

文章编号:1006-1355(2017)02-0137-06

基于ASTFA和SDEO解调的行星齿轮箱故障诊断方法

程军圣, 杨兴凯, 李宝庆, 杨宇

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要:针对行星齿轮箱故障信号的调制特点,提出基于自适应最稀疏时频分析(Adaptive and Sparsest Time-Frequency Analysis, ASTFA)和对称差分能量算子(Symmetric Difference Energy Operator, SDEO)相结合的解调方法,用于提取故障信号的瞬时幅值和瞬时频率信息。采用ASTFA方法分解行星齿轮箱故障信号,得到若干个单分量信号,采用SDEO进行解调,得到各单分量信号的瞬时幅值和瞬时频率,并计算得到包络谱。采用该方法分析行星齿轮箱故障仿真信号和故障实际信号,结果表明,该方法能准确地提取故障特征,实现行星齿轮箱故障诊断。

关键词:振动与波;自适应最稀疏时频分析;对称差分能量算子;行星齿轮箱;故障诊断

中图分类号:TH113.1;TN911.7

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2017.02.028

A Method of Planetary Gearboxes Fault Diagnosis Based on ASTFA and SDEO Demodulation

CHENG Jun-sheng, YANG Xing-kai, LI Bao-qing, YANG Yu

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Bodies, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: According to the modulation characteristics of fault signals of planetary gearboxes, a demodulation method based on adaptive and sparsest time-frequency analysis (ASTFA) and symmetric difference energy operator (SDEO) is proposed to extract instantaneous amplitude and instantaneous frequency information of the fault signals. Firstly, the fault signals of the planetary gearboxes are decomposed into several mono-component signals by ASTFA method. Then, SDEO method is used to demodulate the mono-component signals. Consequently, the instantaneous amplitudes and the instantaneous frequencies of the mono-component signals can be obtained and the envelope spectra can be worked out. This method can be effectively applied to analyze simulative fault signals and actual fault signals of planetary gearboxes. The analysis results prove that the fault features can be extracted accurately and the faults of the planetary gearboxes can also be diagnosed by this method.

Key words: vibration and wave; adaptive and sparsest time-frequency analysis; symmetric difference energy operator; planetary gearbox; fault diagnosis

行星齿轮箱是风力发电机的重要组成部分,其运行工况恶劣,容易产生故障。一旦产生故障,会造

成严重的安全事故^[1],故诊断风机行星齿轮箱的故障具有重要意义。

故障特征提取是机械设备故障诊断过程中的关键步骤,与诊断的准确性密切相关。传统的故障特征提取方法难以得到信号在时频域中的分布情况。经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法^[2]能够自适应地把信号分解为多个内禀模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)之和,但存在着模态混淆、端点效应等问题^[3-5]。受EMD方法和压缩感知理论的启发,THOMAS Y. HOU等提出自适应最稀疏时频分析(Adaptive and Sparsest Time-Frequency Analysis, ASTFA)方法^[6-7]。该方法把信

收稿日期:2016-08-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375152);

智能型新能源汽车国家2011协同创新中心、湖南省绿色汽车2011协同创新中心资助项目

作者简介:程军圣(1968—),男,湖南省永州市人,博士,教授,主要研究方向为机械设备状态监测与故障诊断、动态信号分析与处理。

E-mail:signalp@tom.com

通信作者:杨兴凯,男,硕士研究生。

E-mail: xkyang1992@163.com

号的分解问题转化为求解最优化问题,从而对信号进行自适应分解。

行星齿轮箱故障信号是具有调幅调频特性的非线性信号^[8-9],可以从信号的调幅部分提取故障信息,而这需要采用解调方法对故障信号进行解调。传统能量算子对非线性信号的解调效果较差^[10],文献[11]提出SDEO方法,能够提高解调精度。文献[12]采用SDEO方法对滚动轴承故障信号进行解调,得到了准确的解调结果。然而,SDEO只适用于处理单分量调制信号^[13],而行星齿轮箱故障信号是多分量信号,故应先把故障信号分解成若干个单分量调制信号,然后再进行解调。

文中将ASTFA方法和SDEO相结合,用于行星齿轮箱故障诊断。首先,采用ASTFA方法分解故障信号,得到若干个单分量信号;然后,利用SDEO进行解调,得到各分量的瞬时幅值和瞬时频率;最后,求解包络谱,提取故障信息,对故障进行诊断。

