

DOI: 10.3901/JME.2015.01.131

基于迭代广义同步压缩变换的时变工况 行星齿轮箱故障诊断*

陈小旺¹ 冯志鹏¹ LIANG Ming²

(1. 北京科技大学机械工程学院 北京 100083;

2. 渥太华大学机械工程系 渥太华 K1N 6N5 加拿大)

摘要: 同步压缩变换在分析频率恒定的单分量信号时改善时频可读性的效果显著,而在分析多分量频率时变信号时存在时频模糊现象,为了解决这一问题,提出迭代广义同步压缩变换方法。通过迭代广义解调分离出各单分量成分,并将时变频率变换为恒定频率。应用同步压缩变换精确估计瞬时频率和时频分布幅值。将各单分量的时频分布叠加获得信号的时频分布。该方法有效改善了同步压缩变换在分析频率时变信号时的时频可读性,并且将其推广应用于多分量信号。应用该方法有效识别了时变工况下行星齿轮箱振动信号的频率组成及其时变特征,准确诊断了齿轮故障。

关键词: 行星齿轮箱; 非平稳; 故障诊断; 广义解调; 同步压缩变换

中图分类号: TH17

Planetary Gearbox Fault Diagnosis under Time-variant Conditions Based on Iterative Generalized Synchrosqueezing Transform

CHEN Xiaowang¹ FENG Zhipeng¹ LIANG Ming²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

2. Department of Mechanical Engineering, University of Ottawa, Ottawa K1N 6N5, Canada)

Abstract: The synchrosqueezing transform can effectively improve the readability of time-frequency representation of mono-component and constant frequency signals, but blurs still occur to the time-frequency representation when analyzing multi-component and time-variant frequency signals. In order to address the time-frequency blur issue, an improved synchrosqueezing transform based on iterative generalized demodulation is proposed. The signal is decomposed into mono-components of constant frequency, via iterative generalized demodulation and filtering. The instantaneous frequency and time-frequency representation of such mono-component are accurately estimated by synchrosqueezing transform. The time-frequency representation of original signal is obtained by superposing the reconstructed time-frequency representations of all the mono-components. This proposed method effectively improves the time-frequency readability of synchrosqueezing transform when analyzing time-variant frequency signals, and generalizes the synchrosqueezing transform to multi-component signals as well. Using this method, the vibration signal frequency contents and their time-varying characteristics of a wind turbine planetary gearbox under time-variant conditions are effectively identified, and the gear fault is diagnosed.

Key words: planetary gearbox; time variant; fault diagnosis; generalized demodulation; synchrosqueezing transform

0 前言

行星齿轮箱在风力发电机组传动系统中应用广泛,其故障诊断问题不容忽视。行星齿轮箱振动故障诊断的关键在于如何通过振动信号分析有效识别各齿轮故障的特征频率及其幅值变化^[1-4]。但是,

风力发电机组的运行工况经常变化,转速和负荷等工况参数的变化将导致振动信号具有明显的非平稳性。在这种情况下,行星齿轮箱故障特征频率及其幅值也将随转速和负荷变化,具有时变特点,使得传统的时域和频域分析方法难以有效提取故障特征频率。

时频分析能够揭示非平稳信号的频率成分及其幅值的时变特征。对于时变工况下的行星齿轮箱的非平稳振动信号,时频分析是一种有效的分析手段。但是,常见的时频分析方法各有优缺点^[5-10]。

* 国家自然科学基金(11272047)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0775)、加拿大自然科学基金和加拿大略卓越中心基金资助项目。20140205收到初稿,20141008收到修改稿

例如:线性时频表示(如短时 Fourier 变换和小波变换)虽然不存在交叉项干扰问题,但是其时频分辨率受 Heisenberg 不确定性原理的限制,不能同时达到最佳;Wigner-Ville 分布虽然时频分辨率高,却存在固有的交叉项干扰问题,不适合分析复杂多分量信号;以 Wigner-Ville 分布为基础的双线性时频分布(包括 Cohen 类分布和仿射类分布)通过各种核函数进行平滑处理,虽然抑制了交叉项干扰,但是会造成信号自项畸变,降低时频分辨率;Hilbert-Huang 变换虽然算法效率高,对信号具有自适应性,而且具有良好的局部时频聚集能力,但是对信号的奇异点敏感,容易产生模式混淆,得到虚假的本质模式函数,影响分析结果。

