

迭代广义短时 Fourier 变换在行星齿轮箱故障诊断中的应用

张 东, 冯志鹏✉

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: fengzp@ustb.edu.cn

摘 要 短时 Fourier 变换(STFT)在分析非平稳信号的过程中,受调制系数的影响,时频分布图中的能量扩散至主导频率的周围,降低了时频分布的可读性. 运用 STFT 分析瞬时频率缓变或恒定的信号时,调制系数的影响较小甚至可以忽略不计,而得到能量聚集程度很高的时频分布. 根据这一特点,提出了迭代广义短时 Fourier 变换(IG-STFT),该方法有效改善了时频图的可读性. 首先运用迭代广义解调分离出频率恒定的单分量成分,然后运用 STFT 分析信号的时频分布,最后依据 STFT 的分析结果和相位函数得到原信号的时频分布. 通过行星齿轮箱仿真信号和实验信号分析,验证了该方法在分析非平稳信号中的有效性,准确诊断了齿轮故障.

关键词 故障诊断; 行星齿轮箱; 傅里叶变换; 广义解调; 非平稳信号

分类号 TH165+.3

Application of iterative generalized short-time Fourier transform to fault diagnosis of planetary gearboxes

ZHANG Dong, FENG Zhi-peng✉

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉Corresponding author, E-mail: fengzp@ustb.edu.cn

ABSTRACT Due to the effect of the modulation part, the energy diffuses around the surrounding area of dominating frequencies and diminishes the readability of the time-frequency representation when short-time Fourier transform (STFT) is used to process nonstationary signals. However, when the instantaneous frequency slowly changes or is constant, the effect is small and can even be neglected. Thus, the time-frequency representations have high-energy concentration. Based on this feature, a novel method called iterative generalized short-time Fourier transform (IG-STFT) was proposed, which improved the readability of the time-frequency representation. First, the stationary mono-components are separated using iterative generalized demodulation. Then, the time-frequency representations of each mono-component are acquired using STFT. Finally, the time-frequency representation of the original signal is obtained according to the analysis results of STFT and the phase function. The analysis results of a planetary gearbox simulation signal and experimental signals verify the effectiveness of this method for analyzing nonstationary signals and diagnosing gear faults.

KEY WORDS fault diagnosis; planetary gearbox; Fourier transform; generalized demodulation; nonstationary signal

行星齿轮箱在风力发电机组、直升机等设备中应用广泛,是传动系统中的关键部件^[1]. 实际运行中行星齿轮箱的工作环境恶劣,各齿轮易于出现故障. 在

机组运行过程中行星齿轮箱齿轮一旦出现故障,将会大大降低动力传递效率甚至导致设备停机,带来巨大的经济损失乃至人员伤亡^[2]. 故研究行星齿轮箱的故

障成因并进行有效的状态监测及故障诊断具有重要的现实意义^[3].

风力发电机组、直升机等设备中的行星齿轮箱经常在非平稳状态下工作,其振动信号具有明显的时变特征.常规的基于 Fourier 变换的频谱分析难以满足非平稳信号的分析要求,故研究可以刻画信号各频率成分随时间变化趋势的时频分析技术是十分必要的^[4-5].以 STFT 及小波变换为代表的线性时频分析技术虽可以用来分析非平稳信号,从而得到各频率成分随时间的变化趋势,但受 Heisenberg 不确定性原则的限制无法同时得到具备良好时间分辨率和频率分辨率的时频分布^[6-8].同样以 Wigner-Ville 分布为代表的双线性时频分析方法虽然有效改善了时频分布的分辨率,但其分析结果易于受交叉项的干扰而不适于分析多分量信号^[9].

近期, Yu 和 Zhou^[10]提出了广义线性调频小波变换,并指出在 STFT 中存在的调制系数影响了时频分布的能量聚集程度.对于瞬时频率近乎恒定的信号, STFT 可以得到能量聚集性较好的时频分布,但在分析非平稳信号的过程中,由于时频分布的能量扩散到主导频率的周围区域而降低了时频图的可读性.广义解调可以将任意时变信号的瞬时频率变换为恒定频率^[11-13],因此为充分发挥 STFT 的性能,提供了有效的预处理手段.

综合考虑广义解调在非平稳信号分析中的优势和 STFT 在分析非平稳信号中的不足,本文提出了 IG-STFT.利用迭代广义解调从非平稳信号中提取出多个频率恒定的单分量.运用 STFT 分析各近似平稳的单分量得到其时频分布,并依据相位函数和多个单分量的时频分布获得原始信号的时频分布.行星齿轮箱仿真信号及实验信号验证了提出方法的有效性,并成功诊断了行星齿轮箱故障.

1 迭代广义短时 Fourier 变换

1.1 短时 Fourier 变换

STFT 是目前应用最为广泛的非平稳信号分析技术,本质上而言是一种窗口化的 Fourier 变换.它通过假设信号在某一小段时间内是平稳的,对非平稳信号加时间窗,再通过对窗内的信号进行 Fourier 变换来达到刻画信号中频率成分随时间变化趋势的目的.信号 $x(t)$ 的 STFT 为

$$\text{STFT}[x(t)] = S_x[f] = \int x(\tau) g(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

式中 $g(t)$ 为窗函数 f 为信号 $x(t)$ 的瞬时频率 $x(\tau) \cdot g(\tau - t)$ 为 t 时刻截取下来的局部信号(将 $x(t)$ 和 $g(t)$ 的时间变量换为 τ).

