

Research on Axial-Flow Pump Inlet Velocity Field and Pump Flow at Different Operating Condition

Jinjie Hu¹, Jianghui Zhao^{2*}, Lei Qiu³

¹Taizhou Hohai Water Conservancy Survey and Design Co., Jingjiang

²Water Conservancy Bureau of Taicang City, Taicang

³Jiangsu Guorun Water Conservancy Construction Co., Taixing

Email: *xyliang521@163.com

Received: Jul. 16th, 2013; revised: Jul. 24th, 2013; accepted: Aug. 10th, 2013

Copyright © 2013 Jinjie Hu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The impeller inlet velocity field of axial-flow pump under the long straight pipe inlet was tested by using LDV technology. The axial velocity distributions of impeller inlet at three measuring lines, and origin interpolation integral flow measurement accuracy under three working conditions were analyzed. The results show that under the three working conditions of $0.8 Q_{opt}$, $1.0 Q_{opt}$ and $1.2 Q_{opt}$, axial velocity backflow does not exist at three measuring lines, and distribution trend is more consistent. The axial velocity of measuring line one appears parabolic distribution, and the distribution under the two working conditions of $1.0 Q_{opt}$ and $1.2 Q_{opt}$ is more uniform than that under the working conditions of $0.8 Q_{opt}$. The axial velocity at the hub side of measuring line two and three is greater, and increasing trend is faster. Error analysis shows that at the three measuring lines of $0.12 D$, $0.22 D$, $0.32 D$ axial distance from the impeller center, the maximum error of flow integration is 1.58% under the three working conditions. The flow can be measured accurately via the origin interpolation integral tool with the operability and applicability.

Keywords: Axial-Flow Pump; Velocity Field; Flow Measurement; LDV Technology; Origin Interpolation Integral

不同工况下轴流泵进口流速场及其流量测试研究

胡金杰¹, 赵江辉^{2*}, 仇磊³

¹泰州市河海水利勘测设计有限公司, 靖江

²太仓市水利局, 太仓

³江苏国润水利建设有限公司, 泰兴

Email: *xyliang521@163.com

收稿日期: 2013 年 7 月 16 日; 修回日期: 2013 年 7 月 24 日; 录用日期: 2013 年 8 月 10 日

摘 要: 采用 LDV 技术对长直管进水条件下轴流模型泵叶轮进口流速场进行了测试, 分析研究了三种工况下叶轮进口三条测线轴向流速分布规律及 Origin 插值积分测流精度。结果表明: $0.8 Q_{opt}$ 、 $1.0 Q_{opt}$ 、 $1.2 Q_{opt}$ 三种工况下叶轮进口三条测线轴向流速均无回流, 分布趋势较为一致; 测线一轴向流速呈抛物线分布, 且 $1.0 Q_{opt}$ 和 $1.2 Q_{opt}$ 工况下分布比 $0.8 Q_{opt}$ 工况均匀; 测线二及测线三轮毂侧流速较大, 增大趋势较快。误差分析显示: 不同工况下叶轮进口三条测线流量积分最大误差为 1.58%。运用 Origin 插值积分工具测流, 具备可操作性及适用性较强、测量精度较高等优点。

关键词: 轴流泵; 流速场; 测流; LDV 技术; Origin 插值积分

*通讯作者。

1. 引言

水泵广泛应用于农田排灌、防洪排涝、工农业供水、跨流域调水等领域,产生了巨大的经济效益和社会效益^[1-3]。掌握水泵及装置性能可为改进设计、改善性能和经济运行提供依据^[4]。内流场测试是揭示水泵叶轮内部流动机理、水动力性能特征及内外特性关系的重要手段。

目前 LDV 技术已广泛应用于流体机械内流场测试中,张武高^[5]介绍了利用 LDV 测量离心泵蜗壳流道内部速度场时均速度与流量两种校核方法;杨昌明^[6]采用 LDV 对轴流泵叶轮内部及进出口旋转流场进行了流动测量研究;Nicholas Pedersen^[7]利用 PIV 和 LDV 测试不同工况下离心泵叶轮内流场;Wuibaut G^[8]对离心叶轮内部流场分别进行 PIV 和 LDV 测试,并进行比较分析;Takayuki Matsunuma^[9]用 LDV 对低雷诺数下轴流式水轮机非定常流场进行了测试;金燕^[10]利用三维 LDV 对贯流泵叶轮出口流场和导叶体内流场进行了流动测量并与数值模拟结果进行了比较。

