

DOI: 10.7652/xjtuxb201912007

高阶频率加权能量算子在列车轴箱轴承故障诊断中的应用

刘泽潮, 张兵, 易彩, 吴文逸, 黄晨光
(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都)

摘要: 针对轴箱轴承振动信号中微弱故障冲击难以识别的问题,提出了高阶频率加权能量算子的信号解调方法,进而完成轴箱轴承的故障诊断。频率加权能量算子(FWEO)通过在解调时加入信号中瞬时频率的权重,从而提高了干扰情况下解调的鲁棒性,但是当干扰信号能量较大时,FWEO依然无法有效解调轴承的故障冲击信息。因此,在 FWEO 基础上通过高阶的导数运算,形成了高阶频率加权能量算子(HFWEO)。HFWEO 通过高阶导数运算提高了瞬时频率的权重,从而有效提高了 HFWEO 对干扰信号的抑制作用;使用相关峭度准则确定合适的阶次,保证 HFWEO 在提高抗干扰性的同时又引入较少的高频噪声,从而实现更可靠的轴箱轴承故障诊断。使用所提出的解调方法对仿真信号与轴箱轴承振动信号进行解调,并传统解调方法进行对比,结果表明,提出的 HFWEO 能量算子对干扰具有很好的抑制作用,可以在较低信号干扰比情况下具有良好的解调效果,同时所提的相关峭度准则可以准确地确定最佳的 HFWEO 阶次,在复杂干扰情况下依然可以有效提取轴承故障冲击,克服了传统解调方法在干扰严重时的局限性,抑制了干扰的影响,对信号中故障冲击识别更加有效,为更准确、快速判断轴承故障类型提供了可靠保证。

关键词: 列车轴箱轴承;滚动轴承故障诊断;能量算子解调;高阶频率加权能量算子

中图分类号: TH165.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)12-0046-11

High-Order Frequency-Weighted Energy Operator with Applications to Train Axle-Box Bearing Fault Diagnosis

LIU Zechao, ZHANG Bing, YI Cai, WU Wenyi, HUANG Chenguang
(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiao Tong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To identify the weak fault impulses from axle-box bearing vibration signals, high-order frequency-weighted energy operator (FWEO) is utilized to demodulate the fault signals and diagnose the fault. The FWEO improves demodulation robustness in interference environment by introducing the weight of the instantaneous frequency. The FWEO, however, is invalid to extract fault related information under heavy interference, therefore the high-order frequency-weighted energy operator (HFWEO) is adopted based on FWEO and higher-order derivative operation. This strategy improves the demodulation robustness by enhancing the weight of instantaneous frequency with high-order derivative operation; and the correlation kurtosis criterion is utilized to determine the appropriate order to guarantee that less noise is introduced with increasing order, and achieve reliable axle-box bearing fault diagnosis. The simulated and

test signals are analyzed by the proposed strategy and compared with the other traditional ones. It indicates that this strategy can effectively suppress the interferences, and obtain better demodulation result in low signal-to-interference ratio environment. The correlation kurtosis can accurately determine the best order of HFWE0 to overcome the limitations of the traditional demodulation in heavy interferences.

Keywords: train axle-box bearing; rolling bearing fault diagnosis; energy operator demodulation; high-order frequency-weighted energy operator

轴箱轴承作为轨道交通车辆走行部中的关键旋转部件,不但承受着车辆全部的垂向载荷,同时遭受着强烈的轮对冲击。恶劣的服役环境使其容易发生突发性失效,从而威胁列车的运行安全^[1],因此需要对轴承的服役状态进行实时监控,保证列车的运行安全。复杂的服役环境导致采集到的振动信号成分更为复杂,对故障冲击的识别提出了更高的要求^[2]。

根据循环平稳理论可知,轴承的故障信号具有典型的二阶循环平稳特性,即信号的时域信号是非周期的,但是由故障冲击引起的瞬时能量波动具有典型的周期特性^[3]。因此,可通过识别轴承振动信号中的瞬时能量变化,实现轴承故障诊断与识别。

根据振动方程可知,在计算故障冲击引起的能量波动时不仅应当包含瞬时幅值部分,而且应当包含瞬时频率部分的权重。希尔伯特变换(HT)通过对故障冲击包络信息的计算,实现信号中冲击信息的识别^[4-5]。但 HT 在对信号进行解调时,计算的仅仅是信号的瞬时幅值,不包含瞬时频率部分的权重。当信号信噪比较低且存在其他干扰频率时,解调效果明显下降^[6]。特别是当干扰频率的幅值较大时,在 HT 解调谱中的主要谱线是干扰频率及其调制后的频率成分^[7]。为更好地提取信号中瞬时能量的波动,Teager 提出了 Teager 能量算子(TEO)^[8]。TEO 通过原始信号、信号一阶导数和二阶导数的非线性组合,对信号中的瞬时能量波动进行了有效估计,实现了瞬态冲击特征的提取^[9-13],但是 TEO 的本质是对信号中瞬时能量的估计,原则上其不存在无意义的负能量。为避免像 TEO 一样存在无意义的负值,且又同时在解调时保留信号的瞬时频率部分的权重,O'Toole 提出了一种非负的能量算子——频率加权能量算子(FWE0)^[14]。FWE0 通过计算信号导数的 HT,得到信号的瞬时能量估计,故而不存在负能量部分^[15]。众多学者通过对 FWE0 的研究表明,FWE0 具有比 HT 和 TEO 更好的抗干扰特性^[16]。但是,当信号中的噪声与干扰频率的能量较大时,FWE0 依然无法实现信号瞬时

冲击特征的识别。

FWE0 的核心是通过求导加入瞬时频率的权重,在此基础上本文通过计算信号的高阶导数,加大瞬时频率部分的权重,提高解调的可靠性。将所提出的解调方法称为高阶频率加权能量算子(HFWE0)。同时,提出相关峭度准则,确定合适的 HFWE0 阶次,保证解调的可靠性,并通过仿真信号验证了所提算法在强干扰环境下依然具有较好的鲁棒性。

1 基础理论

1.1 振动方程

根据牛顿力学方程,无阻尼单自由度线性系统自由振动方程可表示为^[17]

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (1)$$

式中: M 为物体质量; K 为物体刚度; x 为振动的位移; $\ddot{x}$ 为振动的加速度。对式(1)求解,可得

$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$

式中: A 为振动的瞬时幅值; ω 为系统的共振频率; ϕ 为初始相位。

系统振动的总能量 E 为

$$E = \frac{1}{2}Kx^2 + \frac{1}{2}M\dot{x}^2 \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),则系统振动的总能量 E 可近似表示为

$$E \approx \frac{1}{2}M\omega^2 A^2 \quad (4)$$

根据式(4)可知,系统的振动能量应当为 A^2 与 ω^2 的乘积再乘以一个系数 $\frac{1}{2}M$,而 HT 的解调结果仅是瞬时幅值的平方 A^2 ^[5]。

1.2 频率加权能量算子

FWE0 通过对信号求导,在计算信号的瞬时能量时加入瞬时频率部分的权重,故而 FWE0 又叫做导数包络能量算子^[12]。

频率加权能量算子的表达式为

$$\varphi[x(t)] = S[\dot{x}(t)] = |\dot{x}(t) + jH[\dot{x}(t)]|^2 = \dot{x}(t)^2 + H[\dot{x}(t)]^2 \quad (5)$$

