排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2014 年 8 月 Aug. 2014 | 第 32 卷 第 8 期 Vol. 32 No. 8
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.14.0024

两级离心泵径向导叶水力优化

曹卫东，刘光辉，刘冰
（江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）


曹卫东

摘要：为提高已有两级离心泵中径向导叶的水力性能，按照正交试验要求，选取径向导叶的喉部面积、扩散角、反导叶数、反导叶高度4个因素，每个因素取3个水平，设计9个导叶. 基于ANSYS CFX软件，选取 $k-\varepsilon$ 湍流模型，并结合全隐式耦合算法对装配具有不同几何参数径向导叶的两级泵全流场进行数值计算，获得了9组设计方案在额定工况下的扬程、效率. 以泵的扬程和效率作为试验指标，利用极差分析法分析了所选几何参数对于两级泵扬程、效率的影响规律，以及影响径向导叶性能的主要因素和次要因素，提出了性能较优的径向导叶方案. 径向导叶喉部面积对两级泵的扬程、效率影响较大. 经数值计算可得，较优方案的额定工况下的扬程为211.70 m，效率为47.63%，较之优化前的径向导叶，扬程提高了1.24 m，效率提高了4.00%，取得了较好的优化效果.

关键词：两级离心泵；径向导叶；优化设计；正交试验；极差分析；数值计算
中图分类号：S277.9；TH311　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2014)08-0663-06

曹卫东，刘光辉，刘冰. 两级离心泵径向导叶水力优化[J]. 排灌机械工程学报，2014，32(8)：663-668.

Cao Weidong，Liu Guanghui，Liu Bing. Hydraulic optimization of radial guide vanes in two-stage centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME)，2014，32(8)：663-668.（in Chinese）

Hydraulic optimization of radial guide vanes in two-stage centrifugal pump

Cao Weidong，*Liu Guanghui*，*Liu Bing*
（National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China）

Abstract：In order to improve the hydraulic performance of radial guide vanes in two-stage centrifugal pumps，four factors of guide vane including the area of throat，diffuser angle，back vanes numbers and height of back vanes were selected to meet the $L_9(3^4)$ orthogonal experiment requirements，so nine different guide vanes were designed. Based on ANSYS CFX，the whole flow field of two-stage pump was simulated by using the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and the fully implicit coupled algorithm. The heads and efficiencies of nine design schemes were obtained. The head and efficiency was selected as the criterion of the test，the effects of geometrical parameters on heads and efficiencies were studied by using orthogonal test method，and the primary and secondary factors of the design parameters were all analyzed by ways of variance analysis. The area of guide vanes throat has great effect on two-stage pump performance. According to the test results，an optimum scheme was put forward. The simulation results of the optimum scheme show that the head of the pump at rated flow point is of 211.70 m and the efficiency is of 47.63%. Compared to the original radial guide vane，the head and efficiency are significantly improved by 1.24 m and 4.00% respectively.

收稿日期：2014-03-06；**网络出版时间**：2014-07-19
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.14.0024.html
基金项目：江苏省自然科学基金资助项目(BK20131256)；江苏高校优势学科建设工程资助项目
作者简介：曹卫东(1972—)，男，江苏南通人，副研究员(cwd@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械水动力学研究.
刘光辉(1987—)，男，湖南娄底人，硕士研究生(767586965@qq.com)，主要从事流体机械优化设计研究.

Key words: two-stage centrifugal pump; radial guide vanes; optimization design; orthogonal test; variance analysis; numerical simulation

多级离心泵因扬程高、体积小等优点广泛应用于农业、矿业、电力等领域,提高多级离心泵的使用性能有着重要的作用. 近年来,诸多学者针对多级离心泵中轴向力平衡[1-3],转子动力学[4-5]等相对突出的问题展开了相关研究. 径向导叶作为多级离心泵中重要的过流部件,负责收集上一级叶轮中的液体,并使液体以一定的速度和环量进入下一级叶轮[6],导叶的性能对于整泵的性能有着重要的影响. 部分学者对导叶内部流场展开了相关的研究,研究表明导叶内部的涡流是降低泵水力效率的主要因素[7-9]. 为了得到导叶内较好的流场分布,部分学者对导叶内的关键参数进行了研究[10-12],发现导叶的喉部面积、进口安放角、扩散角等参数对导叶的性能有较大影响,并有学者选取单个参数进行了优化,但对径向导叶水力性能同时进行多因素的优化研究比较少.

