

不同径向间隙对离心泵动静干涉作用影响的数值模拟*

祝磊 袁寿其 袁建平 裴吉
(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 通过改变蜗壳基圆直径改变叶轮与隔舌之间的间隙,采用 SST 模型对 3 个蜗壳基圆直径的离心泵全流道进行非定常数值模拟。3 个蜗壳基圆直径分别为 184、198 和 214 mm,其对应的间隙率为 5.74%、13.79% 和 22.99%。通过非定常数值模拟获得了不同基圆直径离心泵的压力脉动特性、作用在叶轮上的径向力和扭矩特性,并对其进行比较分析。结果表明:不同测点的压力脉动、作用在叶轮上的径向力和扭矩呈周期波动,均以叶片通过频率为主;不同基圆直径泵叶轮上的径向力矢量图基本呈圆形分布;随着蜗壳基圆直径的增大,叶轮上的径向力先减小后增大,各测点压力脉动幅值逐渐减小,高频脉动也逐渐减少。同时针对蜗壳基圆直径为 184 mm 的泵进行数值模拟,并对该泵进行了性能试验,对比分析结果表明:数值模拟的结果是可信的。

关键词: 离心泵 动静干涉 基圆直径 径向力 压力脉动 数值模拟
中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0049-07

Numerical Simulation on Rotor – Stator Interaction in a Centrifugal Pump with Different Gaps between Impeller and Tongue

Zhu Lei Yuan Shouqi Yuan Jianping Pei Ji
(Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

The three-dimensional unsteady numerical method was applied to simulate the flow in the centrifugal pump with different volute casings by using shear stress transport turbulent model (SST). The base circle diameters of three volute casings were 184 mm, 198 mm and 214 mm with the same impeller, and the radial gaps between the impeller and tongue were 5.74%, 13.79% and 22.99% of the impeller radius, respectively. Different characters of the pressure fluctuation, radial hydraulic force and torque on the impeller were obtained with different gaps concerning the rotor – stator interaction. The analysis results indicated that the blade passing frequency dominated the pressure fluctuation, radial hydraulic force and torque on the impeller, of which fluctuations were periodic. The distributions of the radial hydraulic force vector coordinates were presented almost in circles with different gaps. The radial hydraulic force decreased at first then increased with the increasing volute base circle diameters. The amplitude of the pressure fluctuation on the detecting points decreased when the gaps between the impeller and the tongue became larger, and its high-frequency components were also fewer. The simulations were also presented on the characteristics of the radial hydraulic force and the torque on the impeller of which volute base circle diameters was 184 mm at the different flow rates. For the centrifugal pump with 184 mm volute base circle diameters, its performance experiments and numeric simulations were done. It is found that the calculated results agree well with the measured results.

Key words Centrifugal pump, Rotor – stator interaction, Base circle diameter, Radial hydraulic force, Pressure fluctuation, Numerical simulation

收稿日期: 2010-06-16 修回日期: 2010-07-28
* 国家杰出青年科学基金资助项目(50825902)和江苏省自然科学基金创新学者攀登项目(BK2009006)
作者简介: 祝磊, 硕士生, 主要从事离心泵内动静干涉作用研究, E-mail: zhulei86@163.com
通讯作者: 袁寿其, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及排灌机械研究, E-mail: shouqi@ujs.edu.cn

引言

离心泵叶轮与隔舌的动静干涉是造成离心泵流动诱导振动的重要原因,已成为国内外研究的热点,目前主要集中在分析离心泵压力脉动和径向力特性方面^[1~2]。杨敏等^[3]运用数值模拟方法分析了双蜗壳泵的压力脉动特性和叶轮径向力矢量分布。Guo等^[4]试验测量了离心泵同一个叶轮配备不同叶片数的导叶时,动静干涉诱导产生的压力脉动和径向力,并分析了两者的关系。Yuan等^[5]采用滑移网格技术,分析了由于动静干涉作用,蜗壳流道和叶轮流道内压力脉动的变化规律。

