

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.017

基于动静干涉的离心泵转速测量机理与实验^{*}

潘中永¹ 倪永燕² 袁寿其¹ 李 红¹

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 镇江 212003)

【摘要】 离心泵叶轮和蜗壳的相对运动,使流体在叶轮和蜗壳内的流动相互干涉,从而引起周期性压力脉动。通过流场计算发现流体在蜗壳内沿叶片出口边绝对速度方向上出现明显的高速区域;通过对蜗壳内压力脉动的监测发现,叶轮每转过一周,蜗壳内的压力呈周期性波动,波峰和波谷的数量与叶片数相同。通过对压力的频谱特性分析,发现压力脉动的主频就是叶片通过频率。应用高频压力传感器测量泵出口法兰附近的压力,通过FFT变换发现测得的信号主频也是泵的叶片通过频率。根据离心泵内动静干涉引起的压力脉动的这一特征,将泵出口法兰处得到的压力脉动作为测量泵转速的原始信号,采用快速傅里叶变换技术对压力脉动信号进行后处理,得到的主频就是离心泵的叶片通过频率,应用该叶片通过频率可实现对泵转速的测量。

关键词: 离心泵 动静干涉 压力脉动 转速 测量 实验

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0081-05

Experiment and Mechanism of Centrifugal Pumps Rotation Speed Measurement Based on Rotor-stator Interaction

Pan Zhongyong¹ Ni Yongyan² Yuan Shouqi¹ Li Hong¹

(1. Technology and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Jiangsu University of Science & Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract

As relative motion is existing between the impeller and volute, periodical pressure fluctuations is produced by the flow interaction of the impeller and volute. Numerical simulations showed that obvious high speed regions were formed along the direction of the absolute velocity in the casing at the downstream of the trailing edges. The pressure fluctuations in casing present periodical features, have five peaks and five valleys according to the number of vanes. Frequency spectrum showed that the dominate frequency of the pressure fluctuation was the blade passing frequency. Pressure acquisition in experimental test was executed by a high-frequency pressure sensor installed in the pump outlet flange. FFT technology was used to analyze the measured signals, and it also showed that the dominate frequency was the blade passing frequency. A new technology to measure the pump rotating speed was developed according to the feature of the rotor-stator interaction. The original contents were those pressure signals at the pump outlet. The dominate frequency of the contents was calculated by the technology of FFT, and then the rotating speed was calculated.

Key words Centrifugal pump, Rotor-stator interaction, Pressure fluctuation, Rotating speed, Measurement, Experiment

引言

转速是离心泵的一个重要性能参数。目前离心

泵大都采用异步电动机驱动,泵的转速与电动机的同步转速有差异,在实验和工程应用中需要采用各种各样的转速计来测量泵的实际转速。在实验室中

收稿日期: 2009-04-07 修回日期: 2009-05-31

^{*} 国家杰出青年科学基金资助项目(50825902)和江苏省高校自然科学基金资助项目(08KJB570001)

作者简介: 潘中永, 副研究员, 博士, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: pzy@ujs.edu.cn

最早采用的是日光灯测速法,由于靠目测,测量不精确,这种方法已经很少应用。现在广泛采用的转速测量仪器和方法有两种,一种是光电反射式测速仪,这种测量方式比较方便准确,但是不适用于水下测量,另外,应用该方法测量时,转轴或者与转轴同步旋转的某部件(例如联轴器等)必须可见,因此该方法也不适用于一些叶轮和电动机直联的泵,例如磁力泵和屏蔽泵等。另一种常用的测量方法是基于异步电动机漏磁通感应的感应线圈法,但是随着电动机及其零部件制造和安装工艺水平以及材料性能的不断提高,电动机的漏磁通越来越难于检测。

离心泵的蜗壳是三维非轴对称结构,流体在叶轮和蜗壳内的流动相互干涉并在泵内产生周期性压力脉动。近年来,国内外对离心泵中的动静干涉进行了大量的实验研究和数值分析^[1~2]。González认为压力的脉动特性是描述泵内流态特别是动静干涉问题的关键参数^[3~4]。事实上,对泵内部动静干涉的研究也基本上都是以压力脉动为分析目标进行的^[5~6]。

本文根据离心泵内部流动所具有的动静干涉这一显著特征,在进行流场计算的基础上,根据压力脉动的特征提出一种新型的测量泵转速的方法。

1 动静干涉物理模型

泵主要用来在某一流量下产生一个稳定的压力差以达到输送介质的目的,理想的流量扬程曲线是在某一流量点扬程被认作是静态的。事实上,泵在产生静态压力分量的同时还产生动态压力分量,也就是压力脉动。压力脉动像交流信号一样叠加在静态压力分量上。压力脉动产生的原因有动静干涉、叶轮进出口回流、叶片进口脱流、汽蚀以及过大的耐磨环泄漏等。其中动静干涉是最有特点也是表现最明显的一种现象。

