

文章编号:1000-8055(2013)11-2600-09

基于线调频小波路径追踪阶比循环平稳解调的滚动轴承故障诊断

徐亚军, 于德介, 刘 坚

(湖南大学 机械与运载工程学院 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 针对变转速工况下滚动轴承的故障诊断问题, 提出一种将线调频小波路径追踪算法与阶比循环平稳解调方法相结合的滚动轴承故障诊断方法. 该方法先利用线调频小波路径追踪算法提取轴承的故障特征频率, 再根据轴承的故障特征频率对变转速下时域振动信号的包络在角域等角度重采样, 并对获取的角域平稳信号进行循环平稳解调, 计算得到切片解调谱; 最后根据切片解调谱识别滚动轴承故障. 仿真分析和应用实例表明: 该方法能准确提取变转速工况下滚动轴承的外圈与内圈故障故障特征, 提取效果明显优于基于 Wigner-Ville 峰值跟踪法的包络阶次谱方法.

关 键 词: 线调频小波; 阶比跟踪; 循环平稳解调; 故障诊断; 滚动轴承

中图分类号: V231.9; TH115

文献标志码: A

Fault diagnosis of roller bearings based on chirplet path pursuit and order cyclostationary demodulation

XU Ya-jun, YU De-jie, LIU Jian

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
College of Mechanical and Vehicle Engineering,
Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aim at the problem of fault diagnosis of roller bearings with rotating speed fluctuation, a method for the fault diagnosis of roller bearings was proposed by combining the chirplet path pursuit algorithm with the order cyclostationary demodulation method. In this proposed method, the chirplet path pursuit algorithm was used to obtain the bearing fault characteristic frequency. According to the bearing fault characteristic frequency, the envelope of the time domain vibration signal with rotating speed fluctuation was resampled at constant angle increments in angular domain, and the obtained angular domain steady signal was dealt by cyclostationary demodulation. The slice demodulation spectrum was then acquired and used to diagnose the fault of roller bearings. Simulation analysis and application examples show that the proposed method can exactly extract the outer and inner fault characteristics of roller bearings with rotating speed fluctuation. Compared with the envelope order spectrum method based on Wigner-Ville distribution, the proposed method can obtain more distinct fault characteristic of roller bearings.

Key words: chirplet; order tracking; cyclostationary demodulation; fault diagnosis; roller bearing

收稿日期: 2012-10-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131105.1002.026.html>

基金项目: 国家自然科学基金(50875078); 高等学校博士学科点专项科研基金(20060532009)

作者简介: 徐亚军(1987-), 男, 湖南常德人, 硕士生, 主要从事机械故障诊断研究.

滚动轴承是旋转机械中的主要支撑零部件,其运行状态对设备性能具有重要影响^[1-2].因此,研究滚动轴承的故障诊断技术对保障设备的安全稳定运行具有重要意义.

滚动轴承在运行时会出现局部损伤,在损伤处由于受到反复的冲击作用,其振动信号是以系统振荡为载波的时变调制信号.希尔伯特变换法、广义检波滤波法与高通绝对值调制法是常用的时变调制信号处理方法^[3].

通常情况下,滚动轴承的故障调制信号是一种循环平稳信号^[4],其统计特性呈周期性.循环平稳解调方法是一种崭新的处理工具,它是 20 世纪 80 年代中期迅速发展起来的,姜鸣等^[5]运用循环平稳解调的方法实现了对恒转速齿轮箱的故障诊断.陈向民等^[6]结合线调频小波路径追踪算法与循环平稳解调方法对变转速工况下的齿轮故障诊断问题进行了研究.循环平稳解调满足频率调制信号的解调要求^[7-12],能有效提取淹没在噪声中的故障特征.在变转速工况下,滚动轴承的故障振动信号是非平稳的,其自相关函数为一个时变非周期函数,不满足循环平稳分析的要求,故需对故障信号进行平稳化处理.

目前常用的信号平稳化的方法为峰值跟踪法^[13-16],该方法利用 Wigner-Ville 变换、小波变换等时频分析方法获取瞬时频率估计,但这些时频分析方法存在一些局限性.如小波变换采用等面积平行分割的时频窗^[17],对分析信号缺乏自适应性;Wigner-Ville 变换等二次型时频分析方法对多分量信号分析产生交叉干扰项等.

近年来,Candès 等提出了线调频小波路径追踪算法^[18],该算法利用线调频小波原子^[19],在多维动态时间支撑区上逐段拟合呈曲线变化的瞬时频率,从而得到瞬时频率的估计.

