

基于不同最大拱度位置翼型的高比转数混流泵叶轮优化

孙壮壮¹ 朱亚东^{1,2} 张家敏¹ 吕宁¹ 汤方平² 陈松山²

(1. 扬州市职业大学机械工程学院, 扬州 225100; 2. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225029)

摘要: 为了拓宽高比转数混流泵高效区范围,采用 NACA 四位数字翼型拱度线叠加 NACA66 厚度分布设计了最大拱度相对位置分别为 0.4、0.5 和 0.6 的 3 种翼型方案,并基于这 3 种翼型方案对一比转数为 720 的混流泵叶轮进行多工况优化设计。研究表明:优化后混流泵叶轮加权效率提升约 0.5 个百分点,拓宽了混流泵的高效区范围。采用最大拱度位置不同的翼型设计得到的混流泵叶轮最大效率相差不大,翼型最大拱度位置主要影响高效区分布范围,随着最大拱度位置的后移,高效区范围向大流量、低扬程附近移动。设计流量工况下,随着最大拱度位置的后移,空化性能得到有效改善。最大拱度位置在 0.4 倍和 0.6 倍弦长附近时,对于小流量工况下和大流量工况下进口边附近的流动分离现象分别具有较好的抑制作用,在混流泵设计时叶尖处拱度靠后、叶根处拱度靠前更有利于扩大混流泵高效区范围。研究结果可为不同运行要求下的流体机械优化设计提供参考。

关键词: 水力机械; 混流泵; 叶轮; 优化设计; 水翼; 最大拱度位置

中图分类号: TH313

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0249-08

OSID:



Optimization of High Specific Speed Mixed Flow Pump Impeller Based on Hydrofoils with Different Maximum Camber Positions

SUN Zhuangzhuang¹ ZHU Yadong^{1,2} ZHANG Jiamin¹ LÜ Ning¹ TANG Fangping² CHEN Songshan²

(1. School of Mechanical Engineering, Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou 225100, China

2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225029, China)

Abstract: In order to increase the range of high-efficiency zones in high specific speed mixed pumps, three types of hydrofoil schemes with maximum camber positions of 0.4, 0.5 and 0.6 were designed by using NACA four-digit airfoil camber lines superimposed with NACA66 thickness distribution. Based on the three hydrofoil schemes, the hydraulic performance of the mixed flow pump impeller with specific speed of 720 under multiple operating conditions was optimized. The research results indicated that after optimization, the weighted efficiency of the mixed flow pump impeller was increased by about 0.5 percentage points, expanding the operating range of the high efficiency zone of the mixed flow pump. The maximum efficiency of mixed pump impellers designed with different maximum camber positions of hydrofoils was not significantly different, the position of the maximum camber of the hydrofoil mainly affected the distribution range of the high-efficiency zone. As the position of the maximum camber moved backward, the high-efficiency zone range moved towards the vicinity of high flow and low head. Under the design flow condition, as the maximum camber position moved backward, the cavitation performance showed an improvement trend. When the maximum camber position was around 0.4 times and 0.6 times the chord length, it had a good inhibitory effect on the flow separation phenomenon near the inlet edge under low flow conditions and high flow conditions, respectively. When designing a mixed flow pump, the camber at the blade tip should be placed back and the blade root should be placed forward, which was beneficial for expanding the efficient range of the mixed flow pump. The research results can provide reference for the optimization design of fluid machinery under different operating requirements.

Key words: hydraulic machinery; mixed flow pump; impeller; optimize design; hydrofoil; max camber position

收稿日期: 2023-11-10 修回日期: 2023-12-15

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(SBK2023042972)、中国博士后科学基金项目(2023M741499)、扬州市自然科学基金项目(YZ2024193)、江苏省高效节能大型轴流泵站工程研究中心开放课题(ECHEAP022)、扬州市绿杨金凤计划项目(2023)和扬州市职业大学校级科研项目(2023XJ02)

作者简介: 孙壮壮(1994—),男,讲师,博士,主要从事泵及泵装置优化设计研究,E-mail: sunyuzu@163.com

0 引言

混流泵的比转数通常在 300 ~ 600 之间,扬程范围在 10 ~ 20 m 以内,是一种介于轴流泵和离心泵之间的泵型^[1]。轴流泵的高效区范围较窄,尤其是比转数 650 左右的轴流泵,高效区与马鞍区十分接近,马鞍区内水泵性能具有明显的不稳定性,为了机组的稳定运行,泵站的最高扬程通常控制在马鞍区以下。然而在某些最高扬程与设计扬程相差过大的泵站中,轴流泵难以同时兼顾设计扬程和最高扬程要求。为此,文献[1-3]开发了一批比转数 600 ~ 800 混流泵,以适应低扬程、宽扬程变幅的使用场合。但目前国内可见的高比转数混流泵模型仍相对较少,叶轮是混流泵的核心部件,混流泵叶轮的水力性能的提升对于减少混流泵能耗具有重要意义。

混流泵设计时^[4-5]通常假定流动在以泵轴为旋转轴的回转面上进行,通过保角变换法将径向叶栅转化为直列叶栅进行设计和分析,采用拱度线叠加厚度分布的方法构造混流泵二维剖面。剖面拱度线主要参数包括最大拱度和最大拱度位置,设计时根据叶轮出口环量分布调整最大拱度,通常忽略了最大拱度位置对混流泵水力性能的影响。随着计算机技术的发展,基于 CFD(计算流体力学)与优化算法相结合的叶片优化设计方法在水力机械领域得到广泛应用。基于 CFD 的叶片优化设计方法主要分为直接优化和基于代理模型优化。直接优化^[6-8]采用全局或梯度优化算法直接对叶轮参数优化,对于多目标问题下高精度模拟运算需要耗费大量计算资源和时间,而基于代理模型优化^[9-10]通过机器学习构建叶轮参数和目标值的近似函数关系,可以提高优化效率^[11-23]。

