

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.11.005

基于 RBF 神经网络和 MIGA 的 液压锥阀降噪研究^{*}

王华伟,周鑫,王博,胡漂

(武汉科技大学汽车与交通工程学院,湖北武汉 430000)

摘要: 液压锥阀在气液两相流状态下工作时会产生剧烈的噪声,严重影响锥阀的工作性能及其工作环境,针对这一问题,提出了一种基于径向基函数(RBF)神经网络和多岛遗传算法(MIGA)的方法,对液压锥阀的结构参数进行了优化。首先,采用有限元软件分析了影响锥阀流场及声场的结构参数;然后,以阀芯半锥角角度、喉部长度和阀芯入口角度这 3 个参数为优化变量,以加权平均噪声最小和加权最大噪声最小为优化目标,通过最优拉丁超立方设计方法确定了样本数据;最后,采用了 RBF 神经网络方法,建立了锥阀结构参数与噪声关系的近似模型,利用多岛遗传算法对近似模型进行了优化;根据得到的最优参数建立了锥阀优化模型,并进行了声学特性分析。研究表明:与原模型相比,优化模型的平均噪声降低 23.846 dB,最大噪声降低 5.092 dB;该结果验证了基于 RBF 神经网络和 MIGA 优化方法的有效性,可为液压锥阀的进一步降噪研究提供理论支持。

关键词: 液压控制阀;锥阀噪声抑制;径向基函数神经网络;多岛遗传算法;锥阀结构参数;声学特性分析;最优拉丁超立方

中图分类号:TH137.52

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)11-1527-08

Noise reduction of hydraulic cone valve based on RBF neural network and MIGA

WANG Hua-wei, ZHOU Xin, WANG Bo, HU Li

(School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: Hydraulic cone valve will produce severe noise when it works in the state of gas-liquid two-phase flow, which seriously affects the working performance and working environment of the cone valve. Aiming at this problem, a method based on radial basis function (RBF) neural network and multi-island genetic algorithm (MIGA) was proposed to optimize the structural parameters of hydraulic cone valves. Firstly, the structural parameters affecting the flow field and sound field of the cone valve were analyzed by the finite element analysis software. Then, the half cone angle, throat length and inlet angle of the valve core were taken as the optimization variables, and the noise including weighted average noise and the weighted maximum noise were used as the optimization objectives. The optimal Latin hypercube test method was used to design the sample points. Finally, RBF neural network method was used to establish the approximate model of the relationship between cone valve structural parameters and noise, and the approximate model was optimized by the multi-island genetic algorithm. The optimal parameters were used to establish the optimization model of cone valve, and the acoustic characteristics of that model were analyzed. The results show that compared with the original model, the average noise of the optimized model is reduced by 23.846 dB and the maximum noise is reduced by 5.092 dB, thus the effectiveness of the proposed optimization method is verified. The research results can provide theoretical support for the noise reduction research of hydraulic cone valve.

Key words: hydraulic control valve; cone valve noise suppression; radial basis function (RBF) neural network; multi-island genetic algorithm (MIGA); structural parameters of cone valve; acoustic characteristic analysis; optimal Latin hypercube

0 引言

液压锥阀是液压系统中控制流体流动方向、压力和流量的一种重要元件。

在节流工作过程中,若液压锥阀的阀芯内部气液

两相流流体无法平稳流过管道,会产生不稳定流体,诱发强烈的噪声,严重影响锥阀的工作性能及工作环境。因此,抑制锥阀的噪声成为国内外学者的研究热点。

目前,液压锥阀噪声的研究热点主要围绕不同阀芯结构下的声学特性展开。

收稿日期:2022-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51905389);湖北省教育厅科学技术研究项目(B2020002)

作者简介:王华伟(1989-),男,河南驻马店人,博士,硕士生导师,主要从事流体传动与控制 and 减振降噪方面的研究。E-mail:wanghwwust@163.com

刘晓红等人^[1]结合试验和计算流体力学的方法,对不同结构的液压锥阀进行了研究,结果表明,收缩型锥阀阀口的噪声比扩张型的阀口更低。GAO Hong 等人^[2]采用数值模拟技术,选用了重整规划群(reforming programming group, RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型和 cavitation 模型,尝试了通过改变锥阀的形状来降低噪声的方法,结果发现,锥盆状的锥阀形状对噪声降低效果最佳。王晓晶等人^[3]¹⁴⁶⁻¹⁴⁷通过对锥阀内流场气液两相流的仿真研究,获得了锥阀半锥角对噪声的影响规律。KUDZMA Z 等人^[4]对锥阀阀座有无倒角的流场进行了研究,结果表明,具有最小扩张角的阀头形状的锥阀产生的噪声水平最低。黄皓^[5]⁵¹⁻⁵⁷采用宽频噪声模型,对锥阀内流场的噪声进行了仿真计算,得到了噪声产生的具体位置,仿真结果表明,喉部入口角度对锥阀的噪声影响较大。KIM G J 等人^[6]对锥阀进行了研究,结果表明,锥阀流场的流型对两相流噪声的影响大于管道布置方式的影响。PASSANDIDEH-FARD M 等人^[7]²⁻⁶采用流体体积(volume of fluid, VOF)模型,分析了锥阀的空化过程,结果表明,不同形状的阀口通道和不同大小的锥角角度均会对锥阀的阀芯噪声产生影响。

