

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905242

基于灰色准则与 EEMD 的滚刀振动信号降噪方法*

贾亚超¹, 李国龙¹, 何坤², 董鑫¹

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室 重庆 400044;

2. 重庆工商大学制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室 重庆 400067)

摘要:工程现场采集的滚刀振动信号掺杂噪声,致使信号特征难以提取。提出一种基于灰色准则与集合经验模态分解(EEMD)的滚刀振动信号降噪方法。首先将原信号进行EEMD分解得到若干个特征模态函数(intrinsic mode function, IMF),再根据提出的灰色准则对IMF分量进行极性一致化处理、均值化处理,计算出IMF1与其他IMF分量的灰色关联度,并按照灰色关联度将IMF分量降序排列,然后选择降序排列中前一半IMF分量进行软阈值处理,最终将处理后的IMF分量、未处理的IMF分量及余项进行重构,得到降噪后的信号。通过不同初始信噪比的仿真信号和实际加工中的滚刀振动信号验证了本方法的可行性和有效性,同时与EEMD结合相关系数降噪法、小波软阈值降噪法进行了比较,结果表明本方法的降噪效果更优。

关键词:滚刀振动信号;集合经验模态分解;灰色准则;降噪

中图分类号: V231.92 TH133.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.55

Denoising method for vibration signal of hob based on grey criterion and EEMD

Jia Yachao¹, Li Guolong¹, He Kun², Dong Xin¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: The collected vibration signal of hob in engineering site is contaminated with noise. It is difficult to extract features contained in vibration signal. In this study, ensemble empirical mode decomposition (EEMD) is applied to denoise vibration signals. To solve the problem of selecting and processing of intrinsic mode function (IMF) after EEMD decomposition, a denoising method of hob vibration signal based on grey criterion and EEMD is proposed. Firstly, the original signal is decomposed into several IMF components by EEMD. Then, according to the proposed grey criterion, each IMF component is processed by polarity consistency and mean processing. The grey correlation between IMF1 and other IMF components is calculated. All IMF components are arranged in descending order according to the grey correlation degree. The first half of IMF components in the descending order are selected for soft threshold processing. Finally, processed IMF components, unprocessed IMF components and residual components are reconstructed to obtain the denoised signal. The feasibility and validity of the method are verified by the simulation signal with different initial signal-to-noise ratios and the vibration signals of the hob in actual machining. Meanwhile, the proposed method is compared with EEMD combined with correlation coefficient and wavelet soft threshold denoising. Experimental results show that this method has better denoising effectiveness.

Keywords: vibration signal of hob; ensemble empirical mode decomposition; grey criterion; denoising

0 引言

由于滚刀断续切削的特性,振动现象在滚齿加工中

难以避免。当滚齿机主轴振幅超出齿轮精度误差允许范围时,加工齿轮齿廓表面粗糙、质量恶化,会加速刀具磨损和降低使用寿命,最终导致加工精度和生产效率降低^[1]。所以采集、分析滚刀振动信号对研究滚齿加工振

动特性,提高滚削加工精度具有重要意义。然而滚齿机工作环境复杂,振动信号的采集容易受到采集仪器、采集环境、人为因素的影响,致使振动信号中掺杂噪声,信号特征难以提取。因此对原始振动信号进行降噪处理十分必要。

滚刀主轴结构复杂,采集到的振动信号往往具有非平稳性,非线性等特征,针对此类信号的处理,Wu等^[2]在弥补过去经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)不足的基础上,提出了集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)。近年来许多学者将EEMD用于信号降噪,Wang等^[3]将基于EMD降噪技术的区间阈值法进行了改进,并与EEMD结合对信号进行降噪处理。Han等^[4]通过EEMD和自适应阈值进行微震和地震信号去噪。郭翠云^[5]基于EEMD对制冷机轴承振动信号进行了降噪研究。李利品等^[6]将改进的EEMD算法应用于多相流测量信号滤波,提升了信号的信噪比。Mariyappa等^[7]分析了噪声幅值和阈值效应的作用,利用EEMD对MCG数据进行基线漂移去除和去噪。田晶等^[8]以峭度一度量因子作为准则选取特征模态函数(intrinsic mode function, IMF)重构信号,并结合空域相关降噪方法进行降噪处理,实现对滚动轴承故障的诊断。李建康等^[9]对比了EEMD与EMD的降噪效果,并将EEMD应用于道路载荷谱降噪处理;王玉静等^[10]结合峭度值法、相关系数法两个准则对IMF进行筛选;陈仁祥等^[11]提出了一种基于相关系数的EEMD转子振动信号降噪方法,选取相关系数大于0.5的IMF分量重构信号,达到对原信号降噪的目的。

