

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104938

基于响应面和人群搜索算法的固井泥浆流量计 叶轮结构参数优化*

李宜霖^{1,2} 孙兴伟^{1,2} 杨赫然^{1,2} 王海燕³ 刘 寅^{1,2} 董祉序^{1,2}

(1. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870; 2. 辽宁省复杂曲面数控制造技术重点实验室 沈阳 110870;
3. 沈阳白云机械有限公司 沈阳 110027)

摘 要:切向式涡轮流量计应用于油田固井工程,叶片结构会对计量的效果产生直接影响。为了提升流量计计量的精度以及叶片结构的可靠性,对叶轮结构参数进行优化。将响应面与人群搜索算法相结合,设计三因素四水平正交实验,通过响应面法建立出流量计仪表系数 K 的线性度误差 δ 和流量计叶轮叶片半径、边缘厚度、倾斜角度的二次回归模型,以线性度误差最小为优化目标,基于人群搜索算法对叶片结构参数进行寻优求解,得到叶片结构最优的参数组合。优化后仪表系数线性度误差由3.106 0%减小为0.445 2%,提升了固井泥浆流量计的计量精度以及稳定性,为后续优化设计提供理论支撑。

关键词:响应面法;人群搜索算法;线性度误差;结构参数优化;固井泥浆流量计

中图分类号: TH71; TN03 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Optimization of impeller structure parameters of cementing mud flowmeter based on response surface and crowd search algorithm

Li Yilin^{1,2} Sun Xingwei^{1,2} Yang Heran^{1,2} Wang Haiyan³ Liu Yin^{1,2} Dong Zhixu^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. Key Laboratory of Numerical Control Manufacturing Technology for Complex Surfaces of Liaoning Province, Shenyang 110870, China; 3. Shenyang Baiyun Machinery Co., Ltd., Shenyang 110027, China)

Abstract: Tangential turbine flowmeter is applied to oilfield cementing engineering, the impeller structure will have a direct impact on the metering effect. In order to improve the measurement accuracy of flowmeter and the reliability of impeller structure, the impeller structure parameters are optimized. Combining response surface with crowd search algorithm, a three factor four level orthogonal test is designed, and the linearity error of flowmeter instrument coefficient K is established by response surface method δ and the quadratic regression model of flowmeter impeller radius, impeller edge thickness and impeller inclination angle. Taking the minimum linearity error as the optimization objective, the impeller structure parameters are optimized based on crowd search algorithm. The optimal parameter combination of impeller structure is obtained. After optimization, the linearity error of instrument coefficient is reduced from 3.106 0% to 0.445 2%. The measurement accuracy and stability of cementing mud flowmeter are improved, which provides theoretical support for subsequent optimization design.

Keywords: response surface method; crowd search algorithm; linearity error; structural parameter optimization; cementing mud flow meter

0 引 言

固井泥浆流量计是一种切向式涡轮流量计,用于完成油田固井工程中的水泥浆、钻井液等流体的流量计量

工作。目前关于涡轮流量计的研究重点主要是叶轮结构以及叶片参数优化,通过改进优化叶片的结构参数,使叶片在受到流体冲击时达到更好的响应效果,从而达到更高的计量精度。

郭素娜等^[1]利用 CFD 仿真,以仪表系数平方差

$\Delta(K^2)$ 为优化目标,对不同叶片形状下的流量计计量性能进行了研究,并计算得到最优的叶片切角。孙鹏飞等^[2]以大推力液体火箭发动机的叶轮叶片为优化对象,采用流体仿真和热固耦合仿真的方法,以仪表系数线性度误差为研究对象,设计正交试验对叶片的中径来流角、轴向宽度以及重合度进行优化,将仪表系数线性度误差降低了 0.104 5%。杨振^[3]研究不同流量点下的仪表计量特性,以不同流量点下的仪表系数之差为优化目标,对结构参数进行优化,来降低叶轮叶片处速度剖面变化对计量精度的影响。陈曦^[4]通过分析叶轮叶片数量和前后导流器的倒角大小以及叶片倾斜角对流量计内部流场的影响情况,优化分析得到最佳的流量内部结构参数。

目前大多数关于涡轮流量计的叶片结构优化研究是针对轴向式涡轮流量计,理论模型已经相当成熟。但是针对固井工程专用的切向式涡轮流量计的研究较少。并且目前大多数对于叶片结构参数的优化研究集中在正交试验以及流体仿真等方式,优化效果明显但是很少有研究通过优化算法进行参数优化得到最优解。本文基于响应面和人群搜索算法,对切向式流量计叶片结构参数进行优化分析,最后得到最优叶片结构参数组合。

1 优化目标的确定

1.1 仪表系数 K 的确定

涡轮流量计的叶片在受到流体冲击时,会受到驱动力矩 T_d 、流体阻力矩 T_{rf} 、叶轮转轴与轴承缝隙间的流体粘性阻力矩 T_{rm} 以及叶片顶部与腔体内壁形成的叶片顶隙流体粘性阻力矩 T_{rb} ^[5],如图 1 所示。

