

# 导叶相对距离对 S 形轴伸式贯流泵 压力脉动特性的影响

吴晨晖, 汤方平, 石丽建, 谢传流, 张文鹏

(扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127)

**摘要:**为了分析不同导叶相对距离对 S 形轴伸式贯流泵装置压力脉动特性的影响,采用 ANSYS CFX 软件对 4 种不同导叶相对距离的泵装置进行了三维定常与非定常计算,并通过模型试验验证数值模拟计算的可靠性。结果表明:泵装置扬程与效率随导叶相对距离的增大先增加后减小,导叶相对距离对扬程的影响趋势更明显;导叶相对距离对监测点主频频率没有影响而对幅值影响较大;当导叶相对距离增大时,在导叶进口处,主频幅值逐渐减小,断面高压压力脉动强度面积逐渐减小,近轮缘侧压力脉动强度变化比近轮毂侧更明显;在导叶出口处,各频幅值先减小后增大,断面高压压力脉动强度面积先减小后增大;导叶相对距离为 16 mm 时,泵装置综合性能最优。

**关键词:**轴伸式贯流泵;导叶相对距离;数值模拟;水力性能;压力脉动

中图分类号:TH312

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)01-0063-07

**Effect of relative position of guide vanes on pressure pulsation characteristics of a S-shaped extension tubular pumping system//**WU Chenhui, TANG Fangping, SHI Lijian, XIE Chuanliu, ZHANG Wenpeng (*School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China*)

**Abstract:** To study the influence of different relative distances of guide vanes on the pressure pulsation characteristics of a S-shaped extension tubular pumping system, three-dimensional steady calculation and unsteady calculation were applied under 4 different relative positions of guide vanes by using ANSYS CFX software and the reliability of the numerical simulation was verified by a model test. The results show that the pump head and efficiency increase first and then decrease with the increasing of the guide vanes' relative distance, and the pump head can be affected much more obviously. The relative distance of the guide vanes has no influence on the dominant frequency of the monitoring points, but it has greater impact on the amplitude. With an increase of the relative distance at the guide vanes' inlet position, the amplitudes of dominant frequency and cross section area of high pressure pulsation strength can decrease. The pressure pulsation strength variation near the flange side is more obvious than that near the hub side. The amplitude of the dominant frequency decreases first and then increases at the guide vanes' outlet and the cross-section area of high pressure fluctuation strength decreases first and then increases. The performance of the pump is optimum when the relative position of the guide vanes is set to be 16 mm.

**Key words:** extension tubular pumping system; relative position of guide vanes; numerical simulation; hydraulic performance; pressure pulsation

S 形轴伸贯流泵装置具有结构紧凑、运行效率高、便于检修等特点,因而被广泛应用于中大型低扬程泵站。S 形轴伸式贯流泵装置由进水流道、叶轮体、导叶体、出水流道 4 部分组成,其中导叶可以平顺水流并将液体的动能转换为压能,是泵装置中一种重要的过流部件。导叶参数的变化会直接影响叶轮与导叶之间的非定常水力相互作用,从而改变泵装置内部的压力脉动特性。压力脉动会诱导泵装置

产生噪声与振动,影响泵站运行时的稳定性。因此,研究不同导叶参数对泵装置压力脉动的影响是十分有价值的。目前,国内外学者主要通过数值模拟与试验相结合的方式研究泵装置压力脉动的起因与特性以及压力脉动与振动噪声之间的关系。汤方平等<sup>[1-4]</sup>对轴流泵装置进行了三维非定常数值模拟,研究得出了轴流泵装置叶片区内部的压力脉动频率主要受叶频控制的结论。杨帆等<sup>[5-6]</sup>基于雷诺时均方

基金项目:国家自然科学基金(51376155,51609210);江苏高校优势学科建设工程(PAPD)

作者简介:吴晨晖(1994—),男,硕士研究生,主要从事泵装置理论研究。E-mail:1094617491@qq.com

通信作者:汤方平(1964—),男,教授,主要从事泵装置多学科优化设计。E-mail:tangfp@yzu.edu.cn

程对贯流泵装置进行了全流道非定常数值模拟,提出了其压力脉动特性受周期性水动荷载影响较大的结论。Schennach 等<sup>[7-8]</sup>利用二维激光多普勒测速仪分析了前后导叶之间的不同相对距离对后导叶流场的影响。Liu 等<sup>[9-12]</sup>研究了不同导叶叶片数对泵装置压力脉动特性的影响,认为导叶叶片数越多,导叶内部压力脉动幅值越高。程效锐等<sup>[13-16]</sup>结合数值模拟与试验,分析了不同离心泵导叶参数对泵装置压力脉动的影响,认为导叶与叶轮参数匹配存在最优的结论。

