

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.04.001

基于滑移辛几何模态分解的行星 齿轮箱故障诊断研究*

李 茜¹, 陈 晓², 王军龙³, 刘慧玲⁴

(1. 山西工程职业学院 汽车与轨道交通工程系, 山西 太原 030009; 2. 郑州工程技术学院
机电与车辆工程学院, 河南 郑州 450044; 3. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;
4. 东莞市星火齿轮有限公司, 广东 东莞 523723)

摘要:针对辛几何模态分解方法在分解复杂信号时的特征提取能力不足问题,提出了一种基于滑移辛几何模态分解(SSGMD)的故障诊断方法。首先,通过加窗的方式构造了滑移矩阵,以代替轨迹矩阵,增强了周期性特征提取能力;其次,对滑移矩阵进行了辛几何相似变换,获得了其特征值,将特征值所对应的特征向量经过重构,得到了其初始单分量矩阵;然后,对初始单分量矩阵做对角平均化,得到了一系列初始辛几何分量;最后,对这一系列初始辛几何分量进行拼接重组,得到了滑移辛几何分量(SSGCs),进而完成了对信号的自适应分解。研究表明:通过对仿真信号和行星齿轮箱实测信号进行实验分析,可知SSGMD利用滑移矩阵和辛几何相似变换不仅可以保护原始信号结构化信息不变,而且能充分提取原始信号的状态信息;与经典的信号分解方法相比,SSGMD方法能有效地对多分量信号进行分解,具有优越的特征提取能力。

关键词:行星齿轮箱;复杂信号分解;滑移辛几何模态分解;特征提取能力;信号自适应分解;滑移矩阵

中图分类号:TH132.41

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)04-0427-09

Fault diagnosis method of planetary gearbox based on sliding symplectic geometry mode decomposition

LI Qian¹, CHEN Xiao², WANG Jun-long³, LIU Hui-ling⁴

(1. Department of traffic engineering, Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan 030009, China;
2. School of Electromechanical Vehicle Engineering, Zhengzhou Institute Of Technology, Zhengzhou 450044, China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology,
Luoyang 471003, China; 4. Dongguan Spark Gear Co., Ltd., Dongguan 523723, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient feature extraction ability of the symplectic geometric mode decomposition method in decomposing complex signals, a fault diagnosis method based on slip symplectic geometric mode decomposition (SSGMD) was proposed. Firstly, the slip matrix was constructed by adding windows to replace the trajectory matrix, and the ability of periodic feature extraction was enhanced. Secondly, the eigenvalues were obtained by symplectic geometry similarity transformation of the slip matrix, and the initial single component matrix was obtained by reconstructing the eigenvector corresponding to the eigenvalues. Then, a series of initial symplectic geometry components were obtained by diagonally averaging the initial single component matrix. Finally, a series of initial symplectic geometry components were spliced and recombined to obtain sliding symplectic geometry components (SSGCs), and the adaptive decomposition of the signal was completed. The experimental results show that by analyzing the simulated signal and measured planetary gearbox signals, SSGMD can not only protect the structural information of the original signal, but also fully extract the state information of the original signal by using slip matrix

收稿日期:2021-11-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575161)

作者简介:李茜(1985-),女,山西太原人,硕士研究生,讲师,主要从事机械设计方面的研究。E-mail:muzhiyingya@163.com

and symplectic geometry similarity transformation. Comparing with the classical signal decomposition methods, the proposed SSGMD method can decompose multi-component signals effectively and has superior feature extraction ability.

Key words: planetary gearbox; complex signals decomposition; sliding symplectic geometry mode decomposition (SSGMD); feature extraction ability; signal adaptive decomposition; slip matrix

0 引 言

行星齿轮箱作为机械设备的重要组成部分,其具有体积小、承载能力大、传递平稳和寿命长等特点,被广泛应用于风力发电、工程机械等领域。

然而,行星齿轮箱在运行过程中,其关键部件往往承受着具有时变特性的载荷,容易出现无法避免的损伤;如果不能及时察觉这些故障信息,将留下巨大的安全隐患。因此,对行星齿轮箱展开早期故障检测的研究具有重要意义^[1,2]。

由于工作环境的复杂性,行星齿轮箱振动信号中通常包含大量的噪声及无关分量,将导致其故障特征频率淹没甚至丢失。

为了提升齿轮箱故障特征的提取能力,相关学者提出了一系列行星齿轮箱故障诊断方法^[3,4]。李康强等人^[5]提出了基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和能量算子的分析方法,并将其应用于行星齿轮箱故障诊断中。

EMD 作为一种基于数据驱动的信号分解方法,能够自适应地将一个多分量调幅调频信号分解为一系列本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)之和,且不需要预先设定基函数^[6]。然而,EMD 在包络插值过程中,存在如过包络、噪声鲁棒性及模态混叠等问题,难以适应行星齿轮箱复杂振动信号的分析^[7]。

为了解决 EMD 存在的问题, WU Zhao-hua 等人^[8]在 EMD 基础上提出了集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)的方法。朱静等人^[9]将 EEMD 与和声发射技术相结合,并将其应用于行星齿轮箱的故障诊断中,取得了良好的诊断效果。

EEMD 方法的原理是将白噪声添加至原始信号中,然后对所得信号进行 EMD 分解,并将多次迭代后的总体均值作为最后的结果。EEMD 虽然能有效解决模态混叠的问题,但是该方法在引入噪声后无法将其完全消除^[10]。

鉴于 EMD 及其改进方法的局限性,程军圣等人^[11]提出了局部特征尺度分解(local characteristic-scale decomposition, LCD)方法,其能够将一个复杂信号自适应地分解为若干个瞬时频率具有物理意义的内禀尺度分量(intrinsic scale component, ISC)之和。同

时, LCD 只需三次样条插值拟合极值点的包络线,降低了拟合误差,消除了部分噪声的影响。但是, LCD 方法中的模态混淆问题仍然存在^[12]。

近年来, WANG Ming-yue 等人^[13]结合小波变换的多尺度特性及 EMD 的自适应性,创造性地提出了经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)方法,该方法通过对傅里叶谱进行自适应频带分割,可以将原始故障信号分解为若干个调幅调频模态分量,具有较强的噪声鲁棒性。YUNHAN K 等人^[14]利用倒频谱协助 EWT,实现了对行星齿轮箱的有效诊断,证明了这种方法的优越性。但是, EWT 方法很难准确估计出各个信号分量的频段范围。

