

基于改进 CEEMD 的薄层污垢超声检测信号去噪*

孙灵芳¹, 王彤彤², 徐曼菲², 李霞², 朴亨²

(1. 东北电力大学 节能与测控技术工程实验室 长春 132012; 2. 东北电力大学 自动化工程学院 长春 132012)

摘要:对换热管污垢回波振型特征有效提取是实现污垢厚度定量检测的关键。针对薄层污垢回波声束能量不集中,易产生模态混叠等特点,提出一种基于改进 CEEMD 的小波收缩阈值信号处理方法。首先引入夹角余弦计算原始信号与固有模态函数相似程度,判断信号和噪声主导模态分界点,并结合能量密度谱判断分界点选取准确性,然后利用小波收缩阈值方法拾取噪声主导模态中的细节信息,最后重构得到降噪后信号。仿真和实验结果表明:该方法分界点判断准确性较高,去噪效果优于传统小波阈值方法,数值模拟与实验结果一致,对薄层污垢回波振型特征提取有重要指导意义。

关键词:完备总体经验模态分解;夹角余弦;薄层污垢;数值模拟;实验检测

中图分类号: TB551 TN911.71 TH114 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Thin fouling ultrasonic detection signal denoising based on improved CEEMD

Sun Lingfang¹, Wang Tongtong², Xu Manfei², Li Xia², Piao Heng²

(1. Engineering Laboratory of Energy Conservation & Measure-Control Technology, Northeast Electric Power University, Changchun 132012, China; 2. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Changchun 132012, China)

Abstract: Effective feature extraction of the heat exchange tube fouling signal is the essential step for fouling thickness detection. In view of the echo energy decentralizing and model aliasing, a signal processing method based on CEEMD wavelet adaptive threshold is proposed. Firstly, the similarity between intrinsic mode function (IMF) and original signal is calculated by the angle cosine method. The signal and noise mode segmentation point is determined and evaluated combining with the energy spectrum. Besides, the wavelet adaptive threshold is used to collect detail information in noise modes. Finally, all of the remained IMFs are reconstructed to obtain a noise suppressed signal. The results show the accuracy of segmentation point is high. Improved CEEMD has better de-noising performance than wavelet threshold. The numerical simulation matches the test results, proved that the proposed method is significant to extracting the feature of the thin fouling signal.

Keywords: complementary ensemble empirical mode decomposition (CEEMD); angle cosine; thin fouling; numerical simulation; detection

0 引言

工程换热面与流体相耦合的界面上逐渐形成的固态或软泥态物质称为污垢^[1]。随着换热设备广泛应用,污垢的存在正威胁着换热设备的安全经济运行,针对污垢进行可靠、安全地检测研究势在必行^[2-3]。超声时域反射法 (ultrasonic time-domain reflection method, UTDR) 作为一种高效、安全、可实时在线的污垢检测技术,具有较高

创新和实用价值^[4]。

超声波无损检测过程中,回波信号携带了与污垢有关的丰富信息,但由于噪声干扰使得有用信号及细节特征提取常存在漏检和误检问题^[5]。小波阈值去噪是近年应用较广泛的去噪方法^[6-7],但其阈值选取和分解层数的确定随机性较大,使得去噪易产生“过扼杀”和“过保留”^[8]。完备总体经验模态分解 (complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD) 在基于聚合经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, EE-

MD)发展而来,其核心思想是根据信号本身特征将其从高频到低频分解成具有物理意义的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),包括信号主导模态和噪声主导模态^[9]。CEEMD 既继承了 EEMD 在解决模态混叠方面的优势^[10],同时也改善了 EEMD 由于添加辅助噪声引起的计算效率低、降噪效果差等问题^[11]。然而单纯的 CEEMD 分解去噪会在滤除高频分量的同时丢失部分有效信息,导致降噪效果不理想。因此需要一种更有效的方法提取信号中的特征信息。

由于实际换热管多为小管径薄壁管,且污垢本身质地疏松,致使回波信号模态混叠严重,噪声强度较大,影响回波振型特征有效提取。针对薄层污垢超声检测回波信号模态分析,提出基于改进 CEEMD 的小波收缩阈值去噪方法,采用夹角余弦法和能量密度谱组合方式判断信号和噪声主导模态分界点,并结合小波收缩阈值抑制噪声主导模态中的污染提取信号细节,提供一种薄层污垢回波信号特征提取方法。

1 基本原理

1.1 分界点判断

1.1.1 余弦相似度

原始信号经 CEEMD 分解为一系列从高频到低频的固有模态函数 IMF 和一个余量,信号主导模态主要集中在高阶 IMF 分量中,且与原始信号有较高相似性,而噪声主导模态主要集中在低阶 IMF 分量中,与原始信号相似性较低^[12]。文献[13]已经证明余弦相似度是一种有效的计算数据序列相似性的方法,为获取信号和噪声主导模态分界点 K_i ,引入夹角余弦法计算原始信号和各阶 IMF 分量之间相似程度。