正交试验设计是研究多因素多水平的一种设计方法,它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了均匀分散,齐整可比的特点,是一种高效率、快速、经济的试验设计方法[13]. 目前正交试验法在水泵优化设计中已有应用[14-16],并取得了很好的效果,具有一定的科学性. 文中将采用正交试验设计法对BQS35-200/2-55/N型矿用潜水泵径向导叶进行优化设计,运用较为成熟的数值模拟方法,探究径向导叶几何参数对整泵能量特性的影响,并提出性能较优的径向导叶设计方案.

1 正交试验设计

BQS35-200/2-55/N型矿用潜水泵设计流量 $Q=35\ \mathrm{m^3/h}$,设计扬程 $H=200\ \mathrm{m}$,转速 $n=2\ 980\ \mathrm{r/min}$,采用两级叶轮,配套功率55 kW. 叶轮主要水力尺寸:外径 $D_2=280\ \mathrm{mm}$,出口宽度 $b_2=10\ \mathrm{mm}$,叶片出口安放角 $\beta_2=27°$,叶片数 $Z=4$. 导叶主要水力尺寸:基圆 $D_3=290\ \mathrm{mm}$,外径 $D_4=370\ \mathrm{mm}$,正导叶叶片数为5. 泵的具体结构如图1所示.

径向导叶中关键的几何参数主要有正导叶进口安放角 α_3、喉部面积 F_3、扩散角 ϕ、反导叶进口安放角 α_5、反导叶高度 b_5、反导叶叶片数 Z_2、反导叶出口安放角 α_6 等.

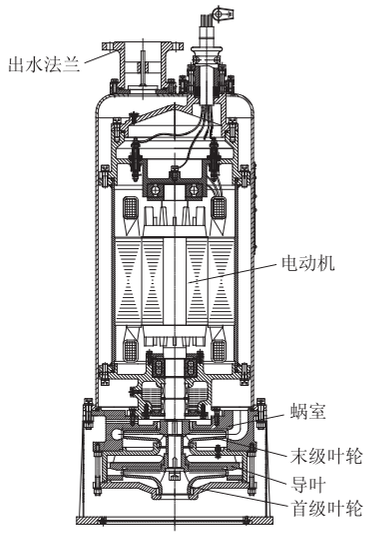


图1 整泵结构

Fig. 1 Profile of pump

由于该泵运行流量较小,因而出口绝对液流角较小,应当设计较小的正导叶进口安放角,而对于喉部面积的设计,通常根据面积比原理来确定,Anderson针对普通离心泵定义面积比系数 Y:

$$Y=\frac{\text{叶轮叶片间的出口面积}}{\text{泵体喉部面积}}. \tag{1}$$

但根据文献[17]中所统计得到的面积比系数与比转数之间的关系来确定导叶喉部面积仍有一定的不确定性,故文中首先将喉部面积 F_3(径向高度×宽度)作为试验研究因素之一;流体流经扩散段时,过流断面面积增大,因而流速相应地逐渐降低,增加压能,扩散角的大小则可能对于流动水力损失有较大影响,故将扩散角 ϕ 作为试验研究因素之二;反导叶进口安放角通常可由进口液流角求得,出于对矿用潜水泵的轴向尺寸特别是正反导叶过渡面积比值的考虑,故将反导叶高度 b_5 作为试验因素之三;反导叶叶片数对于消除流场内旋涡、降低流动损失同样起到重要作用,但其具体数量的优劣尚未有依据可循,故将反导叶叶片数 Z_2 作为试验因素之四. 考虑到反导叶出口安放角 α_6 对次级叶轮的进口流场产生的影响,为了降低次级叶轮进口预旋,按照常规选取为90°. 现选取 F_3,ϕ,b_5,Z_2 作为试验因素,且分别用代号A,B,C,D表示,选择因素水平如表1所示. 根据 $L_9(3^4)$ 正交表,确定试验方案如表2所示.

