排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2020 年 5 月 May 2020 | 第 38 卷 第 5 期 Vol.38 No.5

双蜗壳离心泵空化流动对隔舌处压力脉动特性的影响

杨敬江*，李先军，潘中永，何松
（江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）


杨敬江

摘要：应用数值计算方法分析了双蜗壳离心泵内空化流动影响隔舌部位压力脉动特性情况，以进一步明晰空化流动诱导泵振动噪声机理.采用 SST $k-\omega$ 湍流模型和 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型，对设计工况下的泵内空化流动和无空化流动进行了非定常数值模拟，数值模拟结果表明：SST $k-\omega$ 湍流模型能准确预测双蜗壳离心泵的能量特性指标；泵内空化的空泡初始产生于叶轮叶片进口吸力面根部，随着装置空化余量的降低，空泡云沿着叶轮叶片吸力面向叶片出口和前盖板方向发展，叶轮内部空泡的发展并不均匀，加剧了叶轮内部流动的不稳定性.对比叶轮旋转 1 周在空化和无空化流动状态下发现，2 个隔舌处各个监测点的压力脉动具有明显周期性，在无空化状态下，隔板进口处监测点的压力脉动主频为 2 倍叶频，其他监测点压力脉动主频均为叶频；空化状态下 2 个隔舌处各个监测点的压力脉动主频均为叶频，压力脉动幅值明显增大.

关键词：离心泵；双蜗壳；空化；隔舌；压力脉动
中图分类号：S277.9；TH311　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2020)05-0445-06
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.19.0011

杨敬江，李先军，潘中永，等.双蜗壳离心泵空化流动对隔舌处压力脉动特性的影响[J].排灌机械工程学报，2020，38(5)：445-450.
YANG Jingjiang，LI Xianjun，PAN Zhongyong，et al. Effects of cavitating flow on induced pressure fluctuation near tongue in double-volute centrifugal pump[J].Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2020，38(5)：445-450.(in Chinese)

Effects of cavitating flow on induced pressure fluctuation near tongue in double-volute centrifugal pump

YANG Jingjiang，*LI Xianjun*，*PAN Zhongyong*，*HE Song*
(National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China)

Abstract：Numerical simulation was applied to analyze effects of cavitating flow on pressure fluctution near the tongue in a double-volute centrifugal pump to investigate the mechansems for pump vibration and noise induced by the flow.The SST $k-\omega$ turbulence model and Zwart-Gerber-Belamri cavitation model were selected to carry out unsteady simulations of non-cavitating flow and cavitating flow in the pump under design condition. The numerical results show that the SST $k-\omega$ turbulence model can accurately predict the pump perfromance. Vapour bubbles occur initlally on the blade suction side near the blade leading edge and impeller hub.With the decrease of *NPSHA*(net positive suction head available)，the vapour bubbles develop along the blade suction side towards the blade outlet and impeller shroud.The vapour bubbles uneven development in different flow passages intensifies the unstablility of the flow in the impeller.Comparing the flow patterns of cavitation and non-cavitation flows in one revolution of the impeller，the pressure fluctuation of two monitoring points near tongue domonstrates an

收稿日期：2019-01-31；**修回日期**：2019-05-15；**网络出版时间**：2020-05-06
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20200430.1543.004.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51879120)；江苏高校优势学科建设项目
第一作者简介：杨敬江(1968—)，男，河北唐山人，副研究员，博士(通信作者，yangjj@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械及工程研究.
第二作者简介：李先军(1993—)，男，江苏淮安人，硕士研究生(1227006277@qq.com)，主要从事流体机械及工程研究.

obvious periodicity. The dominant frequency of the pressure fluctuation near the inlet of the deflector is double the blade passing frequency (BPF) under non-cavitation condition. The dominant frequency of the pressure flucutation at the other monitoring points is BPF under both cavitation and non-cavitation conditions. The amplitude of the pressure fluctuation near all the monitoring points increases significantly under cavitation condition.

