

基于响应面法的诱导轮多参数水力优化

黄锡龙, 杨宝锋, 严俊峰, 李春乐, 许开富
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要 为提高预压泵的水力性能, 通过响应面法对高速预压泵的诱导轮进行了多参数水力优化。选取叶片倾角、入口安放角、出口安放角、分流叶片轴向位置、入口轮毂直径和出口轮毂直径这 6 个结构参数作为影响因素, 基于中心复合有界设计原理设计了 78 组诱导轮方案, 并通过数值仿真获得 78 组诱导轮的扬程和效率。对计算结果进行极差分析, 获得各影响因素对诱导轮扬程和效率的影响。结果表明: 出口安放角和出口轮毂直径对诱导轮的扬程影响较大, 分流叶片轴向位置和入口轮毂直径对扬程的影响较小; 入口安放角对效率的影响最大, 出口轮毂直径对效率的影响最小。通过线性回归分别得到扬程系数和效率的响应面模型, 以效率大于 60% 作为约束条件, 利用罚函数法对扬程进行寻优, 使诱导轮扬程提升 15.4%。

关键词 诱导轮; 多参数; 响应面法; 罚函数法; 水力优化

中图分类号 V434.21 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)05-0073-08

Multi-parameter hydraulic optimization of inducer based on response surface method

HUANG Xilong, YANG Baofeng, YAN Junfeng, LI Chunle, XU Kaifu
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract In order to improve the hydraulic performance of prepressurizing turbopumps, the multi-parameter hydraulic optimization of the inducer was carried out by the response surface method. Six inducer's structural parameters including blade inclination angle, inlet blade angle, outlet blade angle, axial position of splitting vanes, inlet and outlet hub diameters were selected as influencing factors. 78 sets of inducer schemes were designed according to the principle of central composite inscribed design. The head and efficiency of 78 sets of inducers were obtained by numerical simulation. The effects of influence factors on the head and efficiency of inducers were obtained by range analysis of calculation results. The results show that outlet blade angle and outlet hub diameter have more influence on the head of the inducer. Axial position of splitting vanes and inlet hub diameter have little influence on the head. Inlet blade angle has the greatest influence on the efficiency of inducer. Outlet hub diameter has the least influence on the efficiency. The response surface models of head coefficient and efficiency were obtained respectively by linear regression. With the efficiency greater than 60% as the constraint condition, the

收稿日期: 2021-08-14; 修回日期: 2022-04-11

基金项目: 国家重大基础研究项目 (613321)

作者简介: 黄锡龙 (1995—), 男, 硕士, 研究领域为涡轮泵设计。

penalty function method was used to optimize the head of inducer. The results show that the head of the optimized inducer is improved by 15.4%.

Key words inducer; multi-parameter; response surface method; penalty function method; hydraulic optimization

0 引言

预压泵能够显著提高主泵的空化性能,减轻推进剂贮箱质量,提高火箭的有效载荷,在新一代大型液体运载火箭中得到了普遍应用^[1]。但国内针对预压泵性能优化的研究还较少^[2-3]。国内学者分别基于正交优化设计、权矩阵分析、NSGA-III 算法和二次回归正交组合设计等对离心轮和诱导轮性能开展了大量优化工作^[4-11]。Derakhshan 等基于神经网络与人工蜂群算法对离心泵叶轮进行优化设计^[12]。

随着对泵精细化设计的要求越来越高,多参数、多目标的优化逐渐引起学者重视。Bellary 等基于参数化建模并采用多目标优化算法对离心泵叶轮形状进行了优化^[13]。Park 等基于人工神经网络建模和多目标粒子群优化算法对轴流泵进行了优化^[14]。袁寿其等基于最优拉丁超立方方法和多岛遗传算法求得最优的叶轮参数组合^[15]。薛城等利用正交试验方法,采用五因素四水平设计了 16 组试验方法,对离心泵的性能进行了优化^[16]。

在多参数优化领域中,响应面法因其独特的优势也得到了广泛的应用。张人会等采用响应面法对叶片载荷分布规律进行了优化研究^[17]。张德胜等利用响应面法构建了 6 个叶轮外形参数与优化目标的数学模型,使泵性能得到明显提升^[18]。

