

不同压水室的圆盘泵非定常特性及内部流动机理研究

王 川¹, 张渤晗¹, 裴迎举², 王东波¹

(1. 西南石油大学 机电工程学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500)

摘 要:针对圆盘泵的非连续叶片特殊叶轮结构,压水室的匹配设计对其整体水力特性提升具有重要意义。基于现场试验和CFX仿真分析结果,验证了湍流模型非定常仿真的可靠性。依据压水室结构参数理论分析结果,选取6种不同过流断面面积的压水室进行数值模拟和多维度内部流场分析,结果表明:随着过流断面面积的增加,6种不同压水室方案的叶轮中心呈现低压区,压力沿径向先增加后减小最后趋于相对稳定;高压区呈中心对称分布,主要位于叶轮和压水室交界并靠近叶轮出口一侧处,最大压力区域出现在压水室出口的近端位置;压水室过流面积越小,叶轮出口处漩涡越为明显,漩涡沿圆周扩散严重,随着压水室过流面积的增加,漩涡明显减弱,过流面积过大,漩涡明显加强。

关 键 词:圆盘泵;压水室;非定常模拟;水力特性;无叶区

中图分类号:TK05 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.05.003

[引用本文格式]王 川,张渤晗,裴迎举,等.不同压水室圆盘泵非定常特性及内部流动机理研究[J].热能动力工程,2021,36(5):17-22. WANG Chuan, ZHANG Bo-han, PEI Ying-ju, et al. Research on unsteady characteristics and inflow mechanism of different pumping chamber of disc pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(5): 17-22.

Research on Unsteady Characteristics and Inflow Mechanism of Different Pumping Chamber of Disc Pump

WANG Chuan¹, ZHANG Bo-han¹, PEI Ying-ju², WANG Dong-bo¹

(1. College of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, China, Post Code: 610500;
2. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, China, Post Code: 610500)

Abstract: In connection with the special impeller structure of discontinuous vane for disc pump, the matching design of the pumping chamber is important to the improvement of its overall hydraulic characteristics. Based on the results of field test and CFX simulation analysis, the reliability of unsteady simulation of turbulence model is verified. According to the theoretical analysis results of the structural parameters of the pumping chamber, six pumping chambers with different cross-sectional areas were selected for numerical simulation and multi-dimensional internal flow analysis. The results show that with the increase of the cross-sectional area, the impeller center of the six different pumping chamber schemes presents a low-pressure zone. After the pressure increases along the radial direction and decreases, it tends to be relatively stable, and the high-pressure area is symmetrically distributed in the center. The high-pressure area is mainly located at the junction of the impeller and the pumping chamber and close to the side of the impeller outlet. The maximum pressure area appears near the outlet of the pumping chamber. As the flow area of the pumping chamber decreases, the vortex at the outlet of the impeller becomes more evident, and

收稿日期:2020-07-17; 修订日期:2020-08-18

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0310200);国家自然科学基金(51704254);四川省重大科技专项(2019ZDZX0030);成都市科技局国际合作自主项目(2019-GH02-00039-HZ)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China(2018YFC0310200); National Natural Science Foundation of China(51704254); Major Special Projects of Provincial Science and Technology Department(2019ZDZX0030); Chengdu Science and Technology Bureau International Cooperation Independent Project(2019-GH02-00039-HZ)

作者简介:王 川(1983-),男,四川广安人,西南石油大学副教授。

the vortex diffuses seriously along the circumference. With the increase of the flow area of the pumping chamber, the vortex is clearly weakened, the flow area is too large and the vortex appears noticeably.

Key words: disc pump, pumping chamber, unsteady simulation, hydraulic characteristics, no-blade area

引 言

叶片圆盘泵作为一种特殊结构离心泵^[1],其内部主要机械元件结构简单,强度高,具备优异的抗磨损和抗气蚀性能,对泵送介质包容性强。在保证不破坏泵送介质自身物理结构特性的同时,能够减小高浓度液体中大颗粒的摩擦阻力,对高粘度、高含气介质输送有较强的适应性^[2-5]。利用特殊结构的主、从动盖板非连续叶片结构,保证叶片圆盘泵运行性能稳定^[6]。