Key words: centrifugal pump; double-volute; cavitation; tongue; pressure fluctuation

双蜗壳离心泵的结构特点是具有2个独立且对称布置的蜗壳流道,可以减小由于单蜗壳内不对称流动产生的径向力[1],在大型离心泵中得到了广泛应用.谈明高等[2]通过数值模拟分析了双蜗壳泵在不同时刻泵内结构变形的特点.张帆等[3]通过数值计算发现双蜗壳离心泵压力脉动主要产生于叶轮出口和蜗壳进口的交界面位置,且主要脉动频率为叶频及其倍频.上述研究主要分析了双蜗壳结构对泵的性能和内部流动的影响,而较少关注双蜗壳离心泵空化流动对压力脉动的影响情况.

目前对于离心泵空化的研究主要有试验和数值模拟2种方法.FRIEDRICHS等[4]采用可视化手段得到了空泡的分布特点和空泡在叶轮内部的演变过程. SINGHAL等[5]建立完全空化数学模型,并通过试验验证其可准确模拟空泡的演变过程.刘厚林等[6]研究了不同空化模型在离心泵空化流动中的适用性.王松林等[7]利用数值模拟研究离心泵内空化流动和压力脉动特点,结果表明叶轮内压力脉动主频为叶轮转频.张德胜等[8]研究了轴流泵叶轮内空泡分布状态.高波等[9]研究了离心泵空化流动的非定常激励特点,探究了压力脉动强度和空化流动发展的关系.LEE等[10]研究了空化流动对叶轮所受径向力的影响.袁建平等[11]研究了离心泵回流旋涡的空化特点,发现在小流量工况下泵内发生回流空化且具有低频特性. LIU等[12]研究了混流泵的压力脉动与叶顶间隙泄漏涡之间的关系.

文中以一台双蜗壳离心泵为研究对象,采用SST $k-\omega$ 湍流模型和Zwart-Gerber-Belamri空化模型,对设计工况下的泵内空化流动和无空化流动进行非定常数值模拟,预测设计工况下泵内空化发生的位置和发展状态,研究空化流动诱导隔舌部位压力脉动的变化,旨在研究双蜗壳结构对空化流动的影响,为双蜗壳泵内空化状态监测和预防提供理论依据,给空化流动诱导泵振动噪声机理相关研究提供新的参考.

1 计算模型

选取的双蜗壳离心泵的最高效率点性能参数分别为流量 $Q_d=185.4\ m^3/h$,扬程 $H_d=82.5\ m$,转速 $n=2\ 950\ r/min$,比转数 $n_s=89.2$.泵的主要几何参数分别为叶轮进口直径 $D_1=160\ mm$,轮毂直径 $d_h=60\ mm$,叶轮出口宽度 $b_2=16\ mm$,叶片数 $Z=5$,隔舌安放角 $\varphi_0=25°$,排出口直径 $D_d=100\ mm$,双蜗壳的隔板位置见图1.图2为采用UG软件对泵水体进行三维造型.

