

文章编号: 100226819(2001)0320045204

## 封闭式水泵吸水池内部流动的 PIV 量测

李永<sup>1</sup>, 李小明<sup>1</sup>, 吴玉林<sup>1</sup>, 袁辉靖<sup>2</sup>, 程卫国<sup>2</sup>, 盛森芝<sup>2</sup>

(1. 清华大学热能工程系, 北京 100084; 2 北京大学力学系, 北京 100871)

**摘要:** 水泵吸水池内部的流动状态非常复杂, 特别是在吸入管的周围, 分布十分复杂的漩涡, 这些漩涡的存在对整个系统的流动状态会产生众多的影响, 有可能使泵站的性能恶化。为了研究吸水池内的流动状态, 用 PIV 量测技术对吸入管附近的流场进行量测, 并对测量结果进行分析, 进而得到测量面上的湍流特征。

**关键词:** PIV; 水泵吸水池; 湍流; 量测

**中图分类号:** TH318

**文献标识码:** A

水泵吸水池的设计在泵站建设中具有重要的意义, 它直接影响到泵站的运行效率和安全。进行水泵吸水池设计时, 一般要遵循下面几个原则: 1) 各过水断面有较均匀的流速分布; 2) 吸水池内部的漩涡要尽量少; 3) 较小的水力损失; 4) 线型简单, 施工方便; 5) 有利于降低造价。其中最重要的就是要减少吸水池内部流动中的漩涡, 它们是引发振动、气蚀和泵效率降低的主要原因, 这些都将使得水泵的性能恶化, 严重时泵站将不能正常工作。水泵吸水池内的流动状态是非常复杂的, 想完全避免漩涡的产生是不现实的, 一般来说, 在吸入管的周围, 分布着一些十分复杂的漩涡, 它们的产生与吸水池和吸入管的结构有很大关系, 也与泵的运行工况有着直接的联系。

本实验要测量一种改良后的封闭式吸水池模型内部的流动特征。这个吸水池模型是根据上述 5 个原则设计的, 为了全面反应吸水池内部的流动状况, 应用粒子成像测速技术(PIV), 在 5 种不同工况下, 对其内部流动进行量测。

### 1 吸水池和吸水管模型

本实验所用的吸水池和吸水管模型都具有特殊的结构<sup>[1]</sup>, 下面分别进行介绍。

水泵吸水池是一个特制的不规则的矩形密封槽, 如图 1 所示。密封槽长为 2 500 mm, 宽 400 mm, 高 248 mm; 槽中央是一垂直的隔板, 将进水口分成两个对称部分, 隔板有特殊的尺寸要求, 在进口段很

薄, 只有 12 mm, 而在接近吸入管时却逐渐变厚, 为 40 mm, 隔板端面是半圆形, 这些设计都是为了优化吸水池中水的流动状态; 吸水池两个进水口大小一致, 从进水方向看, 右侧是进水口 A, 左侧是进水口 B, 使用两个进水口的目的是为了给水泵吸入管周围创造一种不对称的来流条件, 这就使实验更具有—般性和代表性; 在各自进水口的前方都设有稳水栅<sup>[2]</sup>来稳定进水的流动状态; 在靠近吸入管的部分, 吸水池的边缘都设置为倒角的形式。

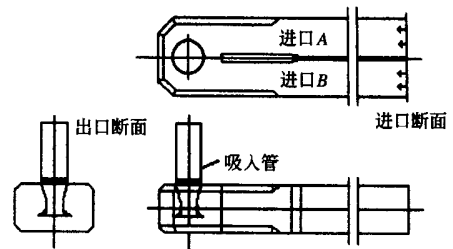


图 1 水泵吸水池结构

Fig 1 Model of pump suction sump

试验所用吸入管具有特殊的喇叭形进口, 它位于吸入管的尾端, 吸入管进口中心到底面的距离为 80 mm, 到后壁的距离为 160 mm, 到左右壁面的距离都为 200 mm。

### 2 试验系统

1) 试验中为了模拟泵的吸水过程, 采用了一个闭路循环系统, 如图 2 所示, 该系统中并没有在吸入管的上方直接连接水泵, 而是通过利用吸水池内部自身的压力, 使水流沿着吸入管流出, 这样产生的流动效果与在吸入管上接水泵的效果相同, 这种结构称为模拟水泵。

