

APLCD-WPT 在滚动轴承特征提取算法中的应用^{*}

赵晓平^{1,2}, 周子贤^{1,2}, 王丽华³, 张永宏³, 陶润喆³

(1. 南京信息工程大学江苏省网络监控中心 南京, 210044)

(2. 南京信息工程大学计算机与软件学院 南京, 210044) (3. 南京信息工程大学信息与控制学院 南京, 210044)

摘要 针对滚动轴承特征频率提取问题, 提出自适应部分集成局部特征尺度分解 (adaptive partly-ensemble local characteristic-scale decomposition, 简称 APLCD) 与小波包变换 (wavelet package transform, 简称 WPT) 结合的 APLCD-WPT 方法。首先, 利用 APLCD 对滚动轴承振动信号进行处理, 通过添加幅值随频率变化的噪声改善信号极值点分布, 再提取内禀尺度分量 (intrinsic mode component, 简称 ISC); 其次, 对 ISC 分量中模态混淆部分使用 WPT 进行修正, 提取滚动轴承特征频率信号。应用提出方法对实测的卧式螺旋离心机振动信号进行研究, 结果表明, 基于 APLCD-WPT 的算法能够有效地解决模态混淆问题, 实现特征频率信号的精确提取。

关键词 滚动轴承; 特征提取; 模态混淆; 自适应部分集成局部特征尺度分解; 小波包

中图分类号 TN911; TH133.33

引言

滚动轴承是机械设备中应用最为广泛的部件, 约 30% 的机械故障是由滚动轴承的损坏引发的^[1], 因此, 对滚动轴承的状态监测具有十分重要的意义。当轴承发生故障时会产生大量非平稳、非线性振动信号, 时频分析方法因能提供非平稳信号在时域和频域的联合分布信息而应用广泛, 典型的时频分析方法如短时傅里叶变换、小波变换等都存在缺乏自适应性的缺陷^[2-3]。近年来, 最具代表性的时频分析方法是 Huang 等^[4]提出的经验模态分解 (empirical mode decomposition, 简称 EMD), EMD 分解能够自适应地将信号分解到多个内禀模态函数分量, 在多个领域得到广泛应用。Zheng 等^[5]提出一种新的自适应时频分析方法 (local characteristic-scale decomposition, 简称 LCD), LCD 分解能够根据信号的局部时变特征自适应地分解信号, 得到若干瞬时频率具有物理意义的内禀尺度分量^[6]。由于 LCD 分解是基于数据本身的特征尺度参数, 且只采用一次拟合, 因此在提高计算效率、抑制端点效应和削弱模态混淆等方面效果更佳^[7]。虽然 LCD 方法已在信号分析及机械故障诊断等领域取得较好效果, 但 LCD 依然存在模态混淆问题^[8]。

针对此问题, 国内外很多学者提出了解决方法。Deering 等^[9]提出了通过添加掩膜信号的方法, 均化原始信号的极值点分布, 达到抑制模态混淆的目的。Wu 等^[10]提出的基于噪声辅助分析的总体平均经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, 简称 EEMD), 对原始信号加入多对噪声, 分解后再总体平均作为提取特征, 较好地抑制了模态混淆。这些抑制模态混淆的算法都对 LCD 方法的改进提供了思路。相较于 EMD 方法, LCD 对噪声和间歇信号更敏感。因此, 郑进德等^[11]提出完备总体平均局部特征尺度分解 (complete ensemble local characteristic-scale decomposition, 简称 CELCD), 通过向信号添加多对相反的白噪声再 LCD 分解取均值, 提取出引起模态混淆的分量, 然后对余量直接进行 LCD 分解, 保证了分解的完备性, 但该方法依然存在少量的模态混淆现象。

基于以上分析, 笔者提出了基于小波包的 APLCD-WPT 时频分析方法。首先, 对原始信号添加多对相反且幅值随频率变化的噪声, 改善信号极值的分布情况; 其次, 对加噪信号进行 LCD 分解, 将分解结果总体平均后得到 ISC 分量; 最后, 针对总体平均后存在的少量模态混淆现象, 利用 WPT 的局部分析能力予以修正, 将特征频率从混淆的 ISC 分量中提取出来。实测卧式螺旋离心机信号验证结

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (51505234, 51405241, 51575283)

收稿日期: 2017-02-09; 修回日期: 2017-05-04

果表明, APLCD-WPT 方法保证提取分量满足 ISC 分量定义, 克服模态混淆的同时保证了分解的完备性, 能够实现特征信号的精确提取。

1 LCD 与小波包理论

1.1 LCD 理论

LCD 方法假设任何一个复杂信号都可分解为若干瞬时频率具有物理意义的内禀尺度分量, 即 ISC 之和^[5]。对一维信号 $S(t)$ 的 LCD 分解步骤简述如下。