叶轮与隔舌间隙的变化对离心泵压力脉动性和径向力特性的影响很大。Solis M等^[6]通过改变隔舌安放角来改变叶轮与隔舌间隙,研究了离心泵压力脉动的变化。González J等^[7~9]通过改变叶轮外径改变叶轮与隔舌的间隙值,数值模拟和试验研究了离心泵隔舌处压力脉动特性和径向力特性。Barrio R等^[10]改变叶轮外径,使叶轮与隔舌间隙率在8.8%~23.2%之间,分析了不同间隙对压力脉动和径向力特性的影响。以上研究主要通过改变叶轮外径和隔舌安放角来改变叶轮与隔舌间隙,但是随着叶轮外径的改变,泵的性能参数随之有较大的变化,特别是扬程,这样不能准确分析叶轮与隔舌间隙变化对泵性能及其压力脉动的影响。而不同基圆直径对泵的性能、压力脉动和径向力特性的影响未进行深入研究。

本文在保证叶轮参数、蜗壳各断面形状及隔舌安放角不变的情况下,通过改变蜗壳的基圆直径来改变叶轮与隔舌之间的间隙。取叶轮与隔舌间隙率分别为5.74%、13.79%和22.99%。为了更准确地捕捉到叶轮与隔舌动静干涉的作用,采用入口总压,出口静压的边界条件^[11~12]进行非定常数值模拟,研究隔舌处不同间隙对动静干涉作用的影响。

1 数值模拟模型

模型泵的设计性能参数为:流量 $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=34\text{ m}$,转速 $n=2\,900\text{ r/min}$ 。叶轮为闭式叶轮,叶片数为6,叶轮出口直径为 $D_2=174\text{ mm}$,叶轮出口宽度为 $b_2=12\text{ mm}$,叶轮进口直径 $D_1=75\text{ mm}$,3种不同蜗壳基圆直径 D 分别为184、198和214 mm,3种基圆尺寸隔舌示意图如图1所示。流场的计算域由叶轮通道、蜗壳、前后泵腔,部分入口和出口管路组成,图2是全流场造型剖面图。

采用有限体积法进行离散求解时,应用 ANSYS

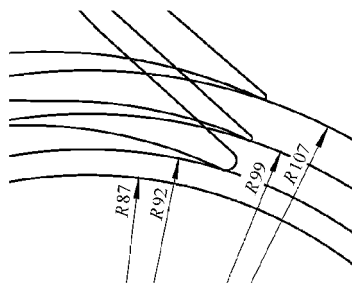


图1 3种基圆尺寸隔舌间隙示意图

Fig.1 Three gaps between impeller and tongue with different base circle diameters

CFX12.0 全隐式耦合多网格线性求解器和 SST 模型,对所有变量进行整场联立求解,同时求解连续方程和动量方程组。采用 ICEM 软件对模型进行前处理得到四面体混合网格,划分结果:3个不同基圆尺寸的蜗壳流道网格数分别为:1 291 476、1 405 306、1 491 876,叶轮流道网格数 416 324,计算网格如图3所示。



图2 全流场造型剖面图
Fig.2 Profile of calculation model

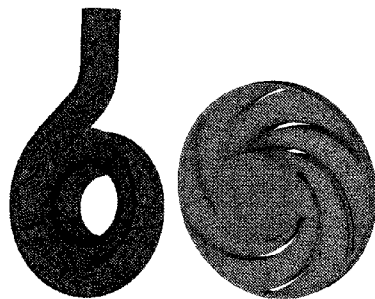


图3 网格示意图

Fig.3 Unstructured mesh of the centrifugal pump and its impeller

叶轮流道内的水体为旋转体,蜗壳内水体为非旋转体,在非定常计算时两者之间的交界面设置为 Transient Rotor - Stator 模式。定常模拟时进出口边界条件均取质量流量。非定常模拟时,以定常计算的结果作为初始条件,压力进口边界条件为总压,压力出口边界条件为静压。出口固体壁面取为无滑移边界条件,并给定固体壁面粗糙度。非定常模拟时叶轮每转 3° 作为一个时间步长,即 $0.000\,172\,4\text{ s}$,选取第4个周期的结果用于分析。在蜗壳内壁面、吸水室进口和隔舌附近布置测点,监测压力脉动变化规律,同时设置记录叶轮的径向力和扭矩随时间变化的数据。