目前叶片圆盘泵主要生产厂家为美国 Discflo 公司,但国内外关于叶片圆盘泵的结构设计理论以及内部流场运动规律的研究成果报道较少。Pérez 等人^[7]研究了圆盘泵入口叶轮相互作用的流体动力学行为,通过压力和速度分布分析了入口叶轮相互作用,了解变量在模拟条件下的特性。文献[8]通过大量的几何参数、转速、流体特性和泵性能实验得出结论,圆盘泵可以高效输送各种粘度和密度的流体。在国内,叶片圆盘泵作为一种新型泵,主要处于结构改进设计阶段以及内部流动规律的前期探究阶段。周昌静等人^[9]对圆盘泵进行全流场的流动仿真,重点对叶片圆盘泵无叶区内的流动情况进行研究,证明叶轮无叶区内存在较多的低压区,同时存在径向回流和轴向流动。陈永超等人^[10]通过不同叶片结构形式模型的计算分析,发现在一定范围内,增加圆盘泵叶片数量、减小叶片宽度及优化叶片,可以一定程度上提高圆盘泵的水力性能。解永超等人^[11]基于叶片圆盘泵的外特性实验结果,综合分析既定工况条件下圆盘泵蜗壳内部、上下叶轮间的压力分布情况,为探究叶片圆盘泵内部流场特性提供参考。周昌静等人^[12]进一步探究叶片圆盘泵内部流道中无叶区和有叶区流动规律,基于内部流场的压力分布、速度矢量规律等分析,认为在叶片圆盘泵中主要流动形式为旋流,并存在贯通流。

近年来,对圆盘泵内部流动影响因素及流动规律的探索不断加强。环形压水室被广泛应用于各种污水泵和泥浆泵的泵体外壳上,这是由于环形压水室设计结构简单、介质通过性高、性能稳定,但其水力损失比其他类型压水室大。本文探讨环形压水室内部流动变化规律,验证流动规律稳定性,为优化设计提供依据,对提高泵的整体水力性能和节约能源具有重要的意义。

1 数值模拟

1.1 模型建立

选取流量为 $260 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程为 120 m 、转速为 $2\,900 \text{ r/min}$ 的叶片圆盘泵为对象,其中,主动轮叶轮叶片数 $Z_1 = 12$ 、从动轮叶轮叶片数 $Z_2 = 12$,叶轮直径为 384 mm 、出口宽度 42 mm ,进口直径 150 mm 、出口直径 120 mm ,如图 1 所示。

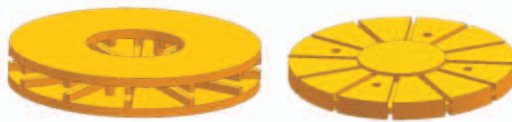


图 1 三维模型示意图

Fig. 1 3D model diagram

1.2 网格划分及无关性验证

选取螺旋形压水室、螺旋 T 形压水室和 6 种不同过流面积的环形压水室,分别建立三维模型。通过 ANSYS ICEM 网格软件分别对不同结构的压水室、叶轮和进出口段流体域进行网格划分。基于前期该类型泵仿真计算的经验和经过仿真预计算,确定网格边界层为 4 层,第一层网格高度为 0.082 mm ,高度增长比为 1.1。对螺旋形压水室隔舌等小角度过渡部分进行二次网格加密,以保证每一部分网格的质量,提高仿真计算的准确度。进行网格无关性验证,即模型的预计算。预计算结果显示,网格总数为 500 万以上,扬程和效率变化在 0.17% 时满足对比分析要求。叶片圆盘泵主要部件流体域网格

划分如图 2 所示。

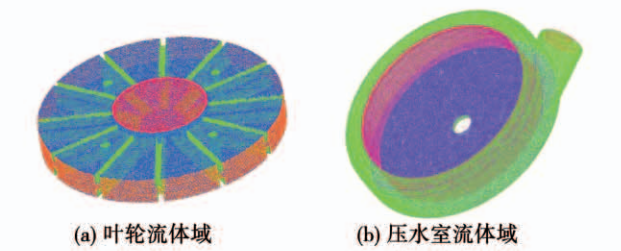


图 2 流体域网格划分
Fig. 2 Fluid domain meshing

1.3 湍流模型选择

RNG $k-\varepsilon$ 是仿真计算过程中普遍采用的湍流模型^[13-14],该模型是一种高雷诺数的湍流模型。在 ε 方程中加入计算条件,有效改善计算精度。