本文结合线调频小波路径追踪(chirplet path pursuit, CPP)算法与循环平稳解调方法,提出了一种变转速工况下滚动轴承的故障诊断方法.滚动轴承的故障振动信号为时变调制信号,该调制信号以外环的各阶固有频率为载波频率,以故障元件(内圈、外圈或滚动体)的通过频率及其倍频为调制频率^[20].本文方法先利用线调频小波路径追踪算法提取轴承的故障特征频率;再根据轴承的故障特征频率对时域振动信号的包络在角域等角度重采样,得到角域平稳信号;最后对角域平稳信号的自相关函数进行切片解调,依据切片解调谱来诊断滚动轴承故障.对本文方法进行了仿真

分析和应用实例验证,结果表明,本文方法能有效提取滚动轴承的外圈与内圈故障特征,其故障特征提取效果明显优于基于 Wigner-Ville 峰值跟踪法的包络阶次谱方法.

1 线调频小波路径追踪算法

线调频小波路径追踪算法在动态区间 I 上定义多尺度 chirplet 原子库如下:

$$\{h_{a_\mu, b_\mu, I}(t)\} =$$

$$\{K_{a_\mu, b_\mu, I} \exp[-i(a_\mu t + b_\mu t^2)]1_I(t)\} \quad (1)$$

式中 $h_{a_\mu, b_\mu, I}(t)$ 为多尺度线调频基元函数; $K_{a_\mu, b_\mu, I}$ 为归一化系数,使得 $\|h_{a_\mu, b_\mu, I}\| = 1$; I 为动态分析时间段, $I = 2^{-j}kN \sim 2^{-j}(k+1)N$; k 为动态时间段序号, $k = 0, 1, \dots, 2^j - 1$; N 为分析信号的采样长度; j 为分析尺度系数, $j = 0, 1, \dots, \log_2(N-1)$; a_μ 为频率偏置系数; b_μ 为调频率;根据采样定理, $a_\mu + 2b_\mu t$ 小于 $f_s/2$, 其中 f_s 为采样频率; $1_I(t)$ 为矩形窗函数,当 $t \in I$ 时为 1, 当 $t \notin I$ 时为 0.

式(1)定义的线调频小波原子在动态区间 I 内的瞬时频率 $a_\mu + 2b_\mu t$ 是呈线性变化的,适合逐段拟合信号分量的频率曲线,在时频面的表示如图 1 所示.式(1)所示的线调频小波原子具有多尺度及调频特性,适用于拟合复杂的频率曲线.

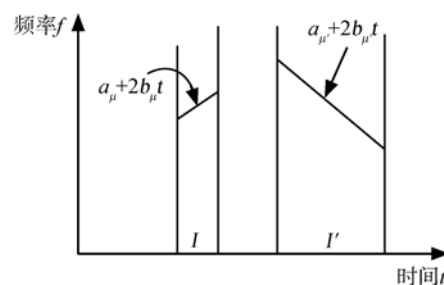


图 1 线调频小波原子的瞬时频率

Fig. 1 Instantaneous frequency of chirplet

基元函数与分析信号越相似,其能量越大,因此需要找到一种有效的连接方法,使得连接获得的基元函数信号总能量最大,即

$$\max \left\{ \sum_{I \in \Pi} \|K_{a_\mu, b_\mu, I} \exp[-i(a_\mu t + b_\mu t^2)]1_I(t)\|^2 \right\} \quad (2)$$

$$\Pi = \{I_1, I_2, \dots\} \in \{I\}$$

Π 在动态区间 I 内对应的基元函数分别为

$$H = \{h_{a_{\mu 1}, b_{\mu 1}, I_1}, h_{a_{\mu 2}, b_{\mu 2}, I_2}, \dots\} \quad (3)$$

线调频小波路径追踪算法路径连接方法如下:

1) 初始化. 令 $d(i)=0, p_{re}(i)=0, i$ 表示时间支撑区序号, $d(i)$ 表示在第 i 个时间支撑区前分解信号的总能量, $p_{re}(i)$ 表示与第 i 个时间支撑区相连的前置时间支撑区序号, $e(i)$ 表示第 i 个时间支撑区上投影系数最大的分解信号的能量.

2) 在动态时间支撑区集合 $\{I_i, i \in Z\}$ 上找出所有与动态时间支撑区 I_i 相邻的动态时间支撑区集合 $\{I_j\}$, 若满足条件

$$d(i) + e(i) > d(j) \quad (4)$$

则令

$$\begin{cases} d(j) = d(j) + e(i) \\ p_{re}(j) = i \end{cases} \quad (5)$$

Π 的连接方法可保证获得的信号分量与分析信号所包含的最大能量信号分量最为接近, 而在动态时间支撑区 I 内连接成的频率曲线就是分量信号的瞬时频率估计.

2 循环平稳解调

循环平稳信号 $x(t)$ 的相关函数、功率谱等统计特性随时间周期平稳变化. 其非对称形式的自相关函数^[21]为

$$R_x(t, \tau) = E[x(t)x^*(t+\tau)] \quad (6)$$

其中 τ 为时延, $E[\cdot]$ 表示取均值, $*$ 表示复数的共轭.

对信号 $x(t)$ 以周期 T_0 进行采样后的 $R_x(t, \tau)$ 为

$$R_x(t, \tau) = E[x(t)x^*(t+\tau)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{(2N+1)} \sum_{n=-N}^N x(t+nT_0)x^*(t+nT_0+\tau) \quad (7)$$

式中 n 为离散时间变量, N 为信号的采样长度.

