

行星齿轮箱耦合调制振动信号 分离与故障诊断

陈 伟, 王友仁, 孙灿飞, 孙 权, 王 俊
(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211106)

摘 要: 针对故障状态下行星齿轮箱振动信号通常表现为稳态调制和冲击调制成分耦合问题, 建立不同求解模型, 提出耦合调制振动信号分离方法。应用稀疏全变分模型实现冲击调制成分分离, 采用改进的非对称惩罚函数, 根据峭度系数与方均根系数指标构建正则化参数优选策略, 采用受控极小化 (majorization-minimization, MM) 方法进行模型求解; 采用基追踪实现稳态调制成分分离。试验结果分析表明: 该方法在噪声 D 为 0.15 的信号中能快速分离出微弱冲击调制成分, 算法迭代次数少、收敛效果好。

关 键 词: 行星齿轮箱; 耦合调制; 全变分模型; 故障诊断; 受控极小化

中图分类号: V231.9; TH17

文献标志码: A

Coupled modulated vibration signal component separation and fault diagnosis of planetary gearbox

CHEN Wei, WANG Youren, SUN Canfei, SUN Quan, WANG Jun
(College of Automation Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Aiming at the status that planetary gearbox vibration signal is usually appeared as coupling problem of steady state modulation component and shock modulation component under fault condition, different solution models have been established and a new method for the separation of coupled modulated vibration signals has been proposed. Shock modulated component separation was realized by the application of sparse total variation model, using an improved asymmetric penalty function, according to a strategy of coefficient of kurtosis and selection of regularization parameters based on mean square index, using majorization-minimization (MM) to solve the model. Steady state component separation was achieved by using base tracking. Simulation and experimental results verify the effectiveness of the proposed method for the separation and separation of vibration signals of planetary gearbox in a strong noise environment. The results of experimental show that this method can quickly isolate the weak shock modulation components under the noise D of 0.15. The

收稿日期: 2016-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(61371041); 航空科学基金(2013ZD52055);

国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(SAMC14-JS-15-051);

研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20160305)

作者简介: 陈伟(1991—), 男, 硕士生, 主要研究方向为航空设备故障诊断。E-mail: weichen_cole@126.com

通讯作者: 王友仁(1963—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要研究方向为检测技术与信号处理、机载设备健康监测、航空设备健康预报技术。E-mail: wangyurac@nuaa.edu.cn

引用格式: 陈伟, 王友仁, 孙灿飞, 等. 行星齿轮箱耦合调制振动信号分离与故障诊断[J]. 航空动力学报, 2018, 33(5): 1112-1120.
CHEN Wei, WANG Youren, SUN Canfei, et al. Coupled modulated vibration signal component separation and fault diagnosis of planetary gearbox[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(5): 1112-1120.

algorithm has fewer iteration times and better convergence effect.

Key words: planetary gearbox; coupled modulation; total variation model; fault diagnosis; majorization-minimization

行星齿轮箱广泛应用于风电机组、直升机主减速器等复杂传动系统中,其体积小、传动比大、承载效率高、环境恶劣以及工况多变性导致故障发生概率大,因此行星齿轮箱故障诊断具有重要的经济效益和军事意义^[1-2]。行星齿轮箱在自身复杂的运动特点和动力学本质以及多变的环境激励的综合作用下,使其振动信号的复杂性、时变性以及调制特征非常明显,导致采用以往针对定轴齿轮箱故障诊断的方法难以奏效。行星齿轮箱正常状态下不可避免的存在齿轮安装误差,以及齿轮发生局部故障状态下,如齿轮点蚀、裂纹、断齿、剥落等故障导致齿轮副啮合力之间相互作用,产生冲击调制信号,而行星齿轮箱啮合振动、均匀磨损等造成啮合振动的调幅调频效应,产生稳态调制信号^[3]。行星齿轮局部故障下,稳态调制成分与冲击调制以及噪声成分相互耦合^[4],因此对耦合振动信号分析是行星齿轮箱故障诊断的关键。

针对行星齿轮箱复杂振动信号,目前常用的处理主要采用小波阈值降噪法^[5]、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)去噪法^[6]、谱峭度滤波法^[7-8]、随机共振法^[9-10]等,该方法主要通过消除或抑制噪声实现故障特征增强与故障特征提取,并取得了一定的效果,但当干扰成分与信号特征成分频带相互重叠时,无法实现信号的有效分离。稀疏分解具有良好的抗噪性和稀疏表达能力,具有良好的应用前景。文献[11]采用了匹配追踪方法,该方法较好的实现冲击信号的提取,并证明该方法在强背景噪声下比 Morlet 小波软阈值法具有更好的效果。文献[12]结合最大相关峭度解卷积与稀疏编码收缩去噪算法,应用于齿轮的点蚀故障诊断,实现了冲击特征提取,验证了该方法在实际工程应用中的有效性。文献[13]采用了受控极小化方法,实现稀疏性极大化,对机械故障诊断具有普遍适用性。文献[14]提出并联基追踪方法提取轴承和齿轮冲击成分,取得较好的效果。上述方法计算速度慢、抗噪性能差,且主要集中于冲击调制成分提取,忽略对稳态调制成分的分析。

