

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0122

气液两相条件下离心泵内部流态及  
受力分析李贵东<sup>1</sup>, 王洋<sup>1</sup>, 郑意<sup>2</sup>, 马小虎<sup>3</sup>, 梁龙一<sup>3</sup>, 胡日新<sup>1</sup>

(1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司, 甘肃 兰州 730070; 3. 大连大耐泵业有限公司, 辽宁 大连 116620)



李贵东

**摘要:** 为研究离心泵在气液两相条件下叶轮内部流态及受力情况,选取一比转数  $n_s = 129$  的离心泵为研究对象,基于 CFX 软件提供的 Eulerian - Eulerian 非均相流模型对泵内部流场进行三维瞬态数值模拟,得到不同初始气相体积分数下叶轮流道内气相体积分数分布及叶片载荷等物理量变化规律,并将数值模拟结果与试验结果进行对比验证. 结果表明:叶轮内气体主要集中分布在叶片吸力面区域,出口处则集中分布在流道中间区域,叶轮前盖板区域气相体积分数大于后盖板区域;当初始气相体积分数逐渐增大时,叶轮流道内流动紊乱,气液两相流动的不均匀性加剧,旋涡区域增大;随着初始气相体积分数的增大,叶片进口到靠近出口位置,叶片压力面所受压力载荷相对于吸力面减小得更快,而在出口位置附近叶片吸力面压力载荷减小得更快,叶轮径向力的不平衡性加剧,叶轮所受转矩减小. 数值计算结果与试验结果在趋势上趋于一致.

**关键词:** 离心泵;气液两相流;瞬态数值模拟;流态分析

**中图分类号:** S277.9; TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2016)05-0369-06

李贵东, 王洋, 郑意, 等. 气液两相条件下离心泵内部流态及受力分析[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(5): 369-374.

LI Guidong, WANG Yang, ZHENG Yi, et al. Unsteady internal flow and thrust analysis of centrifugal pump under gas-liquid two-phase flow conditions[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2016, 34(5): 369-374. (in Chinese)

Unsteady internal flow and thrust analysis of centrifugal pump  
under gas-liquid two-phase flow conditionsLI Guidong<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>, ZHENG Yi<sup>2</sup>, MA Xiaohu<sup>3</sup>, LIANG Longyi<sup>3</sup>, HU Rixin<sup>1</sup>

(1. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. LANPEC Technologies Co. Ltd., Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Dalian Danai Pumps Co. Ltd., Dalian, Liaoning 116620, China)

**Abstract:** In order to study internal flow patterns and thrust on an impeller under gas-liquid two-phase flow conditions, a centrifugal pump with a specific speed of 129 is selected, and the unsteady three-dimensional flow in the pump is simulated by applying the Eulerian - Eulerian inhomogeneous multiphase flow model based on ANSYS CFX software. The variations of a few fluid flow variables such as pressure loading on blades, and gas volume fraction distribution are obtained under different gas volume fractions admitted at the pump inlet, the predicted head and efficiency are compared with the measured data. The results show that the gas phase is mainly accumulated on the blade suction surface and in the middle part of flow passage at the impeller outlet, further the gas volume fraction on the shroud are higher than that on the hub. With the increasing gas volume fraction at the pump inlet the flow distur-

收稿日期: 2015-05-28; 网络出版时间: 2016-05-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20160523.1314.004.html>

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程项目; 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX15\_1064)

作者简介: 李贵东(1988—),男,河南南阳人,博士研究生(liguidong1201@163.com),主要从事流体机械内部流动机理研究.

王洋(1955—),男,河北定州人,研究员,博士生导师(通信作者,pgwy@ujs.edu.cn),主要从事流体机械及工程研究.

tion in the impeller passages becomes severe, hence the flow inhomogeneity between the gas phase and the liquid phase is intensified, and the vortex area is enlarged. From the inlet to the outlet of impeller, the pressure loading on the blade pressure surface reduces faster than that on the blade suction surface, but the loading on the suction surface declines quicker near the impeller outlet. The imbalance of the radial thrust on the impeller gets worse, and the torque acted on it decreases.