本文在灰色关联度的基础上建立了灰色准则,灰色关联度是灰色理论体系中的核心概念之一,其数值大小定性地反映出各因子序列对目标序列影响的权重。王冬冬等^[12]将小波分解与灰色关联分析结合,对热波检测图像进行降噪处理。Zhou等^[13]将马尔可夫模型引入到灰色模型中,对设备的退化进行预测,并且研究了模型参数与预测精度的关系。Liu等^[14]将灰色关联分析和灰色聚类相结合,对再制造产业的关键产业指标进行分类,并提出未来改进的方向。Wang等^[15]提出了灰色动态趋势关联模型,对雾霾天气相关因素进行了动态分析。文成等^[16]针对形态滤波中结构元素尺度难以确定问题,提出利用灰色关联度最大准则选择结构元素尺度进行形态滤波新方法。冉钧等^[17]提出了一种对频域振幅进行灰色关联分析的旋转机械转子故障模式辨识方法;李志山等^[18]利用灰色关联度对钛合金盘铣工艺参数进行优化。

本文针对EEMD分解信号后IMF分量的选取处理问题,提出了灰色准则,并将二者结合应用于滚刀振动信号的降噪处理。首先应用EEMD对待处理的含噪振动信

号进行分解得到若干个IMF分量,然后基于灰色准则对IMF分量进行筛选和处理,排除其中的噪声成分,以达到降低信号噪声,提高信噪比的目的。

1 基于灰色准则与EEMD降噪方法

1.1 EEMD方法

EEMD具体步骤如下。

1) 在原信号 $x(t)$ 中加入幅值均值为0,标准差为常数的高斯白噪声。

2) 对加入高斯白噪声后的信号进行EMD分解,得到 K 个IMF分量 $c_j(t)$, $(j=1,2,\dots,K)$ 和一个余项 $s(t)$ 。

3) 重复步骤1)和2),每次加入不同的随机高斯白噪声,得到:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^K c_{ij}(t) + s_i(t) \quad (1)$$

式中: $x_i(t)$ 表示第 i 次加入高斯白噪声后的信号, $i=1,2,\dots,N$; $c_{ij}(t)$ 表示第 i 次加入高斯白噪声的信号分解后的第 j 个IMF分量; $s_i(t)$ 表示第 i 次分解的余项。

4) 对每次分解得到对应的IMF分量和余项求平均,以消除高斯白噪声对真实IMF分量的影响,如式(2)和(3)所示。

$$c_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{ij}(t) \quad (2)$$

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i(t) \quad (3)$$

式中: $c_j(t)$ 表示EEMD分解后得到的第 j 个IMF分量。

5) 最终原信号被分解为 K 个IMF分量和一个余项,可以表示为式(4)。

$$x(t) = \sum_{j=1}^K c_j(t) + s(t) \quad (4)$$

1.2 基于灰色准则与EEMD的降噪流程

EEMD分解后的IMF分量可分为信号主导分量和噪声主导分量两类,并且研究表明,在EEMD的分解结果中IMF1主要包含噪声^[7]。灰色准则的基本思想是:对EEMD分解后的IMF分量进行极性一致化处理、均值化处理;计算出IMF1与其他IMF分量的灰色关联度,灰色关联度的数值越大,说明所对应的IMF分量与IMF1的关联性越强,即含噪声的程度越大;按灰色关联度的大小将所有IMF分量降序排列,需要指出的是:灰色关联度的数值在0~1之间,IMF1与自身的灰色关联度总为1,所以在降序排列中IMF1排在第一位;在降序排列中,各IMF分量的含噪声程度依次降低,选取前一半的IMF分量进行软阈值处理;最后将处理后的IMF分量、未处理的IMF分量以及余项进行重构,得到降噪后的信号。

基于灰色准则与EEMD的降噪流程如下。

1) 在对原信号进行 EEMD 分解之前需要首先确定两个重要参数:所加入高斯白噪声的比值系数 α 和总体平均次数 M 。本文采用文献[10]的能量标准差法确定 α 和 M 。

2) 将原信号进行 EEMD 分解,得到若干个 IMF 分量和一个余项。

3) 根据灰色准则选择 IMF 分量进行处理并重构,灰色准则的内容包括:

(1) 将各 IMF 分量表示为序列;

$$\text{imf}_i^{(0)}(k) = \{\text{imf}_i^{(0)}(1), \text{imf}_i^{(0)}(2), \dots, \text{imf}_i^{(0)}(n)\} \quad (5)$$

式中: i 表示第 i 个 IMF 分量, $i = 1, 2, \dots$; k 表示序列元素的个数, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