通常情况下,多分量非平稳信号可表述为

$$x(t) = \sum_{i=1}^K x_i(t) = \sum_{i=1}^K A_i(t) e^{j\int_0^t 2\pi f_i(\tau) d\tau} \quad (2)$$

式中 K 为多分量信号中包含单分量的个数, $x_i(t)$ 为 $x(t)$ 的第 i 个分量, $A_i(t)$ 和 $f_i(t)$ 分别为第 i 个分量 $x_i(t)$ 的瞬时幅值和瞬时频率.

将瞬时频率 $f_i(t)$ 在 $t = t_0$ 时刻利用 Taylor 展开,即有

$$f_i(t) = f_i(t_0) + f_i'(t_0)(t - t_0) + R_1(t) \quad (3)$$

式中 $R_1(t)$ 为 $f_i(t)$ 在 t_0 处的 1 阶余项.忽略余项 $R_1(t)$ 则有

$$f_i(t) \approx f_i(t_0) + f_i'(t_0)(t - t_0) \quad (4)$$

第 i 个分量 $x_i(t)$ 的 STFT 为

$$\text{STFT}[x_i(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} A_i(\tau) e^{j\int_0^{\tau} 2\pi f_i(\tau) d\tau} g(\tau - t) e^{-j2\pi f_i(t)\tau} d\tau \quad (5)$$

将 Taylor 展开后得到的瞬时频率式(4)代入式(5),即有

$$\begin{aligned} \text{STFT}[x_i(t)] &\approx \int_{-\infty}^{+\infty} A_i(\tau) e^{j\int_0^{\tau} 2\pi [f_i(t_0) + f_i'(t_0)(\tau - t_0)] d\tau} g(\tau - t) e^{-j2\pi f_i(t)\tau} d\tau = \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} A_i(\tau) e^{j2\pi f_i(t_0)\tau} e^{j2\pi f_i'(t_0)(\tau - t_0)^{2/2}} g(\tau - t) e^{-j2\pi f_i(t)\tau} d\tau. \end{aligned} \quad (6)$$

不失一般性,令 $t = t_0$ 在 t_0 处信号 $x_i(t)$ 的时频分布为

$$\begin{aligned} \text{TFR}_{x_i}[t_0, f_i(t_0)] &= \text{STFT}[x_i(t_0)] \approx \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} A_i(\tau) e^{j2\pi f_i(t_0)\tau} e^{j2\pi f_i'(t_0)(\tau - t_0)^{2/2}} g(\tau - t_0) e^{-j2\pi f_i(t_0)\tau} d\tau = \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} A_i(\tau) \underbrace{\times e^{j2\pi f_i'(t_0)(\tau - t_0)^{2/2}}}_{\text{MP}} \times g(\tau - t_0) d\tau. \end{aligned} \quad (7)$$

由(7)式可见,在 $\text{TFR}_{x_i}[t_0, f_i(t_0)]$ 中存在调制系数 MP. 当 $f_i(t)$ 缓变或为常数时 $f_i'(t) \approx 0$, 调制项 MP 的调制作用较小,甚至可以忽略不计.但当 $f_i(t)$ 随时间产生较大变化时 $f_i'(t) \gg 0$, MP 项的调制作用增大,使得信号时频曲线的能量扩散至周围区域.

运用 STFT 分析瞬时频率变化趋势如图 1(a) 所示的非平稳仿真信号(该信号中包含瞬时频率分别为 f_1 、 f_2 和 f_3 的三个单分量),得到如图 1(b) 所示的分析结果.由图 1 可知,当信号瞬时频率快速变化时,时频曲线的能量扩散至周围区域而降低了时频图的可读性.而当瞬时频率不变时,其时频曲线的能量集中性强,可得到较为理想的时频分布.上述分析结果进一步验证了 STFT 分析非平稳信号过程中存在的不足.

1.2 广义解调

广义解调可以实现瞬时频率为非线性或随时间骤变的非平稳信号向瞬时频率为线性或随时间缓变信号的过渡.在广义解调过程中,首先需要构造相位函数 $s(t)$,然后构造出解调函数 $e^{-s(t)}$ 并与原始信号相乘,最后对其进行 Fourier 变换^[14-15].本质上而言,广义解调是一种广义化的 Fourier 变换.广义解调可表述为

