

基于形态分量分析与阶次跟踪的齿轮箱 复合故障诊断方法

陈向民, 于德介, 李 蓉

(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: 针对变转速下齿轮箱复合故障的故障特征提取, 提出了基于形态分量分析与阶次跟踪的齿轮箱复合故障诊断方法。该方法根据齿轮箱复合故障振动信号中齿轮和滚动轴承故障成分的形态差异性, 先用形态分量分析将其分解为包含齿轮局部故障信息的谐振分量、包含滚动轴承局部故障信息的冲击分量和随机噪声分量, 再根据实测转速信号分别对谐振分量和冲击分量进行包络阶次分析, 根据各包络阶次谱诊断齿轮箱复合故障。算法仿真和应用实例表明: 该方法能有效分离变转速下齿轮和滚动轴承的故障特征, 且其故障特征提取效果要优于传统的包络阶次谱方法。

关 键 词: 阶次跟踪; 形态分量分析; 包络阶次谱; 齿轮箱; 复合故障

中图分类号: V231.9; TH113.1; TH165.3

文献标志码: A

Compound fault diagnosis method for gearbox based on morphological component analysis and order tracking

CHEN Xiang-min, YU De-jie, LI Rong

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

Abstract: In view of the problem of extracting fault characteristics from rotating speed changing gearbox with compound faults, a compound fault diagnosis method for gearbox based on morphological component analysis (MCA) and order tracking was proposed. According to the morphological diversity of the fault signals of gear and rolling bearing, the vibration signals of gearbox with compound fault could be decomposed into the harmonic component containing the fault information of gear, the impulse component containing the fault information of rolling bearing and the random noise component by using MCA. And according to the measured rotating speed, the harmonic component and the impulse component were then analyzed respectively by the envelope order analysis, and the compound fault diagnosis was carried out based on the envelope order spectra. Simulation and application examples indicate that the proposed method can effectively separate the fault characteristic signals of gear and rolling bearing under changing rotating speed, and it is superior to traditional envelope order spectrum method according to the effect of fault characteristic extraction.

Key words: order tracking; morphological component analysis;
envelope order spectrum; gearbox; compound faults

收稿日期: 2012-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(51275161); 湖南省科技计划(2012SK3184);
广东省省部产学研结合项目(2009B090300312)

作者简介: 陈向民(1984—), 男, 湖南衡阳人, 博士生, 主要从事信号处理与机械故障诊断研究。

通讯作者: 于德介(1957—), 男, 湖南常德人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事机械系统动力学、设备状态监测与故障诊断、动态信号分析与处理、振动与噪声控制研究。E-mail: djyu@hnu.edu.cn

实际生产中,机械设备的零部件通常是损坏到一定程度才进行更换,期间,某些故障可能会诱发其他故障的发生,从而导致出现复合故障^[1];同时,现场设备常常会因为负载或电压变化引起转速波动.因此,研究变转速下的复合故障具有一定的实际意义.

齿轮箱是工程上广泛使用的传动部件,起着传递动力和力矩的作用.因工作环境恶劣,齿轮箱中的齿轮和滚动轴承极易因疲劳磨损而产生局部故障.滚动轴承产生局部故障时,其振动信号中会出现通过频率调制现象^[2];而齿轮产生局部故障时,其振动信号中会出现转频调制现象^[3].因此,齿轮箱同时出现齿轮与滚动轴承局部故障时,可依据二者调制频率的不同进行齿轮箱复合故障诊断.但受信号传递路径、损伤部位、损伤程度等因素的影响^[3],所拾取的振动信号中各故障成分通常强弱不平衡,弱故障特征容易被强故障特征淹没,导致出现漏诊.因此,需预先对振动信号中的各故障成分进行分离.

形态分量分析(morphological component analysis, MCA)方法是 Starck 等^[4]基于信号的形态多样性和稀疏表示提出的一种信号处理方法,其基本思想是根据信号成分的形态差异性对信号成分进行分离^[5].同时,在 MCA 方法的基础上,Starck 等发展了其扩展算法——广义形态分量分析(generalized morphological component analysis, GMCA)方法. MCA 方法起先应用于图像处理,主要用于分离图像中的几何结构部分(概貌部分)和纹理部分(细节部分)^[6-7].近年来,GMCA 方法被引入机械故障诊断,用于齿轮箱复合故障振动信号中各故障特征的分离^[8-9].但 GMCA 本质上是一种多输入多输出方法,即需同时采集多路传感器信号,这不仅会增加工程应用成本,而且还会大大提升工程应用难度.而 MCA 方法则能从单路传感器信号中分离出多种具有不同形态的信号成分,工程应用上更为经济简便.另一方面,受工况、负载^[10]等影响,工程实际中运行的齿轮箱通常处于变转速工况,其振动信号为典型的非平稳信号.对于该类信号的分析,工程上通常先用阶次跟踪算法^[11-13]将其平稳化.阶次跟踪算法的基本思想是根据转速对信号进行等角度重采样,从而将时域等时间采样的非平稳信号转化为角域等角度采样的平稳信号^[14].