(2) 对各 IMF 分量序列分别进行极性一致化处理和均值化处理;

$$\text{imf}_i^{(1)}(k) = \text{imf}_i^{(0)}(k) + |\min(\text{imf}_i^{(0)}(k))| \quad (6)$$

$$\text{imf}_i^{(2)}(k) = \frac{\text{imf}_i^{(1)}(k)}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \text{imf}_i^{(1)}(k)} \quad (7)$$

(3) 分别计算 IMF1 序列与其他 IMF 分量序列的灰色关联度;

$$r_j = \sum_{k=1}^n \omega \frac{\min_j \min_k Q_j(k) + \rho \max_j \max_k Q_j(k)}{Q_j(k) + \rho \max_j \max_k Q_j(k)} \quad (8)$$

式中: $Q_j(k) = |\text{imf}_1^{(2)}(k) - \text{imf}_j^{(2)}(k)|$; ρ 表示分辨系数,取值范围为 $0 < \rho < 1$,通常取 $\rho = 0.5$; ω 表示权重系数,通常取 $\omega = 1/n$; r_j 表示第 j 个 IMF 分量与 IMF1 的灰色关联度, $j = 2, 3, \dots$ 。

(4) 将所有 IMF 分量根据灰色关联度的数值大小降序排列;

(5) 选取降序排列中前一半的 IMF 分量进行软阈值处理;

$$\overline{\text{imf}}_i^{(0)}(k) = \begin{cases} \text{sign}(\text{imf}_i^{(0)}(k))(|\text{imf}_i^{(0)}(k)| - T) & |\text{imf}_i^{(0)}(k)| \geq T \\ 0 & |\text{imf}_i^{(0)}(k)| < T \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\overline{\text{imf}}_i^{(0)}(k)$ 表示处理后的 IMF 分量; sign 表示符号函数; $T = \sigma \sqrt{2 \ln N}$, $\sigma = \text{median}(|\text{imf}_i^{(0)}(k)|) / 0.6745$; N 是 IMF 分量的长度。

(6) 将处理后的 IMF 分量、未处理的 IMF 分量以及余项重构,得到降噪后的信号。

2 仿真实验

本节通过正弦信号、“Doppler”信号、“Blocks”信号说

明本方法的有效性,在仿真信号中加入不同的噪声以模拟不同输入信噪比(SNR_{in})的含噪信号。降噪效果与目前应用广泛的 EEMD 结合相关系数的降噪方法^[11](相关系数法)以及小波软阈值降噪法(小波阈值法)进行对比。并采用降噪后的信噪比(SNR_{out})和均方根误差(root mean square error, RMSE)作为评价降噪效果的标准,需要强调的是: SNR_{out} 值越大说明降噪效果越好;与之相反 RMSE 值越小说明降噪效果越好。二者的计算如式(10)和(11)所示。

$$SNR = 10 \log_{10}(P_s/P_n) \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_1 - s_0)^2} \quad (11)$$

式中: P_s 表示纯信号的有效功率; P_n 表示降噪后噪声的有效功率; s_0 表示纯信号; s_1 表示降噪后的信号; N 表示信号长度。

表 1~3 所示为各降噪方法对 3 种仿真信号在 $-20 \leq SNR_{in} \leq 25$ 范围内的降噪效果,图 1~3 所示为 $SNR_{in} = 0$ 时 3 种方法降噪前后的时域波形。从总体上看,本方法的降噪效果优于相关系数法和小波阈值法。相关系数法仅对于正弦信号,且当 $SNR_{in} \geq -7$ 时取得了较好的降噪效果,而对于“Doppler”和“Blocks”此类非平稳信号降噪效果不佳,从波形图中可以看出,经相关系数法降噪之后“Doppler”和“Blocks”信号明显失真,反映出该方法具有一定的局限性。随着 SNR_{in} 的增大,小波阈值法的降噪效果逐渐变好,但是在 $SNR_{in} \leq -5$ 的范围内,小波阈值法的降噪效果不够理想。本方法在 SNR_{in} 数值较高时的降噪效果略逊色于小波阈值法,但是依然有效地提高了信噪比,而在 SNR_{in} 的全部取值范围内,本方法都展现了良好的降噪性能。因此,仿真实验的结果证明了本文方法的有效性。

3 工程应用案例

为了验证本方法对实际工程信号降噪的有效性,在某汽车传动件生产企业采集了滚齿机实际加工中滚刀 Z 向的振动加速度信号(滚刀振动信号),所采用的实验设备主要包括:高速干切滚齿机、日置信号存储记录仪、PCB 振动加速度传感器。滚刀振动信号采集过程中滚齿机持续加工同一批次齿轮,如图 4 所示为滚刀振动信号采集的现场情况。