为了进一步提升故障特征信息提取能力,在辛几何的基础上, PAN Hai-yang 等人^[15]提出了辛几何模态分解(symplectic geometry mode decomposition, SGMD)方法。该方法能够自适应地将一个时间序列分解为若干个具有独立模态的辛几何分量(symplectic geometry component, SGC)。同时, SGMD 不仅能保护时间序列完整性,还能有效地消除噪声及无关分量。CHENG Jian 等人^[16]在 SGMD 的基础上对其进行了分量加权,实现了对行星齿轮箱的早期故障诊断。然而, SGMD 方法在分解过程中,特征识别能力不足。

为了增强周期性故障识别能力,笔者提出一种滑动辛几何模态分解(SSGMD)方法,其能够将时间序列自适应地分解为若干个滑动辛几何分量(sliding symplectic geometry component, SSGC)。在 SSGMD 分解过程中,首先通过加窗的方式构造滑动矩阵代替轨迹矩阵,使其增强周期性特征提取能力;其次,对滑动矩阵进行辛几何相似变换求出特征值,将特征值所对应的特征向量经过重构,得到初始单分量矩阵;然后,对初始单分量矩阵做对角平均化,得到一系列初始辛几何分量;最后,对这一系列初始辛几何分量重组,得到滑动辛几何分量,有效地解决 SGMD 特征识别能力不足的问题。

综上所述,笔者将在辛几何模态分解中,融入滑动矩阵,构造滑动矩阵代替轨迹矩阵,以增强周期性特征的提取能力,并通过辛几何相似变换自适应输出单分量信号。采用行星齿轮箱仿真信号和实际信号对所提方法的分解性能进行验证。

1 滑移辛几何模态分解方法

1.1 信号段矩阵构造

对于一个长度为 n 的信号 $\mathbf{X}(t) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 在该信号上添加一个长度为 k 的滑动窗口, 则该信号就可以被分成 $N = n/k$ 个随时间变化的信号段, 将所得信号段构造为一个矩阵, 即:

$$\mathbf{X}_i^k = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_k \\ x_{k+1} & x_{k+2} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n-k+1} & x_{n-k+2} & \cdots & x_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.2 滑移矩阵集合构造

取矩阵中的第 i 行 $\mathbf{X}_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 对其进行加窗。其中, 窗长度 $w = k/2$, 可得到滑移矩阵 $\mathbf{X}_i^w$ 为:

$$\mathbf{X}_i^w = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{i,1} & \mathbf{X}_{i,2} & \cdots & \mathbf{X}_{i,\frac{k}{2}} \\ \mathbf{X}_{i,2} & \mathbf{X}_{i,3} & \cdots & \mathbf{X}_{i,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{X}_{i,\frac{k}{2}+1} & \mathbf{X}_{i,\frac{k}{2}+2} & \cdots & \mathbf{X}_{i,k} \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用式(2), 可得到滑移矩阵集合:

$$\mathbf{M}_T = [\mathbf{X}_1^w, \mathbf{X}_2^w, \dots, \mathbf{X}_N^w] \quad (3)$$

1.3 QR 分解

对第 i 个滑移矩阵 $\mathbf{X}_i^w (i = 1, 2, \dots, N)$ 进行自相关分析, 可得到协方差矩阵 $\mathbf{A}$:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}_i^w)^T \mathbf{X}_i^w \quad (4)$$

利用协方差矩阵 $\mathbf{A}$ 构造 Hamilton 矩阵 $\mathbf{M}$, 其表达式为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & -\mathbf{A}^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

对 $\mathbf{M}$ 进行变换, 可得矩阵 $\mathbf{W} = \mathbf{M}^2$ 。进一步地, 构造辛正交矩阵 $\mathbf{P}$ 为:

$$\mathbf{P}^T \mathbf{W} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{R} \\ 0 & \mathbf{R}^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{B}$ —上三角矩阵。

为了求解辛正交矩阵 $\mathbf{P}$, 构造一个 Householder 矩阵 $\mathbf{Q}$ 。因此, 矩阵 $\mathbf{H} = [\mathbf{Q}, 0; 0, \mathbf{Q}]$ 也是 Householder 矩阵。根据辛几何定理, 矩阵 $\mathbf{P}$ 可以被矩阵 $\mathbf{H}$ 替代。

在辛几何相似变换中, 矩阵 $\mathbf{Q}$ 保留了原始结构特征, 通过 QR 分解得到特征向量矩阵 $\mathbf{Q}$ 。

利用 $\mathbf{Q}$ 与滑移矩阵 $\mathbf{X}_i^w$ 构造系数矩阵 $\mathbf{S}$:

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{Q}_i^T \mathbf{X}_i^w \quad (7)$$

然后, 对转换系数矩阵变换, 得到重构矩阵 $\mathbf{Z}$:

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{Q}_i \mathbf{S}_i \quad (8)$$

1.4 对角平均化

对于任意矩阵 $\mathbf{Z}_i$, 定义其元素为 $m \times d (m = k/2 + 1)$ $z_{i,j}$ 矩阵, 对任意重构矩阵 $\mathbf{z}_{i,j}$ 进行对角平均化, 其转换表达式为:

$$y_k = \begin{cases} \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k z_{p,k-p+1}^* & 1 \leq k \leq d^* \\ \frac{1}{d^*} \sum_{p=1}^{d^*} z_{p,k-p+1}^* & d^* \leq k \leq m^* \\ \frac{1}{n-k+1} \sum_{p=k-m^*+1}^{n-m^*+1} z_{p,k-p+1}^* & m^* \leq k \leq n \end{cases} \quad (9)$$

对角平均化后, 得到 d 个初始辛几何分量 y_k 。

为了滑移重组更有效率, 对初始辛几何分量进行预重组。设定一终止条件为:

$$NMSE = \frac{\sum_{e=1}^n \mathbf{Y}^h(e)}{\sum_{e=1}^n \mathbf{X}_i^w(e)} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{Y}^h(e) - \mathbf{Y}^h$ 的归一化均方差; $\mathbf{X}_i^w(e) - \mathbf{X}_i^w$ 的归一化方差。