针对上述问题,本文将行星齿轮箱多源振动耦合信号分为蕴含局部故障的冲击调制成分和包含分布式故障的稳态调制成分,建立不同的求解

模型,实现耦合调制振动信号分离。应用改进非对称惩罚函数,提出对全变分模型正则化参数优化选取策略,采用受控极小化算法求解模型,实现冲击调制成分分离,最后采用基追踪分离稳态调制成分。应用新方法于行星齿轮箱第 2 级太阳轮故障诊断,试验结果表明新方法能快速有效地识别故障。

1 理论基础

1.1 问题阐述与模型构造

行星齿轮箱振动信号的复杂性以及传递路径影响^[15],使冲击调制成分常常淹没在工频振动、谐波振动和背景噪声中,稳态调制也会产生明显的调幅调频效应^[16]。为了实现各成分分离,假设冲击调制成分为 x ,稳态调制成分为 m ,噪声成分 ω (方差为 σ^2),提出 N 点含噪声观测序列模型为

$$y = x + m + \omega \quad y \in \mathbf{R}^N \quad (1)$$

基于稀疏理论的信号分离实质是通过观测输出 y ,估计冲击调制成分 x 和稳态成分 m 。将信号估计问题转化为凸优化问题,构造优化目标函数

$$\hat{c} = \arg \min_c \left\{ F(c) = \frac{1}{2} \|y - c\|_2^2 + \lambda \varphi(c) \right\} \quad (2)$$

式中 F 为目标函数,函数 φ 为惩罚函数,设计来提高信号稀疏性, λ 为正则化参数,控制允许误差与稀疏性之间的平衡, c 为待估计信号,通过优化求解使目标函数 F 最小化,就能重构原信号。

1.2 全变分模型冲击调制成分分离

全变分模型广泛应用于图像处理、统计回归分析等领域,采用稀疏导数模型,对时间序列信号冲击分量敏感^[17]。本文将稀疏全变分模型用于振动信号的冲击调制成分分离。为从 y 中估计冲击分量 x ,构造如式(3)的凸优化问题。

$$\hat{x} = \arg \min_x \left\{ F(x) = \frac{1}{2} \|y - x\|_2^2 + \sum_{i=0}^M \lambda_i \sum_{n=0}^{N_i-1} \varphi([D_i x]_n) \right\} \quad (3)$$

式中 λ_i 为正则化参数, D_i 为全变分模型 i 阶有限差分算子。全变分稀疏模型实现冲击调制成分估计存在 3 个重要影响因素:惩罚函数,优化求解方

法,正则化参数选取。

1.2.1 惩罚函数

对于多数情况下,已知稀疏目标信号具有对称性,此时一般采用对称惩罚函数。常用的对称惩罚函数 $\varphi_A(x)=|x|$ (其中 x 为自变量),但是 $\varphi_A(x)$ 函数在 $x=0$ 处不可导,于是逐渐提出了 $\varphi_B(x)=\sqrt{|x|+\epsilon}$ 和 $\varphi_C(x)=|x|-\epsilon\ln(|x|+\epsilon)$ 等改进形式。文献[18]利用提出了改进非对称惩罚函数,用于化学层次谱分析,因此本文在其基础上建立全变分模型应用于振动信号冲击调制分离。

惩罚函数 $\theta(x;r)$ 定义为

$$\theta(x;r)=\begin{cases} x & x\geq 0 \\ -rx & x<0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $r>0$, 函数 $\theta(x;r)$ 是 x 的可正可负的非对称函数,如果 $r=1$, 因此 $\theta(x;r)=\varphi_A(x)=|x|$, 然而上式在 $x=0$ 时不可导,为了解决此问题,在区间 $[-\epsilon,+\epsilon]$ 内采用多项式 $f(x)$ 代替,得到式(5)

$$\theta_\epsilon(x;r)=\begin{cases} x & x>\epsilon \\ f(x) & |x|\leq\epsilon \\ -rx & x<-\epsilon \end{cases} \quad (5)$$

为了获得最优 F , 首先需要找到最优的惩罚函数 $\theta_\epsilon(x;r)$, 定义多项式函数 $f(x)=ax^2+bx+c$ 与 $\theta(x;r)$ 相切时, 满足 $\theta_\epsilon(x;r)$ 获得最优值, 此时多项式 $f(x)$ 可转化为 $g(x,v)$ (v 为相切点) 满足式(6)。

$$g(x,v)=\frac{1+r}{4|v|}x^2+\frac{1-r}{2}x+\frac{(1+r)|v|}{4} \quad (6)$$

此时非对称惩罚函数 $\theta_\epsilon(x;r)$ 可以表示为式(7)所示。在 $v=\epsilon$ 时

$$\theta_\epsilon(x;r)=\begin{cases} x & x>\epsilon \\ \frac{1+r}{4}x^2+\frac{1-r}{2}x+\epsilon\frac{1+r}{4} & |x|\leq\epsilon \\ -rx & x<-\epsilon \end{cases} \quad (7)$$

1.2.2 受控极小化求解法

受控极小化算法用于求解比较困难的优化问题^[13], 其并不是直接求解目标函数 $F(x)$, 而是通过多变量迭代 $Q_k(x,x_k)$ 逐渐逼近目标函数 $F(x)$, 且满足 $Q_k(x,x_k)\geq F(x_k)$, 根据文中第 1.2 节的计算式(3)可以转化为式(8)。

$$\hat{x}=\arg\min_x\left\{F(x)=\frac{1}{2}\|y-x\|_2^2+\lambda_0\sum_{n=0}^{N-1}\theta_\epsilon(x_n;r)+\sum_{i=1}^M\lambda_i\sum_{n=0}^{N_i-1}\varphi([D_ix]_n)\right\} \quad (8)$$