设两个序列夹角为 α , $\alpha \in [0^\circ 90^\circ]$, 那么定义 $\alpha = 0^\circ$ 时两个数据序列最相似,反之 $\alpha = 90^\circ$ 时最不相似。设 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{Q}$ 为两个维数相同列向量,则余弦相似度公式为^[14]:

$$\text{CosSim}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) = \frac{\langle \mathbf{P}, \mathbf{Q} \rangle}{\|\mathbf{P}\| \|\mathbf{Q}\|} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i Q_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N P_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N Q_i^2}} \quad (1)$$

将含噪信号 $x(t)$ 和各阶 IMF 分量间相似度定义为:

$$C(k) = \text{CosSim}[x(t), \text{IMF}] \quad (2)$$

分界点选取准则为相似度曲线首次发生逆向转折的位置,此时可认为含噪信号与各阶 IMF 分量之间相似程度由下降趋势逐渐转变为上升趋势。如图 1 所示,此时可判定分界点 $K_i = 3$ 。

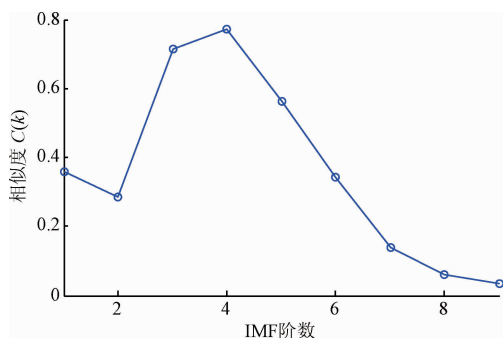


图 1 相似度与 IMF 阶数关系曲线

Fig. 1 Relationship between similarity and IMF

1.1.2 能量密度谱分析

CEEMD 根据信号特征将信号进行自适应时频分析,因此经 CEEMD 分解得到的每个 IMF 分量均代表信号的局部特征,且在相同频带内具有的能量不同。为判断分界点选取准确性对污垢信号 IMF 分量进行能量密度谱分析,如图 2 所示。

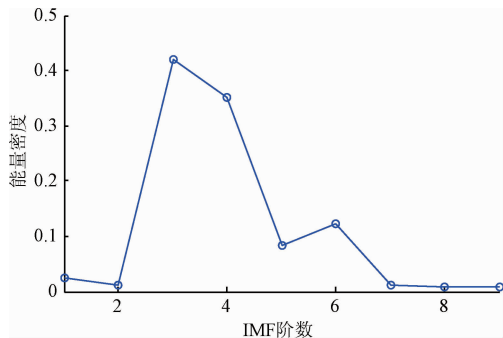


图 2 各阶 IMF 能量密度分布

Fig. 2 The IMF energy density distribution

第 i 个 IMF 分量 $c_i(t)$ 能量计算公式为^[15]:

$$E_i = \int_{-\infty}^{+\infty} |c_i(t)|^2 dt \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

由于噪声能量一般较高,因此各阶 IMF 能量整体呈递减趋势。有用信号出现时会打破递减趋势,产生一个局部极大值点,在该极值点之后,有用信号将替代噪声成为主导模态,因此可判定此时分界点 $K_i = 3$ 。

1.2 改进 CEEMD 去噪原理

CEEMD 核心思想是基于 EEMD 分解在添加辅助噪声时,使加入的辅助噪声呈正负成对形式,辅助噪声的引入既可均衡噪声特性,降低模态混叠影响^[16],同时由于添加噪声组数降低,计算效率可得到显著提高^[17]。

改进 CEEMD 方法的具体过程如下。

1) 向原始信号中添加 n 组正、负成对的辅助白噪声,生成 $2n$ 个集合 IMF:

$$\begin{bmatrix} M_{i1} \\ M_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_i(t) \\ n_i(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $s_i(t)$ 为原始信号, $n_i(t)$ 为辅助噪声, M_i 为引入噪声后信号。

2) 求解第 i 个固有模态函数 $IMF_i = C_i(t)$,收敛判定条件采用标准系数差 SD , SD 一般取 $0.2 \sim 0.3$ 。若满足则有 $C_j(t) = H_j(t)$,否则返回 $j=j+1$,重复步骤 2) 计算。

$$SD = \sum_{i=0}^T \left[\frac{|H_{j-1}(t) - H_j(t)|^2}{H_{j-1}^2(t)} \right] \leq \varepsilon \quad (5)$$

通过组合分量 $C_j(t)$ 得到分解结果:

$$IMF_j = \frac{1}{2n} \left(\sum_{i=1}^{2n} IMF_{ij} \right) \quad (6)$$

式中: IMF_j 为经 CEEMD 分解获得的第 j 个分量。

3) 采用夹角余弦和能量密度谱组合方式判断信号和噪声主导模态分界点,记为 K_i 。对含噪 IMF 分量进行小波收缩阈值抑制噪声污染,拾取高频分量中的细节信号。阈值选取规则为^[18]:

$$\eta(x \text{ thr}) = \begin{cases} x - \frac{1}{2} \frac{\text{thr}^m \cdot k}{x^{m-1}} + (k-1)\text{thr}, & x \geq \text{thr} \\ \frac{1}{2} \frac{k \cdot |x|^n}{\text{thr}^{n-1}} \text{sign}(x), & |x| \leq \text{thr} \\ x + \frac{1}{2} \frac{(-\text{thr})^m \cdot k}{x^{m-1}} - (k-1)\text{thr}, & x \leq -\text{thr} \end{cases} \quad (7)$$

