

超声信号的改进 EMD 阈值方法降噪研究*

张坤硕¹ 齐 华¹ 任安虎¹ 刘 军²

(1. 西安工业大学电子信息工程学院 西安 710021; 2. 武警工程学院通信工程系 西安 710086)

摘 要:在进行工业超声无损检测的过程中,由于环境、仪器等原因产生噪声,对后续缺陷分析等工作形成一定干扰,不利于完成后期数据分析。因此为了使信号的信噪比有所提高,提出了一种改进的经验模态分解阈值降噪算法。同时对比小波软阈值降噪法与经验模态分解清除重复间隔阈值的方法,在 MATLAB 仿真软件中建立超声回波数学模型并进行算法验证。实验结果表明,经验模态分解降噪方法优于小波阈值降噪,改进后的经验模态分解阈值降噪方法在信噪比、均方误差、光滑度 3 个方面均有所提高,达到了较好的降噪效果。

关键词:超声信号; 经验模态分解; 改进阈值; 降噪; 信号处理

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.2040

Study on noise reduction of ultrasonic signals by improved EMD threshold method

Zhang Kunshuo¹ Qi Hua¹ Ren Anhu¹ Liu Jun²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Department of Communication Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: In the process of ultrasonic nondestructive testing in the industry, due to environmental reasons, from instrument noise, form a certain interference to the subsequent defect analysis, is not conducive to the completion of data analysis. In order to improve the signal-to-noise ratio, the signal waveform closer to no noise, proposes an improved empirical mode decomposition the threshold denoising algorithm. Compared with wavelet soft threshold denoising method and EMD method to eliminate the repetition interval of the threshold, the establishment of mathematical model of ultrasonic echo in MATLAB simulation software and the algorithm is verified. The experimental results show that the EMD denoising method is better than wavelet threshold denoising, the improved empirical mode decomposition threshold denoising method based on SNR, mean square error, smoothness are the three aspects to improve, achieve better noise reduction effect.

Keywords: ultrasonic signals; empirical mode decomposition(EMD); improved threshold; denoising; signal processing

0 引 言

超声检测获得的回波信号是一种非平稳、非线性的信号,其中包含着大量的缺陷信息。但由于信号中同时携带了噪声信息,对后续信号的处理会引起误差,从而无法获取缺陷信息,影响下一步的工作。为了准确的对缺陷信号完成检测,需要对信号进行降噪处理。常用的降噪方法有小波阈值降噪法,这种方法是一种有效的时频分析法,其原理为^[1-2]:信号在尺度空间中进行小波分解,选择适当的阈值对小波细节系数进行处理。当细节系数小于阈值时

看为噪声进行阈值处理,高于阈值时则认为存在信号的有用成分,进行保留。最后再保持尺度空间不变完成小波逆变换,进行信号的重构,完成降噪处理。但小波降噪在实际应用中需要考虑到小波基函数,其次在信号处理过程中分解层数和阈值选取的原则都是需要考虑的内容,增加了工作的难度。20 世纪末黄锷等人^[3]提出了经验模态分解法(empirical mode decomposition, EMD)。该算法是一种新的信号时频分析理论,根据信号本身的特征,对信号同时进行不同尺度的分解,分解过程中按照高频至低频的顺序完成。获得的一系列数据称为本征模函数(intrinsic

收稿日期:2017-07

* 基金项目:西安市科技计划项目基金(2017075CG/RC038(XAGY014))资助

mode function, IMF)。根据小波阈值降噪的原理,采用阈值对本征模函数分量进行降噪处理,在滤除噪声的同时可以很好地保留信号的有用信息。阈值降噪分为两种:第1种为采用直接阈值(EMD direct thresholding, EMD-DT)的方法,这种方法在进行信号处理时会忽略 IMF 为具有零均值的调幅/调频的调制正弦波,因此无法对有用信号很好地进行保留。第2种为间隔阈值(EMD interval thresholding, EMT-IT)降噪,如文献[4]中 EMD 清除重复间隔阈值(EMD clear iterative interval-thresholding, EMD-CIIT)的降噪方法。这种方法只针对小波降噪中对于小波基函数与分解层数这两个难点问题进行有效的解决,但对于间隔阈值的选择还存在着不确定性。本文对阈值函数完成了改进,提出一种改进的超声信号降噪算法。该方法能够提高信噪比,使信号波形的光滑性更好。