从式(7)可知, 循环自相关函数 $R_x(t, \tau)$ 为以 T_0 为周期的函数. 则 $R_x(t, \tau)$ 按傅里叶级数展开为

$$R_x(t, \tau) = \sum_f R_x^f(\tau) \exp(2\pi f t i) \quad (8)$$

式中 f 为循环频率.

式(8)对应的傅里叶系数为

$$R_x^f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x^*(t+\tau) \exp(2\pi f t i) dt \quad (9)$$

式中 T 为时域采样周期.

对于幅值调制信号

$$x(t) = A[1 + B \cos(2\pi f_n t)] \cos(2\pi f_z t) \quad (10)$$

式中 f_z 为载波频率, f_n 为调制频率.

将式(10)代入式(9), 积分运算时利用式(11)

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \exp(i\omega_1 t) \exp(i\omega_2 t) dt = 0 \quad \omega_1 \neq \omega_2 \quad (11)$$

整理得到的积分结果为

$$R_x^f(\tau) = \begin{cases} \frac{A^2}{2} \cos(2\pi f_z \tau) \left[1 + \frac{B^2}{2} \cos(2\pi f_n \tau) \right] \\ \frac{A^2 B}{2} \cos(2\pi f_z \tau) [1 + \exp(\pm i 2\pi f_n \tau)] \\ \frac{A^2 B^2}{8} \cos(2\pi f_z \tau) \exp(\pm 2\pi f_n \tau i) \\ \frac{A^2}{4} \exp(\pm 2\pi f_n \tau i) \left[1 + \frac{B^2}{2} \cos(2\pi f_n \tau) \right] \\ \frac{A^2 B}{8} \left\{ \exp(\pm 2\pi f_z \tau i) + \exp[\pm 2\pi (f_n \pm f_z) \tau i] \right\} \\ \frac{A^2 B^2}{16} \exp[\pm 2\pi (f_n \pm f_z) \tau i] \end{cases} \quad (12)$$

式中 f 取值分别为 $f=0, f=\pm f_n, f=\pm 2f_n, f=\pm 2f_z, f=\pm (f_n \pm 2f_z), f=\pm (2f_n \pm 2f_z)$.

显然, 由式(12)可得出, 因 $f=0$ 时, $R_x^f(\tau)$ 只能反映信号 $x(t)$ 的平稳信息, 所以仅当循环频率 f 为 $f=\pm f_n, f=\pm 2f_n, f=\pm 2f_z, f=\pm (f_n \pm 2f_z), f=\pm (2f_n \pm 2f_z)$ 时, 循环自相关函数 $R_x^f(\tau)$ 取得非零值, 在其他频率处均为零. 取定一个 f 值, 对循环自相关函数做切片解调分析, 得到的切片解调谱可用于提取故障特征.

3 阶比循环平稳解调

循环平稳解调能有效地提取淹没在噪声中的周期性故障特征, 若对滚动轴承故障信号进行循环平稳解调, 提取周期性故障特征, 然后进行频谱分析, 能达到较好的解调效果. 在变转速工况下, 轴承振动信号是非平稳的, 不满足循环平稳分析的要求, 故需对振动信号进行平稳化处理. 本文方法先利用线调频小波路径追踪算法估计信号的故障特征频率, 再根据故障特征频率对振动信号的包络在角域等角度采样, 得到角域平稳信号; 最后对角域平稳信号的自相关函数进行切片, 从而实现轴承故障信号的阶比循环平稳解调.

基于线调频小波路径追踪的阶比循环平稳解调算法如下:

1) 利用线调频小波路径追踪方法分析滚动轴承振动信号, 获得变转速滚动轴承振动信号的故障特征频率曲线.

2) 运用 3 阶多项式拟合特征频率曲线,则有

$$f(t) = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (13)$$

3) 确定最大分析阶次 $n_{\max}$.

4) 确定等角度采样间隔 $\Delta\theta$, 从采样定理可得

$$\Delta\theta \geq \frac{2\pi}{2n_{\max}} = \frac{\pi}{n_{\max}} \quad (14)$$

5) 确定重采样后数据总长度 N

$$2\pi \int_0^{T_{\text{total}}} f(t) dt = N\Delta\theta \quad (15)$$

式中 $f(t)$ 为频率拟合函数, T_{total} 为总时间.

6) 获得等角度重采样的键相时标 T_n

$$\begin{aligned} \frac{a}{4} T_n^4 + \frac{b}{3} T_n^3 + \frac{c}{2} T_n^2 + dT_n = \\ \frac{n}{2D_{\max}} + \frac{a}{4} T_0^4 + \frac{b}{3} T_0^3 + \frac{c}{2} T_0^2 + dT_0 \\ n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (16)$$

其中 T_0 为时域采样开始时间.

