

# 多通道相关-经验模式分解在滚动轴承故障诊断中的应用

马增强, 谷朝健, 柳晓云

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**在处理非平稳振动信号时,经验模式分解(EMD)的应用较为广泛。针对滚动轴承的早期故障信号中含有强烈的背景噪声,诊断效果有时也不够明显的情况,本文提出了多通道相关-经验模式分解方法。首先通过EMD将滚动轴承故障信号分解成若干本征模式函数(IMF)分量;然后对IMF分量进行多相关处理,取相关性最强的IMF分量进行自适应重构;最后通过循环谱分析识别出滚动轴承的故障类型。将该方法应用到滚动轴承的仿真故障数据和实际数据中,分析结果表明,该方法可以更加有效地提取滚动轴承故障特征频率信息,突出故障频率。

**关键词:**多通道相关;经验模式分解;滚动轴承;故障诊断

中图分类号:TH165+.3 文献标志码:A 文章编号:2095-0373(2017)01-0064-06

## 0 引言

轴承故障是常见的机器故障之一,通过有效的实时监测轴承的工作状态,是对轴承早期故障进行诊断的前提和必要环节。在获取滚动轴承振动信号的过程中,由于测试环境、测试仪器及人为因素等影响,采集到的信号往往含有大量噪声,而反映故障特征的部分非常微弱。因此,在提取故障特征频率之前必须对采集到的振动信号进行降噪,提高信噪比。然而,由于旋转机械结构的复杂性,转子振动信号具有非线性、非平稳性等特征,增加了降噪的难度<sup>[1]</sup>。现在应用于旋转机械系统信号分析常用的方法有:传统傅里叶变换、解调分析<sup>[2]</sup>、小波分析(WA)<sup>[3]</sup>、高阶谱分析<sup>[4]</sup>、Hilbert-Huang变换(HHT)<sup>[5]</sup>、集合经验模式分解(EEMD)<sup>[6]</sup>等方法。上述方法虽然都有各自独特的优势,但当其处理强噪声背景下的信号时,均暴露出各自的不足,如传统傅里叶变换的降噪方法存在保护信号边缘和抑制噪声之间的矛盾,难以正确识别信号中的噪声并加以去除<sup>[1]</sup>;小波分析的基函数具有不变性,对非平稳信号易产生虚假谐波<sup>[7]</sup>;HHT是一种建立在经验之上的分解方法,没有充分的数学基础,当特征信号中混有强噪声时,不能得到满意的本征模式函数(IMF),分解过程中产生的IMF虚假分量会导致后期的误诊<sup>[8]</sup>;EEMD根据白噪声分解的各分量能量密度与平均周期之积为常数这一特性,确定噪声分量和有用信号分量的分界点,将噪声分量从振动信号中剔除,但剔除的分量有可能含有有用信号<sup>[9]</sup>。针对上述方法在强噪声背景下难以正确诊断滚动轴承故障类型的缺陷,本文提出了多通道相关-经验模式分解的算法,该算法是对多通道相关和经验模式分解两种方法的一种延伸组合,结合了原EMD方法对非线性、非平稳信号处理的优点和多通道相关算法良好的降噪能力,对旋转机械中的滚动轴承进行故障诊断。

## 1 多通道相关-经验模式分解诊断方法

多通道相关-经验模式分解能够分析连续的非线性、非平稳振动信号,其流程图如图1所示。具体算

收稿日期:2016-01-13 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2017.01.02

基金项目:国家自然科学基金(11227201,11372199,51208318);河北省自然科学基金(A2014210142)

作者简介:马增强(1975-),男,博士,教授,研究方向为机车车辆状态监测与故障诊断。E-mail:mzqlunwen@126.com

马增强,谷朝健,柳晓云.多通道相关-经验模式分解在滚动轴承故障诊断中的应用[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(1):64-69.