本文选取最大拱度位置在 0.4、0.5、0.6 倍弦长位置的剖面翼型,以设计流量 0.8、1.0、1.2 倍处加权效率为目标,结合高斯过程回归和多岛遗传算法对混流泵弦长、叶型安放角等多个参数进行优化研究,拓宽其高效区范围,分析最大拱度位置对混流泵性能的影响。

1 研究对象

以某比转数 n_s 约 720 的混流泵为基准模型,该混流泵叶轮直径 D 为 0.3 m,轮毂直径 D_h 为 0.15 m,叶顶间隙 C 为 0.15 mm,转速 n 为 1 200 r/min,设计流量 Q_d 为 0.324 m³/s,设计扬程 H_d 为 5.3 m。叶片为可调节形式,叶片数 Z 为 3,导叶数 Z_d 为 6,混流泵叶轮及导叶模型如图 1 所示。其中比转数 n_s 定义为

$$n_s = \frac{3.65n\sqrt{Q_d}}{H_d^{3/4}} \quad (1)$$

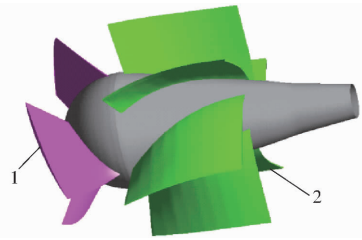


图 1 混流泵叶轮及导叶模型

Fig. 1 Mixed flow pump impeller and guide vane model

1. 叶轮 2. 导叶

2 数值计算方法及准确性验证

2.1 数值计算方法

基于商业软件 ANSYS CFX 软件,求解雷诺时均的 N-S 方程预测混流泵性能,湍流模型选择 SST $k-\omega$ 模型。SST $k-\omega$ 模型考虑了湍流剪切应力的传输,对于负压力梯度条件下流体的分离量具有较高的预测精度,综合了 $k-\omega$ 模型在近壁面处精度高与 $k-\epsilon$ 模型在湍流充分发展区计算速度快的优点。进口采用流量进口条件,出口采用压力出口条件。整个计算域分为旋转域和静止域,其中叶轮为旋转域,叶轮转速 1 200 r/min,其余区域为静止域,采用“Stage”界面(也叫混合平面模型)处理叶轮进口及叶轮出口与导叶段之间动静耦合时流动的参数传递。进口段、出口段、叶轮的轮毂、外壳及导叶体等固体壁面应用无滑移条件,同时近壁区壁面函数设置采用“automatic”方法,评估 y^+ 范围并自动设置壁面函数。

2.2 网格划分

采用 Turbogrid 进行六面体结构化网格划分,对近壁面网格进行加密处理,保证其 y^+ 在 60 以内。为使流动充分发展,在叶轮进口及导叶出口分别设置延伸段,长度约为 2 倍叶轮直径,整个计算域包括进口段、叶轮、导叶和出口段,计算域网格见图 2。

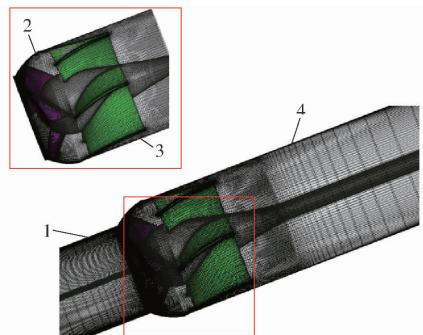


图 2 计算域网格示意图

Fig. 2 Schematic of computational domain grid

1. 进口段 2. 叶轮 3. 导叶 4. 出口段

为减小网格数量带来的误差,保持网格拓扑结构不变,通过改变网格最大尺寸生成不同数量的网格。以设计流量工况下泵段扬程和效率为指标进行网格无关性检测。

网格无关性检测结果如图 3 所示,当网格数大于 4×10^6 时,网格数的增加对计算结果影响不大,综合考虑计算成本和精度,最终总网格数确定为 4.01×10^6 左右。

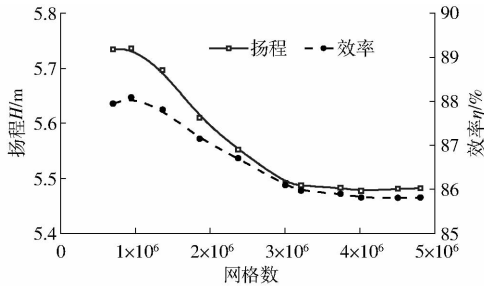


图 3 网格无关性检测结果

Fig. 3 Results of grid irrelevance detection

2.3 准确性验证

图 4 为数值模拟和试验外特性曲线对比。由图可知,数值模拟计算结果与试验结果趋势基本一致,设计流量工况下扬程和效率与试验值偏差小于 3%。整个计算域内扬程和效率与试验值最大偏差出现在大流量附近,这主要是由于计算模型对试验模型进行了简化,忽略了弯管的水力损失。对比结果表明,数值模拟具有较高准确性和可靠性,数值模拟方法较为合理。

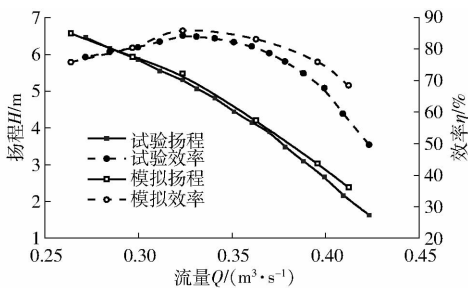


图 4 数值模拟与试验性能曲线对比

Fig. 4 Comparison of numerical simulation and experimental performance curves

3 叶轮优化设计方法

3.1 叶片参数化造型

剖面翼型的选择直接影响泵效率及空化性能,不同于高升力翼型,泵设计时翼型最大拱度相对位置 p (最大拱度弦向位置与弦长的比值) 通常大于 0.4,且厚度分布通常选择压力分布均匀的层流翼型,如 NACA66、791 翼型等。为了研究最大拱度位置对混流泵性能的影响,基于 NACA 四位数翼型拱度线构造最大拱度相对位置 p 为 0.4、0.5 及 0.6 剖

