

基于 HWPT-ZFFT 的二维全息谱计算方法*

李纪永¹, 李舜酩¹, 陈晓红², 王勇¹

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院 南京, 210016) (2. 南京航空航天大学理学院 南京, 210016)

摘要 精确的频率、相位和幅值识别是进行全息谱计算的必备条件, 针对含 3 个及以上的密集频谱成分, 提出一种基于谐波小波包变换的频谱细化方法(harmonic wavelet packets transform-zoom fast Fourier transform, 简称 HWPT-ZFFT), 较传统的复调制细化傅里叶变换所利用的低通及带通滤波器相比, 其盒型频谱特性可将感兴趣频段的信号正交, 无冗余、无泄漏地提取出, 提高了识别精度。首先, 利用谐波小波包对密集频谱成分进行滤波; 然后, 频移进而重采样, 进行傅里叶变换得到细化的频率、幅值及相位; 最后, 计算密集频率下二维全息谱, 进行双盘转子全息谱计算, 考虑高次分倍频, 得到更丰富的故障特征。仿真及双盘转子实验结果表明所提出方法的有效性。

关键词 谐波小波包; 密集频谱; 频谱细化; 全息谱
中图分类号 V233.1; TH132

引言

传统的谱分析应用在旋转机械故障诊断有两个缺陷:a. 相位与振幅分离, 甚至忽略相位信息;b. 转子截面两向振动信号关系未能体现出来。从轴心轨迹的形状、稳定性和旋转方向等方面进行分析, 得到比较全面的机组运行状态信息, 发展了基于信息融合的全谱、全息谱和全矢谱技术^[1]。二维全息谱将转子在一个截面的水平和垂直的振动幅值与相位绘制谱图, 反映了转子在一个支承面的振动情况^[2-3], 在实践中得到广泛应用并积累了许多特征谱图^[4-5]。

由于全息谱技术是建立在傅里叶变换基础之上, 精确的频率、幅值与相位是全息谱计算的关键, 经典的全息谱方法利用比值内插法校正频率, 但难以区分密集频谱成分。密集频谱成分细化与校正方法可分为两类:a. 包含两个密集频率成分信号的频谱细化方法;b. 包含 3 个及以上密集频率成分信号的频谱细化方法。含 3 个及以上的密集频率成分细化思路有: 进行频移、滤波和重采样提高频率分辨率; 在窗长度不变的情况下进行局部细化; 拓展号序列空间, 增加数据长度等^[6]。文献[7]提出复解析带通滤波器的复调制细化选带方法, 采用复解析带通滤波器滤波, 具有速度快精度高特点。文献[8]利用基于小波变换的频谱细化方法细化密集频谱成分, 即在进行细化处理之前利用组合的高斯小波进行滤

波, 在组合高斯小波边缘依然不光滑, 并指出盒型频谱其滤波性能好^[9]。

笔者提出 HWPT-ZFFT 方法, 首先, 利用谐波小波包进行滤波^[10-11], 其盒型频谱特性可将信号正交、无冗余和无遗漏的分解在相应的频带上^[12-13]; 然后, 细化密集频谱成分, 得到修正的频率、幅值和相位; 最后, 进行二维全息谱分析。由于考虑了密集频谱成分, 所以体现出丰富的故障特征。

1 改进的二维全息谱

二维全息谱具体实现过程如下:a. 将一个支承截面上的 x, y 两方向的振动信号进行快速傅里叶变换得到频率幅值相位;b. 将变换之后的幅值与相位以阶次为单位进行融合, 根据幅值和相位信息计算出每个阶次处的离心率、长轴和短轴等椭圆信息。传统的全息谱高频只包含整数倍频成分。在实际故障信号中不可忽略高次谐频, 笔者将幅值明显的谐倍频率考虑进去, 进行全息谱计算。

