

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407374

金属齿轮内部缺陷超声检测信号去噪方法*

杨梦冉¹ 姚贞建¹ 王辰辰² 吕丽¹

(1. 武汉工程大学电气信息学院 武汉 430205; 2. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所 北京 100095)

摘要:针对金属齿轮内部缺陷检测信号易受噪声干扰导致缺陷特征提取不准确问题,提出一种基于动态局部熵与自适应分解的齿轮缺陷超声检测信号去噪方法。采用经验模态分解对齿轮缺陷超声检测信号进行自适应分解,结合相关系数模态聚类指标得到预处理信号;基于检测信号动态局部熵理论确定缺陷回波区间,得到缺陷回波信号;采用经验小波变换实现缺陷回波信号去噪,结合二次多项式平滑滤波算法提升去噪信号平滑度,得到金属齿轮缺陷超声检测信号的最终去噪结果。仿真超声检测信号去噪实验结果显示,对于不同信噪比条件下的仿真信号,本文方法去噪信号平均信噪比值和均方误差分别为 21.34 dB 和 0.000 2 V,去噪效果明显优于经验模态分解和小波变换,两种方法的平均信噪比和均方误差分别为 10.43 dB、12.56 dB 和 0.001 9 V、0.001 4 V,且在不同信噪比条件下的本文方法均具有更优的去噪效果和更强的鲁棒性。金属齿轮内部缺陷实测实验结果表明,本文方法能够去除齿轮缺陷超声检测信号中的复杂噪声干扰,有效提高了金属齿轮内部缺陷超声检测信号质量。

关键词: 超声检测;信号分解;噪声去除;局部熵;区间分割

中图分类号: TB52;TN91 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.2

Ultrasonic detection signal denoising method for internal defects of metal gear

Yang Mengran¹ Yao Zhenjian¹ Wang Chenchen² Lyu Li¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China)

Abstract: Aiming at the problem that the internal defect detection signal of gear is easily disturbed by noise and it is difficult to extract the defect feature information, an ultrasonic detection signal of gear defects denoising method based on dynamic local entropy and adaptive decomposition is proposed. The empirical mode decomposition is used to decompose the ultrasonic detection signal of gear defects adaptively, and the pre-processed signal is obtained. The local entropy distribution of preprocessed signal is calculated by dynamic local entropy theory, the defect echo interval is determined with the local entropy threshold, and the defect echo signal is then obtained. The defect echo signal is denoised based on the empirical wavelet transform, and the signal smoothness is improved through the quadratic polynomial least square algorithm. The final denoised result of the ultrasonic detection signal of gear defects is obtained. Simulations and actual measurement experiments are carried out to verify the denoising performance of the proposed method. The simulation experiment results show that for simulation signals under different SNR conditions, the mean SNR of the proposed method after denoising is 21.34 dB, and the mean square error MSE is 0.000 2 V. The denoising effect of the proposed method is significantly better than EMD and Wavelet Transform. The mean SNR and mean square error of the two methods are 10.43 dB, 12.56 dB and 0.001 9 V and 0.001 4 V respectively. In addition, the proposed method has better denoising effect and stronger robustness under different SNR conditions. The experimental results show that the proposed method can remove the complex noise interference in the ultrasonic detection signal of metal gear defects, and effectively improve the quality of the ultrasonic detection signal of metal gear defects.

Keywords: ultrasonic detection; signal decomposition; noise elimination; local entropy; interval segmentation

0 引言

金属齿轮是机械设备和汽车传动结构的重要部件,在其生产加工过程中通常会出现夹杂、裂纹、气孔、咬边、未融合等内部缺陷,会导致齿轮运行过程出现应力集中,增大疲劳损伤,甚至会产生断裂,进而影响其使用寿命、运动精度以及运行安全等^[1]。因此对金属齿轮内部缺陷进行高精度无损检测,是消除安全隐患和保证机械结构运行质量的关键环节^[2]。

超声检测技术具有穿透性强、适用性广、灵敏度高、对人体无害等优点,被广泛应用于齿轮内部缺陷检测及特性表征^[2-3]。在工程应用中,由于金属齿轮的服役环境复杂,检测过程会受到检测设备元件产生的电子噪声、超声波在传播过程中因齿轮结构不均匀产生的结构噪声以及复杂环境噪声等多种噪声成分的综合影响,导致采集到的齿轮缺陷超声检测信号信噪比较低,甚至可能出现有用信息被复杂噪声完全淹没的情况,无法直接通过采集到的齿轮超声检测信号来判断齿轮是否存在缺陷,缺陷位置、大小等信息,严重影响检测结果的准确性^[4-6]。因此,如何有效实现金属齿轮内部缺陷超声检测信号中复杂噪声的消除对于正确评估服役金属齿轮的结构健康状况具有重要作用。

目前,超声检测信号去噪方法一般依据噪声信号与检测信号的频率分布特征对信号进行分解,得出频率随时间变化的情况,并基于模态聚类指标从分解结果中重构有效信号,提高检测信号信噪比^[7]。常用的信号分解方法主要有小波变换、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)、变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)等^[8-10]。小波变换是根据设定小波基函数和分解层数将信号分解为高频分量和低频分量,通过设置阈值提取小波变换后高频分量中的有用成分,与低频分量组成重构信号实现信号去噪,如刘奎、张曼等^[11-12]利用小波阈值降噪方式实现了对超声检测信号的有效去噪。但小波基函数和分解层数的选择依赖于一定的先验知识,参数选择的合理性直接影响到信号降噪效果,导致该方法去噪过程的适应性较差^[13]。EMD方法无须预先设定任何参数,将信号按照频率由高到低的顺序自适应分解得到一系列本征模态分量,通过相关判定指标选取合适分量实现信号去噪过程^[14-15]。该方法能够去除齿轮缺陷超声检测信号中低频段的噪声干扰,但当噪声和待处理信号时频特征相近时,EMD方法易产生模态混叠问题和端点效应。VMD方法去噪过程与EMD类似,与EMD方法不同的是,该方法能够有效去除齿轮缺陷超声检测信号的高频噪声,但对低频噪声辨识度较差,并且设定合适的模态分解数量 K 对VMD方法去噪结果

