



导叶开度对水泵水轮机调相运行水环流动的影响



刘殿海

刘殿海¹, 祝宝山², 陈帅³, 陈振木^{4*}, 张飞¹

(1. 国网新源控股有限公司抽水蓄能技术经济研究院, 北京 100761; 2. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084; 3. 重庆蟠龙抽水蓄能电站有限公司, 重庆 401420; 4. 温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 水泵水轮机运行在泵工况压水启动过程或压水调相工况时, 需要在转轮腔体内注入空气以降低转轮的启动功率. 为了避免转轮室内的压缩空气泄漏到蜗壳, 需要在无叶区内形成一定厚度的水环进行密封, 以减少压水时的用气量. 为了研究导叶开度对水泵水轮机水环内部流动特性的影响规律, 利用 ANSYS CFX 软件对 3 种不同导叶开度 (全关闭、1% 最优导叶开度、2% 最优导叶开度) 的水泵水轮机模型进行非定常两相流动数值计算分析. 研究表明: 水环的厚度随导叶的关闭而增大, 从而增大了转轮的阻力, 加大了轴功率的消耗; 无叶区内的压力脉动特征频率为叶频及其倍频, 呈现出明显的动静干涉现象. 研究结果可为水泵水轮机在泵工况压水启动过程或压水调相工况下的水环控制提供一定的依据.

关键词: 水泵水轮机; 泵工况启动; 导叶开度; 调相运行; 水环流动

中图分类号: S277.9; TK734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2022)10-0981-06

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.21.0062

刘殿海, 祝宝山, 陈帅, 等. 导叶开度对水泵水轮机调相运行水环流动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(10): 981-986.

LIU Dianhai, ZHU Baoshan, CHEN Shuai, et al. Influence of guide vane opening on water-ring flow characteristics of pump-turbine in synchronous condenser mode[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2022, 40(10): 981-986. (in Chinese)

Influence of guide vane opening on water-ring flow characteristics of pump-turbine in synchronous condenser mode

LIU Dianhai¹, ZHU Baoshan², CHEN Shuai³, CHEN Zhenmu^{4*}, ZHANG Fei¹

(1. Pumped-storage Technological and Economic Research Institute, State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100761, China; 2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Chongqing Panlong Pumped Storage Co., Ltd., Chongqing 401420, China; 4. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

Abstract: It is necessary to inject air into the runner passage to reduce the starting power, when pump-turbine operates under the starting process in pump mode or synchronous condenser mode. In order to prevent the compressed air in the runner passage from leaking into the casing, it is necessary to form a certain thickness of water-ring in the vaneless space for sealing to reduce the air consumption. In order to investigate the water-ring characteristics of pump-turbine in synchronous condenser mode by different guide vane openings, the ANSYS CFX software was employed to conduct the unsteady state

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-04-25; 网络出版时间: 2022-10-09

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20221008.1152.020.html>

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LQ21E090001); 国家自然科学基金资助项目(51679122); 浙江省教育厅科研项目(Y202044675); 国家电网公司科技项目(52573020000B)

第一作者简介: 刘殿海(1970—), 男, 山东德州人, 教授级高级工程师, 博士(1103993891@qq.com), 主要从事抽水蓄能建设与管理研究.

通信作者简介: 陈振木(1988—), 男, 浙江温州人, 博士(chenzhenmu@163.com), 主要从事流体机械流动理论研究.

analysis with two-phase flow. The pump-turbine model was adopted to investigate the internal flow characteristics on the water-ring with three guide vane openings (full closed, 1% GVO and 2% GVO). The result shows that the thickness of the water-ring increases with decrease of guide vane opening, which results in increasing the resistance of the runner and the consumption of the shaft power. At the same time, the dominate frequency of pressure fluctuation in the vaneless space is the blade pass frequency and harmonics, which represents the phenomenon of rotor-stator interaction obviously. The research results can provide a reference for controlling water-ring of pump-turbine in the process of synchronous condenser mode and pump start-up mode.

Key words: pump-turbine; pump start-up; guide vane opening; synchronous condenser mode; water-ring flow

抽水蓄能电站因其启动速度快、容量大、运行灵活等特点,被认为是解决能源平衡问题的理想方案^[1].在中国,大规模的抽水蓄能电站工程建设显著提高了该领域的设计、施工、运维等技术水平.然而,抽水蓄能事业快速发展的同时也带来了一些新的问题.