在液压锥阀结构优化方面,大多数研究人员均是通过仿真和实验的方式,对其流场分布规律进行了研究。但相关方法依赖于工程经验,随机性较大。

智能算法在处理优化问题时具有较强的适应性和灵活性。在结构优化方面,智能算法的全局搜索能力可以有效避免工程经验的偶然性,提高工作的效率^[8-11]。

为了有效减小锥阀的噪声,笔者结合计算流体力学和智能优化算法,对锥阀结构参数进行优化。

笔者首先利用径向基函数(radial-basis function, RBF)神经网络建立阀芯重要影响参数的近似模型;并通过多岛遗传算法(multi-island genetic algorithm, MIGA)寻找最优参数组合;最后提出一种基于 RBF 神经网络和多岛遗传算法(MIGA)的方法,优化液压锥阀阀芯主要参数,以期对锥阀的结构优化及降噪提供参考。

1 锥阀仿真

1.1 模型建立及网格划分

1.1.1 模型建立

笔者选择以某种型号的锥阀为研究对象,为了更有效地研究锥阀的流动性能,对锥阀结构进行简化,如图 1 所示。

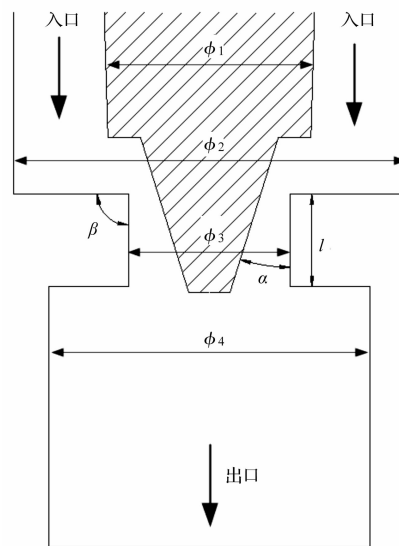


图 1 锥阀结构简图

锥阀结构主要结构尺寸如表 1 所示。

表 1 锥阀参数值

参数/单位	值
半锥角 $\alpha/(^{\circ})$	13
喉部入口角度 $\beta/(^{\circ})$	90
喉部长度 l/mm	1.34
阀芯半径 ϕ_1/mm	2.7
锥阀入口半径 ϕ_2/mm	5
喉部入口 ϕ_3/mm	2.2
锥阀出口 ϕ_4/mm	4.35

1.1.2 网格划分

笔者使用 ANSYS Workbench 软件划分模型网格,为提高计算精度,在喉部位置对网格进行局部细化。

锥阀的网格划分及局部加密图如图 2 所示。

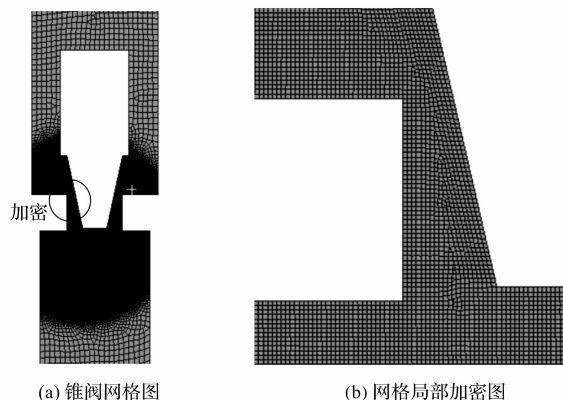


图 2 锥阀网格划分及局部加密图

图 2 中,最小网格面积为 $1.13\text{e}^{-5}\text{mm}^2$,最大网格面积为 $3.93\text{e}^{-4}\text{mm}^2$,节点个数为 27 563 个,单元个数为 26 957 个。

1.2 理论基础

笔者选取 Realizable 混合湍流模型,采用计算流

体动力学的 3 个基本控制方程,并运用了宽带噪声模型。

笔者根据 PROUDMAN I^[12]和 LILLEY G M^[13]导出的声功率公式,引入并改写湍流动能和耗散率,具体如下:

(1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_m —混合密度; v_m —平均质量速度。

(2) Mixture 模型的动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m v_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m^2) = -\nabla p + \nabla [\mu_m (\nabla v_m + \nabla v_m^T)] + \rho_m g + F + \nabla \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_{dk}^2 \right) \quad (2)$$

式中: F —源相; n —相数; v_{dk} —第二相 k 的流速。

(3) Mixture 模型的能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [\alpha_k v_k (\rho_k E_k + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_E \quad (3)$$