实验中滚刀转速 680 r/min,由此可以得到滚刀的转频(f_r)为 11.3 Hz。滚刀刀齿不连续致使滚刀表面产生了沿圆周均匀分布的滚刀槽,在滚齿加工中,由于滚刀槽的存在使得切削力周期性地加载到滚刀上,本文将其称为滚切频率(f_g),该频率可以依据文献[19]中的计算得到,即:

表1 正弦信号仿真结果

Table 1 Simulation results of sinusoidal signals

SNR_{in}	本方法		小波阈值法		相关系数法	
	SNR_{out}	RMSE	SNR_{out}	RMSE	SNR_{out}	RMSE
-20	-4.853	1.235	-18.254	5.776	-19.086	6.357
-17	-2.538	0.946	-14.574	3.782	-16.112	4.514
-15	-0.644	0.761	-12.097	2.843	-13.083	3.185
-13	1.661	0.583	-9.504	2.109	-10.778	2.443
-10	3.955	0.448	-5.279	1.297	-7.991	1.772
-7	6.695	0.327	-1.424	0.832	4.025	0.444
-5	7.515	0.297	0.987	0.630	6.157	0.348
-3	7.472	0.299	2.865	0.508	7.666	0.292
0	10.313	0.215	6.164	0.347	10.496	0.211
3	12.671	0.164	8.941	0.252	12.736	0.163
5	15.679	0.116	11.167	0.195	15.598	0.117
7	15.745	0.115	12.983	0.158	17.102	0.099
10	18.819	0.081	15.667	0.116	17.975	0.089
13	20.191	0.069	19.013	0.079	20.267	0.068
15	19.635	0.104	21.02	0.063	22.159	0.055
17	24.985	0.040	23.619	0.047	24.707	0.041
20	26.642	0.033	26.028	0.035	26.439	0.034
23	29.383	0.024	29.313	0.024	28.952	0.025
25	30.713	0.021	31.344	0.019	30.115	0.022

表2 “Doppler”信号仿真结果

Table 2 Simulation results of “Doppler” signals

SNR_{in}	本方法		小波阈值法		相关系数法	
	SNR_{out}	RMSE	SNR_{out}	RMSE	SNR_{out}	RMSE
-20	-4.605	0.172	-14.369	0.530	-19.001	0.904
-17	-1.704	0.174	-11.385	0.530	-16.088	0.911
-15	0.043	0.179	-9.410	0.530	-14.158	0.916
-13	1.749	0.185	-7.403	0.530	-12.267	0.928
-10	4.154	0.198	-4.404	0.530	-8.109	0.812
-7	6.444	0.215	-1.403	0.530	-5.450	0.845
-5	7.966	0.226	0.577	0.530	2.837	0.409
-3	8.465	0.270	2.591	0.530	4.992	0.402
0	11.149	0.281	5.624	0.531	4.894	0.577
3	13.233	0.312	8.601	0.531	5.123	0.792
5	14.284	0.347	10.593	0.531	4.847	1.030
7	15.064	0.400	12.581	0.532	4.520	1.346
10	17.799	0.414	15.581	0.534	4.069	2.011
13	20.032	0.450	18.478	0.539	6.973	2.026
15	21.441	0.482	20.415	0.542	6.612	2.656
17	22.834	0.519	22.379	0.547	6.502	3.404
20	24.148	0.628	25.222	0.555	6.161	4.977
23	26.783	0.655	28.120	0.561	6.364	6.869
25	28.287	0.693	30.036	0.567	6.406	8.605

表3 “Blocks”信号仿真结果

Table 3 Simulation results of “Blocks” signals

SNR_{in}	本方法		小波阈值法		相关系数法	
	SNR_{out}	RMSE	SNR_{out}	RMSE	SNR_{out}	RMSE
-20	-4.497	0.169	-14.453	0.530	-19.065	0.902
-17	-1.493	0.169	-11.421	0.530	-16.090	0.908
-15	0.443	0.171	-9.392	0.530	-14.133	0.915
-13	2.111	0.176	-7.455	0.530	-12.276	0.924
-10	3.665	0.209	-4.413	0.530	-9.479	0.951
-7	6.155	0.221	-1.444	0.531	-5.994	0.896
-5	6.412	0.271	0.578	0.531	-4.288	0.930
-3	7.737	0.294	2.581	0.532	1.047	0.635
0	8.820	0.369	5.608	0.534	0.919	0.917
3	12.309	0.347	8.485	0.538	1.148	1.253
5	13.498	0.380	10.405	0.543	1.108	1.583
7	14.243	0.439	12.294	0.550	0.877	2.047
10	15.471	0.539	15.026	0.869	0.567	2.895
13	18.459	0.540	17.639	0.593	0.790	4.125
15	19.680	0.590	19.378	0.611	0.677	5.260
17	21.003	0.638	21.076	0.632	0.728	6.583
20	23.283	0.693	23.614	0.667	0.827	9.197
23	25.856	0.735	26.343	0.695	0.912	12.978
25	27.366	0.770	28.083	0.709	0.906	16.202