鉴于长直管进水条件下水泵流道内部流场实际流速流量准确测量缺乏必要研究,本文拟采用 LDV 技术对长直管进水条件下轴流泵叶轮进口流速场进行了模型试验,并运用 Origin 插值积分工具测流,旨在掌握长直管进水条件下水泵叶轮进口轴向流速分布规律及水泵流道内实际流量,为水泵内部流场深入研究提供参考。

2. 试验与方法

2.1. 试验装置

试验装置采用透明有机玻璃制作,由主泵、辅助

泵、电磁流量计、压力水箱、进出水管路等组成,见图 1。测试轴流泵叶轮直径 $D = 150 \text{ mm}$,采用比转数 n 近似 900 的水力模型等比缩小而成,叶轮叶片 4 枚,铝质材料,采用数控加工制作。扬程测试断面 A-A、B-B,电磁流量计和流量显示仪表安装在测试泵前端直管段。

2.2. 水泵性能测试方法

轴流泵装置流量采用 LDG-150S 型电磁流量计传感器、LDZ-6 型电磁流量转换器测量,测试精度 $\pm 5\%$;装置净扬程采用 EJA 型智能式压力变送器测量,工作范围 0~20 kPa、精度 $\pm 0.075\%$,动扬程根据测压断面的面积和流量计算,加上弯头损失,最后求得装置总扬程;功率采用 DZFC-1A 型电能综合分析测试仪测出,测试精度 1.0 级,通过计算得出轴功率;转速采用 HT-4200 型手持光电转速表测量,转速量程 30~50,000 r/min,精度 $\pm 1 \text{ r/min}$ 。性能试验依照 GB/T 3216-2005《回转动力泵水力性能验收试验 1 级和 2 级》标准执行,通过闸阀调节系统流量,依次测试系统不同工况下性能参数。

2.3. LDV 测流法

激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimetry, LDV)是利用流体中运动微粒散射光的多谱勒频移获取流体速度信息的一种仪器。其测速是流体中微粒的运动速度,与流体速度并不完全一致,因此要选择跟随性好的粒子进行测试,多普勒频移频率与速度关系如下:

$$f_D = \frac{2 \sin k}{\lambda} U_y \quad (1)$$

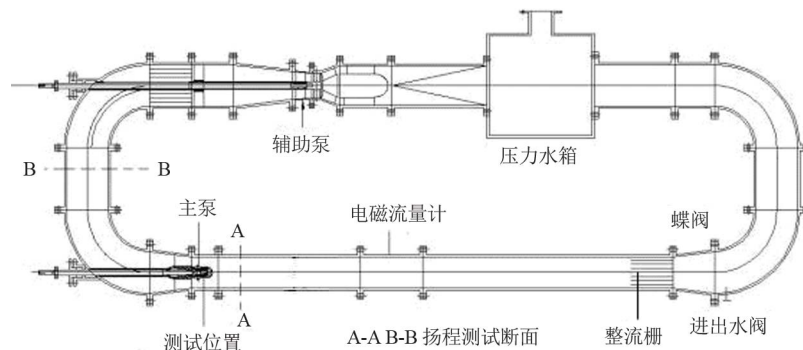


Figure 1. Schematic diagram of the experiment system
图 1. 试验装置示意图

式中：式中 f_D 为多普勒频移频率； k 为两束光之间夹角的一半； λ 为激光波长； U_y 为流体速度。

流场测量采用美国 TSI 公司生产的后向接收五光束 LDV 系统, 见图 2。测试软件采用 FLOWSIZER 2.0, 试验采用 8~12 μm 空心玻璃球作为示踪粒子。

2.4. 测线测点布置

沿叶轮轴向布置三条径向测线, 距离叶轮中心分别为 0.12 D、0.22 D、0.32 D, 其中测线一距离叶轮进口 0.02 D, 见图 3。布置测点时, 对轮毂及外边壁进行了局部加密处理, 共布置 36 个测点。

