

基于小波包的全信息解调方法及其应用*

巩晓赞¹, 杨春燕¹, 韩捷², 陈宏²

(1. 郑州轻工业学院机电工程学院 郑州, 450002) (2. 郑州大学振动工程研究所 郑州, 450001)

摘要 针对旋转机械故障信号的振动特点, 将小波包络解调与基于数据融合技术的全矢谱相结合, 提出一种诊断旋转机械调制信号的分析方法。首先, 对安装在转子同一截面不同方向上的传感器信息同步整周期采样, 对来自不同方向的时域信号分别采用小波包进行分解并重构, 以实现带通滤波的效果; 然后, 采用全矢谱技术对两组重构信号进行数据融合; 最后, 对合成后的信号做包络解调分析。通过仿真研究和工程实例分析可以得出, 对来自同一截面、不同方向的时域信号分别作小波包络谱分析时, 两者在能量分布和频谱结构上存在着较大差别, 以致造成提取故障信息的不完整或造成误判、漏判。基于小波包的全信息解调分析方法通过对同源的双通道信号的有效融合, 可全面地反映出信号中包含的不同调制信息。与基于全矢谱的传统包络解调分析进行对比分析, 具有较好的分析结果和可信度。

关键词 全矢谱; 小波包; 解调; 旋转机械; 故障诊断
中图分类号 TH165.3; TN911.7

引言

旋转机械系统发生故障时, 其振动信号常表现为调制形式, 对调制的故障振动信号解调是一种行之有效的分析方法^[1]。信号中的故障特征信息往往被噪声所淹没, 如何在强噪声背景下提取故障特征是故障诊断的关键, 包络解调和小波分析是目前常用的故障特征提取方法^[2-3]。在旋转机械设备运行状态监测中, 为了全面地监测设备的运行状态, 通常会在转子系统上安装一整套传感器以拾取振动信号。常规的振动信号分析方法仅以单一传感器的信息为研究对象。由于每个单一传感器的振动信息是独立的, 缺乏各传感器信息之间的关联性^[4], 所以单个传感器所采集到的信息只是该转子系统在传感器安装的某方向上(或某坐标方向上)的振动, 不能全面地反映出转子的振动状态^[5]。

笔者根据转子的旋转特性, 将同一类型、不同方向的传感器信息进行融合, 针对故障的调制特征对提取的特征值采用小波解调分析。结合全矢谱技术和小波解调的优点, 对某电厂的磨煤机齿轮传动系统进行故障诊断。

1 全矢谱

全矢谱是根据转子的旋转特性, 将转子同一支承载面上两个相互垂直方向的传感器的振动信号加以合成, 并实现合成信号频域转换的一种频谱分析方法^[6]。与传统频谱分析方法相比较, 全矢谱技术将研究对象由单一通道的信号变为多通道的信号, 在保持频谱分析高分辨率的基础上又直观地反映出转子的振动特征。

由转子的运动方程可知, 转子的运动轨迹为一椭圆^[7]。该椭圆轨迹可以看作是两个频率相同而运动方向相反的正圆轨迹分运动的合成, 如图 1 所示。

图 2 为在某一谐波频率 ω_i 下的全矢谱计算流程图。对 x 方向和 y 方向的信号进行同步整周期采样, 分别得到离散序列 $\{x_i\}$ 和 $\{y_i\}$ ($i=1, 2, \dots, N/2-1$), 将 $\{x_i\}$ 和 $\{y_i\}$ 构成复序列 $\{z_i\}$ 并对其做傅里叶变换。结合转子的旋转特性及其运动方程, 可得到谐波频率 ω_i 下的各个特征参数。其中: R_{ω_i} 为椭圆的长半轴或最大强度, 定义为主振矢; R_{ω_i} 为椭圆的短半轴或最大强度的垂直方向, 定义为副振矢; α_i 为主振矢与 x 轴的夹角; ϕ_i 为该频率下椭圆轨迹