本研究选择经模拟验证可行的边界条件:进口边界设置为压力进口,出口边界设置为质量流出口,壁面采用无滑移壁面等^[14]。

1.4 模型验证

选取原理样机模型进行相似实验,实验台如图 3 所示,具体型号如表 1 所示。



图 3 实验设备台
Fig. 3 Experimental equipment platform

表 1 实验测量仪器型号及精度

实验测量仪器	型号	精度	工作范围
电磁流量计 1	HBH60	0.5%	70 m ³ /h
电磁流量计 2	HBH60	0.5%	120 m ³ /h
真空型泥浆压力传感器	HCYL-106	0.2%	0~3 MPa
一体化温度传感器	HB510	1 ℃	0~25 ℃
数显型泥浆压力传感器	HCYL-106	0.2%	4 MPa

实验泵进出口两端分别安装电磁流量计 1、2 进行对比分析,以消除部分误差。泵入口端为真空型泥浆压力传感器,出口端安装有一体化温度传感器和数显型泥浆压力传感器。分别进行不同流量下的圆盘泵特性实验,并对该原理样机进行数值模拟,实验数据和仿真数据的结果如图 4 所示。

由图 4 的实验和仿真结果对比可知,定常与非定常模拟相对于实验结果总体趋势是相同的,定常模拟的扬程结果与实际实验的扬程结果偏差最低为 5.01%,平均误差达到 14.44%,误差结果相对较大,非定常模拟的结果与实验结果的贴合程度更高,非定常模拟的扬程与实验结果平均误差为 6.09%,最小为 1.19%。因此可知非定常模拟的结果与实验结果更加接近,仿真结果可靠度高。

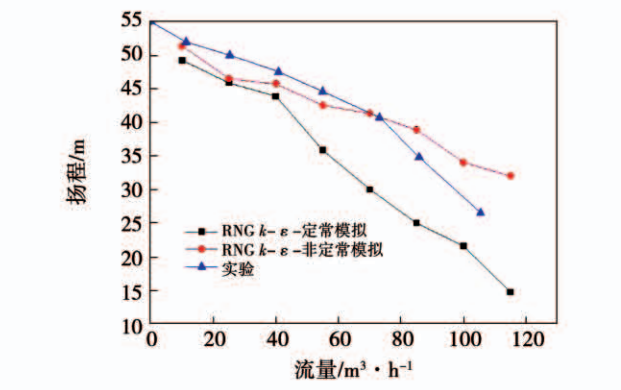


图 4 实验及仿真结果
Fig. 4 Experimental and simulation results

2 结果与分析

2.1 压水室结构分析

压水室通常包括涡室、环形压水室和导叶等^[15],压水室类型的选择和设计主要是依据叶轮出口速度矩分布形式及实际输送介质和工作环境等要求。叶片圆盘泵的叶轮叶片是非扭曲的上下非连续叶片,压水室作为固定流部件,一般不考虑相对速度,但需要考虑叶片圆盘泵非扭曲叶片的特殊结构。

叶片圆盘泵实际输送介质多为固液气多相混合液体,存在较大的黏性,同时叶片圆盘泵的设计是基于摩擦驱动和离心作用的基础理论发展而来的,因

此在叶轮出口迹线分析中,黏性摩擦是不能被忽略的,压水室的设计不能完全按照传统螺旋形压水室进行匹配应用。

为了进一步分析叶片圆盘泵压水室设计思路,选取螺旋形、螺旋 T 形和环形 3 种压水室结构分别进行数值分析,为保证计算结果具备一定的可比性,三个类型的压水室出口尺寸一致,如图 5 所示。



图 5 3 种压水室结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of three kinds of pumping chambers

使用一种相同结构形式的叶轮匹配螺旋形、螺旋 T 形和环形 3 种形式压水室,对不同压水室模型进行变流量仿真分析,压水室泵效率和扬程柱状图如图 6 所示。通过图 6 可以看出,螺旋 T 形压水室效率和扬程最低,环形压水室的最高。环形压水室结构简单、优化设计较为方便,相对螺旋形压水室更容易获得较优的水力特性。

2.2 环形压水室流场分析

环形压水室的结构简单,在设计过程中主要基于叶轮出口速度矢量变化情况和允许通过介质的最大粒径等综合确定环形压水室的过流断面。如图 7 分别建立方案 A、B、C、D、E、F 共 6 种不同过流断面的压水室,进行数值模拟。

