

基于 CSES 和 MED 的滚动轴承微弱故障特征提取*

康 伟, 朱永生, 闫 柯, 任智军

(西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安, 710049)

摘要 针对高噪声条件下,联合平方包络谱(combined squared envelope spectrum,简称 CSES)方法容易受频带内噪声和其他频带特征的干扰,导致对滚动轴承微弱故障特征提取困难的问题,提出了一种结合 CSES 和最小熵解卷积(minimum entropy deconvolution,简称 MED)的滚动轴承微弱故障特征提取方法。首先,使用谱峭度选择不同频带一滤波后的信号;其次,对所选信号进行 MED 滤波,增强频带内的故障特征;最后,依据 CSES 原理,计算上一步滤波后信号的平方包络频谱并进行归一化,将其合并得到故障特征明显的强化包络谱。仿真与试验结果表明,该方法能够有效提取滚动轴承的微弱故障特征。

关键词 滚动轴承;谱峭度;最小熵解卷积;联合平方包络谱
中图分类号 TH165+.3; TH133.3

引 言

滚动轴承的运行状态直接关系到机械设备的工作性能,及时尽早发现其故障特征信息具有重要意义^[1]。在实际生产中,采集到的振动信号早期故障特征较为微弱,受背景噪声等强干扰影响,极易被淹没。

共振解调分析是当前应用最广泛的一种滚动轴承故障诊断方法,通过解调振动信号提取有用信息,该方法的提取效果与共振解调参数的选择紧密相关。对此,国内外学者在选择最优解调频带方面开展了大量的研究工作。Antoni^[2]提出了峭度图方法,利用峭度对冲击特征的敏感性自适应地选择解调频带,已被证明是一种较有效的轴承故障诊断方法^[3],但该方法仍存在可改进的地方^[4]。文献^[5]从使用更精确的滤波器组方面提升该方法的有效性,通过小波变换替代原滤波器组进行信号分解,以提取与小波基相似的故障特征。文献^[6]从频带分割方面进行改进,提出了多尺度聚类灰度信息图方法,使用多尺度频带融合来选择最优解调频带。文献^[3]考虑增强指标的鲁棒性,通过将信号分段计算取平均的方式来克服冲击性噪声的影响。需要指出的是,上述诊断方法均通过单一频带提取故障特征,存在因干扰导致所选频带并不是最优频带的问题,甚至出现误选频带导致故障特征不能被有效提取^[7]。

文献^[7]提出一种通过多频带诊断故障的联合平方包络谱方法。该方法选择多个频带的特征信息联立合并以保留信号中的有用信息。然而,由于故障特征微弱,强背景噪声下的干扰信息会严重影响故障特征的提取。

笔者使用最小熵解卷积滤波^[8]来增强所选频带内的微弱特征信息,提出了一种基于联合平方包络谱和最小熵解卷积的滚动轴承微弱故障特征提取方法,可有效削弱强背景噪声的影响,进而实现滚动轴承微弱故障特征的提取。仿真和试验分析结果也证明了该方法的有效性。

1 方法原理

1.1 CSES 方法

滚动轴承故障时会激起周围结构的共振,通过选择最佳滤波参数共振解调可有效提取故障特征信息。由于采集到的振动信号故障特征微弱,环境噪声会影响最优频带的选择,造成有用信息丢失。因此,使用 CSES 方法将潜在有价值的频带信息进行合并以诊断轴承故障。

CSES 方法^[7]通过提前设定的阈值条件选出多个不同频带的滤波后的信号,再对各信号进行故障特征提取,利用同层叠加与多层叠加的方式完成滚动轴承的故障分析,具体步骤如下。

* 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804400,2017YFC0804407)

收稿日期:2019-08-20;修回日期:2019-11-17

1) 使用小波变换二叉树结构分解原信号到不同滤波参数的频带中。所使用的小波变换方法为最大迭代离散小波包变换(maximal overlap discrete wavelet packet transform, 简称MODWPT), 具有保持各层滤波后的信号时间分辨率相同的优点。原信号 $s(t)$ 经MODWPT分解后得到一系列不同中心频率 f_c , 不同滤波频带 b_w 滤波后的信号 $s_k^i(t)$, 其中: k 为对应的分解层数, 且 $k=0, 1, \dots, K$; K 为确定的最大分解层数; i 为第 k 层分解的第 i 个节点处滤波后的信号, 且 $i=1, 2, \dots, 2^k$ 。

