

随机共振降噪下的齿轮微弱故障特征提取

赵 军 崔 颖 赖欣欢 孔 明 林 敏

中国计量学院,杭州,310018

摘要:针对强背景噪声下的齿轮微弱故障特征提取问题,提出了一种将级联单稳随机共振与经验模式分解(EMD)-Teager 能量算子解调方法相结合的特征提取方法。首先对含噪故障信号进行随机共振输出,降噪后再进行经验模式分解,分解得到具有不同特征时间尺度的固有模态函数(IMFs),最后通过 Teager 能量算子解调方法求取每个有效 IMF 分量的幅频信息,从而提取齿轮微弱故障特征。仿真分析和实际测试结果均表明,通过随机共振降噪后,该方法能有效检测出齿轮局部损伤故障特征频率。

关键词:级联;单稳随机共振;经验模式分解;Teager 能量算子

中图分类号:TN911.23;TP206.3

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.04.022

Weak Feature Extraction of Gear Faults Based on Stochastic Resonance Denoising

Zhao Jun Cui Ying Lai Xinhuan Kong Ming Lin Min

China Jiliang University, Hangzhou, 310018

Abstract: Aimed at the feature extraction problem of weak gear faults under strong background noise, an early feature extraction method was proposed based on cascaded monostable stochastic resonance(CMSR) system and EMD with Teager energy operator demodulating. Firstly CMSRS was employed as the preprocessing to remove noise, and then the denoised signals were decomposed into a series of intrinsic mode functions(IMFs) of different scales by EMD. Finally, Teager energy operator demodulating was applied to get amplitudes and frequencies of each effective IMF so as to extract the faint gear fault features. The simulation and application results show that the proposed method can detect the characteristic frequency of gear faults of local damage effectively after the noise reduction by CMSR.

Key words: cascaded; monostable stochastic resonance; empirical mode decomposition(EMD); Teager energy operator

0 引言

齿轮是机械设备中最常用也是最容易磨损的部件,诊断出齿轮的早期微弱故障特征对避免严重故障的发生、保证机械设备的正常运行具有重要意义。工程实际中存在的大量背景噪声严重降低了信噪比,很难检测出齿轮故障的早期特征。

Lei 等^[1]通过 WKNN(weighted k nearest neighbour)获得了齿轮裂纹信息,Lin 等^[2]则用综合小波分析等方式诊断出齿轮疲劳故障,但这些方式不易实现信息的降噪提取,远未达到早期故障诊断领域内的要求。目前,广泛应用于齿轮故障检测的经验模式分解(empirical mode decomposition,EMD)方法^[3]虽然能有效检测非线性非平稳信号特征,但在强噪声的影响下,EMD 方法也存在着模式混叠、虚假分量等问题,因此在对信号进行 EMD 之前需降噪处理。

随机共振方法利用信号与噪声在非线性系统中的协同作用,达到降噪的目的,此外通过级联方

式将高频噪声能量逐步向低频部分转移,具有良好的滤波和整形效果^[4]。Stocks 等^[5]发现了欠阻尼单稳随机共振现象,Grigorenko 等^[6-7]在不同单稳系统中也证实了单稳随机共振现象。随后,有关单稳系统的研究不断取得进展,万频等^[8]在 Evstigneev 的研究基础上给出了一种新型单稳系统,数值分析发现其信噪比增益局部区域大于 1 的情况。

对具有调制特征的齿轮振动信号,结合 Teager 能量算子的解调方法^[9],比具有加窗效应的 Hilbert 变换^[10]有优势,该方法特别适用于处理信噪比较高、瞬时频率变化缓慢的单分量调幅调频(AM-FM)信号,可有效提取单分量 AM-FM 信号的幅值包络和瞬时频率。

因此,本文在单稳态随机共振研究的基础上,通过级联方式将该非线性系统应用于信号降噪,将消噪信号进行 EMD 之后得到若干个固有模态函数(intrinsic mode function,IMF)之和,从而获得单分量的 AM-FM 信号,再通过 Teager 能量算子解调,获得各阶 IMF 分量中的调制信息,以达到齿轮早期故障特征的有效提取目的。

收稿日期:2012-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10972207,60908039);

浙江省公益性应用研究计划资助项目(2013C31098)

1 方法原理

1.1 级联单稳随机共振

信号和噪声输入随机共振系统时,主要通过特征时间的差异来区分信号和噪声,所以需使系统的特征时间(系统的松弛时间 τ) 介于噪声的特征时间(自相关时间) 和信号的特征时间(信号周期) 之间。由于系统响应速度($1/\tau$) 的局限性,双稳系统能处理的信号特征频率通常很低,而单稳随机共振的特征时间比阶跃运动的特征时间要短很多,所以单稳随机共振情况下,信号特征频率的处理范围相对较宽^[11]。设单稳系统的势函数^[8] 为

$$U(x) = \frac{2}{3}a|x|^{3/2} + \frac{1}{4}bx^4 \quad (1)$$

式中, a, b 为系统的结构参数。

在过阻尼限制即忽略惯性作用的情况下,郎之万方程取其原型:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{dU(x)}{dx} + A\cos\omega t + \xi(t) \quad (2)$$

其中, $U(x)$ 为势函数; $A\cos\omega t$ 是幅值为 A 、频率为 ω 的周期性驱动信号; $\xi(t)$ 为高斯白噪声且 $\langle \xi(t) \rangle = 0, \langle \xi(t)\xi(t') \rangle = 2D\delta(t-t')$ 。则有

$$dx/dt = -a\sqrt{|x|}\operatorname{sgn}x - bx^3 + A\cos\omega t + \xi(t) \quad (3)$$

