

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.04.016

基于 ICEEMD-EFICA 联合降噪的 滚动轴承故障诊断研究*

宋宇宙, 刘兆亮

(河南工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对滚动轴承早期故障信号十分微弱,故障特征提取困难的问题,对轴承早期故障信号的频域分解、信号重构、降噪解混等方面进行了研究,提出了一种基于改进后的完备总体经验模态分解(ICEEMD)和高效快速独立分量分析(EFICA)的联合降噪方法。首先,采用了ICEEMD算法,将振动信号分解成一系列固有模态分量(IMF);其次,设计了峭度准则,并选取相应分量完成了虚拟通道信号和振动冲击信号的重构;研究了EFICA对重构信号的盲源分离,有效降低了振动信号中的噪声,使故障频率的能量幅度最大,利于识别故障特征;最后,搭建了实验平台,进行了实际的滚动轴承早期故障诊断实验。研究表明:该方法能明显抑制噪声和调制频率成分干扰,突出故障特征频率成分;与CEEMD和EFICA结合的方法对比,采用该方法后信噪比提高了24.76%,能更准确地辨别故障信息,可以满足轴承诊断的要求。

关键词:滚动轴承;ICEEMD;EFICA;故障诊断;联合降噪

中图分类号:TH133.33;TP277

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)04-0494-05

Rolling bearing fault diagnosis based on ICEEMD-EFICA combined noise reduction

SONG Yu-zhou, LIU Zhao-liang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problem that the early fault signal of rolling bearing was very weak and the fault feature extraction was difficult, the frequency domain decomposition, signal reconstruction, noise reduction and unmixing of the early bearing fault signal were studied. A combined noise reduction method based on improved complete empirical mode decomposition (ICEEMD) and efficient fast independent component analysis (EFICA) were proposed. Firstly, ICEEMD algorithm was used to decompose the vibration signal to obtain a series of Intrinsic Mode Function (IMF). Secondly, according to the kurtosis criterion, the corresponding components were selected to complete the reconstruction of the virtual channel signal and the vibration shock signal. Finally, EFICA was used to perform blind source separation on the reconstructed signal, which effectively reduced the noise in the vibration signal, maximized the energy amplitude of the fault frequency, and facilitated the identification of fault characteristics; the experimental research on early failure of actual rolling bearings was designed. The results indicate that the method can obviously suppress the interference of noise and modulation frequency components, and highlight the characteristic frequency components of the fault. Comparing with the combined method of CEEMD and EFICA, the signal-to-noise ratio increases by 24.76%, which can identify fault information more accurately and meet the requirements for bearing diagnosis.

Key words: rolling bearing; ICEEMD; EFICA; fault diagnosis; combined noise reduction

0 引言

滚动轴承作为旋转机械中应用最广泛、最易发生

故障的零部件之一,其健康状态将直接影响到机械设备能否正常运转。因此,对滚动轴承进行早期故障特征提取与诊断分析具有十分重要的意义^[1-2]。但滚动

收稿日期:2020-06-24

基金项目:河南省科技攻关资助项目(212102210327)

作者简介:宋宇宙(1993-),男,河南安阳人,硕士研究生,主要从事动态测试与机械故障诊断方面的研究。E-mail:15738815753@163.com

轴承早期故障信号常被淹没于强背景噪声中,使得故障特征信息提取困难,严重影响了滚动轴承早期故障诊断的效果。

改进后的完备总体经验模态分解(ICEEMD)是由 COLOMINAS M A 等人^[3]于 2014 年提出的一种新的信号处理方法,该方法在 CEEMD 基础上进行了改进,利用各模态当前的局部均值重新定义了真实模态;从而克服了传统 EMD 算法模态混叠现象,解决了 EEMD 算法中存在的计算量大、分解完备性差等问题。与 CEEMD 相比,含噪数据分解后,有效信息主要集中在较少的模态分量中,使随机噪声得到有效抑制^[4,5];吴凯等人^[6]利用 ICEEMD 算法有效抑制了脑血氧信号中的基线漂移和低频噪声,提高了数据的精确度;杨凯等人^[7]利用 ICEEMD 算法,较好地降低了随机噪声,提高了地震资料信噪比;张欢等人^[8]将 ICEEMD 与近似熵相结合,得到了更清晰、稳定的脑电去噪结果,解决了 IMF 盲目选取导致的去噪失准及虚假模态等问题。

EFICA 算法是一种盲源分离技术,被广泛应用于振动信号处理领域。该算法对 FastICA 进行了改进,实现了非线性函数的自适应选择,从而可以达到分离精度最佳的效果。徐元博等人^[9]将 EEMD 与 EFICA 相结合,实现了复合故障信号频率特征的提取。

