

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.03.012

# CEEMDAN 辅助快速谱峭度的 滚动轴承故障诊断方法

朱强<sup>1</sup>, 吴芮<sup>2</sup>, 慎明俊<sup>2</sup>, 张守京<sup>2\*</sup>

(1. 西安标准工业股份有限公司, 陕西 西安 710600; 2. 西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:**为解决集合经验模态(EEMD)存在分量重构误差大和提取的故障特征不明显问题,课题组提出一种自适应噪声完备集合经验模态分解(CEEMDAN)辅助快速谱峭度的故障诊断方法。首先采用CEEMDAN将故障信号分解为多个IMF分量,计算分量的谱峭度值,选择峭度和相关度最大的分量进行重构;然后通过快速谱峭度图确定最大共振频带,进行带通滤波分析,获得故障信息;最后采用某滚动轴承实验数据分别对内圈故障和外圈故障进行实验分析。结果表明:与原始故障信号相比,该方法获得的包络谱更清晰,故障频率更明显,内圈故障频率为162 Hz,外圈故障频率为107 Hz。该方法提取故障特征突出,可以得到有效的故障频带。

**关键词:**故障诊断;滚动轴承;集合经验模态分解;快速谱峭度

中图分类号:TH133 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)03-0074-07

## Rolling Bearing Fault Diagnosis Method Assisted by CEEMDAN with Fast Spectral Kurtosis

ZHU Qiang<sup>1</sup>, WU Rui<sup>2</sup>, SHEN Mingjun<sup>2</sup>, ZHANG Shoujing<sup>2\*</sup>

(1. Xi'an Typical Industries Co., Ltd., Xi'an 710600, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of large component reconstruction errors and inobvious fault features extracted from EEMD, an adaptive noise complete ensemble empirical mode decomposition (CEEMDAN) assisted fast spectral kurtosis fault diagnosis method was proposed. Firstly, the fault signals were decomposed by CEEMDAN to obtain several IMF components, and the fast spectral kurtosis values of the components were calculated. The effective components were screened out for reconstruction by using the kurtosis maximum criterion and relevance. Then, the signal was reconstructed by fast spectral kurtosis processing to obtain the maximum resonance frequency band, and then analyzed by bandpass filtering to obtain the fault information. Finally, the inner and outer ring faults were analyzed by using the experimental data of a rolling bearing. The results show that compared with the original fault signal, the envelope spectrum obtained by this method was clearer and the fault frequency was more obvious, the inner ring fault frequency was 162 Hz, the outer ring fault frequency was 107 Hz. This method can extract prominent fault features and obtain effective fault frequency bands.

**Keywords:** fault diagnosis; rolling bearing; EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition); fast spectral kurtosis

收稿日期:2021-12-13;修回日期:2022-01-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1707205)。

第一作者简介:朱强(1970),男,天津人,硕士,高级工程师,主要研究方向为工业缝制设备自动化、智能化和网络化。通信作者:张守京(1976),男,辽宁葫芦岛人,博士,副教授,主要研究方向为智能制造技术及系统、智慧物流与柔性生产调度等。E-mail:zhangshoujing@xpu.edu.cn

随着工业设备的高速智能化发展,滚动轴承作为机械设备中的重要零部件,在集成度高的复杂运行环境中极易发生故障,从而给机械设备造成严重影响。因此,对滚动轴承进行故障诊断,减少突发故障对整个机械设备很有必要。