7) 利用等角度重采样获取角域平稳信号. 根据键相时标 T_n , 运用 Lagrange 线性插值公式对分析信号进行插值, 求取其在角域内的幅值. 假设插值节点为 T_n , 其对应的幅值为 $x(T_n)$, Lagrange 线性插值公式可表示为

$$\begin{aligned} x(T_n) = x(t_i) + \frac{x(t_{i+1}) - x(t_i)}{t_{i+1} - t_i} (T_n - t_i) \\ t_i \leq T_n \leq t_{i+1} \end{aligned} \quad (17)$$

8) 经以上步骤得到重采样信号 $x(T_n)$ 后, 依据式(9)可计算 $x(T_n)$ 的循环自相关函数 $R_x^f(\tau)$.

9) 最后根据式(12), 对循环自相关函数 $R_x^f(\tau)$ 在特征循环阶比处进行切片解调分析, 依据滚动轴承的切片解调谱进行故障诊断.

基于线调频小波路径追踪的变转速轴承振动信号阶比循环平稳解调过程可用图 2 所示的原理框图表示.

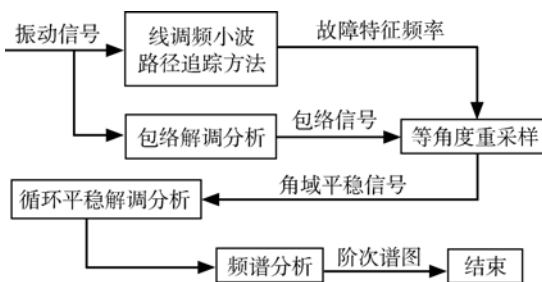


图 2 基于线调频小波路径追踪的阶比循环平稳解调原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of order cyclostationary demodulation approach based on chirplet path pursuit

4 仿真研究

滚动轴承故障振动信号的载波频率为轴承元件的固有频率, 调制频率是故障特征频率及其倍频. 为模拟滚动轴承故障振动信号被调制的现象, 取一个脉冲信号, 设其载波频率为 520 Hz, 衰减系数为 -420.

$$y = \exp(-420t) \times \cos(2\pi t \times 520)$$

取调制频率 f_1 为

$$f_1 = -0.5t^2 + 8t + 30$$

图 3 为单个脉冲信号时域波形图, 周期脉冲信号可通过 repeat 函数来获取, 脉冲周期为 $1/f_1$.

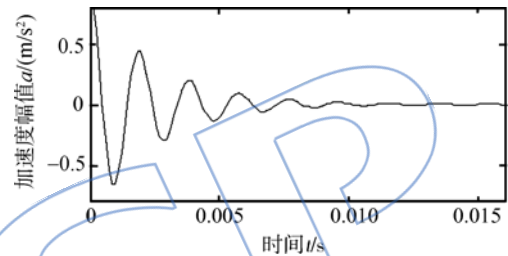


图 3 脉冲信号时域波形图

Fig. 3 Time domain waveform of pulse signals

对周期脉冲信号加入高斯白噪声, 信噪比为 10 dB, 得到如图 4 所示的仿真信号时域波形图. 信号采样频率为 8192 Hz, 采样时间间隔为 4 s.

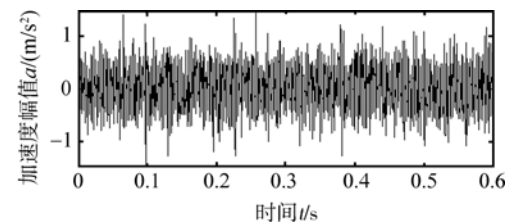


图 4 仿真信号时域波形图

Fig. 4 Time domain waveform of simulated signals

用希尔伯特变换求取图 4 中振动信号的包络, 对该包络信号进行降采样 (采样频率为 1024 Hz), 由于调制频率最大为 54 Hz, 对 10 倍调制频率的提取仍满足采样定理的要求. 对降采样后的包络信号进行快速傅里叶变换, 得到如图 5 所示的频谱图. 因调制频率随时间非线性变化, 所以无法根据图 5 所示的包络谱识别调制频率.

用希尔伯特变换求取振动信号的包络, 再用线调频小波路径追踪方法进行分解, 获取瞬时频率估计, 经拟合得到如图 6 所示的频率曲线 (虚线部分所示), 从图中可以看出, 得到的频率曲线与

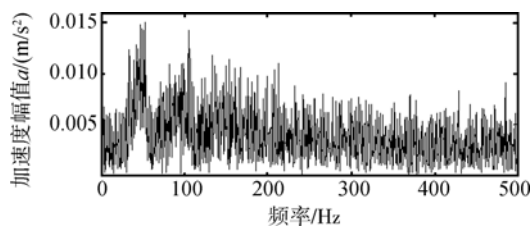


图 5 仿真信号包络谱

Fig. 5 Eenvolop spectrum of simulated signal

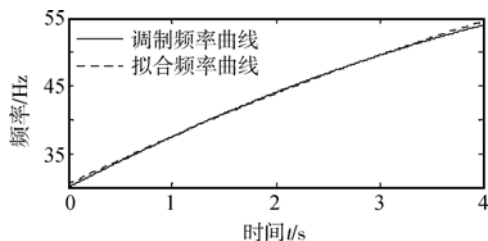


图 6 仿真信号的调制频率和拟合频率曲线

Fig. 6 Modulating frequency curve and fitting frequency curve with simulated signals

