排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2015 年 1 月 Jan. 2015
第 33 卷 第 1 期 Vol. 33 No. 1

doi:10.3969/j. issn. 1674 －8530. 14. 0098

双吸泵输送含沙水流时蜗壳内压力脉动特性

程效锐

程效锐[1,2]，张楠[1,2]，赵伟国[1,2]

（1. 兰州理工大学能源与动力工程学院，甘肃 兰州 730050；2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室，甘肃 兰州 730050）

摘要：为了研究含沙水流下单级双吸式离心泵蜗壳内压力脉动的变化规律，采用 ASMM 固液两相流模型和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型，并结合 SIMPLEC 算法，在固液两相流介质时对泵内流动进行了全流道三维非定常数值计算. 分析不同固相体积分数和粒径时，泵蜗壳内压力脉动的变化规律，并将固相体积分数 $\phi=12\%$、固相粒径 $d=0.050$ mm 时的计算结果与输送清水介质时计算结果进行了对比. 结果表明：固液两相介质下的压力脉动远大于清水介质，且脉动波形滞后 0.002 s；随着固相体积分数的增大，蜗壳内压力脉动幅值逐渐增大；随着固相粒径的增大，压力脉动幅值有减小的趋势；蜗壳内压力脉动主要以叶片通过频率为主，且在 1 倍叶频处压力脉动最大.

关键词：单级双吸离心泵；固液两相流；非定常流动；压力脉动；数值模拟

中图分类号：S277.9；TH311　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674 －8530(2015)01 －0037 －06

程效锐，张楠，赵伟国. 含沙水流双吸泵蜗壳内的压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(1)：37 －42.

Cheng Xiaorui, Zhang Nan, Zhao Weiguo. Pressure fluctuation features of sand particle-laden water flow in volute of double-suction centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME), 2015,33(1)：37 －42. (in Chinese)

Pressure fluctuation features of sand particle-laden water flow in volute of double-suction centrifugal pump

Cheng Xiaorui[1,2], *Zhang Nan*[1,2], *Zhao Weiguo*[1,2]

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: In order to study fluid pressure fluctuation features in the volute of a centrifugal pump under solid-liquid two-phase flow conditions, a series of unsteady, three-dimensional, turbulent, sand particle-laden water flows in a single-stage double-suction centrifugal pump are simulated based on the ASMM solid-liquid two-phase flow model and SIMPLEC algorithm as well as the RNG $k-\varepsilon$ two-equation turbulence model. The pressure fluctuations are characterized at various solid volume fractions and sand particle diameters; additionally, the simulated results of two-phase flow with 12% solid phase volume fraction and 0.05 mm particle diameter are compared with those of water alone. The results show that the pressure fluctuation of solid-liquid two-phase flow is much greater than the water single phase flow, and the pulse waveform of the two-phase flow is with 0.002 s lag. The pressure fluctuation rises with the increasing solid phase volume fraction, but the change in fluctuation amplitude is not significant. Also, the fluctuation is reduced with the increasing particle diameter. Compared with particle

收稿日期：2014 －07 －01；**网络出版时间**：2015 －01 －19
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150119.1709.014.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51269011)；甘肃省自然科学基金资助项目(2011GS04252)
作者简介：程效锐(1972—)，男，甘肃兰州人，副教授，博士(cxr168861@lut.cn)，主要从事固液两相流动理论及应用研究.
张楠(1988—)，女，甘肃兰州人，硕士研究生(13893687120@163.com)，主要从事固液两相流动理论研究.

diameter, the solid volume fraction affects the pressure fluctuation more remarkable than the particle diameter does. The blade passing frequency is dominated in the pressure fluctuations in the volute, further the maximum pressure fluctuation occurs at the double blade passing frequency.

Key words: single-stage double-suction centrifugal pump; solid-liquid two-phase flow; unsteady flow; pressure fluctuations; numerical simulation

在中国黄河沿线提灌泵站大多采用单级双吸式离心泵,而双吸式离心泵的螺旋形压水室空间非对称结构导致其内部流动呈现复杂的非定常特性,使得泵运行时蜗壳内产生静态压力分量的同时也产生动态压力分量,即压力脉动[1-3].压力脉动会引起泵及泵机组的振动和噪声,严重时甚至损坏设备[4-6].

