

DOI: 10.3901/JME.2022.04.022

基于改进群延迟估计的同步压缩变换及其在冲击类振动信号提取中的应用*

贺 雅¹ 胡明辉¹ 卢子元² 明 焯¹ 贾彦飞²

(1. 北京化工大学发动机健康监控及网络化教育部重点实验室 北京 100029;

2. 成都航利(集团)实业有限公司 成都 611936)

摘要: 旋转机械振动信号中的冲击特征通常代表着轴承损伤、齿轮损伤等常发故障的出现, 为了准确提取信号中的冲击分量, 提出一种基于改进群延迟估计的同步压缩变换时频分析方法。分析时间重分配同步压缩变换原型算法在处理实际强频变信号时的特性, 发现其易导致明显的时频模糊问题。构建基于局部最大搜索算法的改进型经典群延迟估计方法, 以克服 TSST 在分析强频变信号时带来的时频模糊问题, 并在此基础上提出了群延迟自适应估计策略。形成一种基于改进群延迟估计的自适应同步压缩变换方法, 在其基础上提出一种振动信号中脉冲特征提取方法。仿真信号和试验数据分析结果表明, 该方法可较准确地提取出振动信号中的冲击特征, 相较其他常用时频分析方法能够生成更为聚集的时频表示。

关键词: 冲击振动; 提取; 时频分析; 时间重分配同步压缩变换; 群延迟估计

中图分类号: TH911; TH165

Synchrosqueezing Transform Based on Improved Group Delay Estimation and Its Application in Extracting Impulse Vibration Signal

HE Ya¹ HU Minghui¹ LU Ziyuan² MING Xuan¹ JIA Yanfei²

(1. Key Lab of Engine Health Monitoring-Control and Networking of Ministry of Education,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Hangli (Group) Industrial Co., Ltd, Chengdu, Chengdu 611936)

Abstract: The impact features in the vibration signal of rotating machinery usually represent the occurrence of common faults such as bearing damage and gear damage. In order to accurately extract the impact component in the signal, a time-frequency analysis method based on improved time-reassignment synchrosqueezing transform(TSST) is proposed. Firstly, the characteristics of TSST prototype algorithm in dealing with actual strongly frequency varying signals are analysed, and it is found that it is easy to cause evident time-frequency ambiguity. Then, an improved group delay estimation method based on local maximum search algorithm is constructed to overcome the time-frequency ambiguity problem caused by TSST. On this basis, an adaptive group delay estimation strategy is proposed. Finally, an adaptive synchrosqueezing transform method based on improved group delay estimation is formed, and a pulse feature extraction method in vibration signal is developed. The results of simulation and experimental data show that the proposed method can extract impulse features of vibration signals more accurately, and generate a more concentrated time-frequency representation than other time-frequency analysis methods.

Key words: impulse vibration; extraction; TFA; TSST; group-delay estimation

0 前言

滚动轴承缺陷、齿轮缺陷及动静碰摩为燃气轮

机、航空发动机等大型旋转机械的典型故障, 其发生频率高且故障危害性大, 直接影响着整套设备、流程的安全性^[1]。据统计, 某型航空发动机的主轴承、齿轮及碰摩故障占发动机振动故障总数的 60% 以上^[2]。上述故障发生时, 通常会产生冲击性振动分量, 因此可将其统称为冲击类故障^[3]。正是基于上述特征, 通过在振动信号中提取、分析冲击分量,

* 博士后创新人才支持计划资助项目(BX20180031)。20210915 收到初稿, 20211220 收到修改稿

即可实现此类故障的预警与诊断, 进而避免严重故障及事故的发生^[4]。显然, 在上述技术的实现过程中, 其中最为关键的是准确提取冲击分量^[5]。因此, 从振动信号中如何准确提取冲击特征一直是冲击类故障诊断的重要研究课题^[6-7]。

针对上述问题, 国内外学者提出了各种信号处理方法并将其探索用于冲击振动分量的提取, 如经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)及其改进方法^[8-9]、谱峭度(Spectral kurtosis, SK)^[10]、深度学习(Deep learning, DL)^[11]和时频分析(Time-frequency analysis, TFA)^[12-13]等。同时, TFA 技术又进一步推进了上述方法的发展。例如, EMD 及其改进方法呈现出二维时频带通滤波特性, 基于 TFA 框架对其进行改进, 提出了非线性模式分解, 可用于处理强时变信号。SK 技术的本质核心就是时频变换, 计算从 STFT 或 WT 获得的频谱图峰值, 以定位与轴承故障相关的敏感频带; 由于 TFA 技术能够揭示非平稳信号的动态特性, 将其与 DL 技术结合, 可极大地提高 DL 算法的特征学习能力和模式识别精度。可见, TFA 方法在提取冲击振动分量方面发挥了显著的作用。

能量聚集的时频表示更有利于对冲击振动的提取, 因此在 TFA 技术的发展历程中, 如何提高时频图中信号能量集中性一直是国内外学者较为关注的核心问题之一。研究表明, 同步压缩变换(Synchrosqueezing transform, SST)技术及其改进型在处理非平稳信号时能够产生能量集中的时频图, 如基于小波变换的 SST^[14]、高阶 SST^[15-16]。但上述 SST 改进型大多建立在所分析信号具有慢时变特性的假设基础上。然而, 冲击类故障所产生的脉冲信号为短时间内发生的瞬态冲击, 具有很宽的频带, 因此适用于慢时变信号的 SST 改进方法在处理此类信号时效果不佳。HE 等^[17]提出, 时间重分配同步压缩变换(Time-reassigned synchrosqueezing transform, TSST)方法可以用来提取脉冲信号, 近年来引起了广泛关注, 但 TSST 方法应用的前提是所分析信号为弱频变信号。而实际冲击类故障发生时, 产生的冲击振动信号具有短时宽带特性, 即脉冲信号在短时间内会经历快速的频率变化^[18]。因此 TSST 方法在处理此类信号时难以产生能量聚集的时频表示, 从而会影响滚动轴承故障诊断结果的准确性。

为准确提取冲击类故障发生时振动信号中的冲击振动分量, 本文提出了一种基于改进群延迟估计的高能量集中 TSST 方法, 不仅能实现信号群延迟的自适应估计, 而且能准确计算强频变信号的群延迟, 可

清晰表征具有快频变特性的复杂信号中冲击振动分量。同时, 本文通过引入脉冲特征提取算子, 致力于从时频图中提取出冲击故障特征, 以实现对冲击类故障的准确诊断。采用本文提出方法对仿真信号和试验数据进行处理分析, 结果证明了该方法的有效性。

1 理论背景

1.1 短时傅里叶变换

一个频变的多分量信号可描述为

$$\hat{s}(\omega) = \sum_{k=1}^K A_k(\omega) \exp(i\varphi_k(\omega)) \quad (1)$$

式中, $A_k(\omega)$ 和 $\varphi_k(\omega)$ 表示频域中第 k 个分量的瞬时振幅 (Instantaneous amplitude, IA) 和瞬时相位 (Instantaneous phase, IP), $-\varphi'_k(\omega)$ 表示群延迟 (Group delay, GD)。IA 和 IP 是两个重要的瞬时特征, 可用以表征多分量信号的频变特征。STFT 可将一维时间序列信号扩展到二维时频平面, 进而提取信号的 IA 和 GD 信息。在频域中, 使用移动窗口函数 $\hat{g}(\eta)$ 的信号 STFT 可表示为

$$V^{\hat{s}}(t, \omega) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\eta) \hat{g}(\eta - \omega) \exp(i(\eta - \omega)t) d\eta \quad (2)$$

基于 STFT 结果, 可从多分量信号重构每个单分量信号。对 $V^{\hat{s}}(t, \omega)$ 进行关于时间变量的积分计算, 可得

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} V^{\hat{s}}(t, \omega) dt &= (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\eta) \hat{g}(\eta - \omega) \exp(i(\eta - \omega)t) dt d\eta = \\ &= (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\eta) \hat{g}(\eta - \omega) \delta(\eta - \omega) d\eta = \\ &= \hat{g}(0) \hat{s}(\omega) \end{aligned} \quad (3)$$

因此, 原始信号可重构为

$$\hat{s}(\omega) = \hat{g}(0)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} V^{\hat{s}}(t, \omega) dt \quad (4)$$