式中: $S[\cdot]$ 表示信号的复包络; $H[\cdot]$ 表示希尔伯特变换; $\varphi[x(t)]$ 为频率加权能量算子。

根据式(2)可知

$$\dot{x}(t) = -A\omega \sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

$$H[\dot{x}(t)] = A\omega \cos(\omega t + \phi) \quad (7)$$

将式(6)(7)代入式(5),可得

$$\begin{aligned} \varphi[x(t)] &= (-A\omega \sin(\omega t + \phi))^2 + \\ & (A\omega \cos(\omega t + \phi))^2 = A^2 \omega^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)表明,FWEO与TEO一样计算的是信号的瞬时能量,而非HT的瞬时幅值平方^[15]。由于FWEO本质上是计算信号导数的包络,所以没有像TEO一样存在无意义负能量部分。

对比式(4)与式(8)可知,FWEO的解调结果只与系统的振动能量相差一个常数项 $\frac{1}{2}M$ 。

2 高阶频率加权能量算子

2.1 基本原理

FWEO通过对信号求导,在计算瞬时能量时引入瞬时频率部分的权重,从而使得FWEO具有同Teager能量算子相同的性质。鉴于此,本文提出通过求取信号的高阶导数,加大瞬时频率部分的权重,进而提高能量算子在干扰情况下解调的鲁棒性。因此,将所提的方法称为高阶频率加权能量算子(HFWEO)。

HFWEO的表达式为

$$\begin{aligned} \xi[x(t), m] &= S[x^m(t)] = |x^m(t) + \\ & jH[x^m(t)]|^2 = x^m(t)^2 + H[x^m(t)]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $x^m(t)$ 表示 $x(t)$ 的 m 阶导数; $\xi[x(t), m]$ 为 m 阶频率加权能量算子。

根据式(2),可得

$$x^m(t) = A\omega^m \cos(\omega t + \phi + m\pi/2) \quad (10)$$

$$H[x^m(t)] = A\omega^m \sin(\omega t + \phi + m\pi/2) \quad (11)$$

将式(10)和(11)代入式(9),可得

$$\begin{aligned} \xi[x(t), m] &= (x^m(t))^2 + (H[x^m(t)])^2 = \\ & (A\omega^m \cos(\omega t + \phi + m\pi/2))^2 + \\ & (A\omega^m \sin(\omega t + \phi + m\pi/2))^2 = A^2 \omega^{2m} \end{aligned} \quad (12)$$

根据式(12)可知,当阶数 m 等于1时,HFWEO即为FWEO。随着阶数 m 的增加,瞬时频率 ω 部分的权重呈指数级增长,故HFWEO可以更好地追踪信号中瞬时能量的微弱变化,从而实现信号中故障冲击的分离。

为实现离散信号的处理,需得到HFWEO的离散形式 $\xi[x(n), m]$ 。离散信号的导数可由差分公式

表示,根据前向差分公式,离散信号 $x(n)$ 的一阶导数 $\dot{x}(n)$ 为^[18]

$$\dot{x}(n) = x(n+1) - x(n) \quad (13)$$

根据递推公式,离散信号 $x(n)$ 的 m 阶导数 $x^m(n)$ 可表示为

$$x^m(n) = x^{m-1}(n+1) - x^{m-1}(n) \quad (14)$$

将式(14)代入式(9),可得HFWEO的离散形式

$$\begin{aligned} \xi[x(n), m] &= S[x^m(n)] = \\ & |x^m(n) + jH[x^m(n)]|^2 = \\ & (x^{m-1}(n+1) - x^{m-1}(n))^2 + \\ & H[x^{m-1}(n+1) - x^{m-1}(n)]^2 \end{aligned} \quad (15)$$

式(2)的离散形式为

$$x(n) = A \cos(\omega n + \phi) \quad (16)$$

将式(16)代入式(15),可得

$$\xi[x(n), m] = 2^{2m} A^2 \sin^{2m}(\omega/2) \quad (17)$$

当 $\omega/2 < \pi/4$ 时 $\sin(\omega/2) \approx \omega/2^0$, 式(17)可近似为

$$\begin{aligned} \xi[x(n), m] &= 2^{2m} A^2 \sin^{2m}\left(\frac{\omega}{2}\right) \approx \\ & 2^{2m} A^2 \frac{\omega^{2m}}{2^{2m}} \approx A^2 \omega^{2m} \end{aligned} \quad (18)$$

此时,离散HFWEO与连续HFWEO解调结果近似相等。通过上述分析可知,离散化误差是由 $\sin(\omega/2) \approx \omega/2$ 导致,且 $\sin^{2m}(\omega/2)$ 与 $(\omega/2)^{2m}$ 的差值会随着阶次 m 的增大而增大。连续的差分运算会导致计算误差的增大,故应当选取合适的阶次 m 。

2.2 解调特性分析

通常单个轴承的故障信号 $x(t)$ 可以简化为指数信号与正弦信号的调幅信号^[3],表达式为

$$x(t) = A e^{-\beta t} \cos(\omega t + \phi) \quad (19)$$

式中: β 为阻尼系数。

谐波干扰信号为

$$v(t) = L_h \cos \omega_h t \quad (20)$$

式中: L_h 为谐波干扰信号的幅值; ω_h 为谐波干扰信号的频率。

信号 $r(t) = x(t) + v(t)$ 中包含轴承的故障信号 $x(t)$ 和谐波干扰信号 $v(t)$ 。信号 $r(t)$ 的FWEO解调结果为

$$\begin{aligned} \varphi(r(t)) &= (\dot{x}(t) + \dot{v}(t))^2 + H^2(\dot{x}(t) + \dot{v}(t)) = \\ & A^2 (\beta^2 + \omega^2) e^{-2\beta t} + \lambda(t) + L_h^2 \omega_h^2 \end{aligned} \quad (21)$$

式中

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= -2A\beta L_h \omega_h e^{-\beta t} \sin(-t\omega_h + t\omega + \phi) + \\ & 2A\omega L_h \omega_h e^{-\beta t} \cos(-t\omega_h + t\omega + \phi) \end{aligned} \quad (22)$$

从式(21)可以看出,第1部分 $A^2 (\beta^2 + \omega^2) e^{-2\beta t}$ 为轴承故障信号的平方包络 $A^2 e^{-2\beta t}$ 再乘以加权系

数 $(\beta^2 + \omega^2)$,此部分对应的是轴承故障特征频率的低频部分。第 2 部分为干扰信号与轴承信号的互相调制部分,该部分位于高频。第 3 部分与干扰信号相关。FWEO 的信号干扰比 σ_{SIR} 可以通过幅值调制部分(式(21)的第 1 部分)和干扰部分(式(21)的第 3 部分)进行计算^[19]

$$\sigma_{\text{SIR}}(\varphi(r(t))) = \frac{(1/T_p) \int_0^{T_p} A^4 e^{-4\beta t} (\beta^2 + \omega^2)^2 dt}{(1/T) \int_0^T L_h^4 \omega_h^4 dt} \approx \frac{A^4 (\beta^2 + \omega^2)^2}{4\beta T_p L_h^4 \omega_h^4} \quad (23)$$