目前,国内外学者对离心泵内压力脉动做了较多研究,利用试验和数值计算方法分析了离心泵内非定常流动特性,并分别对各过流部件压力脉动进行了时域及频域分析[7-8].但是,这些研究多集中于分析输送清水介质时泵内压力脉动特性和输送固液两相流时的叶片磨损问题,而对输送含沙水流时离心泵蜗壳内压力脉动特性研究较少.考虑到沿黄河提灌泵站的实际工作环境,其输送水流中含有大量泥沙,必然增大对流动的影响,导致泵内的压力脉动与输送清水时有所不同[9-10].根据统计数据资料,黄河中游的高含沙水流固相粒径分布大致为小于0.005 mm的粒径占5%~25%,0.005~0.010 mm的粒径占2%~16%,大于0.010 mm的粒径占60%~90%[11].

文中采用试验和数值计算方法,对双吸式离心泵在输送含沙水流时,不同固相体积分数和粒径对蜗壳内压力脉动的影响规律进行数值计算,并与泵在输送清水介质时的压力脉动特性进行对比分析.

1 计算模型及数值方法

1.1 计算模型

本研究以S150-365型单级双吸离心泵为研究对象,其性能参数分别为流量 $Q=400\ \mathrm{m^3/h}$,扬程 $H=33$ m,转速 $n=480$ r/min,效率 $\eta=86\%$,比转数 $n_s=92.5$.叶轮主要几何参数分别为叶轮进口直径 $D_j=80$ mm,轮毂直径 $D_h=40$ mm,叶轮出口直径 $D_2=364$ mm,叶片进口安放角 $\beta_1=23°$,叶片出口安放角 $\beta_2=38°$,叶片出口宽度 $b_2=22$ mm,叶片包角 $\Phi=164°$,叶片数 $Z=6$.S150-365型单级双吸离心泵全流道三维实体模型如图1所示.

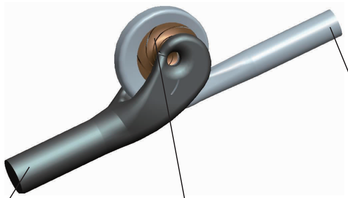

图1 单级双吸离心泵三维模型

Fig.1 3D model of single-stage double-suction centrifugal pump

1.2 基本假设

考虑到离心泵内固液两相流动的复杂性,本研究做了如下假设:

1)流体相为不可压缩连续介质,固体相为离散相,各相物理性质均为常数.

2)固体相颗粒为球形,且尺寸均匀.

3)不考虑相变.

1.3 网格划分

计算域包括3部分,分别为吸水室、叶轮和蜗壳.对计算域采用非结构化网格划分,叶轮流道域网格尺寸较小,吸水室和蜗壳流道域网格尺寸略大,图2为计算模型流体区域网格划分结果,并进行了网格无关性检查[12],同时考虑计算机性能和计算效率,最终确定网格数量分别为吸水室614 784,叶轮301 797,蜗壳670 983,总网格数为1 587 564.

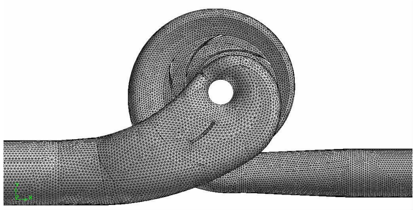

图2 计算域网格划分

Fig.2 Meshing of computational domain

1.4 数值计算方法

采用多重参考坐标系(multiple reference frame, MRF),建立相对坐标系下时均连续方程和全三维不可压缩时均N-S方程,利用RNG $k-\varepsilon$ 模型简化和封闭方程组[13].鉴于液相、固相间曳力规律未知

及计算经济性[14]，固液两相流模型采用在文献[15]中已通过试验验证有较高准确性的代数滑移混合物模型(algebraic slip mixture model, ASMM). 考虑相与相之间滑移速度，液固交换系数采用Schiller and Naumann 模型. 压力－速度耦合方程采用 SIMPLEC 算法[16].