进一步分析 STFT 结果: 首先假设式(1)中的分析信号为弱频变信号, 即 $\exists \varepsilon$ 足够小, 且对于 $\forall \omega$ 有 $|A'_k(\omega)| \leq \varepsilon$ 且 $|\varphi''_k(\omega)| \leq \varepsilon$ 。此时, 式(1)可看作一系列纯谐波信号的叠加。根据泰勒展开式, 第 k 个分量在时间点 t 处的 IA 函数 $A_k(\omega)$ 和 IP 函数 $\varphi_k(\omega)$, 为 $A_k(\eta) = A_k(\omega)$ 和 $\varphi_k(\eta) = \varphi_k(\omega) + \varphi'_k(\omega)(\eta - \omega)$ 。因此, 信号可展开为式(5), 再代入式(2)得

$$\hat{s}(\eta) = \sum_{k=1}^K A_k(\omega) \exp(i(\varphi_k(\omega) + \varphi'_k(\omega)(\eta - \omega))) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V^{\hat{s}}(t, \omega) &= (2\pi)^{-1} \sum_{k=1}^K \int_{-\infty}^{+\infty} A_k(\omega) \exp(i\varphi_k(\omega) + \\ &\quad \varphi'_k(\omega)(\eta - \omega)) \hat{g}(\eta - \omega) \exp(i(\eta - \omega)t) d\eta = \\ &= (2\pi)^{-1} \sum_{k=1}^K A_k(\omega) \exp(i\varphi_k(\omega)) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(i(t + \\ &\quad \varphi'_k(\omega)(\eta - \omega)) \hat{g}(\eta - \omega) d\eta = \\ &= \sum_{k=1}^K A_k(\omega) \exp(i\varphi_k(\omega)) g(t + \varphi'_k(\omega)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $g(t)$ 表示时域窗函数, 且满足 $\text{supp}(g) \in [-\Delta, \Delta]$ 。如果每个分量在时频(Time frequency, TF)平面上被很好地分离, 则不同分量在 TF 平面上占据不同 TF 域。然后, 通过在其 GD 轨迹上的 TF 系数 $V(t, \omega)$ 积分重构每个分量, 即

$$\hat{s}_k(\omega) = \hat{g}(0)^{-1} \int_{|u + \varphi'_k(\omega)| \leq \Delta} V^{\hat{s}}(u, \omega) du \quad (7)$$

因此, 时域信号重构为

$$\begin{aligned} s(u) &= (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}_k(\omega) \exp(i\omega u) d\omega = \\ &= (2\pi g(0))^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{|u + \varphi'_k(\omega)| \leq \Delta} V^{\hat{s}}(u, \omega) \exp(i\omega u) du d\omega \end{aligned} \quad (8)$$

1.2 时间重分配同步压缩变换

HE 等^[17]提出了基于 STFT 的 TSST 技术, 它可较好地实现脉冲信号的时频表征。该方法包含三个步骤: 第一步, 通过式(2)计算分析信号 $s(\omega)$ 的 STFT 表示 $V^{\hat{s}}(t, \omega)$ 。第二步, 计算信号的经典 GD 估计 $\hat{t}(t, \omega)$

$$\hat{t}(t, \omega) = \text{Re} \left(\frac{i \partial_{\omega} V^{\hat{s}}(t, \omega)}{V^{\hat{s}}(t, \omega)} \right) \quad (9)$$

最后, 将 TF 能量从计算位置重新分配到时间域上的重心, 进行一维时间域积分, 将模糊的 TF 能量压缩到 GD 轨迹中, 将 (t, ω) 处的 TF 系数转换至下式中的点 $(\hat{t}(t, \omega), \omega)$ 上, 即

$$Ts(u, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} V^{\hat{s}}(t, \omega) \delta(u - \hat{t}(t, \omega)) dt \quad (10)$$

将式(6)代入式(9)可得

$$\hat{t}(t, \omega) = -\varphi'_k(\omega) \quad (11)$$

结合式(5)和式(10)得

$$\begin{aligned} Ts(u, \omega) &= \\ &= (2\pi)^{-1} \sum_{k=1}^K \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\eta) \hat{g}(\eta - \omega) \exp(i(\eta - \omega)) d\eta dt \delta(u + \varphi'_k(\omega)) = \\ &= \sum_{k=1}^K \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\eta) \hat{g}(\eta - \omega) \delta(\omega - \eta) d\eta \delta(u + \varphi'_k(\omega)) = \\ &= \sum_{k=1}^K \hat{s}(\omega) \hat{g}(0) \delta(u + \varphi'_k(\omega)) \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可知: 对于式(4)给出的弱频变信号, TSST 可通过将模糊 TF 能量压缩到 GD 轨迹中来产生理想的信号表示。从数学上讲, 狄拉克 δ 函数可较好地用于分析弱频变信号^[18]。

然而, 实际信号通常比式(5)表示的信号更为复杂, 以西储大学轴承数据集中的一组轴承外圈故障信号为例, 图 1 为 STFT 和 TSST 处理所得时频结果。由图可知: 信号中包含一系列冲击成分, 每个冲击持续时间很短, 其能量分散在较宽频带。虽然 TSST 一定程度上提升了 STFT 的性能, 但由于信号的频变特性, TSST 结果中仍存在能量模糊现象。为了更好地表征非平稳信号中复杂成分的 TF 特性, 需要进一步提高时频表示的能量聚集性。本文将进一步讨论 TSST 模糊问题, 并在下一节中提出解决方法。

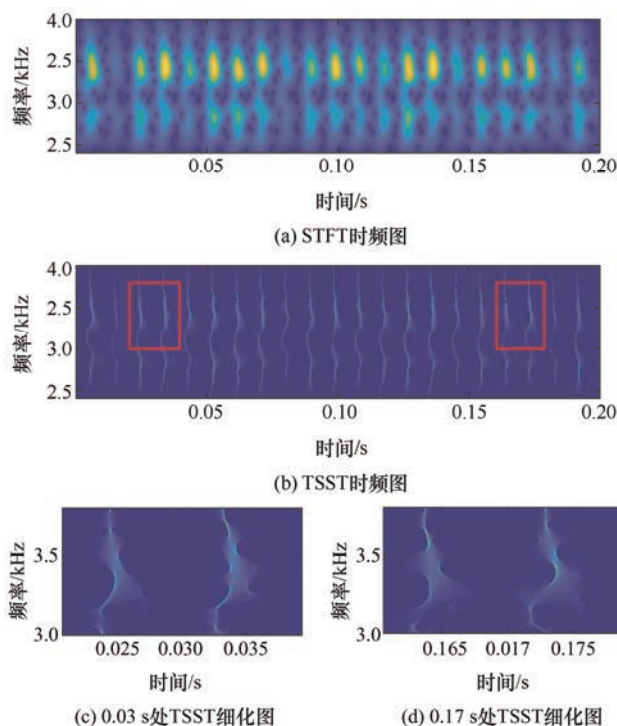


图 1 STFT 和 TSST 时频表示结果

2 基于改进群延迟估计的同步压缩变换

2.1 估计准确度提升

为进一步探讨 TSST 特性, 现分析一组强频变

信号, 即假设 ε 足够小, 对于 $\forall \omega$, $|A'_k(\omega)| \leq \varepsilon$ 且 $|\varphi''_k(\omega)| \leq \varepsilon$ 。泰勒展开后, 式(1)信号可表示为

$$\hat{s}(\eta) = \sum_{k=1}^K A_k(\omega) \exp(i(\varphi_k(\omega) + \varphi'_k(\omega)(\eta - \omega) + 0.5\varphi''_k(\omega)(\eta - \omega)^2)) \quad (13)$$

其中窗函数为高斯窗, 傅里叶变换可以表示为

$$\hat{g}(\omega) = \sqrt{2\sigma\pi} \exp(0.5\sigma\omega^2) \quad (14)$$

将式(13)、(14)代入式(2)可得

$$\begin{aligned} V^{\hat{s}}(t, \omega) &= (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^K A_k(\omega) \exp(i(\varphi_k(\omega) + \varphi'_k(\omega)(\eta - \omega) + 0.5\varphi''_k(\omega)(\eta - \omega)^2)) \times \\ &\quad \sqrt{2\sigma\pi} \exp(0.5\sigma(\eta - \omega)^2) \exp(i(\eta - \omega)t) d\eta = \\ &= \sqrt{2\sigma\pi} (2\pi)^{-1} \sum_{k=1}^K A_k(\omega) \exp(i\varphi_k(\omega)) \times \\ &\quad \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(0.5(\varphi''_k(\omega) - \sigma)(\eta - \omega)^2) \times \\ &\quad \exp(i(t + \varphi'_k(\omega))(\eta - \omega)) d\eta = \\ &= \sum_{k=1}^K A_k(\omega) \exp(i\varphi_k(\omega)) \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma - i\varphi''_k(\omega)}} \times \\ &\quad \exp\left(-\frac{(t + \varphi'_k(\omega))^2}{2\sigma - 2i\varphi''_k(\omega)}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