含 n 个阶次频率的两路互相垂直信号为

$$x = \sum_{i=1}^n X_i \cos(2\pi\omega_i t + \varphi_{xi}) \quad (1a)$$

$$y = \sum_{i=1}^n Y_i \cos(2\pi\omega_i t + \varphi_{yi}) \quad (1b)$$

其中: ω 为频率; X 与 Y 为信号幅值; φ_x 与 φ_y 为相位。不失一般性, 令 $n=1$, 展开可得

* 机械结构强度与振动国家重点实验室开放课题资助项目(SV2015-KF-01); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(NZ2015103)

收稿日期: 2014-01-15; 修回日期: 2014-03-03

$$\begin{cases} X_c = X \cos(\varphi_x) \\ X_s = X \sin(\varphi_x) \\ Y_c = Y \cos(\varphi_y) \\ Y_s = Y \sin(\varphi_y) \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)展开, 消去 t , 得到全息谱方程为

$$\frac{(Y_c^2 + Y_s^2)x^2 + (X_c^2 + X_s^2)y^2 - 2(X_c Y_c + X_s Y_s)xy}{(X_s Y_c - X_c Y_s)^2} = 1 \quad (3)$$

式(3)为阶次频率对应的椭圆轨迹方程, 示意图如图 1 所示。

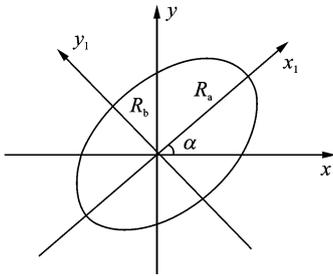


图 1 二维全息谱示意图

Fig. 1 The sketch of 2-D holospectrum

根据几何关系, 其椭圆长半轴 R_a 、短半轴 R_b 、长半轴与 x 轴倾角 α 及转子中心沿椭圆轨迹运动的相位角为 φ_α 。

$$\left. \begin{aligned} R_{a,b} &= \left\{ \frac{1}{2}(X_c^2 + X_s^2 + Y_c^2 + Y_s^2) \pm \sqrt{\frac{1}{4}[(X_c^2 + X_s^2) - (Y_c^2 + Y_s^2)]^2 + (X_c Y_c + X_s Y_s)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \tan 2\alpha &= \frac{2(X_c Y_c + X_s Y_s)}{(X_c^2 + X_s^2) - (Y_c^2 + Y_s^2)} \\ \tan \varphi_\alpha &= \frac{X_s + Y_c}{X_c - Y_s} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由以上分析可知, 构成全息谱的 3 个参量为阶次频率、相位及其幅值。精确的阶次频率, 相位及幅值是构成准确全息谱的必要条件, 笔者利用谐波小波包分解信号, 然后利用密集频谱法对信号频谱、相位及幅度进行校正。

2 基于谐波小波包频谱细化方法

谐波小波具有零相移滤波器, 可以锁定相位且谐波小波变换在不同尺度下数据点数不变, 可精确进行频域定位。谐波小波与小波类似, 其频谱带宽以二进的方式扩大, 不能够任意选择频段, 而谐波小波包则可将信号分解到相互独立的任意频段上且各频段分辨率一致, 如图 2 所示。

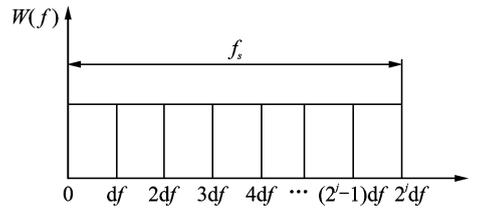


图 2 谐波小波变换后频率分布示意图

Fig. 2 Signal HWPT frequency distribution

分析频带带宽为 $(n - m)2\pi$, 分析时间中心在 $t = k / (n - m)$ 处的谐波小波的一般形式为

$$\psi_{m,n}(t - \frac{k}{n - m}) = \frac{e^{in2\pi(t - \frac{k}{n - m})} - e^{im2\pi(t - \frac{k}{n - m})}}{i2\pi(n - m)(t - \frac{k}{n - m})} \quad (5)$$

频域形式为

$$W_{m,n}[(n - m)\omega] = \begin{cases} \frac{1}{(n - m)2\pi} & (2\pi m \leq \omega \leq 2\pi n) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