法如下。

(1) 采集两路时间序列, 分别做经验模式(EMD)分解, 从而得到多组本征模态函数 IMF 分量。EMD 的过程如下: 首先, 所有局部极值和最小值  $x(t)$  应该确定, 并采用 3 次样条线连接形成的信号上下包络。然后, 原始信号减去平均值  $m_1$  的上和下包络线, 即  $x(t) - m_1 = h_1$ , 如果  $h_1$  不是 IMF, 则  $h_1$  作为原始信号, 并重复前面的步骤, 经过反复转移  $k$  次  $h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}$ , 其中,  $h_{1k}$  称为 IMF, 即  $c_1 = h_{1k}$ 。最后, 由  $r_1 = x(t) - c_1$  从  $x(k)$  分离  $c_1$ , 重复该过程  $n$  次, 直到  $r_n$  成为一个单调函数  $r_q$ 。原始信号  $x(t)$  为

$$x(t) = \sum_{i=1}^q c_i + r_q \quad (1)$$

(2) 对这两路时间序列分解得到的 IMF 分量作多通道相关处理。首先将振动信号经由 EMD 分解产生的 IMF 分别与原始振动信号做相关分析, 选出相关性最强的 IMF。因为噪声之间相关系数为零, 所以相关系数越大, 表明 IMF 的信噪比越高。随后将两路相关系数最大的 IMF 相加整合成一路振动信号进行故障特征频率的提取, 达到强化故障信号的效果。设两个现象有如下两组观测值  $X: x_1, x_2 \dots, x_n$  和  $Y: y_1, y_2 \dots, y_n$ , 则  $X$  与  $Y$  的相关系数为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

$r$  用来表示相关系数, 如果  $r=0$  则表示零相关, 若  $r=1$ , 表示两个变量之间完全相关。文献[8]提出当  $0.7 < |r| < 1$  时为高度相关, 当  $0.4 < |r| < 0.7$  时称为中等相关, 当  $0.2 < |r| < 0.4$  时称为低度相关, 当  $|r| < 0.2$  时称之为极低相关或者接近零相关。

(3) 由于滚动轴承的固有频率通常较高, 循环平稳度分析、谱相关密度单切片分析等方法的计算量过大, 难以胜任高精度和高效率的工况。本文所采用的谱相关密度组合切片(Slice Spectral Correlation Density, SSCD)以及循环谱组合切片能量(Slice Energy Spectral Correlation Density, SESCD)<sup>[10-11]</sup> 分析能有效的诊断出滚动轴承故障类型, 预算量小且针对性强。

## 2 轴承故障实验验证

为了展示多通道相关-经验模式分解算法相比于原 EMD 方法在消除强烈噪声、凸显故障频率方面的优势, 本次试验分别对轴承外圈故障、内圈故障和滚动体故障进行诊断。图 2(a) 展示了本次实验所使用的 QPZZ-II 故障模拟实验台, 其主要组成部分有: ①操作平台、②驱动电机、③轴承底座、④轴承; 图 2(b) 展示了两路传感器的安装位置: ⑤为采集一通道信号的加速度传感器, ⑥为采集二通道信号的加速度传感器。实验所用的滚动轴承的型号是 N205EM, 测试参数与技术参数如表 1 所示, 轴承特征频率及其计算公式如表 2 所示。

表 1 轴承测试与技术参数

中径 $D/\text{mm}$	滚子直径 $d/\text{mm}$	接触角 $\alpha/(\text{°})$	滚子个数 $z$	转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	采样频率 $f_s/\text{Hz}$
38.5	7.5	0	13	317	25 600