1) 确定信号 $S(t)$ 的极值点 m_k 与 m_k 所对应的时刻 $t_k (k=1, 2, \dots, M)$, M 为极值点个数。

2) 根据式(1)计算任意两个相邻的极大(或极小)值连线 l_k 在 t_k 时刻的函数值 A_k , 再计算 A_k 与 t_k 时刻极值 m_k 的差 L_k , 式中 α 的值一般取 0.5

$$A_{k+1} = m_k + \frac{(t_{k+1} - t_k)}{(t_{k+2} - t_k)}(m_{k+2} - m_k) \quad (1)$$

$$L_k = \alpha * A_k + (1 - \alpha)m_k \quad (2)$$

采用三次样条函数拟合 (t_k, L_k) 得到均值曲线 ml_{i1} , 然后将 ml_{i1} 从原信号 $S(t)$ 中分离

$$S_i(t) = S(t) - ml_{i1} \quad (3)$$

3) 若 $S_i(t)$ 满足 ISC 判据条件, 输出 $S_i(t)$ 并令 $ISC_1 = S_i(t)$, 否则将 $S_i(t)$ 代替原始数据 $S(t)$ 。重复步骤 1 和 2 多次, 直到 $S_i(t)$ 满足 ISC 条件。 $S_i(t)$ 为第 1 个 ISC 分量, 记 $ISC_1 = S_i(t), i = i + 1$ 。

4) 将 ISC_1 分量从原始信号中分离出来, 得到一个新信号作为输入信号, 重复步骤 1~3, 得到 $ISC_2, ISC_3, \dots, ISC_n$, 直到剩余信号单调或者能量与原始信号相比可忽略不计。这样将信号 $S(t)$ 分解为 n 个内禀尺度分量和一个残余项 $r(t)$ 之和, 即

$$S(t) = \sum_{i=1}^n ISC_i + r(t) \quad (4)$$

ISC 分量必须满足两个条件: a. 整个数据段内, 任意相邻的两个极值点符号互异; b. 令数据段内极值点为 $m_k (k=1, 2, \dots, N)$, 对应的时刻为 t_k 。那么, 由任意两个相邻的极大(或小)值点 $(t_k, m_k), (t_{k+2}, m_{k+2})$ 确定的直线 l_k 在 t_{k+1} 时刻的函数值 A_{k+1} 与极值 m_{k+1} 比值关系近似不变。

1.2 小波包理论

滚动轴承信号分析中, 为解决特征提取后存在的少量模态混淆问题, 可利用 WPT^[12] 对各提取分量的细节部分进行修正, 从而精确提取特征频率, 便

于准确判定故障类型^[13]。

WPT 是小波变换的推广, 与小波变换不同的是 WPT 在对信号的低频部分进行分解的同时, 对高频部分也进行了分解, 具有更好的局部分析能力。小波包分解利用一组相关联的低通滤波器和高通滤波器, 将信号分解成低频和高频两部分, 通过多次分解达到所需要的频率区间。若分解的层数为 l , 则分解后的节点数为 l^2 。小波包变换的二尺度方程为

$$\begin{cases} \omega_{2n} = \sqrt{2} \sum_k h_{0k} \omega_n(2t - k) \\ \omega_{2n+1} = \sqrt{2} \sum_k h_{1k} \omega_n(2t - k) \end{cases} \quad (5)$$

其中: h_{0k}, h_{1k} 为滤波器系数。

当 $n=0$ 时, $\omega_0(t)$ 为尺度函数, $\omega_1(t)$ 为小波函数, $\{\omega_n(t)\}_{n \in Z}$ 为所确定的小波包。

小波包分系数的递推公式为

$$\begin{cases} d_k^{i+1, 2n} = \sum_l h_{0(2l-k)} d_l^{i, n} \\ d_k^{i+1, 2n+1} = \sum_l h_{1(2l-k)} d_l^{i, n} \end{cases} \quad (6)$$

2 APLCD-WPT 方法

虽然基于噪声辅助分析的方法对模态混淆有很好的抑制效果, 然而 LCD 对噪声和间歇信号较为敏感, 单纯添加白噪声的方法难以保证提取分量满足 ISC 定义。因此, 笔者对 LCD 方法进行了改进, 并针对提取分量存在少量模态混淆的问题, 结合小波包理论提出 APLCD-WPT 方法。

