第 33 卷 第 3 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 33 No. 3
2020 年 9 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Sep. 2020

基于 VMD-FastICA 的齿轮箱故障诊断

吴鲁明， 郝如江， 陆一鹤

(石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄 050043)

摘要:针对齿轮箱故障信号微弱且易受周围噪声影响的问题,提出了一种基于变分模态分解(VMD)的独立分量(ICA)算法。该方法首先将采集的信号进行 MCKD 降噪,将降噪后的信号利用 VMD 算法分解为多个不同的本征模态分量(IMF),然后依据快速谱峭度图和相关系数选取有效的 IMF 分量进行重构信号,对于重构信号利用 FastICA 再次进行降噪处理,根据 FastICA 降噪后得到的故障特征分量,可以有效地识别故障。结果表明:该方法可以更清晰、准确地提取出故障特征频率和找出故障发生的位置。

关键词:VMD;FastICA;齿轮箱;故障诊断

中图分类号:TP277 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-0373(2020)03-0014-07

在机械传动设备中,齿轮箱有着极其重要的地位,它被广泛应用于各行各业中。它不仅造价昂贵,而且极易发生故障,随着运行时间的增加,齿轮箱往往会出现齿轮的断齿、点蚀、磨损等故障,轴承的外圈、内圈、滚动体也极易发生故障。往往一个齿轮发生故障,就会导致整个设备停机。实时监测齿轮箱的运行状态并对齿轮进行故障诊断,可以提前采取合理的措施排除故障,保障设备的安全运行。

机械故障特征的有效提取是故障诊断的基石。文献[1]提出了基于变分模态的多特征融合诊断方法,将高频段 IMF 分量的能量和排列熵作为向量机的输入,对故障类型进行模式识别。文献[2]采用 EMD 方法将振动信号分解为若干个单分量信号,提取各个分量的样本熵并将其作为特征值,最后采用 VPMCD 分类器进行故障识别和分类。文献[3]提出了基于 LMD 和频谱校正的滚动轴承故障诊断方法。文献[4]提出总体局部均值分解和最小熵反褶积的故障诊断方法。基于上述分析,本文提出了 VMD 与 FastICA 相结合的齿轮箱故障诊断方法,通过对齿轮箱实际故障的分析,结果表明可以很好地避免 LCD 分解中存在的模态混叠问题,并且能够准确地提取齿轮箱故障特征频率和找到故障的具体位置。

1 原理与方法

1.1 变分模态分解

VMD 是一种自适应信号分析方法[4-5],通过多次迭代来寻找变分模型最优解,进而找出各个分解分量的中心频率,可以自动地将信号分解为具有稀疏特性的模态分量[6-8]。

VMD 方法是将信号的分解引入到变分模型中来获取 IMF 分量。每个 IMF 分量的带宽和频率中心持续地相互交替迭代更新,最终自动地分解出信号的频带,得到设定的 K 个 IMF 分量。在各个本征模态函数之和等于信号 f 的条件下,来搜寻 K 个本征模态函数 $u_k(k)$,使得模态函数的估计带宽之和最小[9]。求解各个模态带宽的步骤为:

(1)对每一个模态函数 $u_k(k)$进行希尔伯特变换,得到其解析信号。

$$\text{解析信号}=\left[\delta(t)+\frac{j}{\pi t}\right]*u_k(t) \tag{1}$$

收稿日期:2019-01-16 **责任编辑**:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20190010

基金项目:国家自然科学基金(51375319)

作者简介:吴鲁明(1992—),男,硕士研究生,研究方向为机电系统故障诊断。E-mail:sdjtwlm@163.com

吴鲁明,郝如江,陆一鹤.基于 VMD-FastICA 的齿轮箱故障诊断[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(3):14-20.