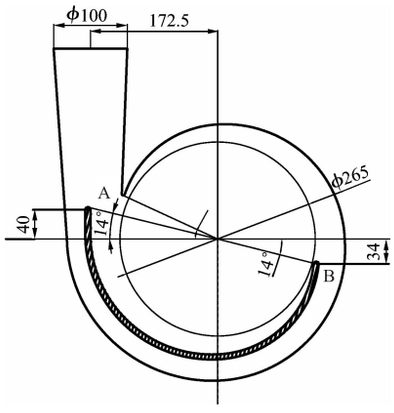


图1 蜗壳平面图
Fig.1 Plain drawing of volute

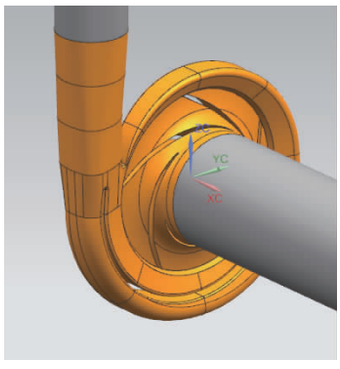


图2 三维造型
Fig.2 3D model drawing of computational domain

2 数值计算

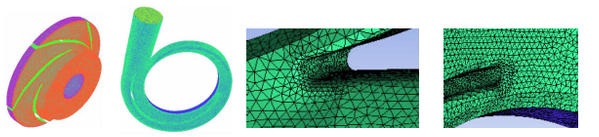
2.1 网格划分

对泵进行全流道数值计算,包括泵进口段、叶轮、蜗壳及泵出口段,叶轮和双蜗壳结构复杂,采用

适应性好的非结构网格,并且在蜗壳的隔舌处进行了网格加密.表 1 为 3 组不同数量 N 的网格无关性验证,表中 H_t,H_c 分别为扬程的试验值和计算值.选用网格 2 为计算网格,各部件的网格质量在 0.35 以上,且叶轮部分的 y^+ 值为 36,符合数值计算要求,主要部件网格划分结果如图 3 所示,最终确定计算域网格总数为 2 548 957.

表 1　网格无关性验证
Tab.1　Validation of mesh size independence

网格	N				H_t/m	H_c/m
	泵进口段	叶轮	蜗壳	泵出口段		
1	502 752	421 512	555 715	294 556	82.5	78.5
2	502 752	966 360	785 289	294 556	82.5	79.9
3	502 752	1 325 247	1 163 402	294 556	82.5	80.1



(a) 叶轮　(b) 蜗壳　(c) 隔舌A局部放大图　(d) 隔舌B局部放大图

图 3　计算网格
Fig.3　Computational mesh patterns

2.2　控制方程

离心泵内空化流动可以看成一种均匀气液混合物流动,采用基于均质多相传输模型的连续性方程和动量方程来描述空化流动.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_m u_j)}{\partial x_j}=0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho_m u_j)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\delta_{ij}\right)\right], \tag{2}$$

$$\rho_m=\rho_l\alpha_l+\rho_v\alpha_v, \tag{3}$$

式中:ρ 为密度;α 为体积分数;u_i,u_j 为速度分量;p 为压强;δ_{ij} 为克罗内克数;μ,μ_t 分别为混合物的动力黏度和湍流黏度;下标 m,l 和 v 分别为混合相、液相和气相.

湍流模型选用在水力机械空化流计算中较为理想的 SST $k-\omega$ 模型.

2.3　空化模型

空化模型采用 ANSYS-CFX 软件中集成的基于 Rayleigh-Plesset 方程的 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型,其气相控制方程为

$$\frac{\partial(\alpha_v\rho_v)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_v\rho_v u_i)=R, \tag{4}$$

$$R=R_e-R_c, \tag{5}$$

$$R_e=F_{vap}\frac{3\alpha_{nuc}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_B}\left(\frac{2}{3}\frac{p_v-p}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{2}},\ 当\ p\leqslant p_v, \tag{6}$$

$$R_c=F_{cond}\frac{3\alpha_v\rho_v}{R_B}\left(\frac{2}{3}\frac{p-p_v}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{2}},\ 当\ p\geqslant p_v, \tag{7}$$

式中:α_v 为气相体积分数;R 为相间质量传输率;ρ_v 为气相密度;u_i 为气相速度;R_e 为蒸气生成率;R_v 为蒸气凝结率;F_{vap} 为蒸发经验系数,$F_{vap}=50$;F_{cond} 为凝结经验系数,$F_{cond}=0.01$;α_{nuc} 为成核位置体积分数;R_B 为空泡半径;p 为流场压力;p_v 为介质在工作温度下的饱和蒸气压.

2.4　边界条件和时间步长设置

流体域的进口为压力进口,出口为质量流量出口,壁面设为绝热无滑移壁面,在进行空化计算时,进口处的液相和气相的体积分数分别为 1 和 0.计算时间步长为叶轮旋转 2°所需时间,为 1.13×10^{-4} s,计算总时长为叶轮旋转 10 周所需时间,为 0.203 s.