1 经验模态分解(EMD)基本理论

EMD算法是一种自适应的时频分析方法。将信号分解为有限本征模函数(IMF),分解结果为: $x(t) =$

$\sum_{i=1}^N h^{(i)}(t) + r(t)$, 即有 N 个 IMF 和一个余项 $r(t)$ 。经

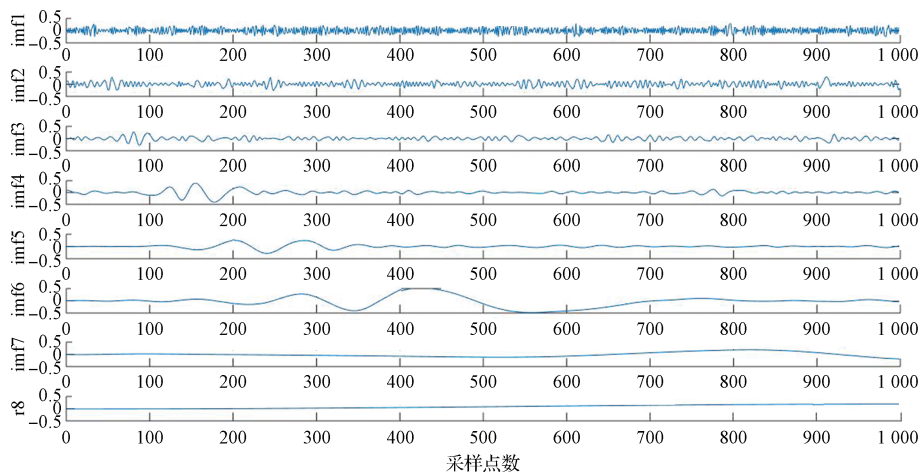


图1 EMD分解图

2 基于EMD的阈值降噪

传统的EMD降噪过程中,需要找到以噪声主导的IMF分量和信号主导的IMF分量,只用信号主导的IMF分量进行信号重构^[7-8],也有利用小波阈值对IMF分量进行阈值降噪的方法^[9-11]。而这两种方法的信噪比虽然有所提高,但使噪声主导的IMF分量中有用信息被忽略,会造成信号的不完整,对后续的工作有所影响。

采用类似小波阈值降噪的思想,EMD分解后得到的IMF分量进行直接阈值降噪。该方法硬阈值函数为:

$$\tilde{h}^{(i)}(t) = \begin{cases} h^{(i)}(t), & |h^{(i)}(t)| > T_i \\ 0, & |h^{(i)}(t)| \leq T_i \end{cases} \quad (1)$$

验模态分解主要分为以下几步^[5-6]:

1) 获得原始信号的极值点,采用3次样条曲线拟合的方法得到信号的上下包络并计算包络的局部平均值 $m(t)$,原信号减去平均值得到: $c(t) = x(t) - m(t)$;

2) 得到的 $c(t)$ 作为新的 $x(t)$ 重复步骤1) 筛选出第1个 IMF 分量 $c_1(t)$, 新的 $x(t)$ 减去筛选获得的 $c_1(t)$ 得到: $m_1(t) = x(t) - c_1(t)$;

3) 将 $m_1(t)$ 作为新的 $x(t)$ 重复以上步骤筛选获得其他分量,直到满足以下条件之一,则停止筛选: $c_N(t)$ 比设定误差小或 $c_N(t)$ 为单调函数或该单调函数不满足分解 IMF 分量的条件。

其中,每一个 IMF 函数必须满足以下两个条件:1) 在整段数据中,过零点的数量与极值点的数量应相等或最多不能相差超过一个;2) 极大值与极小值点形成的上下包络线均值为0,即关于时间轴局部对称^[3]。

如图1所示为 $SNR_m = 5$ dB 时含噪的 doppler 测试信号 EMD 分解图,信号经过分解后得到的有限个频率由高至低排列的 IMF 分量,在这些分量中,序号较小的 IMF 分量中包含着噪声或者信号尖锐的部分;在序号较大的分量中包含着低频成分,看作噪声成分。

