

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.012

基于响应面法的旋流泵优化设计*

王春林 彭海菠 丁剑 赵斌娟 贾飞

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘要:以旋流泵最高效率、高效区范围及在小流量区的扬程-流量曲线稳定性为目标函数,先采用 Plackett - Burman 试验设计筛选结构参数,并根据结构参数对目标函数的影响将其划分为3个等级:显著因素、次显著因素和非显著因素;再由中心复合设计和 Box-Behnken 设计及响应面分析确定各级结构参数的最优设计点。该方法以 CFD 计算结果为基础,构造旋流泵的结构参数与多目标函数的响应面近似模型,分析了结构参数间的交互效应。对最优设计点的泵进行了试验研究,试验结果与 CFD 计算值吻合,在设计工况下效率的相对误差为 4.89%,且较优化前的模型在性能上有明显改善,表明基于试验设计和响应面法可用于旋流泵的优化设计。

关键词:旋流泵 优化设计 响应面法

中图分类号: TH311; TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0059-07

Optimization for Vortex Pump Based on Response Surface Method

Wang Chunlin Peng Haibo Ding Jian Zhao Binjuan Jia Fei

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The optimization method of vortex pump design was established based on experimental design theory and the response surface approximation. Taking the maximum efficient, high effective area and stability of head-flow curves in the small flow region as the objective functions, the structural parameters of model pump were screened by Plackett - Burman experimental design method. The selected parameters were divided into three levels: significant factor, the second significant factor and non-significant factors, according to their influences on objective functions. Finally, the optimal design points for each level of structural parameters were determined by central composite design, Box-Behnken design and the response surface analysis method. Based on the computational fluid dynamics (CFD) results, the response surface approximation model for the pump structural parameters and multi-objective function were built to analyze the interaction between the effects of structural parameters. Furthermore, experimental research was done for the pump at the optimum working point. It was found that experimental results correspond well with the response surface approximation, with a relative efficiency deviation of 4.89%. The optimized pump improved significantly in performance than before. Thus, it is concluded that the response surface optimization design method based on experimental design theory can be used to optimize the design of vortex pump.

Key words: Vortex pump Optimal design Response surface methodology

引言

随着计算流体力学的发展,通过流场分析和数值优化相结合提高泵性能的方法越来越受到重视。

泵内部流动呈现复杂三维的特性,取决于泵内部结构参数的相互作用。借助于 CFD 计算可以获得大量的信息,而数值优化方法可作为分析这些信息的工具,用来研究结构参数与机器性能之间的关系,并

收稿日期: 2012-05-14 修回日期: 2012-06-02

* 国家自然科学基金资助项目(51109094)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教[2011]8号)

作者简介: 王春林,教授,主要从事流体机械理论、特性及流动计算研究, E-mail: chwang@ujs.edu.cn

且寻找结构参数的最佳组合。

近几年来,优化方法在离心叶轮的设计中得到广泛的应用^[1-11]。但由于旋转机械内部存在动静干涉问题,本文基于试验设计和响应面近似方法对旋流泵模型进行优化设计,以期改进旋流泵的性能。

1 CFD 模型及边界条件设定

1.1 计算模型

本文计算采用商用 CFX 软件,基于雷诺时均 N-S 方程和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,选用动静耦合模型中的滑移网格模型,在时间上,采用二阶隐式格式。控制方程的求解采用 SIMPLE 方法,对压力场和速度场进行反复修正及迭代计算,直至获得收敛解。整个计算域为全流道计算,包括泵的吸入段、叶轮流道、蜗壳流道及出口段。

1.2 边界条件设定

(1) 进口边界条件

假定进口无旋,切向速度与径向速度为零,并且湍流充分发展,在进口截面上均匀分布。根据流量与进口截面面积设定速度进口。

(2) 出口边界条件

选用自由出流条件,假定在出口截面上满足所有流动变量具有零扩散通量,出口截面条件是由区域内部推导得来,对上游流动没有影响。

(3) 壁面边界条件

壁面边界条件采用粘性流体无滑移边界。在近壁区采用标准壁面函数法,将壁面上的物理量与湍流核心区内的相应物理量联系起来。

2 优化目标函数定义

通常用于评价泵性能的参数有额定流量、额定扬程和最高效率,要求在额定流量下效率达到最大值,但仅这些参数并不能完全评价一台泵的性能。在本文优化设计中,以最高效率 P 、高效区长度 E 、扬程-流量曲线在小流量区的稳定性 K 为目标函数,其中 K 主要用于评定小流量区域是否出现驼峰和存在驼峰的严重性。