图 1 给出了 APLCD-WPT 算法流程, 具体步骤如下。

1) 设输入信号为 $s(t)$, 初始化添加噪声的幅值 a , 总体平均次数为 $2m$, 其中 m 为添加噪声对的数量。

2) 构造幅值随频率呈正弦变化的噪声 $n_s(t)$ 。研究表明相比白噪声, 加入幅值随频率变化的噪声对模态混淆的抑制效果更好^[14]。噪声构造方法如下: 首先, 随机生成一组白噪声 $n(t)$, 将其进行傅里叶变换得到频谱 $N(f)$, 其中 $f \in (0, f_s/2)$, f_s 为采样频率; 其次, 令 $N_s(f) = N(f) \sin(2\pi 2f/f_s)$, 构造噪声 $N_s(f)$; 最后, 对 $N_s(f)$ 进行逆傅里叶变换, 得到幅值随频率呈正弦变化的噪声 $n_s(t)$ 。

3) 对原信号加入 m 对重构噪声 $n_s(t)$ 以及 $-n_s(t)$, 组成加噪信号 $S_{i+}(t)$ 与 $S_{i-}(t)$, 即

$$\begin{cases} S_{i+}(t) = s(t) + an_s(t) \\ S_{i-}(t) = s(t) - an_s(t) \end{cases} \quad (7)$$

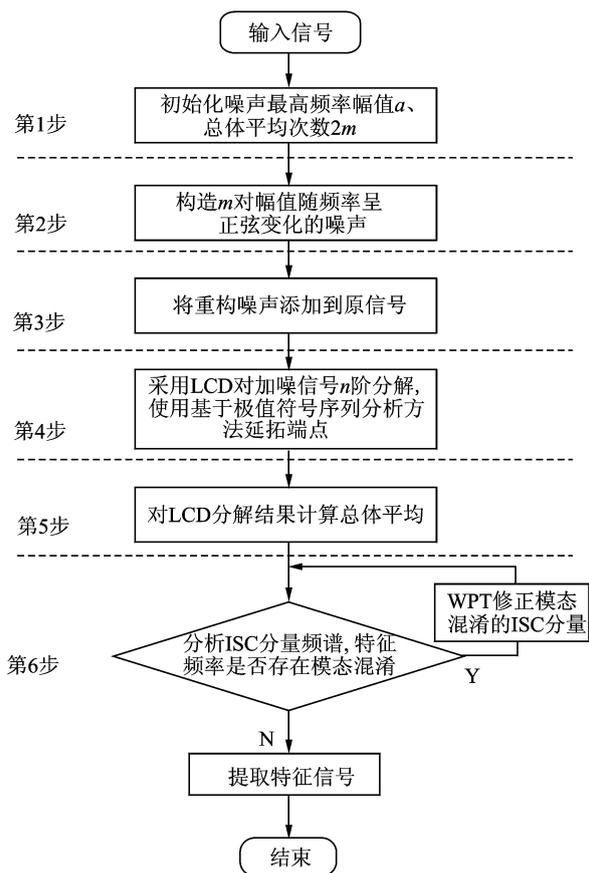


图1 APLCD-WPT方法流程图

Fig. 1 Flow chart of APLCD-WPT method

其中: $i = 1, 2, \dots, m$ 。

4) 对加噪信号 $S_{i+}(t)$, $S_{i-}(t)$ 进行 LCD 分解, 使用极值符号序列分析方法^[15] 延拓信号端点, 记录每次分解的结果 $\{ISC_{i+,n}\}$ 和 $\{ISC_{i-,n}\}$, 其中 n 为 LCD 提取的 ISC 分量个数。

5) 对 $2m$ 组 LCD 分解结果进行总体平均, 如式(8)所示, 得到 ISC_n 作为 APLCD 的分解结果

$$ISC_n = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (ISC_{i+,n} + ISC_{i-,n}) \quad (8)$$

6) 检查特征频率分量是否存在模式混淆, 如果依然存在少量模式混淆现象, 再使用 WPT 进行修正, 将特征频率从混淆的 ISC 分量中提取出来。

APLCD-WPT 算法需要设置添加噪声的幅值 a 和噪声对的数量 m 。添加的白噪声如果幅值较小, 无法达到影响信号极值点的分布, 从而抑制模式混淆的目的; 而过大的噪声则可能淹没原信号的特征信息, 使得分解分量毫无意义。另一方面, 虽然分解结果附带的噪声分量会随着总体平均次数的增加而逐步降低, 但同时也会增加算法的计算量。目前, 参数 a 和 m 虽然没有严格的选择依据, 但文献[9]指