2) 选择不同参数滤波后的信号。计算所有滤波后信号的平方包络函数, 为了削弱不相关噪声信号的干扰, 再计算平方包络信号的无偏自相关函数

$$S(\tau) = \frac{1}{N-n} \sum_{j=1}^{N-n} s(t_j) s(t_j + \tau) \quad (1)$$

其中: $s(t_j)$ 为平方包络信号; n 为信号 $s(t_j)$ 的长度, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$; 时延因子 $\tau=n/f_s$; f_s 为信号采样频率; $S(\tau)$ 为无偏自相关信号。

3) 以式(2)所示的峭度指标为依据, 计算并比较其峭度值, 将超过或等于最大峭度值一半的对应滤波参数选出, 并输出相关滤波后的信号^[7]。

$$k = \frac{\sum_{j=1}^N (S(t_j) - \bar{S})^4}{\left[\sum_{j=1}^N (S(t_j) - \bar{S})^2 \right]^2} \quad (2)$$

其中: \bar{S} 为信号 $S(t_j)$ 的均值。

4) 获取强化包络谱, 完成故障特征提取。计算各滤波后信号的平方包络, 并使用傅里叶变换方法将时域信号转换到频域, 得到多个平方包络谱。分别归一化各平方包络谱, 根据所属的分解层数叠加并取平均, 得到与分解层数相同数量的频谱, 叠加所有频谱得到故障特征明显的强化包络谱^[7]。

1.2 MED方法

信息熵是一种对信号源输出信息的度量, 具体体现在其不确定性和发生随机性的度量^[9]。当振动信号中的干扰成分越少, 故障冲击信号越明显, 输出信号就越简单, 对应的信息熵就越小; 当振动信号中的干扰成分越多, 故障冲击信号越不明显, 输出信号就越复杂, 对应的信息熵就越大。最小熵最初由Wiggins引入到解卷积问题中形成了MED方法^[10], 可从混合信号中有效解卷积脉冲信号。

在信号采集过程中, 输入脉冲信号 $I(n)$ 除了受到周围环境噪声 $e(n)$ 的影响外, 还会受到传递路径

$h(n)$ 的影响。振动信号 $y(n)$ 可表示为一个卷积信号

$$y(n) = (I(n) + e(n)) * h(n) \quad (3)$$

MED通过寻找逆滤波器 $f(n)$, 尽可能消除卷积影响, 得到与输入脉冲信号 $I(n)$ 最相近的解卷积信号 $\hat{I}(n)$ 。这可理解为一个逆滤波的过程^[8], 即

$$\hat{I}(n) = y(n) * f(n) \quad (4)$$

利用目标函数法设计MED滤波器, Wiggins使用 $\hat{I}(n)$ 的范数评估其熵的大小^[8], 且将其作为目标函数以获取最优输出。

$$O_2^4(f(i)) = \sum_{n=1}^N \hat{I}^4(n) / \left[\sum_{n=1}^N \hat{I}^2(n) \right]^2 \quad (5)$$

对目标函数求导并令其等于0, 得到

$$\frac{\partial O_2^4(f(i))}{\partial f(i)} = 0 \quad (6)$$

令逆滤波器 $f(i)$ 的阶数为 L , 由式(4)可得

$$\hat{I}(n) = \sum_{i=1}^L f(i) y(n-i) \quad (7)$$

且

$$\frac{\partial \hat{I}(n)}{\partial f(i)} = y(n-i) \quad (8)$$

联立式(5)~(8), 可得

$$\left(\sum_{n=1}^N \hat{I}^2(n) / \sum_{n=1}^N \hat{I}^4(n) \right) \sum_{n=1}^N \hat{I}^3(n) y(n-i) = \sum_{p=1}^L f(p) \sum_{n=1}^N y(n-i) y(n-p) \quad (9)$$