根据式(6)满足

$$\sum_{i=1}^M\lambda_i\sum_{n=0}^{N_i-1}g([D_ix]_n,[D_iv]_n)\geq\sum_{i=1}^M\lambda_i\sum_{n=0}^{N_i-1}\varphi([D_ix]_n) \quad (9)$$

结合式(8)和式(9), 目标函数 $F(x)$ 最优解问题转化为二次项优化问题 $G(x,v)$

$$G(x,v)=\frac{1}{2}\|y-x\|_2^2+\lambda_0\sum_{n=0}^{N-1}\theta_\epsilon(x_n;r)+\sum_{i=1}^M\lambda_i\sum_{n=0}^{N_i-1}g([D_ix]_n,[D_iv]_n) \quad (10)$$

应用受控极小化算法求解该凸优化问题, 如式(11), 其中 $k\geq 0$ 为迭代次数, MM 优化要求在每次迭代凸函数 $G(x,v)$ 均为 $F(x)$ 在 $x=v$ 时的最优值, 即对于所有的 x 均有 $G(x,v)\geq F(x)$, 在给定初始值 $x^{(0)}$ 在适当的假设条件下, 采用受控极小化算法更新策略产生时间序列 $x^{(k)}$ 趋向于最优解 $F(x)$ 。

$$x^{(k+1)}=\arg\min_x G(x,x^{(k)}) \quad (11)$$

1.2.3 冲击成分正则化参数选取

正则化参数的选取是求解不适定问题的一个难题, 目前尚没有一个适合各种不适定问题的正则化参数选取法。全变分模型正则化参数 λ_i 对冲击调制特征具有重要的影响, 增加 λ_i 使信号 D_ix 更加稀疏, 若 λ_i 过大, 减小了干扰影响, 但振动冲击调制成分也会减小, 而 λ_i 过小, 则使冲击调成分完全淹没, 无法正确分离。为了较好的提取冲击调制效果, 设置 $M=2, \lambda_0=0.5\lambda, \lambda_1=5\lambda, \lambda_2=4\lambda$, 因此 λ 的选取是关键环节, 本文提出正则参数 λ 的优选策略。峭度作为旋转机械冲击成分常用分析指标, 当冲击特征周期性越明显时, 信号峭度指标越大, 但峭度系数对噪声成分敏感, 且无法反映冲击调制成分能量, 而均方值能有效的反映冲击调制幅值的变化, 且能够有效抑制噪声干扰。定义评价指标 e 为

$$e=\overline{x^2}/K_p^2 \quad (12)$$

式中 K_p 为峭度, 正则化参数 λ 为保真度项和正则项的平衡因子, 当 λ 较小时, 目标函数项起主导作用, 冲击调制成分完全淹没, 当 λ 较大时正则项起主导作用, 稀疏化差分算子使得信号过稀疏, 使得峭度成分迅速增大, 而均方根值随之减小。随着正则化参数的变化, 目标函数成分的主导作用发生变换, 评价指标 e 出现拐点, 因此选择评价指标产生拐点(即目标函数平衡点)作为正则参数 λ

的最优点,如图 1 所示。综上分析,本文采取的正则化参数步骤如下:

- 1) 依次为 λ 取多个值,设定 λ 的搜索范围与搜索步长。
- 2) 分别在给定 λ 下,提取冲击振动,并计算其各 λ 下的评价指标。
- 3) 获取 e 下降曲率拐点参数 λ 作为正则化参数,利用 MM 算法求解式(11),得到优化的冲击振动提取结果。

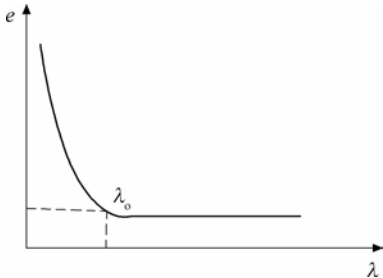


图 1 正则化参数选取
Fig. 1 Regularization parameter selection

1.3 基追踪稳态调制成分分离

在估计出冲击调制成分后,需要实现稳态调制成分分离。稳态调制成分主要包含行星齿轮正常啮合调制成分以及行星齿轮箱分布式故障导致谐波成分和噪声成分,因此实现稳态调制成分的分离实质是实现剩余成分与噪声分量的分离。借助于基追踪算法实现稳态调制分量的分离,设调制信号 m 和噪声信号 ω 组成观测信号 W ,即 $W = m + \omega$, W 可以写成如下形式:

$$W = Ac + \omega \tag{13}$$

根据式(2)取惩罚函数 $\varphi(x) = \|x\|_2^2$,式(13)转化为优化问题如式(14)所示。

$$\argmin_c \|W - Ac\|_2^2 + \lambda \|c\|_2^2 \tag{14}$$

式中 A 为稳态调制分量字典,稳态调制成分主要包啮合振动成分,因此采用采用傅里叶系数作为字典原子。

2 仿真分析

当行星齿轮箱出现局部损伤故障时,振动信号中会出现以啮合频率为载波,齿轮转频及其倍频为调制频率的稳态调制成分,同时出现周期性冲击调制成分。下面针对上述成分构造仿真信号 $x(t)$ 如下:

$$\begin{cases} x(t) = m(t) + h(t) + \omega \\ m(t) = 0.6\sin(2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 5 \cdot t) \\ h(t) = u(t) \\ \omega(t) = \sqrt{2D}\text{rand} \end{cases} \tag{15}$$