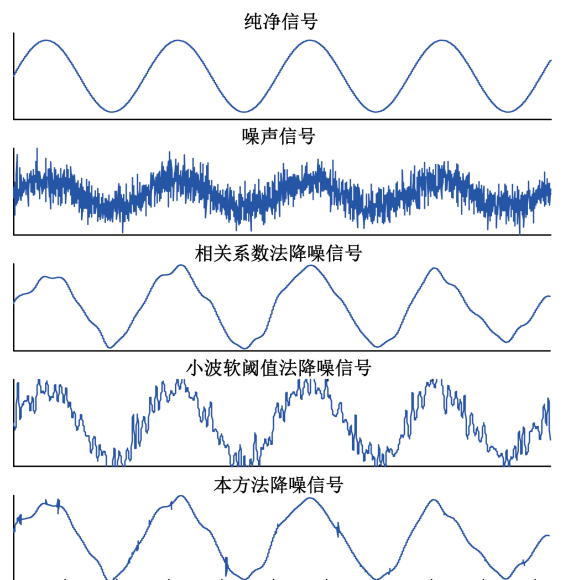


图1 正弦信号降噪前后效果对比

Fig.1 Comparison of sinusoidal signal before and after denoising

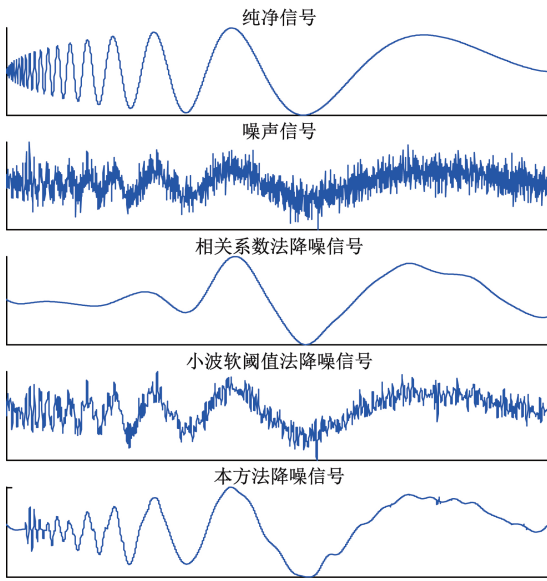


图 2 “Doppler”信号降噪前后效果对比
Fig.2 Comparison of “Doppler” signal before and after denoising

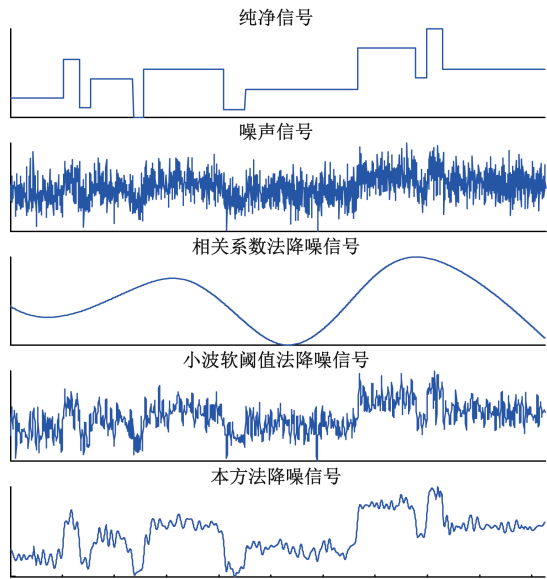


图 3 “Blocks”信号降噪前后效果对比
Fig.3 Comparison of “Blocks” signal before and after denoising

$$f_g = \frac{n \times z_k}{60} \quad (12)$$

式中: n 表示滚刀转速; z_k 表示滚刀槽数, 本实验中 $z_k = 14$ 。

由式(12)可以计算出 $f_g = 158.7$ Hz。因此降噪后滚刀振动信号的包络谱中应能消除噪声的频率成分, 准确提取出 f_r 及其倍频, f_g 及其倍频。