据式(9), 可得 2D-GD 估计

$$\hat{t}_k(t, \omega) = -\varphi'_k(\omega) + \frac{\varphi''_k(\omega)^2}{\sigma^2 + \varphi''_k(\omega)^2} (t + \varphi'_k(\omega)) \quad (16)$$

由式(16)可知, 对于强频变信号, 式(9)所示表达式无法实现信号的准确 GD 轨迹估计, 即可解释 TSST 在处理强频变信号时的时频模糊现象。将 $t_k = -\varphi'_k(\omega)$ 代入式(16), 可得

$$|V^{\hat{s}}(-\varphi'_k(\omega), \omega)| = A_k(\omega) g(0) \quad (17)$$

频域窗函数在 $\omega=0$ 处达到最大值, 即 $\hat{g}(\omega) \leq \hat{g}(0)$, 则式(17)中时频谱振幅 $|V^{\hat{s}}(t, \omega)|$ 在 $(-\varphi'_k(\omega), \omega)$ 点处最大。因此, 可采用局部最大搜索算法定位时频图中幅值的局部最大值, 从而减小 $\hat{t}(t, \omega)$ 和 $-\varphi'_k(\omega)$ 之间误差^[19]。基于局部最大值的 2D-GD 估计可表示为

$$t_m(t, \omega) = \begin{cases} \arg \max_t |V^{\hat{s}}(t, \omega)| & t \in [t - \Delta, t + \Delta] \\ |V^{\hat{s}}(t, \omega)| \neq 0 \\ 0 & |V^{\hat{s}}(t, \omega)| = 0 \end{cases} \quad (18)$$

图 2 为基于局部最大值搜索的 2D-GD 估计示意图, 此处假设两个任意分量在足够的频率距离内可很好分离, 即 $\varphi'_k(\omega) - \varphi'_{k+1}(\omega) > 4\Delta$, $k \in \{1, \dots, n-1\}$ 。因此在 $[-\varphi'_k(\omega) - \Delta, -\varphi'_k(\omega) + \Delta]$ 内, $t_m(t, \omega) = -\varphi'_k(\omega)$, 即

$$t_m(t, \omega) = \begin{cases} -\varphi'_k(\omega) & t \in [-\varphi'_k(\omega) - \Delta, -\varphi'_k(\omega) + \Delta] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

由式(19)可知, 依据局部最大准则得到的 $t_m(t, \omega)$ 可近似表示实际群延迟值 $-\varphi'_k(\omega)$ 。然而, 式(18)不能实现自适应群延迟估计, 且 Δ 的取值会影响后续同步压缩变换的时频表征效果。若 Δ 过小, 发散的能量不能完全分配到 GD 轨迹上; 若 Δ 过大, 不仅会增加计算时间, 还可能造成相邻冲击之间的能量混叠。

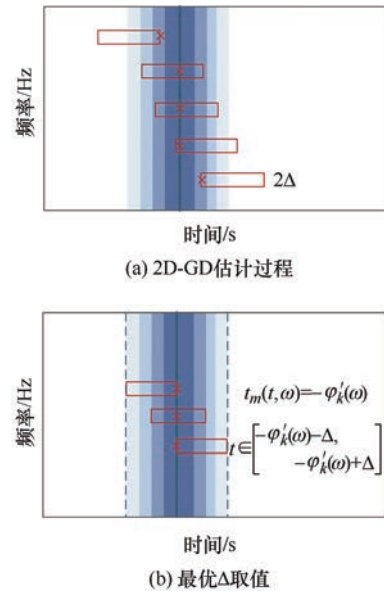


图 2 基于局部最大准则的 2D-GD 估计

2.2 自适应估计策略

Δ 值是影响群延迟估计准确性的主要因素, 而由图 2 和式(19)可知, 最优 Δ 为 STFT 结果时宽的 1/4。因此, 只要计算出 $V^{\hat{s}}(t, \omega)$ 的时宽, 就有望实现自适应群延迟估计。

$V^{\hat{s}}(t, \omega)$ 的幅值可由式(20)计算

$$|V^{\hat{s}}| = \left| \sum_{k=1}^K A_k(\omega) \exp(i\varphi_k(\omega)) \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma - i\varphi_k''(\omega)}} \exp\left(-\frac{(t + \varphi_k'(\omega))^2}{2\sigma - 2i\varphi_k''(\omega)}\right) \right| =$$

$$\sum_{k=1}^K A_k(\omega) \frac{\sqrt{\sigma}}{\sqrt[4]{\sigma^2 + \varphi_k''(\omega)^2}} \exp\left(-\frac{\sigma(t + \varphi_k'(\omega))^2}{2(\sigma^2 + \varphi_k''(\omega)^2)}\right) \quad (20)$$

因此, 对于弱频变信号, 即 $|\varphi_k''(\omega)| < \varepsilon$, 令 $\exp\left(-\frac{\Delta t^2}{2\sigma}\right) = t_0$, 其 STFT 的 $V^{\hat{s}}(t, \omega)$ 的时宽为

$$2\Delta t = 2\sqrt{2\sigma \ln \frac{1}{t_0}} \quad (21)$$

对于强频变信号, 令 $\exp\left(-\frac{\sigma \cdot \Delta t^2}{2(\sigma^2 + \varphi_k''(\omega)^2)}\right) = t_0$,

则时宽为

$$2\Delta t = 2\sqrt{\frac{2(\sigma^2 + \varphi_k''(\omega)^2)}{\sigma} \ln \frac{1}{t_0}} \quad (22)$$

显然, 对于强频变信号, 还需要考虑 $|\varphi_k''(\omega)|$ 对 $V^{\hat{s}}$ 时宽的影响。在大多数实际应用中, 被分析信号都是强频变信号, 且其调制因子 $\varphi''(\omega)$ 为未知的先验信息, 很难预先确定合适时宽, 尤其是多分量信号。因此, 为了计算出冲击类振动信号的 STFT 结果 $V^{\hat{s}}(t, \omega)$ 时宽, 首先需要对被分析信号的 $\varphi''(\omega)$ 进行准确估计。

文献[20]中通过建立轴承振动信号的频域模型实现了对 $\varphi''(\omega)$ 的估计, 其信号模型可表示为

$$\hat{s}(\omega) = A \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_c)^2}{2r^2}\right) \exp\left(-i\left(a + b\omega + \frac{1}{2}c\omega^2\right)\right) \quad (23)$$

其中, 幅值-频率之间满足高斯函数, 频率相位为二次多项式。A、 ω_c 和 r 分别代表单频率分量幅值 $A(\omega)$ 的常数项、中心频率和频率分布参数。参数 a 、 b 和 c 为二次多项式参数。可以看出, 当 r 趋近于无穷大或 $c = 0$ 时, 式(23)为理想的冲击信号模型。

对上述信号模型微分, 可得

$$\frac{\partial \hat{s}(\omega)}{\partial \omega} = \hat{s}(\omega) \left(-\frac{1}{r^2} - ic \right) \omega + \hat{s}(\omega) \left(\frac{\omega_c}{r^2} - ib \right) =$$

$$(q_x \omega + p_x) \hat{s}(\omega) \quad (24)$$

式中, q_x 为该模型中的调制因子 $\varphi''(\omega)$ 。结合式(24), 对式(2)所示的 STFT 变换进行变换后微分, 可得

$$\frac{\partial}{\partial \omega} V^{\hat{s}} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\eta) (\hat{g}(\eta - \omega)) \exp(i(\eta - \omega)t) d\eta \right) =$$