目标函数中变量及变量关联关系见图 1,点 K 为扬程最高点,所对应的扬程为小流量区域的扬程峰值 H_K ;点 E 为效率最高点,对应最高效率 η_E 。令

$$P = \eta_E \quad (1)$$

$$E = \frac{Q_2}{Q_E} - \frac{Q_1}{Q_E} \quad (2)$$

式中 η_E ——效率峰值

Q_E ——效率峰值时的流量

Q_1, Q_2 ——小、大流量工况下 $0.95\eta_E$ 时的流量

模型旋流泵的扬程-流量曲线在小流量处具有不稳定的特性。在小流量区定义函数

$$K = (H_K - H_0) / Q_K \quad (3)$$

式中 H_K ——扬程在小流量区的峰值

H_0 ——关死点扬程

Q_K ——扬程为 H_K 时的流量

K 越小说明扬程曲线在小流量区域的驼峰越小,曲线越平坦,扬程越稳定。效率峰值 η_E 和高效区长度与模型旋流泵结构参数之间有直接的关联。优化设计希望目标函数 P 和 E 越大越好,而 K 越小越好。

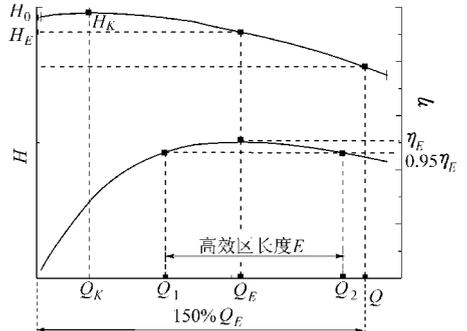


图 1 目标函数中变量及关联关系示意图

Fig. 1 Objective function of variables and connection relationship schemes

3 结构参数设定及筛选

3.1 结构参数设定

优化设计目标模型旋流泵的设计参数:流量 $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 60 \text{ m}$,转速 $n = 3\ 000 \text{ r}/\text{min}$,效率 $\eta = 53\%$ 。其中结构参数的定义如表 1 所示,模型旋流泵的结构示意图如图 2 所示。

表 1 结构参数说明

Tab. 1 Structural parameters

参数符号	参数名称	参数符号	参数名称
R	叶片进口安放角	L	蜗室无叶腔宽度
F	叶片出口安放角	b_3	环形蜗室宽度
P'	叶片倾斜段占叶片全长比例($P' = a/b$)		叶轮出口与蜗室间
d_0	蜗室吸入口直径	e	径向间隙
b_2	叶轮叶片宽度	T	蜗室出口直径
S	从环形蜗室内壁算起的直边长度	R_0	环形蜗室半径
d_2	叶轮外径	K'	叶片厚度
		d_n	轮毂直径
		Z	叶片数

3.2 Plackett - Burman 试验设计筛选参数

应用 Design-Expert 软件对模型旋流泵的优化设计变量进行 Plackett - Burman 设计(因素水平设计如表 2 所示)。对该泵的 14 个优化设计变量进行筛选,外加 5 个虚拟变量。每个变量分别确定(+)

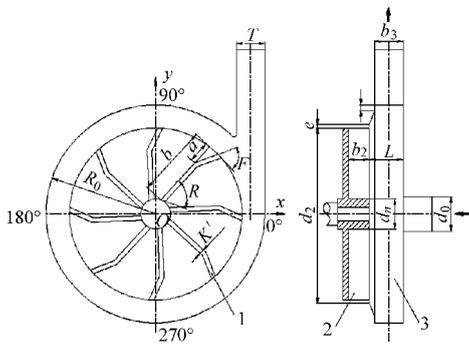


图2 模型旋流泵主要结构参数示意图

Fig.2 Schematic of main structural parameters for vortex pump

1. 叶片 2. 叶轮 3. 蜗室

和(-)2个水平,共进行20次试验以确定每个因素的影响因子。20次试验通过CFX程序求解。

表2 Plackett - Burman 设计因子水平

Tab.2 Levels and factors of Plackett - Burman design

因素	低水平(-)	高水平(+)
$R/(\circ)$	30	45
$F/(\circ)$	30	45
P'	0.2	0.3
Z	8	10
b_2/mm	34	42.5
K'/mm	2	4
d_2/mm	170	210
b_3/mm	40	50
L/mm	25	40
e/mm	3	5
T/mm	40	50
R_0/mm	120	150
d_0/mm	65	80
S/mm	5	8