出, a 的幅值设为原信号幅值标准差的 $0.1 \sim 0.2$ 倍, 添加噪声的对数 m 选择 100 以内即可。

3 仿真试验

旋转机械工作时一般呈周期性运动, 仿真分别用高、低频的谐波代表不同部件的旋转振动信号。当轴承出现故障时, 往往伴随着调制与冲击成分, 因此, 仿真信号 S 包括冲击 s_1 、高频余弦 s_2 、调制 s_3 和低频余弦 s_4 共 4 个成分, 如式(9)所示

$$S = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 \quad (9)$$

其中: $s_2 = \cos(120\pi t)$; $s_3 = 2\sin(4\pi t)\cos(50\pi t)$; $s_4 = \cos(20\pi t - 10)$; 采样时间 t 为 1 s, 采样频率为 1 kHz。

混合信号及各成分时域波形如图 2 所示。

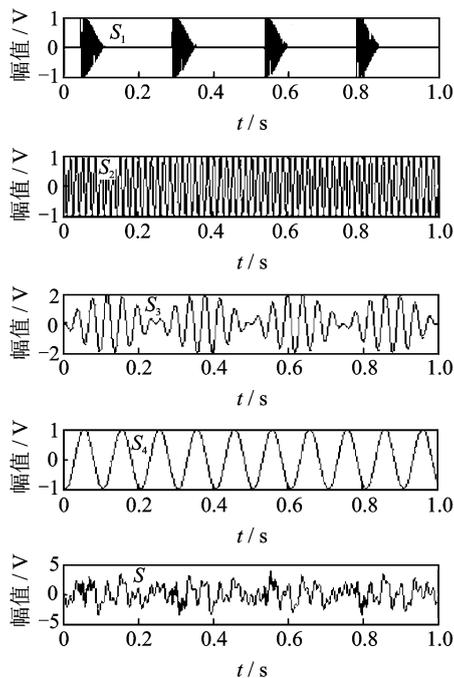


图2 仿真信号及各成分时域波形

Fig. 2 The time domain waveforms of simulation signal and components

分别采用 LCD, CELCD 和 APLCD-WPT 方法对混合信号进行分解。其中, ISC 分量的判断采用三阈值准则, 端点效应采用基于极值符号序列分析的方法处理。CELCD 和 APLCD-WPT 算法均设置整体平均次数为 100 次, 添加噪声幅值标准差为原信号幅值标准差的 0.15 倍。

图 3 为 LCD 分解结果, 由图可以看出, 受冲击信号影响, 冲击信号 s_1 与高频余弦 s_2 都被分到 ISC_1 分量, 而调制信号 s_3 和部分低频余弦信号 s_4 被分到

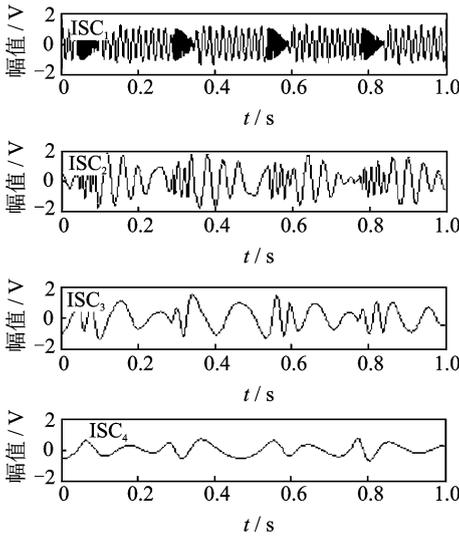


图 3 混合信号 x 的 LCD 分解结果

Fig. 3 The LCD decomposition results of simulation signal

ISC₂ 分量。结果证明 LCD 方法在处理含有冲击的信号时有严重的模态混淆问题,提取的特征分量难以反映原信号的特征频率,其应用范围具有局限性。

对信号进行 CELCD 分解,分解结果如图 4 所示。CELCD 通过添加多对白噪声、分解后再总体平均的方法,能够有效减小分解误差。通过 CELCD 与 LCD 提取分量的比较,证明 CELCD 在一定程度上抑制了 LCD 分解的模态混淆问题。然而将 CELCD 提取的 ISC₃,ISC₄ 分量与原信号进行比较,发现两者都出现局部波形失真的现象。其中,ISC₃ 分量在波谷处部分失真,而 ISC₄ 的波形在峰值处也出现了轻微的畸变(如图中虚线圈部分),说明 CELCD