式中 $x(t)$ 为观测信号, $m(t)$ 为调制成分, $h(t)$ 为冲击成分, $\omega(t)$ 为噪声成分。仿真信号的时域波形图如图 2 所示,它包含载波频率 200 Hz,调制频率为 5 Hz,冲击信号特征频率 10 Hz,噪声成分 $D=0.15$ 的多源耦合信号。仿真信号的采样频率为 1 kHz,采样点数为 2000 点。

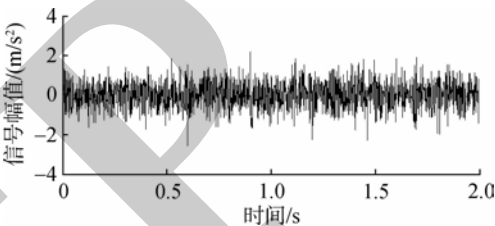


图 2 噪声 $D=0.15$ 仿真信号时域波形图
Fig. 2 $D=0.15$ simulation signal time-domain waveform

从图 2 中可见,周期性冲击成分和稳态调制成分受到噪声的极大影响,稳态调制成分几乎被淹没,已经很难从噪声分量中识别出来。

采用本文所提方法对正则化参数进行选择,在图 3 中选择曲率变换点处 $\lambda=0.035$,给定迭代次数为 30,应用新方法进行耦合振动分离(如图 4 所示)在图 4(a)中我们可以清晰的看到冲击振动成分明显,冲击幅值略有减小,从图 5 的包络谱信号可以看出冲击调制成分频谱为 10 Hz。图 4(b)与图 2 比较,图中分离出的稳态调制成分调制性明显约为 5 Hz,噪声干扰小,上述分析与给定仿真信号一致。从图中可见,该方法较好的实现耦合成分分离,周期性冲击成分特征明显,调制成分

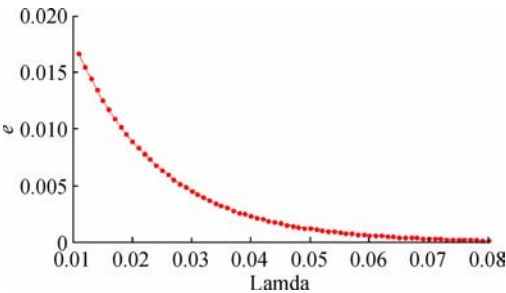
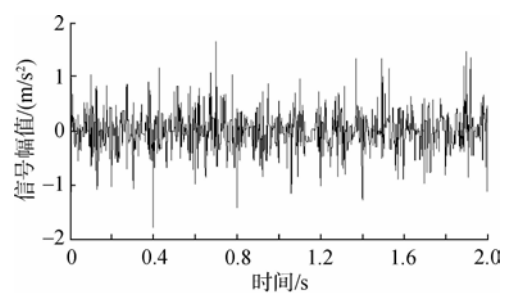
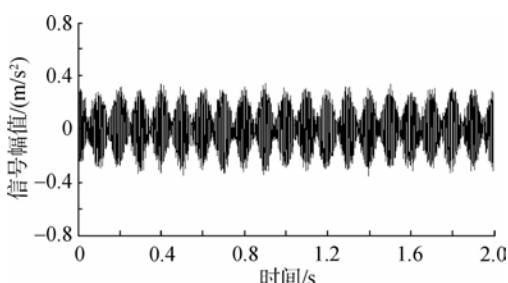


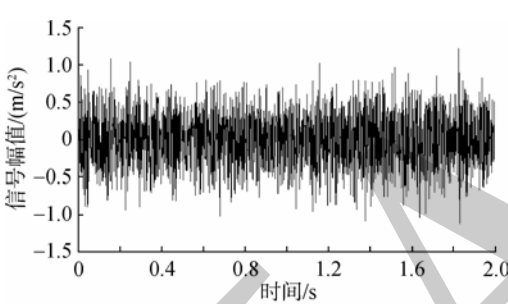
图 3 仿真信号正则化参数优化选取
Fig. 3 Optimization of simulation signal regularization parameter