信号的调制频率曲线吻合较好。

将信号以线调频小波路径追踪方法提取的调制频率进行等角度重采样,本文选取的最大分析阶比 $n_{\max} = 10$ 阶(根据采样定理,满足故障特征阶比为 5 阶的要求),用阶比分析的方法对包络信号角域平稳化,这样就满足了循环平稳解调的要求.对包络信号在角域平稳化后,求其循环自相关函数,对其循环自相关函数在循环阶比为 1 处进行切片解调,得到解调谱如图 7 所示(图中数字为各点对应的坐标值).图中各阶次是模拟信号的故障特征频率及其倍频,表明本文方法很好地识别了该故障信号的调制频率成分。

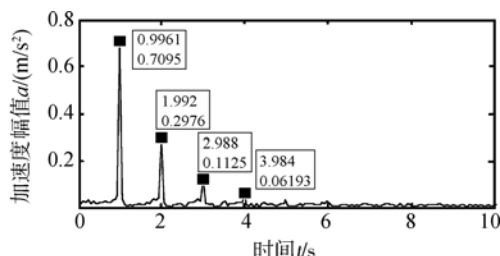


图 7 仿真信号的阶比循环平稳解调谱

Fig. 7 Spectrum of order cyclostationary demodulation with simulated signals

对瞬时频率采用 Wigner-Ville 峰值跟踪法估计,得到频率曲线如图 8 中虚线所示.与图 6 中提取的频率曲线相比,其匹配精度明显要低,表明线调频小波路径追踪算法提取的瞬时频率曲线精度

明显高于 Wigner-Ville 峰值跟踪法.用 Wigner-Ville 峰值跟踪法对仿真信号进行包络解调分析,得到图 9 所示的包络阶次谱,图中峰值点(2.705, 77.08), (3.599, 62.39)属于干扰阶次点,从而无法根据包络阶次谱诊断故障.因此,在振动信号信噪比较低的情况下,基于线调频小波路径追踪算法的阶比循环平稳解调方法能更好地从振动信号中提取轴承故障特征。

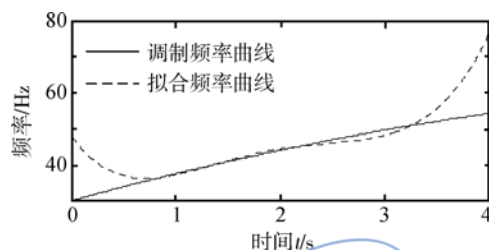


图 8 仿真信号的调制频率曲线与 Wigner-Ville 峰值跟踪法求得的拟合频率曲线

Fig. 8 Modulating frequency curve with simulated signals and fitting frequency curve based on Wigner-Ville peak tracking method

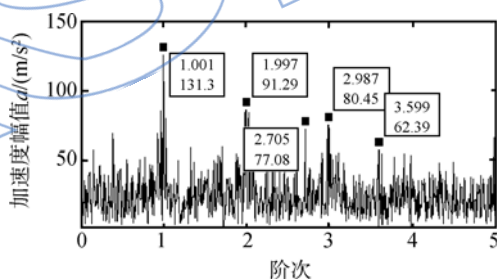


图 9 基于 Wigner-Ville 峰值跟踪法的仿真信号包络阶次谱

Fig. 9 Order enveloping spectrum of simulated signals based on Wigner-Ville peak tracking method

5 实测滚动轴承故障振动信号分析

选用 6307E 型滚动轴承作为分析对象,为模拟常见的外圈和内圈故障,分别在外圈和内圈上切割宽为 0.15 mm,深为 0.13 mm 的槽.将该滚动轴承固定在试验台的基座上,内圈随转轴一起旋转,本次试验采用比利时 LMS (Leuven Measurement and System) 公司 SCM09 采集系统,应用美国压电有限公司 (PCB Piezotronics Inc.) 的加速度传感器采集固定在试验台上滚动轴承的故障信号输入给信号分析仪,并运用 LMS Test. Lab 9A 软件进行数据处理.试验时,滚动轴承外圈转速为

809.09~1280.60 r/min, 内圈转速为 340.72~714.91 r/min. 振动信号采样频率取为 8192 Hz, 采样时长取为 4 s. 图 10 为滚动轴承试验台.

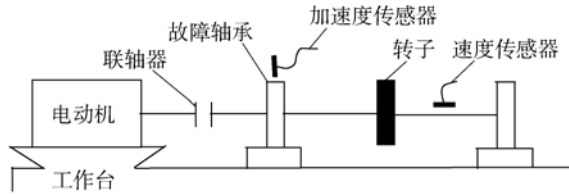


图 10 滚动轴承试验台

Fig. 10 Roller bearing test rig

图 11 为轴承外圈故障信号时域波形图, 图中存在非等时间间隔的冲击成分, 冲击成分分布随转速波动而变化.