式中,t 为时间;$\delta(t)$为冲击函数;$u_k=\{u_1,u_2,\cdots,u_k\}$为分解得到的 IMF 分量,与 $e^{-j\omega_k t}$ 相乘来调节各个分量的中心频率,将各分量的频谱调制到相应的基频带

$$\left[\delta(t)+\frac{j}{\pi t}\right]*u_k(t)e^{-j\omega_k t} \tag{2}$$

式中,$\omega_k=\{\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_k\}$为对应的 IMF 分量 $u_k(t)$的中心频率。

(2)各个分量的带宽通过解调信号的 H^1 高斯平滑指标来估计,则约束变分模型的表达式为

$$\text{约束变分模型}=\begin{cases}\min\limits_{\{u_k\}\{\omega_k\}}\left\{\sum\limits_k\left\|\partial_t\left[\left(\delta(t)+\frac{j}{\pi t}\right)u_k(t)\right]e^{-j\omega_k t}\right\|_2^2\right\}\\ \text{s. t. }\sum\limits_k u_k=f\end{cases} \tag{3}$$

为了将约束变分问题转化为无约束变分求解问题,引入拉格朗日乘子 $\lambda(t)$和二次惩罚因子 α。其中,$\lambda(t)$可以保持约束条件的严格性,α 可以保障存在高斯噪声时信号的重构精度。扩展的拉格朗日表达式为

$$(\{u_k\},\{\omega_k\},\lambda)=\alpha\sum_k\left\|\partial_t\left[\left(\partial(t)+\frac{j}{\pi t}\right)u_k(t)\right]e^{-j\omega_k t}\right\|_2^2+\left\|f(t)-\sum_k u_k(t)\right\|_2^2+\left[\lambda(t),f(t)-\sum_k u_k(t)\right] \tag{4}$$

用乘法交替方向法更新 u_k^{n+1}、ω_k^{n+1} 和 λ^{n+1}来找出增广 Lagrange 表达式的"鞍点"。对于 u_k 的取值问题可表述为

$$u_k^{n+1}=\underset{u_k\in X}{\operatorname{argmin}}\left\{\alpha\left\|\partial_t\left[\left(\delta(t)+\frac{j}{\pi t}\right)u_k(t)\right]e^{-j\omega_k t}\right\|_2^2+\left\|f(t)-\sum_i u_i(t)+\frac{\lambda(t)}{2}\right\|_2^2\right\} \tag{5}$$

式中,ω_k 等同于 ω_k^{n+1};$\sum u_i(t)$ 等同于 $\sum\limits_{i\neq k}u_i(t)^{n+1}$。先利用傅里叶变换,然后用 $\omega-\omega_k$ 来代替 ω,并将式(5)变换为非负频率区间积分的形式,得到二次优化问题的表达式为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega)=\frac{\hat{f}(\omega)-\sum\limits_{i\neq k}\hat{u}_i(\omega)+\frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1+2\alpha(\omega-\omega_k)^2} \tag{6}$$

按照上述过程得到中心频率的更新方法

$$\omega_k^{n+1}=\frac{\int_0^\infty\omega\,|\hat{u}_k(\omega)|^2\mathrm{d}\omega}{\int_0^\infty|\hat{u}_k(\omega)|^2\mathrm{d}\omega} \tag{7}$$

式中,$\hat{u}_k(\omega)$等同于当前的剩余量 $\hat{f}(\omega)-\sum\limits_{i\neq k}\hat{u}_i(\omega)$ 的维纳滤波;ω_k^{n+1} 为当前分量功率谱的重心;对$\{\hat{u}_k(\omega)\}$进行傅里叶逆变换,其实部为$\{\hat{u}_k(t)\}$。算法流程为:①初始化$\{u_k^1\}$、$\{\omega_k^1\}$、λ^1 和 n 为 0;②令 $n=n+1$,重复执行整个循环;③更新 u_k、ω_k;④$k=k+1$,重复执行③直到 $k=K$;⑤根据 $\lambda^{n+1}=\lambda^n+\tau\left(f-\sum u_k^{n+1}\right)$,更新 λ;⑥跟定判别精度 $\xi>0$,直到满足迭代停止条件:$\sum\limits_{k=1}^{K}\frac{\|\hat{u}_k^{n+1}-\hat{u}_k^n(\omega)\|}{\|\hat{u}_k^n(\omega)\|_2^2}<\varepsilon$。