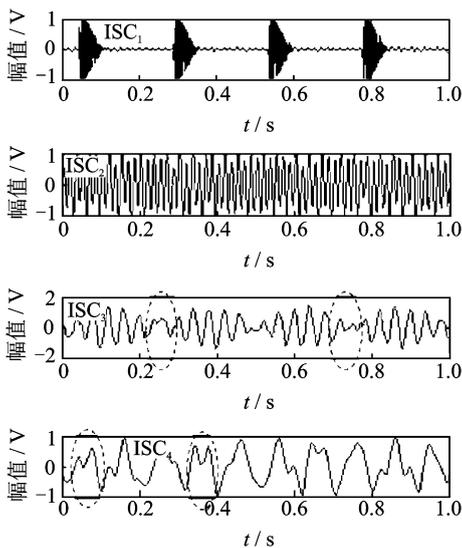


图 4 混合信号 x 的 CELCD 分解结果

Fig. 4 The CELCD decomposition results of simulation signal

方法提取的 ISC 分量依然存在少量模态混淆现象。

APLCD-WPT 方法分解结果较理想,其中 ISC₁,ISC₂,ISC₃ 和 ISC₄ 分别对应原始信号中的 s_1, s_2, s_3 和 s_4 分量,基本上能正确反映出原始信号的特征。结果表明,APLCD-WPT 方法不但克服了 LCD 分解产生的模态混淆问题,并且分解效果优于 CELCD 方法。APLCD-WPT 方法分解结果见图 5。

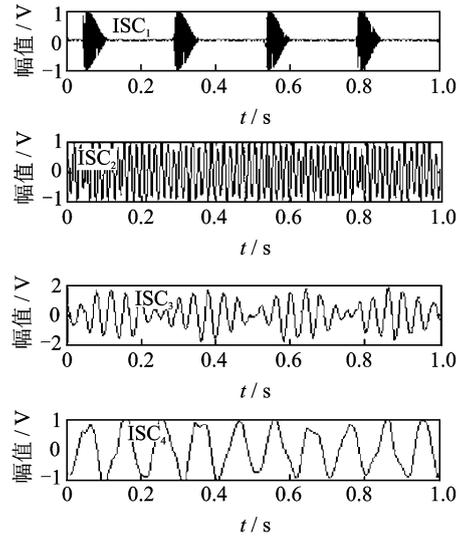


图 5 混合信号 x 的 APLCD-WPT 分解结果

Fig. 5 The APLCD-WPT decomposition results of simulation signal

为了进一步比较 LCD, CELCD 和 APLCD-WPT 的分解效果,笔者还考察了每种方法提取分量与实际分量的相关性 r 与能量误差 E 这两个指标。其中, r_i 表示不同方法提取的分量 ISC _{i} 与实际分量的相关系数;能量误差指提取分量与实际分量误差的能量与实际信号能量的比值, E 越小说明提取的分量越接近实际值^[16]。

表 1 LCD, CELCD 和 APLCD-WPT 分解结果对比
Tab. 1 The decomposition results of LCD, CELCD and APLCD-WPT

方法	$r_1/\%$	$r_2/\%$	$r_3/\%$	$r_4/\%$	E
LCD	33.62	81.22	79.23	64.97	0.258
CELCD	97.79	96.03	97.19	86.87	0.058
APLCD-WPT	99.24	98.27	98.08	96.55	0.036

由表 1 可以看出, LCD 方法产生的模态混淆较为严重,提取分量与原信号的相关性较低。其中,冲击信号 s_1 和低频余弦 s_4 与原信号的相关性分别为 33.62% 和 64.97%,无法满足特征提取的要求。CELCD 方法提取分量与原信号的相关性都高于

85%,说明 CELCD 方法相比 LCD 具有一定优越性。APLCD-WPT 方法对提取的分量使用小波包进行了修正,因此得到的高频分量 ISC_1 和 ISC_2 与实际分量 s_1 和 s_2 的相关性比 CELCD 得到的相关性更高,且提取低频分量 s_4 的相关性达到 96.55%,远高于 CELCD 提取的低频分量。此外,APLCD-WPT 与原信号计算得到的能量误差也小于 CELCD 方法。

上述仿真信号分析结果表明,APLCD-WPT 方法不仅对间歇冲击引起的模态混淆现象有很好的抑制效果,相比现有的 CELCD 方法,其在提高特征精确度以及分量提取的完备性等方面都具有一定优势。

4 工程应用

为了进一步说明 APLCD-WPT 方法的有效性与实用性,将其应用于卧式螺旋离心机(简称卧螺离心机)运行阶段振动信号的分析^[17]。卧螺离心机信号采用 OROS R3X 系的动态信号分析仪进行采集。

实验装置如图 6 所示。其中,振动传感器布置在左右轴承座处,能够从水平和垂直两个方向测量大端和小端的瓦振。同时,在大端和小端都安装支架固定电涡流传感器测量轴的振动,光电传感器装于转鼓大端。卧螺离心机的相关参数如表 2 所示。

