

射流泵流场的 PIV 测量

何培杰, 龙新平, 梁爱国, 刘景植, 陆宏圻

(武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 利用粒子图像速度场仪(PIV)对射流泵渐缩锥形入口、等径直管内有限空间水射流进行测量。该射流泵喉管面积与喷嘴面积之比为 4.75, 基于射流泵喷嘴直径 D 和喷嘴出口流速计算的雷诺数为 3.68×10^5 。通过流量比在 0.20 ~ 0.80 之间的变化来研究流量比对流场的影响。获得了射流泵对称面流场的速度矢量、轴心速度分布和轴向速度等值线图。结果表明: 当射流泵的面积比确定后, 射流泵内有限空间射流结构只与射流泵的流量比有关, 流量比愈小, 其轴心速度衰减得愈快, 高速射流区愈短。测量结果为射流泵理论研究和优化设计提供可靠依据。

关键词: 粒子图像速度场仪; 射流泵; 流速测量; 射流

中图分类号: TV133.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2004)03-0296-04

射流泵内部流动属不规则区域的有限空间射流。有限空间射流是指射流自喷嘴或孔口出流后, 流入一有限区域(或周边区域受到约束)的流动。人们对射流泵内部流动的研究是从研究规则区域(平面、等径直管等等)的有限空间气体射流开始的。早期是用毕托管与热线风速仪测定流速及其脉动值^[1,2]。由于上述方法测定流场时会干扰流场, 因而所测之值并非流场真实的参数分布。随着激光多普勒测速技术(LDA)的发展, LDA 技术逐渐被应用到有限空间射流的流场测试中来。Suzuki、Ida 在研究回流区热传导问题时对等径直管内有限空间水射流进行了 LDA 测试, 测得了时均及脉动速度、紊动能和 Nu 数的分布^[3]。罗为民^[4]、龙新平^[5]对射流泵内有限空间水射流流场进行了一维 LDA 测试, 由于是一维测试, 而且没有采用实时信号处理系统, 因而仅测出了时均流场的分布。用 LDA 技术对有限空间射流流场进行测试, 总的来说做了大量工作, 但还不够完整和全面。

PIV 技术与单点测量方法如皮托管, 热线风速仪和激光多普勒测速仪相比, 优点是突破了空间单点测量技术的局限, 能进行二维和三维全场瞬时速度测量, 对流场干扰小等。同时, 现在的 PIV 系统还具备了与单点测量仪器(如激光多普勒测速仪等)相当的空间分辨率, 即使仅限于二维测量, PIV 技术也是一种详尽的研究复杂流动的定量工具^[6]。由于 PIV 技术的上述优势决定了将其用于射流泵内部流动的可能性。

1 实验装置

1.1 射流泵模型

实验所用射流泵模型结构如图 1 所示。除喷嘴用 45 号钢制作外, 射流泵其它部分都用有机玻璃制成。测试时在所测射流泵喉管入口段、喉管段周边做了一有机玻璃矩形水槽以消除光折射对测试的影响。

1.2 封闭式射流泵循环系统

试验中为了模拟射流泵的吸水过程, 采用了一封闭式循环系统, 如图 2 所示。离心泵在电机的带动下, 从水池中抽水形成工作水流; 工作水流从射流泵喷嘴喷出形成射流, 由于射流的紊动扩散作用, 射流泵从水池吸水形成被吸水流; 工作水流和被吸水流在射流泵中发生动量交换形成混合水流, 混合水流最后流回水池, 完成整个循环过程。用离心泵出口调节阀来调节工作水流流量 Q_0 , 用射流泵出口球阀来调节混合水流流量 Q_c , 从

收稿日期: 2003-01-10; 修订日期: 2003-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59879020)

作者简介: 何培杰(1968-), 男, 湖北孝感人, 武汉大学动力与机械学院博士后, 主要从事喷射技术研究。

E-mail: hepeijie @public.wh.hb.cn

而达到改变流量比 $q = (Q_c - Q_0) / Q_0$ 的目的。射流泵工作水流流量和混合水流流量用 IFS4000 型电磁流量传感器及其相应的 IFC090F 信号转换器测量。