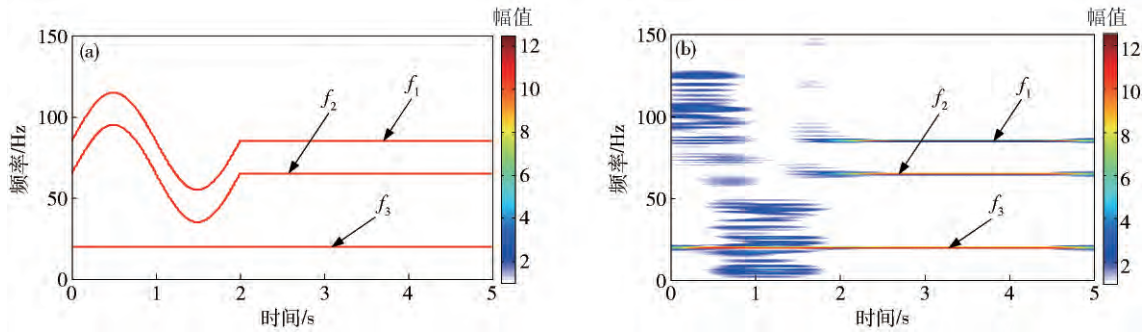


图1 仿真信号分析结果. (a) 实际时频分布; (b) STFT 时频分布

Fig. 1 Analysis results of simulation signal: (a) true spectrogram; (b) STFT spectrogram

$$X_G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi[f(t)t + s(t)]} dt. \quad (8)$$

其中, 相位函数 $s(t)$ 可以由瞬时频率 $f(t)$ 积分得到, 而瞬时频率 $f(t)$ 可由 STFT 或其他自适应时频分析方法分析得到. 虽然估计瞬时频率 $f(t)$ 的过程中会产生一定的误差, 从而导致广义解调后的信号不是严格平稳的, 但是其时频分布总体上是平行于时间轴的, 即 $f_i'(t) \approx 0$. 由于 $f_i'(t) \approx 0$, 减少了调制项的干扰, 所以选取广义解调作为 STFT 的预处理步骤, 为得到具备良好能量聚集性的时频分布提供了可能.

1.3 方法的提出

STFT 在分析接近时不变的信号时可以得到能量聚集性很好的时频分布, 但在分析瞬时频率时变信号时, 由于调制系数的存在, 会产生很强的调制作用, 使其能量扩散到周围区域而降低了时频图的可读性. 广义解调可以实现信号从非平稳到近似平稳的过渡, 将瞬时频率时变的信号转化为频率恒定的信号. 综合上述分析, 提出了 IG-STFT, 以减小调制系数对 STFT 时频分布的影响, 提高时频图的可读性. 具体步骤如下:

(1) 运用 STFT 等自适应时频分析方法分析信号中主导频率的变化趋势, 提取时频脊线得到各频率成分近似的瞬时频率 $\hat{f}_i(t)$;

(2) 对瞬时频率 $\hat{f}_i(t)$ 进行积分, 构造出相位函数 $s_i(t) = \int [\hat{f}_i(t) - f_0] dt$, 进而得到包含相位函数的信号 $x_i(t) e^{-j2\pi s_i(t)}$, 其使得单分量 $x_i(t)$ 的瞬时频率近似地围绕恒定值 f_0 较小地波动 (f_0 的取值小于信号的采样频率一半即可);

(3) 利用滤波器滤出瞬时频率围绕 f_0 波动的准平稳信号 $x_i(t) e^{-j2\pi s_i(t)}$;

(4) 运用 STFT 分析单分量 $x_i(t) e^{-j2\pi s_i(t)}$ 的时频分布;

(5) 依据估计得到的瞬时频率 $\hat{f}_i(t)$ 与滤波器中心频率 f_0 的差值 $v(t) = \hat{f}_i(t) - f_0$ 对时频图重新排布, 即可得到单分量 $x_i(t)$ 真实的时频分布 TFR $[x_i]$;

(6) 重复 (2) ~ (5), 直至得到所有频率成分 $\hat{f}_i(t)$ 所对应分量 $x_i(t)$ 的时频分布 TFR $[x_i]$;

(7) 依据各分量的时频分布 TFR $[x_i]$, 即可得到原始信号的时频分布 $\text{TFR}[x] = \sum_{i=1}^K \text{TFR}[x_i]$.

2 仿真信号分析

为了验证 IG-STFT 在行星齿轮箱齿轮故障诊断中的可行性, 分析下式所示的行星齿轮箱太阳轮故障仿真信号,

$$\begin{aligned} \text{sig}(t) = & \left\{ 1 - \cos \left[2\pi \int f_s^{(r)}(t) dt \right] \right\} \cdot \\ & \left\{ 1 + A \cos \left[2\pi \int f_s(t) dt + \phi \right] \right\} \cos \left\{ 2\pi \int f_m(t) dt + \right. \\ & \left. B \sin \left[2\pi \int f_s(t) dt + \theta \right] \right\} + \zeta(t). \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $f_s^{(r)}(t)$ 为太阳轮转频, $f_s(t)$ 为太阳轮故障特征频率, $f_m(t)$ 为啮合频率, 初相位 $\phi = \theta = 0$, 幅值调制系数 $A = 1.4$, 频率调制系数 $B = 0.05$. 为了模拟实际测试环境中背景噪声的影响, 在仿真信号中加入信噪比为 0 dB 的高斯白噪声 $\zeta(t)$. 同时令太阳轮转频 $f_s^{(r)}(t) = -12.9t^2 + 20t + 12$ 以模拟行星齿轮箱非平稳运行工况. 信号采样频率为 2048 Hz, 采样时间为 1.5 s.