为了获得性能参数 P 、 E 和 K , 必须对所有工况范围进行计算。在筛选分析中, 每次试验安排 25 ~ 30 个工况点进行计算, 并通过多项式拟合曲线获得所有工况范围内的性能曲线, 对拟合的多项式进行计算获得 P 、 E 和 K 。采用 Design-Expert 对计算结果进行回归分析, 其中最高效率 P 的偏回归系数及其显著性如表 3 所示。由表 3 可明显看出因素叶轮外径、蜗室径向尺寸、吸入口直径为显著影响因子。而出口斜角、叶片厚度、蜗室宽度、无叶腔宽度、蜗室出口径向宽度为次显著影响因子。

对 E 及 K 的数据进行回归分析, 得到各影响因子的偏回归系数及其显著性(表 4、表 5)。由表 4 可明显看出因素叶轮叶片宽度、叶片厚度为主要影响因子。由表 5, 吸入口直径是影响 K 的显著因素, 且呈正影响。通过对表 4 和表 5 分析, 结合前人试验研究^[12-14], 对结构参数进行总结, 得出显著因素有叶轮外径、环形蜗室径向尺寸、蜗室吸入口直径, 次

显著因素有叶片出口安放角、蜗室无叶腔宽度、叶轮叶片宽度、环形蜗室宽度、蜗室出口直径, 其余的为非显著因素。

表3 P 偏回归系数及影响因子的显著性分析

Tab.3 Significance analyses of partial regression coefficients and effect factors of P

因素	回归系数	均方	平方和/%	p 值	显著性
截距	0.519				
R	-6×10^{-4}	-0.001	0.026	0.433 9	
F	-0.003	-0.006	0.688	0.007 0	*
P'	7×10^{-4}	0.001 5	0.040	0.337 3	
Z	8×10^{-4}	0.001 6	0.044	0.313 7	
b_2	-0.002	-0.003	0.173	0.078 4	
K'	-0.004	-0.008	1.317	0.001 7	*
d_2	0.025	0.049 5	45.06	$< 10^{-4}$	**
b_3	-0.003	-0.006	0.602	0.009 2	*
L	-0.008	-0.015	4.269	0.000 1	*
e	-0.002	-0.004	0.570	0.059 9	
T	0.002	0.004	0.301	0.033 3	*
R_0	-0.022	-0.044	35.040	$< 10^{-4}$	**
d_0	0.013	0.025 5	11.960	$< 10^{-4}$	**
S	7×10^{-4}	-0.001	0.041	0.331 4	

注: ** 表示显著影响; * 表示次显著影响; 标准误差为 7×10^{-4} 。

表4 E 偏回归系数及影响因子的显著性分析

Tab.4 Significance analyses of partial regression coefficients and effect factors of E

因素	回归系数	均方	平方和/%	p 值	显著性
截距	0.7				
R	-0.007	-0.014	1.009 4	0.59	
F	0.008	0.015	1.1648	0.57	
P'	0.007	0.015	1.1203	0.57	
Z	-0.003	-0.007	0.219	0.80	
b_2	0.033	0.066	21.855	0.05	*
K'	0.044	0.087	38.633	0.02	*
d_2	0.009	0.018	1.685 7	0.49	
b_3	-0.005	-0.01	0.494 3	0.71	
L	-0.018	-0.036	6.561	0.21	
e	-0.004	-0.009	0.395 5	0.74	
T	-1×10^{-4}	-2×10^{-4}	0.000 2	0.99	
R_0	-6×10^{-4}	-0.001	0.007 1	0.96	
d_0	0.014	0.029	4.225	0.3	
S	0.019	0.037	7.059 9	0.19	

注: * 表示次显著影响; 标准误差为 0.012。

4 响应面优化设计分析

4.1 次显著因素响应面分析

应用 Design-Expert 软件, 采用中心复合设计对 5 个次显著因素进行试验设计, 非显著参数采用原始值。根据试验设计, 共进行 48 次试验, 其中 42 个

试验点是析因点,6个试验点为区域的中心点,重复计算用以估计试验误差。响应面分析对48个试验结果进行拟合获得二次模型。通过决定系数 R^2 和修正的决定系数 R_{adj}^2 来验证该模型,决定系数见表6。

高的 R^2 说明二次模型可以准确地拟合多项式,高的 R_{adj}^2 说明方程中没有增加不必要的项。因此 E 和 K 的模型中有不必要的项,这是由于在第一步

表6 决定系数

Tab.6 Determination coefficients

目标	次显著因素分析		显著因素分析	
	R^2	R_{adj}^2	R^2	R_{adj}^2
P	0.9703	0.9483	0.9477	0.8803
E	0.8108	0.6707	0.9980	0.9955
K	0.7368	0.5419	0.9763	0.9458

