

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.016

轴流泵多目标优化正交试验

郑源¹ 孙奥冉² 杨春霞³ 蒋文青³ 周灿华⁴ 陈宇杰²

(1. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098;
3. 河海大学能源与电气学院, 南京 210098; 4. 江苏省江都水利工程项目管理处, 扬州 225200)

摘要: 为了整体提高轴流泵的水力优化设计水平, 找出影响轴流泵性能的主要几何参数, 运用正交试验方法, 以扬程、效率、轴功率和压力脉动作为试验评判指标, 将综合频率分析法应用到轴流泵多目标优化设计中。基于 $L_9(3^4)$ 正交表得到了 9 组方案, 研究叶片数、翼型、轮毂比和叶片与导叶间距离对轴流泵的扬程、效率、轴功率和压力脉动的影响规律, 并通过综合频率分析法确定了一组最佳试验方案。结果表明: 该最佳试验方案在设计流量下, 水流在叶轮及导叶段中的流态较好, 水流流线顺畅, 分布相对均匀; 轴流泵模型在流量和扬程满足改型要求的同时, 效率提高了 5.7%; 轴功率下降了 1.21%; 压力脉动系数降低了 11%, 验证了综合频率分析法在多目标正交优化中的可行性。

关键词: 轴流泵; 多目标优化; 正交试验; 综合频率分析法

中图分类号: TH312 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)09-0129-08

Multi-objective Optimization Design and Test of Axial-flow Pump

ZHENG Yuan¹ SUN Aoran² YANG Chunxia³ JIANG Wenqing³ ZHOU Canhua⁴ CHEN Yujie²

(1. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China
3. College of Energy and Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China
4. Jiangsu Province Jiangdu Water Conservancy Project Management Office, Yangzhou 225200, China)

Abstract: The object is to improve the hydraulic performance of the axial-flow pump and find out the main geometric parameters that affect the performance of axial-flow pump. Based on the $L_9(3^4)$ orthogonal experiment, number of blades, airfoil seating angle, hub ratio, the distance between the blade and guide vane were selected as test factors, and each experimental factor corresponded to three levels. Using orthogonal test method, the head, efficiency, shaft power and pressure pulsation were taken as the evaluation indexes. According to the results of intuitive analysis and range analysis, the best experimental scheme was determined by comprehensive frequency analysis. The results showed that hub ratio had the greatest influence on the four test evaluation indexes and the distance between blade and guide vane had the least effect. Under the optimum test plan, the flow regime was better, the whirlpool on the back of guide vane almost disappeared and the streamline on the blade surface distributed evenly. After optimization, the high pressure area of the blade surface disappeared basically, and the pressure distribution was more uniform, and the optimization effect was better. Compared with the original model, the optimized model of axial-flow pump in the flow and head satisfied requirement for module at the same time, under the new design flow, efficiency was increased from 74.33% to 78.59%, which was increased by 5.7%; shaft power was decreased from 20.54 kW to 20.29 kW, which was fallen by 1.21%; pressure pulsation coefficient absolute value was decreased from 0.344 to 0.310, which was reduced by 11%. Four evaluation indexes were achieved and the optimized model of axial-flow pump had a wide range of efficient area and the feasibility of comprehensive frequency analysis method in multi-objective orthogonal optimization was verified.

Key words: axial-flow pump; multi-objective optimization; orthogonal experiment; comprehensive frequency analysis method

收稿日期: 2017-03-20 修回日期: 2017-04-17
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51339005)、国家自然科学基金面上项目(51579080)和安徽省自然科学基金面上项目(1608085ME119)
作者简介: 郑源(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事流体机械及水利水电工程研究,E-mail: zhengyuan@hhu.edu.cn

引言

轴流泵在农田灌溉和调水工程中有着广泛的应用^[1]。轴流泵内部的流动状态十分复杂,其复杂的流动状态导致泵内出现压力脉动现象,进而影响机组的稳定运行^[2-3]。因此,在轴流泵流量、扬程、效率和轴功率满足设计要求的前提下,提高轴流泵机组运行的稳定性是未来水泵优化设计的一项重要任务。

石丽建等^[4]通过改变叶轮的几何设计参数,采用数值模拟对轴流泵进行多工况优化设计,结果表明,轴流泵在非设计工况下的运行效率显著提高,拓宽了轴流泵高效区范围。杨帆等^[5]研究了可调后置导叶对轴流泵水力性能的影响,结果发现通过调节后置导叶可改善导叶体内水流流态,达到了减弱甚至消除进口冲角及尾部脱流等不良流态的目的,从而提高泵装置的水力效率。王秀勇等^[6]为提高核主泵整机水力性能,以 AP1000 型核主泵为研究对象,选取导叶进口角冲角等为正交试验因素,优化后的模型较原模型的扬程和效率增加显著。为了优化旋流泵的水力性能,采用正交试验方法,分别选取了不同的试验因素对旋流泵叶轮进行优化设计,找出了影响旋流泵性能的主要结构参数,结果表明,正交优化结合数值模拟可大大减少工作量,优化后的旋流泵模型扬程和效率都有显著提高,验证了正交试验在泵优化设计方面的可行性^[7-9]。司乔瑞等^[10]将叶频噪声声压级作为判断离心泵设计水平的其中一项指标,在正交试验的基础上借助计算流体力学和计算声学的数值模拟方法,并通过权矩阵分析得出了一组最佳的离心泵几何参数组合。