式中: m,n,k 为阈值函数调节因子。

利用小波收缩阈值降噪后的 IMF 分量结合信号主导模态和余量得到重构信号:

$$x'(t) = \sum_{j=l+1}^m IMF_j + r_{es} \quad (8)$$

式中: r_{es} 为余量。

1.3 评价标准

引入信噪比(signal noise ratio, SNR)和重构均方误差(root mean square error, RMSE)定量评价改进 CEEMD 去噪性能。定义信噪比越高,均方误差越小则重构信号越接近原始信号,证明去噪效果越好^[19]。

1) 信噪比计算公式:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=0}^T s^2(t)}{\sum_{i=0}^T |h'(t) - s(t)|^2} \quad (9)$$

2) 原信号与重构信号之间均方误差计算公式:

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum (h'(t) - s(t))^2 \quad (10)$$

式中: $s(t)$ 为原始信号, $n(t)$ 为噪声信号, $h'(t)$ 为去噪后信号。

2 仿真分析

为实现对改进 CEEMD 降噪效果的定量评价,基于 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件建立了充液污垢管道 3D 有限元模型。如图 3 所示,模型为 4 层流固耦合模型,采用全局定义^[20],管道模型长 300 mm,外径为 25 mm,壁厚 1.5 mm,管道材质为碳钢管,杨氏模量 $E = 195 \text{ GPa}$,密度为 $\rho = 8\,400 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\mu = 0.28$;污垢层为碳酸钙,厚度 0.5 mm,杨氏模量 $E = 10 \text{ GPa}$,密度为 $\rho = 2\,200 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\mu = 0.28$ 。

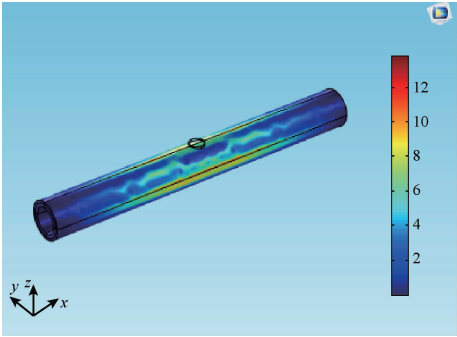


图 3 污垢管道三维实体模型

Fig. 3 Three-dimensional entity model of fouling tube

2.1 分界点判断

基于流固耦合模型仿真获取 10 MHz 激励下换热管污垢回波信号,对原信号加入不同高斯白噪声模拟含噪信号,如图 4 所示。定义波峰 A、B 为管壁回波,T 为污垢界面回波。

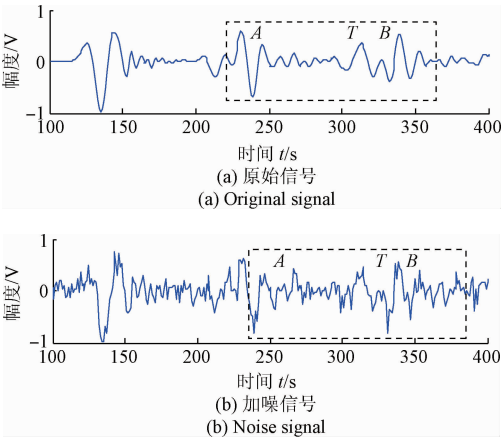


图 4 污垢管道响应时程曲线

Fig. 4 Fouling tube response time curve

采用改进 CEEMD 对仿真信号进行分解,图 5 所示为信号经 CEEMD 分解后各阶 IMF 分量及其能量谱图。由于篇幅有限,本文仅以去噪前信噪比为 5 dB 的加噪信号为例进行说明。

由图 5(a)可知,经 CEEMD 分解得到的 10 阶 IMF 分量中,前 3 阶 IMF 分量图像杂乱且毫无规律,表明前 3 阶 IMF 分量为噪声主导模态;由 $IMF_4 \sim IMF_{10}$ 图像可以看出他们是对信号的逐级逼近;由图 5(b)可知,IMF 分量能量整体呈递减趋势, IMF_3 的出现打破了递减趋势,成为一个局部极大值点,表明 IMF_4 开始信号取代噪声成为主导模态,分解点 $K_i = 3$,与图 5(a)所得结论一致。计算各阶 IMF 模态分量与原始含噪信号余弦相似度,关系曲线如图 6 所示。

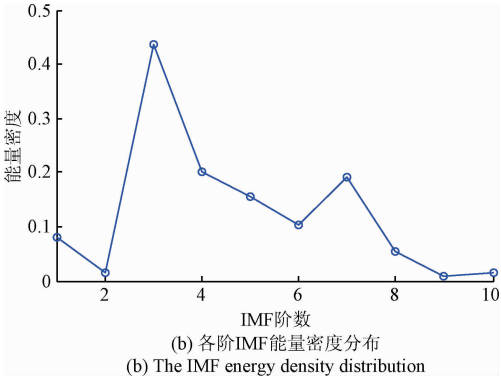


图 5 CEEMD 分解结果(5 dB)