本文基于响应面法针对高速预压泵中的诱导轮开展多参数水力优化研究,利用罚函数法对响应面模型进行寻优,获得最优组合,提高诱导轮的水力性能。

1 优化方案

1.1 理论基础

响应面法是数据回归方法中的一种,它综合了试验设计和数学建模^[19]。该方法一般包括试验、建模、模型检验、最优化和结果验证等几个步骤。通过对设计域内部分具有代表性的点进行试验,回归

拟合影响因素与优化目标之间的近似函数关系,基于一定的算法求得各因素最优水平^[20]。该方法在机械优化领域内得到了广泛的应用,是近年来高速发展的优化理论方法。

1.2 影响因素的选择

在响应面法中,影响因素的选择直接决定了优化效果,选择合适的影响因素不仅是优化成功的关键,也是减少资源消耗、加快优化进程的重要手段。目前在叶片泵的水力优化中,一般选取 1~3 个参数进行分析,但由于影响叶片泵性能参数众多,得到的优化模型往往还有进一步优化的空间。但是从优化效率和速度考虑,影响因素又不宜太多。

综上,选取 6 个结构参数对诱导轮进行优化,包括叶片倾角 γ 、入口安放角 β_1 、出口安放角 β_2 、分流叶片轴向位置 l 、入口轮毂直径 D_1 、出口轮毂直径 D_2 等,如图 1 所示。

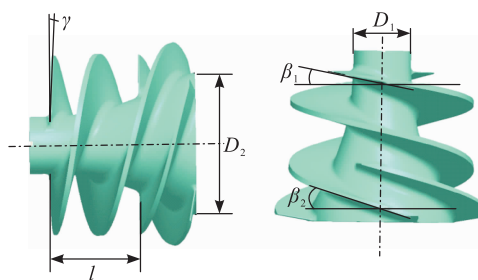


图 1 诱导轮参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram for parameters of inducer

为解决影响因素不同量纲所带来的不便,方便后续统一处理,将所有参数作如下线性变换:

$$\begin{cases} \Delta_i = (X_{2i} - X_{1i})/2 \\ X_{0i} = (X_{1i} + X_{2i})/2 \\ x_i = (X_i - X_{0i})/\Delta_i \end{cases} \quad (1)$$

式中影响因素 X_i 的设计范围是 $[X_{1i}, X_{2i}]$, $i = 1, 2, 3, \dots, 6$ 。

采用旋转性及外推稳健性均较好的中心复合有界设计开展试验方案设计,该试验设计的试验点分布情况见图 2。

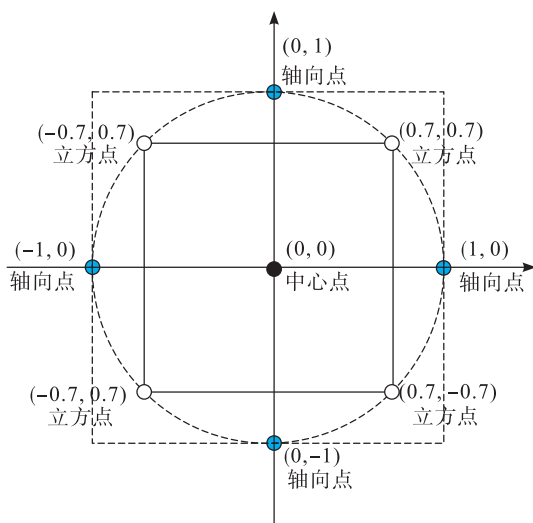


图2 中心复合有界设计试验点分布

Fig.2 Distribution of test points according to the central composite inscribed design