软阈值函数为:

$$\tilde{h}^{(i)}(t) = \begin{cases} \text{sgn}[h^{(i)}(t)] |h^{(i)}(t) - T_i|, & |h^{(i)}(t)| > T_i \\ 0, & |h^{(i)}(t)| \leq T_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_i 为第 i 个 IMF 的门限阈值。为了避免 EMD-DT 降噪过程中出现的问题导致信噪比较低,EMD-IT 采用区间阈值。以信号相邻的两个零点之间为一个阈值区间单位,阈值表示为:

硬阈值:

$$\tilde{h}^{(i)}(z_j^{(i)}) = \begin{cases} h^{(i)}(z_j^{(i)}), & |h^{(i)}(z_j^{(i)})| > T_i \\ 0, & |h^{(i)}(z_j^{(i)})| \leq T_i \end{cases} \quad (3)$$

软阈值:

$$\tilde{h}^{(i)}(z_j^{(i)}) = \begin{cases} h^{(i)}(z_j^{(i)}) \frac{|h^{(i)}(r_j^{(i)})| - T_i}{|h^{(i)}(r_j^{(i)})|}, & |h^{(i)}(r_j^{(i)})| > T_i \\ 0, & |h^{(i)}(r_j^{(i)})| \leq T_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: $z_j^{(i)}$ 表示为第 i 个 IMF 分量的第 j 个过零点的数值; $h^{(i)}(z_j^{(i)})$ 表示为 $z_j^{(i)}$ 和 $z_{j+1}^{(i)}$ 之间的包络曲线; $h^{(i)}(r_j^{(i)})$ 表示为曲线 $h^{(i)}(z_j^{(i)})$ 的极大值或极小值。阈值 T_i 可由式(5)获得:

$$T_i = C \sqrt{2 \left(\frac{E_1^i}{\beta} \right) \rho^{-k} \ln N}, \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

式中: E_1^i 为第一个 IMF 的能量, β 和 ρ 的值分别为 0.719 和 2.01, k 为 IMF 分量的序列数, C 为常量, N 为信号长度。

受到平移不变小波阈值算法^[12]的启发, EMD-CIIT 降噪的基本步骤:

1) 完成原始带噪的超声信号的 EMD 分解;

2) 对第 1 个 IMF 分量进行阈值处理, 得到 $h^{(1)}(t)$ 降噪后的 $\tilde{h}^{(1)}(t)$ 并对 $h^{(1)}(t)$ 中实际含有的噪声进行估计, 得到 $h_n^{(1)}(t) = h^{(1)}(t) - \tilde{h}^{(1)}(t)$;

3) 将处理过的第一个 IMF 分量与剩下未处理的 $L-1$ 个分量进行相加完成重构, 得到重构后的信号

$$x_p(t) = \sum_{i=2}^L h^{(i)}(t) + \tilde{h}^{(1)}(t);$$

$$\tilde{h}^{(i)}(z_j^{(i)}) = \begin{cases} h^{(i)}(z_j^{(i)}) (|h^{(i)}(r_j^{(i)})| - T_i - b \cdot \exp(|h^{(i)}(r_j^{(i)})| - T_i)^2), & |h^{(i)}(r_j^{(i)})| \geq T_i \\ h^{(i)}(z_j^{(i)}) \left(b \cdot (|h^{(i)}(r_j^{(i)})| - \frac{T_i}{2}) \cdot \frac{T_i}{2} \right), & \frac{T_i}{2} < |h^{(i)}(r_j^{(i)})| < T_i \\ 0, & |h^{(i)}(r_j^{(i)})| \leq \frac{T_i}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: b 为常数。

4 实验仿真与结果分析

在检验降噪效果时, 不仅观察信号的光滑程度, 同时将信噪比, 均方误差也作为评价的标准。信噪比和均方误差计算公式如下^[14]:

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum f(t)^2}{\sum [f(t) - f(t')]^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [f(t) - f(t')]^2}{n}} \quad (8)$$

式中: $f(t)$ 为原带噪信号, $f(t')$ 为经过降噪处理后的信号, n 为采样点数。当 SNR 越大则代表信号降噪的效果越好, RMSE 越小则信号降噪效果越好。

超声信号的回波信号的数学模型建立如下^[15]:

$$f(t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos[2\pi f_c(t-\tau) + \phi] \quad (9)$$