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\eta + \omega) \hat{g}(\eta) \exp(i\eta t) d\eta \right) =$$

$$(q_x \omega + p_x) V^{\hat{s}} + q_x V^{\omega \hat{s}} \quad (25)$$

而对 $V^{\hat{s}}(t, \omega)$ 进行直接微分, 可得到

$$\frac{\partial}{\partial \omega} V^{\hat{s}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\eta) \frac{\partial}{\partial \omega} (\hat{g}(\eta - \omega)) \exp(i(\eta - \omega)t) d\eta +$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\eta) \hat{g}(\eta - \omega) \frac{\partial}{\partial \omega} (\exp(i(\eta - \omega)t)) d\eta =$$

$$-V^{\hat{s}'} - it \cdot V^{\hat{s}} \quad (26)$$

式中, $V^{\omega \hat{s}}$ 和 $V^{\hat{s}'}$ 分别为 $\omega \hat{g}(\omega)$ 和 $\hat{g}'(\omega)$ 作为窗函数的 STFT 频域表达。结合式(25)、(26), 可得

$$\frac{\partial}{\partial \omega} V^{\hat{s}} = -V^{\hat{s}'} - it \cdot V^{\hat{s}} = (q_x \omega + p_x) V^{\hat{s}} + q_x V^{\omega \hat{s}} \quad (27)$$

即

$$-V^{\hat{s}'} = (q_x \omega + p_x + it) V^{\hat{s}} + q_x V^{\omega \hat{s}} \quad (28)$$

对式(28)进行微分, 可得

$$-V^{\hat{s}''} = (q_x \omega + p_x + it) V^{\hat{s}'} + q_x V^{\omega \hat{s}'} \quad (29)$$

式中, $V^{\hat{s}''}$ 、 $V^{\omega \hat{s}'}$ 为 $\hat{g}''(\omega)$ 和 $\omega \hat{g}'(\omega) = \omega d\hat{g}(\omega)/d\omega$ 作窗函数的 STFT 频域表达。综合式(28)、(29)

$$q_x = \frac{(V^{\hat{s}'^2} - V^{\hat{s}''} V^{\hat{s}})}{V^{\hat{s}} V^{\omega \hat{s}'} - V^{\hat{s}'} V^{\omega \hat{s}}} \quad (30)$$

故分别计算出信号的不同 STFT 结果 $V^{\hat{s}}$ 、 $V^{\hat{s}'}$ 、 $V^{\hat{s}''}$ 、 $V^{\omega \hat{s}}$ 和 $V^{\omega \hat{s}'}$, 则可得到估计值 $\hat{\varphi}''(t, \omega)$ 。

$$\hat{\varphi}''(t, \omega) = \text{Re} \left(\frac{2i\pi(V^{\hat{s}'^2} - V^{\hat{s}''} V^{\hat{s}})}{V^{\hat{s}} V^{\omega \hat{s}'} - V^{\hat{s}'} V^{\omega \hat{s}}} \right) \quad (31)$$

对于 $V^{\hat{s}}(t, \omega)$ 时频图中的每一点 (t_0, ω_0) , 均可据式(31)估算 GD 变化率 $\hat{\varphi}''(t, \omega)$, 将其代入式(22)可得 Δt 估计值, 取其一半作为群延迟估计参数, 如式(32)。即使强频变信号, 也能准确估计其群延迟。

$$\hat{t}_m(t, \omega) = \begin{cases} \arg \max_t |V^{\hat{s}}(t, \omega)| & t \in \left[t - \frac{\Delta t}{4}, t + \frac{\Delta t}{4} \right] \\ & |V^{\hat{s}}(t, \omega)| \neq 0 \\ 0 & |V^{\hat{s}}(t, \omega)| = 0 \end{cases} \quad (32)$$

2.3 面向强频变信号的自适应同步压缩变换

2.3.1 自适应同步压缩变换

由上述分析可知, 保留信号分量重构能力的方式是只在时间或频率域上重新分配 TF 系数。因此, 本文提出一种基于改进群延迟估计的自适应同步压缩变换(ALMTSST, 简称为 ALMT), 如式(33)所示

$$T_{AL}(u, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} V^{\hat{s}}(t, \omega) \delta(u - \hat{t}_m(t, \omega)) dt \quad (33)$$

利用 ALMT 对图 1 的轴承外圈信号进行处理, 时频结果如图 3 所示。对信号中具有频变特性的冲击, 相较图 1 中 TSST 时频图, ALMT 可得到能量更为集中的时频表示。

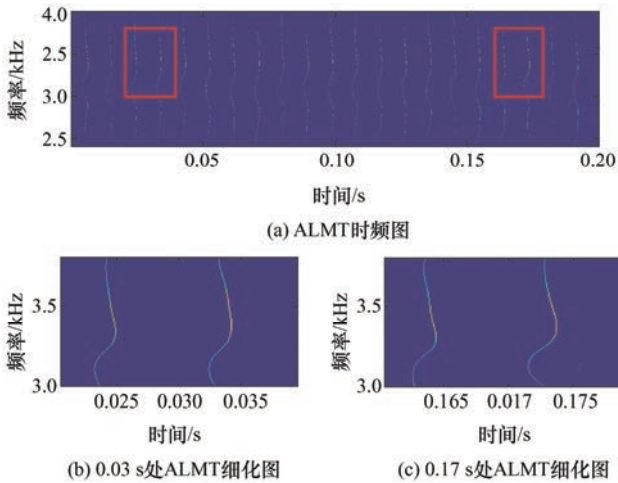


图 3 本文提出 ALMT 方法时频表示结果

为进一步证明 ALMT 的信号重构能力, 将 ALMT 结果进行一维积分, 可得

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} T_{AL}(u, \omega) du &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} V^{\hat{s}}(t, \omega) \delta(u - \hat{t}_m(t, \omega)) dt du = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} V^{\hat{s}}(t, \omega) dt = \hat{g}(0) \hat{s}(\omega) \end{aligned} \quad (34)$$

因此, 利用该方法可很好地恢复原始信号

$$\hat{s}(\omega) = (\hat{g}(0))^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} T_{AL}(u, \omega) du \quad (35)$$

考虑到所有模糊的 TF 系数都被重分配到对应的 GD 轨迹周围, 故每个单分量信号需要从 GD 轨迹周围的 TF 系数中分解出来。

$$\hat{s}_k(\omega) = \hat{g}(0)^{-1} \int_{|u + \phi_k'(\omega)| \leq \Delta} T_{AL}(u, \omega) du \quad (36)$$

2.3.2 ALMT 算法实现

第 2.1 节中详细介绍了 ALMT 方法的理论推导, 本节将给出其算法的实现步骤。

(1) 初始化。输入信号 s , 窗长 M , 窗系数 σ , 时间和频率的离散化参数 Δh 和 Δm 。

(2) 计算 STFT。 $V^{\hat{s}}[h, m]$ 、 $V^{\hat{s}'}[h, m]$ 、 $V^{\hat{s}''}[h, m]$ 、 $V^{\omega \hat{s}}[h, m]$ 、 $V^{\omega \hat{s}'}[h, m]$ 。

(3) 计算最优 Δn 值

$$\begin{aligned} \hat{\phi}''[h, m] &= \text{Re} \left(\frac{2i\pi(V^{\hat{s}''2} - V^{\hat{s}''*} V^{\hat{s}})}{V^{\hat{s}} V^{\omega \hat{s}'} - V^{\hat{s}'} V^{\omega \hat{s}}} \right) \\ \Delta n[h, m] &= 2 \sqrt{\frac{2(\sigma^2 + \hat{\phi}''[h, m]^2)}{\sigma}} \ln \frac{1}{t_0} \end{aligned}$$

(4) 计算 ALMT。计算 GD 估计: $\hat{t}_m[h, m]$

$$T_{AL}[h, \xi] \leftarrow 0$$

for $h=1:L$

for $m=1:L$

$$\xi \leftarrow \hat{t}_m[h, m]$$

$$T_{AL}[h, \xi] \leftarrow T_{AL}[h, \xi] + V^{\hat{s}}[h, m]$$

end for

end for

输出 $T_{AL}[h, \xi]$

2.3.3 基于 ALMT 的冲击分量提取

当旋转机械出现冲击类故障时, 会周期性地产生一系列脉冲, 两个连续脉冲之间的时间间隔为故障特征频率的倒数。尽管在本文已经证明了 ALMT 在处理实际脉冲类信号时能产生较为聚集的时频表示, 但如何根据时频表示识别故障特征频率、进而实现故障诊断仍需要进一步研究。