1 基于ASTFA和SDEO的解调方法

1.1 ASTFA方法

ASTFA方法在由所有内禀模态函数组成的过完备字典库中搜寻信号的最稀疏表示形式,把信号分解问题转化为求解非线性最优化问题。

(1) 过完备字典库D

$$D = \{a(t)\cos(\theta(t)): \theta'(t) \geq 0, a(t) \in V(\theta)\} \quad (1)$$

$$V(\theta) = \text{Span} \left\{ \cos\left(\frac{k\theta}{n}\right) \sin\left(\frac{l\theta}{n}\right) : k = 0, \dots, \lambda n; l = 1, \dots, \lambda n \right\} \quad (2)$$

(2) 非线性最优化问题

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } N \\ & \text{Subject to: } f(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t)\cos\theta_i(t), a_i(t)\cos\theta_i(t) \in D \end{aligned} \quad (3)$$

上述优化问题是一个 L_0 优化问题,该问题本身是NP-Hard问题。ASTFA方法将上述 L_0 优化问题转化为 L_2 优化问题,并采用Gauss-Newton迭代方法解决该问题,这使得ASTFA方法对初始相位函数 $\theta^0(t)$ 的选择非常敏感,若相位初值选择不当,会出现迭代不收敛或者分解结果不正确等情况^[7]。

由文献[14]可知,ASTFA方法的分解顺序由 $\theta^0(t)$ 确定,即若选取一个特定的数值作为 $\theta^0(t)$ 的值,采用该值作为ASTFA方法的初始相位值,则可以优先分解得到该 $\theta^0(t)$ 对应的信号分量。为了验证该特性,进行仿真分析。仿真信号见式(4),波形见图1,采样频率 $f_s = 4096 \text{ Hz}$,采样时间 $t \in [0, 1]$,两个分量的波形见图2。

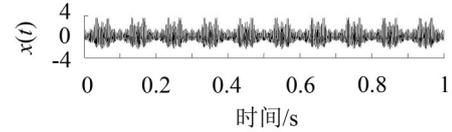


图1 仿真信号的时域波形

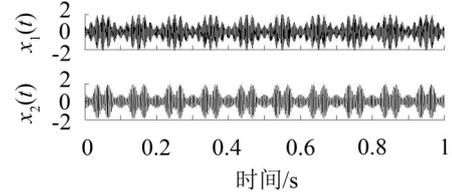


图2 仿真信号两个分量的时域波形

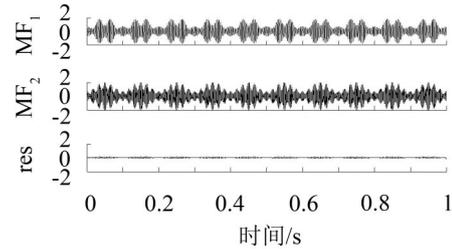


图3 仿真信号ASTFA分解结果一($\theta^0(t) = 500\pi t$)

按照分量被分解出来的顺序绘图,若 $\theta^0(t) = 500\pi t$,结果见图3,若 $\theta^0(t) = 1000\pi t$,结果见图4。

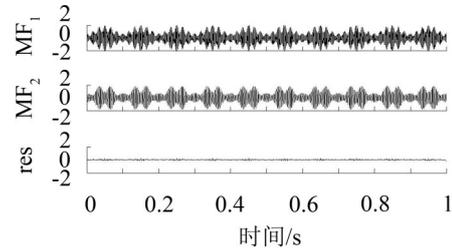


图4 仿真信号ASTFA分解结果二($\theta^0(t) = 1000\pi t$)

比较图3、图4,可知ASTFA方法的分解顺序确实由初始相位函数决定。

$$\begin{cases} x(t) = x_1(t) + x_2(t) \\ x_1(t) = (1 - 0.5 \cos(20\pi t))(1 + 0.5 \cos(60\pi t)) \times \cos(500\pi t + 0.5 \sin(60\pi t)) \\ x_2(t) = (1 - 0.5 \cos(20\pi t))(1 + 0.5 \cos(120\pi t)) \times \cos(1000\pi t + 0.5 \sin(120\pi t)) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 基于ASTFA和SDEO的解调方法实施步骤

将ASTFA方法和SDEO相结合,用于处理故障信号,主要步骤如下:

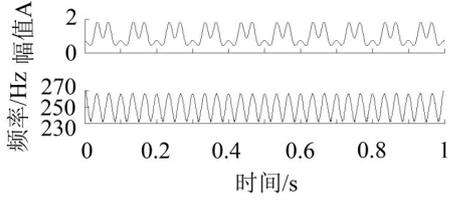
(1) 采用ASTFA方法将多分量故障信号分解为若干个单分量信号;

(2) 采用SDEO对单分量信号进行解调,得到瞬时幅值和瞬时频率;

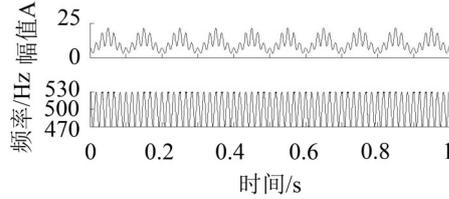
(3) 对各单分量信号的瞬时幅值进行傅里叶变换,得到包络谱,提取故障信息,进行故障诊断。

1.3 仿真分析

仿真信号见式(4),两个分量信号的瞬时幅值和瞬时频率见图5。



(a) 仿真信号分量 $x_1(t)$ 的瞬时幅值和瞬时频率



(b) 仿真信号分量 $x_2(t)$ 的瞬时幅值和瞬时频率

图5 仿真信号两个分量的瞬时幅值和瞬时频率

用EMD方法对仿真信号进行分解,结果见图6,用SDEO对 IMF_1 、 IMF_2 进行解调,得到瞬时幅值和瞬时频率,结果见图7。用ASTFA方法分解仿真信号,采用图4所示的分解结果。用SDEO对两个分量进行解调,得到瞬时幅值和瞬时频率,结果见图8。

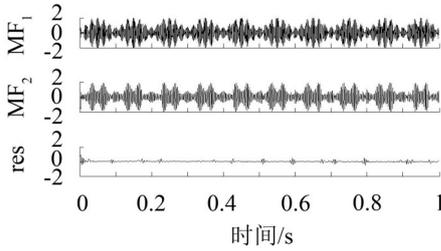
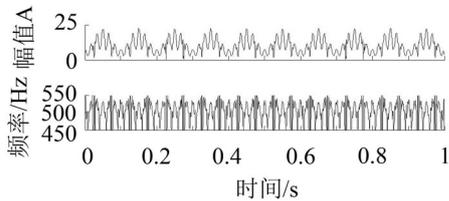
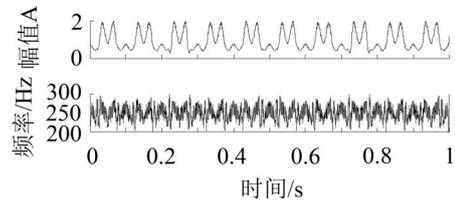


图6 仿真信号EMD分解结果

对比图7和图8可知,采用EMD方法和SDEO

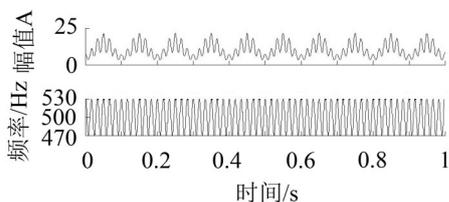


(a) EMD分解所得 IMF_1 分量的瞬时幅值和瞬时频率

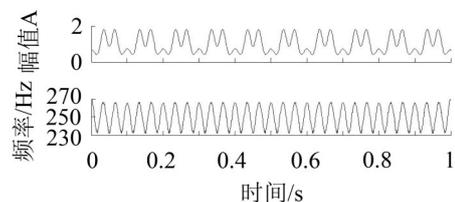


(b) EMD分解所得 IMF_2 分量的瞬时幅值和瞬时频率

图7 EMD分解所得分量经SDEO解调后的瞬时幅值和瞬时频率



(a) ASTFA分解所得 IMF_1 分量的瞬时幅值和瞬时频率



(b) ASTFA分解所得 IMF_2 分量的瞬时幅值和瞬时频率

图8 ASTFA分解所得分量经SDEO解调后的瞬时幅值和瞬时频率

解调所得的瞬时幅值波形部分失真,瞬时频率波形波动很大。但采用基于ASTFA和SDEO解调方法所得的瞬时幅值和瞬时频率波形曲线很光滑,与理论值基本一致。这表明,采用基于ASTFA和SDEO方法的解调效果更为优越。