尽管国内外学者对于叶轮与导叶之间动静干涉引起的压力脉动进行了许多研究并获得了大量成果,但是关于导叶与叶轮相对距离对泵装置压力脉动的影响研究较少。本文在前人的研究基础上,以一台 S 形轴伸贯流泵装置作为研究对象,对 4 个不同导叶相对距离的泵装置进行三维非定常数值模拟,重点研究不同导叶相对距离对泵装置压力脉动频域特性、不同断面压力脉动强度分布以及水力性能的影响,以期对 S 形轴伸贯流泵装置叶轮与导叶的匹配优化提供参考。

## 1 计算模型与数值模拟

### 1.1 计算模型与监测断面

研究模型为一台 S 形轴伸贯流泵装置,主要由进出水流道及延伸段、叶轮体以及导叶体组成,如图 1 所示。叶轮叶片数为 3 片,叶顶间隙为 0.15 mm,叶轮直径  $D = 300$  mm,导叶片数为 5 片,设计流量为 225 L/s,转速为 1 022 r/min,进出水流道各延长 2.4 m。图 2 为不同叶轮与导叶之间相对距离示意图,本文共研究 4 种导叶相对距离,以叶轮叶片根部与导叶叶片根部之间间隔 6 mm 为基准方案,其他方

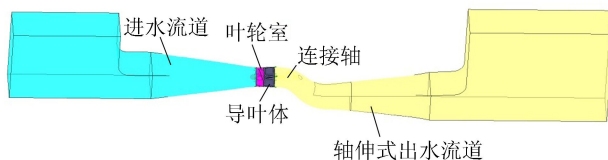


图 1 泵装置计算模型

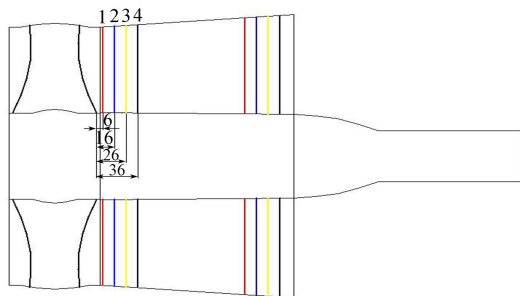


图 2 导叶相对距离示意图 (单位:mm)

案导叶位置分别向后移动 10 mm。应用 ICEM 软件对泵装置的进出水流道及其延伸段进行网格划分,采用 Turbo grid 软件对叶轮室以及导叶体建立模型并划分网格,经检验各部分网格质量较好,其中进出水流道及延伸段网格质量均大于 0.35。经过网格无关性验证,当泵装置总网格数达到 160 万时,装置扬程基本保持稳定。最终计算模型总网格数确定为 200 万左右,其中由于导叶相对距离不同,导叶网格也不完全相同,保持在 55 万左右。

为研究 S 形轴伸贯流泵装置内部压力脉动,在导叶进口断面由轮毂测到轮毂侧均匀布置 P1 ~ P4 4 个监测点,导叶出口断面则由内到外布置 P5 ~ P8 4 个监测点(图 3),另外选取导叶体至出水水道沿轴向方向的中截面,以研究装置沿轴向方向的压力脉动强度变化。

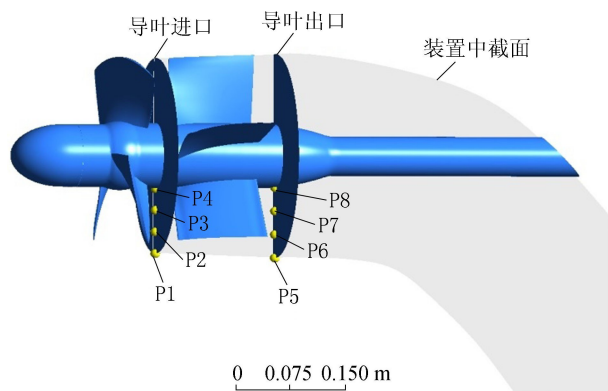


图 3 监测断面位置

### 1.2 数值计算设置与计算方法

在非定常数值模拟计算中,出口采用流量,设计流量  $Q = 225$  L/s,进口采用固定总压,总压设定为 1 个标准大气压,进出水流道延伸段表面设置为自由水面,自由水面对速度和湍动能均采用对称平面处理,各部位壁面选用光滑壁面与无滑移边界。在定常计算中,采用 Stage 交界面处理叶轮与进水水道、导叶体之间动静耦合流动的参数传递,而在非定常计算中,将进水水道与叶轮、叶轮与导叶交界面设置为“瞬态转子-定子”,设置时间步长为  $4.89237 \times 10^{-4}$  s,每一步叶轮旋转  $3^\circ$ ,叶轮旋转一周需要 120 步,总计算时间为 0.35225 s,共 6 个周期,取最后 3 个周期的结果分析压力脉动频域,取最后 1 个周期的结果分析压力脉动强度分布。

