DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0001-04.

CSES应用SVMD-Teager Energy的滚动轴承多工况下故障诊断方法

李金城[1]，张 凯[2]

(1.沈阳化工大学 信息工程学院,辽宁 沈阳 110142;
2.沈阳化工大学 装备可靠性研究所,辽宁 沈阳 110142)

摘 要: 针对多工况下的滚动轴承复合故障信号易被高噪声淹没而难以提取之难点,提出使用联合平方包络谱(CSES)对滚动轴承进行故障频率判定,但被高噪声包围的复合故障振动信号使得谱分析效果大打折扣。首先信号预处理采用的连续变分模态分解(SVMD)克服人为设置分解模态K数,避免了模态混叠,减少噪声干扰,依据相关系数提高重构信号精度;其次,采用Teager能量算子突显瞬时故障脉冲特征;最后,采用CSES原理,计算滤波后信号的平方包络谱。通过仿真与实验,在不同载荷情况下,与快速包络谱、CSES相比,该方法能够有效提取滚动轴承在多工况下初期的故障信号。

关键词: 滚动轴承;多载荷;信号处理;故障诊断;降噪;故障特征
中图分类号:TP274;TH133.33 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)02-0001-04

CSES Application of SVMD Teger Energy for Fault Diagnosis of Rolling Bearings under Multiple Operating Conditions

LI Jin-cheng[1], ZHANG Kai[2]

(1. College of Information Engineering, Shenyang Chemical University, Shenyang 110142 China;
2. Equipment Reliability Research Institute, Shenyang Chemical University, Shenyang 110142 China)

Abstract: Faced with the difficulty that the composite error signal of the rolling bearing under multiple working conditions is easily flooded by high noise and difficult to extract, it is proposed to use the Combined Squared Envelope Spectrum (CSES) to determine the failure rate of rolling bearings, however, the composite error vibration signal surrounded by strong noise significantly reduces the effect of spectral analysis. The specific application process can be found here. First, the SVMD used in signal preprocessing overcomes the artificial adjustment of the decomposition mode K number, avoids mode aliasing, reduces noise interference, and improves the accuracy of the reconstructed signal according to the correlation coefficient. Second, the Teager energy operator is used to highlight the properties of transient error pulses. Finally, the squared envelope spectrum of the filtered signal is calculated according to the CSES principle. Through simulation and experiment under different load conditions, compared to Fast Envelope Spectrum, CSES, this method can effectively extract the initial error signal of the rolling bearing under multiple working conditions.

Keywords: rolling bearings; multiple loads; signal processing; fault diagnosis; noise reduction; fault frequency

0 引言

轴承故障是旋转机械设备报错的主要原因之一,如何确保轴承的良好运转,及时诊断、排除故障是所努力的目标。在轴承故障诊断方面,反褶积技术得到巨大的发展并不断进步使其广泛应用在故障诊断领域滤波降噪。

自Huang等人[1]对信号特性提出递归固有模态函数IMF分量,为解决非线性非平稳的振动信号提供了一种全新且权威的经验模态分解方法(EMD)。为了消除原始经验模态分解(EMD)中存在的模态混合,提出集成经验模态分解(EEMD)。通过研究参数幅度和集成试验次数对EEMD进行定量评价[2],与空域相关结合提取信号特征[3]。后续相继设计和提出了大量的故障特征提取技术和方法。如自适应时频分析方法的局部均值分解(LMD),以故障振动信号故障提取为目标[4],将去噪后的信号送入LMD进行实验,能得到较高的故障诊断正确率。变分模态分解(VMD)方法通过将信号变换到频域并分解信号各分量,分别采用峭度、粒子群优化算法和多目标多岛遗传算法[5-7],麻雀算法对分解次数K和惩罚因子α进行数值选

*基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB2004401);辽宁省高端人才建设工程-辽宁省特聘教授([2018]3533号)资助;辽宁省教育厅重点(普通)项目(LJKZ0435)
收稿日期:2023-03-08

择。与VMD具有相似数学理论的新变体即变分模态提取(Variational mode extraction,VME)认为将提取特模态后的残余信号在中心频率为零[8],得到较高降噪信号提取。拓展到二维图像信号,提出的新变体2D−VMD[9],用于肽显微镜图像降噪;复变分模式分解(Complex variational mode extraction,CVMD)[10]用于处理复值信号。本文采用的信号降噪是连续变分模态分解算法(SVMD)[11]是在VME发展起来,与VMD的模态并行提取相反,分解方法以顺序的方式提取所有的模态。其次,为突出对于降噪信号后的故障特征使用Teager能量算法。而对于近些年对数据降维、模式识别[12−13]应用在轴承诊断均取得良好效果。最后对于故障信号的识别阶段。为了克服当前峭度图的局限性,采用CSES[14]作为新的解调方法。

