排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2020 年 12 月 Dec. 2020 | 第 38 卷 Vol.38 | 第 12 期 No.12

基于正交试验的高扬程混流泵优化设计

李彦军，吴天澄，王文杰*，裴吉
（江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）


李彦军

摘要： 为了提高高扬程导叶式混流泵的扬程和效率，选择叶轮叶片进、出口安放角、包角和叶轮外径这 4 个因素，每个因素取 4 个水平，利用正交设计软件 SPSS 进行正交试验方案的设计，应用 CFD 软件 ANSYS CFX 对设计的 16 副叶轮进行三维数值模拟，利用极差分析的方法分析得到各因素对扬程和效率的影响程度，进而得到最优组合方案，最后对比分析原始模型与优化模型的内部流动情况，验证优选方案的可行性.结果表明：叶轮叶片出口安放角对扬程影响程度最大，叶片包角对效率影响程度最大.在设计流量下，兼顾扬程和效率所选出的最优方案扬程和效率均有所提高，泵段内水流流态较好，压力分布均匀，达到优化设计的目的.因此，基于正交试验的高扬程混流泵优化可行，优化方案的参数搭配能够有效地减小高扬程混流泵的水力损失，提高其水力性能，并改善其内部流动.

关键词： 混流泵；高扬程；正交试验；优化设计
中图分类号： TH313；S277.5　**文献标志码：** A　**文章编号：** 1674-8530(2020)12-1203-06
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.19.0313

李彦军，吴天澄，王文杰，等. 基于正交试验的高扬程混流泵优化设计[J].排灌机械工程学报，2020，38(12)：1203-1208.
LI Yanjun，WU Tiancheng，WANG Wenjie，et al. Optimization design of mixed-flow pump with high head based on orthogonal test [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2020，38(12)：1203-1208.(in Chinese)

Optimization design of mixed-flow pump with high head based on orthogonal test

LI Yanjun，*WU Tiancheng*，*WANG Wenjie**，*PEI Ji*
(National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China)

Abstract：The orthogonal design software SPSS was used to design the orthogonal test scheme of four factors and four levels including inlet angle，outlet angle，wrap angle，outer diameter of impeller. Three-dimensional numerical simulation of the 16 designed impellers were carried out with CFD software ANSYS CFX. Range analysis was used to analyze the influence of various factors on the head and efficiency. Then an optimal scheme was put forward. The feasibility of the preferred scheme was verified by comparing and analyzing the internal flow of the original model and the optimized model. The results show that the outlet angle has the greatest influence on the head，and the blade wrap angle has the greatest influence on the efficiency. At the designed flow rate，the head and efficiency of the optimum program to both head and efficiency were improved. The flow pattern in the pump section was better and the pressure distribution was uniform，which is up to the optimal goal. Therefore，the optimization of the high-head mixed-flow pump based on the orthogonal test is feasible. The parameters of

收稿日期： 2019-11-26；**修回日期：** 2020-01-14；**网络出版时间：** 2020-12-03
网络出版地址： https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20201202.1632.002.html
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFB0606103)；武汉市科技计划项目(2018060403011350)
第一作者简介： 李彦军(1976—)，男，江苏赣榆人，副研究员(lyj782900@ujs.edu.cn)，主要从事泵和泵装置优化设计及动力特性测试研究.
通信作者简介： 王文杰(1990—)，男，湖北天门人，助理研究员(wenjiewang@ujs.edu.cn)，主要从事泵智能优化设计研究.

the preferred scheme can effectively reduce the hydraulic loss of the high-head mixed-flow pump and improve its hydraulic performance and internal flow.

Key words: mixed-flow pump; high head; orthogonal test; optimization design

混流泵是比转数介于250~600的泵型,其结构和性能介于轴流泵和离心泵之间,混流泵兼具轴流泵和离心泵的优点,是性能较优的泵型[1-2],因而广泛应用于电站(核电站、蓄能电站)、市政引水工程、石油化工工程等,在国民经济中起到重要作用.

