

基于响应面法的圆盘泵叶轮优化研究

何坤健¹, 衡亚光¹, 张惟斌², 江启峰³

(1. 西华大学 能源与动力工程学院, 四川 成都 610039; 2. 西华大学 流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039;
3. 西华大学 航空航天学院, 四川 成都 610039)

摘要: 为了提高圆盘泵的水力性能, 以径向直叶片圆盘泵为研究对象, 结合计算流体动力学方法(CFD)与响应面分析法, 研究叶轮结构参数对泵扬程和效率的影响。以叶片高度、叶片数量和盘间距为优化设计变量, 泵的扬程和效率为响应变量, 基于 Box-Behnken 样本点设计法进行三因素三水平设计, 建立 17 组样本点。通过 ANSYS CFX 数值计算软件对各个样本点的设计模型进行数值模拟, 并基于二阶响应面回归方程拟合了叶轮结构参数与扬程和效率之间的关系表达式。研究结果表明: 叶片高度、叶片数量和盘间距均对泵的水力性能有明显的影响。多因素交互作用中叶片高度和盘间距的组合影响最为显著。通过响应面方程找到了最优参数组合, 优化后的圆盘泵扬程在各流量工况下平均提升了 22 m, 最高效率提升了 15%。

关键词: 圆盘泵; 响应面法; 叶轮结构参数; 水力性能

中图分类号: TH3; TQ051.2

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.08.002

[引用本文格式] 何坤健, 衡亚光, 张惟斌, 等. 基于响应面法的圆盘泵叶轮优化研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(8): 8-15. HE Kun-jian, HENG Ya-guang, ZHANG Wei-bin, et al. Research on optimization of disc pump impeller based on response surface method[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 8-15.

Research on Optimization of Disc Pump Impeller Based on Response Surface Method

HE Kun-jian¹, HENG Ya-guang¹, ZHANG Wei-bin², JIANG Qi-feng³

((1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu, China, Post Code: 610039; 2. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery of Ministry of Education, Xihua University, Chengdu, China, Post Code: 610039;
3. School of Aeronautics and Astronautics, Xihua University, Chengdu, China, Post Code: 610039))

Abstract: To improve the hydraulic performance of the disc pump, the influence of impeller structural parameters on the pump head and efficiency was studied by Computational Fluid Dynamics (CFD) method and response surface analysis method, based on current radial straight vane disc pump. The blade height, number of blades and disc spacing were defined as optimization design variables, and the head and efficiency of the disc pump were the response variables. Seventeen groups of sampling points were established through three-factor and three-level design implemented based on the Box-Behnken sampling point design method. Numerical simulations on the design models of each sampling point were performed by ANSYS CFX numerical software, to obtain the numerical results of hydraulic performance, analyze the influence of individual and interactive effects of blade height, number of blades and disc spacing, and fit the

收稿日期: 2021-01-27; 修订日期: 2021-03-13

基金项目: 四川省科技厅资助项目(2020YFH152); 四川省教育厅资助项目(18ZB0563); 西华大学研究生创新基金资助(YCJJ2020042)

Fund-supported Project: Science and Technology Department of Sichuan Province Supported Project(2020YFH152); Education Department of Sichuan Province Supported Project(18ZB0563); Postgraduate Innovation Fund of Xihua University(YCJJ2020042)

作者简介: 何坤健(1996-), 男, 重庆人, 西华大学硕士研究生。

通讯作者: 江启峰(1979-), 男, 山东济宁人, 西华大学教授。

relational express of impeller structure parameters with head and efficiency based on second-order response surface regression equation. The research results show that the blade height, number of blades and disc spacing all have obvious influence on the hydraulic performance of the disc pump, and the combination of blade height and disc spacing has the most significant influence among multi-factor interactive effects. The optimal parameter combination is found by the response surface equation. The head of the optimized disc pump is increased by 22 m on average, and the maximum efficiency is increased by 15% under various flow conditions.