时频分辨率高低以及是否存在交叉项干扰影响时频分布的可读性。为了提高时频分析的可读性,AUGER 等^[11]提出了时频重分配方法,将时频平面上任一点处的时频分布移到能量的重心位置。该方法在时间-频率/尺度域内进行二维重分配,计算量较大。2011 年,DAUBECHIES 等^[12]提出了同步压缩变换方法,该方法在小波变换的基础上,在尺度域提高时频分布的聚集性,能够减小瞬时频率曲线畸变,准确重构信号分量,清晰表示时频分析结果,具有更好的可读性。但是,实际的非平稳信号通常包含多个分量,它们不仅会在时域内同时出现,而且瞬时频率还可能随时间变化,在频域内重叠。这时,应用同步压缩变换并不能如愿得到最清晰真实的时频信息^[13-15]。

为了克服同步压缩变换的缺陷,本文对该方法进行了改进,应用迭代广义解调方法提取单分量成分,再进行同步压缩变换时频分析,提高了时频分辨率,避免了交叉项干扰。应用数值仿真信号验证了迭代广义同步压缩变换的性能,并应用该方法准确诊断了时变工况下的行星齿轮箱故障。

1 迭代广义同步压缩变换

DAUBECHIES 等^[16]提出的同步压缩变换是基于小波变换的一种改进的时频重分配方法。小波变换凭借可变分辨率的优势,能够较为准确地表达信号的时频特征。但是,由于时间分辨率和频率分辨率随小波尺度变化,将产生时频模糊现象,对于瞬时频率随时间变化的非平稳信号,这种模糊现象将在时间和频率/尺度域内同时出现。同步压缩变换只是在尺度域内进行处理,可以抑制尺度/频率方向上的模糊现象,适合分析频率恒定的信号,而在时间域内未做任何处理,难以抑制时间方向上的模糊现

象,不适合分析频率时变信号。另外,实际信号通常由多个分量组成,若各分量在频域内重叠或它们的瞬时频率相差不大,则各分量可能在频率/尺度域内产生干扰,影响同步压缩变换的时频可读性。为了解决上述问题,我们在广义解调的基础上,提出了迭代广义同步压缩变换方法。

1.1 广义解调

同步压缩变换非常适合分析频率恒定的信号。对于频率恒定的单分量信号,其时频分布为一条平行于时间坐标轴的直线,通过同步压缩变换可以有效抑制频率/尺度方向上的时频模糊现象,而且不会在时间方向上造成失真。为了获得这一性质,我们希望将频率时变的信号变换成频率恒定的信号来进行同步压缩变换时频分析,这可以通过广义解调来实现^[17]。

广义解调根据信号的瞬时相位,构造一个解调函数和信号相乘,可以将信号的时变频率变换为恒定值。对任一单分量信号 $s(t) = A(t)\cos[\varphi(t)]$ 乘以函数 $\exp[-i2\pi\nu(t)]$, 得 $u(t) = s(t)\exp[-i2\pi\nu(t)]$, 其中 $\varphi(t)$ 和 $\nu(t)$ 为瞬时相位函数,则信号 $u(t)$ 的 Fourier 变换为

$$\int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp\{-i2\pi[\nu(t) + ft]\} dt = S[f + \dot{\nu}(t)] \quad (1)$$

若将 $\exp\{-i2\pi[\nu(t) + ft]\}$ 视为基函数,则信号 $s(t)$ 的广义 Fourier 变换定义为

$$S_G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp\{-i2\pi[\nu(t) + ft]\} dt \quad (2)$$

其逆变换为

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_G(f) \exp\{i2\pi[\nu(t) + ft]\} df = \exp[i2\pi\nu(t)] \int_{-\infty}^{\infty} S_G(f) \exp[i2\pi ft] df \quad (3)$$

若 $S_G(f) = \delta(f - f_0)$, 即信号的时变频率 $\dot{\varphi}(t)/(2\pi)$ 经过变换成为了恒定频率 f_0 , 则 $s(t) = \exp\{i2\pi[\nu(t) + f_0 t]\}$ 。因此,若想将频率时变的信号变换成频率恒定的信号,只需要时变相位函数 $\nu(t)$ 满足条件

$$\dot{\varphi}(t) = \dot{\nu}(t) + 2\pi f_0 \quad (4)$$

其中瞬时角频率 $\dot{\varphi}(t)$ 可以通过常规时频分析估计。

1.2 同步压缩变换

信号 $u(t)$ 的连续小波变换为

$$W_u(a, b) = \langle u(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) \psi^* \frac{t-b}{a} dt \quad (5)$$