2 计算结果及分析

2.1 3种基圆尺寸泵性能预测

为了定量分析叶轮与隔舌之间的间隙的变化,定义叶轮与隔舌之间的间隙与叶轮出口半径之比的间隙率为

$$S = (R_3 - R_2) / R_2$$

式中 R_2 ——叶轮出口半径

R_3 ——蜗壳基圆半径

通过对离心泵全流道进行三维定常数值模拟,预测了设计工况下不同基圆直径蜗壳泵的水力性能,如表1所示。

表1 不同基圆直径的泵的性能比较

Tab.1 Performance of pumps with different base circle diameters

性能参数	间隙率/%		
	5.74	13.79	22.99
	($D=184\text{ mm}$)	($D=198\text{ mm}$)	($D=214\text{ mm}$)
扬程/m	35.57	36.40	35.85
效率/%	80.23	81.69	80.14
功率/kW	6.03	6.08	6.09

从表中可以看出,在叶轮参数不变的情况下,增大蜗壳基圆的尺寸(即增大隔舌处的间隙),泵的扬程、效率均先增大后减小。这说明,适当增大蜗壳基圆直径能提高水泵的扬程和效率,且存在一个最佳的基圆直径使水泵的扬程和效率达到最优。

2.2 基圆直径为184 mm时不同工况的径向力和扭矩特性

为了分析不同工况下作用在叶轮上的径向力和扭矩特性,选取蜗壳基圆直径为184 mm的泵进行多工况数值模拟。图4为不同工况下作用在叶轮上的径向力时域特性图。从图中可以看出:不同工况下作用在叶轮的径向力都随时间呈一定的周期波动;设计工况和小流量工况时脉动幅值较大,而大流

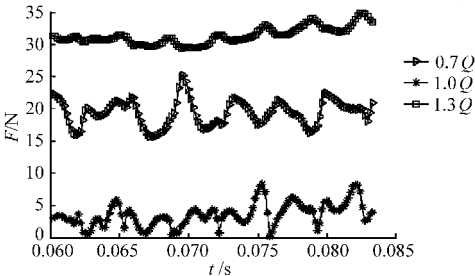


图4 不同工况下作用在叶轮上的径向力时域特性图
Fig.4 Radial hydraulic force fluctuations on the impeller under different running conditions

量工况时脉动幅值减小;设计工况下叶轮所受径向力较小,而偏离设计工况时径向力较大,尤其在大流量下,径向力为设计工况下的5~6倍。

图5为不同工况下作用在叶轮上的扭矩时域特性图,扭矩为负,表明与叶轮旋转方向相反。从图中可以看出:不同工况下叶轮受到的扭矩呈周期波动;随着流量的增大,叶轮的扭矩增大,这与流量增大则功率增大的变化规律相符合。

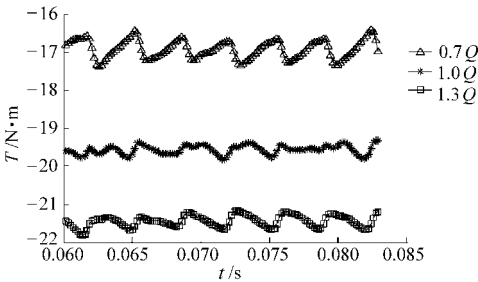


图5 不同工况下作用在叶轮上的扭矩时域特性图
Fig.5 Torque fluctuations on the impeller under different running conditions

图6为不同工况下作用在叶轮上的径向力频域特性图。从图中可以看出:脉动频率以叶片通过频率为主;偏离设计工况,低频脉动更为明显。不同工况下径向力的脉动幅值不同,小流量时脉动幅值明显比设计工况的幅值高,而大流量时脉动幅值变化不大。

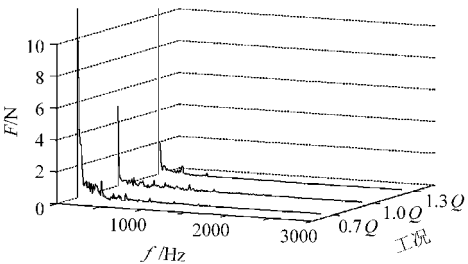


图6 不同工况下作用在叶轮上的径向力频域特性图
Fig.6 Frequency spectra of radial hydraulic force on the impeller under different running conditions

