

# 粒子群优化算法在齿轮箱振动信号去噪中的应用

张澎涛<sup>1</sup>, 刘晋浩<sup>2</sup>

1. 东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040
2. 北京林业大学工学院, 北京 100083

**摘要** 以振动频谱分析和粒子群优化算法为主要理论依据, 以风力涡轮机齿轮箱为例, 提出一种基于一维加速搜索算法和粒子群优化的齿轮箱振动信号去噪方法。利用一维加速搜索算法缩减搜索范围, 应用粒子群优化算法提升优化效果, 对切比雪夫带通滤波器和 Morlet 小波滤波器的设计参数进行优化, 并对齿轮箱故障振动信号进行滤波处理。仿真实验结果表明, 此方法能够实现快速有效滤波去噪, 适用于齿轮箱实时故障诊断的研究, 具有一定的理论研究价值和实践应用价值。

**关键词** 粒子群优化算法; 齿轮箱; 黄金分割; 带通滤波器; 小波滤波器

**中图分类号** TP277

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.13.004

## Application of Particle Swarm Optimization Algorithm to Denoising Vibration Signal of Gearbox

ZHANG Pengtao<sup>1</sup>, LIU Jinhao<sup>2</sup>

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China
2. Engineering College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

**Abstract** Taking the gearbox in wind turbine as an example, this paper introduces a method about denoising the vibration signal of gearbox based on the vibration spectrum analysis and particle swarm optimization algorithm. The particle swarm optimization algorithm can reduce the search space by using one dimension search, and improve the optimization result by simultaneously optimizing the design parameters of Chebyshev band pass filter and Morlet wavelet filter, eventually filtering out the fault vibration signal of the gearbox. Experimental results show that this method can effectively eliminate the external noise in the vibration signal, and that the hybrid algorithm can effectively reduce the search range of particle swarm optimization and improve the optimization result for the relevant parameter optimization of Chebyshev band-pass filter and Morlet wavelet filter. It is applicable to the real-time gearbox fault diagnosis research. Therefore, it has certain value for theoretical research and practical applications. This hybrid algorithm has good optimized performance and the optimization process is fast. The fault features are obvious in the denoised signal, and can be applied to the real-time fault diagnosis of gearbox in the future research.

**Keywords** particle swarm optimization algorithm; gearbox; golden section; band-pass filter; wavelet filter

齿轮箱作为许多机械设备不可或缺的重要部件, 主要起调整输出轴旋转速度的作用。一旦齿轮箱发生故障, 将会导致与之关联的机械装置不能正常工作, 出现停产停工的现

象, 有时甚至会危及工作人员的人身安全, 造成不必要的经济损失<sup>[1,2]</sup>。从理论上完善齿轮箱的设计, 从加工工艺上提高其加工质量, 进而提高齿轮箱的整体质量是确保其正常工作

收稿日期: 2014-01-22; 修回日期: 2014-03-24

基金项目: 国家林业局引进国际先进林业科学技术项目(948项目)(2013-4-20)

作者简介: 张澎涛, 博士研究生, 研究方向为智能检测与故障诊断, 电子信箱: zpt@nefu.edu.cn; 刘晋浩(通信作者), 教授, 研究方向为林业机械与特种装备及自动化, 电子信箱: liujinhao@vip.163.com

引用格式: 张澎涛, 刘晋浩. 粒子群优化算法在齿轮箱振动信号去噪中的应用[J]. 科技导报, 2014, 32(13): 28-32.

的根本方法。但仅靠上述措施也很难保证齿轮箱工作中不出现故障。所以,研究齿轮箱故障诊断方法和技术,并应用于故障诊断中,是一种降低因齿轮箱故障造成经济损失和人身事故的有效方法<sup>[3-5]</sup>。