上述研究主要集中在将泵的流量和扬程作为优化的考察指标^[11-13],但到目前为止,将泵的稳定性作为其中一项考察指标的文献还较少。本文以某低扬程轴流泵为研究对象,研究叶片数、翼型、轮毂比和叶片与导叶间距离对轴流泵装置的扬程、轴功率、效率和压力脉动的影响,以期寻找一种高效稳定的轴流泵水力优化设计方法。

1 多指标正交试验理论

1.1 多指标正交试验优化方法

传统的水泵优化方法主要是将多目标优化转换为单指标分析,靠设计者的经验对已有的水泵模型参数进行修改,这种优化设计方法工作量大、效率低。正交试验设计是利用一套规格正交表,安排试验,通过部分试验了解全面试验的情况寻找试验因

素对轴流泵各指标的影响规律及主次顺序,确定轴流泵的最优设计参数组合^[14]。

通常情况下,在分析所选取试验因素对试验指标的影响时,如果是单指标,且不考虑试验因素间的相互作用,则正交试验所选取的各试验因素最好的水平组合被认为是最佳的几何因素组合。但本次优化选取了多个评判指标,属于多指标正交试验,需要综合考虑因素水平对试验评判指标影响的主次,且最佳的试验方案并不一定在所设计的几组试验中。因此,本文采用综合频率分析法来确定最佳试验方案,其确定最佳试验方案的方法为:如果多指标正交试验的评判指标具有同等权重,则按照因素水平频率出现的高低排序,优先选择出现频率高的因素水平;若因素水平具有相同的频率,则根据生产成本高低及操作的难易程度来确定顺序^[15]。

1.2 试验方案的确定

(1)确定考察指标,明确试验目的。试验目的是提高轴流泵水力性能,选取了 4 个试验评判指标:扬程、效率、轴功率和压力脉动,在水泵优化中,扬程是设计参数,属于判据性指标。

(2)设计因素水平表。根据轴流泵结构设计要求^[16],本次试验选择对轴流泵性能具有显著影响的叶片数(因素 A)、翼型(因素 B)、轮毂比(因素 C)和导叶与叶片间的距离(因素 D)4 个因素进行正交试验,每个因素选取 3 个水平。

(3)制定正交表,进行正交试验。根据正交试验原理,设计四因素三水平正交试验方案 $L_9(3^4)$,如表 1 所示,探索这 4 个试验因素对轴流泵性能及稳定性的影响规律。

表 1 正交试验方案
Tab.1 Orthogonal experiment scheme

试验 序号	试验因素			
	叶片数	翼型	轮毂比	导叶与叶片之间
	A	B	C	距离 D/mm
1	3	翼型 1	0.45	175
2	3	翼型 2	0.47	210
3	3	翼型 3	0.49	263
4	4	翼型 1	0.47	263
5	4	翼型 2	0.49	175
6	4	翼型 3	0.45	210
7	5	翼型 1	0.49	210
8	5	翼型 2	0.45	263
9	5	翼型 3	0.47	175

其中各断面翼型安放角的变化如图 1 所示,其中相对半径为叶片截面上某点的半径与转轮室半径的比值。

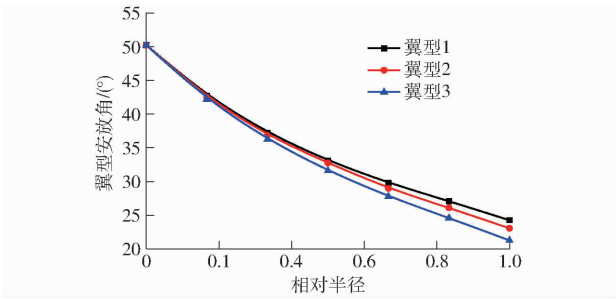


图 1 各断面翼型安放角变化

Fig. 1 Changes of airfoil seating angle for each section

2 数值计算

2.1 计算域及网格

江都一站、二站经过多年的运行,运行工况已经发生变化,为了解决其长期偏离设计工况运行的问题,研究适合现行运行工况条件的水泵模型,需要对 2 座泵站的轴流泵模型进行优化。本文中轴流泵原始模型基本参数如下:设计流量 $Q = 298.6 \text{ L/s}$,设计扬程 $H = 6.8 \text{ m}$,转速 $n = 1\,461 \text{ r/min}$,叶片数 $Z = 4$ 。改型要求是设计流量在原来基础上提高 10%,即新的设计流量 $Q = 328.5 \text{ L/s}$,新的设计扬程增大为 7.8 m 。计算域包括弯肘型进水流道段、叶轮、导叶、出水弯管和虹吸式出水流道段,如图 2 所示。