调相运行是抽水蓄能机组工况转换过程中的一个重要组成部分.影响机组调相运行稳定性的因素较多,包括水力、机械和电气等,其中水力因素中水环是抽水蓄能机组所特有的现象,对调相工况机组的稳定运行起着决定性作用.水泵水轮机在抽水调相工况启动时,电站进水阀、进水旁通管、机组导叶均关闭,并在转轮腔体内注入压缩空气,以降低转轮启动所需要的功率.同时迷宫环处通冷却水进行冷却,冷却水泄漏至转轮室后被甩至转轮与活动导叶之间,在转轮与导叶之间的无叶区形成水环.过厚的水环经导叶间隙排至蜗壳,通过均压管最终排到尾水管,从而使水环达到动态平衡^[2].在导叶出口与水轮机转轮进口之间形成有一定厚度的密封水环,不但可以减少压水时的用气量,而且可以用于冷却转轮.但是过厚的水环给机组转轮造成很大的阻力,使机组输入的功率增大,从而对变频器提出更大的容量要求,因此确定水环功率对变频器的容量选择至关重要.同时,过厚的水环会被转轮撞击以及回抛,产生剧烈的压力脉动,造成机组和厂房结构振动^[3-4].因此有必要对水环现象的内部流动进行深入研究.

水泵水轮机在水泵工况启动过程中或在压水调相运行工况时所形成的水环与液环真空泵内部所形成的水环类似,其主要对机组起到密封和冷却的作用^[5-8].国内外对水环的研究主要集中于水环真空泵内部特性^[9-13],而对水泵水轮机内水环现象的研究较少.VAGNONI等^[14-18]对水泵水轮机在压水调相运行时进行试验,监测压力和转矩等数据,

建立了尾水管内液面波动与密度修正弗劳德数之间的关系,研究结果表明,由无叶区与尾水管之间水环厚度增大是导致转轮阻力增大的主要原因.

文中应用非定常数值计算方法,针对3种不同导叶开度(全关闭、1%最优导叶开度、2%最优导叶开度)对水泵水轮机模型机的水环现象进行研究.

1 数值计算

1.1 计算模型及网格划分

原型水泵水轮机的设计性能参数分别为水头 $H=308$ m, 额定功率 $P=306.12$ MW, 额定转速 $n=333.3$ r/min, 比转数 $n_s=143$. 水轮机工况时进口直径为 4.565 m, 出口直径为 2.750 m.

对于水环流动特性的研究,文中采用水泵水轮机模型进行数值计算,模型计算域包括蜗壳(带有均压管)、导叶、冷却水注入环、转轮和尾水管,如图1所示.模型参数分别为水轮机工况转轮进口直径 $D_{1m}=0.450$ m, 水轮机工况转轮出口直径 $D_{2m}=0.270$ m, 转轮叶片数 $Z_b=7$, 固定导叶数 $Z_{sv}=20$, 活动导叶数 $Z_{gv}=20$, 迷宫环间隙 $\xi_1=0.50$ mm, 活动导叶上下端面间隙 $\xi_2=0.12$ mm, 冷却水流量 $Q=2$ kg/s, 转速 $n=1\ 000$ r/min.

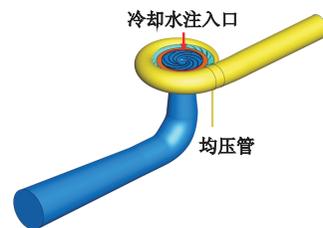


图1 水泵水轮机计算模型
Fig.1 Calculation model of pump-turbine

冷却水从迷宫环间隙进入转轮腔体内,再通过导叶间隙和均压管回流至尾水管,使水环厚度达到

动态平衡.因此水泵水轮机计算域中留有间隙环,作为冷却水注入口,该环厚度为 0.5 mm.泵工况时最优导叶开度 GVO 为 25 mm,文中选用活动导叶开度为全关闭(0% GVO)、1%最优导叶开度(1% GVO)、2%最优导叶开度(2% GVO)共 3 种工况研究水环的流动特性.

为提高数值计算精度,整个计算域采用结构化网格进行划分,各过流部件网格划分如图 2 所示.