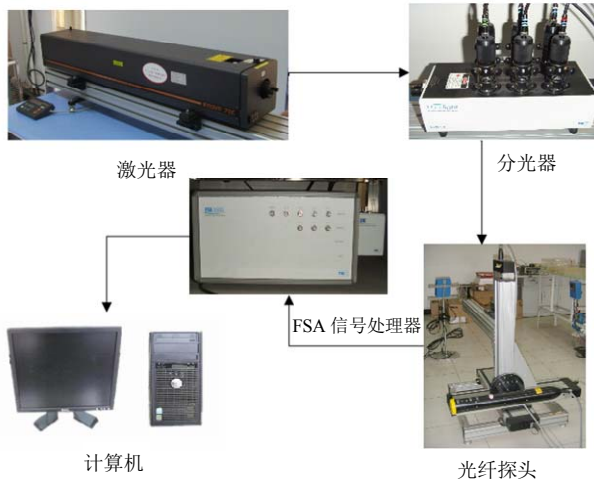


Figure 2. LDV test system
图 2. LDV 测试系统

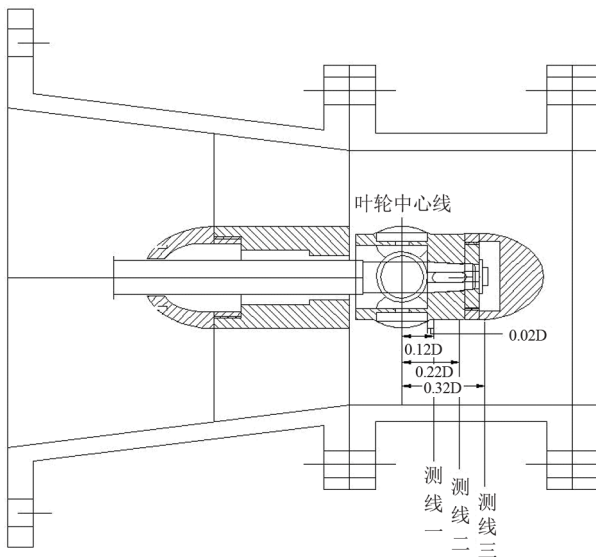


Figure 3. Measuring line(point) layout
图 3. 测线(点)布置图

2.5. Origin 插值积分法

科学绘图与数据处理软件 Origin 提供曲线插值与积分处理工具, 经绘制半径测线轴向速度分布图, 将轴向速度与对应测点半径值相乘即可得到 $r \sim r \cdot v$ 曲线分布图, 对 $r \sim r \cdot v$ 数据进行插值积分, 可算出流量值, 公式如下:

$$Q = \int_{R_0}^R v_i r_i dr \quad (2)$$

式中: R 为环形断面外半径, m; R_0 为环形断面内半径, m; v_i 为第 i 测点流速, m/s; r_i 为第 i 测点所对应的半径, m。

本文测点 36 个, 相对较多, 采用线性插值。经分析比较, 插值点选择 300 个。

3. 结果与分析

3.1. 水泵性能测试结果

图 4 为轴流泵于 1000 r/min 转速下试验装置性能曲线, 其中 H 和 η 分别为模型泵在最高效率点时对应的扬程和装置效率。模型装置效率计算式为:

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{N} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为泵装置效率, %; Q 为泵装置流量, m/s; H 为泵装置扬程, m; N 为泵轴功率, W; ρ 为水的密度, 10^3 kg/m^3 ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 。

