

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108355

基于混沌加权粒子群算法的频率计权设计*

邵亚璐 王 鉴 赵飞飞 韩 焱

(中北大学信息探测与处理山西省重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对声级测量中利用传统双线性变换法设计频率计权滤波器时在标称频率高频段出现的误差问题,采用一种基于混沌加权粒子群算法的设计方法,进行了频率计权的优化设计。首先对频率计权的幅频响应的误差来源展开分析研究,然后根据分析结果设定频率计权滤波器的优化对象与适应度函数,从而构造出基于混沌加权粒子群的频率计权数字滤波器优化模型,并求得最佳解。经仿真实验验证,给出的优化算法准确度更高,且最大误差可限制在0.005 dB范围内,满足国家标准中对1级声级计的设计要求,适用于声级测量中的频率计权,也可用于其他领域的滤波器设计。

关键词: 频率计权;数字滤波器设计;粒子群算法;动态权重;混沌扰动

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Frequency weighting design based on chaotic weighted particle swarm algorithm

Shao Yalu Wang Jian Zhao Feifei Han Yan

(Shanxi Key Lab of Signal Capturing and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the error problem in the high frequency band of the standard frequency when the traditional bilinear transformation method is used to design the frequency weighting filter in the sound level measurement, a frequency weighting design method based on the chaotic weighted particle swarm algorithm is adopted to realize the frequency weighting. Optimize the design. First, analyze and study the error source of the frequency-weighted amplitude-frequency response, and then design the optimization object and fitness function of the frequency-weighting filter according to the analysis results, and construct a frequency-weighted digital filter optimization model based on chaotic weighted particle swarms, And seek the optimal solution. The simulation experiment shows that the optimization algorithm proposed has high accuracy and the error can be controlled within 0.005 dB, which meets the design requirements of the first class sound level meter in the national standard, and It is suitable for frequency weighting in sound level measurement and filter design in other fields.

Keywords: frequency weighting; digital filter design; particle swarm algorithm; dynamic weight; chaotic disturbance

0 引 言

人耳听到的声音不仅与声波强度相关,还与其率有关,据科学研究表明,人类对于高频率的声音比较灵敏,对于低频率的声音较为迟钝^[1],因此,为了更贴切人耳对声音的感知能力,避免过大的声音对人耳造成损伤,需要根据等响度曲线对原始声音信号进行频率计权。根据已有的研究实验证明,A频率计权后的声级能更好地反应人对声音的主观感受,且国家规定1级声级计中使用A计权和C计权来进行声级测量。因此本文中仅针对A、C两种频率计权进

行滤波算法设计。

频率计权设计本质上是具有严格衰减的滤波器设计,C频率计权为四阶带通滤波器,A频率计权则是C计权与二阶高通滤波器的级联。数字滤波器的设计分为IIR和FIR两种,其中IIR滤波器可用较低的阶数获得较高的选择性,经济且效率高,但其相位的非线性十分严重,且采用递归结构,稳定性较差;FIR滤波器具有严格的线性相位,采用非递归结构,故稳定性较高,运算误差较小,但其需要较IIR滤波器5~10倍的阶数才可获得相同的选择性^[2]成本较高。但因为频率计权中更多关注的是幅值,相位关注

收稿日期:2021-11-16

* 基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61901419)项目资助

度较低,综合考虑滤波器阶数与成本,通常采用 IIR 数字滤波器实现频率计权。双线性变换法是 IIR 数字滤波器设计的常用方法,但此方法误差较大,存在标准频率失真,因此近年来许多学者开始研究频率计权^[3-4]滤波器设计的优化问题。文献[5]将声信号做 FFT 谱分解后,在频域下对频谱信号的功率值进行频率计权。文献[6]采用改进 LMS 自适应滤波算法设计频率计权,在不失精度的情况下具有较快的收敛速度,削弱本底噪声对被测信号的影响;还有许多人开始将优化算法引入设计中,根据进化类算法“优胜劣汰”的自然选择法则,在种群中不断进化迭代寻求最优解,文献[7]列举了 2015 年以来 6 种常用优化算法各自的特性,文献[8]采用粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO)对 A 计权的数字 IIR 滤波器系数进行优化,效果明显,但此算法易陷入局部最优,全局搜索效果差;文献[9]提出一种改进鸡群优化算法实现 A 频率计权,一定程度上改善了早熟收敛现象,减小了滤波器误差;文献[10]提出一种改进帝国竞争算法设计滤波器,提高了搜索精度与滤波器特性,误差小于 0.01 dB。