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (4)$$

式(3,4)中: E_k —第二相的能量; v_k —第二相的流速; k_{eff} —热导率; S_E —能量交换相。

(4) 宽频噪声模型:

$$P_A = \alpha \rho_0 \left(\frac{\mu^3}{l} \right) \frac{\mu^5}{\alpha_0^5} \quad (5)$$

$$P_A = \alpha_\varepsilon \rho_0 \varepsilon M_t^5 \quad (6)$$

$$M_t = \frac{\sqrt{2k}}{a_0} \quad (7)$$

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_A}{P_{\text{ref}}} \right) \quad (8)$$

式(5~8)中: P_A —声功率; μ , l —流速和时间; α_0 —声速; α —常数; k —湍流动能; ε —耗散率; α_ε —常量, 值为 0.1; L_p —声功率级; P_{ref} —参考声功率, 一般值为 10^{-12} W。

1.3 流场分析

在该处的计算中,笔者选用稳态的 Realizable k - ε 湍流模型及 Mixture 两相流模型;壁面函数选用对近壁面区域的网格质量要求不高、计算量较小且精度较高的非平衡壁面函数。

笔者设置流体域条件为 R410 两相参数(在 2.5 MPa 的压力条件下,其饱和液相密度为 967.5 kg/m^3 ,动力黏度为 $9.72 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$;饱和气相密度为 105.67 kg/m^3 ,动力黏度为 $1.4 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 。

求解方法选择高精度的 coupled 耦合求解器,残差设为 10^{-5} 。

残差收敛曲线如图 3 所示。

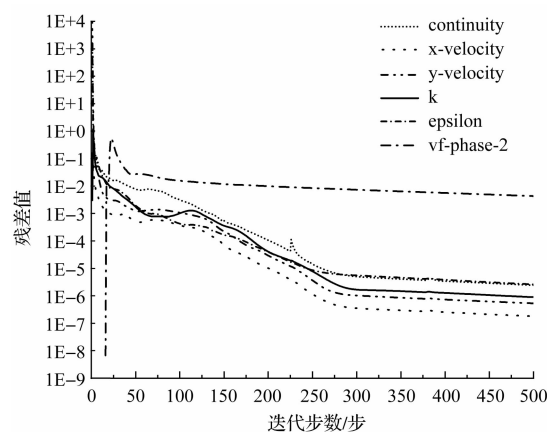


图 3 残差收敛曲线

图 3 中,计算结果的收敛性较好,计算结束。

为使入口平面流速均匀分布,避免回流的影响,笔者需结合实际锥阀结构,简化进出口^[5,14]。

锥阀压力流场如图 4 所示。

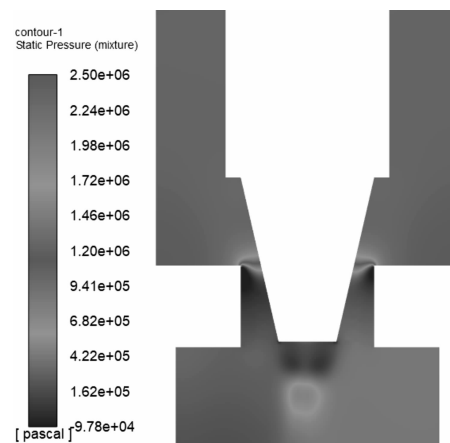


图 4 锥阀压力流场云图

锥阀速度流场如图 5 所示。

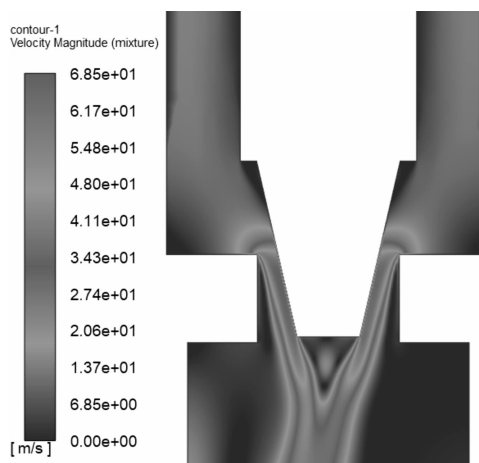


图 5 锥阀速度流场云图

流体进入阀门入口时压力较大、速度较低;当流体进入阀芯喉部位置节流时,流速迅速增加而压力迅速降低;当流体流经阀芯喉部位置后,压力逐渐回升,而阀芯正下端出现压力极小值。