Key words: disc pump, response surface method, structural parameters of impeller, hydraulic performance

引 言

圆盘泵,又称为碟片泵也被称为特斯拉泵^[1]。传统叶片泵和容积泵输送含固体颗粒或粘性凝块的介质时,会出现易堵塞、易缠绕、易磨损等问题,使泵发生故障,影响生产线的正常运行。而使用圆盘泵进行输送时,由于其叶轮叶片轴向不连续,叶轮流道中间存在无叶片过流区,减少了被输送介质与过流部件的接触,在一定程度上缓解了叶轮表面的磨损。圆盘泵的工作机理和结构特点使其在一些特殊的工作环境下更具有竞争力,但其研究起步较晚,相关文献资料较少,设计理论与方法不完善,使其工作时的总体效率处于较低水平,大约只有 20% ~ 40%,如何设计出高效稳定的圆盘泵是目前的研究重点。

现有文献中关于圆盘泵叶轮结构参数对泵性能影响的研究大多采用正交试验法。王少平等人^[2]应用正交分析法研究了圆盘外径、圆盘内径、圆盘间距和流量等因素对圆盘泵性能的影响程度,发现主要影响因素是圆盘外径,其次是圆盘内径、盘间距和流量。陈永超等人^[3]分析了叶片的数量、宽度和形状对泵性能的影响,研究结果表明,随着叶片数量的增加和叶片宽度的减小,以及采用梯形叶片均能有效提高圆盘泵的性能。Leonel 等人^[4]在叶轮中分别设置横截面为三角形、圆形和正方形的扰流器,观察泵内流场的变化,研究其对泵性能的影响,试验结果表明,在叶轮上设置正方形扰流器的泵表现出更好的性能。但是,正交试验法存在一定的局限性,该方法只能对每个孤立的试验样本点进行分析,难以获得影响因素与目标值之间的函数关系。

为了对圆盘泵叶轮结构进行优化设计,本文将

计算流体动力学与响应面法^[5-7]相结合,以试验设计样本点的数值计算结果为基础,构建叶轮结构参数与圆盘泵水力性能参数之间的响应面模型,分析参数间的交互影响,寻求最优结构参数组合,为高性能圆盘泵设计方法提供依据和参考。

1 数值模拟方法

1.1 几何模型

以径向直叶片圆盘泵为研究对象,三维模型如图 1 所示,主要参数:流量 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$, 转速 $n = 2\,900 \text{ r/min}$ 。叶轮叶片数 $N = 8$, 叶片单侧高度 $h = 4 \text{ mm}$, 叶片形式为呈辐射状排布的径向直叶片, 叶轮进口直径 $D_1 = 88 \text{ mm}$, 叶轮出口直径 $D_2 = 200 \text{ mm}$, 盘间距 $b = 16 \text{ mm}$ 。



图 1 径向直叶片圆盘泵三维模型

Fig. 1 3D model of radial straight vane disc pump

整个流体计算域包括进口延长段、叶轮叶片区、叶轮无叶区、蜗壳和出口延长段,如图 2 所示。为了保证进、出口流体的充分发展,将进、出口管延长至管径的 5 倍。

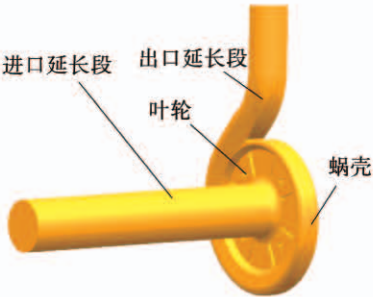


图 2 流体域模型
Fig.2 Fluid domain model

1.2 网格划分

采用 ANSYS ICEM 专业软件对进、出口延长段和蜗壳部分划分结构化网格,叶轮部分划分非结构网格,如图 3 所示。

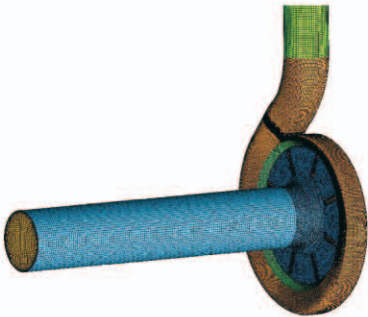


图 3 流体域网格
Fig.3 Fluid domain grids

1.3 控制方程及边界条件

基于雷诺时均 N-S 方程和 $k-\varepsilon$ 湍流模型,采用多重参考坐标系法 (Multiple Reference Frame, MRF) 在 ANSYS CFX 软件中进行计算。其中,叶轮叶片区设置为旋转域,转速为 2 900 r/min,其余部分均设置为静止域。流场控制方程在每个计算域内进行求解,通过使用 GGI (General Grid Interface) 界面技术将速度换算成绝对速度的形式进行数据交换。设置总压进口和流量出口边界条件。固壁表面采用无滑移壁面,并用 Scalable 壁面函数求解近壁面流动。设定残差小于 10^{-5} 且监测值稳定后判定计算收敛。