采用标准  $k-\varepsilon$  模型为基本控制方程,每个网格节点计算得出的压力脉动数值大小是周期性的相平均量,由于随机压力波动与叶轮导叶之间动静干涉影响产生的周期性压力波动相比影响较小,所以忽略了随机量。为定量分析泵装置压力脉动程度,引入压力脉动系数  $C_p$  与压力脉动强度  $C_p^*$ <sup>[17-18]</sup>,计算

公式如下:

$$C_p = \frac{2 \left[ p \left( x, y, z, \frac{i}{120} T \right) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p \left( x, y, z, \frac{i}{120} T \right) \right]}{\rho u^2} \quad (1)$$

$$C_p^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n C_p^2}{n}} \quad (2)$$

式中:  $p \left( x, y, z, \frac{i}{120} T \right)$  为计算节点上时刻  $i$  的压力值;  $T$  为叶轮旋转周期;  $\rho$  为水的密度;  $u$  为叶轮圆周速度;  $n$  为叶轮转数, 取值 120。由式(2)可知, 压力脉动强度由标准差算法导出, 是网格节点上衡量一个周期压力脉动程度的综合量。

### 1.3 外特性试验验证

为验证数值模拟结果的可靠性, 对导叶相对距离  $A=16 \text{ mm}$  方案的 S 形轴伸式贯流泵模型装置进行外特性模型试验。试验在扬州大学高精度水力机械试验台上进行, 经鉴定, 效率测试系统综合不确定度为  $\pm 0.39\%$ , 通过国家计量认证。试验按照水利部行业标准 SL140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》要求, 每个叶片安放角的水力性能试验点不少于 18 个; 临界汽蚀余量按流量保持常数, 改变有效汽蚀余量至效率下降 1% 时确定; 泵装置的试验效率为扣除机械损失转矩后的数值。图 4 为模型现场测试段照片, 整理泵装置模型试验扬程效率曲线与数值模拟外特性曲线对比如图 5 所示, 图中  $\eta$  为效率,  $H$  为扬程。



图 4 模型泵装置

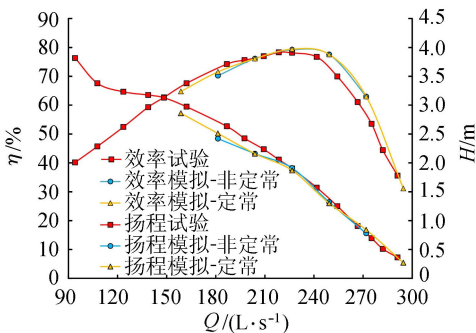


图 5 试验与数值模拟结果对比

由图 5 可知, 在设计流量和大流量工况下, 数值模拟扬程曲线与模型试验扬程曲线吻合度较高, 在小流量工况下, 数值模拟扬程略低于模型试验扬程。在大流量工况下数值模拟效率略高于试验效率, 而在小流量工况下略低于试验效率。总体而言, 数值模拟数据与模型试验吻合度较高, 整体趋势保持一致, 各点误差都在 5% 以内。对比非定常计算结果、定常计算结果与试验结果, 在设计工况下三者扬程相对差值最大不超过 1.4%, 因此取设计工况下泵装置内部流场特征作为分析对象。

## 2 结果分析

### 2.1 不同方案外特性对比

针对设计工况, 对不同导叶叶轮相对距离方案进行了非定常数值模拟, 计算得不同导叶相对距离下的扬程与效率系数如图 6 所示。

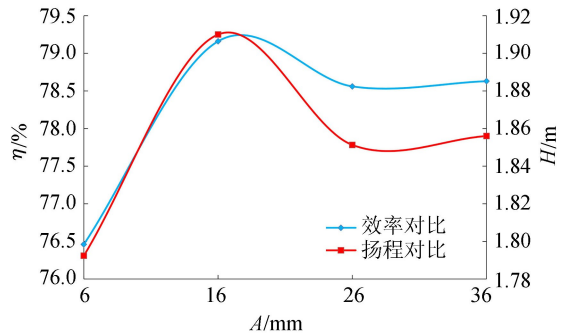


图 6 扬程与效率系数曲线

由图 6 可知, 随着  $A$  由 6 mm 增加到 26 mm, 扬程效率曲线呈现先上升后下降的趋势, 而在  $A$  由 26 mm 增加到 36 mm 时, 扬程效率变化不明显。最高扬程效率出现在  $A=16 \text{ mm}$  时, 而最低扬程效率出现在  $A=6 \text{ mm}$  时, 其扬程相对差值为 6.3%, 效率相对差值为 3.4%, 由此可见,  $A$  对扬程的影响比对相对效率的影响更明显, 而产生扬程效率波动的原因可能是导叶相对距离对装置内部水流流态影响较大。叶轮属于动叶, 导叶属于静叶, 叶轮与导叶之间存在强烈的动静干涉作用。叶轮导叶之间相对距离对二者之间的动静干涉作用强度有直接的影响, 所以叶轮导叶之间相对距离对泵装置的水流流态和压力脉动特性有明显的影响。而导叶与叶轮之间的相对距离过远时, 导叶无法及时平整叶轮流出的水流, 在叶轮与导叶叶片之间出现了脱流等不良流态, 从而影响到泵装置水流流态与压力脉动特性。