图7为不同工况下作用在叶轮上的扭矩频域特性图。从图中可以看出,扭矩的脉动频率也是以叶片通过频率为主;不同工况下扭矩的脉动幅值不同,

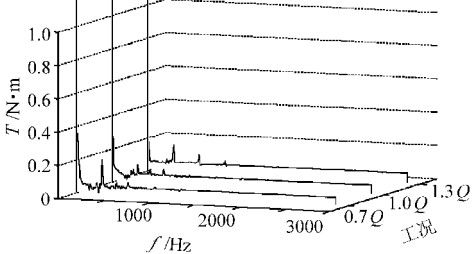


图7 不同工况下作用在叶轮上的扭矩频域特性图
Fig.7 Frequency spectra of torque fluctuations on the impeller under different running conditions

非设计工况下脉动幅值明显比设计工况下幅值高。

图 8 为不同工况下第 4 个周期作用在叶轮上的径向力矢量分布图。 y 轴正半轴朝下是为了与三维造型 y 轴方向一致,图中某一点的矢量坐标代表了某一时刻径向力的大小与方向。从图中可以看出:径向力大小和方向时刻都在变化;设计工况下径向力较小,方向变化剧烈;非设计工况下径向力较大,整体变化趋势基本呈圆形分布,但小流量时,局部有很明显的回旋现象。

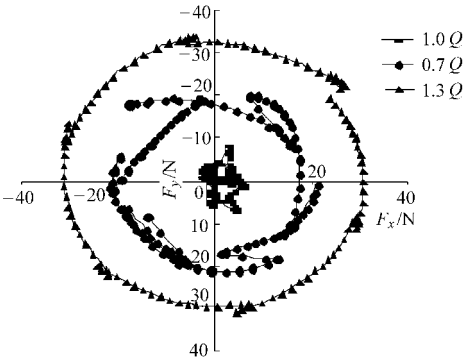


图 8 不同工况下作用在叶轮上的径向力矢量分布图

Fig. 8 Vector diagram of radial hydraulic force on the impeller under different running conditions

2.3 设计工况、不同基圆直径时压力脉动特性

(1)测点布置

为了监测蜗壳内壁面圆周方向的压力脉动特性,在蜗壳内壁面的圆周位置布置 7 个测点^[13]以监测压力脉动变化,如图 9 所示。测点 a、b、c、d、e、f 随着叶轮旋转方向与隔舌所在断面夹角分别为 18°、63°、153°、180°、243°、333°。测点 g 位于蜗壳轴向的中断面上,是以隔舌的舌端为圆心作辅助圆与泵体内壁的切点。同时在蜗壳隔舌附近和吸水室进口分别取一个测点,测点位于中心轴面上,测点的坐标如表 2 所示。

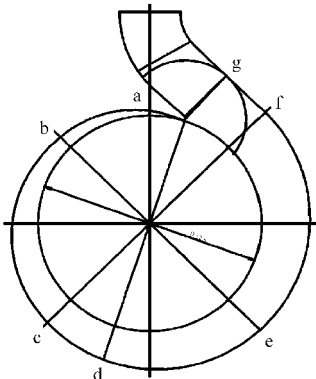


图 9 圆周 7 测点布置图

Fig. 9 Seven detecting points

(2)测点脉动频域特性分析

图 10、图 11 分别为不同基圆直径泵进口和隔舌处测点压力脉动频域特性图。从图中可以看出:

表 2 泵进口和隔舌处测点坐标

Tab. 2 Coordinate value at inlet and near tongue

mm

坐标	进口测点			隔舌处测点		
	$D = 184\text{ mm}$	$D = 198\text{ mm}$	$D = 214\text{ mm}$	$D = 184\text{ mm}$	$D = 198\text{ mm}$	$D = 214\text{ mm}$
x	0	0	0	27	27	27
y	155	155	155	0	0	0
z	0	0	0	87.4	87.4	87.4

蜗壳基圆直径的变大,泵进口和隔舌处脉动的幅值减小;当间隙率为 5.74% ($D = 184\text{ mm}$) 时进口脉动剧烈,幅值约为间隙率为 22.99% ($D = 214\text{ mm}$) 时幅值的 3 倍;当间隙率为 5.74% ($D = 184\text{ mm}$) 时,在隔舌处出现了较多高频脉动,而随着隔舌间隙增大,隔舌处的高频脉动明显较少。由此可见,适当地增大蜗壳基圆直径可以改善泵进口和隔舌处的脉动情况。