式中, ψ 为小波基,且当 $\xi < 0$ 时,其 Fourier 变换 $\hat{\psi}(\xi) = 0$ 。设信号 $u(t)$ 的模为 A , 则式(5)可写为

$$W_u(a, b) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{u}(\xi) \hat{\psi}^*(a\xi) \exp(ib\xi) d\xi = \frac{A\sqrt{a}}{4\pi} \hat{\psi}^*(a\omega_0) \exp(ib\omega_0) \quad (6)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

若小波的 Fourier 变换 $\hat{\psi}(\xi)$ 能量聚集在频率 ω 处, 则在时间-尺度平面内, 信号 $u(t)$ 的连续小波变换 $W_u(a, b)$ 应该聚集在尺度 $a = \omega/\omega_0$ 水平直线上, 但是实际的能量分布在这条水平直线周围, 造成模糊现象。对于频率恒定的信号, 模糊现象只发生在尺度方向上, 而在时间方向上则不受尺度变化的影响。因此, 对于时间-尺度平面上任意一点 (a, b) , 若 $W_u(a, b) \neq 0$, 则瞬时角频率为

$$\omega_u(a, b) = \frac{-i}{W_u(a, b)} \frac{\partial W_u(a, b)}{\partial b} \quad (7)$$

在计算瞬时频率时, 通过同步压缩变换实现精确定位并将小波变换的时间-尺度分布重分配为时间-频率分布

$$\text{TFR}_u(\omega_l, b) = \frac{1}{\Delta\omega} \sum_{a_k} W_u(a_k, b) a_k^{-3/2} (\Delta a)_k \quad (8)$$

式中, a_k 的范围为满足 $|\omega(a_k, b) - \omega_l| \leq \Delta\omega/2$ 的区间, ω_l 是第 l 个离散角频率, a_k 是第 k 个离散尺度, $\Delta\omega = \omega_k - \omega_{k-1}$, $(\Delta a)_k = a_k - a_{k-1}$ 。同步压缩变换结果取决于连续小区间 $[\omega_l - (1/2)\Delta\omega, \omega_l + (1/2)\Delta\omega]$ 的中心 ω_l , 它将小波变换中尺度/频率方向上的模糊范围压缩到了一个集中区域, 从而有效地改善了时频分布的可读性。

1.3 迭代广义同步压缩变换

实际信号通常包含多个分量, 而且各个分量的瞬时频率变化率并不一致, 因此无法只通过一次广义解调就能将各个分量都变换成频率恒定的信号。另外, 当对多分量的信号进行同步压缩时, 由于压缩范围在尺度/频率方向上固定, 如果各分量的瞬时频率相差很小, 则压缩结果会相互干扰。为了解决上述问题, 本文提出了迭代广义同步压缩变换, 具体步骤如下。

(1) 通过短时 Fourier 变换等常规时频分析, 估计信号中的组成分量个数, 根据时频分布的脊线拟合各个分量的瞬时频率曲线 $f_j(t)$ 。

(2) 根据第 j 个分量 $s_j(t)$ 的瞬时频率曲线 $f_j(t)$, 构造广义解调相位映射函数 $v_j(t) = -\int [f_j(t) - f_0] dt$, 并对待分析信号 $s(t)$ 进行频率调制 $u(t) =$

$s(t) \exp[-i2\pi v_j(t)]$, 将第 j 个分量的时变频率变换为近似恒定于 f_0 的频率。

(3) 对调制信号 $u(t)$ 进行带通滤波(中心频率为 f_0 , 带宽为时频分析中第 j 个分量与上下两个相邻分量瞬时频率差值的最小值), 分离出单分量 $u_j(t)$ 。