如图 1 所示,级联方式是指输入信号 $s(t)$ 与噪声 $n(t)$ 组成的混合信号 $s_n(t)$ 通过串联的随机共振系统,以前一级 $U_1(x)$ 的输出 $x_1(t)$ 作为后一级 $U_2(x)$ 的输入,使得噪声在经过多级随机共振系统后,谱能量主要集中在低频区域,系统将噪声在低频区域所聚集的能量逐级增大,输入信号更易在噪声的协同作用下形成以信号频率作切换运动的随机共振现象。

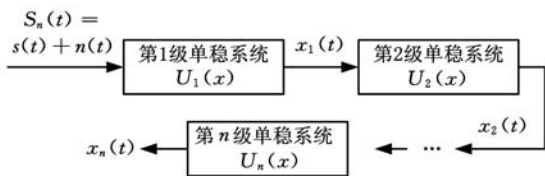


图 1 级联单稳随机共振系统

1.2 EMD 方法

EMD 方法的实质是采用特征时间尺度来表征信号中所内涵的固有模态函数,分解过程如下:

(1) 计算被分解信号 $x(t)$ 的所有极大值和极小值,用 3 次样条函数分别拟合得到上下包络线,继而得到平均包络线 $m_1(t)$,从而得到滤除低频走势的数据序列 $h_1(t)$,即

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (4)$$

若 $h_1(t)$ 不是基本模式分量,则可将其按式

(4) 重复 k 次直至 $h_k(t)$ 是一个基本模式分量,即

$$h_k(t) = h_{k-1}(t) - m_k(t) \quad (5)$$

(2) 记 $f_1(t) = h_1(t)$ 为从 $x(t)$ 中得到的第 1 个 IMF 分量,则从 $x(t)$ 中减去 $f_1(t)$ 得到剩余信号为

$$r_1(t) = x(t) - f_1(t) \quad (6)$$

重复式(4)~式(6)的计算步骤,依次分解得

$$\left. \begin{aligned} r_2(t) &= r_1(t) - f_2(t) \\ r_3(t) &= r_2(t) - f_3(t) \\ &\vdots \\ r_n(t) &= r_{n-1}(t) - f_n(t) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

直至所剩余信号 $r_n(t)$ 变成一个单调函数,不能再筛选出基本模式分量为止。最后信号被分解为 n 个基本模式分量 $f_i(t)$ 和一个余项 $r_n(t)$,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t) + r_n(t) \quad (8)$$

式(8)表明信号的经验模式分解具有完备性。

在 EMD 分解的过程中,为消除虚假 IMF 分量的影响,采用互信息分量筛选法^[12],设 \bar{I} 为各个 IMF 分量与原始信号互信息值的均值,则

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n H_i \quad (9)$$

其中, N 为原始信号 EMD 分解得到的 IMF 分量的个数,若 IMF 分量与原始信号的互信息值 H_i 大于 \bar{I} ,则认为该分量为真实分量,否则为虚假分量予以剔除。

1.3 Teager 能量算子解调

Teager 能量算子 (Teager energy operator, TEO) 是 Teager 在研究非线性语音建模引入的算法^[13],连续信号 $x(t)$ 的能量算子定义为

$$\phi_d[x(t)] = \dot{x}^2(t) - x(t)\ddot{x}(t) \quad (10)$$

式中, $\dot{x}(t), \ddot{x}(t)$ 分别为信号 $x(t)$ 对应时间 t 的一阶微分和二阶微分。

离散信号 $x(n)$ 的能量算子定义为

$$\phi_d[x(n)] = x^2(n) - x(n-1)x(n+1) \quad (11)$$

记 $x(n) = a(n)\cos\varphi(n)$,瞬时频率 $\omega(n)$ 定义为相位函数 $\varphi(n)$ 的向后差分,即

$$\omega(n) = \varphi(n) - \varphi(n-1) \quad (12)$$

对 $x(n)$ 进行非线性运算得

$$\phi_d[x(n)] = a^2(n)\cos^2\varphi(n) - a(n-1)a(n+1)\cos[\varphi(n-1)]\cos[\varphi(n+1)] \quad (13)$$

由于调制信号的变化比载波的变化慢得多,此时 $a(n)$ 和 $\omega(n)$ 相对于载波的变化是缓慢的,故近似有

$$\left. \begin{aligned} a(n-1) &= a(n+1) = a(n) \\ \varphi(n+1) - \varphi(n-1) &= 2\omega(n) \\ \varphi(n+1) + \varphi(n-1) &= 2\varphi(n) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式(13)可化简为

$$\psi_d[x(n)] = a^2(n)\sin^2\omega(n) \quad (15)$$

若记 $y(n) = x(n) - x(n-1)$, 同理可得

$$\psi_d[y(n)] = 4a^2(n)\sin^2[\omega(n)/2]\sin^2\omega(n) \quad (16)$$

联立式(15)、式(16), 可得

$$\omega(n) = \arccos\left\{1 - \frac{\psi_d[y(n)]}{2\psi_d[x(n)]}\right\} \quad (17)$$

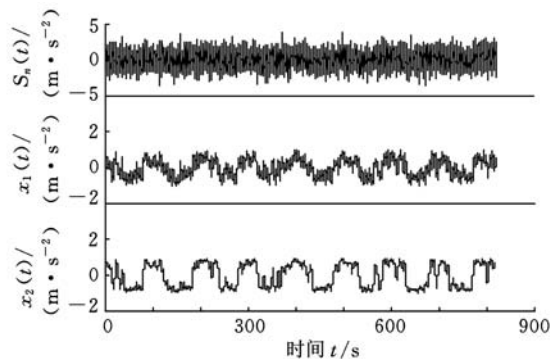
$$|a(n)| = \sqrt{\frac{\psi_d[x(n)]}{\psi_d[x(n)] + \left\{\frac{\psi_d[y(n)]}{2\psi_d[x(n)]}\right\}^2}} \quad (18)$$

