doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.010

前置导叶可调式轴流泵低频压力脉动特性研究*

冯卫民　程　千　郭志伟　潘静也
(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 基于 RANS 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型,对前置导叶可调式轴流泵进行三维非定常计算,研究了前置导叶调节对轴流泵外特性和压力脉动的影响,揭示了小流量工况泵内低频压力脉动随前置导叶调节变化机理。结果表明:前置导叶负角度时,轴流泵扬程升高,效率在小流量工况基本保持不变,大流量工况略有升高;前置导叶正角度时,轴流泵扬程和效率均下降,且大流量工况效率下降幅度较大;小流量工况泵后置导叶内的涡旋引起低频压力脉动,且低频压力脉动频率与涡脱落频率一致;偏离设计工况时,前置导叶调节可减小叶轮进口流动冲角,改善泵内流态,从而降低低频压力脉动幅值。

关键词: 轴流泵　压力脉动　前置导叶　数值模拟
中图分类号: TH312　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)10-0062-06

Characteristics of Low Frequency Pressure Fluctuation in Axial Flow Pump with Variable Inlet Guide Vane

Feng Weimin　Cheng Qian　Guo Zhiwei　Pan Jingye
(*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *China*)

Abstract: The low frequency pressure fluctuations in axial flow pump with variable inlet guide vane were studied. The numerical method based on the RANS equations and SST $k-\omega$ turbulence model was used to simulate unsteady flow in the axial flow pump. The hexahedral meshing scheme was used for the whole computational domain, particularly with O-grid around the blades. The multiple reference frame approach was applied to solve the rotor-stator interaction problem in steady simulation and it was changed to the sliding mesh technology in unsteady simulation. The mass flow rate was adopted at the inlet section and static pressure at the outlet section. No-slip conditions were applied to the whole wall boundary. The effects of variable inlet guide vane on pump performance were firstly investigated. Then through analyzing the spectra of pressure fluctuation at different pressure survey points, the variation of low frequency pressure fluctuation by adjusting the angles of inlet guide vane was presented. The flow field in outlet guide vane under small flow condition was also presented. The results showed that the predicted results were in good agreement with the experimental data. When the angle of inlet guide vane was negative, the pump head was increased due to the prewhirl regulation, and the efficiency was basically kept unchanged at small flow rate and it was slightly increased at large flow rate. When the angle of inlet guide vane was positive, both the pump head and the efficiency were decreased, and the efficiency dropt greatly at large flow rate because of the large hydraulic loss caused by inlet guide vane. At small flow rate, the vortex in the exit guide vane can cause low frequency pressure fluctuation, which was consistent with the vortex frequency. When the axial flow pump was operated under off-design condition, the variable inlet guide vane could decrease the angle of attack at the impeller entrance and further descend the amplitude of low frequency pressure fluctuation.

Key words: Axial flow pump　Pressure fluctuation　Inlet guide vane　Numerical simulation

收稿日期: 2015-06-17　修回日期: 2015-07-19
* "十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAD08B03)
作者简介: 冯卫民,教授,博士生导师,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: wmfeng@whu.edu.cn

引言

水泵偏离设计工况运行时，泵内复杂流动的自激作用(叶轮进口水流冲击、旋转失速、局部空化及二次流等)均会引起泵内低频压力脉动，造成轴流泵性能下降、振动噪声、叶片疲劳或轴承损坏，严重影响泵的安全稳定运行[1]。对此，国内外已有大量文献进行了泵压力脉动特性研究[2-13]。张德胜等[6]通过试验，发现偏离设计工况时，由于导叶内流体的撞击和回流，导叶区域压力脉动出现多个低频信号。Yao 等[7]发现在非设计工况下，离心泵内存在一种宽带频率，当这种频率与水泵上某种频率一致时，会引起共振。小流量工况下，由水泵旋转失速诱导的低频压力脉动，其强度远大于动静干涉所引起的压力脉动[8-9]。另外，空化的发展同样会增强泵内低频压力脉动幅值[13]。可见，偏离设计工况运行时，泵内不稳定流动的自激作用增强，诱发较强的低频压力脉动，使机组振动加剧。通过泵运行工况调节，可改善这种情况[1]。

前置导叶调节技术普遍用于压缩机和风机[14-15]，被认为是一种有效的工况调节方法。目前，该技术也逐渐用于泵的工况调节，并能有效地改善非设计工况泵内流态，拓宽泵的高效运行范围[16-19]。这些研究主要关注前置导叶调节对泵外特性的改善，关于前置导叶调节对泵压力脉动影响的研究则比较少。

本文对不同流量工况轴流泵内部流动进行三维非定常计算，研究前置导叶调节对轴流泵外特性及压力脉动的影响，揭示小流量工况泵内低频压力脉动随前置导叶调节变化机理，以完善前置导叶调节技术在轴流泵工况调节方面的应用。