由式 (9) 推导得到信号中包含的 9 个时变频率成分: $f_{1-4} = f_m \pm f_s \pm f_s^{(r)} + f_{FM}$, $f_{5-6} = f_m \pm f_s + f_{FM}$, $f_{7-8} = f_m \pm f_s^{(r)} + f_{FM}$, $f_9 = f_m + f_{FM}$. 其中, $f_m = (50/3) f_s^{(r)}$, $f_s = (10/3) f_s^{(r)}$, $f_{FM} = 0.05 \cos \left(2\pi \int f_s dt \right) f_s$.

太阳轮故障仿真信号的分析结果如图 2 所示, 其时域波形及 Fourier 频谱如图 2(a) 和 (b) 所示. 进一步运用 STFT 及 IG-STFT 分析上述仿真信号并得到其时频分析结果如图 2(c) 和 (d) 所示. 在图 2(c) 中, 可见在主导频率周围存在较强的调制作用, 且受噪声影响较大, 甚至在初始及末了阶段出现了不同频率成分之间交叉重叠的现象. 在图 2(d) 中, 存在明显的 9 个主导频率成分时变趋势, 故所提出的方法有效避免了交叉项、背景噪声及调制系数的影响.

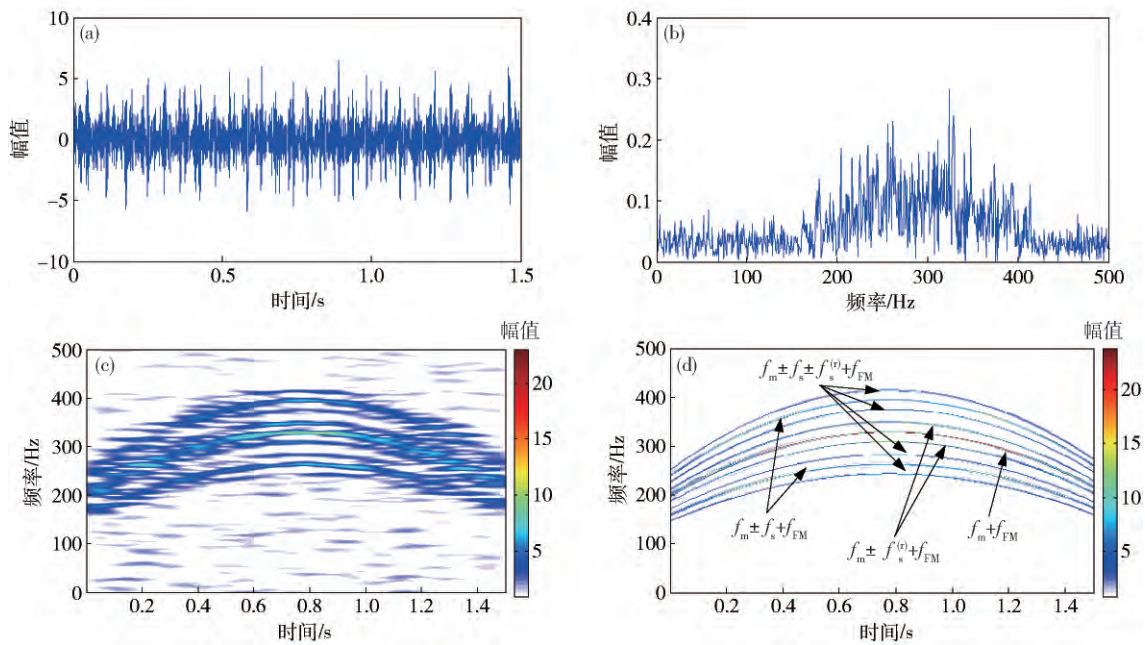


图2 行星齿轮箱太阳轮故障仿真信号分析结果. (a) 时域波形; (b) Fourier 频谱; (c) STFT 时频分布; (d) IG-STFT 时频分布

Fig.2 Simulation signal of a planetary gearbox with a sun gear fault: (a) time domain waveform; (b) Fourier spectrum; (c) STFT spectrogram; (d) IG-STFT spectrogram

3 实验信号分析

3.1 实验说明

该实验在加拿大 Ottawa 大学机械工程系完成. 实验装置如图 3 所示,由电动机、两级行星齿轮箱、定轴齿轮箱、转速计、加速度传感器和磁粉制动器构成. 依据齿轮箱各齿轮参数如表 1 及电动机转频 f_d ,计算得到各级行星齿轮箱各齿轮故障特征频率如表 2 所示,表中 $f_s(t)$ 、 $f_p(t)$ 和 $f_r(t)$ 分别为太阳轮、行星轮和齿圈故障特征频率. 为了模拟太阳轮磨损和局部剥落故障,分别在第一级行星齿轮箱的太阳轮上加工了分布式缺陷模拟磨损故障,在第二级行星齿轮箱太阳轮的

某一个齿上加工了局部式缺陷模拟局部剥落故障,如图 4 所示. 信号采样频率为 20 kHz,采样时间为 4.5 s,并由磁粉制动器施加 16.3 N·m 的负荷. 实验中电动机转频 f_d 从 60 Hz 逐渐降至 40 Hz 左右,故第一级和第二级行星齿轮箱的最高啮合频率分别为 222.2 Hz 和 48.6 Hz. 实验中共测试得到三组振动信号:(1) 正常状态;(2) 第一级行星齿轮箱太阳轮分布式缺陷;(3) 第二级行星齿轮箱太阳轮局部式缺陷. 为了降低计算量提高分析效率,对原始信号进行重采样,重采样后信号的采样频率为 1000 Hz(针对第一级行星齿轮箱)和 160 Hz(针对第二级行星齿轮箱),分别覆盖了两级行星齿轮箱齿轮的 1.5 倍啮合频率,以保证重采样后信号中包含充足的故障信息.