由于共有6个影响因素,故试验包含12个轴向点、64个立方点,另取2个中心点,共计78个试验点,即78个诱导轮方案。

2 样本获取与极差分析

对78个诱导轮方案进行数值仿真,获得诱导轮扬程系数和效率。同时,对计算结果进行极差分析,获得各影响因素对诱导轮扬程系数和效率的影响。

2.1 网格及数值方法

利用ANSYS ICEM CFD软件对流域划分网格。采用非结构网格,并对壁面进行加密。计算域如图3所示。

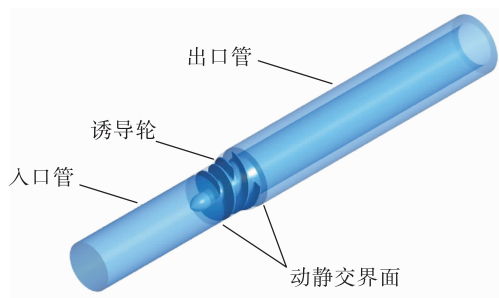


图3 计算域

Fig.3 Computational domain

为提高计算方法的准确性并降低对计算资源的需求,对网格进行了无关性验证,结果如图4所示。为保证计算结果的准确性,选定总网格单元数

为574万。

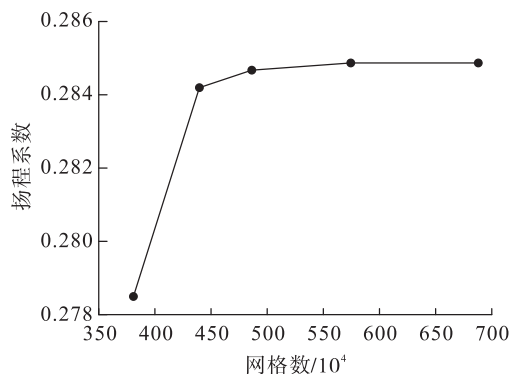


图4 网格无关性验证

Fig.4 Grid independence validation

采用ANSYS CFX15.0进行稳态数值计算。将常温水作为工作介质,以压力入口、质量流量出口作为边界条件,并设入口总压为0.073 MPa、质量流量为6.2 kg/s。壁面均为无滑移壁面,采用scalable壁面函数。诱导轮转速设为12 500 r/min。采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,ZGB空化模型,饱和蒸气压为3.574 kPa,残差收敛精度设为 10^{-6} 。利用ANSYS CFX软件的session功能简化设置过程。

为使计算结果更准确,先计算无空化条件下的流场,并将其作为初场再计算空化条件下的流场。部分计算结果如表1所示(其中000-1模型和000-2模型是原始模型的两独立次的仿真计算,即两个中心点)。扬程系数定义为

$$\psi = \frac{p_{\text{out}} - p_{\text{in}}}{\rho v_t^2} \quad (2)$$

式中: p_{out} 为出口压力; p_{in} 为入口压力; ρ 为流体密度; v_t 为泵叶尖速度。

表1 部分计算结果

Tab.1 Partial calculation results

模型序号	扬程系数	效率
000-1	0.284 8	0.624 3
000-2	0.284 3	0.624 8
001	0.275 9	0.609 1
⋮	⋮	⋮
038	0.290 8	0.609 7
⋮	⋮	⋮
075	0.242 5	0.598 8
076	0.274 5	0.605 6

2.2 极差分析

考察各影响因素对诱导轮扬程和效率的影响大小,对 64 个立方点的计算结果进行极差分析,结果如表 2 和表 3 所示。其中 K_{ij} 是第 i 个因素、第 j

个水平所对应的计算结果之和, k_{ij} 是 K_{ij} 的平均值, R_i 是第 i 个因素的极差,极差越大反映影响因素对诱导轮扬程或效率的影响越大。

表 2 扬程系数极差分析

Tab. 2 Range analysis of the head coefficient

极差分析指标	叶片倾角/(°)	入口安放角/(°)	出口安放角/(°)	分流叶片轴向位置	入口轮毂直径	出口轮毂直径
K_{i1}	8.834	8.887	8.128	8.733	8.781	9.036
K_{i2}	8.678	8.624	9.384	8.779	8.731	8.476
k_{i1}	0.276	0.278	0.254	0.273	0.274	0.282
k_{i2}	0.271	0.270	0.293	0.274	0.273	0.265
R_i	0.005	0.008	0.039	0.001	0.002	0.018