基于上述分析,本文将 MCA 方法与阶次跟踪算法相结合,提出了基于 MCA 与阶次跟踪的

齿轮箱复合故障诊断方法.算法仿真和应用实例验证了本文方法分离变转速下的齿轮与滚动轴承局部故障特征的有效性和优越性.

1 MCA 方法简介

1.1 MCA 原理

MCA 方法可视为基追踪(basis pursuit, BP)算法^[15]和匹配追踪(matching pursuit, MP)算法^[16]的一种结合,其原理为:假设输入信号 s ($s \in \mathbf{R}$)是由 K 个具有不同形态的信号分量 s_k 线性组合而成,即 $s = \sum_{k=1}^K s_k$,同时,每个 s_k 都存在与其相对应的稀疏表示字典 Φ_k ,即 $s_k = \Phi_k \alpha_k$,其中 α_k 为变换系数.假设 Φ_k 能且仅能稀疏表示 s_k ,而对于其他的 $s_{k'} (k \neq k')$ 则不能有效稀疏表示.此时,信号 s 的稀疏性可用 0 范数来定义,即

$$\begin{aligned} \{\alpha_1^{\text{opt}}, \dots, \alpha_K^{\text{opt}}\} &= \arg \min_{\{\alpha_1, \dots, \alpha_K\}} \sum_{k=1}^K \|\alpha_k\|_0 \\ \text{s. t. } s &= \sum_{k=1}^K \Phi_k \alpha_k \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\arg \min_x f(x)$ 表示返回 $f(x)$ 最小时 x 的值.

由于式(1)是一个非凸问题,难以实现.为了获得式(1)优化问题的解,根据 BP 算法理论,用 1 范数代替其中的 0 范数即可形成可解的凸集优化问题,此时,式(1)转化为

$$\begin{aligned} \{\alpha_1^{\text{opt}}, \dots, \alpha_K^{\text{opt}}\} &= \arg \min_{\{\alpha_1, \dots, \alpha_K\}} \sum_{k=1}^K \|\alpha_k\|_1 \\ \text{s. t. } s &= \sum_{k=1}^K \Phi_k \alpha_k \end{aligned} \quad (2)$$

放宽式(2)的约束条件,可将式(2)转换为

$$\begin{aligned} \{\alpha_1^{\text{opt}}, \dots, \alpha_K^{\text{opt}}\} &= \arg \min_{\{\alpha_1, \dots, \alpha_K\}} \sum_{k=1}^K \|\alpha_k\|_1 + \\ &\lambda \left\| s - \sum_{k=1}^K \Phi_k \alpha_k \right\|_2^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 λ 为给定的阈值.

根据 $s_k = \Phi_k \alpha_k$, 给定 s_k , 便可以得到 α_k

$$\alpha_k = \Phi_k^* s_k \quad (4)$$

式中 $\Phi_k^* = \Phi_k^T (\Phi_k \Phi_k^T)^{-1}$, Φ_k^* 为 Φ_k 的伪逆矩阵.

将式(4)代入式(3),即可将式(1)中变换系数 $\{\alpha_1, \dots, \alpha_K\}$ 的优化求解问题转变为式(5)中分量 $\{s_1, \dots, s_K\}$ 的优化求解问题

$$\begin{aligned} \{s_1^{\text{opt}}, \dots, s_K^{\text{opt}}\} &= \arg \min_{\{s_1, \dots, s_K\}} \sum_{k=1}^K \|\Phi_k^* s_k\|_1 + \\ &\lambda_k \left\| s - \sum_{k=1}^K s_k \right\|_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

1.2 阈值函数的选取

针对式(5)的优化求解问题,Starck 等在块协调松弛(block-coordinate-relaxation, BCR)算法的基础上,给出了 MCA 方法的数值实现步骤.而在这一算法步骤中,变换系数 α_k 的阈值降噪采用了软阈值方法

$$\alpha'_{k_j} = \begin{cases} \text{sgn}(\alpha_{k_j})(|\alpha_{k_j}| - \delta_k) & |\alpha_{k_j}| \geq \delta_k \\ 0 & |\alpha_{k_j}| < \delta_k \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数.软阈值方法虽在一定程度上保证了信号的连续性,但同时也削弱了有用信号,造成信息丢失. Bobin 等^[17]在改善 MCA 方法性能的同时,提出采用硬阈值方法对系数 α_k 进行阈值降噪处理

$$\alpha'_{k_j} = \begin{cases} \alpha_{k_j} & |\alpha_{k_j}| \geq \delta_k \\ 0 & |\alpha_{k_j}| < \delta_k \end{cases} \quad (7)$$