本文针对 A 频率计权滤波设计中双线性变换法误差较大的缺陷,采用基于混沌加权^[11-12]的粒子群算法进行设计,既保留了粒子群^[13-14]算法已具有成本低、效率高、收敛速度快的优点,又通过改变权重及加入混沌扰动的方式改善其早熟收敛的不足,在频率计权滤波设计中相较于传统粒子群算法具有更高的优化精度。

1 双线性变换法设计 A 频率计权

1.1 频率计权原理

根据 IEC 国际标准规定标准 C 计权与 A 计权的计算公式如式(1)、(2)所示。

$$A(f) = 20\lg \left[\frac{f_4^2 f^4}{\langle f^2 + f_1^2 \rangle \langle f^2 - f_2^2 \rangle \frac{1}{2} \langle f^2 + f_3^2 \rangle \frac{1}{2} \langle f^2 - f_4^2 \rangle} \right] - A_{1000} \quad (1)$$

$$C(f) = 20\lg \left[\frac{f_4^2 f^2}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_4^2)} \right] - C_{1000} \quad (2)$$

式(1)、(2)中的常数 $C_{1000} = -2$ dB, $A_{1000} = -0.062$ dB, $f_1 = 20.6$ Hz, $f_2 = 107.7$ Hz, $f_3 = 737.9$ Hz, $f_4 = 12194$ Hz。故可分别推导出 A、C 计权的模拟滤波器的传递函数如式(3)、(4)所示。

$$H_A(s) = [H_1(s)]^2 H_2(s) H_3(s) [H_4(s)]^2 \quad (3)$$

$$H_C(s) = [H_1(s)]^2 [H_4(s)]^2 \quad (4)$$

C 频率计权的 S 域表达式如式(5)所示。

$$A(C) = 20\lg |H_{A(C)}(j2\pi f)| - A(C)_{1000} \quad (5)$$

将式(3)、(4)的传递函数拆分成子滤波器表示如式(6)所示。

$$H_i(s) = \begin{cases} \frac{s}{s + \Omega_i}, & i = 1, 2, 3 \\ \frac{\Omega_i}{s + \Omega_i}, & i = 4 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\Omega_i = 2\pi f_i$ 。根据双线性变换法, $z = e^{j\omega_i}$, $s = j\Omega_i$ 代入式(6)可得:

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (7)$$

$$\Omega_i = \frac{2}{T_s} \tan\left(\frac{T_s \omega_i}{2}\right) \quad (8)$$

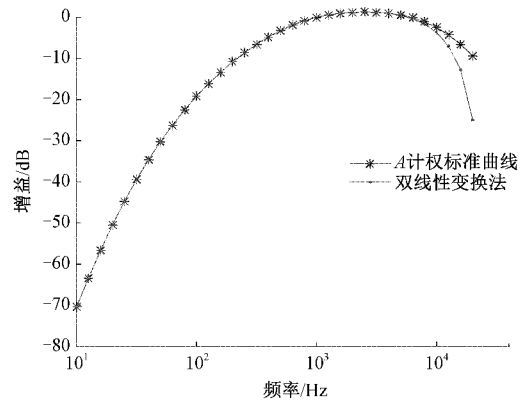
式中: T_s 为采样时间,则 A、C 计权的各个子滤波器传递函数的 Z 域表示为:

$$H_i(z) = \begin{cases} \frac{z - 1}{[1 + \tan(T_s \omega_i / 2)]z + \tan(T_s \omega_i / 2) - 1}, & i = 1, 2, 3 \\ \frac{\tan(T_s \omega_i / 2)z + \tan(T_s \omega_i / 2)}{(1 + \tan T_s \omega_i)z + \tan(T_s \omega_i / 2) - 1}, & i = 4 \end{cases} \quad (9)$$