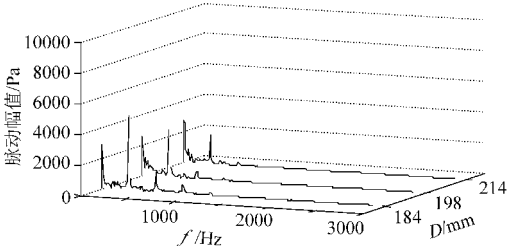


图 10 不同基圆直径泵进口压力脉动频域特性图

Fig. 10 Frequency spectra of inlet pressure fluctuations at the detecting point of pumps with different base circle diameters

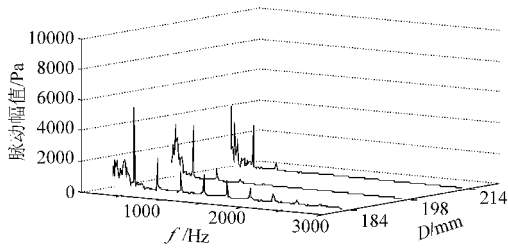


图 11 不同基圆直径泵隔舌处压力脉动频域特性图

Fig. 11 Frequency spectra of pressure fluctuations at the detecting point near tongue of pumps with different base circle diameters

图 12 ~ 14 为不同基圆直径蜗壳内壁 a ~ g 7 个测点的脉动频域特性图。从这 3 个图中均可以看出:不同基圆直径泵的 a ~ g 这 7 个测点,随着偏离叶轮出口的距离越来越远,脉动的幅值减小,但并不是随着圆周方向一直减小;a 测点离隔舌位置最近,受动静干涉作用影响最强,脉动幅值最大,c 测点的脉动幅值明显高于 b 测点,e 测点的脉动略高于 d 测点。通过 3 个图的对比可以看出:随着蜗壳基圆直径的增大,对应的各测点的压力脉动幅值均减小,

高频脉动成分减少;当间隙率为 13.79% ($D = 198\text{ mm}$)和 22.99% ($D = 214\text{ mm}$)时,a 点脉动幅值分别为间隙率 5.74% ($D = 184\text{ mm}$)时脉动幅值的 80% 和 60%;这说明适当增大蜗壳基圆直径对蜗壳内壁压力脉动有良好的改善作用。

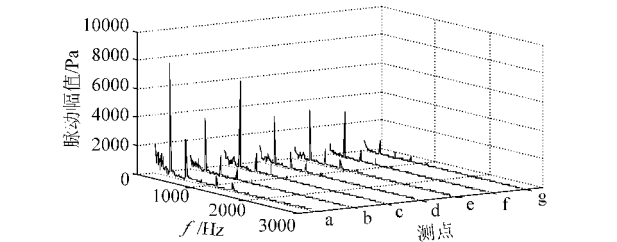


图 12 $D = 184\text{ mm}$ 蜗壳内壁 7 测点压力脉动频域特性图
Fig. 12 Frequency spectra of pressure fluctuations at circumferential detecting points of pumps with $D = 184\text{ mm}$

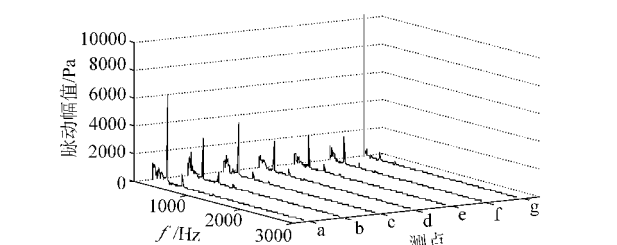


图 13 $D = 198\text{ mm}$ 蜗壳内壁 7 测点压力脉动频域特性图
Fig. 13 Frequency spectra of pressure fluctuations at circumferential detecting points of pumps with $D = 198\text{ mm}$