(4) 对频率近似恒定的单分量 $u_j(t)$ 进行小波同步压缩变换, 得到其时频分布 $\text{TFR}_{u_j}(t, f)$, 同时精确计算单分量 $u_j(t)$ 的瞬时频率 $f_{u_j}(t)$, 进而得到第 j 个原始信号分量 $s_j(t)$ 的瞬时频率 $f_{s_j}(t) = f_{u_j}(t) + f_j(t) - f_0$, 基于时间 t 、频率 $f_{s_j}(t)$ 和对应的时频分布幅值 $\text{TFR}_{u_j}(t, f)$, 构造第 j 个原始信号分量 $s_j(t)$ 的时频分布 $\text{TFR}_{s_j}(t, f)$ 。

(5) 重复步骤(2)~(4), 直至计算出所有分量的时频分布, 将各个原始信号分量的时频分布累加到一起, 即得到原始信号的时频分布。

2 仿真信号分析

本节分析行星齿轮箱故障振动数值仿真信号, 验证广义同步压缩变换方法的效果。行星齿轮箱故障振动信号由调幅-调频成分组成, 不失一般性, 我们考虑太阳轮局部故障, 且只考虑其中载波频率和调制频率的基频, 即齿轮啮合频率和故障齿轮的特征频率, 则振动信号模型简化为^[3]

$$x(t) = [1 - \cos(2\pi \int f_s^{(r)}(t) dt)] [1 + A \cos(2\pi \int f_s(t) dt + \phi)] \times \cos[2\pi \int f_m(t) dt + B \sin(2\pi \int f_s(t) dt + \varphi) + \theta] + n(t) \quad (9)$$

设行星齿轮箱齿数配置和表 1 中的第一级相同, 令太阳轮的旋转频率为 $f_s^{(r)}(t) = -12t^2 + 12t + 15$, 根据齿数配置可得啮合频率 $f_m(t) = (50/3)f_s^{(r)}$, 太阳轮局部故障特征频率 $f_s(t) = (10/3)f_s^{(r)}$ 。令调制系数分别为 $A = 0.6$, $B = 0.05$, 相位 $\phi = \varphi = \theta = 0$ 。为了模拟真实环境中的背景噪声, 加入了信噪比为 0 dB 的 Gauss 白噪声 $n(t)$ 。采样频率为 2 000 Hz, 信号的时域波形和 Fourier 频谱如图 1 所示。

表 1 行星齿轮箱参数

齿轮	齿数/个	
	第 1 级	第 2 级
齿圈	100	100
行星轮	40(4)	36(4)
太阳轮	20	28

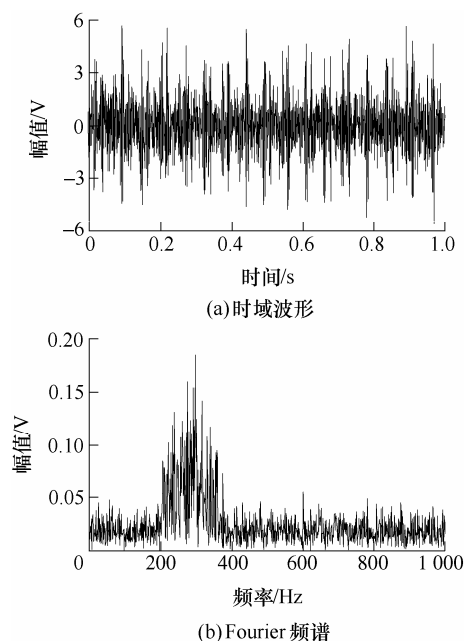


图 1 仿真信号

由信号的仿真模型推导其频率组成, 写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_9 \end{pmatrix} f + \frac{1}{6} f \cos\left(\frac{20}{3} \pi \int f_s^{(r)}(t) dt\right) \quad (10)$$

式中, f_n ($n=1,2,\dots,9$) 为各个频率成分, 系数 k_n 分别为 $k_1=63/3$, $k_2=60/3$, $k_3=57/3$, $k_4=53/3$, $k_5=50/3$, $k_6=47/3$, $k_7=43/3$, $k_8=40/3$, $k_9=37/3$, 且 $f=-12.9t^2+20t+12$ 。

分别应用 Morlet 小波尺度谱、重排 Morlet 小波尺度谱、同步压缩变换和迭代广义同步压缩变换方法对仿真信号进行了分析, 时频分析结果如图 2a~2d 所示。可见, 由于边带成分多且频率相差较小, 而且背景噪声干扰强, 常规时频分析方法难以清晰地分辨出 9 个主要频率成分的时变曲线。

