

文章编号:1006-1355(2019)01-0166-06

# 基于SWD-AVDIF的齿轮箱复合故障诊断方法

李娟<sup>1</sup>, 程军圣<sup>1</sup>, 黄祝庆<sup>2</sup>, 卿宏军<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙 410082;  
2. 常州湖南大学 机械装备研究院, 江苏 常州 213100)

**摘要:**针对由噪声干扰和故障强度分布不均引起的齿轮箱复合故障诊断问题,提出基于群分解和平均差值形态算子(Swarm Decomposition- Average Difference Filter, SWD-AVDIF)的齿轮箱复合故障诊断方法。该方法首先运用群分解(Swarm Decomposition, SWD)将振动信号分解为若干单一模态振荡分量(Oscillatory Components, OCs);然后对分量进行AVDIF解调,得到SWD-AVDIF解调谱;最后根据解调结果判别故障类型。与EMD对比,仿真信号验证了SWD方法在频率区分能力上的优越性;运用齿轮箱复合故障仿真信号和实验信号进行分析,结果表明该方法能够有效地分离复合故障信号并加强故障特征,为齿轮箱复合故障诊断提供了一种新的方法。

**关键词:**振动与波;群分解;平均差值形态算子;齿轮箱;复合故障诊断

中图分类号:TH13

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2019.01.032

## Multi-faults Diagnosis Method for Gearboxes Based on SWD-AVDIF

LI Juan<sup>1</sup>, CHENG Junsheng<sup>1</sup>, HUANG Zhuqing<sup>2</sup>, QIN Hongjun<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Delivery Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;  
2. CZ-HNU Institute of Machinery Equipment, Changzhou 213100, Jiangsu China)

**Abstract:** The problem of multi-fault diagnosis of gearboxes under the condition of noise interference and uneven distribution of fault intensity is studied. A fault diagnosis method based on Swarm Decomposition and Average Difference Filter (SWD-AVDIF) is proposed. Firstly, Swarm Decomposition (SWD) is used to decompose the vibration signal into several Oscillatory Components (OCs). Then, the OCs are demodulated into SWD-AVDIF spectrum with AVDIF operator to realize accurate diagnosis. Compared with EMD, the analysis results with simulation signal verify the superiority of SWD method in frequency discrimination ability. The method is applied to the mechanical multi-fault signal analysis. The results show that this method can effectively decompose different fault signals and strengthen fault features. This study provides a new method for multi-fault diagnosis of gearboxes.

**Keywords:** vibration and wave; swarm decomposition (SWD); average difference filter (AVDIF); gearbox; multi-fault diagnosis

滚动轴承、齿轮作为齿轮箱的核心部分,其状态好坏直接影响整个设备的运行<sup>[1]</sup>。目前,国内外学者对齿轮箱诊断方法已经进行了大量研究,这些研究大多是基于齿轮箱某一部件的单一故障而展开,但齿轮箱中复合故障更为常见<sup>[2]</sup>,其故障多表现为强度分布不均且相互叠加、彼此干扰<sup>[3]</sup>,增加了故障诊断难度。因此,研究新的齿轮箱复合故障诊断方法具

有重要的现实意义。复合故障信号主要包含啮合频率被转频调制的调制型齿轮故障信号和以轴承故障频率及其倍频为周期的脉冲型轴承故障信号<sup>[4]</sup>。传统的复合故障诊断方法以频带划分为基础,将故障信号分解到不同频带,进而提取故障特征进行故障诊断。经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,简称EMD)具有类似二进滤波器组的特性<sup>[5]</sup>,将振动信号分解成若干个不同频段且瞬时频率具有物理意义的固有模态函数(Intrinsic Mode Function,简称IMF)之和,并在故障诊断中得到了广泛应用<sup>[6]</sup>。但是,EMD分解高频分量带宽较大,频率分辨率低,在分解频率成分较为接近的复合故障信号时容易造成模态混叠<sup>[7]</sup>,影响诊断的准确性。

收稿日期:2018-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575168,51875183);  
湖南省重点研发计划资助项目(2017GK2182)