为了实现良好的降噪效果,准确提取轴承故障信息,本文提出 ICEEMD 与 EFICA 联合降噪方法;首先对振动信号进行 ICEEMD 分解;然后将得到的 IMF 利用峭度准则重组,并作为盲源分离的输入矩阵;最后通过 EFICA 降噪分离,提取出故障特征成分,辨别轴承故障。

1 算法原理

1.1 ICEEMD 算法原理

为减少冗余模态影响,ICEEMD 在 CEEMD 的基础上,从原始信号中去除估算局部均值,从而降低了信号分解后模态中的残留噪声。其具体分解步骤如下:

(1) 设立一个滚动轴承信号。在其中加入高斯白噪声,生成新信号,如下式所示:

$$x^i = x + \beta_k w^i \quad (1)$$

式中: x —原始滚动轴承信号; x^i —新生成的滚动轴承信号; w^i —第 i 组添加的高斯白噪声; β_k — x^i 的计算系数, $\beta_k = \varepsilon_0 \text{std}(r_k)$; ε_0 — β_k 的计算系数; r_k —第 k 个余项; std —标准差运算;

(2) 定义两种算子 $M(\cdot)$ 和 $E_k(\cdot)$ 。

$M(\cdot)$ 与 $E_k(\cdot)$ 的关系如下式所示:

$$M(x) = x - E_k(x) \quad (2)$$

式中: $E_k(\cdot)$ —EMD 分解得到的第 k 个模态;

(3) 通过对 EMD 的计算,获得第一个 IMF 分量,如下式所示:

$$IMF_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E_1(x^i) \quad (3)$$

则其一级残差为:

$$r_1 = x - IMF_1 \quad (4)$$

(4) 计算第 2 个残差和第 2 个模态,如下式所示:

$$r_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m M[r_1 + \beta_1 E_2(w^i)] \quad (5)$$

$$IMF_2 = r_1 - r_2 \quad (6)$$

(5) 依此类推,计算第 k 个残差和第 k 个模态,如下式所示:

$$r_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m M[r_{k-1} + \beta_{k-1} E_k(w^i)] \quad (7)$$

$$IMF_k = r_{k-1} - r_k \quad (8)$$

(6) 重复步骤(5),直至残差不能被分解,从而获得全部的 IMF。

1.2 峭度准则

峭度是无量纲参数,对冲击信号特别敏感,适用于表面损伤类故障的诊断,尤其是轴承早期故障的诊断。

当轴承健康运行时,振动信号的幅值分布接近正态分布,峭度值约为 3;当轴承发生早期故障时,由早期局部故障引发的冲击成分使正态分布发生偏移或分散,峭度值增大;峭度值越大,轴承故障冲击信号的特征信息越易提取。

峭度 K 是反映随机变量分布特性的数值统计量,如下式所示:

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

式中: $E(x)$ — x 变量的期望值; x —振动信号; μ —振动信号的均值; σ —振动信号的标准差。

1.3 EFICA 算法原理

EFICA 是基于 FastICA 的改进算法,依据单位方差约束找到具有最小熵的不相关信号;该算法能够自适应地选择非线性函数,具有较高的分离精度,可用于非高斯信号。

算法步骤分为以下 3 步:

(1) 对观测数据均值和白化等进行预处理后,运行对称 FastICA 算法,直至收敛;

(2) 假定信号为广义高斯分布,对非线性函数进行自适应选择。常采用的非线性函数为 $g(s) = \tanh$

$$(s) \text{ 和 } g(s) = \frac{s}{(1+s^2)};$$

(3) 微调和细化, 以提高最终分离的准确度。每次微调都要利用单一对称 FastICA 自适应选择非线性函数迭代来处理。

2 ICEEMD-EFICA 降噪方法研究

ICEEMD-EFICA 方法通过 ICEEMD 分解构造虚拟信号, 解决了单通道盲源分离的欠定问题, 利于实现 ICA 的降噪作用。

将通过 ICEEMD 分解获得的 IMF, 根据峭度准则重组成虚拟信号和振动冲击信号, 作为盲源分离的输入矩阵; 然后采用 EFICA 算法进行降噪解混, 可以解决单一 ICEEMD 方法受无关噪声源信号影响的不足, 从而准确、快速地辨别出其故障特征。