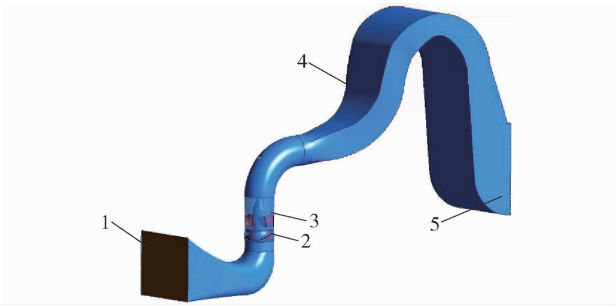


图 2 轴流泵的计算域

Fig. 2 Calculation domain of axial-flow pump

1. 上游进口 2. 叶轮 3. 导叶 4. 虹吸式出水流道 5. 下游出口

采用 ICEM CFD 软件对计算域进行网格划分,考虑到整个模型几何形状复杂且不规则,故采用适应性较强的非结构化网格。为提高数值模拟的准确性,对轴流泵的叶片和导叶部分进行局部加密。并添加边界层网格,将边界层厚度无量纲系数 γ_{plus} 控制在 300 以内。进行网格无关性验证,考虑到相同的收敛精度 (10^{-5}),网格数大于 320 万时,扬程的相对差值在 1% 以内,综合考虑计算精度与节省计算机资源,确定最终计算网格数为 321 万左右。

2.2 计算方法及边界条件

采用 ANSYS CFX 软件对 9 个试验方案进行全流道数值模拟计算,选择广泛应用于流体机械外特性预测的 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型^[17-18]。该模型考虑

了紊动速度比尺和紊动长度比尺的输运,因而能确定各种复杂水流的长度比尺分布,能精确地描述许多流动的物理过程,在流体机械中具有较好的通用性^[19]。为了实现交界面上数据的传递,在定常计算时,将动静交界面设置为冻结转子类型;非定常计算时,将动静交界面设置为瞬态冻结转子类型^[20]。忽略泵体和叶轮之间的微小间隙引起的流量损失。确定本次计算区域的进、出口为轴流泵的进水流道进口和出水流道出口。进口采用质量流量边界条件,出口采用自由出流边界条件。在定常数值计算时,计算残差设置为 10^{-5} ,同时对扬程和效率设置监测点。当扬程、效率的监测曲线趋于稳定且残差满足设置的精度时,认为计算满足要求。

非定常求解时,时间步长为 $3.42 \times 10^{-4} \text{ s}$,即每个时间步长内叶轮旋转 3° 。为了更好地获取轴流泵内部压力脉动信息,在叶轮进出口和导叶的中部及出口处设置了 4 组压力脉动监测点,如图 3 所示。为保证非定常压力脉动计算的准确性及节约计算机资源,本文非定常计算采样时间为 8 个周期,即叶轮旋转 8 圈,并取最后 2 个周期的结果作为压力脉动特性分析的数据。

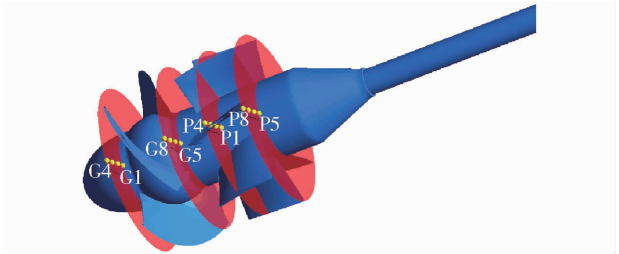


图 3 轴流泵内部监测点设置

Fig. 3 Set of axial-flow internal monitoring points

2.3 数值计算结果

对 9 种不同方案在设计流量点处的轴流泵装置进行计算。参照前人研究及本次计算结果可知,轴流泵内的压力脉动主要是由叶片与导叶的动静干涉作用产生的,压力脉动幅值在叶轮出口处最大,因此,选用叶轮出口的计算结果作为本次优化的压力脉动评判数据。通过数值计算得到了轴流泵内部各监测点的压力脉动时域信息,定义一个无量纲的压力脉动系数 C_p 来描述各监测点的压力脉动特性,其表达式为

$$C_p = \left| \frac{p_i - p_{avg}}{p_{avg}} \right| \tag{1}$$

式中 C_p ——无量纲压力脉动系数
 p_i ——监测点在某一时刻静压,Pa
 p_{avg} ——1 个转动周期内静压平均值,Pa
9 种试验方案下的计算结果如表 2 所示。

表 2 设计流量点处数值模拟结果

Tab.2 Summary of design flow numerical simulation results

试验 序号	试验评判指标			
	扬程 H/m	轴功率 P/kW	效率 $\eta/\%$	C_p
1	6.42	14.92	72.12	1.19
2	6.58	16.64	78.47	1.16
3	5.59	13.09	72.66	1.11
4	8.01	20.29	78.59	0.31
5	6.70	15.67	72.56	0.80
6	6.90	16.74	75.28	0.74
7	7.48	17.58	72.94	0.53
8	7.72	18.47	74.25	0.99
9	7.70	19.76	79.65	0.34

3 优化设计

根据数值模拟计算结果,对正交试验的 4 个考察指标进行分析。先对每个考察指标进行单指标的直观分析,然后再利用直观分析结果进行极差分析,最终,根据直观分析与极差分析得到的结果运用综合频率分析法进行分析,确定最佳试验方案。

表 3 试验结果的极差分析

Tab.3 Range analysis of test results

参数	扬程 H/m				效率 $\eta/\%$				轴功率 P/kW				C_p			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
K_1	18.59	21.91	21.04	20.82	223.25	223.65	221.65	224.33	44.65	52.79	50.13	50.35	3.46	2.03	2.92	2.33
K_2	21.61	21.00	22.29	20.96	226.84	225.28	236.71	226.69	52.70	50.78	56.69	50.96	1.85	2.95	1.81	2.43
K_3	22.90	20.19	19.77	21.32	226.43	227.59	218.16	225.50	55.81	49.59	46.34	51.85	1.86	2.19	2.44	2.41
极差 R	1.43	0.57	0.84	0.17	1.19	1.31	6.18	0.78	3.72	1.07	3.45	0.50	0.53	0.46	0.37	0.03