2 行星齿轮箱故障仿真分析

2.1 故障信号模型

太阳轮是行星齿轮箱的关键组成部件,一旦发生局部故障,会导致风机失效。文中建立行星齿轮箱太阳轮发生局部故障的测试信号模型,用于故障仿真分析。

根据文献[8]、[9]可知,传感器测试所得的太阳轮局部故障振动信号模型可以表示为

$$x(t) = h(t) \sum_{k=0}^{\infty} a_k(t) \cos(2\pi k f_m t + b_k(t) + \varphi_k) \quad (5)$$

式中 $h(t)$ 描述额外的调幅效应, $a_k(t)$ 和 $b_k(t)$ 分别为调幅、调频函数, f_m 是啮合频率, φ_k 为初始相位。额外的调幅效应、调幅、调频函数可以表示如下

$$a_k(t) = K \sum_{n=0}^{\infty} A_{kn} \cos(2\pi n f_s t + \Phi_{kn}) \quad (6)$$

$$b_k(t) = \sum_{l=0}^{\infty} B_{kl} \sin(2\pi l f_s t + \Psi_{kl}) \quad (7)$$

$$h(t) = [1 - \eta \cos(2\pi f_{sr} t)] \quad (8)$$

式中 A_{kn} 、 B_{kl} 分别表示调幅、调频强度系数, K 是常数因子(一般取 $K=1$), f_s 是太阳轮局部故障特征频率, Φ_{kn} 、 Ψ_{kl} 均为初始相位, f_{sr} 是太阳轮绝对旋转频率, η 是权值系数。

2.2 故障仿真分析

根据式(5)产生故障仿真信号。不失一般性,忽

略初始相位,考虑基频和二倍频,采样频率为 $f_s = 4096 \text{ Hz}$,采样时间 $t \in [0, 1]$ 。为了模拟噪声的干扰作用,加入信噪比 $\text{SNR} = 2 \text{ dB}$ 的高斯白噪声 $N(t)$,则故障仿真信号表达式见式(9),其时域波形见图9。利用ASTFA方法分解 $X(t)$,分解结果见图10。采用SDEO对 IMF_1 、 IMF_2 进行解调,并求两者的包络谱,如图11所示。

$$\begin{cases} X(t) = x_1(t) + x_2(t) + N(t) \\ x_1(t) = \left[1 - \frac{1}{2}\eta \cos(2\pi f_{sr}t)\right] \left[1 + A \cos(2\pi f_s t)\right] \cos(2\pi f_m t + B \sin(2\pi f_s t)) \\ x_2(t) = \left[1 - \frac{1}{2}\eta \cos(2\pi f_{sr}t)\right] \left[1 + A \cos(2\pi \times 2f_s t)\right] \cos(2\pi \times 2f_m t + B \sin(2\pi \times 2f_s t)) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中各参数取值见表1。

表1 行星轮故障仿真信号表达式中的参数

权值系数 η	调幅部分幅值 A	调频部分幅值 B	啮合频率 f_m	太阳轮绝对旋转频率 f_{sr}	太阳轮局部故障特征频率 f_s
0.5	0.5	0.5	250	10	30

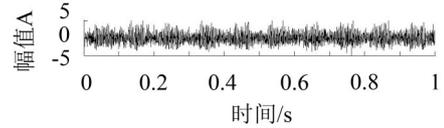


图9 行星齿轮箱故障仿真信号时域波形

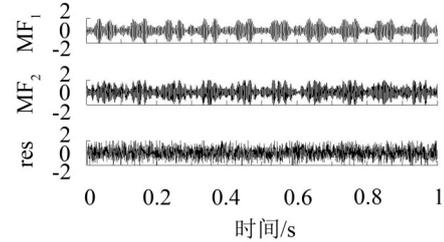
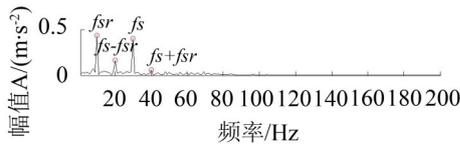
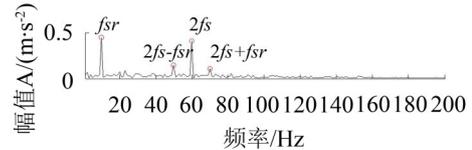