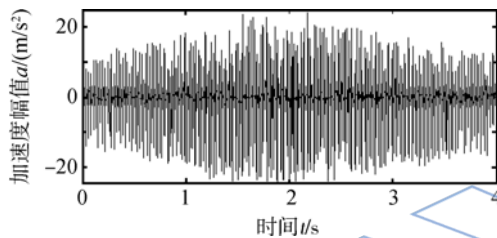


图 11 轴承外圈故障信号时域波形图

Fig. 11 Time domain waveform of signals of bearing with outer fault

图 12 所示为轴转动频率与轴承外圈故障特征频率曲线, 图中曲线 1 为利用转速计直接拾取的故障轴承所在轴的转动频率曲线(变化范围为 13.48~21.34 Hz), 曲线 2 为根据轴承故障特征频率计算公式^[22]计算得到的外圈故障特征频率曲线(变化范围为 41.26~65.31 Hz).

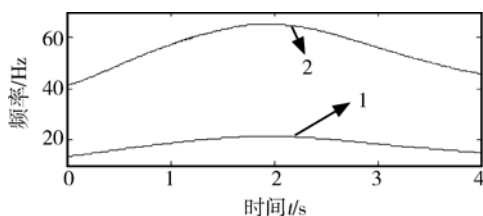


图 12 轴转动频率与轴承外圈故障特征频率曲线图

Fig. 12 Rotational frequency curve of shaft and characteristic frequency curve of bearing with outer fault

图 13 为轴承外圈故障包络信号频谱图, 由于转速的曲线变化导致故障特征频率呈曲线变化, 从而使得快速傅里叶变换得到的包络谱的峰值无

法和转动频率以及故障特征频率对应, 故需另寻求分析方法.

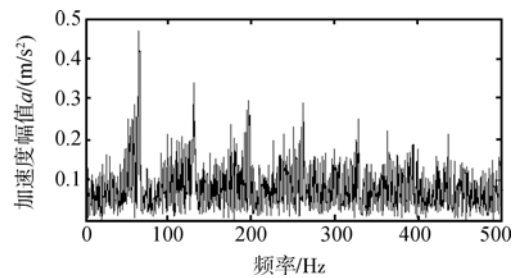


图 13 轴承外圈故障包络信号频谱图

Fig. 13 Spectrum of enveloping signals of bearing with outer fault

对轴承外圈故障振动信号采用本文方法进行分析. 先提取振动信号的包络, 再用线调频小波路径追踪算法对包络信号分解, 估计瞬时频率, 拟合频率曲线如图 14 中虚线所示. 图 14 中实线为计算获得的故障特征调制频率曲线, 即图 12 中的曲线 2. 从图 14 中可以看出, 拟合得到的瞬时频率曲线(虚线)与根据转动频率计算得到的故障特征频率曲线(实线)吻合较好.

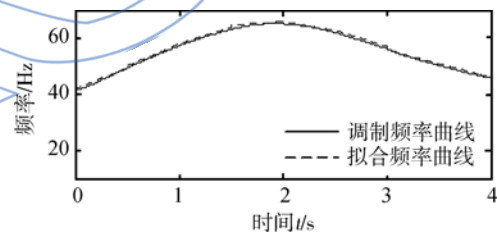


图 14 轴承外圈故障特征频率曲线

Fig. 14 Characteristic frequency curve of bearing with outer fault

对具有外圈故障的滚动轴承, 其故障振动信号为时变调制信号, 该调制信号以轴承外圈各阶固有频率为载波频率, 以故障元件(内圈、外圈或滚动体)的故障特征频率及其倍频为调制频率^[20]. 利用拟合频率曲线对包络信号在角域平稳化后, 求其循环自相关函数, 对其循环自相关函数在循环阶比为 1 处进行切片解调, 得到切片解调谱如图 15 所示. 图中峰值点 (0.996, 6.444), (2.051, 3.815), (2.921, 3.108), (4.963, 4.314) 分别对应外圈故障特征频率的 1X, 2X, 3X, 4X. 阶次特征表明滚动轴承外圈出现了故障, 与实际情况相符.

为进一步验证本文方法的优越性, 利用 Wigner-Ville 峰值跟踪法获取故障特征频率曲线

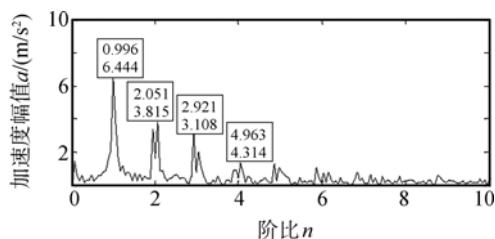


图 15 轴承外圈故障信号循环平稳解调包络阶次谱
Fig. 15 Enveloping spectrum of order cyclostationary demodulation of bearing with outer fault signals

如图 16 所示. 对比图 14 可以看出, 对于实测信号而言, 线调频小波路径追踪算法能更准确地估计瞬时特征频率.

