

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.032

# 基于自适应 Morlet 小波和 WOA 方法的牵引齿轮箱故障诊断

杜延鹏, 韩得水, 吴连军, 栾赛, 曹朝煜

(中车工业研究院(青岛)有限公司, 山东 青岛 266111)

**摘要:**为提高轨道交通牵引传动系统用齿轮箱早期故障诊断能力,开发一种 Morlet 小波自适应参数字典算法,可以实现局部分割与整体数据进行全局分析的功能,通过鲸鱼优化算法自主计算小波字典数据。根据正交匹配追踪结果对振动信号开展稀疏分解,以包络谱分析的方法获取齿轮中的早期信号,实现齿轮箱的高效故障诊断。研究表明:仿真信号波形内形成了明显的周期故障冲击特征,采用该方法计算的 Morlet 小波参数极大地缩短了算法所需的时间。与 CFA 方法相比,该方法对原子小波参数具有更准确的识别性能,具备更强抗噪能力,算法效率也获得明显提升。该研究可以拓展到其他的机械传动系统上,具有很高的推广价值。

**关键词:** 齿轮箱; 故障诊断; 稀疏表示; Morlet 小波; 鲸鱼优化算法

**中图分类号:** TH132.41 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2024)06-0160-04

## Fault Diagnosis of Traction Gear Box Based on Adaptive Morlet Wavelet and WOA Method

DU Yanpeng, HAN Deshui, WU Lianjun, LUAN Sai, CAO Chaoyu

(CRRC Industrial Research Institute (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

**Abstract:** In order to improve the early fault diagnosis ability of gear box for rail transit traction transmission system, a Morlet wavelet adaptive parameter dictionary algorithm is developed with the aim to realize the function of local segmentation and global analysis of the whole data. The whale optimization algorithm is used to compute the wavelet dictionary data autonomously. According to the results of orthogonal matching pursuit, the sparse decomposition of the vibration signals is carried out, and the envelope spectrum analysis method is applied to obtain the early signals in the gear box, achieving the efficient fault diagnosis of the gear box. The results show that obvious periodic fault impact features are formed in the simulation signal waveform, and the Morlet wavelet parameters calculated by the method greatly shorten the time required by the algorithm. Compared with CFA method, this method has more accurate identification performance for atomic wavelet parameters, stronger anti-noise ability, and remarkably improved algorithm efficiency. The research can be extended to other mechanical transmission systems with a high value of popularization.

**Keywords:** gear box; fault diagnosis; sparse representation; Morlet wavelet; whale optimization algorithm

### 0 引言

齿轮箱属于牵引传动系统的一个重要组成部分,在牵引系统动力传输领域发挥着关键作用。实现齿轮故障的精确检测对工程应用具有极大价值。采用信号处理方式来实现齿轮故障的高效诊断已获得了越来越多学者的深入研究<sup>[1-2]</sup>。振动信号容易产生非线性变化特征,而且还会受外部噪声因素的显著干扰,难以从设备振动频率中提取准确的故障特征,如果继续选择传统处理模式将导致诊断精度明显下降<sup>[3-4]</sup>。

学习字典和参数字典已经成为原子字典的两类重点处理技术<sup>[5]</sup>。其中,学习字典是根据学习目标包含的特征参数来完成字典内容的自主更新

的,但利用学习字典需要经过大量样本数据分析才能实现对信号固有特征的提取<sup>[6]</sup>。相关方面的研究吸引了很多的学者。田赛等<sup>[7]</sup>结合 Morlet 小波和粒子群优化算法,设计了一种滚动轴承故障诊断方法,并与峭度指标进行实验,验证了该方法的有效性。艾延廷等<sup>[8]</sup>提出了一个反映信号中冲击成分强弱的局部包络谱峰值因子,并应用于轴承故障信号 Morlet 复小波共振解调频带领域,有效地将故障信息从振动信号中分离出来,实现轴承故障的诊断。张龙等<sup>[9]</sup>提出一种基于包络谱谱峰因子和复平移 Morlet 小波滤波的共振解调方法,验证了该方法在共振解调最优频带选取中的有效性和优越性。邓飞跃等<sup>[10]</sup>提出了一种基于自适应 Morlet 小波参数字典设计的齿轮故障诊断