将式(9)表示为矩阵形式, 可得

$$B = FA \quad (10)$$

$$F = BA^{-1} \quad (11)$$

其中: B 为输入信号与输出信号的互相关矩阵; F 为所求逆滤波器的系数矩阵; A 为输入信号的拓普利兹自相关矩阵。

MED算法流程如图1所示。

2 基于CSES和MED的故障特征提取方法

CSES在提取故障特征时, 解决了通过单一频带包络解调时因误选频带造成的有用信息丢失问题。对于滚动轴承的早期故障, 其故障信号较为微弱, 不仅会受到其频带内的噪声影响, 还会受到所选其他频带特征的干扰, 影响滚动轴承的微弱故障特征提取。针对这一问题, 笔者将MED方法用于微弱故障特征的增强, 如图2所示, 提出了一种基于

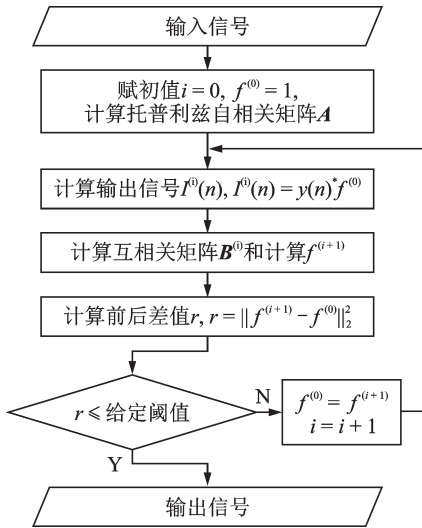


图1 MED算法流程图
Fig.1 MED flow chart

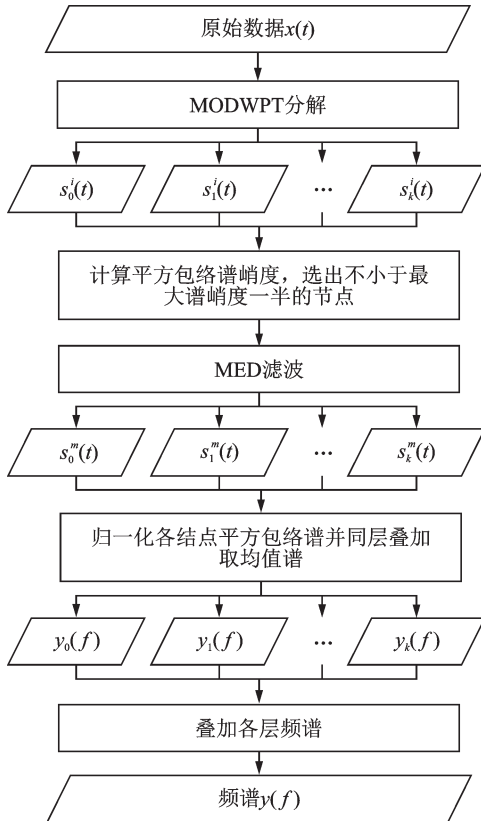


图2 基于CSSES和MED的微弱故障特征提取流程
Fig.2 Flow chart of feature extraction for CSSES and MED

CSSES和MED的微弱故障特征提取方法,其步骤如下。

- 1) 根据CSSES方法中所用的MODWPT,分解信号至不同频带,在各节点位置处得到长度相同的滤波后的信号 $s_k^i(t)$ 。
- 2) 选出各层满足要求的滤波后的信号。该步骤选取各节点处滤波后的信号的平方包络自相关函

数来计算谱峭度,选取超出或等于最大谱峭度一半的节点处滤波后的信号作进一步分析。选择谱峭度作为选择标准替代峭度,主要是考虑到其作为峭度的一种延伸,既能反应信号的冲击特征,又能反映峭度随频率的分布^[1,3],有益于后期通过合并频谱提取故障特征。谱峭度的计算公式^[2]为

$$sk = \frac{E[|S(t_j, f)|^4]}{E[|S(t_j, f)|^2]^2} - 2 \quad (12)$$

其中: $E[\cdot]$ 为数学期望; $|\cdot|$ 为取绝对值; $S(t_j, f)$ 为频率 f 处信号 $s(t_j)$ 的复包络信号。

3) 使用MED滤波增强故障特征。输入信号 $s(t)$, 其中, m 为第 k 层选出的节点序号。对 $s(t)$ 进行MED滤波,削弱频带内的噪声影响,增强故障特征。