1.2 基于相关系数和快速谱峭度选取 IMF 分量

(1)相关系数。通过计算观测信号和各个 IMF 分量的相关系数,选取相关系数较大的 IMF 分量作为重构信号。设观测信号 X,IMF 分量 Y,则相关系数

$$\rho_{XY}=\frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} \tag{8}$$

(2)快速谱峭度。峭度 K 是归一化的四阶中心距且是无量纲参数,可以反映振动信号的分布特性,其定义是

$$K=\frac{E(x-\mu)^4}{\sigma^4} \tag{9}$$

式中,σ、μ 分别为信号 x 的方差和均值;$E(x-\mu)^4$ 为四阶数学期望值。

快速谱峭度算法[9]是在二叉树结构设计全频带范围内 1/3 和带通滤波器中分析信号。从谱峭图中找出最大带宽区间,通过带宽范围选取合适的分量,进行故障特征分析。

1.3 FastICA 算法的基本原理

FastICA 算法是基于定点递推算法得到的。通过搜寻矩阵 $\boldsymbol{W}$,使得 $Y=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}X$ 非高斯性最大化。其中,X 是观测信号,Y 是估计信号。估计信号的非高斯性随着负熵的变化成正比变化。

基于负熵的 FastICA 算法过程为:(1)对预处理信号进行去均值和白化处理;(2)选择迭代次数 p,源信号个数 n;(3)初始化分接矩阵 $\boldsymbol{W}_p$;(4)$\boldsymbol{W}_p=E\{Zg(\boldsymbol{W}_p^{\mathrm{T}}X)\}-E\{g'(\boldsymbol{W}_p^{\mathrm{T}}Z)\}\boldsymbol{W}$;(5)$\boldsymbol{W}_p=\boldsymbol{W}_p-\sum\limits_{j=1}^{p-1}(\boldsymbol{W}_p^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_j)\boldsymbol{W}_j$;(6)令 $\boldsymbol{W}_p=\boldsymbol{W}_p/\|\boldsymbol{W}_p\|$;(7)如果 $\boldsymbol{W}_p$ 不收敛,返回步骤(3)。

2 VMD-FastICA 在齿轮箱故障诊断中的研究

为了弥补 ICA 只能应用于观测源数不少于信号源数的超定盲源分离问题这一缺点[10],本文基于 VMD 分解方法,重构信号和引入的虚拟噪声通道,共同作为 ICA 的输入矩阵,有效地解决单通道 ICA 的欠定问题。

VMD-FastICA 的流程如图 1 所示,方法实现步骤如下:

步骤 1 采集齿轮箱的振动信号,设置 VMD 程序中的参数,其中初始化模态数 $K=5$[11],惩罚因子 $\alpha=2\ 000$,带宽 $\tau=0$;

步骤 2 将 MCKD 降噪后的信号载入 VMD 程序中进行分解;

步骤 3 观测每一个 IMF 分量的中心频率,若中心频率相近,则 $K=K+1$,否则 $K=K-1$,继续进行步骤 2;

步骤 4 通过快速谱峭度计算原信号和每个 IMF 分量的最大频率范围,计算每个 IMF 分量的相关系数,综合上述两方面选取 IMF 分量作为重构信号,没有被选出且相关系数较大的 IMF 分量作为虚拟噪声通道;

步骤 5 将步骤 4 得到的 2 个通道作为 FastICA 输入,将其解混得到联合降噪后的信号;