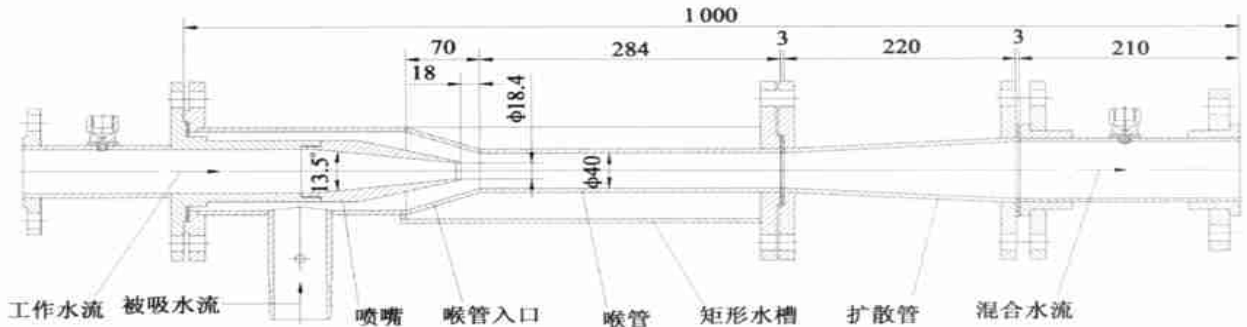


图 1 射流泵模型

Fig. 1 Model of jet pump

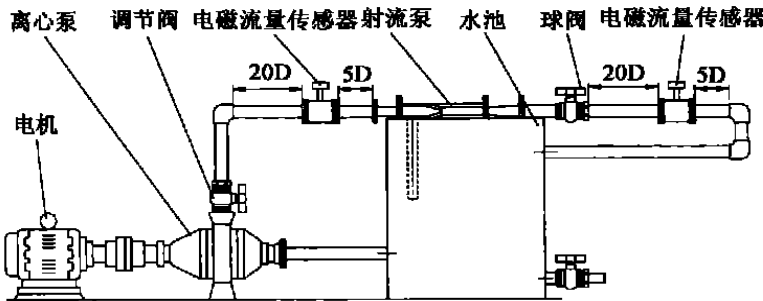


图 2 实验系统布置图

Fig. 2 Structure of the experiment system

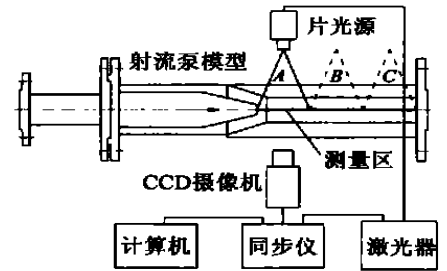


图 3 PIV 系统示意图

Fig. 3 Schematic of the PIV system

1.3 PIV 系统

本次实验所用的 PIV 测试系统如图 3 所示。由脉冲激光器通过柱面镜和球面镜形成的片光源，照亮流场中的一个很薄(约 1 mm 厚)的流场层片；在与片光源相垂直方向的 CCD 摄像机摄下了流场层片中流动粒子的图像；然后把图像数字化送入计算机，利用互相关原理进行图像处理。

由于 PIV 测量区域最大尺寸为 105 mm × 105 mm，而所要测量的射流泵喉管入口段、喉管段对称面流场尺寸为 285 mm × 40 mm，为此，通过移动片光源和 CCD 的轴向位置(位置 A、B 和 C)可测得整个对称面流场。测试时，先根据电磁流量传感器的工作水流流量 Q_0 ，调节喷嘴出口流速到 20 m/s，在保持喷嘴出口流速不变的情况下对图 3 所示的 3 个轴向位置分别进行测量；然后保持喷嘴出口流速不变，改变流量比 q ，再次对 3 个轴向位置分别进行测量。

2 实验结果及分析

实验结果见图 4~图 6。其射流泵喷嘴出口流速 U_0 量纲为一，喷嘴直径 D 和 U_0 计算的雷诺数为 3.68×10^5 。

2.1 速度矢量

需要指出的是，射流泵喉管入口段和喉管段是粘接的，由于粘胶分布的不规则性以及粘胶所带来的反光等问题， $X/D = 2$ 以前和 $X/D = 13.8$ 以后的流场呈无规律性，且测试结果不够准确。因此，以下仅给出了 $2D \sim 13.8D$ 以内的 PIV 测量结果。