故障诊断的核心是提取能紧密表征轴承状态的故障特征,而集合经验模态分析(EEMD)作为有效分解振动信号的工具被广泛运用。胡爱军等<sup>[1]</sup>将 EEMD 和峭度最大准则相结合筛选出有效分量,再利用包络解调方法进行滚动轴承故障诊断;田晶等<sup>[2]</sup>将 EEMD 与空域相关降噪联合实现滚动轴承的故障诊断;李利品等<sup>[3]</sup>对 EEMD 算法进行了改进并将其应用在多相流检测中;周将坤等<sup>[4]</sup>建立了 EMD 与 BP 神经网络结合的故障诊断系统;师少达等<sup>[5]</sup>用细菌觅食优化算法来优化 EEMD 的参数,以轴承为例验证了该方法的有效性。EEMD 能解决模态混合问题,但无法从不明显的早期故障信号中提取出有效的故障特征。自适应噪声完备经验模态分解(CEEMDAN)在 EEMD 的基础上成对添加反向的白噪声信号,可以提高分解分量的完备性,同时降低信号重构时产生的误差。陈世鹏等<sup>[6]</sup>采用 CEEMDAN 分解本征模态分量,再利用多核相关向量机进行故障诊断;慎明俊等<sup>[7]</sup>将 CEEMD 与 3 点对称差分算子相结合用于滚动轴承故障诊断;王海龙等<sup>[8]</sup>提出一种 CEEMDAN 与小波包联合降噪的优化方法。

谱峭度方法被广泛应用于滚动轴承故障诊断中,赵妍等<sup>[9]</sup>用谱峭度算法分析时频特征,然后结合包络解调实现了异步电机的故障诊断;张龙等<sup>[10]</sup>提出一种基于包络谱带通峭度的改进谱峭度方法,并应用于滚动轴承的故障诊断中。快速谱峭度作为谱峭度的改进方法,可减小峭度检测的不确定性,任学平等<sup>[11]</sup>将变分模态分解和快速谱峭度联合有效提取了滚动轴承的早期故障特征;王海明等<sup>[12]</sup>利用快速谱峭度对振动信号进行滤波,再结合正交匹配追踪算法完成了滚动轴承的故障诊断。

笔者提出一种 CEEMDAN 辅助快速谱峭度的滚动轴承故障诊断方法,将 CEEMDAN 分解信号的自适应性和完备性与快速谱峭度高效识别故障区域相结合,提高滚动轴承故障诊断的效率和精确性。

## 1 基本理论分析

### 1.1 CEEMDAN 理论基础

自适应噪声完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)<sup>[13]</sup>是从改进经验模态分解(EMD)和集合经验模态分解(EEMD)算法演变而来的新算法,是在 EEMD 的基础上加入自适应白噪声进一步减小信号分解产生的模态混叠,可以解决 EEMD 在加入白噪声后分解失去完备性、产生重构误差的问题<sup>[14]</sup>。

假设原始振动信号为  $x(t)$ , 笔者定义分解获得的第  $k(k=1, 2, 3, \dots, K)$  模态分量为  $I_{MF,k}, N_0^i(t)$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 是服从  $N(0, 1)$  分布的白噪声,  $\partial_k$  为第  $k+1$  个模态分量加入白噪声后的幅值,  $L_k(\cdot)$  为 EMD 分解得到的第  $k$  个模态分量。CEEMDAN 算法分解过程为:

1) 对信号  $x^i(t) = x(t) + \partial_0 N_0^i(t)$  进行 EMD 分解并对其分量求平均得到

$$I_{MF,1} = \frac{1}{N} I_{MF,1}^i \quad (1)$$

2) 则第 1 个残余分量为  $r_1(t) = x(t) - I_{MF,1}$ ; 对混合信号  $x^1(t) = r_1(t) + \partial_1 L_1(N_0^i(t))$  进行第 2 次分解, 得到第 2 个  $I_{MF,2}$  分量:

$$I_{MF,2} = \frac{1}{N} \sum_i^N L_1[r_1(t) + \partial_1 L_1(N_0^i(t))] \quad (2)$$

3) 当  $k(k=2, 3, \dots, K)$  时, 借助第  $k$  个残余信号  $r_k(t)$ , 再求出  $I_{MF,k+1}$ , 对混合信号  $x^{k-1}(t) = r_{k-1}(t) + \partial_{k-1} L_k(N_0^i(t))$  进行分解, 则  $r_k(t)$  和  $I_{MF,k+1}$  分别为:

$$r_k(t) = r_{k-1}(t) - I_{MF,k}; \quad (3)$$

$$I_{MF,k+1} = \frac{1}{N} \sum_i^N L_1[r_k(t) + \partial_{k-1} L_{k-1}(N_0^i(t))] \quad (4)$$