3　计算结果分析

3.1　外特性分析

如图 4 所示,设计工况下,扬程和效率的计算值与试验值误差分别为 3.2%和 2.0%,非设计工况下的计算值与试验值基本一致,且计算值略低于试验值,最大误差不超过 5.0%,表明选用的计算模型能满足要求.

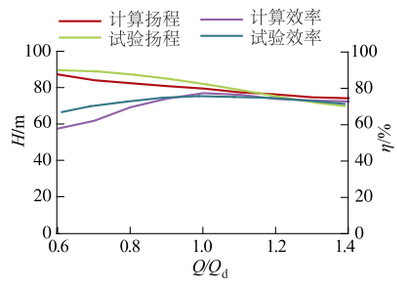


图 4　泵水力性能曲线
Fig.4　Pump performance curves

3.2　空化模拟分析

泵的有效空化余量 $NPSHA$ 的计算公式为

$$NPSHA=\frac{p_{in}-p_{va}}{\rho g}+\frac{v_s^2}{2g}, \tag{8}$$

式中:p_{in} 为泵进口压力;p_{va} 为流体在工作温度下的

饱和蒸气压；v_s 为泵进口的流体速度；ρ，g 分别为流体密度和重力加速度.

根据泵的有效空化余量的计算公式和模拟结果绘制成预测空化性能曲线，如图 5 所示.

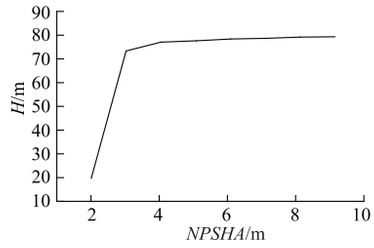
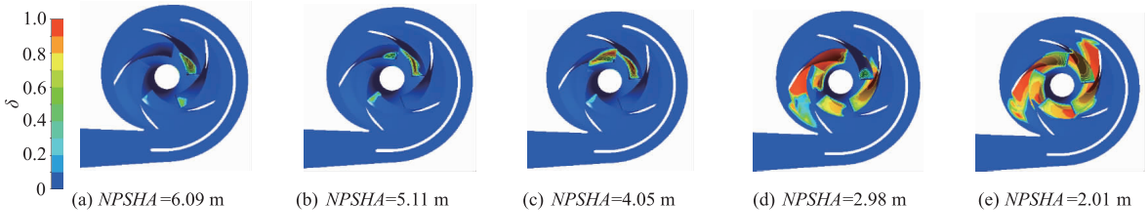


图 5 设计工况下泵空化性能预测曲线

Fig.5 *H*-*NPSHA* curve of pump under design condition

泵扬程下降 3%时所对应的装置空化余量为临界空化余量 *NPSHC*，根据数值模拟结果，计算出在设计工况下的临界空化余量为 *NPSHC*=4.05 m.

图 6 为泵在设计工况点不同空化余量下，叶轮内部的空泡体积分布.由图 6 可以看出：随着装置空化余量降低，叶轮内部发生空化的程度加剧，尤其是当装置空化余量降低到临界空化余量以下时，叶轮内部出现大规模空化状态，叶片吸力面产生大量空泡，进而导致叶片吸力面被空泡覆盖，堵塞流道，严重削弱叶片做功能力，导致扬程急剧降低；泵内空化的空泡初始产生于叶轮叶片进口吸力面根部，随着空化余量的降低，空泡云沿着叶片吸力面向叶片出口和前盖板方向发展，叶轮内部空泡的发展并不均匀，加剧了叶轮内部流动的不稳定性.



