

基于 PSO 算法的低比转数冲压离心泵水力性能多目标优化

郑水华 赵学燕 章程 李奕良 柴敏

(浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310014)

摘要: 针对低比转数冲压离心泵水力性能偏低问题,以 CDLI 型多级冲压离心泵叶轮为研究对象,结合数值模拟和试验测试方法,对首级叶轮的水力性能进行分析。由于低比转数冲压离心泵叶轮水力性能受多个因素影响,本文使用拉丁超立方方法对首级叶轮各设计变量进行抽样形成样本空间并获得相应性能参数,进而建立 Kriging 代理模型分析各参数对叶轮水力性能的敏感性,选定叶轮关键影响参数为粒子群算法(PSO)输入,对多参数进行优化设计,在此基础上探究叶轮的水力性能和内流机制。结果表明,优化后的叶轮水力性能优于原始设计,最高效率点效率提升 2.8 个百分点,单级扬程提高 0.4 m。

关键词: 低比转数冲压泵; 水力性能优化; 粒子群算法; 数值模拟; 试验测试

中图分类号: TH31

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)05-0353-08

OSID:



Multi-objective Optimization of Hydraulic Performance of Low Specific Speed Stamp Pump Impeller Based on PSO Algorithm

ZHENG Shuihua ZHAO Xueyan ZHANG Cheng LI Yiliang CHAI Min

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming to address the issue of low hydraulic performance in low-specific-speed stamping centrifugal pumps, focusing on the CDLI multi-stage stamping centrifugal pump, using its first-stage impeller as the research object, by combining numerical simulation and experimental testing methods, a comprehensive analysis of the hydraulic performance of the first-stage impeller was conducted. Given that the hydraulic performance of low-specific-speed impellers was influenced by multiple factors, Latin hypercube sampling (LHS) was employed to sample various design variables of the first-stage impeller, forming a sample space and obtaining the corresponding performance parameters. A Kriging surrogate model was then established to analyze the sensitivity of each parameter to the hydraulic performance of the impeller. The critical influence parameters of the impeller were selected as the input for the particle swarm optimization algorithm (PSO), and multi-parameter optimization design was carried out. On this basis, the hydraulic performance and internal flow mechanism of the impeller were investigated in depth. The results showed that the hydraulic performance of the optimized impeller was significantly improved compared with the original design, with the efficiency at the rated point increased by 2.8 percentage points and the single-stage head increased by 0.4 m. Additionally, the optimization process revealed that the impeller's blade angle, inlet and outlet diameters, and blade thickness were the most sensitive parameters affecting hydraulic performance. The improved design not only significantly enhanced the overall efficiency and head but also optimized the flow distribution, reduced turbulence, minimized energy losses, improved fluid dynamics, and increased operational stability, leading to better performance, reliability, and long-term durability in practical applications.

Key words: low specific speed stamp pump; optimization of hydraulic performance; particle swarm optimization algorithm; numerical simulation; experimental testing

收稿日期: 2024-12-13 修回日期: 2025-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51976193)

作者简介: 郑水华(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事流体机械基础理论及工程应用等研究,E-mail: zneu@zjut.edu.cn

通信作者: 柴敏(1992—),男,副研究员,主要从事多相流及流体机械研究,E-mail: chaimin@zjut.edu.cn

0 引言

低比转数冲压离心泵广泛应用于工业、农业、医疗以及生活等各个领域。作为一种特殊的离心泵,低比转数冲压离心泵与常规铸造低比转数离心泵相比,其相同点是叶轮流道狭长,叶轮进出口喉部面积比大流道扩散严重等特征会导致水力性能下降^[1-3];不同点是冲压泵叶片和盖板采用冲压工艺成型,叶片和盖板采用激光焊接技术焊接,其冲压叶片厚度小,叶轮流道光滑,叶轮盖板形状多为直线,传统速度系数法设计低比转数冲压泵的方法存在一定局限性。

近年来,国内外学者对低比转数离心泵的水力参数与性能之间的关系进行了大量研究,对离心泵内流机理进行了详细的分析^[4-7]。在该背景下,采用高精度代理模型代替的传统 CFD 具有更高的优化效率,文献[8]建立了以低比转数离心泵效率最高、汽蚀余量最小、理论扬程最大的多目标优化数学模型,利用遗传算法对低比转数离心泵进行了优化;文献[9]运用 Kriging 代理模型结合优化算法对离心通风机进行研究,发现该方法节省时间,且能够捕捉到叶型的全局信息;部分学者采用不同的优化算法对低比转数离心泵叶轮进行优化,且优化后的叶轮内部流态均不同程度得到改善^[10-11]。文献[12]采用正交分解(POD)代理模型的低比转数离心叶轮优化方法,研究表明 POD 代理模型能够快速地对流场进行精确的预测。文献[13]采用正交试验对离心泵叶轮主要水力参数进行优化组合,优化模型较原型机扬程提高 0.7 m,效率提高 4.2%。文献[14]采用最佳拉丁超立方采样方法和粒子群优化算法来提高泵性能。在诸多优化方法中,采用粒子群优化算法(PSO)对离心泵过流部件进行优化设计方法较少,因此为低比转数离心泵的优化提供了一种思路^[15-20]。文献[21]通过优化低比转数离心泵叶轮的子午面和多个关键参数,采用最优拉丁超立方设计、BP 神经网络和 NSGA-II 多目标遗传算法,显著提高了泵的扬程和效率。综上所述,目前对低比转数冲压离心泵叶轮内部流动与优化设计的研究相对较少,针对低比转数冲压离心泵叶轮内部流场进行分析研究,具有理论和实际意义。