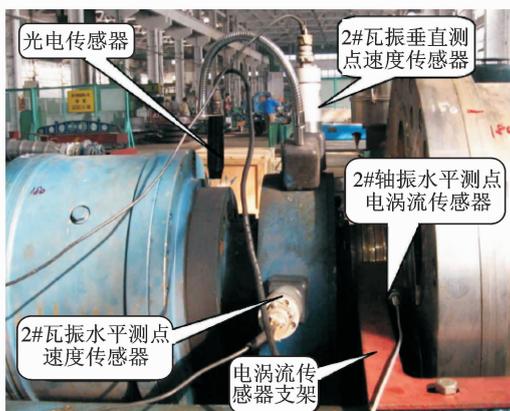


图 6 卧螺离心机大端传感器布置

Fig. 6 The big end sensor arrangement

取大端垂直方向轴振工作阶段的振动信号。综合考虑 Nyquist 采样定理与小波包分解理论,选择采样频率为 12.8 kHz,采样时间为 20 s。图 7 为其时域信号。

表 2 卧螺离心机主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters

转鼓工作转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	转速差/ ($r \cdot \min^{-1}$)	功率/ kW	整机质 量/kg	外形 尺寸/mm
3 300	30	45	4 200	4 500×1 240 ×1 340

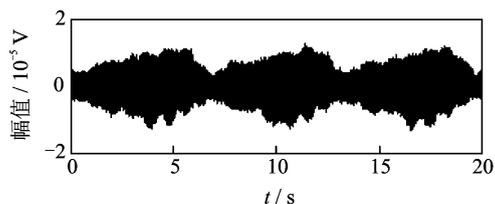


图 7 振动信号时域图

Fig. 7 Vibration signal time domain diagram

通过对卧螺离心机频谱图进行分析,发现其主要频率成分有工作频率 f (55 Hz)、2 倍频和 3 倍频,其他多个频率成分难以识别,如图 8 所示。为此,采用 APLCD-WPT 算法对时域信号进行分解,提取 55 Hz 特征频率信号,设置整体平均次数均为 50,添加噪声幅值标准差为原信号幅值标准差的 0.15 倍。

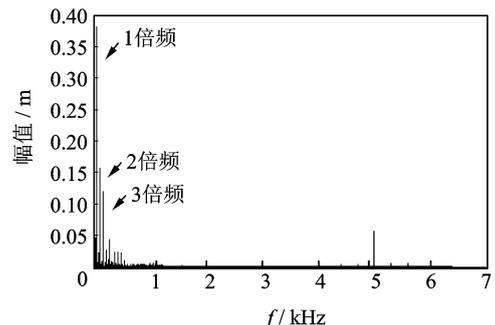


图 8 振动信号频谱图

Fig. 8 Vibration signal spectrum

图 9 为信号仅经过 APLCD 分解后的频谱图(只列出分解后特征频率信号 55 Hz 存在模态混淆的 3 个 ISC 分量),表明信号经 APLCD 分解后依然存在部分模态混淆现象。为了实现特征频率的精确提取,需要使用 WPT 对上述 3 个分量进行修正。对特征频率 f 使用 WPT 进行提取时,为了减小虚假分量的生成,小波包频段分割的下限应该低于 f ,同时上限要尽可能高于 f 且低于需剔除的频率。

以 ISC_4 为例,使用 WPT 消除图 9 中模态混淆的分量,需要将 ISC_4 左侧模态混淆部分 55 Hz 分量提取出来。因为信号采样频率为 12.8 kHz,而 55 Hz 太靠近 WPT₇ 层分解提取 50~100 Hz 频率区间的分割处,直接进行 WPT 提取易产生虚假分量。因此,首先对 ISC_4 进行 WPT₆ 层分解,提取出 0~100 Hz 频率段的分量 I_1 ;其次再对 ISC_4 进行 WPT₈ 层分解,提取出 75~100 Hz 分量 I_2 ;最后用 WPT₆ 提取的分量 I_1 减去 WPT₈ 提取的 I_2 ,从而将 55 Hz 分量从模态混淆的 ISC_4 中提取出来。