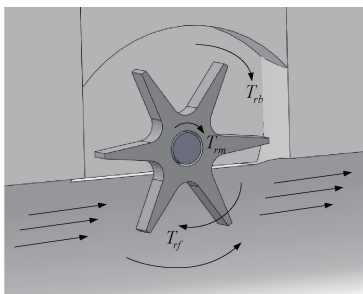


图 1 叶轮力矩示意图

Fig. 1 Impeller moment diagram

在稳定工况下,叶轮在流体中受到合力矩趋近于 0,叶轮转动的角加速度也趋近于 0^[6-7],叶轮力矩平衡方程如式(1)所示,

$$T_d - T_{rf} - T_{rm} - T_{rb} = 0 \quad (1)$$

通过流体仿真软件对流量计进行仿真计算,通过导入 UDF 文件来约束叶轮运动的自由度,使叶轮在流体推动作用下,实现被动旋转。通过这种方式,给流量计入口

设定初始流速,迭代计算过程中,监测叶轮的力矩系数变化曲线,当达到稳定工况时,读取平衡状态下的叶轮转速,并计算得到仿真仪表系数 K ,仿真仪表系数 K 的计算公式^[8]如式(2)~(4)所示。

$$K = \frac{f}{Q} \quad (2)$$

式中: f 为脉冲信号频率; Q 为体积流量。其中:

$$f = \frac{nZ}{60} \quad (3)$$

式中: Z 为叶片数量, n 为转速。则有:

$$K = \frac{nZ}{60Q} \quad (4)$$

在流体粘度 55 mPa·s,密度 1 440 kg/m³ 条件下对流量计仪表系数进行仿真计算。油田实际固井工程中流量计测量的泥浆流量大致在 1.0~2.0 m³/min 范围内,所以进行仿真的入口流速设置取 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 m³/min 共 6 个流量点,来查看流量计在实际工程流量范围内的仪表系数变化特性,仪表系数变化曲线如图 2 所示。

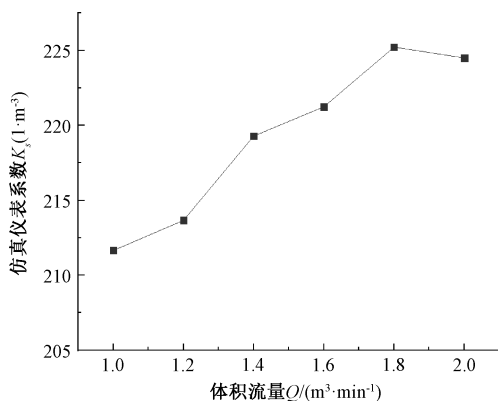


图 2 仪表系数变化曲线

Fig. 2 Instrument coefficient curve

由图 2 可知,在流量 1.0~2.0 m³/min 范围内,仪表系数随流量的增大而逐渐增大,仪表系数最高达到 225.23,最小值为 211.66,而理想状态下的仪表系数应该为一定值,不会随着流量的变化而变化,当仪表系数在一定范围有较大的数值波动时,则表明流量计的计量效果不够稳定。

1.2 叶片结构分析

针对固井泥浆流量计切向式叶轮结构的特殊性,本文结合流体仿真计算的方法,分析叶片表面在转动过程中的表面压力分布和速度场的分布特性,在此基础上,结合传统轴向式叶轮叶片的优化位置,来确定泥浆流量计叶轮叶片的具体优化位置。初步设置入口速度为 1.0 m³/min,进行仿真计算。

图 3 为流量计稳定工况下叶轮附近速度分布矢量图,可以发现在叶轮下半部分周围的流场情况最为复杂,由于叶片横截面形状为矩形,叶片表面与叶片侧边呈直角过渡,导致流体冲击叶片表面后向侧边流出时,流体过渡不够平滑,叶轮暴露 in 流量计腔体内部的叶片周围发生了流体流速的急升,且造成叶片表面压力分布不均匀的现象。

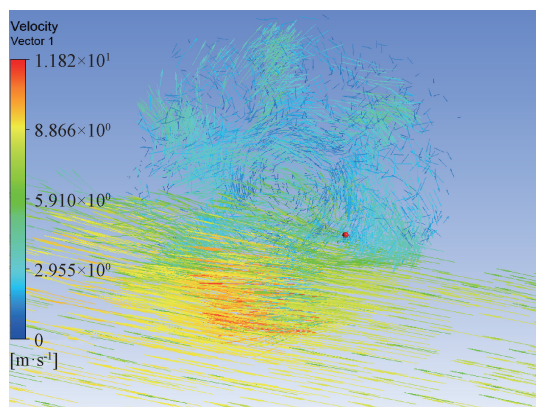


图 3 流场速度矢量图

Fig. 3 Velocity vector diagram of flow field

图 4 为叶片直接与流体发生冲击一侧的压力分布云图,可以发现在叶片中心位置处的压力最大,且分布面积相对较小,压力由中心位置向叶片边缘逐渐减小,但是叶片表面整体的压力分布不够均匀。

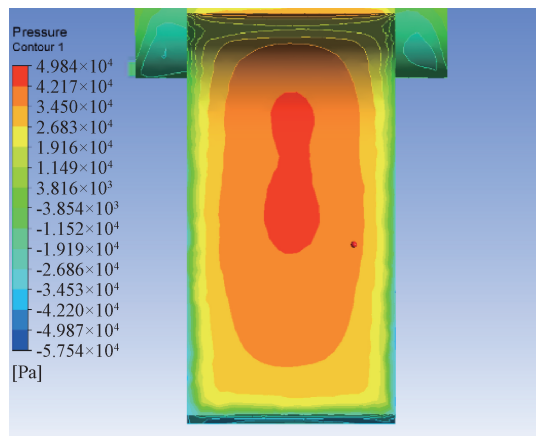


图 4 叶片表面压力云图

Fig. 4 Pressure cloud of impeller surface

图 5 为与来流直接发生冲击的叶片侧面压力分布云图,由于叶片侧边面积较大,从图 5 中能够明显看出叶片侧面产生了大面积负压,负压最大值在叶片靠近顶端位置处,最大负压值为 $-57\,540\text{ Pa}$,向外逐渐增大至 $-38\,540\text{ Pa}$,过大的负压会导致叶轮结构在长时间工作下发生变形,影响计量精度。为了减小负压情况,本文考虑将叶片两侧的厚度减小,使叶片表面呈弧线廓形,减小