可以得出归一化均方差 (normalized mean squared error, NSEM) 比值。当比值小于设定阈值 $r = 0.3$ 时, 则分解结束; 否则, 继续进行迭代分解。

1.5 滑移分量组合

对滑移矩阵集合 $\mathbf{M}_T$ 进行对角平均, 得到分量矩阵集合:

$$\mathbf{Y}_i = \{\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_N\} \quad (11)$$

选取 $\mathbf{Y}_i$ 中各矩阵中第 e 个初始分量 y_e , 通过式 (12) 进行拼接重组以得到滑移辛分量, 即:

$$SSGC_e = [\mathbf{Y}_1(y_e), \mathbf{Y}_2(y_e), \dots, \mathbf{Y}_N(y_e)] \quad (12)$$

式中: e —所得滑移辛分量的模态个数。

2 仿真信号分析

为了检验所提方法的有效性, 笔者采用公式来模拟太阳轮的故障振动信号, 即:

$$x = (1 - 0.2 \cos(2\pi f_s^r t)) (1 + A \cos(2\pi f_s t)) \cdot \cos(2\pi f_m t + B \sin(2\pi f_s t)) \quad (13)$$

式中: f_s^r —太阳轮的绝对旋转故障频率; f_s —太阳轮的相对旋转故障特征频率; f_m —啮合频率; A, B —振幅。

其中, 模型参数分别取值为 $f_s^r = 10$ Hz、 $f_s = 36$ Hz、 $f_m = 500$ Hz、 $A = B = 1$ 。

同时, 笔者设置采样频率为 $f = 1\,000$ Hz。

对不超过 x 添加信噪比为 -5 dB 的高斯白噪声, 含噪仿真信号时域波形如图 1 所示。

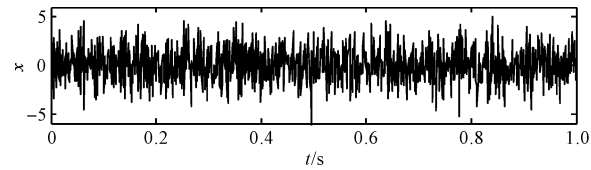


图 1 太阳轮故障仿真信号时域波形

由图 1 可知:冲击信号的特征信息被噪声完全淹没,无法判断该信号的状态类型。

包络谱作为齿轮故障诊断的有效工具,常用于判断齿轮是否具有故障。包络谱可以通过希尔伯特变换和时域信号的频谱分析得到,用相对旋转频率代替啮合频率和边频,以此作为故障特征频率来判别齿轮状态。

笔者对图 1 所示的故障信号进行包络谱分析,其结果如图 2 所示。

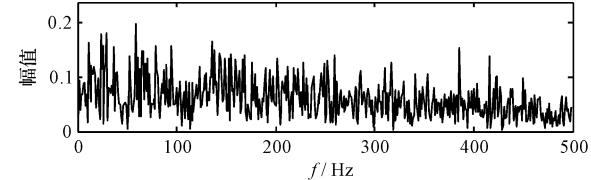


图 2 仿真信号包络谱

由图 2 可知:故障频率(36 Hz)及其倍频周围存在较多干扰成分,导致其特征不明显。为了获取仿真信号的故障特征频率,笔者采用 SSGMD 方法对太阳轮故障仿真信号进行分解,以得到具有故障信息的分量信号,如图 3 所示。

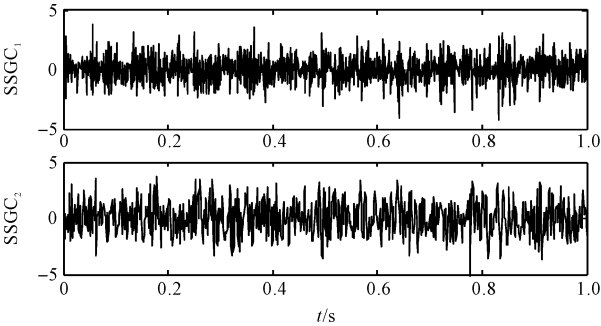


图 3 仿真信号 SSGMD 分解所得的分量

由图 3 可知:所得分量具有一定的调制特性,可以根据该时域信号初步判断该信号的状态。

为了进一步准确判断该信号的状态,笔者对图 3 分量信号进行包络谱分析,结果如图 4 所示。

由图 4 可知:在第一个分量的包络谱中,故障特征频率明显。因此,可以判定该信号为故障信号。其原因在于,SSGMD 通过加窗的方式构造滑移矩阵,增强了周期性特征提取能力。同时,对滑移矩阵进行辛几何相似变换求出特征值,不仅能保护时间序列完整性,还能够有效消除噪声及无关分量,获得具有太阳轮故障信息的分量信号。