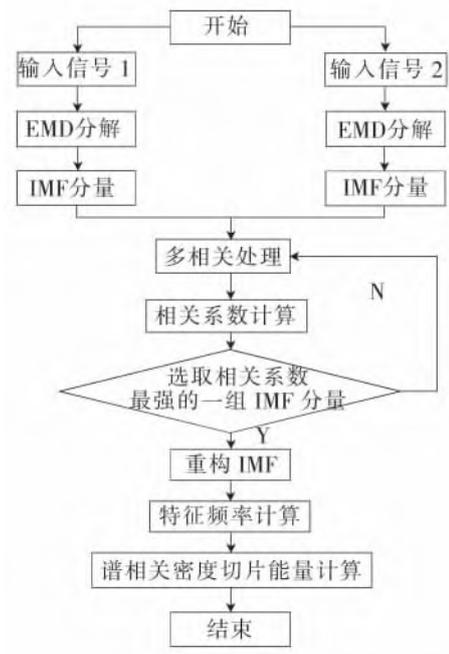


图 1 多通道相关-经验模式分解诊断方法流程图

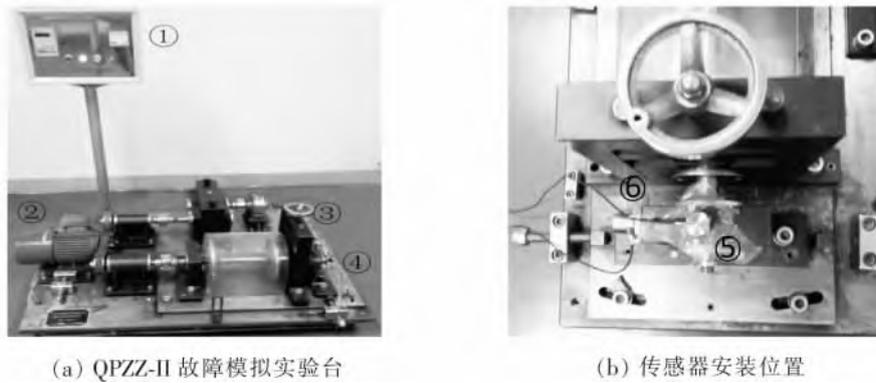


图 2 试验装置以及两个传感器安装位置

表 2 轴承特征频率及其计算公式

轴承特征频率类型	轴承特征频率的计算公式	故障特征频率理论值/Hz
内圈旋转频率	$f_r = \frac{n}{60}$	5.2
滚动体通过频率	$f_{bp} = \left[ \frac{D}{d} - \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right] f_r$	26.25
内圈通过频率	$f_{ip} = \frac{Z}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_r$	40.29
外圈通过频率	$f_{op} = \frac{Z}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_r$	28.75
保持架旋转频率	$f_{cp} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_r$	3.13

在本次滚动轴承故障诊断中,一通道与二通道分别为多通道相关-经验模式分解的数据采集通道,而一通道数据为多通道相关-经验模式分解与原 EMD 方法共用数据通道。文献[12]中提到,由 IMF 的本性可知,通常 EMD 方法分解出来的前几个 IMF 分量往往集中了原信号中最显著、最重要的信息,因为它总是把最主要的一些信息先提取出来,所以本文所述的原 EMD 方法是将 EMD 分解出的前 5 个 IMF 的平均值整合成的新的信号进行 SSCD 和 SESC D 分析。以下是对外圈、内圈、滚动体 3 种轴承故障类型做出的分析。

表 3 通道一各 IMF 与其振动信号相关系数

本征模态函数	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	IMF10
相关系数	0.547 2	0.572 4	0.383 4	0.184 4	0.339 6	0.222 3	0.049 1	0.058 7	0.030 1	0.000 9

表 4 通道二各 IMF 与其振动信号相关系数

本征模态函数	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	IMF10
相关系数	0.494 3	0.730 7	0.247 7	0.263 8	0.167 2	0.038 2	0.250 6	0.080 5	0.011 0	-0.005 8

图 3(a)~图 3(c)分别展示了外圈故障信号通道一、通道二与整合出的有效 IMF 的时域图,并通过多通道相关-经验模式分解与原 EMD 方法的 SSCD 与 SESC D 对比结果说明:

(1)图 3(a)和图 3(b)分别为通道一和通道二振动信号的时域图,将振动信号由 EMD 分解出的各 IMF 分量做多通道相关处理,其结果由表 3 和表 4 给出。选择相关系数最大的一组 IMF 相加,整合出的有效的 IMF 的时域图如图 3(c)所示。

(2)与图 3(d)相比较,在图 3(e)中,2 000 Hz 附近信号幅值相对较高,其余频段信号相对 2 000 Hz 处较为微弱,而图 3(g)在 2 000 Hz 处信号被附近频段的噪声所淹没,特征频率集中的频段幅值并不明显,这体现了多通道相关-经验模式分解方法相对于原 EMD 方法能够更准确的突出有效振动频率。