步骤 6 通过对联合降噪后的信号包络解调来判断故障。

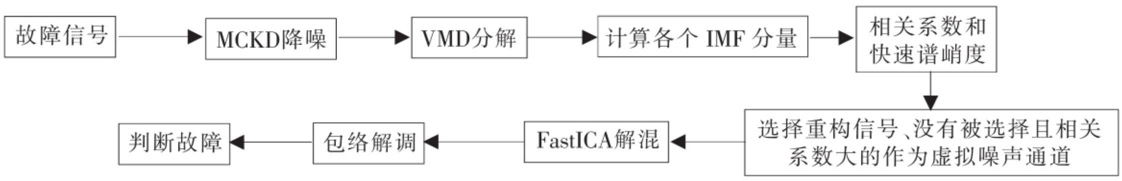


图 1 VMD-FastICA 流程图

3 实验分析

3.1 实验台介绍

为了验证本文提出的方法在齿轮箱故障诊断中的可行性[12],运用如图 2 所示的美国 DDS 实验台,DDS 实验台主要由电动机、行星齿轮箱、定轴齿轮箱、磁粉制动器组成。实验台上的测点如图 3 所示,CH1 在齿轮箱体侧向,CH2 在齿轮箱体垂向,CH3 在齿轮箱体轴向,CH4 在支撑轴承座垂向。通过分析发现前 3 个通道噪声干扰比较大,因此利用 CH4 通道采集的数据进行分析。

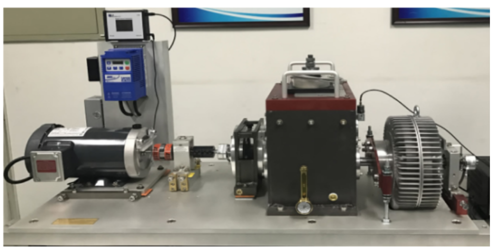


图 2 DDS 实验台

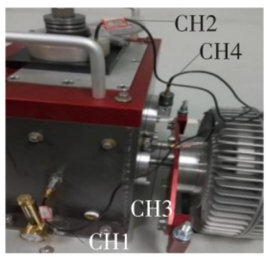


图 3 传感器布置

设置中间轴轴承内圈点蚀，齿轮缺齿复合故障，轴承型号为 SKF61800，点蚀直径为 1 mm，深 0.5 mm，轴承几何参数与技术参数如表 1 所示，轴承和齿轮故障如图 4 所示。通过计算可知，理论上的中间轴转频频率为 2.537 5 Hz，轴承内圈故障频率为 13.778 6 Hz，齿轮断齿的故障频率为 91.35 Hz。

表 1　轴承几何参数与技术参数

节圆直径 D/mm	滚动体直径 d/mm	滚动体数目 z	接触角 α/(°)	电机转频 f_r/Hz	采样频率 f_s/Hz	采样时间 t/s
14.5	2.381	10	0	40	25 000	2

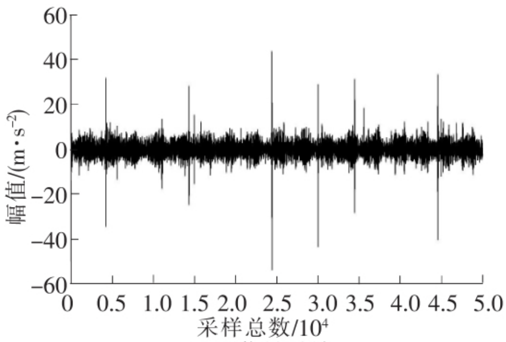
(a)轴承内圈故障

(b)齿轮缺齿故障

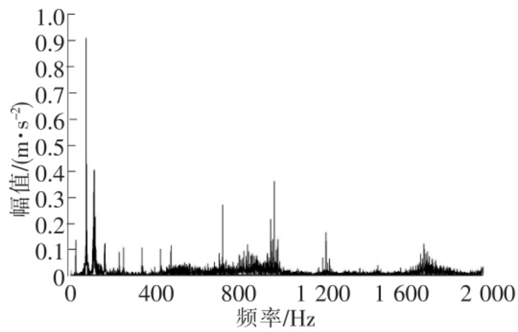
图 4　轴承和齿轮故障

3.2　实验验证

如图 5 所示为原信号时域图、频谱图。由图可知，原信号时域图中存在明显的冲击信号，并伴有大量噪声信号。对采集的原始信号首先进行 MCKD 降噪预处理，降噪后的信号如图 6 所示，时域图中可以看出信号中存在非常明显的冲击成分，频域图中信号的幅值明显增大，一些噪声信号被去除。