### 2.2 导叶体压力脉动频域分析

#### 2.2.1 导叶进口压力脉动频域

为分析不同导叶相对距离对泵装置压力脉动频域特性的影响, 通过对非定常数值模拟得出的压力脉动时域数据进行傅里叶变换, 得到了设计工况下,

不同方案在导叶进口与导叶出口断面上的压力脉动频域特性图如图 7 所示,图中  $f$  为叶轮转动频数。

由图 7 可知,当  $A$  一定时,导叶进口处压力脉动幅值沿导叶轮缘到轮毂呈现先减小后增大的趋势,高频频谱越来越丰富。在设计工况下,不同  $A$  值的导叶进口压力脉动频谱特性的变化基本一致,主频是 3 倍转频,次频为 6 倍转频,可见导叶相对距离对导叶进口主频没有影响。在  $A$  由 6 mm 增大到 26 mm 的过程中,压力脉动主频幅值呈现逐渐减小

而次频幅值基本不变的趋势。 $A > 26$  mm 时,导叶体进口各测点压力脉动特性基本保持不变,这是由于随着导叶越来越远离叶轮,两者之间的动静干涉作用越来越小,叶轮导叶之间的动静干涉作用已不再是影响导叶体进口压力脉动的主要因素。

### 2.2.2 导叶出口压力脉动频域

不同方案导叶出口断面各测点压力脉动频域如图 8 所示,当导叶位置不变时,导叶出口压力脉动幅值沿轮缘到轮毂呈现先增大后减小的趋势,与导叶

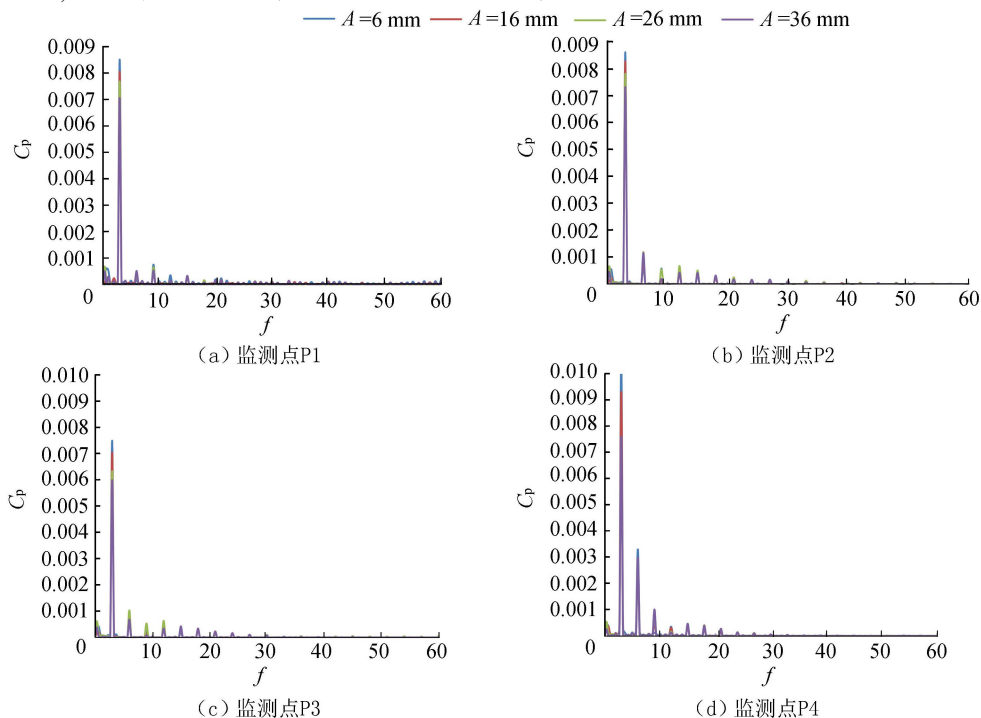


图 7 不同方案导叶进口断面各测点压力脉动频域

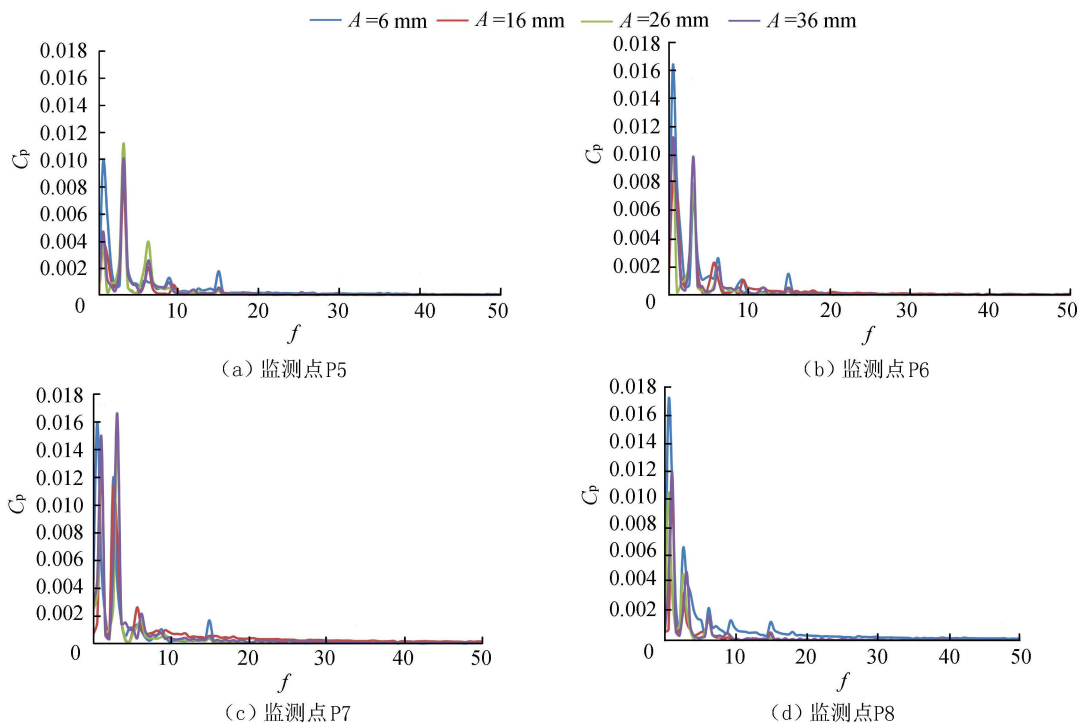


图 8 不同方案导叶出口断面各测点压力脉动频域