已有诸多学者对混流泵的结构设计和内部流动特性进行了大量的研究.贾瑞宣等[3]对低比转数混流泵叶轮叶型径向参数进行优化设计,使泵效率得到较大提高.张文武等[4]分析了低比转数混流泵在不同叶顶间隙下的外特性参数和叶轮内部流场.瞿杰等[5]、黎义斌[6]等研究了低比转数混流泵叶轮和导叶间动静干涉下的压力脉动情况.MIYABE等[7]分析了低比转数混流泵不稳定水流特性的产生机理,发现导叶进口边的旋涡引起从导叶出口到叶轮出口的回流,从而导致泵内的不稳定流动.常书平等[8]应用剪切应力输运湍流模型和基于Rayleigh-Plesset方程的混合物均相流空化模型,对某混流泵在设计工况时的流场进行数值模拟,获取了泵的扬程衰减曲线,捕捉到泵内空化的发生、发展过程,对轻微空化、临界空化和严重空化3种工况下叶轮内空泡体积分布特性.尽管对混流泵的研究已取得了一定的成果,但在高扬程导叶式混流泵方面的研究成果较少,特别是对比转数为260左右的高扬程导叶式混流泵的水力模型研究较为匮乏.

目前中国正在规划兴建的三江连通工程、珠江三角洲水资源配置工程等重大调水工程,其规划设计的大型泵站均需要高扬程大流量的低比转数导叶式混流泵水力模型.因此,研制开发高扬程低比转数导叶式混流泵水力模型对中国大型调水工程的发展具有重要的意义,同时该类型水力模型也可应用于电站等工业循环水系统.

较传统的试错法,正交试验是研究多因素多水平的一种设计方法,通过选择合适的正交试验设计表可以分析各因素对优化目标的影响顺序,获得性能最优的参数组合.因其高效率、快速、经济的特点,正交试验法被广泛应用于水泵的优化设计,并获得了良好的效果[9-13],其中又以离心泵居多.因此文中使用正交试验方法对高扬程导叶式混流泵叶轮的叶片进、出口安放角,包角和外径4个因素进行优化设计,探索其优化设计方法.

1 数值模拟和试验验证

1.1 计算水力模型

研究对象为1台高扬程导叶式混流泵试验模型泵,其设计参数:额定流量 $Q=350$ L/s,设计扬程 $H=30$ m,额定转速 $n=1\ 450$ r/min,比转数 $n_s=263$,叶片数 $z=5$,导叶叶片数 $z_d=7$,叶轮直径 $D_2=370$ mm.数值模拟计算区域包括进水流道、叶轮、导叶以及出水流道4个部分,如图1所示.

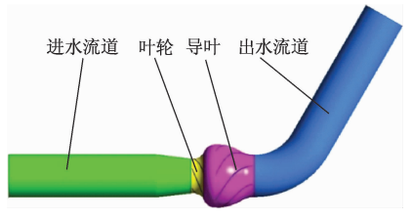


图1 混流泵模型
Fig.1 Mixed-flow pump model

1.2 网格划分

采用三维造型软件UG进行三维造型并用ANSYS ICEM进行结构网格划分,叶轮和导叶网格划分示意图如图2所示.

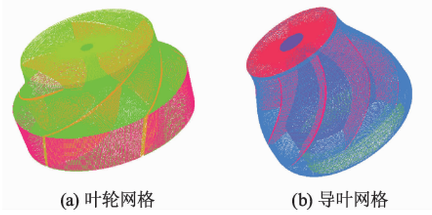


图2 网格模型
Fig.2 Mesh model

网格划分影响着模型计算精度、收敛性和计算效率,因此在完成网格划分后对其进行了网格无关性分析.选取5套不同网格数量的叶轮,利用ANSYS软件计算设计点处的扬程.模拟结果表明,叶轮网格数在达到84万之后,模拟得到的扬程趋于稳定,误差维持在2%以内.因此,选用网格数量为84万的叶轮网格进行数值模拟计算.

1.3 边界条件

采用ANSYS CFX对模型进行计算设置.流体运动的控制方程基于三维不可压缩的雷诺时均N-S方程,应用标准SST $k-\omega$ 湍流模型对方程进行封闭,

该模型在广泛的流动领域具有更高的精度和可靠性.进口边界条件设置为 1.013×10^5 Pa，出口边界条件设置为质量流量，叶轮部分设置为旋转域，转速设定为 1 450 r/min，其他区域为静止域.固体壁面采用无滑移边界条件，靠近壁面区域采用标准壁面函数自动修正.