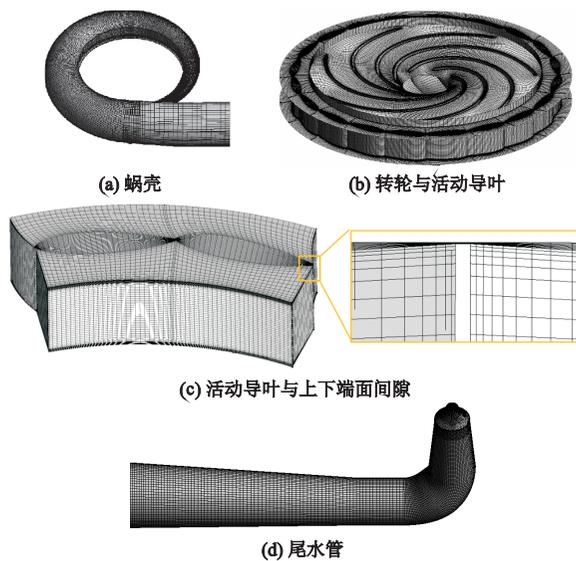


图 2 水泵水轮机各过流部件网格
Fig.2 Numerical mesh of pump-turbine

1.2 数值计算方法

在水泵水轮机调相工况下出现水环现象时,其内部水和气并不相混溶,并且具有清晰的两相分界面,因此文中采用 VOF 模型进行多相流计算.

为了对比湍流模型对数值计算结果的影响,分别选取 SAS 模型、SST 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型对水泵水轮机调相工况下进行非定常计算.3 种湍流模型在无叶区内计算的的压力脉动结果如图 3 所示.

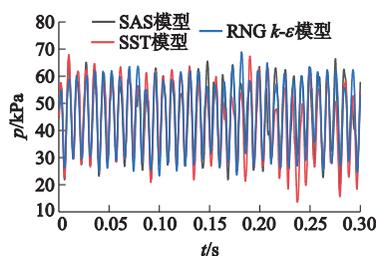


图 3 不同湍流模型计算的无叶区压力对比
Fig.3 Comparison of pressure in vaneless region calculated by different turbulence models

由图 3 可以看出,3 种湍流模型计算的的压力 p 都呈有规律的周期性变化,且其规律相似.考虑到

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对射流、分离流等方面的适应性^[19],选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行后续数值计算.

由于水泵水轮机运行在调相工况时,蜗壳与上游水库相连接的高压管道的阀门处于关闭状态,且连接蜗壳与尾水管的均压管处于打开状态,所以蜗壳内的压力为下游尾水管内的压力.进行非定常计算时,在蜗壳出口处设置边界条件为“Wall”,尾水管进口处及均压管出口处设置为自由出流, $p=0$ Pa.动静交界面设置为“transient rotor stator”.选取转轮每旋转 2° 记为 1 个时间步长,转轮旋转 20 转用时为总共计算时间.

1.3 监测点布置

为分析水环流动对流动内压力脉动的影响,在无叶区内以 +Y 方向为第 1 个点 $GV01$,按顺时针方向均匀布置 20 个监测点,如图 4 所示.

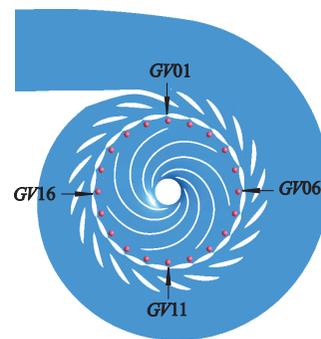


图 4 压力脉动监测点
Fig.4 Monitoring points for pressure fluctuation

2 计算结果及分析

2.1 水环形状分析

图 5 为 3 种导叶开度下水环内自由液面的量纲一化平均直径 d/D_{im} 分布.

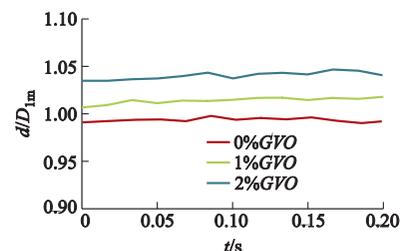


图 5 导叶开度对水环自由液面平均直径的影响
Fig.5 Influence of guide vane opening on average diameter of water-ring free surface

由图 5 可以看出:3 种导叶开度下水环的自由液面平均直径基本不随时间变化,这说明水环里的水从导叶间隙泄漏至蜗壳,此时水环的水已经达到了平衡

的状态;叶全关闭状态下,水环的直径最小,此时形成的水环厚度最大;在最优导叶开度 1% 和 2% 下,水环的直径已经超过转轮的直径,在这 2 种工况下,水环的空气与水的平均交界面已经处于无叶区。