进口处幅值变化相反,在5张导叶叶片对水流的平顺作用下,导叶出口压力脉动特性整体弱于导叶进口,沿轮缘至轮毂,各测点压力脉动低频频谱占总频谱的比重逐渐增加。在A由6 mm增大到26 mm的过程中,各观测点压力脉动低频与中频幅值呈现先减小后增大的趋势,当A=26 mm时,各观测点压力脉动幅值均为最小,而当A由26 mm增大到36 mm时,各测点压力脉动特性变化不明显。其原因在于当导叶过于接近叶轮时,二者之间的动静干涉作用较强,使得各测点产生较大的压力波动;而当导叶过于远离叶轮时,导叶体内部产生回流区,从而激励低频脉动的产生。

## 2.3 压力脉动强度分析

### 2.3.1 导叶进口压力脉动强度

为进一步分析泵装置各截面压力脉动强度分布,计算最后1个周期内设计工况下导叶进出口断面与出水结构中截面上压力脉动强度,结果如图9所示。由于旋转叶轮与导叶之间的动静干涉,在近轮缘侧出现了5个相对对称的高压力脉动强度区域。截面整体压力脉动强度梯度分布随着导叶相对距离的增大越来越均匀,截面高压脉动强度面积逐渐减小,在A=36 mm时最优。随着A的逐渐增加,导叶进口近轮缘侧压力脉动强度分布变化较大而近轮毂侧变化不明显,由此可以得出,导叶相对距离对导叶进口轮缘附近区域的压力波动影响较大而对轮毂附近区域影响不明显。

### 2.3.2 导叶出口压力脉动强度

图10为设计工况下导叶出口截面上的压力脉动强度分布图。由图10可以看出,导叶相对距离对导叶出口截面的压力脉动强度影响较大,导叶出口

压力脉动强度整体低于导叶进口,压力脉动强度沿轮毂向轮缘呈现先增大后减小的趋势。当A由6 mm增大到26 mm时,导叶出口截面高压脉动强度区域面积先减小后增大,当A=16 mm时,高压脉动强度面积最小,而当A由26 mm增大到36 mm时,截面高压脉动强度面积变化较小。在A=6 mm时,截面高压脉动区域面积远高于其他3种方案,在导叶流道出口处,压力脉动强度出现了明显的大梯度分布。