作者简介:李娟(1995-),女,湖南省益阳市人,硕士研究生,主要研究方向为机械故障诊断。

通信作者:程军圣,男,博士生导师。

E-mail: chengjunsheng@hnu.edu.cn

文献[8]提出了一种基于群体智能算法的非线性滤波器——HS滤波(Hunting Swarm Filter,简称HSF),相比传统中值滤波器,HS滤波器具有更好的抗噪性。文献[9]对HS滤波器进行改进提出群滤波(Swarm Filter,简称SwF),在此基础上,提出了一种新的信号处理方法——群分解(Swarm Decomposition,简称SWD),并成功的将该方法运用到非线性、非平稳信号处理中。SWD借鉴EMD迭代滤波的思想,经迭代SwF滤波将原始信号自适应的分解为若干单一模态的振荡分量(Oscillatory Components,简称OCs)。SwF滤波器相当于一个带通滤波器,通过设计SwF参数可以控制OC分量主模态频率,使得SWD分解在模态分离方面,可以将频率相近的两个谐波信号分离,相比EMD具有更高的频率区分能力。本文将SWD方法引入故障诊断领域,用于分解齿轮箱复合故障振动信号。

SWD方法能够将故障信号分解到不同频率范围的OC分量中,但是无法从OC分量中直接读取故障信息,因此需要对OC分量进行解调分析。常见的解调方法有包络解调、广义检波滤波等<sup>[10]</sup>,但包络解调两端会产生调制现象,致使解调误差增大;广义检波滤波则出现混频现象,在频率准确值的提取方面效果不尽人意。形态学解调是一种基于数学形态学的方法,通过设计具有滤波窗作用的结构元素对信号进行边缘匹配和处理<sup>[11]</sup>。平均差值形态算子(Average Difference Filter,简称AVDIF)<sup>[12]</sup>作为一种基于形态学解调的新型组合差值算子,在抑制随机噪声和突出冲击信号上有很好的效果,对OC分量进行AVDIF解调能够降低带内噪声干扰、增强故障特征,相比前两种解调算法具有更高的准确性和精度。

基于上述分析,本文对比分析EMD与SWD方法的频率区分能力并提出一种基于群分解和平均差值形态算子(Swarm Decomposition-Average Difference Filter,简称SWD-AVDIF)的齿轮箱复合故障诊断方法。该方法首先对齿轮箱复合故障振动信号进行分解;然后采用平均差值形态算子对分量信号进行解调;最后根据解调结果判别故障类型。齿轮箱复合故障仿真信号和实验信号验证了本文所提方法的优越性。

## 1 群分解方法

### 1.1 SWD分解

SWD通过迭代SwF滤波<sup>[9]</sup>,将输入信号分解为多个OC分量之和。分解过程如下:

1) 根据功率谱峰值确定初始信号中心频率

$\omega_{dom}^q$ ,由 $\omega_{dom}^q$ 可以得到SwF参数 $M, \delta^{[9]}$

$$\omega_{dom}^q = \arg \max_{\omega} (S_x(\omega) > P_{th}) \quad (1)$$

其中: $s_x(\omega)$ 表示韦尔奇功率谱<sup>[13]</sup>, $q$ 表示该频率在SWD分解过程中第 $q$ 次作为中心频率, $P_{th}$ 为阈值;

2) 对输入信号 $x[n]$ 进行SwF滤波<sup>[9]</sup>,得到输出信号 $y[n]$ ,计算输出信号与输入信号的方差值 $StD$ 值

$$StD = \sum_n \frac{|y[n] - x[n]|^2}{x^2[n]} \quad (2)$$

当 $StD > StD_{th}$ 时,以 $y[n]$ 为输入信号重复SwF滤波,直到 $StD < StD_{th}$ ,记 $x_i'[n] = y[n]$ ;

3) 更新输入信号

$$x_0'[n] = x[n] - \tilde{c}_{\omega_q}[n] \quad (3a)$$

$$\tilde{c}_{\omega_q}[n] = x_i'[n - \tau_{delay}] \quad (3b)$$

$$\tau_{delay} = \arg \max_{\tau} (R_{(x_i, x_i)}(\tau)) \quad (3c)$$

其中: $R_{(x_i, x_i)}(\tau)$ 为互相关函数 $(-(L-1) \leq \tau \leq (L-1))$ , $\tau$ 为时延。

4) 利用新的“输入”信号,重复步骤(1)–(3)直到 $S_x(\omega) \leq P_{th}, \forall \omega$ ,此时的输入信号为余量 $r[n]$ ;