表 3 效率极差分析

Tab. 3 Range analysis of the efficiency

极差分析指标	叶片倾角/(°)	入口安放角/(°)	出口安放角/(°)	分流叶片轴向位置	入口轮毂直径	出口轮毂直径
K_{i1}	8.834	8.887	8.128	8.733	8.781	9.036
K_{i2}	8.678	8.624	9.384	8.779	8.731	8.476
k_{i1}	0.276	0.278	0.254	0.273	0.274	0.282
k_{i2}	0.271	0.270	0.293	0.274	0.273	0.265
R_i	0.002	0.023	0.004	0.004	0.002	0.001

从表 2 可得,影响因素对扬程的影响从大到小依次是:出口安放角、出口轮毂直径、入口安放角、叶片倾角、入口轮毂直径、分流叶片轴向位置。从表 3 可得,6 个影响因素对效率的影响从大到小依次是入口安放角、出口安放角、分流叶片轴向位置、入口轮毂直径、叶片倾角、出口轮毂直径。

3 响应面模型的建立与评估

根据试验样本建立扬程系数和效率的响应面模型。采用常用的二阶响应面模型。该模型具有较高的拟合精度。

3.1 模型建立

由于包含 6 个影响因素,二阶响应面模型公式为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^6 \beta_i x_i + \sum_{i < j}^6 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^6 \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (3)$$

式(3)共包含 28 个未知参数。根据得到的样本数据,通过线性回归可求解该模型中的所有未知

参数。

为方便计算,将式(3)进行如下换算。

$$\hat{\beta}_0 = \beta_0, \hat{\beta}_1 = \beta_1, \hat{\beta}_2 = \beta_2, \dots, \hat{\beta}_6 = \beta_6, \hat{\beta}_7 = \beta_{12}$$

$$\hat{\beta}_8 = \beta_{13}, \dots, \hat{\beta}_{11} = \beta_{16}, \hat{\beta}_{12} = \beta_{23}$$

$$\hat{\beta}_{13} = \beta_{24}, \dots, \hat{\beta}_{15} = \beta_{26}, \hat{\beta}_{16} = \beta_{34}, \hat{\beta}_{17} = \beta_{35}$$

$$\hat{\beta}_{18} = \beta_{36}, \hat{\beta}_{19} = \beta_{45}, \hat{\beta}_{20} = \beta_{46}, \hat{\beta}_{21} = \beta_{56}$$

$$\hat{\beta}_{22} = \beta_{11}, \hat{\beta}_{23} = \beta_{22}, \dots, \hat{\beta}_{27} = \beta_{66}$$

$$z_1 = x_1, z_2 = x_2, \dots, z_6 = x_6, z_7 = x_1 x_2$$

$$z_8 = x_1 x_3, \dots, z_{11} = x_1 x_6, z_{12} = x_2 x_3$$

$$z_{13} = x_2 x_4, \dots, z_{15} = x_2 x_6, z_{16} = x_3 x_4$$

$$z_{17} = x_3 x_5, z_{18} = x_3 x_6, z_{19} = x_4 x_5$$

$$z_{20} = x_4 x_6, z_{21} = x_5 x_6, z_{22} = x_1 x_1$$

$$z_{23} = x_2 x_2, \dots, z_{27} = x_6 x_6$$

将式(3)改写成多元线性模型,由此得到响应面模型的线性表达形式,即

$$y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 z_1 + \hat{\beta}_2 z_2 + \hat{\beta}_3 z_3 + \cdots + \hat{\beta}_{27} z_{27} \quad (4)$$

系数向量 $\hat{\beta}$ 的最小二乘估计为

$$\hat{\beta} = (Z^T Z)^{-1} Z^T Y \quad (5)$$

$$y_h = 0.2818 + 0.0025x_1 - 0.0038x_2 - 0.0195x_3 - 0.0056x_4 - 0.0007x_5 - 0.0089x_6 - 0.0005x_1x_2 + 0.0010x_1x_3 + 0.0005x_1x_4 + 0.0002x_1x_5 - 0.0005x_1x_6 + 0.0057x_2x_3 - 0.0001x_2x_4 + 0.0002x_2x_5 - 0.0008x_2x_6 - 0.0006x_3x_4 - 0.0005x_3x_6 - 0.0001x_4x_5 + 0.0004x_4x_6 - 0.0002x_5x_6 + 0.0005x_1^2 - 0.002x_2^2 - 0.0039x_3^2 - 0.0012x_4^2 + 0.0006x_5^2 - 0.0022x_6^2$$