式中: T_p 为轴承故障冲击间隔。
信号 $r(t)$ 的二阶 HFWEO 解调结果为
$$\xi(r(t), 2) = (\dot{x}(t) + \dot{v}(t))^2 + H^2(\dot{x}(t) + \dot{v}(t)) = A^2 e^{-2i\beta t} (\beta^2 + \omega^2)^2 + \lambda(t) + L_h^2 \omega_h^4$$

式中
$$\begin{aligned} \lambda(t) = & -2A\beta^2 L_h \omega_h^2 e^{\beta(-t)} \cos(-t\omega_h + t\omega + \phi) + \\ & 2A\omega^2 L_h \omega_h^2 e^{\beta(-t)} \cos(-t\omega_h + t\omega + \phi) - \\ & 4A\beta\omega L_h \omega_h^2 e^{\beta(-t)} \sin(-t\omega_h + t\omega + \phi) \end{aligned}$$

二阶 HFWEO 的 σ_{SIR} 为

$$\sigma_{\text{SIR}}(\xi(r(t), 2)) = \frac{(1/T_p) \int_0^{T_p} A^4 e^{-4\beta t} (\beta^2 + \omega^2)^4 dt}{(1/T_h) \int_0^{T_h} L_h^4 \omega_h^8 dt} \approx \frac{A^4 (\beta^2 + \omega^2)^4}{4\beta T_p L_h^4 \omega_h^8} \quad (24)$$

二阶 HFWEO 与 FWEO 的 σ_{SIR} 之比为
$$\frac{\sigma_{\text{SIR}}(\xi(r(t), 2))}{\sigma_{\text{SIR}}(\varphi(r(t)))} \approx \frac{(\beta^2 + \omega^2)^2}{\omega_h^4} \quad (25)$$

通常轴承故障冲击的共振频率 ω 都大于谐波干扰频率 ω_h , 则 $\frac{\sigma_{\text{SIR}}(\xi(r(t), 2))}{\sigma_{\text{SIR}}(\varphi(r(t)))} > 1$, 可见二阶 HFWEO 的 σ_{SIR} 大于 FWEO 的 σ_{SIR} 。

信号 $r(t)$ 的 m 阶 HFWEO 的 σ_{SIR} 为
$$\sigma_{\text{SIR}}(\xi(r(t), m)) \approx \frac{A^4 (\beta^2 + \omega^2)^{2m}}{4\beta T_p L_h^4 \omega_h^{4m}} \quad (26)$$

则
$$\frac{\sigma_{\text{SIR}}(\xi(r(t), m))}{\sigma_{\text{SIR}}(\xi(r(t), m-1))} \approx \frac{(\beta^2 + \omega^2)^2}{\omega_h^4} > 1 \quad (27)$$

通过式(27)可知,随着 HFWEO 阶次 m 的增大,HFWEO 的 σ_{SIR} 逐渐提高。阶次 m 越大,HFWEO 对信号中的谐波干扰抑制效果越好。
通过对比不同 HFWEO 解调结果的信噪比 σ_{SNR} , 评估 HFWEO 阶次对噪声的影响。HFWEO 解调结果的 σ_{SNR} 定义为

$$\sigma_{\text{SNR}} = 10 \log \frac{\sum_X |\xi(x(t), m)|^2}{\sum_X |\xi(n(t), m)|^2} \quad (28)$$

式中: $x(t)$ 为轴承的故障信号; $n(t)$ 为白噪声。
原始信号的 σ_{SNR} 为 5 dB,图 1 为根据式(28)计算的 1 至 10 阶 HFWEO 解调结果的 σ_{SNR} , 其中一阶 HFWEO 即 FWEO。从图中可以看出,随着阶次的增大 HFWEO 的 σ_{SNR} 逐渐降低,这是由于连续的差分运算,导致解调结果中包含更多的高频噪声。图 2 为 $\sigma_{\text{SNR}}=5$ dB 轴承故障仿真信号 FWEO 和 10 阶 HFWEO 的解调结果,显然 FWEO 结果中可以发现明显的故障冲击,但是 10 阶 HFWEO 结果中的故障冲击很微弱。

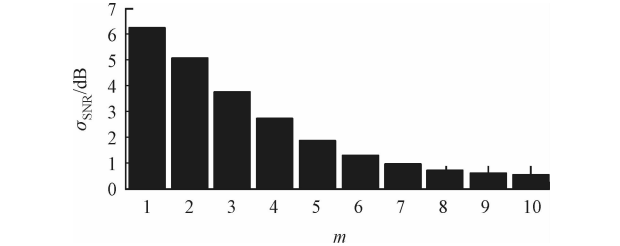


图 1 不同阶次 HFWEO 解调结果 σ_{SNR}

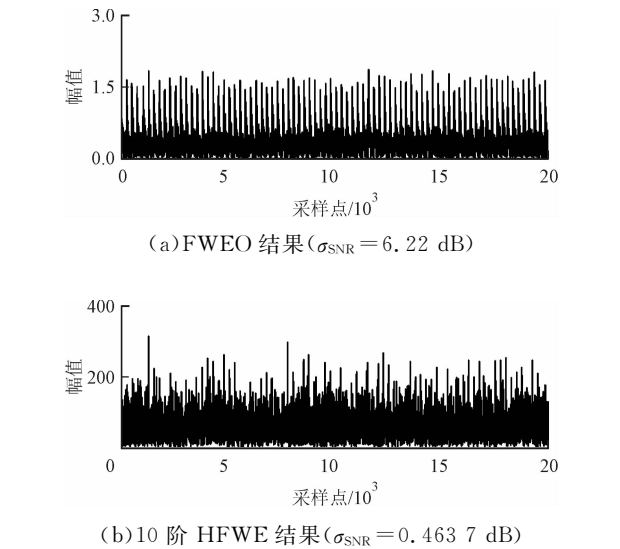


图 2 两种方法解调结果的对比

综上所述,随着阶次的增大,HFWEO 对谐波干扰信号的抑制效果越来越好,但是随着连续的差分运算,导致 HFWEO 解调结果中引入了更多的高频噪声。故应当设置合适的阶次 m , 保证 HFWEO 在对谐波干扰具有较好的抑制效果的同时又避免引入更多的噪声。

2.3 阶次确定

通过上述分析可知,阶次对 HFWEO 的解调结

果有着至关重要的影响,故在此提出相关峭度准则(CK) K_{CK} 来确定合适的阶次 m 。

K_{CK} 指标不仅可以对序列中的冲击特性进行表征,同时通过平移周期 T ,可以对序列中的周期性进行表征^[20]。序列 y_n 的 K_{CK} 表达式为

$$K_{CK}(y_n, T, H) = \sum_{n=1}^N \left(\prod_{h=0}^H y_{n-hT} \right)^2 / \left(\sum_{n=1}^N y_n^2 \right)^{H+1} \quad (29)$$