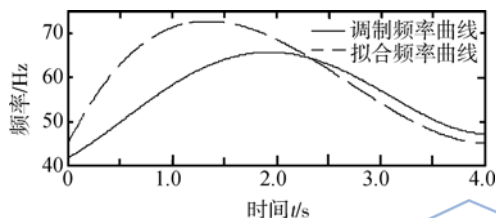


图 16 用 Wigner-Ville 峰值跟踪法求得的轴承外圈故障信号瞬时特征频率曲线
Fig. 16 Transient characteristic frequency curve based on Wigner-Ville peak tracking method of bearing with outer fault signals

对轴承外圈故障信号用 Wigner-Ville 峰值跟踪法求得的瞬时特征频率进行包络解调, 得到图 17 所示的包络阶次谱, 图中故障特征频率的 1X, 2X, 3X 等模糊不清, 被噪声所掩盖, 比图 15 中的效果明显要差.

图 18 为轴承内圈故障信号时域波形图. 对具

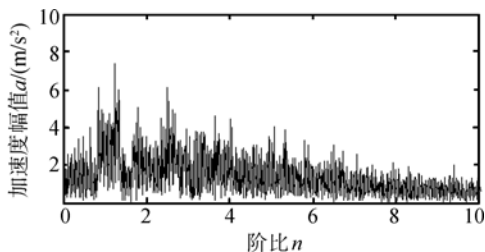


图 17 轴承外圈故障信号基于 Wigner-Ville 峰值跟踪法的包络阶次谱
Fig. 17 Order enveloping spectrum of bearing with outer fault signals based on Wigner-Ville peak tracking method

有内圈故障的滚动轴承, 其故障信号为时变调制信号, 该调制信号以外圈各阶固有频率为载波频率, 以内圈的故障特征频率及其倍频为调制频率^[20].

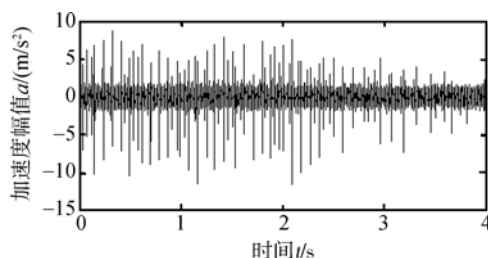


图 18 轴承内圈故障信号时域波形图
Fig. 18 Time domain waveform of bearing with inner fault signals

用本文方法得到的轴承内圈故障信号循环平稳解调包络阶次谱如图 19 所示. 图中峰值点 I (0.994), II (1.973), III (3.059) 分别对应故障特征频率的 1X, 2X, 3X. 试验轴承型号为 6307E, 从轴承故障特征频率公式^[22]求得轴承内圈的故障特征频率是转动频率的 4.937 倍, 因此转动频率约为故障特征频率的 0.202 倍 ($1/4.937 \approx 0.202$), 则图 19 中的峰值点 1X (0.1922), 2X (0.4196), 3X (0.6084) 分别为转动频率的 1X, 2X, 3X, 说明轴承内圈故障信号被转动频率及其倍频调制, 该滚动轴承的内圈出现了故障.

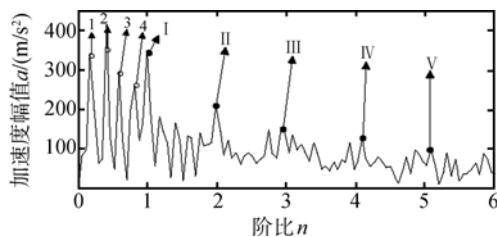


图 19 轴承内圈故障信号循环平稳解调包络阶次谱
Fig. 19 Enveloping spectrum of order cyclostationary demodulation of bearing with inner fault signals

对轴承内圈故障信号用 Wigner-Ville 峰值跟踪法求得的瞬时特征频率进行包络解调, 得到如图 20 所示的包络阶次谱, 从图中可以看出, 峰值阶次淹没在噪声中, 难以区分. 因此在信噪比较低的情况下, 基于 Wigner-Ville 峰值跟踪法的包络阶次谱难以得到可靠的故障诊断结果.

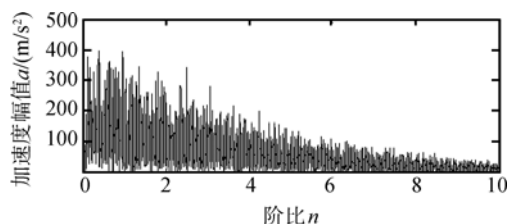


图 20 轴承内圈故障信号基于 Wigner-Ville 峰值跟踪法的包络阶次谱

Fig. 20 Order enveloping spectrum of bearing with inner fault signals based on Wigner-Ville peak tracking method