通过极差分析可得,各因素对 4 个评判指标的影响程度不同,为直观显示各因素水平对评判指标的影响,以因素水平为横坐标,各评判指标为纵坐标,得到如图 4~7 所示的水平指标关系。

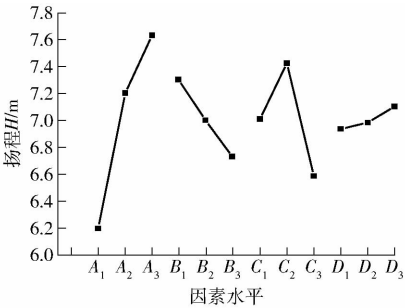


图 4 各因素水平与扬程指标关系

Fig.4 Relationship between level of each factor and head

通过图 4~7 可知,在设计流量工况下,叶片数(因素 A)的影响为:当增加叶片时,每个叶片的负荷将会减少,从而改善叶轮内水流流态^[21]。随着叶片数的增加,轴流泵扬程和轴功率均单调增长,效率增长到一定值后增加缓慢。

3.1 直观分析

对 9 次试验的计算结果进行单指标直观分析,由于方案 1~3 和方案 5~7 在设计流量点处,扬程没能达到目标要求,属于不可优化范畴,由此分析得到的较优试验方案分别为:扬程指标的较优试验方案为第 4 号试验,试验方案为 $A_2B_1C_2D_3$;效率指标的较优试验方案为第 9 号试验,试验方案为 $A_3B_3C_2D_1$;轴功率指标的较优试验方案为第 8 号试验,试验方案为 $A_3B_2C_1D_3$;压力脉动系数的较优试验方案为第 4 号试验,试验方案为 $A_2B_1C_2D_3$ 。

3.2 极差分析

极差分析是转换成单指标正交试验设计,即计算每个指标下对应因素的极差。一般情况下,每个指标下所对应因素的极差是不同的,极差主要是反映了每个因素下所选取的水平对试验指标影响权重的大小。极差越大,说明该因素下所选取的水平对试验指标的影响权重越大。根据表 3 中计算数据,可以得出各因素水平对 4 个试验指标的影响。

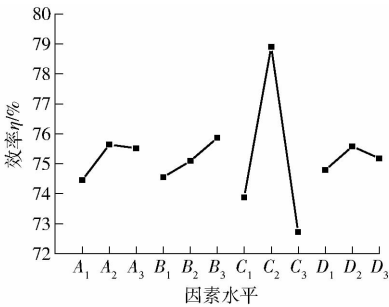


图 5 各因素水平与效率指标关系

Fig.5 Relationship between level of each factor and efficiency

翼型(因素 B)的影响由速度环量定义

$$\Gamma = 2\pi R V_u \tag{2}$$

式中 Γ ——速度环量, m^2/s

R ——不同截面的叶轮半径, m

V_u ——绝对速度的圆周分量, m/s

为使叶片各个截面获得相同的扬程,因此在设计叶片时假设不同叶轮半径 R 下速度环量相同,所以,叶轮半径 R 与绝对速度的圆周分量 V_u 成反比,靠近轮毂处的翼型安放角较大,叶片外缘翼型安放

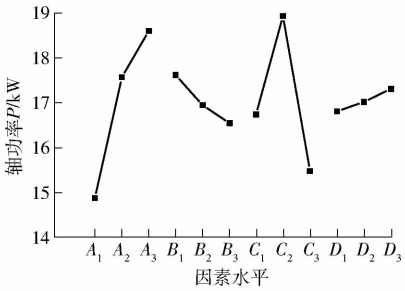


图 6 各因素水平与轴功率指标关系
Fig. 6 Relationship between level of each factor and axis power

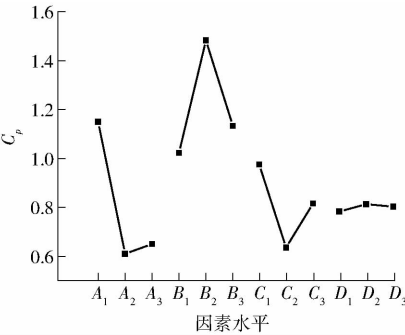


图 7 各因素水平与压力脉动系数指标关系
Fig. 7 Relationship between level of each factor and pressure pulsation coefficient

角较小,导致叶片扭曲严重。根据图 4~6 可得出,当翼型因素水平由翼型 3→翼型 2→翼型 1 变化时,随着各断面翼型安放角的减小,轴流泵扬程与轴功率均单调增加,其中扬程由 6.73 m 增大到 7.30 m,但效率由 75.86% 减小到 74.55%,扬程增加显著,效率降低甚微。可发现,减小各断面翼型安放角,可减少叶片的扭曲程度,改善翼型性能,提高叶片的做功能力。