然而,硬阈值方法在阈值点并不连续,会给去噪后的信号带来较大的方差.因此,为克服软阈值和硬阈值方法的不足,GAO 等^[18]在研究小波系数阈值降噪时提出了一种折中的阈值降噪方法——半软阈值方法

$$\alpha'_{k_j} = \begin{cases} 0 & |\alpha_{k_j}| \leq \delta_{k1} \\ \text{sgn}(\alpha_{k_j}) \times \frac{\delta_{k2}(|\alpha_{k_j}| - \delta_{k1})}{\delta_{k2} - \delta_{k1}} & \delta_{k1} < |\alpha_{k_j}| \leq \delta_{k2} \\ \alpha_{k_j} & |\alpha_{k_j}| > \delta_{k2} \end{cases} \quad (8)$$

式中 δ_{k2} 为上阈值, δ_{k1} 为下阈值,一般情况下取 $\delta_{k2} = 2\delta_{k1}$.半软阈值方法有效解决了保留信号细节与抑制噪声之间的权衡问题,能更有效降低均方差和抑制噪声.因此,本文中变换系数 α_k 的阈值消噪均采用半软阈值方法.

2 MCA 与阶次跟踪相结合的变转速下的齿轮箱复合故障诊断原理

MCA 方法可根据各信号成分的形态差异性,通过构建具有不同形态的过完备稀疏表示字典,能有效分离信号中的具有不同形态的信号成分;而阶次跟踪算法通过等角度重采样能有效实现时域非平稳信号的平稳化,因此,本文将 MCA 与阶次跟踪相结合,提出了基于 MCA 与阶次跟踪的齿轮箱复合故障诊断方法,该方法步骤为:

1) 构建 8 阶消失矩 Symlet 小波字典用于稀疏表示信号中的冲击成分,而对于信号中的谐振成分,则构建局部离散余弦与正弦变换字典进行稀疏表示.

2) 采用 MCA 方法将变转速工况下的齿轮箱复合故障振动信号分解为包含齿轮局部故障信息的谐振分量、包含滚动轴承局部故障信息的冲击分量及其噪声分量(即冲击分量、谐振分量的和信号与原信号之差).

3) 采用 Hilbert 包络解调分析分别求取谐振分量和冲击分量的包络信号.

4) 根据实测转速信号,对谐振分量和冲击分量的包络信号分别进行等角度重采样.

5) 对重采样后的角域包络信号进行频谱分析,获取谐振分量和冲击分量的包络阶次谱.

6) 根据谐振分量和冲击分量的包络阶次谱分别诊断齿轮和滚动轴承局部故障.

3 算法仿真

构造一个同时包含齿轮和滚动轴承局部故障的齿轮箱复合故障信号 $x(t)$,如式(9)所示.式(9)中 $x_1(t)$ 为被 1 倍转频调制的调幅调频信号,以模拟变转速工况下的齿轮局部故障信号,其中信号幅值为 0.2,模拟齿轮齿数为 20; $x_2(t)$ 为周期性瞬态冲击信号,用以模拟变转速工况下的轴承局部故障信号. $x_2(t)$ 由多个单个瞬态冲击 $y(t)$ 构成, $y(t)$ 的衰减系数为 -800,共振频率为 1200 Hz; $u(t)$ 是单位阶跃函数; $x_c(t)$ 为轴承局部故障调制信号,轴承局部故障特征阶次 O_o 为 3.5; $\max(\cdot)$ 表示取最大值; P 表示 $x_c(t)$ 的最大值(即峰值)的集合; t_{P_i} 表示第 i 个峰值所对应的时间点. $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的时域波形分别如图 1(a) 和图 1(b) 所示. $n(t)$ 为无量纲振动幅值为 0.4 的白噪声,以模拟随机干扰,其时域波形图如图 1(c) 所示.信号采样频率为 4096 Hz,采样时长为 1 s.图 2 为仿真转速信号 $f_r(t)$ (见式(15))的变化曲线.图 3 为式(11)的时域波形,图中,滚动轴承故障冲击成分比较明显,但齿轮故障调幅成分已被淹没.