式中: H 为平移周期的个数; T 为平移周期长度; N 为序列长度。

在此, y_n 代表不同阶次下的HFWEO解调结果 $\xi(y_n, m)$ 。通过式(29)可以得到不同阶次HFWEO解调结果的 K_{CK} 值,则最优的HFWEO阶次 m_{best} 为

$$m_{best} = \arg \max_m (K_{CK}(\xi(y_n, m), T, H)) \quad (30)$$

3 仿真验证

使用仿真信号对所提算法进行验证,仿真信号的表达式为

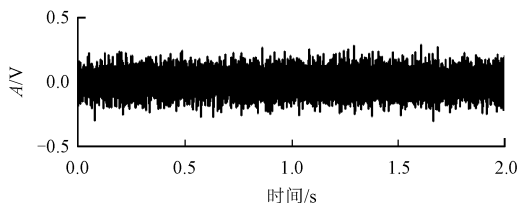
$$y(t) = \sum_{m=-L}^L A_m e^{-\beta(t-mT_p-\tau_m)} \cos(\omega_r(t-mT_p-\tau_m)) \cdot u(t-mT_p-\tau_m) \quad (31)$$

式中: A_m 是冲击的幅值, $A_m=1$; L 是冲击个数; T_p 是故障冲击的间隔,特征频率 $f_c=1/T_p=104.5$ Hz; ω_r 是故障引起共振的频率, $\omega_r=4\,000$ Hz; τ_m 为随机转移系数,通常取 $0.01T_p \sim 0.02T_p$; $u(t)$ 是单位阶跃函数; β 是阻尼系数, $\beta=1\,500$ N·s/m。

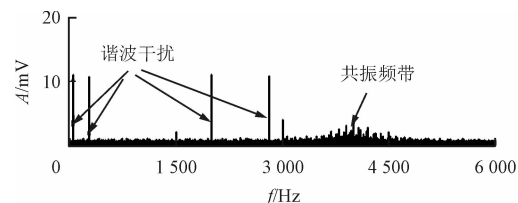
信号的采样频率 $f_s=12\,000$ Hz,信号时间长度为2 s。在信号中加入不同信号噪声比的白噪声与不同信号干扰比的正弦干扰信号^[17],以研究所提方法在不同噪声与干扰情况下的解调效果。

首先,对比几种不同的解调方法它们在高 σ_{SNR} 与高 σ_{SIR} 情况下的解调效果。在信号中加入 $\sigma_{SNR}=0$ dB的白噪声和 $\sigma_{SIR}=-5$ dB的正弦干扰信号,干扰信号的频率分别为50、270、2 043和2 810 Hz。加噪后信号的时域波形与频谱如图3a和3b所示。虽然从仿真信号的频谱在图3b中可以发现很明显的干扰频率及噪声,但由于信号的 σ_{SNR} 与 σ_{SIR} 都较高,依然可以很明显地观察到共振频带。

使用HT、TEO、FWEO与HFWEO 4种方法对仿真信号进行解调,HT、TEO、FWEO解调结果如图4所示。可以发现,在高 σ_{SNR} 与 σ_{SIR} 情况下,HT、TEO、FWEO 3种方法的解调谱中都可以发现故障特征频率 f_c 及其倍频,解调谱中存在干扰频率。这说明3种解调方法对干扰信号都较敏感,只

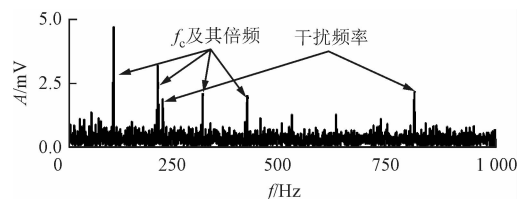


(a) 时域信号

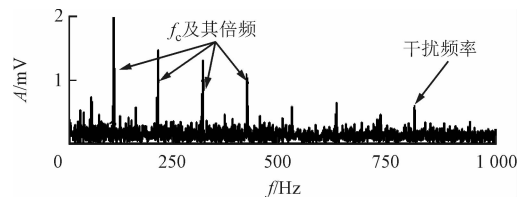


(b) 傅里叶谱

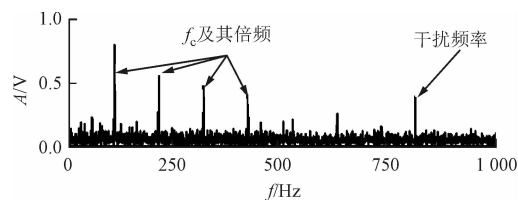
图3 $\sigma_{SNR}=0$ dB和 $\sigma_{SIR}=-5$ dB时仿真信号



(a) 包络谱



(b) Teager 谱



(c) FWEO 谱

图4 $\sigma_{SNR}=0$ dB和 $\sigma_{SIR}=-5$ dB时3种解调方法结果的对比

是由于干扰频率的能量较低,所以从解调谱中依然可以发现故障特征频率及其倍频。

图5为1至10阶的HFWEO相关峭度,第2阶HFWEO的相关峭度值最大,当阶次继续增大时,由于连续差分运算引入了更多的噪声,所以相关峭度值逐渐降低。图6为归一化后1至10阶的HFWEO解调谱。从不同阶次的解调谱中都可以识别到故障特征频率 f_c 及其倍频,同时可以发现解

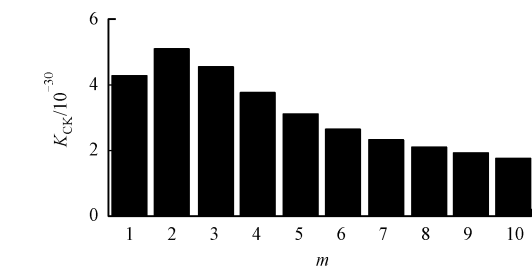


图 5 HFWEO 相关峭度

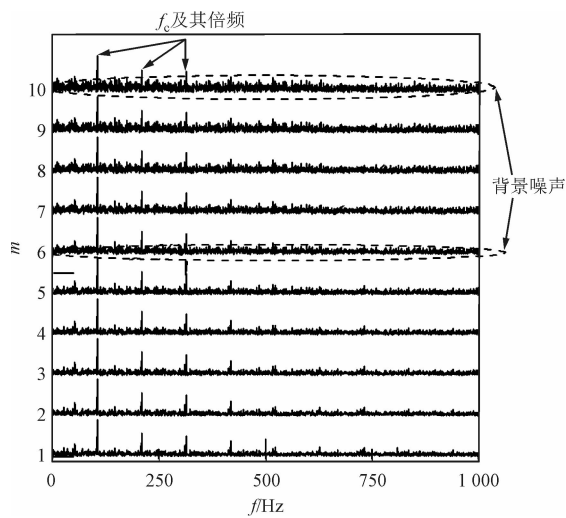
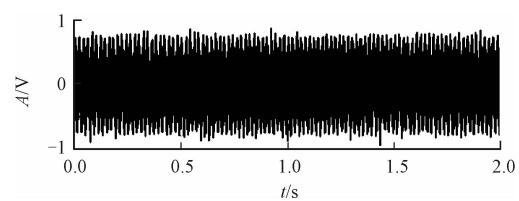


图 6 $\sigma_{\text{SNR}}=0\text{ dB}$ 和 $\sigma_{\text{SIR}}=-5\text{ dB}$ 时的仿真信号 HFWEO 谱

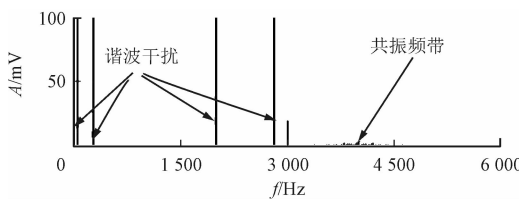
调谱中不存在干扰频率。但随着阶次的增大,解调谱中的背景噪声也逐渐增大,故障特征频率的倍频数量减少。综上所述,HFWEO 通过增加瞬时频率部分的权重,保证在解调时对于干扰频率具有更好的抑制效果。同时,通过相关峭度指标可以确定合适的 HFWEO 阶次,确保 HFWEO 在对谐波干扰进行抑制的同时引入更少的高频噪声。