本文选择 CDL1 型低比转数冲压离心泵首级叶轮单流道为研究对象,采用 DOE (Design of experiments) 试验设计对叶轮盖板型线和叶片型线进行全参数优化设计,并对多个参数进行敏感性分析,通过代理模型拟合输入与输出的响应关系,使用 PSO 算法对代理模型进行迭代计算,得到满足目标的低比转数冲压离心泵叶轮最佳的参数组合。

1 模型建立

1.1 优化参数选定及参数化设计

CDL1 型泵铭牌参数流量 Q 为 $1\text{ m}^3/\text{h}$,单级扬程 H 为 5.8 m ,效率 η 为 37.5% ,比转数 n_s 为 47 ;最高效率点流量 Q 为 $1.6\text{ m}^3/\text{h}$,单级扬程 H 为 4.9 m ,设计效率 η 为 44.6% ,设计转速 n 为 $2\,900\text{ r/min}$ 。叶轮的基本水力参数:叶片数 z 为 6 、叶轮进口直径 D_j 为 32 mm 、叶轮外径 D_2 为 74.5 mm 、叶片进口角度 β_1 为 24.5° 、叶片出口角度 β_2 为 34° 、叶片包角 φ 为 65° 、叶轮出口宽度 b_2 为 2.7 mm 、轴径 d_h 为 14 mm 、叶片进口宽度 b_1 为 2.7 mm 。

低比转数冲压离心泵叶轮子午流道型线多为直线。选择控制点 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 的 z 坐标根据叶轮出口宽度 b_2 和叶片进口宽度 b_1 关联。前盖板与轴线存在一定的夹角,后盖板型线与轴线保持垂直, r 坐标根据进口直径 D_j 、叶轮外径 D_2 、叶片进口直径 D_{LE} 进行约束,叶轮子午流道几何示意图如图 1 所示。

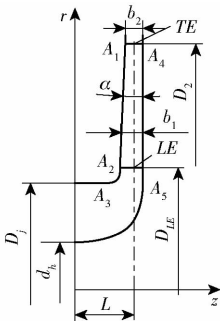


图 1 叶轮子午流道几何关系

Fig. 1 Geometric relation of impeller meridian flow channel

因优化目标是圆柱形叶片,只对前盖板型线进行参数化即可。在给定叶片进出安放角及叶轮轴面的前提下,型线起点的切矢方向与控制点 A 到 B 的射线 $\overrightarrow{AB}$ 方向相同,曲线终点的切矢方向与控制点 E 到 D 的射线 $\overrightarrow{ED}$ 方向相同,使得参数化控制点 A 、 B 、 C 共线,点 C 、 D 、 E 共线。如图 2 所示,横坐标 l 为轴面流线相对长度百分比,通过调整直线 AC 、 CE 的斜率和 Bezier 曲线的起点与终点,可得到不同的叶型。叶片型线微分方程为

$$\frac{d\theta}{dM} = \frac{1}{r \tan \beta} \tag{1}$$

- 式中 dM ——叶片中线径向坐标的微分
 r ——型线某点半径
 $d\theta$ ——沿流线运动经过的圆心角微分
 β ——叶片安放角

其叶片参数化方程为

$$p(u) = \sum_{i=0}^n B_{n,i}(u) V_i \quad (0 \leq u \leq 1) \tag{2}$$

式中 $p(u)$ ——叶型控制点坐标
 V_i ——第 i 个控制点的向径
 $B_{n,i}(u)$ 为基函数,是 Bernstein 多项式。

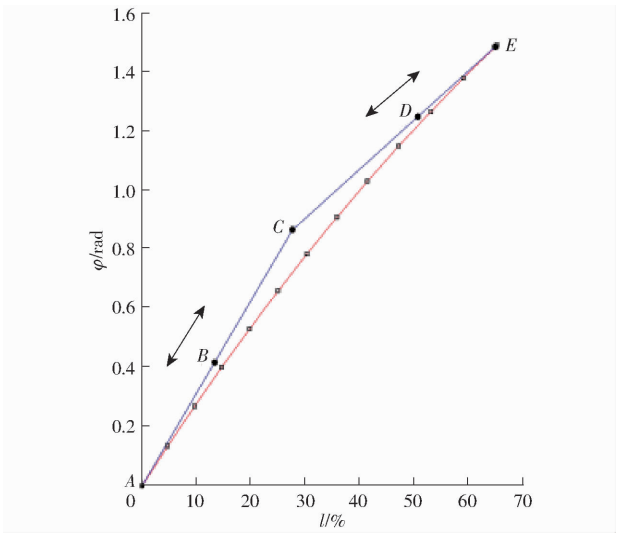


图 2 叶轮股线控制图
Fig. 2 Impeller strand control diagram

1.2 三维模型设计

根据叶轮的主要参数,基于 Workbench 平台连接 CFTURBO 软件进行三维建模,模型计算域主要包括:进水段、叶轮、导叶和出水段,为提高计算速度和参数化集成,计算叶轮导叶单流道流场,其具体三维水体模型如图 3 所示。