(a) 冲击调制成分



(b) 稳态调制成分



(c) 剩余成分

图 4 仿真信号耦合调制分离

Fig. 4 Simulation signal coupling modulation separation

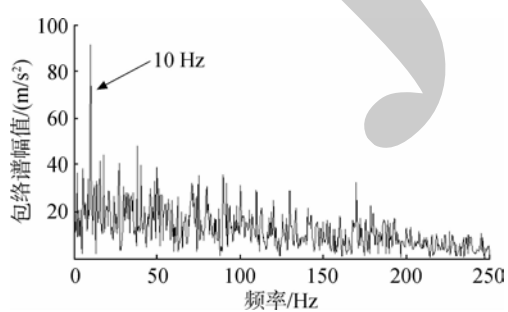


图 5 冲击调制成分包络谱

Fig. 5 Shock modulation component envelope spectrum

周期性明显提高。

由图 6 可见,优化目标函数随算法迭代次数的增加而逐步收敛于最优解。综上分析,本文提出新方法成功的从较强背景噪声复杂耦合信号中实现振动信号成分分离。

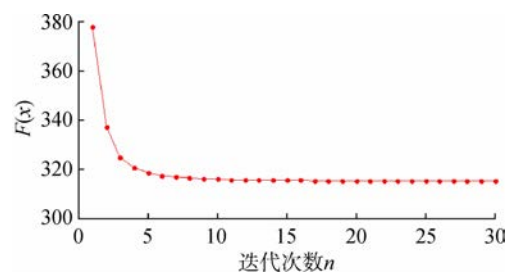


图 6 优化目标函数随迭代次数变化

Fig. 6 Optimization objective function changes with the number of iterations

3 试验信号分析

3.1 试验背景说明

为模拟行星齿轮箱实际工作条件,试验在美国 Spectra Quest 公司动力传动系统故障诊断综合试验台上进行。试验平台由变速驱动电机、多功能可编程控制面板、2 级行星齿轮箱、2 级平行齿轮传动齿轮箱、可编程磁力制动器、压电式加速度传感器、转速传感器、数据采集器等构成。整个试验台被固定在台架上,变速驱动电机(功率为 0~2.2 kW,转速为 0~5 000 r/min)提供动力,作为输入端,经过 2 级行星齿轮箱和 2 级平行齿轮传动齿轮箱,最后到达磁粉制动器。驱动电机和磁粉制动器由相应调节器来控制,用以调整不同转速及负载,以达到模拟不同工况下工作的目的,试验平台如图 7 所示。试验平台的行星齿轮箱基本参数如表 1 所示。

给定输入轴转速 2 400 r/min,相关部件特征频率计算如表 2 所示,对第 2 级太阳轮齿施加裂纹故障,如图 8 所示。加速度传感器安装在靠近输出位置,采样频率设置为 10 kHz,分别采集太阳轮正常和早期裂纹故障两种状态时的振动加速度信号。



图 7 行星齿轮试验平台

Fig. 7 Planetary gear test platform

表 1 行星齿轮箱参数
Table 1 Planetary gear parameters

级次	齿轮	齿数
第 1 级	太阳轮	20
	行星轮(3)	40
	内齿圈	100
第 2 级	太阳轮	28
	行星轮(4)	36
	内齿圈	100

表 2 输入 40 Hz 各部件特征频率
Table 2 Input 40 Hz Characteristic frequencies of frequency of each component

部件	频率/Hz
第 1 级太阳轮转频 f_{1s}	40.00
第 2 级太阳轮转频 f_{2s}	6.67
第 2 级行星架转频 f_{2c}	1.46
第 2 级太阳轮故障特征频率 f_r	20.84

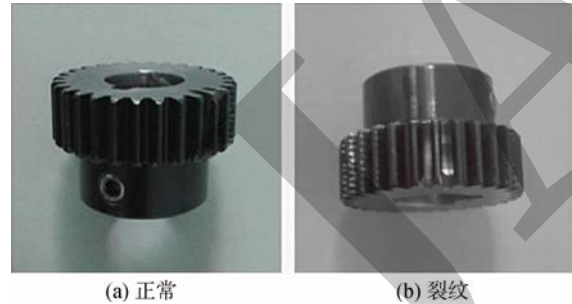


图 8 第 2 级太阳轮正常与裂纹故障状态
Fig. 8 Normal and crack failure status of second stage sun gear

3.2 试验结果分析与对比

3.2.1 行星齿轮箱第 2 级太阳轮正常

选取试验 0~4 s 数据,第 2 级太阳轮正常状态振动信号的时域波形和频谱分别如图 9(a)和图 9(b)所示。给定输入转速 2 400 r/min,行星齿轮箱第 1 级啮合频率 $f_{1m}=666.67$ Hz,第 2 级啮合频率 $f_{2m}=145.91$ Hz。由图 9(b)可见,在行星齿轮箱第 1 级啮合频率及其倍频信号为主导成分,而第 2 级啮合频率幅值极小,无法直接判断,因此选取[0, 500] Hz 频带区间进行分析,该频段涵盖行星齿轮箱第 2 级啮合频率 3 倍频区间,能

够反映第 2 级太阳轮的健康状态。

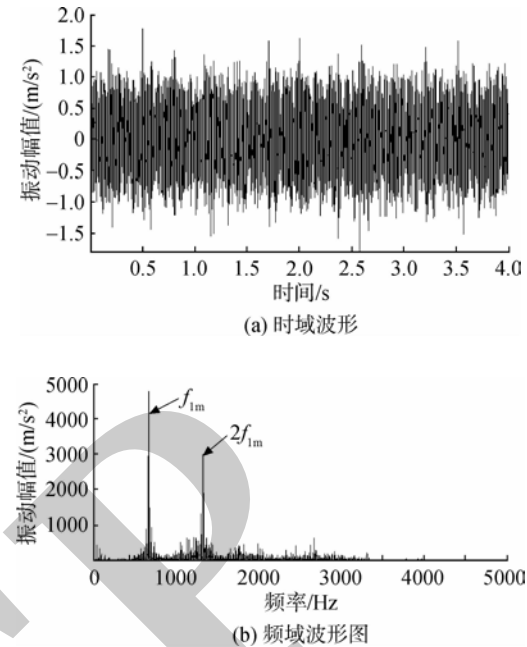


图 9 太阳轮正常状态时频谱
Fig. 9 Normal vibration signal time-frequency spectrum

对正常状态下[0 500] Hz 频带振动信号,应用本文方法进行耦合振动信号分离,设置算法迭代次为 30,通过评价指标 e 与参数 λ 的曲线的拐点(如图 10),选取正则化参数 $\lambda=0.02$ 。振动信号分离结果如图 11 所示,由图 11(b)可以清晰的看见冲击调制成分。