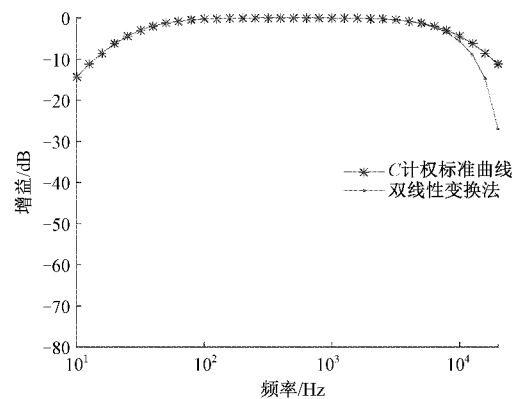
故 A、C 频率计权的基于双线性变换法的 Z 域表达式为:

$$A(C)_{BH} = 20\lg |H(e^{j2\pi f / T_s})| - A(C)_{1000} \quad (10)$$

声级测量中通常采用 48 kHz 的采样率,根据声级测量的 34 个标称频率,利用 MATLAB 对标准 A、C 计权与基于双线性变换的 A、C 频率计权进行仿真,仿真图如图 1 所示。



(a) A 频率计权滤波器幅度曲线



(b) C 频率计权滤波器幅度曲线

图 1 A/C 频率计权双线性变换仿真曲线

从图 1 中可看出,双线性变换法在高频段严重偏离标准曲线,误差较大。

1.2 误差分析

基于双线性变换法设计的滤波器误差表示为:

$$E_A = A(f) - A_{BH}(f) \quad (11)$$

$$E_C = C(f) - C_{BH}(f) \quad (12)$$

代入式(5)、(10)可得:

$$E_A = 2 * E_1 + E_2 + E_3 + 2 * E_4 \quad (13)$$

$$E_C = 2 * (E_1 + E_4) \quad (14)$$

$$E_i = 20 \lg | H_i(j2\pi f) | - 20 \lg | H_i(e^{j2\pi f T_s}) | \quad (15)$$

可以看出 A 频率计权的误差是 4 个子滤波器的误差的不同系数之和, C 计权是 1、4 两个子滤波器的误差和的 2 倍。将子滤波器误差的幅频响应曲线绘制如图 2 所示, 可以看出, 子滤波器 4 是导致误差较大的关键, 最大误差达到 8 dB。因此本文只针对此滤波器进行优化设计。

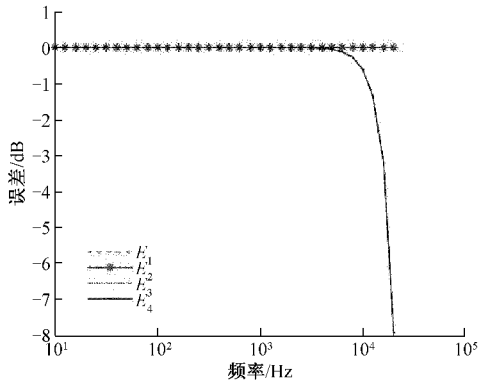


图 2 各子滤波器误差曲线

2 基于混沌加权粒子群算法设计 A 频率计权

2.1 混沌加权粒子群算法

粒子群(PSO)算法直观,易于理解,寻优策略简单,调试参数少,收敛速度快且简单易行,因此被广泛应用于求解各种非线性、不可微的复杂优化问题。但是算法本身也有局限性,在优化早期,能迅速向最优值靠拢,但在最优值附近收敛较慢,容易出现所谓的“早熟”,即局部收敛^[15]。粒子群算法出现早熟现象的主要原因就是缺乏种群的多样性^[16-17]。