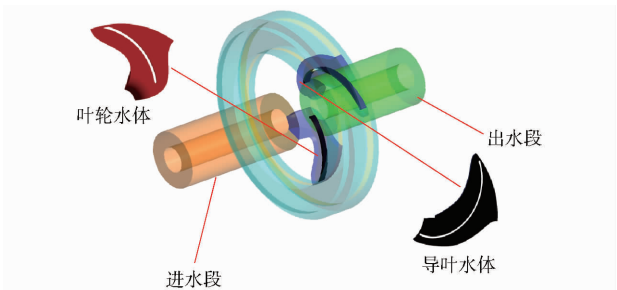


图 3 三维水体模型
Fig. 3 Three-dimensional hydraulic model

1.3 网格划分与数值计算设置

本文采用混合网格,其中叶轮、导叶使用 TurboGrid 划分结构网格,进出水段采用 ANSYS Mesh 划分非结构网格。在网格划分时考虑到近壁面存在分离流,为得到更优的网格质量,对叶轮和导叶近壁面等部位进行网格加密,具体如图 4 所示。

文中利用 CFX 进行定常数值模拟计算,选择 SST 两方程湍流模型,进口边界条件设置为压力进口,出口设置为质量流量。壁面采用无滑移边界条件,动静交接面设置为“Frozen rotor”。求解器设置为二阶迎风格式,收敛残差设置为 10^{-5} 。

在进行数值计算的过程中,网格数量和质量对数值模拟结果有着显著影响。为确保计算效率和结

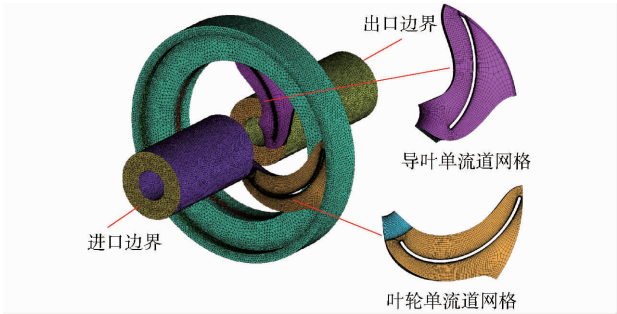


图 4 模型网格
Fig. 4 Model mesh

果的可靠性,进行图 5 所示的网格无关性验证。随网格数的增加,低比转数离心泵的扬程和水力效率先减小后增大,当网格数达到 3.5×10^6 时,扬程和水力效率趋于稳定,且网格质量控制 0.3 以上。故本文选择模型网格数为 3.5×10^6 ,其中叶轮网格数 6.0×10^5 ,导叶网格数 8.0×10^5 ,进口段网格 5.5×10^5 ,出口段 5.5×10^5 ,过渡段 1.0×10^6 。

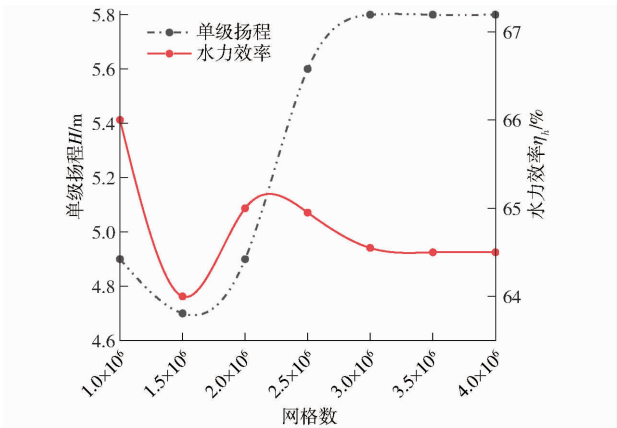


图 5 网格无关性检验
Fig. 5 Mesh independence test

2 基于 PSO 算法的多目标优化设计

2.1 优化目标与变量的试验设计

以首级叶轮在设计工况下的扬程 H 和水力效率 η_h 最大为优化目标,通过 CFD 计算泵进出口压力和扭矩,得到泵效率 η_{hp} 。计算公式为

$$\eta_{hp} = \frac{Q_d}{3600} \frac{P_{2tot} - P_{1tot}}{T\omega} \times 100\% \quad (3)$$

式中 Q_d ——额定工况点流量, m^3/h

P_{1tot} ——泵进口总压, Pa

P_{2tot} ——泵出口总压, Pa

T ——全流道叶轮扭矩, $N \cdot m$

ω ——叶轮旋转角速度, rad/s

扬程优化过程中,扬程表达式为

$$H = \frac{P_{2tot} - P_{1tot}}{\rho g} \quad (4)$$

式中 ρ ——流体密度, kg/m^3

g ——重力加速度, m/s^2

以选取的叶轮参数为优化变量,在 ANSYS Workbench 中的 Design Exploration 中进行试验设计。因优化设计变量较多,区间长度大,为避免出现样本点的聚集,采用 LHS 方法使设计样本空间更加均匀,具体变量取值范围如表 1 所示。

表 1 优化参数取值范围

Tab.1 Optimization variable parameters range

优化参数	下限	上限	设计值
叶片包角 $\varphi/(\circ)$	60	100	65
叶片进口角度 $\beta_1/(\circ)$	16	28	24.5
叶片出口角度 $\beta_2/(\circ)$	24	36	34
叶轮外径 D_2/mm	65	83	74.5
叶轮出口宽度 b_2/mm	2.1	3	2.7
叶片进口直径 D_{LE}/mm	16	20	16.2
叶片进口宽度 b_1/mm	2.7	3.9	2.7
控制点 B 的 $L/\%$	5	40	14
控制点 C 的 $L/\%$	41	50	45.1
控制点 D 的 $L/\%$	50	95	66
叶片数 z	5	7	6