Fig. 5 The CEEMD decomposition results(5 dB)

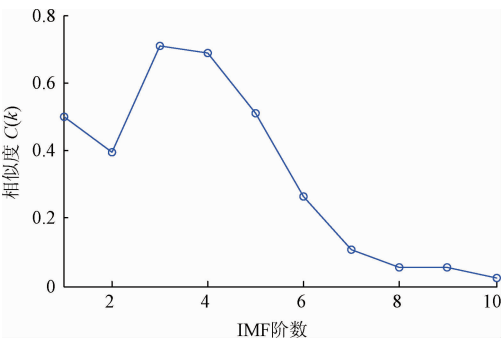


图 6 相似度与 IMF 阶数关系曲线(5 dB)

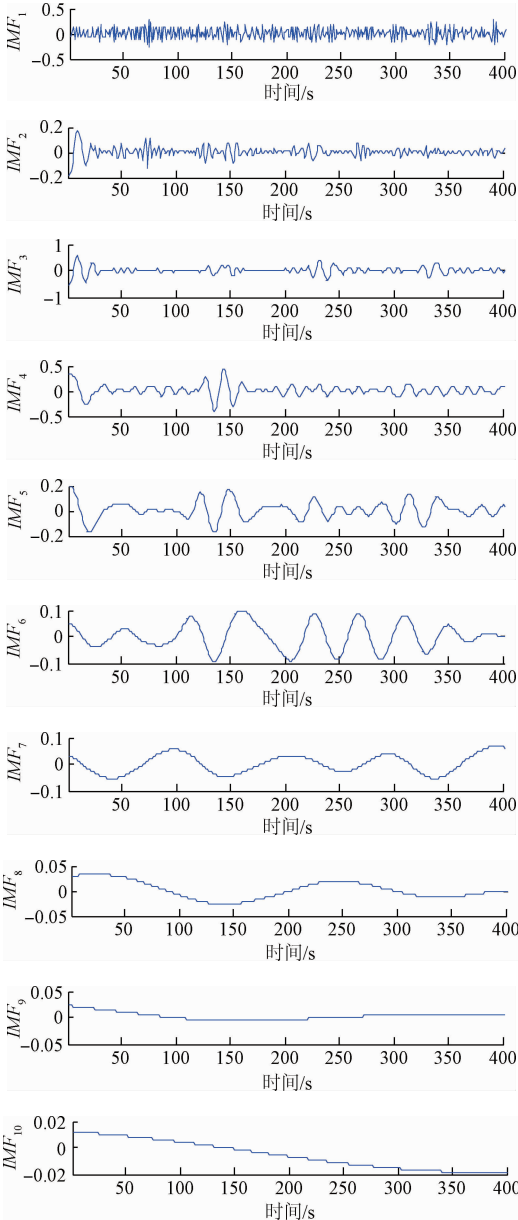
Fig. 6 the relationship between similarity and IMF(5 dB)

根据信号和噪声主导模态分解点判断准则,首次发生逆向转折的位置为 IMF_3 ,因此判定分界点 $K_i = 3$,与图 5 所得结论一致。仿真结果表明,本文改进的 CEEMD 可准确定位信号和噪声主导模态分界点。

2.2 不同信噪比降噪效果对比

为验证改进 CEEMD 降噪方法降噪效果,对污垢管道回波信号加入高斯白噪声,选取小波阈值法对比本文方法对加噪信号进行降噪处理。小波阈值降噪选取紧支撑性较好的“sym8”小波进行 4 层分解,根据文献[21]选用混合型阈值规则“heursure”自适应降噪。改进的 CEEMD 噪声实现数为 200 组,迭代上限为 2 000, $SD = 0.2$ 。由于篇幅有限仅对降噪前信噪比为 10 dB 的加噪信号降噪效果进行展示说明。

图 7 所示为 3 种方法降噪效果图。图 7(a)为原始信号,图 7(b)为加噪信号,噪声严重干扰了原信号时域表达。观察图 7,小波阈值降噪后回波振型产生了严重畸变,相比较而言,小波硬阈值降噪处理后细节保留程度较好,但平滑性较差,无法提取渡越时间;改进 CEEMD 降噪处理后波形平滑,细节保留程度优于传统小波阈值方法,污垢界面回波波峰 T 主瓣波形清晰。