混沌加权粒子群算法与传统粒子群算法的区别在于: 1) 改变线性递减的权重为动态变化惯性权重, 权重值与粒子当前位置及最优位置有关, 使权重随粒子位置的改变而改变, 更易摆脱局部极值的干扰; 2) 混沌运动具有遍历性与随机性的特性, 将其引进粒子群算法中, 对初始粒子进行混沌初始化, 对最优解进行混沌扰动, 产生更多的种群, 在进化过程中, 对粒子最优位置进行局部搜索, 提高粒子群算法的开发能力, 防止算法早熟, 增强算法的全局探测能力。

动态权重的计算公式如式(16)、(17)所示。

$$\omega^t = e^{-\alpha^t / \alpha^1} \quad (16)$$

$$\alpha^t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f'(x_i) - f_{\min}^t(x)| \quad (17)$$

式中: N 为粒子数目; $f'(x_i)$ 为第 t 次迭代时第 i 个粒子的目标函数值; $f_{\min}^t(x)$ 为第 t 次迭代时的最优目标函数值。

2.2 优化对象设计

由上一章的误差分析可知, 误差主要是由第 4 个子滤波器造成, 故采用混沌加权粒子群算法对其传递函数的系数进行优化, 根据式(9)设计优化模型, 由于传递函数中子滤波器 4 是以平方形式出现, 故将优化模型设置如式(18)所示。

$$H_{hd}(z) = A * \left(\frac{z-a}{z-b} * \frac{z-c}{z-d} \right) = A * G_{hd}(z) \quad (18)$$

式中: a, c 为滤波器的零点; b, d 为滤波器的极点。本文将零点的取值范围定为 $[-1, 1]$, 极点的取值范围定为 $(-1, 1)$ 。 A 为滤波器的增益, 可由设计的滤波器与理想滤波器的响应推导得到:

$$|A| = \frac{\sum_{i=1}^{34} [|G(e^{j2\pi f_i T_s})| |H_4(j2\pi f_i)|]}{\sum_{i=1}^{34} |G(e^{j2\pi f_i T_s})|^2} \quad (19)$$

2.3 适应度设计

本文采用频率响应平方差之和作为所设计的频率计权滤波器的优化准则, 平方和的值达到最小即为最优, 通过优化, 使所设计的滤波器响应与理想滤波器无限逼近。所设计滤波器的频率响应为:

$$W_{hd}(e^{j2\pi f T_s}) = 20 \lg [|A| |G(e^{j2\pi f T_s})|] \quad (20)$$

子滤波器 4 的理想频率响应为:

$$W_s(j2\pi f) = 20 \lg [|H_4(j2\pi f)|] \quad (21)$$

则频率响应平方差之和表示为:

$$S = \sum_{i=1}^{34} \{W_{hd}(e^{j2\pi f_i T_s}) - W_s(j2\pi f_i)\}^2 \quad (22)$$

将式(22)作为混沌加权粒子群优化算法的目标函数, 使其无限趋近于 0, 对所设计滤波器的系数 a, b, c, d 进行搜索寻优, 求得最优解, 从而得到与理想滤波器 4 响应无限逼近的滤波器的传递函数。

则优化后的滤波器的传递函数与频率计权表达式为:

$$H_{hd_A}(z) = [H_{BH1}(z)]^2 H_{BH2}(z) H_{BH3}(z) [H_{hd}(z)]^2 \quad (23)$$

$$H_{hd_C}(z) = [H_{BH1}(z)]^2 [H_{hd}(z)]^2 \quad (24)$$

$$A(C)_{hd}(f) = 20 \lg |H_{hd_A(C)}(e^{j2\pi f T_s})| - A(C)_{1000} \quad (25)$$