轮毂比(因素 C)的影响为:当轮毂比由 0.45→0.47→0.49 变化时,相应的轴流泵扬程、效率和轴功率均是先增加后减少,且极差较大。由此可知,轮毂除了在固定叶片满足相应的结构强度要求外,轮毂比对叶轮内的水流流态也具有重要的影响,是轴流泵水力设计和优化的一个重要几何参数。

导叶与叶片间距离(因素 D)的选取参照 $S = (0.1 \sim 0.15) D_h$ (D_h 为叶轮直径, S 为导叶与叶片间最优距离),与因素 A、B、C 相比,该因素对 4 个评判指标的影响较小。从图 4~6 中可以看出,随着导叶与叶片间距离的增大,扬程和轴功率均单调增加,效率先增加后减少,因此存在最优的距离 S 使水泵效率达到最高。

根据图 7 可以得出,叶片数(因素 A)、翼型安放角(因素 B)与轮毂比(因素 C)对压力脉动系数影响较大,而导叶与叶片间距离(因素 D)对压力脉动系数影响较小。因素 B 的水平 2 下,压力脉动系数

最大,说明在此因素水平下轴流泵运行稳定性较差。

通过上述极差分析,可得到的较优试验方案分别为:扬程指标的较优试验方案为 $A_3B_1C_2D_3$;效率指标的较优试验方案为 $A_2B_3C_2D_2$;轴功率指标的较优试验方案为 $A_1B_3C_3D_1$;压力脉动指标的较优试验方案为 $A_2B_1C_2D_1$ 。

从计算得到的极差 R 可知,4 个试验因素对试验指标的显著性顺序为:对扬程的影响从大到小依次为 A、C、B、D;对效率的影响从大到小依次为 C、B、A、D;对轴功率的影响从大到小依次为 A、C、B、D;对压力脉动系数的影响从大到小依次为 A、B、C、D。

3.3 采用综合频率分析法确定最佳试验方案

本次正交试验的 4 个评判指标具有同等的重要性,根据前文直观分析得到的试验方案和通过各个指标的极差分析得到的试验方案,对 4 个因素 A、B、C、D 所对应不同水平进行综合频率分析。因素 A 的 2 水平出现频率是 1/2;因素 B 的 1 水平出现的频率是 1/2;因素 C 的 2 水平出现的频率是 3/4;因素 D 的 3 水平出现的频率是 1/2。因此根据综合频率分析法确定的初步最佳试验方案是 $A_2B_1C_2D_3$,即叶片数选为 4,选用翼型 1,轮毂比选为 0.47,导叶与叶片距离选为 263 mm。

3.4 优化方案分析

优化得出的最佳试验方案 $A_2B_1C_2D_3$ 对应正交表中的方案 4,需对该最佳试验方案进行进一步的计算校核。

为对比优化结果,在设计流量 $Q = 328.5 \text{ L/s}$ 下,提取 0.5 倍叶高处叶轮及导叶的内部时均流线图,如图 8 所示。由于轴流泵原始模型在该流量条件下已经偏离设计工况,所以从图 8 中可以看出在导叶的背面形成了 2 个较大范围的旋涡,且水流在叶轮及导叶段分布不均匀,水力损失较大;优化后的模型在导叶背面的旋涡基本消失,且水流在叶轮及导叶段水流流线顺畅,分布相对均匀,流态较好。

优化前后的轴流泵叶轮均有 4 个叶片,采用 CFD 数值计算时,同一个工况点下的各个叶片表面的压力云图及流速分布图相似。图 9 为在设计流量 $Q = 328.5 \text{ L/s}$ 下叶片表面的压力云图及流速分布图。从图 9 中可以看出,叶片优化前后,水流沿叶片表面的流动顺畅,没有产生旋涡及回流。而优化前叶片压力面在靠近轮毂处出现高压区,优化后的叶片表面高压区基本消失,且压力分布相对更加均匀,优化效果较好。

图 10 为优化后模型泵在设计流量 $Q = 328.5 \text{ L/s}$ 下,叶轮出口处监测点的压力脉动时域图及压力脉

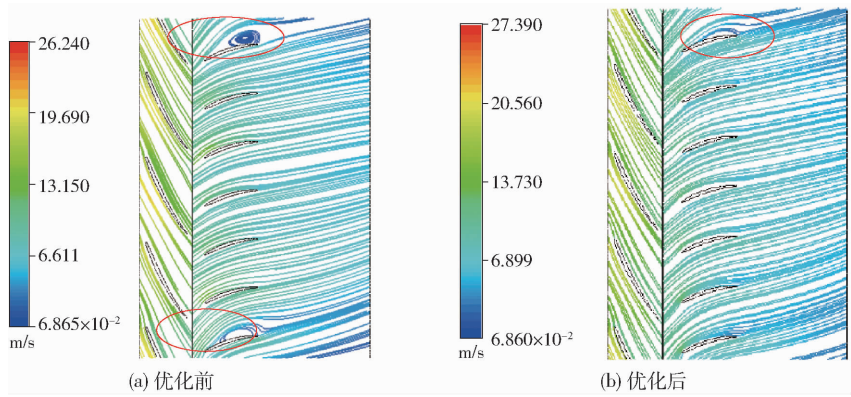


图 8 0.5 倍叶高处泵内部时均流线图

Fig. 8 Distribution of time-average streamline in impeller and guide vane at 0.5 times blade height