5) 计算OC分量

$$oc_m \equiv c_{\omega}[n], \forall m = 1, \dots, |\Omega_{dominant}| \quad (4a)$$

$$c_{\omega}[n] = \sum_q \tilde{c}_{\omega_{dom}^q}[n], \forall \omega \in \Omega_{dominant} \quad (4b)$$

$$\Omega_{dominant} = \{\omega: \omega = \omega_{dom}\} \quad (4c)$$

### 1.2 SWD频率区分能力研究

考察下式所示仿真信号,采样频率为1 024 Hz,采样时间为1 s

$$\left. \begin{aligned} x_1(t) &= \cos(2\pi f_1 t) \\ x_2(t) &= \cos(2\pi f_2 t) \\ x(t) &= x_1(t) + x_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

两个余弦分量频率比 $f_2/f_1 = 40/50 = 0.8$ ,仿真信号及其时域波形图如图1。

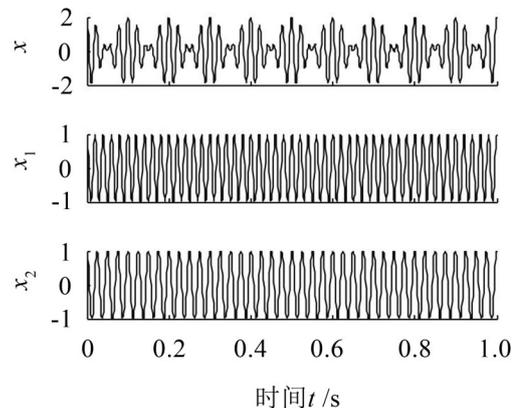


图1 仿真信号时域波形

分别用EMD与SWD方法对仿真信号进行分

解,为减小端点效应对结果的影响,采用互相关匹配端点延拓<sup>[14]</sup>对SWD的端点效应进行处理,分解结果如图2,分别求其有效分量的Hilbert时频谱如图3。