* 国家自然科学基金资助项目(50675209); 河南省杰出人才创新基金资助项目(06211000500); 河南省高等学校精密制造技术与工程重点学科开放实验室开放基金资助项目(PMTE201004A); 郑州轻工业学院博士科研基金资助项目(2013BSJJ035)

收稿日期: 2012-09-11; 修回日期: 2012-11-20

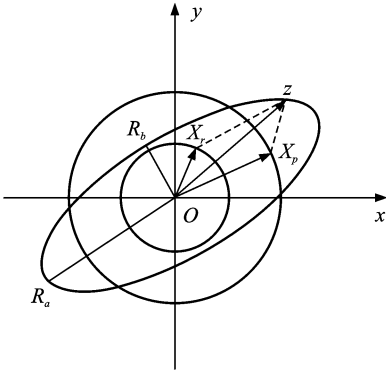


图 1 转子的椭圆轴心轨迹

Fig. 1 Motion orbit of rotor axis center

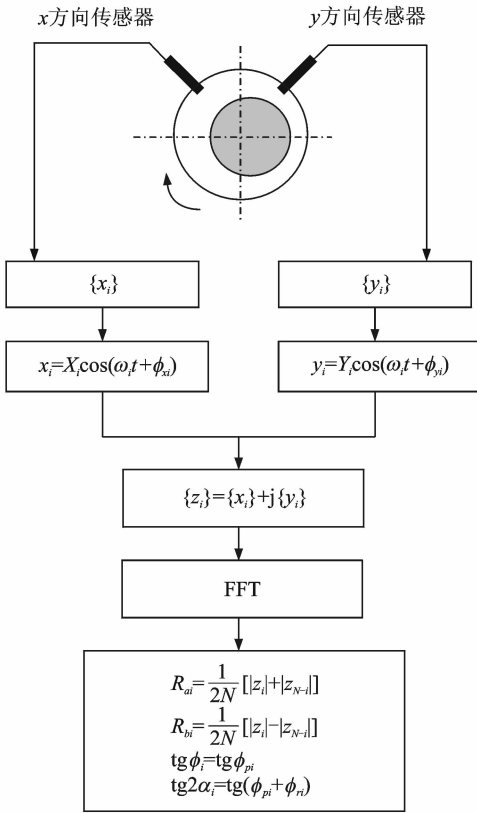


图 2 全矢谱算法流程图

Fig. 2 Full vector spectrum algorithm process

的初相位角。

2 基于小波包的全信息解调方法

2.1 小波包的分解算法

小波包重构的优点在于可根据需要选择全部或部分频段的信息,其余频段置零,因此只要能将信号的有用成分与噪声干扰成分分解到不同频段上^[2-3,8],就可以方便地重构出滤除了噪声干扰的原

信号有用成分。

设 $g_j^n(t) \in U_j^n$, 则 $g_j^n(t)$ 可表示为

$$g_j^n(t) = \sum_l d_l^{j,n} u(2^j t - l) \quad (1)$$

小波包分解算法: 由 $\{d_l^{j+1,n}\}$ 求 $\{d_l^{j,2n}\}$ 和 $\{d_l^{j,2n+1}\}$ 。

$$\begin{cases} d_l^{j,2n} = \sum_k a_{k-2l} d_k^{j+1,n} \\ d_l^{j,2n+1} = \sum_k b_{k-2l} d_k^{j+1,n} \end{cases} \quad (2)$$

小波包重构算法: 由 $\{d_l^{j,2n}\}$ 和 $\{d_l^{j,2n+1}\}$ 求 $\{d_l^{j+1,n}\}$ 。

$$d_l^{j+1,n} = \sum_k [h_{l-2k} d_k^{j,2n} + g_{l-2k} d_k^{j,2n+1}] \quad (3)$$

2.2 全信息解调方法

和传统解调分析是对包络信号进行傅里叶变换一样,全信息解调方法是对多通道的融合包络信号进行傅里叶变换的结果。通过以下计算方法,可实现同源信息融合后的包络分析。

1) 采集转子截面同源双通道的信号 $\{x_i\}$ 和 $\{y_i\}$ ($i=1, 2, \dots, N/2-1$), 同步整周期采样, 采样点数和采样频率为 N 和 f_s 。