脉冲通常具有宽频带特性, 因此通常存在一个具有最显著 TF 幅值的频率点, 此频率点即可用来描述脉冲间隔。因此, 首先计算时频表示中每个频率的频谱幅值最大值^[14], 如下所示

$$FP(\omega) = \max \left| \int \left(|T_{AL}(t, \omega)| - \beta(\omega) \right) \exp(-i\xi t) dt \right| \quad (37)$$

式中, $\beta(\omega)$ 表示频率 ω 对应的 ALMT 结果在时间上的均值。据式(39)可得 ALMT 结果中具有最显著脉冲特征的频率点。因此, 具有最大 FP 值频率下的 ALMT 结果即可表示冲击类故障特征, 即

$$\text{Im}(t) = T_{AL} \left(t, \arg \max_{\omega} FP(\omega) \right) \quad (38)$$

3 数值仿真分析

本节以滚动轴承故障为例仿真了两组周期性冲击信号, 初步验证 ALMT 提取冲击振动的效果。仿真单分量的内圈故障振动信号, 如式(39)所示

$$x_i(t) = \sum_{i=1}^K (A \cos(2\pi f_m t + \varphi_A) + C_A) \times \exp(-B(t - T_i - \tau_i)) \sin(2\pi f_n(t - T_i - \tau_i)) \quad (39)$$

式中, K 表示脉冲个数, 令 $K=9$; $B=250$; $f_n=500$ Hz; $T_i=T_0+i/f_i$, $T_0=0$, $f_i=33.5$ Hz; $\tau_i=\lambda T_i$, $\lambda=0.01$ 。冲击频率 f_m 为 5 Hz, $A=5$ g。此仿真信号波形如图 4a 所示。为模拟实际应用中的噪声干扰, 添加 -3 dB 高斯白噪声, 得到图 4b 所示的含噪信号。

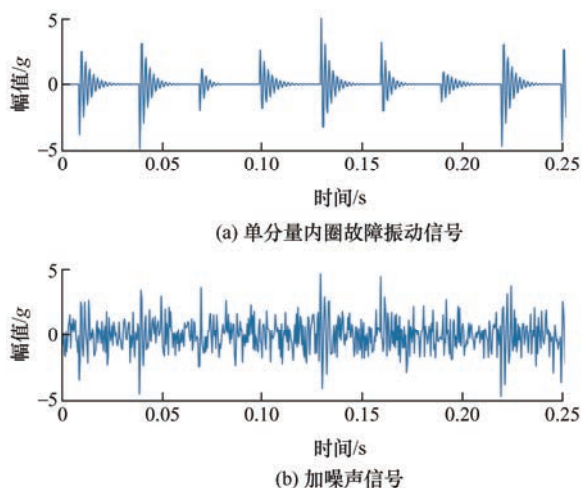


图 4 内圈故障仿真信号

图 5 为利用短时傅里叶变换(Short-time fourier transform, STFT)、小波变换(Wavelet transform, WT)、时间重分配同步提取变换(Time-reassigned synchroextracting transform, TET)、二阶时间重分配同步提取变换(Second-order time-reassigned synchroextracting transform, STET)、局部最大时间重分配同步压缩变换(Local maximum time-reassigned synchroextracting transform, LMT)和本文提出的 ALMT 方法对含噪信号处理得到的时频图。受海森堡测不准原理限制, STFT 的时频结果存在严重的能量模糊问题, 如图 5a 所示。由于仿真轴承故障信号具有明显的频变特性, TSST 不能准确估计频变信号的 GD 轨迹, 图 5b 所示的时频图中仍然存在轻微模糊现象。如图 5c 所示, 虽然 TET 时频图中能量较为集中, 但噪声对 TET 的表征效果影响较大, TET 难以准确表征被噪声掩盖的冲击分量。如图 5d 所示, STET 能够有效表征故障冲击, 但其

时频图中也引入了显著的背景噪声。LMT 为未考虑自适应、仅基于局部最大准则的时间重分配同步压缩变换, 如图 5e 所示, Δ 值设为 15, 从细化图发现 GD 轨迹周围有明显的发散能量未参与重分配, 其主要原因为信号在不同频率处的频变特性差异较大, 设定统一的 Δ 值难以满足信号在全频带的需求。如图 5f 所示, 本文所提出的 ALMT 可以产生能量高度集中的时频表示, 有效分析该冲击类故障信号。

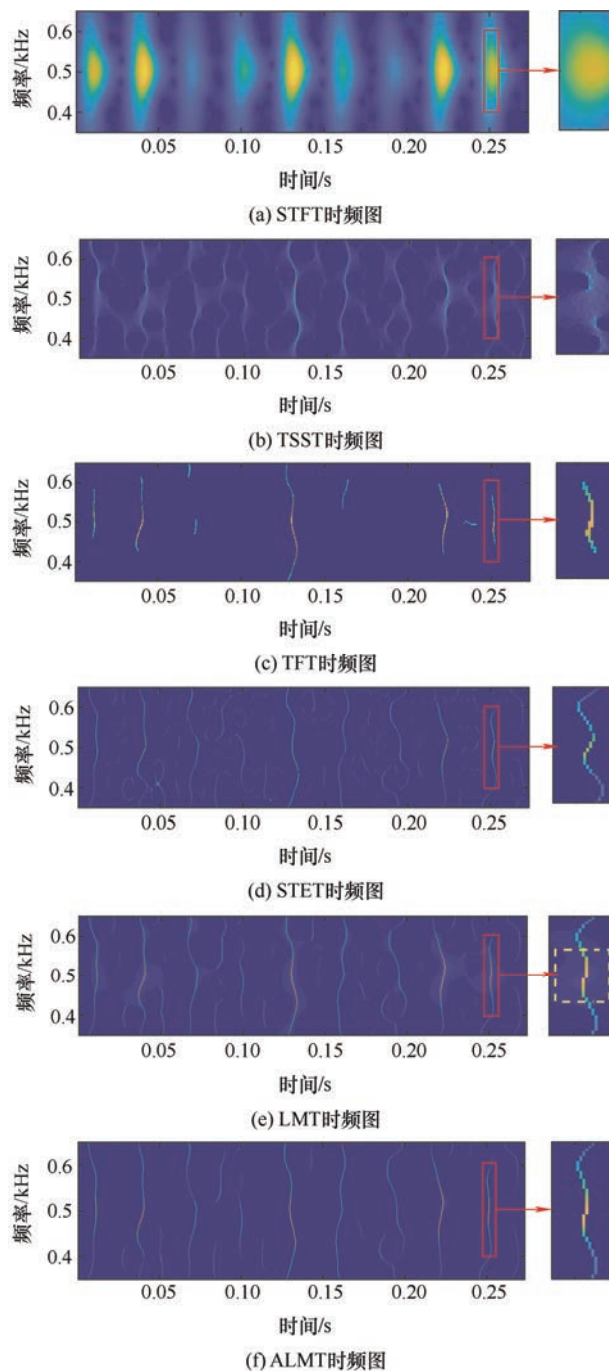


图 5 不同方法的时频表示结果

为了从含噪信号中提取出故障冲击, 据式(38)计算信号 FP 谱。如图 6a 所示, FP 谱在 500 Hz 附近达到最大值, 与理论中心频率 f_n 一致。图 6b 为根

据式(39)提取出的故障脉冲，与故障无关的噪声成分可被有效剔除。由图 6c 所示局部细化图可知相邻冲击之间的时间间隔为 0.03 s，对应故障特征频率为 33.3 Hz，与理论值 33.5 Hz 吻合。上述分析表明：在噪声干扰下，本文提出的方法能准确提取振动信号中冲击类故障特征。