1.4 实验验证

为验证数值模拟方法的正确性,在西华大学

流体及动力机械教育部重点实验室对原模型泵 (优化前模型) 进行外特性实验测试,流体介质为清水,实验模型如图 4 所示。将原模型泵外特性曲线的数值模拟与试验结果进行对比,对比结果如图 5 所示。

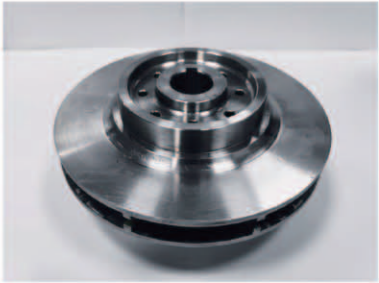


图 4 圆盘泵叶轮实物模型
Fig.4 Physical model of disc pump impeller

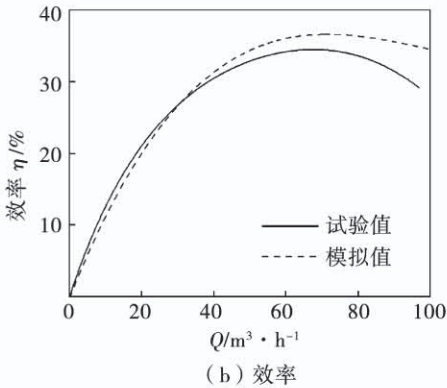
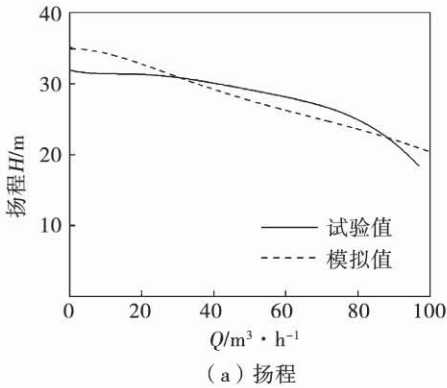


图 5 模拟值与试验值对比
Fig.5 Comparison of simulated and experimental values

由图可知,两种方式所得到的水力性能曲线变化规律基本一致,扬程均随着流量的增大而减小,效率均随着流量的增大先增大后减小。当流量小于

40 m³/h 时,效率曲线吻合程度较高;当流量大于 40 m³/h 之后,效率试验值与模拟值的误差逐渐增大。这是由于数值计算采用的模型进行了简化,与实际流动存在一定的差异。同时,实验测试时存在随机误差,如测量值的波动、读数误差等。

2 响应面法设计

响应面法是一种通过样本点设计法获得基于各组样本点的计算结果,采用多元回归方程拟合优化设计变量(因素)与响应变量(目标值)之间的函数关系,求得最优参数的统计方法。其中样本点设计较为常用的有 Box-Behnken 设计(BBD)和中心复合设计(Central Composite Design, CCD)^[8]。中心复合设计是在两水平析因设计的立方点基础上加上轴向点和中心点构成,进行设计时每个因素取 5 个水平,因此设计出的样本点会超出原定的水平,而 Box-Behnken 设计每个因素取 3 个水平,以(−1, 0, 1)编码,中心点以 0 编码,每个因素的取值范围上限和下限分别以 1 和 −1 编码,即 1 和 −1 分别对应各因素在取值范围内的最大值和最小值,故 BBD 法设计出的样本点不会超出预定的取值范围。