TEO 分离算法计算离散时间信号时, 在每一个瞬时时刻只需要 3 个采样点就能计算获得信号源能量, 对于信号的瞬态成分具有良好的时间分辨率。

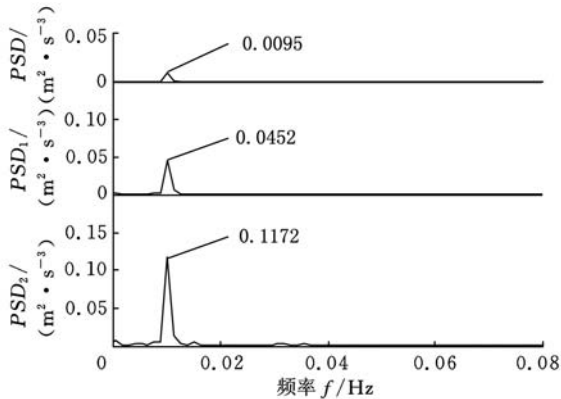
2 仿真信号分析

2.1 级联单稳随机共振效应分析

对式(3)的过阻尼朗之万方程, 采用 4 阶格库塔方法求解, 计算步长 $h = 1/f_s$ (采样频率 $f_s = 10\text{Hz}$), 微弱的余弦信号幅值 $A = 0.2\text{m/s}^2$, 频率 $\omega = 0.02\pi\text{s}^{-1}$, 数据长度为 8192。图 2a 所示为系统输入的含噪信号的时域波形以及一级、二级单稳系统输出信号, 图 2b 所示为对应的含噪信号的功率谱。当系统结构参数 $a = 0.1, b = 1$ 时, 系统信噪比增益随噪声强度的不断增大而呈现出随机共振峰, 当噪声强度 $D = 0.5$ 时取得最大值, 故参



(a) 时域波形



(b) 功率谱

图 2 含噪余弦信号级联单稳随机共振输出

数选取为噪声强度 $D = 0.5$, 信噪比 $\text{SNR} = S/X = S/[P - S(f_0)]$, 其中, S 为信号在频率 f_0 处的功率, X 为系统总功率 P 减去 S 后的噪声功率。该式能较为全面地描述信号与噪声的功率对比关系, 符合信号检测等工程实践中信噪比的定义。从时域波形可以看出, 级联单稳随机共振系统具有较好的降噪特性, 时域波形逐渐光滑而清晰显现出信号特征, 相应的一级级联输出信号和二级级联输出信号的功率谱中的特征频率幅值也明显增大, 随机共振效应得到增强。

2.2 齿轮局部损伤故障仿真分析

当齿轮存在局部磨损、裂纹等故障时, 其振动信号具有调制特征, 忽略传递函数对齿轮振动信号的影响, 传感器测得的箱体表面的齿轮故障振动信号^[14]为

$$X(t) = \sum_{m=1}^M A_m [1 + d_m(t)] \cos[2\pi z f_r t + b_m(t) + \varphi_m] \quad (19)$$

式中, A_m 为第 m 阶啮合频率谐波分量的幅值; $d_m(t)$ 、 $b_m(t)$ 分别为第 m 阶啮合频率谐波分量的幅值和相位调制函数; z 为齿轮齿数; f_r 为轴频; φ_m 为第 m 阶啮合频率的初相位。

齿轮出现局部故障时, 故障齿随轴每周啮合一次, 因此 $d_m(t)$ 和 $b_m(t)$ 是以故障齿所在轴转频及其倍频为调制频率的周期函数。齿轮发生局部损伤尤其是轻微损伤时, 损伤部位引起的振动能量变化量占总体能量的变化量较小, 易被强噪声背景所淹没而影响诊断结果。仿真信号解析表达式为

$$x(t) = (1 + 0.3\sin 30\pi t) \cos(120\pi t + 0.5\sin 40\pi t) + \sin 200\pi t \quad (20)$$

仿真信号的组成: 基频为 60Hz, 微弱的调幅信号为 15Hz, 调频信号为 20Hz, 以及一个正弦信号。添加一个均值为零、噪声强度为 D 的高斯白噪声。

在强背景噪声下, 仿真信号的 EMD 分解结果如图 3 所示, 采样频率 $f_s = 1000\text{Hz}$, 数据长度为 8192, 强噪声的干扰使得分解出的 IMF 分量存在较多的虚假分量, 通过互信息分量筛选法得到包含主要信息成分的分量 $\text{IMF}_1, \text{IMF}_2, \dots, \text{IMF}_5$, 利用 TEO 计算相应分量的瞬时幅值, 包络解调后, 从图 3 的解调谱中可以看到, 在分量 IMF_3 中出现了微弱的幅值调制频率 (为 15Hz)。图 4 所示为经过一级级联单稳随机共振系统降噪后, 通过对 EMD 分解得到的各阶 IMF 分量, 进行 TEO 解调后所得的解调谱。仿真信号为大参数信号, 故采用变尺度方法, 二次采样频率^[15] $f_{sr} = f_s/R = 10\text{Hz}$, 频率尺度压缩比 $R = 100$,

采样长度不变。级联系统参数 $a = 0.1, b = 1$ 时, 噪声强度 $D = 0.55$, 此时随机共振效应最为明显, 尺度恢复后幅值调制频率 15Hz 出现在分量 IMF_2 中。图 5 所示为仿真信号经过二级级联单稳随机共振系统降噪后, 通过对 EMD 分解得到的各阶 IMF 分量, 采用变尺度方法进行二次采样, 尺度恢复后分解出的分量 IMF_1 进行 TEO 解调, 所得的解调谱中即出现了更为明显的幅值调制频率 15Hz。