Plackett-Burman 筛选试验中,本次试验的5个因素并不是 E 和 K 的显著影响因素。

通过响应面模型,可以获得单一因素以及因素交互作用对性能的影响。图3表示次显著因素中对性能影响较显著的交互效应。由图3a, F 在高水平时, T 在低水平时可以获得较高的效率;由图3b,随着 b_3 的下降, P 呈上升的趋势,在 b_3 低水平和 L 在27 mm附近时有较高效率;由图3c, T 在低水平, L 在28 mm附近时 P 有较高值;由图3d, b_2 和 b_3 都在低水平时, P 较高;由图3f, L 和 b_3 都在低水平时, K 取较小值。

使用 Design-Expert 基于响应面二次多项式在各个变量的高低水平范围内寻优,使得最高效率 P 、高效区长度 E 最大,而使小流量区稳定性 K 最小。其中一个优化组合为: $F = 25^\circ, L = 30 \text{ mm}, b_2 = 35 \text{ mm}, b_3 = 35 \text{ mm}, T = 50 \text{ mm}$;此时 $P = 0.5708, E = 0.7147, K = 0.045$ 。

4.2 显著因素响应面分析

采用 Box-Behnken 设计对3个显著因素进行试

表5 K 偏回归系数及影响因子的显著性分析
Tab.5 Significance analyses of partial regression coefficients and effect factors of K

因素	回归系数	均方	平方和/%	p 值	显著性
截距	0.06				
R	-0.006	-0.0130	3.9945	0.290	
F	-0.003	-0.0060	0.9255	0.594	
P'	1×10^{-4}	0.0002	0.0015	0.983	
Z	0.006	0.0118	3.4617	0.321	
b_2	-0.003	-0.0070	1.0776	0.566	
K'	0.01	0.0195	9.4995	0.128	
d_2	-7×10^{-4}	-0.0010	0.0557	0.894	
b_3	-0.012	-0.0230	13.4750	0.082	
L	-0.009	-0.0180	8.4099	0.147	
e	0.003	0.0061	0.9372	0.591	
T	-0.005	-0.0090	2.1898	0.421	
R_0	0.006	0.0115	3.2842	0.332	
d_0	0.02	0.0391	38.3580	0.015	*
S	-9×10^{-4}	-0.0020	0.0762	0.877	