4) 获取故障特征明显的强化包络谱。计算经MED滤波得到的各信号的平方包络函数,使用傅里叶变换方法转换至频域。与CSSES方法相同操作,获取各层的归一化平均包络谱,合并得到强化包络谱,提取微弱故障特征。

3 仿真分析

为了验证所提方法在强背景噪声干扰下提取微弱故障特征的有效性,构造合成信号进行仿真分析。合成信号 $x(t)$ 包括仿真轴承故障的重复冲击信号 $x_b(t)$ 、干扰信号 $n_g(t)$ 和高斯白噪声 $n_r(t)$, 即

$$x(t) = x_b(t) + n_g(t) + n_r(t) \quad (13)$$

信号 $x_b(t)$ 参照文献[11]给出的滚动轴承外圈故障数学模型构建

$$x_b(t) = A(t) \sum_{z=1}^Z I(t - z/f_d) \quad (14)$$

$$I(t) = \begin{cases} 0 & (t \leq 0) \\ e^{-\alpha} \sin(2\pi f_v t) & (t > 0) \end{cases} \quad (15)$$

其中: $A(t)$ 为幅值; f_d 为故障特征频率; z 为第 z 个故障冲击,且 $z = 1, 2, \dots, Z$; Z 为总的瞬态冲击个数; $I(t)$ 为单瞬态响应函数; f_v 为共振频率; c 为阻尼比。

信号 $n_g(t)$ 使用齿啮合干扰与谐波干扰进行构建,数学模型^[11]为

$$n_g(t) = \sum_{l=1}^{11} [(1.3 - 0.01l) \cos(2\pi j f_l t) + 0.1 \cos(2\pi f_l t)] \quad (16)$$

其中: f_l 为转轴转频; l 为仿真齿啮合干扰齿数。

仿真信号的主要参数参照文献[11]设置如下:共振频率 f_v 为 3 600 Hz; 阻尼比 c 为 860; 特征频率 f_d 为 24 Hz; 采样频率为 25.6 kHz; 采样时间为 0.5 s; 转

频为 15 Hz,且考虑 2% 的滑移因素影响;高斯白噪声的标准差为 0.7;信噪比为 -17 dB。图 3 为时域信号。重复冲击信号 $x_b(t)$ 和未添加高斯白噪声干扰信号 $n_g(t)$ 如图 3 (a) 和图 3 (b) 所示;添加高斯白噪声后的仿真信号 $x(t)$ 如图 3 (c) 所示。可见,故障重复冲击信号完全淹没于强背景噪声中。

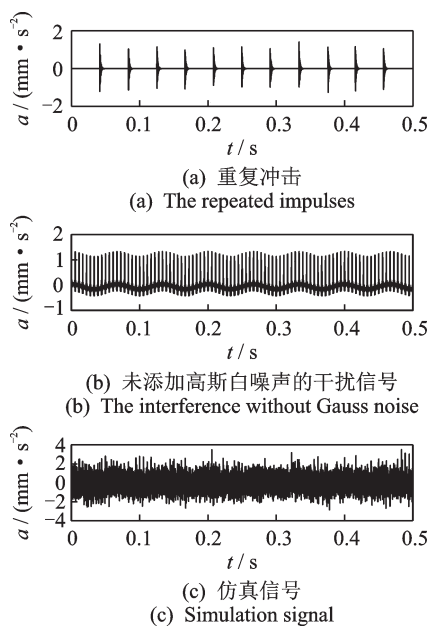


Fig.3 Time domain waveform

基于 CSES 和 MED 提取滚动轴承的故障特征时,利用小波基函数“db12”进行 MODWPT 分解。考虑 MODWPT 分解时随着分解层数的增加,计算量也随之增大,设置分解层数为 4 阶,详情可参见文献[7]。