2) $\{x_i\}$ 和 $\{y_i\}$ 采用相同的小波基函数进行相同尺度的分解, $dx_i^{j,n}$ 和 $dy_i^{j,n}$ 分别为 $\{x_i\}$ 和 $\{y_i\}$ 的小波包系数。通过式(3)得到小波重构信号 $dx_i^{j,n}$ 和 $dy_i^{j,n}$ 。

3) 根据传统 Hilbert 变换的解调原理^[9], 实现同源信息的解包络。记 $x_{dx}(t) = dx_i^{j,n}$, $y_{dy}(t) = dy_i^{j,n}$, 重构信号 $x_{dx}(t)$ 和 $y_{dy}(t)$ 的解析包络分别为 $|z_x(t)|$ 和 $|z_y(t)|$ 。

4) 将包络信号 $|z_x(t)|$, $|z_y(t)|$ 进行信息融合并提取全矢谱特征值。

3 仿真研究

当旋转机械的某些零部件出现故障时,通常同时存在调幅调频效应。根据振动信号中无调制现象可以判断该零部件是否出现故障^[10]。笔者采用一对具有调幅调频的算例来说明基于小波包的全信息解调算法及其优越性。

设 $x(t)$ 和 $y(t)$ 为一组同源信息

$$\begin{aligned} x(t) &= A(1 + \sin 2f_1 \pi t) \cos(2f_2 \pi t + C \sin(2f_3 \pi t)) \\ y(t) &= B(1 + \sin 2f_1 \pi t) \cos(2f_2 \pi t + D \sin(2f_3 \pi t)) \end{aligned}$$

其中: $A=4; B=6; C=1; D=10; f_1=60 \text{ Hz}; f_2=2400 \text{ Hz}; f_3=80 \text{ Hz}$ 。

图3(a)和图3(b)分别为信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的时域波形,对其分别进行小波包络解调可得到去噪后的解调谱,如图3(c)和图3(d)所示。 $x(t)$ 的小波包络谱只解调出频率 f_1 ,而 $y(t)$ 的解调谱图反映出了调制频率 f_1 和 f_3 ,说明同一截面、不同方向的振动信号因振动能量的不同而表现出不同的频谱结构。

为了减少这种误差,采用数据融合的方法将信

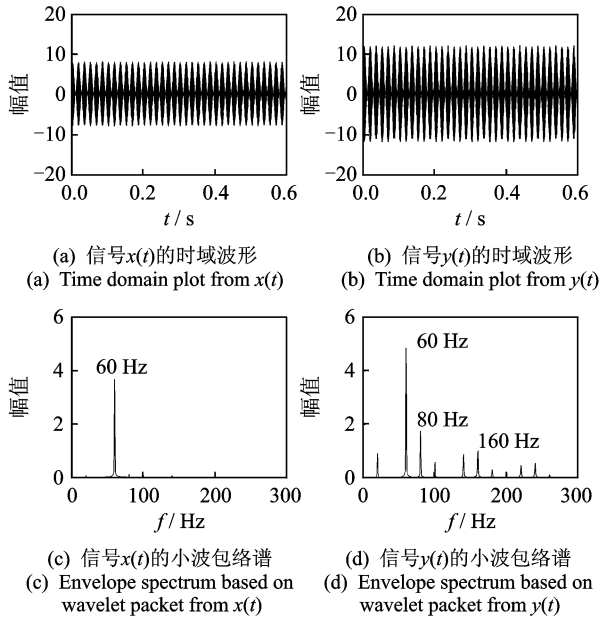


图3 基于小波包的单源信息包络谱

Fig. 3 Envelope spectrum based wavelet packet from single source data

号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 不同振动特征融合并反映在一幅频谱图中,即如图4所示的基于小波包的全信息解调谱图。从图4可以看出,调制频率 f_1 和 f_3 及其倍频都有峰值出现,能够综合反映出信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的调制特性。可见,基于小波包的全信息解调方法在继承小波包络优势的基础上,可以有效融合不同方向的振动特征,与理论分析结果一致。