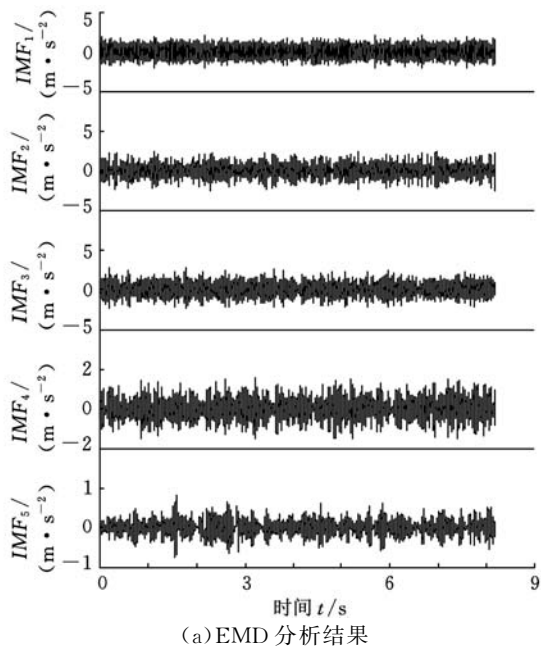
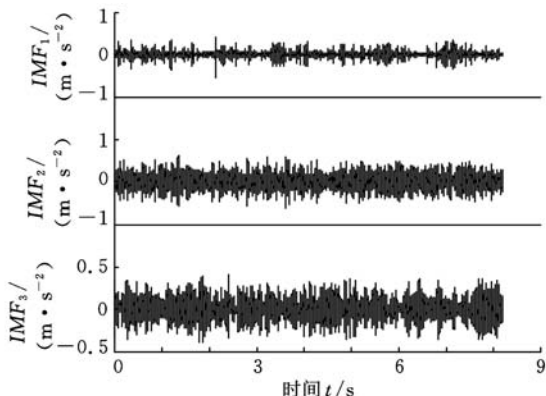


图 3 含噪仿真信号的 EMD 及 TEO 解调谱

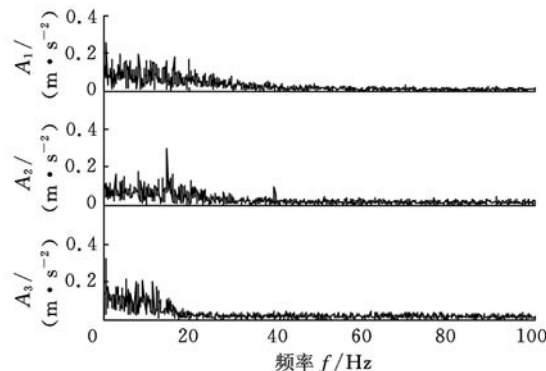
3 汽车变速器齿轮故障诊断

3.1 齿轮故障诊断系统

实验在汽车变速器振动分析台架上进行, 实

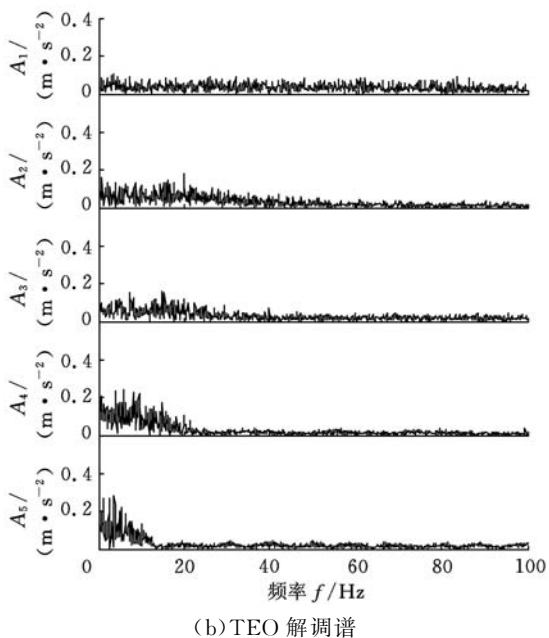


(a) EMD 分析结果

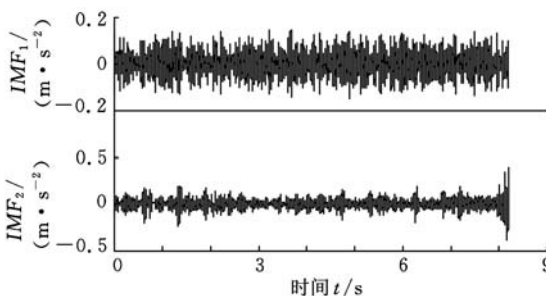


(b) TEO 解调谱

图 4 一级单稳随机共振输出后仿真信号的 EMD 及 TEO 解调谱



(a) EMD 分析结果



(b) TEO 解调谱

图 5 二级单稳随机共振输出后仿真信号的 EMD 及 TEO 解调谱

验用某型汽车变速器为手动横置前驱机械式(有 5 个前进挡和 1 个倒挡, 并带差速器总成)。试验通过三相异步交流电机模拟汽车变速器总成的动力输入, 手动调节 1~5 挡及倒挡, 在各个挡位、不同转速、空载条件下, 由 PCI 四通道高速同步数

采卡采集加速度传感器的信号,每通道信号初始采样频率为 5kHz。图 6 为变速结构简图, I 轴为输入轴, II 轴为输出轴, I 轴的动力输入由三相异步交流电机提供,传感器布置于箱体的 I 轴正上方。