故障诊断结果是否准确主要取决于能否对故障特征进行有效、准确的提取,而提取故障特征的前提是要剔除振动信号中的外部噪声。粒子群算法适用于求解非线性、不可微的复杂优化问题,具有原理简单、容易实现的特点。虽然粒子群优化算法具有强大的多元优化功能,但作为进化优化算法的典型代表,其计算复杂程度较传统优化算法要高很多,优化耗时较多,因此并不适用于实时故障诊断研究。本文以风力涡轮机齿轮箱为例,提出一种基于一维加速搜索算法和粒子群优化的齿轮箱故障振动信号去噪方法。利用一维加速搜索法缩减搜索范围,应用粒子群优化算法提升优化效果,对切比雪夫带通滤波器和Morlet小波滤波器的设计参数进行优化,对齿轮箱故障振动信号进行滤波处理。

### 1 加速一维搜索算法原理

黄金分割法是一种传统的一维搜索优化算法。黄金分割法能求得一维优化的最优解,其基本求解思路是在确保区间具有“高-低-高”区间特征的前提下,不断缩小区间长度,直至达到预定的精度,它是一种常见的单峰优化算法。图1描述了黄金分割法的基本原理。

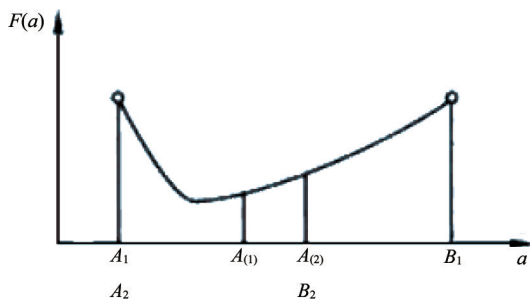


图1 黄金分割法基本原理

Fig. 1 Diagram of the golden section method

在区间  $[A_1, B_1]$  内插入两点,依次为  $A_{(1)}, A_{(2)}$ , 则原区间  $[A_1, B_1]$  可分为两个3点区间,即  $A_1-A_{(1)}-A_{(2)}, A_{(1)}-A_{(2)}-B_1$ 。保留其中有“高-低-高”区间特征的区间,作为新的区间。如图1所示,区间  $A_1-A_{(1)}-A_{(2)}$  段将被保留。在缩小后的区间  $[A_2, B_2]$  内再插入两个新的数值点,构成新的两个3点区间,反复迭代直至达到精度要求<sup>[6]</sup>。

黄金分割法的关键是如何不间断找出区间内的两个对称点,保证极小点不会丢失且收敛速度快。黄金分割法的均匀缩短率  $\alpha = 0.618$ , 黄金分割法的取点规则表达式为

$$\begin{cases} x_1 = x_{hi} - \alpha(x_{hi} - x_{lo}) \\ x_2 = x_{hi} + \alpha(x_{hi} - x_{lo}) \end{cases} \quad (1)$$

尽管黄金分割法可靠性较高,但毕竟要通过多次的迭代计算来寻找“最佳点”位置,耗时较多。将二次拟合结合黄金分割法可以实现快速收敛,充分利用3点模式匹配的优势,通过3个点的二次拟合可以获得唯一的一个极值。若给定目标函数为  $F_x$ , 则通过3点二次拟合计算的极值表达式为

$$x_{qu} = \frac{1}{2} \frac{F_{lo}(s_{mid} - s_{hi}) + F_{mid}(s_{hi} - s_{lo}) + F_{hi}(s_{lo} - s_{mid})}{F_{lo}(x_{mid} - x_{hi}) + F_{mid}(x_{hi} - x_{lo}) + F_{hi}(x_{lo} - x_{mid})} \quad (2)$$

$$F_{lo} = F(x_{lo}), F_{mid} = F(x_{mid}), F_{hi} = F(x_{hi})$$

$$s_{lo} = (x_{lo})^2, s_{mid} = (x_{mid})^2, s_{hi} = (x_{hi})^2$$

加速一维搜索算法就是黄金分割-抛物线插值混合优化算法,在加速搜索算法中首先使用黄金分割法对4点  $(x_{lo}, x_1, x_2, x_{hi})$  进行计算决定搜索的方向。确定搜索方向后,根据式(2)计算极值  $x_{qu}$ , 再根据黄金分割法规则舍弃其中一点,如此循环计算。在快速搜索算法的下一迭代计算中使用黄金分割法还是抛物线插值法主要取决于目标函数的值。如果用黄金分割法计算出的目标函数值优于抛物线插值法,那么在下一迭代计算中就选择黄金分割法,反之则用抛物线插值法。与单独使用黄金分割法相比,将黄金分割法与抛物线插值法相结合的加速搜索算法的优化速度要提高35%~40%。图2为加速一维搜索算法原理。