由图 2a 可见, Morlet 小波尺度谱粗略分析出了瞬时频率的变化趋势, 但是由于各个成分之间的瞬时频率相差较小, 而且方法本身在尺度/频率方向上存在模糊现象, 因此无法清晰分辨出 9 个成分的时变频率曲线, 甚至未能识别出能量较低的成分。图 2b 重排 Morlet 小波尺度谱的时频分辨率有显著提高, 但只能分辨出少部分频率成分。可见对小波尺度谱进行重排, 提高了时频分辨率, 但对于多分量且频率相差较小的信号, 仍然难以准确地识别各个频率成分。图 2c 是由同步压缩变换方法得到的时频分布, 显示了瞬时频率的总体变化趋势, 但频率波动较大, 没有识别出各个频率成分各自的变化特征。

可见同步压缩变换理论上能够通过尺度/频率方向上的压缩提高分辨率, 但对于瞬时频率相差较小的多分量信号效果不佳。图 2d 是通过本文提出的迭代广义同步压缩变换方法得到的时频分布, 清晰地显示了 9 个主要频率成分及其时变特征, 与式(10)中的理论值完全相符。可见迭代广义同步压缩变换有效解决了时变频率引起的尺度/频率模糊现象以及多分量带来的交叉项干扰问题, 清晰准确地揭示了信号的频率组成及其时变特征。

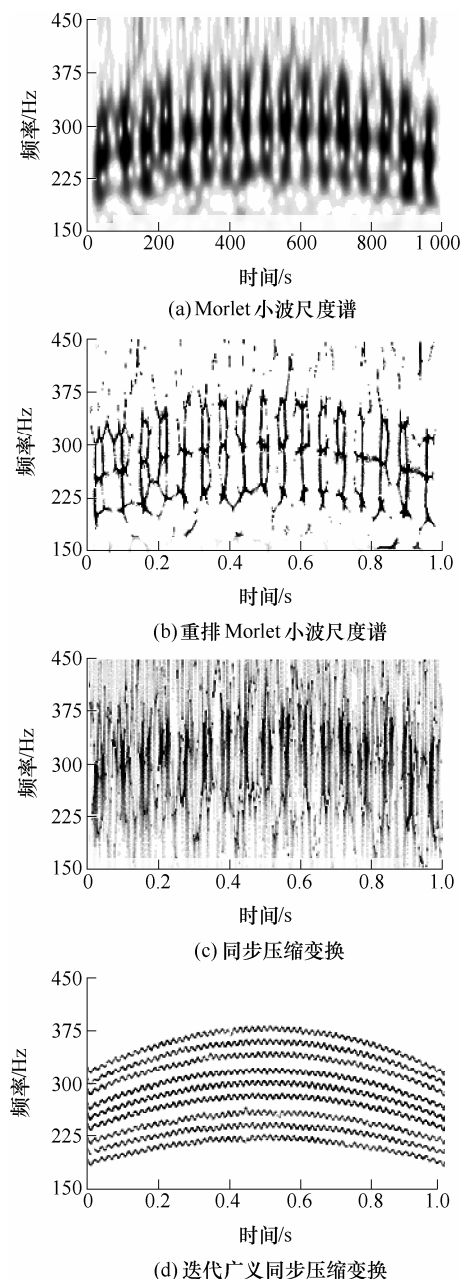


图 2 仿真信号时频分布

3 试验信号分析

应用迭代广义同步压缩变换分析行星齿轮箱

的非平稳信号，通过故障信号与正常信号的对比分析，诊断时变工况下行星齿轮箱的齿轮故障。

3.1 试验说明

试验在 Ottawa 大学机器监控实验室完成。图 3 为风电机组行星齿轮传动系统试验台，其中行星齿轮箱与定轴齿轮箱均为两级结构，参数分别见表 1、2。为了模拟行星齿轮箱的齿轮故障，在第 1 级太阳轮的某个轮齿上加工了剥落损伤，如图 4 所示。试验过程中，通过安装在行星齿轮箱箱体顶部的加速度传感器测试振动信号，采样频率为 20 kHz，第 2 级行星齿轮箱输出轴承所受的负荷为 16.284 N·m。在电动机转速由 60 Hz 降到 20 Hz 过程中采集了振动信号。由于风电机组叶片额定转速一般在 15~20 r/min 即 0.250~0.333 Hz 之间，根据传动系统中定轴齿轮箱和行星齿轮箱的齿数配置，该试验对应的叶片转速从 0.469 Hz 降到 0.156 Hz，涵盖风电机组的额定转速范围。