影响圆盘泵扬程和效率的因素众多,如圆盘内径与外径、盘间距、叶片数量及蜗壳形式等。结合前人的研究成果^[9-10]和现有圆盘泵实物模型的优化需求,选择叶片高度、叶片数量和盘间距进行优化研究。由于叶轮结构参数的取值范围受实际泵模型中各部件装配尺寸的影响,为了避免最优点超出范围,以单侧叶片高度 h 、叶片数量 N 和盘间距 b 作为因素,选择 Box-Behnken 设计法对这 3 个因素进行样本点设计。为了让叶片高度适应盘间距的变化,不同的盘间距对应不同的叶片高度,对应关系如表 1 所示。表中 λ 为叶片总高度与盘间距的比值,即:

$$\lambda = \frac{2h}{b}$$

(1)

基于 BBD 样本点设计法设计出的样本点共有 17 组。编码及结果如表 2 和表 4 所示。

表 1 叶片高度与盘间距的对应关系
Tab. 1 Corresponding relation between blade height and disc spacing

h/mm	b/mm	λ
1.5	10	0.3
2.4	16	0.3
3.3	22	0.3
2.5	10	0.5
4	16	0.5
5.5	22	0.5
3.5	10	0.7
5.6	16	0.7
7.7	22	0.7

表 2 因素及其水平(取值范围)
Tab. 2 Test factors and their levels(interval of values)

因素	编码及水平(取值范围)		
	−1	0	1
h/mm	1.5	2.5	3.5
	2.4	4	5.6
	3.3	5.5	7.7
b/mm	10	16	22
N	6	8	10

3 结果及分析

3.1 网格无关性验证

对各组样本点模型进行计算之前,为了排除网格数对计算的干扰,进一步提升计算精度,以第一个样本点的模型为基础进行网格无关性验证,分别计算了网格数从 185 万增加到 526 万过程中圆盘泵的扬程和效率,结果如表 3 所示。当扬程和效率的变化随着网格数的增加而趋于稳定时,可判定此时的网格数满足计算精度的要求。由表可知,当网格数大于 308 万时,扬程和效率的波动幅值 ΔH 和 $\Delta \eta$ 分别为 0.1 m 和 0.2%,此时其值已趋于稳定。在保证计算结果具有足够精度的同时考虑所拥有的计算资源和计算时长,选择序号 3 的网格参数设置对其余样本点模型进行网格划分。

表 3 网格无关性验证

Tab.3 Verification of grid independence

序号	网格数	扬程 H/m	效率 $\eta/\%$
1	1 855 495	6.81	21.35
2	3 086 043	6.43	20.85
3	3 696 626	6.52	21.11
4	4 373 766	6.39	20.88
5	5 267 884	6.42	21.04

3.2 响应面回归方程的建立及显著性检验

在三维建模软件 UG NX 中建立流体域模型,导入专业网格划分软件 ICEM 和计算流体力学数值模拟软件 ANSYS CFX 中,分别进行网格划分和数值计算。

泵的扬程和效率与叶轮结构参数有关,在同一组结构参数时,不同流量工况点的扬程与效率也不同。为了考虑流量的影响,计算各个叶轮结构参数的扬程和效率时均为高效点流量下的值。结合已有的研究成果^[10-11],叶轮结构参数中,盘间距 b 对高效点流量的影响相对于另两个参数更为显著,因此主要考虑盘间距 b 对高效点流量的影响。盘间距 b 的取值为 10,16 和 22 mm,随机在表 4 中选择 3 个模型作为不同盘间距的代表。选取序号 3,5 和 6 的模型分别作为各盘间距的代表找出高效点流量的大小,各模型的 $\eta-Q$ 曲线如图 6 所示。由图可知,当 $b=10\text{ mm}$ (模型 5)时,高效点流量约为 $55\text{ m}^3/\text{h}$;当 $b=16\text{ mm}$ (模型 3)时,高效点流量约为 $75\text{ m}^3/\text{h}$;当 $b=22\text{ mm}$ (模型 6)时,高效点流量约为 $110\text{ m}^3/\text{h}$ 。