信号 $f(t)$ 的谐波小波变换为

$$W_f(m, n, k) = (n - m) \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi}_{m,n}(t - \frac{k}{n - m}) dt \quad (7)$$

其中: $\overline{\Psi}$ 为 ψ 的复数表达形式, 做傅里叶变换可得

$$W(m, n, \omega) = f(\omega) \overline{\Psi}_{m,n}[(n - m)\omega] \quad (8)$$

式(7)与式(8)为信号 $f(t)$ 谐波小波变换(harmonic wavelet packets transform, 简称 HWPT)后时域及频域表达式。

设 $s(t)$ 为谐波小波包分解后某一频段信号, 进行平移、重采样后再做傅里叶变换, 即可得到细化频率, 其基本流程如下。

- 1) 滤波: 按实际选取频段频率区间为 $[f_l, f_h]$, 则其中心频率可表示为 $f_0 = (f_l + f_h) / 2$ 。
- 2) 频移: 将 $s(t)$ 移至频率轴原点, 即 $\bar{s}(t) = s(t)e^{-i2\pi f_0 t / f_s}$ 。

3) 重采样: 令 $\overline{dt} = D \times dt$, D 为细化倍数, dt 为原信号时间间隔, \overline{dt} 为重采样时间间隔。

4) 傅里叶变换: 其变换点数不变, 频率间隔变为 $\overline{d\omega} = d\omega / D$, 即得到细化了 D 倍后的频段。

其思路与复调制细化傅里叶变换及基于传统小波变换频谱细化方法一致, 不同之处在于笔者采用谐波小波包进行滤波, 根据需要设置分解层数。鉴于信号噪声往往存在于高频段, 选取低频段则降低了噪声对细化的影响。

3 仿真信号频谱细化

构造仿真信号中信号采样频率为 $f_s = 1\ 024$; 傅

里叶变换点数为 1 024, 信号长度点数为 20 480。

$$f(t) = \cos(63.774 3t + 0.523 6) + \cos(64.406t + 0.698 1) + \cos(66.915 9t + 1.047 2) + \cos(125.663 7t + 0.733) + \cos(251.327 4t) + n(t) \quad (9)$$

其中: $n(t)$ 为噪声; 信噪比为 3.9。

仿真时间历程与傅里叶变换如图 3 所示。由于傅里叶变换时分辨率为 1 Hz, 密集频谱成分并未显示出。

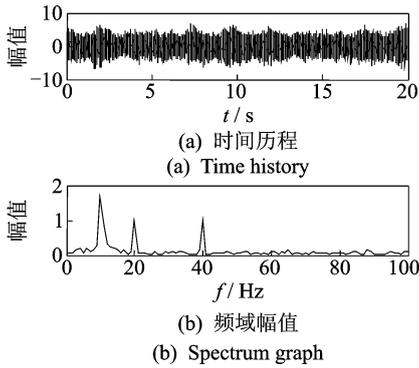


图 3 仿真时间历程与频域幅值

Fig. 3 Simulation signal time history and spectrum graph

利用线性调频 Z 变换(chirp Z transform, 简称 CZT)细化, 结果如图 4(a) 所示。复调制 ZFFT 细化, 分别利用低通及带通滤波, 结果如图 4(b) 及图 4(c) 所示。谐波小波包滤波变换后(分解层数为 4, 频段间隔为 32 Hz)细化结果如图 4(d) 所示。可以看出, 带通滤波时出现虚假频率成分, 这是由于滤波器设计不当造成频谱泄漏, 从而造成细化频谱失真。比较去噪效果可知, HWPT 去噪效果优于带通及低通滤波, 而 CZT 方法由于未涉及滤波, 故无去噪效果。表 1 为细化后的频率、幅值及相位。结合图 4 可知, 谐波小波包校准精度最高, 这说明了谐波小波包滤波及细化的有效性及优越性。

表 1 频率、幅值及相位细化结果

Tab. 1 Detail zoom results of frequency, amplitude and phase

项目	f/Hz	幅值	相位/ $^\circ$
原信号	10.150	1.000	30.000
	10.250	1.000	40.000
	10.650	1.000	60.000
低通滤波	10.150	0.977	29.728
	10.250	0.996	39.141
	10.650	1.101	60.244
CZT	10.140	1.050	56.709
	10.250	1.040	25.431
	10.650	0.995	48.797
HWPT	10.150	0.980	29.728
	10.250	0.998	39.214
	10.650	1.102	60.062