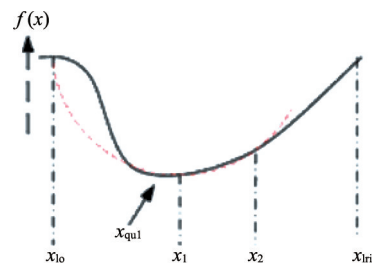


图2 加速一维搜索算法原理

Fig. 2 Diagram of accelerated one dimensional search

由于  $f(x_1) < f(x_2)$ , 确定搜索空间为  $[x_{lo}, x_1, x_2]$ , 对3点  $(x_{lo}, x_1, x_2)$  进行二次拟合, 计算出  $x_{qu1}$ 。又因为  $f(x_{lo}) > f(x_{qu1}) < f(x_1)$ , 再对  $(x_{lo}, x_{qu1}, x_1)$  进行二次拟合, 计算出  $x_{qu2}$ 。以此类推进行迭代计算直至迭代终止。

### 2 粒子群优化算法原理

粒子群优化算法(partical swarm optimization algorithm, PSO)由美国学者Kennedy和Eberhart于1995年提出,主要受人工生命研究的启发而形成。其基本概念源于对鸟群捕食过程中迁徙和聚集行为的研究,与遗传算法一样,是群体智能进化计算的代表性方法之一<sup>[7,8]</sup>。由于粒子群优化算法对解的“更新”加入了局部以及全局最优的启发式信息,PSO算法具有收敛速度快的特征,而且需要用户确定的经验性参数较少,操作简单,程序实现方便。作为一种新的并行优化算

法, PSO算法适用于解决大量非线性、不可微和多峰值的复杂问题优化, 并已广泛应用于科学研究和工程应用领域。

与其他基于群体智能的进化搜索算法类似, PSO算法也通过个体间的协作与竞争, 实现多维空间中最优解的搜索。它首先生成初始种群, 即在可行解空间中随机初始化一群粒子, 每个粒子都为优化问题的一个可行解。并用代价函数计算出相应的适应值以确定是否达到寻优目标。每个粒子将在解空间中运动, 并由一个矢量决定其运动方向和位移, 通常粒子将追随当前已知的最优位置, 并经迭代搜索最后得到最优解。在每一代中, 粒子将跟踪两个目标位置, 一个为粒子本身迄今为止找到的最优解, 代表该粒子自身对寻优方向的认知水平; 另一个为全种群迄今为止找到的最优解, 代表社会认知水平<sup>[9]</sup>。

具体考虑一个  $d$  维空间中的优化问题, 需要优化的对象为  $d$  维参数, 则粒子群优化算法的基本步骤如下。

1) 在解空间中随机产生初始化粒子群, 并假设其大小为  $N$ , 其中粒子位置记为  $X_i$ , 表示为  $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ , 其中  $i=1, 2, \dots, N$ , 相应地对每个粒子也随机初始定义了其飞行的速度  $v_i$ , 记为  $(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 。

2) 引入根据具体优化问题定义的适应度函数, 并计算每个粒子的适应度函数。

3) 将粒子  $X_i$  迄今为止搜索到的最佳位置记为  $p_{best}=(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ , 整个粒子群(或邻域内)迄今为止搜索到的最佳位置记为  $g_{best}=(p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 。

4) 根据式(3)和式(4)调整粒子的速度和位置:

$$v_i(k+1) = \omega v_i(k) + c_1 \text{rand}_1(p_{best} - X_i) + c_2 \text{rand}_2(g_{best} - X_i) \quad (3)$$

$$X_i(k+1) = X_i(k) + K v_i(k+1) \quad (4)$$

式中,  $\omega$  为惯性权值, 决定了对粒子当前速度继承的多少, 通过适当的选择可以使粒子具有均衡的全局和局部搜索的能力;  $c_1$  和  $c_2$  为非负的常数, 称为加速度常数, 也称为学习因子, 表示每个粒子受两个最优位置吸引的加速项的权重;  $\text{rand}_1$  和  $\text{rand}_2$  是  $d$  维的  $[0, 1]$  之间的随机数序列;  $K$  是压缩因子, 用以对粒子的飞行速度进行约束。同时粒子的速度一般有 1 个最大值  $v_{max}$  的限制, 其值一般设为搜索空间范围的 10%~20%。