其中,控制点 B 、 C 、 D 在叶片型线位置如图 2 所示,为降低优化变量数量,且相对流线长度百分比的变化可以得到丰富的叶型,本次参数优化只对控制点的相对流线长度百分比进行参数化。叶片进口边为方便参数化并防止 $b_1 > b_2$ 的情况,使宽度 $b_1 = b_2 + h(0 \leq h \leq 1.2 \text{ mm})$ 。

2.2 Kriging 模型与粒子群算法

粒子群算法因其结构简单易行、收敛速度快和设置参数少等优点,广泛应用于能源、机械和化学等工程领域^[22-26]。

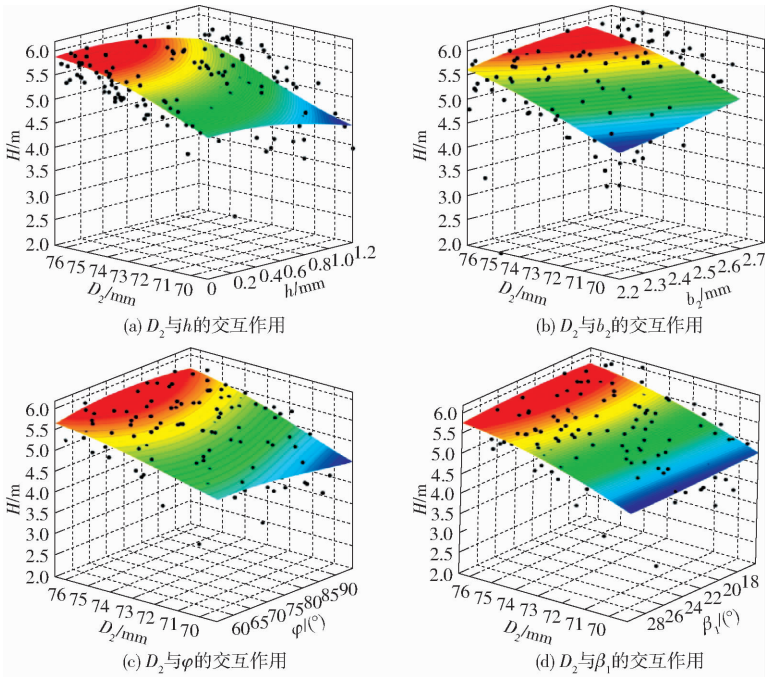


图 7 叶轮主要参数与扬程的响应关系

Fig.7 Response relationships of main parameters of impeller and head

图 6 为粒子群算法在迭代过程中粒子位置更新示意图,设粒子的两个属性:速度 v 和位置 s ,在找到这两个最优值后,粒子通过公式

$$v_{i,t+1} = v_{i,t} + c_1 rand_{1i}(pbest_i - x_{i,t}) + c_2 rand_{2i}(gbest_i - x_{i,t}) \tag{5}$$