$$y_\eta = 0.6210 + 0.001x_1 - 0.0163x_2 - 0.0025x_3 + 0.0023x_4 - 0.0014x_5 - 0.0009x_6 + 0.0013x_1x_2 + 0.0034x_1x_3 + 0.0022x_1x_4 - 0.0011x_1x_5 + 0.0008x_1x_6 + 0.0037x_2x_3 + 0.0002x_2x_4 + 0.0014x_2x_5 - 0.0036x_2x_6 - 0.0026x_3x_4 + 0.0007x_3x_5 + 0.0012x_3x_6 + 0.0003x_4x_5 - 0.0025x_4x_6 - 0.001x_5x_6 + 0.002x_1^2 - 0.0014x_2^2 - 0.008x_3^2 - 0.0059x_4^2 + 0.0024x_5^2 - 0.0043x_6^2$$

(6)

3.2 模型评估

对响应面模型进行误差分析、方差分析及残差分布分析,验证模型的准确性、可靠性和适应性。

误差分析是对响应面精度评价指标的分析,包括复相关系数 R^2 、修正复相关系数 R_a^2 以及相对均方根误差^[21];方差分析是对响应面模型进行显著性检验,它可以验证模型的可靠性。

表4给出了响应面模型误差分析和方差分析的结果。结果表明,两个响应模型均具有较高的准确性和可靠性。

表4 评估结果
Tab. 4 Evaluation results

评价指标	扬程系数 响应面模型	效率 响应面模型
复相关系数 R^2	0.979	0.866
修正复相关系数 R_a^2	0.978	0.853
相对均方根误差	0.011	0.011
F	560.5	39.5

下面对响应面模型的残差分布进行分析,验证响应面模型的适应性。图5和图6分别给出了残差正态概率分布图和残差与预测值分布图。图中每个点代表一个试验方案,不同颜色代表不同的值,其值从蓝到红逐渐增大。

式中: Z 为78组方案的影响因素水平矩阵; Y 为78组方案的扬程系数矩阵或效率矩阵。

经过矩阵计算,分别得到扬程系数响应面模型和效率响应面模型,即

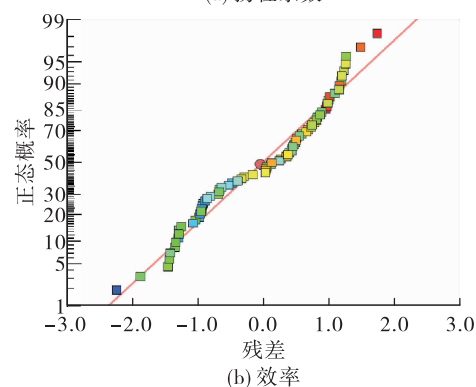
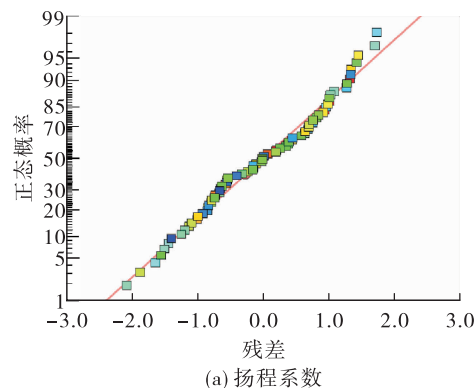


图5 残差正态概率分布图

Fig. 5 Normal probability distribution of residuals

从图5可以看到,残差正态概率总体呈线性分布,主要位于一根直线上,表明两种响应面模型具有良好的适应性。而在图6中,所有的残差均分布在两根红线内,且无明显的分布规律,亦能表明响应面模型具有良好的适应性。