### 2.3.3 装置中截面压力脉动强度

图11为S形轴伸式贯流泵装置在设计工况下导叶体与出水流道S形弯管中截面上的压力脉动强度分布,主要呈现出沿轴向压力脉动强度的分布特征。由图11可见,由于导叶与出水流道S形弯管对动压的回收,压力脉动强度沿导叶体至出水流道逐渐减小,并且由于轴伸式出水流道在S形弯管处形成流道凹凸使得流道两侧速度不均匀,弯管处压力脉动强度区域略微偏向流道外侧。当A由6 mm增大到16 mm时,导叶体截面高压脉动强度区域由导叶轮缘向轮毂区域压缩,最高压力脉动强度由0.015降低到0.011,S形轴伸式贯流出水流道外侧的相对高压脉动区域面积逐渐减小。当A由16 mm上升到36 mm时,导叶体截面高压脉动强度区域呈现先增大后减小的趋势,截面最高压力脉动强度数值变化不明显,而出水流道S形弯管内测的相对高压脉动强度区域逐渐变大并向外侧以及导叶方向偏移。当A=16 mm时,截面整体压力脉动强度分布为最佳。除了A=16 mm方案,其余3种方案在出水流道弯管处均出现了相对较大的高压脉动区域,主要是由于导叶叶轮之间相对距离较短时,

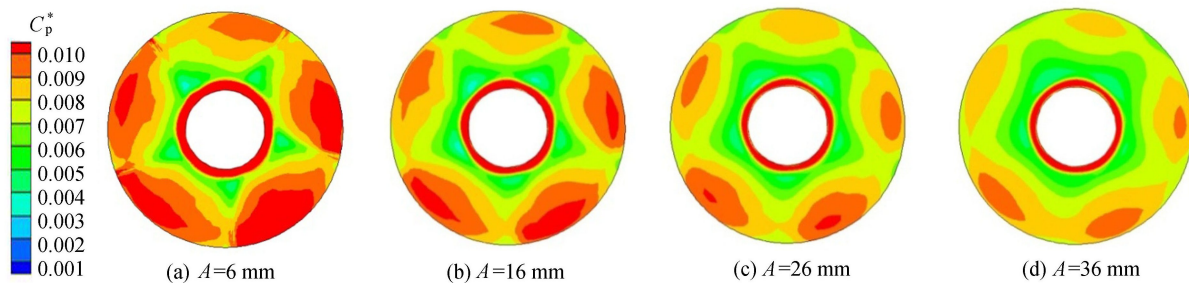


图9 导叶进口断面压力脉动强度对比

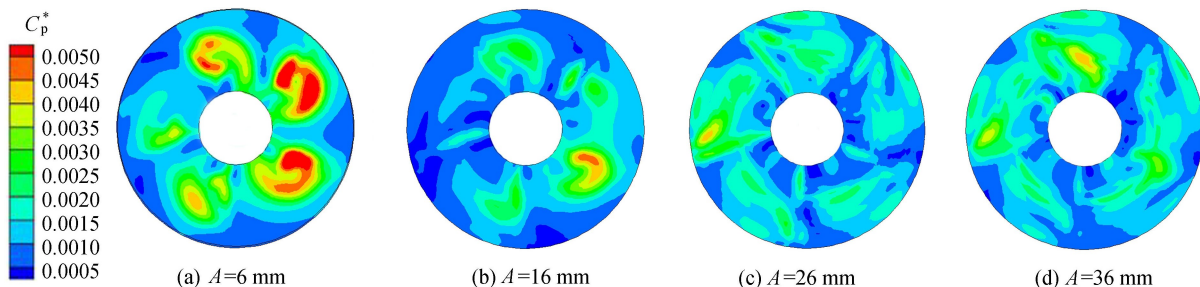


图10 导叶出口断面压力脉动强度对比

二者之间的动静干涉作用较强,而二者之间相对距离较远时,主要是由于流动冲击与流动分离造成压力的剧烈波动。

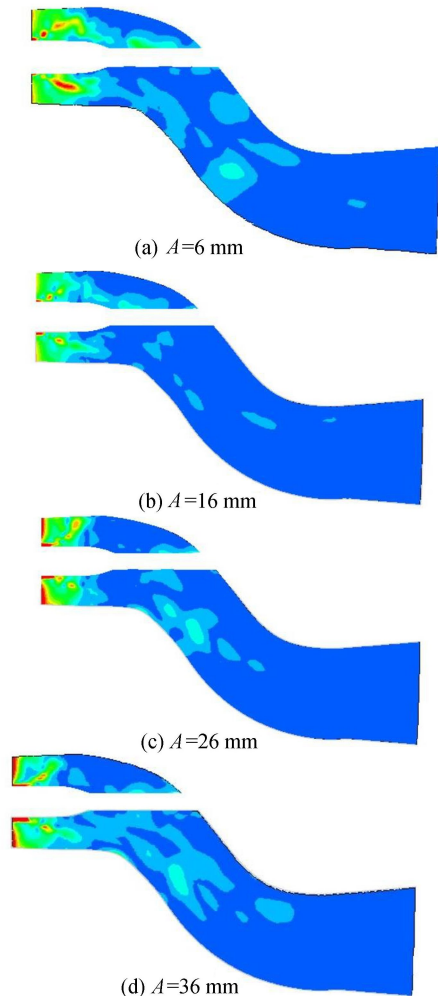
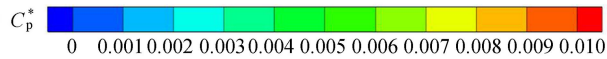