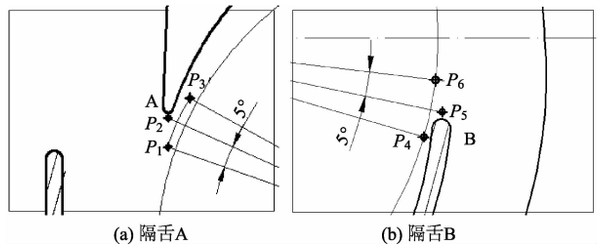
(a) *NPSHA*=6.09 m (b) *NPSHA*=5.11 m (c) *NPSHA*=4.05 m (d) *NPSHA*=2.98 m (e) *NPSHA*=2.01 m

图 6 不同空化余量下空泡分布图

Fig.6 Vapour volume fraction contours in impeller

3.3 空化压力脉动特性

为了准确描述双蜗壳离心泵的空化流动对隔舌处的压力脉动影响，在隔舌 A 和 B 处各设置了 3 个相邻间隔 5°的压力脉动监测点，分别为 P_1，P_2，P_3，P_4，P_5 和 P_6，如图 7 所示.



(a) 隔舌A (b) 隔舌B

图 7 压力脉动监测点设置

Fig.7 Monitoring points near volute tongue

采用压力系数 C_p 分析压力脉动特点，即

$$C_p=\frac{p-\bar{p}}{0.5\rho u^2}, \tag{9}$$

式中：p 为静压；$\bar{p}$ 为叶轮旋转 1 周的平均静压；u 为叶轮圆周速度.

图 8 为设计工况时，在空化和无空化流动状态下，叶轮旋转 1 周的压力脉动时域信号图，可以看出：隔舌 A 处的监测点 P_1，P_2 和 P_3 的压力脉动具有明显的周期性特点，监测点 P_1 在空化与无空化流动状态下的压力脉动规律一致，表明该处的流动受泵内空化影响较小；受到隔舌位置附近紊乱的流动影响，监测点 P_2 在空化与无空化流动状态下的压力脉动规律有明显差异，压力脉动幅值受空化流动影响较大，空化流动状态下的压力脉动峰值是无空化流动状态压力脉动峰值的 2 倍；在无空化流动状态下，监测点 P_3 与监测点 P_1 的压力脉动变化规律基本一致，而在蜗壳断面与隔舌的共同作用下，监测点 P_3 的压力脉动受到空化流动的影响，但在空化流动状态下的压力脉动峰值变化不大；隔舌 B 处的监测点 P_4，P_5 和 P_6 的压力脉动同样具有周期性的特点；监测点 P_4 和 P_5 在空化与无空化流动状态下的压力脉动变化规律一致，空化流动对监测点 P_4 的压力脉动影响较小，而监测点 P_5 的压力脉动受空化流动影响较大，且该处空化流动状态下的压力脉动峰值是无空化流动状态下压力脉动峰值的 2 倍；监测点 P_6 位于隔板进口的上游位置，流动状态受隔板影响较小，在空化与无空化流动状态下的压力脉动规律与监测点 P_4 和 P_5 差异较大，监测点 P_6 在空化流动状态与无空化流动状态下的压力脉动变化一致，表明该处受空化流动的影响较小.