为比较该方法与全矢包络分析方法处理的效

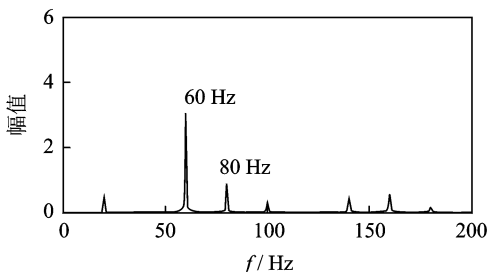


图4 基于小波包的全信息包络谱

Fig. 4 Envelope spectrum based on wavelet packet of full information

果,对原始信号直接进行传统包络谱的信息合成,图5为解调分析结果。从图5可以看出,分析结果仅仅可以解调出频率 f_1 ,对含有调幅调频效应的解调效果并不理想。可见,基于小波包的全信息解调的效果要优于全矢包络谱。

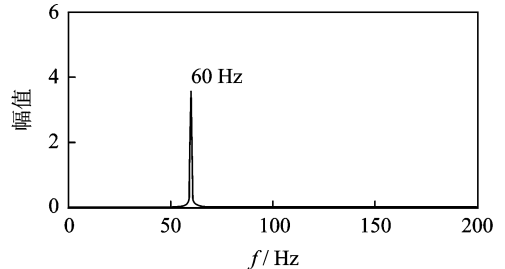


图5 基于信息融合的传统包络谱

Fig. 5 Envelope spectrum of full information

4 工程应用实例分析

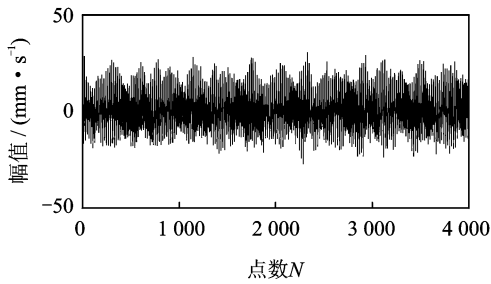
本实例数据来自某电厂双进双出筒式钢球磨煤机。磨煤机作为火力发电厂的主要辅机设备之一,对磨煤机开展故障诊断和状态检修有着一定的现实意义^[11]。该磨煤机的振动标准:振动速度4.5 mm/s为报警值,11.0 mm/s为危险值。以此作为状态监测和检修后验收的评判依据。

为了查清磨煤机振动超标的原因,分别从水平和垂直方向对小牙轮轴承座的振动数据进行采集,其时域波形及其频谱如图6所示。其中:小牙轮齿数为29;齿轮轴的转频为2.2 Hz;小牙轮的啮合频率为63.8 Hz;信号采样频率 $f=1\ 280$ Hz;采样点数为4 096。

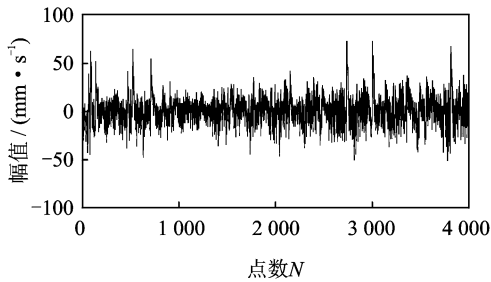
从图6(c)发现,在啮合频率(63.75 Hz)处的幅值已经超过了报警值,达到了7.169 mm/s。图6(d)的幅值谱图显示在啮合频率(63.75 Hz)处的振动值为2.042 mm/s,仍处在正常振动范围内,但其2倍频处的振幅为5.229 mm/s,达到了报警值。