图 11 出水结构中截面压力脉动强度对比

### 3 结论

**a.** 当导叶相对距离为 16 mm (0.0533D) 时,扬程效率均为最高。导叶相对距离对扬程影响比对效率的影响更明显。

**b.** 导叶相对距离的变化对各监测点的主频率没有影响而对各频谱幅值影响较大。当导叶逐渐远离叶轮时,在导叶进口,主频压力脉动幅值先减小后不变;在导叶出口,各监测点幅值先减小后增大,并且当导叶相对距离增加到一定值后,导叶进出口的压力脉动频谱分布变化不明显,此时,叶轮导叶之间的动静干涉作用已不再是影响导叶体进出口压力脉动的主要因素。

**c.** 在导叶进口位置处,高压脉动强度分布在近轮缘与近轮毂侧,导叶相对距离对近轮缘侧压力脉动强度分布的影响比对近轮毂侧大;在导叶出口

位置处,高压脉动主要分布在导叶流道处,断面压力脉动强度整体小于导叶进口断面;在出水流道处,高压脉动强度区主要分布在流道中心区。

**d.** 综合泵装置的外特性与压力脉动特性,当导叶相对距离为 16 mm 时泵装置整体性能最佳。

### 参考文献:

[1] 汤方平,张丽萍,付建国,等.轴流泵内部压力脉动数值预测及分析[J].排灌机械工程学报,2013,31(10):835-840. (TANG Fangping, ZHANG Liping, FU Jianguo, et al. Prediction and numerical analysis for pressure fluctuation of axial-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(10): 835-840. (in Chinese))

[2] 张德胜,耿琳琳,施卫东,等.轴流泵水力模型压力脉动和振动特性试验[J].农业机械学报,2015,46(6):66-72. (ZHANG Desheng, GENG Linlin, SHI Weidong, et al. Experimental investigation on pressure fluctuation and vibration in axial-flow pump model[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(6):66-72. (in Chinese))

[3] 王福军,张玲,张志民,等.轴流式水泵非定常湍流数值模拟的若干关键问题[J].机械工程学报,2008,44(8):73-77. (WANG Fujun, ZHANG Ling, ZHANG Zhimin, et al. Some key issues of unsteady turbulent numerical simulation in axial-flow pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8):73-77. (in Chinese))

[4] 赵浩儒,杨帆,吴俊欣,等.立式轴流泵装置压力脉动特性的试验[J].流体机械,2017,45(7):12-16. (ZHAO Haoru, YANG Fan, WU Junxin, et al. Experimental analysis on pressure fluctuation of multiple conditions in axial-flow pumping system[J]. Fluid Machinery, 2017, 45(7):12-16. (in Chinese))

[5] 杨帆,刘超,许旭东,等.S形贯流泵装置水力模型非定常水动力特性分析[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(3):442-453. (YANG Fan, LIU Chao, XU Xudong, et al. Unsteady hydrodynamic performance of hydraulic model in s-shaped shaft extension tubular pumping system[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(3):442-453. (in Chinese))

[6] 颜红勤.梅梁湖泵站竖井贯流泵装置主要参数的确定[J].水利水电科技进展,2005,25(6):91-94. (YAN Hongqin. Determination of main parameters for shaft tubular pumping system[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(6):91-94. (in Chinese))

[7] SCHENNACH O, WOISETSCHÄGER J, MARN A, et al. Laser-doppler-velocimetry measurements in a one and a half stage transonic test turbine with different angular stator-stator positions[J]. Experiments in fluids, 2007, 43(2/3):385-393.