图10 行星齿轮箱故障仿真信号ASTFA分解结果

从图11可知, IMF_1 包络谱中存在谱线 f_s (30 Hz),是太阳轮局部故障特征频率。 IMF_2 包络谱中



(a) 故障仿真信号经ASTFA分解所得 IMF_1 分量的包络谱



(b) 故障仿真信号经ASTFA分解所得 IMF_2 分量的包络谱

图11 故障仿真信号经ASTFA分解所得两个分量的包络谱

存在谱线 $2f_s$ (60 Hz),是太阳轮局部故障特征频率的二倍频。表明基于ASTFA和SDEO的解调方法能准确提取太阳轮局部故障特征频率。

3 实际应用

图12(a)是国内某公司制造的风机单级行星齿轮箱的结构示意图,1为太阳轮,2为行星轮,3为外齿圈,H是行星架,外齿圈固定,各齿轮齿数见表2。

表2 风力发电机行星齿轮箱结构参数

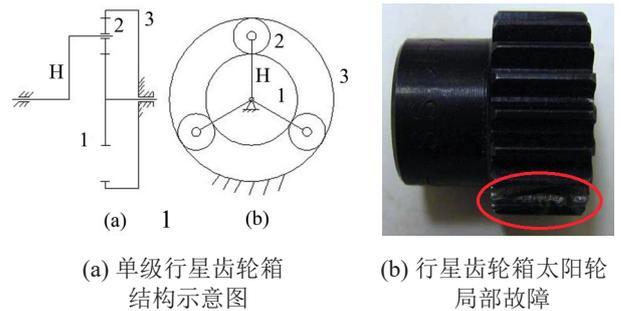
齿轮	太阳轮	外齿圈	行星轮(个数)
齿数	21	102	40(3)

行星架采用动力输入,太阳轮采用动力输出。行星架转速 $n_H = 15 \text{ r/min}$,故转频 $f_c = 0.25 \text{ Hz}$ 。各齿轮的特征频率计算结果见表3。

表3 行星齿轮箱特征频率/Hz

啮合频率	绝对旋转频率		局部故障特征频率		
	太阳轮	行星架	太阳轮	行星轮	外齿圈
25.5	1.465	0.25	3.645	0.6375	0.75

在一次维修中,发现太阳轮的一个轮齿发生了



(a) 单级行星齿轮箱结构示意图 (b) 行星齿轮箱太阳轮局部故障

图12 行星齿轮箱结构及故障

齿面剥落,表明太阳轮产生了局部故障,如图12(b)所示。对图13所示的实际振动加速度信号进行分析,采样频率 $f_s = 256 \text{ Hz}$,采样点数 $N = 2048$ 。

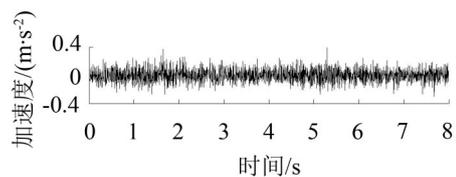


图13 行星齿轮箱振动加速度信号时域波形

采用ASTFA方法对实际信号进行分解。由1.1

节可知,采用特定的初始相位值 $\theta^0(t)$ 可以分解得到与其对应的信号分量。由表3可知,该行星齿轮箱啮合频率理论值为 $f_m=25.5\text{ Hz}$,行星架转频为 $f_c=0.25\text{ Hz}$ 。因此,结合式(5)表示的故障模型可知,把啮合频率的理论计算值作为ASTFA方法的初始相位函数值,即 $\theta^0(t)=2\pi\times 25.5t$,得到的分量 IMF_1 理论上对应太阳轮局部故障信号。同理,采用 $\theta^0(t)=2\pi\times 0.25t$,得到的分量 IMF_2 理论上对应输入轴转频信号。图14为 IMF_1 和 IMF_2 的波形图。