本实验中滚刀振动信号的采样频率为 10 000 Hz, 该

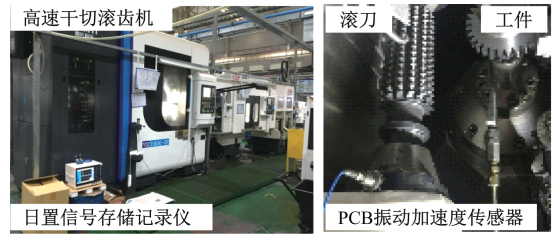


图 4 滚刀振动信号采集现场
Fig.4 Hob vibration signal acquisition site

批次齿轮的单位加工时间约 40 s。为了更加直观、便捷地验证本方法的工程实用性, 截取了振动信号的一段共 10 000 个采样点, 分别采用本方法, 相关系数法和小波阈值法进行降噪处理, 滚刀原始振动信号如图 5 所示。

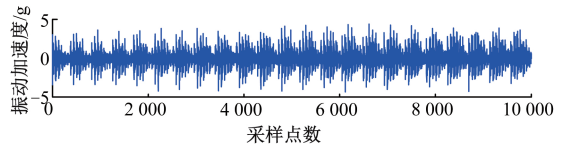


图 5 滚刀振动信号
Fig.5 Hob vibration signal

对原始滚刀振动信号进行 EEMD 分解, 计算出所加入高斯白噪声的比值系数 $\alpha = 0.11$ 、总体平均次数 $M = 131$, 分解得到 12 个 IMF 分量和一个余项, 如图 6 所示。

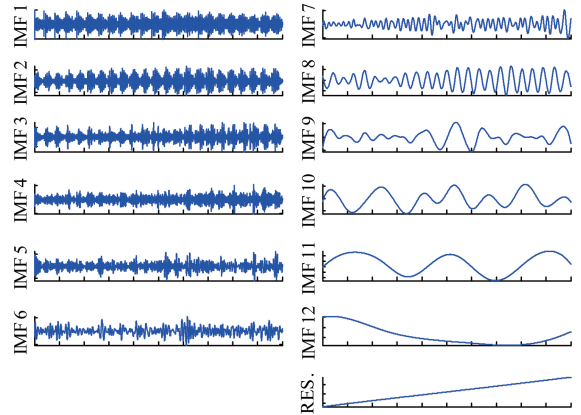


图 6 滚刀振动信号 EEMD 分解结果
Fig.6 EEMD decomposition of vibration signals of hob

将 3 种降噪方法分别应用于滚刀振动信号, 降噪后的时域波形如图 7 所示, 通过对比可以看出经本文方法降噪后振动信号的时域波形更加光滑, 初步验证了本文方法的工程实用性。进一步求出 3 种方法降噪后振动信号的包络谱^[20-21], 如图 8 所示, 本文方法有效地从振动信号中提取出了 f_r 、2 倍 f_r 、 f_g 、2 倍 f_g 、3 倍 f_g 、4 倍 f_g 、5 倍 f_g , 噪声部分已经基本被消除, 降噪结果符合上述的理论分析; 而相关系数法和小波阈值法的包络谱中依然存在噪