**Key words:** centrifugal pump; gas-liquid two-phase flow; transient numerical simulation; flow status analysis

泵是一种通用机械,在人们的日常生活和工业生产中,凡是有液体流动的地方,基本上都有泵在工作<sup>[1-3]</sup>. 离心泵广泛应用于农业工程、市政工程、海洋工程、石化及能源工程等领域<sup>[4-6]</sup>,在工程实践中,常遇到泵输送含有气液两相混合物的介质,或在启动时可能会因为真空度不足或正常运行时进口管道发生漏气等状况,导致泵内介质产生气液混输现象等问题<sup>[7-8]</sup>. 因此,近年来泵的气液两相流动研究受到人们的重视.

目前,国内外学者对于离心泵内部气液两相流动做了大量的研究<sup>[9-12]</sup>. 卢金铃等<sup>[13]</sup>采用欧拉模型对离心泵进行气液两相流动分析,探讨了进口含气率对叶轮内部流态及泵外特性的影响规律. 潘兵辉等<sup>[14]</sup>研究了离心泵在不同气相浓度、不同气相颗粒直径下,气液两相流对泵扬程和效率的影响. 付强等<sup>[8]</sup>运用 CFX 软件对离心泵叶轮流道内的气液混输过渡过程进行数值计算,研究了离心泵进口管路因漏气而出现气液混输瞬态过渡过程的水力特性. 余志毅等<sup>[15-16]</sup>对叶片式混输泵叶轮内气液两相流动进行了数值模拟,通过分析流场含气率及两相速度矢量分布,探讨了该型泵内气液两相非定常流动特性. 朱荣生等<sup>[17]</sup>采用不同导叶出口安放角,研究了气液两相对核主泵内部压力脉动及含气率脉动的影响.

文中在总结以往研究成果的基础上,对离心泵在气液两相条件下叶轮内部流态及受力情况进行研究,通过选用欧拉非均相流模型对离心泵进行气液两相数值计算,分析叶轮流道内气相体积及过流部件内液相速度流线的分布情况,得到在不同气相体积分数下,叶轮叶片载荷分布及叶轮所受扭矩的变化情况,为离心泵在气液两相条件下的内部流动规律及受力情况提供理论参考.

## 1 计算模型与计算方法

### 1.1 几何建模与网格划分

选取一比转数  $n_s = 129$  的离心泵作研究对象,

其水力模型主要包括进水管路、叶轮、蜗壳和出水管路 4 个部分. 泵主要的性能参数分别为设计流量  $Q_d = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ , 扬程  $H_d = 20.54 \text{ m}$ , 转速  $n = 2900 \text{ r}/\text{min}$ . 基于 Pro/E 三维造型软件分别对离心泵的叶轮、蜗壳和进出口过流部件进行三维建模. 为使流动能得到充分的发展,对进口和出口管路进行适当延伸,以增加计算的准确性<sup>[18-19]</sup>. 采用 ICEM 软件对计算域进行六面体结构化网格划分,经网格无关性检查,质量符合要求,计算模型约 1 200 000 个网格单元,计算域网格装配图如图 1 所示.