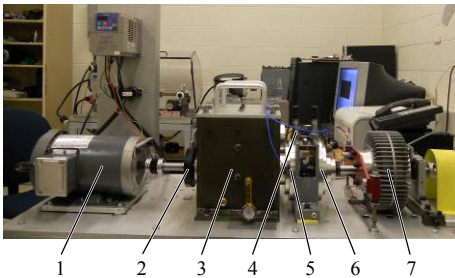


图 3 风电行星齿轮传动试验系统试验台

1. 电动机 2. 转速计 3. 定轴齿轮箱 4. 加速度传感器
5. 第 1 级行星齿轮箱 6. 第 2 级行星齿轮箱 7. 负荷施加装置



图 4 太阳轮局部损伤

表 2 定轴齿轮箱参数

齿轮	齿数/个	
	第 1 级	第 2 级
输入轴	32	—
中间轴	80	40
输出轴	—	72

根据定轴齿轮箱和行星齿轮箱的配置，可以计算第 1 级行星齿轮箱齿轮故障特征频率与驱动电动机旋转频率 $f_d(t)$ 之间的关系，见表 3，其中 $f_m(t)$ ， $f_c(t)$ ， $f_s^{(r)}(t)$ ， $f_r(t)$ ， $f_p(t)$ ， $f_s(t)$ 分别代表一级

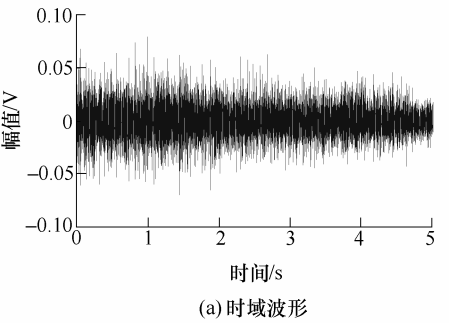
行星齿轮箱的啮合频率、行星架和太阳轮旋转频率、以及齿圈、行星轮和太阳轮局部故障特征频率。

表 3 齿轮故障特征频率

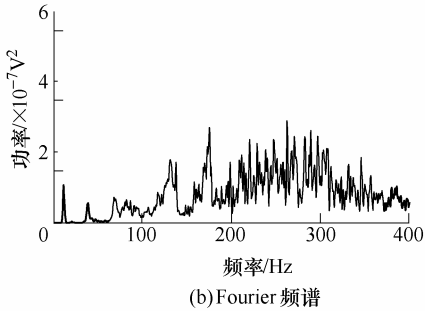
表达式	特征频率/Hz		
	$f_m(t)$	$f_c(t)$	$f_s^{(r)}(t)$
	$(100/27)f_d(t)$	$(1/27)f_d(t)$	$(2/9)f_d(t)$
表达式	特征频率/Hz		
	$f_r(t)$	$f_p(t)$	$f_s(t)$
	$(4/27)f_d(t)$	$(5/54)f_d(t)$	$(20/27)f_d(t)$

3.2 正常状态

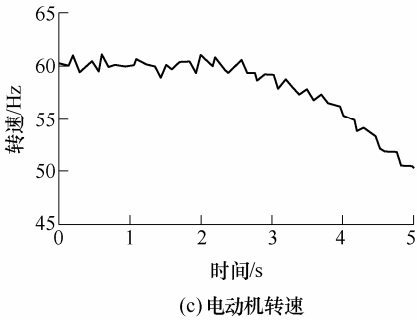
为降低计算量，截取降速过程中前 5 s 的振动信号进行分析，正常状态下行星齿轮箱振动信号的时域波形和功率谱以及电动机转速变化曲线分别如图 5a~5c 所示。由图 5c 可见，电动机转速从 60 Hz 逐渐下降到 50 Hz 左右，相应地，第一级行星齿轮箱的啮合频率最大值为 214.8 Hz，最小值为 185.1 Hz，我们在[0, 400 Hz]的区间内进行分析，该频段包含啮合频率最大值的 3/2 倍，能够反映齿轮箱的健康状态。