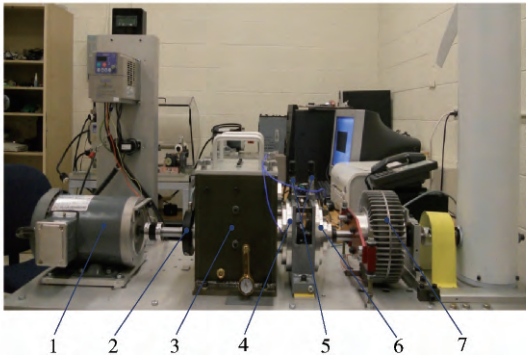


图3 实验装置. (1) 电动机; (2) 转速计; (3) 定轴齿轮箱; (4) 第一级行星齿轮箱; (5) 加速度传感器; (6) 第二级行星齿轮箱; (7) 磁粉制动器

Fig.3 Experimental rig: (1) motor; (2) tachometer; (3) fixed-shaft gearbox; (4) planetary gearbox stage 1; (5) accelerometers; (6) planetary gearbox stage 2; (7) magnetic brake

表 1 齿轮箱主要参数

Table 1 Main parameters of gearboxes

齿轮箱		齿数	
		第一级	第二级
定轴齿轮箱	输入轴	32	—
	中间轴	80	40
	输出轴	—	72
行星齿轮箱	齿圈	100	100
	行星轮(个数)	40(4)	36(4)
	太阳轮	20	28

3.2 信号分析

3.2.1 正常状态

行星齿轮箱正常状态下振动信号的分析结果如图 5 所示. 虽在其 Fourier 频谱如图 5(b) 中存在多个

表 2 行星齿轮箱故障特征频率

Table 2 Fault characteristic frequencies of planetary gearbox

级数	$f_s(t)/\text{Hz}$	$f_p(t)/\text{Hz}$	$f_r(t)/\text{Hz}$
1	$(20/27)f_d$	$(5/54)f_d$	$(4/27)f_d$
2	$(175/1512)f_d$	$(175/7776)f_d$	$(175/5400)f_d$

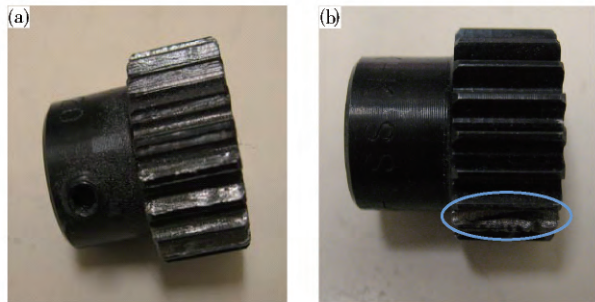


图 4 太阳轮损伤. (a) 太阳轮分布式故障; (b) 太阳轮局部式故障

Fig. 4 Sun gear damage: (a) sun gear distributed fault; (b) sun gear localized fault