在数值模拟计算过程中,非定常计算是将定常计算的结果作为仿真计算的初始条件。每一时间步的计算是以前一时间步内叶轮旋转域相对静止域的转动时间步结果为计算初始值。其能充分反映圆盘泵内部压力分布、扬程等物理特征随叶轮转动所呈现的变化规律,而定常计算仅针对叶轮某一个特定的相对位置^[16]。

采用非定常模拟结果进行对比分析。取叶轮流道无叶区中间轴向截面为截面 1。由图 8 可知,6 种不同过流断面的压力分布非常均匀,无叶区压力随着半径的增大先均匀增大后减小,并趋于稳定;叶轮中心呈现低压区,过流断面高压区主要位于叶轮和压水室交界,最大压力区域出现在压水室出口的近

端位置。6 种压水室方案中,除叶轮中心外没有出现明显低压区,说明出口处的回流和扰动没有形成明显旋涡,回流稳定。

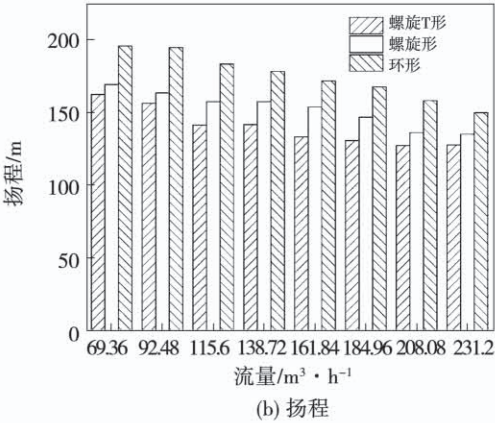
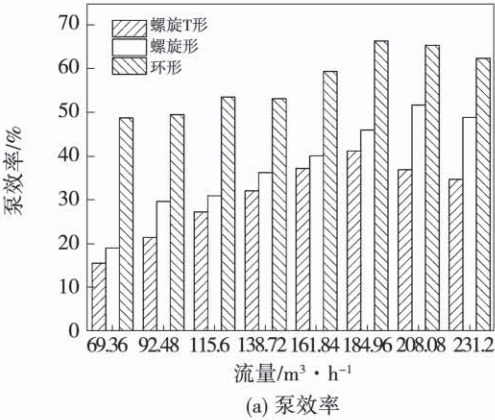


图 6 3 种压水室效率及扬程柱状图

Fig.6 Efficiency and head histogram of three kinds of pumping chambers

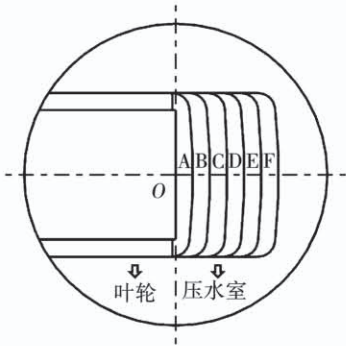


图 7 过流断面示意图

Fig.7 Schematic diagram of overcurrent section

靠近叶片圆盘泵从动盖板有叶区为轴向截面 2。由图 9 可知,6 种过流断面压水室方案中,叶轮和压水室在截面 2 上的压力分布与截面 1 处较为一

致,叶轮中心呈现低压区,压力沿径向先减小后增加最终趋于稳定;通过截面 2 上的流线对比图,能够清晰的看出 6 种方案的中心位置均出现明显的低压旋涡,该情况和图 8 中低压区分析较为一致。同时 6 种方案下均在叶轮边缘出现小漩涡,且有随着过流断面面积增加而减少的趋势,在方案 A 中的旋涡沿圆周扩散最为严重;方案 C、E 中出口流线较为平顺,但在方案 D、F 中出口流线出现旋涡。

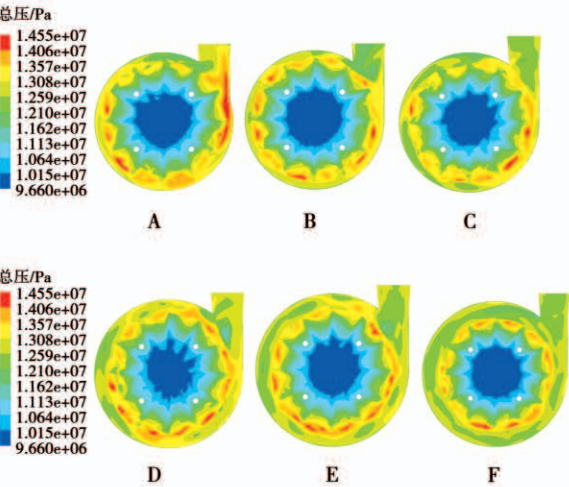


图 8 不同压水室方案下载面 I 非定常模拟压力云图
Fig. 8 Unsteady simulated pressure contour on section I for different pumping chambers