另外,从图 5 可知:流体流经阀芯的喉部位置时,阀芯壁面的速度变化梯度明显大于阀体壁面处的变化梯度,在阀芯下端也出现了速度极小值区域。

为了更直观地观察流体流经喉部节流位置处的压力和速度变化,笔者在模型上取一条线进行描述,如图 6 所示。

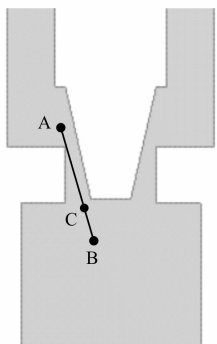


图 6 取直线

图 6 中:AC 段为喉部位置,CB 段为阀腔区域。AB 间的速度变化如图 7 所示。

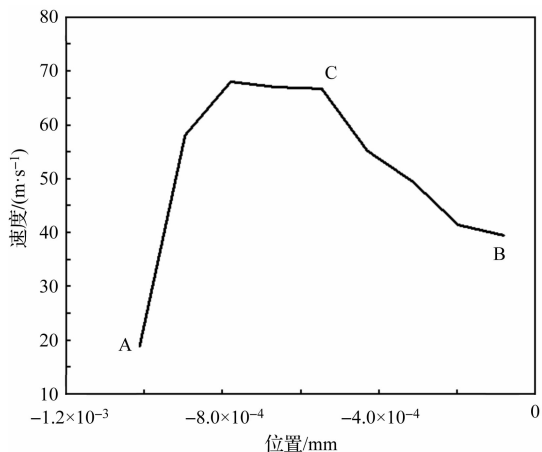


图 7 AB 间速度变化

AB 间的压力变化如图 8 所示。

流体流经喉部位置时,压力和速度都发生了显著的变化,导致流体出现不稳定的流动状态,诱发强烈噪声。

锥阀的宽频噪声声场如图 9 所示。

图 9 中:高分贝噪声主要集中于喉部位置以及阀芯正下端位置,流经喉部之后的锥阀噪声逐渐降低。

由此可见,半锥角、喉部入口角度和喉部长度等喉部位置的形状参数对锥阀的声学特性有显著影响。

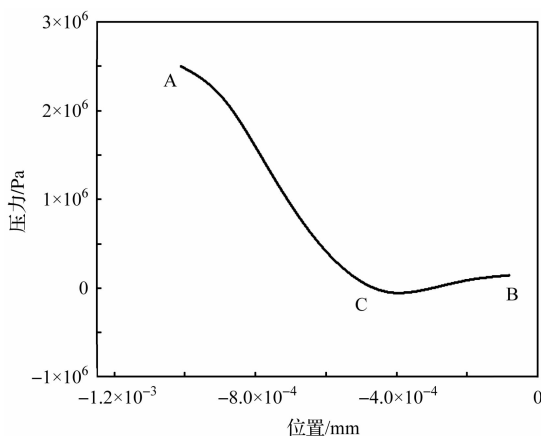


图 8 AB 间压力变化

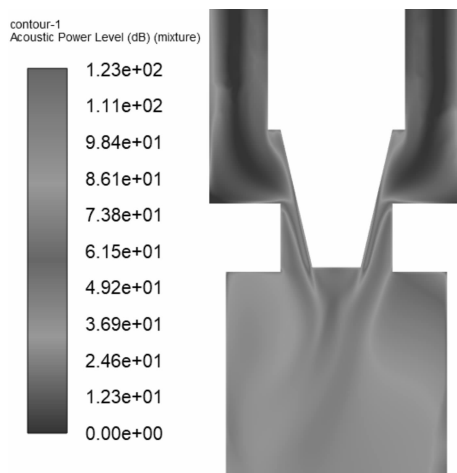


图 9 锥阀宽频噪声声场

2 锥阀优化

2.1 优化流程介绍

该处液压锥阀的整体优化思路流程图如图 10 所示。

由上述流场分析可知:锥阀阀芯喉部位置对流场变化的影响尤为明显。

文献[3,5,7]的研究结果表明:锥阀的锥角角度、喉部入口角度和喉部长度等结构参数会对锥阀的噪声产生影响。因此,笔者选择半锥角、喉部入口角度和喉部长度作为阀芯优化的输入参数。

优化流程介绍如下:

- (1)确定阀芯优化的输入参数。半锥角,喉部入口角度、喉部长度;
- (2)确定优化目标。平均噪声和最大噪声最小;
- (3)运用最优拉丁超立方设计方法确定输入 40 组输入数据;
- (4)根据数据集输入参数改变模型,并通过 Fluent 软件计算出对应的输出值;

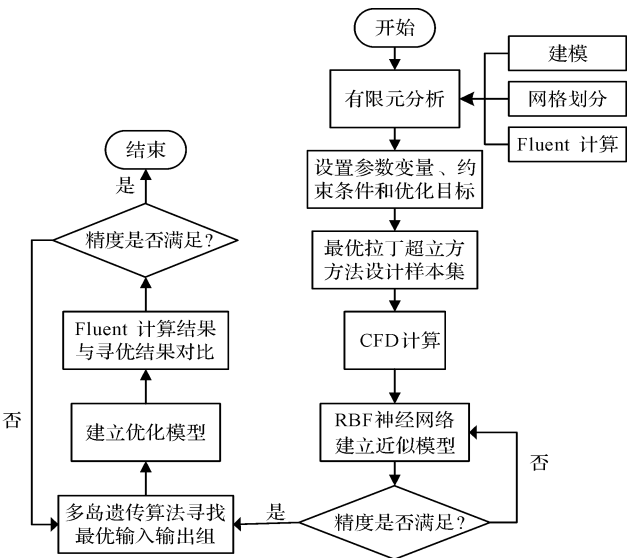


图 10 优化流程图

(5)运用 RBF 神经网络方法建立近似模型。检查近似模型建立的精度是否满足要求,若不满足要求,则重新设置计算参数,再次建立近似模型,直到精度达到要求;