式中: β 为幅值, α 为带宽因子, τ 为信号到达的时间, ϕ 为相位, f_c 为中心频率。

4) 随机改变第一个 IMF 分量中估计噪声的样本位置, $h_a^{(1)}(t) = ALTER(h_n^{(1)}(t))$; 将随机改变位置后的 $h_a^{(1)}(t)$ 与 $x_p(t)$ 相加, 得到与原始带噪的超声信号不同的信号 $x_a(t) = x_p(t) + h_a^{(1)}(t)$, 对新的带噪信号 $x_a(t)$ 进行 EMD 分解;

5) 用区间阈值函数对新的 IMF 分量进行处理后, 得到重构处理后的信号 $\tilde{x}_1(t)$;

6) 重复步骤 4)、5) $K-1$ 次, 获得每次处理后的信号 $\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), \tilde{x}_3(t), \dots, \tilde{x}_k(t)$, 其中 K 为迭代次数, 取平均值得到 $\tilde{x}(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \tilde{x}_k(t)$ 。

3 改进阈值函数

在阈值降噪的过程中, 对于不同的带噪信号, 处理后的信号结果也会有所不同, 需要根据实际情况对阈值函数进行选取。当进行降噪处理时, 选择的阈值偏小就会使噪声系数保留, 从而使处理过的信号中仍然包含噪声信息, 影响了降噪效果; 选择阈值偏大时会使得有用信息被滤除, 在重构时由于有用信号的缺失导致信号失真。

针对以上缺点, 参考文献[13]对阈值函数完成改进, 改进后的方法比文献中的得到的效果较好。改进函数的数学表达式为:

如图 2~3 所示, 通过 MATLAB 仿真验证改进函数的算法有效性进行验证。原始信号为含有 1 dB 与 5 dB 噪声的超声信号。对原始信号分别用小波软阈值降噪、EMD-CIIT 的硬阈值降噪、EMD-CIIT 的软阈值降噪和 EMD-CIIT 的改进算法进行降噪处理。

小波软阈值函数降噪采用的是 dB 小波基函数, 分解层数选取 4, 阈值规则选择 minimaxi 规则。由图 2~3 可以看出, 本文提出的 EMD-CIIT 的改进阈值降噪方法与小波软阈值降噪、EMD-CIIT 降噪进行对比, 改进后的阈值函数对信号降噪处理后, 得到的信号更为光滑且波形失真程度较低。4 种方法的性能指标 SNR 与 RMSE 对比见表 1。

表 1 含噪原始信号降噪(输入信噪比为 1 dB)

性能指标	小波软 阈值	EMD 硬阈值	EMD 软阈值	EMD 改进阈值
SNR	9.132 1	10.197 1	10.566 6	11.085 8
RMSE	0.274 1	0.309 1	0.296 3	0.279 1