面拱度线,厚度统一选择 NACA66 厚度分布,记为 F1、F2、F3,基准模型方案记为 F0。图 5 为 3 种拱度线外形的比较,图中纵坐标为拱度 f 与最大拱度 f_{\max} 的比值, x 、 c 分别表示弦向位置和弦长,单位为 m。NACA 四位数翼型拱度线参数定义为

$$f = \begin{cases} \frac{f_{\max}}{p^2} [2p(x/c) - (x/c)^2] & (0 \leq x/c \leq p) \\ \frac{f_{\max}}{(1-p)^2} [1 - 2p + 2p(x/c) - (x/c)^2] & (p < x/c \leq 1) \end{cases} \quad (2)$$

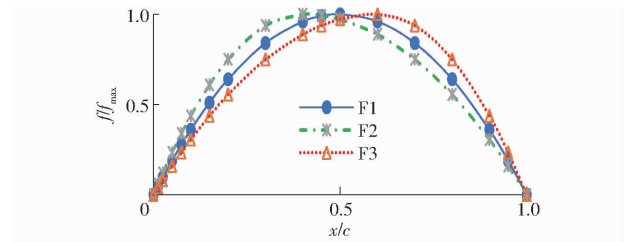


图 5 拱度线形状对比

Fig. 5 Comparison of camber line shapes

保持叶轮叶片数及轮毂比不变,从轮毂到轮缘共划分了 10 个流面,展向无量纲距离 r^* 定义为

$$r^* = \frac{r - r_h}{r_t - r_h} \quad (3)$$

式中 r ——流面半径, m

r_t ——轮缘半径, m

r_h ——轮毂半径, m

由式(3)可知轮毂处 r^* 为 0,轮缘处 r^* 为 1。

剖面翼型主要参数包括:弦径比 c/D 、安放角 φ 及最大拱度比 f_{\max}/c ,如图 6 所示。为了提高设计效率、减少设计变量数,各断面弦径比 c/D 按线性分布,通过给定 $r^* = 0$ 和 $r^* = 1$ 断面 c/D 确定;安放角 φ 及最大拱度比 f_{\max}/c 按二次函数分布,通过给定 $r^* = 0$ 、 $r^* = 0.5$ 和 $r^* = 1$ 断面 φ 及 f_{\max}/c 确定。

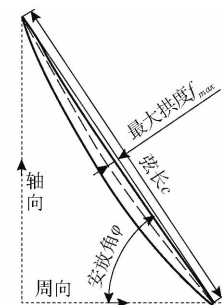


图 6 剖面形状参数示意图

Fig. 6 Schematic of profile shape parameters

参考文献[1]及基准模型自身结构参数,各变量取值范围如表 1 所示,表中下标 0、0.5 和 1 分别对应 $r^* = 0$ 、 $r^* = 0.5$ 和 $r^* = 1$ 断面。

表1 叶轮设计参数

Tab.1 Impeller design parameters

参数	低水平(-)	高水平(+)
$(c/D)_0$	0.35	0.45
$(c/D)_1$	0.50	0.65
$\varphi_0/(\circ)$	30	45
$\varphi_{0.5}/(\circ)$	20	30
$\varphi_1/(\circ)$	10	20
$(f_{\max}/c)_0/\%$	0	15
$(f_{\max}/c)_{0.5}/\%$	0	10
$(f_{\max}/c)_1/\%$	0	5

3.2 叶轮优化函数模型

构建近似模型需要以大量样本点作为数据库,包含叶轮和导叶的全通道计算需要耗费大量计算资源和时间。最大拱度位置对叶轮性能的影响是本文研究的关键,考虑到后置导叶对上游叶轮性能影响较小,为提高优化效率,本文仅对叶轮进行单通道计算。单通道计算区域如图7所示,叶轮网格数为全通道的1/3。

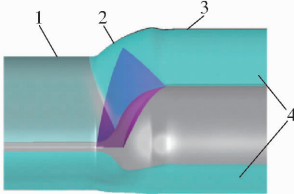


图7 叶轮单通道计算区域

Fig.7 Calculation zone of impeller single channel

1. 进口段 2. 叶轮 3. 出口段 4. 周期性边界

为扩大混流泵高效区范围,除设计工况外,兼顾小流量和大流量工况点效率。采用加权的方法将多目标问题转化为单目标问题,以 $0.8Q_d$ 、 Q_d 和 $1.2Q_d$ 处的加权效率 η_d 最大为优化目标,加权效率目标为

$$\max \eta_d = k_1 \eta_1 + k_2 \eta_2 + k_3 \eta_3 \quad (4)$$

式中 η_1 、 η_2 、 η_3 ——流量 $0.8Q_d$ 、 Q_d 、 $1.2Q_d$ 工况下叶轮效率, %

k_1 、 k_2 、 k_3 ——权重因子

某泵站长期运行于大流量、低扬程工况,因此在保证设计流量处的效率的同时,对大流量工况效率赋予更高的权重,参考文献[24], k_1 、 k_2 、 k_3 取值分别为 0.279、0.406、0.315。