表 1　正交试验因素水平
Tab. 1　Factor level in orthogonal test

水平	A	B	C	D
	F_3/mm^2	ϕ/(°)	b_5/mm	Z_2
1	7.5×15	2	15	5
2	12.0×15	5	20	6
3	15.0×15	8	25	7

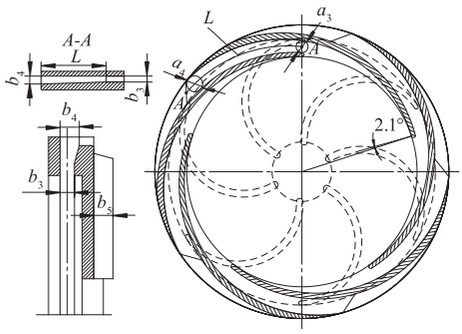
表 2　试验方案
Tab. 2　Test scheme

试验序号	A	B	C	D	相应参数			
					F_3/mm^2	ϕ/(°)	b_5/mm	Z_2
1	A_1	B_1	C_1	D_1	7.5×15	2	15	5
2	A_1	B_2	C_2	D_2	7.5×15	5	20	6
3	A_1	B_3	C_3	D_3	7.5×15	8	25	7
4	A_2	B_1	C_2	D_3	12.0×15	2	20	7
5	A_2	B_2	C_3	D_1	12.0×15	5	25	5
6	A_2	B_3	C_1	D_2	12.0×15	8	15	6
7	A_3	B_1	C_3	D_2	15.0×15	2	25	6
8	A_3	B_2	C_1	D_3	15.0×15	5	15	7
9	A_3	B_3	C_2	D_1	15.0×15	8	20	5

2　水力模型与数值计算

2.1　导叶结构

图 2 为径向导叶结构图.



(a) 二维视图



(b) 实体模型

图 2　径向导叶结构图
Fig. 2　Profile of radial guide vane

依据设计参数对径向导叶分别进行水力设计，在 UG 中进行三维造型，其水力模型与实体造型如图 2 所示. 其中，b_3 为导叶进口轴面宽度；b_4 为正导叶叶片出口宽度；b_5 为反导叶叶片宽度；a_3 为导叶喉部平面宽度；a_4 为导叶出口平面宽度；L 为扩散段长度. 扩散段进口喉部面积 $F_3 = a_3 b_3$，扩散段出口面积 $F_4 = a_4 b_4$，扩散角按式(2)[6]确定：

$$\phi = 2\arctan[(\sqrt{F_4/\pi} - \sqrt{F_3/\pi})/L]. \quad (2)$$

2.2　CFD 分析方法

根据两级泵具体的结构尺寸与形式完成整泵水体的造型. 由于该泵为内装式隔爆式潜水泵，流体经蜗室流出后充满隔爆外壳与电动机的间隙，最终流出出水法兰，该部分水体较多，但其流速较小，因而水力损失较小，且其对计算结果的影响较小，故将该部分水体省略. 最终全流场包括进口段水体、首级和末级的叶轮水体、泵腔水体、口环间隙水体、双蜗壳水体以及末端泄压水体. 图 3 为模拟该泵的计算区域，为了得到稳定的进口和出口流动状态，对进口部分和出口部分水体进行了适当延伸.

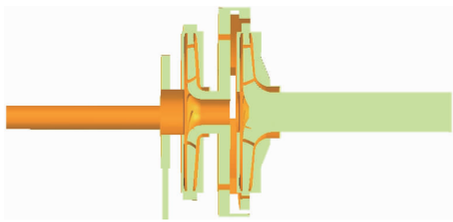


图 3　计算区域
Fig. 3　Computational domain

网格的数量与质量对于计算结果的准确性有着重要的影响，利用 ICEM CFD 软件对全流场进行结构网格划分，并对固体壁面处网格进行适当加密，总体网格质量在 0.3 以上；通过增加网格数量的方法降低网格数对计算结果准确性的影响，但过多的网格数会相应地增加计算机的计算时间，因此也不宜选用过多的网格数. 文中以额定工况点的外特性作为指标，对比不同网格数下的计算结果，作为对计算准确性的判断. 图 4 为网格节点数对外特性的影响，从图中可看出，当网格节点数 N 在 400 万以上时，泵的扬程和模拟效率(未考虑机械效率)的变化较小，文中选取总网格节点数为 420 万，图 5 为结构网格划分结果.