(3)由于 2 000 Hz 处存在特征频率所以幅值较高,而其他频段特征频率较为微弱,理论上除强噪声

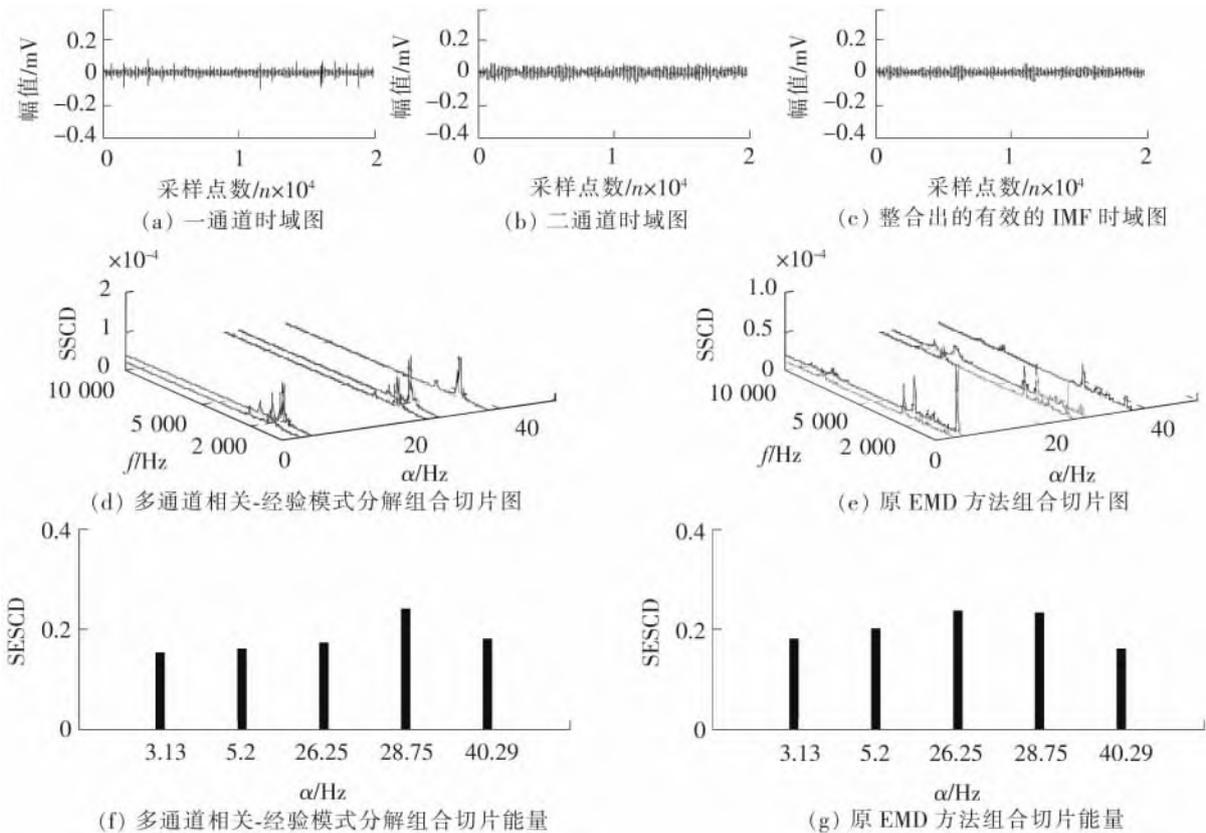


图 3 外圈故障信号分析结果

外,信号能量应相对较低,图 3(d)所示的原 EMD 方法的 SSCD 图谱中 2 000 Hz 外的其他频段,存在能量较高的噪声,而图 3(d)中除了信号在特征频率集中的 2 000 Hz 附近具有较高的幅值外,其他频段并没有明显的高能量谱线,这说明多通道相关-经验模式分解方法能有效削弱振动信号中的强噪声。

(4)由图 3(f)和图 3(g)中是对多通道相关-经验模式分解与原 EMD 方法的循环谱组合切片能量的分析,其中对 5 种不同类型的故障特征频率进行切片能量分析,能量最高的频率即为当前故障特征频率,依次诊断出滚动轴承的故障类型。图 3(h)表明, $\alpha=28.75$  Hz 处能量较高,相对的其他切片能量明显较低,依据表 2 中的故障特征频率理论值可知,故障发生在外圈。正如原 EMD 方法的 SSCD 图谱中所显示,每条特征频率的谱线内含有大量的强噪声,导致原 EMD 方法的 SESCD 的谱图显示处  $\alpha=26.25$  Hz 和  $\alpha=28.75$  Hz 处谱线能量都很高,且  $\alpha=28.75$  Hz 处的能量略低于  $\alpha=26.25$  Hz 处的能量,由表 2 中的故障特征频率理论值得到的诊断结果是内圈故障,出现了明显的误诊,这进一步说明多通道相关-经验模式分解比原 EMD 方法能更有效的提高信号的信噪比,能够更准确地提取滚动轴承的故障频率、识别故障类型。

通过图 4 所示内圈的 SSCD 图谱可看出:多通道相关-经验模式分解图谱中除 2 000 Hz 以外的频段的信号幅值比较微弱,表明信号内所含的强噪声较少,而原 EMD 方法在 2 000 Hz 处故障频率集中的频段的幅值相对强噪声的幅值并不明显,10 000 Hz 附近噪声的幅值相对较大,表明强噪声对原 EMD 的 SSCD 分析产生了较强的影响,表明了多通道相关-经验模式分解比原 EMD 方法能够更好的削弱噪声、提高信噪比。