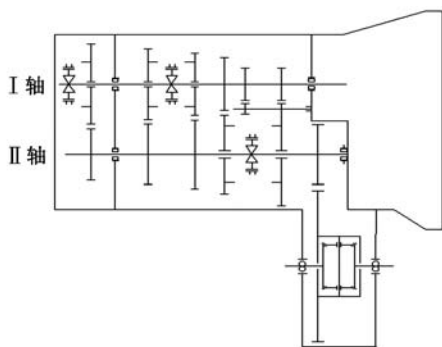


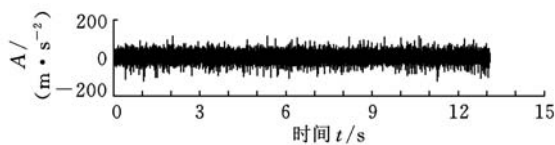
图 6 某型变速箱结构简图

3.2 实测信号分析

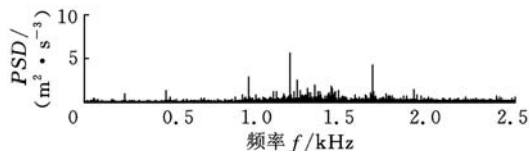
齿轮齿面磨损失效中,当一对啮合的齿轮副存在非均匀磨损的故障时,箱体的振动信号主要特征^[13]表现为:①出现了齿轮副的啮合频率调制,载波频率为齿轮副的啮合频率及其谐波,调制频率为故障齿轮所在轴转频及其倍频,在频谱图上可观察到在啮合频率及其倍频附近有幅值较小且稀疏的边频带;②齿轮啮合频率及其谐波的幅值明显增大,阶数越高,幅值增大的幅度越大,同时振动能量(有效值及峭度等)有较大幅度的增加。

在相同工况下,对同型号的 2 个正常及带有故障的变速器进行测试,分别采集惰轮得正常振动信号及非均匀磨损故障信号。实测数据的 I 轴转速为 1200r/min,倒挡齿轮输入轴齿数 $Z_1=12$,输出轴齿数 $Z_2=40$,啮合频率 $f_z=240\text{Hz}$,惰轮轴上的惰轮的齿数 $Z_3=27$,对应 I 轴转频 $f_{r1}=20\text{Hz}$,II 轴转频 $f_{r2}=6\text{Hz}$,惰轮轴转频 $f_{r3}=8.88\text{Hz}$ 。图 7 所示为正常惰轮啮合的信号时域波形及频谱,对比图 8 中惰轮的非均匀磨损故障的啮合信号的时域波形及频谱可以看出,图 8b 中的齿轮啮合频率及其高次谐波 ($4f_z, 5f_z, 7f_z$) 幅值可见且分布稀疏,图 8b 中的齿轮啮合频率及其高次谐波 ($4f_z \sim 9f_z$) 幅值较大,而正常信号的频谱图 7c 中 I 轴转频 $f_{r1}=20\text{Hz}$ 及其 3 倍频成分 $3f_{r1}=60\text{Hz}$ 较明显,图 8c 低频部分谱线杂乱,谱图中无法确定故障特征频率。

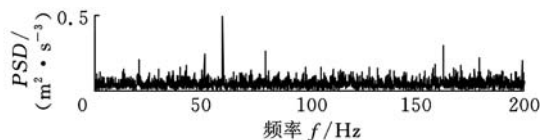
先对惰轮的非均匀磨损故障信号进行 EMD 分解,如图 9 所示,通过互信息分量筛选法得到包含主要信息成分的分量 $IMF_1 \sim IMF_6$,相应对分量 $IMF_1 \sim IMF_6$ 作 TEO 解调后,在得到的解调



(a) 正常齿轮振动信号时域波形

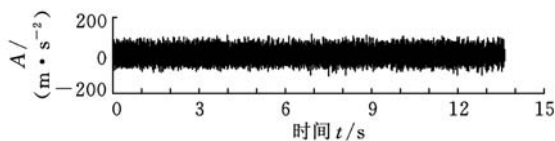


(b) 正常齿轮振动信号频谱图(0 ~ 2.5kHz)

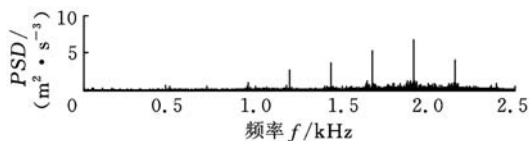


(c) 正常齿轮振动信号频谱图(0 ~ 200Hz)

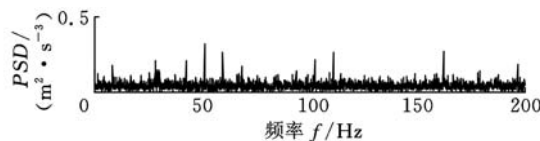
图 7 正常齿轮振动信号时域波形及频谱图



(a) 故障齿轮信号时域波形



(b) 故障齿轮信号频谱图(0 ~ 2.5kHz)



(c) 故障齿轮信号频谱图(0 ~ 200Hz)

图 8 故障齿轮信号时域波形及频谱图

谱图中无法得到调制特征频率,在图 10a、图 10b 中均存在微弱的 I 轴转频 $f_{r1}=20\text{Hz}$ 、II 轴转频 $f_{r2}=6\text{Hz}$ 及惰轮轴转频 $f_{r3}=8.88\text{Hz}$,图 10c ~ 图 10f 已难以确定特征频率,这说明强噪声背景下的特征信号已经被淹没。