4) 重复步骤 3) 直到满足  $r_K(t) = x(t) - \sum_{k=1}^K I_{MF,k}$  时, 循环终止, 则此时原始信号被最终分解为:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K I_{MF,k} + r_K(t) \quad (5)$$

### 1.2 快速谱峭度算法

#### 1.2.1 谱峭度

峭度作为时域中用来描述故障冲击信号强弱的无

量纲指标,对信号的瞬时冲击极为敏感,但极易受到噪声的扰乱使得效果不佳。谱峭度(spectral kurtosis, SK)是由 Deyer 提出<sup>[15]</sup>,通过计算频谱图中谱线的峭度来确定信号的冲击所在的频率,既能检测到故障信号,又能准确定位到故障冲击所在的频率范围<sup>[16]</sup>。

定义故障信号  $X(t)$  的机理响应为  $Y(t), M(t, \omega)$  为  $Y(t)$  在频率  $\omega$  处的复包络,则

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{2\pi f_j t} M(t, \omega) dX(t). \quad (6)$$

则  $X(t)$  谱峭度为

$$S_{KY}(\omega) = \frac{S_{4Y}(\omega)}{S_{2Y}(\omega)} - 2, \omega \neq 0. \quad (7)$$

式中,  $S_{2nY}(\omega)$  为信号  $Y(t)$  的  $2n$  阶瞬时谱矩,且有

$$S_{2nY}(\omega) = E[|M(t, \omega) dX(t)|^{2n}] / d\omega.$$

### 1.2.2 快速谱峭度图

随着信号时频分析的不断发展,以及包络分析中带宽和中心频率依靠人为经验估计的不足,Atoni 通过谱峭度和 FIR 带通滤波器提出了快速谱峭度的概念<sup>[17]</sup>。快速谱峭度原理为将原始信号通过构建的具有不同频带的 1/3-二叉树带通滤波器进行分解,并计算各个频带的谱峭度值得到快速谱峭度图,图中纵坐标表示依据峭度大小信号分解的层数,横坐标表示信号滤波的最佳带宽和其中中心频率所在位置<sup>[18]</sup>。

## 2 CEEMDAN-FSK 故障诊断流程

CEEMDAN 算法将故障振动信号分解成多个 IMF 分量,利用 FSK 算法计算出故障信号和每个 IMF 分量的峭度值,同时计算出各 IMF 分量与故障信号的相关度,筛选出峭度值大于 3 且相关度较大的分量。然后将筛选的分量进行重构得到新的信号序列,再对该信号序列进行快速谱峭度分析,得到重构信号的快速谱峭度图,找到谱峭度图中颜色较深的区域,确定其谱峭度最大的共振频带。最后利用谱峭度最大值范围设置合适的带通滤波区间,对该区间的信号进行滤波分析实现滚动轴承故障诊断。笔者将对滚动轴承的内圈和外圈分别进行故障诊断,图 1 所示为 CEEMDAN-FSK 诊断滚动轴承故障的具体流程。