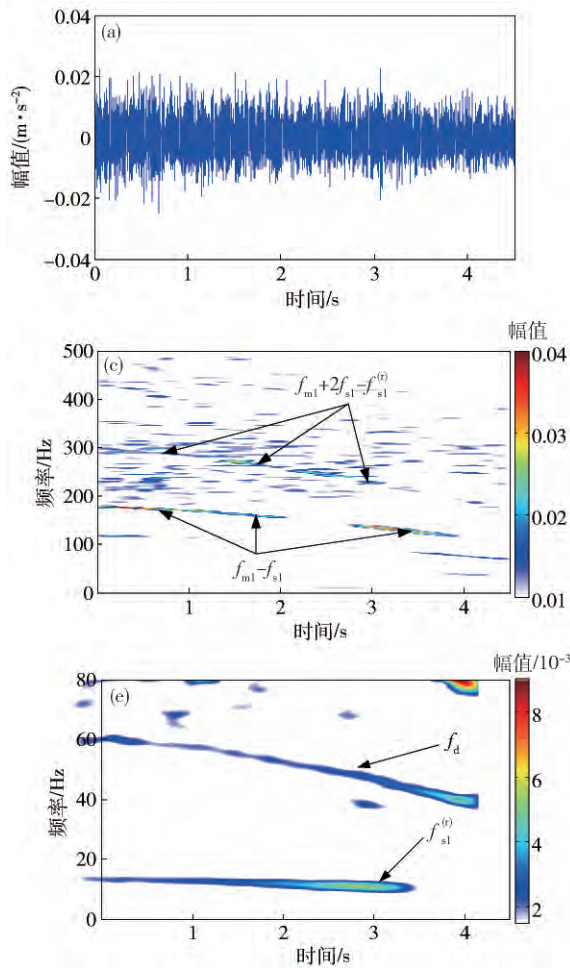


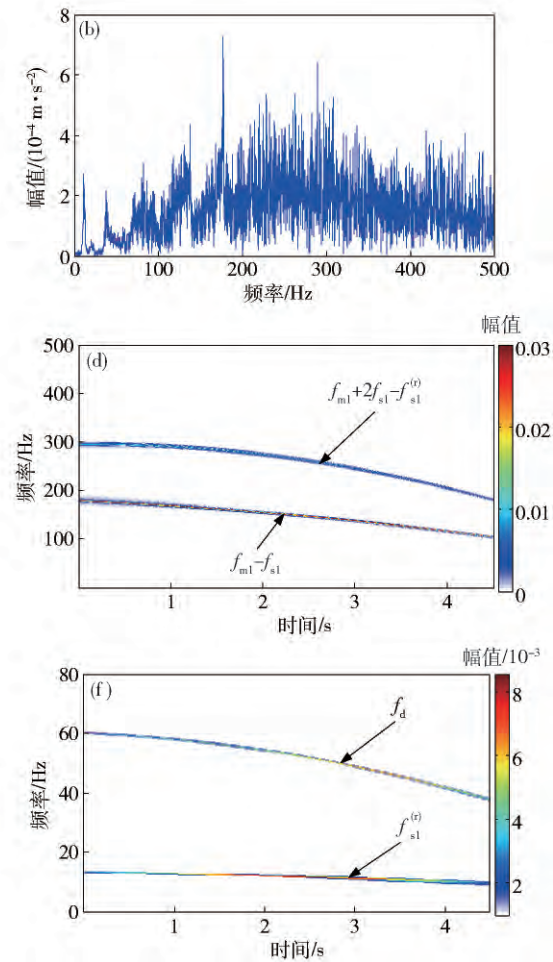
图 5 正常状态分析结果. (a) 时域波形; (b) Fourier 频谱; (c) STFT 时频分布(0 ~ 500 Hz); (d) IG-STFT 时频分布(0 ~ 500 Hz); (e) STFT 时频分布(0 ~ 80 Hz); (f) IG-STFT 时频分布(0 ~ 80 Hz)

Fig. 5 Normal signal analysis results: (a) time domain waveform; (b) Fourier spectrum; (c) STFT spectrogram (0 ~ 500 Hz); (d) IG-STFT spectrogram (0 ~ 500 Hz); (e) STFT spectrogram (0 ~ 80 Hz); (f) IG-STFT spectrogram (0 ~ 80 Hz)

峰值,但由于行星齿轮箱工作于非平稳工况下,故无法根据边带判断行星齿轮箱是否存在故障及故障出现的位置.分别对重采样后不同频率范围的信号运用 STFT 分析,得到其时频图如图 5(c) 和 (e) 所示,并估计出其中主导频率的变化趋势.进一步地,IG-STFT 的分析结果如图 5(d) 和 (f) 所示.图 5(d) 中主导频率成分依次为第一级行星齿轮箱齿轮啮合频率 f_{m1} 、太阳轮转频 $f_{s1}^{(r)}$ 及故障特征频率 f_{s1} 的组合频率: $f_{m1} - f_{s1}$ 和 $f_{m1} + 2f_{s1} - f_{s1}^{(r)}$.而图 5(f) 中主导频率分别为:电动机转频 f_d 和第一级行星齿轮箱太阳轮转频 $f_{s1}^{(r)}$.图 5(d) 和 (f) 中,虽然各主导频率与第一级行星齿轮箱太阳轮相关,但是其幅值相对较小,且在啮合频率 f_{m1} 附近不存在明显的调制边带.由于齿轮箱实际制造和装配过程中难免会存在一定的误差,导致上述主导频率成分的存在,故判定齿轮箱不存在故障,与实际情况相符.

3.2.2 太阳轮磨损

第一级行星齿轮箱太阳轮磨损故障信号的分析结果如图 6 所示.虽在其 Fourier 频谱如图 6(b) 中出



现了多个峰值,但同样无法判断齿轮箱的工作状态.其 STFT 分析结果如图 6 (c) 所示,其中虽然存在数条时频曲线,但受噪声及调制系数的影响较大.进一步运用 IG-STFT 分析得到如图 6 (d) 所示的时频图.可见其主导频率依次为第一级行星齿轮箱齿轮啮合频率 f_{m1} 、太阳轮转频 $f_{s1}^{(r)}$ 及故障特征频率 f_{s1} 的组合频率: $f_{m1} + 3f_{s1}$ 、 $f_{m1} + 2f_{s1} - f_{s1}^{(r)}$ 、 $f_{m1} - f_{s1}$ 和 $f_{m1} - 2f_{s1} - f_{s1}^{(r)}$.

$f_{s1}^{(r)}$. 以上频率成分均与第一级行星齿轮箱相关,且在第一级行星齿轮箱的啮合频率 f_{m1} 的两侧出现了与第一级行星齿轮箱太阳轮相关的调制边带,故认为第一级行星齿轮箱的太阳轮出现了故障,与实验设置条件相符.