(6)利用多岛遗传算法寻找全局最优参数组合。用寻找出的最优参数组建立新的模型,使用 Fluent 软件计算结果,比较其结果是否与优化后的结果在误差允许范围内达到一致,若不一致,则重新寻优,直到精度达到要求;

(7)根据最优参数组建立新模型,与原模型进行仿真对比。

2.2 样本点设计

笔者确定影响锥阀工作性能的主要参数为锥阀半锥角角度、喉部长度和喉部入口角度。

根据现有研究成果^[15],笔者确定这 3 个参数的约束范围如表 2 所示。

表 2 锥阀参数范围

锥阀参数/单位	下限	上限
半锥角 $\alpha/(^{\circ})$	10.00	20.00
喉部长度 l/mm	1.34	3.34
喉部入口角度 $\beta/(^{\circ})$	55.00	75.00

为了更精确地建立近似模型,笔者应该在锥阀参数的约束范围内选取合适的样本点,兼顾计算效率和计算精度,选取最优拉丁超立方方法生成样本点。相比于其他试验设计方法,该方法具有更有效的填充性和映射性能,同时可以拟合高阶非线性关系,试验次数也可以人为控制。

根据设计的参数范围,利用最优拉丁超立方方法设计的 40 组样本数据如表 3 所示。

表 3 锥阀参数设计样本点

序号	喉部长度/mm	半锥角 $\alpha/(^{\circ})$	喉部入口角度 $\beta/(^{\circ})$
1	2.468	14.62	73.97
2	2.519	10.77	57.56
3	3.186	11.54	58.59
4	2.263	17.69	74.49
5	3.084	17.69	66.79
6	3.289	15.13	60.64
7	1.391	18.46	62.69
8	2.725	14.36	67.31
9	3.135	18.97	60.13
10	2.366	11.28	71.92
11	2.058	17.44	62.18
12	2.827	19.74	71.41
13	1.494	15.38	59.62
14	1.443	11.03	59.10
15	1.596	18.72	70.38
16	3.032	12.82	72.95
17	1.853	15.64	72.44
18	1.802	12.56	75.00
19	1.904	20.00	65.77
20	1.648	16.15	66.28
21	2.161	13.85	61.15
22	2.212	15.90	56.03
23	2.417	19.23	58.08
24	2.571	19.49	64.74
25	2.673	16.41	61.67
26	2.007	10.51	63.21
27	3.237	12.05	65.26
28	1.750	10.26	69.87
29	1.350	13.59	70.38
30	2.109	13.33	67.82
31	1.699	18.21	56.54
32	2.314	16.92	68.33
33	1.545	13.08	64.23
34	2.776	14.10	57.05
35	2.878	17.18	55.00
36	1.955	12.31	55.51
37	3.340	14.87	68.85
38	2.622	11.79	63.72
39	2.878	10.00	69.36
40	2.981	16.67	73.46

2.3 近似模型建立

近似模型方法是指,通过建立一种数学模型来逼近输入变量和响应变量之间关系的方法。

液压锥阀的半锥角、喉部长度、喉部入口角度等流道形状参数与锥阀噪声存在复杂的耦合关系,目前还无法用具体的数学模型来描述,因此,需要建立一种近似模型,以表达锥阀流道参数与其工作时产生的最大噪声、平均噪声之间的关系。

描述近似模型的输入量与输出量之间的复杂关系公式如下:

$$y(x) = \hat{y}(x) + \varepsilon \quad (9)$$

式中: $y(x)$ —输出实际值; $\hat{y}(x)$ —输出近似值; ε —随机误差。

RBF 神经网络逼近是一种采用径向单元隐含层和线性单元输出层的神经网络,具有较强的逼近复杂非线性函数能力以及较快的学习速度,如今已经被广泛应用于各类行业之中^[16]。