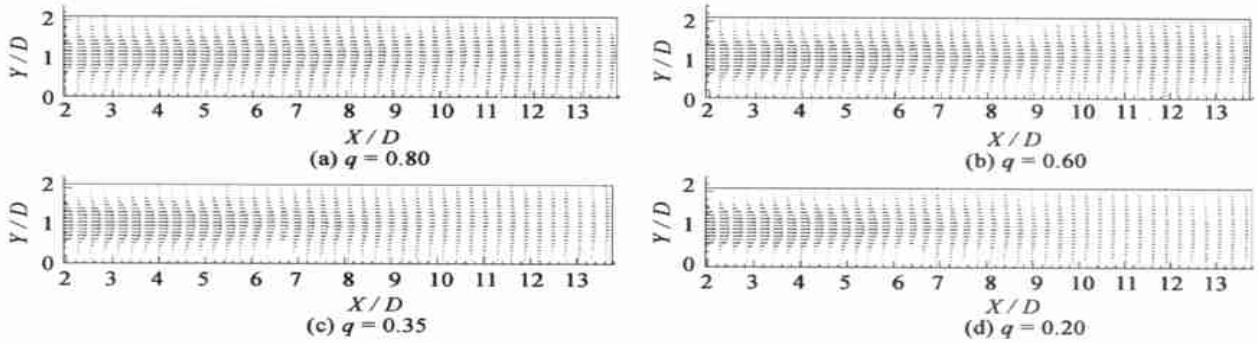


图4 射流泵对称面流场速度矢量图

Fig. 4 Velocity vectors on the symmetry plate of jet pump

射流泵对称面流场速度矢量见图4。在射流泵喉管入口段和喉管段，速度矢量图显示流动具有射流特征，射流核心区内轴向时均速度近似相等，对应喷嘴边缘的径向位置处出现最大的时均速度径向梯度。由于湍流混合和射流卷吸，随流动的发展，速度剖面不断扩展，而剖面峰值则不断降低，至 $X/D = 13.0$ ，整个速度剖面已基本稳定。

2.2 轴心速度

图5为除流量比不同外,其它条件均相同情况下的射流泵流场轴心速度分布图。从图5可看出:各种工况下射流泵内部流动的大趋势是一致的,射流轴心速度均随轴向位置增加而减小,但流量比 q 愈小,其轴心速度衰减得愈快。

2.3 速度等值线

射流泵对称面流场轴向速度等值线如图6所示。

对照图5、图6可以看出,当射流泵喉管和喷嘴的尺寸确定后(即射流泵的面积比确定后),流动的结构只与射流泵的流量比有关(即与工作射流和被吸流体的速度比有关)。在大流量比情况下,即工作射流和被吸流体的速度比较小的情