进口边界条件：采用速度进口，并依据质量守恒定律和进口无预旋假定固相进口浓度分布均匀.

出口边界条件：采用自由出流.

壁面条件：壁面满足无滑移条件，近壁面区域采用标准壁面函数处理.

非定常计算中时间步长为 0.337 8 ms，即每 120 个时间步长叶轮旋转 1 周. 采用压力脉动系数 C_p 反映压力脉动的幅值，它是一个相对值，能较为直观地进行不同对象或不同位置压力脉动大小比较.

$$C_p = \frac{p - p_{av}}{0.5\rho u_2^2}, \tag{1}$$

式中：p 为各监测点总压；p_{av} 为总压平均值；ρ 为固液混合相密度；u_2 为叶轮出口圆周速度.

为研究蜗壳内不同位置压力脉动变化规律，布置 13 个压力监测点，如图 3 所示，其中：$P_1 - P_4$ 和 $P_7 - P_{10}$ 为蜗壳中心平面内壁上 8 个监测点；P_5，P_6 为蜗壳第四断面不同基圆半径处监测点；P_{11} 和 P_{12} 分别为隔舌两侧监测点；P_{13} 为蜗壳出口监测点.

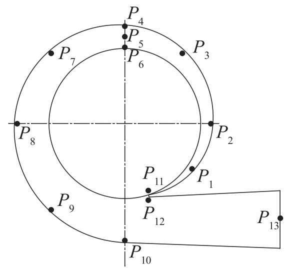

图 3　监测点分布示意图
Fig. 3　Monitoring points distribution

2　计算结果分析

2.1　含沙水流对蜗壳内压力脉动的影响

在泵输送清水介质流动特性分析的基础上，本研究仅对泵在设计流量(400 m³/h)，不同粒径和不同固相体积分数时泵内固液两相流动进行了全流道非定常数值计算. 固相密度为 $\rho = 2\ 650$ kg/m³，固相体积分数分别为 $\phi = 2\%$，7% 和 12%，粒径 d 分别为 0.050，0.076 和 0.100 mm.

由叶轮转速可计算泵的叶片通过频率(叶频) $f_n = 24.7 \times 6 = 148.2$ Hz. 考虑到开机时和低频回流对压力脉动的影响，本研究中所有计算数据均是在叶轮转到第 10 圈时提取的.

2.1.1　不同固相体积分数对压力脉动的影响

图 4 为在设计流量下不同固相体积分数时，蜗壳隔舌处监测点 P_{12} 与蜗壳第三断面处监测点 P_3 的压力脉动幅值频域图. 可以看出：各监测点的压力脉动随频率的变化呈现明显周期性特征，均具有较强的离散频谱特性；各监测点压力脉动幅值最大值均出现在 1 倍叶频处，并随着蜗壳过流断面面积增大，压力脉动逐渐减弱，在 4 倍叶频后脉动曲线较为平缓，脉动幅值均小于 0.004；在同一固相体积分数下，隔舌处点 P_{12} 压力脉动均比点 P_3 处压力脉动强烈，当 $\phi = 2\%$ 时两点的压力脉动幅值分别约为 0.005 和 0.008，$\phi = 7\%$ 时两点的脉动幅值分别约为 0.006 和 0.001，$\phi = 12\%$ 时两点的脉动幅值分别约为 0.009 和 0.002，且隔舌处压力脉动幅值最大，这说明叶轮与蜗壳间的动静干涉作用在隔舌处表现最为强烈，并随着固相体积分数增加各点压力脉动幅值也逐渐增大.