保持信号的 $\sigma_{\text{SNR}}=0\text{ dB}$ 不变,将 σ_{SIR} 降低为 -20 dB ,对比 4 种方法对高 σ_{SNR} 、低 σ_{SIR} 信号的解调效果。加噪信号的时域波形与频谱如图 7a 和 7b 所示。由于信号的 σ_{SIR} 较低,此时谐波频率的幅值较大,故从信号的频谱中很难识别出共振频带。

HT、TEO 和 FWEO 的解调谱如图 8 所示。由于信号的 σ_{SIR} 较低,所以从这 3 种方法的解调谱中都只能识别出干扰频率,而无法识别出故障特征频率 f_c 及其倍频。使用 HFWEO 对仿真信号进行解调,1 至 10 阶 HFWEO 相关峭度如图 9 所示,归一化后 1 至 10 阶的 HFWEO 谱如图 10 所示。在前 4 阶 HFWEO 解调谱中只能识别到干扰频率,此时相关峭度值也较低;到第 5 阶 HFWEO 解调谱中发现故障特征频率 f_c 及其倍频,但是依然可以发现干扰

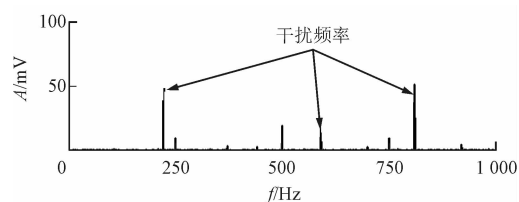


(a) 时域信号

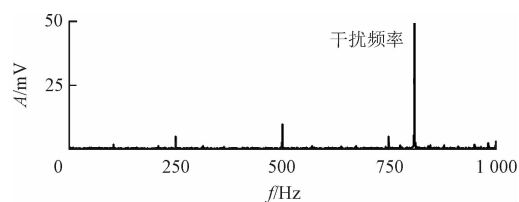


(b) 傅里叶谱

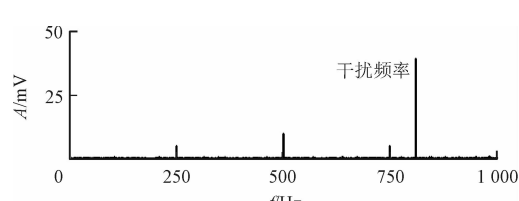
图 7 $\sigma_{\text{SNR}}=0\text{ dB}$ 和 $\sigma_{\text{SIR}}=-20\text{ dB}$ 时的仿真信号



(a) 包络谱



(b) Teager 谱



(c) FWEO 谱

图 8 $\sigma_{\text{SNR}}=0\text{ dB}$ 和 $\sigma_{\text{SIR}}=-20\text{ dB}$ 时的 3 种解调方法结果对比

频率,此时相关峭度值依然较小。随着阶次的增大,在 7 阶以后 HFWEO 解调谱中只能识别到故障特征频率 f_c 及其倍频,而不再存在干扰频率。此时,相关峭度值较大,且在第 9 阶时 HFWEO 的相关峭度值达到最大。同时,随着阶次的增大,高频噪声也在逐渐增大,第 10 阶 HFWEO 的相关峭度值反而降低。这说明,HT、TEO 与 FWEO 的抗谐波干扰性较差,而本文所提的 HFWEO 通过连续的导数运算,加大了瞬时频率部分的权重,使得其在较强干扰

时仍然具有较好的鲁棒性。同时,相关峭度准则可以准确地得到合适的 HFWE0 阶次,保证 HFWE0 的可靠性。

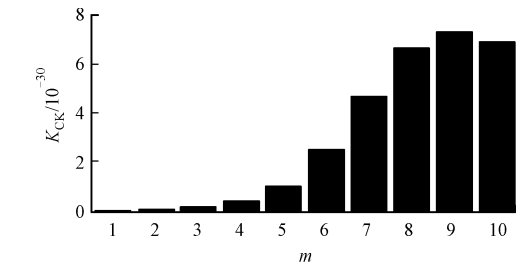


图 9 HFWE0 相关峭度

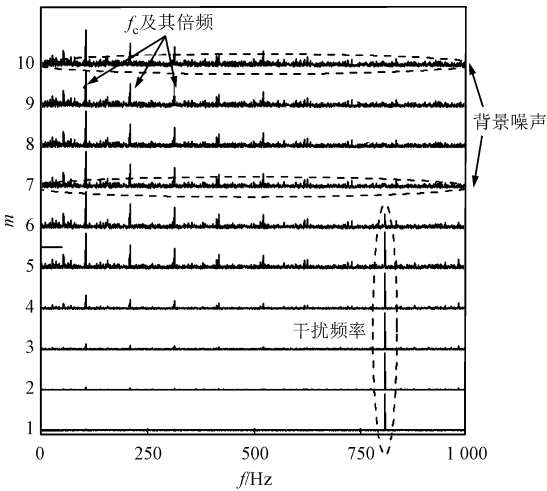
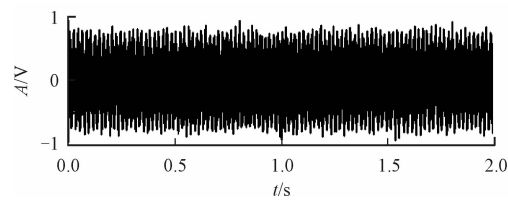
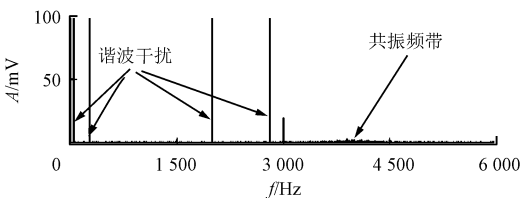


图 10 $\sigma_{SNR}=0$ dB 和 $\sigma_{SIR}=-20$ dB 时的仿真信号 HFWE0 谱

为进一步验证 4 种解调算法对低 σ_{SNR} 和低 σ_{SIR} 信号的解调效果,在仿真信号中加入 $\sigma_{SNR}=-5$ dB 的白噪声与 $\sigma_{SIR}=-20$ dB 的干扰信号。加噪仿真信号的时域波形与频谱如图 11a 与 11b 所示。由于信号的 σ_{SNR} 与 σ_{SIR} 都很低,所以从频谱中同样很难识



(a) 时域信号

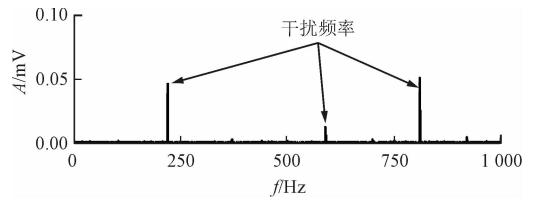


(b) 傅里叶谱

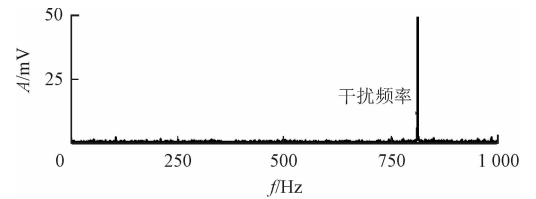
图 11 $\sigma_{SNR}=-5$ dB 和 $\sigma_{SIR}=-20$ dB 时的仿真信号