由图 5 可得, 最优工况点 $Q_{\text{opt}} = 30 \text{ L/s}$ 。

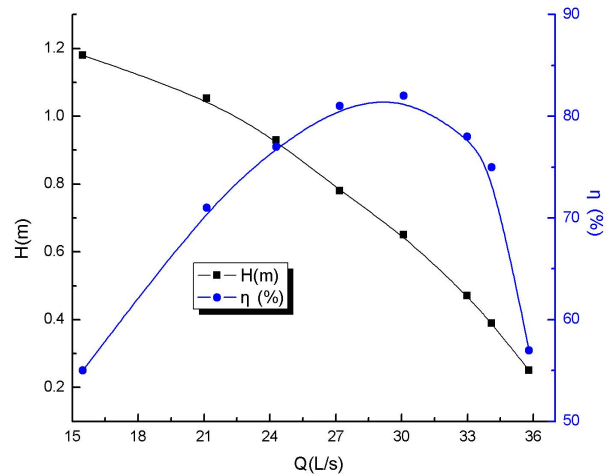


Figure 4. Axial flow pump performance curve
图 4. 轴流泵装置性能曲线

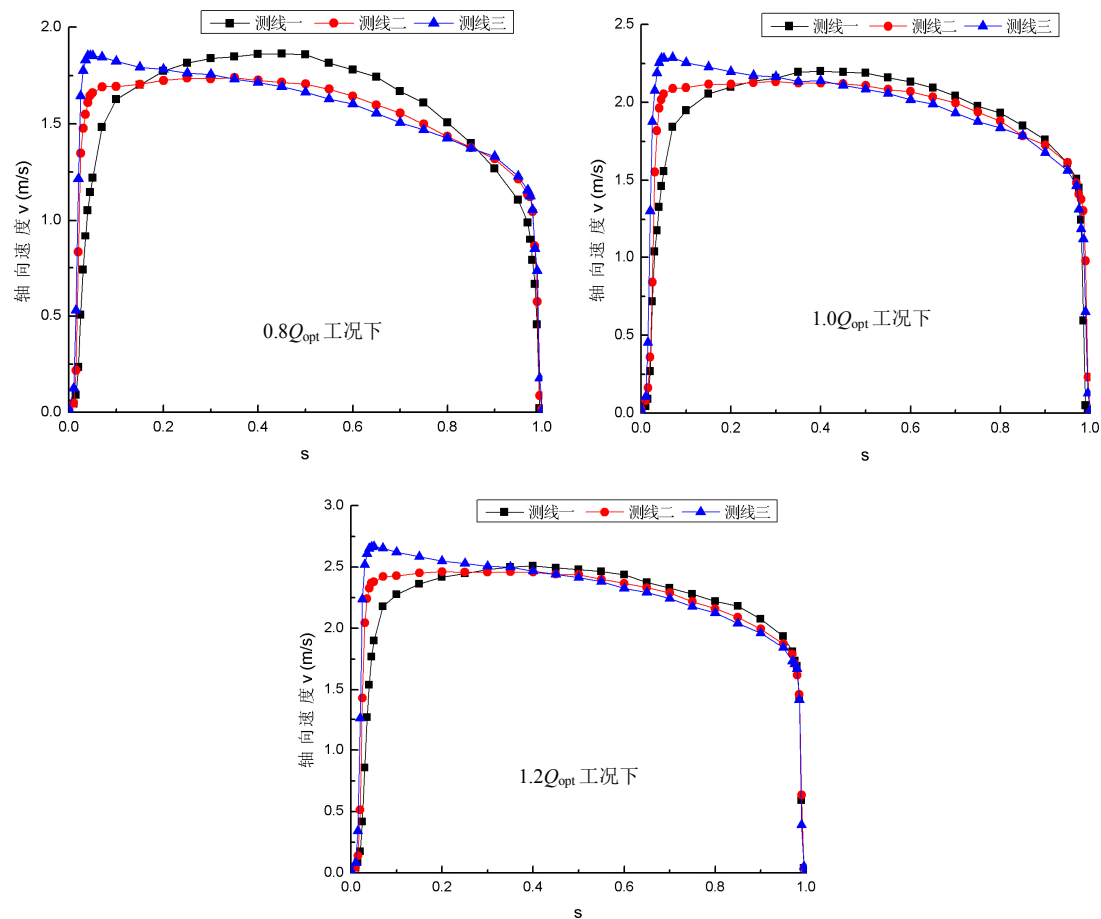


Figure 5. Three measuring line axial velocity distribution of the impeller inlet at three different operating conditions
图 5. 不同工况下叶轮进口三条测线轴向速度分布图