**第一作者简介:** 杜延鹏(1988—),男,山东济宁人,工程师,硕士,研究方向为列车产品平台技术,18765264235@163.com。

法,并利用鲸鱼优化算法(WOA)自适应确定小波字典参数。该方法可以有效提取齿轮微弱故障特征。

目前的研究多是利用自适应 Morlet 小波参数字典对振动信号进行过滤处理,在这个过程中考虑到对适应度函数的对应选取方面仍有不足,这会降低诊断效率。根据以上结果,本文开发了一种 Morlet 小波自适应参数字典算法,并通过鲸鱼优化算法进行参数字典计算;开展了仿真和实验信号分析,验证了本文方法的先进性,为后续的进一步应用奠定理论基础。

## 1 自适应 Morlet 小波

对于 CFA 算法来说,小波支撑区间和分析信号的长度保持一致<sup>[11]</sup>。但 Morlet 小波冲击成分在整体波长中的占比很小。经综合考虑,本文按照小波能量正态分布  $3\delta$  的原则设置 Morlet 小波支撑区间如下:

$$\frac{\sum_{i=1}^W |\Psi_{\zeta_i}(t_i)|^2}{\sum_{i=1}^L |\Psi_{\zeta_i}(t_i)|^2} \quad (1)$$

式中: $\Psi$  表示小波参数; $\zeta_i$  组成 Morlet 小波; $L$  为信号长度; $W$  为小波支撑区间。利用上述小波支撑区间分割信号,建立下述空间矩阵表达式:

$$\mathbf{y}(t) = [Y_1, Y_2, \dots, Y_{L-W+1}] = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \dots & y(L-W+1) \\ y(2) & y(3) & \dots & y(L-W+2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(W) & y(W+1) & \dots & y(L) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $Y_1, Y_2, \dots, Y_{L-W+1}$  表示子信号。建立  $\Psi$  和各子信号相关函数表达式,得到序列峭度如下:

$$K_i = \frac{E(C_i - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (3)$$

式中: $E(\cdot)$  是数学期望; $\mu$  与  $\sigma$  分别对应  $C_i$  均值与标准差。最大峭度如下<sup>[12]</sup>:

$$K_{\text{best}} = \max(K_1, K_2, \dots, K_{F \times Z}) \quad (4)$$

本文设计的以 WOA 实现的自适应参数字典设计流程为:

- 1) 确定 Morlet 小波寻优的区间,黏滞阻尼比  $\zeta \in$ , 频率区间  $f$ ;
- 2) 对 WOA 参数进行初始化,鲸群个数为  $A=50$ ,迭代上限为  $M=20$ ,总共对 2 个参数进行优化;
- 3) 以随机方式确定小波参数,建立 Morlet 小波函数,构建 WOA 适应度函数;
- 4) 利用 WOA 算法对鲸鱼狩猎位置迭代更

新,完成捕食过程;

5) 持续迭代到符合收敛条件,确定最优适应度小波结果;

6) 根据最优小波参数建立 Morlet 小波,利用逐点时移方法建立参数字典;

7) 以正交匹配追踪(OMP)方法计算信号的稀疏分解结果,再对分解信号开展包络解调处理获取故障特征。具体流程如图 1 所示。

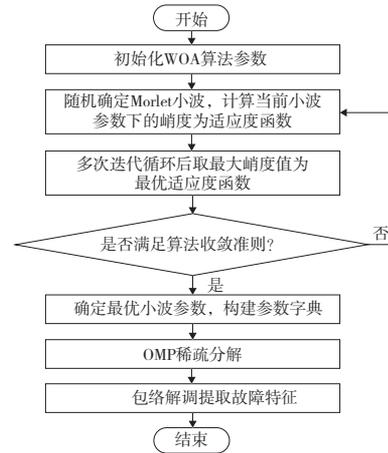


图 1 本文方法流程图

## 2 仿真分析

本文根据齿轮早期的仿真计算结果判断方法可靠性。采用传统方法进行故障模拟时,通常需要加入白噪声形成背景噪声;但考虑到实际工程领域没有白噪声,本文在仿真过程中设置了白噪声与有色噪声使其与实际状态更加接近。建立以下的仿真函数:

$$\begin{cases} s(t) = h(t) + n(t) + r(t) \\ h(t) = \sum_i e^{-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} [2\pi f(t-iT-\tau_0)]^2} \sin[2\pi f(t-iT-\tau_0)] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $s(t)$  为仿真信号; $h(t)$  为故障信号; $n(t)$  为加入信噪比  $-5$  dB 后高斯白噪声; $r(t)$  为有色噪声。控制频率  $20$  Hz, 阻尼比为  $0.008$ , 故障周期  $0.25$  s, 以  $\tau_0=2$  s 作为最初故障冲击时间, 设定采样频率  $600$  Hz, 共采样  $7\ 692$  点。

图 2 给出了初始故障和加入背景噪声之后形成的信号曲线。可以看到,受到背景噪声影响后,故障冲击成分呈现淹没的状态,不能对其进行精确识别。确定 WOA 输出峭度最大为  $6.152$  1, 测试得到表 1 所示的结果。建立小波参数字典并利用 OMP 信号开展稀疏分解计算,测试得到图 3 的结果。可以看到此时在信号波形内形成了明显的

周期故障冲击特征,这跟初始仿真信号相符。接着通过 CFA 方法开展比较分析,考虑到 CFA 的计算过程需要占用大量时间,对于小波参数搜寻区间和步长并未设置成非常细致的状态。根据图 4 可知,最大相关系数为 0.110 8,再以虚线标识小

波参数,测试得到表 1 所示的结果。表 1 显示,采用本方法计算的 Morlet 小波参数跟初始设置相近,而通过 CFA 计算获得的结果相对设置值存在明显差异,而且本文方法的参数遍历算法更加简单,因此极大缩短了算法所需的时间。

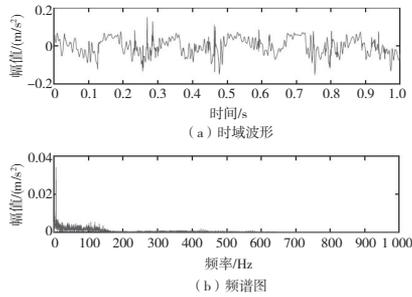


图 2 齿轮故障仿真信号

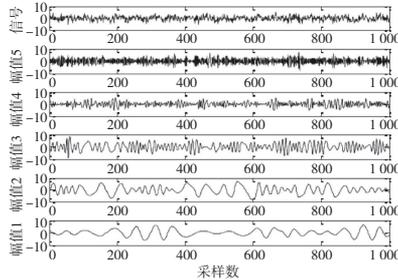


图 3 仿真信号系数分解结果

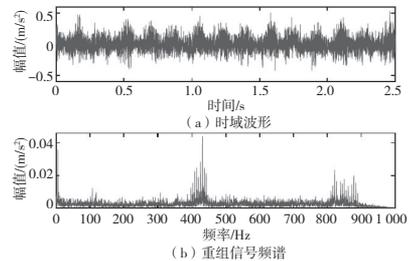


图 4 仿真信号小波识别结果

表 1 仿真信号分析结果

| 参数   | $f/\text{Hz}$ | $\zeta$ | 运算时间/s  |
|------|---------------|---------|---------|
| 所提方法 | 18.635        | 0.008   | 22.635  |
| CFA  | 122.360       | 0.002   | 515.263 |

### 3 试验分析

#### 3.1 试验方案

本实验利用 QPZZ-II 旋转机械故障系统平台测试尺寸故障特征。在从动大齿轮中设置断齿故障,主动轮和从动轮的齿数分别为 55、75,控制输入轴转速为 870 r/min。以  $f_s = 5\ 120\ \text{Hz}$  频率进行采样,共采集 8 192 点数据。