从图 5 所示的滚动体 SESCD 图谱上可看出:多通道相关-经验模式分解的循环谱组合切片能量大于 0.2 的谱线只有一条,而原 EMD 方法的 SESCD 图谱中切片能量大于 0.2 的谱线有两条。若以阈值判断轴承故障类型,原 EMD 方法不能确诊故障类型,而多通道相关经验模式分解则可依据表 2 故障特征频率理论值准确的诊断出该轴承的故障类型为滚动体故障,这表明了多通道相关-经验模式分解比原 EMD 方法能更准确的提取故障特征频率、诊断出故障类型。

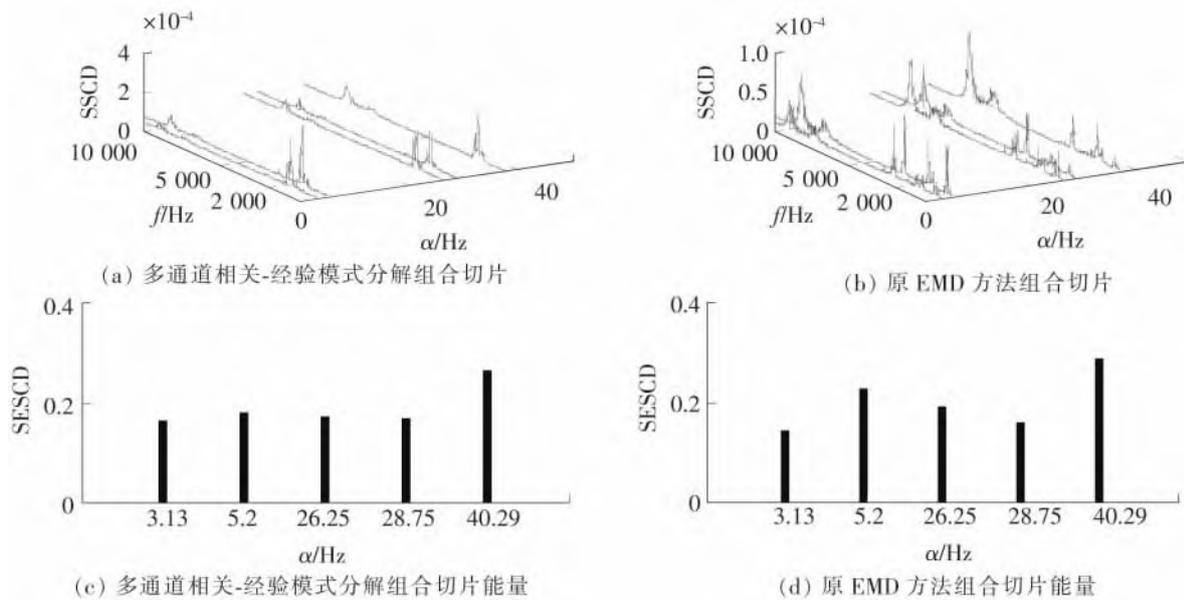


图 4 内圈故障信号分析结果

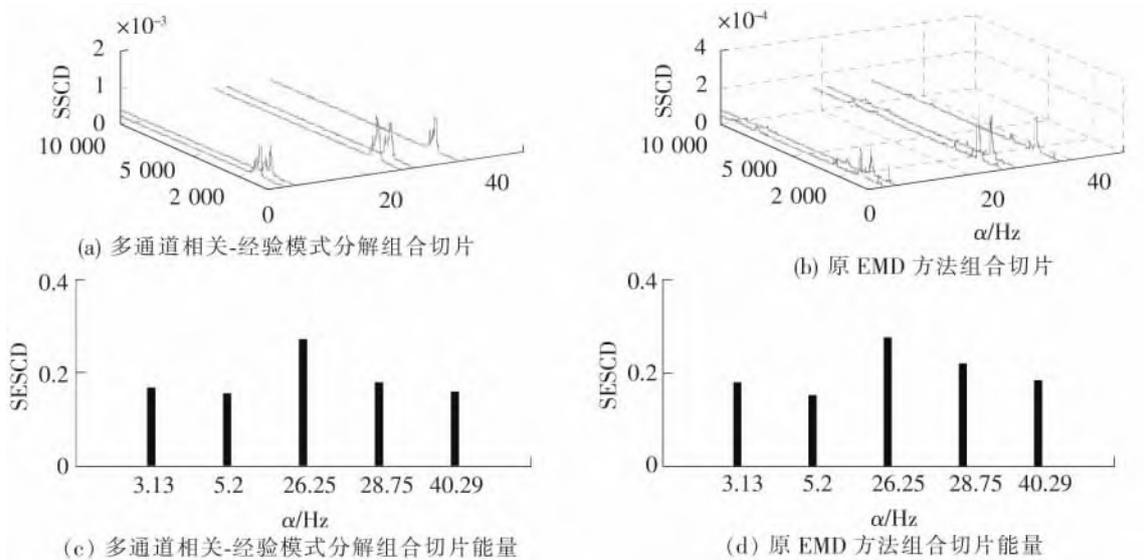


图 5 滚动体故障信号分析结果

### 3 结论

本文通过多通道相关-经验模式分解与原 EMD 方法对滚动轴承故障的诊断结果进行比较分析,结果表明:

- (1) 多通道相关-经验模式分解突破了对滚动轴承振动信号的循环平稳特性的要求,能用于分析连续的、非线性、非平稳振动信号,如调制的机械信号、转子启停等。
- (2) 多通道相关性分析能够依据相关系数,选择相关性最大的 IMF,由此可以排除原 EMD 方法产生的虚假分量。
- (3) 本文提出的多通道相关-经验模式分解的方法能有效削弱强噪声、提高信噪比,可在强噪声背景下有效地诊断滚动轴承的故障类型。

然而不是所有的振动信号都适用于多通道相关-经验模式分解方法,本文提出的方法适用于分析连续的振动信号,如调制的机械信号、转子启停等非线性、非平稳振动信号,而对于冲击等短时振动信号以及

信号呈线性规律特征的信号,本文所述方法还需进一步改进和完善。

## 参 考 文 献

- [1]陈仁祥,汤宝平,吕中亮. 基于相关系数的 EEMD 转子振动信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 542-546.
- [2]丁康,米林,王志杰. 解调分析在故障诊断中应用的局限性问题[J]. 振动工程学报,1997(1):13-20.
- [3]付新欣. 基于小波分析的滚动轴承故障诊断技术研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2013.
- [4]耶晓东. HHT 方法在轴承故障诊断中的应用[J]. 陕西理工学院学报:自然科学版, 2012(4):9-13.
- [5]刘雪霞,张琦,谭业发. 高阶谱分析技术在轴承故障信号特征提取中的应用[J]. 机床与液压, 2008(7):155-160
- [6]岳晓峰,邵海贺. 基于改进 EEMD 的滚动轴承故障诊断研究[J]. 制造业自动化, 2015(17):80-82.
- [7]廖庆斌,李舜酩,覃小攀. 车辆振动信号的特征提取方法比较 [J]. 吉林大学学报, 2007, 37(4):910-914..
- [8]廖庆斌,李舜酩. 一种旋转机械振动信号特征提取的新方法 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(16):1675-1679.
- [9]余发军,周凤星. 基于 EEMD 和自相关函数特性的自适应降噪方法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(1):206-209.