(a) 时域波形



(b) Fourier 频谱



(c) 电动机转速

图 5 正常状态振动信号与电动机转速

由图 5b 可知,该信号具有宽带特征,虽然有明显的峰值,但由于频率随时间变化,难以准确分析时频变化规律。

对正常状态信号进行迭代广义同步压缩变换分析,得到的时频分布如图 6 所示。从图 6 中可以准确识别出信号的主要频率成分,其中主导频率成分是第一级行星齿轮箱啮合频率与太阳轮故障特征频率之差 $f_m(t) - f_s(t)$ 。此外,还存在啮合频率与太阳轮故障特征频率的 $7/4$ 倍频之和 $f_m(t) + (7/4)f_s(t)$ 频率成分,但它们的幅值较小。齿轮的制造和安装误差以及微小的损伤在所难免,均可能导致上述频率成分的出现,分析结果符合基于正常信号模型的理论预期结果。

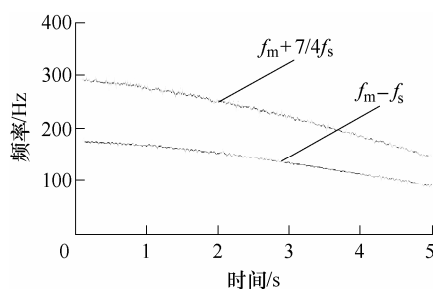


图 6 正常状态信号时频分布

3.3 太阳轮故障

太阳轮故障状态下行星齿轮箱振动信号的时域波形和功率谱以及电动机转速变化曲线分别如图 7a~7c 所示。由图 7c 中可见,电动机转速仍然从 60 Hz 逐渐下降到 50 Hz 左右,依旧在 $[0, 400 \text{ Hz}]$ 的频段内分析。

应用迭代广义同步压缩变换方法得到的太阳轮故障信号时频分布如图 8 所示。主导频率仍然为第一级行星齿轮箱啮合频率与太阳轮故障特征频率之差 $f_m(t) - f_s(t)$, 且其能量在第 0~1 s 和 2~4 s 内明显增强。啮合频率与太阳轮故障特征频率的 $7/4$ 倍频之和 $f_m(t) + (7/4)f_s(t)$ 频率成分也依然存在。此外,时频分布中还存在啮合频率 $f_m(t)$ 、啮合频率与太阳轮旋转频率的 4 倍频之差 $f_m(t) - 4f_s^{(r)}(t)$ 、啮合频率与太阳轮故障特征频率的 3 倍频之和 $f_m(t) + 3f_s(t)$ 。这些特征说明太阳轮出现了损伤,符合试验中的实际情况。

4 结论

同步压缩变换能够改善时频分布的可读性,但只对频率恒定的单分量信号效果显著。针对这一问题,提出了基于迭代广义解调的改进方法,将复杂多分量时变频率成分分解为频率恒定的单分量成