叶片的侧边面积,使叶片表面的流体过渡更均匀的同时,减小两侧的负压面积。

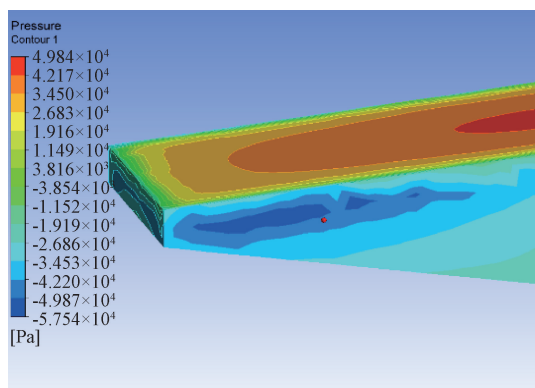


图 5 叶片侧边压力云图

Fig. 5 Pressure cloud of impeller side

图 6 为叶轮靠近流量计出口一侧的速度云图,能够发现在叶片左侧靠近管道上壁的位置,出现了面积较大的低速涡流区域,流体形态变化较大,低速涡流区域的出现会使叶轮的转动产生小幅度的振动影响,降低叶轮高速转动的稳定性。原因是流量计的切向直板式叶片在高速旋转时,叶片两侧的流体流速高于叶片中间部分流速,在流体之间的相互作用下,形成低速涡流区域。使叶片附近的流场分布不均匀。为减小低速涡流区域以及可能带来的影响,本文考虑加大叶片的倾斜角度,使流体沿叶片边缘流出时,流体过渡更加平稳,不会发生较大的速度突变,提升叶片对流体冲击的响应效果和表面压力分布均匀性,从而提升不同流量下仪表系数的一致性,减小仪表系数曲线的线性度误差。

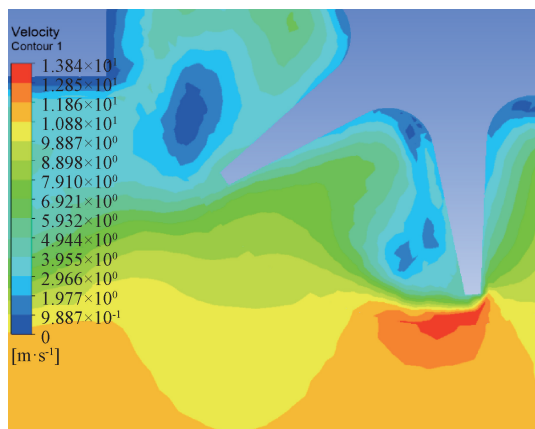


图 6 管道出口侧的叶轮处速度云图

Fig. 6 Velocity cloud at impeller at outlet side of pipe

其中,加大叶片倾斜角所带来的叶轮轴向力可能造成轴承及叶轮结构的微小轴向位移,使结构间产生机械摩擦作用,将增大叶轮转动的阻力矩,王旭龙^[9]指出,在

湍流状态下,轴承的机械摩擦阻力对于计量结果影响很小,可以忽略不计。针对本文研究对象,实际测量的泥浆处于大流量湍流状态下,所以不考虑轴向力对于计算结果的影响。

以往关于流量计叶轮叶片的结构优化参数选取大多集中于叶片半径、轮毂半径、叶片顶端厚度、叶片安装角等参数,为了减小泥浆流量计叶轮叶片侧面负压情况,同时提升叶轮叶片对来流冲击的响应效果和整体计量的精度,结合以往叶片优化的经验,将叶片的顶端半径、叶片边缘厚度、叶片倾斜角这3个变量定为结构优化的参数。

2 优化目标函数的确定

为了确定优化目标与设计变量之间的关系,本文采用响应面法对输入和输出变量进行拟合得到函数关系式,并以此作为目标函数,将其作为人群搜索算法的适应度值函数进行参数寻优,得到最佳参数组合。

2.1 仪表系数线性度误差模型

根据杨振^[3]关于涡轮流量计仪表系数线性度误差的研究,线性度误差 δ 的计算公式如式(5)所示。

$$\delta = \frac{K_{\max} - K}{K} \times 100\%$$
(5)

$$K = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\max} + K_{\min}}$$
(6)

$$K_{\max} = \text{Max} \{ K_i \}, i = 1, 2, \dots, n$$
(7)

$$K_{\min} = \text{Min} \{ K_i \}, i = 1, 2, \dots, n$$
(8)

式中: n 为进行结构参数优化选取的流量点个数; K_i 为第 i 个流量点对应的仪表系数; K 为平均仪表系数; δ 为线性度误差。

针对研究对象,所选的6个流量下所仿真得到的6个仪表系数,选取最大值 $K_{\max}$ 和最小值 $K_{\min}$,通过式(5)计算得到仪表系数线性度误差。

2.2 正交试验设计

为了降低计量范围内的仪表系数的线性度误差 δ ,建立线性度误差与优化变量之间的数学模型,并探讨各优化参数和仪表系数线性度误差的关系,本文设计了三因素四水平的正交实验,并通过建立不同参数组合的叶轮模型,重新建立的叶轮模型和原模型对比如图7所示。分别进行仿真计算,得到各参数组合的最大和最小仪表系数 K 以及线性度误差 δ 。