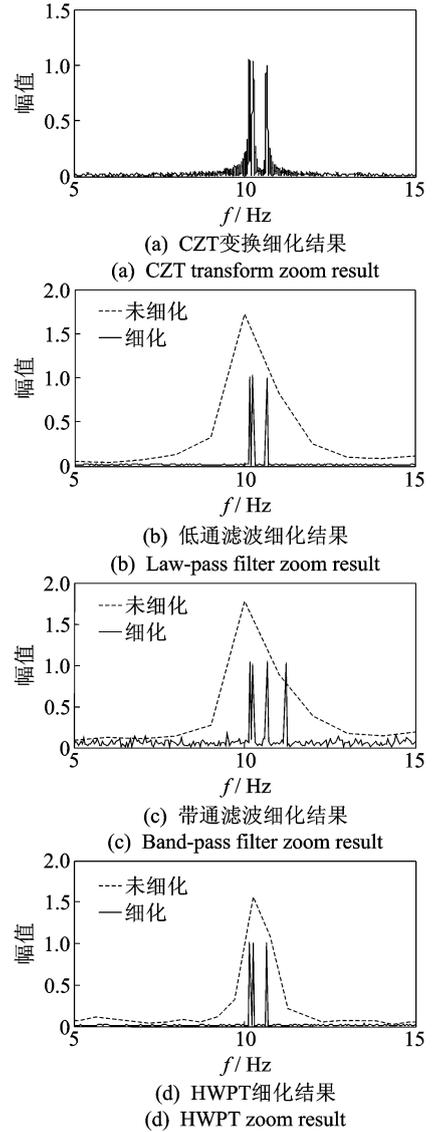


图 4 细化结果

Fig. 4 Zoom results

4 实验分析

图 5 为双盘转子实验装置示意图。采用柔性联轴器连接, 利用涡流传感器采集位移信号。其涡流传感器水平方向与 x 轴夹角为 0 , 如图 6 所示, 并按观察传感器方向观察轴心轨迹。

双跨转子含碰摩及不对中故障, 信号采样频率为 2 048 Hz, 点数为 32 768。对其进行傅里叶变换,

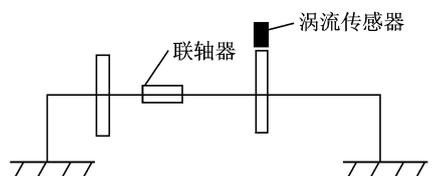


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Experimental device schematic diagram

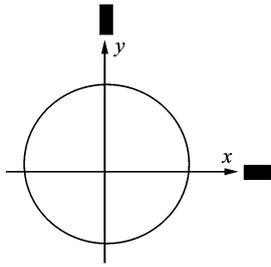


图 6 涡流传感器安装示意图

Fig. 6 Eddy current sensor installation schematic diagram

结果如图 7 所示,傅里叶变换点数为 2 048,密集频率成分没有计算出来,采用 HWPT-ZFFT 算法,分解层数设为 4,细化倍数设为 30。对 x 方向基频及二倍频细化结果如图 8 所示。细化的具体频率、幅值与相位如表 2 所示。 y 方向细化后的频率、幅值与相位如表 3 所示。利用传统的二维全息谱方法计算,得到倍频及低次分倍频成分下的二维全息谱如图 9 所示。椭圆具体参数如表 4 所示。椭圆轨迹主要在基频及二倍频成分上呈现出复合故障,旋向不一致表明了不对称故障。