## 3 实验分析

为验证笔者方法的有效性,采用西储大学轴承实验数据进行实验仿真分析,实验具体装置见文献

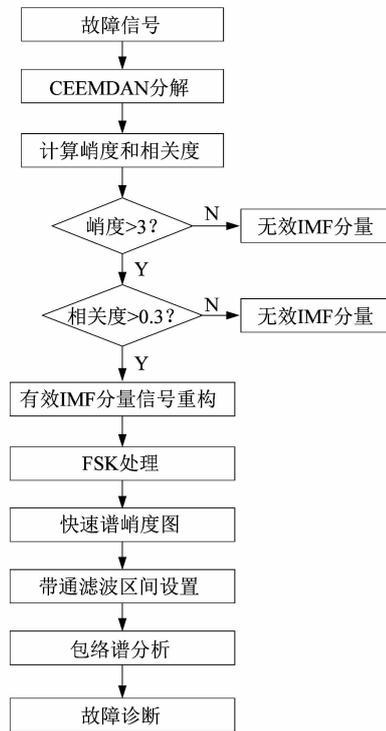


图 1 诊断流程图

Figure 1 Diagnostic flow chart

[14]。笔者选用装置驱动端型号为 6205-2RS 的滚动轴承,该实验利用电火花在轴承内圈、外圈和滚动体上制造出直径为 0.177 8 mm(0.007 in)的故障。笔者选取该实验数据中的采样点数为 4 000,轴承具体参数如表 1 所示,计算得到滚动轴承内圈理论故障频率为  $f_i = 162.18$  Hz,外圈理论故障频率为  $f_j = 107.36$  Hz,轴承转频为  $f_0 = 29.95$  Hz。

表 1 轴承结构参数

Table 1 Bearing structure parameters

采样频率/Hz	转速/(r · min <sup>-1</sup> )	内圈直径/mm	外圈直径/mm
12 000	1 797	25.00	52.00
厚度/mm	直径/mm	节径/mm	滚动体数
15.00	7.94	39.04	9

轴承内圈故障信号的时域波形和包络谱如图 2 所示。图 2(a)时域图中几乎看不到具有周期性的故障脉冲;包络谱中内圈故障特征频率较为微弱,且受干扰谱线的影响较为严重,还需对信号做进一步处理。

采用笔者方法对内圈故障信号做进一步处理得到如图 3 所示的结果。图 3(a)所示为信号经 CEEMD 分解得到 10 组 IMF 分量;各个分量的峭度和相关度如

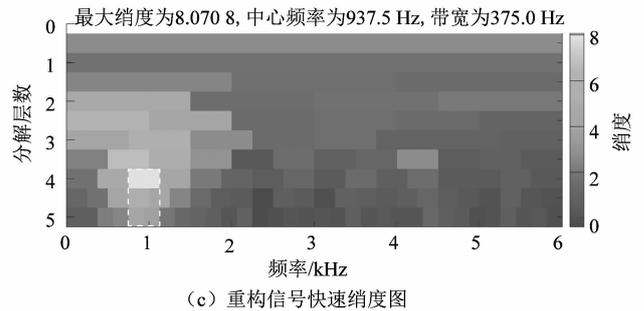
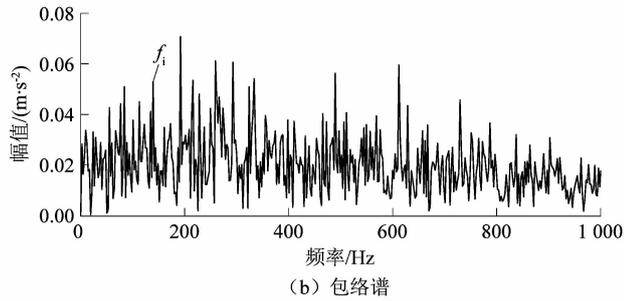
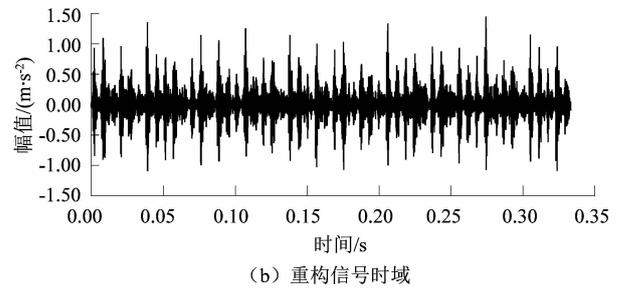
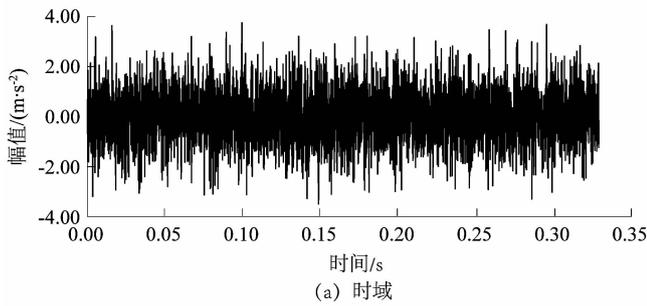