#### 3.2 结果分析

图 5 给出了齿轮故障信号的测试结果。可以看到,此时在时域波形内形成大量背景噪声,带有不规则冲击成分。对初始信号进行 Hilbert 直接包络谱计算所得的结果,并未从图中提取得到故障特征频率与倍频信号。

本方法对小波参数自主识别时,图 6 给出了以参数字典与 OMP 稀疏分解得到的信号数据,WOA 输出峭度最大为 8.421,测试结果如表 2 所示。此时在时域波形内存在明显故障冲击信号,从包络谱内观察到齿轮故障频率与倍频,能够实现齿轮故障精确诊断。

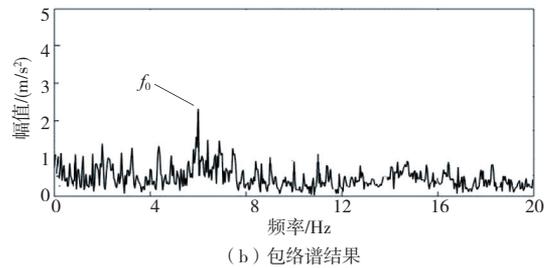


图 5 故障信号 CFA 识别波形和包络谱结果

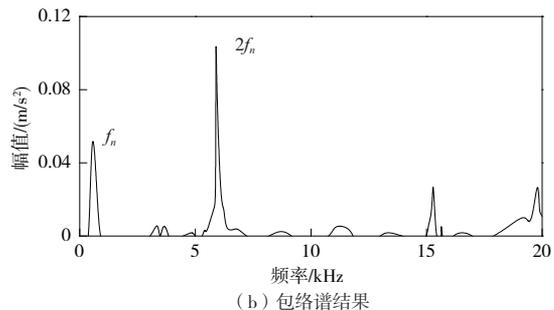
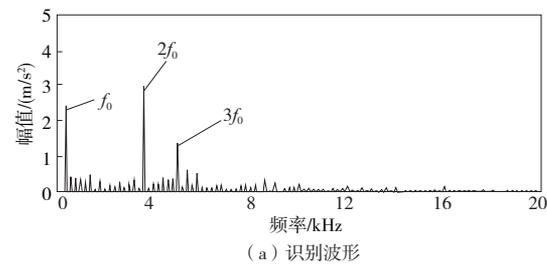
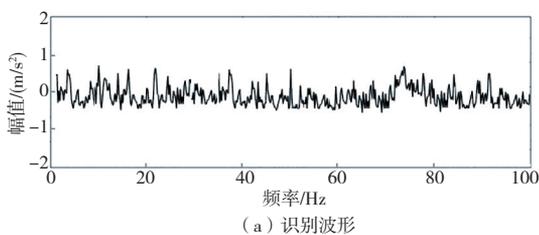


图 6 本文识别波形和包络谱结果

表 2 齿轮故障信号信号分析结果

| 项目   | $f/\text{Hz}$ | $\zeta$ | 运算时间/s    |
|------|---------------|---------|-----------|
| 所提方法 | 162.254       | 0.006   | 116.587   |
| CFA  | 1 045.128     | 0.004   | 1 259.672 |



采用 CFA 方法进行分析时,为了实现低阻尼比条件下也达到理想的分辨性能,形成了不均匀的小波参数划分状态。对上述结果进行对比可知,CFA 相对本文方法的识别状态存在明显差异,同时计算时间也明显延长。

#### 4 结语

1) 仿真信号波形内形成了明显的周期故障冲击特征,采用本文方法计算的 Morlet 小波参数,能极大地缩短算法所需的时间。与 CFA 方法相比,本文方法对原子小波参数具有更准确的识别性能,具备更强抗噪能力,算法效率也获得明显提升。

2) 试验信号下 OMP 方法受到噪声频率影响时实际强度很低,不能实现准确识别的效果。本文方法的试验信号时域波形内存在明显故障冲击信号,从包络谱内观察到齿轮故障频率与倍频,实现齿轮故障精确诊断。

#### 参考文献:

- [1] 吴磊,张新,王家序,等. 基于增强自适应盲解卷积方法的齿轮故障诊断[J]. 振动与冲击, 2023, 42(7): 123-132.
- [2] 范志锋,张融,王婷,等. 行星轮系早期故障诊断的研究与进展[J]. 机械传动, 2023, 47(3): 156-164.
- [3] 袁荷伟,李高磊,袁黎,等. 基于 LF-GWO 优化 FKCA 模型的齿轮箱故障诊断研究[J]. 机械设计与制造, 2023(4): 239-242.