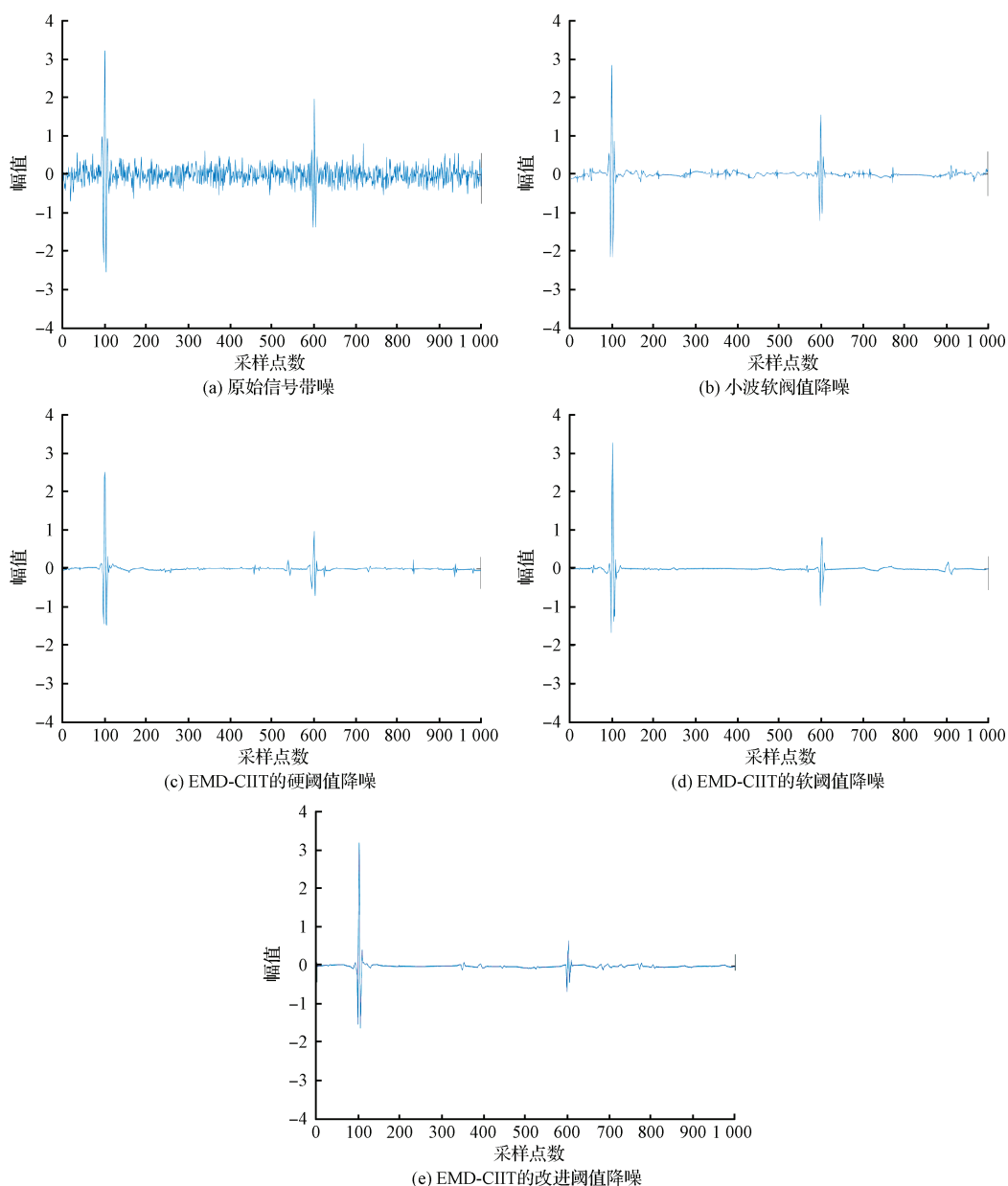


图2 信噪比为1 dB的信号降噪处理结果

表2 含噪原始信号降噪(输入信噪比为5 dB)

性能指标	小波软 阈值	EMD 硬阈值	EMD 软阈值	EMD 改进阈值
SNR	11.254 9	14.577 2	15.836 9	16.273 7
RMSE	0.273 7	0.186 7	0.161 5	0.153 6

由表1、2可知,改进阈值函数的降噪效果相比较小波软阈值与EMD-CIIT未改进的阈值方法的降噪效果最好,在输入信噪比为1 dB的情况下,改进后的阈值新造比提高了约3 dB;在输入信噪比为5 dB的情况下,SNR

相比较小波软阈值提高了约5 dB,相比较未改进的硬、软阈值方法分别提高了1.696 5 dB和0.436 8 dB。结合上图所示,改进的阈值函数不仅信噪比最高且信号光滑度最佳。

5 结论

本文针对基于经验模态分解的阈值降噪算法在降噪过程中信号光滑度的缺点,提出了应用于超声信号中的改进阈值降噪的算法。经过MATLAB仿真验证,相较于小波软阈值降噪算法,改进后的EMD阈值函数处理后的信号,其信噪比与光滑度均有所提高。