图 2 内圈原始信号时域和包络谱  
Figure 2 Time domain and envelope spectrum of inner ring original signal

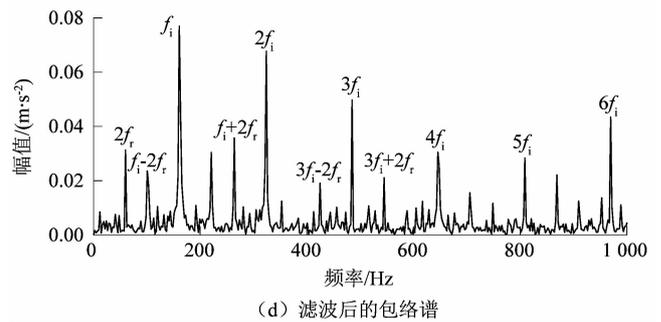
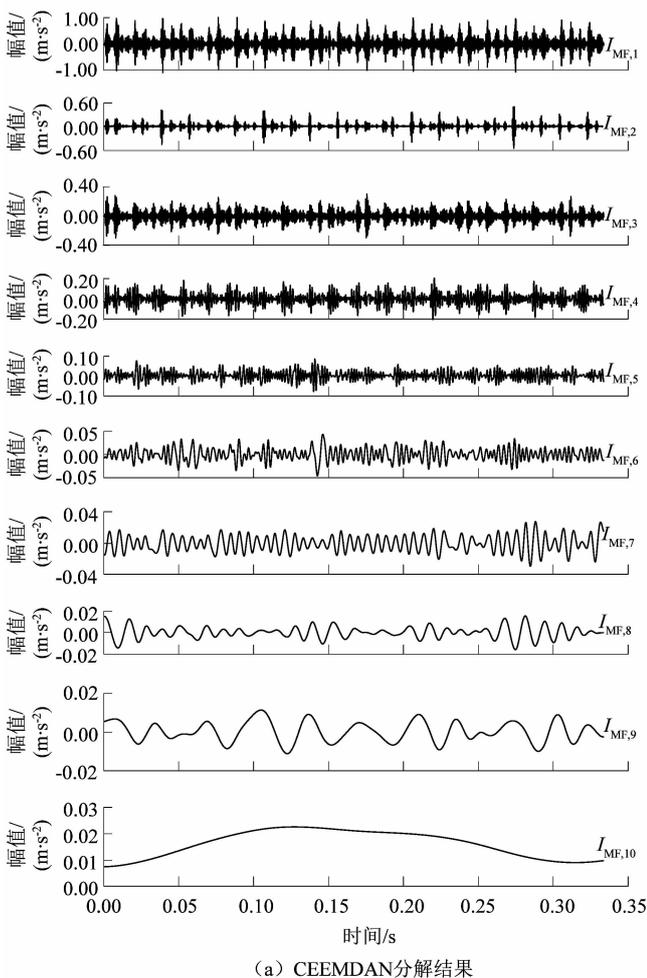


图 3 CEEMDAN-FSK 分析内圈故障结果  
Figure 3 CEEMDAN-FSK analysis of inner ring failure results

表 2 所示。其中,  $I_{MF,1}$  和  $I_{MF,3}$  的峭度值都大于 3 且相关度大于 0.3; 根据峭度-相关度最大规则筛选出包含轴承内圈故障信息最多的 IMF 分量并将其重构, 结果如图 3(b) 所示, 可清晰观察到等间隔的周期性冲击成分。图 3(c) 为重构信号经 FSK 处理结果, 信号中峭度最大的共振频带对应图中白色虚线框位置, 中心频率为 937.5 Hz, 带宽为 375.0 Hz, 设置带通滤波区间为 750.0 ~ 1 125.0 Hz 对信号做滤波处理。图 3(d) 滤波信号的包络谱中, 除明显的转频外, 内圈故障特征频率  $f_i$  处谱线更加突出, 其倍频  $2f_i \sim 6f_i$  处也有较为突出的谱线, 并且还提取到了转频与特征频率形成的调制边频带 ( $f_i \pm 2f_r, 3f_i \pm 2f_r$ ), 与图 2(b) 相比, 谱线更清晰, 幅值更明显。可以确定轴承内圈发生故障时的频率为 162 Hz, 实验结果与理论值相符。