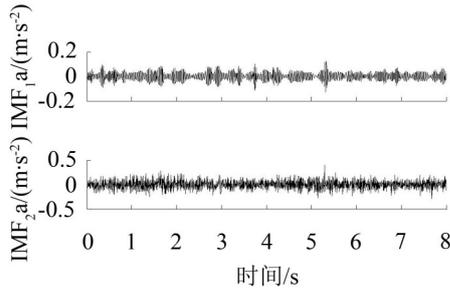


图14 行星齿轮箱振动加速度信号ASTFA分解结果

采用SDEO进行解调,并计算其包络谱,结果如图15所示。

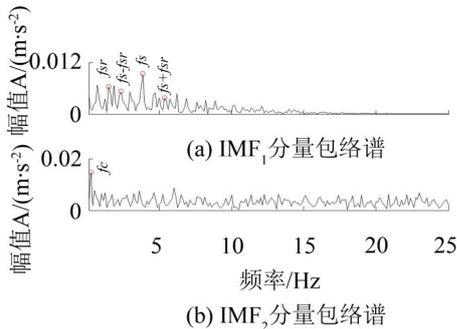


图15 行星齿轮箱振动加速度信号经ASTFA分解所得分量的包络谱

为了进行对比,采用EMD方法分解实际振动加速度信号,分解结果如图16所示。

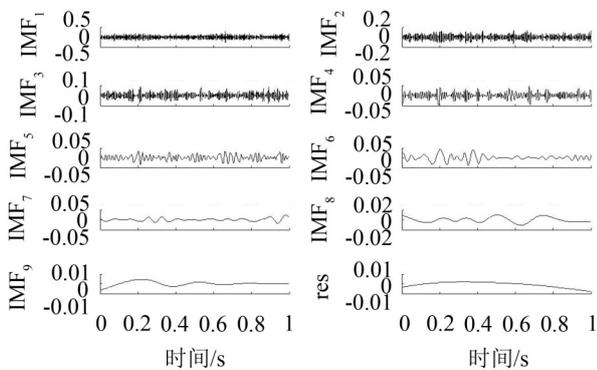


图16 行星齿轮箱振动加速度信号经EMD分解结果

由于分量 IMF_1 、 IMF_2 、 IMF_3 和 IMF_4 包含的故障信息丰富,故选取这四个分量进行分析,采用SDEO进行解调并求解其包络谱,结果见图17。

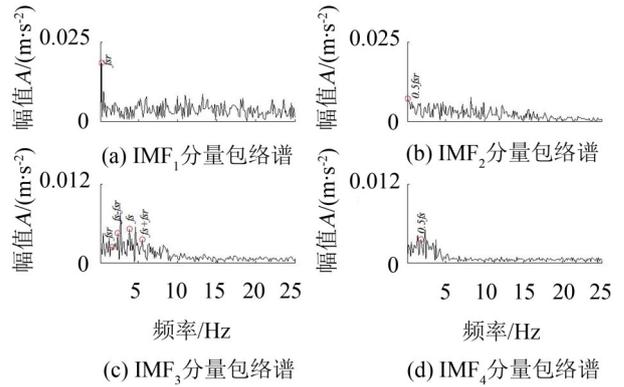


图17 行星齿轮箱振动加速度信号经EMD分解所得前四个分量的包络谱

对图15进行分析,可以得出的结论为:

(1) IMF_1 分量的包络谱中存在频率为 f_s (数值约为 3.645 Hz)的谱线,表明ASTFA方法分解所得的 IMF_1 确实为太阳轮局部故障信号。 IMF_2 分量的包络谱中存在频率为 f_c (数值约为 0.25 Hz)的谱线,表明 IMF_2 确实为输入轴转频信号。表明利用ASTFA方法的分解顺序特性,可以有效地分解出实际故障信号中特定的信号分量。

(2) IMF_1 分量的包络谱中存在频率为 f_s (数值约为 3.645 Hz)的谱线,可以诊断出行星齿轮箱太阳轮确实发生了局部故障,与实际情况一致。表明基于ASTFA和SDEO的解调方法能够有效地处理实际故障信号,得到准确的诊断结果。

图17(c)中频率为 f_s (数值为 3.875 Hz)的谱线幅值明显小于图15(a)中频率为 f_s (数值约为 3.645 Hz)的谱线,且图17(c)中频率 f_s 与表3中太阳轮局部故障频率理论值的误差更大,这表明基于ASTFA和SDEO的解调方法对行星齿轮箱实际故障的诊断效果优于EMD和SDEO方法。

4 结语

(1) 提出了基于ASTFA和SDEO的解调方法,并与EMD和SDEO方法进行对比,仿真信号和实际信号处理结果表明,基于ASTFA和SDEO的解调方法效果更优。

(2) 采用基于ASTFA和SDEO的解调方法对风机行星齿轮箱太阳轮局部故障仿真信号进行分析,分析结果表明,该方法能准确提取故障特征频率。

(3) 采用基于ASTFA和SDEO的解调方法对风机行星齿轮箱太阳轮局部故障实际信号进行处理,处理结果表明,该方法能够提取实际故障信号的特征频率,得到准确的诊断结果。