收稿日期: 2000212226

基金项目: 清华大学机械学院基础研究基金资助

李永, 博士, 北京市清华园 清华大学热能系, 100084

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

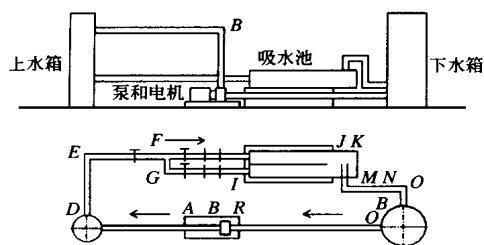


图2 实验系统布置图

Fig. 2 Structure of the experiment system

在这循环系统中,水泵在电机的带动下,将水从下水箱抽到上水箱,上水箱里的水经过主干管流进两个支管,然后分别从A、B两个进口流进吸水池中,吸水池中的水经过锥形吸入管再流进下水箱,完成整个循环过程。在这个过程中,用主干管中的总阀门来调节系统中总流量,用支管中的两个阀门来调节吸水池各个进口的流量。

2) 实验所用的仪器是TSI公司生产,由以下几部分组成:一个双腔Nd:Yag激光器,一个CCD,一个高速数据接口板,一个同步器和数据处理系统。其中激光器为功率120 mJ ÖPulse的Nd:YAG双腔激光器,示踪粒子为直径为10~20 μm的空心玻璃球,所使用的摄像机分辨率为1.3 k×1 k。整个PIV试验系统如图3所示。

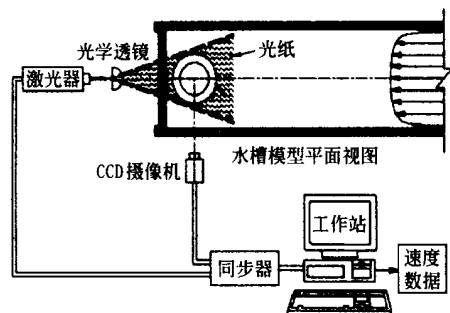


图3 PIV系统示意图

Fig. 3 Schematic of the PIV system

激光器两次脉冲之间的间隔可以为200 ns~600 ns,第二次曝光的时间比第一次曝光的时间要长,每秒钟拍摄3.75对单次曝光照片,在这种情况下可以得到理想的互相关照片。

在实验过程中,在与上、下、左、右壁面平行的四个方位进行拍摄,每个方位又有四个不同位置,每一个位置拍摄40对单次曝光图片,这样,五种工况可以得到3200对单次曝光照片,这些照片能够全面的反映出整个流场内部的流动状态。

3) 为全面反应不同流量下吸水池内部的流动

特征,在试验中,量测了5种工况,A、B两个进口的流量比各不相同,从1.025到1.1。这5种工况为:

入口A处的流量为1.075 m<sup>3</sup>Ön in。

入口B处的流量为0.2685 m<sup>3</sup>Ön in。

泵的总出水量为1.3435 m<sup>3</sup>Ön in。

入口A处的流量为0.905 m<sup>3</sup>Ön in。

入口B处的流量为0.385 m<sup>3</sup>Ön in。

泵的总出水量为1.29 m<sup>3</sup>Ön in。

入口A处的流量为0.965 m<sup>3</sup>Ön in。

入口B处的流量为0.64 m<sup>3</sup>Ön in。

泵的总出水量为1.605 m<sup>3</sup>Ön in。

入口A处的流量为1.32 m<sup>3</sup>Ön in。

入口B处的流量为1.08 m<sup>3</sup>Ön in。

泵的总出水量为2.40 m<sup>3</sup>Ön in。

入口A处的流量为1.32 m<sup>3</sup>Ön in。

入口B处的流量为1.32 m<sup>3</sup>Ön in。

泵的总出水量为2.64 m<sup>3</sup>Ön in。

### 3 试验结果分析

在PIV量测试验结束后,使用TSI公司的Insight软件,运用互相关<sup>[3]</sup>技术,对实验数据进行了初步处理,剔除数据中少量的坏点,并在这些点的位置进行插值,使得实验结果更接近于真实的流动状态。