为了说明 SSGMD 方法的优越性,笔者将该方法

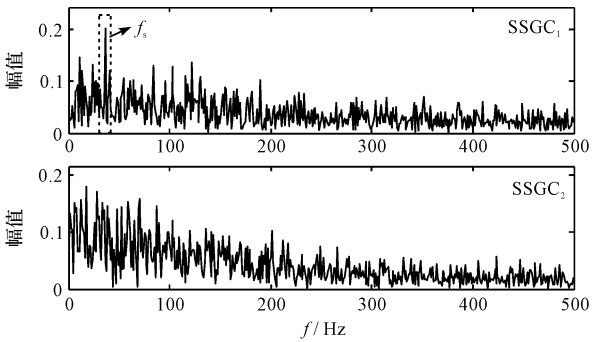


图 4 SSGMD 分量的包络谱

与 EMD、LCD 和 SGMD 进行对比分析。

首先,采用 EMD 对仿真信号进行分解,并做包络谱分析。仿真信号 EMD 分解所得的分量如图 5 所示。

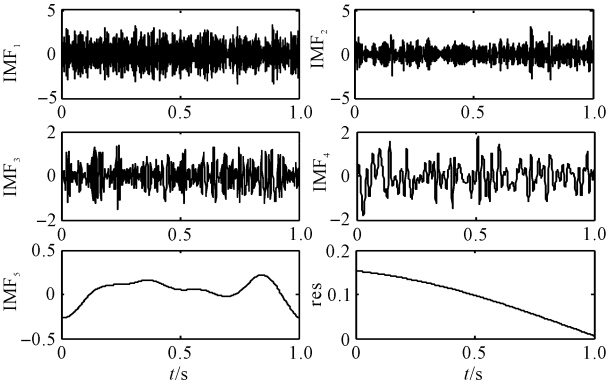


图 5 仿真信号 EMD 分解所得的分量

由图 5 可知:所得分量的调制特性并不明显,无法根据该时域信号判断该信号的状态类型。

EMD 分量的包络谱如图 6 所示。

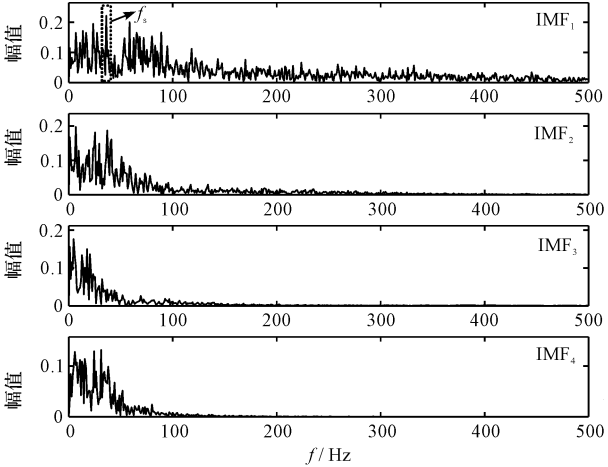


图 6 EMD 分量的包络谱

图 6 为 IMF₁-IMF₄ 的包络谱,虽然可以从第一个分量 IMF₁ 对应的包络谱中检测到特征频率,但是其并不明显。其他 3 个分量 (IMF₂-IMF₄) 的包络谱中,存在较多的干扰成分,导致故障特征频率完全丢失。

接着,笔者采用 LCD 方法提取仿真信号的特征信息,为不失一般性,选择所得时域波形图中的前 4 个分量进行包络谱分析。

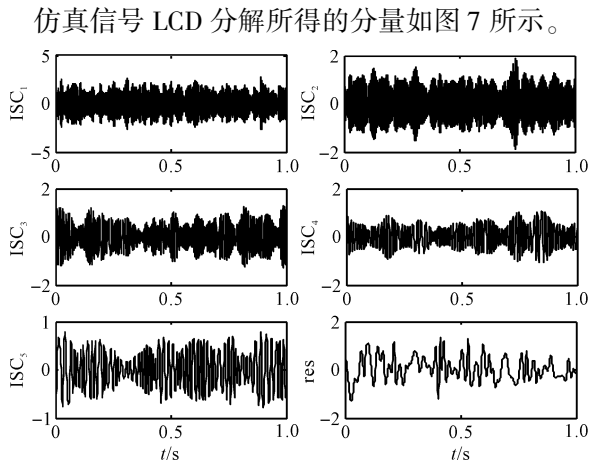


图 7 仿真信号 LCD 分解所得的分量

从图 7 可以看出:所得分量的调制特性并不明显,也无法根据该时域信号判断该信号的状态类型。

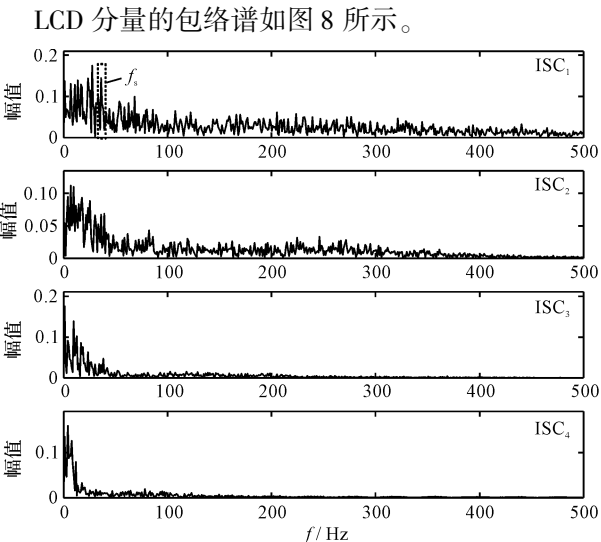


图 8 LCD 分量的包络谱

由图 8 可知:只有 ISC_1 分量的包络谱中可以观察到故障频率,但是干扰噪声仍然较大。因此,从 LCD 分解结果无法判断该信号状态。

最后,笔者采用 SGMD 方法对仿真信号进行分解,仿真信号 SGMD 分解所得的分量如图 9 所示。

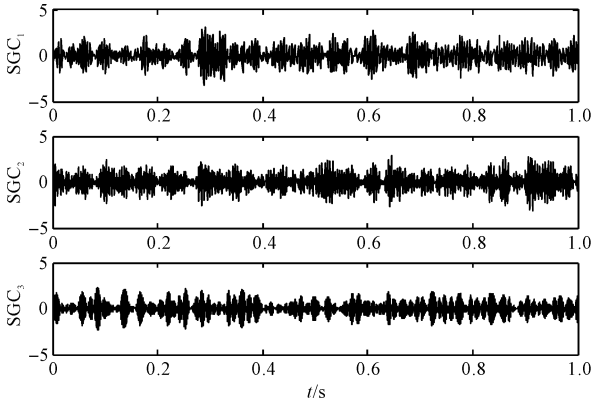


图 9 仿真信号 SGMD 分解所得的分量

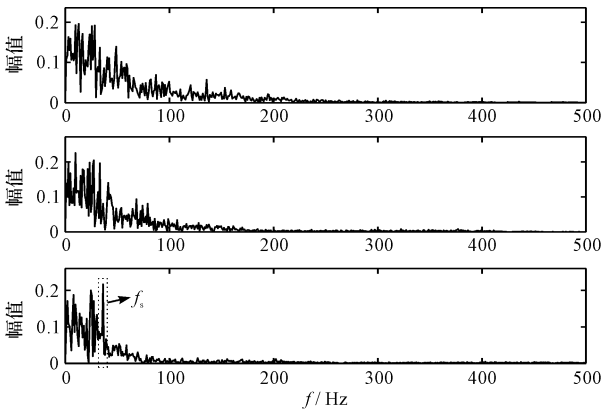


图 10 SGMD 分量的包络谱

由图 10 可知:仅有 IMF_3 对应的包络谱中含有较为明显的故障频率成分,而前两个分量包络谱故障频率并不明显。

因此,通过 SSGMD 方法与其他 3 种方法 (EMD、LCD 及 SGMD) 所得分量的包络谱结果对比可知:采用 SSGMD 方法得到的太阳轮故障特征频率及其倍频更加明显,且噪声干扰较少。