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + n(t) \quad (9)$$

$$x_1(t) =$$

$$0.2\{1 + \cos[2\pi(20t - 1.429\cos(1.4\pi t))]\} \cdot \cos\{2\pi \cdot 20[20t - 1.429\cos(1.4\pi t)]\} \quad (10)$$

$$x_2(t) = \sum_{i=1}^{76} y(t - t_{P_i}) \cdot u(t - t_{P_i}) \quad (11)$$

$$y(t) = 4\exp(-800t) \cdot \cos(2\pi \cdot 1200t) \quad (12)$$

$$x_c(t) = \cos\{2\pi \cdot 3.5[20t - 1.429\cos(1.4\pi t)]\} \quad (13)$$

$$P = \max[x_c(t)] \quad (14)$$

$$f_r = 20 + 2\pi\sin(1.4\pi t) \quad (15)$$

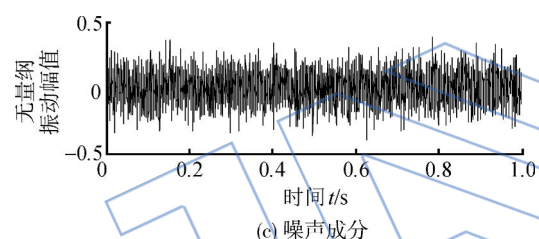
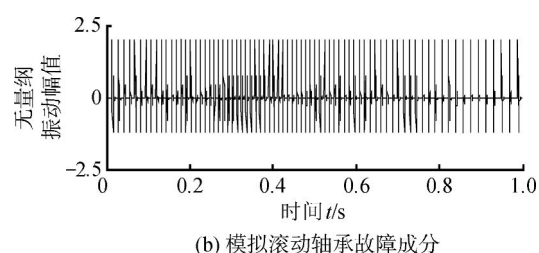
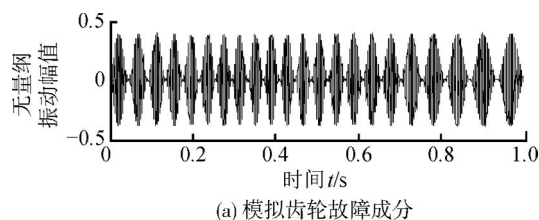
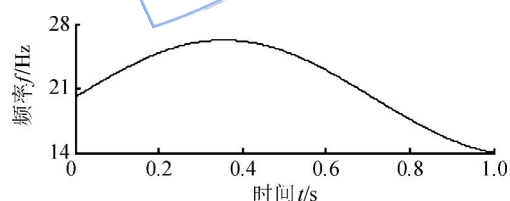


图 1 各仿真成分
Fig. 1 Each simulated component



采用 MCA 对图 3 所示仿真合成信号进行分析,得到的各分量如图 4。对比图 1 和图 4 可知,合成信号中的齿轮故障成分与滚动轴承故障成分已基本分离,仅在部分信号振动幅值上略有差异。

利用图 2 所示仿真转速信号对图 4(a)所示谐振分量和图 4(b)所示冲击分量进行包络阶次分析,得到的包络阶次谱分别如图 5(a)和图 5(b)所示。图 5(a)中,转频阶次 O_r 处存在一处明显的峰值,说明谐振分量中出现了转频调制现象,与所设置的转频调制特征相符;同时,图 5(b)中,轴承

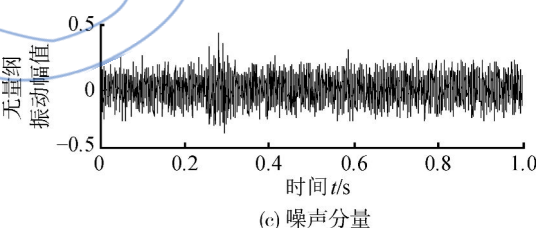
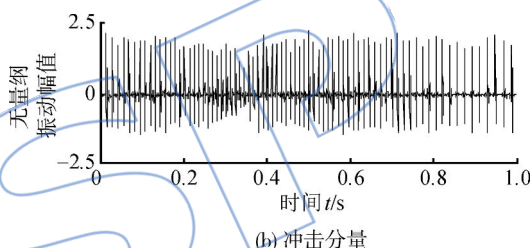
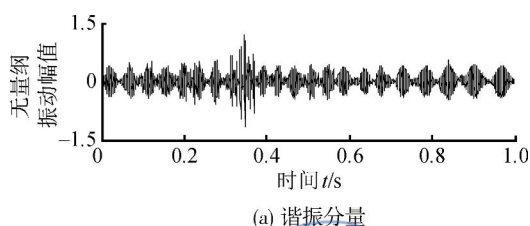
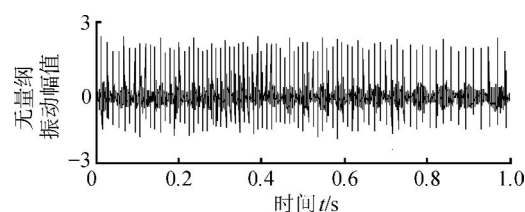