6 结 论

1) 在不额外安装硬件的情况下,变转速滚动轴承的故障特征频率曲线可通过线调频小波路径追踪算法准确提取,且线调频小波路径追踪算法在提取转动频率以及故障特征频率时具有分解精度高、抗噪能力强的优点。根据轴承的故障特征频率对振动信号包络在角域等角度重采样,可得到角域平稳信号,从而简化了变转速滚动轴承的诊断过程。

2) 循环平稳解调分析既可以解调幅值调制信号,又可以解调频率调制信号,能有效地提取滚动轴承的周期性故障特征。

3) 本文将线调频小波路径追踪算法和循环平稳解调方法相结合,将时域非平稳故障信号重采样转化为角域平稳信号,再对角域平稳信号的自相关函数进行切片解调,依据切片解调谱来诊断滚动轴承故障。对本文方法进行了仿真分析和应用实例验证,结果表明本文方法能有效提取滚动轴承的外圈与内圈故障特征。

参考文献:

- [1] 虞和济,韩庆大,李沈,等. 设备故障诊断工程[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
- [2] 钟秉林,黄仁. 机械故障诊断学[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [3] 张帆,丁康. 平方解调分析原理及在机械信号故障诊断中的应用[J]. 汕头大学学报:自然科学版,2002,17(1):42-47.
ZHANG Fan, DING Kang. Application of square demodulation analysis in fault diagnosis for mechanical signal[J]. Journal of Shantou University: Natural Science Edition, 2002, 17(1): 42-47. (in Chinese)
- [4] 丁康,孔正国,何志达. 振动调幅信号的循环平稳解调原理与应用[J]. 振动工程学报,2005,18(3):304-308.
DING Kang, KONG Zhengguo, HE Zhida. The principle and application of cyclostationary analysis for demodulation of amplitude modulated signals[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(3): 304-308. (in Chinese)
- [5] 姜鸣,陈进. 循环自相关函数的解调性能分析[J]. 上海交通大学学报,2002,36(6):799-802.
JIANG Ming, CHEN Jin. Demodulation analysis for cyclic autocorrelation function[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(6): 799-802. (in Chinese)
- [6] 陈向民,于德介,罗洁思. 基于线调频小波路径追踪阶比循环平稳解调的齿轮故障诊断[J]. 机械工程学报,2012,48(3):95-101.
CHEN Xiangmin, YU Dejie, LUO Jiesi. Gear tooth fault diagnosis by using order cyclostationary demodulating approach based on chirplet path pursuit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 95-101. (in Chinese)
- [7] 周福昌,陈进,何俊,等. 循环自相关函数的解调特性分析及其在故障诊断中的应用[J]. 振动工程学报,2004,17(suppl. 1):280-283.
ZHOU Fuchang, CHEN Jin, HE Jun, et al. Characteristics of demodulation about cyclic autocorrelation and its application in fault diagnosis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(suppl. 1): 280-283. (in Chinese)
- [8] Capdessus C, Sidahmed M, Lacoume J L. Cyclostationary processes: application in gear faults early diagnosis[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2000, 14(3): 371-385.
- [9] Randall R B, Antoni J, Chobsaard S. The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2001, 15(5): 945-962.
- [10] Antoniadis I, Glossiotis G. Cyclostationary analysis of rolling-element bearing vibration signals[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(5): 829-845.
- [11] Raad A, Antoni J, Sidamel M. Indicators of cyclostationarity: theory and application to gear fault monitoring[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2008, 22(3): 574-587.
- [12] 崔玲丽,高立新,蔡力钢,等. 基于循环平稳解调的齿轮裂纹早期故障诊断研究[J]. 振动工程学报,2008,21(3): 274-278.
CUI Lingli, GAO Lixin, CAI Ligang, et al. Gear tooth crack early fault diagnosis based on the cyclostationary demodulation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(3): 274-278. (in Chinese)
- [13] Fyfe K R, Munck E D S. Analysis of computed order tracking[J]. Mechanical System and Signal Processing, 1997, 11(2): 187-205.
- [14] Bossley K M, Mckendrick R J. Hybrid computed order tracking[J]. Mechanical System and Signal Processing, 1999, 13(4): 627-641.
- [15] Saavedra P N, Rodriguez C G. Accurate assessment of computed order tracking[J]. Shock and Vibration, 2006, 13

- (1):13-32.
- [16] Capdessus C, Sidahmed M, Lacoume J L. Cyclostationary processes: application in gear faults early diagnosis[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2000, 14(3): 371-385.
- [17] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 20-26.
- [18] Candès E J, Charlton P R, Helgason H. Detecting highly oscillatory signals by chirplet path pursuit[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2008, 24(1): 14-40.
- [19] Anderson W G, Balasubramanian R. Time-frequency detection of gravitational waves[J]. Physical Review: D, 1999, 60(10): 1-12.
- [20] PAN Minchun, CHIU Chunching. Investigation on improved Gabor order tracking technique and its applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3): 810-826.
- [21] 丁康, 李巍华, 朱小勇. 齿轮及齿轮箱故障诊断实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [22] Mallat S, Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries[J]. Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.

JALSP