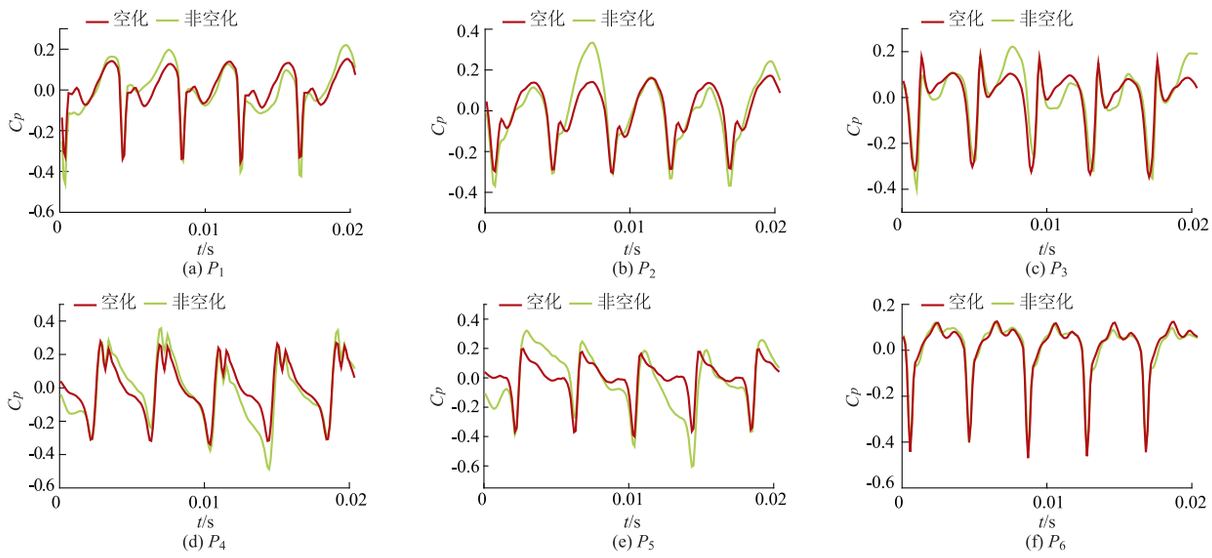


图 8　隔舌 A 和 B 不同监测点的压力脉动时域图

Fig.8　Time domain of pressure fluctuation at monitoring points A and B near tongue

图 9 为相应的压力脉动频域图,可以看出,在设计工况点,泵内发生空化和无空化状态下,监测点 P_1,P_2,P_3,P_4 和 P_6 处的压力脉动主频均为 245.8 Hz,为叶轮叶片通过频率,而点 P_5 在空化状态下压力脉动主频为叶频,在无空化状态下压力脉动主频为 2 倍叶频.

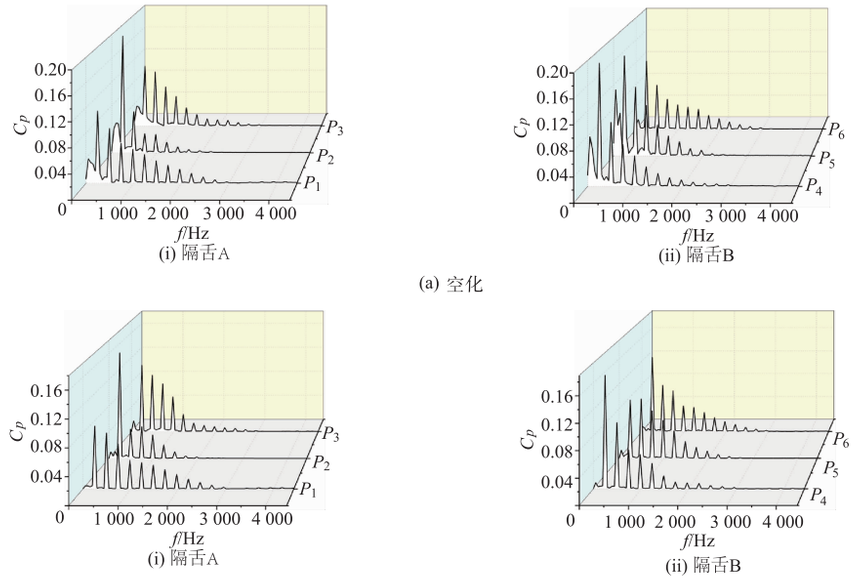


图 9　隔舌 A 和 B 不同监测点的压力脉动频域图

Fig.9　Frequency domain of pressure fluctuation at monitoring points A and B near tongue

4　结　论

1）在设计工况下,双蜗壳离心泵内发生空化时,空泡初始产生于叶轮叶片进口吸力面根部.随着装置空化余量的降低,空泡云沿着叶轮叶片吸力面向叶片出口和前盖板方向发展.叶轮内部空泡的发展并不均匀,叶轮内部不稳定流动加剧,导致泵振动产生噪声.

2）在空化状态下,双蜗壳离心泵隔舌 A,B 处的压力脉动均呈现出周期性,不同监测点的主频均为叶频,且在靠近隔舌位置的点 P_2,P_5 的压力脉动幅值有显著增长,其峰值均为对应无空化状态下压力脉动峰值的 2 倍.