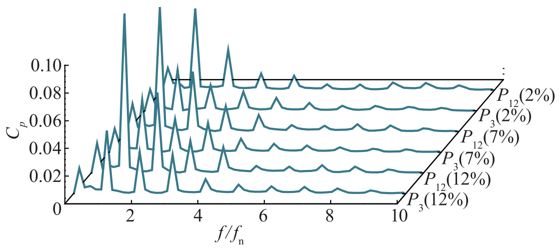

图 4　不同固相体积分数下压力脉动频域图
Fig. 4　Frequency spectra of pressure fluctuation at different solid volume fractions

2.1.2　不同粒径对压力脉动的影响

图 5 为在设计流量下不同固相粒径时，蜗壳隔舌处监测点 P_{12} 与蜗壳第三断面处监测点 P_3 压力脉动幅值频域图.

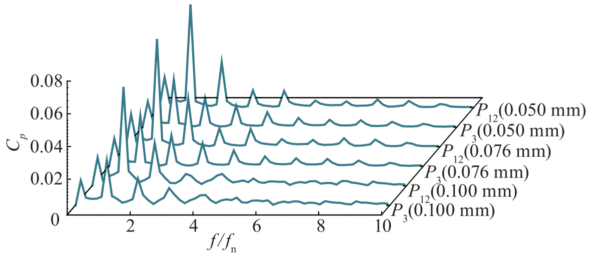

图 5　不同固相粒径下压力脉动频域图
Fig. 5　Frequency spectra of pressure fluctuation at different sand particle diameters

由图 5 可以看出:各监测点压力脉动最大频率峰值均出现在 1 倍叶频处,d = 0.050 mm 和 d = 0.076 mm 的脉动波形始终呈现明显的周期性特征;d = 0.100 mm 的脉动波形在 4 倍叶频后波形虽然较平缓,但波动较为紊乱,没有明显周期性特征;而且随着粒径增大,各监测点压力脉动幅值逐渐减小,这主要是因为当颗粒直径增大,其单个颗粒质量必然增大,从而导致固相在叶轮出口处的绝对速度和相对运动角减小,固相相对速度和圆周速度增大,从而减弱了叶轮出口处的回流,对蜗壳内压力脉动起到一定的抑制作用.

2.2 不同介质时计算结果对比

通过对不同固相体积分数和不同粒径时计算结果分析,选择设计流量、固相体积分数和粒径分别为 ϕ = 12% ,d = 0.050 mm 时,固液两相流场计算结果与清水介质时计算结算进行了对比分析.

2.2.1 蜗壳周向压力脉动变化规律

图 6 为设计流量时,泵在输送固液两相流与清水介质蜗壳周向监测点(压水室中截面最外侧内壁上的监测点)压力脉动时域图.