在离心泵中,离心叶轮内流体流动与后续的蜗壳内的流体流动相互干涉并在叶轮下游产生压力脉动。在叶轮和蜗壳隔舌的径向间隙比较小的情况下,压力波动可能与泵内总的压力增量一样大。这种压力脉动的产生主要有两方面的原因,如图1所示,一是由于叶轮叶片和静止的蜗壳隔舌之间的相对运动引起的无粘性相互作用,也就是势流的相互作用;二是叶轮流道内产生的尾迹进入后续的蜗壳流道时,由于尾迹的冲击和传播形成的尾迹的相互作用^[2,7~8]。

2 动静干涉流场分析

2.1 泵模型

为了更详细描述图1所示的动静干涉现象,应

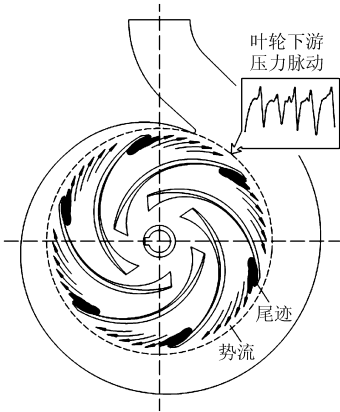


图1 动静干涉物理模型

Fig.1 Physical model of rotor-stator interaction

用Fluent对离心泵内的流场进行计算,分析离心泵内部压力脉动特征。

研究对象为设计比转数 $n_s=35.3$ 的离心泵,该泵的性能曲线如图2所示,转速为 $n=3\,500\text{ r/min}$,叶片数 $z=5$,设计点参数为

$\varphi=0.025\quad\psi=1.046$

其中 $\varphi=\frac{Q}{\pi b_2 D_2 U_2}\quad\psi=\frac{2gH}{U_2^2}$

式中 b_2 ——叶轮出口宽度,m

D_2 ——叶轮出口直径,m

g ——重力加速度, m/s^2

H ——扬程,m Q ——流量, m^3/s

U_2 ——叶轮出口圆周速度, m/s

φ ——流量系数 ψ ——扬程系数

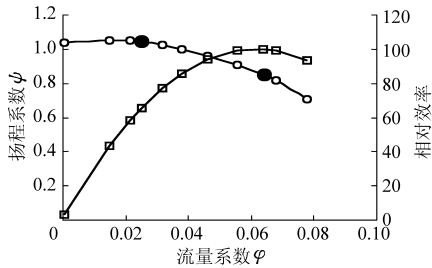


图2 性能曲线

Fig.2 Performance characteristics

该泵为加大流量设计,其最优效率点与设计点不一致,最优效率点的参数为

$\varphi=0.064\quad\psi=0.847$

2.2 数值模拟及分析

应用不可压缩连续方程和Reynolds平均Navier-Stokes方程模拟离心泵内液体的流动,同时使用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭方程组。

离心泵内由于叶轮转动,使得叶轮与入口段和蜗壳形成了两级动静干扰。采用滑移网格模型^[6],在叶轮与入口段和蜗壳之间分别形成两个网格滑移面,以模拟流场内的动静干扰。计算过程中叶轮网

格相对于入口段网格和蜗壳网格转动;各部件的计算同时进行,并且在交界面两侧的通量相等。

首先通过三维定常湍流计算得到定常流场结果,把定常结果作为非定常计算的流场初始条件。定常计算的边界条件为进口边界采用给定均匀速度场,假定进口速度方向垂直于进口截面。出口边界上假定流动为充分发展的流动,即出口断面的速度分布规律沿流动方向不变;同时给定湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 。固壁面采用无滑移边界条件,近壁区应用标准壁面函数。详细计算过程参见文献[9]。

为了获得压水室内的压力脉动特性,如图 3 所示,在数值计算过程中,在压水室内各断面上选取了 6 个点进行监测。

表 1 所示为数值计算所选取的一些工况点,为了便于同实验结果比较,各工况的流量系数以及转速都是在后述的实验基础上提取确定的。表 1 中叶片通过频率 $f_{BPF} = Zn/60$ 。

图 4 为计算得到的泵内部流动的绝对速度分布。从图中可以看出,在所计算的各种工况下,在泵压水室内有明显的高速区,高速区主要出现在自叶片出口边开始的绝对速度方向上。