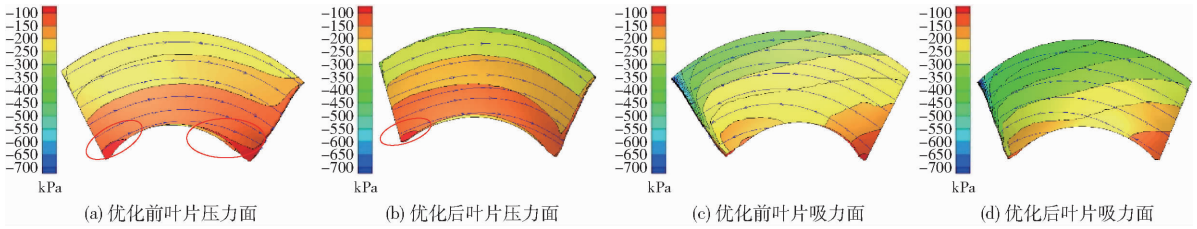


图 9 叶片表面压力云图及流速分布图

Fig. 9 Blade surface pressure contours and velocity distribution

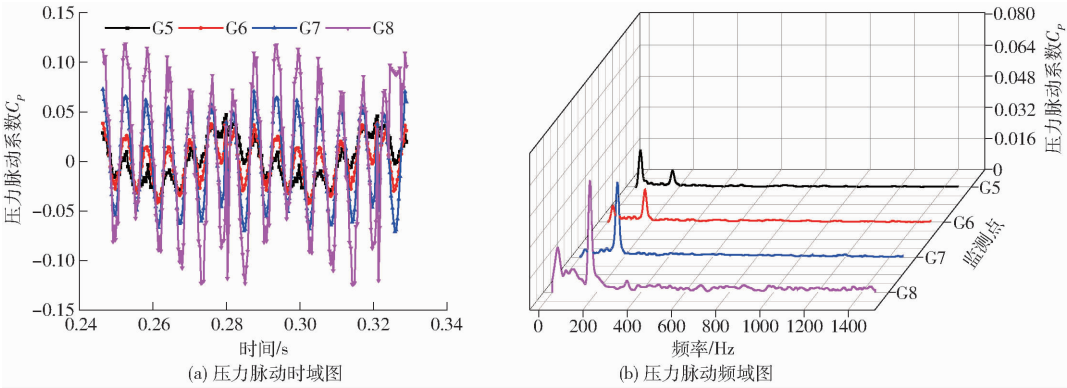


图 10 设计流量下轴流泵内压力脉动时域及频域图

Fig. 10 Time and frequency domains of pressure pulsation in axial-flow pump under design flow

动频域图。从图 10a 可知,压力脉动系数 C_p 从轮毂到轮缘逐渐增大,轮缘处系数最大值是轮毂处的 3 倍,且压力脉动呈周期性波动。从图 10b 可知,叶轮出口处的水流受叶片及导叶的动静干涉作用,压力主频为 7 倍的转频,与轴流泵的导叶个数一致,且在 4 倍转频处,也有较大的幅值,且经过傅里叶变换得到的压力脉动幅值变化也是从轮毂到轮缘处逐渐增大。

综上所述,相比原始模型,优化后的轴流泵模型在流量和扬程满足改型要求的同时,在新的设计流量下,效率由 74.33% 增大为 78.59%,提高了 5.7%;轴功率由 20.54 kW 减小为 20.29 kW,下降了 1.21%;压力脉动系数由 0.344 减小为 0.310,降低了 11%,发现该优化方案均达到要求,验证了采用综合频率法进行多目标正交优化设计的可行

性。

4 模型试验验证

4.1 试验台及测量设备

对优化后的轴流泵装置进行模型试验,图 11 为轴流泵叶轮及其模型装置。试验在河海大学水力机械多功能试验台上进行,其三维示意图如图 12 所示。经鉴定,试验台综合精度为 $\pm 0.37\%$ (A 级)精度。试验台为立式封闭循环系统,包括压力水箱、尾水箱、电磁流量计、供水泵(或辅助泵)、电动闸阀、手动蝶阀、 $\Phi 500$ 型管道等。电磁流量计型号为:RFM4110-500,精度为 $\pm 0.2\%$;差压传感器型号为:EJA110A,精度为 0.075%;扭矩仪型号为:JCZ-1000 N·m,精度为 $\pm 0.1\%$;与水泵配套的直流电动机功率为 120 kW。采用等扬程方法进行模型试验

研究,即保持原型与模型的 nD (n 为转速, D 为转轮直径)值相等。通过试验误差分析,本次试验的总误差为 $\pm 0.27\%$ ^[22],满足试验规程要求。