设计流量下叶轮扬程变化不宜过大,以保证其比转数一致,在工程应用上能满足设计要求。约束叶轮优化前后扬程变化小于 0.1 m,扬程约束为

$$H_{ipR} - 0.1 \leq H_{ipH} \leq H_{ipR} + 0.1 \quad (5)$$

式中 H_{ipR} 、 H_{ipH} ——优化前、后叶轮扬程, m

基准叶轮设计流量工况下扬程约为 5.76 m,约束优化后叶轮扬程为 5.66 ~ 5.86 m。

叶轮空化性能预测采用文献[25]提出的基于低压等值面面积与叶片面积比 R_{iso} 的泵临界空化余

量预测模型,该预测模型认为叶片表面空化发生位置与低压区位置大致相同,可通过低压等值面压力预测泵空化余量,该模型临界空化余量预测公式为

$$NSPH_{re} = \frac{P_{tin} - P_{iso}}{\rho g} \quad (6)$$

式中 $NSPH_{re}$ ——临界空化余量, m

P_{tin} ——泵进口总压, Pa

ρ ——流体密度, kg/m³

g ——重力加速度, m/s²

P_{iso} ——面积比 R_{iso} 时低压等值面压力, Pa

当面积比 R_{iso} 确定时,在 CFX 中可通过手动插值的方式,确定满足该面积比的低压等值面压力 P_{iso} 。然而在自动优化过程中无法直接按式(6)确定临界空化余量,为保证优化后叶轮空化性能优于原始模型,约束压力为 P_{iso} 的低压等值面面积比小于原始模型。基准叶轮设计流量工况下空化余量约为 8.08 m,即以压力 22 060 Pa 确定等值面面积。空化特性约束为

$$R_{isoH} \leq R_{isoR} \quad (7)$$

式中 R_{isoR} 、 R_{isoH} ——空化前、后压力为 P_{iso} 等值面与叶片面积比, %

综上所述,混流泵叶轮的优化模型可简化为

$$\begin{cases} \max \eta_d = k_1 \eta_1 + k_2 \eta_2 + k_3 \eta_3 \\ H_{ipR} - 0.1 \leq H_{ipH} \leq H_{ipR} + 0.1 \\ R_{isoH} \leq R_{isoR} \end{cases} \quad (8)$$

3.3 高斯过程回归模型

高斯过程在机器学习中的一个常见应用是高斯过程回归(Gaussian process regression, GPR),对处理小样本、非线性、高维数等复杂问题具有良好的适用性^[26]。高斯过程回归的推导可以从一般线性回归出发,含噪声的一般线性回归模型为

$$Y = X^T \zeta + \theta \quad (9)$$

式中 X ——输入变量 Y ——输出变量

ζ ——待定参数

θ 中各元素服从均值为 0、标准差为 σ 的高斯分布。

GPR 模型是一种概率模型,每个观测值都需引入函数 $f(X)$ ($f(X)$ 服从于均值为 0、协方差函数为 $K(X, X_i)$ 的高斯分布)和 $h(X)$ (基函数)来解释该响应并将函数投影到高维空间,即

$$Y = hX^T \zeta + f(X) \quad (10)$$

模型训练前需对数据进行预处理以提升训练效果,采用 Z-score 标准化方法,使得数据符合均值为 0、方差为 1 的高斯分布,公式为

$$X^* = \frac{X - \bar{X}}{\sigma^2} \quad (11)$$

超参数作为机器学习模型中不能通过学习得到的参数,其选择直接影响模型的训练效果。GPR 模型的超参数主要包括:核函数、基函数和标准差 σ 等。机器学习中的超参数优化旨在寻找使得机器学习算法在验证集表现性能最佳的超参数组合。手动调参需要依赖大量的经验,且比较耗时,贝叶斯优化是基于数据使用贝叶斯定理估计目标函数的后验分布,根据分布选择下一个采样的超参数组合,因此本研究中采用贝叶斯优化确定超参数组合。模型训练时为防止过拟合采用 5 折交叉验证,迭代步数为 100,以均方误差 M_{SE} 最小作为超参数更新原则。为了兼顾模型的整体预测精度,采用最小化的置信边界上限(Upper confidence bound,UCB)方法,从迭代结果中选择最佳参数点。

3.4 优化流程

整个优化流程如图 8 所示,首先通过优化拉丁超立方采样(Optimizing Latin hypercube sampling, OLHS)获取设计范围内的样本数据,建立样本库,并通过多学科优化软件 Isight 搭建自动数值模拟平台,快速获得样本点的优化目标值。在获取足够多的样本点后,通过 GPR 模型拟合变量与优化目标间的近似关系,构建近似模型。通过多岛遗传算法(MIGA)求解该近似模型得到最优参数组合,最后采用 CFD 方法对优化结果进一步验证。其中 MIGA 算法设置为:子群个数为 10,岛个数为 10,交叉率为 1,岛间迁移率和变异概率均为 0.01,迁移间隔代数数为 10。

为防止个别样本点影响预测精度,剔除样本集中扬程偏差过大的点。将样本集分为训练集和测试集,其中 75%用于训练近似模型,25%用于测试近似模型预测效果,采用贝叶斯方法优化高斯过程模型超参数。由优化模型可知,优化指标主要包括 η_d 、 H_{ipH} 和 R_{isoH} ,以方案 F2 为例,各指标下 GPR 模型超参数寻优过程如图 9 所示。经过超参数优化,预测结果的 M_{SE} 显著下降,当迭代次数大于 30 时,模型 M_{SE} 趋于稳定,对于 η_d 、 H_{ipH} 和 R_{isoH} 预测结果的 M_{SE} 均在 0.2 以下。按最小 UCB 确定最佳参数点,最终超参数组合如表 2 所示。

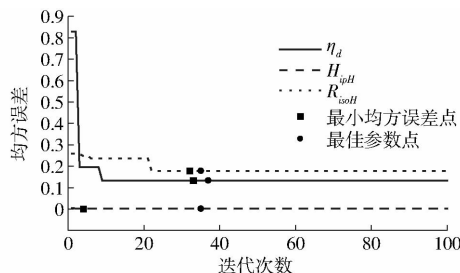


图 9 方案 F2 超参数寻优

Fig. 9 Hyperparameter optimization history for scheme F2

表 2 方案 F2 超参数寻优结果

Tab.2 Hyperparameter optimization result for scheme F2

参数	η_d	H_{ipH}	R_{isoH}
基函数	常量	常量	常量
标准差	35.94	36.65	17.01
核函数	非各向同性 Matern 5/2		

引入决定系数 R^2 评价模型预测精度,决定系数 R^2 越接近于 1,表明预测结果越准确。GPR 模型关于 η_d 、 H_{ipH} 和 R_{isoH} 预测结果决定系数 R^2 如表 3 所示。GPR 模型预测结果决定系数 R^2 均在 0.94 以上,以方案 F2 为例,真实值和预测值比较如图 10 所示。GPR 模型预测值和真实值基本分布在 1:1 线两侧,大部分数据点接近理想预测,GPR 模型对各项指标均具有较高的预测精度,可以作为叶轮优化近似模型。