RBF 神经网络结构示意图如图 11 所示。

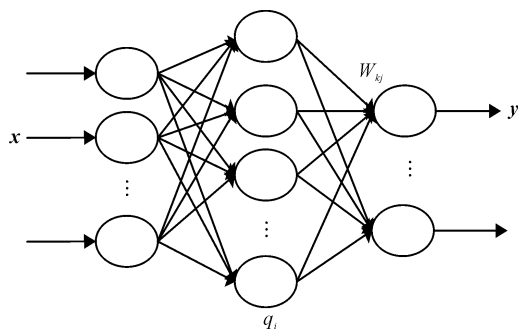


图 11 RBF 神经网络示意图

x —输入向量; q_i —第 i 个隐含层节点输出; W_{kj} —输出方向; y —输出向量

在该处的优化中,笔者共设计了 40 组样本数据,运用 RBF 神经网络方法拟合样本数据,建立其近似模型。

平均相对误差的值是判断近似模型的拟合精度标准,其具体值如表 4 所示。

表 4 平均相对误差分析

误差项	平均噪声	最大噪声	水平
平均相对误差值	0.087 38	0.110 08	0.2

表 4 中,拟合的输出量平均相对误差值均小于 0.2,拟合程度较好,近似模型建立成功。

2.4 多岛遗传算法优化

遗传算法是模拟自然界生物遗传和进化过程而发展出的一种全局寻优算法^[17-19],多岛遗传算法是遗传算法的一种改进智能算法。

与并行分布的传统遗传算法相比,多岛遗传算法的全局寻优能力更强、计算效率更高,其主要特点就是将原本一个大的种群分为多个子种群,即“岛”,再在每个“岛”上分别使用遗传算法进行子种群寻优。因此,多岛遗传算法每隔一定的步数便会进行“岛”与“岛”之间的种群个体交换。