其方法的流程图如图 1 所示。

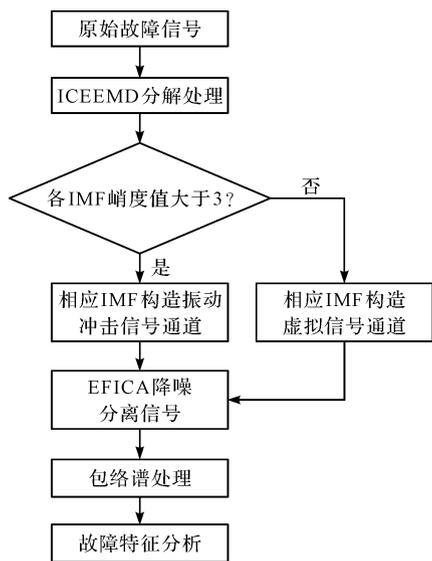


图 1 方法流程图

3 实验验证

3.1 轴承故障诊断实验

在 SpectraQuest 公司推出的轴承故障模拟试验台 (MFS) 上, 笔者进行滚动轴承早期故障诊断实验。

实验选用内圈发生早期故障的轴承进行实验, 轴承型号为 MB ER-10K, 轴承参数如表 1 所示。

表 1 轴承参数

节圆直径/mm	滚珠直径/mm	滚珠个数	接触角 $\theta/(\circ)$
33.5	7.94	8	0

实验中, 采样频率为 10 240 Hz, 采样时长 10 s; 电机实际转速为 1 793 r/min。

轴承转频 f_r 与内圈故障特征频率 f_i 计算方法如下式所示:

$$f_r = \frac{n}{60} \quad (10)$$

$$f_i = 0.5Z \left(1 + \frac{d}{D} \cos\theta \right) f_r \quad (11)$$

式中: n —转速; Z —滚珠个数; D —节圆直径; d —滚珠直径; θ —接触角。

由式(10,11)可计算得出其转频为: 29.88 Hz, 其内圈故障特征频率为 147.85 Hz。

3.2 实验与结果分析

滚动轴承内圈故障是局部点蚀故障, 其转轴运转过程中, 故障点周围的载荷密度会发生周期性变化, 该变化将使振动信号发生以转轴频率为调制频率的幅值调制现象^[10,11]。所以, 在内圈早期故障信号中应包含转频、故障特征频率、倍频, 以及以故障频率为中心、转频为边带的调制频率。

滚动轴承内圈故障信号频谱如图 2 所示。

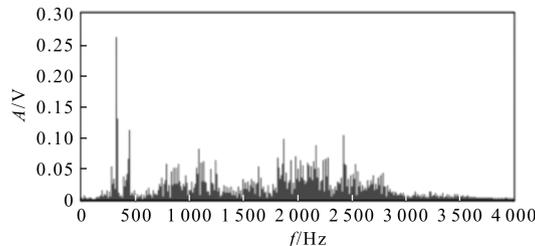
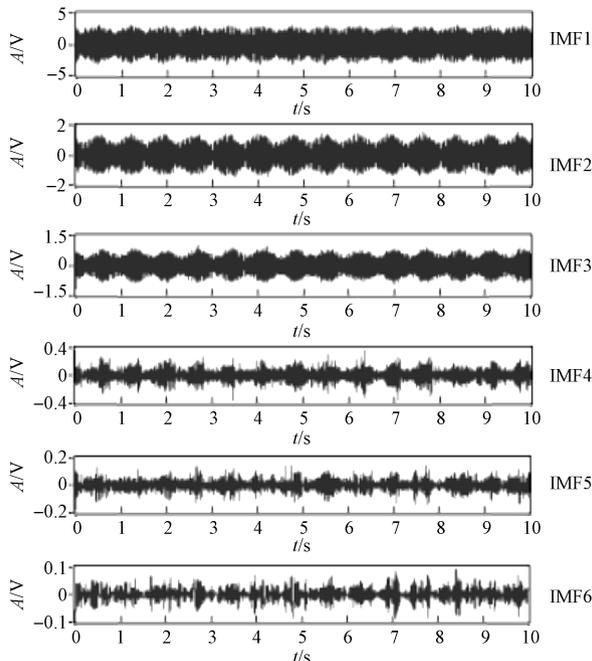


图 2 内圈故障信号频谱

由图 2 可知: 频谱中, 转频、内圈故障频率及其倍频完全淹没于低频噪声中, 不能实现提取。因此, 只通过频谱来判别滚动轴承内圈的故障特征十分困难。

此处笔者利用本文方法对故障信号进行处理, 故障信号经 ICEEMD 自适应分解得到 9 个 IMF。

内圈故障信号 IMF_s 分量时域波形如图 3 所示。



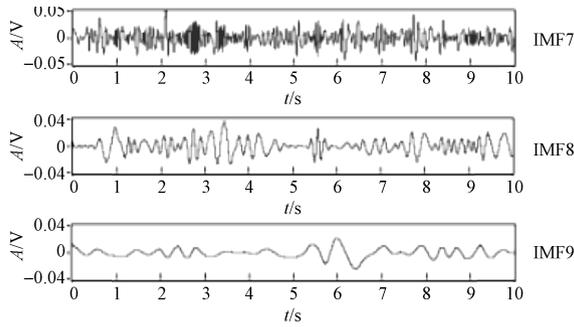


图3 内圈故障信号IMFs分量时域波形

由图3可知,从IMF1到IMF9模态分量频率逐渐降低,表明分解效果较为准确。

分别计算9个IMF的峭度值,IMFs分量峭度指标如表2所示。

表2 IMFs分量峭度指标

分量	峭度值		
IMF1-IMF3	6.05	5.89	2.83
IMF4-IMF6	4.69	4.22	2.56
IMF7-IMF9	2.11	1.38	1.70