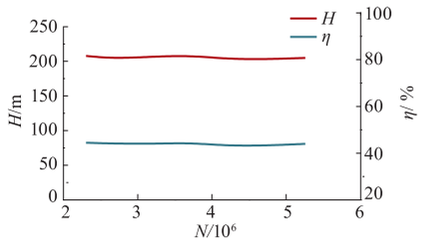


图 4　网格节点数对外特性的影响
Fig. 4　Influence of grids number on pump characteristics

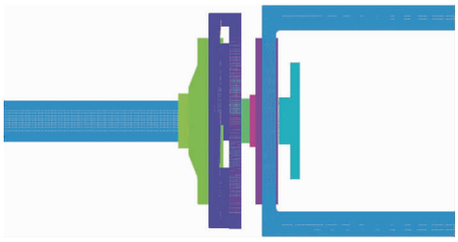


图5 结构网格
Fig. 5 Computational grids

将网格导入CFX软件中进行数值计算,设定整个流道内部的流场为三维不可压稳态黏性湍流流场,建立相对坐标系下时均连续方程和动量方程.采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,全隐式耦合算法,设定叶轮旋转速度为2 980 r/min,叶轮水体处于运动坐标系,其余水体均处于固定坐标系,两者在交界面耦合,其中泵腔水体中与叶轮前后盖板接触面设置为旋转面,转速同叶轮转速.边界条件设为速度进口,压力出口,并假设出口流动为充分发展.固体壁面为无滑移边界条件,近壁区采用标准壁面函数,设定收敛精度为 10^{-5}.

3 结果与分析

经CFD数值计算,得到表2设定的9个试验方案的模拟结果,将扬程和效率作为试验指标,在额定工况 $Q=35\ m^3/h$ 时,9个导叶方案的扬程、效率的数值模拟结果如表3所示.为了确定所选因素对泵性能的影响,找到主要因素及优化方案,对正交试验结果进行极差分析,结果如表4所示,其中 H 为扬程;η 为模拟效率(未考虑机械效率);K_1,K_2,K_3 分别为相应水平下的试验指标之和;$\bar{K}_1$,$\bar{K}_2$,$\bar{K}_3$ 分别为相应水平下试验指标的平均值.

表3 外特性模拟结果
Tab. 3 Simulation result of pump characteristics

试验序号	H/m	η/%
1	210.54	46.14
2	211.51	47.11
3	210.21	46.25
4	211.15	44.93
5	209.44	44.47
6	207.47	44.86
7	207.08	43.73
8	205.04	43.10
9	206.94	43.84

从表4极差分析中可看出,各列的极差 R 是不相等的,这说明所选试验因素的水平改变对试验结果的影响是不相同的.极差越大,表示该列因素的数值在试验范围内的变化会导致试验指标在数值上有更大的变化,因此极差最大的一列,即因素的水平对试验结果影响最大的因素,就是最主要的因素.经极差分析,对比得到了所选水力几何参数对多级泵的扬程和效率影响的主次顺序,分别为 F_3,b_5,ϕ,Z_2 和 F_3,b_5,Z_2,ϕ.各因素下的水平对于多级泵的性能的影响按主次顺序自上而下列出,如表5所示.

表4 极差分析
Tab. 4 Range analysis

试验指标		A	B	C	D
H	K_1	632.26	628.78	623.05	626.93
	K_2	628.07	625.99	629.6	626.07
	K_3	619.07	624.63	626.74	626.40
	$\bar{K}_1$	210.75	209.59	207.68	208.97
	$\bar{K}_2$	209.35	208.66	209.86	208.68
	$\bar{K}_3$	206.35	208.21	208.91	208.80
极差	R_H	4.40	1.38	2.18	0.28
η	K_1	139.50	134.80	134.11	134.45
	K_2	134.26	134.68	135.88	135.71
	K_3	130.67	134.95	134.45	134.28
	$\bar{K}_1$	46.50	44.93	44.70	44.81
	$\bar{K}_2$	44.75	44.89	45.29	45.23
	$\bar{K}_3$	43.56	44.98	44.82	44.76
极差	R_η	2.94	0.09	0.59	0.47