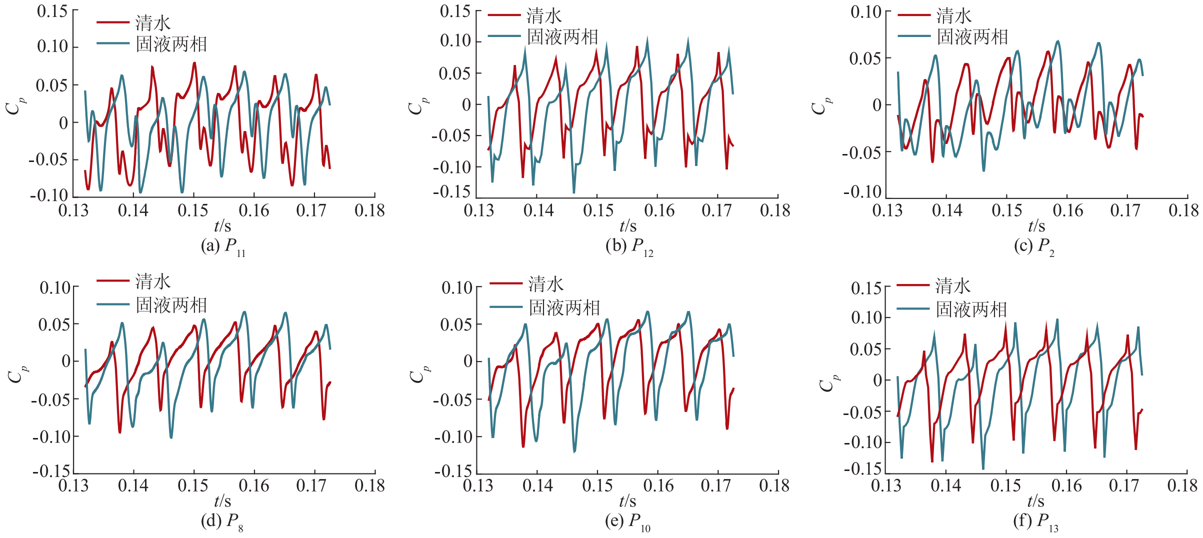

图 6 蜗壳周向监测点压力脉动时域图

Fig. 6 Pressure fluctuation time domain chart at monitoring points along volute circumference

由图 6 可以看出:固液两相流介质时蜗壳沿周向压力脉动具有与清水时一致的变化规律,均有 6 个波峰和 6 个波谷,与叶片数相同;除监测点 P_{11}(见图 6a)外,固液两相流介质时压力脉动幅值均大于清水介质时的压力脉动幅值;点 P_{11}的压力波动没有点 P_{12}的强烈,而且对于点 P_{11}的压力脉动幅值清水介质时反而高,出现这种现象的原因一方面是由于液流在冲击隔舌顶部时发生边界层分离和叶轮出口处形成的射流 - 尾流结构影响;另一方面由于固体颗粒的存在,在液流高速运动时隔舌处受到叶片挤压作用形成回流,使得压力脉动幅值最大处向隔舌下游偏移. 固液两相流时各监测点的压力脉动波形比清水介质时滞后 0.002 s,这主要是由于固液两相流动中,固相与液相之间存在速度差,会产生动量交换,而这种微团间的动量交换不是一瞬间完成的,表现为时间和空间的滞后.

将图 6 的压力脉动时域分析数据经快速傅里叶变换(FFT)得到各监测点的最大脉动幅值,如图 7 所示.

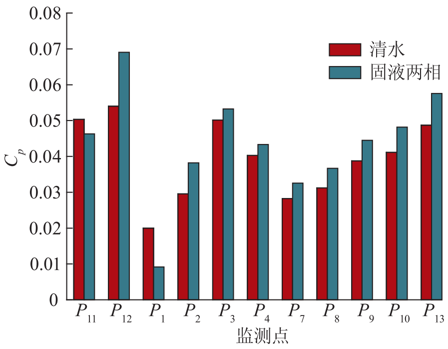

图 7 不同介质时蜗壳周向压力脉动幅值

Fig. 7 Pressure fluctuation amplitude along volute circumference under single- and two-phase flow conditions

由图 7 可以看出:2 种介质下蜗壳沿周向压力脉动变化情况大致相同,均是从隔舌沿着蜗壳周向到泵出口,压力脉动由大减小,在点 P_3 处又增大,之后幅值逐渐减小,在点 P_7 之后又有增大的趋势,且隔舌处点 P_{12} 的脉动幅值最大;除监测点 P_{11} 和 P_1 外,其他各监测点固液两相介质下的压力脉动幅值

均大于清水介质的压力脉动幅值，说明固体颗粒的存在加剧了蜗壳周向压力脉动；点 P_{11} 和 P_1 的压力脉动幅值在清水介质时反而比固液两相介质时的高，这主要是因为在点 P_{11} 和 P_1 处存在一个低压区，该处流道又比较狭窄，流速较大，易形成脱流，导致此处压力脉动增大，而在输送含沙水流时，固相在一定程度上抑制了脱流的发生.

2.2.2　蜗壳径向压力脉动变化规律

图 8 为在设计工况下，清水介质与固液流两相介质时蜗壳第四断面不同监测点处压力脉动时域图. 可以看出：在同一蜗壳断面不同半径处固液两相流和清水介质时各监测点压力脉动波形相似，固液两相流时脉动波形仍然会出现滞后现象，同时点 P_4 和 P_5 压力脉动幅值明显大于清水介质时压力脉动幅值，而点 P_6 则略小于输送清水介质时的脉动幅值；2 种介质时点 P_6 压力脉动最强烈，幅度也最大，点 P_4 压力脉动则相对减弱，各点压力脉动幅值由大到小依次为 P_6，P_5，P_4；蜗壳壁面及中部的点 P_4 和 P_5 处，固液两相流介质时压力脉动明显大于清水介质，而在点 P_6 处压力脉动变化却相反，即固液两相介质对蜗壳基圆处（叶轮出口附近）的压力脉动也有抑制作用.