1　物理模型及数值计算方法

1.1　几何模型

轴流泵模型参数为：设计流量 $Q_d = 370.33$ L/s，设计扬程 $H_d = 3.3$ m，设计效率 $\eta_d = 83.69\%$，转速 $n = 1\ 450$ r/min，前置导叶叶片数 $Z_i = 4$，叶轮叶片数 $Z_r = 3$，后置导叶叶片数 $Z_s = 5$，叶轮轮毂直径 $D_1 = 108$ mm，轮缘直径 $D_2 = 300$ mm，其中轮缘间隙 $\delta = 0.3$ mm。计算区域如图 1 所示，从进口到出口依次包括前置导叶、叶轮、后置导叶及出水弯管等部分。

整个计算域均采用结构化六面体网格，由于叶轮流道高度扭曲，采用“J”型网格拓扑结构，并且在叶片附近采用“O”型拓扑环绕，间隙处采用“H”型拓扑结构。经过网格独立性验证，最终总体网格单元数约 2.9×10^6，模型网格如图 2 所示。

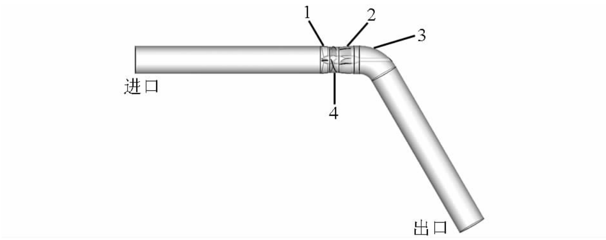

图 1　轴流泵物理模型

Fig. 1　Sketch map of computational domain

1. 前置导叶　2. 后置导叶　3. 弯管　4. 叶轮

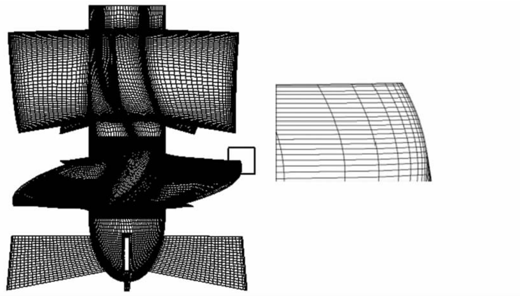

图 2　计算网格

Fig. 2　Mesh of model

1.2　计算方法

基于粘性不可压缩雷诺时均 Navier-Stokes 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型[20]，采用 ANSYS FLUENT 14.5 软件对轴流泵内部流动进行三维非定常计算。采用质量流量进口和静压力出口边界，固壁为无滑移边界条件。采用有限体积法进行控制方程离散，压力-速度耦合求解采用 SIMPLEC 算法。

旋转区域和非旋转区域，首先采用多重坐标系方法进行流场定常计算，其结果作为非定常计算的流场初始值。非定常计算时，在动静交界面处采用滑移网格技术，时间步长 $\Delta t = 3.5\times10^{-4}$ s，即每个时间步叶轮转动 3°。分别对 3 个流量工况($0.9Q_d$、Q_d 和 $1.1Q_d$)进行定常和非定常计算。