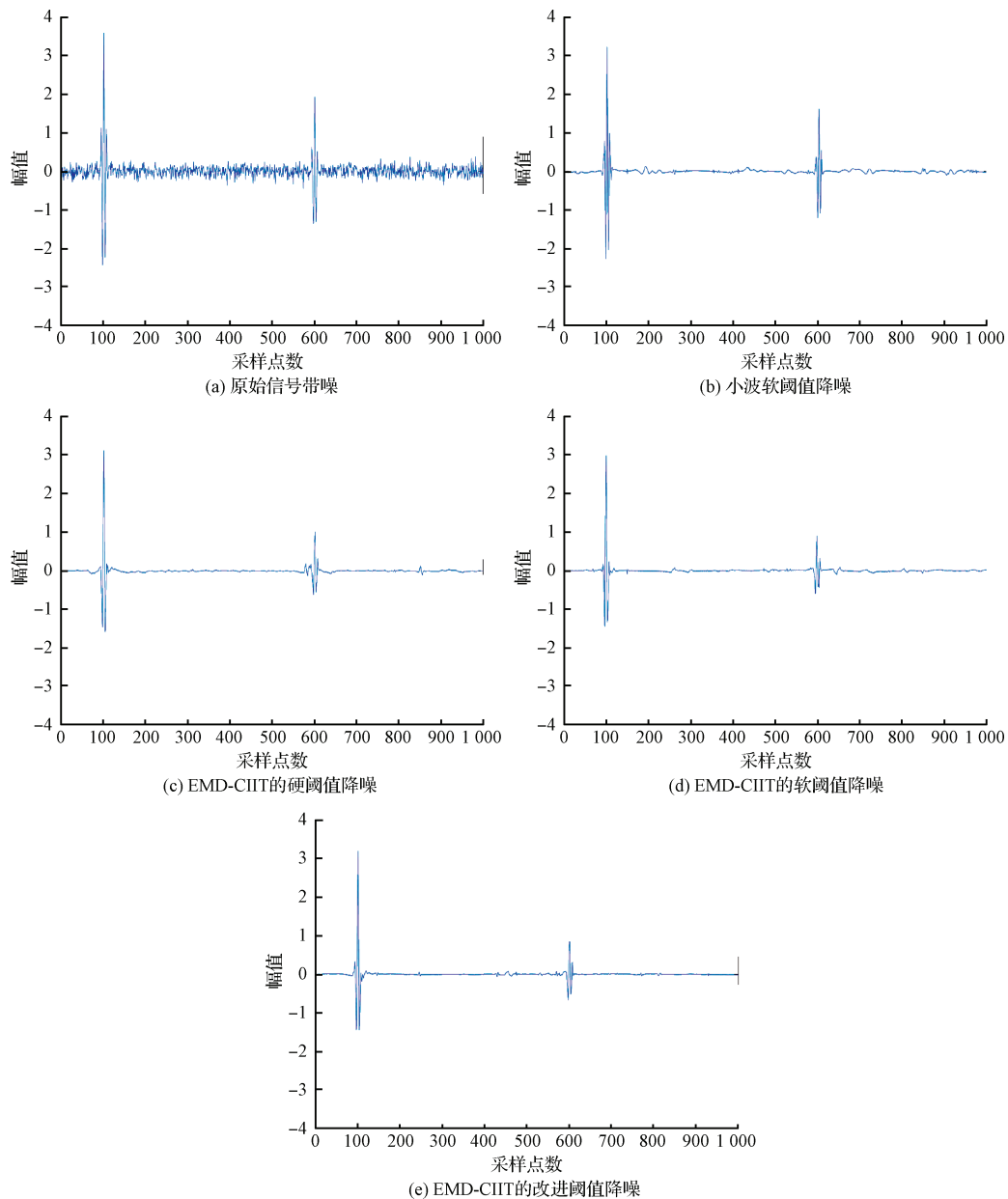


图3 信噪比为 5 dB 的信号降噪处理结果

参考文献

[1] 张韬,左宪章,田贵云,等. 脉冲漏磁信号的 EMD 小波阈值去噪研究[J]. 计算机工程,2012,38(7):263-265.
 [2] 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.
 [3] 苗晟,王威廉,姚绍文. Hilbert-Huang 变换发展历程及其应用[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(8):812-818.
 [4] KOPSINIS Y, MCLAUGHLIN S. Development of EMD-Based denoising methods inspired by wavelet thresholding [J]. IEEE Transactions on Signal Pro-

cessing, 2009,57(4):1351-1362.

[5] 张晖,鲁明明,丁华平,等. 基于经验模态分解法的桥梁应变信号降噪方法研究[J]. 电子测量技术,2016,39(10):166-170.
 [6] 王金海,岳晨飞,韦然,等. 基于 EMD 的动态脉搏数据处理研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(增刊1):34-39.
 [7] 张楠,周西峰,王瑾,等. 基于改进的 EMD 超声信号降噪方法研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2016,36(2):49-55.
 [8] 王婷. EMD 算法研究及其在信号去噪中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
 [9] 陈建勇,王道阔,邓文锋,等. 重构小波阈值函数在信