本文针对故障的滚动轴承进行诊断主要的工作与创新:

(1) 提出基于CSES的SVMD−Teager Energy的滚动轴承多工况故障诊断方法;

(2) 采用SVMD自适应分解本征模态函数,达到降噪、克服模态混叠;

(3) 采用Teager能量算子加强重构信号的故障脉冲冲击;

(4) 采用联合平方包络谱进行包络解调,突出故障特征倍频频率。

1 理论基础

1.1 SVMD算法

SVMD算法为了减少模态混叠和重构信号误差,是在VME基础上添加了一些约束条件,以顺序提取所有模态分量,对第L−1模态的分量不会对下一阶模态分量L造成影响。

通过图2滚动轴承试验台中的传感器再由数据采集装置得到的振动信号进行试验分析。

一般振动信号模态分解用数学表达式为:

$$f(t)=u_L(t)+f_r(t) \tag{1}$$

输入信号$f(t)$分解为:第一阶模态($u_L(t)$)和残差信号($f_r(t)$)。

算法遵循如下4条约束准则:

(1) 依据各模态在其中心频率聚集这一原则。

(2) $f_r(t)$能量在$u_L(t)$具有有效分量的频率下最小化。

(3) 前L−1模态在有效分量下中心频率最小。

(4) 约束4是保证信号完全重构$f(t)$。

顺序提取至第L模态时,在满足式(1)时,将J_1、J_2和J_3的准则约束最小化。

$$\begin{aligned}&\min_{u_L,\omega_L,f_r}\{\alpha J_1+J_2+J_3\}\\&\text{subject to:}u_L(t)+f_r(t)=f(t)\end{aligned} \tag{2}$$

式中,α为平衡J_1、J_2、J_3的参数。

振动信号经过模态分解后的信号归一化降噪,为第二步作准备。

1.2 Teager Energy

Teager Energy采用微分+瞬时值估算动态总能量,可以增强信号的脉冲特征。对于离散时间信号$x(t)$,Teager能量算子表达式为:

$$\psi\left[x(t)\right]=\left[x(t)\right]^2-x(t-1)x(t+1) \tag{3}$$

幅值、频率反应越剧烈,能量算子输出越大。可以突显故障信号的脉冲特征。

1.3 CSES算法

第一步:将降噪信号分解到不同频带获取各中心频率;

第二步:计算各层滤波后平方包络谱下的无偏自相关信号;

$$s(\tau)=\frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N-n}s(t_j)s(t_j+\tau) \tag{4}$$

式中:$s(t_j)$为平方包络信号;n为信号$s(t_j)$的长度,n=0,1,2,…,N−1时延因子$\tau=n/f_s$;f_s为信号采样频率;$s(\tau)$为无偏自相关信号。

第三步:以≥最大峭度值一半为依据,筛选滤波信号;

第四步:将平方包络谱叠加求均值,提取故障特征频率。

1.4 试验整体步骤

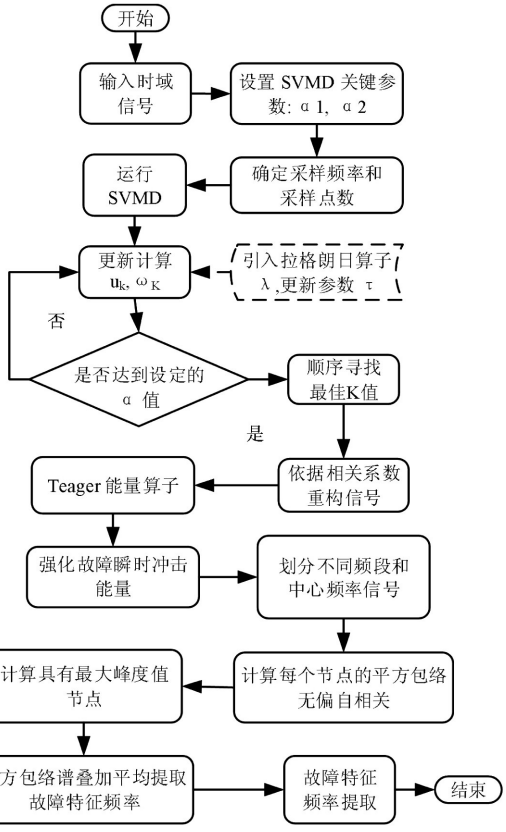


图1 方法分析过程图

SVMD克服以往学者研究的EMD、VMD等分解信

号算法需人为干预分解的模态数量，采用顺序方式提取所有模态即模态之间互相独立，克服模态混叠。Teager Energy虽会加强一定程度的干扰，但是使其脉冲能量更加凸显。使用谱分析可以对振动信号从时域变换到频域，更加直观清晰从频谱图观察到故障类型的频率。而采用CSES谱不仅克服误脉冲所带来的不恰当解，同时对各个频带进行分析与叠加，强化明显频谱。