图 4 仿真合成信号的形态分量分析
Fig. 4 Morphological component analysis of simulated synthetic signal

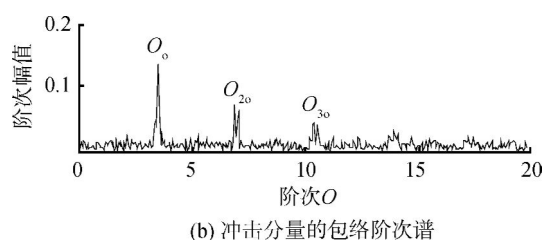
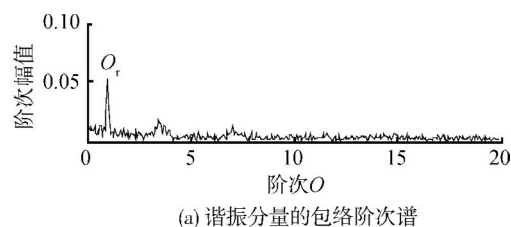


图 5 谐振分量与冲击分量的包络阶次谱
Fig. 5 Envelope order spectrum of harmonic component and impulse component

局部故障的故障特征阶次及其倍频阶次 $O_0 \sim 3O_0$ 处也出现了峰值,与所设置的轴承调制特征相符,验证了本文方法的有效性。

利用图 2 所示仿真转速信号对图 3 所示仿真合成信号直接进行包络阶次分析,得到的包络阶次谱如图 6 所示,图中,在模拟轴承局部故障特征阶次及其倍频阶次 $O_0 \sim 3O_0$ 处峰值较为突出,但在模拟齿轮局部故障特征阶次 O_r 处则不存在明显峰值。对比图 5 和图 6 可知,将复合故障信号中的各故障成分进行分离后,再进行包络阶次谱分析,能更好凸显变转速工况下的各故障特征。

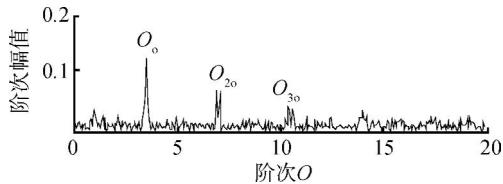


图 6 仿真合成信号的包络阶次谱

Fig. 6 Envelope order spectrum of simulated synthetic signal

4 应用实例

为检验本文方法对实测齿轮箱复合故障信号的有效性,在试验台上同时设置齿轮与滚动轴承局部故障,试验台简图如图 7 所示。试验用齿轮为直齿圆柱齿轮,齿轮 1、齿轮 2 的齿数都是 37;试验用滚动轴承 1~4 均为 SKF6307-2RS 深沟球轴承,其参数值见表 1。经计算,轴承外圈局部故障所对应的故障特征阶次 $O_0 = 3.06$ 。

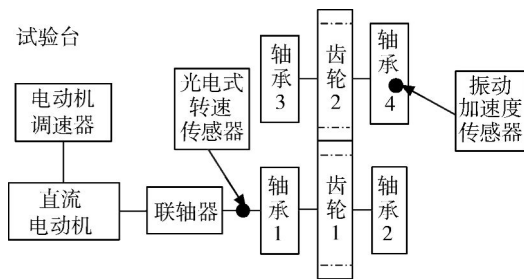


图 7 试验台简图

Fig. 7 Diagram of test rig

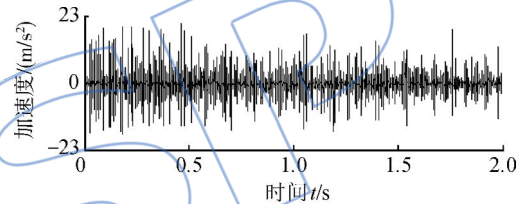
表 1 滚动轴承参数

Table 1 Parameters of rolling bearing

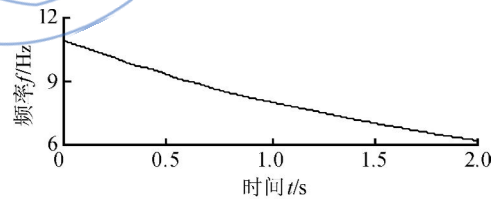
外径 D/mm	内径 d/mm	滚动体直径 d_0 /mm	接触角 $\alpha/^\circ$	滚动体 个数 Z
80	35	13.5	0	8