对正常状态下的冲击调制成分和稳态调制成分进行包络谱分析如图 12 所示。从图中可以准确识别出信号的主要频率成分,其中主导频率成分为行星齿轮箱第 1 级输入转频 f_{1s} 和第 2 级转频 f_{2s} 及其倍频信号,在图 12 中的直接表现为:①第 1 级太阳轮转频及其倍频信号幅值较大(图 12 中 f_{1s});②第 2 级行星架和第 2 级太阳轮转频幅值较大(图 12 中 f_{2c} 和 f_{2s})。此外,其他频率成分

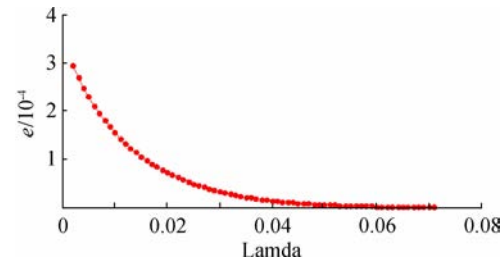


图 10 试验信号正则化参数选取
Fig. 10 Selection of regularization parameter of test signal

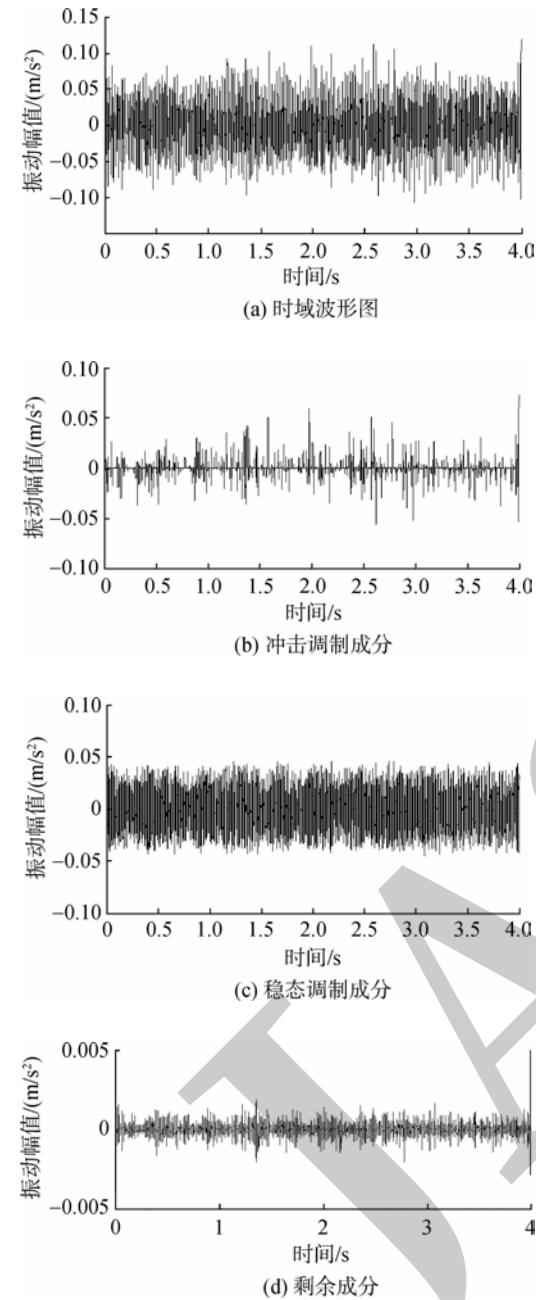


图 11 正常状态下耦合调制分离

Fig. 11 Coupled modulation separation under normal condition

幅值较小,分析结果符合正常信号模型的理论预期结果。

3.2.2 行星齿轮箱第 2 级太阳轮裂纹故障

对第 2 级太阳轮裂纹故障振动信号仍采用 [0 500] Hz 振动信号进行分析,故障信号的时域和包络谱如图 13 所示,从包络谱图可知,其主导频率成分为第 1 级太阳轮转频,无法判断太阳轮故障状态。设置参数与正常状态下相同,应用新方法进行耦合调制振动信号分离,分析结果如图 14 所示。在图 14(a)中可以清晰的发现周期性冲