1.3　监测点布置

为了研究轴流泵内流场压力脉动特性，在叶轮进口、叶轮出口和后置导叶出口截面，从轮毂到轮缘依次布置 3 个监测点，如图 3 所示。

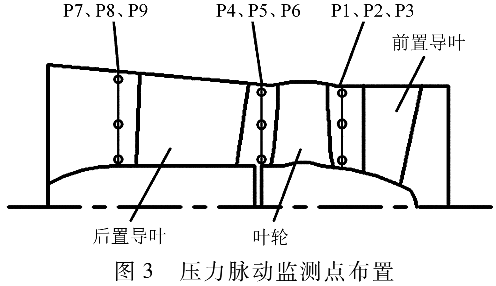

图 3　压力脉动监测点布置

Fig. 3　Locations of pressure survey points

1.4　可靠性验证

为了验证计算方法的可靠性，对不加前置导叶

轴流泵进行非定常计算，并将轴流泵外特性计算值与试验数据对比，如图4所示。外特性参数采用无量纲形式的流量系数 φ、扬程系数 ψ、效率 η 表示，公式为

$$\varphi = \frac{Q}{nD_2^3} \tag{1}$$

$$\psi = \frac{gH}{n^2 D_2^2} \tag{2}$$

$$\eta = \frac{30\rho gQH}{M\pi n} \times 100\% \tag{3}$$

式中 ρ——流体密度，kg/m^3
Q——流量，L/s　　H——扬程，m
M——转矩，N·m
g——重力加速度，m/s^2

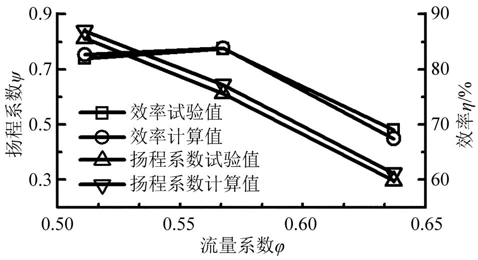

图4 轴流泵外特性计算值与试验值对比
Fig. 4 Comparison between simulation results and test data

由图4可知，3个流量工况泵扬程和效率计算值与试验数据较为接近，说明本文采用的计算方法是可靠的。

2 结果及分析

2.1 轴流泵外特性

前置导叶叶片为直板结构，定义导叶片沿轴向时，安放角为0°；当导叶片出口倾斜方向与叶轮旋转方向一致时，安放角为正角度，相反为负角度[19]。本文选取的前置导叶角度分别为 -10°、0°和10°。

图5为前置导叶调节泵扬程系数与流量系数关系曲线。由图可知，增设前置导叶且未调节时，扬程系数略有下降，这是由于前置导叶的增设增加了局部水头损失，且流量越大，损失越大。同一流量工况，随着前置导叶从负角度调至正角度，扬程系数逐渐下降，这一规律与叶轮进口的预旋调节理论[1]相一致。

图6为前置导叶调节泵效率与流量系数关系曲线。随着前置导叶从负角度调至正角度，效率逐渐下降，且大流量工况效率下降幅度较大。

2.2 轴流泵压力脉动

非定常计算时，通过监测出口边界流量发现，经过4个叶轮旋转周期后，流量保持稳定，故从该时刻开始采样，采样时间为8个叶轮旋转周期，利用快速傅里叶变换（FFT）进行流场压力脉动频谱分析。采用压力系数表征监测点压力脉动，压力系数公式为

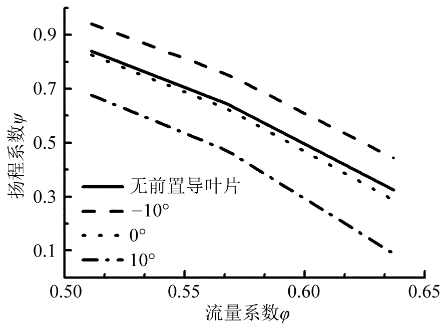

图5 前置导叶不同安放角时泵扬程系数曲线
Fig. 5 Pump head coefficient curves for various angles of inlet guide vane

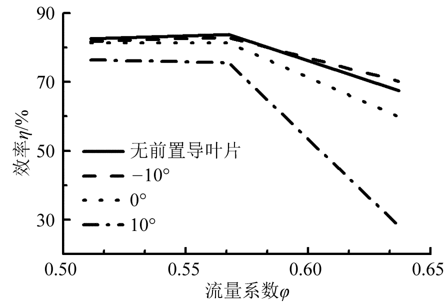

图6 前置导叶不同安放角时泵效率曲线
Fig. 6 Pump efficiency curves for various angles of inlet guide vane

$$C_p = \frac{P - \overline{P}}{0.5\rho U_{tip}^2} \tag{4}$$

式中 P——监测点压力，Pa
$\overline{P}$——采样时间内监测点平均压力，Pa
U_{tip}——叶轮叶顶圆周速度，m/s

采用叶频倍数 f/f_n 表示频率无量纲参数，其中叶片通过频率为

$$f_n = \frac{Z_r n}{60} \tag{5}$$

通过分析发现，在叶轮进口，靠近轮缘处轴流泵压力脉动较强；在叶轮出口，轮毂附近和流道中间位置压力脉动较强[10]。最终选取流道中间位置监测点P2、P5和P8进行频谱分析，重点研究前置导叶调节对压力脉动，特别是对低频压力脉动的影响。

图7为不同流量工况监测点P2的压力系数频域图。由图可知，在叶轮进口，受叶轮转动影响，频率以叶片通过频率为主，且未出现低频信息，说明叶轮入流流态较好。小流量时，前置导叶10°能很好地降低压力系数幅值；设计流量时，前置导叶10°也使压力系数幅值有所下降；大流量时，前置导叶调角均能降低压力系数幅值。