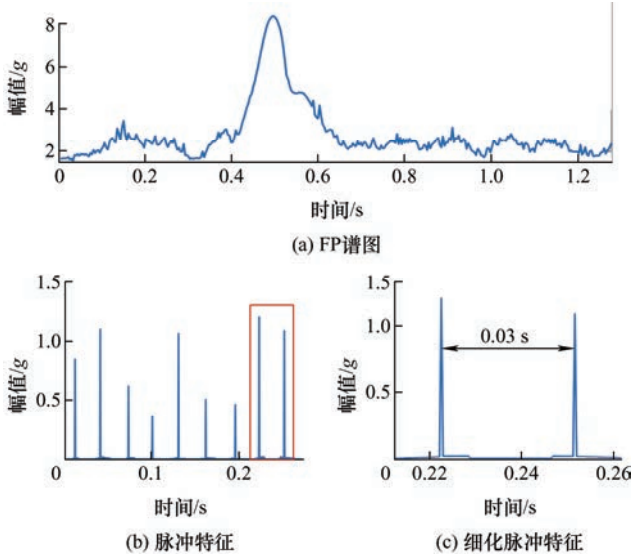


图 6 故障冲击提取结果

为进一步评估不同 TFA 方法的抗噪性能，将该方法应用于具有不同信噪比(从 -6 dB 到 20 dB)的含噪信号中。任意熵可定量表征时频图中的能量聚集性，熵值越小，则聚集性越好，因此本文选取该指标来衡量不同 TFA 方法的表征效果。图 7 为 STFT、WT、TSST、HSST 和 ALMT 几种 TFA 方法的处理结果。由图可知：相比其他 TFA 方法，ALMT 在多种噪声水平下均保持着最好的能量聚集性，即其具有良好的抗噪性能。

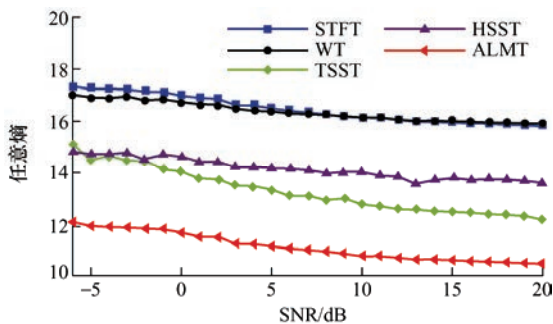


图 7 不同 TFA 方法时频图随噪声水平的变化趋势

为探究 ALMT 处理多分量冲击振动信号时的性能，再仿真一组轴承外圈故障信号，如式(40)所示。

$$x_o(t) = \sum_{i=1}^K C_A \cdot \exp(-B(t - T_i - \tau_i)) \sin(2\pi f_n(t - T_i - \tau_i)) \quad (40)$$

式中， $K=7$ ； f_n 设为 1 000 Hz； $T_i=T_0+i/f_o$ ， f_o 为故障特征频率，设为 24 Hz； C_A 设为 4 g，其余参数均与式(39)一致。该信号波形如图 8a 所示。然后构造出一组多分量冲击振动信号，如式(41)所示。多分量信号波形如图 8b 所示。

$$x(t) = 0.5 \cdot x_o(t) + 0.5 \cdot x_i(t) \quad (41)$$

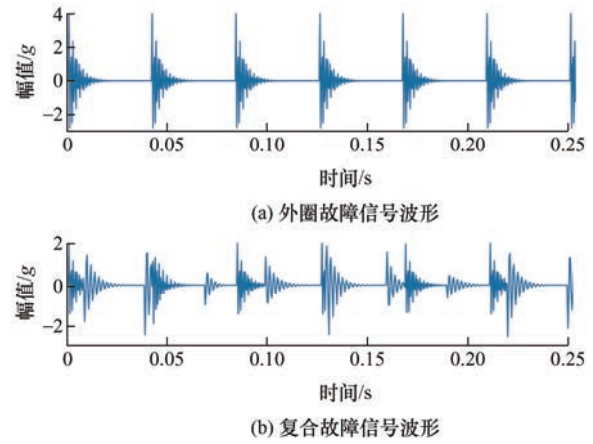


图 8 多分量复合故障仿真信号

图 9a 为添加随机噪声后的多分量信号。ALMT 处理后的时频结果如图 9b~9d 所示，从中可清楚地辨识出信号中两种故障冲击分量。根据局部细化图可有效识别不同故障的时频特征，0.03 s 和 0.042 s 的冲击间隔分别对应故障特征频率 33.3 Hz 和 23.8 Hz，与仿真的理论故障特征频率一致。

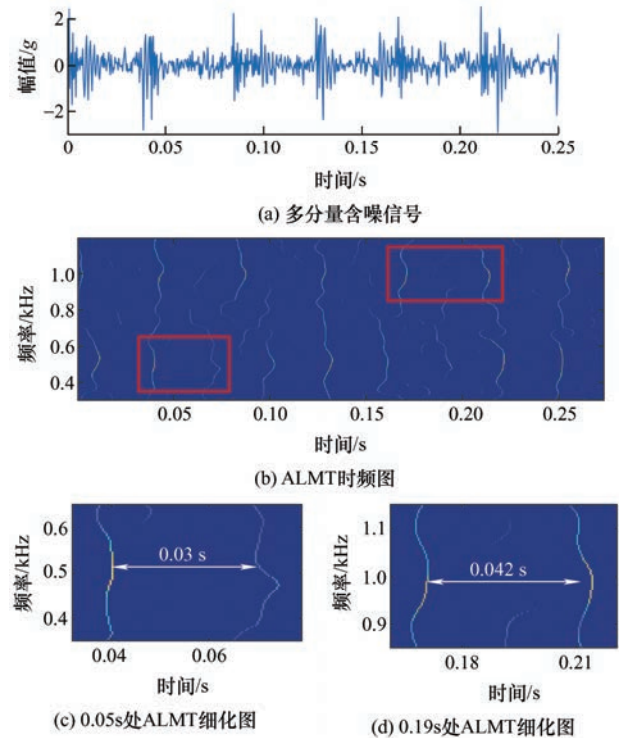


图 9 含噪信号波形及 ALMT 时频表示结果

如图 10a 所示, FP 谱中存在两个共振频带, 从中也能辨识出信号中的两个冲击分量。对两个分量的冲击特征分别进行提取, 得到的故障脉冲如图 10b、10c 所示。相比原信号波形, 噪声已经被显著抑制, 充分显露出故障特征。上述分析结果表明, ALMT 能够有效地分析多分量冲击振动信号, 并可成功提取出故障特征。

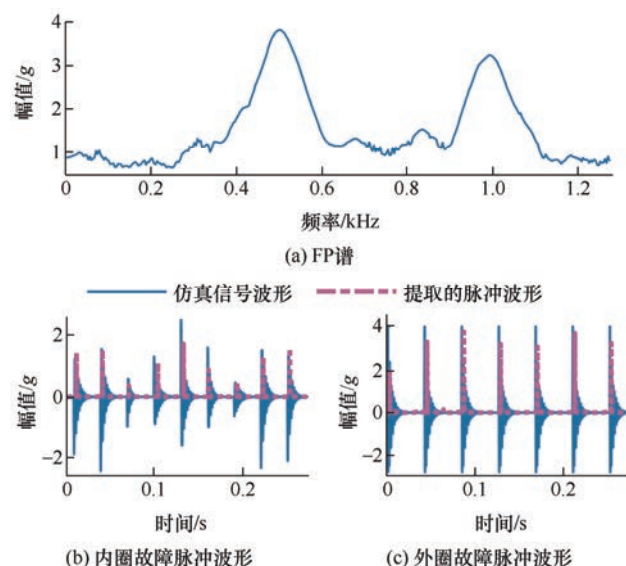


图 10 故障脉冲提取结果

4 试验信号分析

在本节中, 开展了两类典型冲击类故障试验模拟, 用以验证 ALMT 方法在处理实际冲击类故障振动信号时的有效性。使用的转子-轴承故障模拟试验台如图 11 所示, 主要由电机、皮带传动、联轴器、1#轴承座、转子和 2#轴承座组成。

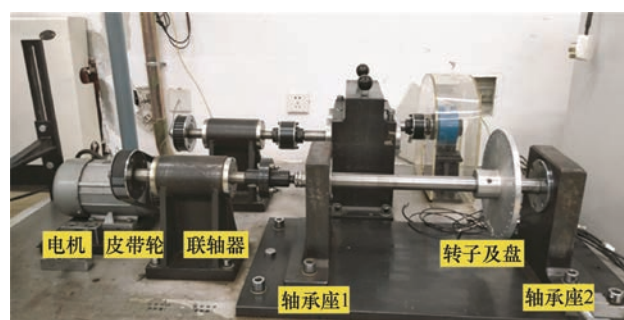


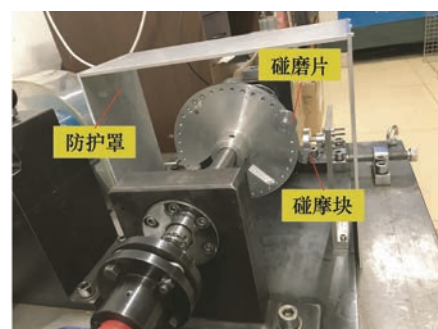
图 11 转子-轴承故障模拟试验台

4.1 转子碰摩故障

为模拟转子碰摩故障, 设计并加工了如图 12a 所示的碰摩装置, 其中主要包括转子盘、碰摩片、碰摩块、固定座及防护罩等。当转子旋转时, 转子盘上的碰摩片会与固定座上的碰摩块相撞, 从而模