同样,将特征分量 f 从 ISC_5 和 ISC_6 中提取出

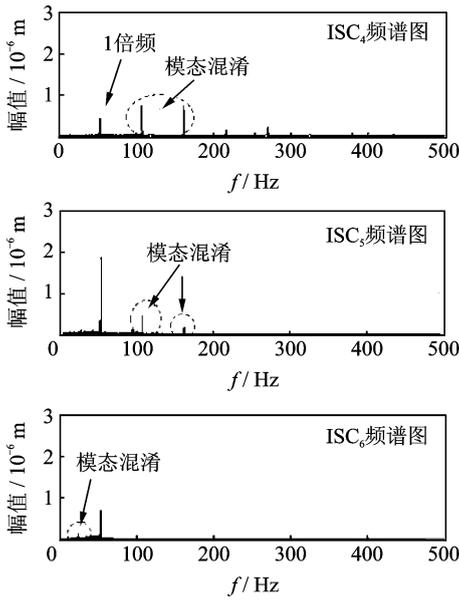


图 9 ISC_4, ISC_5 和 ISC_6 分量频谱图

Fig. 9 The ISC_4, ISC_5 and ISC_6 components spectrum

来。其中,对应 ISC_5 先进行 WPT_6 层分解,提取出 $0 \sim 100$ Hz 频率段的分量 I_3 ; 再对 ISC_5 进行 WPT_8 层分解,提取出 $75 \sim 100$ Hz 分量 I_4 ; 最后将 I_3 减去 I_4 , 提取出 ISC_5 中混淆的 55 Hz 分量。处理 ISC_6 时只需将提取的 $0 \sim 100$ Hz 频率段分量 I_5 减去 WPT_8 层分解得到 $0 \sim 25$ Hz 分量 I_6 , 同样能够将模态混淆 ISC_6 中的 55 Hz 分量提取出来。 ISC_4, ISC_5 和 ISC_6 使用 WPT 提取分量的频谱图如图 10 所示。

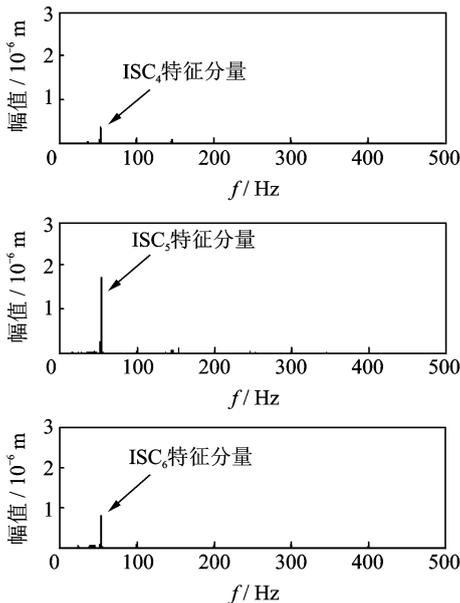


图 10 APLCD-WPT 提取的 ISC_4, ISC_5 和 ISC_6 频谱图
 Fig. 10 The ISC_4, ISC_5 and ISC_6 components spectrum of APLCD-WPT

将 ISC_4, ISC_5 和 ISC_6 提取分量相加, 得到特征频率 55 Hz 的分量, 其频谱图如图 11 所示。由图可以看出, APLCD-WPT 方法很好地将模态混淆部分进行了消除, 能够有效地提取出特征频率信号。

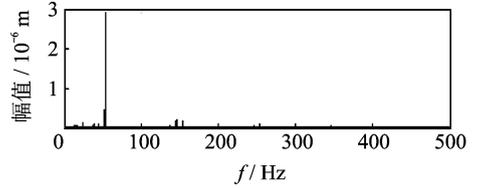


图 11 APLCD-WPT 提取的特征信号频谱图
 Fig. 11 The signal spectrum of APLCD-WPT

将 LCD, CELCD 和 APLCD-WPT 这 3 种方法提取得到的 55 Hz 时域信号进行对比分析, 如图 12 所示。通过比较发现, LCD 方法不但存在模态混淆的问题, 而且混入的噪声使得提取分量不如 APLCD-WPT 提取的分量平滑。CELCD 方法提取的分量存在少量模态混淆的问题, 得到的 55 Hz 分量的信号周期性较差, 很难满足单一频率信号的精确提取。此外, APLCD-WPT 方法提取的分量与 CELCD 和 LCD 提取的分量相比幅值更小, 且更具有周期性, 可以实现特征频率的精确提取。综上所述, APLCD-WPT 方法不仅能解决提取分量模态混淆的问题, 还能很好地实现特征信号的自适应提取。

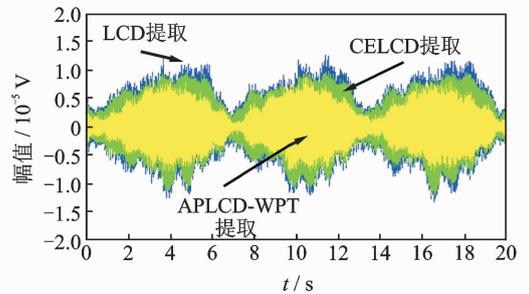


图 12 LCD, CELCD 和 APLCD-WPT 方法提取分量时域图

Fig. 12 The time domain diagram result of LCD, CELCD and APLCD-WPT

5 结束语

为了有效提取滚动轴承特征频率信号, 提出了一种基于 APLCD-WPT 的滚动轴承特征提取方法。该方法通过 APLCD 筛选出滚动轴承特征频率分量, 然后结合 WPT 方法修正提取 ISC 分量中模态混淆的部分, 实现了滚动轴承特征频率信号的精确提取。将所提方法应用于仿真和实测数据分析, 结