因此,有必要对输入信号进行降噪处理,图 11 所示为含噪信号输入至一级单稳随机共振系统后再进行 EMD 分解,变尺度处理后二次采样频率 $f_{sr}=f_s/R=50\text{Hz}$,则频率尺度压缩比 $R=100$,采样长度不变,由于事先可计算得出系统的故障特征频率,故采用相关估计法,粗略估计得噪声强度与前述仿真所得的范围相当,故一级单稳系统参数取为 $a=0.1, b=1$,尺度恢复后再作 TEO 解调,发现在分量 $IMF_2 \sim IMF_6$ 瞬时幅值 ($A_2 \sim A_6$) 的包络谱图(图 11)中出现了较为明显的惰轮轴转频 $f_{r3}=8.85\text{Hz}$ (理论值为 8.88Hz)

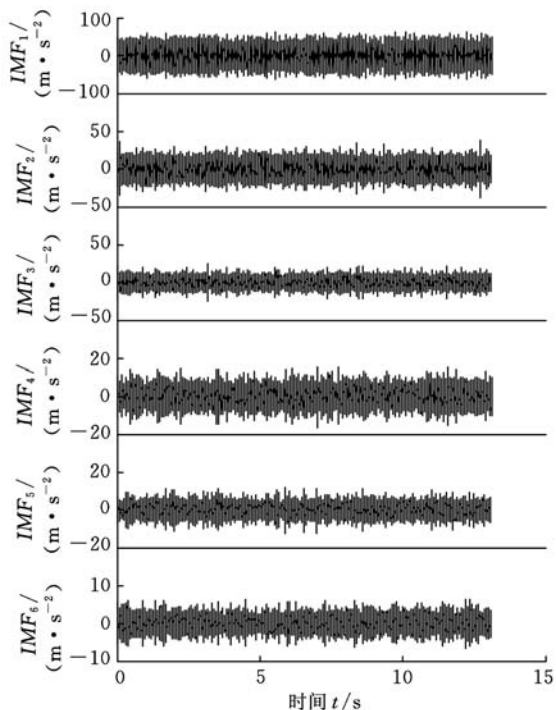


图 9 齿轮故障振动信号的 EMD 分析结果

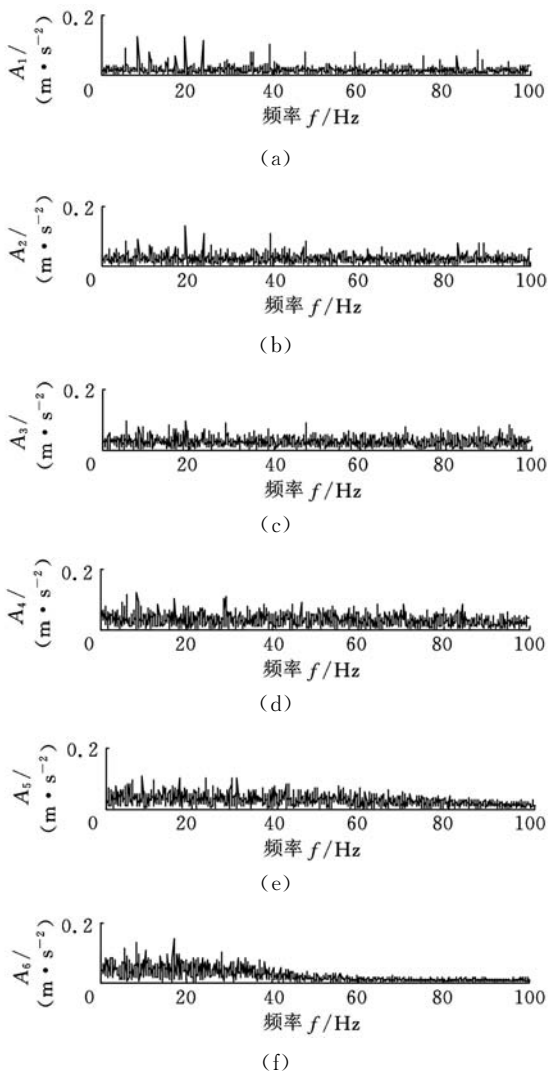
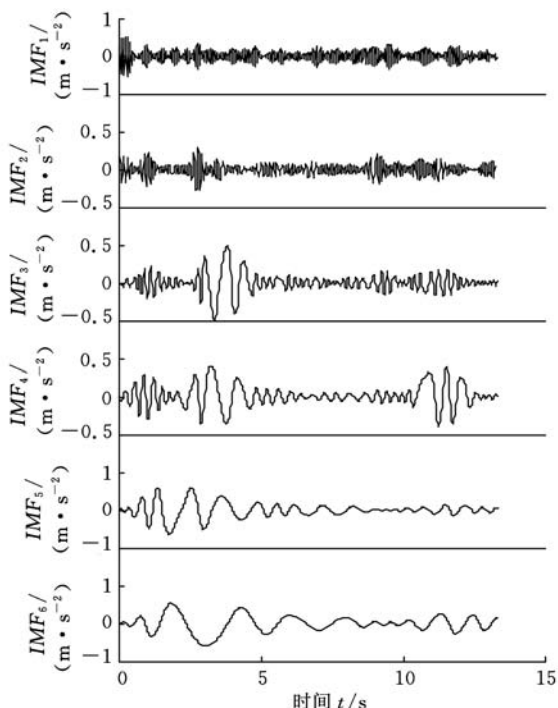
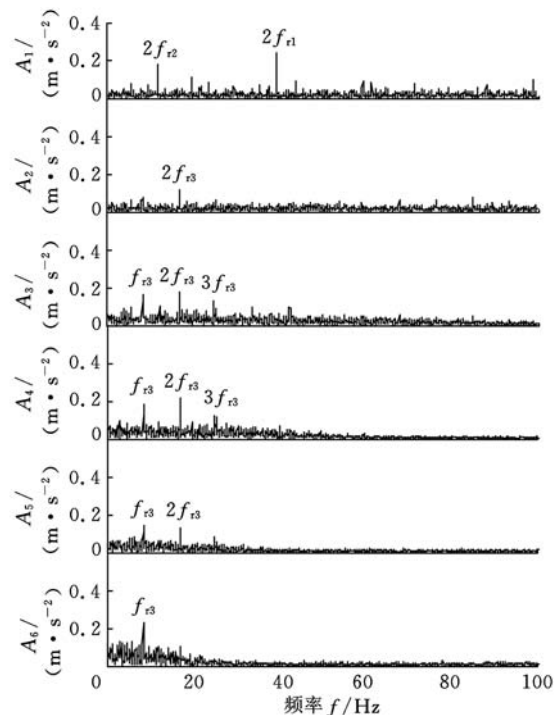