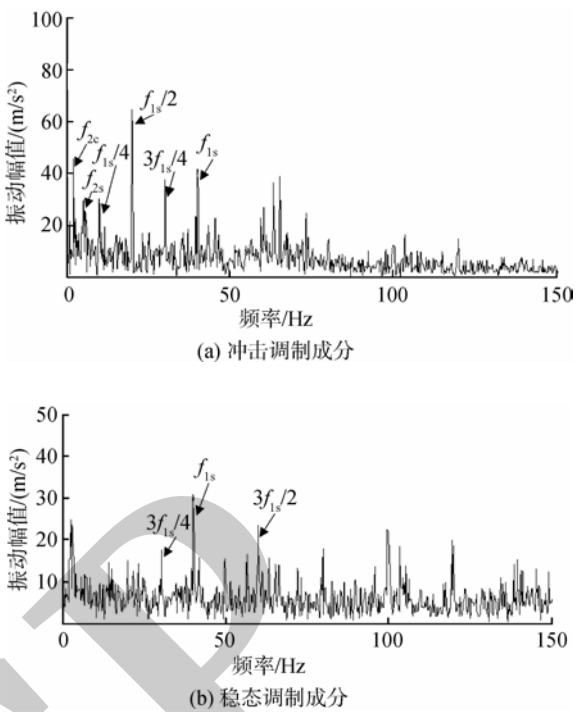


图 12 正常状态成分包络谱

Fig. 12 Normal state component envelope spectrum

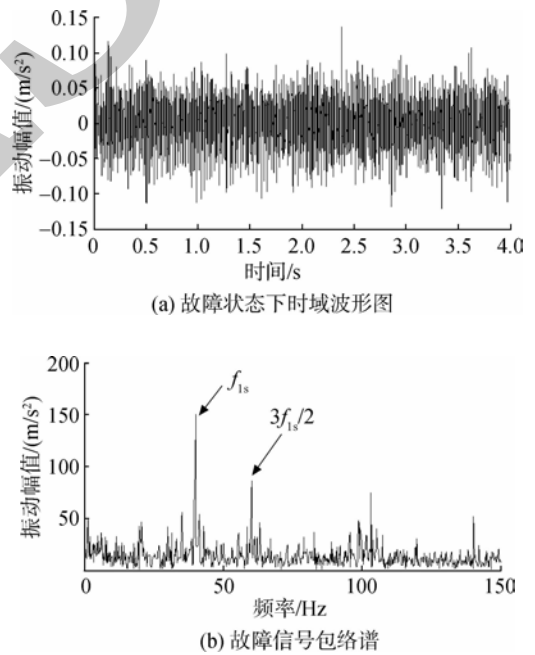


图 13 故障信号波形图

Fig. 13 Fault state signal waveform

击调制成分,对比图 11(b),第 2 级太阳轮裂纹状态下冲击调制成分明显比正常状态下成分复杂、幅值增大。

为分析故障特征,对得到的第 2 级太阳轮裂纹故障冲击调制信号进行包络谱解调分析,如图 15(a)所示。由表 2 可知,试验所用的太阳轮局部

故障特征频率为 $f_r = 20.84\text{ Hz}$ 。对比图 13(a), 冲击调制成分包络谱频率成分复杂程度增加, 主导频率为 20.75、41.5 Hz, 分别对应第 2 级太阳轮局部特征频率 f_r 和 $2f_r$ 处, 由于行星轮 ($N=4$) 的不一致性^[3], 在 $3f_{1s}/4 + f_r/4$ 频率处幅值也出现占优情况; 如图 15(b) 稳态调制成分包络谱中, 对比图 13(b), 第 1 级太阳轮输入转频 f_{1s} 及其倍频信号占主导频率成分, 而太阳轮故障特征频率极其微弱。上述分析表明冲击调制成分能准确识别太阳轮局部损伤, 与实际试验情况相符合。

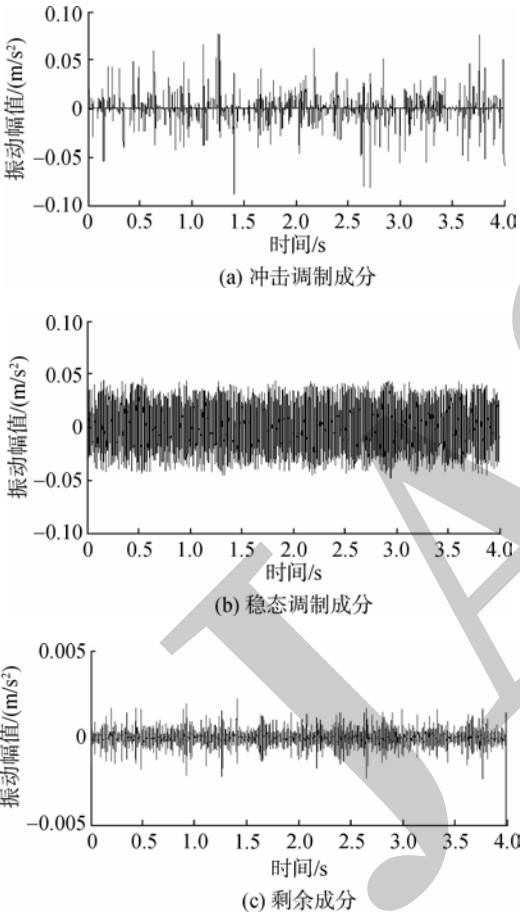


图 14 太阳轮裂纹故障状态下耦合调制成分分离
Fig. 14 Separation of the coupled modulation components under sun gear fault

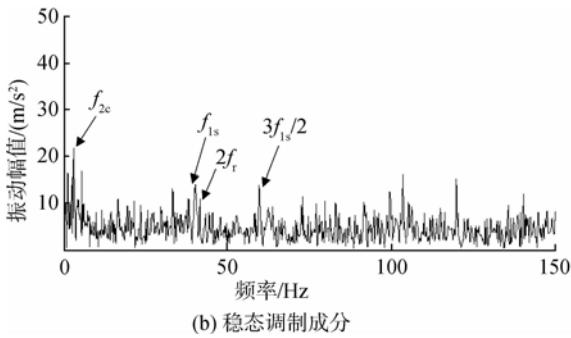
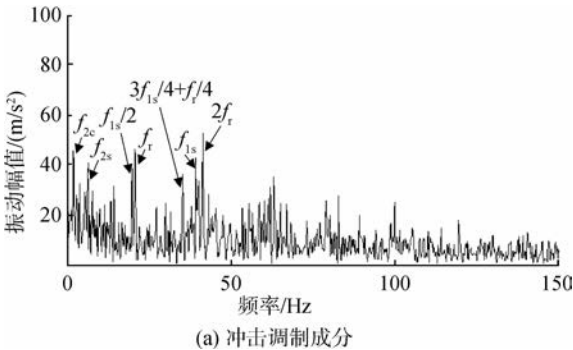