表5 因素对性能影响的主次顺序
Tab. 5 Primary and secondary factors of pump characteristics

试验指标							
H				η			
A_1	B_1	C_2	D_1	A_1	B_3	C_2	D_2
A_2	B_2	C_3	D_3	A_2	B_1	C_3	D_1
A_3	B_3	C_1	D_2	A_3	B_2	C_1	D_3

从表5中可看出,因素A对于多级泵的扬程和效率的影响主次顺序一致,同为 A_1,A_2,A_3,故可选择水平 A_1 作为优化结果,而因素B对多级泵的扬程和效率的影响规律却不一致,因素C对于多级泵的扬程和效率的影响主次顺序一致,同为 C_2,C_3,C_1,故可选择水平 C_1 作为优化结果,而因素D对多级泵的扬程和效率的影响规律却不一致.为了分析某一因素对于多级泵扬程和效率的相对影响程度,现定义相对影响指数为

$$E=100\%\cdot 3R/(\bar{K}_1+\bar{K}_2+\bar{K}_3), \qquad (3)$$

式中:R 为极差.E 值越大,则说明该因素对多级泵某方面性能相对影响程度越大.因素B和因素D对于多级泵扬程和效率的相对影响指数分别为 $E_{B-H}=2.11\%$,$E_{B-\eta}=0.20\%$ 和 $E_{D-H}=0.13\%$,$E_{D-\eta}=1.05\%$.$E_{B-H}>E_{B-\eta}$,说明因素B对多级泵扬程的影响比对效率的影响更为明显,故优先选取对于扬程影响关键的水平规律,为 B_1,B_2,B_3;$E_{D-\eta}>E_{D-H}$,

说明因素 D 对于多级泵效率的影响比对扬程的影响更为明显,故优先选取对于效率影响关键的水平规律,为 D_2,D_1,D_3. 综上分析,可得所选参数中最优的因素组合为 A_1,B_1,C_2,D_2.

4　试验验证

为进一步验证优化方案的效果,根据正交试验所得到的优化方案制作新的径向导叶,进行外特性试验. 由于矿山中装置扬程较高,故将流量为 21 ~ 49 m^3/h 的 5 个相对较小流量运行工况下的数值计算结果与试验结果作对比. 对比结果如图 6 所示. 优化后多级泵额定工况下试验的扬程为 205.45 m,机组效率为 34.03%;数值计算所得额定工况的扬程为 211.70 m,泵效率为 47.63%,数值计算与试验的扬程相对误差为 3.04%. 对于效率而言,由于试验所得的为机组效率,若按照标准 MT671—2006 规定配套潜水电动机效率约为 85.00%,机组效率模拟值为 40.48%,但此时依然未考虑内装式的电泵结构导致的水力损失以及模拟误差等,数值模拟结果略高于试验值,但性能曲线趋势基本一致. 优化之前的原始方案为第 5 组方案,数值计算额定工况的扬程为 210.46 m,泵效率为 43.63%,文中的优化使得多级泵扬程提高了 1.24 m,泵效率提高了 4.00%.

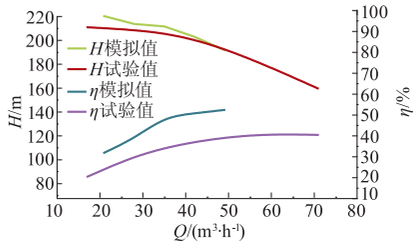


图 6　性能曲线

Fig. 6　Curves of pump performance

5　结　论

以两级叶轮的潜水泵为研究对象,经数值模拟和试验验证,综合得到径向导叶中所选各参数对于多级泵能量特性的影响.

1) 所选参数对多级泵扬程影响的主次顺序依次为:喉部面积、反导叶高度、扩散角、反导叶数;所选参数对于多级泵效率影响的主次顺序依次为:喉部面积、反导叶高度、反导叶数、扩散角.

2) 喉部面积对于径向导叶的水力性能有重要的影响,在径向导叶的设计中需尤为重视. 正交数值计算试验对于径向导叶的优化设计具有一定参考价值.

参考文献(References)

[1] 何玉杰,周广凤,潘金秋,等. 海水淡化多级泵轴向力试验[J]. 排灌机械,2009,27(2):105 - 110.
He Yujie, Zhou Guangfeng, Pan Jinqiu, et al. Experiment for axial thrust of multi-stage pump for seawater desalination [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009,27(2):105 - 110. (in Chinese)

[2] 胡敬宁,潘金秋,杨孙圣,等. 海水淡化用高压泵轴向力数值模拟计算与试验对比[J]. 流体机械,2006,18(3):47 - 50.
Hu Jingning, Pan Jinqiu, Yang Sunsheng, et al. Axial thrust numerical calculation compared with experimental result of high pressure pump for seawater desalination [J]. Fluid Machinery, 2006,18(3):47 - 50. (in Chinese)