1.4　数值模拟结果及试验验证

原始方案试验在中水北方勘测设计研究有限责任公司水力模型通用试验台进行，试验台满足国家标准.原始方案数值模拟得到的外特性结果和试验的外特性结果对比曲线如图 3 所示.从图中可知，数值模拟与试验外特性曲线趋势基本一致.总体上，数值模拟结果与试验所得结果误差保持在 3.8%以内，符合工程实际，说明该数值模拟方法可行.

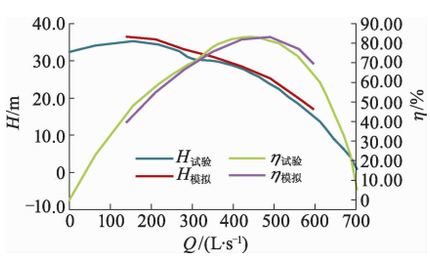


图 3　试验结果和数值模拟结果对比

Fig.3　Comparison between CFD and experimental results

2　正交试验设计

文中根据正交试验方案设计出 16 副叶轮，然后找出扬程和效率综合性能最优的方案并进行数值试验分析.

2.1　正交试验目的

1）探索所选取的高扬程导叶式混流泵的各几何参数对设计工况点扬程和效率的影响规律；

2）通过对正交试验结果进行极差分析并对本模型泵提出最优设计方案；

3）对比分析优化前后模型泵的水力性能以及内部流动状态，验证最优方案的可行性.考虑到设计工况时，原始方案试验扬程为 30.021 m，且数值计算所得扬程略高于试验扬程，因此优化方案设计工况扬程需保持在 29.5～30.5 m，同时效率得到提高以及内部流动状态得到改善.

2.2　正交试验因素和方案

试验选取模型泵进口安放角 β_1，出口安放角 β_2，叶片包角 φ 和叶轮外径 D_2 这 4 个因素进行正交设计，因素水平及设计方案如表 1，2 所示.

表 1　因素水平表

Tab.1　Factors and levels of orthogonal table

水平	因素			
	A	B	C	D
	β_1/(°)	β_2/(°)	φ/(°)	D_2/mm
1	39	54	100	367
2	43	58	110	369
3	47	62	120	371
4	51	66	130	373

表 2　试验方案

Tab.2　Test schemes

试验序号	A(β_1)	B(β_2)	C(φ)	D(D_2)
1	39	54	100	367
2	47	62	100	371
3	51	66	100	373
4	43	58	100	369
5	43	66	120	367
6	51	62	110	367
7	47	58	130	367
8	39	66	130	371
9	51	54	130	369
10	39	62	120	369
11	43	62	130	373
12	43	54	110	371
13	47	54	120	373
14	47	66	110	369
15	51	58	120	371
16	39	58	110	373

3　正交试验结果分析

通过对 16 副叶轮数值模拟结果进行整理，对正交试验的结果进行分析，得出试验中 4 个因素对泵性能的影响程度，以此来找出影响泵性能的主要因素并提出最优方案，数值模拟结果如表 3 所示.

表 3　数值模拟结果

Tab.3　Simulated results

设计方案	参数	
	H/m	η/%
1	30.58	80.75
2	30.86	79.69
3	31.39	80.00
4	30.55	78.84
5	28.08	83.65
6	30.46	83.70
7	30.05	84.40
8	28.10	83.89
9	31.35	83.75
10	29.21	82.51
11	30.2	83.44
12	33.73	80.70
13	32.44	81.65
14	29.22	82.53
15	31.72	83.58
16	31.13	79.79

3.1 直观分析

根据表 3 中正交试验数值模拟结果可以看出，方案 7 的扬程在 29.5～30.5 m，且效率最高，符合优化目标.