由频谱图中还可以看出,水平和垂直方向上同时出现齿轮的啮合频率(63.75 Hz)及其谐波频率,说明主要故障在齿轮啮合处,同时啮合频率及其倍频处均有边频带出现。

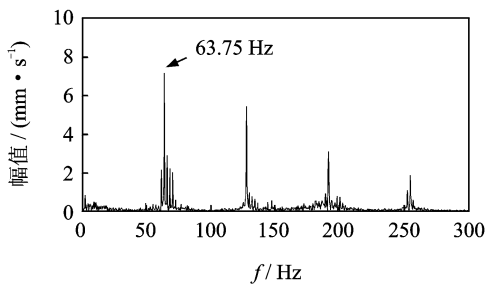
选用小波基函数分别对这一组数据进行3层分解。由于振动能量集中在高频部分^[8],选取高频段数据重构,得到去噪后的振动信息。为了解析出调制频率,对重构信号采取解调分析,得到如图7所示的小波包解调谱图。图7(a)中出现了小牙轮轴的旋转频率(2.188 Hz)及倍频,图7(b)中在频率为



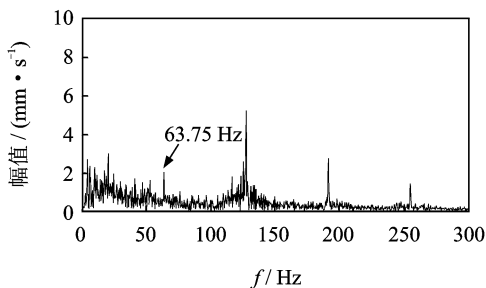
(a) Time domain plot in horizontal direction



(b) Time domain plot in vertical direction



(c) Frequency spectrum in horizontal direction



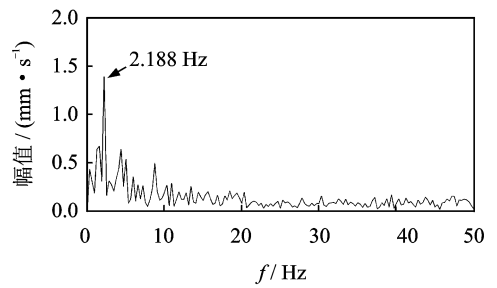
(d) Frequency spectrum in vertical direction

图 6 实测信号及其频谱图

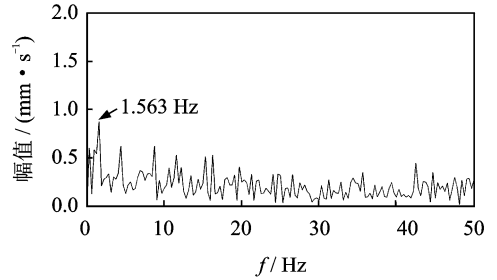
Fig. 6 Measured signal and its frequency spectrum

1.563 Hz处出现了峰值,没有解调出小齿轮轴的旋转频率(2.188 Hz)。图 7 进一步验证了两个方向的小波解调谱表现出不同的频谱结构。

为了提高诊断效率,提出采用基于数据融合的虚拟探头监测方法。首先,对这一组同源信息进行



(a) Horizontal direction



(b) Vertical direction

图 7 实测信号的小波包络谱图

Fig. 7 Envelope spectrum based on wavelet packet of measured signal

数据融合,在振动强度最大的方向上安装一虚拟探头;然后,对虚拟探头处的振动信息进行小波包解调分析,如图 8 所示。图 8 清晰地反映出小齿轮轴的旋转频率(2.188 Hz)及其 2 倍频和 3 倍频,有效融合了图 7(a)和图 7(b)的振动特征,全面地反映出水平和垂直方向上的不同振动特征。经检验发现,拆装机组时小齿轮的轴中心位置产生偏移,使大小齿轮啮合不正确。

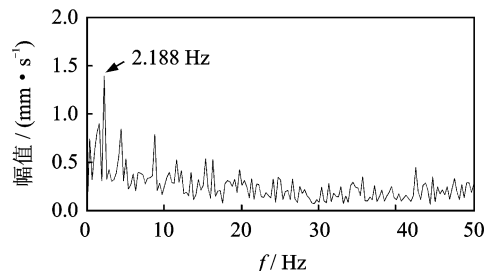


图 8 实测信号的全信息小波包络谱图

Fig. 8 Envelope spectrum based on wavelet packet of measured full information

图 9 为基于信息融合的传统共振解调谱。可以看出,传统共振解调谱中转频 2.188 Hz 处出现分叉,对故障特征频率的提取造成一定干扰,直接影响故障特征提取的准确性。