2.4 设计过程

设计过程如图 3 所示, 具体步骤如下。

1) 混沌初始化与参数设定。设种群数量 $N=50$, 最大迭代次数 $M=100$, 采样频率 $f_s=48$ kHz, 优化变量维数 4。随机生成一个范围为 $[0, 1]$ 的 4 维向量作为混沌初值, 根据 Logistic 方程迭代得到 $2N=100$ 个分量, 该方程是描述在资源有限的条件下种群增长规律的一个, 数学模型, 图像呈 S 形。迭代方程如下:

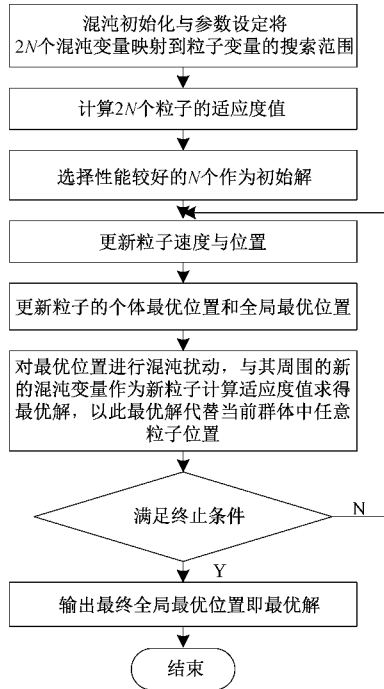


图 3 基于混沌粒子群算法的频率计权设计流程

$$z_{i+1} = \alpha z_i (1 - z_i) \quad (26)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, 2N - 1, 0 < z_i < 1, \alpha \in [0, 4]$ 。根据式(24)将混沌变量映射在待优化变量的取值区间内,作为初始混沌粒子群。

$$x_{ij} = a + (b - a) * z_{ij} \quad (27)$$

其中, a, b 分别是待优化变量的上下限, $i = 1, 2, \dots, 2N, j = 1, 2, 3, 4$ 。

2) 根据目标函数计算每个粒子的适应度值,从 $2N$ 个初始粒子群中选择性能较好的 N 个作为初始解 $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i4}]$, $i = 1, 2, \dots, N$, 并随机产生粒子的速度。

3) 在初始解中设置粒子群的初始个体极值和全局极值。定义各粒子的当前位置为个体极值 g_{test} , 根据目标函数计算各个体极值 g_{test} 对应的适应度值 z_{test} , 选则适应度值最小时的粒子位置定义为全局极值 g_{best} , 该适应度值定义为 z_{best} 。

4) 根据式(28)、(29)更新粒子的飞行速度和位置,更新 g_{best} 与 z_{best} 。

$$v_i^{t+1} = \omega^t v_i^t + \eta_1 * rand * [g_{test}^t(i) - P_i^t] + \eta_2 * rand * [g_{best}^t(i) - P_i^t] \quad (28)$$

$$P_i^{t+1} = P_i^t + v_i^t \quad (29)$$

式中: v_i^t 表示第 i 个粒子在第 t 次迭代的速度, t 代表当前迭代次数, ω^t 为动态惯性权重, η_1 和 η_2 为加速常数,通常取 2, 粒子的速度和位置均有上下界限定。

5) 对全局最优位置 g_{best} 进行混沌优化。首先根据式(24)将最优位置 g_{best} 映射到 Logistic 方程的定义域 $[0, 1]$, 再根据 Logistic 方程在最优位置周围产生 $N - 1$ 个