3.2. LDV 测试结果与分析

根据轴流泵性能测试结果，确定选择 $0.8 Q_{opt}$ 、 $1.0 Q_{opt}$ 、 $1.2 Q_{opt}$ 三个工况进行 LDV 测试。测点径向位置采用无因次坐标表示，定义 $S = (r - R_0) / (R - R_0)$ ，其中 $S = 0$ 表示测点位于轮毂表面， $S = 1$ 表示测点位于叶轮室表面。

由图 5 分析可得：不同工况下，三条测线轴向速度分布趋势较为一致，均无回流现象；测线一呈抛物线分布，速度增大趋势较缓，且 $1.0 Q_{opt}$ 及 $1.2 Q_{opt}$ 下轴向速度分布比 $0.8 Q_{opt}$ 工况均匀；测线二、三轮毂侧速度较大，速度增大趋势较快，轮毂侧速度大于外壁测速度值。

3.3. Origin 插值积分测流误差分析

通过对试验得出的轴向速度分布进行 Origin 插值积分可算出不同工况下的流量值，以测线三为例，轴

Table 1. The contrast between different measuring line integral flow and electromagnetic flow meter readings at different operating conditions

表 1. 不同工况不同测线流量积分与电磁流量计读数对比

工况	测线	流量计读数 $/L \cdot s^{-1}$	流量积分值 $/L \cdot s^{-1}$	相对误差 /%
一	测线一	24.08	24.38	1.25
	测线二	24.07	23.69	-1.58
	测线三	24.19	23.96	-0.95
二	测线一	30.20	30.33	0.43
	测线二	30.13	30.05	-0.27
	测线三	30.19	29.99	-0.66
三	测线一	35.04	34.77	-0.77
	测线二	35.07	34.66	-1.16
	测线三	35.12	34.81	-0.88