至关重要, K 值偏小会使分解结果粗糙,无法有效实现信号去噪; K 值偏大,会导致信号分解过度,去噪结果失真。

综上,针对金属齿轮内部缺陷超声检测信号去噪问题,本文提出一种基于动态局部熵与自适应分解的齿轮内部缺陷超声检测信号去噪方法,通过引入信号局部熵理论^[16],结合经验模态分解,估计齿轮内部缺陷超声检测信号的缺陷回波区间,并通过经验小波变换和二次多项式平滑滤波算法实现金属齿轮内部缺陷超声检测信号的可靠去噪,有效提升超声检测信号的信噪比。

1 金属齿轮缺陷超声检测信号去噪方法

在实际金属齿轮超声缺陷检测过程中,齿轮缺陷超声检测信号易受检测环境、仪器等产生的噪声干扰而导致检测信号失真问题,大大降低缺陷检测的精确度和可靠性^[17]。针对这一问题,本文提出一种基于动态局部熵与自适应分解的齿轮缺陷超声检测信号去噪方法。

1.1 缺陷回波区间确定

齿轮缺陷超声检测信号中包含大量复杂噪声,噪声成分会使信号复杂度发生较大变化,从而影响信号动态局部熵的计算以及会对缺陷回波区间范围确定产生较大误差,为解决这一问题,首先要对原始信号进行粗去噪预处理。采用EMD对超声检测信号 $x(t)$ 进行自适应分解,得到一系列 $u(t)$ 分量和趋势分量 $Res.$,如式(1)所示。

$$x(t) = \sum_{k=1}^m u_k(t) + Res. \quad (1)$$

不同 $u(t)$ 分量中含有原始信号的特征信息不同,本文通过比较 $u(t)$ 分量与原始信号之间的相关系数,实现有用 $u(t)$ 分量筛选。计算 $u(t)$ 与 $x(t)$ 的相关系数 $r_1(m)$, $m=1,2,\dots,M$, M 为 $u(t)$ 个数。根据文献[18],本文将相关系数阈值 r_{limit} 设置为0.4,即当 $r_1(m) > r_{limit}$, $(m=1,2,\dots,M)$ 时,则定义第 m 个 $u(t)$ 分量为有用分量进行保留,否则为噪声分量予以剔除。将所有有用分量求和,得到预处理检测信号 $x_0(t)$ 。

为准确估计金属齿轮缺陷超声检测信号区间范围,本文基于信息熵理论提出动态局部熵指标,并通过信号复杂程度量化结果实现回波区间上下限准确估计。计算预处理检测信号 $x_0(t)$ 的熵值,通常情况下,信号规律性越差,信号越复杂,其熵值越大。设 $p_i(i=1,2,3,\dots,n)$ 为系统某一状态发生的概率,则该状态所含有的信息量可用如式(2)所示。

$$S(p_i) = \log(p_i^{-1}) = -\log(p_i) \quad (2)$$

使用所有状态含有的信息量的数学期望值作为系统的信息熵:

$$S = - \sum_{i=1}^n p_i \log(p_i) \quad (3)$$

信息熵的值反映超声检测信号的信息量,无法衡量每个时刻的含噪状态,因此提出能够反映信号局部性质的局部熵。针对预处理检测信号 $x_0(t)$,在时间坐标轴 $t(t = t_1, t_2, \dots, t_{end})$ 上建立窗长为 w 的时间窗口,则 $x_0(t)$ 在 t_0 处取时间区间 $(t_0 - \frac{w}{2}, t_0 + \frac{w}{2})$,根据式(3)计算该区间内信号熵值 $S_w(t_0)$,作为信号点 $x_0(t_0)$ 在窗长为 w 下的局部熵,如图 1 所示。对齿轮缺陷超声检测信号上的每个点进行如上计算,即可获得所有信号点的局部熵 $S_w(t)$ 。

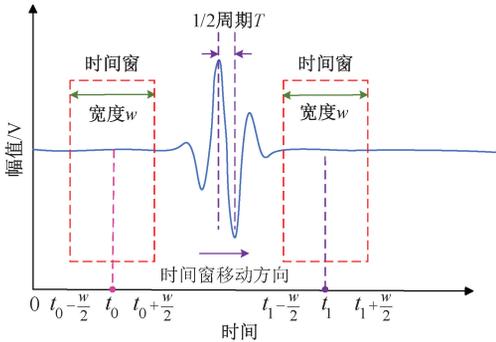


图 1 局部熵计算示意图

Fig. 1 Local entropy calculation diagram

不同信号求解出的局部熵范围可能不同,为了方便局部熵在齿轮缺陷超声检测信号降噪过程中的通用性,对局部熵进行线性归一化处理,使其范围在 0~1 之间。

$$S'_w(t) = \frac{S_w(t) - \min(S_w(t))}{\max(S_w(t)) - \min(S_w(t))} \quad (4)$$

提取 $S'_w(t)$ 中所有极大值点,建立极大值集合 $h(t)$, $h(t)$ 最大值点坐标为 $H(t_{max}, h_{max})$,以 t_{max} 为分界点将信号时间区间划分为 $[t_1, t_{max})$ 和 $[t_{max}, t_{end}]$ 。设定信号局部熵阈值 H_{limit} ,搜索 $[t_1, t_{max})$ 和 $[t_{max}, t_{end}]$ 中局部熵值小于等于 H_{limit} 的点,其横坐标记作 $t(p)$ 、 $t(q)$ 得:

$$t(p) < t_{max}, (p = 1, 2, \dots, P) \quad (5)$$

$$t(q) > t_{max}, (q = 1, 2, \dots, Q) \quad (6)$$

$$H_{limit} = 2.5\%h_{max} \quad (7)$$

其中, P 、 Q 分别为区间中满足式(5)和(6)的点数。

分别计算 $t(p)$ 、 $t(q)$ 与 t_{max} 的距离,确定距离最小值对应的横坐标,记作 t_{left} 、 t_{right} ,即区间 (t_{left}, t_{right}) 为预处理检测信号缺陷回波范围。针对实测齿轮缺陷超声检测信号,用 (t_{left}, t_{right}) 作为缺陷回波区间虽然可以有效避免信号噪声干扰,但是会造成信号特征信息缺失导致后续重构信号失真。