[3] 马旭丹,吴大转,王乐勤. 多级离心泵轴向力平衡装置的设计与分析[J]. 农业工程学报,2010,26(8):108 - 112.
Ma Xudan, Wu Dazhuan, Wang Leqin. Design and analysis of an axial thrust balancing device for multistage centrifugal pumps[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 108 - 112. (in Chinese)

[4] 孔繁余,王婷,张洪利. 基于流场数值模拟的多级泵转子动力学分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2011,32(5):516 - 521.
Kong Fanyu, Wang Ting, Zhang Hongli. Rotor dynamic analysis of multistage pump based on numerical simulation of flow field[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2011,32(5):516 - 521. (in Chinese)

[5] 平仕良,吴大转,谭善光,等. 大功率高压多级离心转子动力学分析[J]. 工程热物理学报,2010,31(7):1135 - 1138.
Ping Shiliang, Wu Dazhuan, Tan Shanguang, et al. Rotor dynamic analysis on high-power high-pressure multistage centrifugal pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(7): 1135 - 1138. (in Chinese)

[6] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011:314 - 324.

[7] 胡泽明,陈学纯. 离心泵导叶扩散段内湍流计算[J]. 石油大学学报:自然科学版,1993,17(3):52 - 57.

Hu Zemin, Chen Xuechun. Turbulent simulation in guide vane diffuse section of centrifugal pump [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1993, 17(3): 52 – 57. (in Chinese)

[8] 汪家琼,孔繁余. 多级离心泵叶轮与导叶水力性能优化研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2013,41(3):92 – 96.
Wang Jiaqiong, Kong Fanyu. Hydraulic performance optimization study on impeller and diffuser of multi-stage centrifugal pump [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(3): 92 – 96. (in Chinese)

[9] 张学静, 李德明. 多级导叶式离心泵导叶内部 CFD 计算分析[J]. 甘肃科学学报,2006,18(3):47 – 50.
Zhang Xuejing, Li Deming. The calculation and analysis of multistage diffuser in centrifugal pump using CFD [J]. Journal of Gansu Sciences, 2006, 18(3): 47 – 50. (in Chinese)

[10] 薛睿,李家文,唐飞. 多级泵级间导叶的优化与数值仿真[J]. 火箭推进,2011,37(5):24 – 29.
Xue Rui, Li Jiawen, Tang Fei. Optimization and numerical simulation for interstage crossover of multistage pump [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(5): 24 – 29. (in Chinese)

[11] 崔宝玲,孟嘉嘉,贾晓奇. 基于 CFD 技术的多级潜水泵优化设计[J]. 农业机械学报,2012,43(11):142 – 146.
Cui Baoling, Meng Jiajia, Jia Xiaoqi. Optimization design of multi-stage submersible pump based on CFD[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 142 – 146. (in Chinese)

[12] 秦杰, 徐士鸣. 导叶结构对核主泵性能的影响[J]. 发电设备,2010(5):315 – 318.
Qin Jie, Xu Shiming. Influence of guide vane structure on performance of reactor coolant pumps[J]. Journal of Power Equipment, 2010(5): 315 – 318. (in Chinese)

[13] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009:59 – 67.

[14] 王洪亮,施卫东,陆伟刚,等. 深井离心泵的水力设计和二次回归正交试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(6):479 – 483.
Wang Hongliang, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Hydraulic design and quadratic regression orthogonal experiment of deep well centrifugal pumps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(6): 479 – 483. (in Chinese)

[15] Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Numerical investigations and performance experiments of a deep-well centrifugal pump with different diffusers[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7): 071102.1 – 071102.8.

[16] 沈艳宁,袁寿其,陆伟刚,等. 复合叶轮离心泵数值模拟正交试验设计方法[J]. 农业机械学报,2010,41(9):22 – 26.
Shen Yanning, Yuan Shouqi, Lu Weigang, et al. Orthogonal test design method based on numerical simulation for non-overload centrifugal pump with complex impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 22 – 26. (in Chinese)

[17] 张俊达. 面积比系数的统计[J]. 水泵技术,1991(2): 28 – 29.
Zhang Junda. Statistics for area ratio coefficient [J]. Pump Technology, 1991(2): 28 – 29. (in Chinese)

(责任编辑 朱滑云)