表2 轴承内圈 IMF 分量的峭度和相关度

Table 2 Kurtosis and correlation of IMF components of bearing inner ring

模态分量	峭度	相关度
$I_{MF,1}$	5.928 1	0.300 4
$I_{MF,2}$	4.338 5	0.011 6
$I_{MF,3}$	10.057 3	0.365 7
$I_{MF,4}$	3.496 4	0.091 1
$I_{MF,5}$	2.833 7	0.023 2
$I_{MF,6}$	2.629 9	0.000 1
$I_{MF,7}$	3.110 4	0.000 4
$I_{MF,8}$	2.528 9	0.002 1
$I_{MF,9}$	2.903 1	0.004 3
$I_{MF,10}$	5.112 7	0.201 1

### 3.2 滚动轴承外圈故障

图4所示为实验轴承外圈故障信号的时域波形和包络谱。外圈时域波形图中受到强噪声的干扰,外圈故障激发的周期性冲击特征被淹没;对应包络谱中,由于噪声的影响未能提取到与轴承外圈相关的特征频率成分,无法判断轴承的故障类型。传统的包络解调方法失效。

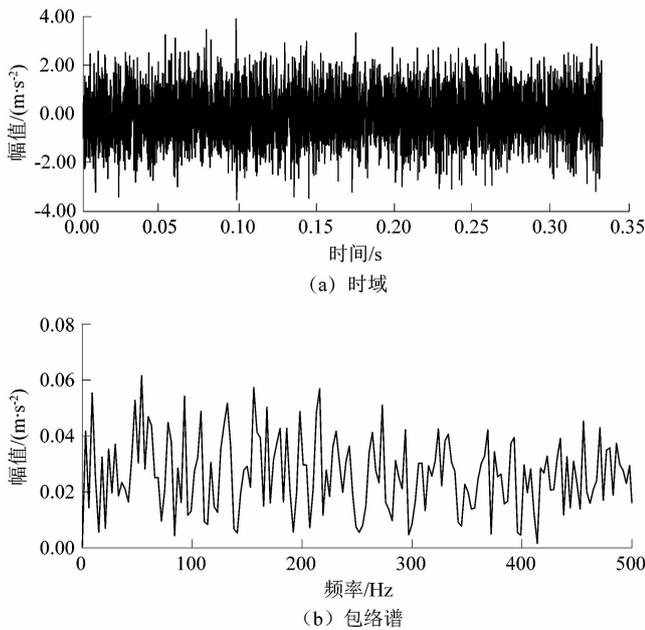


图4 原始信号时域和包络谱

Figure 4 Time domain and envelope spectrum of original signal

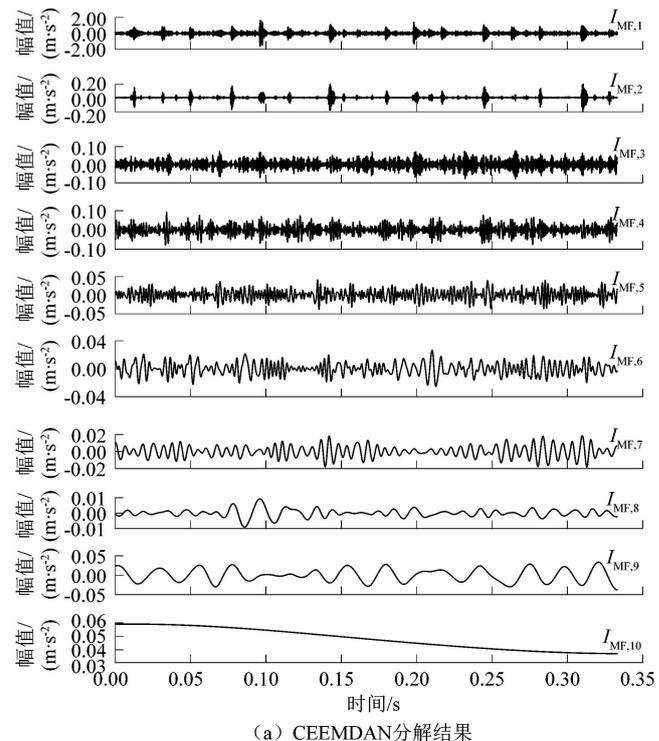
图5(a)所示为信号经 CEEMDAN 分解得到的 10 组 IMF 分量;各个分量的峭度和相关度如表 3 所示,