图 10 齿轮故障振动信号的 TEO 解调谱

及其倍频 $2f_{r3}=17.7\text{Hz}$ 、 $3f_{r3}$ 成分,而 IMF_1 的幅值 A_1 则存在 $2f_{r2}=12\text{Hz}$ 及 $2f_{r1}=40\text{Hz}$,可初步判断故障轴为惰轮轴。



(a) EMD 分析结果



(b) TEO 解调谱

图 11 一级单稳随机共振输出后齿轮故障信号的 EMD 及 TEO 解调谱

图 12 所示为含噪信号输入至二级单稳随机共振系统后再进行 EMD 分解,二级单稳系统参数也取为 $a=0.1$ 、 $b=1$,尺度恢复后作 TEO 解调,分量 $IMF_1 \sim IMF_3$ 瞬时幅值的包络谱(图 13a~图

13c)中出现了更为明显的惰轮轴转频 8.85Hz(理论值 8.88Hz)及其二倍频、三倍频成分,能量幅度较一级单稳系统输出更高,更加有效地检测出了在强噪声背景下的齿轮微弱故障的调制频率。

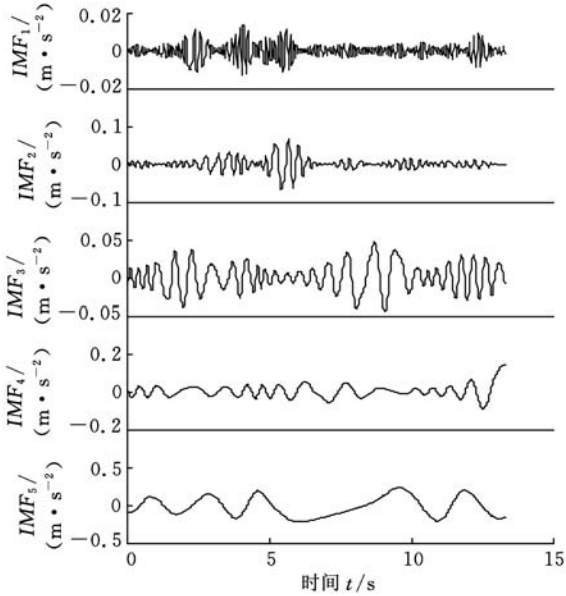


图 12 二级单稳随机共振输出后齿轮故障信号的 EMD

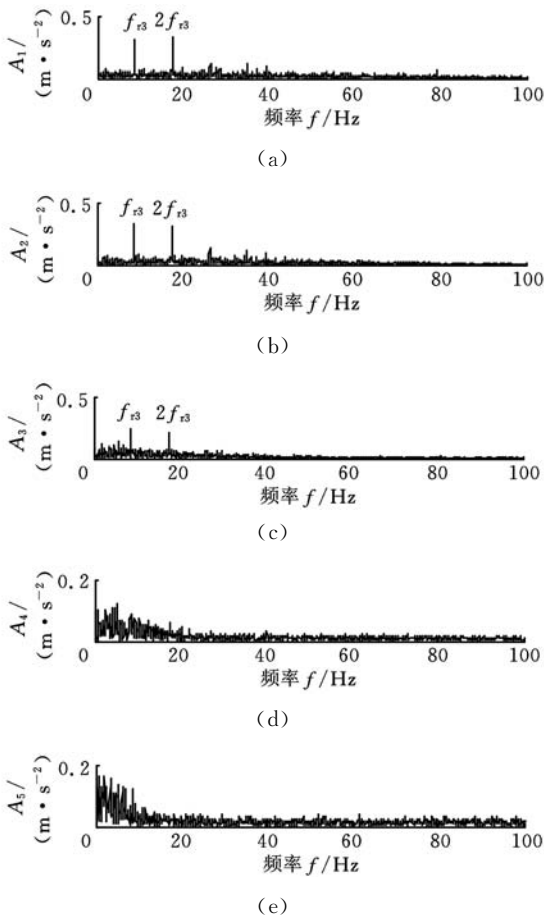


图 13 二级单稳随机共振输出后齿轮故障信号的 TEO 解调谱

4 结语

本文在对单稳态随机共振系统研究的基础

上,结合 EMD 分解及 Teager 能量算子解调方法,提出了检测强噪声背景下齿轮局部损伤故障的诊断方法。该方法充分利用单稳随机共振系统能处理较宽频率范围信号特性,以及 Teager 能量算子解调方法相对于 Hilbert 变换解调的优越性,并结合级联随机共振系统的低通滤波原理,在逐步滤除高频干扰的同时,不断加强低频特征成分能量,提高了运算效率。仿真及实验结果均表明,该方法有利于检测具有微弱调制故障特征的振动信号,为机械设备的早期故障诊断提供了新的参考。

参考文献:

- [1] Lei Y G, Zuo M J. Gear Crack Level Identification Based on Weighted K Nearest Neighbor Classification Algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(5): 1535-1547.
- [2] Lin J, Zuo M J. Gearbox Fault Diagnosis Using Adaptive Wavelet Filter[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(6): 1259-1269.
- [3] Huang N E, Shen Zheng, Long S R. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Non-linear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proceeding of Royal Society of London A, 1998, 454: 903-995.
- [4] 冷永刚, 王太勇, 胡世广, 等. 级联双稳系统的随机共振特性[J]. 物理学报, 2005, 54(3): 1118-1124. Leng Yonggang, Wang Taiyong, Hu Shiguang, et al. Stochastic Resonance Behaviors of Bistable Systems Connected in Series[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(3): 1118-1124.
- [5] Stocks N G, Stein N D, McClintock P V E. Stochastic Resonance in Monostable Systems[J]. Phys. Rev. E, 1993, 26(7): 385-390.
- [6] Vilar J M G, Rubf J M. Divergent Signal-noise Ratio and Stochastic Resonance in Monostable Systems [J]. Phys. Rev. Lett., 1996, 77(4): 2863-2866.
- [7] Grigorenko A N, Nikitin S I, Roschepkin G V. Stochastic Resonance at Higher Harmonics in Monostable Systems[J]. Phys. Rev. E, 1997, 56(5): 4907-4910.
- [8] 万频, 詹宜巨, 李学聪, 等. 一种单稳随机共振系统信噪比增益的数值研究[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 53-59. Wan Pin, Zhan Yiju, Li Xuecong, et al. Numerical Research of Signal-to-noise Ratio Gain on a Monostable Stochastic Resonance[J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60(4): 53-59.
- [9] 程军圣, 于德介, 杨宇. 基于 EMD 的能量算子解调

基于近似因子分解法的铸造充型过程数值模拟研究

牛晓峰¹ 王冠乾¹ 梁伟¹ 侯华²

1. 太原理工大学, 太原, 030024 2. 中北大学, 太原, 030051

摘要: 目前求解流动过程中速度场、压力场最常用的方法是 SOLA 法, 在求解过程中由于需要在连续性方程、动量方程间反复迭代, 所以计算效率不高。采用近似因子分解法进行速度场、压力场求解, 由于在求解过程中每一步均可采用托马斯算法求解三对角方程, 所以计算简单, 可有效提高计算效率。最终建立了基于有限差分法的流动场数值模拟程序, 并针对 Benchmark 件进行了充型过程流动场数值模拟, 通过对比模拟结果与实验结果, 验证了计算模型的正确性。

关键词: 近似因子分解法; 速度场; 压力场; 数值模拟

中图分类号: TG244.3

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.04.023

Numerical Simulation of Casting Filling Process Based on Approximate Factorization Method

Niu Xiaofeng¹ Wang Guanqian¹ Liang Wei¹ Hou Hua²

1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024 2. North University of China, Taiyuan, 030051

Abstract: To simulate the flow patterns of casting filling, a SOLA method was used for calculating the pressure and the velocity fields. Because of repeated iteration, the computational efficiency was low. Herein, an approximate factorization scheme was applied in numerical solution of the pressure and the velocity fields. The finite difference program was established to calculate filling process. In order to demonstrate the correctness of this new program, a benchmark filling experiment was simulated. The simulated results agree very well with the experimental results and this new program can be used to properly predicate the mold filling simulation in casting.

Key words: approximate factorization method; velocity field; pressure field; numerical simulation

0 引言

铸造充型过程被认为是一个不可压缩流的非

定常流动现象, 其液态金属流动时所遵循的质量守恒定律和牛顿第二定律采用连续性方程、动量方程描述。目前求解 Navier-Stokes 方程的主要方法有 SIMPLE 法、MAC 法和 SOLA 法等。

收稿日期: 2013-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51304145, 51301118)

方法及其在机械故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2004, 40(8): 115-118.

Cheng Junsheng, Yu Dejie, Yang Yu. Energy Operator Demodulating Approach Based on EMD and Its Application in Mechanical Fault Diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8): 115-118.

[10] Alexandros P, Petros M. A Comparison of the Energy Operator and Hilbert Transform Approach to Signal and Speech Demodulation[J]. Signal Processing, 1994, 37(1): 95-120.

[11] Alfonsi L, Gammaitoni L, Santucci S, et al. Intra-well Stochastic Resonance Versus Interwell Stochastic Resonance[J]. Phys. Rev. E, 2000, 62(1): 299-302.

[12] Peng Z K, Peter W T, Chu F L. An Improved Hilbert Huang Transform and Its Application in Vibration Signal Analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286(23): 187-205.

[13] Teager H M. Some Observations on Oral Air Flow

during Phonation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1980, 25(5): 599-601.

[14] 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.

[15] 冷永刚, 王太勇, 李瑞欣, 等. 变尺度随机共振用于机电故障的监测诊断[J]. 中国机电工程学报, 2003, 23(11): 111-115.

Leng Yonggang, Wang Taiyong, Li Ruixin, et al. Scale Transformation Stochastic Resonance for the Monitoring and Diagnosis of Electromotor Faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 111-115.

(编辑 张洋)

作者简介: 赵 平, 男, 1960 年生。中国计量学院计量测试工程学院教授级高级工程师。主要研究方向为机械振动噪声控制与信号处理等。发表论文 20 余篇。崔 颖, 女, 1989 年生。中国计量学院计量测试工程学院硕士研究生。赖欣欢, 男, 1987 年生。中国计量学院计量测试工程学院硕士研究生。孔 明, 男, 1978 年生。中国计量学院计量测试工程学院教授。林 敏, 男, 1962 年生。中国计量学院计量测试工程学院教授。