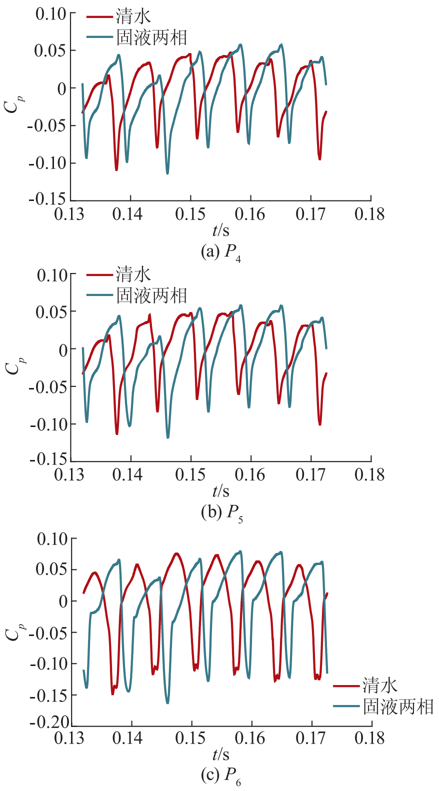

图 8　蜗壳径向监测点压力脉动时域图

Fig. 8　Pressure fluctuation time domain chart at monitoring points along radial direction in volute

将图 8 的压力脉动时域分析经 FFT 变换可得各监测点的最大压力脉动幅值，如图 9 所示.

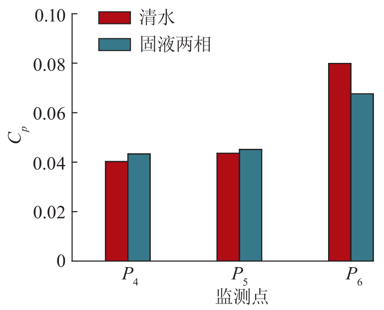

图 9　不同介质时蜗壳径向压力脉动幅值

Fig. 9　Pressure fluctuations amplitude along radial direction in volute under single- and two-phase flow conditions

由图 9 可以看出：2 种介质下蜗壳基圆监测点 P_6 处的压力脉动幅值均大于蜗壳中部监测点 P_5 和内壁面监测点 P_4 的压力脉动幅值；点 P_4 和 P_5 处，固液两相流介质时压力脉动幅值均大于清水介质，而监测点 P_6 则小于清水介质，这主要是由于固相的存在改变了叶轮出口处流动的绝对速度和相对运动角，从而减弱叶轮出口处的回流和旋涡，减小压力脉动的幅度所致.

3　结　论

1）单级双吸离心泵在输送清水和固液两相流介质时，蜗壳内各监测点压力脉动变化趋势基本相同，蜗壳内部压力脉动主频均为叶片通过频率，且在 1 倍叶频处脉动幅值最大.

2）当固相粒径一定时，随着固相体积分数增加，蜗壳内各监测点压力脉动幅度有增大趋势，但当固相体积分数一定时，固相粒径增大压力脉动幅值却有减小趋势.

3）固液两相介质时蜗壳各监测点上压力脉动波形比清水介质时波形出现明显滞后现象.

4）在输送固液两相流介质时蜗壳内壁从第二截面至蜗壳出口处监测点压力脉动幅度均大于清水介质，但在隔舌和隔舌附近第一截面处却相反. 固相颗粒的存在对蜗壳基圆处（叶轮出口附近）的压力脉动有抑制和减小作用.

参考文献（References）

[1]　朱荣生，苏保稳，杨爱玲，等. 离心泵压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报，2010，41(11)：43－47.