为保证缺陷回波区间的合理性,对缺陷回波区间进行拓宽处理,区间 (t_{left}, t_{right}) 左右端点向外扩展 1/4 周

期,即缺陷回波区间为 $(t_{left} - \frac{1}{4}T, t_{right} + \frac{1}{4}T)$,其中 T 为缺陷回波区间内信号的周期,如图 2 所示。根据缺陷回波区间,对齿轮缺陷超声检测信号 $x(t)$ 进行区间分割,提取缺陷回波信号 $x_1(t)$ 。

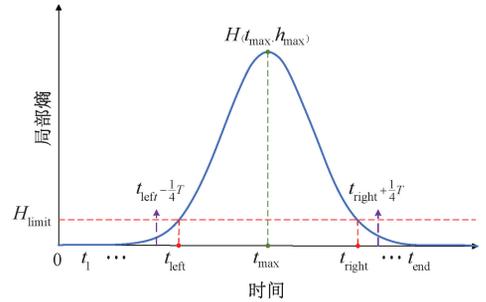


图 2 缺陷回波区间确定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of defect echo interval determination

1.2 金属齿轮缺陷超声检测信号重构

为实现齿轮缺陷超声检测信号去噪,对缺陷回波信号 $x_1(t)$ 进行降噪处理,采用经验小波变换对 $x_1(t)$ 进行自适应分解,得到 N 个 $w(t)$ 分量。计算 $w(t)$ 与 $x_1(t)$ 的相关系数 $r_2(n)$, $(n = 1, 2, \dots, N)$,将 $r_2(n)$ 大于 r_{limit} 的 $w(t)$ 分量进行求和,得到信号 $x_2(t)$ 。

$$x_1(t) = \sum_{j=1}^n w_j(t) \quad (8)$$

结合超声检测信号趋势分量 $Res.$ 与 $x_2(t)$ 构成重构信号 $x_3(t)$,即为降噪后的齿轮缺陷超声检测信号。由于在缺陷回波区间左右两端会出现信号跳变现象导致重构结果失真。为减小重构超声检测信号 $x_3(t)$ 的失真问题,采用二次多项式平滑滤波方法对缺陷回波区间两端信号跳变进行平滑处理,提升金属齿轮缺陷超声检测信号去噪效果。

二次多项式平滑滤波是一种基于移动窗口的最小二乘平滑滤波方法^[19-20]。在滤波操作中需要设定窗口长度为一个大于等于 3 的奇数 ($window = 2m + 1$) 和多项式次数 $k = 2$,对 $x_3(t)$ 进行平滑滤波后得到齿轮缺陷超声检测信号的最终去噪结果 $y(t)$,表示为:

$$y(t) = \sum_{k=-m}^m h(k) x_3(t - k) \quad (9)$$

式中: $h(k)$ 为平滑滤波器的抽象响应。

基于动态局部熵与自适应分解的金属齿轮内部缺陷超声检测信号去噪方法流程如图 3 所示。

2 去噪实验分析

2.1 仿真信号去噪实验

实际超声检测中,根据金属齿轮尺寸结合超声波传

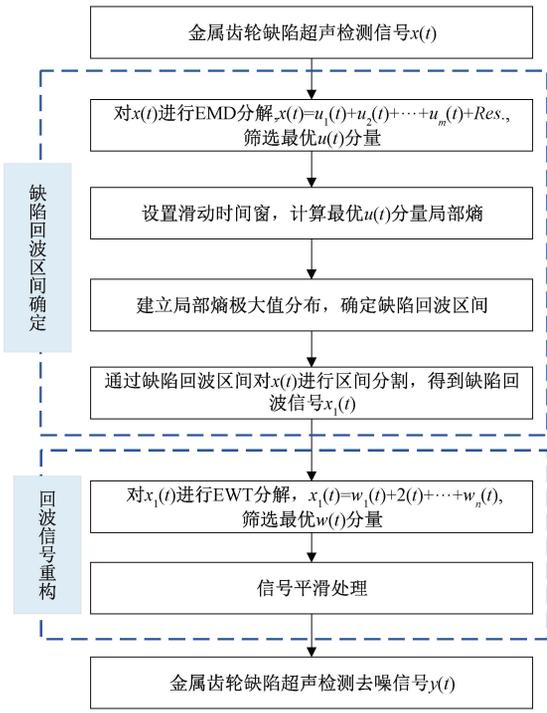


图3 金属齿轮缺陷超声检测信号去噪流程图

Fig. 3 De-noising flow chart of ultrasonic detection signal of metal gear defects

播速度,可区分齿轮缺陷超声检测信号中表面回波、底面回波与缺陷回波。对于存在多处缺陷的齿轮,采用本文所提去噪方法进行分段去噪处理,再将其拼接重构表征降噪检测信号。为方便讨论,本文仅针对单回波齿轮缺陷检测信号进行处理。仿真齿轮缺陷超声检测信号由高斯回波信号和噪声组成,高斯回波信号模型^[18]为:

$$s(t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos[2\pi f_c(t - \tau) + \varphi] \quad (10)$$

式中:信号幅度 $\beta = 1$;带宽因数 $\alpha = 60$;回波到达时间 $\tau = 1$;中心频率 $f_c = 5$;相位 $\varphi = 1.5$ 。

噪声信号由方差为 0.08、均值为 0 的高斯白噪声模拟得到。信号采样频率为 100 MHz,采样时间为 4 μs ,得到的仿真无噪信号和仿真加噪信号如图 4 所示。仿真加噪信号的信噪比 SNR = 5.732 4 dB,均方误差 MSE = 0.005 4 V。对仿真加噪信号进行 EMD 分解,得到 7 个 $u(t)$ 分量和 1 个趋势分量 $Res.$,如图 5 所示。

为提取有用 $u(t)$ 分量,分别计算各 $u(t)$ 分量与仿真加噪信号的相关系数,如表 1 所示。通过比较各 $u(t)$ 分量的相关系数与相关系数阈值 $r_{\text{limit}} = 0.4$ 的大小,可知只有 $u_2(t)$ 分量满足有用 $u(t)$ 分量筛选条件,内部包含大量有效特征信息,因此 $u_2(t)$ 分量为有用 $u(t)$ 分量,即预处理信号;其余分量均为噪声分量,予以剔除。