表 3 GPR 模型预测精度 R^2

Tab.3 Prediction accuracy R^2 of GPR

方案	η_d		H_{ipH}		R_{isoH}	
	训练	测试	训练	测试	训练	测试
F1	0.97	0.96	0.97	0.97	0.95	0.99
F2	0.99	1.00	0.99	1.00	0.95	0.94
F3	0.98	0.99	1.00	1.00	0.94	0.94

4.2 叶轮优化结果分析

经多岛遗传算法寻优,得到加权效率更高的参数组合,如表 4 所示。优化后各设计参数均在参数范围内,参数范围选择较为合理。根据优化结果对

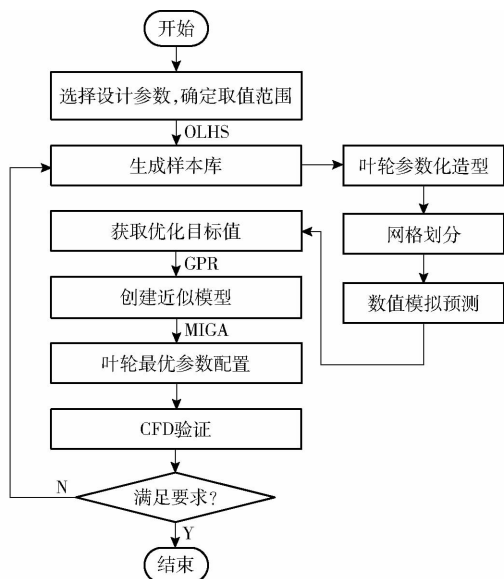


图 8 叶轮优化流程图

Fig. 8 Optimization flow chart of impeller optimization

4 优化结果与分析

4.1 机器学习训练结果

通过优化拉丁超立方算法共生成 260 组样本,

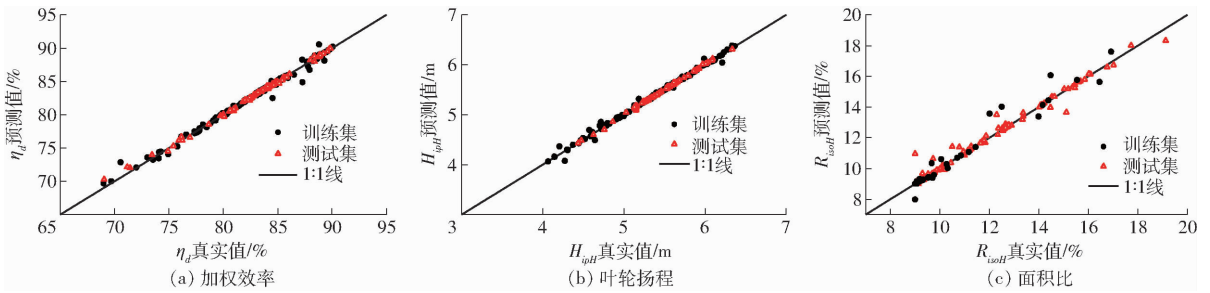


图 10 方案 F2 真实值和预测值比较

Fig. 10 Comparison of true and predicted values for scheme F2

表 4 优化后叶轮参数组合

Tab. 4 Optimized impeller parameter combination

参数	F1	F2	F3
$(c/D)_0$	0.416	0.413	0.409
$(c/D)_1$	0.614	0.606	0.596
$\varphi_0 / (^\circ)$	41.35	41.38	42.67
$\varphi_{0.5} / (^\circ)$	26.72	26.73	26.30
$\varphi_1 / (^\circ)$	17.48	17.47	17.93
$(f_{\max}/c)_0 / \%$	5.41	5.35	4.75
$(f_{\max}/c)_{0.5} / \%$	2.75	2.22	2.42
$(f_{\max}/c)_1 / \%$	0.19	0.50	0.12

叶轮重新造型,优化前后叶片形状对比如图 11 所示。优化后 3 种方案叶片形状整体上相差不大,各设计参数根据翼型升阻力特性进行了微调,侧面反映了优化后的参数组合更有利于叶轮加权效率的提升。与基准模型相比,各断面弦长略有增大,翼型安放角呈现减小的趋势,这也使得叶轮在大流量、小攻角附近工作时具有更高的水力效率。尤其是轮毂侧安放角减小明显,减小了叶片由内到外的扭曲,符合叶片优化设计的思路。同时叶片盘面比增大,有利于叶片空化性能提升。

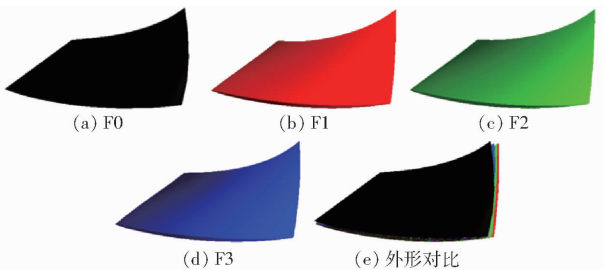


图 11 优化前后叶片外形

Fig. 11 Blade shape before and after optimization

4 种方案叶轮外特性对比如图 12 所示。与基准模型 F0 相比,优化后模型在流量 $0.8Q_d \sim 1.2Q_d$ 范围内叶轮效率均有所提升,4 种方案加权效率分别为 88.27%、88.70%、88.72% 和 88.77%,优化后模型加权效率提升约 0.5 个百分点。设计流量下 4 种模型叶轮扬程分别为 5.76、5.80、5.79、5.76 m,扬程变化较小,满足了效率提升且比转数基本不变的优化设计目标。在流量 $0.8Q_d$ 、 Q_d 和 $1.2Q_d$ 工况下,