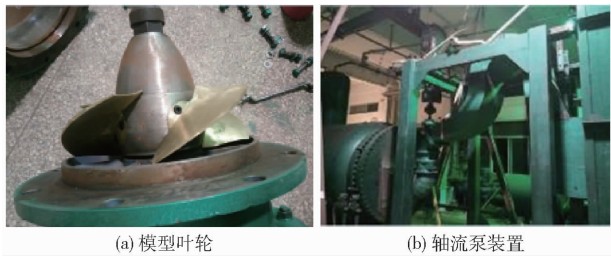


图 11 轴流泵装置模型试验

Fig. 11 Axial-flow pump device model test

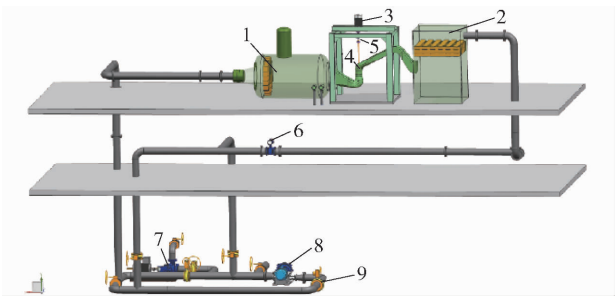


图 12 多功能试验台三维模型示意图

Fig. 12 3D model diagram of multifunctional test platform

1. 尾水箱 2. 压力水箱 3. 测功电动机 4. 模型泵 5. 扭矩仪
6. 电磁流量计 7. 充水泵 8. 供水泵 9. 电磁阀

4.2 试验结果与分析

数值模拟计算结果与试验结果的外特性对比,如图 13 所示。从图 13 中可以看出,在小流量及大流量工况下,数值模拟得到的扬程和效率均高于试验值,扬程的最大误差为 4.6%,对应的效率最大误差为 3.2%。造成这一误差的原因,可能是试验时轴承与密封环摩擦造成了损失;同时在进行模型试验时,手动调节叶片,无法保证 4 个叶片摆放角度完全一致及在模型试验操作时 2 个工况点之间没有留有足够的稳定时间,也有可能造成两者的偏差。虽然模拟结果与试验结果存在一点偏差,但从图 13 中可以看出,数值模拟计算的扬程、效率与试验结果的随流量的变化规律一致,具有较高的吻合度,最大误差均不超过 5%。说明本文所采用的数值计算模型与方法可以较准确地预测轴流泵的外特性。

根据试验测得数据,绘出轴流泵装置模型综合特性曲线,如图 14 所示。从图 14 中可知,优化后的轴流泵模型装置具有较大范围的高效率区,模型装置的最高效率为 78.66%,对应的叶片安放角为 0°,对应的扬程为 7.52 m;根据不同叶片角度下的轴流泵装置性能参数并对照工程的改型要求,叶片安放

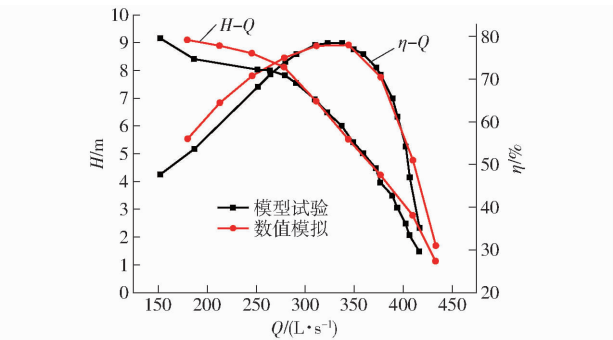


图 13 模型泵试验数据与数值模拟数据对比

Fig. 13 Comparison of model pump test data with numerical simulation data

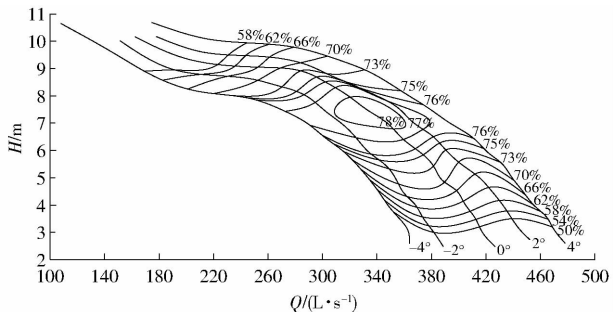


图 14 轴流泵装置模型综合特性曲线

Fig. 14 Comprehensive characteristic curve of axial-flow pump model

角为 0°时满足设计要求。

5 结论

(1)极差分析结果表明,与其他试验因素相比,导叶与叶片间距离(因素 D)对 4 个试验评判指标的影响最小,轮毂比(因素 C)对 4 个试验评判指标影响显著,因此轮毂比是轴流泵水力优化设计的一个重要几何参数。

(2)基于正交试验的轴流泵多目标优化设计中,借助直观分析与极差分析结果,采用综合频率分析法确定了最佳试验方案为 $A_2B_1C_2D_3$ 。在该最佳试验方案下,轴流泵模型在流量和扬程满足改型要求的同时,在新的设计流量下,效率提高了 5.7%;轴功率下降了 1.21%;压力脉动系数绝对值降低了 11%,验证了数值模拟技术结合综合频率分析法在轴流泵多目标正交优化试验中的可行性。

(3)根据试验分析,数值模拟得到的轴流泵装置扬程与效率随流量的变化趋势与试验结果一致,数值模拟结果与试验数据的各点误差均在 5% 以内,进一步说明本文所采用的数值计算模型以及方法可以较准确地预测轴流泵的外特性。