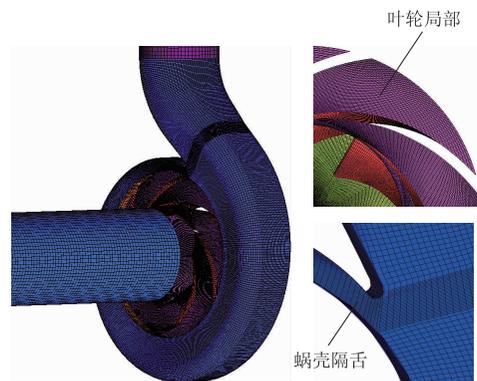


图 1 计算域网格及局部网格

Fig. 1 Mesh in computational domain and its close-up

### 1.2 计算方法

基于 CFX 软件,选用 Eulerian - Eulerian 非均相流模型,控制方程对液相湍流模型选用 RNG  $k - \varepsilon$  双方程模型,气相选用零方程模型,并作如下假设: ① 泵内部液相为非稳态、不可压缩连续相,气相为不可压缩离散相;② 气相为直径均匀的球形;③ 忽略相间的质量传输与热量传输;④ 进口气相体积分数为常数.

泵进口边界条件设定为压力进口条件,且在进口处通入一定量的气相,初始气相体积分数  $\alpha_0$  分别设置为 0, 5%, 10%, 15%, 20% 和 25%. 出口给定为出口质量流量,通过出口边界条件控制模型的质量流量. 采用有限体积法对控制方程进行二阶精度的空间离散,时间离散采用二阶全隐格式. 将定常数

值计算结果作为初始条件进行瞬态计算分析. 对于泵内旋转叶轮和定子部件之间的交界面, 引入 Transient rotor-stator 技术对交界面进行处理. 叶轮、蜗壳和进出口管路的壁面采用绝热无滑移边界条件, 对于近壁区采用标准壁面函数法修正湍流模型. 瞬态计算时采用定常 RANS 计算结果作为初始条件, 以叶轮旋转  $3^\circ$  为 1 个时间步长, 每个旋转周期包含 120 个时间步, 每个时间步长取  $0.169 \text{ ms}$ , 总时间设为  $0.2069 \text{ s}$ <sup>[20]</sup>.

为研究不同气相体积分数下叶轮流道内流态的变化情况, 在 2 个叶片间流道内设置 5 个监测面, 如图 2 所示.



图2 监测面设置

Fig. 2 Location of monitoring planes

### 1.3 数值计算与试验分析

为进一步研究气液两相条件下离心泵内部流动数值计算结果的准确性, 对该泵在不同工况 ( $0.4Q_d \sim 1.4Q_d$ ) 下瞬态数值计算获取扬程的平均值与试验值进行对比, 如图 3 所示. 从图中可以看出, 在设计工况下计算结果与试验结果扬程误差小于  $1.05\%$ , 效率误差小于  $6.59\%$ , 计算效率略高于试验效率, 预测结果与试验结果在趋势上一致. 数值模拟结果与试验结果产生误差的原因可能是由于在数值模拟过程中忽略了叶轮口环间隙的泄漏损失, 叶轮前后盖板的摩擦损失以及轴承、摩擦副等引起的机械损失等. 结果显示数值模拟可以比较准确地预测泵的外特性, 表明非定常计算结果是可信的.

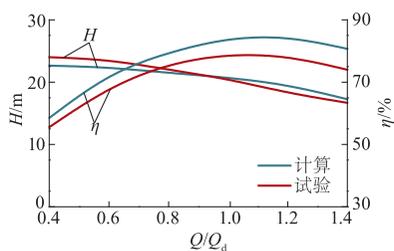


图3 外特性对比

Fig. 3 Comparison of performance curves

## 2 计算结果与分析

### 2.1 流道内气相体积分布

图 4 为设计工况下不同初始气相体积分数时, 叶轮流道不同截面处气相体积分数分布情况, 可以看出: 沿着流道从叶轮进口向出口方向, 气相体积分数先增大后减小, 并在截面 4 附近达到最大值; 在截面 1, 2, 3, 4 中, 靠近叶轮吸力面区域的气相体积分数明显大于叶轮压力面附近的气相体积分数, 而截面 5 中气相体积分数主要分布在叶轮流道的中间区域; 随着气相体积分数的增大, 叶轮流道中液相被气相排挤的程度增加, 流道堵塞逐渐严重, 这将使叶轮与液相的能量交换能力减弱, 导致泵性能的下降; 相比于叶轮流道后盖板区域, 前盖板区域具有较大的气相体积分数, 这可能是由于叶轮前后盖板曲率不同, 叶轮旋转时气液两相流所受的离心力作用不同所致.