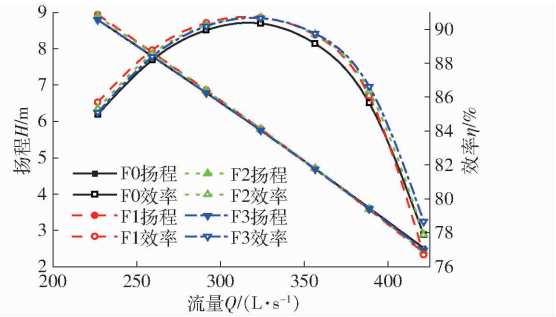


图 12 优化前后叶轮外特性对比

Fig. 12 Comparison of impeller external characteristics before and after optimization

基准模型 F0 水力效率分别为 88.20%、90.35% 和 85.66%,与 F0 相比,在流量 $0.8Q_d$ 、 Q_d 和 $1.2Q_d$ 工况下,方案 F1 水力效率分别上升 0.57、0.35、0.41 个百分点,方案 F2 水力效率分别上升 0.35、0.33、0.70 个百分点,方案 F3 水力效率分别上升 0.20、0.32、0.98 个百分点。方案 F1 和方案 F3 在流量 $0.8Q_d$ 工况效率相差约 0.37 个百分点,在流量 $1.2Q_d$ 工况效率相差约 0.57 个百分点。对于混流叶轮设计而言,采用不同位置拱度线设计的叶轮最大效率相差不大,翼型最大拱度位置主要影响高效区分布范围,翼型最大拱度位置靠近尾缘时有利于大流量、低扬程附近性能提升,最大拱度位置靠近前缘时更有利于小流量、高扬程附近性能提升。

图 13 为设计流量工况叶片表面压力 22 060 Pa 等值面。4 种方案压力 22 060 Pa 对应等值面与叶片面积比值分别为 13.28%、11.98%、10.87% 和

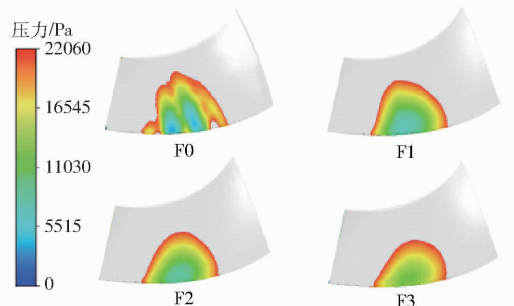


图 13 叶片表面设计流量工况下压力 22 060 Pa 等值面
Fig. 13 Iso-surface of pressure 22 060 Pa under design flow conditions on blade

9.82%，与基准模型 F0 相比，优化后各方案空化性能均得到一定提升，满足了空化性能的约束，主要与叶片盘面比的增大有关。随着最大拱度后移，叶片背面低压区位置逐渐向尾缘方向移动，低压等值面积呈现减小趋势，这说明混流泵设计时选择最大拱度位置靠后翼型有利于空化性能提升。

4.3 内部流场分析

为阐明优化后叶轮性能提升原因，从内流场角度进行分析。图 14 为叶片表面压力及速度矢量分布。在流量 $0.8Q_d$ 工况下，基准模型 F0 叶片进口边背面附近存在局部的低压区，在该位置存在明显的回流和轮毂到轮缘的二次流现象，低能流体的聚集造成了叶片表面压力降低。在设计流量 Q_d 工况下，叶片表面低压区分布与流量 $0.8Q_d$ 工况类似，在流

量 $1.2Q_d$ 工况下，低压区位置发生改变，低压区分布在进口边工作面附近，小攻角下叶片进口边的流动分离主要发生在工作面。与基准模型 F0 相比，优化后各方案叶片表面压力整体分布更为均匀，叶片表面局部低压区减小，压力梯度更为合理，叶片表面流动分离强度减弱。在流量 $0.8Q_d$ 工况下，由 F1 到 F3 低压区范围呈现逐渐增大趋势。设计流量工况下，3 种方案低压区范围相差很小。在流量 $1.2Q_d$ 工况下，由 F1 到 F3 低压区呈现逐渐减小趋势。综合以上分析发现，最大拱度位置靠前和靠后时，对于小流量工况下叶片背面和大流量工况下叶片工作面进口边的流动分离现象分别有着较好的抑制作用。

湍动能 (Turbulent kinetic energy, TKE) 是衡量湍流在时间和空间上发展或衰退的指标，一定程度上可以衡量流动稳定性。图 15 为叶轮内展向断面湍动能分布，结合图 14 中流动分离位置，主要分析 $r^* = 0.15$ ($0.8Q_d$) 和 $r^* = 0.85$ ($1.2Q_d$) 断面。在流量 $0.8Q_d$ 工况下，湍动能高值区主要分布叶片背面头部附近，与叶片表面流动分离区域大致相同，随着最大拱度后移，湍动能呈现增大趋势。在流量 $1.2Q_d$ 工况下，湍动能高值区主要分布叶片工作面头部附近，同样是受流动分离的影响，随着最大拱度后移，湍动能呈现减小趋势。