别出共振频带。

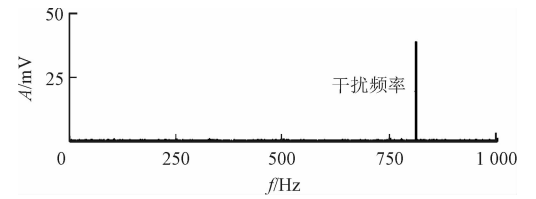
分别使用 HT、TEO 和 FWE0 对加噪后仿真信号进行解调,解调谱如 12 所示。可以看出,解调谱中的主要频率成分均是干扰频率,无法识别出故障特征频率 f_c 及其倍频。



(a) 包络谱



(b) Teager 谱



(c) FWE0 谱

图 12 $\sigma_{SNR}=-5$ dB 和 $\sigma_{SIR}=-20$ dB 时的 3 种解调方法结果对比

图 13 和图 14 所示分别为 1 至 10 阶 HFWE0 的相关峭度值和归一化后的解调谱,显然当阶次较低时,HFWE0 同样无法对信号中的瞬态冲击进行提取,解调谱中只能发现干扰频率,故此时相关峭度较低。随着阶次的增加,干扰频率的幅值逐渐减小,而故障特征频率 f_c 及其倍频的幅值逐渐增加。当阶次大于 7 以后,HFWE0 解调谱中不存在干扰频率,但随着阶次的增加,解调谱中的噪声也在增大,从而影响对故障特征频率的观测效果,所以第 7 阶时的 HFWE0 相关峭度值最大。

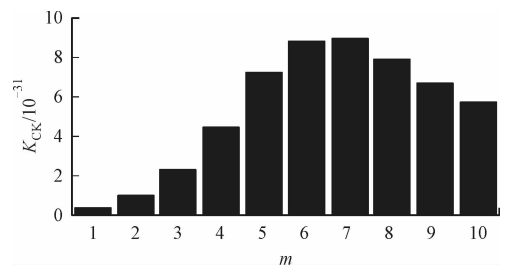


图 13 HFWE0 相关峭度

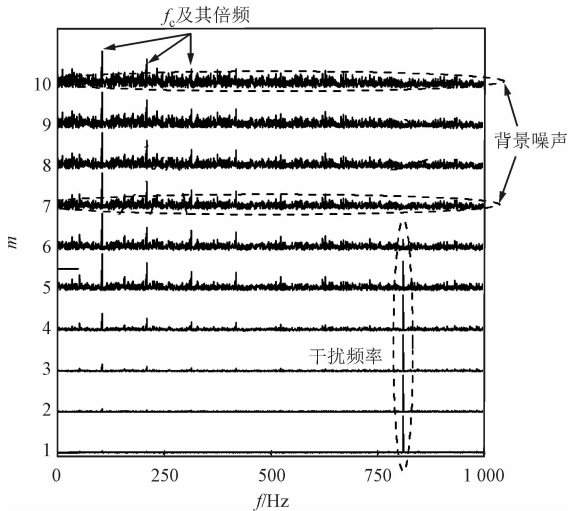


图 14 $\sigma_{\text{SNR}} = -5 \text{ dB}$ 和 $\sigma_{\text{SIR}} = -20 \text{ dB}$ 时的仿真信号 HFWE0 谱

综上所述,本文所提的 HFWE0 能量算子对于干扰具有很好的抑制作用,可以在低 σ_{SIR} 情况下具有良好的解调效果,同时所提的相关峭度准则可以准确地确定最佳的 HFWE0 阶次。

4 试验验证

4.1 铁路货车轮对跑合试验台

为验证 HFWE0 对实际振动信号的解调效果,本文对货车轮对跑合试验台的振动数据进行分析,关于试验台的详细介绍见文献[18]。测试轴承型号为 197726,在实际运行过程中,轴承形成内圈损伤,内圈滚道出现明显剥落。轮对的旋转速度为 465 r/min,轴承的旋转频率为 $f_r = 7.75 \text{ Hz}$,采样频率为 $f_s = 12.8 \text{ kHz}$ 。根据轴承参数,计算得到内圈故障频率 $f_{\text{BPF1}} = 88.25 \text{ Hz}$ 。现对 1 s 的振动数据进行分析,振动信号的时域波形及其频谱如图 15a 和 15b 所示。当轴承存在内圈损伤时,振动信号的解调谱中应当出现转频 f_r 、内圈故障频率 f_{BPF1} 及其倍频和以内圈故障频率 f_{BPF1} 为中心且以转频 f_r 为间隔的边频带[3]。

使用 HT 对信号进行解调,包络谱如 16a 所示。包络谱中故障特征频率 f_{BPF1} 的谱线并不明显,并且没有发现以 f_{BPF1} 为中心、以转频 f_r 为间隔的边频带。然后,使用 TEO 与 FWEO 对信号进行解调,解调谱如图 16b 和 16c 所示。同包络谱相同,从解调谱中同样只能隐约观测到 f_{BPF1} ,但依然无法识别到以 f_{BPF1} 为中心且以转频为 f_r 间隔的边频带。这说明 HT、TEO 和 FWEO 都无法对信号中的轴承故障冲击进行提取,因此无法从解调谱中发现与内圈