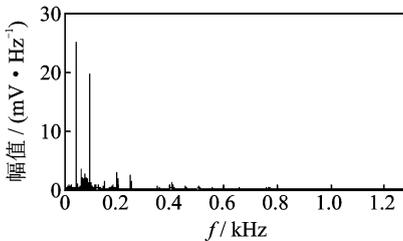
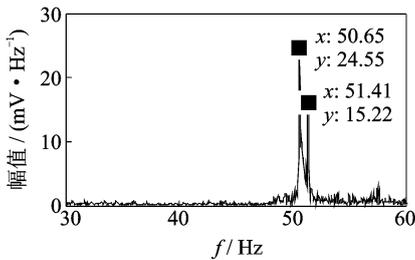


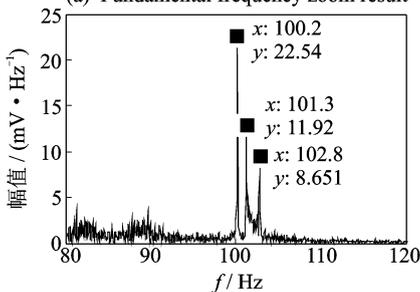
图 7 故障信号频谱

Fig. 7 Fault signal spectrum



(a) 基频细化结果

(a) Fundamental frequency zoom result



(b) 二倍频细化结果

(b) Quadratic component zoom result

图 8 细化频率

Fig. 8 Zoom frequency

表 2 x 方向的频率、幅值与相位

Tab. 2 x direction signal frequency, amplitude and phase

f/Hz	幅值/ $(\text{mV} \cdot \text{Hz}^{-1})$	相位/ $(^\circ)$
50.650	24.550	10.530
51.410	15.220	152.900
100.200	22.540	-110.854
101.300	11.920	-149.597
102.900	8.651	13.798

表 3 y 方向的频率、幅值与相位

Tab. 3 y direction signal frequency, amplitude and phase

f/Hz	幅值/ $(\text{mV} \cdot \text{Hz}^{-1})$	相位/ $(^\circ)$
50.65	41.840	170.131
51.41	30.100	48.772
100.2	3.998	64.818
101.3	14.51	-16.044 5
102.9	8.943	-125.394 1

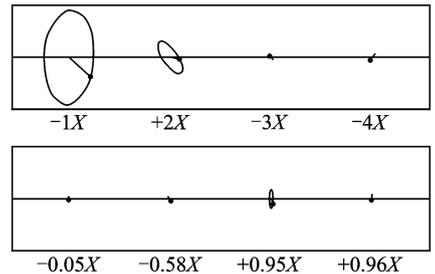


图 9 倍频及低次分倍频二维全息谱图

Fig. 9 Traditional holospectrum graph

表 4 传统全息谱信息

Tab. 4 Traditional holospectrum information

阶次	长轴	短轴	无量纲 比值	离心率	长轴 倾角	旋转 方向
1	-19.070	33.950	-68.470	0.857	86.400	负向
2	-12.930	14.870	25.620	0.927	124.800	正向
3	1.180	-1.650	0.810	0.888	121.400	负向
4	0.860	1.950	0.630	0.997	49.600	负向
0.05	-0.530	-0.290	3.120	0.990	96.400	负向
0.58	-1.150	1.230	0.190	0.954	114.500	负向
0.95	1.110	2.740	13.250	0.983	92.100	正向
0.98	1.020	-0.770	-6.130	0.987	97.100	正向

高次分倍频二维全息谱如图 10 所示,包括 1.015 次倍频,1.98 次倍频,2.03 次倍频。椭圆轨迹参数如表 5 所示。1.98 次倍频的椭圆轨迹扁平,表示发生碰摩故障。高次分倍频全息谱的计算丰富了故障信息,综合倍频、低次分倍频及高次分倍频的结果可知转子发生了碰摩及不对中故障。

5 结 论

1) 利用谐波小波包将信号正交,无冗余地分解

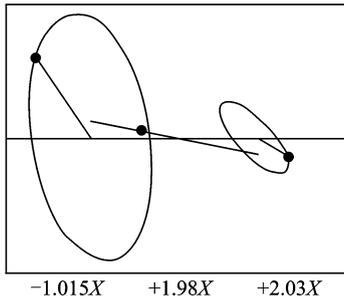


图10 高次分倍频二维全息谱

Fig.10 High order fractional frequency holospectrum graph

表5 高次分倍频全息谱信息

Tab.5 Holospectrum information of high order fractional frequency

阶次	长轴	短轴	无量纲 比值	离心率	长轴 倾角	旋转 方向
1.015	3.472	-6.771	11.320	0.877	99.200	负向
1.98	-9.471	-3.712	1.810	0.987	169.200	正向
2.03	0.970	3.961	-3.650	0.929	131.500	正向