3.2 极差分析

为了能更加直观地显示各因素水平对扬程和效率的影响的主次顺序，以因素水平为横坐标，扬程和效率为纵坐标，得到图 4 所示的水平指标关系.从图中可以看出，扬程的极差由大到小依次为 R_B，R_D，R_A，R_C，效率的极差由大到小依次为 R_C，R_D，R_A，R_B.由此可知，影响扬程的因素顺序为 BDAC，影响效率的因素顺序为 CDAB.因此，对扬程来说，影响程度最大的是出口安放角 β_2；而对效率来说，影响程度最大的是叶片包角 φ.就单个因素而言，因素 A（进口安放角）各水平对扬程的影响顺序为 $A_4A_3A_2A_1$，对效率的影响顺序为 $A_4A_3A_1A_2$；因素 B（出口安放角）各水平对扬程的影响顺序为 $B_1B_2B_3B_4$，对效率影响顺序为 $B_4B_3B_1B_2$；因素 C（包角）各水平对扬程影响顺序为 $C_1C_2C_3C_4$，对效率影响顺序为 $C_4C_3C_2C_1$；因素 D（叶轮外径）各水平对扬程影响顺序为 $D_4D_3D_2D_1$，对效率影响顺序为 $D_1D_3D_2D_4$.

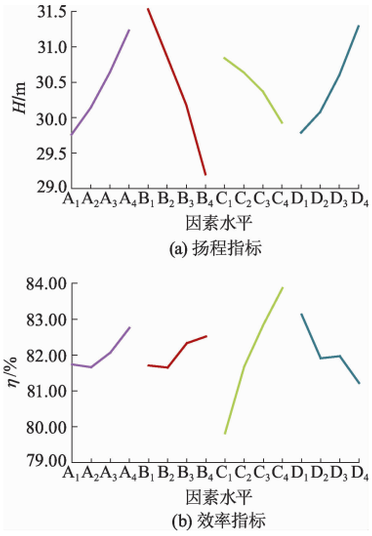


图 4 因素与性能指标的关系

Fig.4 Relationship between factors and performance indicators

进一步分析可知，随着进口安放角的增大，扬程和效率整体上有大幅提升，效率在进口安放角增大过程中略微降低之后提高.出口安放角对扬程的影响最大，通过减小出口安放角能使扬程有较大的提升.增大叶片包角虽然对提高效率作用明显，但同时也会使扬程降低.随着叶轮外径的增大，扬程明显提高，但是圆盘摩擦损失也会增加，使得效率降低.

综上所述，效率最佳组合为 $A_4B_4C_4D_1$，即 $\beta_1=51°$，$\beta_2=66°$，$\varphi=130°$，$D_2=367$ mm，其设计工况点扬程为 29.55 m，效率为 85.62%，计算结果与设计的 16 副叶轮方案进行对比，综合评出 $A_4B_4C_4D_1$ 为最优组合方案，符合优化设计目标.所以可以确定最佳方案为 $A_4B_4C_4D_1$，即 $\beta_1=51°$，$\beta_2=66°$，$\varphi=130°$，$D_2=367$ mm.

4 优化方案分析

4.1 数值模拟性能曲线对比

图 5 为优化前后扬程和效率对比图，从图中可以看出，优化后的扬程整体略有降低，但是优化后设计工况扬程仍然处在 29.5～30.5 m，满足扬程在优化方面的需求.从效率性能曲线可以明显看出，优化方案的整体效率得到提升，数值上提高了 9.98%，高效区也得到明显拓宽，优化效果显著，符合优化目标.

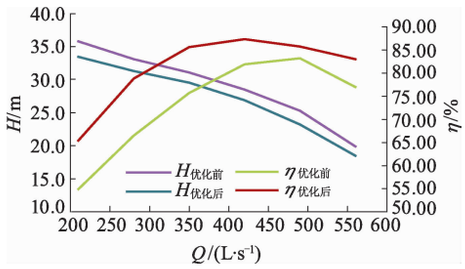


图 5 优化前后模拟性能曲线

Fig.5 Comparison of pump performance before and after optimization

4.2 叶轮内部速度流线图对比

为了深入理解低比转数导叶式混流泵性能大幅度提升的机理，对比分析不同工况下叶轮和导叶内三维流动特性.图 6 为 Q/Q_d 分别为 0.8，1.0 以及 1.2 工况下优化前后叶轮内部截面速度流线图.从图中可以看出，优化前叶轮流道内存在不同程度的不稳定流动，优化前 $Q/Q_d=0.8$ 工况下叶轮出口处存在小范围旋涡，流线分布不均匀，水力损失较大；优化后旋涡基本消失，流线顺畅且分布较均匀，流体流动方向符合叶片型线，这有利于提升叶轮水利性能.在 $Q/Q_d=1.0$ 和 $Q/Q_d=1.2$ 工况下，优化前叶片进口边处存在少量回流，堵塞叶轮流道进口，从而造成水力损失，优化后回流消失，流线较为平顺.由此可以看出，适当增大叶片进口安放角以及减小出口安放角有利于改善流体流态，提高叶轮水力性能.