图 6 为不同导叶开度下水环在无叶区水的体积分数 φ 分布,可以看出:在转轮出口处存在明显的

水和空气的分界面,且交界面环状不规则,形成了一个水环以阻止空气从导叶间隙泄漏,这说明水泵水轮机泵工况启动时调相运行在这 3 种导叶开度下,水环起到了明显的密封作用;在 2% 最优导叶开度下,在导叶以外区域,水环内部夹杂着一些空气,表明此时水环的密封性遭到少许破坏。

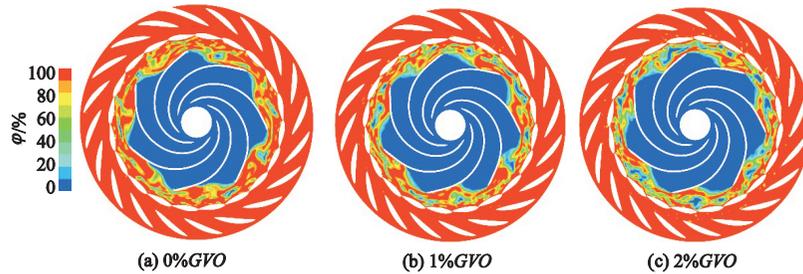


图 6 水的体积分数分布
Fig.6 Water volume fraction distribution

2.2 无叶区压力脉动分析

图 7 为在不同导叶开度下无叶区最上层 4 个位置 +Y, +X, -Y, -X 的压力脉动时域对比,可以看出:4 个位置的压力脉动没有太大的差异,都按一定的频率进行有规律波动;在导叶完全关闭状态

下,4 个位置的压力相比于其他导叶开度下的最大;随着导叶开度的增大,压力随之减小,这是由于水环的厚度随着导叶开度增大而减小,从而水环所产生的离心力也随之减小,进一步降低了在无叶区内的压力。

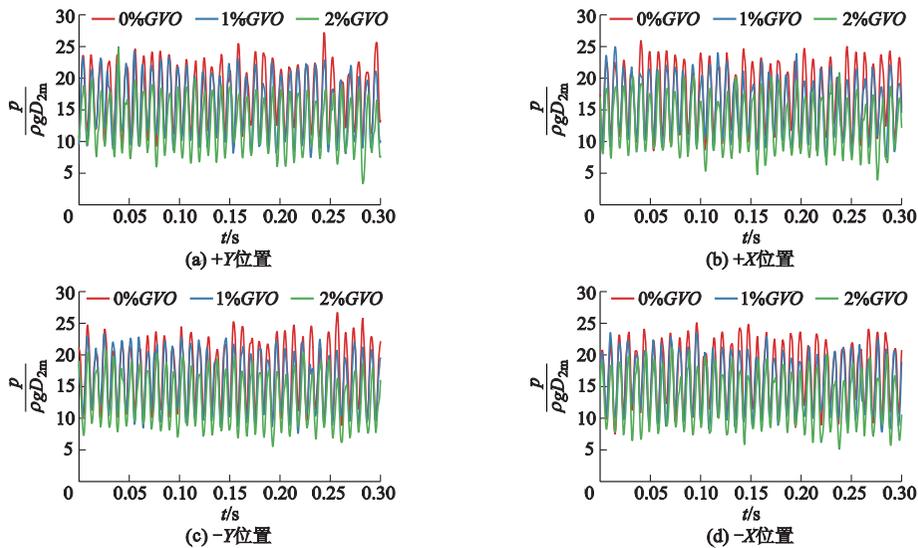


图 7 无叶区四位置的压力脉动时域图
Fig.7 Time-domain of pressure fluctuation at four positions in vaneless space

为了研究无叶区压力脉动幅值的分布情况,定义压力脉动幅值大小为

$$C_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (p_i - \bar{p})^2}}{\rho g D_{2m}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: p_i 为监测点的瞬时压力; \bar{p} 为平均压力; k 为样本数目; ρ 为水密度; g 为重力加速度。

图 8 为在不同导叶开度下无叶区的压力脉动幅

值分布,可以看出:数值计算得到的压力脉动幅值和文献[15]的幅值属于同一个数量级,表明文中所采用的数值计算方法是可靠的,在导叶开度为 0% GVO 和 2% GVO 时,压力脉动幅值围绕转轮 1 圈基本没有太大的差异;在 1% GVO 下,无叶区上层的压力脉动幅值从 120°~360° 的位置有一轻微程度的波动,在无叶区内的压力脉动幅值整体上要稍低于导叶全关闭状态下的压力脉动幅值;在 2% GVO 下,无叶区内压力脉动

幅值显著降低.总体而言,导叶开度越大,无叶区内的压力脉动幅值越小,这表明无叶区内的压力脉动能量随着导叶的开度增大而发生了耗散.