分别在齿轮 2 和轴承 4 上设置局部故障,为模拟齿轮断齿,在齿轮 2 上整体切割一个齿;为模拟齿轮裂纹,在齿轮 2 齿根处切割一条宽为 0.15 mm、深为 1 mm 的槽;为模拟轴承外圈故障,在轴承 4 外圈上切割出一条宽为 0.15 mm、深为 0.13 mm 的槽。振动加速度传感器直接置于轴承 4 的轴承盖上用于测取加速度信号;同时,光电式转速传感器安装在主动轴上用于获取实测转速信号,试验同时采集转速信号和振动加速度信号。采样频率设为 8192 Hz,采样时长为 2 s。

齿轮 2 断齿与轴承 4 外圈裂纹复合故障的振动加速度信号如图 8(a)所示,图 8(b)则为实测转速信号。从图 8 中可看出,随着转速的下降,振动加速度信号幅值逐渐减小。



(a) 振动加速度信号



(b) 转速信号

图 8 齿轮箱齿轮断齿与轴承外圈裂纹复合故障的振动加速度信号与转速信号

Fig. 8 Vibration acceleration signal and rotating speed signal of compound fault of gearbox with broken gear and outer race cracked bearing

对图 8(a)所示振动加速度信号进行 MCA,分离得到的各分量如图 9 所示,其中,图 9(a)为分离出的谐振分量,信号变化相对平缓,包含了齿轮故障信息;而图 9(b)为分离出的冲击分量,信号以冲击成分为主,包含了滚动轴承故障信息。

利用图 8(b)所测转速信号分别对图 9(a)和图 9(b)所示分量分别进行包络阶次分析,得到的包络阶次谱如图 10 所示。图 10(a)为谐振分量的包络阶次谱,图中可看出,转频阶次及其倍频阶次 $O_r \sim 2O_r$ 处有 2 个明显的峰值,说明谐振分量中存在转频调制现象;图 10(b)则为冲击分量的包络阶次谱,图中,在轴承局部故障特征阶次及其倍频

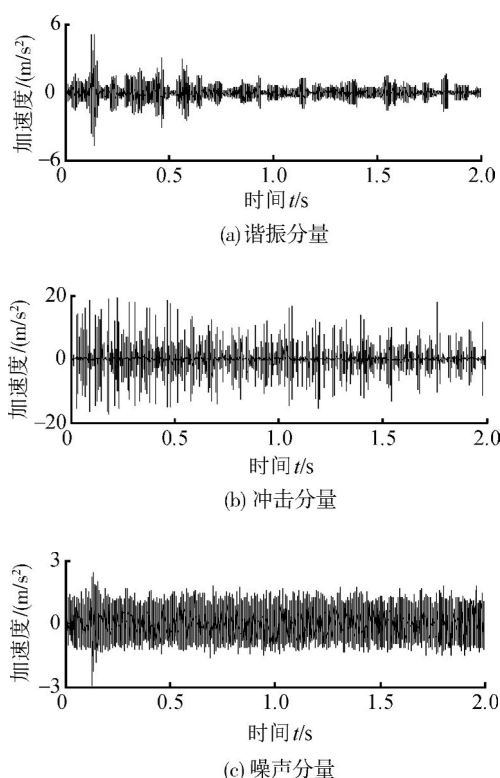


图 9 齿轮箱齿轮断齿与轴承外圈裂纹复合故障振动加速度信号的形态分量分析

Fig. 9 MCA of vibration acceleration signal of compound fault of gearbox with broken gear and outer race cracked bearing

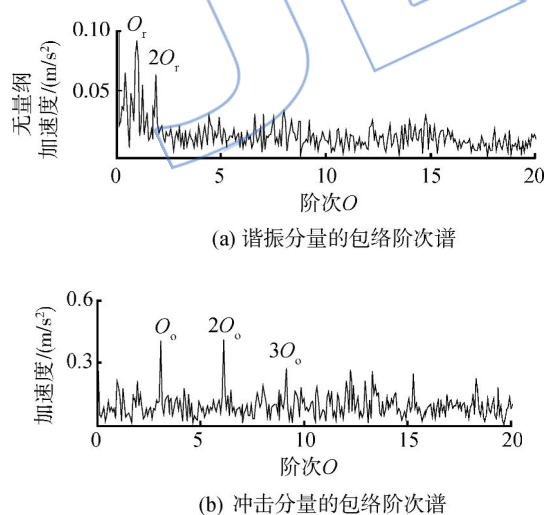


图 10 齿轮箱齿轮断齿与轴承外圈裂纹复合故障谐振分量和冲击分量的包络阶次谱

Fig. 10 Envelope order spectrum of harmonic component and impulse component of compound fault of gearbox with broken gear and outer race cracked bearing