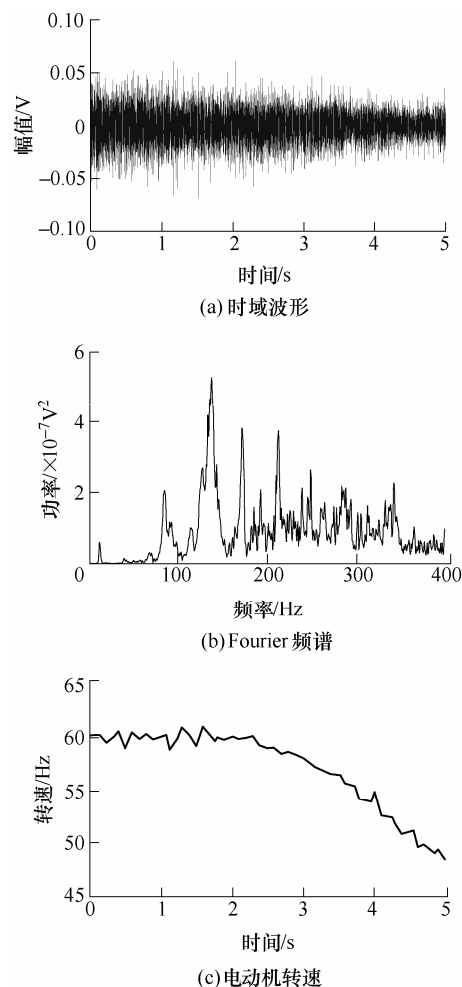


图 7 太阳轮故障状态下振动信号与电动机转速

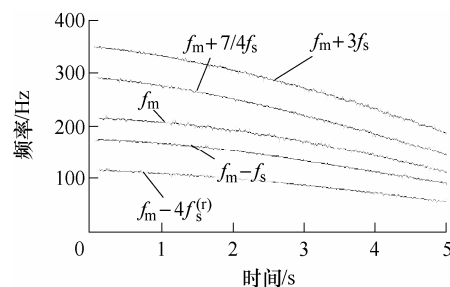


图 8 太阳轮故障信号时频分布

分,从而充分发挥同步压缩变换的优势,获得最佳的时频可读性。该方法具有良好时间-频率分辨率,无交叉项干扰,适合分析时变多分量信号。

时变工况下行星齿轮箱故障诊断的关键在于有效识别时变的故障特征频率。应用迭代广义同步压缩变换方法,有效提取了行星齿轮箱时变工况下振动信号的频率成分及其变化特征,诊断出了行星齿轮箱故障。

参考文献

- [1] 雷亚国,何正嘉,林京,等.行星齿轮箱故障诊断技术的研究进展[J].机械工程学报,2011,47(19):59-67.

- LEI Yaguo, HE Zhengjia, LIN Jin, et al. Research advances of fault diagnosis technique for planetary gearboxes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 59-67.
- [2] 秦大同, 肖正明, 王建宏. 基于啮合相位分析的盾构机减速器多级行星齿轮传动动力学特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 20-29.
- QIN Datong, XIAO Zhengming, WANG Jianhong. Dynamic characteristics of multi-stage planetary gears of shield tunnelling machine based on planet mesh phasing analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 20-29.
- [3] FENG Z, ZUO M. Vibration signal models for fault diagnosis of planetary gearboxes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331: 4919-4939.
- [4] INALPOLAT M, KAHRAMAN A. A theoretical and experimental investigation of modulation sidebands of planetary gear sets[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 323: 677-696.
- [5] FENG Z, LIANG M, CHU F. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(1): 165-205.
- [6] HLAWATSCH F, BARTELS G. Linear and quadratic time-frequency signal representations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 9(2): 21-67.
- [7] YU Dejie, CHENG Junsheng, YANG Yu. Application of Hilbert-Huang transform method to gear fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 18(6): 102-107.
- [8] PENG Zhike, HE Yongyong, LU Qing, et al. Wavelet multifractal spectrum: Application to analysis vibration signals[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 15(8): 59-63.
- [9] ZOU J, CHEN J. A comparative study on time-frequency feature of cracked rotor by Wigner-Ville distribution and wavelet transform[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 276(1-2): 1-11.
- [10] 褚福磊, 彭志科, 冯志鹏, 等. 机械故障诊断中的现代信号处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- CHU Fulei, PENG Zhike, FENG Zhipeng, et al. Modern signal processing methods in machinery fault diagnosis[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [11] AUGER F, FLANDRIN F. Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1995, 43: 1068-1089.
- [12] DAUBECHIES I, LU F J, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition like tool[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30: 243-261.
- [13] BREVDIO E, WU H T, THAKUR G, et al. Synchrosqueezing and its applications in the analysis of signals with time-varying spectrum[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011.
- [14] DAUBECHIES I, MAES S, ALDROUBI A. Wavelets in medicine and biology[M]. FL: CRC Press, 1996.
- [15] LI C, LIANG M. Time-frequency signal analysis for gearbox fault diagnosis using a generalized synchrosqueezing transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 26: 205-217.
- [16] DAUBECHIES I. Ten lectures on wavelets[C/CD]// CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, Philadelphia: SIAM, 1992.
- [17] OLHEDE S, WALDEN A. A generalized demodulation approach to time-frequency projections for multi-component signals[J]. Proceedings of the Royal Society A—Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2005, 461: 2159-2179.

作者简介: 陈小旺, 男, 1992 年出生。主要研究方向为机械故障诊断和信号处理。

E-mail: xiaowang.chen@live.com

冯志鹏(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械故障诊断、信号处理、机械动力学、人工智能。

E-mail: fengzp@ustb.edu.cn

LIANG Ming, 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械故障诊断、信号处理、机械动力学。