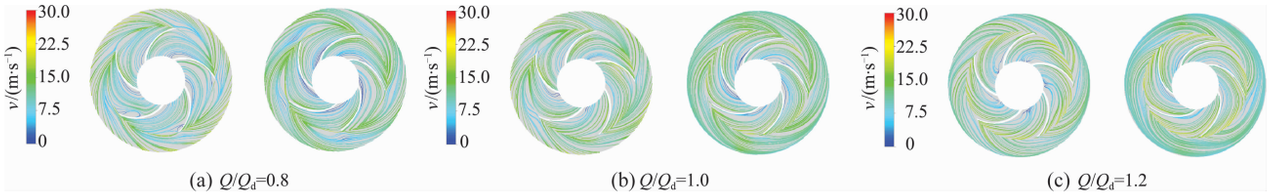


图 6　叶轮内部截面速度流线图
Fig.6　Streamline distribution on middle section of impeller

4.3　导叶表面流线分布对比

研究发现,叶轮和导叶之间存在相互的影响[13-15],因此有必要对导叶内流场进行分析.图 7 为 Q/Q_d分别为 0.8,1.0 和 1.2 工况下单个导叶片表面速度流线图,从图中可以看出,随着流量的增大,优化前后的模型导叶内旋涡面积均增大,流动分离状况愈加严重.优化前旋涡范围较大,阻塞流道,从而有较大流动损失,而优化后 $Q/Q_d=0.8$ 工况下旋涡基本消失,另 2 个工况下分离旋涡面积明显减小,流线分布更加平滑,流动损失减小.结果表明,与原模型相比,优化后的模型与导叶匹配程度更高,使导叶内水力损失减小,水力效率得到提高.

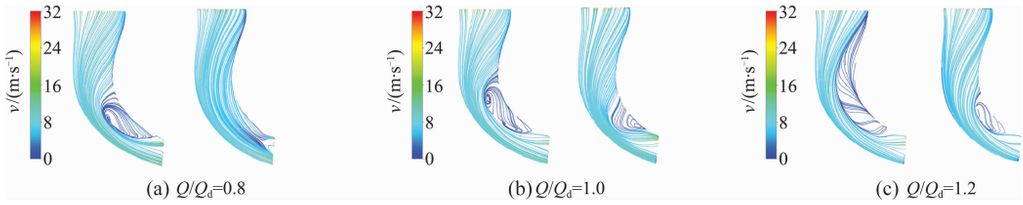


图 7　导叶表面流线分布图
Fig.7　Streamline on surface of guide vane

5　结　论

1) 极差分析结果表明,叶轮叶片出口角对扬程影响最大,叶片包角对效率影响最大,叶轮外径对扬程和效率的影响显著.

2) 在采用正交试验对模型泵进行的优化设计中,通过极差分析最终确定了最佳方案为 $A_4B_4C_4D_1$,即 $\beta_1=51°$, $\beta_2=66°$, $\varphi=130°$, $D_2=367$ mm,提高了扬程和效率,改善了叶轮和导叶内流态.

3) 通过对优化前后模型进行内部流动对比分析可知,优化后的模型叶轮和导叶内流体流态更好,水力损失减小,水力性能提高,表明高扬程导叶式混流泵正交试验优化可行,为其进一步的优化研究提供指导.

参考文献(References)

[1] 王俊,张永超,王达,等. 混流式核主泵内部复杂流动结构分析[J]. 流体机械,2017,45(10): 58-63.
WANG Jun, ZHANG Yongchao, WANG Da, et al. Analysis of internal flow structures in a mixed flow nuclear main pump [J]. Fluid machinery, 2017, 45(10): 58-63. (in Chinese)

[2] 高海司,裴吉,袁寿其,等. 蜗壳式混流泵叶轮部件湿模态流固耦合分析[J]. 流体机械,2018,46(1):46-51.
GAO Haisi,PEI Ji,YUAN Shouqi,et al. Fluid-structure coupling dynamic analysis for the impeller in a mix flow pump[J].Fluid machinery,2018,46(1): 46-51.(in Chinese)