该结果验证了 SSGMD 方法的有效性。

3 实验及结果分析

为了进一步验证所提方法的有效性,笔者将 SSGMD 方法用于行星齿轮箱实测数据中,进行故障分析。动力传动故障诊断实验台如图 11 所示。



图 11 动力传动故障诊断综合试验台

实验中的行星轮数量为 4,太阳轮为 28,行星轮齿数为 36,齿圈齿数为 100。

在实验过程中,为了模拟太阳轮失效,笔者在行星齿轮箱太阳轮根部加工出裂纹,裂纹深度为 $0.5\text{ mm}^{[17]}$ (太阳轮模数为 1 mm 、压力角为 20° 、齿宽为 10 mm)。裂纹会降低轮齿的刚度,进而产生故障冲击。因此,可以更好地模拟太阳轮的早期故障失效形式。

同时,笔者在输出端施加 0.5 V 的转矩负载,驱动电机转速为 10 Hz (太阳轮的旋转频率)。

实验中,笔者将加速度传感器安装在行星齿轮^[18,19]箱箱体上,利用 3 个加速度传感器,将 X-Y-Z 轴振动信号传输到数字采集仪上。采用加速度传感器采

SGMD 分量的包络谱如图 10 所示。

集行星齿轮箱的振动信号,其采样频率为 $f=3\,840\text{ Hz}$ 。

太阳轮故障频率为:

$$\begin{cases} f_c = \frac{f_{sr}Z_s}{Z_s + Z_r} \\ f_m = f_c Z_r \\ f_s = \frac{f_m}{Z_s} N \end{cases} \quad (14)$$

式中: f_{sr} —太阳轮的绝对旋转故障频率; Z_s, Z_r, N —太阳轮、齿圈和行星轮的齿数。

笔者通过计算得到故障频率 $f_s=31.06\text{ Hz}$ 。

实验与分析过程如下:

- (1) 利用加速度传感器拾取行星齿轮箱振动信号,从时域及包络谱初步分析信号的状态类型;
 - (2) 采用信号分析方法对振动信号进行分解,并完成分量信号的包络谱分析;
 - (3) 根据包络谱信息判断所分析信号的状态类型。
- 具有裂纹故障的太阳轮振动波形图如图 12 所示。