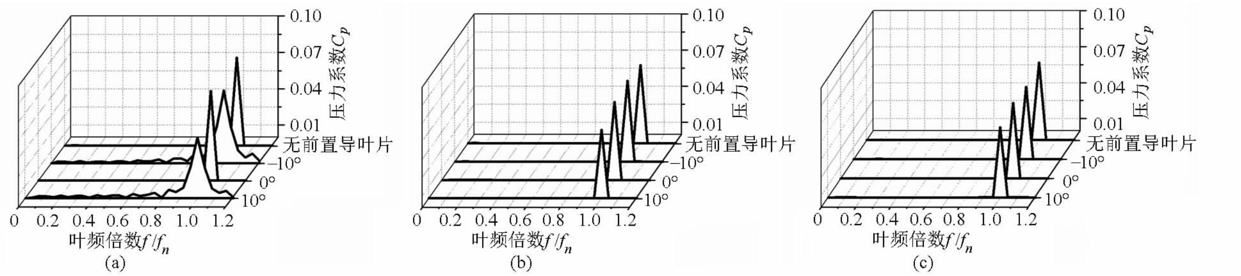

图 7　不同流量工况监测点 P2 压力脉动频域图

Fig. 7　Frequency spectra of pressure fluctuation at survey point P2 under different flow rate conditions

(a) $0.9Q_d$　(b) Q_d　(c) $1.1Q_d$

图 8 为不同流量工况监测点 P5 的压力系数频域图。在叶轮出口，频率仍以叶片通过频率为主，且出现低频信息。小流量时，主频变化规律与图 7a 相似；无前置导叶片时，出现低频小幅值压力脉动，这是由于流体流入后置导叶时，在轮毂附近出现回流造成的，且前置导叶 10°能很好地降低该低频压力脉动幅值；设计流量时，前置导叶 10°使低频压力脉动幅值有所下降，而前置导叶 -10°增大了主频及低频压力脉动的压力系数幅值；大流量时，前置导叶调角均能降低主频压力脉动幅值，同时前置导叶 -10°使低频压力脉动幅值有所下降，但前置导叶 10°增大了低频压力脉动幅值。

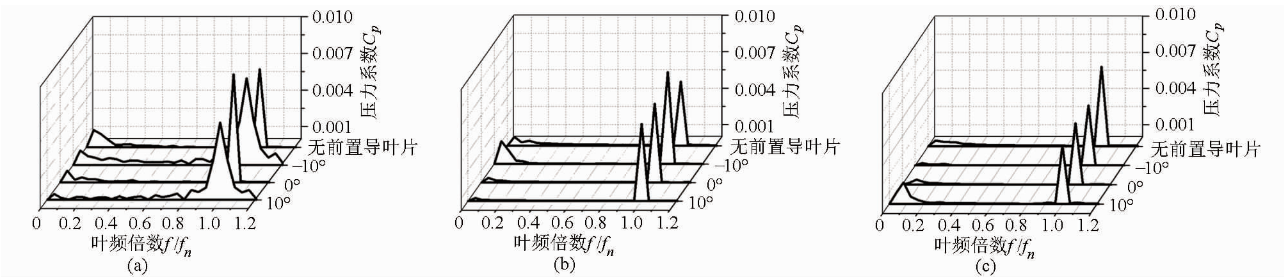

图 8　不同流量工况监测点 P5 压力脉动频域图

Fig. 8　Frequency spectra of pressure fluctuation at survey point P5 under different flow rate conditions

(a) $0.9Q_d$　(b) Q_d　(c) $1.1Q_d$

图 9 为不同流量工况监测点 P8 的压力系数频域图。在后置导叶出口，距离叶轮较远，受叶轮转动影响较小，叶片通过频率的压力系数幅值大为降低。小流量时，出现大量低频信息，且幅值较大。前置导叶 0°和 10°能很好地降低低频压力脉动的压力系数幅值；设计流量和大流量时，前置导叶调角的影响分别与图 8b、8c 一致，不同之处在于，图 9b、9c 中，前置导叶调角增大了叶片通过频率的压力系数幅值。

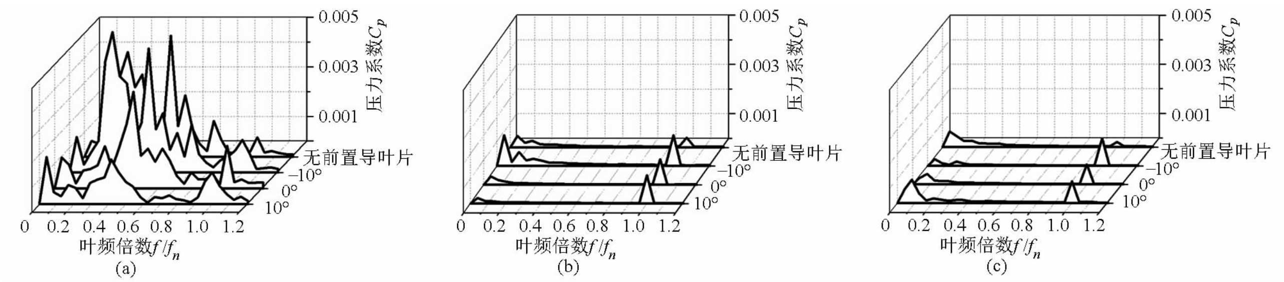

图 9　不同流量工况监测点 P8 压力脉动频域图

Fig. 9　Frequency spectra of pressure fluctuation at survey point P8 under different flow rate conditions