5) 重复步骤 2)~4) 的过程, 直到适应度函数达到最优或满足终止迭代的条件。

PSO 算法中粒子位置在每一代的更新方式可用图 3 描述。

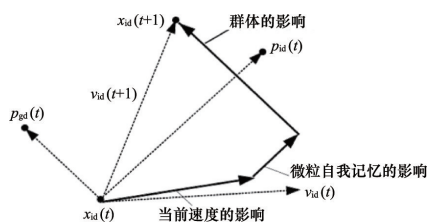


图3 粒子位置更新示意

Fig. 3 Diagram of updated particle position

### 3 PSO优化去噪仿真

仿真实验所采用的风力涡轮机齿轮箱故障振动信号如图 4 所示, 数据通过加速度传感器采集得到。传感器测点位置位于风力涡轮机机械传动组件内行星齿轮箱的输入端。故障类型为高速传动机构中的传动齿轮出现严重的齿面磨损。主轴转速为 14.72 r/min, 高速轴转速约为 1200 r/min, 采样频率为 40 kHz。仿真算法流程如图 5 所示, 其中的多维优化算法采用粒子群优化算法。

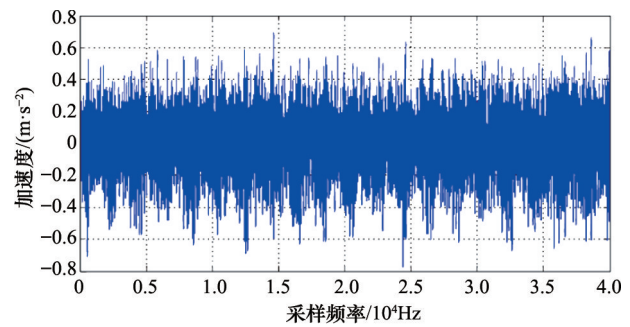


图4 齿轮箱原始振动信号

Fig. 4 Original vibration signal of gearbox

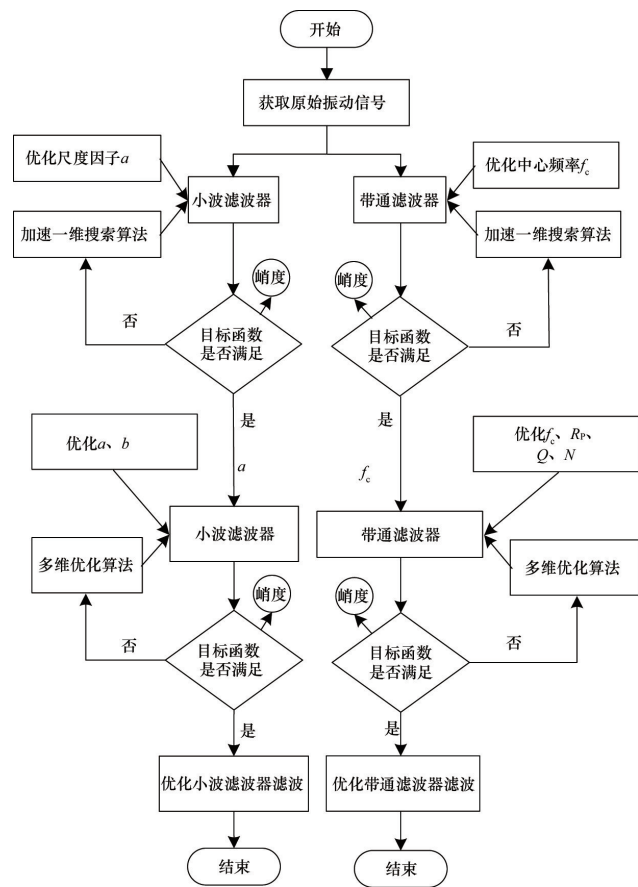


图5 仿真流程

Fig. 5 Simulation flow chart

仿真流程主要包括滤波器参数的粗调与微调两个部分, 目标函数是谱峭度的最大值函数。在粗调步骤(一维优化)中通过加速一维搜索算法满足目标函数, 从而逐一优化滤波器参数, 然后将粗调步骤的优化结果输入微调部分(多维优化)再进行优化处理; 在微调部分中利用粒子群优化算法对滤波器的参数同时进行优化调整。使用加速一维搜索算法粗调参数的目的主要是因其优化速度较快, 这就减轻了微调部分的压力, 从而缩短整个优化过程的时间。