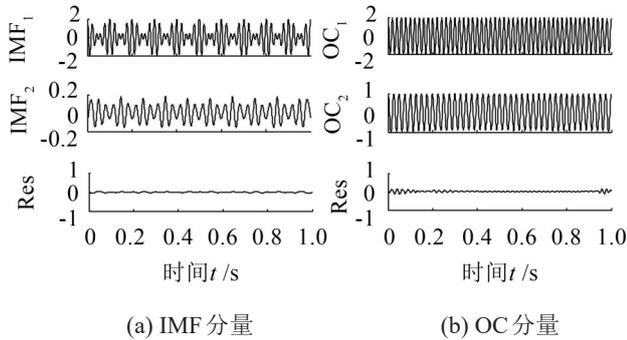


图2 EMD和SWD分解结果

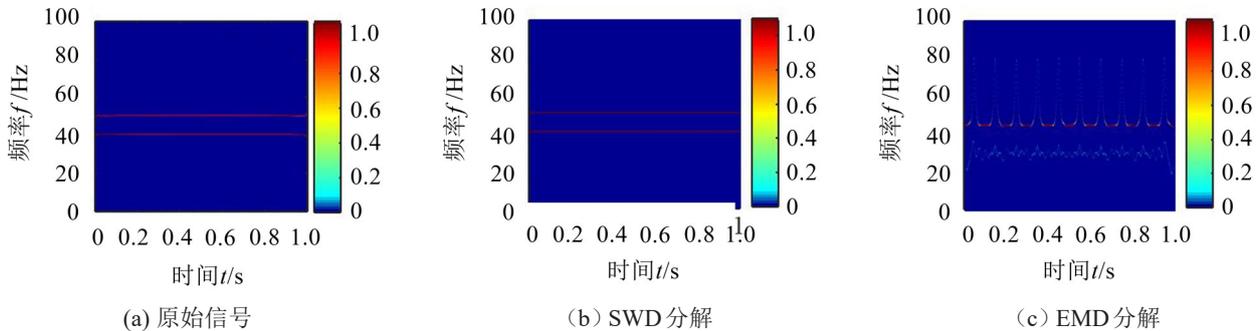


图3 原始信号及两种分解结果的Hilbert谱

解,然后利用Hilbert变换得到其平均幅值和频率,对结果进行归一化处理,得到归一化幅值和归一化频率与频率比的关系如图4。

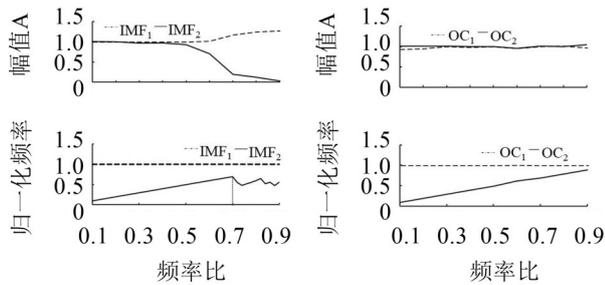


图4 EMD和SWD频率区分能力

从图中可以看出当频率 $f_2$ 与 $f_1$ 相差较大,即 $f_2/f_1 < 0.5$ 时,EMD可以有效的将原始信号分离开,得到的分量频率和幅值具有较高的准确性,但随着频率比的增大,在 $0.5 < f_2/f_1 < 0.7$ 会出现一个过渡带,在这一阶段,部分低频成分被看成高频成分的调幅成分被抽取到高频信号中,造成低频部分能量逐步减小,IMF分量会出现瞬时幅值上的误差,但此时仍然能够正确的反应原始信号频率成份;当 $0.7 < f_2/f_1$ 时,原始信号分量频率越来越接近,此时IMF分量在幅值和频率上都出现明显的失真,不能正确地

从结果可以看出,EMD在分解时将频率相接近的两个成份看成是一个调幅调频信号分解到同一个IMF分量中,得到的IMF<sub>1</sub>和IMF<sub>2</sub>时域波形呈现调幅特性,其Hilbert时频谱不能反映原始信号的瞬时幅值和瞬时频率,由此可以看出EMD不能分解频率接近的谐波信号。而SWD可以有效地对原始信号进行分解,并得到各个频率成分的OC分量,其中分量1和分量2分别对应OC<sub>1</sub>和OC<sub>2</sub>,其Hilbert时频谱和原始信号基本一致。

为进一步分析频率比对SWD分解结果的影响,利用式(5)构造一组等幅谐波信号,频率比范围满足: $f_2/f_1 \in [0.1, 0.9]$ 。首先对其进行SWD和EMD分

解,然后利用Hilbert变换得到其平均幅值和频率,对结果进行归一化处理,得到归一化幅值和归一化频率与频率比的关系如图4。反映原始信号分量。而随着频率比从0.1增加到0.9,SWD分解在小频率比范围内能够很好地保证分量瞬时幅值和瞬时频率,随着频率比的增大,SWD分解的瞬时频率基本不受频率比的影响,虽然瞬时幅值出现一定的波动,但是在可接受的范围内。从而可以说明SWD方法相对EMD,在频率区分能力上具有一定优越性。

## 2 SWD-AVDIF方法

### 2.1 SWD-AVDIF算法

复合故障信号多表现为强度分布不均,直接对振动信号进行特征提取存在弱故障被强故障和噪声掩盖的问题,鉴于SWD方法提取谐波分量的优越性和AVDIF在强化冲击信号的作用,提出基于SWD-AVDIF的旋转机械复合故障诊断方法。利用SWD将复合故障信号分解到不同频段的OC分量中,对OC分量进行AVDIF算子解调提取故障信息,通过其滤除带内噪声、强化冲击达到增强故障特征的作用。SWD-AVDIF方法具体步骤如下:

首先,通过SWD分解得到OC分量;