(a) $0.9Q_d$　(b) Q_d　(c) $1.1Q_d$

根据叶轮进口速度三角形，如图 10(图中 v_1、u_1 和 w_1 分别表示绝对速度、圆周速度和相对速度)所示，假定前置导叶不调角时，v_{m1} 为设计流量时的轴面分速度，满足叶轮进口无冲击条件；当流量减小时，轴面分速度由 v_{m1} 减小到 v'_{m1}，将前置导叶调至正角度可满足叶轮进口无冲击条件，改善泵内流态，从而能降低压力脉动幅值并能减少低频压力脉动信息；当流量增大时，轴面分速度由 v_{m1} 增加到 v''_{m1}，此时需要将前置导叶片调至负角度，以改善泵内流态，降低压力脉动幅值。另外，对比图 7、8、9 发现，在叶轮进口，压力脉动幅值最大，通过叶轮和后置导叶后，压力脉动幅值逐渐降低[6]。

2.3 轴流泵流场

图 11(图中 T_0 和 T_1 分别表示涡产生和脱落时刻,T 表示涡脱落周期)为小流量工况,未设前置导叶轴流泵后置导叶内流线图。从图中可以发现,在后置导叶翼型背面存在 2 种涡,记为涡 A 和涡 B,T_0 时刻到 T_1 时刻为一个周期 T。在 T_0 时刻,涡 A 在翼型背面中部产生,不断增大并随主流向导叶出口移动;经过 $T/2$,在翼型背面中部同一位置产生相同的涡 A′,即涡 A 的周期为 $T/2$。在 T_0 时刻,涡 B 在翼型尾部产生,不断增大,并在 $T/2$ 时刻受到涡 A 的挤压而收缩;之后再次增大、卷起,随主流流出导叶;在 T_1 时刻,重新产生相同的涡,即涡 B 的周期为 T,是涡 A 周期的 2 倍。经换算,涡 A 的频率为 36 Hz,涡 B 的频率为 18 Hz;与图 9a 中无前置导叶片时,监测点 P8 的 2 个低频压力脉动峰值对应的频率相一致。可见,这 2 个低频压力脉动是由这两种涡引起的。

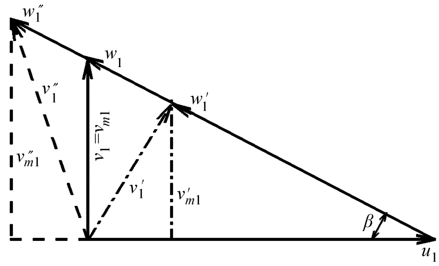

图 10 叶轮进口速度三角形

Fig. 10 Sketch of inlet velocity triangle

图 12 为小流量工况,前置导叶 10°轴流泵后置导叶内流线图。由图可知,T_0' 时刻,翼型背面中后

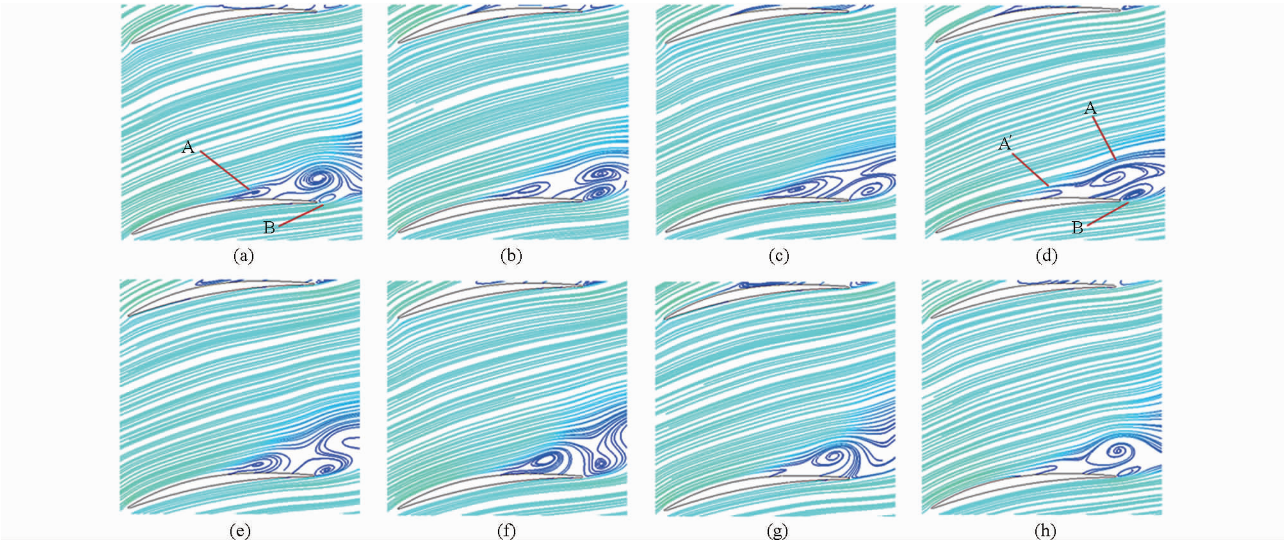

图 11 小流量工况无前置导叶时泵后置导叶内流线图

Fig. 11 Streamline distribution in outlet guide vane without inlet guide vane under $0.9Q_d$ flow condition