### 3.1 切比雪夫带通滤波器优化

切比雪夫带通滤波器需要被优化的参数为中心频率  $f_c$ 、品质因数  $Q$ 、带通纹波  $R_p$  以及滤波阶数  $N$ <sup>[10]</sup>。在优化第一阶段首先通过谱峭度法, 令峭度最大化, 估算出中心频率  $f_c$  的初始值, 令  $Q=0.707$ ,  $R_p=1$  dB, 滤波阶数  $N$  恒等于4。当中心频率在  $\left[ f_c - \frac{f_c}{2}, f_c + \frac{f_c}{2} \right]$  范围内时, 运行黄金分割-抛物线

插值加速一维搜索算法继续优化  $f_c$ , 算法迭代计算终止条件为  $|f_c^{(i+1)} - f_c^{(i)}| \leq 0.001 (i=1, 2, \dots, N)$ , 下同。如图6(a)所示, 当峭度值为4.85时峭度最大, 此时  $f_c=525$  Hz。图6(b)给出了针对中心频率  $f_c$  和品质因数  $Q$  的峭度特性, 观察特性图可以发现峭度最大值应出现在  $300 \text{ Hz} < f_c < 500 \text{ Hz}$ ,  $0.3 < Q < 0.7$  范围内, 因此设置粒子群优化算法的搜索范围为

$$300 \text{ Hz} < f_c < 1500 \text{ Hz}; 0.3 < Q < 2; 2 < N < 8; 1 < R_p < 6。$$

经过粒子群优化算法优化后得出的峭度最大值为5.18, 优化结果为  $f_c=420.20$  Hz,  $Q=0.54$ ,  $N=3$ ,  $R_p=2.99$ 。使用优化后的切比雪夫滤波器对原始振动信号进行滤波处理, 得到如图6(c)所示的滤波信号。

粒子群优化算法参数设置为: 迭代次数  $I=100$ , 粒子数量  $N_p=5$ , 惯性权重  $\omega \in [0.4, 0.9]$ ,  $c_1=1.496$ ,  $c_2=1.4961$ ,  $\text{rand}_1$  和  $\text{rand}_2$  为服从  $[0, 1]$  上的均匀分布随机数。