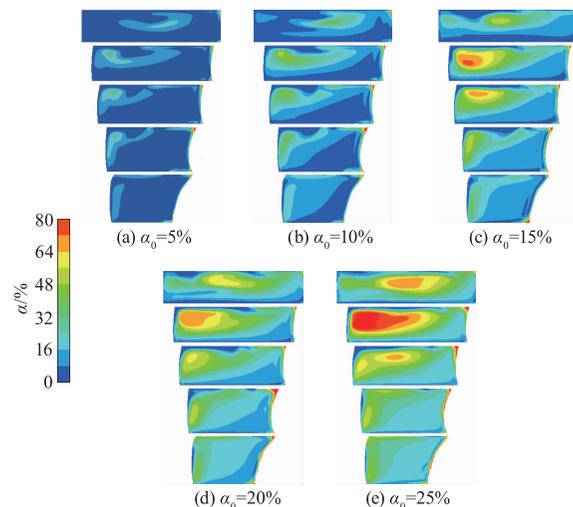


图4 叶轮流道内不同截面处气相体积分布

Fig. 4 Gas volume fraction contours in different cross-sections in impeller

### 2.2 液相速度流线分布

图 5 为设计工况下不同初始气相体积分数时, 过水流道液相流线的速度分布情况, 可以看出: 随着初始气相体积分数的增大, 叶轮流道内及蜗壳出口曲率较大区域液相流线有较明显的变化; 在初始气相体积分数  $\alpha_0 = 0$  时, 叶轮流道内流线的稠密度分布相对较为均匀, 叶片吸力面速度相对压力面速度较大, 叶轮出口区域速度相对通入气相时较大; 当通入的液体中含有气相时, 液相在叶片吸力面处速度小于压力面处速度, 并在叶轮流道吸力面中间

靠后区域,液流形成了局部旋涡,流道内的流动紊乱;随着初始气相体积分数的增大,叶轮各流道中流线的稠密度分布不均匀性增大,叶轮内气液两相的流动加剧,旋涡区变得明显且增大;在截面4附近,气相具有较大的体积分数,说明气体会聚集在旋涡区域,文献[16]中也有类似现象与说明。

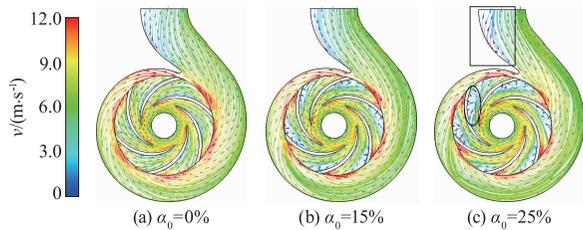


图5 液相速度流线

Fig. 5 Liquid velocity vector plots in mid-span plane

### 2.3 叶片载荷分布

图6为不同初始气相体积分数时,叶片压力面与吸力面压力载荷差值随中间流线相对位置  $span$  (叶片进口到叶片出口的位置,  $0 \sim 1.000$ ) 的变化曲线,可以看出:不同初始气相体积分数时,叶片压力载荷差值的变化规律基本相同,变化规律较为复杂;压力载荷的差值随着流线相对位置的变化先增大,在流线相对位置  $0.017$  处达到最大值后减小,在  $0.060$  位置附近又开始逐渐增大,在  $0.550$  位置处达到第二个峰值后再单调递减到最小值;随着初始气相体积分数的增大,叶片压力载荷的差值在点  $P$  (流线相对位置  $0.900$  附近) 左侧区域逐渐减小,而在点  $P$  右侧逐渐增大,即在流线相对位置  $0 \sim 0.900$  处,叶片压力面所受的压力载荷相对于吸力面减小得更快,而在流线相对位置  $0.900 \sim 1.000$  处区域则相反,叶片吸力面压力载荷减小得更快;直线  $y = 0$  将曲线分为正负两部分,大于  $0$  表明叶片压力面压力载荷大于吸力面,小于  $0$  时则相反。