(a) 污垢管道回波信号 IMF 分量
(a) The IMF of fouling tube echo signal

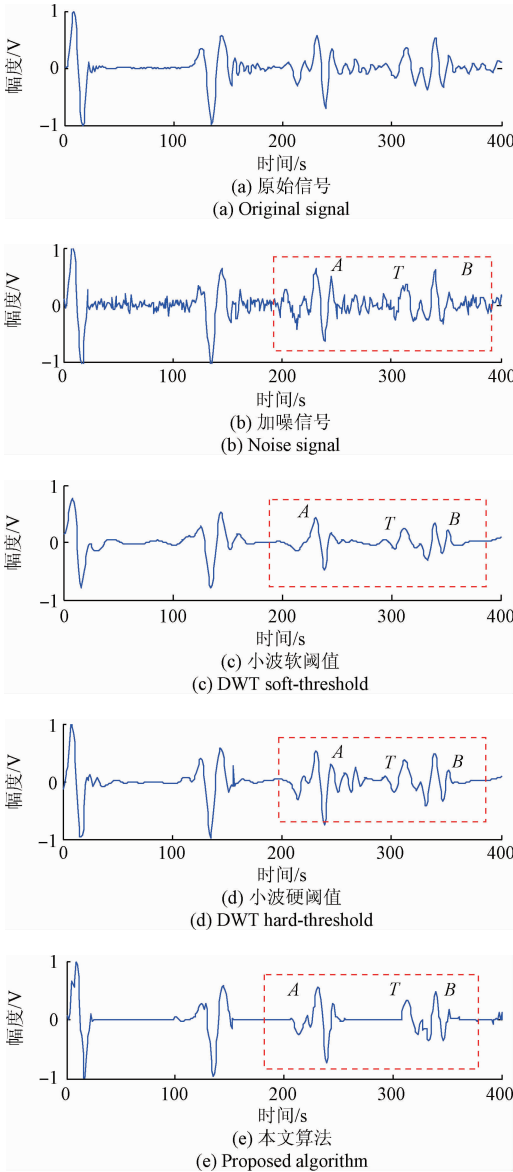


图 7 污垢管道超声回波降噪效果 (10 dB)

Fig. 7 De-nosing results of fouling tube ultrasonic echo(10 dB)

为更直观地对降噪效果进行分析,保持管道参数不变,改变加入的噪声强度,分别对以上降噪方法重复试验 200 次,信噪比和均方根误差变化如图 8 所示,统计得到重构信号信噪比和均方误差平均值,如表 1 所示。

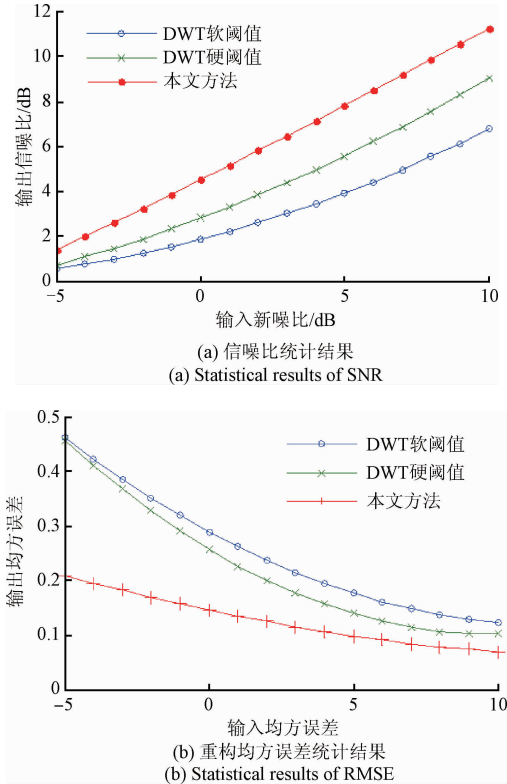


图 8 信噪比和均方误差变化图

Fig. 8 The change graph of SNR and RMSE

由以上数据可知,3 种降噪方法整体降噪效果均随噪声强度增大而降低,但在细节特征提取和微弱噪声抑制方面存在差异。由图 8 可知,改进 CEEMD 降噪效果明显优于小波阈值法,降噪效果随着加入噪声强度的降低,优势越发明显。

表 1 性能指标数据对比

Table 1 Performance comparison

未降噪信号 SNR/dB	小波软阈值		小波硬阈值		本文方法	
	SNR/dB	RMSE	SNR/dB	RMSE	SNR/dB	RMSE
10	6.539 2	0.117 6	8.353 1	0.098 7	11.491 9	0.065 1
5	3.956 2	0.180 8	5.858 1	0.143 9	7.837 7	0.099 2
3	2.772 0	0.215 1	3.992 1	0.181 4	6.145 2	0.120 5
-1	1.373 6	0.322 0	2.538 2	0.275 2	4.923 2	0.138 8
-5	0.541 5	0.467 7	0.733 5	0.478 5	1.591 1	0.201 3

仿真结果显示,加入噪声强度相同时,改进 CEEMD 降噪后信噪比高于小波阈值法,均方误差低于小波阈值法,证明了本文方法的可行性和优越性。

2.3 不同污垢厚度降噪效果对比

实际生产中,由于污垢质地疏松、分布不均,且换热管多为小管径薄壁管,导致管壁与污垢回波易产生模态混叠,不利于渡越时间提取。为验证改进 CEEMD 对薄

层污垢微弱特征信号提取效果,保持管道参数不变,选取 400 数据点,在 10 MHz 激励下基于有限元模型获取不同污垢厚度碳钢管响应时程曲线,加入高斯白噪声,信噪比为 10 dB,对加噪信号进行降噪处理,结果如表 2 和图 8 所示。由于篇幅有限,对重构均方误差统计结果未做展示。定义角标 1 为小波软阈值,2 为小波硬阈值,3 为本文方法。