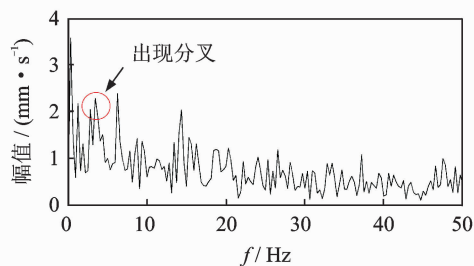


图9 实测信号的全信息包络谱图

Fig. 9 Envelope spectrum of measured full information

5 结论

1) 受故障位置和传输路径的影响,旋转机械转子系统的振动在不同方向表现出不同的振动特征,不仅给现场检测人员带来了诊断困难,且大大降低了诊断效率。针对这一特点,笔者采用基于数据融合的全矢谱技术,实现了全信息故障诊断方法。

2) 针对故障的调制特性,笔者将全矢谱技术应用到小波解调分析方法中,实现了多通道信息的小波解调。仿真和工程实例研究表明,该方法在继承小波解调优势的基础上,能够有效融合不同信息的解调谱,全面反映出转子系统的调制信息。与包络解调分析方法的对比进一步说明了该方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 丁康,胡晓斌,谢明. 解调分析的一种优化方法[J]. 振动工程学报,1998,11(2):235-240.
Ding Kang, Hu Xiaobin, Xie Ming. An optimized method of demodulation[J]. Journal of Vibration Engineering, 1998,11(2):235-240. (in Chinese)
- [2] Fan Xianfeng, Zuo Ming. Gearbox fault detection using Hilbert and wavelet packet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006,20:966-982.
- [3] Sheen Y T, Hung C K. Constructing a wavelet-based envelope function for vibration signal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004,18:119-126.
- [4] Fan Chenchao, Syu J W, Pan Minchun, et al. Study of start-up vibration response for oil whirl, oil whip and dry whip[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011,25:3102-3115.

- [5] Zhao Xiaomin, Patel T H, Zuo Ming. Multivariate EMD and full spectrum based condition monitoring for rotating machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012,27:712-728.
- [6] 韩捷,关惠玲,梁川,等. 矢谱:一种实用的旋转机械故障诊断分析方法[J]. 机械强度,1998,20(3):212-215.
Han Jie, Guan Huiling, Liang Chuan, et al. Vector spectrum: a practical analysis method of the rotary machine fault diagnosis [J]. Journal of Mechanical Strength, 1998,20(3):212-215. (in Chinese)
- [7] 钟一谔,何衍宗,王正,等. 转子动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1987:1-34.
- [8] Hu Qiao, He Zhengjia, Zhang Zhousuo, et al. Fault diagnosis of rotating machinery based on improved wavelet package transform and SVMs ensemble[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007,21:688-705.
- [9] Feldman M. Hilbert transform in vibration analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011,25:735-802.
- [10] 冷军发,荆双喜,陈东海. 基于 EMD 与同态滤波解调的矿用齿轮箱故障诊断[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(4):435-438.
Leng Junfa, Jing Shuangxi, Chen Donghai. Fault diagnosis of mine gearbox based on EMD and homomorphic filtering demodulation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011,31(4):435-438. (in Chinese)
- [11] 刘占辉,卢一兵,罗剑斌,等. 钢球磨煤机系统的轴承故障诊断与分析[J]. 电站系统工程,2011,27(6):37-39.
Liu Zhanhui, Lu Yibing, Luo Jianbin, et al. Analysis and diagnosis for bearing fault of ball mill system[J]. Power System Engineering, 2011,27(6):37-39. (in Chinese)



第一作者简介:巩晓赞,女,1981年1月生,博士、讲师。主要研究方向为设备诊断与可靠性分析。曾发表《矢 Hilbert 解调及其在齿轮故障诊断中的应用》(《机械强度》2010年第32卷第6期)等论文。
E-mail: gxyun2008@sohu.com