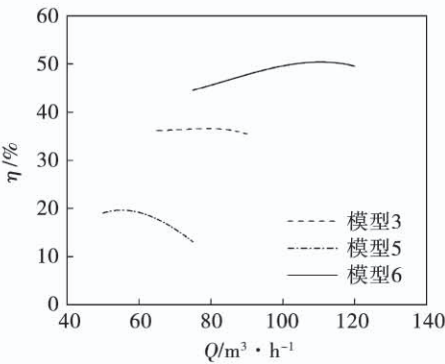


图 6 所选取模型的 $\eta-Q$ 曲线

Fig.6 $\eta-Q$ curves of the selected model

各组样本点的计算结果如表 4 所示。

表 4 响应面样本点设计及计算结果

Tab.4 Design of sampling points and calculation results

序号	h/mm	b/mm	N	H/m	$\eta/\%$
1	2.4	16	6	6.52	17.62
2	2.4	16	10	13.3	26.89
3	4	16	8	24.13	36.46
4	3.5	10	8	27.49	35.79
5	1.5	10	8	7.88	19.79
6	7.7	22	8	43.29	50.37
7	5.6	16	10	42.92	48.2
8	3.3	22	8	10.48	22.8
9	2.5	10	10	20.51	31.54
10	5.5	22	10	33.7	44.17
11	4	16	8	24.13	36.46
12	5.5	22	6	20.74	33.72
13	2.5	10	6	13.49	25.83
14	4	16	8	24.13	36.46
15	4	16	8	24.13	36.46
16	4	16	8	24.13	36.46
17	5.6	16	6	30.62	40.86

在响应面法中,一般采用多项式来拟合出设计变量(因素)与响应变量(目标值)的关系式,阶数越高,响应面模型的精度越高,表达式越复杂。当因素数量为 3 个时,采用二阶多项式进行拟合已经能够满足精度要求,其表达式为^[12]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

式中: Y —响应变量(目标函数); x —设计变量(因素); β_0 —线性项; β_i —变量 x_i 的斜率; β_{ii} —变量 x_i 的二次项; β_{ij} — x_i 与 x_j 的交叉乘积项的系数。

采用二阶多项式拟合的叶片高度、叶片数、盘间距与扬程和效率之间的函数关系式为:

$$H = -10.45062 + 2.425\lambda - 0.189167b + 0.66625N + 2.75\lambda b + 3.45\lambda N + 0.12375bN - 7.6875\lambda^2 - 0.042708b^2 - 0.120625N^2 \quad (3)$$

$$\eta = -32.94826 + 84.84583\lambda + 0.509861b + 3.95125N + 2.41042\lambda b - 1.20625\lambda N + 0.09875bN - 58.6875\lambda^2 - 0.053472b^2 - 0.18N^2 \quad (4)$$

为确保得到的拟合方程能够准确的描述它们之间的关系,分别对上式进行方差分析,使用 P 值、决定系数 R^2 和校正决定系数 R^2_{adj} 进行判定。 P 值小于 0.05 表示模型是显著的,大于 0.1 则表示是不显著的; R^2 和 R^2_{adj} 是对回归方程拟合准确性的度量,其取值范围为 0~1,值越大表明拟合程度越高。从表 5 可知,各响应变量的 P 值均小于 0.000 1,且 R^2 和 R^2_{adj} 均接近于 1,这表明拟合所得到的响应面回归方程拟合准确度高,能够较好地预测圆盘泵的水力性能。

表 5 回归方程方差分析结果

Tab. 5 Variance analysis results of regression expression

响应变量	平方和	均方	F 值	P 值	R^2	R^2_{adj}
扬程	1 859.5	206.6	1 736.8	<0.000 1	0.999 6	0.999 0
效率	1 371.2	152.3	875.2	<0.000 1	0.999 1	0.998 0

3.3 单因素作用影响分析

叶片高度、盘间距和叶片数的 P 值均小于 0.000 1,表明这 3 个因素对扬程和效率有较明显的影响。表 4 的计算结果也反映出了这一点。叶片高度能够影响叶轮对流体的做功能力,进而改变圆盘泵的工作性能。在 1988 年,Gurth^[13] 首次在光滑圆盘上设置若干叶片,相当于叶片高度从零增加到某一值,显著提升了圆盘泵的性能,使其成为第二代圆盘泵。圆盘泵叶轮叶片与一般离心泵叶片不同,其在轴向上是不连续的,中间存在无叶片过流区域,圆盘间距直接影响了该区域的大小和泵叶轮的通过性,进而影响圆盘泵的性能。除此之外,叶轮叶片的