#### 3.1 速度矢量

在这些处理完之后,再利用Insight软件得出每帧图像各个像素的速度分量,并由40对图像得到各个像素的平均速度( $u_m, v_m$ ),计算公式如下

$$u_m = \frac{\sum_{i=0}^{39} u_i}{40} \quad v_m = \frac{\sum_{i=0}^{39} v_i}{40}$$

式中  $u_0, u_1, v_0, v_1$ ——分别表示每幅图像中各个点的速度矢量。

根据平均速度矢量,用Tecplot 7.5表示出各个面上的速度分布,画出每个面上的速度矢量图、速度等值线图和流线图。

以第3种工况为例,画出吸水池内3个典型位置A、B、C处的速度分布图和流线分布图。与吸入管进口相切的面,称为A面;与吸水管左边缘(从进水方向看)相切的面,它与大流量进口相对应,称为B面;与吸水管右边缘(从进水方向看)相切的面,它与小流量进口相对应,称为C面。

A、B、C 三个面上的速度矢量和速度等值线分布如图 4 所示。

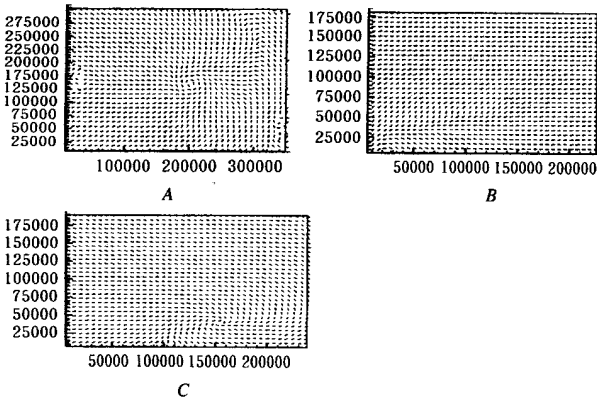


图 4 A、B、C 三个面上的速度分布(长度单位: Lm)

Fig 4 Vertical velocity vector maps of the A, B and C planes (scale unit: Lm)

流线分布图如图 5 所示。

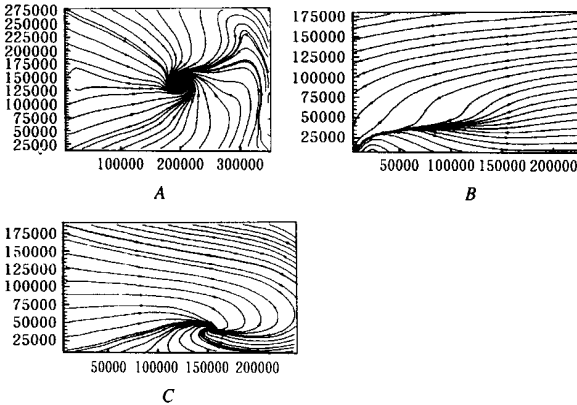


图 5 A、B、C 三个面上的流线分布(长度单位: Lm)

Fig 5 Stream line maps of the A, B and C planes (scale unit: Lm)

从速度分布图和流线分布图中可以看出, 在第三种运行工况下, 吸水池内部的时均流动比较平稳, 除了在吸水管进口处形成较大的漩涡以外, 在其他地方没有明显的漩涡产生, 在水平方向上, 小流量的那边会产生一个大的扰动, 在竖直面, 大流量的一面流动相对规则, 小流量的一面流动的波动较大, 这是由于两个进口的水流在吸水池尾部相互撞击造成, 大流量的一端经过吸水池尾部后发生偏转, 在小流量一端形成回流, 从而造成小流量一边的流动相对复杂。

对其他几种工况下的流动显示进行分析, 可以发现, 当两个进口的流量比越大时, 小流量一端的流动就越混乱, 而大流量一端的流动始终比较规则。

### 3 2 湍流特征

要全面的反应吸水池内部的流动特征, 只知道各个面上的时均速度是不够的, 还要知道吸水池内部的瞬间流动特征。这需要用表征流体湍流特征的两个物理量: 速度的标准偏差和湍动能。