然后,对得到的OC分量进行AVDIF算子变换解调,即

$$\text{AVDIF} = \frac{[CD(oc_m(n)) - EO(oc_m(n))] + [DC(oc_m(n)) - EO(oc_m(n))]}{2} \quad (6a)$$

$$DC(oc_m(n)) = (oc_m \oplus g \bullet g)(n) \quad (6b)$$

$$CD(oc_m(n)) = (oc_m \bullet g \oplus g)(n) \quad (6c)$$

$$EO(oc_m(n)) = (oc_m \ominus g \circ g)(n) \quad (6d)$$

其中： $g(n)$ 表示结构元素， $\ominus$ 、 $\oplus$ 、 $\circ$ 、 $\bullet$ 分别表示形态学滤波的腐蚀运算、膨胀运算、开运算和闭运算四种基本运算；

最后，对解调后的OC分量进行频谱分析，得到多个SWD-AVDIF谱，提取故障特征。

### 2.2 齿轮箱复合故障仿真分析

为验证论文所提出方法的有效性，利用仿真信号进行分析。齿轮和滚动轴承是齿轮箱中最为重要的两个零件，因此，本文选取齿轮故障仿真信号和滚动轴承故障仿真信号来模拟复合故障信号，齿轮和滚动轴承的故障仿真信号如下

$$x_1(t) = A \bullet (1 + \cos(2\pi f_r t)) \cos(2\pi f_z t) \quad (7)$$

$$x_2 = \sum_{m=0}^M \{ B_m \exp(-\beta(t - mT_p)) \bullet \cos(2\pi f_n(t - mT_p)) u(t - mT_p) \} \quad (8)$$

其中： $A$ 为齿轮故障幅值； $f_r$ 为齿轮调制频率； $f_z$ 为载波频率； $M$ 为轴承冲击个数； $B_m$ 为第 $m$ 个冲击信号幅值， $\beta$ 为衰减系数； $f_n$ 为共振频率； $T_p$ 为模拟冲击间隔； $u(t)$ 为单位阶跃信号。仿真信号采样频率 $f_s$ ：8 192 Hz，采样点数：8 192，并加入高斯随机噪声。仿真信号各参数如表1。

表1 故障仿真信号参数

$f_r$ /Hz	$f_z$ /Hz	$M$	$B_m$	$\beta$	$f_n$ /Hz	$T_p$ /s	$A$
5	120	30	80	-1 500	3 200	1/30	2

故障信号及其分量如图5。

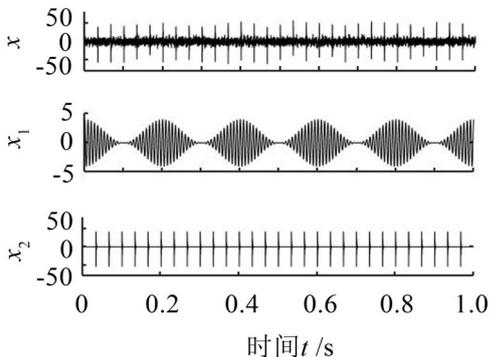


图5 复合故障仿真信号及其分量复合

齿轮故障特征频率为 $f$ ，滚动轴承故障特征频率 $f_c=1/T_p$ 运用SWD-AVDIF方法对模拟复合信号进行处理，得到仿真信号SWD-AVDIF谱如图6。

图中看出，该方法能够将齿轮和滚动轴承故障分解到不同分量，在相应的故障频率及其倍频处能看到明显的谱线。证明了本文所提方法的有效性。

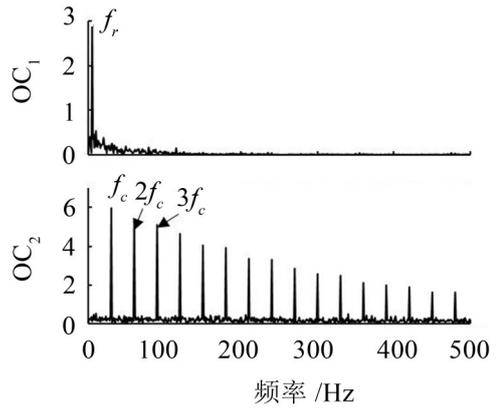
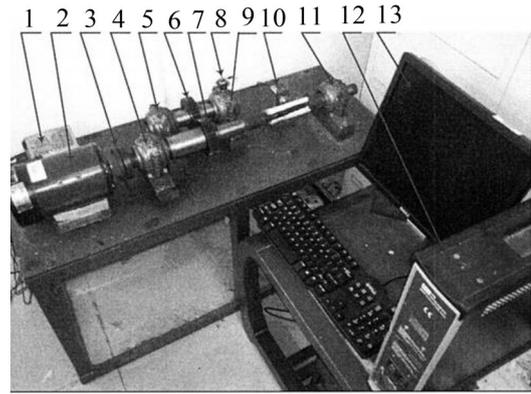