为确定缺陷回波区间,选取局部熵时间窗口长度为 $w = 5$,计算预处理信号的局部熵并通过式(4)进行线性

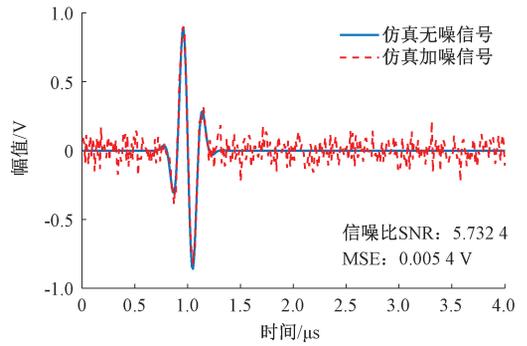


图4 仿真齿轮缺陷超声检测信号

Fig. 4 Simulation of gear defect ultrasonic detection signal

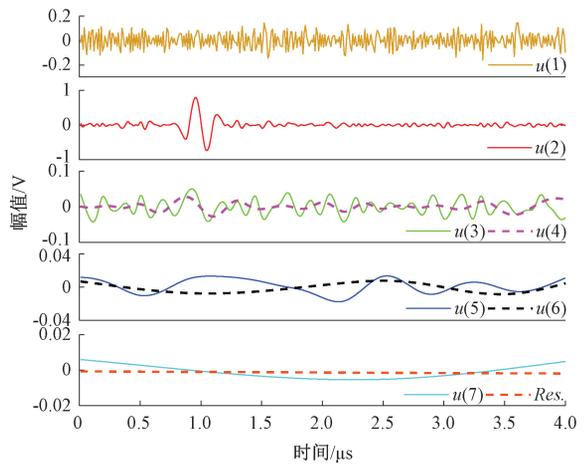


图5 EMD结果

Fig. 5 EMD result

归一化,如图 6 所示。局部熵最大值点记作 $H(t_{\text{max}}, h_{\text{max}})$,根据局部熵最大值 $h_{\text{max}} = 1$,得阈值 H_{limit} 为 0.025。通过 H_{limit} 筛选局部熵小于等于 H_{limit} 的极大值点,如图 6 蓝色方点所示,依次计算其横坐标与 $t_{\text{max}} = 0.96 \mu\text{s}$ 的距离。以 t_{max} 为界将时间轴分为 $[0, 0.96] \mu\text{s}$ 和 $[0.96, 4] \mu\text{s}$ 两个区间,搜索两个区间与 t_{max} 距离最近的极大值点,其横坐标分别记作 $t_{\text{left}} = 0.67 \mu\text{s}$ 、 $t_{\text{right}} = 1.24 \mu\text{s}$ 。区间 $[t_{\text{right}}, t_{\text{left}}]$ 即为缺陷回波区间,为了保证缺陷回波信号的

表1 仿真信号 $u(t)$ 相关系数

Table 1 $u(t)$ correlation coefficient of simulated signal

模态分量	相关系数	分量类型
$u_1(t)$	0.396 8	噪声分量
$u_2(t)$	0.912 4	有用分量
$u_3(t)$	0.367 4	噪声分量
$u_4(t)$	0.185 5	噪声分量
$u_5(t)$	0.062 2	噪声分量
$u_6(t)$	$8.778 6 \times 10^{-4}$	噪声分量
$u_7(t)$	0.02	噪声分量
Res.	0	噪声分量

完整性,将缺陷回波区间两侧外扩 $T/4$,其中 $T=0.2 \mu\text{s}$,得到最终缺陷回波区间为 $[0.62, 1.29] \mu\text{s}$ 。缺陷回波信号如图 7 中虚线所示。

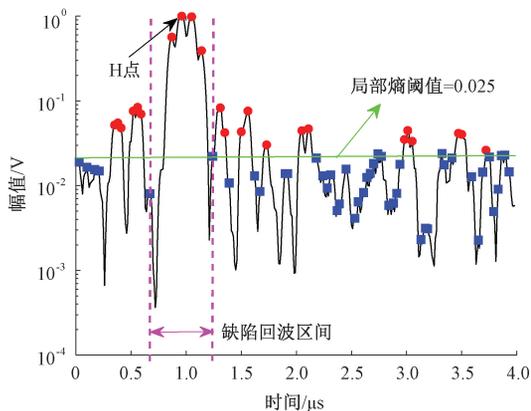


图 6 预处理检测信号局部熵

Fig. 6 Preprocessing detection signal local entropy

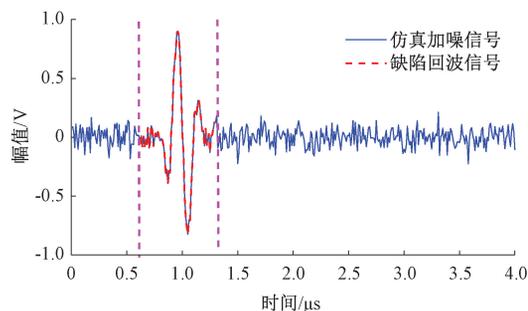


图 7 时域齿轮超声检测缺陷回波信号

Fig. 7 Time domain gear ultrasonic detection defect echo signal

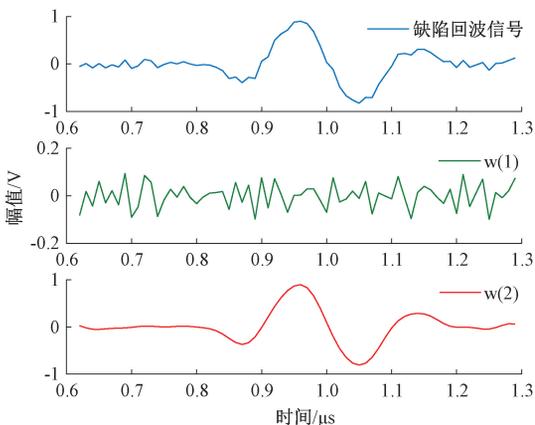
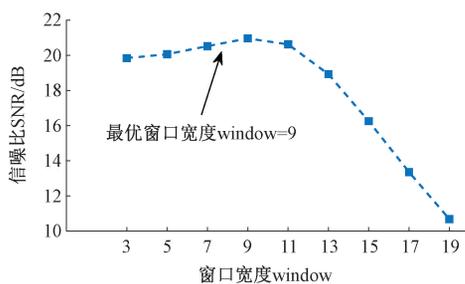