包角也较小,叶片数会影响叶轮对流体的控制能力,较少的叶片数会导致有叶片过流区的流体倒流和扩散损失。同样的,叶片数也与叶轮的做功能力有关,有利于叶轮与流体之间的能量传递。

3.4 多因素交互作用影响分析

圆盘泵的水力性能通常受结构参数间的交互影响,除了分析单一因素的作用对泵水力性能的影响外,还应考虑多因素共同作用时的变化规律。

由图 7~图 10 可看出,圆盘泵的水力性能均随着各个变量组合值的增大而增大。对于所选取的设计变量及其取值范围,当设计变量处于高水平时,变量值的增大对效率的影响变小,效率响应曲面逐渐趋于平缓。若继续增大对效率的提升不明显,甚至可能会使效率降低,但是扬程响应曲面还有上升的空间,只是被变量取值范围所限制。文献[14]指出叶片高度与盘间距的比值为 0.6 左右较适宜,若继续增大此值并不会显著提升圆盘泵的水力性能。盘间距的取值要适应设计流量,以及蜗壳的尺寸大小等因素,因为盘间距过小会降低流体的通过性,过大会造成叶轮对流体的控制能力下降,进而影响泵的水力性能。通过 P 值能够了解因素间的交互作用对圆盘泵扬程和效率的影响程度。在对扬程的影响中,各因素交互作用的 P 值均小于 0.000 1,表明对扬程的影响显著;在对效率的影响中,因素组合 λb 、 bN 和 λN 的 P 值分别为 <0.000 1、0.000 8 和 0.054,这表示了叶片高度和盘间距组合的交互影响对圆盘泵的效率影响最显著,盘间距和叶片数组合次之,叶片高度和叶片数的组合则影响最小。