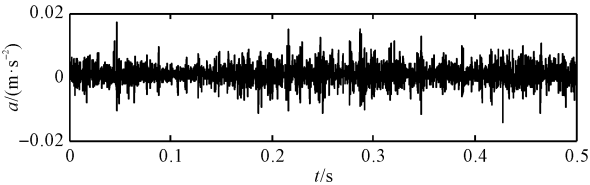


图 12 原始信号时域波形图

从图 12 可以看出:在时域波形图中无法直接观察到信号的特征信息。

原始信号的包络谱如图 13 所示。

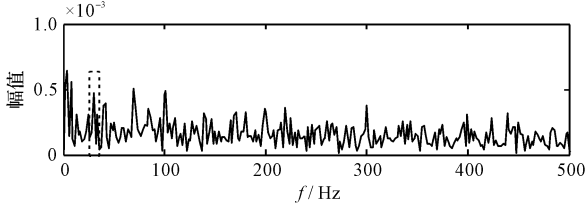


图 13 原始信号的包络谱

从图 13 可以看出:虽然故障频率处具有一条明显的谱线,但是其干扰频率也较为明显,很难准确判断该信号的状态。

为了说明 SSGMD 方法的优越性,笔者将该方法与 EMD、LCD 和 SGMD 进行对比分析。

首先,笔者采用 EMD 方法提取振动信号的故障特征频率。太阳轮裂纹故障时域信号经 EMD 分解后,所得分量信号的时域波形如图 14 所示。

由图 14 可知:分量信号的时域波形图难以判断该信号的状态类型。

笔者进一步对 IMF_1 - IMF_3 进行包络谱分析,所得结果如图 15 所示。

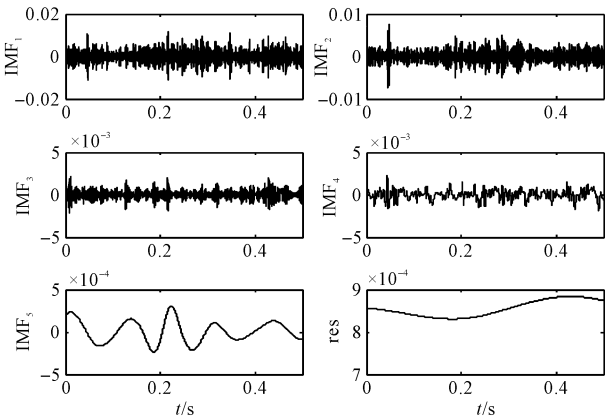


图 14 EMD 分量图

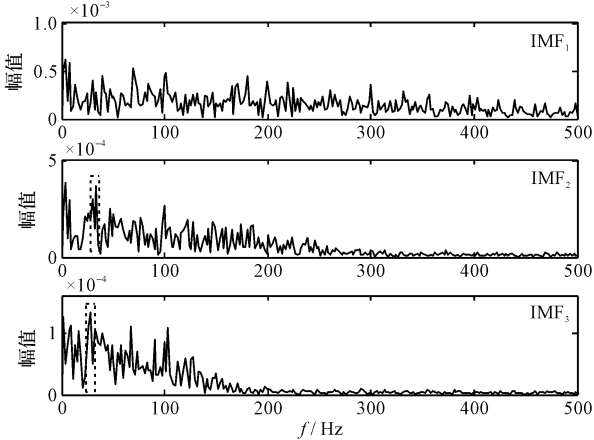


图 15 EMD 分量的包络谱

由图 15 可知:3 个分量对应的包络谱中,由于无关分量及噪声的影响,EMD 无法有效提取到太阳轮故障特征频率。

接着,笔者采用 LCD 方法进行对比分析,经 LCD 分解后,分解结果如图 16 所示。

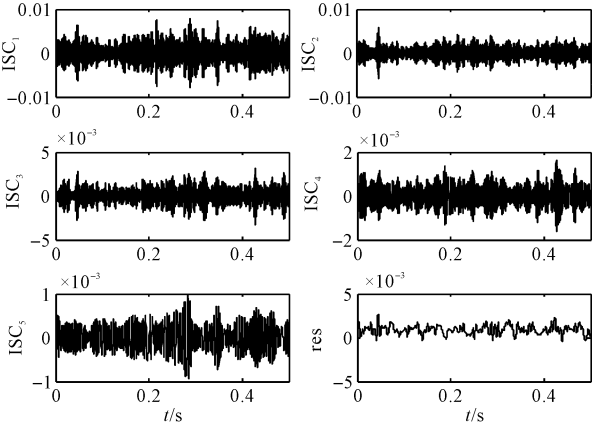


图 16 LCD 分解所得的分量

从图 16 可以看出:所得分量无法判断行星齿轮箱的状态。

笔者进一步对前 3 个分量 ISC_1 - ISC_3 进行包络分析,所得包络谱如图 17 所示。

由图 17 可知:与 EMD 结果类似,LCD 仅能够在

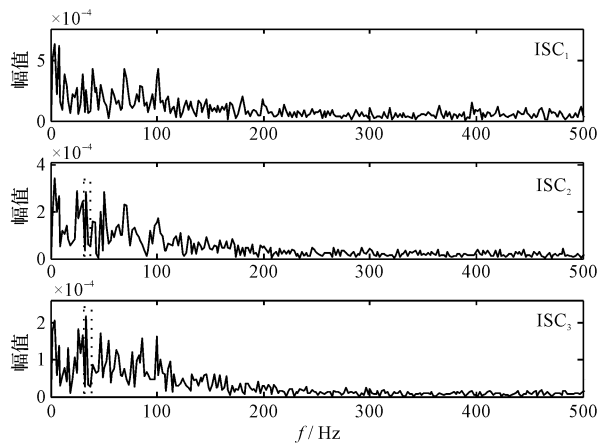


图 17 LCD 分量的包络谱

ISC₂-ISC₃ 的包络谱中提取到故障频率,但是干扰频率成分也较多,掩盖了故障频率。

然后,笔者采用 SGMD 方法对实测太阳轮故障信号进行分解,并选取前两个分量进行包络谱分析,所得 SGMD 分解所得的分量如图 18 所示。

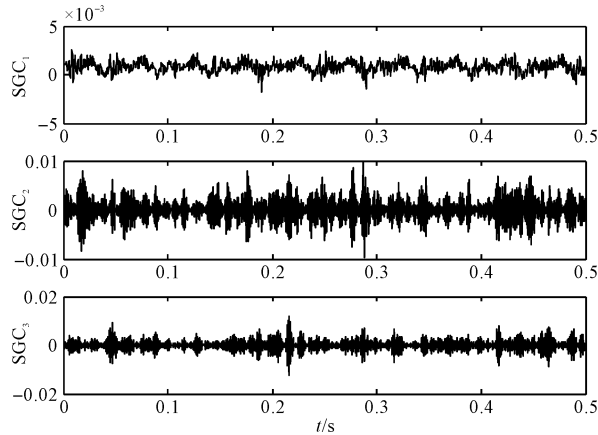


图 18 SGMD 分解所得的分量

所得 SGMD 分量的包络谱如图 19 所示。

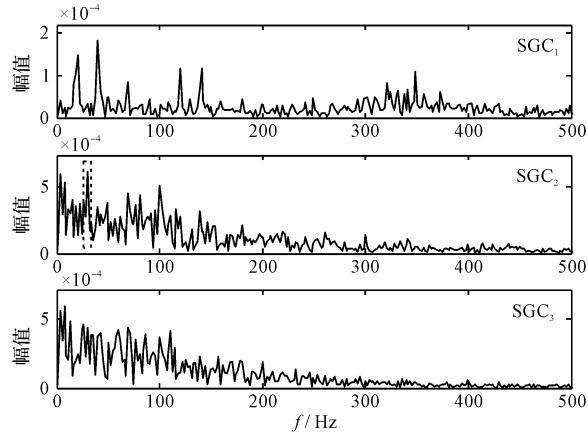


图 19 SGMD 分量的包络谱

由图 19 可知:虽然包络谱中具有明显的故障信息,但是故障特征频率周围干扰较多。

最后,笔者采用所提 SSGMD 方法提取实测信号的故障信息。

在实测信号中添加滑动窗口过程,窗长度 k 设置为 1 024,其分量时域波形如图 20 所示。

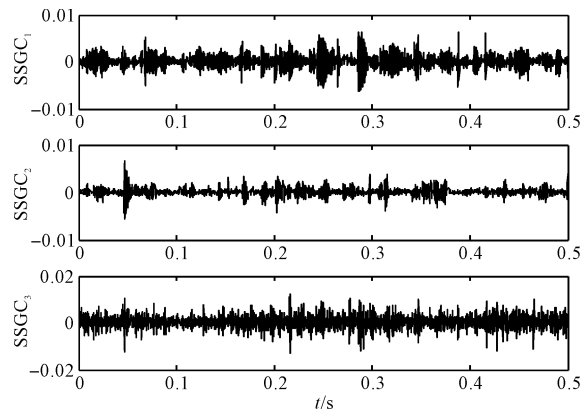


图 20 SSGMD 分量图

从图 20 可以看出:所得分量具有很强的调制信息。究其原因在于,通过加窗获得滑移矩阵,增强了信号特征,保护了原始信号的结构信息。

笔者进一步对所得分量进行包络分析,结果如图 21 所示。

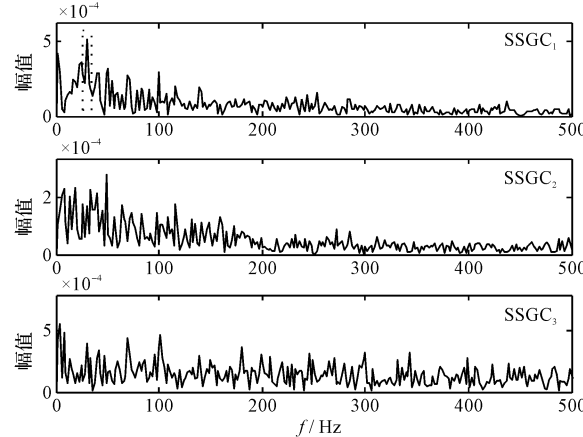


图 21 SSGMD 分量的包络谱