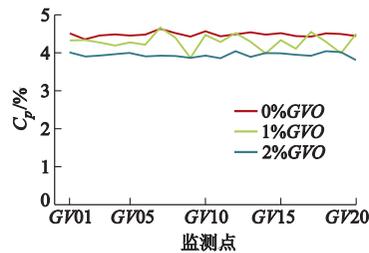


图8 无叶区压力脉动幅值分布
Fig.8 Amplitude of pressure fluctuation distribution in vaneless region

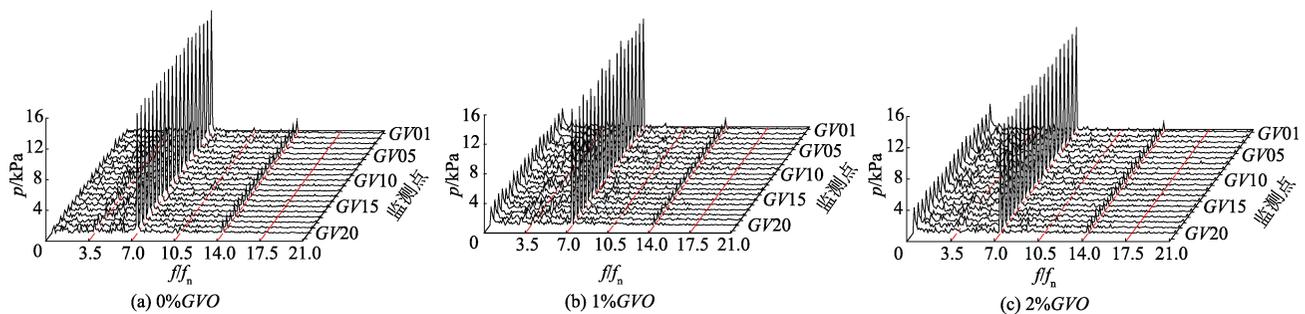


图9 无叶区内压力脉动频域分布
Fig.9 Frequency-domain distribution of pressure fluctuation in vaneless region

3 结论

应用数值计算方法,通过分析导叶在全关闭、1%和2%最优导叶开度下,水环内部流动特性和尾水管内流动,得到结论如下:

1) 在不同导叶开度下,无叶区内可以明显观察到水和空气的分界面形成水环,从而阻止空气从导叶间隙泄漏.水环的厚度随着导叶的开度增大而减小,在2%最优导叶开度下,水环内部混杂有少许空气,在固定导叶和活动导叶区域夹杂着微量的空气,水环在该工况下的密封性已有微弱的破坏.

2) 在无叶区内的压力大小和压力脉动幅值随着导叶开度的增大而减小,无叶区内的压力脉动特征频率为7倍转频,并伴有该频率的倍频和半倍频,呈现明显的动静干涉现象.

参考文献 (References)

[1] ROBERTS B. Capturing grid power[J]. IEEE power & energy magazine, 2009, 7(4):32-41.
[2] 徐桅,潘雪石. 张河湾抽水蓄能电站机组水环设计与现状分析[J]. 水电与新能源,2016,139(1):46-48.

为了分析无叶区内水环特性的频率特征,对无叶区的压力脉动时域数据进行快速傅里叶变换(FFT)得到其频谱特征.

图9为3种不同导叶开度下无叶区内20个监测点的压力脉动频域图,图中 f_n 为转频.可以看出:3种导叶开度下,在无叶区内的压力脉动主频为7倍的转频,倍频数刚好为转轮的叶片数,可判断该主频为叶频,其余特征频率为该叶频的倍频和半倍频,并呈现明显的动静干涉效果;导叶开度对无叶区内压力脉动的频率影响并不明显,在最优导叶开度1%和2%工况下,无叶区内的压力脉动出现一个非常低的频率特征,该频率仅为0.13倍转频.

XU Wei, PAN Xueshi. Design and analysis of the water ring in hydro-turbine units in Zhanghewan pumped storage power station[J]. Hydropower and new energy, 2016,139(1):46-48. (in Chinese)

[3] 陶德圣. 水轮机的充气压水调相运行[J]. 水电站机电技术,1985(4):17-24,16.