阶次 $O_o \sim 3O_o$ 处存在 3 个明显的峰值,表明冲击分量中出现了轴承外圈故障特征频率调制现象。

直接对图 8(a)所示信号进行包络阶次分析,得到的包络阶次谱如图 11 所示,图中在轴承局部故障特征阶次 O_o 及其 2 倍频阶次 $2O_o$ 处峰值明显,但在转频阶次处峰值不突出。

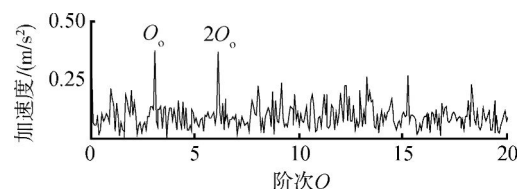


图 11 齿轮箱齿轮断齿与轴承外圈裂纹复合故障振动加速度信号的包络阶次谱

Fig. 11 Envelope order spectrum of vibration acceleration signal of compound fault of gearbox with broken gear and outer race cracked bearing

图 12(a)为齿轮 2 裂纹与轴承 4 外圈裂纹复合故障的振动加速度信号时域波形图,而图 12(b)为实测转速信号。从图 12 中可看出,随着转速信号的增大,振动加速度信号幅值逐渐增大。

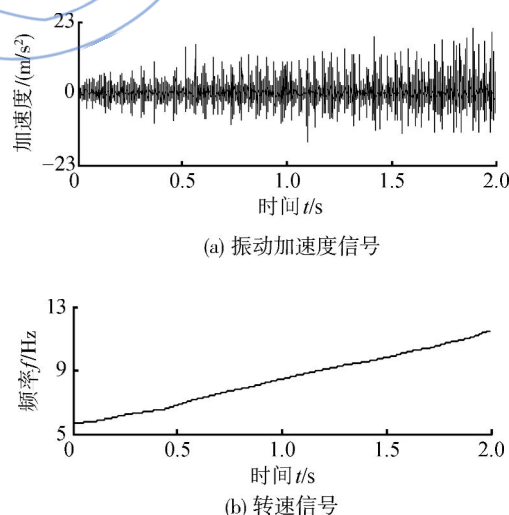


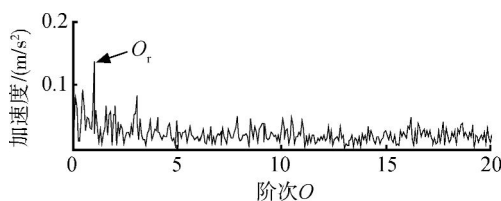
图 12 齿轮箱齿轮裂纹与轴承外圈裂纹复合故障的振动加速度信号与转速信号

Fig. 12 Vibration acceleration signal and rotating speed signal of compound fault of gearbox with cracked gear and outer race cracked bearing

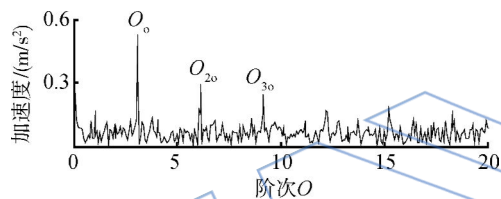
利用本文方法对图 12(a)所示信号进行分析,得到的各分量的包络阶次谱分别如图 13 所示。图 13(a)为谐振分量的包络阶次谱,图中可看出,转频阶次 O_r 处存在 1 个明显的峰值,表明谐振分量中存在转频调制现象;而图 13(b)为冲击分

量的包络阶次谱,图中,在轴承局部故障特征阶次及其倍频阶次 $O_0 \sim 3O_0$ 处出现了3个显著峰值,表明冲击分量中出现了轴承外圈故障特征频率调制现象。

对图12(a)所示信号直接进行包络阶次分析,得到的包络阶次谱如图14所示,图中,在 O_r 和 $O_0 \sim 3O_0$ 处均存在峰值,说明信号中同时出现了转频调制现象和轴承外圈故障特征频率调制现象。但对比图13和图14可知,图13有效分离了两种调制特征,更好地凸显了调制转频。



(a) 谐振分量的包络阶次谱



(b) 冲击分量的包络阶次谱

图13 齿轮箱齿轮裂纹与轴承外圈裂纹复合故障
谐振分量与冲击分量的包络阶次谱

Fig. 13 Envelope order spectrum of harmonic component and impulse component of compound fault of gearbox with cracked gear and outer race cracked bearing