图 15 太阳轮裂纹故障成分包络谱
Fig. 15 Component envelope spectrum of sun gear fault

4 结 论

结合故障状态下行星齿轮箱振动信号特点, 将复杂振动信号分为冲击调制和稳态调制成分, 并构造问题模型, 采用稀疏全变分模型和基追踪进行耦合信号分离。仿真和试验结果证明该方法具有以下优势:

- 1) 利用峭度系数与方均根系数评价指标, 对正则化参数 λ 选取具有重要作用, 在噪声成分 $D=0.15$ 的复杂信号中能快速提取冲击成分, 克服背景噪声下冲击特征提取困难等问题。
- 2) 应用改进的非对称罚函数和受控极小化法求解模型, 算法迭代次数少、收敛效果好。
- 3) 分析裂纹故障下提取冲击调制成分和稳态调制成分, 在冲击调制成分故障特征频率明显, 能快速诊断出故障。

参考文献:

[1] YIP L. Analysis and modeling of planetary gearbox vibration data for early fault detection[D]. Toronto: University of Toronto, 2011.

[2] HOOD A A. Fault detection on a full-scale OH-58 AC helicopter transmission[D]. Maryland: University of Maryland, 2010.

[3] FENG Z, ZHAO L, CHU F. Vibrationspectral characteristics of localized gear fault of planetary gearboxes[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(2): 118-125.

[4] 何国林, 丁康, 林慧斌. 基于匹配追踪的齿轮箱耦合调制振动信号分离方法研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(1): 102-108.

HE Guolin, DING Kang, LIN Huibin. Matching pursuit method for coupling modulation signal separation of gearbox vibration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(1): 102-108. (in Chinese)

[5] LIU L, LIANG X, ZUO M J. Vibration signal modeling of a planetary gear set with transmission path effect analysis [J]. Measurement, 2016, 85(1): 20-31.

- [6] 李红延,周云龙,田峰,等. 一种新的小波自适应阈值函数振动信号去噪算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2200-2206.
- LI Hongyan, ZHOU Yunlong, TIAN Feng, et al. Wavelet-based vibration signal de-noising algorithm with a new adaptive threshold function[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2200-2206. (in Chinese)
- [7] MARIYAPPA N, SENGOTTUVEL S, PATEL R, et al. Denoising of multichannel MCG data by the combination of EEMD and ICA and its effect on the pseudo current density maps[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2015, 18: 204-213.
- [8] WANG H, CHEN J, DONG G. Fault diagnosis of rolling bearings early weak fault based on minimum entropy deconvolution and fast Kurtogram algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering Science 1989—1996 (Vol 203-210), 2015, 229(16): 2890-2907.
- [9] BARSZCZ T, RANDALL R B. Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1352-1365.
- [10] LEI Y, HAN D, LIN J, et al. Planetary gearbox fault diagnosis using an adaptive stochastic resonance method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(1): 113-124.
- [11] 李永波,徐敏强,赵海洋,等. 级联双稳随机共振和基于 Hermite 插值的局部均值分解方法在齿轮故障诊断中应用[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 95-101.
- LI Yongbo, XU Minqiang, ZHAO Haiyang, et. Application of cascaded bistable stochastic resonance and Hermite interpolation local mean decomposition method in gear fault diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5): 95-101. (in Chinese)
- [12] 秦毅,郭磊,吴宏钢. 冲击振动提取的优化稀疏表征方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(1): 54-58.
- QIN Yi, GUO Lei, WU Honggang. Optimal sparse representation method for impact vibration extraction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(1): 54-58. (in Chinese)
- [13] 唐贵基,王晓龙. 最大相关峭度解卷积结合稀疏编码收缩的齿轮微弱故障特征提取[J]. 振动工程学报, 2015, 28(3): 478-486.
- TANG Guiji, WANG Xiaolong. Weak feature extraction of gear fault based on maximum correlated kurtosis deconvolution and sparse codes shrinkage[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(3): 478-486. (in Chinese)
- [14] 贺王鹏,訾艳阳,陈彬强. 冲击特征受控极小化通用稀疏表示及其在机械故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(4): 94-99.
- HE Wangpeng, ZI Yanyang, CHEN Binqiang. Majorization minimization oriented sparse optimization method for feature extraction technique in machinery fault diagnosis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(4): 94-99. (in Chinese)
- [15] 崔玲丽,莫代一,邹娜. 并联基追踪稀疏分解在齿轮箱弱故障诊断中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2633-2640.
- CUI Lingli, MO Daiyi, WU Na. Application of sparse signal decomposition using dual-BP in gear-box weak fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2633-2640. (in Chinese)
- [16] FENG Z, LIANG M. Complex signal analysis for planetary gearbox fault diagnosis via shift invariant dictionary learning[J]. Measurement, 2016, 90(2): 382-395.
- [17] SELESNICK I W, GRABER H L, PFEIL D S, et al. Simultaneous low-pass filtering and total variation denoising[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(5): 1109-1124.
- [18] NING X, SELESNICK I W, DUVAL L. Chromatogram baseline estimation and denoising using sparsity (BEADS) [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2014, 139(1): 156-167.

(编辑:叶 青)