

# 基于PSO优化随机共振参数的轴承故障诊断

姜鑫 赵翌 霍宇琛

陕西法士特齿轮有限责任公司 陕西 宝鸡 722409

**摘要:** 轴承广泛应用于汽车、航天、航空、船舶等旋转机械,但轴承早期微弱故障信号往往淹没在强噪声背景当中,轴承故障诊断难以进行。针对这一问题,本文提出了一种粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)联合随机共振(Stochastic Resonance, SR)的轴承故障诊断方法。该方法对SR系统进行变尺度计算,以满足对大参数信号的检测;将输出信号信噪比作为适应度函数,使用PSO算法优化SR结构参数,自适应实现非线性系统、输入信号与噪声信号协同共振效果。通过仿真信号和开源轴承数据验证该算法的有效性。结果表明,PSO-SR轴承故障诊断方法优于传统SR方法,轴承故障信号频率提取误差0.49%,轴承故障频率幅值提高了17.61倍。

**关键词:** 轴承故障诊断; 随机共振; 变尺度计算; 粒子群优化算法

**中图分类号:** TH17

## 引言

旋转机械结构复杂多变,当轴承发生损坏或异常旋转时,轴承微弱故障信号往往淹没在强噪声背景中,使用常规滤波方法,难以在低信噪比信号中提取故障特征。常见的降噪方法有小波变换<sup>[1]</sup>、经验模态分解<sup>[2]</sup>、局部均值分解<sup>[3]</sup>等。其中,使用小波变换提取信号故障特征时,难以选择合适的小波基导致提取效果不佳;小波阈值降噪方法包括小波硬、软阈值降噪,软阈值函数原始小波与估计小波存在一定的误差,硬阈值函数存在不连续的缺陷;局部均值分解存在模态混叠现象。Benzi<sup>[4]</sup>等人首次提出了随机共振理论,用于解释古冰川气象现象。贺利芳等<sup>[5]</sup>将随机共振理论用于轴承故障诊断领域,实验表明该方法能很好的在强噪声环境中提取轴承故障频率信息。使用SR模型前,输入信号必须满足绝热近似理论,但在工程应用中,输入信号往往是大参数信号,不满足绝热近似理论。常使用归一化、二次采样、变尺度计算等方法,使得大周期信号满足绝热近似条件。考虑到旋转机械中轴承信号为大参数周期信号,且有效故障特征淹没在强噪声背景中难以提取,本文采用变尺度计算对SR系统进行参数转换,利用PSO算法对SR系统进行参数寻优,通过PSO-SR方法自适应增强轴承故障特征频率幅值,实现轴承故障特征频率精准识别。

## 1 基本理论

### 1.1 随机共振理论

随机共振多用于描述非线性系统中噪声增加系统输出响应的自然现象。本文选用非线性双稳态势阱模型—朗之万方程,如式(1)所示:

$$\frac{dx}{dt} = -H(x) + s(t) + n(t) \quad (1)$$

式中,系统输出 $x(t)$ ;势函数 $H(x)$ ;输入信号 $s(t) = A\cos(\omega_0 t - \varphi)$ ,振幅 $A$ ,角频率 $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,频率 $f_0$ ,相位角 $\varphi$ ;  $n(t)$ 为强度为 $D$ 的噪声信号; $H(x)$ 如式(2)所示:

$$H(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4 \quad a > 0, b > 0 \quad (2)$$

式中, $a$ 、 $b$ 为双稳态势阱结构参数,双稳态势阱曲线图如图1所示:

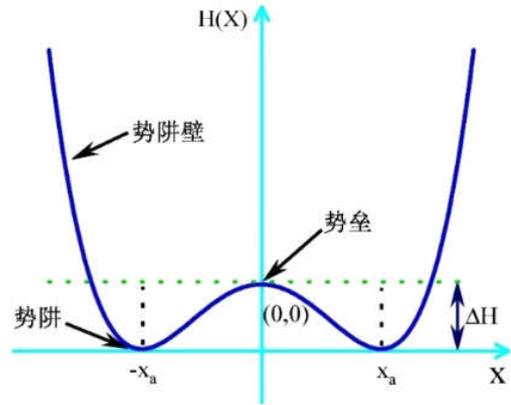


图1 双稳态势阱曲线图

图1可看出,当 $A = D = 0$ 时, $H(x)$ 曲线存在一个势垒(不稳定点)和两个势阱(稳定点),对应的横坐标为 $-x_a = -\sqrt{a/b}$ 和 $x_a = \sqrt{a/b}$ 。 $\Delta H$ 为势垒高度, $\Delta H = a^2/4b$ 。在双稳态系统中,粒子要克服 $\Delta H$ 在势阱间跳跃,输入信号的幅值必须超过系统临界阈值 $A_c$ 。令 $s(t) = A_c$ ,势函数表示为:

$$H_1(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4 + A_c x \quad a > 0, b > 0 \quad (3)$$