3.2.3 太阳轮局部剥落

图 7 为第二级行星齿轮箱太阳轮局部剥落故障信

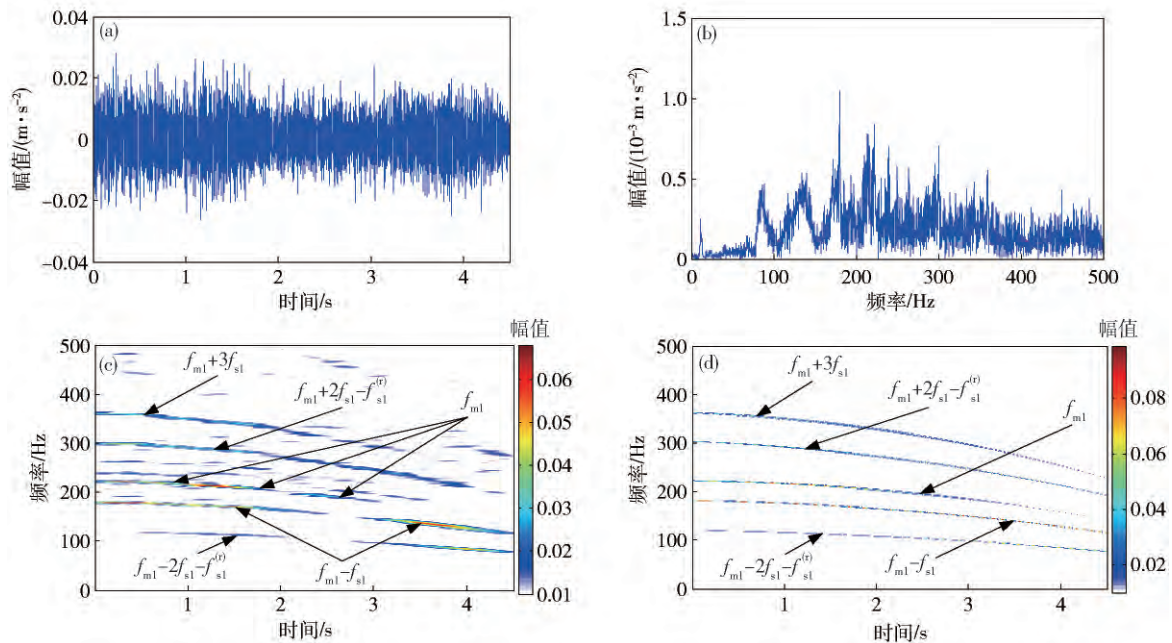


图 6 太阳轮磨损振动信号分析结果. (a) 时域波形; (b) Fourier 频谱; (c) STFT 时频分布; (d) IG-STFT 时频分布

Fig. 6 Analysis results of sun gear worm vibration signal: (a) time-domain waveform; (b) Fourier spectrum; (c) STFT spectrogram; (d) IG-STFT spectrogram

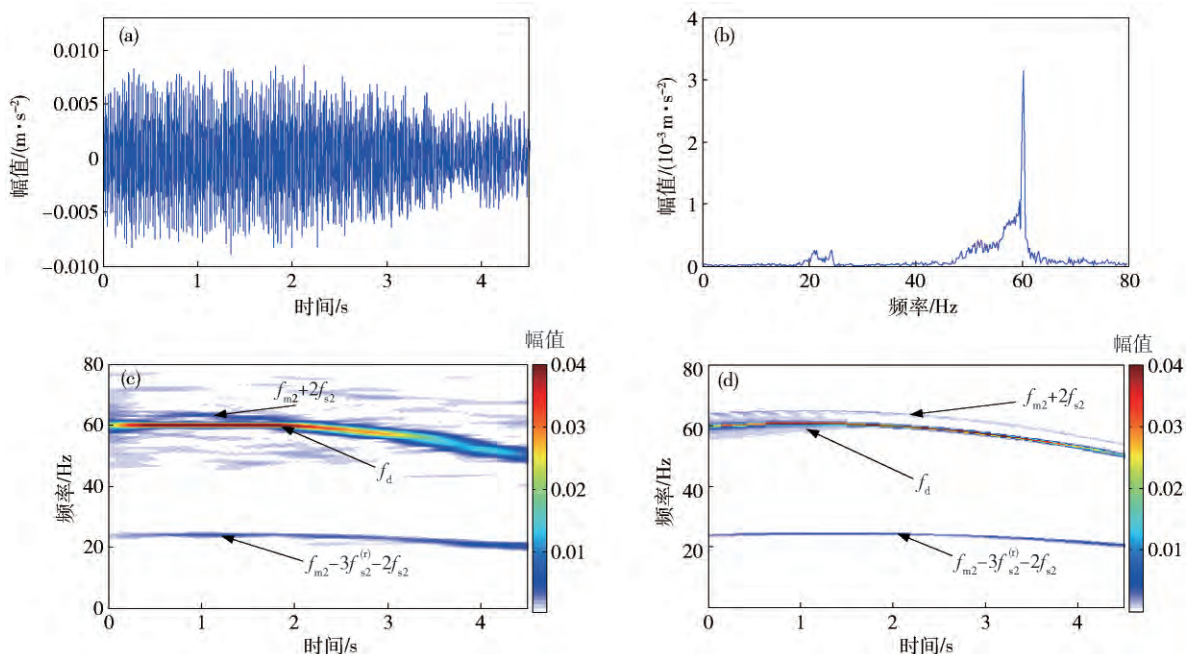


图 7 太阳轮剥落振动信号分析结果. (a) 时域波形; (b) Fourier 频谱; (c) STFT 时频分布; (d) IG-STFT 时频分布

Fig. 7 Analysis results of sun gear chipping vibration signal: (a) time-domain waveform; (b) Fourier spectrum; (c) STFT spectrogram; (d) IG-STFT spectrogram