Zhu Rongsheng, Su Baowen, Yang Ailing, et al. Numerical investigation of unsteady pressure fluctuations in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11):43－47. (in Chinese)

[2] 袁建平,付燕霞,刘阳,等.基于大涡模拟的离心泵蜗壳内压力脉动特性分析[J].排灌机械工程学报, 2010, 28(4):310－314.
Yuan Jianping, Fu Yanxia, Liu Yang, et al. Numerical investigation of unsteady pressure fluctuations in volute based on large eddy simulation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4): 310－314. (in Chinese)

[3] 丛国辉,王福军. 双吸离心泵隔舌区压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2008,39(6):60－67.
Cong Guohui, Wang Fujun. Numerical investigation of unsteady pressure fluctuations near volute tongue in a double-suction centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):60－67. (in Chinese)

[4] 姚志峰,王福军,肖若富,等. 双吸离心泵吸水室和压水室压力脉动特性试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(4): 473－479.
Yao Zhifeng, Wang Fujun, Xiao Ruofu, et al. Experimental investigation on pressure fluctuations of the suction chamber and volute in a double-suction centrifugal pump[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4):473－479. (in Chinese)

[5] 司乔瑞,袁寿其,袁建平,等.叶片与隔舌干涉对离心泵性能和压力脉动影响的数值研究[J].流体机械, 2012,40(8):22－26.
Si Qiaorui, Yuan Shouqi, Yuan Jianping, et al. Effect of interaction between blade and volute tongue of centrifugal pumps on the performance and pressure pulsation [J]. Fluid Machinery, 2012,40(8):22－26. (in Chinese)

[6] 程效锐,李仁年,黎义斌,等. 螺旋离心泵瞬态特性的数值分析[J]. 机械工程学报,2013,49(8),186－192.
Cheng Xiaorui, Li Rennian, Li Yibin, et al. Numerical analysis on transient regime of a screw-type centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (8): 186－192. (in Chinese)

[7] 刘厚林,杜辉,董亮,等.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)

[8] Stefan B, Sebastian H, Karin K, et al. Experimental and numerical analysis of pressure fluctuations and mechanical deformations in a centrifugal pump impeller [C]//Proceedings of the ASME－JSME－KSME Conference, 2011:24－29.

[9] Solis M, Khelladi S, Bakir F. A new-high precision solver to predict pressure fluctuations in centrifugal pumps [C]//Proceedings of the ASME－JSME－KSME Conference, 2011:1－13.

[10] Atia E K, Amro M A, Rached B M. Study of pressure fluctuations and induced vibration at blade-passing frequencies of a double volute pump[J]. Mechanical Engineering, 2011, 36:1333－1345.

[11] 刘玮炜,石辉.黄河中游高含沙水流泥沙粒径特征研究[J]. 人民黄河,2006, 28(7):17－18.
Liu Weiwei, Shi Hui. The study of characteristics for the particle diameter in the middle Yellow River[J]. Yellow River, 2006,28(7):17－18. (in Chinese)

[12] 马薇. 螺旋离心泵内固液两相非定常流动的数值计算与分析[D]. 兰州:兰州理工大学能源与动力工程学院, 2012.

[13] Barrio R, Parrondo J, Blanco E. Numerical analysis of the unsteady flow in the near-tongue region in a volute-type centrifugal pump for different operating points [J]. Computers & Fluids, 2010, 39(5):859－870.

[14] Jafarzadeh B, Hajari A, Alishahi M M, et al. The flow simulation of a low-specific-speed high-speed centrifugal pump [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(1):242－249.

[15] 张玉良,李轶,崔宝玲,等.两相流离心泵水力输送性能计算分析[J].机械工程学报,2012,48(14):169－176.
Zhang Yuliang, Li Yi, Cui Baoling, et al. Computational analysis of hydraulic transmission performance in two-phase flow centrifugal pump [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012,48(14):169－176. (in Chinese)

[16] 温正,石良辰,任毅如,等. FLUENT 流体计算应用教程[M].北京:清华大学出版社,2009.

(责任编辑 陈建华)