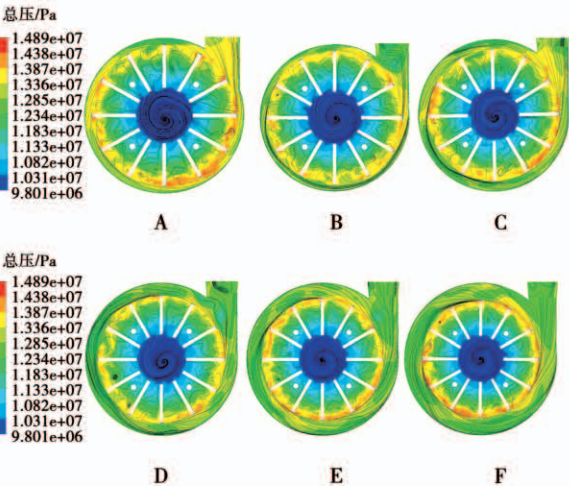


图 9 不同压水室方案下载面 II 非定常模拟
流线及压力云图
Fig. 9 Unsteady simulation streamline and pressure
contour on section II for different pumping chambers

截面 3 位于叶片圆盘泵主动盖板有叶区,旋转叶片的有叶区和中间无叶区存在过渡交汇和相互扰动,流动较为复杂。从图 10 不同压水室的相对速度矢量图中可以看出:6 种方案中,环形压水室内部流体流速沿出口方向逐渐增大,并在出口处达到相对极值;压水室内部环流和叶轮出口处流体交汇形成局部高速区域;由于环形压水室周向过流截面是环形空腔,在隔舌位置间隙较大。在截面 3 中能够清晰看到回流造成的旋涡以及在回流中的二次加速和减速的扰动,其回流的变化趋势以及回流的稳定状态均和流线及压力云图较为相似。

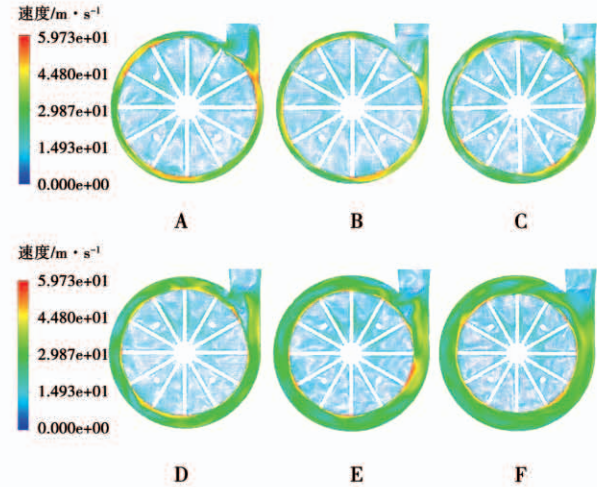


图 10 不同压水室方案下载面 III 相对速度矢量图
Fig. 10 Vector illustration of relative velocity on section III for different pumping chambers

3 结 论

- (1) 不同压水室过流断面的叶轮中心呈现低压区,有明显的低压漩涡,压力沿径向先增加后减小最终趋于相对稳定,高压区呈环形分布,主要位于叶轮和压水室交界并靠近叶轮出口一侧,最大压力区域出现在压水室出口的近端位置。
- (2) 压水室过流面积越小,叶轮出口处漩涡越明显,漩涡沿圆周扩散越严重。随着压水室过流面积的增加,可视化漩涡明显减弱,压水室出口流线较为平顺,叶片间的流线也较为规律。压水室过流面积过大,漩涡又明显出现,部分漩涡扩散到叶轮的进口处。

(3) 叶片圆盘泵多应用于含有颗粒的多相黏性混合介质的输送。压水室的优化设计需综合考虑叶轮出口速度以及介质最大粒径等因素,在水力计算的压水室过流截面面积的基础上,考虑回流的影响,以获得较优的圆盘泵水力性能。