拟转子碰摩故障。考虑试验的安全性, 本试验在 300 r/min 转速下进行。数据采集设备为 BK 采集板卡, 加速度传感器为 PCB 608 A11 型, 传感器安装在 2#轴承座垂直方向, 如图 12b、12c 所示。以 5 120 Hz 采样频率采集转子碰摩故障的振动加速度, 信号波形如图 13 所示。

利用 STFT、RM、TSST、STET 及本文提出的 LMT($\Delta=15$)和 ALMT 对碰摩故障信号进行分析, 均使用同一窗函数, 时频结果如图 13 所示。



(a) 碰摩装置示意图



(b) 传感器安装示意图



(c) 数据采集板卡

图 12 碰摩故障模拟

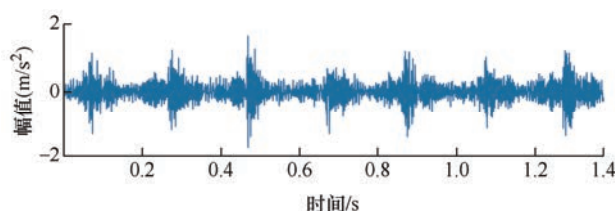


图 13 模拟碰摩故障振动信号波形

如图 14a、14b 所示, STFT 结果中能量发散严重, 难以准确识别冲击振动分量; 如图 14c 所示, 尽管 RM 沿时间方向和频率方向对 GD 轨迹周围能量进行重排, 显著提升了 STFT 结果的能量聚集性, 但明显缺失了信号重构能力; 如图 14d 所示, TSST 虽然能够较好地聚集弱频变信号附近能量, 但由于某些频率处的强频变特性导致出现群延迟估计偏差, 所以 TSST 难以清晰刻画强频变信号的时频特性; 如图 14e、14g 所示, STET 与 ALMT 均能提供

清晰、准确的时频表征,但 STET 丢失了一部分信号能量;如图 14f 所示,由 LMT 结果中的虚线框区域可以看出,统一的 Δ 值难以适用整个频带,因此在具有强频变特性的频率处,LMT 无法将扩散的能量完全集中到 GD 轨迹中。综上,相比其他 TFA 方法,ALMT 不仅能够提升群延迟估计准确性,还可实现 Δ 值与信号频变特性的自适应,生成能量高度集中的时频表示,从而准确捕捉信号中的冲击故障特征。

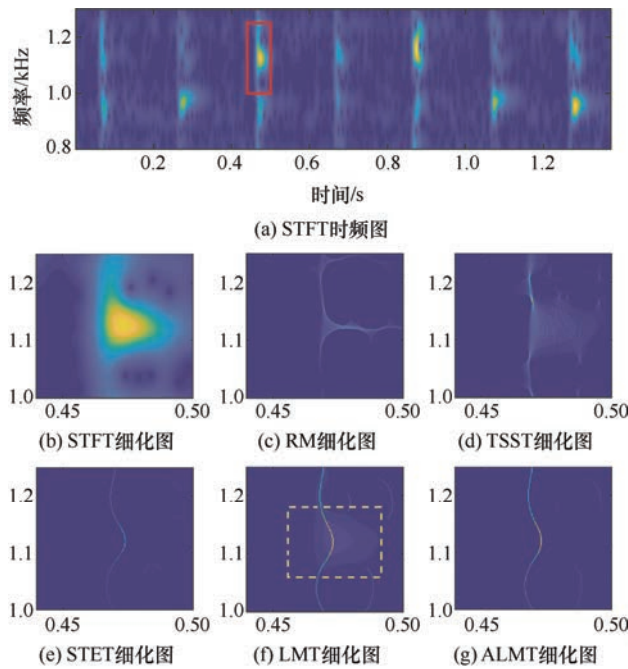


图 14 不同方法的时频表示结果

与仿真信号分析一致,选取任意熵定量评估不同 TF 结果的能量聚集程度。结果如表 1 所示,相比其他方法,ALMT 结果的熵值最低,即时频表示中的能量最为集中。另外,表 1 亦证明了 Δ 值的自适应明显提升了时频表示的能量聚集性。

表 1 不同 TFA 结果的任意熵

TFA	STFT	WT2	RM	TSST	LMT	ALMT
任意熵	20.9	17.9	16.8	19.1	16.4	15.4

采用包络分析和变分模态分解 (Variational mode decomposition, VMD) 对图 13 的信号进行脉冲波形提取,如图 15a、15b 所示。其中,图 15 是基于峭度值选取出的最优模态。对 ALMT 结果进一步处理提取出了脉冲波形,如图 15 所示。由图可知:

- ① 相比包络分析和 VMD,本文提出的方法能够更准确、清晰地提取出信号中与故障相关的冲击波形;
- ② 由于本试验设置的是单点碰摩,转子每转一周就会与静止的碰摩块相撞一次,即理论特征频率为转子工频;根据图 16 可知,冲击频率为转子旋转频率

一致,与理论特征频率一致。因此,ALMT 方法可准确提取出碰摩故障的冲击特征。

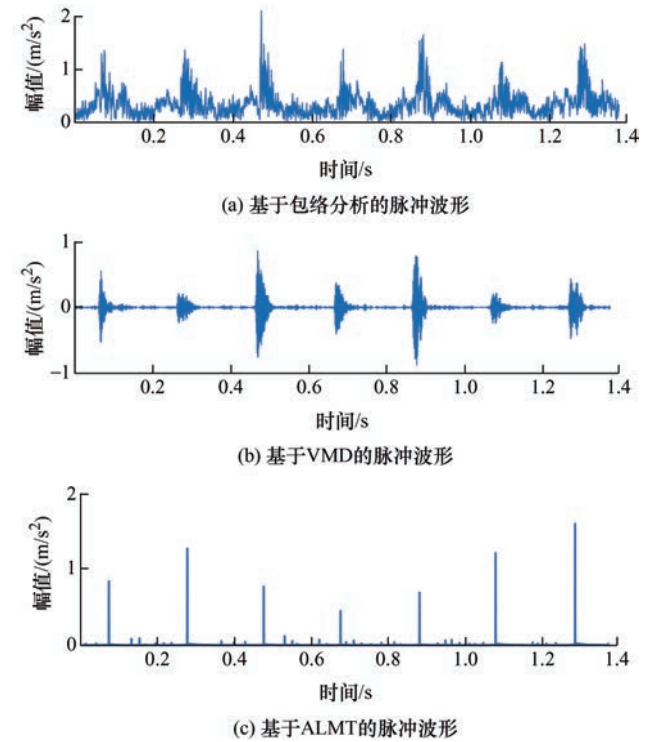


图 15 不同方法提取出的故障脉冲波形

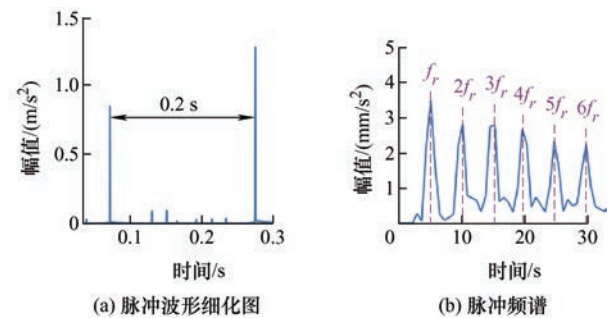


图 16 ALMT 提取出脉冲波形细化及频谱

4.2 轴承外圈故障

为模拟滚动轴承外圈故障,在 2#轴承外圈内表面加工一 1 mm 深 1 mm 宽、贯穿轴线方向的缺陷,如图 17a 所示。在本试验中,转子转速设定为 1 178 r/min,且 2#轴承型号为 N205EM,在试验转速下外圈故障特征频率为 95.2 Hz。振动测试系统与第 4.1 节中一致。本试验中采样频率为 51 200 Hz,采集的振动信号波形如图 17b 所示。