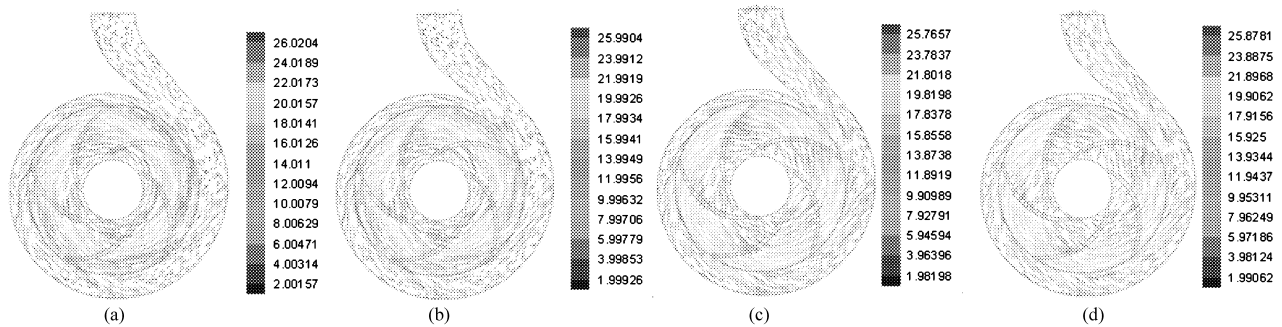


图 4 绝对速度分布

Fig. 4 Absolute velocity distribution

(a) $\varphi = 0.021$ (b) $\varphi = 0.025$ (c) $\varphi = 0.064$ (d) $\varphi = 0.077$

图 5 所示为图 3 各点监测到的叶轮旋转一周时间内的时域压力脉动特性,纵坐标为压力系数

$$\lambda = p / (0.5 \rho U_2^2)$$

式中 p ——监测点静压,Pa

ρ ——介质密度, kg/m^3

从图 5 可以看出,各点的压力波动形式基本一致,都有 5 个波峰和 5 个波谷,这与叶片数是一致的。蜗壳扩散管内的压力波动要比螺旋段的更有规律性。

图 6 为通过快速傅里叶变换 (FFT) 得到的蜗壳内压力脉动的频域特性。从图中可以看出,主频与表 1 中叶片通过频率是一致的。但是在偏离设计工况和最优效率工况的区域 (大流量点和小流量点) 出现了 1 200 Hz 的明显高频特性,出现这种脉动的特性的原因还需进一步分析。

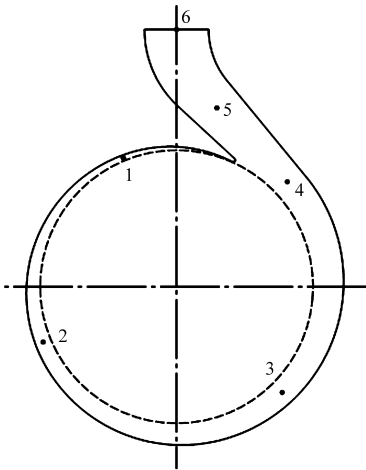


图 3 压水室内监测点

Fig. 3 Indicator points in casing flow passage

表 1 数值计算工况

Tab. 1 Conditions of numerical simulation

流量系数 φ	转速 $n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	叶片通过频率 f_{BPF}/Hz
0.021	3 473	289.4
0.025	3 469	289.1
0.064	3 439	286.6
0.077	3 454	287.8

3 实验分析

为了验证离心泵内部动静干涉引起的压力脉动特性,对离心泵进行了实验研究,实验装置为闭式回路,如图 7 所示,详细的仪器性能参见文献[9],其中在泵出口法兰的取压孔处安装 NMB PRC 高频响应压力传感器,采样频率为 50 kHz。转速的测量采用激光反射式测速仪,由于在泵轴的测速位置安装了具有 100 个齿的反光齿轮,将转速测量的误差降低为一般反射式测速仪的 1%。

实验进行 4 个工况对应的主要参数如表 1 所示。采集的主要数据有流量、进出口压力、转速等,然后对在泵出口法兰采集的压力数据进行 FFT 处理,结果如图 8 所示,从图中可以看出,测得的压力