- 号去噪中的应用与研究[J]. CT理论与应用研究, 2017, 26(1): 63-68.
- [10] 崔治. 小波分析在超声检测信号处理中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [11] 陈卫萍, 潘紫薇. 基于经验模态分解的小波阈值滤波去噪[J]. 安徽工业大学学报: 自然科学版, 2010, 27(4): 397-400.
- [12] 金仁贵, 金昊, 杨仁付. 电压互感器局部放电信号去噪的平移不变小波算法[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(9): 255-257.
- [13] 景新幸, 洗灿娇, 杨海燕. 基于改进的小波阈值去噪算法的研究[J]. 电声技术, 2015, 39(5): 80-83.
- [14] 苏秀红, 李皓. 基于经验模态分解和小波阈值的冲击信号去噪[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(1): 204-208, 220.
- [15] 杨辰龙, 陈越超, 叶钱, 等. 金属材料小缺陷超声反射信号建模及识别[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2635-2644.

作者简介

张坤硕, 1992年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为超声信号分析等。

E-mail: queenazha@163.com

齐华, 1963年出生, 工学博士, 教授, 主要研究方向为无线传感器网络、信息传输、信息处理、信息编码理论、电磁兼容技术等。

泰克为下一代汽车设计与工程提供最新测试解决方案

随着电子器件在汽车中的作用不断扩大, 创新的5系列混合信号示波器(MSO)最新软件解决方案加快了设计周期, 使工程师能够更深入的研究

2017年11月17日, 泰克科技公司日前推出专为5系列混合信号示波器(MSO)开发的新型汽车专用软件解决方案, 旨在加快下一代汽车中使用的复杂电子器件的验证速度, 缩短这些电子器件的设计周期。最新汽车解决方案全面利用5系列混合信号示波器(MSO)的关键创新技术, 包括最多8个通道、12位分辨率及大型高清容性触控显示器和高度直观的用户界面。

汽车行业正在经历着剧变, 受到数字化创新的驱动, 从智能无人驾驶汽车到替代或增强传统机电系统的电子系统。对新型中速和高速串行总线的需求, 比如CAN FD (5~10 Mb/s)和汽车以太网, 与包括LIN、FlexRay、MOST和其他汽车总线技术共存, 则使形势变得更加复杂。通过这次专为5系列混合信号示波器(MSO)开发的软件, 泰克为汽车工程师提供了理想的解决方案, 他们可以分析和调试所有汽车子系统电子控制单元(ECUs)和多条总线。

“针对5系列混合信号示波器(MSO)的这些解决方案将使下一代汽车工程师能够更加深入地了解复杂系统, 更快地解决问题, 并保证项目按计划进行。”泰克科技公司中端示波器总经理 Brian Ice 说, “与仅限于4个通道的其他解决方案不同, 5系列混合信号示波器(MSO)使得客户能够同时捕获更多的信息并交互比较, 从而更快、更高效地进行故障排除和调试。”

泰克为5系列混合信号示波器(MSO)开发的最新汽车解决方案包括:

1) 5-SRAUTO 协议选项包, 可以对汽车行业使用的

总线进行全面的串行触发和分析, 包括CAN、CAN FD、LIN和FlexRay。CAN FD支持非ISO标准版本和ISO标准版本。

2) 5-CMAUTOEN 汽车以太网解决方案支持根据IEEE P802.3bw (100BASE-T1)和BroadR-Reach V3.2规范要求自动进行一致性测试。这种自动化一致性测试解决方案包括5系列混合信号示波器(MSO)上运行的测试软件, 同时执行汽车以太网OPEN联盟特别兴趣小组(SIG)标准所定义的物理媒体附件(PMA)发射机第1组电气测量一致性测试。

重新定义中端示波器

新功能扩展了5系列混合信号示波器(MSO)支持的应用, 提供了大量的创新技术, 重新定义了中端示波器。这些创新技术包括: 业界第一个FlexChannel™技术, 支持4、6或8个模拟通道及最多64个数字通道, 集成协议分析和信号发生器, 新型12位ADC信号采集系统, 15.6英寸容性触控显示器, 高度直观的用户界面, 为复杂的嵌入式系统提供前所未有的灵活性和无与伦比的可视性。

供货情况

专为5系列混合信号示波器(MSO)开发的汽车解决方案现已上市, 如需进一步了解泰克全线汽车解决方案, 敬请访问: <https://cn.tek.com/automotive-0>。

想知道泰克其他动态? 查看Bandwidth Banter博客, 关注Twitter和Facebook, 了解泰克最新消息。