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + v_{i,t+1} \tag{6}$$

式中 $x_{i,t}$ 、 $v_{i,t}$ ——在迭代时刻 t 第 i 个粒子的位置、速度

c_1 、 c_2 ——自身认识学习速度、社会学习速度的学习因子

$rand_{1i}$ 、 $rand_{2i}$ ——随机因子,在 0 和 1 之间随机取值

$pbest_i$ ——第 i 个粒子的最优值

$gbest_i$ ——整个粒子群的最优值

来更新自己的速度和位置。

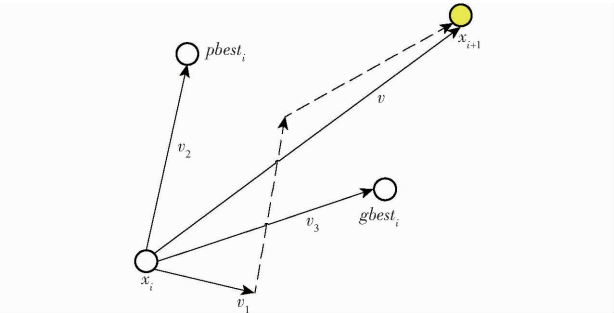


图 6 粒子运动示意图

Fig.6 Schematic of particle motion

2.3 设计变量敏感性分析

图 7 和图 8 为设计变量对额定工况下,样本点扬程和效率的响应面。图 7a 表示 D_2 与 h 的交互作

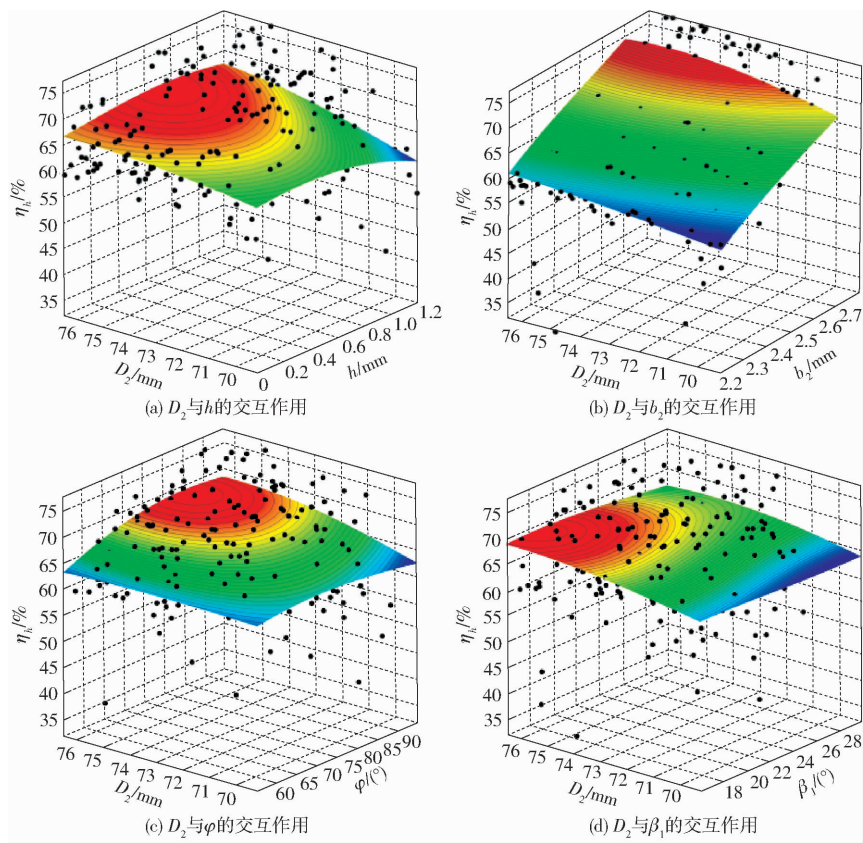


图 8 叶轮主要参数与水力效率的响应关系

Fig. 8 Response relationships of main parameters of impeller and hydraulic efficiency

用,当 D_2 取值较高水平时 H 随 h 的增大而增大,而后随着 h 增大而减小;图 7b 表示 D_2 与 b_2 的交互作用,当 D_2 取值较高水平时 H 随 b_2 的增大而增大。图 7c 表示 D_2 与 φ 的交互作用,当 D_2 取值较高水平时 H 随 φ 的增大而增大,而后随着 φ 增大而减小;图 7d 表示 D_2 与 β_1 的交互作用,当 D_2 取值较高水平 H 随 β_1 的增大而增大,而后随着 β_1 增大而减小。

图 8a 表示 D_2 与 h 的交互作用,当 D_2 取值较高水平时, η_h 随 h 的增大而减小;图 8b 表示 D_2 与 b_2 的交互作用,当 D_2 取值较高水平时, η_h 随 b_2 的增大而增大;图 8c 表示 D_2 与 φ 的交互作用,当 D_2 取值较高水平时, η_h 随 φ 的增大先增大后减小;图 8d 表示 D_2 与 β_1 的交互作用,当 D_2 取值较高水平时, η_h 随 β_1 的增大而减小。不同设计变量对叶轮扬程和水力效率影响存在差异,为具体地分析各水力参数对叶轮水力性能的敏感性,使用敏感性近似模型以及决定系数 R^2 、响应变量的总偏差、已解释的偏差、未解释的偏差、拟合误差修正进行计算。

图 9 所示为叶轮水力效率和扬程的预测贡献值,由图 9 可知对叶轮扬程影响因素从主到次依次为:叶轮外径 D_2 、叶轮出口宽度 b_2 、叶片出口角度 β_2 、叶片进口宽度 b_1 、叶片数 z 、叶片包角 φ 、叶片进口角度 β_1 ;对叶轮水力效率影响因素从主到次依次为:叶轮出口宽度 b_2 、叶片包角 φ 、叶片进口宽度 b_1 、

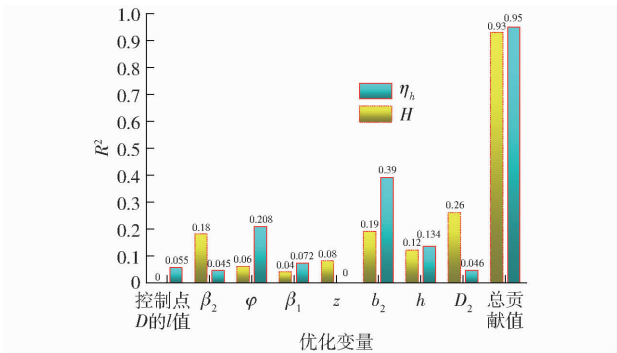


图 9 各变量预测贡献值与总贡献值

Fig. 9 Predicted contribution value of each variable and total contribution value

叶片进口角度 β_1 、控制点 D 的 l 值、叶轮外径 D_2 、叶片出口角度 β_2 。根据工程经验总贡献值均大于 90%,说明响应面拟合模型精度较高, Kriging 拟合精度满足工程需求。根据预测贡献值,最终选取 8 个设计参数进行优化设计。

3 PSO 优化设计及结果分析

选定目标参数后,采用 PSO 算法进行参数优化,通过优化最终模型,对低比转数离心泵首级叶轮外特性和内部流场进行分析。经对叶轮叶片多个参数进行组合优化后,可得到优化后的叶片型线,设计叶型与优化叶型如图 10 所示。具体优化变量结果

如表 2 所示。

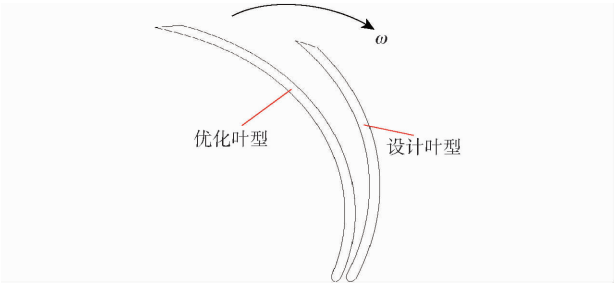


图 10 叶片优化前后对比示意图

Fig. 10 Schematic of comparison of blade before and after optimization

表 2 优化参数结果对比

Tab.2 Comparison of optimized parameter results		
优化参数	设计值	优化值
叶片包角 $\varphi/(^{\circ})$	65	93
叶片出口角度 $\beta_2/(^{\circ})$	34	26.1
叶片进口角度 $\beta_1/(^{\circ})$	24.5	20
叶轮外径 D_2/mm	74.5	75.3
叶轮出口宽度 b_2/mm	2.7	2.8
叶片进口宽度 b_1/mm	2.7	3.8
控制点 D 的 $L/\%$	66	52.7
叶片数 z	6	6