参考文献:

- [1] 陈永超,陈国明,周昌静,等. 圆盘泵叶片结构形式对泵外特性影响分析[J]. 机械设计,2014,31(9):93-96.
CHEN Yong-chao, CHEN Guo-ming, ZHOU Chang-jing, et al. A analysis on the influence of blade structure on exterior characteristics of disc pump[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(9): 93-96.
- [2] BENSON S, PACELO J. Solving the problems of pumping medium-to-high density paper stock[J]. World Pumps, 1997, 368: 68-71.
- [3] GURTH M I. Method for pumping fragile or other article in a liquid medium[P]. US 476892, 1988-09-06.
- [4] GURTH M I. Rotary disc pump[P]. US, 4940385, 1990-07-10.
- [5] 高本金. 海底泥浆举升圆盘泵流场仿真与性能研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2009.
GAO Ben-jin. Flow field simulation and performance assessment for the subsea mud lift disc pump[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2009.
- [6] 陈永超. 叶片圆盘泵流固耦合强度分析及性能改进研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
CHEN Yong-chao. Strength analysis of fluid-solid interaction and performance improvement of disc pump with radial straight blade[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2013.
- [7] PÉREZ J L, PATIÑO L, ESPINOZA H. Three-dimensional simulation of the entrance-impeller interaction of a hydraulic disc pump[J]. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 2006, 29(1): 61-73.
- [8] CRAWFORD M E, RICE W. Calculated design data for the multiple-disk pump using incompressible fluid[J]. Eng. Power, 1974, 96(3): 274-282.
- [9] 周昌静, 陈国明, 尹树孟, 等. 叶片圆盘泵叶轮无叶区内部流场数值模拟[J]. 化工机械, 2010, 37(6): 750-754.
ZHOU Chang-jing, CHEN Guo-ming, YIN Shu-meng, et al. Numerical simulation of the internal flow field in the bladeless zone of the impellers of disk pumps with radial straight blades[J]. Chemical Machinery, 2010, 37(6): 750-754.
- [10] 陈永超, 陈国明, 李 伟, 等. 一种抗磨损多级圆盘泵结构设计[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(10): 25-28.
CHEN Yong-chao, CHEN Guo-ming, LI Wei, et al. Structure design for a multi-stage disc pump with high wear-resistance[J]. Oil Field Equipment, 2013, 42(10): 25-28.
- [11] 解永超, 陈国明, 张 叶, 等. 叶片圆盘泵压力脉动及叶轮径向力特性分析[J]. 石油机械, 2015, 43(10): 63-67.
XIE Yong-chao, CHEN Guo-ming, ZHANG Ye, et al. Numerical analysis on pressure fluctuation and radial force of disc pump with straight blade[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(10): 63-67.
- [12] 周昌静, 陈国明, 徐 群, 等. 圆盘泵流动规律研究[J]. 流体机械, 2010, 38(10): 44-47.
ZHOU Chang-jing, CHEN Guo-ming, XU Qun, et al. Research on flow mechanism in disc pump[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(10): 44-47.
- [13] 裴迎举, 宋文武, 胡 帅, 等. 多工况下不同叶片包角的斜流泵水力特性研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(9): 138-142.
PEI Ying-ju, SONG Wen-wu, HU Shuai, et al. Study on hydraulic characteristics of mixed-flow pump with different blade wrap angles under multi-operation conditions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(9): 138-142.
- [14] 裴迎举, 宋文武, 庞 辉, 等. 不同叶片包角的斜流泵水力特性多维度研究[J]. 人民长江, 2017, 48(16): 73-77.
PEI Ying-ju, SONG Wen-wu, PANG Hui, et al. Multidimensional study on hydraulic characteristics of mixed-flow pump with different wrap angles[J]. Yangtze River, 2017, 48(16): 73-77.
- [15] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
GUAN Xing-fan. Modern pump theory and design[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2011.
- [16] 吴贤芳, 冯进升, 刘厚林, 等. 单流道离心泵定常非定常性能预测及湍流模型工况适用性[J]. 农业工程学报, 2017(S1): 85-91.
WU Xian-fang, FENG Jin-sheng, LIU Hou-lin, et al. Performance prediction of single-channel centrifugal pump with steady and unsteady calculation and working condition adaptability for turbulence model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017(S1): 85-91.

(姜雪梅 编辑)