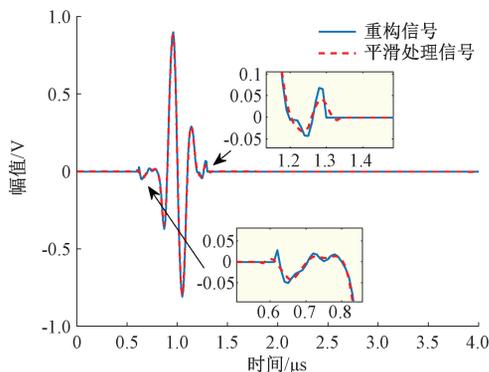
图 8 缺陷回波信号及 EWT 分解结果

Fig. 8 Defect echo signal and EWT decomposition result

采用 EWT 对缺陷回波信号进行分解,得到 2 个模态分量 $w(t)$ 如图 8 所示。2 个 $w(t)$ 与缺陷回波信号之间的相关系数分别为 0.150 1、0.990 2。说明 $w_1(t)$ 分量包



(a) 最优window估计
(a) Optimal window estimation



(b) 重构信号及平滑处理信号对比结果
(b) Comparison results of reconstructed signal and smoothed signal

图 9 平滑处理结果

Fig. 9 Smoothing results

含有用信息较少,视作噪声; $w_2(t)$ 分量包含较多有用信息,作为降噪后提取的有效信号。

将趋势分量 $Res.$ 和 $w_2(t)$ 相加得到重构信号,重构信号如图 9(b) 蓝色实线所示。为消除重构信号连接处跳变问题,对重构信号进行二次多项式平滑滤波处理。令二次多项式平滑滤波的窗口宽度 $window$ 由 3~19 间隔为 2 均匀变化,分别计算不同 $window$ 值条件下重构信号的信噪比指标,如图 9(a) 所示。由信噪比定义可知二次多项式平滑滤波的最优窗口宽度为 $window=9$ 。图 9(b) 红色虚线为当 $window=9$ 时重构信号的平滑滤波结果。由图 9(b) 局部放大图可知,经过二次多项式平滑处理后重构信号的平滑性得到提高。因此,将平滑处理信号作为仿真超声检测信号的去噪结果。

仿真齿轮缺陷超声检测信号去噪结果如图 10 所示。从图 10(a) 时域曲线上可以看到在保持信号幅值几乎不衰减的情况下能够有效去除信号中混杂的噪声,同时提高信号波形的平滑度,从图 10(b) 频域曲线上也可以直观的看到本文方法能够有效去除高频噪声,对低频噪声也有较好的抑制作用,验证了本文方法对于齿轮缺陷超声检测信号去噪的可行性。

为验证本文方法对齿轮缺陷超声检测信号去噪的优越性,采用 EMD、VMD、小波变换和本文方法分别对仿真

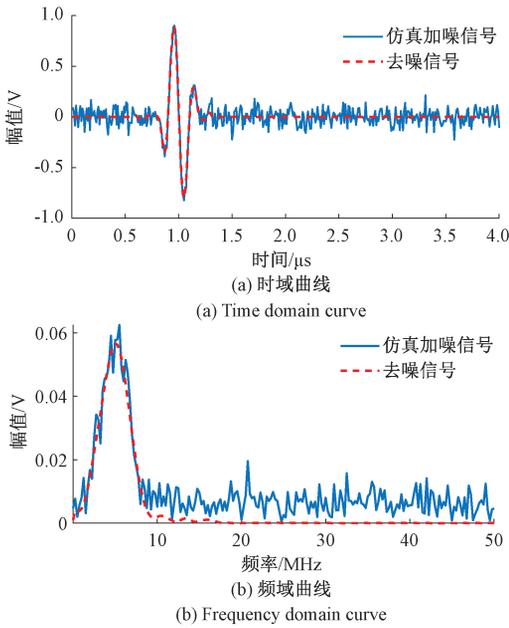


图 10 仿真齿轮缺陷超声检测信号去噪结果

Fig. 10 Simulation results of ultrasonic echo signal denoising

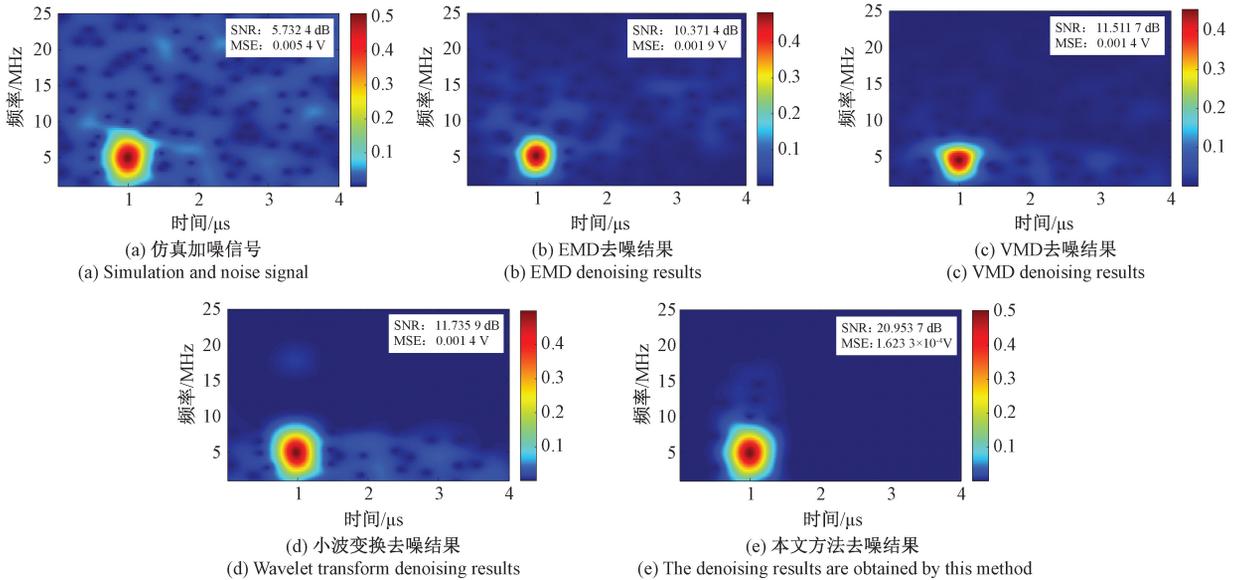


图 11 仿真齿轮超声检测信号去噪结果时频图对比

Fig. 11 Comparison of time-frequency graphs of de-noising results of ultrasonic detection signals of simulated gears