3.1 优化结果对比分析

由图 11 优化叶轮与原型叶轮的计算结果对比可知,优化叶轮模型的高效区范围也变大。在小流量工况点,扬程的优化效果显著,效率的优化效果次之;在大流量工况点,效率的优化效果显著,扬程的优化效果次之;在额定工况点,优化叶轮模型水力效率提升 3 个百分点,计算扬程提高 0.5 m。优化后的叶轮要明显优于原始叶轮。

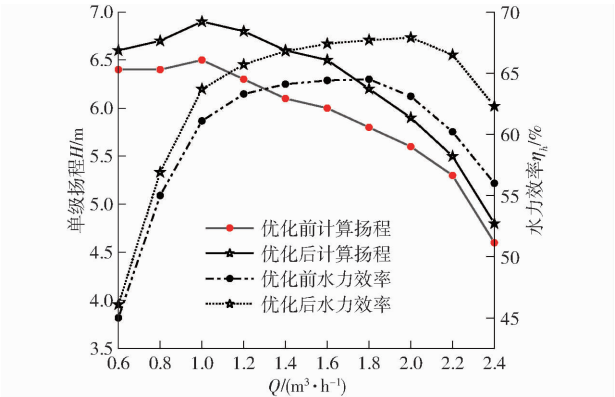


图 11 外特性优化结果对比

Fig. 11 Comparison of external characteristic optimization results

3.2 流场分析

图 12 为优化叶轮与原型叶轮流线对比图。由图 12 可知,在小流量工况点 $1\text{ m}^3/\text{h}(0.6Q)$ 时,原型叶轮流道中产生明显的漩涡,而优化叶轮流道中无

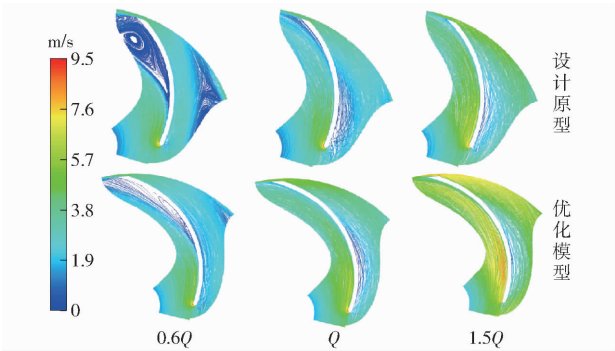


图 12 优化后叶轮流道流线对比

Fig. 12 Comparison of streamline in impeller channel after optimization

明显漩涡产生,结合图 11 外特性曲线可知,原型流道漩涡的产生,是离心泵扬程和效率显著下降的主要原因。在额定流量工况点 $1.6\text{ m}^3/\text{h}(Q)$ 和大流量工况点 $2.4\text{ m}^3/\text{h}(1.5Q)$,在叶片工作面进口处,原型叶轮流道间的流线较为混乱且分布不均,而优化叶轮流道间流线分布均匀。

优化叶轮叶片包角 φ 为 65° ,当低比转数冲压离心泵在小流量工况 $0.6Q$ 运行时,流体的轴面流速降低,雷诺数下降。流体流动受粘性力的影响增强,由于优化叶轮的包角较小,流道扩散严重,工作面和背面之间的流道存在较大的速度差,加剧局部区域产生流动分离从而形成与叶轮旋转方向相反的漩涡,导致部分流体无法顺畅流出,不断消耗能量,叶轮做功能力下降;优化后叶轮叶片包角 φ 为 93° ,叶轮流道增长后,流道扩散减小,轴面流速加大,速度差减小,有效抑制流动分离与漩涡的形成。

图 13 为叶轮优化前后的静压分布图。由图 13 可知,从叶轮进口到出口,静压逐渐增大。在小流量工况点 $1\text{ m}^3/\text{h}(0.6Q)$ 和额定流量工况点 $1.6\text{ m}^3/\text{h}(Q)$ 时,原型叶轮出口边压力明显高于优化叶轮出口边压力,主要因为设计叶轮的流道长度较小,未能充分对流体做功,导致原型叶轮出口流体速度降低,压力升高导致原型叶轮水力性能变差。在大流量工

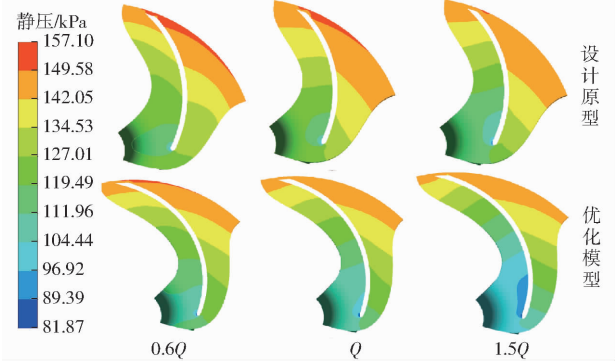


图 13 优化后叶轮流道压力云图对比

Fig. 13 Comparison of nephogram in impeller after optimization

况点 $2.4\text{ m}^3/\text{h}$ ($1.5Q$) 时,优化叶轮叶片进口背面出现低压区,但低压区并未导致优化叶轮水力性能降低,主要是因为在大流量工况下,流体充满整个叶轮流道,此时叶片背面的低压区不会降低离心泵的水力性能。