2 实验数据采集

为增加数据可靠性，采用沈阳化工大学装备可靠性研究所的滚动轴承数据，验证本文方法在背景噪声干扰下的故障特征提取能力。电主轴，液压加载装置，上位机控制界面，数据采集系统等组成该设备。滚动轴承试验台如图2所示。

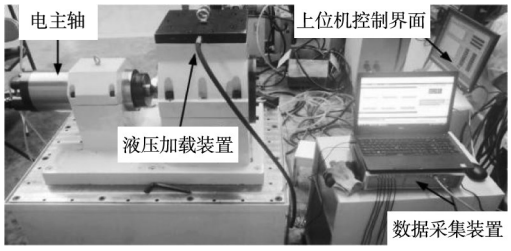


图2 滚动轴承试验台

表1为SKF6306轴承的几何尺寸参数。表2为SKF6306轴承的试验设置参数。

表1 SKF6306轴承的几何尺寸参数

参数名称	内圈直径/mm	外圈直径/mm	滚动体直径/mm	节圆直径/mm	接触角/α	滚动体个数/Z
大小	30.0	72.0	12.6	51.0	0°	8

表2 SKF6306轴承的试验设置参数

参数名称	内圈单点损伤/mm	外圈单点损伤/mm	采样频率/kHz	转速/r/min	载荷/kN
大小	0.2	0.2	20	1 880	0
	0.4	0.4	20	1 680	4

滚动轴承故障试验台采集到的外圈、内圈振动时域信号分别如图3、图6所示。图4、图7为外圈、内圈故障信号的分析结果。

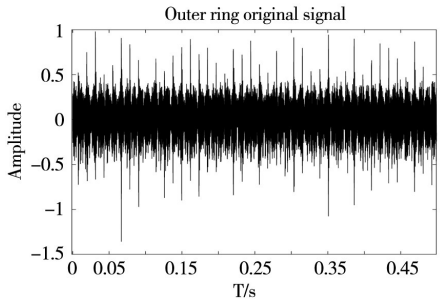


图3 外圈时域波形

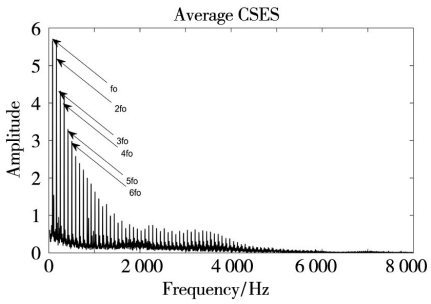


图4 外圈故障频域波形

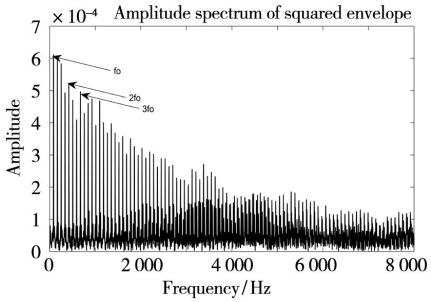


图5 快速包络谱提取外圈故障信号

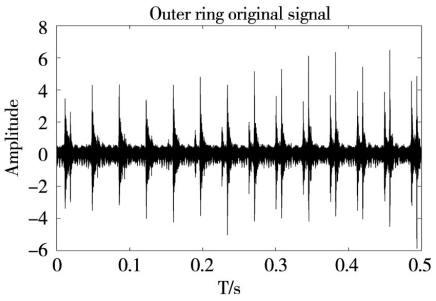


图6 内圈时域波形

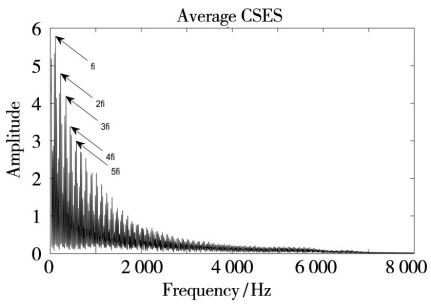


图7 内圈故障频域波形

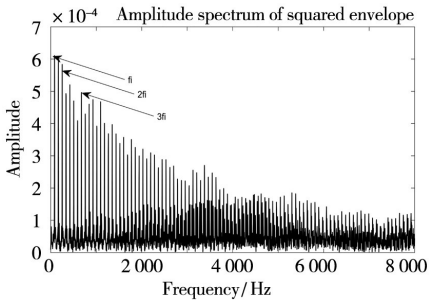


图8 快速包络谱提取内圈故障信号

(下转第65页)