图6 复合故障仿真信号SWD-AVDIF谱

### 3 齿轮箱复合故障实验信号分析

为了验证本文所提出的方法在工程实践中的实用性，以湖南大学齿轮箱复合故障振动信号数据为例验证该方法的应用效果。齿轮箱试验台为单级传动，如图7所示。



- 1. 电机调速器 2. 直流电机 3. 联轴器 4. 滚动轴承1
- 5. 滚动轴承3 6. 正齿轮2 7. 正齿轮1 8. 振动加速度传感器
- 9. 滚动轴承4 10. 光电式转速传感器
- 11. 滚动轴承2 12. LMS数据采集仪 13. 计算机

图7 齿轮箱故障实验台

通过激光切割的方式在齿轮和轴承上设置局部故障，其中滚动轴承的型号为SKF6307-2RS，在轴承的外圈上切割宽0.15 mm，深0.2 mm的槽来模拟轴承外圈故障；齿轮的齿数为37，在齿轮上切掉一个齿来模拟断齿故障。轴承和齿轮故障示意图如图8所示。

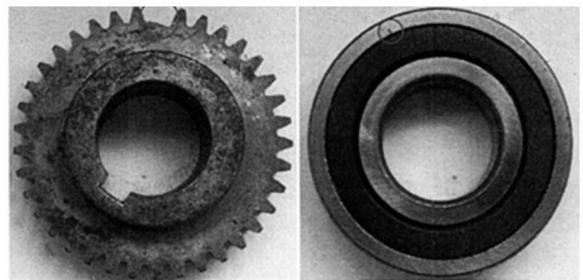


图8 故障齿轮和轴承

实验采样频率为 8 192 Hz, 采样时间为 1 s。采集到如图 9 所示的故障信号。

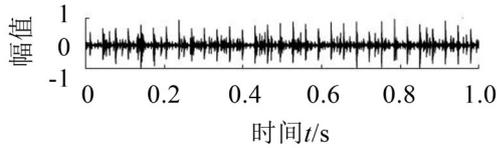


图 9 故障信号时域波形图

对其进行包络谱分析, 得到其频率在 0 到 500 Hz 之间的包络谱如图 10, 从图中可以看出, 轴承外圈的故障频率及其倍频在包络谱中表现明显, 但是齿轮故障特征频率被掩盖, 无法判断是否发生齿轮故障。

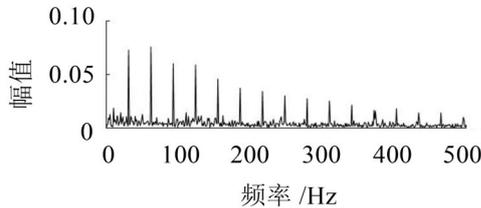


图 10 故障信号包络谱

为了对比分析本文提出的方法, 分别运用基于 EMD-AVDIF、基于 SWD 分解的包络解调法和本文提出的方法对振动信号进行分析。其 EMD 分解得到 7 个 IMF 分量和余量, 选取前 4 个分量进行 AVDIF 解调得到 EMD-AVDIF 谱, 如图 11。