### 1.2 PSO优化算法

PSO参数寻优是将系统初始化为种群粒子,每个粒子都是一个解,通过更新粒子最佳位置寻求最优解<sup>[6]</sup>。在此

过程中，每迭代一次粒子将更新一次位置，通过适应度函数计算出适应度值，来判断是否在解的范围内，直到

所有粒子都集中在某一位置附近，得到最优解，迭代结束。粒子速度及位置更新的方程如下：

$$v_i = \omega v_i + c_1 \times rand() \times (pbest_i - x_i) + c_2 \times rand() \times (pbest_i - x_i) \quad (4)$$

$$x_i = x_i + v_i \quad (5)$$

式中， $i=1,2,\dots,N$ ， $N$ 为种群数量， $\omega$ 为非负惯性因子， $v_i$ 为粒子移动速度， $c_1, c_2$ 为学习因子，一般取2， $rand()$ 是(0,1)范围内的随机数， $pbest_i$ 为粒子最佳位置。

应原始信号的固有频率25Hz，幅值为0.573，PSO-SR算法有效。

### 2 基于 PSO 优化随机共振参数模型

PSO-SR算法实现轴承故障诊断的步骤如下：

(1) PSO和SR的初始参数设定。设置粒子种群个数 $N$ ，惯性因子 $\omega$ ，学习因子 $c_1, c_2$ ，最大飞行速度 $v_{max}$ ，最大迭代次数及寻优范围；

(2) 在达到终止条件前，运行PSO算法更新SR模型的结构参数 $a, b$ ；

(3) 达到终止条件后，提取微弱特征。

PSO算法优化SR参数算法流程图如图2所示：

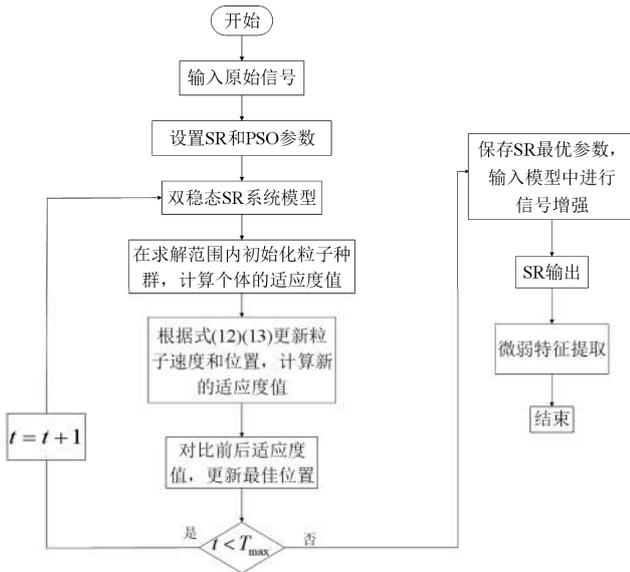


图2 PSO算法优化SR参数算法流程图

### 3 仿真信号验证

为验证PSO-SR算法的有效性，使用仿真信号进行实验。使用变尺度计算方法，将大参数信号转换为小参数信号。原始信号 $x(t) = A \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$ ，其中 $A = 0.5, f = 25\text{Hz}$ ，采样频率3000Hz、采样点数3000。向原始信号中加入一定强度的噪声信号生成输入信号。设置种群数量50，结构参数 $a, b$ 的寻优范围为(0,3)，最大迭代次数60， $c_1 = c_2 = 2, \omega = 0.6, v_{max} = 5$ ，求得得 $a = 0.02, b = 0.36$ ，尺度变换系数2000。将变尺度输出信号还原后的时域如图3所示，频域如图4所示。图3输出信号时域幅值由原来的0.5增加至约2.3，幅值增加了3.6倍；图4峰值对