使用笔者提出的方法分析仿真信号,所得结果如图 4 所示。图 4(a) 为其联合平方包络谱,将其进行叠加得到图 4(b) 所示的强化包络谱。由图 4(b) 可以发现故障特征频率及其倍频信息,尤其是前 3 阶倍频信息。图中紫线表示故障特征频率 24 Hz 及其倍频成分。为了对比分析,使用包络解调方法和 CSES 方法分析仿真信号。仿真信号的包络谱如图 5 所示,图中啮合特征频率明显(紫线表示啮合频率 180 Hz 及其倍频成分),而故障特征信息不能被发现。图 6 为仿真信号经 CSES 方法得到的分析结果。图 6(a) 为其联合平方包络谱,将其进行叠加得到图 6(b) 所示的强化包络谱。图 6(b) 中 有用信息受到严重干扰,故障特征频率未能有效提取,图中较明显的频率成分为紫色线对应的 180 Hz 及其倍频成分。

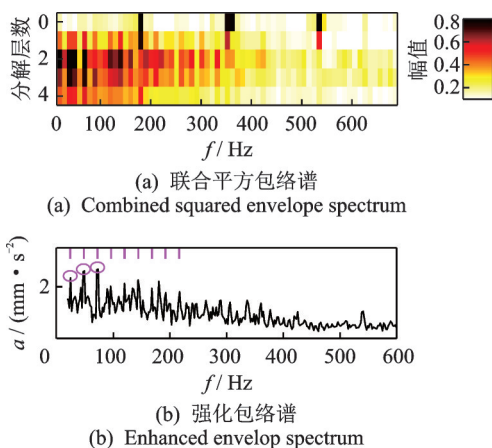


图 4 仿真信号经笔者提出方法得到的分析结果

Fig.4 The analysis results of simulation signal processed by the proposed method

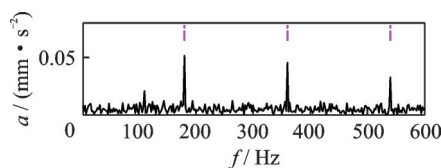


图 5 仿真信号包络谱

Fig.5 Envelop spectrum of simulation signal

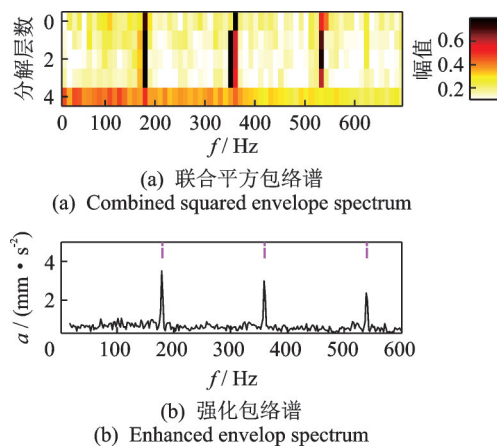


图 6 仿真信号经 CSES 方法得到的分析结果

Fig.6 The analysis results of simulation signal processed by CSES

综上所述,包络解调方法和 CSES 方法在受到强背景噪声干扰的情况下并不能有效提取故障信息。笔者提出方法与上述 2 种方法相比,尽管强化包络谱中仍有干扰信息,但故障频率更加突出,表明了该方法的有效性。

4 试验验证

采用美国凯斯西储大学滚动轴承数据中心的试验数据进一步验证所提方法在背景噪声干扰下

的故障特征提取能力。滚动轴承试验台如图7所示。该设备由驱动电机、扭矩传感器、功率测试计和信号采集系统等组成。基本试验参数如下:滚动轴承型号为SKF-6205;内圈直径为25 mm;外圈直径为52 mm;节径为39.04 mm;接触角为 0° ;滚动体直径为7.94 mm;驱动端有轴承故障;滚动轴承的外圈和内圈单点损伤,直径为0.533 4 mm;采样频率为12 kHz;电机转速为1 797 r/min。