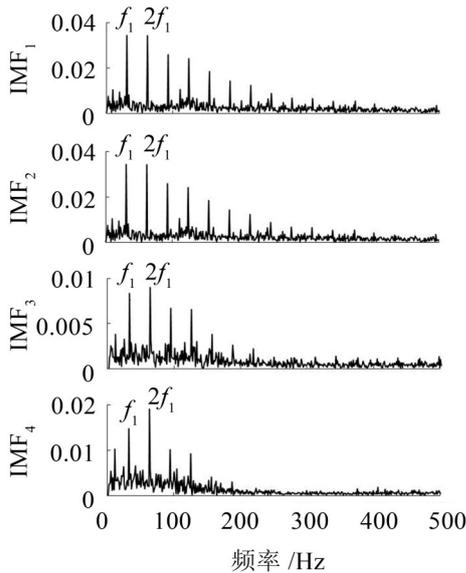


图 11 IMF<sub>1</sub>~IMF<sub>4</sub>分量 EMD-AVDIF 谱

从图中看出, 在轴承故障频率及其倍频处存在明显谱线, 但齿轮故障频率仍然被掩盖, 无法判断是否发生齿轮故障, 说明 EMD-AVDIF 不能实现复合故障诊断。

接着运用基于 SWD 分解的包络解调法和本文

提出的方法对振动信号进行分解, 选取幅值为 0 的直线型 AVDIF 解调算子, 运用能量特征比<sup>[15]</sup>确定 AVDIF 算子结构元素尺寸为 31。将故障信号进行 SWD 分解, 得到的 OC 分量如图 12。

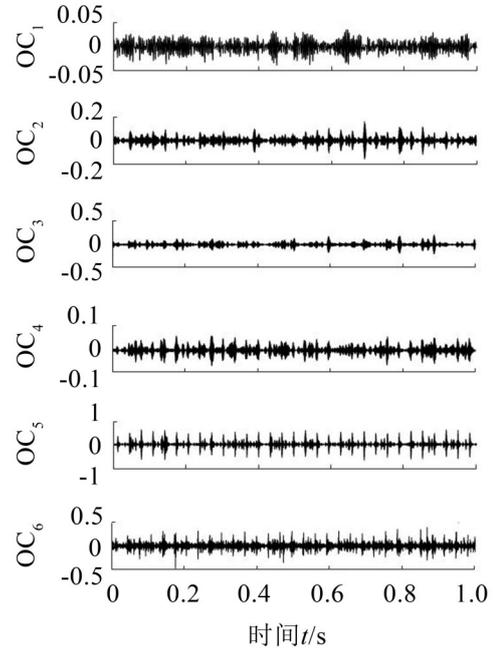


图 12 复合故障信号 OC 分量

对前两个分量分别进行包络解调和 AVDIF 解调得到 SWD-包络谱和 SWD-AVDIF 谱, 如图 13、图 14。

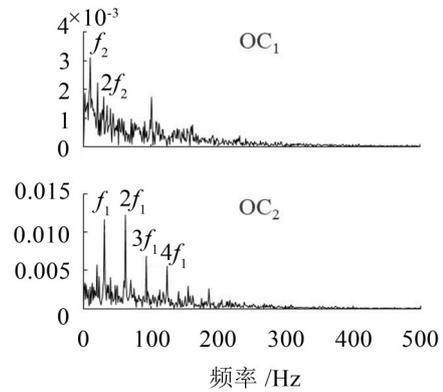


图 13 SWD-包络谱

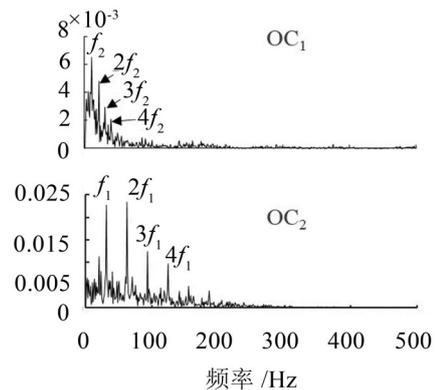


图 14 SWD-AVDIF 谱

由两种频谱图可以看出SWD可以实现复合故障信号分解,但相比SWD-包络谱,本文所述方法在解调时加强了冲击信号并削弱了随机噪声的干扰,得到的SWD-AVDIF谱降低了高频处噪声谱线的干扰,加强了低频部分故障特征。综上,充分说明了相比EMD-AVDIF法和SWD-包络法,本文所提出的方法更适合用来进行齿轮箱复合故障诊断。