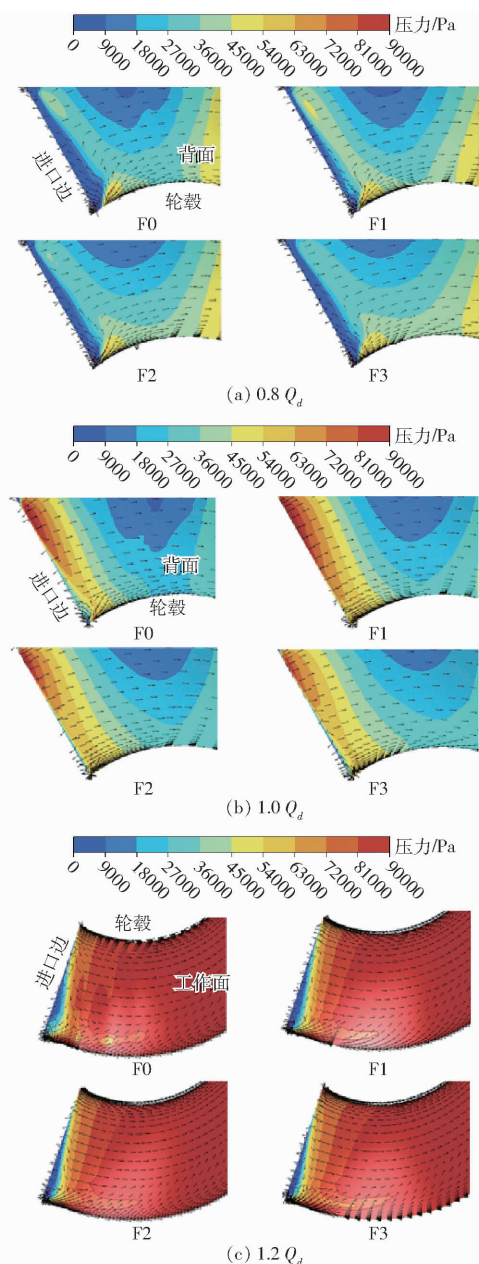


图 14 叶片表面压力及速度矢量图

Fig. 14 Pressure and velocity vector diagrams of blade surface

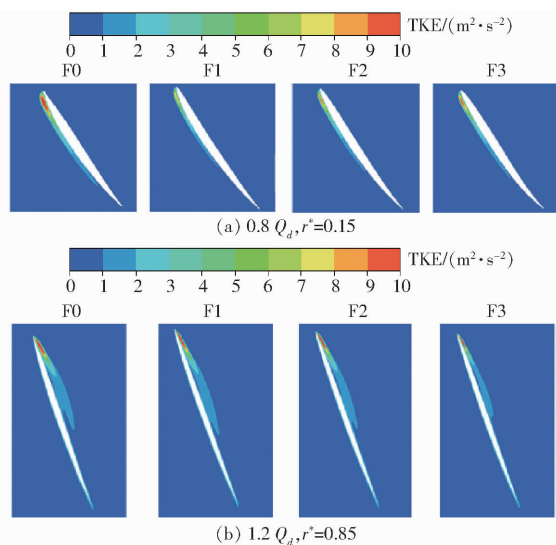


图 15 叶轮内展向断面湍动能分布

Fig. 15 Turbulent kinetic energy distribution in spanwise section of impeller

5 结论

(1) 采用最大拱度位置不同的翼型设计得到的混流泵叶轮最大效率相差较小，翼型最大拱度位置对混流泵叶轮性能的影响主要体现在高效区的分布范围，随着最大拱度位置的后移，高效区向大流量、低扬程附近移动。

(2)随着最大拱度位置向尾缘方向移动,设计流量工况下叶片背面低压等值面面积呈现减小趋势,混流泵设计时采用最大拱度位置靠后翼型时有利于混流泵空化性能的提升。

(3)最大拱度位置在0.4倍和0.6倍弦长附近

时,对于小流量工况下叶片背面靠近叶根附近和大流量工况下工作面叶顶附近进口边的流动分离分别具有较好的抑制作用,叶尖处采用拱度靠后翼型、叶根处采用拱度靠前翼型更有利于扩大混流泵高效区范围。

参 考 文 献

- [1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.
- [2] 曹树良,梁莉,祝宝山,等. 高比转速混流泵叶轮设计方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2005,26(3):185-188.
CAO Shuliang, LIANG Li, ZHU Baoshan, et al. Design method for impeller of high specific speed mixed-flow pump[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2005, 26(3): 185-188. (in Chinese)
- [3] 肖若富,陶然,王维维,等. 混流泵叶轮反问题设计与水力性能优化[J]. 农业机械学报,2014,45(9):84-88.
XIAO Ruofu, TAO Ran, WANG Weiwei, et al. Inverse design and hydraulic optimization of mixed-flow pump impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 84-88. (in Chinese)
- [4] 关醒凡. 轴流泵和斜流泵:水力模型设计试验及工程应用[M]. 北京:中国宇航出版社,2009.
- [5] LEWIS R I. Vortex element methods for fluid dynamic analysis of engineering systems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [6] 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.
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. (in Chinese)
- [7] 陶然,肖若富,杨魏. 基于遗传算法的轴流泵优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(7):573-579.
TAO Ran, XIAO Ruofu, YANG Wei. Optimization design for axial flow pump based on genetic algorithm[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(7): 573-579. (in Chinese)
- [8] 王珑,王同光,罗源. 改进的NSGA-II算法研究风力机叶片多目标优化[J]. 应用数学和力学,2011,32(6):693-701.
WANG Long, WANG Tongguang, LUO Yuan. Improved NSGA-II in multi-objective optimization studies of wind turbine blades[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2011, 32(6): 693-701. (in Chinese)
- [9] 穆雪峰,姚卫星,余雄庆,等. 多学科设计优化中常用代理模型的研究[J]. 计算力学学报,2005,22(5):608-612.
MU Xuefeng, YAO Weixing, YU Xiongqing, et al. A survey of surrogate models used in MDO[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(5): 608-612. (in Chinese)
- [10] 谷海涛,林扬,胡志强,等. 基于代理模型的水下滑翔机机翼设计优化方法[J]. 机械工程学报,2009,45(12):7-14.
GU Haitao, LIN Yang, HU Zhiqiang, et al. Surrogate models based optimization methods for the design of underwater glider wing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(12): 7-14. (in Chinese)
- [11] 姜丙孝,杨军虎,王晓晖,等. 基于高维机器学习方法的离心泵扭曲叶片优化[J]. 航空动力学报,2022,37(3):629-638.
JIANG Bingxiao, YANG Junhu, WANG Xiaohui, et al. Optimization of twisted blade of centrifugal pump based on high dimensional machine learning method[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 629-638. (in Chinese)
- [12] 裴吉,甘星城,王文杰,等. 基于人工神经网络的管道泵进水流动性能优化[J]. 农业机械学报,2018,49(9):130-137.
PEI Ji, GAN Xingcheng, WANG Wenjie, et al. Hydraulic optimization on inlet pipe of vertical inline pump based on artificial neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 130-137. (in Chinese)
- [13] MA S B, KIM S, KIM J H. Optimization design of a two-vane pump for wastewater treatment using machine-learning-based surrogate modeling[J]. Processes, 2020, 8(9): 1170.
- [14] 朱国俊,冯建军,郭鹏程,等. 基于径向基神经网络-遗传算法的海流能水轮机叶片翼型优化[J]. 农业工程学报,2014,30(8):65-73.
ZHU Guojun, FENG Jianjun, GUO Pengcheng, et al. Optimization of hydrofoil for marine current turbine based on radial basis function neural network and genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 65-73. (in Chinese)
- [15] WANG Mengcheng, LI Yanjun, YUAN Jianping, et al. Effects of different vortex designs on optimization results of mixed-flow pump[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2022, 16: 36-57.
- [16] WANG Mengcheng, LI Yanjun, YUAN Jianping, et al. Comprehensive improvement of mixed-flow pump impeller based on multi-objective optimization[J]. Processes, 2020, 8(8): 905.
- [17] WANG Mengcheng, LI Yanjun, YUAN Jianping, et al. Matching optimization of a mixed flow pump impeller and diffuser based on the inverse design method[J]. Processes, 2021, 9(2): 260.
- [18] 苗森春,杨军虎,王晓晖,等. 基于神经网络-遗传算法的液力透平叶片型线优化[J]. 航空动力学报,2015,30(8):1918-1925.
MIAO Senchun, YANG Junhu, WANG Xiaohui, et al. Blade pattern optimization of the hydraulic turbine based on neural network and genetic algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(8): 1918-1925. (in Chinese)