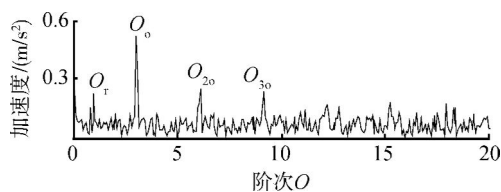


图14 齿轮箱齿轮裂纹与轴承外圈裂纹复合故障振动加速度信号的包络阶次谱

Fig. 14 Envelope order spectrum of vibration acceleration signal of compound fault of gearbox with cracked gear and outer race cracked bearing

5 结 论

本文将 MCA 与阶次跟踪算法相结合,提出了基于 MCA 与阶次跟踪的齿轮箱复合故障诊断方法,并将其应用于单通道变转速工况下的齿轮箱复合故障振动加速度信号中,主要结论如下:

1) 通过对变速转工况下齿轮箱复合故障振动加速度信号的分析表明,本文方法能有效分离变转速下的齿轮与滚动轴承局部故障特征,且从故障特征的分析效果看,本文方法要明显优于传统的包络阶次谱方法。

2) 本文将 MCA 用于单通道齿轮箱复合故障振动加速度信号的分析取得了较好的效果,但仍存在一些问题需进一步研究,如阈值函数的进一步优化、多形态成分的故障特征分离等。

参考文献:

- [1] 张含蕾,周洁敏,李刚. 基于小波分析的感应电动机复合故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):159-162.
ZHANG Hanlei, ZHOU Jiemin, LI Gang. Mixed fault diagnosis based on wavelet analysis in induction motors[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(8): 159-162. (in Chinese)
- [2] 杨宇,王欢欢,程军圣,等. 基于 LMD 的包络谱特征值在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 航空动力学报,2012,27(5):1153-1158.
YANG Yu, WANG Huanhuan, CHENG Junsheng, et al. Application of envelope spectrum characteristics based on LMD to roller bearing fault diagnosis[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 1153-1158. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] Starck J L, Moudden Y, Robin J. Morphological component analysis[J]. Proceedings of Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2005, 5914: 5914. 1-5914. 15.
- [5] 李映,张艳宁,许星. 基于信号稀疏表示的形态成分分析:进展和展望[J]. 电子学报,2009,37(1):146-152.
LI Ying, ZHANG Yanning, XU Xing. Advances and perspective on morphological component analysis based on sparse representation[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1): 146-152. (in Chinese)
- [6] Starck J L, Elad M, Donoho D. Redundant multiscale transforms and their application for morphological component separation[J]. Advances in Imaging and Electron Physics, 2004, 132(82): 287-348.
- [7] Elad M, Starck J L, Querre P. Simultaneous cartoon and texture image inpainting using morphological component analysis(MCA)[J]. Journal on Applied and Computational Harmonic Analysis, 2005, 19(3): 340-358.
- [8] 杨杰,郑海起,关贞珍,等. 基于形态成分分析的轴承复合故障诊断[J]. 轴承,2011(8):38-42.
YANG Jie, ZHENG Haiqi, GUAN Zhenzhen, et al. Compound fault diagnosis for bearings based on morphological component annlysis[J]. Bearing, 2011(8): 38-42. (in Chinese)
- [9] 李辉,郑海起,唐力伟. 基于改进形态分量分析的齿轮箱轴承多故障诊断研究[J]. 振动与冲击,2012,31(12):

- 135-140.
- LI Hui, ZHENG Haiqi, TANG Liwei. Bearing multi-fault diagnosis based on improved morphological component analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(12): 135-140. (in Chinese)
- [10] Heyns T, Godsill S J, Villiers J P, et al. Statistical gear health analysis which is robust to fluctuating loads and operating speeds[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 27(2): 651-666.
- [11] Borghesani P, Pennacchi P, Randall R B, et al. Order tracking for discrete-random separation in variable speed conditions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 30(1): 1-22.
- [12] Saavedra P N, Rodriguez C G. Accurate assessment of computed order tracking[J]. *Shock and Vibration*, 2006, 13(1): 13-32.
- [13] 郭瑜, 秦树人, 汤宝平, 等. 基于瞬时频率估计的旋转机械阶比跟踪[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(3): 32-36.
- GUO Yu, QIN Shuren, TANG Baoping, et al. Order tracking of rotating machinery based on instantaneous frequency estimation[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(3): 32-36. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] Chen S S, Donoho D L, Saunders M A. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. *Journal on Scientific Computing*, 1998, 20(1): 33-61.
- [16] Mallet S G, Zhang Z F. Matching pursuit with time-frequency dictionaries[J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [17] Bobin J, Starck J L, Fadili J. Morphological component analysis: an adaptive thresholding strategy [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2007, 16(11): 2675-2681.
- [18] GAO Hongye, Bruce A G. Waveshrink and semisoft shrinkage[R]. *Statistical Science Research Report*, No. 39, 1995.