[3] 贾瑞宣,徐鸿. 低比转速混流泵叶轮优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(2):98-102.
JIA Ruixuan, XU Hong. Optimal design of low specific speed mixed-flow pump impeller[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2010, 28(2): 98-102. (in Chinese)

[4] 张文武, 余志毅, 祝宝山, 等. 叶顶间隙对低比转速混流泵性能及内部流场影响的数值研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22):182-189.
ZHANG Wenwu, YU Zhiyi, ZHU Baoshan, et al. Study of tip clearance effects on performances and flow field of a low specific speed mixed-flow pump[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(22):182-189. (in Chinese)

[5] 翟杰, 祝宝山, 李凯, 等. 低比转数混流泵导叶内部压力脉动特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6):42-46.
ZHAI Jie, ZHU Baoshan, LI Kai, et al. Internal

pressure fluctuation characteristic of low specific speed mixed-flow pump[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(6):42-46. (in Chinese)

[6] 黎义斌, 李仁年, 王秀勇, 等. 低比转数混流泵压力脉动特性的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3):205-209.
LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical analysis of pressure fluctuation in low specific speed mixed-flow pump[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2013, 31(3):205-209. (in Chinese)

[7] MIYABE M, MAEDA H, UMEKI I, et al. Unstable head-flow characteristic generation mechanism of a low specific speed mixed flow pump[J]. Journal of thermal science, 2006, 15(2):115-120.

[8] 常书平, 王永生. 基于CFD的混流泵空化特性研究[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 171-175.
CHANG Shuping, WANG Yongsheng. Cavitation performance research of mixed flow pump based on CFD[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2012, 30(2): 171-175.(in Chinese)

[9] 王伟, 施卫东, 蒋小平, 等. 基于正交试验及CFD的多级离心泵叶轮优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(3): 191-197.
WANG Wei, SHI Weidong, JIANG Xiaoping, et al. Optimization design of multistage centrifugal pump impeller by orthogonal experiment and CFD[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34(3): 191-197. (in Chinese)

[10] 侯虎灿, 张永学, 李振林,等. 离心泵前置导叶的正交优化设计[J]. 工程热物理学报,2015, 36(12): 2618-2623.
HOU Hucan, ZHANG Yongxue, LI Zhenli, et al. Optimization design of inlet guide vane in a centrifugal pump based on orthogonal method[J]. Journal of engineering thermophysics, 2015, 36(12): 2618-2623. (in Chinese)

[11] 黄志辉,邹晔,魏昌洲,等. 基于正交试验及CFD的消防泵叶轮优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2016, 34(12): 1040-1044.
HUANG Zhihui, ZOU Ye, WEI Changzhou, et al. Optimization design based on orthogonal experiment and CFD on fire pump impeller[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34(12): 1040-1044.(in Chinese)

[12] 郑源, 孙奥冉, 杨春霞, 等. 轴流泵多目标优化正交试验[J]. 农业机械学报, 2017,48(9):134-141.
ZHENG Yuan, SUN Aoran, YANG Chunxia, et al. Multi-object optimization design and test of axial-flow pump[J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(9): 134-141.(in Chinese)

[13] 段小辉, 孔繁余, 赵瑞杰, 等. 基于正交试验的炉水循环泵导叶优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(7):580-586.
DUAN Xiaohui,KONG Fanyu,ZHAO Ruijie, et al. Optimization analysis of vaned-diffuser of boiler water circulation pump based on orthogonal experiment[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering,2018, 36(7):580-586.(in Chinese)

[14] ATIF A, BENMANSOUR S, BOIS G, et al. Numerical and experimental comparison of the vaned diffuser interaction inside the impeller velocity field of a centrifugal pump[J]. Science China technological sciences, 2011, 54(2):286-294.

[15] 王凯, 王文博, 刘厚林, 等. 多级离心泵叶轮与导叶的匹配特性[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(5): 392-398.
WANG Kai, WANG Wenbo, LIU Houlin, et al. Matching characteristic between impeller and bowl diffuser in multi-stage centrifugal pump[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016,34(5):392-398. (in Chinese)

(责任编辑 盛杰)