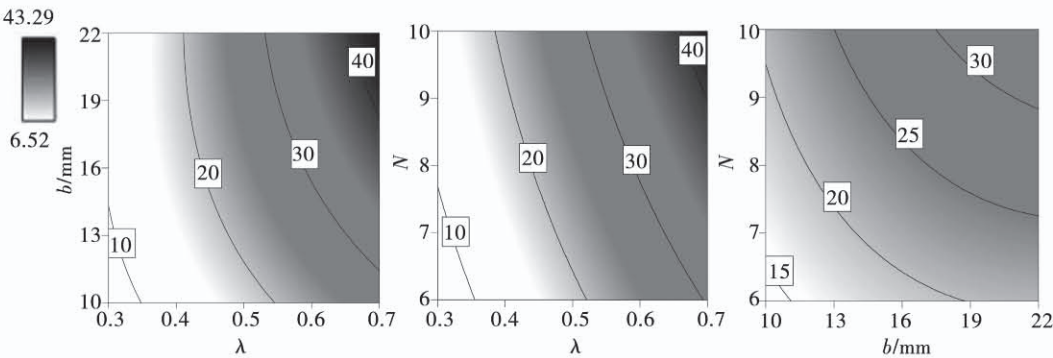


图 7 扬程等高线图
Fig. 7 Contour diagrams of head

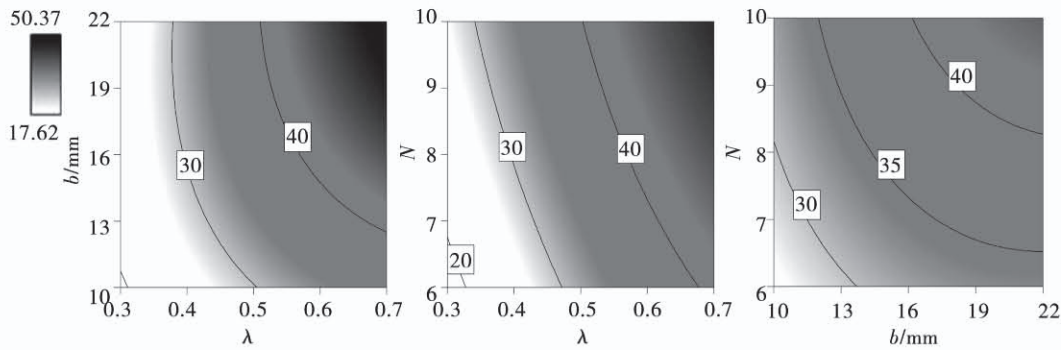


图 8 效率等高线

Fig.8 Contour diagrams of efficiency

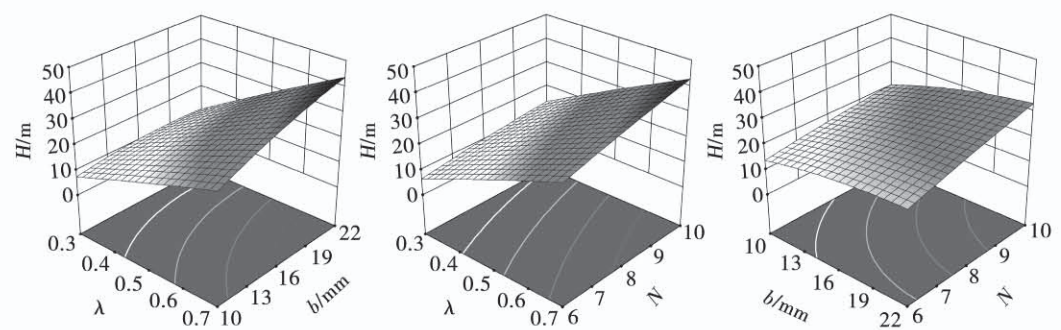


图 9 扬程响应曲面图

Fig.9 Response surface diagrams of head

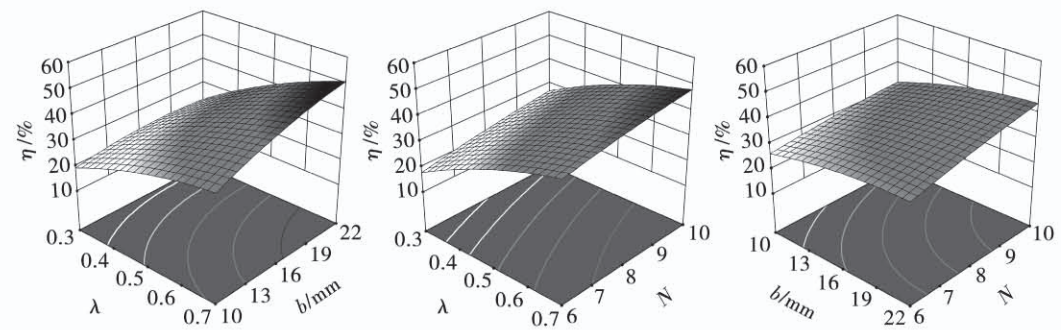


图 10 效率响应曲面图

Fig.10 Response surface diagrams of efficiency

基于各个设计变量的取值范围,结合拟合出的响应面模型式(3)和式(4),可得到最优参数组合: $h=7.15\text{ mm}(\lambda=0.65)$, $b=22\text{ mm}$, $N=10$ 。基于最优参数建立流体域模型,并在 ANSYS CFX 中进行数值计算。图 11 为优化前后圆盘泵的 $H-Q$ 和

$\eta-Q$ 特性曲线。显然,优化后圆盘泵性能有明显的改善,优化后圆盘泵的扬程在各流量工况下平均提升了 22 m,最高效率提升了 15%,满足了预期的优化需求,表明基于响应面法的圆盘泵叶轮结构参数优化方法可靠。