多岛遗传算法的主要流程步骤如图 12 所示。

笔者采用的多岛遗传算法的具体参数设置如表 5 所示。

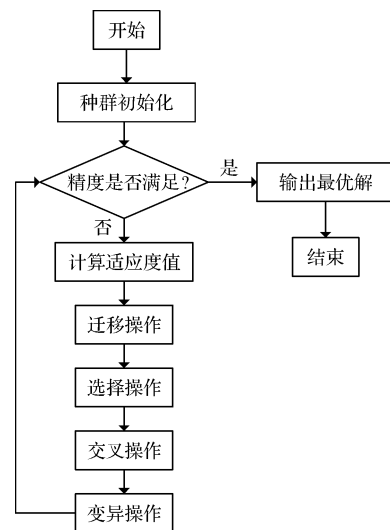


图 12 多岛遗传算法流程图

表 5 多岛遗传算法设置参数

参数	数值
子群规模	10
岛个数	10
进化代数	10
交叉概率	1
变异概率	0.01
岛间迁移	0.01
岛间迁移间隔代数	5
子群个体竞争比率	0.5

笔者按照表 5 设置参数,进行多岛遗传算法寻优计算,最终求解的遗传迭代步数为 1 002 步。

半锥角优化过程图如图 13 所示。

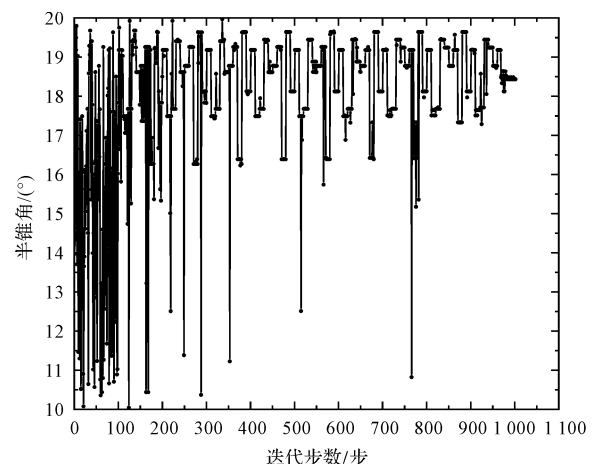


图 13 半锥角优化过程图

喉部长度优化过程图如图 14 所示。

入口角度优化过程图如图 15 所示。

各变量在优化过程中,前 300 步的变化比较明显,之后慢慢趋于稳定,在 1 002 步时计算停止。

锥阀的最大噪声如图 16 所示。

平均噪声优化过程图如图 17 所示。

图 17 中:在 300 步之后,各变量虽多次处于最优

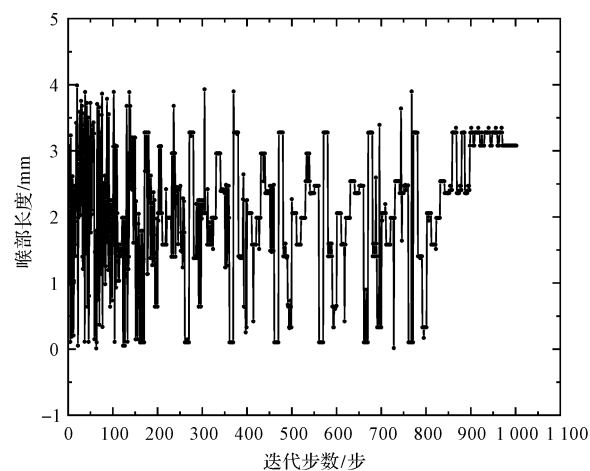


图 14 喉部长度优化过程图

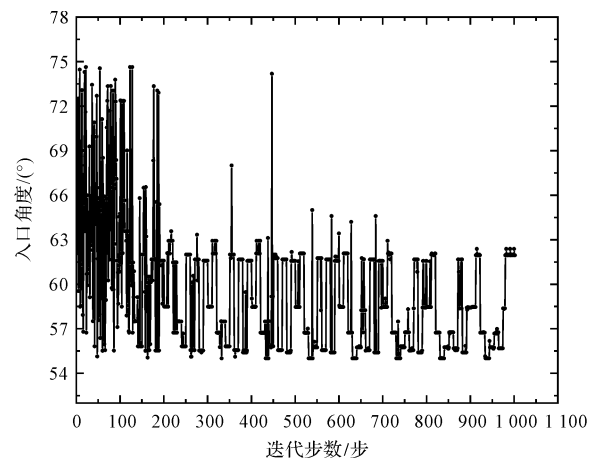


图 15 入口角度优化过程图

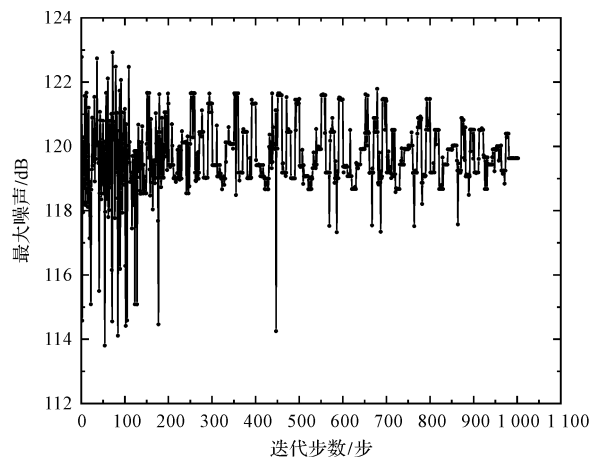


图 16 最大噪声优化过程图

解附近,并出现局部变化过大的情况,但最终计算结果还是收敛在最优解附近,这使多岛遗传算法在计算过程中产生“岛”迁移,避免了计算结果陷于局部最优解附近的情况。

3 优化结果分析

根据 RBF 神经网络和多岛遗传算法,笔者对锥阀的结构参数进行了优化。为了验证该方法的有效性,

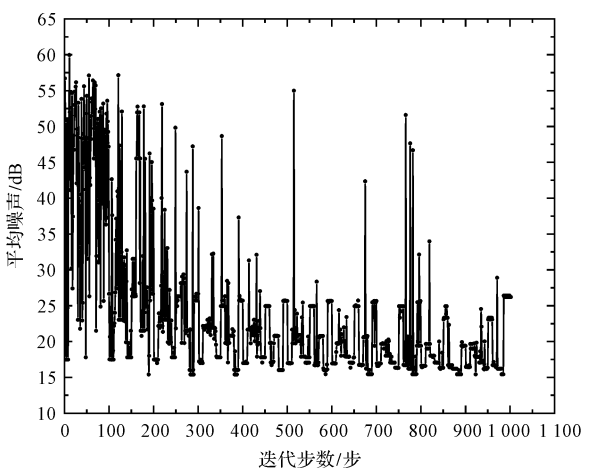


图 17 平均噪声优化过程图

笔者根据优化后的参数重新建立模型,并进行了声学计算。

优化后的模型如图 18 所示(原模型如图 6)。

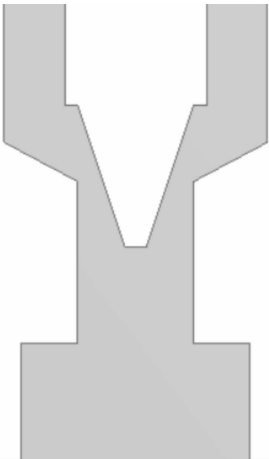


图 18 优化后的锥阀模型图

宽频噪声场云图如图 19 所示(原模型如图 9)。

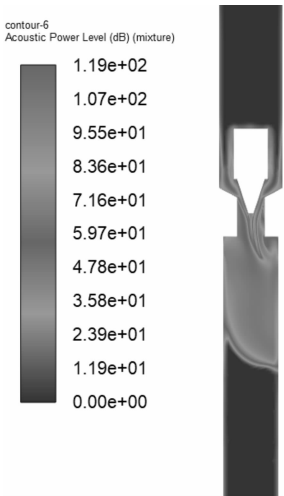


图 19 优化后的锥阀声场云图

阀腔整体的噪声减少比较明显,平均噪声降低效果更为显著。

阀芯主要参数以及计算结果如表 6 所示。

表 6 优化结果对比

参数/单位	原值	优化值	仿真值
半锥角 $\alpha/(\circ)$	13.000	18.431	18.431
喉部长度 l/mm	1.340	3.078	3.078
喉部入口角度 $\beta/(\circ)$	90.000	61.993	61.993
加权平均噪声/dB	50.045	26.199	26.965
加权最大噪声/dB	124.528	119.628	119.436

表 6 中:加权平均噪声的相对误差为 2.841%,加权最大噪声的相对误差为 0.161%,可靠性较高;优化后,锥阀的平均噪声降低 23.846 dB,最大噪声降低 5.092 dB;平均噪声和最大噪声均可达到最小,最终优化后的锥阀参数为半锥角 18.431°,喉部入口角度 61.993°,喉部长度 3.078 mm。