3种去噪方法。不同信噪比条件下,EMD、VMD、小波变换和本文方法去噪后信号信噪比平均值分别为 10.43、13.81、12.56 和 21.34 dB。对于强噪声环境下(实验6),仿真齿轮缺陷超声检测信号信噪比为 3.71 dB 情况下,本文方法去噪信号信噪比为 18.26 dB,提高了 14.55 dB,有效提取超声检测信号有用信息。此外,本文方法去噪结果的 MSE 指标始终小于其他 3 种方法,鲁棒性强。综合两种评价指标,进一步说明本文方法对于金属齿轮缺

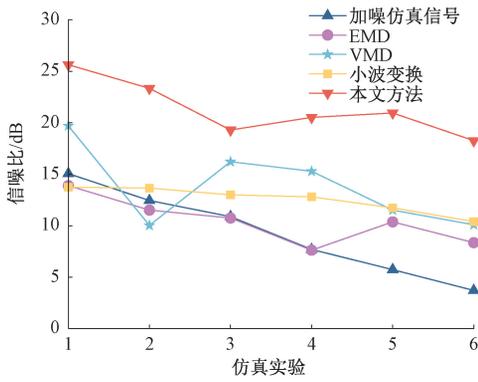
陷超声检测信号去噪的优越性。

2.2 金属齿轮缺陷超声检测信号重构

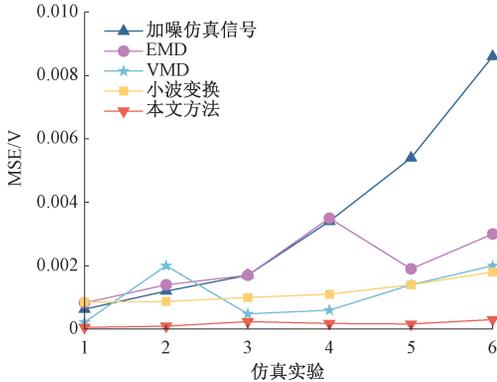
为验证本文方法对实测金属齿轮缺陷超声检测信号的去噪性能,采用 Olympus5077PR 脉冲收发仪、OlympusV106 接触式探头(单收发式超声换能器)以及泰克 MDO4054C 示波器组成的超声检测系统,对不同尺寸的金属齿轮构件分别进行检测并采集其超声检测信号,金属齿轮缺陷超声检测系统如图 13 所示。

信号进行去噪,其中小波变换选取 8 dB 小波函数,分解层数为 3 层。仿真加噪信号及 4 种方法的去噪结果时频图如图 11 所示。从图 11(a)可以看出,红色区域对应缺陷回波。EMD 去噪结果如图 11(b)所示,该方法可消除 7 MHz 以下的低频噪声成分,但对于高频噪声的去除效果较差。VMD 去噪结果如图 11(c)所示,该方法能够有效消除 7 MHz 以上的高频噪声成分,但对低频噪声成分辨识度低,去噪效果较差。与小波变换方法去噪结果类似,小波变换方法能够消除绝大部分高频噪声,且去噪效果优于 VMD 方法,但对于与原始信号频率相近的低频噪声成分去噪能力一般,小波变换去噪结果如图 11(d)所示。相比而言,本文方法综合了前 3 种去噪方法的优点,有效消除高、低频噪声的同时对中心频率处的噪声有显著抑制效果。

图 12 给出仿真齿轮缺陷超声检测信号在不同信噪比条件下,4 种方法对于信号去噪效果的量化分析对比。可以看出相比较于其他 3 种现有去噪方法,本文方法去噪效果最为显著,去噪结果的信噪比始终远远大于其他



(a) 信噪比结果对比
(a) Comparison of SNR results



(b) 均方误差结果对比
(b) Comparison of mean square error results

图 12 不同信噪比条件下去噪结果对比
Fig. 12 Comparison of noise results under different SNR conditions

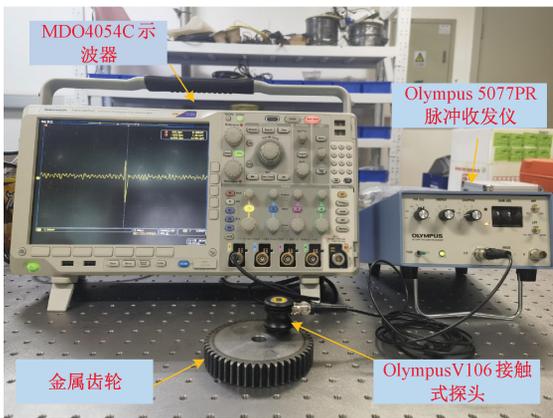
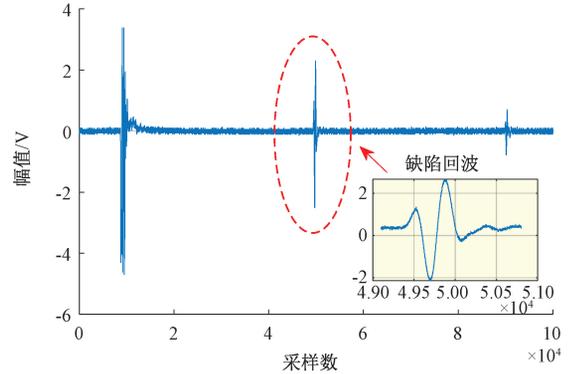


图 13 金属齿轮缺陷超声检测系统

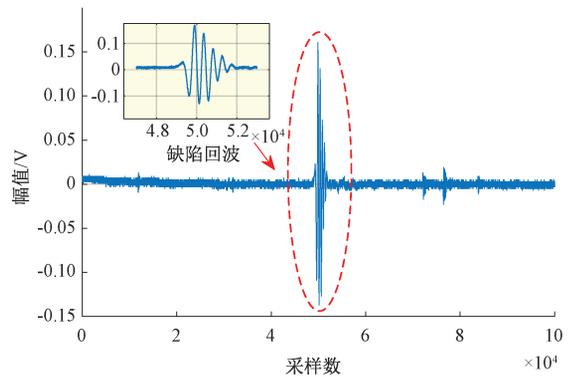
Fig. 13 Metal gear defect ultrasonic detection system