3.3 试验测试与结果对比

本次试验测试型号为 CDL1,为求证优化叶轮模型结果的可靠性,对原型叶轮和优化叶轮同时在闭式试验台进行试验测试,在测试时,其他所有条件和设备保持不变,仅更换叶轮。如图 14 所示,测试试验台符合国家标准 GB/T 3216—2016《回转动力泵水力性能验收试验 1 级、2 级和 3 级》和 GB/T 12785—2014《潜水电泵试验方法》1 级精度要求,并通过 CMA 与 CNAS 认证。试验中所采用的仪器仪表精度等级为:电磁流量计 0.5 级,压力变送器 0.2 级,电参数仪 0.2 级;试验台泵效率测试的综合不确定度为 0.1%。泵实际样机优化前后的性能曲线如图 15 所示,优化后泵的额定点效率提高 2.8 个百分点,单级扬程提高 0.4 m。

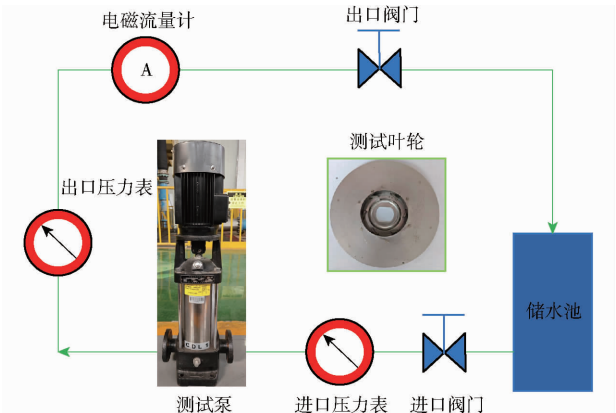


图 14 试验测试系统图

Fig. 14 Schematic of experimental testing

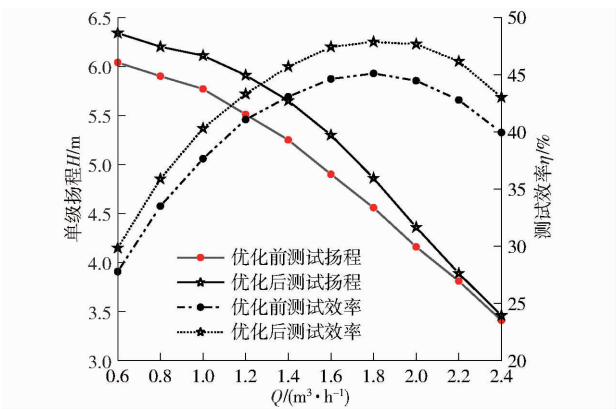


图 15 优化模型试验测试对比

Fig. 15 Comparison of optimized model experimental tests

4 结论

(1)不同参数对低比转数冲压离心泵水力性能影响程度不同。对扬程影响因素从主到次依次为:叶轮外径 D_2 、出口宽度 b_2 、出口角 β_2 、叶片进口宽度 b_1 、叶片数 z 、包角 φ 、叶片进口角度 β_1 ;对效率影响因素从主到次依次为:出口宽度 b_2 、叶片包角 φ 、叶片进口宽度 b_1 、进口角 β_1 、控制点 D 的 l 、叶轮外径 D_2 、出口角 β_2 。

(2)叶片数在一定范围内,对低比转数冲压离心泵的水力效率影响较小,且在小流量工况时,漩涡的产生是低比转数冲压离心泵扬程下降的主要原因。

(3)当低比转数冲压离心泵在小流量工况点运行时,叶轮流道扩散增强漩涡的产生是整机水力性能降低的主要原因;在大流量工况点运行时,较大的正冲角在叶片背面形成的低压区对离心泵的性能无显著影响,优化后的叶轮水力性能优于原始设计,额定点效率提升 2.8 个百分点,单级扬程提高 0.4 m。

参 考 文 献

[1] 衣拥军. 离心冲压泵水力元件叶轮与导叶的研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2016.
YI Yongjun. Research on impellers and guide vanes of stamping centrifugal pump hydraulic components [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016. (in Chinese)

[2] 钱家祥,童志成,陈文正. 冲压泵的特点及其应用[J]. 流体机械,1999(8):30-33.

[3] 汪家琼,赵瑞杰,孔繁余,等. 不锈钢冲压焊接离心泵研究现状[J]. 水泵技术, 2015(4): 11-15.

[4] 张映波,赵子龙,钱忠东. 双吸式离心泵叶片吸力面泥沙磨损破坏规律与形成机制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 202-207.
ZHANG Yingbo, ZHAO Zilong, QIAN Zhongdong. Analysis of sediment erosion at suction side of double suction centrifugal pump blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 202-207. (in Chinese)

[5] 王田田,李俊宏,南玲博,等. 可变形磨损模型下微型离心泵复合磨损研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 136-145.
WANG Tiantian, LI Junhong, NAN Lingbo, et al. Complex wear of micro centrifugal pump under deformable wear model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 136-145. (in Chinese)

[6] 沈小波,李仁年,韩伟,等. 基于动态边界的双吸离心泵叶片渐进磨损及泵性能预测[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 212-220.
SHEN Xiaobo, LI Rennian, HAN Wei, et al. Progressive erosion and pump performance prediction of double suction centrifugal pump vane based on dynamic boundary[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 212-220. (in Chinese)