叶片的优化参数示意图如图8所示。原模型叶片半径 A 为18.5 mm、叶片边缘厚度 B 为0.8 mm、叶片倾斜角度 C 为 0° 。

设计的三因素四水平实验如表1所示。仿真计算结果如表2所示。

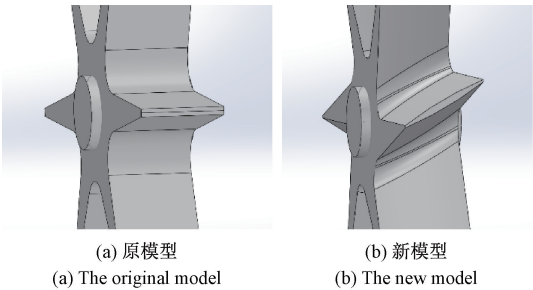


图7 叶轮模型对比

Fig. 7 Contrast diagram of impeller model

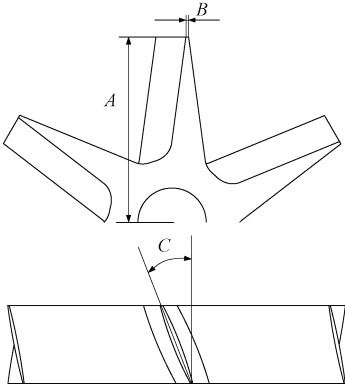


图8 叶片参数示意图

Fig. 8 Schematic diagram of impeller parameters

表1 正交试验变量表

Table 1 Orthogonal test variable scale

变量水平	A 顶端半径/mm	B 边缘厚度/mm	C 倾斜角度/(°)
1	17	0.39	0
2	18	0.52	10
3	19	0.65	20
4	20	0.78	30

表2 仿真试验数据表

Table 2 Simulation test data sheet

编号	A/mm	B/mm	C/(°)	Kmax (1·m ⁻³)	Kmin (1·m ⁻³)	δ/ %
1	18	0.65	10	213.55	208.49	0.84
2	20	0.78	20	211.66	202.94	1.95
3	20	0.52	0	207.13	201.15	0.95
4	17	0.65	20	219.23	214.57	0.86
5	20	0.78	20	217.65	213.13	0.96
6	18	0.65	10	212.36	207.21	1.42
7	17	0.39	0	205.15	199.86	1.31
8	20	0.52	0	206.94	199.26	1.89
9	19	0.52	30	216.23	213.25	1.75
10	19	0.39	10	206.22	198.65	1.02
11	17	0.65	20	218.53	214.23	0.99
12	20	0.65	30	214.85	211.53	0.7
13	18	0.52	10	214.61	208.86	0.72
14	18	0.78	30	213.26	209.19	0.92
15	19	0.52	30	212.75	209.23	0.62
16	17	0.39	30	215.26	212.11	0.82
17	18	0.52	10	209.99	202.62	1.15
18	17	0.78	0	204.23	195.28	2.26
19	19	0.78	0	203.65	194.17	1.56
20	20	0.39	20	217.84	213.92	1.34

2.3 响应面模型建立

响应面方法 (response surface methodology, RSM) 是一种通过回归分析方法,来建立设计变量和影响变量之间的特定函数关系的统计方法^[10-11]。响应面法可以通过建立的回归方程来预测变量范围内各试验点的响应值,同时能够生成响应面从而直观的观察各因素或多因素协同作用下的响应值变化情况^[12]。

为了更准确表达顶端半径 A 、叶片边缘厚度 B 、叶片倾斜角 C 和仪表系数线性度误差之间响应关系,本文采用带有交叉项的二次回归方程进行拟合^[13-15],对应的表达式如式(9)所示。

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i a_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} a_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} a_i a_j + \xi \tag{9}$$

式中: β 是回归系数, a_i 是自变量, Y 是响应值, ξ 是随机响应误差。

利用每组仿真试验的参数和计算得到的仪表系数线性度误差值拟合,得到优化目标关于顶端半径 A 、叶片边缘厚度 B 、叶片倾斜角 C 三个设计变量的带有交叉项的二次回归拟合方程,即为后续的优化目标函数,得到的回归方程如式(10)所示。

$$\delta = 48.743\,14 - 5.173\,38 \times A + 2.771\,62 \times B - 0.072\,54 \times C - 0.416\,36 \times A \times B + 4.282\,92 \times 10^{-4} \times A \times C + 0.025\,524 \times B \times C + 0.145\,84 \times A^2 + 4.023\,28 \times B^2 + 5.701\,76 \times 10^{-4} \times C^2 \tag{10}$$

通过响应面法拟合得到的回归方程,需要对建立的回归方程进行方差分析,分析结果如表 3 所示。

表 3 方差分析表

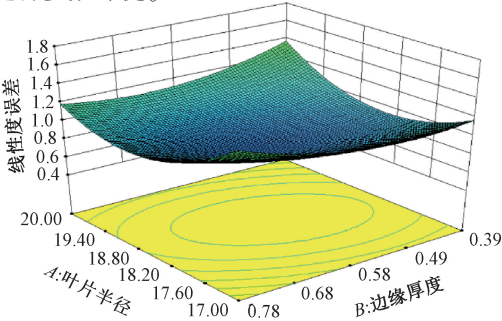
Table 3 Table of variance analysis

方差源	平方和	均方	F 值	P 值
模型	3.734 425	0.414 936	6.889 532	0.002 9
A	0.001 978	0.001 978	0.032 847	0.859 8
B	0.110 382	0.110 382	1.832 759	0.205 6
C	2.367 836	2.367 836	39.315 17	< 0.000 1
AB	0.124 227	0.124 227	2.062 641	0.181 5
AC	0.006 326	0.006 326	0.105 037	0.752 5
BC	0.221 946	0.221 946	3.685 158	0.083 9
A ²	0.195 163	0.195 163	3.240 456	0.102 0
B ²	0.072 23	0.072 23	1.199 298	0.299 1
C ²	0.066 771	0.066 771	1.108 661	0.317 2
残差	0.602 27	0.060 227		
失拟项	0.382 904	0.095 726	2.618 244	0.140 5
误差项	0.219 367	0.036 561		
总和	4.336 695			