4 结束语

由于液压锥阀在气液两相流状态下工作时,会产生强烈的噪声,笔者采用了 RBF 神经网络结合多岛遗传算法,对锥阀的结构参数进行了优化,并对优化前后的锥阀模型进行了仿真计算对比。

研究表明:

(1)由某种型号液压锥阀的仿真可知,流体在经过锥阀喉部位置节流时,其压力和速度会发生显著变化,引起剧烈的噪声,得到了对锥阀工作性能有直接影响的参数;

(2)根据研究结果,笔者确定了优化参数的具体范围,利用最优拉丁超立方方法进行样本点设计,采用 RBF 神经网络算法拟合样本数据,成功建立了一种表达锥阀流道参数,与其工作时产生的最大噪声、平均噪声之间关系的近似模型,拟合精度较高,证明该近似模型是准确的;

(3)笔者利用多岛遗传算法优化建立好的锥阀参数近似模型,并将优化值与仿真值进行了对比,结果表明,优化出的锥阀参数可靠性较高,优化后的锥阀平均噪声降低 23.846 dB,最大噪声降低 5.092 dB,效果较好;为锥阀的性能优化提供了一种新的思路。

为了进一步提高液压锥阀的降噪效果,笔者在后续研究中,还将寻找出更多的对锥阀工作性能有直接影响的参数,并进行优化。

参考文献 (References):

[1] 刘晓红,柯 坚. 基于计算流体动力学解析的液压锥阀噪

- 声评价[J]. 中国机械工程,2007,18(22):2687-2691.
- [2] GAO Hong, LIN Wan-lai. Suppression of a cavitation near the orifice of a relief valve [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**,2005,18(1):149-155
- [3] 王晓晶,沈志琦,满国佳. 液压锥阀气穴现象两相流仿真及实验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(7):144-153.
- [4] KUDZMA Z, STOSIAK M. Studies of flow and cavitation in hydraulic lift valve [J]. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**,2015,15(4):951-961.
- [5] 黄 皓. 电子膨胀阀节流噪声数值模拟[D]. 杭州:浙江理工大学建筑工程学院,2015.
- [6] KIM G J, LEE J H, PARK J H, et al. Flow visualization and noise measurement of R410A two-phase flow near electric expansion valve for heating cycle of multi-split air-source heat pump [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2019,157:113712.
- [7] PASSANDIDEH-FARD M, MOIN H. A Computational Study of Cavitation in a Hydraulic Poppet Valve [C]. Fifth International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems. Bialystok: HEAT,2008.
- [8] 唐腾飞,肖 莉,高 翔. 迷宫式调节阀节流碟片的流道优化研究[J]. 液压与气动,2021,45(5):109-113.
- [9] 韩 军,曹龙凯,徐 睿,等. 基于多岛遗传算法的环形薄壁铝合金零件铣削参数优化[J]. 机电工程,2022,39(1):100-106.
- [10] QU Sheng, ZHAO Ji-bin, WANG Tian-ran. Experimental study and machining parameter optimization in milling thin-walled plates based on NSGA-II [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2017,89(5-8).
- [11] 秦继鹏,刘俨后,麻 娟,等. 基于 BP 神经网络的轮胎模具微铣削能耗预测[J]. 机床与液压,2021,49(24):57-60.
- [12] PROUDMAN I. The generation of noise by isotropic turbulence [J]. **Proceedings of the Royal Society of London**,1952,214(116):119-132.
- [13] LILLEY G M. The Radiated Noise From Isotropic Turbulence [R]. **Theoretical and Computational Fluid Dynamics**,1993,6:281-301.
- [14] 杜 沂. 空调电子膨胀阀气动噪声与降噪研究[D]. 杭州:中国计量大学计量测试工程学院,2018.
- [15] 张 珂,刘益才. 小型制冷系统两相流致噪声研究进展[J]. 浙江大学学报:工学版,2021,55(4):775-792.
- [16] 温 正,孙华克. MATLAB 智能算法[M]. 北京:清华大学出版社,2017.
- [17] 王冬梅,肖超利,路敬祯. 基于 VMD-ISD 的天然气管道泄漏信号去噪研究[J]. 压力容器,2021,38(9):46-54.
- [18] 李正祥. 柱塞闭死容积对柱塞泵出口流量脉动的研究[J]. 液压气动与密封,2022(2):16-19,15.
- [19] 郑金勇,刘保国,冯 伟. 基于遗传算法优化灰色神经网络的机床主轴热误差建模研究[J]. 机电工程,2019,36(6):602-607.

[编辑:雷 敏]

本文引用格式:

王华伟,周 鑫,王 博,等. 基于 RBF 神经网络和 MIGA 的液压锥阀降噪研究[J]. 机电工程,2022,39(11):1527-1534.

WANG Hua-wei, ZHOU Xin, WANG Bo, et al. Noise reduction of hydraulic cone valve based on RBF neural network and MIGA[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2022,39(11):1527-1534.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>