- [7] 郑源, 赵雪莹, 周文杰, 等. 空化诱导的离心泵叶轮区流动特性与压力脉动分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 244–251.
ZHENG Yuan, ZHAO Xueying, ZHOU Wenjie, et al. Analysis of flow characteristics and pressure pulsation in impeller region of centrifugal pump induced by cavitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 244–251. (in Chinese)
- [8] 廖福, 张洪. 基于遗传算法低比转数离心泵的优化设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(2): 233–236.
LIAO Fu, ZHANG Hong. Optimization design of low-speed pump based on genetic algorithm[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(2): 233–236. (in Chinese)
- [9] 孟凡念, 张子琦, 苏晓龙, 等. 基于 Kriging 代理模型的离心通风机电叶片优化[J]. 液压与气动, 2023, 47(5): 85–91.
MENG Fannian, ZHANG Ziqi, SU Xiaolong, et al. Centrifugal fan blade optimization based on Kriging surrogate model[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(5): 85–91. (in Chinese)
- [10] ZHANG R, CHEN X, LUO J. Knowledge mining of low specific speed centrifugal pump impeller based on proper orthogonal decomposition method[J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30(3): 840–848.
- [11] 童哲铭, 陈尧, 童水光, 等. 基于 NSGA-III 算法的低比转速离心泵多目标优化设计[J]. 中国机械工程, 2020, 31(8): 2239–2246.
TONG Zheming, CHEN Yao, TONG Shuguang, et al. Multi-objective optimization design of low specific speed centrifugal pumps based on NSGA-III algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(18): 2239–2246. (in Chinese)
- [12] 郭广强, 张人会, 陈学炳, 等. 低比转速离心叶轮的 POD 代理模型优化方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 50–55.
GUO Guangqiang, ZHANG Renhui, CHEN Xuebing, et al. Optimization method for low specific speed centrifugal impeller based on POD surrogate model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(7): 50–55. (in Chinese)
- [13] 沈海军, 吴宏飞. 基于正交实验及 CFD 的低比转速离心泵优化设计[J]. 装备制造技术, 2023(9): 41–44.
- [14] PEI Ji, WANG Wenjie, YUAN Shouqi, et al. Optimization on the impeller of a low-specific-speed centrifugal pump for hydraulic performance improvement[J]. Advanced Manufacturing and Machining Technology Published, 2016, 29: 992–1002.
- [15] AYREMLOUZADEH H, JAFARMADAR S, NIAKI S R A. Investigation on the effect of impeller design parameters on performance of a low specific speed centrifugal pump using Taguchi optimization method[J]. International Journal of Fluid Power, 2022, 23(2): 161–182.
- [16] 王文杰, 韩振华, 黄从兵, 等. 基于 PSO 的水利蜗壳泵叶轮和导叶匹配设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(11): 4282–4291.
WANG Wenjie, HAN Zhenhua, HUANG Congbing, et al. Matching design of impeller and diffuser of hydraulic volute pump based on PSO[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(11): 4282–4291. (in Chinese)
- [17] QI Handong, LI Wei, JI Leilei, et al. Performance optimization of centrifugal pump based on particle swarm optimization and entropy generation theory[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 10: 1094717.
- [18] CHEN Hanxin, FANG Lu, FAN Dongliang, et al. Centrifugal pump impeller health diagnosis based on improved particle filter and BP neural network[C]//Cyber Security Intelligence and Analytics; Proceedings of the 2020 International Conference on Cyber Security Intelligence and Analytics (CSIA 2020). Springer International Publishing, 2020: 217–224.
- [19] LUO H, ZHOU P, SHU L, et al. Energy performance curves prediction of centrifugal pumps based on constrained PSO-SVR model[J]. Energies, 2022, 15(9): 3309.
- [20] 王文杰, 邓起凡, 裴吉, 等. 粒子群算法在带导叶离心泵性能优化中的应用[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(4): 73–79.
WANG Wenjie, DENG Qifan, PEI Ji, et al. Application of particle swarm optimization to improve the performance of a centrifugal pump with vaned diffuser[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2021, 41(4): 73–79. (in Chinese)
- [21] 马文生, 周清松, 李方忠, 等. 基于 BP 神经网络与 NSGA-II 算法的低比转数离心泵优化[J]. 中国农村水利水电, 2023(4): 189–194, 202.
MA Wensheng, ZHOU Qingsong, LI Fangzhong, et al. Optimization of low specific speed centrifugal pump based on BP network and NSGA-II algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(4): 189–194, 202. (in Chinese)
- [22] 董敏, 杨浩, 陈铁桩. 离心泵多目标优化设计及数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(4): 154–157, 161.
DONG Min, YANG Hao, CHEN Tiezhuan. Multi-objective optimization design and numerical simulation of centrifugal pumps[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(4): 154–157, 161. (in Chinese)
- [23] JOSEPH A J, ASALETHA R, MANOJ V J, et al. An enhanced PSO-based energy efficient clustering routing algorithm for wireless sensor network[J]. Communications in Computer and Information Science, 2024, 1930: 99–112.
- [24] LIN J F, SHEU J J. Application of hybrid PSO and SQP algorithm in optimization of the retardance of citrate coated ferrofluids[C]//Proceedings of the 2022 6th International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence, 2022: 62–66.
- [25] ZERAATI M, CHEN T C, EBRI M, et al. Length prediction of silicon nanowires (SiNWs) prepared by the MACE method using the ANN-COA-PSO algorithm for high supercapacitor applications[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2021, 156: 110146.
- [26] KENNEDY J, EBERHART R. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya: IEEE, 1995: 3943.