注: * 表示次显著影响;标准误差为0.005。

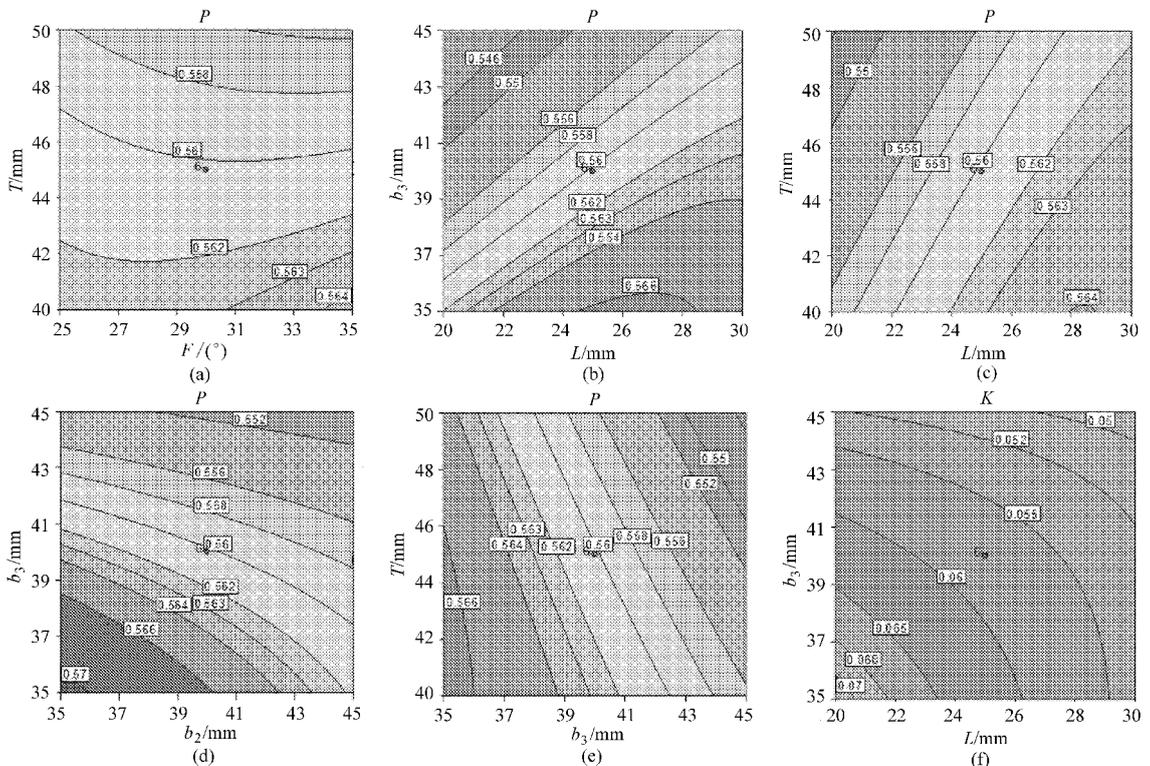


图3 次因素交互效应

Fig.3 Interaction effects of weak factors

验设计,不重要因素采用原始值,次显著因素定为其响应面分析的优化值。根据试验设计,共进行17次试验,其中12个试验点是析因点,5个试验点为区域的中心点,重复计算用以估计试验误差。由表6可知,获得的RSM二项式可以准确地拟合目标函数的关联式。

图4显示的是显著因素的交互效应。由图4a,

R_0 处于高水平时,最高效率 P 随着 d_2 的增加而升高, d_2 处于高水平时, P 随 R_0 的增大而升高,最高效率发生在 R_0-d_2 的对角线上,因此 d_2 和 R_0 存在最佳配合,其最佳配合发生在对角线上;由图4b,沿 d_0-d_2 对角线,随着 d_0 和 d_2 的增大, P 逐渐升高;由图4c,最高效率发生在 R_0-d_0 的斜对角线上,且在 d_0 高水平、 R_0 低水平时取得最高值。