(a) T_0 (b) $T/8$ (c) $T/4$ (d) $T/2$ (e) $5T/8$ (f) $3T/4$ (g) $7T/8$ (h) T_1

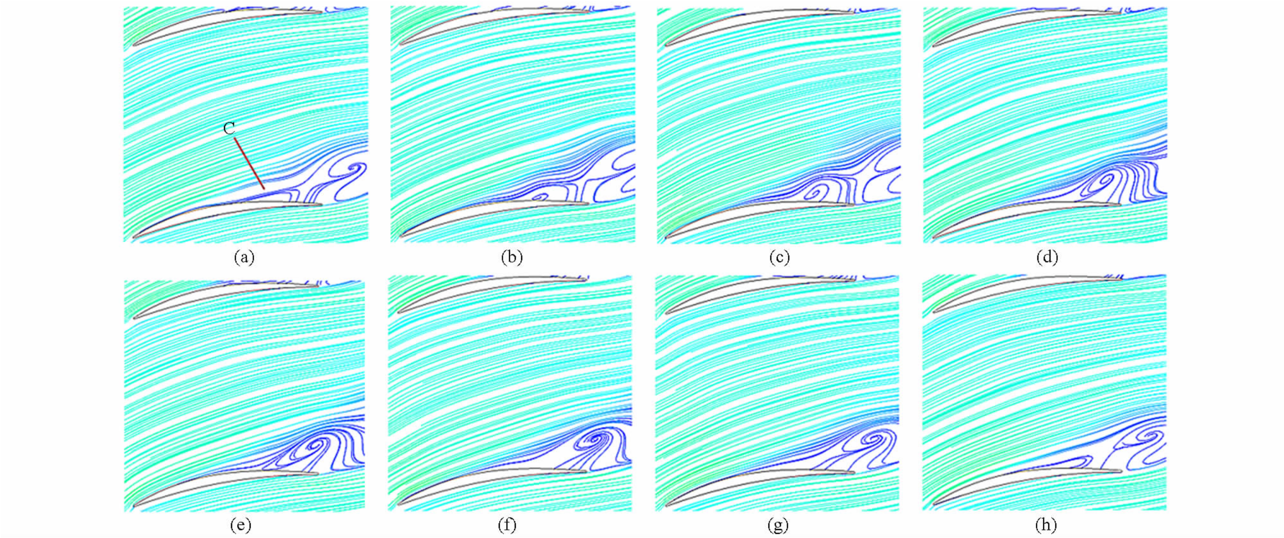

图 12 小流量工况前置导叶 10°时泵后置导叶内流线图

Fig. 12 Streamline distribution in outlet guide vane with angle of inlet guide vane of 10° under $0.9Q_d$ flow condition

(a) T_0' (b) $T'/8$ (c) $T'/4$ (d) $T'/2$ (e) $5T'/8$ (f) $3T'/4$ (g) $7T'/8$ (h) T_1'

部产生涡 C，随之卷起增大，并随主流向导叶出口流动，在 T_1' 时刻，产生相同的涡。经换算，涡 C 的频率为 32 Hz，与图 9a 中前导叶片 10°时，监测点 P8 的低频压力脉动峰值对应的频率 30 Hz 较接近。对比图 11 和图 12 发现，在小流量工况，将前置导叶调至正角度可以改善泵后置导叶内部流场，减少涡的产生，从而减少后置导叶出口低频压力脉动信息，并降低低频压力脉动幅值。

3　结论

（1）前置导叶负角度时，轴流泵扬程增大，小流量工况效率基本保持不变，大流量工况效率略有升高；前置导叶正角度时，轴流泵扬程和效率均下降，且大流量工况效率下降较严重。

（2）小流量工况轴流泵后置导叶内出现涡旋，引起导叶出口低频压力脉动，且低频压力脉动频率与涡脱落频率一致。

（3）小流量工况前置导叶正角度调节，可减小叶轮进口流动冲角，改善泵内流态，减少后置导叶内涡的产生，从而减少后置导叶出口低频压力脉动信息，并降低低频压力脉动幅值；大流量工况前置导叶负角度调节，可降低低频压力脉动幅值，并能提高泵效率。

参　考　文　献

1　关醒凡. 轴流泵与斜流泵[M]. 北京：中国宇航出版社，2009.