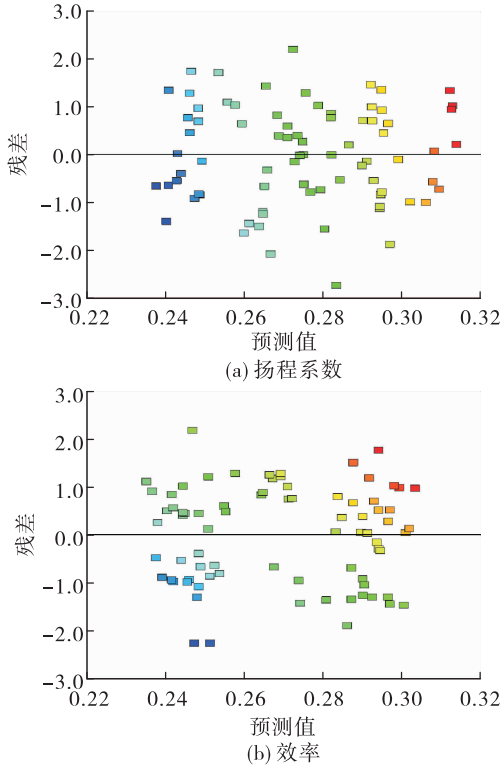


图 6 残差与预测值分布图

Fig. 6 Distribution diagram of residuals and predicted values

综上所述,扬程系数响应面模型和效率响应面模型具有良好的准确性、可靠性和适应性,能够对优化目标进行有效、准确的预测。

4 模型寻优

将扬程系数作为优化目标,效率大于 60% 作为约束条件,采用内点罚函数法在不同范围内对扬程系数进行寻优。优化问题的数学形式为

$$\begin{aligned} \min F(\mathbf{X}) \quad \mathbf{X} &= (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \\ \text{s. t.} \quad &\begin{cases} M(\mathbf{X}) \geq 0.6 \\ a \leq x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \leq b \\ F(\mathbf{X}) = -y_h \quad M(\mathbf{X}) = y_\eta \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $F(\mathbf{X})$ 为目标函数; $M(\mathbf{X})$ 为约束函数; a 、 b 为寻优范围的上、下界。

构成内点罚函数的寻优数学模型为

$$\begin{cases} \min \varphi(\mathbf{X}, r_k) = F(\mathbf{X}) + r_k \frac{1}{M(\mathbf{X})} \\ \mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T \end{cases} \quad (8)$$

式中 r_k 为惩罚因子, $r_{k+1} = \beta r_k$, $\beta = 0.1$ 。

持续迭代,惩罚因子将趋于 0,惩罚项也趋于 0,从而使罚函数逐渐逼近目标函数。

4.1 寻优结果

利用 Design-Expert 软件分别求解不同寻优范围内下扬程系数的最优解。下面给出了 4 个不同范围内的寻优结果。

1) $-1 \leq x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \leq 1$

在 $[-1, 1]$ 寻优范围内求得最优解为 $x = [-1, -1, 1, -0.271, -1, -1]$, 扬程系数的预测值为 0.326 6, 效率的预测值为 61.53%。

根据最优解给出的诱导轮参数,建立诱导轮三维模型,并进行仿真计算,得到扬程系数的仿真值为 0.316 3, 效率为 61.21%, 优化后的诱导轮扬程系数相比原始模型提升了 11.06%, 与预测值的相对误差为 3.26%。将该优化模型命名为优化模型 A。

2) $-1.2 \leq x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \leq 1.2$

在 $[-1.2, 1.2]$ 范围内求得最优解为 $x = [-1.2, -1.2, 1.2, -0.527, -1.2, -1.075]$, 扬程系数的预测值为 0.334 2, 效率的预测值为 61.06%。

经仿真计算,得到扬程系数的仿真值为 0.323 2, 效率为 60.67%, 优化后的诱导轮扬程系数较原始模型提升了 13.48%, 与预测值的相对误差为 3.40%。将该优化模型命名为优化模型 B。

3) $-1.5 \leq x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \leq 1.5$

在 $[-1.5, 1.5]$ 范围内,求得最优解为 $x = [-1.5, -1.5, 1.5, -0.578, -1.5, -0.979]$, 扬程系数的预测值为 0.346 0, 效率的预测值为 60.64%。

经仿真计算,得到扬程系数的仿真值为 0.328 7, 效率为 61.37%, 优化后的诱导轮扬程系数较原始模型提升了 15.41%, 与预测值的相对误差为 5.26%。将该优化模型命名为优化模型 C。