## 4 结语

针对旋转机械复合故障诊断方法的不足,提出了一种基于SWD-AVDIF的齿轮箱复合故障诊断方法。

(1) 与EMD对比,分析了SWD方法在频率区分能力上的优越性,SWD在分解不同频率的等幅周期信号时,分解能力受频率比 $f$ 影响较小,能够有效分离频率相接近的谐波分量;

(2) 将SWD方法引入齿轮箱故障诊断领域,提出了SWD-AVDIF方法;

(3) 运用SWD-AVDIF对齿轮箱复合故障振动信号进行分析,仿真信号和实验信号结果表明该方法能够提取复合故障中的微弱信号,提高了故障诊断的准确性。

### 参考文献:

- [1] 张钰,陈璐,王晓峰,等. Xgboost在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. **噪声与振动控制**,2017,37(4):166-170.
- [2] PURUSHOTHAM V, NARAYANAN S, PRASAD S A N. Multi-fault diagnosis of rolling bearing elements using wavelet analysis and hidden Markov model based fault recognition[J]. **Ndt & E International**, 2005, 38(8): 654-664.
- [3] 王晓冬,何正嘉,瞿艳阳. 多小波自适应构造方法及滚动轴承复合故障诊断研究[J]. **振动工程学报**,2010,23(4):438-444.
- [4] 张文义,于德介,陈向民. 齿轮箱复合故障诊断的信号共振分量能量算子解调方法[J]. **振动工程学报**,2015,28(1):148-155.

- [5] HUANG N E, WU M L C, LONG S R, et al. A Confidence Limit for the Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectral Analysis[C]. **Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences**, 2003, 459(2037): 2317-2345.
- [6] 张俊红,李林洁,马文朋,等. EMD-ICA联合降噪在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. **中国机械工程**,2013,24(11):1468-1472.
- [7] 郑近德,程军圣. 改进的希尔伯特-黄变换及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. **机械工程学报**,2015,51(1):138-145.
- [8] TEODORESCU H M. A collective biological processing algorithm for ecg signals[C]// **Biosignals 2011 - Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Systems and Signal Processing**, Rome, Italy, 26-29 January. DBLP, 2011: 413-420.
- [9] J. Swarm decomposition: A novel signal analysis using swarm intelligence[J]. **Signal Processing**, 2017, 132: 40-50.
- [10] 梁霖,徐光华. 基于自适应复平移Morlet小波的轴承包络解调分析方法[J]. **机械工程学报**,2006,42(10):151-155.
- [11] 王建东,马增强,李延忠,等. 一种自适应调整滤波参数的轴承故障诊断方法[J]. **噪声与振动控制**,2017,37(1):137-141.
- [12] 石晓辉,阳新华,张向奎,等. 改进的形态差值滤波器在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. **重庆理工大学学报(自然科学)**,2018(1).
- [13] XIN Y I, AIHUA Q U. Matlab simulation analysis of power spectrum estimation based on welch method[J]. **Modern Electronics Technique**, 2010.
- [14] 潘海洋,郑近德,杨宇,等. 基于CELCD和MFVPMCD的智能故障诊断方法研究[J]. **电子学报**,2017,45(3):546-551.
- [15] 鄢小安,贾民平. 基于改进奇异谱分解的形态学解调方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. **机械工程学报**,2017,53(7):104-112.

(上接第125页)

- [7] 孙宁,李瑰贤. 随机振动信号的一种简单模拟计算方法[J]. **振动与冲击**,2000,19(2):50-51+63.
- [8] 蒋瑜,陶俊勇,王得志,等. 一种新的非高斯随机振动数值模拟方法[J]. **振动与冲击**,2012,31(19):169-173.
- [9] 关广丰,王海涛,熊伟. 随机振动功率谱再现自适应控制算法研究[J]. **振动与冲击**,2011,30(3):1-4.
- [10] 陈章位,于慧君. 振动控制技术现状与进展[J]. **振动与冲击**,2009,28(3):73-77+86.
- [11] 高亚奎,朱江,林皓. 飞行仿真技术[M]. 上海:上海交通大学出版社,2015:375-377.
- [12] 付金良. MIL-STD-810中振动应力经验公式的研究[J]. **航空标准化与质量**,1994,2:14-17.