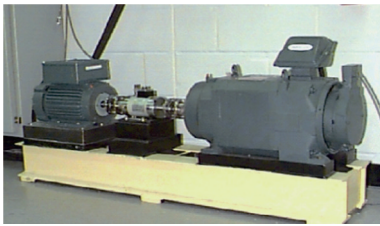


图7 滚动轴承试验台

Fig.7 Test rig of rolling element bearing

4.1 滚动轴承外圈故障特征提取

由于3点钟方向基座处采集到的振动信号存在较强的转轴谐波干扰,背景噪声较强,轴承故障特征不易提取^[12],故使用该振动信号验证提出方法的有效性,轴承外圈故障时的振动信号如图8所示。

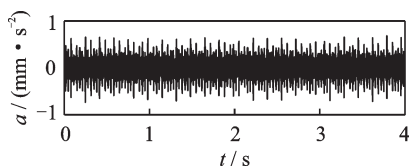
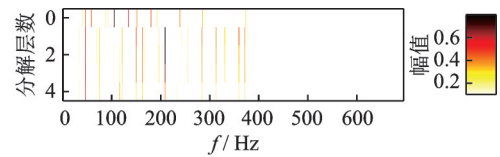


图8 外圈故障信号

Fig.8 Outer face fault signal

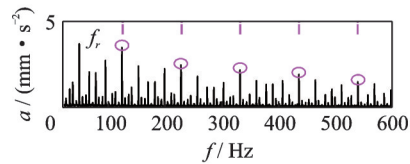
使用笔者提出方法提取外圈故障轴承的特征频率,结果如图9所示。图9(a)为得到的联合平方包络谱,将其进行叠加得到图9(b)所示的强化包络谱。图9(b)中紫色线为理论外圈故障特征频率107.36 Hz及其倍频,除一阶转频 f_r 干扰外,故障特征频率相对其他干扰信息更加明显,且倍频特征较周围的干扰更加突出。为了对比分析,使用包络解调方法和CSES方法提取故障特征频率。图10为外圈故障信号包络谱。由图10可知,包络谱中的滚动轴承故障特征频率存在但并不突出,倍频成分难以发现,受到了强背景噪声的严重干扰,不能有效诊断滚动轴承的外圈故障。

图11为外圈故障信号经CSES方法得到的分析结果。图11(a)为CSES方法得到的联合平方包络谱图,将其进行叠加,得到图11(b)所示的强化



(a) 联合平方包络谱

(a) Combined squared envelope spectrum



(b) 强化包络谱

(b) Enhanced envelop spectrum

图9 外圈故障信号经笔者提出方法得到的分析结果

Fig.9 The analysis results of outer race fault signal processed by the proposed method

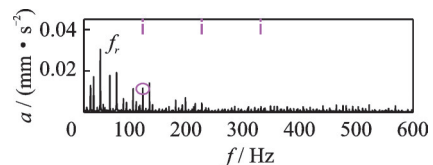
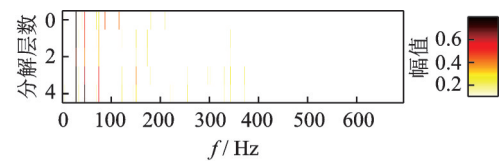


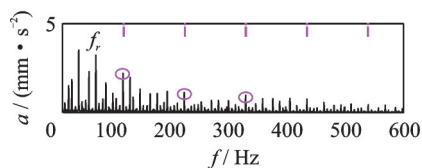
图10 外圈故障信号包络谱

Fig.10 Envelop spectrum of outer race fault signal



(a) 联合平方包络谱

(a) Combined squared envelope spectrum



(b) 强化包络谱

(b) Enhanced envelop spectrum

图11 外圈故障信号经CSES方法得到的分析结果

Fig.11 The analysis results of outer race fault signal processed by CSES

包络谱。CSES方法得到的强化包络谱中故障特征频率及其部分倍频能够被找到,但除受到一阶转频 f_r 干扰外,还受到其他较强频率成分的干扰。

综上所述,受到强背景噪声干扰时,包络解调方法与CSES方法均不能有效提取外圈故障特征,但CSES方法在一定程度上突出了故障特征频率及其倍频成分。笔者提出方法与上述2种方法相比,尽管存在一阶转频干扰,但故障特征及其倍频特征明显,能够有效提取轴承的外圈故障特征。