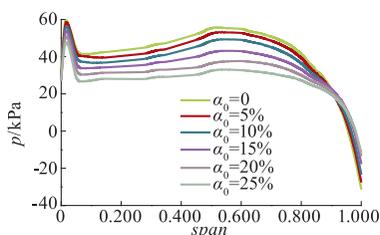


图6 不同气相体积分数时叶片压、吸力面压力载荷差值

Fig. 6 Differential pressure loading across blade pressure and suction surfaces at different gas fractions

### 2.4 叶轮径向力

图7为不同初始气相体积分数时,作用在叶轮

上的径向力矢量分布,可以看出:随着泵进口通入气相体积分数的变化,叶轮所受径向力大小和方向都发生变化;当介质中只有液体时,径向力最大;随着初始气相体积分数的增大,径向力逐渐减小;当  $\alpha_0 = 0, 5\%$  时,径向力的极大值数与叶片数相等,且波动幅值图形相对于坐标原点近似于中心对称,这种现象的产生是随着叶轮与隔舌的相互作用而随时间变化的,叶轮所受径向力较为平衡;当  $\alpha_0 = 15\%$  时,波动幅值图形向坐标系下方偏移,即叶轮在第三、第四象限所承受的径向力大于在第一、第二象限的径向力,但波动幅值仍具有一定的规律性;当  $\alpha_0 = 25\%$  时,叶轮产生不平衡的径向力,且全部处于第三象限内,原因可能是液流形成的局部旋涡受蜗壳隔舌的影响在叶轮流道中分布不均匀。

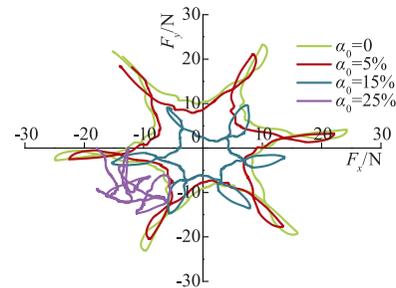


图7 不同气相体积分数时径向力矢量分布

Fig. 7 Vector diagram of radial thrust on impeller at different gas fractions

综上所述,当离心泵进口通入的气相体积分数达到一定程度时,气泡使得叶轮内部稳态流动的对称性受到破坏,造成各流道内液流分布不均匀,从而引起周期性的不平衡径向力,泵的运行稳定性受到破坏,这将会影响机组的正常运行。

### 2.5 叶轮转矩变化

为了研究叶轮所受转矩在不同初始气相体积分数下的变化情况,选用平均转矩系数  $\delta$  与转矩波动系数  $\varepsilon$  分别表征转矩的变化规律<sup>[21]</sup>,即

$$\delta = \bar{T} / (0.25\rho u_2^2 \pi D_2^2 b_2), \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (T_i - \bar{T})^2}}{0.25\rho u_2^2 \pi D_2^2 b_2}, \quad (2)$$

式中:  $\bar{T}$  为叶轮旋转 1 个周期所受到的平均转矩,  $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} T_i$ ;  $T_i$  为叶轮旋转 1 个周期所受到的瞬时转矩;  $u_2$  为叶轮圆周速度;  $D_2$  为叶轮直径;  $b_2$  为叶轮出口宽度;  $N$  为叶轮旋转 1 个周期时的样本点。

图8为不同初始气相体积分数时叶轮转矩的变

化情况,可以看出:平均转矩系数与转矩波动系数随初始气相体积分数的增大而单调递减;当初始气相体积分数  $\alpha_0$  从 0 增大到 25.00% 时,平均转矩系数和转矩波动系数分别下降 34.20% 和 57.14%,这是因为叶轮流道内液相被气相排挤的程度增大,液相体积分数减小,叶片承受的压力载荷减小且叶轮的做功能力减弱,所受转矩降低。