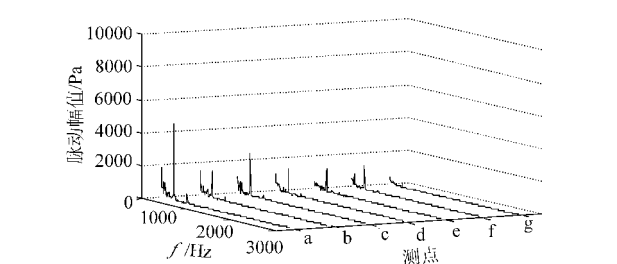


图 14 $D = 214\text{ mm}$ 蜗壳内壁 7 测点压力脉动频域特性图
Fig. 14 Frequency spectra of pressure fluctuations at circumferential detecting points of pumps with $D = 214\text{ mm}$

2.4 设计工况、不同基圆直径时作用在叶轮上的径向力和扭矩特性比较

图 15、图 16 分别为不同基圆直径下叶轮径向力和扭矩的时域特性图。由图 15 可知,随着基圆直径增大,叶轮的径向力大小先减小后增大;间隙率为 5.74% ($D = 184\text{ mm}$)时径向力变化范围大,间隙率为 22.99% ($D = 214\text{ mm}$)的泵径向力变化范围最小,说明适当增大蜗壳基圆直径可减小径向力变化范围。同样由图 16 知,随着蜗壳基圆直径的增大,扭矩的变化范围减小,因此适当加大蜗壳基圆直径可以改善作用在叶轮上的径向力和扭矩的脉动状况,进而改善泵的振动性能。

图 17、图 18 分别为不同基圆直径下叶轮径向力和扭矩频域特性图。从这两图中可以看出:随着

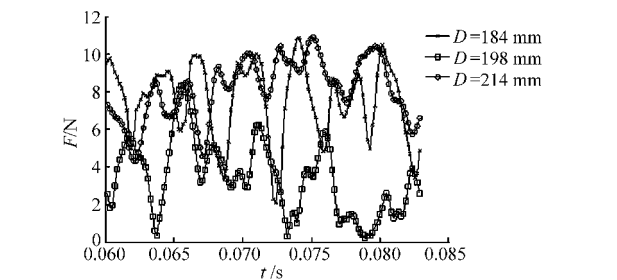


图 15 不同基圆直径径向力时域特性图
Fig. 15 Radial hydraulic force fluctuations on the impeller of pumps with different base circle diameters

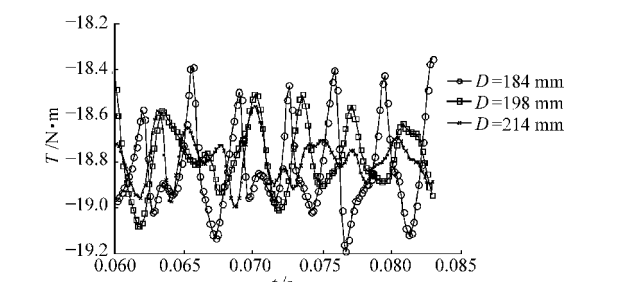


图 16 不同基圆直径扭矩时域特性图
Fig. 16 Torque fluctuations on the impeller of pumps with different base circle diameters

蜗壳基圆直径的增大,作用在叶轮上的径向力和扭矩的脉动值均减弱,且低频脉动和高频脉动也随之减少。

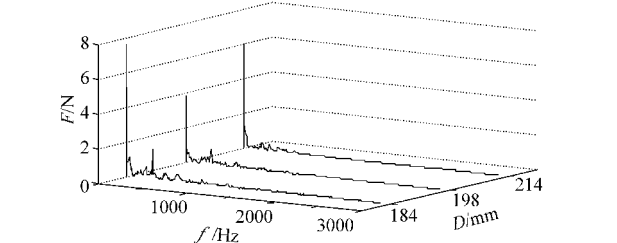


图 17 不同基圆直径径向力合力频域特性图
Fig. 17 Frequency spectra of radial hydraulic forces on the impeller of pumps with different base circle diameters