声成分,降噪效果不佳。因此相较于相关系数法和小波阈值法,本方法可以有效地抑制滚刀振动信号的噪声,提取出滚刀的特征频率,从而证明了本方法的工程实用价值。

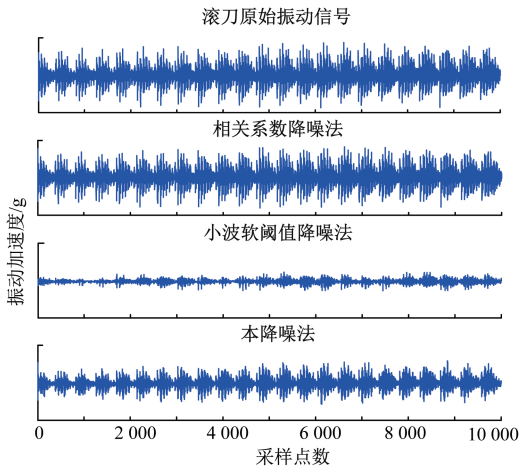


图7 降噪效果时域对比

Fig.7 Comparison of noise reduction effect in time domain

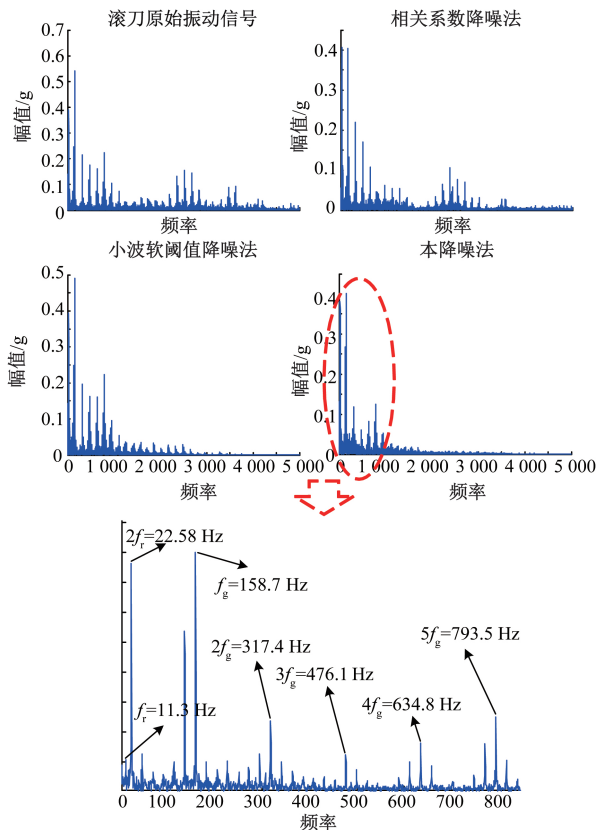


图8 降噪效果包络谱对比

Fig.8 Envelope spectrum comparison of noise reduction effect

4 结 论

针对实际采集滚刀振动信号掺杂噪声导致特征难以提取的问题,本文提出一种基于灰色准则与 EEMD 的滚刀振动信号降噪方法。该方法在对原信号进行 EEMD 分解的基础上,根据所提出的灰色准则对分解得到的 IMF 分量进行极性一致化处理、均值化处理,计算 IMF1 与其他 IMF 分量灰色关联度,并按照灰色关联度将 IMF 分量降序排列,然后选择降序排列中前一半的 IMF 分量进行软阈值处理,最终将处理后的 IMF 分量、未处理的 IMF 分量以及余项进行重构,得到降噪后的信号。

IMF1 被认为主要包含噪声,通过计算 IMF1 与其他 IMF 分量灰色关联度,可以定性地判断出其余各 IMF 分量与 IMF1 关联性的相对大小,并将此作为判断 IMF 分量含噪声程度的依据。将 IMF 分量按灰色关联度降序排列,则在此排列顺序中,IMF 分量的含噪声程度依次降低,选择前一半的 IMF 分量进行软阈值处理,去除其中的噪声成分,最后将处理后的 IMF 分量、未处理的 IMF 分量以及余项进行重构,得到降噪后的信号。将本文方法应用于仿真信号和滚刀振动信号,结果表明本文方法可有效提高信号的信噪比,降低噪声成分对滚刀振动信号特征提取的干扰。

参考文献

- [1] 李先广,杨勇.数控滚齿机滚刀主轴振动特性研究[J]. 机械工程学报,2017,53(1):130-139.
LI X G, YANG Y. Research on the vibration properties of hob spindle for CNC gear hobbing machine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017,53(1):130-139.
- [2] WU ZH H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1):1-41.
- [3] WANG H, LIU ZH G, SONG Y, et al. Ensemble EMD-based signal denoising using modified interval thresholding[J]. IET Signal Processing, 2017, 11(4): 452-461.
- [4] HAN J J, VAN DER BAAN M. Microseismic and seismic denoising via ensemble empirical mode decomposition and adaptive thresholding[J]. Geophysics, 2015, 80(6): KS69-KS80.
- [5] 郭翠云.提升 EEMD 降噪方法及制冷机轴承故障诊断应用研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(5): 9-15.
GUO C Y. De-noising method with improved EEMD and