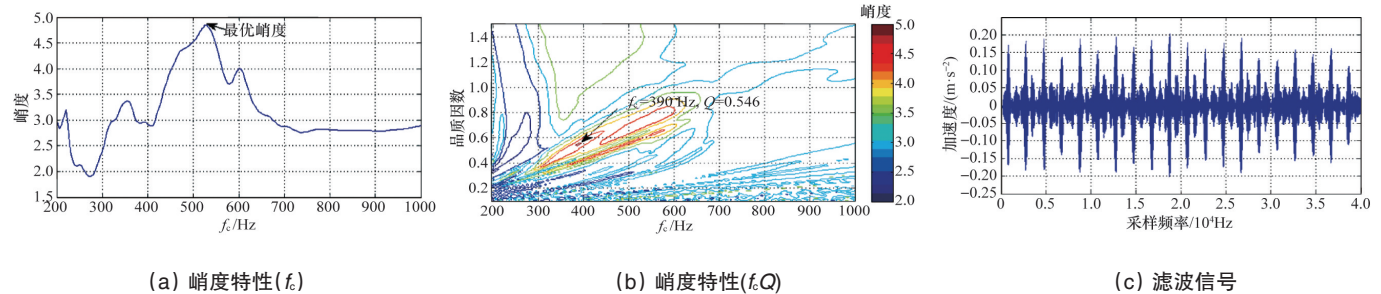


图6 PSO优化切比雪夫带通滤波器滤波

Fig. 6 Filtering through the Chebyshev band-pass filter optimized by PSO

### 3.2 Morlet小波滤波器优化

Morlet小波滤波器需要优化的参数为形状因子  $\beta$  和尺度因子  $a$ <sup>[11,12]</sup>。首先运行加速一维搜索算法搜索尺度因子  $a$  作为粒子群优化算法的初始值, 如图7(a)所示, 峭度值最大时  $a=35$ 。图7(b)给出了针对形状因子  $\beta$  和尺度因子  $a$  的峭度特性, 观察图7(b)发现峭度最大值大致出现在  $10 < a < 40$ ,

$0.0002 < \beta < 0.0008$  参数范围内, 因此将 PSO 算法的搜索范围设置为:  $10 < a < 50$ ,  $0.0001 < \beta < 0.002$ 。经过 PSO 算法优化后得出的峭度最大值为4.66, 此时  $a=34.12$ ,  $\beta=0.00047$ 。使用优化后的 Morlet 小波滤波器对齿轮箱原始故障振动信号进行滤波处理, 得到如图7(c)所示的去噪振动信号。PSO 算法参数设置同前节。

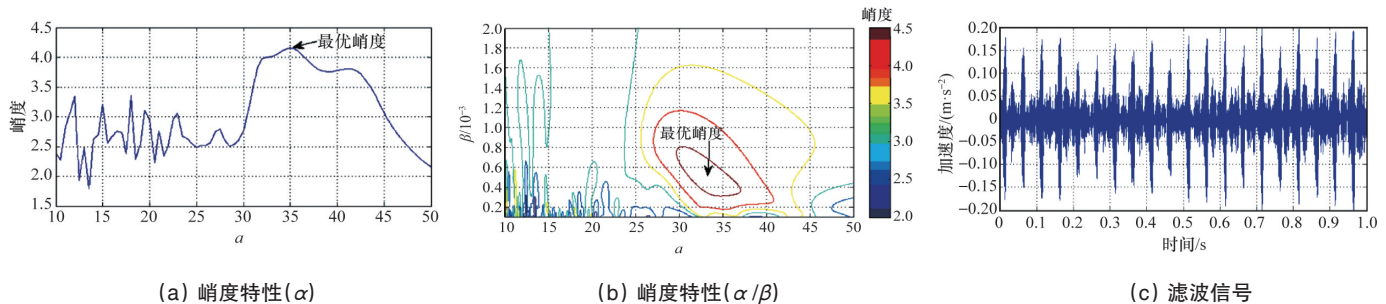


图7 PSO优化Morlet小波滤波器滤波

Fig. 7 Filtering through the Morlet wavelet filter optimized by PSO

### 3.3 滤波性能对比

对粒子群优化切比雪夫带通滤波器和 Morlet 小波滤波器滤波性能进行对比。粒子群优化算法优化切比雪夫带通滤波器需要搜索的参数为4个, 与之相比较, Morlet 小波滤波器

优化的参数仅为2个。仿真实验结果表明, 粒子群优化切比雪夫带通滤波器和 Morlet 小波滤波器均能实现快速有效的滤波去噪。表1给出了二者之间的滤波性能对比。

1) 在对 Morlet 小波滤波器进行优化时, PSO 算法用时

8.765 s就搜索到了最优解,迭代次数为65次,而优化切比雪夫带通滤波器时则耗时较多,为14.654 s,迭代次数为80次;

2) 对于一维加速搜索算法优化参数算法收敛时的迭代次数, Morlet小波滤波器要优于切比雪夫带通滤波器;

3) 切比雪夫带通滤波器与 Morlet小波滤波器相比,滤波

去噪耗时较多;

4) 在对切比雪夫带通滤波器进行优化时, PSO算法搜索到的峭度最大值为5.18, 而优化 Morlet小波滤波器时搜索到的峭度最大值为4.66。

表1 滤波性能对比

Table 1 Comparison of filtering performance

滤波器	需优化参数	滤波时间/s	一维加速收敛 迭代次数	PSO收敛 迭代次数	PSO优化 耗时/s	峭度最大值
切比雪夫带通 滤波器	$4(f_c, Q, N, R_v)$	0.1131	8	80	14.654	5.18
Morlet小波 滤波器	$2(a, \beta)$	0.0459	5	65	8.756	4.66