对试验数据进行进一步处理, 可以得到测量面上各个点速度的标准偏差和湍动能。

对每个位置的 40 对照片所显示的速度矢量进行分析, 可以计算出每个面上各个点速度的标准偏差, 公式如下

$$u_{ms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{39} (u_m - u_i)^2}{40}}$$

$$v_{ms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{39} (v_m - v_i)^2}{40}}$$

得出各个面的速度偏差之后, 可求出面上各点的湍动能, 计算公式如下

$$k = \frac{1}{2} (u_{ms}^2 + v_{ms}^2)$$

上述三个测量面上的湍动能如图 6 所示。

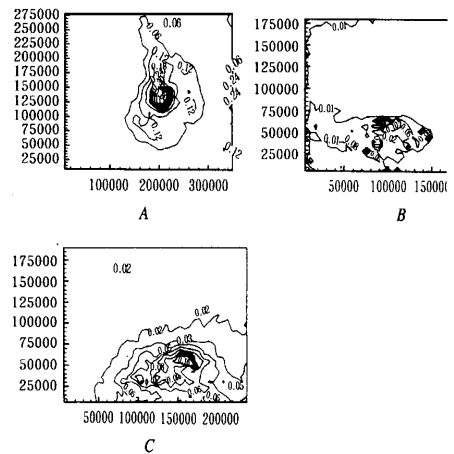


图 6 A、B、C 三个面上的湍动能(长度单位: Lm)

Fig 6 Turbulent kinetic energy maps of the A, B and C planes (scale unit: Lm)

从三个面上的湍流特征图中可以看出, 在吸水池的内部, 大部分区域的湍动能是比较小的, 说明这些地方的流动比较平稳; 而在水泵吸入管的进口附近, 湍动能相对较大, 这说明在该处流动变化比较剧烈, 湍流特性很强; 在吸水管的中心位置, 湍动能最大, 可以达到  $0.6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ; 另外, 在吸水池后端的一些位置, 湍动能也比较大, 是由于水流在吸水池尾端发

生偏转造成的,这与预测的情况相吻合。

对其他几种工况下的流动进行分析,可以知道吸水池内总的流动状况是好的,除了在吸入管附近的湍动能稍大外,其他位置的湍动能都很小,这对提高泵站的运行性能很有帮助。

#### 4 结 论

1) 用 PIV 技术对吸水池内部流动进行量测的结果表明,改进的密封式不规则矩形吸水池在各种不同的工况下都具有良好的流动性能,对减小震动、降低汽蚀和提高泵站的效率有着重要的意义。

2) 对于自然界中绝大多数紊流来说,其流动特征都是三维的,本试验所研究的吸水池内部流动也不例外,尤其在吸入管进口附近,其三维流动特性是

非常强烈的,在目前的 PIV 试验中,由于条件所限和技术上的原因,还不能对三维流场进行全面的量测,因此只能得到二维平面内的流动特征。为了对内部的流动进行全面的反应,从三个不同的方向都进行拍摄二维照片,由此可以对整个流场的流动进行测量。

#### [参 考 文 献]

- [1] 徐 宇,吴玉林,王 琳 水泵吸水池内紊流及漩涡的数值模拟[A] 中国工程热物理学会流体机械学术会议论文集[C] 北京,2000
- [2] Veera P Rajendran, G S Constantinescu Experiments on flow in a model water pump intake sump to validate a numerical model [A] ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting[C], 1998 6

### P IV Experiments on Flow in a Closed Model Pump Suction Sump

Li Yong<sup>1</sup>, Li Xiaoming<sup>1</sup>, Wu Yulin<sup>1</sup>, Yuan Huijing<sup>2</sup>, Cheng Weiguo<sup>2</sup>, Sheng Senzhi<sup>2</sup>

(1 Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China;

2 Department of Mechanics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The flow conditions in the pump suction sump are very complex, there are kinds of vortices in and around the pump bell, these are common problems, which lead to poor pump performance. PIV technologies are used to measure the flow conditions in the model of pump suction sump, and the data of the experiments are analyzed to obtain the characteristic of the turbulence on the measurement planes.

**Key words:** PIV; pump suction sump; turbulence; measurement