4.2 滚动轴承内圈故障特征提取

滚动轴承内圈故障试验基座处采集到的振动信号如图12所示。使用基于CSES和MED的方法提取滚动轴承的故障特征频率,图13为内圈故障信号的分析结果。图13(a)为其联合平方包络谱,将其进行叠加得到如图13(b)所示的强化包络谱。强化包络谱中的紫线表示理论特征频率162.186 Hz及其倍频,可以发现,故障特征频率被有效提取,倍频成分较周围频率成分更突出。包络解调方法和CSES方法同样被用于对比分析。由图14所示的内圈故障信号包络谱可得,受背景噪声干扰,滚动轴承内圈故障特征频率成分存在但不明显,二阶倍频成分相对突出,故障特征提取效果不好。

图15为内圈故障信号经CSES方法得到的分析结果。图15(a)为其联合平方包络谱,将其进行叠加得到图15(b)所示的强化包络谱。由图15(b)可得,使用CSES方法得到的强化包络谱中除受到

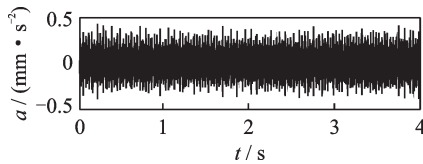


图12 内圈故障信号

Fig.12 Inner race fault signal

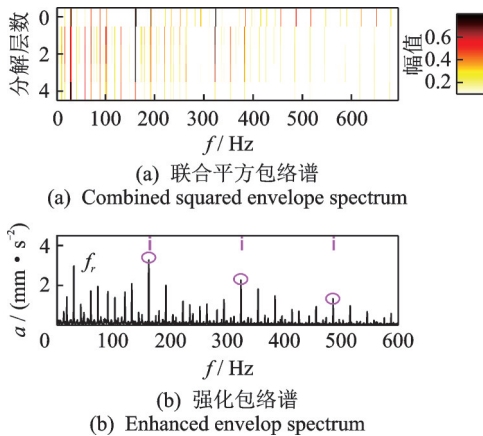


图13 内圈故障信号经笔者提出方法得到的分析结果

Fig.13 The analysis results of inner race fault signal processed by the proposed method

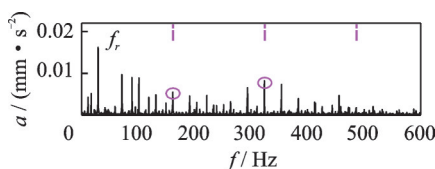


图14 内圈故障信号包络谱

Fig.14 Envelop spectrum of inner race fault signal

一阶转频 f_r 的干扰外,故障特征频率及其倍频也比较明显,可以完成故障诊断。

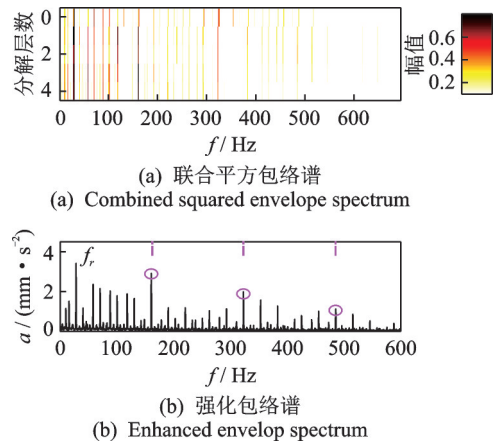


图15 内圈故障信号经CSES方法得到的分析结果

Fig.15 The analysis results of inner race fault signal processed by CSES

综上所述,在提取该滚动轴承内圈故障时,包络解调分析方法难以有效提取故障特征。传统方法和笔者提出方法均能诊断出内圈故障,但笔者提出方法的故障特征频率在其强化包络谱中更加明显,诊断效果更好。