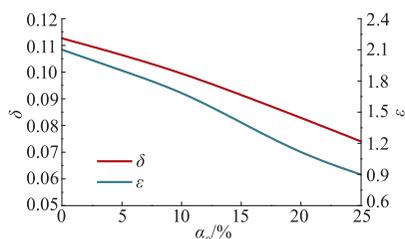


图8 不同气相体积分数时叶轮转矩变化  
Fig.8 Variation curves of torque on impeller at different gas fractions

### 3 结 论

1) 叶轮内气相主要集中在叶片吸力面区域及出口流道中间区域,叶轮前盖板区域气相体积分数大于后盖板区域.随着初始气相体积分数的增大,叶轮中液相被气相排挤的程度增强,流道堵塞严重.

2) 随着初始气相体积分数的增大,叶轮流道内的流动紊乱,气液两相流动的不均匀性加剧,旋涡区域增大.

3) 随着初始气相体积分数的增大,叶片进口到靠近出口位置,叶片压力面所受压力载荷相对于吸力面减小得更快,而在出口位置附近叶片吸力面压力载荷减小得更快.

4) 初始气相体积分数较小时,叶轮所受径向力较为平衡,当体积分数逐渐增大时,叶轮产生不平衡的径向力且叶轮所受转矩降低.

#### 参考文献 (References)

[1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.

[2] 张华,施卫东,陈斌,等. 轴流泵内部流场的二维粒子成像测速试验[J]. 农业工程学报,2013,29(23):93-98.

ZHANG Hua, SHI Weidong, CHEN Bin, et al. 2D - particle image velocimetry measurement for internal flow field of axial flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 93 - 98. (in Chinese)

[3] 司乔瑞,余志顺,袁寿其,等. 带诱导轮高速离心泵流动诱导振动数值分析[J]. 振动与冲击,2013,20(32):102-106.

SI Qiaorui, YU Zhishun, YUAN Shouqi, et al. Numerical analysis for flow-induced vibration of a high speed centrifugal pump with inducer[J]. Journal of vibration and shock, 2013, 20(32): 102 - 106. (in Chinese)

[4] 丛小青,杨明,陆伟刚,等. 深井离心泵叶轮出口边斜度对水力性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(3):214-219.

CONG Xiaoqing, YANG Ming, LU Weigang, et al. Effect of impeller outlet edge inclination on performance of deep well centrifugal pump[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2014, 32(3): 214 - 219. (in Chinese)

[5] JOHANN F G. Centrifugal Pumps [M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[6] SHOJAEFARD M H, TAHANI M, EHGAGHI M B, et al. Numerical study of the effects of some geometric characteristics of a centrifugal pump impeller that pumps a viscous fluid [J]. Computers & fluids, 2012, 60: 61 - 70.

[7] 胡四兵,柴立平,何玉杰,等. 离心式气液两相流泵的试验研究[J]. 流体机械,2002,30(2):4-6.

HU Sibing, CHAI Liping, HE Yujie, et al. Experimental research on the centrifugal pump transferring gas-liquid two phases flow [J]. Fluid machinery, 2002, 30(2): 4 - 6. (in Chinese)

[8] 付强,袁寿其,朱荣生,等. 离心泵气液混输瞬态过渡过程水力特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2012,33(11):1428-1434.

FU Qiang, YUAN Shouqi, ZHU Rongsheng, et al. Hydraulic characteristics of transient transition process of gas-liquid mixed flow in a centrifugal pump[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(11): 1428 - 1434. (in Chinese)

[9] TREMANTE A, MORENO N, REY R, et al. Numerical turbulent simulation of the two-phase flow (liquid/gas) through a cascade of an axial pump[J]. Journal of fluids engineering, 2002, 124(2): 371 - 376.

