验 [J]. *排灌机械*, 2007, 25(3):53-56.
- CEN Qi-gang, WANG Zhen-tao, WEN Jian-long. Experimental study on spray characteristics for metal cutting by PDA [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(3):53-56. (in Chinese)
- [11] Angelo A, Sergio B, Carmine D B. Experimental and numerical investigation on the effects of seeding properties on LDA measurements [J]. *Journal of Fluids Engineering, Transaction ASME*, 2005, 127(3):514-522.

(责任编辑 赵 鸥)

“潜水泵理论与关键技术研究及推广应用”项目获国家科技进步二等奖

1月8日上午,一年一度的国家科学技术奖励大会在北京人民大会堂隆重举行.由江苏大学袁寿其研究员等完成的“潜水泵理论与关键技术研究及推广应用”项目,喜获国家科学技术进步二等奖.项目完成人为袁寿其、施卫东、关醒凡等人,第一完成单位是江苏大学,合作单位包括江苏亚太泵阀有限公司、南京蓝深制泵集团股份有限公司、上海凯泉泵业(集团)有限公司等.

该项目历时20年,研究开发了小型潜水电泵、潜水排污泵、潜水轴/混流泵、井用潜水泵共4大类400余种规格的潜水泵系列产品,综合技术指标居国际先进水平,已先后转让及技术辐射了江苏亚太泵阀有限公司等近1000家企业,产量约占全国潜水泵总产量的60%以上,年产量达1000余万台,大量替代同类引进产品,并出口创汇,加速了我国泵行业技术的发展和进步,促进了产业结构的调整、优化、升级及产品的更新换代.据50家企业统计,近3年累计新增产值54.51亿元、利润6.88亿元、税收3.25亿元,创收外汇4亿美元,取得了巨大的经济效益和良好的社会效益.

(转载自 <http://www.ujs.edu.cn/pub/xiaonei/xinwen/jdxw/view/3056>)

本刊被评定为江苏省一级期刊

年前,从江苏省第六届期刊质量评估分级及优秀期刊评选结果获悉,《排灌机械》杂志被评定为“江苏省一级期刊”.这是本刊首次参加此项评比活动,因此被认为实现了自我超越.

本届期刊质量评估分级评审程序严格,评审委员会按照《期刊出版管理规定》和评刊工作方案的要求,从政治、业务(学术、技术、影响力)、编辑、出版等方面对每种期刊进行审核,评选出一级、二级、三级等3个等级.

本刊自归口江苏大学杂志社管理后,综合实力得到了显著提升,编辑出版水平上了一个新台阶.我们将以本次期刊评级为新的契机,继续发扬孺子牛精神和勤奋进取的作风,营造团结和谐、积极向上的氛围,立足本职岗位,开拓创新,为实现编辑出版工作的跨越式发展而努力.

(清风)