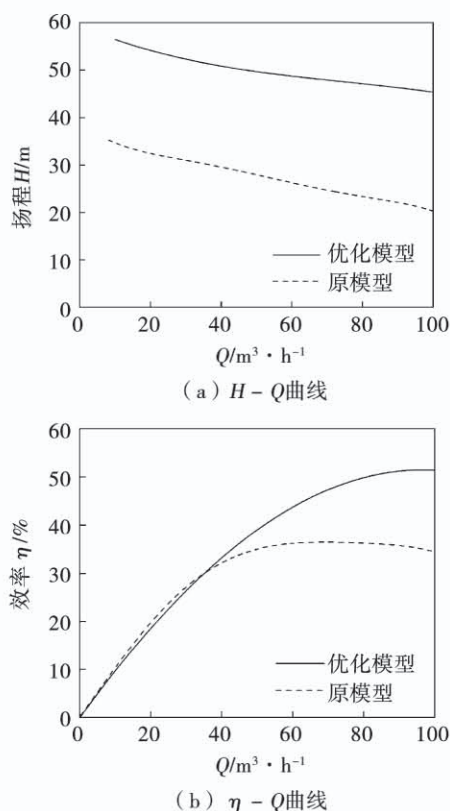


图 11 优化前后泵性能曲线

Fig. 11 Comparison of performance curves between original and optimized pump

4 结 论

(1) 以径向直叶片圆盘泵为研究对象,叶片高度、叶片数量和盘间距为设计变量,泵的扬程和效率为响应变量,基于 Box-Behnken 设计法和 ANSYS CFX 数值计算结果,获得了设计变量与响应变量之间的函数关系表达式,分析了各因素对泵水力性能的影响,发现叶片高度、叶片数量和盘间距均对扬程和效率有明显的影响,其中叶片高度和盘间距的组合影响最为显著,叶片高度和叶片数的组合影响最小。

(2) 基于试验设计和响应面分析法建立的二次多项式响应面方程,考虑了叶轮结构参数的交互影响,方程拟合准确度高,与 CFD 计算值基本吻合。

(3) 基于设计变量的取值范围和响应面模型,获得了最优参数组合: $h=7.15\text{ mm}$ ($\lambda=0.65$), $b=22\text{ mm}$, $N=10$ 。同时,进行数值模拟计算优化后模型的水力性能,优化后圆盘泵的扬程在各流量工况

下平均提升了 22 m,最高效率提升了 15%,相较原模型泵的性能有明显地改善,圆盘泵的优化模型满足预期的优化需求。

参考文献:

- [1] TESLA N. Fluid propulsion[P]. US1061142;1913-05-06.
- [2] 王少平,高本金,尹树孟,等.圆盘泵叶轮结构参数正交优化分析[J].石油矿场机械,2012,41(6):58-62.
WANG Shao-ping, GAO Ben-jin, YIN Shu-meng, et al. Optimization on structural parameter of disc pump impeller based on orthogonal digital simulation[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(6): 58-62.
- [3] 陈永超,陈国明,周昌静,等.圆盘泵叶片结构形式对泵外特性影响分析[J].机械设计,2014,31(9):93-96.
CHEN Yong-chao, CHEN Guo-ming, ZHOU Chang-jing, et al. Analysis on the influence of blade structure on exterior characteristics of disc pump[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(9): 93-96.
- [4] MARTÍNEZ-DÍAZ L, HERRERA H H, GONZÁLEZ L M C, et al. Effects of turbulization on the disc pump performance[J]. Alexandria Engineering Journal, 2019, 58(3): 909-916.
- [5] 张娟,陈海峰,谢霄虎,等.对排凸胞换热管内传热分析及多目标优化[J].热能动力工程,2020,35(3):138-144.
ZHANG Juan, CHEN Hai-feng, XIE Xiao-hu, et al. Heat transfer analysis and multi-objective optimization of convex heat transfer tubes[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 138-144.
- [6] JAGADISH, BHOWMIK S, RAY A. Prediction and optimization of process parameters of green composites in AWJM process using response surface methodology[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(5-8): 1359-1370.
- [7] NARESH B, MUTHUKRISHNAN N. Investigation on surface roughness in abrasive water-jet machining by the response surface method[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(11-12): 1422-1428.
- [8] 郭勤涛,张令弥,费庆国.用于确定性计算仿真的响应面法及其试验设计研究[J].航空学报,2006(1):55-61.
GUO Qin-tao, ZHANG Ling-mi, FEI Qing-guo. Response surface method and its experimental design for deterministic computer simulation[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2006(1): 55-61.
- [9] 高本金.海底泥浆举升圆盘泵流场仿真与性能研究[D].青岛:中国石油大学,2009.
GAO Ben-jin. Flowfield simulation and performance assessment [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.