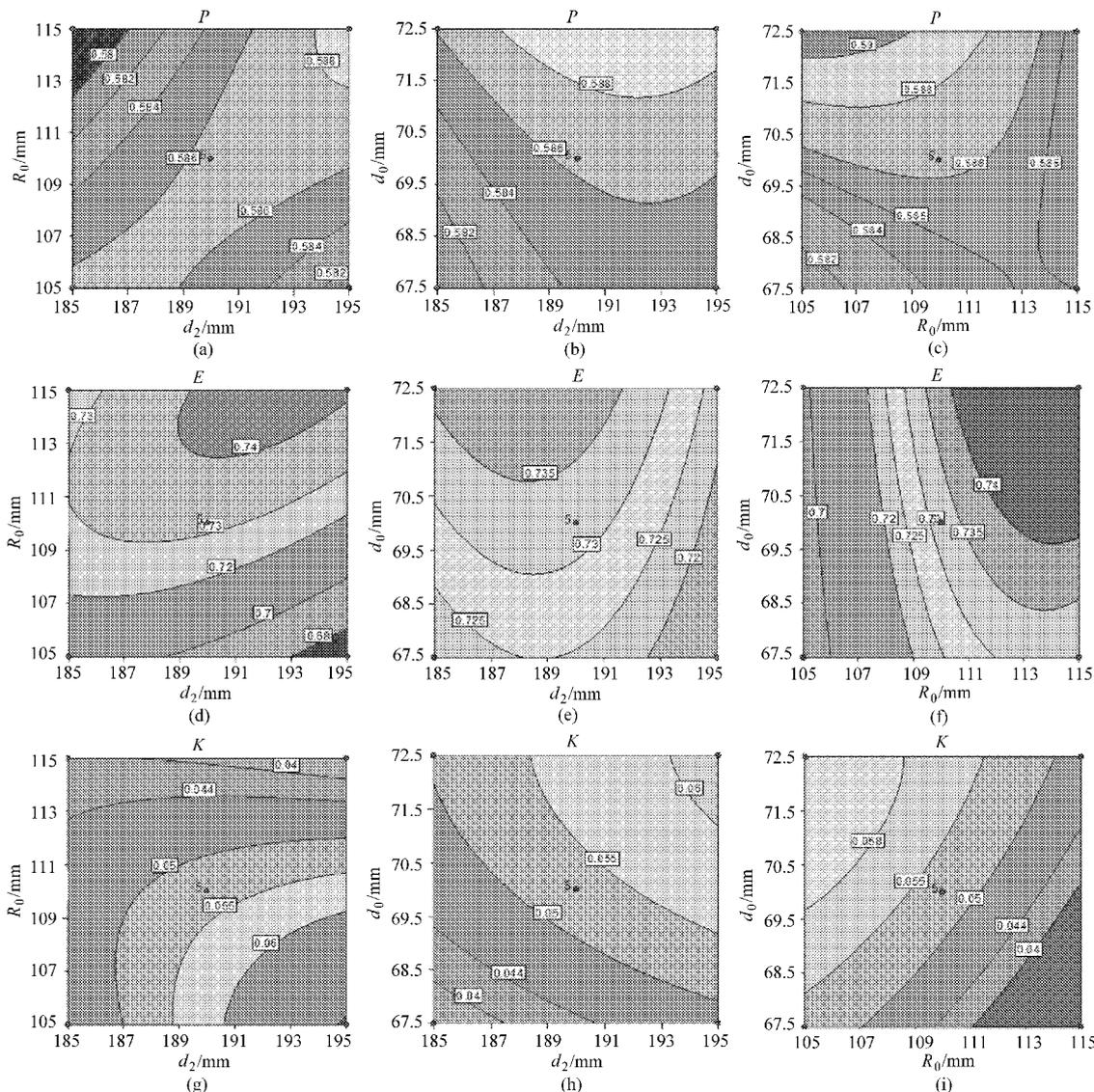


图4 显著因素交互效应

Fig.4 Interaction affects of significant factors

由图4d, d_2 处高水平时,随 R_0 的增大,高效区 E 不断升高, E 最高值发生在 d_2 和 R_0 的高水平区;由图4e,在 d_2 的零水平190mm附近, E 随 d_0 的增大直线上升;由图4f,固定 d_0 水平, E 随 R_0 增大而升高。

由图4g, K 在 d_2 和 R_0 都取高水平时有最小值,在 R_0 的低水平到零水平之间,沿 R_0-d_2 斜对角线,随着 R_0 的减小、 d_2 的增大, E 逐渐升高,在 R_0 低水平和 d_2 高水平时, E 取得最大值;由图4h, E 沿 d_0-

d_2 对角线随 d_0 、 d_2 值增大而逐渐升高,在 d_0 和 d_2 低水平时取得最小值;由图4i,沿 d_0-R_0 的斜对角线方向,随着 d_0 的减小、 R_0 的增大, K 逐渐降低,且在 d_0 低水平、 R_0 的高水平处取得最小值。

显著因素的响应面回归方程为

$$\begin{aligned}
 P = & -0.86 + 0.01d_2 - 5.78 \times 10^{-3}R_0 + 0.02d_0 + \\
 & 1.81 \times 10^{-4}d_2R_0 - 2.82 \times 10^{-5}d_2d_0 - \\
 & 2.25 \times 10^{-4}R_0d_0 - 7.28 \times 10^{-5}d_2^2 - \\
 & 5.92 \times 10^{-5}R_0^2 + 7.02 \times 10^{-5}d_0^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E = & -6.65 + 0.08d_2 - 4.0 \times 10^{-4}R_0 + \\
 & 1.74 \times 10^{-4}d_0 + 5.6 \times 10^{-4}d_2R_0 - \\
 & 8.9 \times 10^{-5}d_2d_0 + 2.95 \times 10^{-4}R_0d_0 - \\
 & 3.5 \times 10^{-4}d_2^2 - 5.5 \times 10^{-4}R_0^2 - 9.3 \times 10^{-5}d_0^2 \\
 K = & -9.77 + 0.05d_2 + 0.07R_0 + 0.03d_0 - \\
 & 3.1 \times 10^{-4}d_2R_0 - 1.67 \times 10^{-5}d_2d_0 + \\
 & 3.6 \times 10^{-4}R_0d_0 - 4.13 \times 10^{-5}d_2^2 - \\
 & 1.64 \times 10^{-4}R_0^2 - 4.56 \times 10^{-4}d_0^2
 \end{aligned}$$

在3个目标函数的回归方程中,由于参数筛选时主要是以参数对 P 的影响程度来进行的,而参数对 E 和 K 的影响只起到参考的作用,故所得显著因素的响应面回归方程里 P 拟合的精度最高,预测更准。使用 Design-Expert 基于上述在3个变量的高低水平范围内寻优,取其中3个优化组合,对其进行 CFD