故障对应的频谱特征。

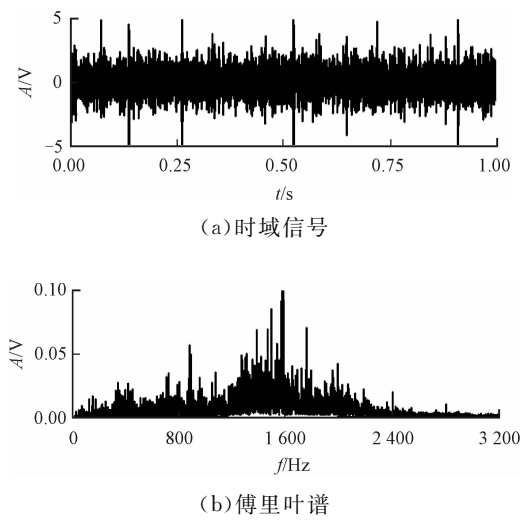


图 15 铁路货车轮对跑合试验台振动信号及频谱

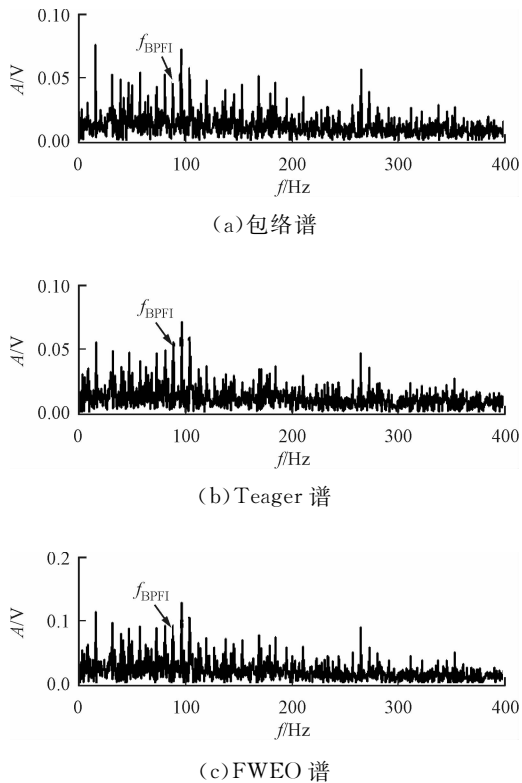
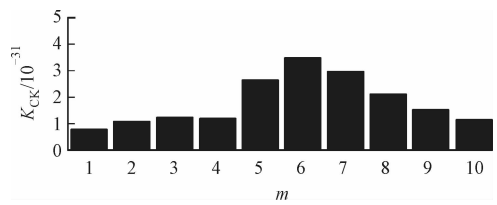
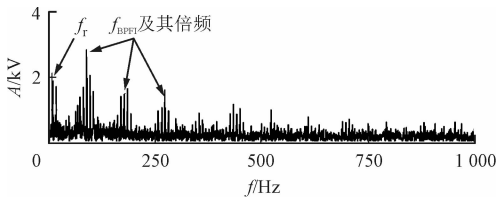


图 16 3 种解调方法结果铁路货车轮对跑合试验台振动数据解调对比

使用本文所提的 HFWE0 对信号进行解调,并计算各阶次 HFWE0 相关峭度值,其结果如图 17a 所示。第 7 阶 HFWE0 的相关峭度值最大,其解调谱如 17b 所示。从解调谱中不但可以识别到转频 f_r 、内圈故障特征频率 f_{BPF1} ,而且还可以识别到以 f_{BPF1} 为中心且以转频 f_r 为间隔的边频带。这与内圈故障对应的频谱特征相吻合,说明 HFWE0 可以



(a)HFWEO 相关峭度



(b)第 6 阶 HFWEO 谱

图 17 铁路货车轮对跑合试验台振动数据 HFWEO 解调结果

很好地从信号中分离出故障冲击信息。

在货车轮对跑合试验台的振动信号中噪声与干扰较大,轴承故障冲击的能量较微弱,因此传统解调方法无法对故障冲击进行提取。根据式(27)可知,随着阶数 m 的增加,HFWEO 的抗干扰性越来越好,故从高阶 HFWEO 谱中可以识别到故障特征频率。同时,相关峭度准则可以准确地确定 HFWEO 的阶次。

4.2 高速列车轮对跑合试验台

为进一步验证本文所提算法在复杂环境下的有效性,使用高速列车轮对跑合试验台的振动数据对算法进行验证。图 18 所示为高速列车轮对跑合试验台,试验台包括电机、驱动轮对、高速动车组轮对、高速动车组轴箱和载荷加载装置。电机带动驱动轮对驱动高速动车组轮对,进而带动轴箱内的轴承旋转,载荷加载装置可以对轴箱施加垂向载荷,振动传感器位于轴箱上。

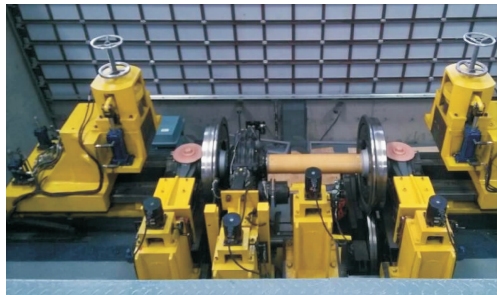


图 18 高速列车轮对跑合试验台

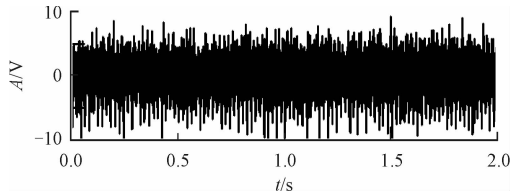
在轴承的外滚道表面以 120° 夹角设置 3 处人工损伤,3 处损伤的深度为 1 mm,宽度分别为 1、3 和 5 mm,损伤部位如图 19 所示。



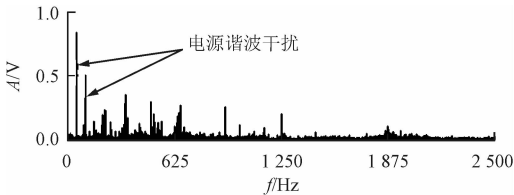
图 19 轴承外圈损伤示意图

试验时,在轴箱垂向上施加 50 kN 的垂向载荷,采样频率为 10 kHz。驱动轮对的转速为 100 km/h,则轴承的旋转频率 $f_r=10.28$ Hz,因此根据轴承的几何参数和转频可以计算得到外圈故障特征频率 $f_{BPFO}=83.29$ Hz。

图 20a 和 20b 所示为 1 s 的高速列车轮对跑合试验台振动信号及其频谱。显然,由于试验台的结构复杂,因而信号中的频率成分更加丰富。现场恶劣的采集环境导致信号中存在 50、100 Hz 的谐波干扰频率。故高速列车轮对跑合试验台的振动信号比货车轮对跑合试验台的振动信号更加复杂,对算法的鲁棒性要求更高。



(a)时域信号



(b)傅里叶谱

图 20 高速列车轮对跑合试验台振动信号及频谱

使用 HT、TEO 和 FWEO 对信号进行解调,解调谱如图 21 所示。由于谐波干扰和噪声的影响,从它们的解调谱中都无法识别到故障特征频率。在包络谱中可以发现很明显的干扰频率,这说明 HT 对谐波干扰较敏感。TEO 和 FWEO 计算的是信号的瞬时能量,对谐波干扰的抑制效果优于 HT。但是,振动信号中还存在轮对冲击的成分,且其能量大于轴承故障冲击能量,因此从 TEO 与 FWEO 解调谱

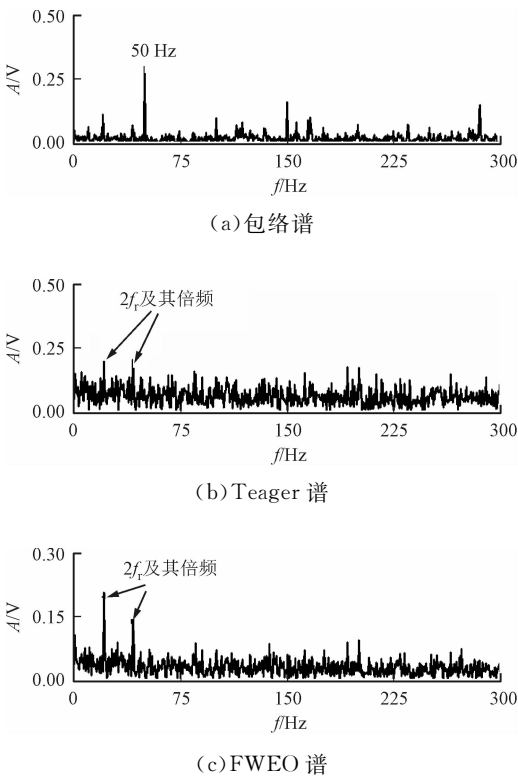


图 21 高速列车车轮对跑合试验台振动数据 4 种解调方法结果对比

中仅可以识别到转频 f_r 及其二倍频。

使用本文所提 HFWEO 对振动信号进行解调, 1 至 10 阶 HFWEO 相关峭度如 22a 所示, 第 10 阶相关峭度最大, 其对应的 HFWEO 谱如 22b 所示。从 HFWEO 中可以发现很明显的故障特征频率 f_{BPFO} 及其二倍频, 说明本文算法成功诊断出轴承外圈故障。这是因为, 轮对冲击的能量虽然较大, 但是轴承故障冲击的瞬时频率比轮对冲击的瞬时频率更