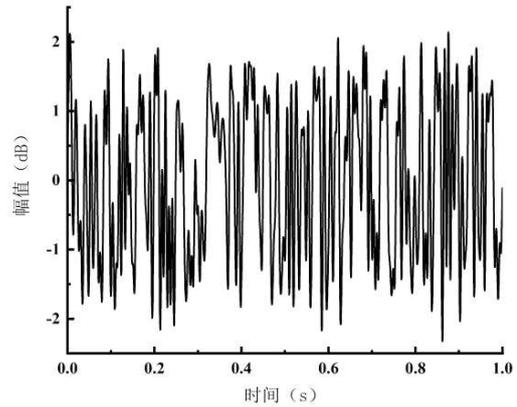


图3 大参数PSO-SR输出信号时域

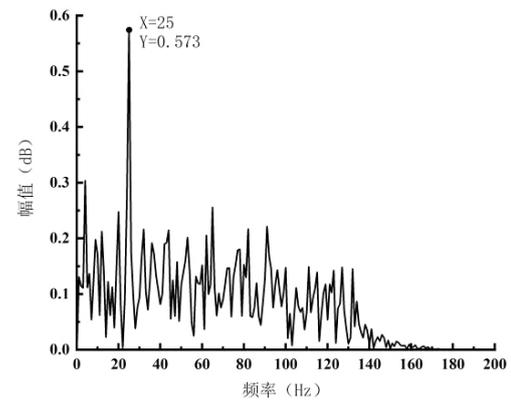


图4 大参数PSO-SR输出信号频域

### 4 工程验证

本文将PSO-SR算法应用美国凯斯西储大学开源轴承外圈故障诊断。其中，设置采样频率为2000Hz，计算轴承外圈的故障频率为104.5Hz。故障信号时域如图5所示，频域如图6所示。为使轴承信号满足SR的绝热近似条件，设置尺度变换系数为50000，压缩后的采样频率和轴承信号固有频率都满足小参数要求。按照PSO-SR系统参数进行模型初始化后，对轴承故障信号进行处理，为更好的看出故障频率，对输出信号进行尺度还原，得到PSO-SR系统自适应增强的轴承输出时域如图7所示，频域如图8所示。从图8中可以看出，频率幅值最大值处对应的频率为104Hz，幅值为0.763。此频率与轴承故障频率接近，误差为0.49%，相比于图6故障频率幅值0.041提高了17.61倍。

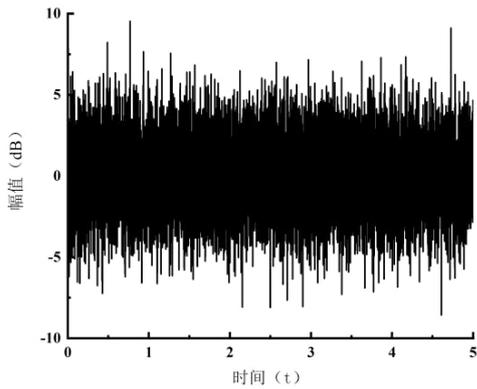


图5 轴承原始信号时域

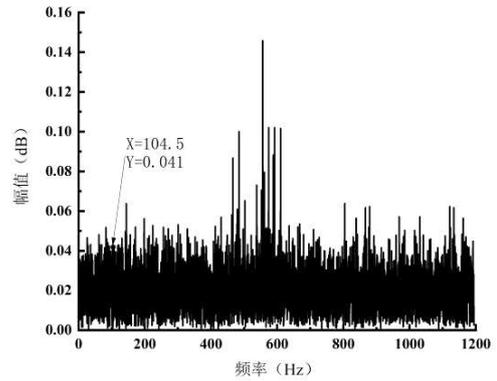


图6 轴承原始信号频域

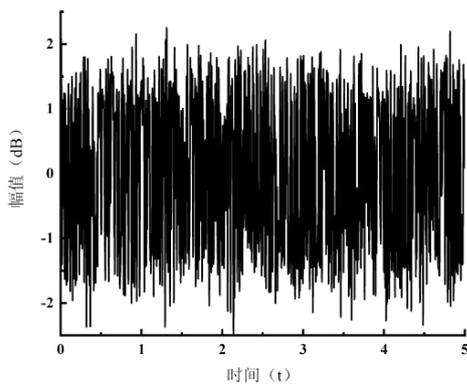


图7 PSO-SR输出信号时域

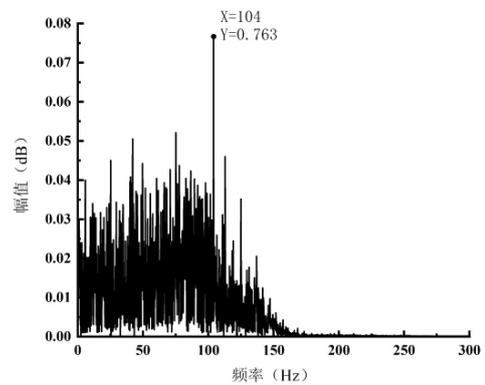


图8 PSO-SR输出信号时域

### 5 结论

(1) 针对轴承早期故障信号淹没在强噪声背景当中无法识别特征信息,提出了一种基于PSO优化SR系统参数的轴承故障诊断方法;

(2) 采用仿真信号验证了PSO-SR算法处理大周期信号的有效性;

(3) 采用开源轴承数据进行工程验证,结果表明,PSO-SR算法可以对轴承故障特征进行提取,识别误差为0.49%,故障频率幅值提高了17.61倍。

### 参考文献

[1]黄姗姗,李志农.基于高密度小波变换的航空发动机滚动轴承故障诊断方法[J].轴承,2023(02):19-25.  
[2]Ma C,Huang X,Wang K, et al.Prediction of

Remaining Parking Spaces Based on EMD-LSTM-BiLSTM Neural Network[J/OL].Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition):1-25[2023-10-20].

[3]谢小正,李俊,赵荣珍等.SVD-LMD联合降噪和TEO的滚动轴承故障诊断[J].机械传动,2021,45(06):104-112.

[4]Benzi R, Sutera A, Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance[J]. J Phys, 1999, 14(11): L453

[5]贺利芳,杨玉蕾,张天骐.时延反馈EVG系统随机共振特性研究及轴承故障诊断[J].仪器仪表学报,2019,40(8):47-57.

[6]晏晓红,宋丽,荣延祥.PSO-SVR优化模型在基坑变形监测预测中的应用[J].地理空间信息,2022,20(12):53-57.