向速度分布及积分插值曲线见图 6。

分别对 3 个测试工况、三条测线进行插值积分，可得出流量值，不同工况不同测线流量积分值与电磁流量计读数对比分析见表 1。

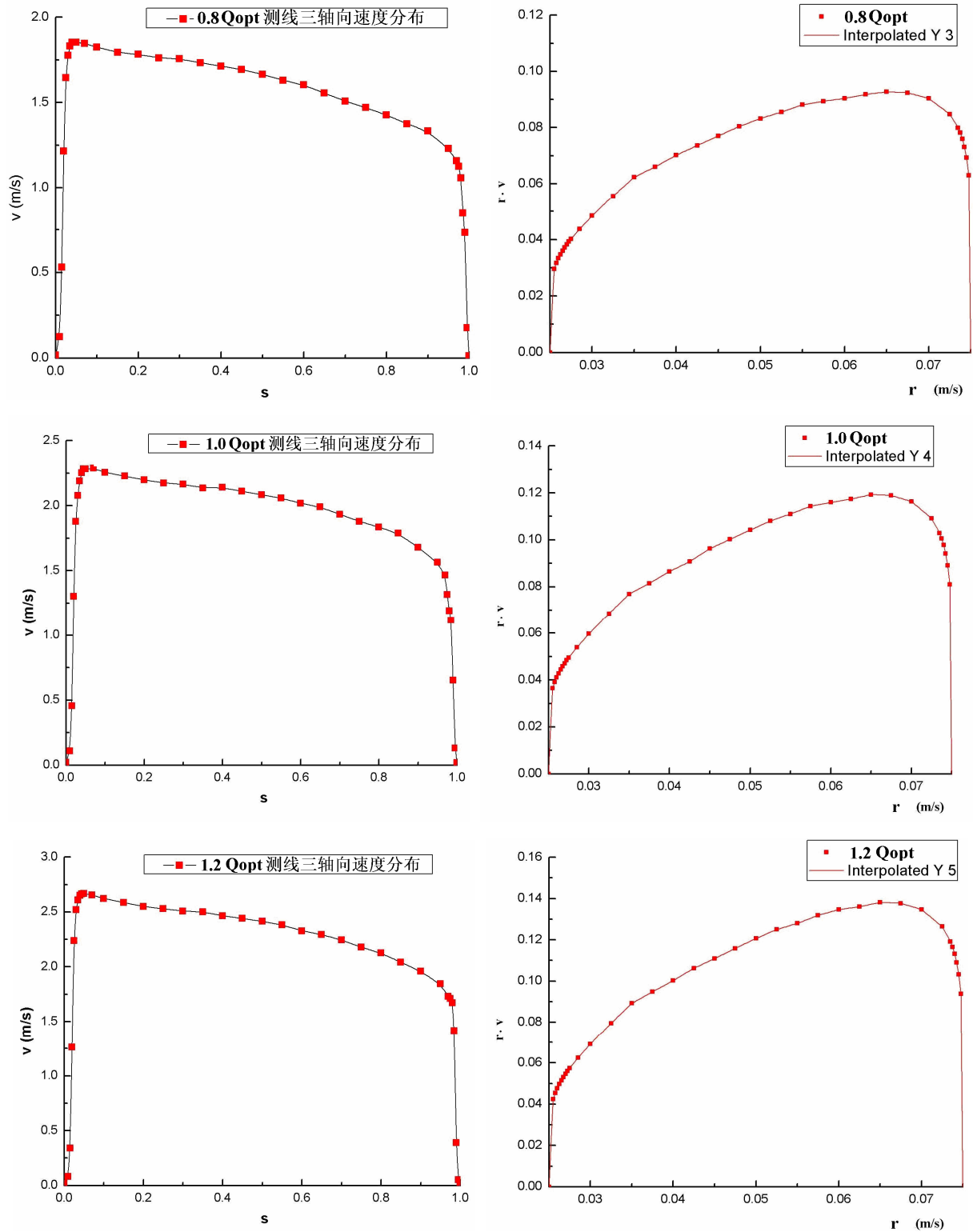


Figure 6. Measuring line three axial velocity distribution and interpolation integral curve at different operating conditions

图 6. 不同工况下测线三轴向速度分布及插值积分曲线图

由表 1 可看出, 不同工况不同测线流量积分值与电磁流量计读数最大误差 1.58%, 说明进口流速分布

较为均匀, 受叶轮旋转影响较小, 采用 Origin 插值积分计算流量精度较高, 结果可靠。

4. 结论

1) 模型试验测出轴流泵装置性能曲线, 得出最优工况点 $Q_{opt} = 30 \text{ L/s}$ 。采用 LDV 技术获取轴流泵在 $0.8 Q_{opt}$ 、 $1.0 Q_{opt}$ 、 $1.2 Q_{opt}$ 三种工况下叶轮进口三条测线轴向流速分布规律。

2) 采用 Origin 插值积分计算水泵流量, 与电磁流量计读数对比, 最大测量误差 1.58%, 精度较高, 结果可靠, 可推广应用。

参考文献 (References)

- [1] 刘超. 水泵与水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 李忠, 杨敏官, 王春林. 轴流泵叶轮出口流场实验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 94-97.
- [3] 杨华, 孙丹丹, 汤方平, 等. 轴流泵非稳定工况下叶轮进口流场试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(5): 406-410.
- [4] 汤正军, 黄季艳, 仇宝云, 等. 大型水泵流量测定方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2006, (12): 67-69.
- [5] 张武高, 陈晓玲, 曹广军. 利用 LDV 测量离心蜗壳流道内速度场的校核[J]. 石油机械, 2000, 28(3): 36-39.
- [6] 杨昌明. 轴流泵间隙流动数值模拟与试验研究[D]. 西南交通大学, 2003.
- [7] N. Pedersen, P. S. Larsen and C. B. Jacobsen. Flow in a centrifugal pump impeller at design and off-design conditions-part I: particle image velocimetry (PIV) and laser doppler velocimetry (LDV) measurements. ASME Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1): 61-72.
- [8] G. Wuibaut, G. Bois, M. El Hajem, et al. Optical PIV and LDV comparisons of internal flow investigations in SHF impeller. International Journal of Rotating Machinery, 2006, 2006: 1-9.
- [9] T. Matsunuma. Unsteady flow field of an axial-flow turbine rotor at a low reynolds number. ASME Journal of Turbomachinery, 2007, 129: 360-371.
- [10] 金燕. 贯流泵内部流动的数值模拟与三维 LDV 测量研究[D]. 扬州大学, 2010.