2　Cui B L, Chen D S, Xu W J, et al. Unsteady flow characteristic of low-specific-speed centrifugal pump under different flow-rate conditions[J]. Journal of Thermal Science, 2015, 24(1): 17－23.

3　Pei J, Yuan S Q, Li X J, et al. Numerical prediction of 3-D periodic flow unsteadiness in a centrifugal pump under part-load condition[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2014, 26(2): 257－263.

4　施卫东，张光建，张德胜，等. 入口非均匀流对轴流泵性能和压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报，2014，32(4)：277－282. Shi Weidong, Zhang Guangjian, Zhang Desheng, et al. Effects of non-uniform suction flow on performance and pressure fluctuation in axial-flow pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4): 277－282. (in Chinese)

5　靳栓宝，王永生，常书平，等. 混流泵内流场压力脉动特性研究[J]. 农业机械学报，2013，44(3)：64－68. Jin Shuanbao, Wang Yongsheng, Chang Shuping, et al. Pressure fluctuation of interior flow in mixed-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 64－68. (in Chinese)

6　张德胜，王海宇，施卫东，等. 轴流泵多工况压力脉动特性试验[J]. 农业机械学报，2014，45(11)：139－145. Zhang Desheng, Wang Haiyu, Shi Weidong, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation with multiple flow rates in scaled axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 139－145. (in Chinese)

7　Kaupert K A, Staubli T. The unsteady pressure field in a high specific speed centrifugal pump impeller—Part II: transient hysteresis in the characteristic [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(3): 627－632.

8　Yao Z F, Wang F J, Qu L X, et al. Experimental investigation of time-frequency characteristics of pressure fluctuations in a double-suction centrifugal pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(10): 101303－101303－10.

9　黄先北，刘竹青. 无导叶离心泵蜗壳内低频压力脉动分析[J]. 机械工程学报，2014，50(10)：170－176. Huang Xianbei, Liu Zhuqing. Analysis of low-frequency pressure pulsations in vaneless centrifugal pump volute[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(10): 170－176. (in Chinese)

10　姚捷，施卫东，吴苏青，等. 轴流泵压力脉动数值计算与试验[J]. 农业机械学报，2013，44(增刊 1)：119－124. Yao Jie, Shi Weidong, Wu Suqing, et al. Numerical calculation and experiment on pressure fluctuation in axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 119－124. (in Chinese)

11　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)

12　张德胜，施卫东，李通通，等. 轴流泵叶轮出口尾迹区非定常压力和速度场特性[J]. 农业工程学报，2012，28(17)：32－37. Zhang Desheng, Shi Weidong, Li Tongtong, et al. Property of unsteady pressure and meridional velocity in wake region of axial-flow pump impeller[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 32－37. (in Chinese)

13　高波，杨敏官，李忠，等. 空化流动诱导离心泵低频振动的实验研究[J]. 工程热物理学报，2012，33(6)：965－968. Gao Bo, Yang Minguan, Li Zhong, et al. Experimental study on cavitation induced low frequency vibration in a centrifugal pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(6): 965－968. (in Chinese)

14　Mohseni A, Goldhahn E, Van den Braembussche R A, et al. Novel IGV designs for centrifugal compressors and their interaction with the impeller[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2012, 134(2): 021006－021006－8.

15　Fernández Oro J M, Argüelles Diaz K M, SantolariaMorros C, et al. Numerical simulation of the unsteady stator-rotor interaction in a low-speed axial fan including experimental validation[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2011, 21(2): 168－197.