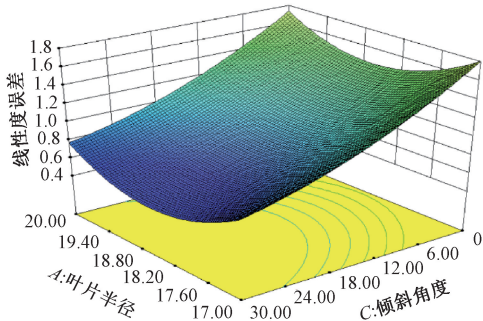
表 3 中,模型显著性检验结果以 P 值表示,一般 P 值小于 0.01 时,该模型具有较高显著性。通过方差分析能够发现,二次回归方程的模型的 P 值为 $0.002\,9 < 0.01$,表

明该函数模型的显著性极高,失拟项的 P 值为 $0.140\,5 > 0.05$,表明模型的失拟性不显著^[16-17]。所以该二次回归方程能很好地表达响应值和变量值之间的关系,并用于参数寻优计算中。

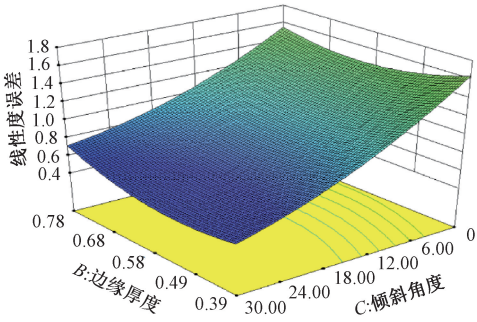
图 9 为结构参数交互效应响应面,从图 9 能够发现,叶片倾斜角度对仪表系数线性度误差值影响最大,仪表系数线性度误差随着叶片倾斜角度增大,呈现逐渐减小的趋势,符合分析结果。叶片半径和叶片厚度对仪表系数线性度误差的影响相对较小,在叶片半径 18~19 mm、叶片边缘厚度 0.39~0.52 mm、叶片倾斜角 30°附近范围内,存在仪表系数线性度误差值的极小值,需要通过优化算法进行参数寻优。



(a) 变量 AB 交互效应响应面
(a) Variable AB interaction effect response surface



(b) 变量 AC 交互效应响应面
(b) Variable AC interaction effect response surface



(c) 变量 BC 交互效应响应面
(c) Variable BC interaction effect response surface

图 9 变量交互响应面

Fig. 9 Variable interaction response surface

3 人群搜索算法参数寻优

3.1 人群搜索算法

人群搜索算法 (seeker optimization algorithm, SOA) 是一种通过模拟人类的随机搜索的智能行为和搜索过程中的经验梯度和不确定性推理,通过分析人类的利己行为、利他行为、预动行为、不确定性行为,来对人类搜索的方向和步长进行建模的一种启发式算法^[18-19],具有收敛快、鲁棒性好的特点。目标函数的优化流程如图 10 所示。

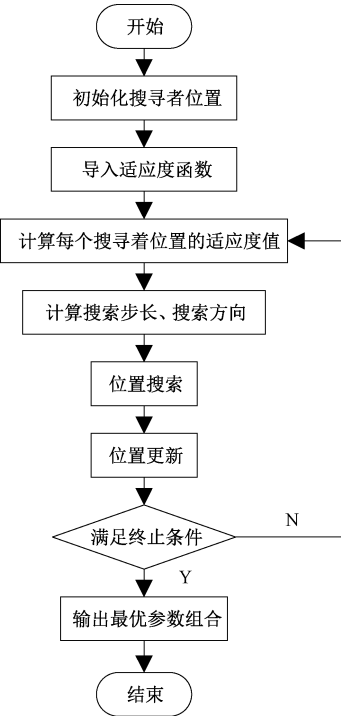


图 10 SOA 算法目标函数优化流程

Fig. 10 Flow chart of SOA algorithm objective function optimization

3.2 搜索步长的确定

SOA 算法的不确定推理行为利用模糊系统的逼近能力对目标函数值和搜索步长的关系进行建模,搜索步长的模糊变量采用高斯隶属函数^[20],如式 (11) 所示。

$$u_i(x) = e^{-\frac{(x-u)^2}{2\delta^2}} \quad (11)$$

式中: x 为输入的参数, u, δ 为高斯隶属函数参数。

为了体现人类搜索行为的随机性,引入线性隶属函数^[21],如式 (12) 所示, $\text{rand}(u_i, 1)$ 为分布在 $[u_i, 1]$ 范围内的一实数。

$$u_i = \text{rand}(u_i, 1) \quad (12)$$

式中: u_i 为第 i 个目标函数值的隶属度。

求出隶属度 u_i 后,即可计算搜索步长 α_i ,如式 (13) 所示。

$$\begin{cases} \alpha_i = \delta_i \sqrt{-\ln(u_i)} \\ \vec{\delta}_i = \omega \cdot |\vec{x}_{\min} - \vec{x}_{\max}| \\ \omega = (t_{\max} - t) / t_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: δ_i 为高斯隶属函数的参数; ω 为惯性权重; $\vec{x}_{\max}$ 为种群最大目标函数值, $\vec{x}_{\min}$ 为种群最小目标函数值; $t_{\max}$ 最大迭代步数, t 为最小迭代步数。