计算,并与响应面回归方程的预测值进行比较,如表7所示。响应面回归方程的预测值与 CFD 计算值相符,其中 P 和 E 可以精确地预测各自的计算值,而 K 则精度相对较低,这是由于寻优后的3个模型均在响应曲面的高低水平范围内,其中 PUMP2 为试验中的一个最优样本,故存在计算值和预测值一致的现象;且在因素筛选时,对于 K 性能的影响并未出现显著因子,故 K 预测精度较低。次显著因素响应面分析中,次显著因素零水平时, $P=0.56049$, $E=0.7122$, $K=0.061$ 。由表7,优化后的模型,3个目标函数明显改善。从3个模型的计算结果和预测结果可以看出 PUMP3 的优化结果较好,即在后面的试验中将采用 PUMP3 的设计值。

表7 3个模型泵的 CFD 计算值与公式预测值比较

Tab.7 Comparison between three models of pump CFD simulation value with the formula is predicted

序号	d_2	R_0	d_0	P		E		K	
				计算值	预测值	计算值	预测值	计算值	预测值
PUMP1	185	105	72.5	0.5862	0.5864	0.704	0.706	0.047	0.044
PUMP2	190	110	72.5	0.5864	0.5864	0.732	0.735	0.053	0.05
PUMP3	195	115	70	0.5889	0.5887	0.742	0.74	0.033	0.036

5 试验验证及结果分析

优化设计后得到结构参数为: $R=30^\circ$, $P'=0.3\%$, $Z=9$, $K'=4\text{ mm}$, $e=3\text{ mm}$, $S=5\text{ mm}$;形状参数取 Pareto 前沿上的设计点,其中优选点: $F=25^\circ$, $b_2=35\text{ mm}$, $b_3=35\text{ mm}$, $L=40\text{ mm}$, $T=50\text{ mm}$ 。根据优化的结构参数,采用 CFD 进行性能预测,得到结果如表8和图5所示。

表8 扬程及效率相对误差计算结果

Tab.8 Calculation of head and efficiency relative error

参数	流量		
	0.5Q	1.0Q	1.5Q
计算扬程/m	67.60	63.82	56.35
试验扬程/m	62.97	60.46	51.45
扬程相对误差/%	7.35	5.56	9.53
计算效率/%	49.55	57.86	52.24
试验效率/%	46.18	55.16	47.55
效率相对误差/%	7.30	4.89	9.86

试验验证在江苏大学流体机械试验室 C 级封闭式性能试验台上进行。试验系统运行稳定,重复性好,以常温清水为试验介质,试验方法按照 GB/T3216—2005《回转动力泵 水力性能验收试验 1 级和 2 级》进行。试验结果如表8和图5所示。

从表8可以看出,在设计工况点的试验值:流量 $Q=100\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=60.46\text{ m}$,效率 $\eta=55.16\%$,

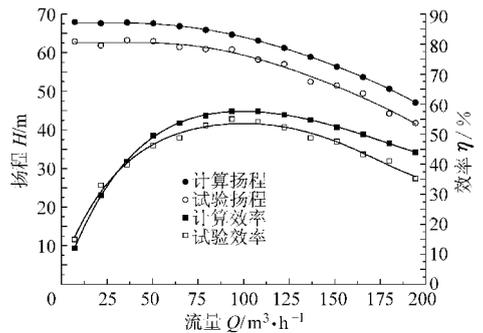


图5 实测与计算性能曲线

Fig.5 Measured and calculated performance curves

这说明优化的旋流泵模型结构参数完全满足设计参数的要求,且效率指标高于设计要求。与计算值相比,试验效率的相对误差为4.89%、扬程相对误差为5.56%,这表明计算值具有较高的预测精度。

图5为计算与试验的性能曲线,两者的扬程曲线变化规律基本一致,效率曲线总的变化趋势也相同,在小流量工况下,误差较小,在大流量区误差逐渐加大。产生误差的主要原因:① CFD 计算结果的效率为水力效率,为了与试验值进行对比,采用经验公式估算机械效率 η_m 和容积效率 η_v ,会产生一定的误差。②选择的计算模型与实际流动存在一定的差异。从试验性能曲线得知,采用本文方法优化设计的模型,性能曲线平滑,单调下降,小流量区稳定,优化效果明显。

6 结论

(1) 以最高效率 P 、高效区长度 E 、扬程流量曲线在小流量区的稳定性 K 为目标函数作为响应目标,基于 Plackett - Burman 试验设计、RSM 方法对旋流定压泵中的 14 个优化设计变量进行了分析,获得了目标函数与设计变量的关联式。