（下转第 74 页）

Machinery,2005,23(1):10－12.(in Chinese)
2 陈容新,陈建良,易锡玲,等.竖井双向贯流泵站机组设备选型设计与研究[J].中国农村水利水电,2007(7):69－71.
Chen Rongxin, Chen Jianliang, Yi Xiling, et al. The design and research on devices selection for bifurcate silo tubular pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(7):69－71.(in Chinese)
3 陆林广,刘成云,陈玉明.进水流道对轴流泵装置水力性能的影响[J].水泵技术,1997(3):25－26,39.
Lu Linguang, Liu Chengyun, Chen Yuming. Influence of inlet conduit on hydraulic performance of axial flow pump [J]. Pump Technology,1997(3):25－26,39.(in Chinese)
4 成立,刘超,周济人,等.基于 RNG 湍流模型的双向泵站出水流道流动计算[J].水科学进展,2004(1):109－112.
Cheng Li, Liu Chao, Zhou Jiren, et al. Numerical simulation of flow in the outlet passages of reversible pumping station by RNG $k-\varepsilon$ turbulent model with wall function law[J]. Advances in Water Science,2004(1):109－112.(in Chinese)
5 张仁田.双向泵站进水流道优化水力设计与试验研究[J].农业机械学报,2003,34(6):73－76,72.
Zhang Rentian. Optimum hydraulic design and experiment for dual-directional inlet passage in pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2003, 34(6):73－76,72.(in Chinese)
6 仇宝云,林海江,袁寿其,等.大型水泵出水流道优化水力设计[J].机械工程学报,2006,42(12):47－51.
Qiu Baoyun, Lin Haijiang, Yuan Shouqi, et al. Optimum hydraulic design for discharge passage of large pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006, 42(12):47－51.(in Chinese)
7 刘军.竖井式贯流泵装置水力特性及优化设计研究[D].扬州:扬州大学,2010.
8 刘君,郑源,周大庆,等.前、后置竖井贯流泵装置基本流态分析[J].农业机械学报,2010,41(增刊):32－38.
Liu Jun, Zheng Yuan, Zhou Daqing, et al. Analysis of basic flow pattern in shaft front-positioned and shaft rear-positioned tubular pump systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(Supp.):32－38.(in Chinese)
9 陈松山,葛强,严登丰,等.大型泵站竖井贯流泵装置能量特性试验[J].中国农村水利水电,2006(3):54－56.
Chen Songshan, Ge Qiang, Yan Dengfeng, et al. The energy test of large bidirectional shaft tubular pump system [J]. China Rural Water and Hydropower,2006(3):54－56.(in Chinese)
10 徐磊,陆林广,陈伟,等.南水北调工程邳州站竖井贯流泵装置进出水流态分析[J].农业工程学报,2012, 28(6):50－56.
Xu Lei, Lu Linguang, Chen Wei, et al. Flow pattern analysis on inlet and outlet conduit of shaft tubular pump system of Pizhou pumping station in South-to-North Water Diversion Project[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 50－56.(in Chinese)
11 徐磊,陆林广,王海,等.竖井式进水流道尺寸对水力性能的影响[J].水利水运工程学报,2014(5):47－52.
Xu Lei, Lu Linguang, Wang Hai, et al. Influence of control size of shaft inlet conduit on hydraulic performance[J]. Hydro-Science and Engineering,2014(5):47－52.(in Chinese)
12 陈会向,周大庆,张蓝国,等.基于 CFD 的双向竖井贯流泵装置水力性能数值模拟[J].水电能源科学,2013(11):183－187.
Chen Huixiang, Zhou Daqing, Zhang Languo, et al. Hydraulic performance improvement of bidirectional shaft tubular pump system base on CFD[J]. Water Resourcese and Power,2013(11):183－187.(in Chinese)
13 梁金栋,陆林广,徐磊,等.轴流泵装置导叶出口水流速度环量对出水流道水力损失的影响[J].农业工程学报,2012, 28(1):55－60.
Liang Jindong, Lu Linguang, Xu Lei, et al. Influence of flow velocity circulation at guide vane outlet of axial-flow pump on hydraulic loss in outlet conduit[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 55－60.(in Chinese)
14 杨帆,刘超,汤方平,等.竖井型线演变及对泵装置水力性能的影响分析[J].应用基础与工程科学学报,2014(1):129－139.
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Shaft shape evolution and analysis of its effect on the pumping system hydraulic performance [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2014(1):129－139.(in Chinese)
15 周伟,陶玮,周红兵,等.开敞式双向泵装置出水锥管的优化设计[J].南水北调与水利科技,2014(2):164－166.
Zhou Wei, Tao Wei, Zhou Hongbing, et al. Optimal design of outlet conical pipe for open dual-directional pumping system[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2014(2):164－166.(in Chinese)

(上接第 67 页)

16 Tan L, Zhu B S, Cao S L, et al. Influence of prewhirl regulation by inlet guide vanes on cavitation performance of a centrifugal pump[J]. Energies, 2014, 7(2): 1050－1065.
17 杨帆,刘超,汤方平,等.带可调进口导叶轴流泵装置水力性能的数值分析[J].农业机械学报,2014,45(5):51－58.
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Numerical simulation on hydraulic performance of axial-flow pump system with adjustable inlet guide vanes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 51－58.(in Chinese)
18 Tan L, Cao S L, Wang Y M, et al. Influence of axial distance on pre-whirl regulation by the inlet guide vanes for a centrifugal pump[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(4): 1037－1043.
19 孔繁余,王文廷,黄道见,等.前置导叶调节混流泵性能的数值模拟[J].农业工程学报,2010,26(10):124－128.
Kong Fanyu, Wang Wenting, Huang Daojian, et al. Numerical simulation of inlet guide vane regulation for mixed-flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(10): 124－128.(in Chinese)
20 Menter F R. A comparison of some recent eddy-viscosity turbulence models[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1996, 118(3): 514－519.