[10] POULLIKKAS A. Effects of two-phase liquid-gas flow on the performance of nuclear reactor cooling pumps [J]. Nuclear energy, 2003, 42(1): 3 - 10.

[11] JOSE C, MIGUEL A, FRANK K, et al. Characterization of a centrifugal pump impeller under two-phase flow conditions[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2008, 63: 18 - 22.

[12] YU Z Y, WANG G Y, CAO S L. Extended two-fluid

- model applied to analysis of bubbly flow in multiphase rotodynamic pump impeller[J]. *Frontiers of mechanical engineering in China*,2009,4(1):53-59.
- [13] 卢金铃,席光,祁大同. 离心泵叶轮内气液两相三维流动数值研究[J]. *工程热物理学报*,2003,24(2):237-240.
- LU Jinling, XI Guang, QI Datong. Numerical study on the gas-liquid two-phase 3-D flow in the impeller of a centrifugal pump[J]. *Journal of engineering thermophysics*,2003,24(2):237-240. (in Chinese)
- [14] 潘兵辉,王万荣,江伟. 基于CFD的离心泵小流量工况下扬程预测分析[J]. *石油化工应用*,2011,30(12):101-104.
- PAN Binghui, WANG Wanrong, JIANG Wei. Gas-liquid two-phase flow numerical simulation of centrifugal pump[J]. *Petrochemical industry application*,2011,30(12):101-104. (in Chinese)
- [15] 余志毅,曹树良,王国玉. 叶片式混输泵内气液两相流的数值计算[J]. *工程热物理学报*,2007,28(1):46-48.
- YU Zhiyi, CAO Shuliang, WANG Guoyu. CFD analysis of the air-water bubbly flow in a multiphase rotodynamic pump impeller[J]. *Journal of engineering thermophysics*,2007,28(1):46-48. (in Chinese)
- [16] 余志毅,刘影. 叶片式混输泵气液两相非定常流动特性分析[J]. *农业机械学报*,2013,44(5):66-69.
- YU Zhiyi, LIU Ying. Characteristic analysis of unsteady gas-liquid two-phase flow in a multiphase rotodynamic pump[J]. *Transactions of the CSAM*,2013,44(5):66-69. (in Chinese)
- [17] 朱荣生,习毅,袁寿其,等. 气液两相条件下核主泵导叶出口边安放位置[J]. *排灌机械工程学报*,2013,31(6):484-489.
- ZHU Rongsheng, XI Yi, YUAN Shouqi, et al. Position of guide vane trailing edge of nuclear reactor coolant pump under gas-liquid two phase condition[J]. *Journal of drainage and irrigation machinery engineering*,2013,31(6):484-489. (in Chinese)
- [18] 王洋,吕忠斌,曹璞钰,等. 双吸泵吸入室挡板的数值模拟和正交试验[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*,2014,35(5):525-530.
- WANG Yang, LYU Zhongbin, CAO Puyu, et al. Numerical simulation and orthogonal test of baffle in suction chamber of double suction pump[J]. *Journal of Jiangsu University(natural science edition)*,2014,35(5):525-530. (in Chinese)
- [19] 刘瑞华,李贵东,王洋. 气液两相下离心泵内部流动数值模拟[J]. *排灌机械工程学报*,2015,33(8):661-666.
- LIU Ruihua, LI Guidong, WANG Yang. Internal flow numerical simulation of centrifugal pump under gas-liquid two-phase flow[J]. *Journal of drainage and irrigation machinery engineering*,2015,33(8):661-666. (in Chinese)
- [20] SHI F, TSUKAMOTO H. Numerical study of pressure fluctuations caused by impeller-diffuser interaction in a diffuser pump stage[J]. *Journal of fluids engineering*,2001,123(3):466-474.
- [21] BARRIO R, BILANCO 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]. *Journal of fluids engineering*,2008,130(11):1111021.

(责任编辑 陈建华)