3.3 搜索方向的确定

在 SOA 算法中,搜索方向的确定融合了人类的利己行为、利他行为、预动行为,对这 3 种人类行为可能产生的搜索方向进行建模,并将利己方向 $\vec{d}_{i,ego}$ 、利他方向 $\vec{d}_{i,alt}$ 、预动方向 $\vec{d}_{i,pro}$ 三个方向进行随机加权几何平均,得到搜索方向 $\vec{d}_i$ ^[22],如式 (14) 所示。

$$\begin{cases} \vec{d}_{i,ego} = \vec{p}_{i,best} - \vec{x}_i(t) \\ \vec{d}_{i,alt} = \vec{g}_{i,best} - \vec{x}_i(t) \\ \vec{d}_{i,pro} = \vec{x}_i(t_1) - \vec{x}_i(t_2) \\ \vec{d}_i(t) = \text{sign}(\omega \vec{d}_{i,pro}(t) + \varphi_1 \vec{d}_{i,ego}(t) + \varphi_2 \vec{d}_{i,alt}(t)) \end{cases} \quad (14)$$

式中: φ_1 和 φ_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机实数; t_1 和 t_2 分别为 $[t, t-1]$ 和 $[t-1, t-2]$ 范围内的值; $\vec{x}_i(t_1)$ 和 $\vec{x}_i(t_2)$ 分别为 $[\vec{x}_i(t-2), \vec{x}_i(t-1)]$ 和 $[\vec{x}_i(t-1), \vec{x}_i(t)]$ 区间内的最佳搜索位置; sign 为符号函数。确定搜索方向和搜索步长之后,进行个体位置的更新,如式 (15) 所示。

$$\begin{cases} \Delta x_i(t+1) = \alpha_i(t) d_i(t) \\ x_i(t+1) = x_i(t) + \Delta x_i(t+1) \end{cases} \quad (15)$$

4 优化结果及仿真验证

4.1 优化结果

将响应面法拟合得到的仪表系数线性度误差回归模型作为适应度函数,以仪表系数线性度误差最小为优化目标。代入到 SOA 算法进行迭代计算,并和粒子群算法 (PSO) 进行对比,适应度值迭代变化曲线如图 11 所示。

能够发现 SOA 算法迭代速度很快,在迭代至第 50 步左右时,相较于 PSO 算法迭代 65 步左右,从适应度值迭代曲线能够看出 SOA 算法迭代速度更快,寻优性能更好。通过 SOA 算法寻找到适应度的极小值,即仪表系数线性度误差的极小值,极小值为 0.445,此时得到最佳参数组合,如表 4 所示。

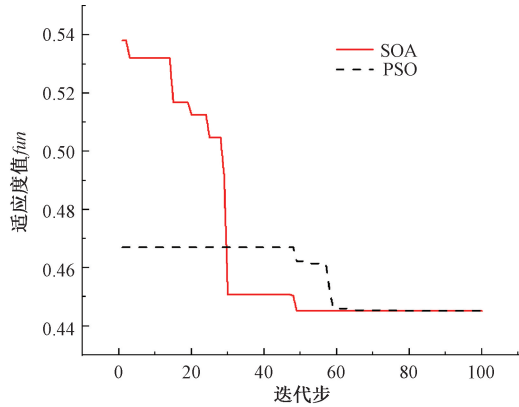


图 11 适应度值迭代曲线

Fig. 11 Fitness value iteration curve

表 4 优化结果对比

Table 4 Comparison of optimization results

	A 顶端半径/ mm	B 边缘厚度 /mm	C 倾斜角度/ (°)	线性度 误差/%
优化前	18.5	0.8	0	3.106 0
优化后	18.431 0	0.514 3	30	0.445 2

4.2 仿真验证

通过 Fluent 对优化后的叶轮结构进行仿真计算,能够发现优化后的叶片表面在稳定工况下最大压力出现在叶片右半部分,最大压力为 46 990 Pa,压力从右向左逐渐减小,相较于优化前的结果,优化后的叶片具有更大倾斜角度,表面压力分布整体较为均匀,如图 12 所示。

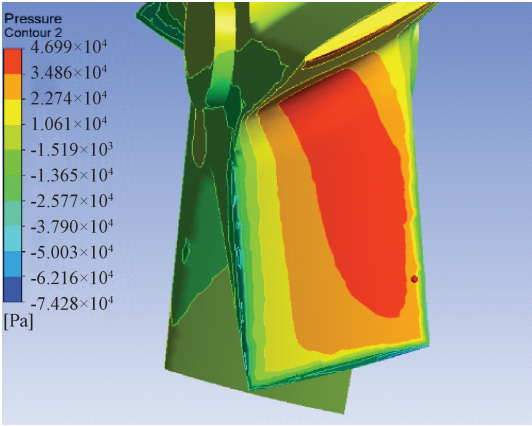


图 12 优化后叶片表面压力云图

Fig. 12 Pressure cloud image of impeller surface after optimization

通过叶片侧面的压力云图能够发现,叶片边缘厚度的减小和叶片倾斜角度的增大,导致来流冲击在叶片上时,叶片能够做出更好的响应,叶片的侧面负压明显减小,则叶片在长时间工作后,叶片顶端附近产生的变形也会大大减小,如图 13 所示,在提升计量精度同时,也提高了叶片结构的可靠性。