- [10]毕果. 基于循环平稳的滚动轴承及齿轮微弱故障特征提取应用研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2007.
- [11]毕果,陈进. 组合切片分析在滚动轴承故障诊断中的应用研究 [J]. 机械科学与技术, 2009, 28(2):182-185.
- [12]杨宇,于德介,程军圣,等. 经验模态分解(EMD)在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2003, 30(5):25-28.

## Application of Multi-channel Correlation Empirical Mode Decomposition in the Fault Diagnosis of Rolling Bearings

Ma Zengqiang, Gu Chaojian, Liu Xiaoyun

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Experience mode decomposition (EMD) is most widely used in processing non-stationary vibration signals. In order to solve the problems that some diagnosis effects achieved by this method are not obvious enough sometimes due to the strong background noise involved in the early fault signal of rolling bearings, the Multi-channel correlation empirical mode decomposition (MCC-EMD) based on EMD is proposed. Firstly, EMD is used to decompose the fault signal into several intrinsic mode functions (IMFs). Secondly, the Multi-correlation process is made for the IMFs and adaptive reconstruction is performed by the strongest correlation of IMFs. Finally, the fault type of rolling bearing is identified by cyclic spectrum analysis. The proposed method is applied to simulated signals and actual signals, and the results show that the method can effectively extract the weak feature frequency information of incipient fault of rolling bearing.

**Key words:** Multi-channel correlation; empirical mode decomposition; rolling bearing; fault diagnosis