混沌变量,组成新的 N 个混沌粒子,计算每个粒子的适应度值,得到最优解 g_{best}' 。

6) 用 g_{best}' 代替当前群体中任意粒子位置。

7) 返回步骤 4), 直到满足粒子群终止条件则停止计算,得到最优参数 a, b, c, d 。

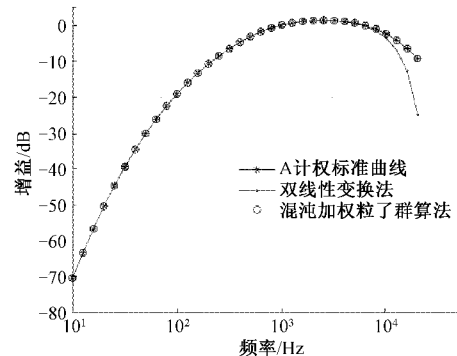
8) 根据式(23)~(25)计算得到基于混沌加权粒子群算法的频率计权表达式。

3 仿真与结果分析

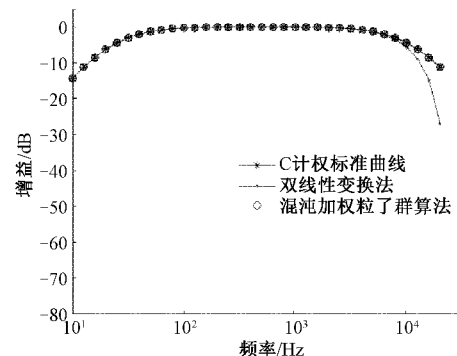
为验证本文设计的频率计权滤波器的有效性,利用 MATLAB 软件进行仿真,将频率响应均方差作为判别函数:

$$F(f) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{34} \{W(e^{i2\pi f_i T_s}) - W_s(j2\pi f_i)\}^2}{34}} \quad (30)$$

图 4 为基于双线性变换和基于混沌加权粒子群算法的频率计权滤波器的幅频响应曲线图,从图 4 中可知,混沌加权粒子群算法相较于双线性变换法误差小得多,更无限贴近于理想响应。



(a) 3种算法下的A频率计权幅度曲线

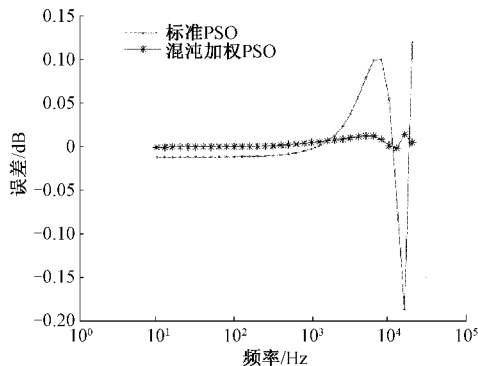


(b) 3种算法下的C频率计权幅度曲线

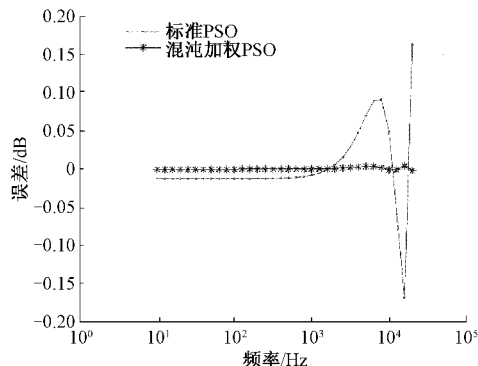
图 4 频率计权滤波幅频响应曲线图

除此以外,为进一步证明本文算法的有效性,与标准 PSO 算法设计频率计权滤波器做对比,误差对比图如图 5 所示。设计中均采用种群数量为 50,最大迭代次数为 100 的参数设置,均以频率响应的方差作为误差判别。除此之外,由于文献[9]和[10]的算法未进行 C 计权算法设计,因此只针对 A 频率计权设计进行了误差对比,对比结果如

表1所示。通过仿真对比结果表明,在相同的条件下,混沌加权粒子群算法具有更小的误差,更高的精确度,误差值低于0.005 dB。



(a) 本文算法与标准粒子群A频率计权误差对比



(b) 本文算法与标准粒子群C频率计权误差对比

图5 不同优化算法下的误差曲线

表1 不同算法下频率计权误差值 dB

算法	A 计权	C 计权
双线性变换法	2.938 0	2.936 5
传统粒子群法	0.051 2	0.050 3
混沌加权粒子群法	0.004 2	0.001 3
文献[9]算法	0.005 1	—
文献[10]算法	0.010 0	—