(2) 综合考虑上述 3 个性能目标,基于关联式提出了旋流定压泵的设计方法,并将该设计方法应用于 3 个模型泵的设计,发现基于关联式的预测值

与 CFD 的计算值符合良好。使 3 个性能目标都达到最优,经过优化设计,最终确定最优设计点,其性能指标较优化前的模型有明显改善。

(3) 建立了基于试验设计理论和响应面近似的旋流泵优化设计方法,考虑了重要结构参数的交互作用,计算量相对较小,计算结果的精度和可靠度较高,可以快速而准确地选出旋流泵结构参数的最优组合。

(4) 通过试验验证,设计工况下相对误差较小,该设计方法科学可行,可用于多目标的旋流泵的优化设计。

参 考 文 献

- Zhang Jinya, Zhu Hongwu, Yang Chun, et al. Multi-objective shape optimization of helico-axial multiphase pump impeller based on NSGA-II and ANN[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(1): 538 ~ 546.
- Franz X Tanner, Seshasai Srinivasan. CFD-based optimization of fuel injection strategies in a diesel engine using an adaptive gradient method[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2009, 33(3): 1 366 ~ 1 385.
- Roy R, Tiwari A, Corbett J. Designing a turbine blade cooling system using a generalised regression genetic algorithm[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2003, 52(1): 415 ~ 418.
- Falzon B G, Faggiani A. The use of a genetic algorithm to improve the postbuckling strength of stiffened composite panels susceptible to secondary instabilities[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(3): 883 ~ 895.
- Wahba W A, Tourlidakis A. A genetic algorithm to the design of blade profiles for centrifugal pump impellers[C]. *AIAA Paper 2 001 ~ 2 582*, 2001.
- Benini E, Tourlidakis A. Design optimization of vaned diffusers of centrifugal compressors using genetic algorithms[C]. *AIAA Paper 2 001 ~ 2 583*, 2001.
- Duccio Bonaiuti, Andrea Arnone, Mirco Ermini, et al. Analysis and optimization of transonic centrifugal compressor impellers using the design of experiments technique[J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2006, 128(4): 786 ~ 797.
- 郑赟韬, 蔡国飙, 尘军. 用于概念设计的离心泵叶轮多目标优化[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(9): 1 554 ~ 1 559.
Zheng Yuntao, Cai Guobiao, Chen Jun. For the conceptual design of the centrifugal pump impeller multi-objective optimization [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(9): 1 554 ~ 1 559. (in Chinese)
- 何希杰, 朱广奇, 劳学苏. 遗传算法在离心泵优化设计中的应用[J]. *排灌机械*, 2008, 26(2): 40 ~ 44.
He Xijie, Zhu Guangqi, Lao Suxue. The genetic algorithm optimization in the centrifugal pump design [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2008, 26(2): 40 ~ 44. (in Chinese)
- 刘小民, 张文斌. 采用遗传算法的离心叶轮多目标自动优化设计[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(1): 31 ~ 35.
Liu Xiaomin, Zhang Wenbin. Centrifugal impeller and multi-objective genetic algorithm automatically optimize the design [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(1): 31 ~ 35. (in Chinese)
- 王晓峰, 席光, 王尚锦. 离心压缩机叶轮的响应面优化设计 I: 设计方法[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(3): 408 ~ 410.
Wang Xiaofeng, Xi Guang, Wang Shangjin. The response surface optimization of the centrifugal compressor impeller design I: design method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(3): 408 ~ 410. (in Chinese)
- 沙毅, 杨敏官, 康灿, 等. 旋流泵的特性分析与设计方法探讨[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 124 ~ 127.
Sha Yi, Yang Minguan, Kang Can, et al. The characteristics of the vortex pump analysis and design methods [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 124 ~ 127. (in Chinese)
- 沙毅, 杨敏官, 袁寿其, 等. 污水污物潜水旋流泵性能及设计方法试验研究[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(5): 82 ~ 85.
Sha Yi, Yang Minguan, Yuan Shouqi, et al. Sewage submersible vortex pump performance and design method test [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(5): 82 ~ 85. (in Chinese)
- 郑铭, 袁寿其, 陈池. 旋流泵结构参数对泵性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2000, 31(2): 46 ~ 49.
Zheng Ming, Yuan Shouqi, Chen Chi. Vortex pump structure parameters on pump performance [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(2): 46 ~ 49. (in Chinese)
- Plackett R L, Burman J P. The design of optimum multifactorial experiments [J]. *Biometrika*, 1946, 33(4): 305 ~ 325.