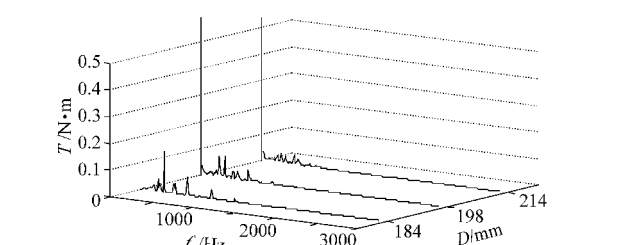


图 18 不同基圆直径扭矩频域特性图
Fig. 18 Frequency spectra of torques on the impeller of pumps with different base circle diameters

图 19 为设计工况、不同基圆直径时作用在叶轮上的径向力矢量分布图。从图中可以看出:叶轮旋转一个周期,不同基圆直径泵的叶轮径向力矢量图基本呈圆形分布。当间隙率为 5.74% ($D = 184\text{ mm}$)时,径向力较大,径向力方向变化剧烈且规

律不明显;当间隙为 13.79% ($D = 198\text{ mm}$) 时,径向力明显减小,但方向变化仍然剧烈;当间隙率为 22.99% ($D = 214\text{ mm}$) 时,径向力又变大,但方向变化的剧烈程度减弱。

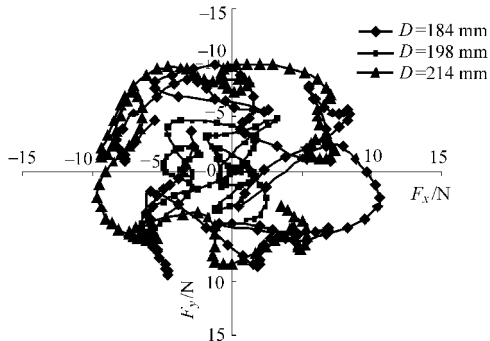


图 19 不同基圆直径泵的叶轮径向力矢量分布图

Fig. 19 Vector diagram of radial hydraulic forces on the impeller of pumps with different base circle diameters

3 性能试验

在水泵开式试验台上对基圆直径为 184 mm 的泵进行了性能试验,并将试验结果与数值模拟的结果进行对比,如图 20 所示,模拟结果和试验结果吻合良好。其中,扬程的模拟值比试验值偏低,设计流量的相对误差为 1.3%;效率计算值比试验值偏高,设计流量下模拟值比试验值高 6.5%。可见,该数学模型比较准确地预测了泵的外特性,验证了数值模拟的准确性。

4 结论

(1) 不同工况下作用在叶轮上的径向力具有脉动性,且在设计工况下叶轮受径向力较小,非设计工

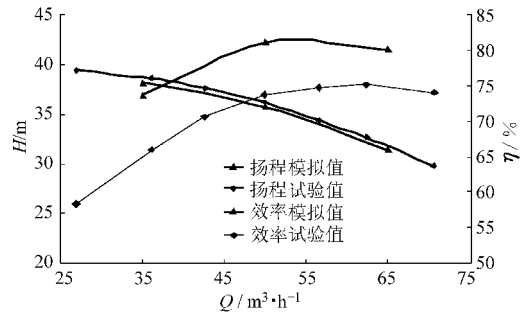


图 20 基圆直径为 184 mm 泵性能曲线的计算值与试验值比较

Fig. 20 Comparison of the performance curves of pumps with base circle diameter 184 mm

况下径向力明显增大,尤其在大流量工况,径向力为设计工况的 5~6 倍;不同工况点作用在叶轮上的扭矩呈周期波动,且随着流量的增大,叶轮的扭矩增大;不同工况下径向力和扭矩主要脉动频率均为叶片通过频率,小流量时脉动幅值明显比设计工况时高,且低频脉动成份更为明显。

(2) 在叶轮旋转一个周期内,作用在叶轮上的径向力大小和方向时刻在变化,设计工况下径向力较小,非设计工况下径向力较大,整体变化趋势基本呈圆形分布。

(3) 适当增大蜗壳基圆直径,在泵的进口处、隔舌处及蜗壳圆周方向的压力脉动幅值均能减小,高频脉动成分减少。

(4) 作用在不同基圆直径泵叶轮上的径向力矢量图基本呈圆形分布;随着基圆直径的增大,叶轮的径向力值先减小后增大,作用在叶轮上的径向力和扭矩的脉动值均随之减弱,且低频脉动与高频脉动成分也随之减少。