号的分析结果. 在 Fourier 频谱如图 7(b) 中, 电动机转频的初始频率 60 Hz 处出现了明显的峰值, 但同样无法判断齿轮箱工作正常与否. STFT 和 IG-STFT 的分析结果如图 7(c) 和 (d) 所示. 可见时频图中的主导频率依次为第二级行星齿轮箱齿轮啮合频率 f_{m2} 、太阳轮故障特征频率 f_{s2} 及转频 $f_{s2}^{(i)}$ 的组合频率: $f_{m2} + 2f_{s2}$ 、 $f_{m2} - 3f_{s2}^{(i)} - 2f_{s2}$ 及电动机转频 f_d . 由于上述频率成分与第二级行星齿轮箱太阳轮相关, 故判定第二级行星齿轮箱太阳轮出现故障, 与实际情况相符.

4 结论

本文在充分发挥 STFT 和广义解调优势的基础上, 运用迭代广义解调对 STFT 进行了改造, 提出了迭代广义短时 Fourier 变换, 达到在分析非平稳信号的过程中得到能量聚集性很好的时频分布的目的. 最后, 运用迭代广义短时 Fourier 变换分析了行星齿轮箱太阳轮故障仿真信号及实验信号, 分析结果表明该方法可以准确刻画非平稳信号的时变特征和诊断齿轮故障, 验证了所提出方法的有效性.

参 考 文 献

- [1] Tian S S, Qian Z. Planetary gearbox fault feature enhancement based on combined adaptive filter method. *Adv Mech Eng*, 2015, 7(12): 1
- [2] Lei Y G, He Z J, Lin J, et al. Research advances of fault diagnosis technique for planetary gearboxes. *J Mech Eng*, 2011, 47(19): 59
(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. *机械工程学报*, 2011, 47(19): 59)
- [3] Feng Z P, Fan Y X, Liang M, et al. A nonstationary vibration signal analysis method for fault diagnosis of planetary gearboxes. *Proc CSEE*, 2013, 33(17): 105
(冯志鹏, 范寅夕, LIANG Ming, 等. 行星齿轮箱故障诊断的非平稳振动信号分析方法. *中国电机工程学报*, 2013, 33(17): 105)
- [4] Feng Z P, Qin S F, Liang M. Time-frequency analysis based on Vold-Kalman filter and higher order energy separation for fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under nonstationary conditions. *Renewable Energy*, 2016, 85: 45
- [5] Li C, Liang M. Time-frequency signal analysis for gearbox fault diagnosis using a generalized synchrosqueezing transform. *Mech Syst Signal Process*, 2012, 26: 205
- [6] Hlawatsch F, Boudreaux-Bartels G. Linear and quadratic time-frequency signal representations. *IEEE Signal Process Mag*, 1992, 9(2): 21
- [7] Cohen L. Time-frequency distributions: a review. *Proc IEEE*, 1989, 77(7): 941
- [8] Chen X W, Feng Z P, Liang M. Planetary gearbox fault diagnosis under time-variant conditions based on iterative generalized synchrosqueezing transform. *J Mech Eng*, 2015, 51(1): 131
(陈小旺, 冯志鹏, LIANG Ming. 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. *机械工程学报*, 2015, 51(1): 131)
- [9] Martin W, Flandrin P. Wigner-Ville spectral analysis of nonstationary processes. *IEEE Trans Acoust Speech Signal Process*, 1985, 33(6): 1461
- [10] Yu G, Zhou Y Q. General linear chirplet transform. *Mech Syst Signal Process*, 2016, 70: 958
- [11] Cheng J S, Yang Y, Yu D J. The envelope order spectrum based on generalized demodulation time-frequency analysis and its application to gear fault diagnosis. *Mech Syst Signal Process*, 2010, 24(2): 508
- [12] Li C, Liu Z X, Zhou F X, et al. Application of generalized demodulation in bearing fault diagnosis of inverter fed induction motors // *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation IEEE*. Shenyang, 2014: 2328
- [13] Wang Y, Xu G H, Luo A L, et al. An online tacholeless order tracking technique based on generalized demodulation for rolling bearing fault detection. *J Sound Vib*, 2016, 367: 233
- [14] Olhede S, Walden A T. A generalized demodulation approach to time-frequency projections for multicomponent signals. *Proc Math Phys Eng Sci*, 2005, 461(2059): 2159
- [15] Cheng J S, Yang Y, Yu D J. Application of the improved generalized demodulation time-frequency analysis method to multicomponent signal decomposition. *Signal Process*, 2009, 89(6): 1205