参 考 文 献

- 1 WANG Z, PENG G, ZHOU L, et al. Hydraulic performance of a large slanted axial-flow pump[J]. Engineering Computations, 2010, 27(2):243-256.
- 2 施卫东,冷洪飞,张德胜,等. 轴流泵内部流场压力脉动性能预测与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(5):44-48.
SHI Weidong, LENG Hongfei, ZHANG Desheng, et al. Performance prediction and experiment for pressure fluctuation of interior flow in axial-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5):44-48. (in Chinese)
- 3 张德胜,王海宇,施卫东,等. 轴流泵多工况压力脉动特性试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):139-145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141122&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.022.
ZHANG Desheng, WANG Haiyu, SHI Weidong, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation with multiple flow rates in scaled axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):139-145. (in Chinese)
- 4 石丽建,汤方平,谢荣盛,等. 基于 CFD 计算的轴流泵改型设计和效果[J]. 农业工程学报,2015,31(4):97-102.
SHI Lijian, TANG Fangping, XIE Rongsheng, et al. Design of axial flow pump modification and its effect based on CFD calculation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4):97-102. (in Chinese)
- 5 杨帆,刘超,汤方平,等. 可调后置导叶对泵装置水力特性的影响与预测[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(4):40-46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150407&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.007.
YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Numerical analysis and prediction of hydraulic performance for axial-flow pumping system with adjustable outlet guide vanes[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):40-46. (in Chinese)
- 6 王秀勇,黎义斌,齐亚楠,等. 基于正交试验的核主泵导叶水力性能数值优化[J]. 原子能科学技术,2015,49(12):2181-2188.
WANG Xiuyong, LI Yibin, QI Ya'nan, et al. Numerical optimization on guide vane hydraulic performance of nuclear main pump based on orthogonal test[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(12):2181-2188. (in Chinese)
- 7 王秀礼,朱荣生,苏保稳,等. 无过载旋流泵正交设计数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(1):48-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120110&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.010.
WANG Xiuli, ZHU Rongsheng, SU Baowen, et al. Numerical simulation and experiment of latin square design on non-overload vortex pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1):48-52. (in Chinese)
- 8 高雄发,施卫东,张德胜,等. 基于 CFD 正交试验的旋流泵优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(5):101-106. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140516&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.016.
GAO Xiongfa, SHI Weidong, ZHANG Desheng, et al. Optimization design and test of vortex pump based on CFD orthogonal test[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(5):101-106. (in Chinese)
- 9 雒军,王振,赵万勇. 基于正交法的旋流泵结构优化[J]. 兰州理工大学学报,2010,36(2):47-51.
LUO Jun, WANG Zhen, ZHAO Wanyong. Structural optimization of vortex pumps based on orthogonal law[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010,36(2):47-51. (in Chinese)
- 10 司乔瑞,林刚,袁寿其,等. 高效低噪无过载离心泵多目标水力优化设计[J]. 农业工程学报,2016,32(4):69-77.
SI Qiaorui, LIN Gang, YUAN Shouqi, et al. Multi-objective optimization on hydraulic design of non-overload centrifugal pumps with high efficiency and low noise[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(4):69-77. (in Chinese)
- 11 石丽建,汤方平,刘超,等. 轴流泵多工况优化设计及效果分析[J]. 农业工程学报,2016,32(8):63-69,316.
SHI Lijian, TANG Fangping, LIU Chao, et al. Optimization design and effect analysis of multi-operation conditions of axial-flow pump device[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(8):63-69,316. (in Chinese)
- 12 施伟,李彦军,袁寿其,等. 轴流泵导叶进口段调节对其外特性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(12):109-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151216&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.016.
SHI Wei, LI Yanjun, YUAN Shouqi, et al. Influence of adjustable inlet part of guide on hydraulic performance of axial-flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(12):109-116. (in Chinese)
- 13 石丽建,汤方平,周捍珑,等. 不同导叶叶片掠角下轴流泵段水力特性分析及试验[J]. 农业工程学报,2015,31(14):90-95.
SHI Lijian, TANG Fangping, ZHOU Hanlong, et al. Axial-flow pump hydraulic analysis and experiment under different swept-angles of guide vane[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14):90-95. (in Chinese)
- 14 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)
- 15 刘俊娥,傅昊,郭章林. 综合频率分析法在多指标正交试验设计中的应用[J]. 价值工程,2016,35(24):124-126.
- 16 关醒凡. 轴流泵和斜流泵[M]. 北京:中国宇航出版社,2009.
- 17 LI Y J, WANG F J. Numerical investigation of performance of an axial-flow pump with inducer[J]. Journal of Hydrodynamics; Ser. B, 2007, 19(6):705-711.
- 18 SHI W, ZHOU L, LU W G, et al. Numerical prediction and performance experiment in a deep-well centrifugal pump with different impeller outlet width[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(1):46-52.
- 19 钱健. 离心泵叶轮内部三维紊流数值模拟研究[D]. 扬州:扬州大学,2003.
- 20 郑源,陈宇杰,毛秀丽,等. 混流泵压力脉动特性及其对流动诱导噪声的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(23):67-73.
ZHENG Yuan, CHEN Yujie, MAO Xiuli, et al. Pressure pulsation characteristics and its impact on flow-induced noise in mixed-flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(23):67-73. (in Chinese)
- 21 韩小林,石岩峰,姚铁,等. 用数值模拟研究叶片数变化对轴流泵性能的影响[J]. 水泵技术,2007(4):15-17,14.
- 22 WINZER P J, SHERMAN K, ZIRNGIBL M. Time-division multiplexed Raman pump experiment using a tunable C-band laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(6):789-791.