参 考 文 献

- 1 Qin W, Tsukamoto H. Theoretical study of pressure fluctuations downstream of a diffuser pump impeller-part I: fundamental analysis on rotor-stator interaction[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(3): 647~652.
- 2 Zhang M, Tsukamoto H. Unsteady hydrodynamic forces due to rotor-stator interaction on a diffuser pump with identical number of vanes on the impeller and diffuser [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(4): 743~751.
- 3 杨敏, 闵思明, 王福军. 双蜗壳泵压力脉动特性及叶轮径向力数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 83~88.
Yang Min, Min Siming, Wang Fujun, et al. Numerical simulation of pressure fluctuation and radial force in a double volute pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 83~88. (in Chinese)
- 4 Guo Shijie, Okamoto H. An experimental study on the fluid force induced by rotor-stator interaction in a centrifugal pump [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2003, 9(2): 135~144.
- 5 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.
- 6 Solis M, Bakir F, Khelladi S. Pressure fluctuations reduction in centrifugal pumps: influence of impeller geometry and radial gap [C]//Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2009, USA, 2009.
- 7 González J, Santolaria C, Parrondo J L, et al. Unsteady radial forces on the impeller of a centrifugal pump with radial gap variation [C]//Proceedings of 4th ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM2003, USA, 2003: 1173~

- 1 181.
- 8 González J, Parrondo J L, Santolaria C, et al. Steady and unsteady radial forces for a centrifugal pump with impeller to tongue gap variation [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(3): 454 ~ 462.
- 9 González J, Fernández J, Blanco E, et al. 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.
- 10 Barrio R, Blanco E, Parrondo J, et al. The effect of impeller cutback on the fluid-dynamic pulsations and load at the blade-passing frequency in a centrifugal pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(11): 111 102 - 1 ~ 111 102 - 11
- 11 田辉, 郭涛, 孙秀玲, 等. 离心泵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)
- 12 Longatte F, Kueny J L. Analysis of rotor-stator-circuit interactions in a centrifugal pump [C] // Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, 2009: 1 039 ~ 1 045.
- 13 姚志峰, 王福军, 肖若富, 等. 离心泵压力脉动测试关键问题分析[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(3): 219 ~ 223.
Yao Zhifeng, Wang Fujun, Xiao Ruofu, et al. Key issues in pressure fluctuation experiment for centrifugal pumps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 219 ~ 223. (in Chinese)
- 14 祝磊, 袁寿其, 袁建平, 等. 阶梯隔舌对离心泵压力脉动和径向力影响的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 21 ~ 26.
Zhu Lei, Yuan Shouqi, Yuan Jianping, et al. Numerical simulation on pressure fluctuations and radial hydraulic forces in centrifugal pump with step-tongue[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 21 ~ 26. (in Chinese)
-

(上接第 43 页)

参 考 文 献

- 1 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 2 成立, 刘超, 汤方平, 等. 对称翼型转轮双向泵装置紊流数值模拟与性能预测[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 78 ~ 81.
Cheng Li, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Numerical simulation and performance prediction of reversible pump with symmetric aerofoil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 78 ~ 81. (in Chinese)
- 3 Tang Fangping, Wang Guoqiang. Influence of outlet guide vanes upon performances of waterjet axial-flow pump [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(6): 19 ~ 26.
- 4 Zhang Desheng, Shi Weidong, Chen Bin, et al. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B., 2010, 22(1): 35 ~ 43.
- 5 金燕, 刘超, 汤方平. 灯泡贯流泵装置内部流动数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(2): 155 ~ 159.
Jin Yan, Liu Chao, Tang Fangping. Numerical simulation of internal flow of tubular pumping system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(2): 155 ~ 159. (in Chinese)
- 6 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- 7 汤方平, 袁家博, 周济人. 轴流泵站进出水流道水力损失的试验研究[J]. 排灌机械, 1995, 13(3): 13 ~ 14.
Tang Fangping, Yuan Jiabo, Zhou Jiren. Experimental study on the inlet and outlet channels of pump device [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1995, 13(3): 13 ~ 14. (in Chinese)
- 8 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.
Li Zhong, Yang Minguan, Wang Chunlin. Experiment of the flow field at the outlet of impeller of axial-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 94 ~ 97. (in Chinese)