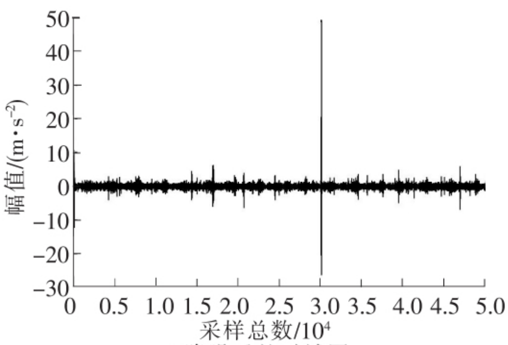


(a)原信号时域

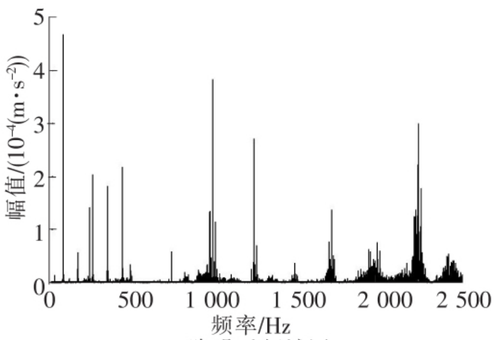


(b)原信号频域

图 5　原信号的时频域



(a)降噪后的时域图

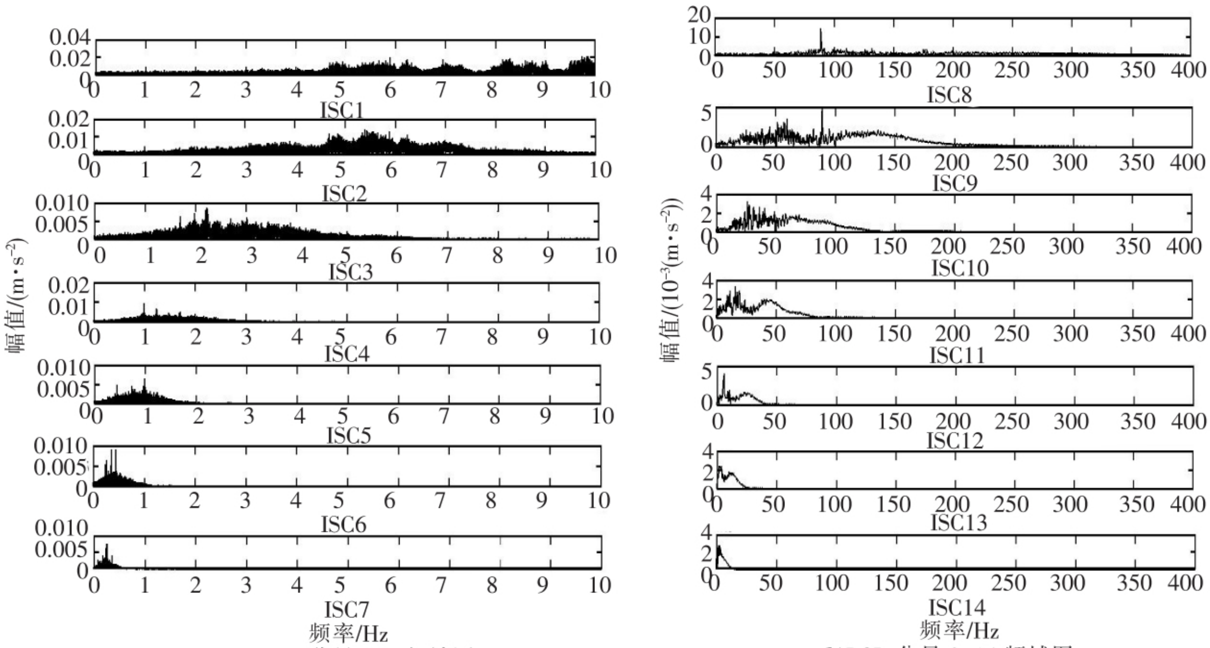


(b)降噪后频域图

图 6　降噪后的时频域

对降噪后的信号分别进行基于局部特征尺度分解（LCD）和基于变分模态分解（VMD），分解后各个分量的频域图如图 7、图 8，通过对图 7、图 8 对比可知，LCD 分解存在着严重的模态混叠现象，VMD 分解