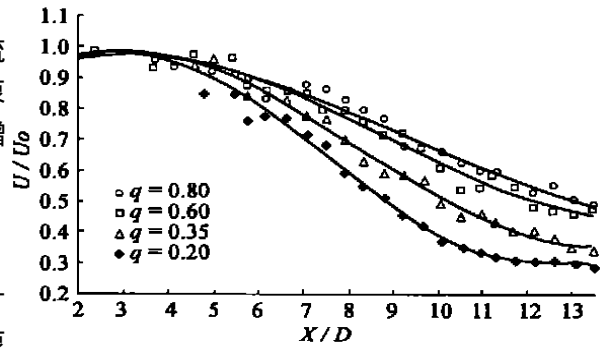


图5 射流泵流场轴心速度分布

Fig. 5 Centerline velocity decay

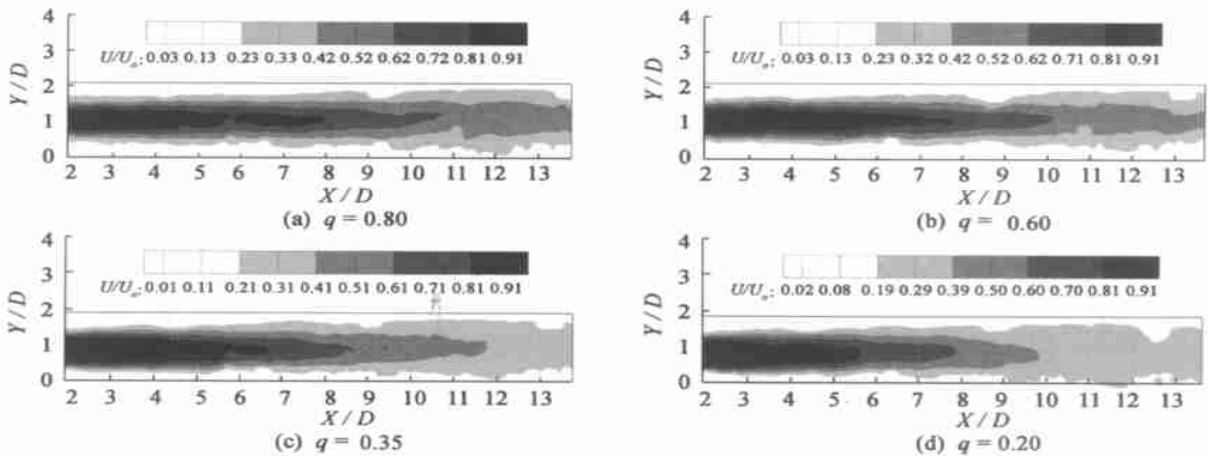


图6 射流泵对称面流场轴向速度等值线图

Fig. 6 Axial velocity contour on the symmetry plate of jet pump

况下,两股流体要混合一致,工作射流所付出的能量较少,射流衰减就较慢,因此高速射流区域就保持得较长,从图6可以清楚地看见这个过程。随着流量比的减少,高速射流区越来越短,这也在图5的轴心速度分布清楚地表现出来。另外,在小流量比情况下(图6(d)),射流在扩展到壁面之前,如果被吸流体不能供给工作射流卷吸所需要的流体,则射流要从下游卷吸流体,从而形成回流。由于回流是要消耗能量的,必然引起效率的降低。因而当结构参数一定时,为了保持高效运行,射流泵应在一个适当的流量比 q 范围内运行。

3 结 论

(1) 用PIV进行流场测试对流场无干扰,一次能测量整个视场。由测试得到的数据文件还便于处理成多种易于理解的形式。

(2) 射流泵的基本工作机理就是湍流混合、射流卷吸过程。当射流泵的面积比确定后,流动的结构只与射流泵的流量比有关。为了保持高效运行,射流泵应在一个适当的流量比 q 范围内运行。

(3) 随着射流向下游的扩展,射流轴心速度不断下降,流量比 q 愈小,其轴心速度衰减得愈快,高速射流区愈短。

(4) 对于小流量比 q 工况,由于射流出流后受到固体边界的约束,射流的扩展受到固壁的限制,射流在扩展到固壁之前卷吸了所有的被吸液流,则固壁边界层会发生分离,在流动方向上产生回流。

参考文献:

- [1] Barchilon M S, Curtet R. Some details of the structure of an axisymmetric confined jet with backflow[J]. Journal of Basic Engineering, 1964, 86: 777 - 786.
- [2] Razinsky E, Brighton J A. Confined jet mixing for non-separating conditions[J]. Journal of Basic Engineering, 1971, 93: 333 - 349.
- [3] Suzuki K, Ida S, Sato T. Turbulence measurements related to heat transfer in an Axisymmetric confined jet with Laser Doppler Anemometer [M]. Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence Shear Flows, University of Karlsruhe, Germany, Paper 18.1 - 18.6.
- [4] 罗为民. 射流泵内部流动的数值模拟及试验研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1988.
- [5] 龙新平. 定常及脉冲有限空间射流的研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1995.
- [6] 石惠娴, 王勤辉, 骆仲决, 等. PIV应用于气固多相流动的研究现状[J]. 动力工程, 2002, 22(1): 1589 - 1593.

PIV measurement of flow field in jet pump^{*}

HE Pei-jie, LONG Xin-ping, LIANG Ai-guo, LIU Jing-zhi, LU Hong-qi

(Institute of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The present work is an experimental investigation of confined water jet in jet pump. The confined jet in a converging conical inlet and in a constant-diameter pipe of the jet pump is measured by particle image velocimetry (PIV). The throat-to-nozzle area ratio of jet pump is 4.75. The Reynolds number based on nozzle outlet velocity and nozzle diameter D of jet pump is 3.68×10^5 . The effect of flow rates on flow field of jet pump is studied by changing the flow rates from 0.20 to 0.80. Velocity vectors, centerline velocity decays and axial velocity contours on the symmetry plate of the jet pump are obtained for four flow rates of 0.20, 0.35, 0.60, 0.80 within a length of $X/D = 13.8$. The results show that the confined jet in jet pump depends strongly on the flow rates when the area ratio is fixed. The smaller the flow ratio is, the quicker the centerline velocity decays are, and the shorter the jet's length of the high-velocity zone is. All results obtained in this paper provide a reliable basis for theoretical study and optimal design of jet pumps.

Key words: particle image velocimetry; jet pumps; velocity measurement; jets

* The project is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 59879022).