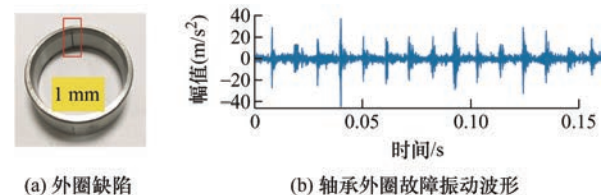


图 17 外圈故障模拟示意图和振动信号波形

图 18 为外圈故障振动信号的不同时频分析结果。根据图 18a 可以看出, 信号中噪声对 STFT 分析干扰严重, 且 STFT 时频图中能量发散, 难以准确分析实际轴承振动信号。对 STFT 时频图进一步进行 ALMT 变换, ALMT 时频结果的细化图如图 18b、18c 所示。可以看出 ALMT 能够清晰地表征外圈故障产生的冲击信号时频特性。基于时频图, 提取出故障冲击特征如图 19a、19b 所示。噪声被有效地抑制, 相邻两个脉冲间的时间间隔与理论值吻合。进一步对提取出的故障冲击进行傅里叶变换, 可得图 19c 所示的冲击分量频谱, 谱中噪声很小, 可直观分析出冲击发生的频率与外圈故障特征频率一致。综上所述, 本文提出方法可准确提取出滚动轴承外圈故障的冲击特征。

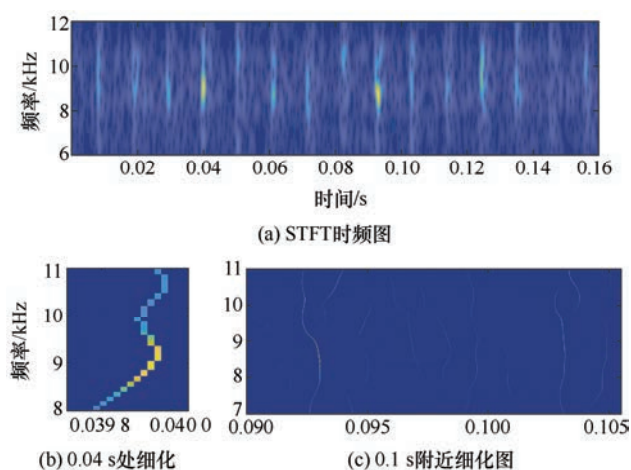


图 18 STFT 和 ALMT 时频表示结果

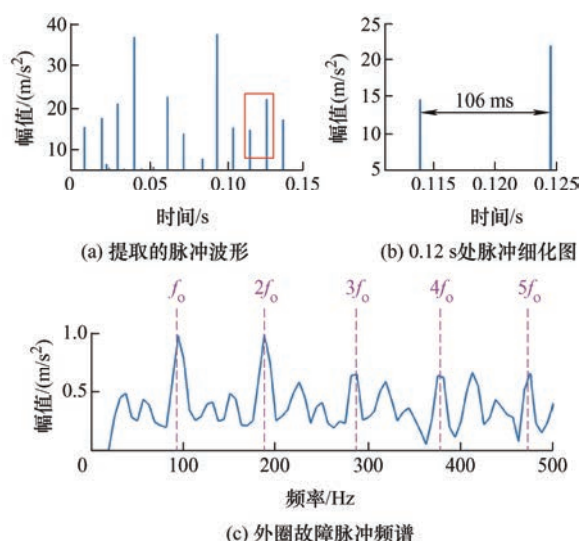


图 19 本文方法提取出的脉冲结果

5 结论

针对旋转机械冲击类故障特征的时频表示, 本

文采用局部最大值搜索算法有效避免了 TSST 在处理强频变信号引起的群延迟估计偏差; 同时, 借助谱图时宽与群延迟估计参数之间的关系, 推导出了群延迟估计自适应的理论公式; 进一步地, 提出了一种基于改进群延迟估计的同步压缩变换(ALMT)方法, 同时证明了提出的 ALMT 保持着信号重构能力; 最后, 基于 ALMT 时频结果, 提出了一种冲击类故障特征提取方法。使用本文提出方法对仿真信号和试验数据进行分析, 结果表明如下。

(1) 相对其他时频分析方法, 本文所提方法能够更清晰地描述多分量强频变特征, 且具有良好的抗噪性。

(2) ALMT 方法能够准确提取出冲击类故障特征, 指导故障诊断。

参 考 文 献

- [1] 秦海勤, 张耀涛, 徐可君. 双转子-支承-机匣耦合系统碰摩振动响应分析及试验验证[J]. 机械工程学报, 2019, 55(19): 75-83.
- [2] 刘佳杭. 基于振动分析的航空发动机转子系统故障诊断研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- [3] 唐建蒙. 基于压缩感知的旋转机械冲击型故障诊断方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [4] 陈予恕, 张华彪. 航空发动机整机动力学研究进展与展望[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1371-1391.
- [5] 胡爱军, 许莎, 向玲, 等. 滚动轴承外圈多点故障特征分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(21): 110-120.
- [6] QIN Y. A new family of model-based impulsive wavelets

- and their sparse representation for rolling bearing fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2716-2726.
- [7] 赵德尊, 王天杨, 褚福磊. 基于自适应广义解调变换的滚动轴承时变非平稳故障特征提取[J]. 机械工程学报, 2020, 56(3): 80-87.
- ZHAO Dezun, WANG Tianyang, CHU Fulei. Adaptive generalized demodulation transform based rolling bearing time-varying nonstationary fault feature extraction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3): 80-87.
- [8] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. The Royal Society, 1998, 454: 903-995.
- [9] ZHENG J, PAN H, LIU T, et al. Extreme-point weighted mode decomposition[J]. Signal Process, 2018, 142: 366-374.
- [10] LIU H, HUANG W, WANG S, et al. Adaptive spectral kurtosis filtering based on Morlet wavelet and its application for signal transients detection[J]. Signal Process, 2014, 96: 118-124.
- [11] LI C, ZHANG S H, QIN Y, et al. A systematic review of deep transfer learning for machinery fault diagnosis[J]. Neurocomputing, 2020, 407: 121-135.
- [12] 陈雪峰, 王诗彬, 程礼. 航空发动机快变信号的匹配同步压缩变换研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 13-22.
- CHEN Xuefeng, WANG Shibin, CHENG Li, et al. Matching synchrosqueezing transform for aero-engine's signals with fast varying instantaneous frequency[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 13-22.
- [13] 俞坤, 罗志涛, 李鸿飞, 等. 广义参数化同步压缩变换及其在旋转机械振动信号中的应用[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 149-159.
- YU Kun, LUO Zhitao, LI Hongfei, et al. General parameterized synchrosqueezing transform and its application in rotating machinery vibration signal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 149-159.
- [14] DAUBECJIES I, LU J, WU H T, et al. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool[J]. Applied Computer Harmonic Analysis, 2011, 30(2): 243-261.
- [15] OBERLIN T, MEIGNEN S, PERRIER V. Second-order synchrosqueezing transform or invertible reassignment? Towards ideal time-frequency representations[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2015, 63(5): 1335-1344.
- [16] PHAM D, MEIGNEN S. High-order synchrosqueezing transform for multicomponent signals analysis-with an application to gravitational-wave signal[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2017, 65(12): 3168-3178.
- [17] HE D, CAO H, WANG S, et al. Time-reassigned synchrosqueezing transform: The algorithm and its applications in mechanical signal processing[J]. Mechanical Systems and Signal Process, 2019, 117: 255-279.
- [18] YU G, LIN T, WANG Z, et al. Time-reassigned multisynchrosqueezing transform for bearing fault diagnosis of rotating machinery[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 1486-1496.
- [19] YU G, WANG Z, ZHAO P, et al. Local maximum synchrosqueezing transform: An energy-concentrated time-frequency analysis tool[J]. Mechanical Systems and Signal Process, 2019, 117: 537-552.
- [20] HE Zhoujie, TU Xiaotong, BAO Wenjie, et al. Gaussian-modulated linear group delay model: Application to second-order time-reassigned synchrosqueezing transform[J]. Signal Processing, 2020, 167: 107275.
-
- 作者简介: 贺雅, 女, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为航空发动机转子系统故障诊断。
E-mail: heya@mail.buct.edu.cn
- 胡明辉(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为航空发动机故障诊断与振动抑制。
E-mail: humh2008@163.com