可以在很大程度上避免此问题。



(a)LCD 分量 1~7 频域图 (b)LCD 分量 8~14 频域图

图 7 LCD 分量频域图

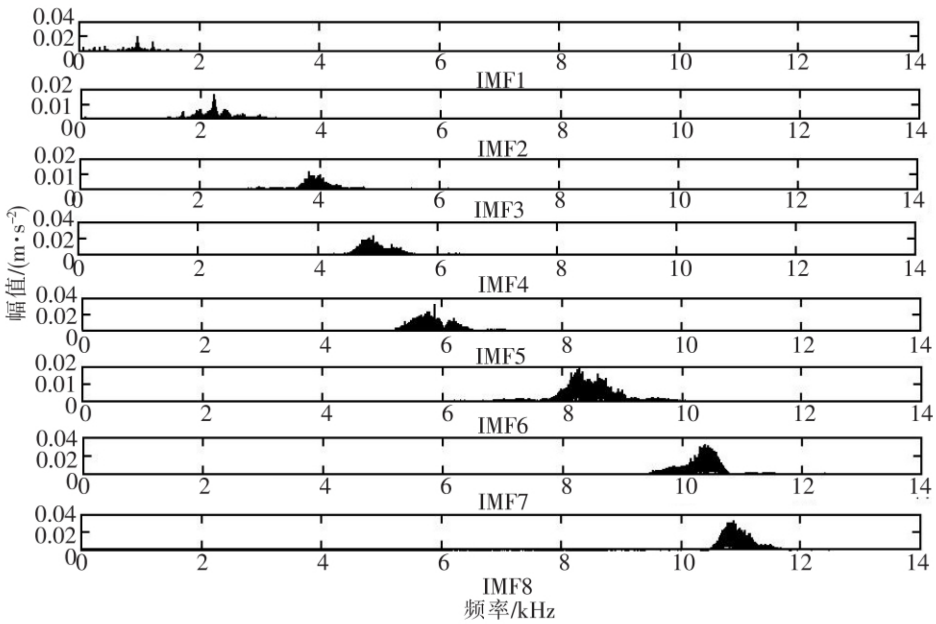


图 8 VMD 分解频域图

通过快速谱峭度图和互相关系数对 LCD 分解得到的 14 个 ISC 分量进行筛选,选取 ISC3 与 ISC14 作为重构信号,ISC3 与 ISC7 作为虚拟噪声通道。将以上两通道作为 FastICA 的输入通道,对信号进行解混,将解混后的信号做包络和进行快速傅里叶变换如图 9、图 10 所示。

图 9 的包络谱中可以看到轴承内圈故障频率 13.35 Hz(理论值 13.778 6 Hz)、二倍频 26.7 Hz 以及多倍频。在二倍频 26.7 Hz 附近看到了中间轴转频(理论值 2.537 5 Hz)调制出来的边频带。因此可以确定中间轴上的轴承内圈出现了故障。图 10 没有看出第三级定轴齿轮传动的啮合频率(理论值 91.35 Hz),可以看出二倍频 178.5 Hz,但在其周围存在较强的其他频率成分,可以明显地看出其三倍频 268 Hz。可知 LCD-FastICA 算法得到的分离信号可以找出轴承故障,但找出的齿轮故障特征不够明显。