- [ 8 ] CHEN E, MA Z, ZHAO G, et al. Numerical investigation on vibration and noise induced by unsteady flow in an axial-flow pump [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(12): 5398-5403.
- [ 9 ] LIU Y, TAN L, LIU M, et al. Influence of prewhirl angle and axial distance on energy performance and pressure fluctuation for a centrifugal pump with inlet guide vanes [J]. *Energies*, Part A, 2017, 10(5): 454-465.
- [ 10 ] 张德胜, 施卫东, 王川, 等. 斜流泵叶轮和导叶叶片数对压力脉动的影响 [J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(2): 167-170. (ZHANG Desheng, SHI Weidong, WANG Chuan, et al. Influence of impeller and guide vane blade number on pressure fluctuation in mixed-flow pump [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(2): 167-170. (in Chinese))
- [ 11 ] 王玲花, 刘大恺, 陈德新. 双向贯流泵导叶设置与原动机布置的研究 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(1): 106-108. (WANG Linghua, LIU Dakai, CHEN Dexin. Study on arrangement of guide blade and prime motor for bidirectional tubular axial-flow pumps [J]. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 2002, 30(1): 106-108. (in Chinese))
- [ 12 ] 史广泰, 杨军虎, 苗森春, 等. 不同导叶数下液力透平蜗壳内压力脉动计算 [J]. *航空动力学报*, 2015, 30(5): 1228-1235. (SHI Guangtai, YANG Hujun, MIAO Senchun, et al. Calculation of pressure fluctuation within volute of hydraulic turbine under different guide vane numbers [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(5): 1228-1235. (in Chinese))
- [ 13 ] 程效锐, 贾程莉, 杨从新. 导叶周向布置位置对核主泵压力脉动的影响 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(16): 197-204. (CHENG Xiaorui, JIA Chengli, YANG Congxin, et al. Influence of circumferential position of guide vane on unsteady flow characteristics in reactor coolant pump [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(16): 197-204. (in Chinese))
- [ 14 ] 刘厚林, 杜辉, 董亮, 吴贤芳, 刘东喜. 离心泵蜗壳内压力脉动特性数值分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(1): 18-21. (LIU Houlin, DU Hui, DONG Liang, et al. Numerical analysis of pressure fluctuation in the volute of centrifugal pump [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33(1): 18-21. (in Chinese))
- [ 15 ] 顾延东, 袁寿其, 裴吉. 导叶安装位置对混流泵压力脉动特性的影响 [J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(2): 93-99. (GU Yandong, YUAN Shouqi, PEI Ji, et al. Effects of diffuser installation position on pressure fluctuation in mixed flow pump [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, 35(2): 93-99. (in Chinese))
- [ 16 ] 李伟, 竺晓程, 王惠斌. 时序效应对涡轮叶片非定常作用力影响的数值研究 [J]. *推进技术*, 2012, 33(1): 47-53. (LI Wei, ZHU Xiaocheng, WANG Huibin, et al. Numerical simulation of clocking effect on turbine blade unsteady force [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(1): 47-53. (in Chinese))
- [ 17 ] 裴吉, 袁寿其, 袁建平. 单叶片离心泵压力脉动强度多工况对比研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(12): 29-33. (PEI Ji, YUAN Shouqi, YUAN Jianping, et al. Comparative study of pressure fluctuation intensity for a single-blade pump under multiple operating conditions [J]. *Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(12): 29-33. (in Chinese))
- [ 18 ] 王文杰, 袁寿其, 裴吉. 时序效应对导叶式离心泵内部压力脉动影响的数值分析 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(4): 185-192. (WANG Wenjie, YUAN Shouqi, PEI Ji, et al. Numerical analysis of the clocking effect on the pressure fluctuation in the centrifugal pump with vaned diffuser [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(4): 185-192. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-10-12 编辑: 郑孝宇)

(上接第 57 页)

- [ 10 ] 邓华锋, 李建林. 库水位变化对库岸边坡变形稳定的影响机理研究 [J]. *水利学报*, 2014, 45(增刊 2): 45-51. (DENG Huafeng, LI Jianlin. Research on the influence mechanism of water level fluctuation on the bank landslide deformation and stability [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(Sup2): 45-51. (in Chinese))
- [ 11 ] 段永祥, 许模, 肖先焯. 库岸滑坡稳定性物理模拟研究 [J]. *水科学与工程学报*, 2015(1): 5-9. (DUAN Yongxiang, XU Mo, XIAO Xianxuan. Physical model studies on stability of bank landslide [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2015(1): 5-9. (in Chinese))
- [ 12 ] 张嘎. 水库区边坡群稳定性耦联分析概念性模型 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, 55(6): 612-615. (ZHANG Ga. Coupled stability analysis for slopes near a reservoir [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(6): 612-615. (in Chinese))
- [ 13 ] 李小凡, MULLER J P, 方晨, 等. 基于 TerraSAR-X 强度图像相关法测量三峡树坪滑坡时空形变 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(12): 3843-3850. (LI Xiaofan, MULLER J P, FANG Chen, et al. Measuring displacement field from TerraSAR-X amplitude images by subpixel correlation: an application to the landslide in Shuping, Three Gorges Area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(12): 3843-3850. (in Chinese))
- [ 14 ] WANG F W, ZHANG Y M, HUO Z T, et al. Movement of the Shuping Landslide in the first four years after the initial impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China [J]. *Landslides*, 2008(5): 321-329. (收稿日期: 2017-12-26 编辑: 雷燕)