4) $-2 \leq x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \leq 2$

在 $[-2, 2]$ 范围内,求得最优解为 $x = [-2, -2, 2, -0.844, -2, -0.541]$, 扬程系数的预测值为 0.366 0, 效率的预测值为 60.00%。

经仿真计算,得到扬程系数的仿真值为 0.319 5, 效率为 61.04%, 优化后的诱导轮扬程系数较原始模型提升了 12.18%, 与预测值的相对误差为 14.55%。将该优化模型命名为优化模型 D。

优化结果汇总如表 5 所示。

表 5 优化结果
Tab. 5 Optimization results

寻优范围	预测值	仿真值	相对误差/%	提升率/%
$[-1,1]$	0.326 6	0.316 3	3.26	11.06
$[-1.2,1.2]$	0.334 2	0.323 2	3.40	13.48
$[-1.5,1.5]$	0.346 0	0.328 7	5.26	15.41
$[-2,2]$	0.366 0	0.319 5	14.55	12.18

从表 5 可以看到,在一定范围内,随着寻优范围的扩大,最优解的诱导轮扬程系数越大,预测值与仿真值之间的相对误差越大,且相对误差处于较低水平,体现了响应面模型对扬程系数预测的准确性。但是当寻优范围扩至 $[-2,2]$ 时,两者的相对误差急剧增加到 14.55%,响应面模型预测得到的结果明显失真,且扬程系数未继续增大,表明在该寻优范围下,扬程系数响应面模型已不再适用,无法对诱导轮扬程系数作出准确的预测。在 4 个优化模型中,优化模型 C 增压能力最高,其扬程系数较原始模型提升了 15.41%。

4.2 流场对比分析

将扬程系数最高的优化模型 C 与原始模型做进一步对比分析。

图 7 给出了优化前后的诱导轮流道轴截面压力分布对比。从图 7 中可以看到,优化模型的流道入口低压区明显减少,叶轮入口条件明显改善,具有更好的进口性能,且叶轮出口处高压区也明显增多,表明优化模型增压能力得到了提升。

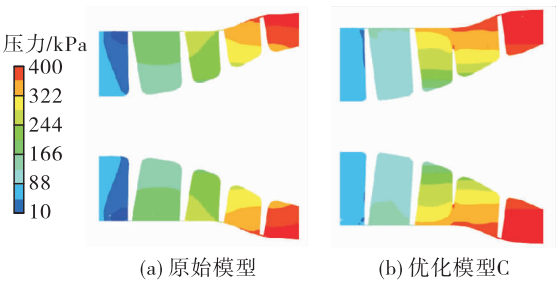


图 7 压力分布对比

Fig. 7 Comparison of the pressure distribution

图 8 给出了 90%叶高处湍动能分布对比,湍动能可以反映流道内能量的耗散程度。从图 8 中可以看到,在分流叶片与长叶片之间的流道的湍动能明

显高于其他区域,且优化后湍动能小幅下降,出口处的能量损失减少。此外,优化模型与原始模型相比,入口处的湍动能均处于较低的水平,这可能是因为优化后减弱了进口回流,改善了诱导轮入口条件,使得入口能量损失减少。

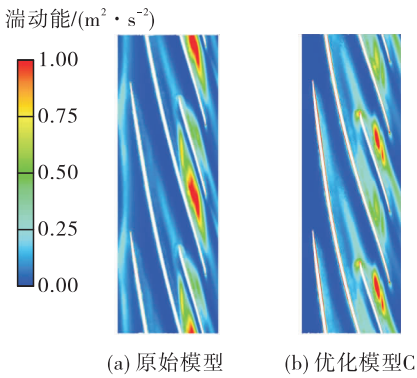


图 8 90%叶高处湍动能分布对比

Fig. 8 Comparison of the turbulent kinetic energy distribution at 90% blade height

综上对比分析,优化后的诱导轮做功能力更强,入口条件更好,流场改善明显。

5 结论

利用基于中心复合有界设计的响应面法,选取叶片倾角 γ 、入口安放角 β_1 、出口安放角 β_2 、分流叶片轴向位置 l 、入口轮毂直径 D_1 和出口轮毂直径 D_2 这 6 个诱导轮结构参数作为影响因素,对诱导轮进行了多参数水力优化,使诱导轮扬程提升 15.4%。