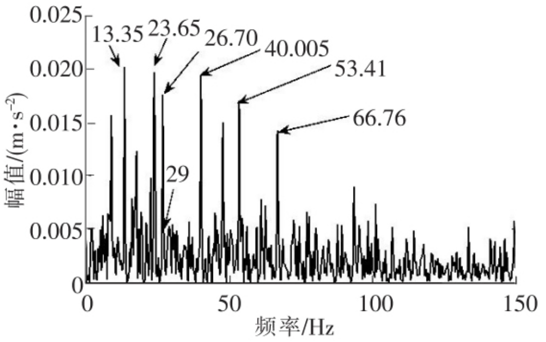


图 9　轴承内圈故障

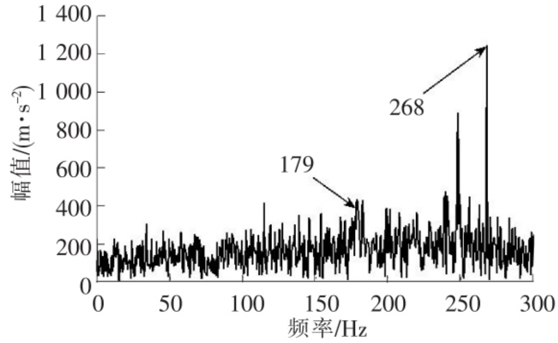


图 10　齿轮缺齿故障

通过对 MCKD 降噪后的原信号进行快速谱峭度计算,分解层数为 6,带宽为 195.312 5 Hz,中心频率为 10 544.531 3 Hz,最大频带范围为(10 446.87 Hz,10 642.19 Hz)。依次计算 VMD 分解的 8 个 IMF 分量的快速谱峭度图和计算每个分量与降噪后信号的相关系数,结果如表 2 所示。

表 2　IMF 分量的最大频带范围和相关系数

IMF 分量	最大频带范围	相关系数
IMF1	(10 416.66,10 677.08)	0.103 0
IMF2	(10 676.79,10 937.21)	0.138 2
IMF3	(10 546.88,10 742.18)	0.181 1
IMF4	(10 546.88,10 742.18)	0.336 4
IMF5	(10 546.88,10 742.18)	0.410 8
IMF6	(10 546.88,10 742.18)	0.357 7
IMF7	(10 676.79,10 937.21)	0.588 4
IMF8	(10 416.66,10 677.08)	0.590 7

各个 IMF 分量的最大频带范围与降噪后信号的最大频带范围(10 446.87 Hz,10 642.19 Hz)进行比较,可知 IMF3、IMF4、IMF5、IMF6 的最大频带范围在降噪后信号的最大频带范围内,IMF4、IMF5、IMF6、IMF7、IMF8 的相关系数较大,综合以上 2 个方面,选取 IMF4、IMF5、IMF6 作为重构信号,将 IMF3、IMF7、IMF8 作为虚拟噪声通道。将以上两通道作为 FastICA 的输入通道,对信号进行解混,将解混后的信号做包络和进行快速傅里叶变换如图 11、图 12 所示。

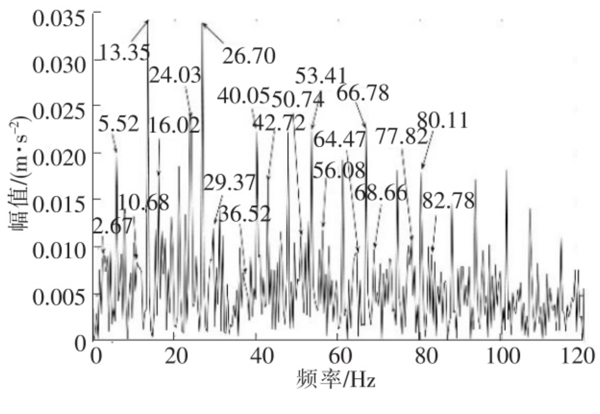


图 11　轴承内圈故障

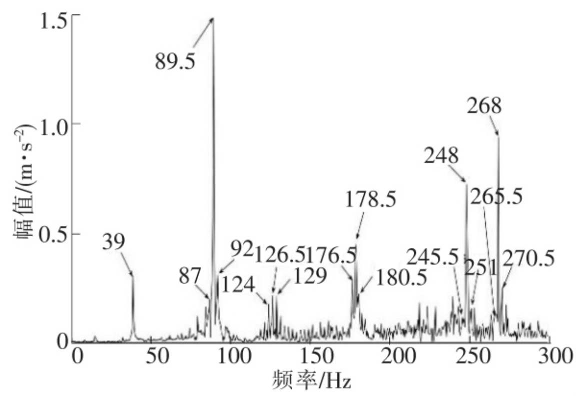


图 12　齿轮缺齿故障

从图 11 可以看到中间轴的转频 2.67 Hz(理论值 2.537 5 Hz)及其二倍频 5.52 Hz,还可以看出轴承内圈故障频率 13.35 Hz(理论值 13.778 6 Hz),以及二倍频 26.7 Hz、三倍频 40.05 Hz、四倍频 53.41 Hz、五倍频 66.76 Hz、六倍频 80.11 Hz。同时看到了中间轴转频 2.67 Hz(理论值 2.537 5 Hz)调制出来的边频带。因此可以确定中间轴上的轴承内圈出现了故障。