表 2 性能指标数据对比
Table 2 Performance comparison

H/mm	SNR_1/dB	SNR_2/dB	SNR_3/dB	H/mm	SNR_1/dB	SNR_2/dB	SNR_3/dB
0.1	5.600 3	9.468 5	11.852 4	0.55	6.153 4	9.038 7	12.419 3
0.15	6.127 8	8.336 1	11.301 1	0.6	6.802 4	8.473 0	12.108 0
0.2	5.793 3	8.369 8	12.916 9	0.65	6.582 1	8.270 0	12.793 5
0.25	5.619 5	8.435 3	12.035 3	0.7	6.243 8	9.122 1	12.220 6
0.3	5.322 4	8.862 9	12.995	0.75	6.899 8	8.940 6	12.728 6
0.35	5.719 1	8.339 5	12.529 8	0.8	6.857 1	9.210 3	11.192 0
0.4	5.770 8	8.443 5	12.448 8	0.85	6.355 5	8.639 9	11.913 7
0.45	6.542 1	9.502 7	12.883 2	0.9	67 386	8.295 4	11.739 1
0.5	6.339 2	9.244 1	12.801 7	0.95	6.387 0	7.600 0	12.472 8

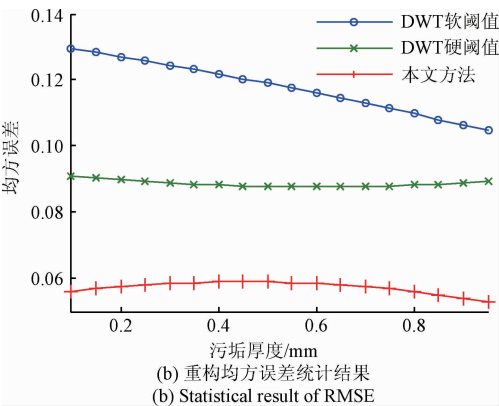
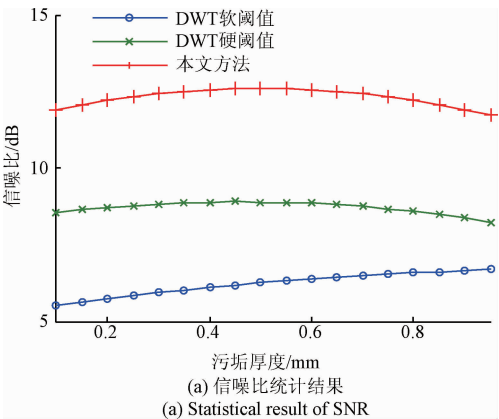


图 9 信噪比和均方误差变化图(10 dB)

Fig.9 Changing of SNR and RMSE(10 dB)

由图 9 可知,在污垢调谐厚度范围内,小波硬阈值整体降噪效果优于小波软阈值,随着污垢厚度增加,本文方法降噪效果呈先增大后减小趋势。由于起始污垢厚度较薄,超声回波振型模态混叠严重,重构信号信噪比较低,随着厚度增加,模态混叠程度逐渐减小,降噪效果呈上升趋势;在峰值后,污垢厚度逐级增加,由于回波声束能量不集中,曲线逐渐呈下降趋势。

仿真结果表明,污垢厚度相同时,本文方法降噪效果优于小波阈值法;污垢厚度较薄时优势明显,对薄层污垢回波振型特征提取有重要指导意义。

3 实测数据实验

为分析本文方法对实际信号去噪效果,对实际换热管污垢进行超声时域检测。实验基于换热污垢动态模拟试验台进行,整体构成如图 10 所示。换热管污垢成分多为碳酸钙,采用 CaCl_2 和 Na_2CO_3 溶液配制生成碳酸钙溶液作为介质,介质经冷却后匀速通过恒温水浴中的碳钢管,管道外径为 25 mm,壁厚 1.5 mm。水浴温度 50℃,冷却介质温度 30℃。

选取未加药的清洁管道回波作为对比,如图 11(a)所示。投入运行初期由于污垢生长处于诱导期无污垢界面回波,按照污垢生长规律,持续实验 20 d,选取期间具有代表性的管道污垢回波响应时程曲线,如图 11(b)所示。