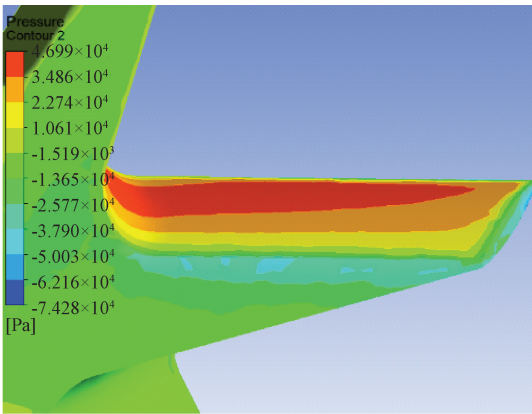


图 13 优化后叶片侧边压力云图

Fig. 13 Pressure cloud image of impeller side after optimization

优化后的管道出口侧的叶轮上方低速涡流区域相较于优化前明显减小,流体流速过渡较平缓,如图 14 所示,证明叶片倾斜角度的增加对于管道内流场的均匀性有较大提升,验证了优化方案的合理性,从而叶轮转动的稳定性以及工作的可靠性得到提升。

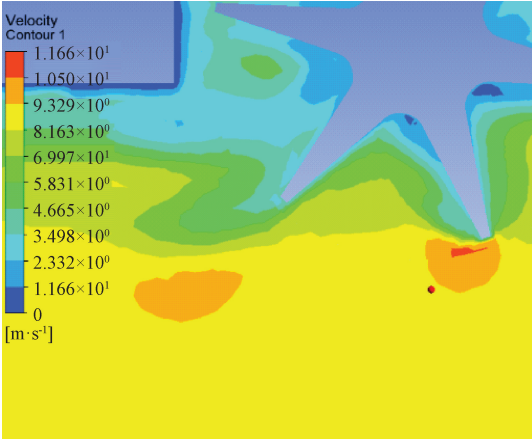


图 14 优化后管道出口侧的叶轮处速度云图

Fig. 14 Velocity cloud at impeller at outlet side of pipe

结构参数优化后的流量计仪表系数线性度误差相较于优化前明显减小,仪表系数在流量 1.0~2.0 m³/min 范围内变化明显趋于稳定,如图 15 所示。表明参数优化后的流量计能够达到更高的计量精度。

5 结 论

本文针对固井泥浆流量计特殊的切向式叶轮结构进行优化,通过仿真分析的手段,确定了叶片结构参数优化的变量分别为叶片顶端半径、叶片边缘厚度、叶片倾斜角度。通过设计三因素四水平正交试验,采用响应面法,拟合出仪表系数线性度误差关于 3 个设计变量的带有交叉

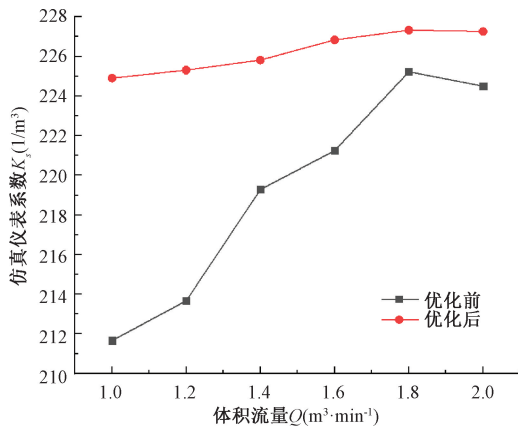


图 15 优化前后仪表系数对比

Fig. 15 Comparison of instrument coefficients before and after optimization

项的二次回归函数关系式,并作优化目标函数。通过人群搜索算法对叶片结构参数进行寻优计算,以仪表系数线性度误差最小为优化目标,迭代计算得到最优参数组合为叶片顶端半径为 18.431 mm、叶片边缘厚度为 0.514 mm、叶片倾斜角度为 30°,仪表系数线性度误差由优化前的 3.106%减小为 0.445%,大大提升了固井泥浆流量计的计量精度和稳定性。

参考文献

[1] 郭素娜,张涛,孙立军.采用流场分析提高涡轮流量传感器性能的研究[J].仪器仪表学报,2015,36(11):2473-2478.
GUO S N, ZHANG T, SUN L J. Research on improving turbine flow sensor performance by flow field analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(11):2473-2478.

[2] 孙鹏飞,徐鸿鹏,李涛,等.大推力液体火箭发动机试验用涡轮流量计结构优化设计[J/OL].西安交通大学学报,2022(5):1-11[2022-01-25].
SUN P F, XU H P, LI T, et al. Structural optimization design of turbine flowmeter for high thrust liquid rocket engine test [J/OL]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022(5):1-11[2022-01-25].

[3] 杨振.高精度液体涡轮流量传感器结构研究[D].天津:天津大学,2014.
YANG ZH. Research on structure of high precision liquid turbine flow sensor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[4] 陈曦.基于CFD的涡轮流量计结构优化[D].大庆:东北石油大学,2015.
CHEN X. Structure optimization of turbine flowmeter based on CFD [D]. Daqing: Northeast Petroleum

University, 2015.

[5] 邵家存,严微微,林景殿,等.气体涡轮流量计后导流体结构优化设计[J/OL].仪器仪表学报,2021,1-9[2022-01-25].
SHAO J C, YAN W W, LIN J D, et al. Structural optimization design of rear diverter for gas turbine flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,1-9[2022-01-25].