参考文献(References)

[1] 施瀚昱,牟介刚,郑水华,等.双蜗壳泵隔板长度对径向力平衡的影响[J]. 浙江农业学报,2013,25(6):1378-1382.
SHI Hanyu,MOU Jiegang,ZHENG Shuihua,et al. Effect of different baffle length of double volute pump on radial force balance [J]. Acta agriculturae Zhejiangensis,2013,25(6):1378-1382.(in Chinese)

[2] 谈明高,吴贤芳,刘厚林,等. 双蜗壳离心泵的流固耦合分析[J]. 中国农村水利水电,2012(12):127-130.
TAN Minggao, WU Xianfang, LIU Houlin, et al. The fluid structure interaction analysis for a centrifugal pump with double volute[J]. China rural water and hydropower,2012(12):127-130. (in Chinese)

[3] 张帆,袁寿其,付强,等. 双蜗壳式离心泵内部非定常流动压力特性分析[J]. 农业机械学报,2015,46(2):52-57.
ZHANG Fan, YUAN Shouqi, FU Qiang, et al. Analysis on pressure characteristics during internal unsteady flow in double volute centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAM,2015,46(2):52-57. (in Chinese)

[4] FRIEDRICHS J, KOSYNA G. Rotating cavitation in a centrifugal pump impeller of low specific speed[J]. Journal of fluids engineering, 2002, 124(2): 356-362.

[5] SINGHAL A K,ATHEAVALE M M,LI H. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. Journal of fluids engineering,2002,124(3):617-624.

[6] 刘厚林,刘东喜,王勇,等. 三种空化模型在离心泵空化流计算中的应用评价[J]. 农业工程学报,2012, 28(16):54-59.
LIU Houlin,LIU Dongxi,WANG Yong,et al. Applicative evaluation of three cavitating models on cavitating flow calculation in centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE,2012, 28(16):54-59.(in Chinese)

[7] 王松林,谭磊,王玉川. 离心泵瞬态空化流动及压力脉动特性[J]. 振动与冲击,2013,32(22):168-173.
WANG Songlin,TAN Lei,WANG Yuchuan. Characteristics of transient cavitation flow and pressure fluctuation for a centrifugal pump[J]. Journal of vibration and shock,2013,32(22):168-173. (in Chinese)

[8] 张德胜,潘大志,施卫东,等. 轴流泵空化流及其诱导压力脉动的数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2014,42(1):34-38.
ZHANG Desheng, PAN Dazhi, SHI Weidong, et al. Numerical simulation of cavitation flow in axial flow pump and induced pressure fluctuation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(natural science edition), 2014, 42(1):34-38. (in Chinese)

[9] 高波,孙鑫恺,杨敏官,等. 离心泵内空化流动诱导非定常激励特性的研究[J]. 机械工程学报,2014,50(16):199-205.
GAO Bo,SUN Xinkai,YANG Minguan,et al. Characteristics of unsteady excitation induced by cavitating flow in centrifugal pumps[J]. Journal of mechanical engineering,2014,50(16):199-205. (in Chinese)

[10] LEE D I, LIM H C. Erosion-corrosion damages of water-pump impeller[J]. International journal of automotive technology,2009,10(5):629-634.

[11] 袁建平,侯敬生,付燕霞,等. 离心泵回流漩涡空化的非定常特性研究[J]. 振动与冲击,2018,37(16):24-30.
YUAN Jianping, HOU Jingsheng, FU Yanxia, et al. A study on the unsteady characteristics of the backflow vortex cavitation in a centrifugal pump[J]. Journal of vibration and shock,2018,37(16):24-30.(in Chinese)

[12] LIU Yabin, TAN Lei. Tip clearance on pressure fluctuation intensity and vortex characteristic of a mixed flow pump as turbine at pump mode[J]. Renewable energy,2018,129(12):606-615.

(责任编辑 陈建华)