为减小超声波衰减及环境噪声的干扰,提高采集信号数据精度,设置声波偏转角度为 0°,将超声换能器置于待测齿轮正上方进行 A 扫描,超声换能器中心频率为 5 MHz,采样频率为 200 MHz。图 14 为金属齿轮缺陷超

声回波波形(不包括金属齿轮构件上下表面回波),数据长度均为 100 000。为方便后续处理分析,本文选取单回波齿轮缺陷超声检测信号作为实验对象进行降噪性能评估。多重回波齿轮缺陷超声检测信号的降噪处理过程与单超声回波信号类似,采用区间分割将其划分为多个单回波信号,然后依次采用本文方法进行降噪处理,最后对多个单回波降噪信号进行信号重构得到最终多重回波齿轮缺陷超声检测降噪信号。图 14(a)和(b)中局部放大图为选取的待处理缺陷超声回波信号。



(a) 缺陷超声检测信号(测试齿轮1)
(a) Defect ultrasonic detection signal (Test gear 1)



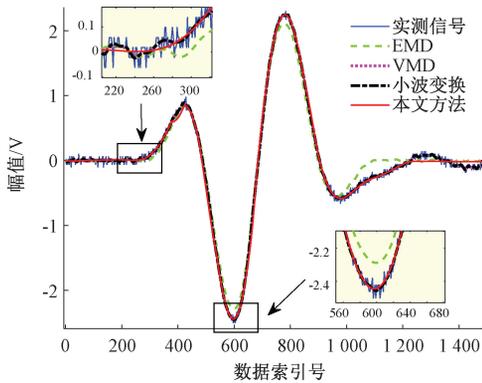
(b) 缺陷超声检测信号(测试齿轮2)
(b) Defect ultrasonic detection signal (Test gear 2)

图 14 实测超声检测信号

Fig. 14 Measured ultrasonic detection signal

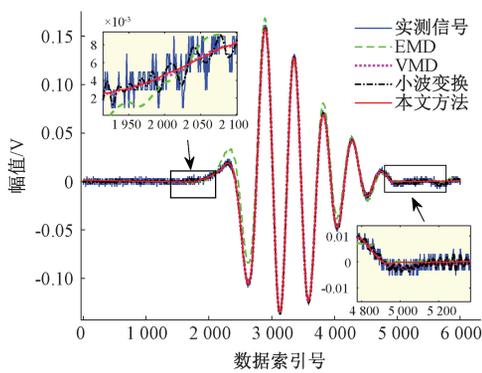
分别采用 EMD、VMD、小波变换以及本文方法对两组实测金属齿轮缺陷超声检测信号进行去噪处理,结果如图 15(a)和(b)所示。从图 15 中可以看出,4 种方法对实测超声检测信号均有一定的噪声抑制效果。可以直观地看出 EMD 方法虽然可以消除部分噪声,但在检测信号的波峰和波谷处存在欠拟合和过拟合现象,造成信号波峰和波谷处幅值畸变严重,特征信息丢失,导致检测信号失真;小波变换方法能够在一定程度上减小噪声成分对实测超声检测信号的干扰,但整体去噪效果一般,从图 15 局部放大图中可以看到,在图 15(a)中第 220~320 数

据点和图 15(b) 中第 1 950~2 100 数据点处,降噪处理后的缺陷回波信号仍然存在实测超声检测信号中的噪声成分趋势,信号幅值上下波动,信号波形光滑度较差;VMD 相较于前两种方法,去噪效果稳定,但在信号波形平滑度方面效果一般。



(a) 缺陷回波信号去噪结果(测试齿轮1)

(a) Defect echo signal denoising results (Test gear 1)



(b) 缺陷回波信号去噪结果(测试齿轮2)

(b) Defect echo signal denoising results (Test gear 2)

图 15 超声检测信号去噪结果

Fig. 15 Ultrasonic signal denoising results

此外,从图 15(a) 和 (b) 可以看到,实测超声检测信号分别第 1 200 数据点和第 4 750 数据点之后信号仍然存在震荡波动现象,其原因为齿轮内部结构、检测设备以及复杂环境噪声与采集的缺陷回波信号叠加引起的信号干扰,表现为缺陷回波信号后出现幅值抖动。针对这一问题,基于噪声信号与有用信号的频域概率分布的信号去噪方法(EMD、VMD 和小波变换)无法准确区别有用信号与噪声成分差异,将该部分的幅值抖动作为有用回波信号予以保留,增大缺陷回波信号复杂度。相反,本文方法利用信号动态局部熵分布将齿轮缺陷超声检测信号中的有用信号进行准确分割,单独进行降噪处理,能够有效克服异常值对于超声检测信号回波的干扰,提高信号去噪性能及鲁棒性。综上,本文方法可以有效消除有用信号外的部分噪声成分干扰,保留超声检测信号的特征

信息,进一步表明本文方法能够更好地实现对金属齿轮缺陷超声检测信号去噪和有效信息的提取。

3 结 论

为实现金属齿轮内部缺陷检测信号去噪,本文将区间分割思想应用于齿轮检测信号去噪处理中,结合经验模态分解、动态局部熵指标、经验小波变换以及二次多项式平滑滤波算法,提出一种基于动态局部熵与自适应分解的超声检测信号去噪方法。本文方法通过区间分割方法有效避免了传统信号分解的端点效应、模态混叠及异常值干扰等问题,在保证去噪信号完整性前提下有效减小复杂噪声干扰。仿真实验和实测实验结果表明,相较于传统去噪方法,本文方法对于不同信噪比条件下的检测信号均具有更优的去噪效果和鲁棒性,能够有效抑制噪声,保留超声检测信号特征信息,实现了金属齿轮内部缺陷检测信号的有效去噪。该方法为金属齿轮缺陷信号去噪提供了新思路,但对于噪声频谱混叠条件下检测信号的去噪方法有待进一步改进,提高该方法的适用范围和鲁棒性。