通过对 64 个立方点的计算结果进行极差分析,得到各影响因素对诱导轮扬程和效率的影响大小。其中,出口安放角和出口轮毂直径对扬程的影响较大,分流叶片轴向位置和入口轮毂直径对扬程的影响较小;入口安放角对效率的影响最大,出口轮毂直径对效率的影响最小。

参考文献

[1] 廖懂华,林奇燕,叶小明. 预压涡轮泵轴流式液力涡轮的流动结构研究[J]. 导弹与航天运载技术,2018(6): 49-54.
[2] 袁伟为,王晓锋,张聃,等. 液体火箭发动机预压泵性能优化研究[C]//陕西省宇航学会 2018 年学术交流会.

- 汉中:陕西省宇航学会,2018.
- [3] 陈聿晨,安阳,沈文金. 220 吨补燃循环发动机氢预压泵诱导轮技术方案研究[C]//第二届中国空天推进技术论坛. 西宁:[s. n.],2019.
- [4] 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.
- [5] 冷洪飞,郝开元. 基于权矩阵分析法的微型离心泵多目标正交优化设计[J]. 流体机械,2018,46(5):35-39.
- [6] 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(18):2239-2246.
- [7] 方杰,朱荣生,王秀礼,等. 基于二次回归正交组合设计低比转速离心泵叶轮的优化设计[J]. 水泵技术,2019(1):14-20.
- [8] 李惠敏,李向阳,蒋建国,等. 诱导轮出口参数对高速离心泵性能的影响[J]. 火箭推进,2020,46(1):69-75.
LI H M, LI X Y, JIANG J Y, et al. Influence of outlet parameters of inducer on performance of high speed centrifugal pump[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(1): 69-75.
- [9] 张亚太,陈晖,项乐,等. 基于正交优化设计的诱导轮空化性能研究[J]. 推进技术,2020,41(2):343-352.
- [10] 余璐,张皓晨,陈晖,等. 考虑空化不稳定性的诱导轮水力正交优化设计[C]//2018 年工程热物理学会西安年会. 西安:中国工程热物理学会,2018.
- [11] 黄锡龙,陈炜,王文廷,等. 前置不同诱导轮的高速离心泵性能[J]. 火箭推进,2020,46(2):64-70.
HUANG X L, CHEN W, WANG W T, et al. Performance of high-speed centrifugal pump with different pre-positioned inducer[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(2):64-70.
- [12] DERAKHSHAN S, MOHAMMADI B, NOURBAKHS A. Efficiency improvement of centrifugal reverse pumps[J]. Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(2):1-9.
- [13] BELLARY S A I, HUSAIN A, SAMAD A. Effectiveness of meta-models for multi-objective optimization of centrifugal impeller[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(12):4947-4957.
- [14] PARK H S, MIAO F. Simulation and modeling methodologies, technologies and applications[EB/OL]. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-11457-6>, 2015.
- [15] 袁寿其,王文杰,裴吉,等. 低比转数离心泵的多目标优化设计[J]. 农业工程学报,2015,31(5):46-52.
- [16] 薛城,祝宝山,刘小兵,等. 基于叶片载荷分布的离心泵正交优化设计[J]. 工程热物理学报,2019,40(5):1065-1071.
- [17] 张人会,樊家成,杨军虎,等. 基于自由曲面变形方法的离心泵叶片载荷优化[J]. 农业机械学报,2015,46(10):38-43.
- [18] 张德胜,梅剑,赵睿杰,等. 基于响应曲面法的氟塑料两相流泵优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2020,38(9):898-903.
- [19] ZHANG X D, YU S M, GONG Y, et al. Optimization design for turbodrill blades based on response surface method[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(2):168781401562483.
- [20] 方俊涛. 响应曲面方法中试验设计与模型估计的比较研究[D]. 天津:天津大学,2011.
- [21] 熊俊涛,乔志德. 基于响应面法的跨声速翼型气动优化设计[J]. 实验流体力学,2005,19(1):104-108.