$I_{MF,2}$ 峭度值最大且相关度大于 0.3;图5(b)所示为利用峭度和相关度最大准则筛选出包含轴承内圈故障信息最多的 IMF 分量并将其重构的结果,重构信号的脉冲冲击更见明显,幅值也更清晰。图5(c)中重构信号经 FSK 处理后信号中峭度最大的共振频带对应图中白色虚线框处,中心频率为 2 812.5 Hz,带宽为 375.0 Hz,设置带通滤波区间 2 625.0 ~ 3 000.0 Hz 对信号做滤波处理。图5(d)滤波信号的包络谱中,有效提取到轴承外圈故障特征频率成分  $f_0 \sim 4f_0$ ,且与图4(b)相比,故障频率成分更清晰。由此判定轴承外圈发生故障时的频率为 107.0 Hz,实验结果与理论相符。

表3 轴承外圈 IMF 分量的峭度和相关度

Table 3 Kurtosis and correlation of IMF components of bearing outer ring

模态分量	峭度	相关度
$I_{MF,1}$	4.508 1	0.235 9
$I_{MF,2}$	12.012 6	0.402 2
$I_{MF,3}$	4.639 9	0.202 3
$I_{MF,4}$	3.315 4	0.100 8
$I_{MF,5}$	2.784 5	0.034 1
$I_{MF,6}$	3.886 1	0.020 9
$I_{MF,7}$	2.583 2	0.000 5
$I_{MF,8}$	2.631 9	0.000 7
$I_{MF,9}$	3.004 5	0.001 6
$I_{MF,10}$	2.531 1	0.001 0