#### 4 结论

将进化优化算法的典型代表粒子群优化算法应用于齿轮箱的故障信号去噪, 尽管粒子群优化算法具有强大的多元优化功能, 但由于这种算法计算相对较复杂, 耗时长, 因此并不适用于实时故障诊断研究。针对上述问题, 提出了一种基于加速一维搜索-粒子群优化的混合优化算法, 混合算法能够有效缩减粒子群优化的搜索范围, 提升优化效果, 用于优化切比雪夫带通滤波器和 Morlet小波滤波器的相关参数。仿真实验结果表明, 混合算法优化后的两种滤波器滤波耗时短而且滤波性能较好, 去噪信号中的故障脉冲特征明显。在今后的研究中可以尝试将其应用于齿轮箱实时故障诊断。

#### 参考文献(References)

[1] 曾兴祥, 樊新海. 综合传动装置齿轮故障诊断研究[J]. 机械传动, 2013, 35(1): 90-93.  
Zeng Xingxiang, Fan Xinhai. Fault diagnosis of the gear in the integrated transmission[J]. Mechanical Drive, 2013, 35(1): 90-93.

[2] 安婧, 仇大俐. 时频分析方法在齿轮故障诊断中的应用[J]. 信息技术, 2010, 23(3): 103-108.  
An Qian, Kang Dali. The application of time-frequency analysis method in gear fault diagnosis[J]. Information Technology, 2010, 23(3): 103-108.

[3] 康葳, 董田沼, 杨国振. 基于AHP的火控系统故障诊断策略研究[J]. 科技导报, 2012, 30(13): 53-56.  
Kang Wei, Dong Tianzhao, Yang Guozhen. Fault diagnosis strategy of the fire control system based on the AHP[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(13): 53-56.

[4] 游张平, 胡小平, 张凯, 等. 基于自适应LS-SVM的柴油机进排气系统故障诊断[J]. 科技导报, 2010, 28(8): 77-80.  
You Zhangping, Hu Xiaoping, Zhang Kai, et al. The fault diagnosis for diesel engine inlet and exhaust system based on adaptive LS-SVM[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(8): 77-80.

[5] 周平, 杨浩泉. 基于数据流动发动机动力不足故障诊断方法研究[J].

科技导报, 2011, 29(3): 48-51.

Zhou Ping, Yang Haoquan. Diagnosis method to power shortage fault in engine based on the data-stream[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(3): 48-51.

[6] 王复兴. 黄金分割法在自控系统故障判断中的应用[J]. 自动化仪表, 2001, 22(6): 48-49.

Wang Fuxing. Application of golden section method in fault diagnosis of automatic control system[J]. Automation Instrumentation, 2001, 22(6): 48-49.

[7] 原菊梅, 潘宏侠. 粒子群优化齿轮箱振动信号周期分量提取方法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(1): 30-33.

Yuan Jumei, Pan Hongxia. Gearbox vibration signal periodic components extraction method based on advanced particle swarm optimization algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(1): 30-33.

[8] 毛鸿伟, 潘宏侠, 刘文礼. 基于粒子群优化的小波神经网络及其在齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2007, 26(5): 133-136.

Mao Hongwei, Pan Hongxia, Liu Wenli. Application of fault diagnosis in gearbox based on wavelet neural network optimized by particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(5): 133-136.

[9] Samanta B, Nataraj C. Use of particle swarm optimization for machinery fault detection[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009, 22(5): 308-316.

[10] Hussain S, Gabbar H A. A robust method for coupling detection among process variables[J]. Process Systems Engineering, 2012, 2(1): 93-110.

[11] Hussain S, Gabbar H A. Fault diagnosis in gearbox using adaptive wavelet filtering and shock response spectrum features extraction[J]. Structural Health Monitoring, 2013, 12(1): 1-12.

[12] Hussain S, Gabbar H A. A novel method for real time gear fault detection based on pulse shape analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(4): 1287-1298.

(责任编辑 赵业玲)