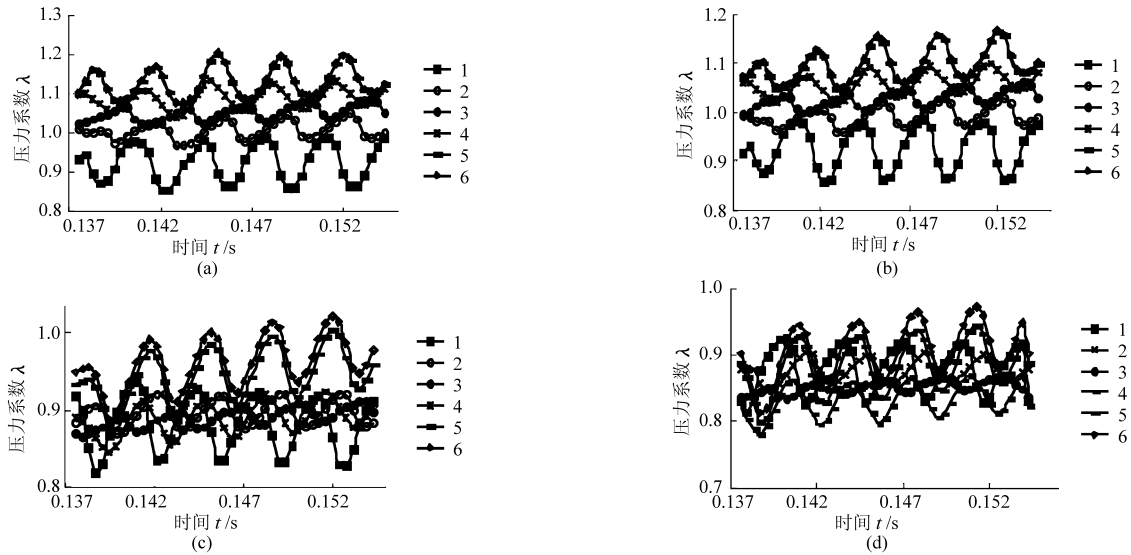


图 5 蜗壳内压力脉动

Fig. 5 Pressure fluctuations in casing flow passage

(a) $\varphi=0.021$ (b) $\varphi=0.025$ (c) $\varphi=0.064$ (d) $\varphi=0.077$

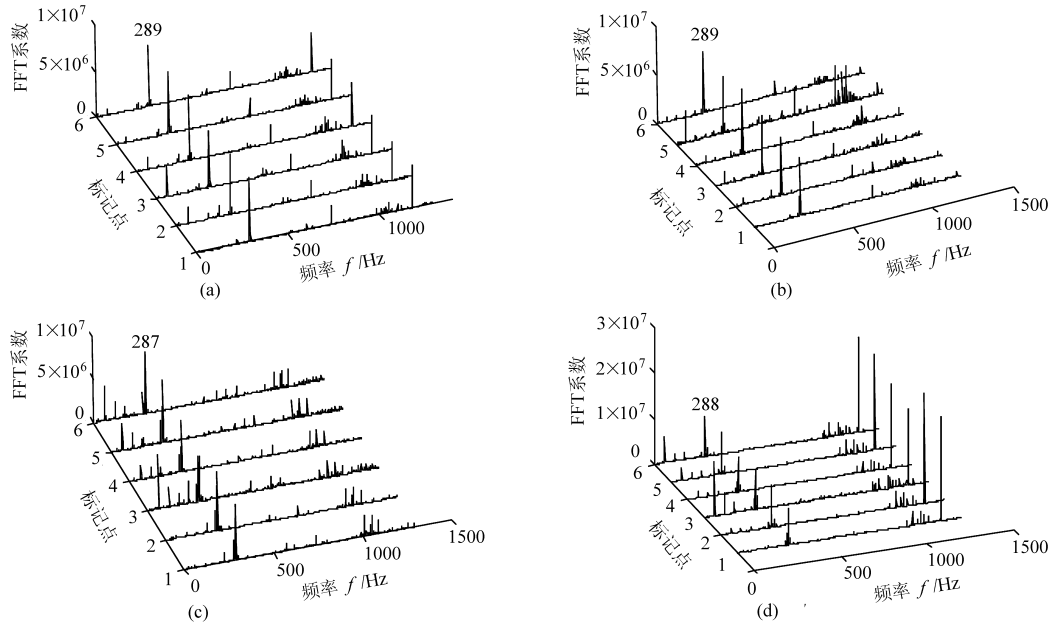


图 6 蜗壳内压力脉动频域特性

Fig. 6 Frequency spectrum of pressure in volute flow passage

(a) $\varphi=0.021$ (b) $\varphi=0.025$ (c) $\varphi=0.064$ (d) $\varphi=0.077$

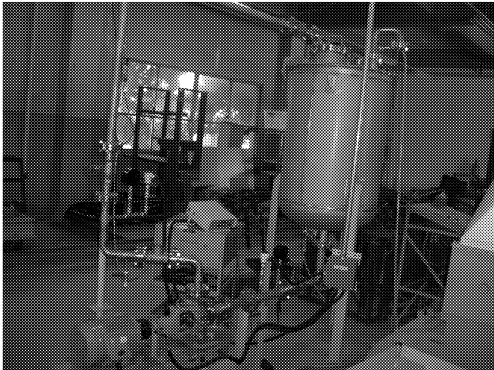


图 7 实验台

Fig. 7 Test rig

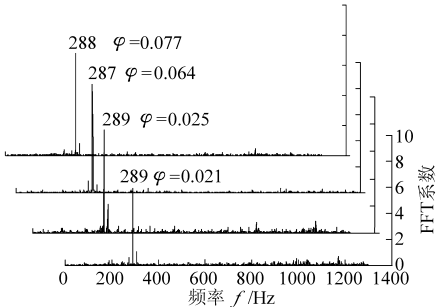


图 8 测量压力的频谱特性

Fig. 8 Frequency spectrum of measured pressure

信号的主频与叶片通过频率相同,而且也没有发现图6中出现的高频特性。因此可以根据测得的压力信号频谱特性的主频计算泵轴的转速。

4 转速测量

根据前述分析结果,可以通过分析泵出口处压力的频谱特性计算泵的转速。步骤如下:泵出口压力采集,FFT变换,查找主频,根据主频应用公式 $f_{BPF} = Zn/60$ 计算转速 n 。

该方法的优点是,将从泵出口采集的压力直接输入计算机进行处理,不用另外添加硬件,不要求泵轴可见,能够适用于测量潜水泵的转速。但是应用

该方法测量泵转速时必须知道泵叶轮的叶片数。

5 结束语

离心泵内的动静干涉是导致泵内部流动不稳定性的一个重要原因,这种流动不稳定性最明显的特征就是引起的内部压力脉动的主频与叶片通过频率相同,本文从数值计算和实验测试两个方面对动静干涉的这一特征进行了验证,在此基础上提出并实现了一种测量离心泵转速的新方法,该方法适用性广,不需要额外的硬件投资,因此是实验室中一种有效的转速测量方法。

参 考 文 献

- 1 Guo S, Okamoto H. An experimental study on the fluid forces induced by rotor-stator interaction in a centrifugal pump [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2003, 9(2): 135 ~ 144.
- 2 Wang H, Tsukamoto H. Fundamental analysis on rotor-stator interaction in a diffuser pump by vortex method [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(4): 737 ~ 747.
- 3 González J, Fernández J, Blanco E. Numerical simulation of the dynamic effects due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 348 ~ 355.
- 4 González J, Santolaria C. Unsteady flow structure and global variables in a centrifugal pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(9): 937 ~ 946.