图 10 超声检测系统总体构成情况

Fig. 10 overall structure of the ultrasonic detection system

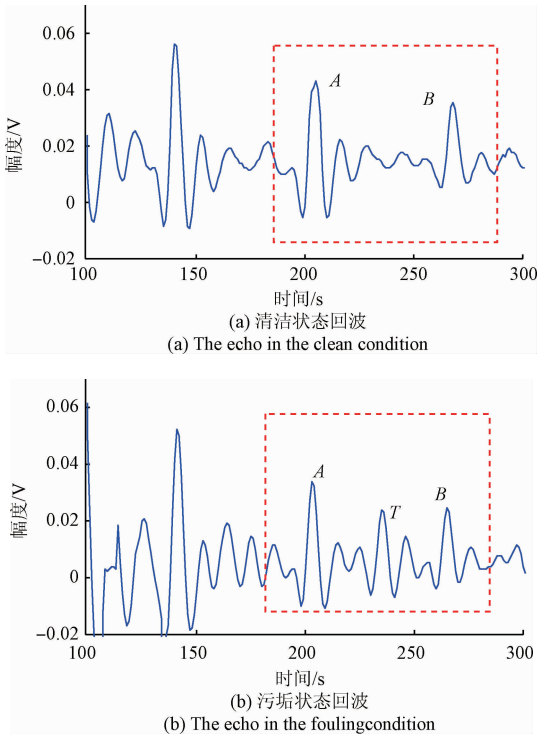


图 11 换热管污垢检测回波

Fig. 11 the detection echo of heat exchange tube fouling

由图 11(b)可知,由于波峰呈等间隔震荡,可判断为管壁 1 次、2 次和 3 次回波。波峰 *AB* 之间产生了振幅较小的回波信号波峰 *T*,对比清洁管道回波,可判断凸起的波峰 *T* 为污垢回波。采用改进 CEEMD 对信号进行处理,对比小波阈值法,降噪效果如图 12 所示。

由图 12 可知,小波软阈值降噪后波形失真严重,硬阈值降噪平滑性能和细节保留同样难以兼顾;而改进 CEEMD 重构信号较好地保留了原始信号细节特征,同时抑制了模态混叠现象。实验结果表明改进的 CEEMD 方法能较好地进行换热管污垢微弱特征信号提取。

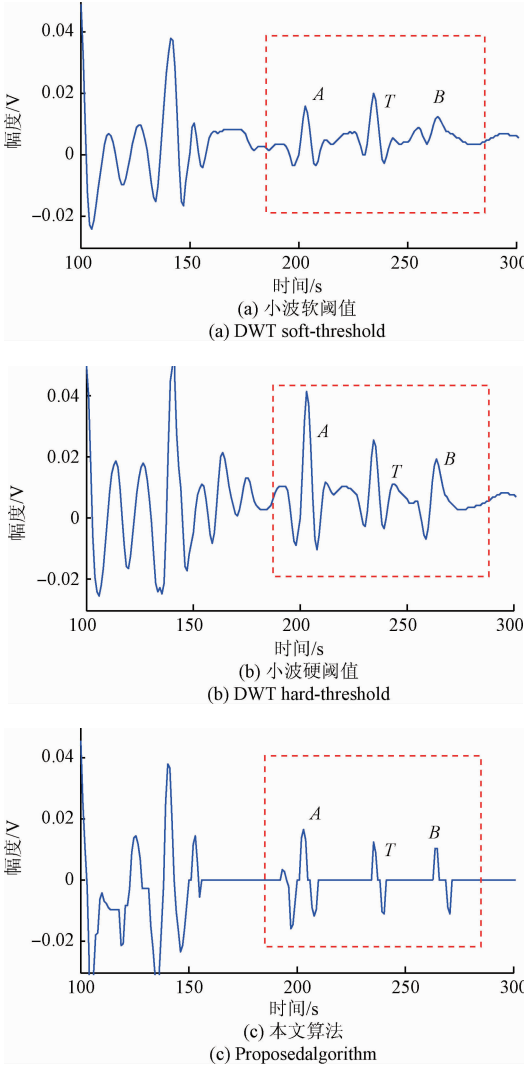


图 12 污垢管道超声回波降噪效果

Fig. 12 De-nosing resultS of fouling tube ultrasonic echo

4 结 论

采用夹角余弦和能量密度谱组合方法能准确定位信号和噪声主导模态分界点,分界点选取准确性较高。

采用小波收缩阈值改进 CEEMD 可有效改善直接舍弃高频分量造成的信号细节丢失问题,降噪效果优于传统小波阈值法。

基于换热管污垢流固耦合模型实现对污垢检测信号的模拟;在薄层污垢微弱信号特征提取方面具有明显优势。

基于换热污垢动态模拟试验台获取污垢管道回波,采用改进 CEEMD 方法对其进行处理,数值模拟与实验结果一致,在去噪效果和性能指标上都优于传统小波阈值法,并表现出明显的有效性和实用性。