5 结束语

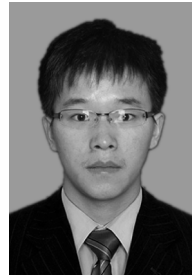
针对使用单一频带包络解调时存在因误选频带损失有用信息的问题,介绍了基于CSES的特征提取方法,并针对强背景噪声干扰下,滚动轴承微弱故障特征易受频带内噪声及其他频带特征影响的问题,提出了一种基于CSES和MED的滚动轴承微弱故障特征提取方法。分别使用添加强背景噪声的仿真信号和存在较强背景噪声干扰的内外圈故障轴承试验信号进行微弱故障特征提取试验,利用包络解调方法、CSES方法和笔者提出方法分别提取信号中的微弱故障特征,结果表明,笔者提出方法能够有效增强故障特征,从而提高微弱故障的诊断准确率。

参 考 文 献

[1] 李宏坤,杨蕊,任远杰,等.利用粒子滤波与谱峭度的滚动轴承故障诊断[J].机械工程学报,2017,53(3):63-72.
LI Hongkun, YANG Rui, REN Yuanjie, et al. Rolling element bearing diagnosis using particle filter and kurtogram [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 63-72. (in Chinese)

[2] ANTONI J. Fast computation of the kurtogram for the

- detection of transient faults [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2007, 21(1): 108-24.
- [3] 代士超, 郭瑜, 伍星, 等. 基于子频带谱峭度平均的快速谱峭度图算法改进[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(7): 98-102.
DAI Shichao, GUO Yu, WU Xing, et al. Improvement on fast kurtogram algorithm based on sub-frequency-ban spectral kurtosis average [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(7): 98-102. (in Chinese)
- [4] 彭畅, 柏林, 刘小峰. 基于鲁棒性小波包峭度图的滚动轴承故障诊断[J]. *振动、测试与诊断*, 2016(1): 11-16.
PENG Chang, BO Lin, LIU Xiaofeng. Robust wavelet transform-based kurtogram for the fault diagnostics of rolling element bearing [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016(1): 11-16. (in Chinese)
- [5] LEI Y, LIN J, HE Z, et al. Application of an improved kurtogram method for fault diagnosis of rolling element bearings [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2011, 25(5): 1738-1749.
- [6] LI C, CABRERA D, OLIVEIRA J V D, et al. Extracting repetitive transients for rotating machinery diagnosis using multiscale clustered grey infogram [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2016 (76/77): 157-173.
- [7] MOSHREFZADEH A, FASANA A. The autogram: an effective approach for selecting the optimal demodulation band in rolling element bearings diagnosis [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2018, 105: 294-318.
- [8] 张龙, 胡俊锋, 熊国良. 基于MED和SK的滚动轴承循环冲击特征增强[J]. *振动、测试与诊断*, 2017(1): 97-101.
ZHANG Long, HU Junfeng, XIONG Guoliang. Enhancement for cyclic impact characteristics of rolling element bearings based on MED and SK [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017(1): 97-101. (in Chinese)
- [9] 江瑞龙, 陈进. 基于最小熵解卷积的滚动轴承故障诊断研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [10] MCDONALD G L, ZHAO Q. Multipoint optimal minimum entropy deconvolution and convolution filter: application to vibration fault detection [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 82: 461-477.
- [11] MING Z, JIA X. A novel strategy for signal denoising using reweighted SVD and its applications to weak fault feature enhancement of rotating machinery [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 94: 129-147.
- [12] SMITH W A, RANDALL R B. Rolling element bearing diagnostics using the case western reserve university data: a benchmark study [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015(64/65): 100-131.



第一作者简介:康伟,男,1992年4月生,博士生。主要研究方向为机电设备故障诊断及预测技术。

E-mail: kang_wei@stu.xjtu.edu.cn

通信作者简介:朱永生,男,1973年9月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为轴承服役状态建模、设备运行状态监测评估及预测技术等。

E-mail: yszhu@mail.xjtu.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为EI Compendex数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价30元,全年180元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332

邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdcn.nuaa.edu.cn