由表2可知:分量1、2、4、5的模态分量峭度值大于3,表明以上分量包含较多的冲击成分,可重构为振动冲击信号;其余模态分量重构为虚拟通道信号。重构信号经EFICA降噪解混,完成信噪分离;最后,对最佳估计信号进行包络谱分析。

ICEEMD-EFICA内圈包络谱如图4所示。

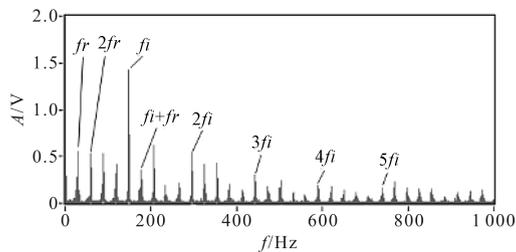


图4 ICEEMD-EFICA内圈包络谱

由图4可知:该方法可以准确地识别出能量幅值最大的滚动轴承内圈早期故障频率(f_i)147.7 Hz,且可以精确地定位到其5倍频;转频(f_r)29.8 Hz、二倍转频 $2f_r$ 幅值明显;以故障频率为中心,转频为边带的调制频率(如: $f_i + f_r$)能够准确找出,所得故障频率与理论计算故障频率基本一致。

3.3 对比分析

与CEEMD-EFICA方法进行对比分析。CEEMD-

EFICA内圈包络谱如图5所示。

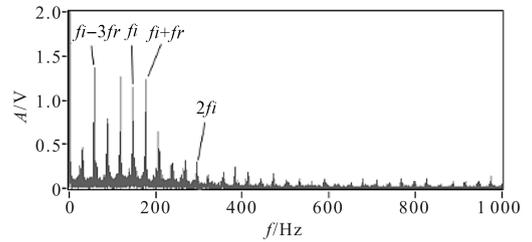


图5 CEEMD-EFICA内圈包络谱

由图5可知:虽然可以找出故障特征频率及其2倍频和调制频率,但故障特征频率(f_i)147.7 Hz的能量幅值并非最大,最大值位于调制频率($f_i - 3f_r$)58.2 Hz,易将58.2 Hz判别为其他故障频率,不利于内圈故障的提取及诊断分析,甚至易产生误判。

对比图4和图5可知,ICEEMD-EFICA降噪法可以有效地抑制无关噪声,突出故障特征频率,便于故障信息的高效、准确提取及诊断分析。

笔者利用峭度值(K)和信噪比(SNR)对两个算法的降噪效果进行评定,其评定结果如表3所示。

表3 降噪评定结果

评定指标	CEEMD-EFICA	ICEEMD-EFICA
K	5.95	7.14
SNR	49.35	61.57

由表3可知:基于ICEEMD-EFICA方法得到的信号峭度值更大,是经CEEMD-EFICA处理后得到信号峭度值的1.2倍;根据峭度准则可知,其包含更多的轴承故障冲击成分,进而其故障特征频率也更容易被提取;同时,用本文方法得到的 SNR 大,比经CEEMD-EFICA方法处理得到的信号的 SNR 增加了24.76%。

由此可见,本文所提方法降噪效果更加显著。

4 结束语

(1)针对滚动轴承早期故障信号十分微弱,故障特征提取困难的问题,笔者提出了ICEEMD与EFICA联合降噪方法,该方法解决了单一ICEEMD方法受无关噪声源信号影响的不足和单通道盲源分离的欠定问题;能够提取出淹没于强噪声中的振动冲击信号;

(2)笔者利用ICEEMD与EFICA联合降噪方法对滚动轴承早期故障进行实验分析。结果表明:利用该

(下转第520页)

本文引用格式:

宋宇宙,刘兆亮.基于ICEEMD-EFICA联合降噪的滚动轴承故障诊断研究[J].机电工程,2021,38(4):494-497,520.

SONG Yu-zhou, LIU Zhao-liang. Rolling bearing fault diagnosis based on ICEEMD-EFICA combined noise reduction[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(4): 494-497, 520.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>