参考文献

- [1] 杨善让,徐志明,孙灵芳. 换热设备污垢与对策[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2004: 22-58.
YANG SH R, XU ZH M, SUN L F. Fouling and countermeasures of heat transfer equipment[M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2004: 22-58.
- [2] PALMER K A, HALE W T, SUCH K D, et al. Optimal design of tests for heat exchanger fouling identification[J]. Applied Thermal Engineering, 2015(95): 382-393.
- [3] 孙灵芳,陶苗苗,朴亨. 基于正则序极端学习机的换热设备污垢预测[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(4): 84-90.
SUN L F, TAO M M, PIAO H. Fouling prediction of heat exchanger based on sequential regularized extreme learning machine[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2015, 35(4): 84-90.
- [4] CHEN J H, YANG Y C, HUANG J Y. On-line monitoring and diagnosis of membrane fouling using ultrasonic techniques[J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems, 2013, 127(11): 147-157.
- [5] 黄政钦,孙静,张丽娜,等. 心音、心电采集系统设计与信号预处理[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 117-121, 131.
HUANG ZH Q, SUN J, ZHANG L N, et al. ECG and heart sound acquisition system and signal preprocessing[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(9): 117-121, 131.
- [6] 余辉,姜博畅,刘雁飞,等. 基于小波收缩的心音降噪最优化分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 383-388.
YU H, JIANG B CH, LIU Y F, et al. Optimization analysis of noise reduction in heart sound based on wavelet shrinkage[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(3): 383-388.
- [7] 王金玉,赵月娇,孔德健,等. 基于小波变换的HVDC系统故障检测[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(2): 37-40.
WANG J Y, ZHAO Y J, KONG D J, et al. Fault detection of HVDC system based on wavelet transform[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(4): 28-30.
- [8] 李醒飞,纪越,吴军. 高精度超声测距系统中自相关小波去噪法的研究[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(3): 179-185.
LI X F, JI Y, WU J. Study on self-correlation wavelet de-noising method used in highly ultrasonic ranging system[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2016, 14(3): 179-185.
- [9] 孟玲霞,徐小力,蒋章雷,等. 风电机组齿轮箱早期故障预警方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2758-2765.
MENG L X, XU X L, JIANG ZH L, et al. Study on the early fault warning method for wind turbine gearbox[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2758-2765.
- [10] 巩晓赞,王宏超,杜文辽,等. EEMD方法在转子碰摩故障诊断中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 415-421.
GONG X Y, WANG H CH, DU W L, et al. Research on EEMD in rub-impact fault diagnosis of rotor system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(3): 415-421.
- [11] 武哲,杨绍普,刘永强. 基于多元经验模态分解的旋转机械早期故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 241-248.
WU ZH, YANG SH P, LIU Y Q. Rotating machinery early fault diagnosis method based on multivariate empirical mode decomposition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 241-248.
- [12] 周涛涛,朱显明,彭伟才,等. 基于CEEMD和排列熵的故障数据小波阈值降噪方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 207-211.
ZHOU T T, ZHU X M, PENG W C, et al. A wavelet threshold denoising method for fault data based on CEEMD and permutation entropy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(23): 207-211.
- [13] 董明利,马闪闪,张帆,等. 基于核熵成分分析的流式数据自动分群方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 206-211.
DONG M L, MA SH SH, ZHANG F, et al. Auto classification method of flow cytometry data based on kernel entropy component analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 206-211.
- [14] 马子骥,郭帅锋,李艳福. 基于夹角余弦和模糊阈值的EEMD去噪方法[J]. 传感技术学报, 2016, 29(6): 872-879.
MA Z J, GUO SH F, LI Y F. A noise suppression scheme with EEMD based on angle cosine and fuzzy threshold[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(6): 872-879.
- [15] 赵利强,王建林,于涛. 基于改进EMD的输油管道泄漏信号特征提取方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2696-2702.
ZHAO L Q, WANG J L, YU T. Study on the extraction method for oil pipeline leakage signal feature based on improved empirical mode decomposition[J]. Chinese

- Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(12): 2696-2702.
- [16] 姜绍飞,陈志刚,沈清华,等. 基于 EEMD 与 FastICA 的损伤异常识别与定位[J]. 振动与冲击, 2016, 35(1): 203-209.
- JIANG SH F, CHEN ZH G, SHEN Q H, et al. Damage detection and locating based on EEMD-FastICA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(1): 203-209.
- [17] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2011, 1(1): 1-41.
- [18] 唐进元,陈维涛,陈思雨,等. 一种新的小波阈值函数及其在振动信号去噪分析中的应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7): 118-121.
- TANG J Y, CHEN W T, CHEN S Y, et al. Wavelet-based vibration signal denoising with a new adaptive thresholding function[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(7): 118-121.
- [19] 明安波,褚福磊,张炜. 滚动轴承复合故障特征分离的小波-频谱自相关方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3): 80-87.
- MING AN B, CHU F L, ZHANG W. Compound fault features separation of rolling element bearing based on the wavelet decomposition and spectrum auto-correlation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3): 80-87.
- [20] 李乐,苑修乐,杜广生,等. 超声波流量计中反射装置的声-固耦合[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1946-1951.
- LI L, YUAN X L, DU G SH, et al. Analysis of the reflection device in ultrasonic flowmeter based on acoustic-structure coupling method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 1946-1951.
- [21] 李红延,周云龙,田峰,等. 一种新的小波自适应阈值函数振动信号去噪算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2200-2206.
- LI H Y, ZHOU Y L, TIAN F, et al. Wavelet-based vibration signal de-noising algorithm with a new adaptive threshold function[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2200-2206.

作者简介



孙灵芳,分别在 1993 年和 1999 年于东北电力大学获得学士学位和硕士学位,2004 年于华北电力大学获得博士学位,现为东北电力大学教授,主要研究方向为换热设备污垢与对策、热工过程先进控制。
E-mail:15043283452@163.com

Sun Lingfang received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Northeast Electric Power University in 1993 and 1999, respectively, and received his Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2004. Now he is a professor in Northeast Electric Power University. His main research interests include fouling and countermeasure of heat exchange equipment, advanced control of thermal process.