- [48] 朱志畅,葛焱,臧晶荣,等. 基于无人机图像和 SHAP 特征筛选的小麦田间产量预测方法研究[J/OL]. 麦类作物学报, <http://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20240509.1045.026>.
- [49] ALI A,IMRAN M. Remotely sensed real-time quantification of biophysical and biochemical traits of citrus (*Citrus sinensis* L.) fruit orchards—a review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 282: 110024.
- [50] CHEN R Q, ZHANG C J, XU B, et al. Predicting individual apple tree yield using UAV multi-source remote sensing data and ensemble learning[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 201: 107275.
- [51] CAI J, LUO J W, WANG S L, et al. Feature selection in machine learning: a new perspective[J]. *Neurocomputing*, 2018, 300: 70–79.
- [52] UPENDAR K, AGRAWAL K. N, CHANDEL N. S, et al. Greenness identification using visible spectral colour indices for site specific weed management[J]. *Plant Physiology Reports*, 2021, 26(1): 179–187.
- [53] KAZEMI F,GHANBARI PARMEHR E. Evaluation of RGB vegetation indices derived from UAV images for rice crop growth monitoring[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2023, 10: 385–390.
- [54] FAN X, GAO P, ZHANG M, et al. The fusion of vegetation indices increases the accuracy of cotton leaf area prediction[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1357193.
- [55] XU W C, YANG F F, MA G C, et al. Multiscale inversion of leaf area index in citrus tree by merging UAV LiDAR with multispectral remote sensing data[J]. *Agronomy*, 2023, 13(11): 2747.

(上接第 256 页)

- [19] 张德胜,杨港,赵旭涛,等. 基于 BP 神经网络的立式离心泵导叶与蜗壳优化设计[J]. 农业机械学报,2022,53(4):130–139.
ZHANG Desheng, YANG Gang, ZHAO Xutao, et al. Optimization design of vane diffuser and volute in vertical centrifugal pump based on back propagation neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(4): 130–139. (in Chinese)
- [20] 杨魏,王福军,王宏. 离心风机叶片三维反问题优化设计[J]. 农业机械学报,2012,43(8):105–109.
YANG Wei, WANG Fujun, WANG Hong. Aerodynamic optimization design of centrifugal fan blades based on 3D inverse design method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(8): 105–109. (in Chinese)
- [21] 王春林,叶剑,曾成,等. 基于 NSGA-II 遗传算法高比转速混流泵多目标优化设计[J]. 农业工程学报,2015,31(18):100–106.
WANG Chunlin, YE Jian, ZENG Cheng, et al. Multi-objective optimum design of high specific speed mixed-flow pump based on NSGA-II genetic algorithm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(18): 100–106. (in Chinese)
- [22] 王春林,冯一鸣,叶剑,等. 基于 RBF 神经网络与 NSGA-II 算法的渣浆泵多目标参数优化[J]. 农业工程学报,2017, 33(10):109–115.
WANG Chunlin, FENG Yiming, YE Jian, et al. Multi-objective parameters optimization of centrifugal slurry pump based on RBF neural network and NSGA-II genetic algorithm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(10): 109–115. (in Chinese)
- [23] 王春林,胡蓓蓓,冯一鸣,等. 基于径向基神经网络与粒子群算法的双叶片泵多目标优化[J]. 农业工程学报,2019, 35(2):25–32.
WANG Chunlin, HU Beibei, FENG Yiming, et al. Multi-objective optimization of double vane pump based on radial basis neural network and particle swarm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(2): 25–32. (in Chinese)
- [24] 袁建平,范猛, GIOVANNI P, 等. 高比转速轴流泵正交优化设计研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(22): 115–121.
YUAN Jianping, FAN Meng, GIOVANNI P, et al. Orthogonal optimum design method for high specific-speed axial-flow pumps [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(22): 115–121. (in Chinese)
- [25] 龙云. 喷水推进泵水力优化设计方法及空化研究[D]. 上海:上海交通大学,2018.
LONG Yun. Study on the hydraulic optimization design method and cavitation of waterjet pump[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese)
- [26] SMOLA A J, BARTLETT P. Sparse greedy Gaussian process regression[C]// *Neural Information Processing Systems*. MIT Press, 2000.