- its application to fault diagnosis of refrigerator bearing[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019,33(5):9-15.
- [6] 李利品,党瑞荣,樊养余.改进的 EEMD 算法及其在多相流检测中的应用[J].*仪器仪表学报*,2014,35(10):2365-2371.
- LI L P, DANG R R, FAN Y Y. Modified EEMD denoising method and its application in multiphase flow measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014,35(10):2365-2371.
- [7] MARIYAPPA N, SENGOTTUVEL S, PARASAKTHI C, et al. Baseline drift removal and denoising of MCG data using EEMD: Role of noise amplitude and the thresholding effect[J]. *Medical Engineering and Physics*, 2014, 36(10): 1266-1276.
- [8] 田晶,王英杰,王志,等.基于 EEMD 与空域相关降噪的滚动轴承故障诊断方法[J].*仪器仪表学报*, 2018, 39(7):144-151.
- TIAN J, WANG Y J, WANG ZH, et al. Fault diagnosis for rolling bearing based on EEMD and spatial correlation denoising[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(7):144-151.
- [9] 李建康,宋向荣,周宏月,等. EEMD 在道路载荷谱降噪处理中的应用[J].*振动与冲击*,2014, 33(12):69-74,116.
- LI J K, SONG X R, ZHOU H Y, et al. Application of EEMD in denoising processing of road load spectra[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(12):69-74, 116.
- [10] 王玉静,康守强,张云,等.基于集合经验模态分解敏感固有模态函数选择算法的滚动轴承状态识别方法[J].*电子与信息学报*,2014, 36(3):595-600.
- WANG Y J, KANG SH Q, ZHANG Y, et al. Condition recognition method of rolling bearing based on ensemble empirical mode decomposition sensitive intrinsic mode function selection algorithm[J].*Journal of Electronics and Information Technology*,2014,36(3):595-600.
- [11] 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):542-546,685.
- CHEN R X, TANG B P, LYU ZH L. Ensemble empirical mode decomposition de-noising method based on correlation coefficients for vibration signal of rotor system[J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2012, 32(4):542-546,685.
- [12] 王冬冬,田干,杨正伟,等.基于小波分解灰关联的热波检测图像增强[J].*仪器仪表学报*,2015, 36(5):1086-1092.
- WANG D D, TIAN G, YANG ZH W, et al. Image enhancement of infrared thermal waving inspection based on the wavelet decomposition and grey relational analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015,36(5):1086-1092.
- [13] ZHOU D J, YU Z Q, ZHANG H SH, et al. A novel grey prognostic model based on Markov process and grey incidence analysis for energy conversion equipment degradation[J]. *Energy*,2016,109:420-429.
- [14] LIU W J,ZHANG J,JIN M ZH,et al. Key indices of the remanufacturing industry in China using a combined method of grey incidence analysis and grey clustering[J]. *Journal of Cleaner Production*,2017,168:1348-1357.
- [15] WANG J J,HIPEL K W,DANG Y G. An improved grey dynamic trend incidence model with application to factors causing smog weather [J]. *Expert Systems with Applications*,2017,87:240-251.
- [16] 文成,周传德.基于灰色关联度的形态滤波及滚动轴承故障诊断中应用[J].*振动与冲击*, 2015, 34(14):51-55.
- WEN CH, ZHOU CH D. Morphological filter based on grey relational degree and its application in rollingbearing fault diagnosis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(14):51-55.
- [17] 冉钧,赵荣珍.基于频域振幅灰色关联度的转子故障模式辨识[J].*振动.测试与诊断*, 2013, 33(6):1019-1024, 1096.
- RAN J, ZHAO R ZH. Rotor failure mode identification based on grey correlation analysis of frequency-domain amplitude[J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2013, 33(6):1019-1024,1096.
- [18] 李志山,史耀耀,辛红敏,等.灰色关联度优化钛合金盘铣开槽工艺参数[J].*西北工业大学学报*, 2018, 36(1):139-148.
- LI ZH SH, SHI Y Y, XIN H M, et al. Technologicalparameter optimization of disc-Milling grooving of titanium alloy based on grey correlation degree[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical*

University, 2018, 36(1):139-148.

- [19] 雷涛,曹华军,朱利斌,等. 交变冲击载荷下高速干切滚刀主轴系统振动响应特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(11):113-121.
LEI T, CAO H J, ZHU L B, et al. Vibration response characteristics research for the hob spindle system of high-speed dry hobbing under alternating impact load [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(11): 113-121.
- [20] 胡爱军,马万里,唐贵基. 基于集成经验模态分解和峭度准则的滚动轴承故障特征提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11):106-111.
HU AI J, MA W L, TANG G J. Rolling bearing fault feature extraction method based on ensemble empirical mode decomposition and kurtosis criterion [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(11):106-111.
- [21] 闫祥海,周志立,李忠利. 拖拉机 PTO 载荷 EMD 软阈值降噪研究[J]. 西安交通大学学报, 2019(5):1-7.
YAN X H, ZHOU ZH L, LI ZH L. Study on the noise reduction of tractor PTO load by EMD soft-threshold method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019 (5):1-7.

作者简介



贾亚超, 2017 年于长安大学获得学士学位, 现为重庆大学博士研究生, 主要研究方向为智能制造与装备。

E-mail: 1195413771@qq.com

Jia Yachao received his B. Sc. degree from Chang'an University in 2017. He is currently a Ph. D. candidate at Chongqing University. His main research interests include intelligent manufacturing and intelligent equipment.



李国龙 (通信作者), 1990 年于武汉科技大学获得学士学位, 1997 年于重庆大学获得硕士学位, 2001 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆大学教授、博士生导师, 主要研究方向为精密加工与装备。

E-mail: glli@cqu.edu.cn

Li Guolong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Wuhan University of Science and Technology in 1990, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Chongqing University in 1997 and 2001. He is currently a professor and doctoral supervisor at Chongqing University. His main research interests include precision machining and equipment.