[6] 张桂夫,王鲁海,朱雨建,等.基于PIV测量的涡轮流量计响应分析[J].仪器仪表学报,2013,34(10):2381-2387.
ZHANG G F, WANG L H, ZHU Y J, et al. Turbine flowmeter response analysis based on PIV measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34 (10):2381-2387.

[7] WANG B, ZHANG N, CAO Q, et al. Evaluation approach to dynamic characteristic of turbine flowmeters considering calibration system response [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 64: 126-132.

[8] 孙宏军,冯越,汪波.气体涡轮流量计前导流器的数值模拟与优化设计[J].电子测量与仪器学报,2016,30(4):550-557.
SUN H J, FENG Y, WANG B. Numerical simulation and optimization design of front diverter for gas turbine flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(4):550-557.

[9] 王旭龙.小流量粘性液体用涡轮流量计的研究[D].兰州:兰州理工大学,2019.
WANG X L. Study on turbine flowmeter for viscous liquid with small flow [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.

[10] 徐巍,孔建益,王兴东,等.连续热镀锌生产线中锌层重量影响因素模拟与优化[J].仪器仪表学报,2019,40(7):64-72.
XU W, KONG J Y, WANG X D, et al. Simulation and optimization of influencing factors of zinc layer weight in continuous hot dip galvanizing production line [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(7):64-72.

[11] 李莉,张赛,何强,等.响应面法在试验设计与优化中的应用[J].实验室研究与探索,2015,34(8):41-45.
LI L, ZHANG S, HE Q, et al. Application of response surface methodology in experimental design and optimization [J]. Laboratory Research and Exploration, 2015,34(8):41-45.

[12] REN W X, CHEN H B. Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method[J]. Engineering Structures, 2010,32(8):2455-2465.

- [13] 石松宁,王大志,时统宇. 基于RSM的永磁驱动器偏心磁极的多目标优化[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9):1963-1971.
SHI S N, WANG D ZH, SHI T Y. Multi-objective optimization of eccentric pole of permanent magnet driver based on RSM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9):1963-1971.
- [14] 石松宁,王大志. 基于RSM-AGA的永磁驱动器周向开槽的参数优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3):601-607.
SHI S N, WANG D ZH. Parameter optimization design of circular slotting for permanent magnet driver based on RSM-AGA [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3):601-607.
- [15] 王晨,黄金霖. 基于响应面法的定子永磁型轴向磁通切换电机齿槽转矩优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7):1144-1151.
WANG CH, HUANG J L. Optimization design of groove torque of stator permanent magnet axial flux switching motor based on response surface method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7):1144-1151.
- [16] 陈超鹏,全伟,吴明亮,等. 基于离散元法的油菜移栽垂直入土式成孔部件参数优化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(4):433-439.
CHEN CH P, QUAN W, WU M L, et al. Parameter optimization of vertical soil-filling hole-forming parts for rapeseed transplantation based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, 45(4):433-439.
- [17] SOLHI L, SUN H S, DASWANI S H, et al. Controlled sulfation of mixed-linkage glucan by response surface methodology for the development of biologically applicable polysaccharides [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 269:118275.
- [18] 张连强,王东风. 基于改进人群搜索算法的PID参数优化[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(12):3389-3393.
ZHANG L Q, WANG D F. PID parameter optimization based on improved crowd search algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(12):3389-3393.
- [19] 易照云,胡蓉,钱斌,等. 基于自适应约束调整的BRB参数优化[J]. 控制工程, 2021, 28(10):2021-2027, 2044.
YI ZH Y, HU R, QIAN B, et al. BRB parameter optimization based on adaptive constraint adjustment [J]. Control Engineering, 2021, 28(10):2021-2027, 2044.
- [20] 杨俊华,邹子君,杨金明,等. 基于人群搜索算法的波浪发电系统最优负载[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10):2725-2731.
YANG J H, ZOU Z J, YANG J M, et al. Optimal load of wave power generation system based on crowd search algorithm [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(10):2725-2731.
- [21] 葛育晓,赵荣珍. 基于改进SOA算法自整定PID系统优化研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020(10):108-115.
GE Y X, ZHAO R ZH. Research on self-tuning PID system optimization based on improved SOA algorithm [J]. Instrument Technology and Sensors, 2020(10):108-115.
- [22] 孙立香,单秀文,靖文. 基于SOA的PMLSM进给系统PID参数优化研究[J]. 微特电机, 2016, 44(11):62-65.
SUN L X, SHAN X W, JING W. Research on PID parameter optimization of PMLSM feed system based on SOA [J]. Micro & Special Motor, 2016, 44(11):62-65.

作者简介



李宜霖, 2018年于沈阳化工大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学在读硕士, 主要研究方向为固井泥浆流量计计量原理及应用研究。

E-mail: 2549430534@qq.com

Li Yilin received his B. Sc. degree from Shenyang University of Chemical Technology in 2018. Now he is a M. Sc. candidate in Shenyang University of Technology. His main research interests include measurement principle and application of cementing mud flowmeter.



孙兴伟(通信作者), 分别于1992年和1995年在沈阳工业大学获得学士和硕士学位, 于2006年在天津大学获得工学博士学位。现为沈阳工业大学机械工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂曲面测量与数控加工轨迹优化、数控技术与专用集成

数控系统、CAD/CAM/CAE技术等。

E-mail: sunxingw@126.com

Sun Xingwei (Corresponding author) received her both B. Sc. degree and M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 1992 and 1995, and received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2006. She is currently a professor and a doctoral supervisor in the School of Mechanical Engineering at Shenyang University of Technology. Her main research interests include complex surface measurement and NC machining trajectory optimization, CNC technology and dedicated integrated CNC system, and CAD/CAM/CAE technology.