TAO Desheng. Hydraulic turbine operated under synchronous condenser mode[J]. Mechanical and electrical technique of hydropower station, 1985(4):17-24,16. (in Chinese)

[4] 陈湘匀,黄国桢,肖惠民,等. 抽水蓄能机组水环新设计方法[J]. 水力发电,2002,5(18):42-43.

CHEN Xiangyun, HUANG Guozhen, XIAO Huimin, et al. A new design method of water ring for pumped storage units[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2002,5(18):42-43. (in Chinese)

[5] GUO Guangqiang, ZHANG Renhui, YU Hao. Evaluation of different turbulence models on simulation of gas-liquid transient flow in a liquid-ring vacuum pump[J]. Vacuum, 2020, 180: 109586.

[6] NAUMOV V A, VELIKANOV L. Simulation of operational characteristics of the water-ring vacuum pumps[J]. Materials science and engineering, 2019, 537: 032029.

- [7] 张人会,郭广强,杨军虎,等.液环泵内部气液两相流动及其性能分析[J].农业机械学报,2014,45(12):99-102.
ZHANG Renhui, GUO Guangqiang, YANG Junhu, et al. Investigation on inner gas-liquid flow and performance of liquid-ring pump[J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(12):99-102. (in Chinese)
- [8] 张人会,严龙钢,杨军虎,等.径向间隙及叶片型线对液环泵性能影响的分析[J].流体机械,2015,43(8):21-24.
ZHANG Renhui, YAN Longgang, YANG Junhu, et al. Influence of the radial gap and blade profile on the performance of the liquid-ring pump[J]. Fluid machinery, 2015, 43(8):21-24. (in Chinese)
- [9] 郭广强.液环泵内部气液两相流动及其性能研究[D].兰州:兰州理工大学,2014.
- [10] 黄思,阮志勇,邓庆健,等.液环真空泵内气液两相流动的数值分析[J].真空,2009,46(2):49-52.
HUANG Si, RUAN Zhiyong, DENG Qingjian, et al. Numerical analysis of gas-liquid two-phase flow in liquid-ring vacuum pump[J]. Vacuum, 2009, 46(2):49-52. (in Chinese)
- [11] 黄苗苗,李国君,匡晓峰.水环真空泵内部气液两相流动的数值分析[J].船舶力学,2011,15(7):722-729.
HUANG Miaomiao, LI Guojun, KUANG Xiaofeng. Numerical simulation of the gas-liquid two-phase flow in water-ring vacuum pump[J]. Journal of ship and mechanical, 2011, 15(7):722-729. (in Chinese)
- [12] 郭君.水环真空泵工作特性数值模拟研究[D].东营:中国石油大学(华东),2016.
- [13] 张忱,张人会,李仁年,等.液环泵叶片轴向叶顶凹槽间隙流场及其性能[J].排灌机械工程学报,2021,39(4):358-363.
ZHANG Chen, ZHANG Renhui, LI Rennian, et al. Axial leakage flow and performance analysis of squealer tip clearance for liquid ring pump blade[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2021, 39(4):358-363. (in Chinese)
- [14] VAGNONI E, ANDOLFATTO L, GUILLAUME R, et al. Air-water ring in the vaneless gap of a reversible pump-turbine operating in condenser mode[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation, 2018.
- [15] VAGNONI E, ANDOLFATTO L, GUILLAUME R, et al. Interaction of a rotating two-phase flow with the pressure and torque stability of a reversible pump-turbine operating in condenser mode[J]. International journal of multiphase flow, 2019, 111: 112-121.
- [16] VAGNONI E, ANDOLFATTO L, AVELLAN F. On the sloshing free surface in the draft tube cone of a Francis turbine operating in synchronous condenser mode[J]. Journal of physics, 2017, 813: 012034.
- [17] VAGNONI E, ANDOLFATTO L, GUILLAUME R, et al. Oxygen diffusion through air-water free surfaces in a pump-turbine operating in condenser mode[J]. International journal of multiphase flow, 2019, 112: 183-192.
- [18] VAGNONI E, ANDOLFATTO L, GUILLAUME R, et al. Rotating air-water ring in the vaneless gap of a pump-turbine operating in condenser mode[J]. International journal of multiphase flow, 2018, 105: 112-121.
- [19] 胡坤,李振北.ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2014:207-210.

(责任编辑 陈建华)