从图 21 中可以清楚地观测到故障特征频率 f_s 。由此可以证明,SSGMD 方法具有较强的太阳轮故障特征提取能力。

为了更好地说明 SSGMD 方法的有效性,笔者拟在同等条件下,开展太阳轮不同故障程度的故障诊断实验。

实验选用的太阳轮裂纹深度为 0.6 mm。同样,实验选择 EMD、LCD 及 SGMD 方法进行对比分析,采用 SSGMD、EMD、LCD 及 SGMD 方法分别对采集的振动信号进行分解,并给出包络谱。

SSGMD 分量的包络谱如图 22 所示。

EMD 分量的包络谱如图 23 所示。

LCD 分量的包络谱如图 24 所示。

SGMD 分量的包络谱如图 25 所示。

由图(22~25)可以看出:采用上述 4 种方法得到的分量包络谱效果都较好,均可提取太阳轮故障信息;

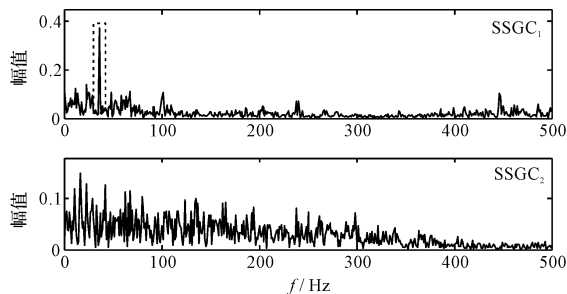


图 22 SSGMD 分量的包络谱

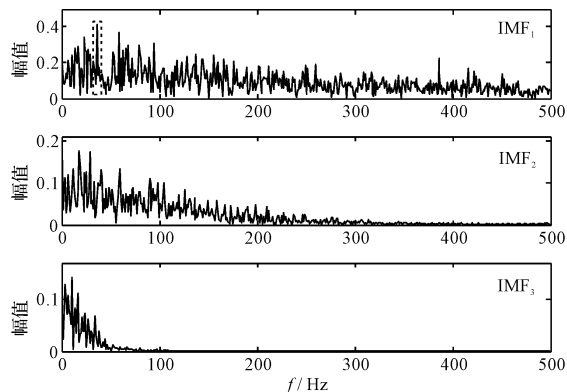


图 23 EMD 分量的包络谱

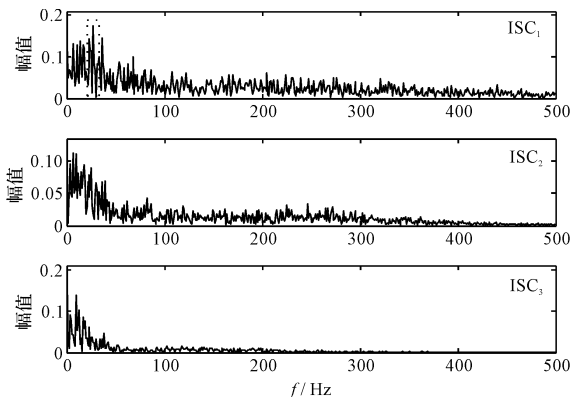


图 24 LCD 分量的包络谱

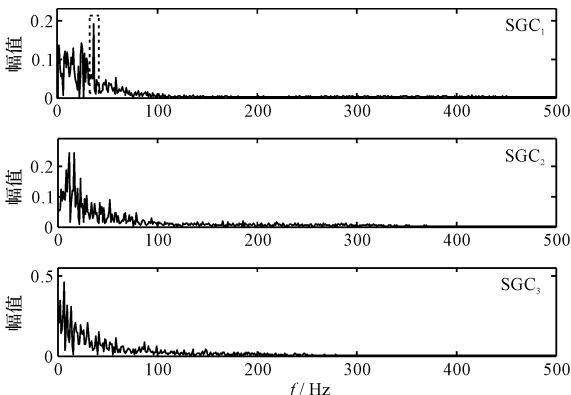


图 25 SGMD 分量的包络谱

其中,SSGMD 的特征信息提取能力最佳,分量包络谱中干扰频率最少。

由此可以再次证明,SSGMD 方法具有较强的太阳轮故障特征提取能力。

终上所述,相比于 EMD、LCD 及 SGMD,SSGMD 方法能够有效地提取太阳轮故障特征频率;也进一步验证了滑移辛几何模态分解方法的有效性和优越性。

4 结束语

为了解决辛几何模态分解方法在分解复杂信号时的特征提取能力不足问题,笔者提出了一种基于滑移辛几何模态分解(SSGMD)的故障诊断方法。

笔者首先通过构造滑移矩阵,并结合 SGMD 提出了滑移辛几何模态分解方法,最后将该方法应用于行星齿轮箱故障诊断中。该研究得到的结论如下:

(1)通过加窗的方式获得滑移矩阵,有效地增强了原始信号的结构化信息;与 SGMD 相比,SSGMD 具有明显的特征提取能力;

(2)利用辛几何相似变换获取滑移矩阵特征值,不仅能保护时间序列完整性,还能够有效消除噪声及无关分量;

(3)将 SSGMD 应用于行星齿轮箱故障诊断中,通过实验得出的结果表明,SSGMD 能有效提取太阳轮故障特征频率,证明 SSGMD 方法的可行性和有效性。

上述研究结果表明,SSGMD 方法在行星齿轮箱故障诊断中具有优越的特征提取能力。但是,SSGMD 仍然存在一些不足之处,如在分解复杂信号时,SSGMD 存在端点效应问题。

因此,在下一步的研究工作中,笔者将针对端点效应问题,以此来进一步探索 SSGMD 方法原理,以提高该算法的分解性能。

参考文献 (References):

- [1] 胡芑庆,陈徽鹏,程 哲,等. 基于经验模态分解和深度卷积神经网络的行星齿轮箱故障诊断方法[J]. 机械工程学报,2019,55(7):9-18.
- [2] 金 棋,王友仁,王 俊. 基于深度学习多样性特征提取与信息融合的行星齿轮箱故障诊断方法[J]. 中国机械工程,2019,30(2):196-204.
- [3] 丁 闯,张兵志,冯辅周,等. 局部均值分解和排列熵在行星齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击,2017,36(17):55-60.