在所需频段上,其对噪声抑制性能优于带通及低通滤波。

2) 对 HWPT 分解后的信号利用 ZFFT 方法细化频谱,得到校正的密集频谱成分,与传统的复调制 ZFFT 及线性调频 CZT 变换相比,其频率、幅值及相位校正精度得到提高,表明了所提出 HWPT-ZFFT 方法的有效性。

3) 考虑细化后密集的频谱进行二维全息谱计算,以及双跨转子实验计算中考虑高次谐波成分,能够得到更丰富的故障特征,表明考虑高次分频进行二维全息谱计算的必要性。

参 考 文 献

- [1] Goldman P, Muszynska A. Application of full spectrum to rotating machinery diagnostics [J]. Orbit, 1999,20(1): 17-21.
- [2] Qu L, Liu X, Peyronne G, et al. The holospectrum: a new method for rotor surveillance and diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1989, 3 (3): 255-267.
- [4] 杜永祚,秦志英. 旋转机械动态信号全息谱分析[J]. 振动、测试与诊断,2002,22(2):81-88.
Du Yongzuo, Qin Zhiying. Holo-spectrum analysis of rotating machinery dynamic signals[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2002,22(2): 81-88. (in Chinese)
- [5] 屈梁生. 机械故障的全息诊断原理[M]. 北京:科学出版社,2007:156-174.
- [6] 李宏坤,周帅,朱泓,等. 基于经验模式分解的全息

谱故障识别方法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31 (1): 20-22.

Li Hongkun, Zhou Shuai, Zhu Hong, et al. Rotor fault classification using empirical mode decomposition based holospectrum[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1):20-22. (in Chinese)

- [7] 毛育文,涂亚庆,肖玮,等. 离散密集频谱细化分析与校正方法研究进展[J]. 振动与冲击, 2012,31(21): 112-119.
Mao Yuwen, Tu Yaqing, Xiao Wei, et al. Advances and trends of study on discrete intensive frequency spectrum zooming analysis and correction methodology [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 112-119. (in Chinese)
- [8] 马建仓,吴启彬. 基于小波变换的频谱细化分析方法[J]. 信号处理, 1997, 13(3): 276-279.
Ma Jiancang, Wu Qibin. Spectrum zoom analysis method based on wavelet transform [J]. Signal Processing, 1997, 13(3): 276-279. (in Chinese)
- [9] 曹豫宁,李永丽,梅云,等. 基于小波变换的频谱细化方法在电动机故障检测中的应用[J]. 继电器, 2002, 30(6): 1-3.
Cao Yuning, Li Yongli, Mei Yun, et al. Diagnosis of rotor faults of inductive motors using spectrum zoom analysis method based on wavelet transform[J]. Relay, 2002,30(6):1-3. (in Chinese)
- [10] 李舜酩. 谐波小波包方法及其对转子亚频轴心轨迹的提取[J]. 机械工程学报, 2004, 40(9): 133-137.
Li Shunming. Harmonic wavelet packetes method and used on accurate obtaining the orbit of rotor sub-frequency signal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004,40(9): 133-137. (in Chinese)
- [11] Yan R, Gao R X. An efficient approach to machine health diagnosis based on harmonic wavelet packet transform [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2005, 21(4): 291-301.
- [12] Jiang C, Weng X T, Lou J J. Gear fault diagnosis based on harmonic wavelet packet and BP neural network[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 21 (7): 2683-2687.
- [13] Bouzida A. Fault diagnosis in industrial induction machines through discrete wavelet transform[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011,58(9): 4385-4395.



第一作者简介:李纪永,男,1985年1月生,博士研究生。主要研究方向为旋转机械故障信号处理。

E-mail:ljynav@163.com