参考文献

- [1] 罗朝莉,朱冰,王波,等. 铝板表面裂纹的激光超声检测与信号处理研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 41-52.
LUO ZH L, ZHU B, WANG B, et al. Research on laser ultrasonic testing and signal processing of surface cracks in aluminum plate [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (10): 41-52.
- [2] 张旭,程江,涂君,等. 齿轮焊缝超声检测信号降噪方法研究[J]. 中国测试, 2021, 47(4): 32-37.
ZHANG X, CHENG J, TU J, et al. Research on signal de-noising method of welded gear ultrasonic testing [J]. China Measurement & Test, 2021, 47(4): 32-37.
- [3] XU W L, LI X H, ZHANG J, et al. Ultrasonic signal enhancement for coarse grain materials by machine learning analysis [J]. Ultrasonic, 2021, 117: 106550.
- [4] LIAN J J, LIU Z, WANG H J, et al. Adaptive variational mode decomposition method for signal processing based on mode characteristic [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 107: 53-77.
- [5] 王辰辰,姚贞建,杨梦冉. 基于经验与变分模态分解的超声回波信号噪声消除方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 197-204.
WANG CH CH, YAO ZH J, YANG M R, et al. Noise elimination method of ultrasonic echo signal based on

- empirical and variational hybrid decomposition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 197-204.
- [6] SONG Y F, ZI X H, FU Y D, et al. Nondestructive testing of additively manufactured material based on ultrasonic scattering measurement [J]. Measurement, 2018, 118: 105-112.
- [7] 刘轩, 吕炎, 边策, 等. 管道电磁超声传感器阵列检测技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 24-32.
LIU X, LYU Y, BIAN C, et al. Electromagnetic acoustic transducer array of pipeline inspection technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 24-32.
- [8] 张坤硕, 齐化, 任安虎, 等. 超声信号的改进 EMD 阈值方法降噪研究 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(11): 15-20.
ZHANG K SH, QI H, REN A H, et al. Study on noise reduction of ultrasonic signals by improved EMD threshold method [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(11): 15-20.
- [9] 杜必强, 孙立江. 变分模态分解和熵理论在超声信号降噪中的应用 [J]. 中国工程机械学报, 2017, 15(4): 310-317.
DU B J, SUN L J. Application of variational mode decomposition and entropy theory in ultrasonic signal denoising [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2017, 15(4): 310-317.
- [10] 孙灵芳, 王彤徐, 徐曼菲, 等. 基于改进的 CEEMD 的薄层污垢超声检测信号去噪 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 2879-2887.
SUN L F, WANG T T, XU M F, et al. Thin fouling ultrasonic detection signal denoising based on improved CEEMD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 2879-2887.
- [11] 刘奎, 张冬梅, 于光, 等. 空气耦合超声信号的小波阈值滤波降噪试验研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 61-66.
LIU K, ZHANG D M, YU G, et al. Wavelet threshold denoising experiments of air-coupled ultrasonic signal [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 61-66.
- [12] 张曼, 王明泉, 杨顺民, 等. 基于小波分析的锂电池空耦超声信号降噪研究 [J]. 测试学报, 2020, 34(4): 304-310.
ZHANG M, WANG M Q, YANG SH M, et al. Research on noise reduction of air-coupled ultrasonic signal of lithium battery based on wavelet analysis [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020, 34(4): 304-310.
- [13] YANG Y, LI S S, LI C, et al. Research on ultrasonic signal processing algorithm based on CEEMDAN joint wavelet packet thresholding [J]. Measurement, 2022, 201: 111751.
- [14] 李可, 王翀, 明雪飞, 等. 基于改进多路径匹配追踪的芯片超声信号去噪方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 93-100.
LI K, WANG CH, MING X F, et al. Denoising method of chip ultrasonic detection signals based on the improved multipath matching pursuit [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 93-100.
- [15] 王茜, 田慕琴, 宋建成, 等. 基于经验小波变换的振动信号特征量提取 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 261-266.
WANG X, TIAN M Q, SUN J CH, et al. Feature extraction of vibration signals based on empirical wavelet transform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16): 261-266.
- [16] 张洪, 张郁, 王通德. 基于局部熵的超声信号阈值降噪方法 [J]. 探测与控制学报, 2019, 41(1): 106-112.
ZHANG H, ZHANG Y, WANG T D. Ultrasonic signal threshold de-noising based on local entropy [J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(1): 106-112.
- [17] LIU F F, LIU S P, ZHOU Z G, et al. Detailed characterisation and evaluation of composite stiffener R-zones based on mono-pulse ultrasonic reflection behavior [J]. Ultrasonics, 2022, 124: 106732.
- [18] 曹弘毅. 碳纤维复合材料超声相控阵无损检测技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
CAO H Y. Research on phased array ultrasonic non-destructive testing technique of carbon fiber reinforced plastic [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [19] ZHU J X, WANG G Y, HUANG Y, et al. A denoising method for ultrasonic testing of rubber composites based on improved symplectic geometric mode decomposition [J]. Applied Acoustics, 2023, 209: 109428.
- [20] 乔钢柱, 朱良泽, 丁智慧, 等. 基于多项式最小二乘滤波的时间序列相似性度量 [J]. 测试技术学报, 2020, 34(1): 28-33.
QIAO G ZH, ZHU L Z, DING ZH H, et al. Time series similarity measure based on polynomial least squares

filtering [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020, 34(1): 28-33.

作者简介



杨梦冉, 2021 年于河南工程学院获得学士学位, 现为武汉工程大学硕士研究生, 主要研究方向为超声检测技术与信号处理。
E-mail: ymr210727@163.com

Yang Mengran received his B. Sc. degree from Henan University of Engineering in 2021. He is currently a M. Sc. candidate at Wuhan Institute of Technology. His main research interests include ultrasonic detection technology and signal processing.



姚贞建 (通信作者), 2013 年于燕山大学获得学士学位, 2018 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为武汉工程大学硕士研究生导师, 主要研究方向为动态压力测试计量、超声检测技术与信号处理。

E-mail: yao_buaa@126.com

Yao Zhenjian (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yanshan University in 2013, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2018. He is currently a postgraduate advisor at Wuhan Institute of Technology. His main research interests include dynamic pressure measurement, ultrasonic detection technology and signal processing.