- [4] 朱渔,李丹,李晓明,等. 基于 EEMD 和 BLSTM 算法的齿轮泵行星轮典型故障诊断[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(4): 198-201, 207.
- [5] FENG Z P, ZHOU Y K, ZUO M J, et al. Atomic decomposition and sparse representation for complex signal analysis in machinery fault diagnosis: a review with examples[J]. Measurement, 2017, 103: 106-132.
- [6] 郭俊锋,石斌,魏兴春,等. 基于 K-SVD 字典学习算法的稀疏表示振动信号压缩测量重构方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(7): 97-106.
- [7] 田赛,姚斌,陈彬强,等. 基于 Morlet 小波和改进峭度的滚动轴承故障诊断方法[J]. 工具技术, 2022, 56(10): 141-146.
- [8] 艾延廷,田博文,田晶,等. Morlet 复小波频带优化及其在中介轴承故障诊断中的应用[J]. 航空动力学报, 2020, 35(1): 153-161.
- [9] 张龙,毛志德,熊国良,等. 滚动轴承故障诊断的自适应包络谱谱峰因子算法[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(4): 507-514.
- [10] 邓飞跃,强亚文,郝如江,等. 基于自适应 Morlet 小波参数字典设计的微弱故障检测方法研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(8): 187-193, 254.
- [11] 王冉,余龙靖,余亮,等. 基于 RPCA 低秩稀疏分解的循环频率检测方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(4): 88-94.
- [12] 李静娇,陈恩利,刘永强. BSS 与 Morlet 小波变换在轴承声学故障诊断中的研究[J]. 机械强度, 2018, 40(3): 528-533.

收稿日期:2023-03-22

(上接第 150 页)

料层合板参数。再对同一层合板进行自由模态试验,通过比较识别前、后参数下的计算-实测频率误差来验证识别参数的准确性。结果表明:参数计算-实测自由模态频率误差由识别前的 18.61% 降至识别后的 5.10%, 这说明了基于模态试验的参数识别方法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 肖守讷,江兰馨,蒋维,等. 复合材料在轨道交通车辆中的应用与展望[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 154-176.
- [2] 刘镇阳,翟雨农,李东升,等. 飞机复合材料壁板装配变形控制技术研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(18): 46-54, 78.
- [3] 邹瑞睿,张坤. 纤维增强塑料复合材料在汽车轻量化中的应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57(5): 123-126.
- [4] WANG W T, KAM T Y. Material characterization of laminated composite plates via static testing [J].

- Composite Structures, 2000, 50(4): 347-352.
- [5] LECOMPTE D, SMITS A, SOL H, et al. Mixed numerical-experimental technique for orthotropic parameter identification using biaxial tensile tests on cruciform specimens [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(5): 1643-1656.
- [6] 张令弥. 动态有限元模型修正技术及其在航空航天结构中的应用[J]. 强度与环境, 1994, 21(2): 10-17.
- [7] 郭勤涛,张令弥,费庆国. 结构动力学有限元模型修正的发展:模型确认[J]. 力学进展, 2006, 36(1): 36-42.
- [8] PRODROMOU A G, LOMOV S V, VERPOEST I. The method of cells and the mechanical properties of textile composites [J]. Composite Structures, 2011, 93(4): 1290-1299.
- [9] JIANG L X, XIAO S, YANG B, et al. Bimodulus constitutive relation and mesoscopic model of braided composites [J]. Composite Structures, 2021, 270: 114115.
- [10] 吉根林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(2): 69-73.

收稿日期:2023-02-21