(a) CEEMDAN分解结果

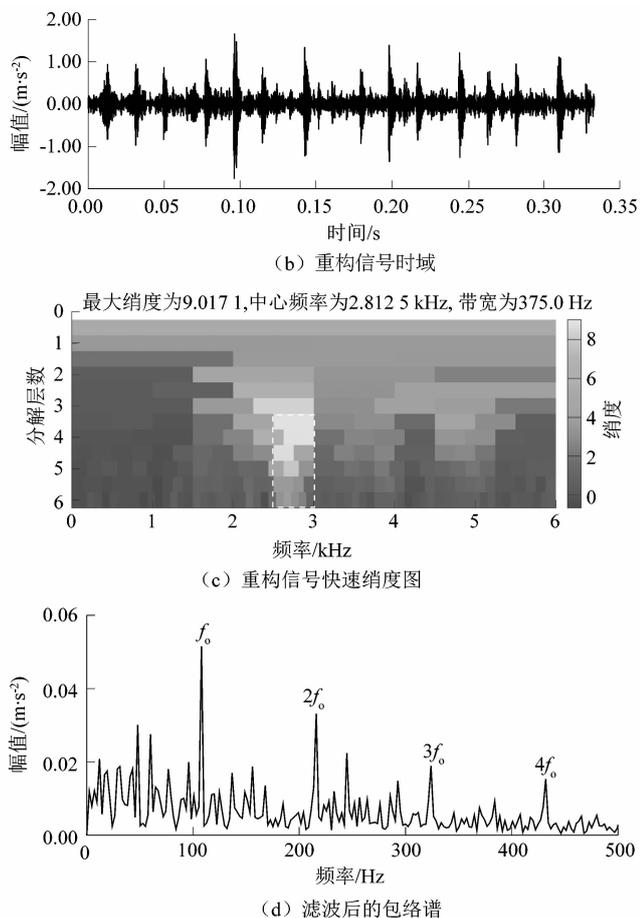


图 5 CEEMDAN-FSK 分析外圈故障结果

Figure 5 CEEMDAN-FSK analysis of outer ring failure results

## 4 结论

针对滚动轴承故障信号的非线性和非平稳特性,故障特征提取难和故障识别不够准确问题,笔者提出一种 CEEMDAN 辅助快速谱峭度的故障诊断方法。首先利用 CEEMDAN 算法将故障信号分解,然后选取峭度值大于 3.0 以及相关度大于 0.9 的 IMF 分量进行重构,实现轴承的故障特征提取;然后利用快速谱峭度分析得到快速谱峭度图,再对其进行带通滤波处理,通过分析频率变化识别轴承故障;最后,笔者分别对滚动轴承的内圈故障和外圈故障进行诊断实验,验证了 CEEMDAN-FSK 方法的有效性和可行性。研究结论如下:

1) 利用 CEEMDAN 算法实现故障信号的分解重构解决了 EEMD 算法产生的模态效应和重构误差大的问题,提取的故障特征更完备;快速谱峭度方法对重构

的故障特征进行带通滤波处理,使得故障区域更突出。

2) 将 CEEMDAN 和快速谱峭度联合实现滚动轴承的故障诊断,对滚动轴承的内圈故障和外圈故障进行实验,并与原始故障频率进行对比分析,结果表明内圈故障时的频率为 162 Hz,外圈故障频率为 107 Hz,与理论值相符,故所提方法能够实现滚动轴承的故障诊断。

## 参考文献:

- [1] 胡爱军,马万里,唐贵基. 基于集成经验模态分解和峭度准则的滚动轴承故障特征提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11): 106 - 111. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.11.006.
- [2] 田晶,王英杰,王志,等. 基于 EEMD 与空域相关降噪的滚动轴承故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 144 - 151. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1803316.
- [3] 李利品,党瑞荣,樊养余. 改进的 EEMD 算法及其在多相流检测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2365 - 2371.
- [4] 周将坤,陆森林. 基于 EMD 平均能量法的滚动轴承故障诊断[J]. 轻工机械, 2010, 28(2): 36 - 40.
- [5] 师少达,宋玉琴,刘西川. BFOA-EEMD 在轴承故障诊断中的应用[J]. 西安工程大学学报, 2019, 33(3): 290 - 295. DOI: 10.13338/j.issn.1674-649x.2019.03.010.
- [6] 陈世鹏,杨奕飞,张林,等. 基于 CEEMDAN 和 SCA-MRVM 的滚动轴承故障诊断[J]. 轴承, 2021(10): 53 - 59. DOI: 10.19533/j.issn1000-3762.2021.10.012.
- [7] 慎明俊,高宏玉,张守京,等. 基于 CEEMD 和 3 点对称差分能量算子的滚动轴承故障诊断方法[J]. 轻工机械, 2021, 39(4): 62 - 67.
- [8] 王海龙,李帅,赵岩,等. CEEMDAN-小波包联合降噪的优化方法[J]. 爆破器材, 2021, 50(4): 48 - 53.
- [9] 赵妍,李志民,李天云. 一种基于谱峭度的异步电机故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 189 - 196. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2014.05.024.
- [10] 张龙,毛志德,杨世锡,等. 基于包络谱带通峭度的改进谱峭度方法及在轴承诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2018, 37(23): 171 - 179. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.23.024.
- [11] 任学平,李攀,王朝阁. 基于 VMD 和快速谱峭度的滚动轴承早期故障诊断[J]. 轴承, 2017(12): 39 - 43. DOI: 10.19533/j.issn1000-3762.2017.12.011.
- [12] 王海明,刘永强,廖英英. 基于快速谱峭度和正交匹配追踪算法的轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(19): 78 - 83.
- [13] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C]//2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Prague, Czech Republic: IEEE, 2011: 4144 - 4147.