(下转第 443 页)

本文引用格式:

李 茜,陈 晓,王军龙,等. 基于滑移辛几何模态分解的行星齿轮箱故障诊断研究[J]. 机电工程,2022,39(4):427-434,443.

LI Qian, CHEN Xiao, WANG Jun-long, et al. Fault diagnosis method of planetary gearbox based on sliding symplectic geometry mode decomposition[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022,39(4):427-434,443.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

[10] 韩占忠,王敬,兰小平. 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京理工大学出版社,2004.

[11] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 1版. 北京:清华大学出版社,2004.

[12] 朱祖超. 低比转速高速离心泵的理论及设计应用[M]. 1版. 北京:机械工业出版社,2008.

[13] 沈天耀. 离心叶轮的内流理论基础[M]. 杭州:浙江大学出版社,1986.

[14] 张克危. 流体机械原理[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

[15] 张金凤. 带分流叶片离心泵全流场数值预报和设计方法研究[D]. 江苏:江苏大学机械工程学院,2007.

[16] 丁成伟. 离心泵与轴流泵[M]. 北京:机械工业出版社,1981.

[17] 唐辉,何枫. 离心泵内流场的数值模拟[J]. 水泵技术,2002(2):3-9.

[18] 李文广. 特低比转速离心泵叶轮内部流动分析[J]. 水泵技术,2005(1):1-6.

[19] 朱保林. 离心泵内流三维数值模拟[D]. 杭州:浙江工业大学机电学院,2005.

[20] 贾军军,尹管彬,杨刚. 蓄能器壳体翻板旋压收口工艺数值模拟[J]. 压力容器,2021,38(8):81-86.

[21] 邱福寿,王国涛,彭辉. 含凹坑缺陷稠油热采井口用四通管的冲蚀数值模拟研究[J]. 压力容器,2021,38(2):28-36,54.

[22] 刘厚林,毛艳虹,王勇,等. 基于 Open FOAM 的导叶式离心泵数值模拟研究[J]. 流体机械,2022,50(1):37-44.

[23] 王名扬,徐增丙,林辉,等. 混流式喷水推进泵压力脉动数值分析[J]. 流体机械,2021,49(10):7.

[24] 杨敏官. 离心泵叶轮中固液两相流动的数值模拟[J]. 水泵技术,2005(4):31-34.

[编辑:雷敏]

本文引用格式:

董鹏敏,赵天义,华超,等. 原油外输泵的内流场动力学仿真分析[J]. 机电工程,2022,39(4):435-443.

DONG Peng-min, ZHAO Tian-yi, HUA Chao, et al. Dynamic simulation analysis of flow field in crude oil centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022,39(4):435-443.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第434页)

[4] FENG Zhi-peng, GAO Ao-ran, LI Kang-qiang, et al. Planetary gearbox fault diagnosis via rotary encoder signal analysis[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**,2021,149:107325.

[5] 李康强,冯志鹏. 基于 EMD 和能量算子的模态参数识别在行星齿轮箱中的应用[J]. 振动与冲击,2018,37(8):1-8.

[6] 郑近德,潘海洋,程军圣,等. 基于自适应经验傅里叶分解的机械故障诊断方法[J]. 机械工程学报,2020,56(9):125-136.

[7] 李东东,周文磊,郑小霞,等. 基于自适应 EEMD 和分层分形维数的风电机组行星齿轮箱故障检测[J]. 电工技术学报,2017,32(22):233-241.

[8] WU Zhao-hua, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. **Advances in Adaptive Data Analysis**,2009,1(1):1-41

[9] 朱静,邓艾东,李晶,等. 基于改进 EEMD 和声发射技术的行星齿轮箱故障诊断研究[J]. 噪声与振动控制,2018,38(S2):657-660.

[10] 程正阳,王荣吉,潘海洋. 辛几何模态分解方法及其分解能力研究[J]. 振动与冲击,2020,39(13):27-35.

[11] 程军圣,郑近德,杨宇. 一种新的非平稳信号分析方法——局部特征尺度分解法[J]. 振动工程学报,2012,25(2):215-220.

[12] WU Jia-teng, YANG Yu, YANG Xing-kai, et al. Fault feature analysis of cracked gear based on LOD and analytical-FE method[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**,2018,98:951-967.

[13] WANG Ming-yue, SHENG Xiao-zhen. Combining empirical wavelet transform and transfer matrix or modal superposition to reconstruct responses of structures subject to typical excitations[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**,2022,163:108162.

[14] YUNHAN K, JONG M H, KYUMIN N, et al. Cepstrum-assisted empirical wavelet transform (CEWT)-based improved demodulation analysis for fault diagnostics of planetary gearboxes[J]. **Measurement**,2021,183:109796.

[15] PAN Hai-yang, YANG Yu, LI Xin, et al. Symplectic geometry mode decomposition and its application to rotating machinery compound fault diagnosis[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**,2019,114:189-211.

[16] CHENG Jian, YANG Yu, LI Xin, et al. An early fault diagnosis method of gear based on improved symplectic geometry mode decomposition[J]. **Measurement**, 2020, 151: 107140.

[17] 黄金. 基于刚柔耦合模型的行星齿轮箱太阳轮裂纹与断齿及其混合故障的仿真研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2019.

[18] 胡冬益,娄军强,罗利敏,等. 精密 RV 减速器输入齿轮轴振动分析[J]. 机械制造,2021,59(2):17-20,78.

[19] 刘续壮,吴伟,王磊,等. 基于 KISSsoft 行星减速轮系的修形优化设计[J]. 机电工程技术,2021,50(3):5.

[编辑:雷敏]