4 结 论

针对频率计权滤波器设计中双线性变换法在高频段误差较大的情况,本文采用一种基于混沌加权粒子群优化算法对其进行设计。本文算法既保留了粒子群算法寻优策略简单,调试参数少,收敛速度快的优点,又通过加入混沌扰动与动态惯性权重的方式来改善其易陷入局部极值、“早熟”的缺点,仿真结果表明,所设计的滤波器与理想响应之间的误差更小,优化效果明显,且误差值低于0.005 dB,满足1级声级计中关于频率计权设计的要求,具有一定的应用价值。

参考文献

[1] 赵丹,李丽,贺慧勇,等. 频率计权网络的数字电路实现[J]. 现代电子技术,2015,38(19):94-97,101.

- [2] 陈磊. 数字信号处理技术在噪声频谱分析仪中的应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
- [3] RIMEL L A N, MANSFIELD N J, PADDAN G S. Design of digital filters for frequency weightings(A and C) required for risk assessments of workers exposed to noise [J]. *Industrial Health*, 2015,53(1): 21-27.
- [4] FENG D U. Frequency weighting filter design for automotive ride comfort evaluation[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016,29(4):727-738.
- [5] 刘艺,杜雨滔,官毓,等. 基于频域的声信号计权改进算法[J]. 成都信息工程大学学报,2021,36(1):68-72.
- [6] 杨敏. 改进LMS自适应滤波算法及其在声功率测量中的应用[D]. 湖南:湖南大学,2018.
- [7] 李雅丽,王淑琴,陈倩茹,等. 若干新型群智能优化算法的对比研究[J]. *计算机工程与应用*, 2020,56(22):1-12.
- [8] 唐求,贾杨威,滕召胜,等. 基于粒子群优化的声级计A计权设计[J]. *仪器仪表学报*, 2015,36(4):856-862.
- [9] 信蒙蒙. 改进鸡群算法及其在声功率测量系统中的应用[D]. 湖南:湖南大学,2019.
- [10] 唐求,吴娟,邱伟,等. 基于MICA的声级计频率计权数字IIR滤波器设计[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020,47(2):78-84.
- [11] 仲帅. 基于改进粒子群算法的数字滤波器设计及应用[D]. 吉林:吉林大学,2016.
- [12] 胡鑫楠. 基于改进型混沌粒子群优化算法的FIR高通数字滤波器设计[J]. *计算机科学*, 2019,46(S1):601-604.
- [13] 居明宇. 基于PSO算法的DBN模型参数优化[J]. *国外电子测量技术*, 2020,39(3):12-16.
- [14] 王丽丽,辛玲. 基于粒子群优化的BPNN自适应切换控制算法研究[J]. *电子测量技术*, 2021,44(3):99-103.
- [15] NIU W, FENG Z, CHEN Y, et al. Multireservoir system operation optimization by hybrid quantum-behaved particle swarm optimization and heuristic constraint handling technique [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125477.
- [16] 吴阳,刘凯,陈柏,等. 自适应粒子群优化算法优化径向基函数神经网络用于电阻抗成像图像重建[J]. *仪器仪表学报*, 2020,41(6):240-249.
- [17] CAI X, GAO L, LI F. Sequential approximation optimization assisted particle swarm optimization for expensive problems [J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 83: 105659.
- [18] 肖支才,龙玉峰,郭家豪,等. 基于非线性变因子的粒子群算法[J]. *电子测量技术*, 2020,43(5):67-70.

作者简介

邵亚璐,硕士研究生,主要研究方向为信息采集与信号处理、信息重建。

E-mail:Shaoyl0203@163.com

韩焱,教授,博士生导师,主要从事通信技术、信号处理和识别、自动检测技术、数字图像处理与信息重建等领域的教学和研究工作。

E-mail:hanyan@nuc.edu.cn