果表明,APLCD-WPT不但能够抑制模态混淆,且较传统时频分析算法,对滚动轴承信号特征具有更好的提取效果,有利于后期的状态监测和故障诊断。

参 考 文 献

- [1] 钟秉林,黄仁. 机械故障诊断学[M]. 北京:机械工业出版社,2007:1-5.
- [2] Cohen L. Time-frequency distribution-a review[J]. Proceedings of the IEEE,1989,77(7):941-981.
- [3] Mallat S G. A theory for multi-resolution decomposition, the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1989,11(7):674-689.
- [4] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis[J]. The Royal Society, 1998,454:903-995.
- [5] Zheng Jingde, Cheng Junsheng, Yu Yang. A rolling bearing fault diagnosis approach based on LCD and fuzzy entropy[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013,70(6):441-453.
- [6] 杨宇,曾鸣,程军圣. 局部特征尺度分解方法及其分量判据研究[J]. 中国机械工程,2013,24(2):195-201. Yang Yu, Zeng Ming, Cheng Junsheng. Research on local characteristic-scale decomposition and its stopping criteria[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(2):195-201. (in Chinese)
- [7] 杨宇,曾鸣,程军圣. 局部特征尺度分解方法及其分解能力研究[J]. 振动工程学报,2012,25(5):602-609. Yang Yu, Zeng Mine, Cheng Junsheng. Research on local characteristic-scale decomposition and its capacities[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(5):602-609. (in Chinese)
- [8] 胡爱军,孙敬敬,向玲. 经验模态分解中的模态混叠问题[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(4):429-434. Hu Aijun, Sun Jingjing, Xiang Ling. Mode mixing in empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011,31(4):429-434. (in Chinese)
- [9] Deering R, Kaiser J F. The use of masking signal to improve empirical mode decomposition[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Philadelphia, USA: [s. n.], 2005.
- [10] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009,1(1):1-41.
- [11] 郑近德,程军圣,聂永红. 完备总体平均局部特征尺度分解及其在转子故障诊断中的应用[J]. 振动工程学报,2014,27(4):637-644. Zheng Jinde, Cheng Junsheng, Nie Yonghong, et al. Complete ensemble local characteristic-scale decomposition and its applications to rotor fault diagnosis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(4): 637-644. (in Chinese)
- [12] 张建宇,张随征,管磊,等. 基于小波包变换和样本熵的滚动轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断,2015,35(1):128-132. Zhang Jianyu, Zhang Suizheng, Guan Lei, et al. Pattern recognition of bearing defect severity based on multi-wavelet packet sample entropy method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(1): 128-132. (in Chinese)
- [13] 王丽华,陶润喆,张永宏,等. 基于CEEMD-WPT的滚动轴承特征提取算法[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(1):181-188. Wang Lihua, Tao Runzhe, Zhang Yonghong, et al. Feature extraction of rolling bearing based on CEEMD-WPT[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017,37(1):181-188. (in Chinese)
- [14] 雷亚国,孔德同,李乃鹏,等. 自适应总体平均经验模式分解及其在行星齿轮箱故障检测中的应用[J]. 机械工程学报,2014,50(3):64-70 Lei Yaguo, Kong Detong, Li Naipeng, et al. Adaptive ensemble empirical mode decomposition and its application to fault detection of planetary gearboxes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014,50(3):64-70. (in Chinese)
- [15] 徐卓飞,刘凯. 基于极值符号序列分析的EMD端点效应处理方法[J]. 振动、测试与诊断,2015,35(2):309-315. Xu Zhuofei, Liu Kai. Method of empirical mode decomposition end effect based on analysis of extreme value symbol sequence[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(2):309-315. (in Chinese)
- [16] Frei M G, Osorio I. Intrinsic time-scale decomposition: time-frequency-energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals[J]. Proceedings of the Royal Society a Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2007,463(2078):321-342.
- [17] 赵晓平,侯荣涛. 基于Viterbi算法的Gabor阶比跟踪技术[J]. 机械工程学报,2009,45(11):247-252. Zhao Xiaoping, Hou Rongtao. Gabor order tracking based on viterbi algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(11):247-252. (in Chinese)



第一作者简介:赵晓平,女,1977年1月生,副教授。主要研究方向为旋转机械故障诊断、模式识别及信号处理。曾发表《一种新的旋转机械升降速阶段振动信号的瞬时频率估计算法》(《机械工程学报》2011年第47卷第7期)等论文。
E-mail: zxp@nuist.edu.cn