- 5 Feng J, Benra F K, Dohmen H J. Numerical investigation on pressure fluctuations for different configurations of vaned diffuser pumps [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2007, 13(1): 1 ~ 10.
- 6 Yuan Shouqi, Ni Yongyan, Pan Zhongyong, et al. Unsteady turbulent simulation and pressure fluctuation analysis for centrifugal pumps [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(1): 64 ~ 69.
- 7 杨军虎. 低比转数离心泵叶轮内的流动机理和叶轮设计[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 47 ~ 49.
Yang Junhu. Flow mechanism inside the impeller of a centrifugal pump with low specific speed and design of the impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(2): 47 ~ 49. (in Chinese)
- 8 张兄文, 李国君, 李军. 离心泵蜗壳内部非定常流动的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 63 ~ 68.
Zhang Xiongwen, Li Guojun, Li Jun. Numerical simulation of unsteady flow in centrifugal pump volute [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 63 ~ 68. (in Chinese)
- 9 倪永燕. 离心泵非定常湍流场数值计算及流体诱导振动研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
Ni Yongyan. 3-D unsteady numerical simulation and fluid-induced vibration for centrifugal pumps [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
- 10 田辉, 郭涛, 孙秀玲, 等. 离心泵内部动静干涉作用的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 92 ~ 95.
Tian Hui, Guo Tao, Sun Xiuling, et al. Numerical simulation of unsteady flow in a centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 92 ~ 95. (in Chinese)

勘误:《农业机械学报》2010年41卷第2期47~51页发表的“基于GIS的保护性耕作技术适宜性区划方法”一文中第二作者“何茆彬”应为“何英彬”,特此更正。