图 12 可以看出第三级定轴齿轮传动的啮合频率 89.5 Hz(理论值 91.35 Hz)、二倍频 178.5 Hz 以及三倍频 268 Hz,并且在上面倍频的左右看到中间轴转频 2.67 Hz 调制出来的边频带,在倍频图中还可以看到输入轴转频 39 Hz(理论值 40 Hz),126.5 Hz 为输入轴转频 39 Hz 和第三级啮合频率相加的频率被中间轴转频 2.67 Hz 调制得出。由此可以确定中间轴第三级传动中小齿轮发生了缺齿故障。

4 结论

针对单通道情况下难以实现齿轮箱复合故障诊断问题,提出了一种基于 VMD-FastICA 的故障诊断方法。该方法采用快速谱峭度图和相关系数指标作为筛选 IMF 分量的标准,克服了传统 Fast-ICA 算法观测信号的数目必须大于原信号数目的局限性。与传统的 LCD-FastICA 方法对比,结果表明本文提出的方法可更好地实现齿轮箱混合故障的分离,突出了轴承内圈及齿轮的故障特征,效果明显。同时本文所提出的方法能解决实际工程中无法安装多个传感器的困扰,有效降低噪声影响,在实际应用中具有良好效果。

参 考 文 献

[1]王建国,陈帅,张超.基于 VMD 与多特征融合的齿轮故障诊断方法[J].机械传动,2017,41(3):160-165.

[2]程军圣,马兴伟,杨宇.基于 VPMCD 和 EMD 的齿轮故障诊断方法[J].振动与冲击,2013,32(20):9-13.

[3]孙伟,李新民,金小强,等.基于 LMD 和频谱校正的滚动轴承故障诊断方法[J].制造技术与机床,2018(6):54-57.

[4]赵少勇,任学平,郝富贵.基于 ELMD 分解和 MED 的齿轮箱故障诊断分析[J].包钢科技,2018,44(1):68-71.

[5]Dragomiretskiy K,Zossso D. Variational mode deconposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2014,62(3):531-544.

[6]魏勇召. 基于变分模态分解的机车轴承故障诊断[D].北京:北京交通大学,2018.

[7]武英杰,甄成刚,刘长良.变分模态分解在风电机组故障诊断中的应用[J].机械传动,2015,39(10):129-132.

[8]赵洪山,郭双伟,高夺.基于奇异值分解和变分模态分解的轴承故障特征提取[J].振动与冲击,2016,35(22):183-188.

[9]马增强,柳晓云,张俊甲,等. VMD 和 ICA 联合降噪方法在轴承故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2017,36(13):201-207.

[10]Jérôme Antoni. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(1):108-124.

[11] 张俊甲. 基于变分模态分解的滚动轴承故障诊断[D].石家庄:石家庄铁道大学,2018.

[12] 李非,郝如江.基于 EMD 模态相关和形态学降噪的齿轮故障诊断研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2018,31(3):56-62,74.

Application of VMD－FastICA in Fault Diagnosis of Gearbox

Wu Luming, **Hao Rujiang**, **Lu Yihe**

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Aiming at the problem that the gearbox fault signal is weak and susceptible to the surrounding noise, a fault diagnosis method based on the combination of Variational Modal Decomposition (VMD) and Independent Component Analysis (ICA) is proposed. First, the MCKD is used to reduce the noise of the collected signal, and the signal after noise reduction is decomposed into several different intrinsic modal components (IMFs) by using VMD method. Then, according to the fast spectral cliff graph and correlation coefficient, the effective IMF components are selected to reconstruct the signal, and the FastICA is used to reduce the noise again for the reconstructed signal. Depend on the fault characteristic component obtained after the noise reduction of FastICA, the fault can be identified effectively. The results show that this method can extract the fault characteristic frequency more clearly and accurately and find out where the fault occurs.

Key words: VMD; FastICA; gearbox; fault diagnosis