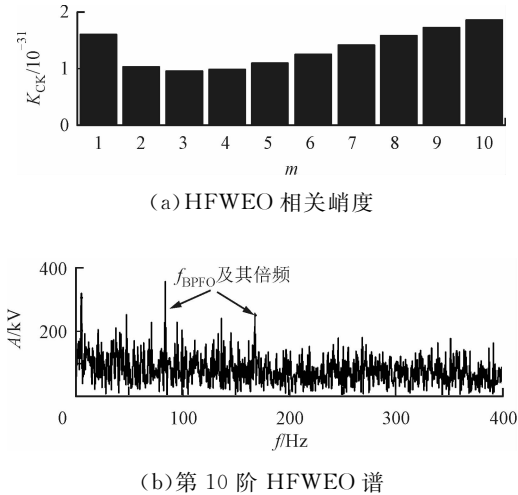


图 22 高速列车车轮对跑合试验台振动数据 HFWEO 解调结果

高^[1], HFWEO 通过不断加大瞬时频率 ω 的权重, 从而对瞬时频率较高的冲击提取效果更好, 从 HFWEO 谱中可以更明显识别出轴承外圈故障特征频率 f_{BPFO} 及其倍频。

5 结 论

通过增加瞬时频率部分的权重, 提高了 HFWEO 抗干扰的能力, 保证在干扰均较大时, 依然具有良好的解调效果。但是, 连续的差分运算导致解调时引入了高频噪声, 因此需要确定合适的阶数。通过相关峭度准则可以确定合适的 HFWEO 阶次, 保证算法在对于干扰信号具有较好鲁棒性的同时引入更少的高频噪声。仿真信号与试验信号分析表明, 本文算法可以在信号中存在严重干扰情况下依然可以实现轴承故障冲击的解调, 从解调谱中识别故障特征频率。

参考文献:

[1] 刘国云, 曾京, 罗仁, 等. 轴箱轴承缺陷状态下的高速车辆振动特性分析 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(9): 37-42, 51.

LIU Guoyun, ZENG Jing, LUO Ren, et al. Vibration performance of high-speed vehicles with axle box bearing defects [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(9): 37-42, 51.

[2] DING J M. Fault detection of a wheelset bearing in a high-speed train using the shock-response convolutional sparse-coding technique [J]. Measurement, 2018, 117: 108-124.

[3] RANDALL R B, ANTONI J. Rolling element bearing diagnostics; a tutorial [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(2): 485-520.

[4] 丁康, 米林, 王志杰. 解调分析在故障诊断中应用的局限性问题 [J]. 振动工程学报, 1997(1): 13-20.

DING Kang, MI Lin, WANG Zhijie. Investigation on limitations for demodulation analysis application in failure diagnosis [J]. Journal of Vibration Engineering, 1997(1): 13-20.

[5] FELDMAN M. Hilbert transform in vibration analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(3): 735-802.

[6] 胡异丁, 任伟新, 杨栋, 等. 基于希尔伯特变换的非平稳调幅信号解调 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(10): 181-183.

HU Yiding, REN Weixin, YANG Dong, et al. Demodulation of non-stationary amplitude modulated sig-

- nal based on Hilbert transform [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(10): 181-183.
- [7] FAGHIDI H, LIANG M. Bearing fault identification by higher order energy operator fusion: a non-resonance based approach [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 381: 83-100.
- [8] 夏均忠, 赵磊, 白云川, 等. 基于 Teager 能量算子和 ZFFT 的滚动轴承故障特征提取 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(11): 106-110.
- XIA Junzhong, ZHAO Lei, BAI Yunchuan, et al. Fault feature extraction of rolling element bearings based on Teager energy operator and ZFFT [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(11): 106-110.
- [9] 杨青乐, 梅检民, 肖静, 等. Teager 能量算子增强倒阶次谱提取轴承微弱故障特征 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(6): 1-5.
- YANG Qingle, MEI Jianmin, XIAO Jing, et al. Weak fault feature extraction for bearings based on an order cepstrum enhanced with Teager energy operator [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(6): 1-5.
- [10] KAISER J F. Some useful properties of Teager's energy operators [C]//IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993: 149-152.
- [11] 马增强, 李亚超, 刘政, 等. 基于变分模态分解和 Teager 能量算子的滚动轴承故障特征提取 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(13): 134-139.
- MA Zengqiang, LI Yachao, LIU Zheng, et al. Rolling bearings' fault feature extraction based on variational mode decomposition and Teager energy operator [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(13): 134-139.
- [12] 程军圣, 杨怡, 杨宇. 基于 LMD 的能量算子解调机械故障诊断方法 [J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(6): 915-919, 1033.
- CHENG Junsheng, YANG Yi, YANG Yu. Mechanical fault diagnosis of energy operator demodulating approach based on LMD [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(6): 915-919, 1033.
- [13] 徐元博, 蔡宗琰, 丁凯. 复杂背景下对称差分解能量算子在轴承故障诊断中的应用 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(8): 246-254.
- XU Yuanbo, CAI Zongyan, DING Kai. Bearing fault detection based on an analytic energy operator of symmetrical differencing under complex background [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(8): 246-254.
- [14] O'TOOLE J M, TEMKO A, STEVENSON N. Assessing instantaneous energy in the EEG: a non-negative, frequency-weighted energy operator [C]//2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 5333-5342.
- [15] 徐元博, 蔡宗琰. 频率加权能量算子在振动筛故障诊断中的应用 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(9): 2475-2482.
- XU Yuanbo, CAI Zongyan. A frequency-weighted energy operator for bearing fault detection of vibrating screen [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(9): 2475-2482.
- [16] IMAOUCHEN Y, KEDADOUCHE M, ALKAMAR, et al. A frequency-weighted energy operator and complementary ensemble empirical mode decomposition for bearing fault detection [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 82: 103-116.
- [17] 王天金, 冯志鹏, 郝如江, 等. 基于 Teager 能量算子的滚动轴承故障诊断研究 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(2): 1-5, 85.
- WANG Tianjin, FENG Zhipeng, HAO Rujiang, et al. Fault diagnosis of rolling element bearings based on Teager energy operator [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(2): 1-5, 85.
- [18] MARAGOS P, POTAMIANOS A. Higher order differential energy operators [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1995, 2(8): 152-154.
- [19] LIANG M, SOLTANI BOZCHALOOI I. An energy operator approach to joint application of amplitude and frequency-demodulations for bearing fault detection [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(5): 1473-1494.
- [20] MCDONALD G L, ZHAO Q, ZUO M J. Maximum correlated Kurtosis deconvolution and application on gear tooth chip fault detection [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 33: 237-255.

(编辑 杜秀杰)