

# 改进小波阈值函数降低发动机冷试噪声 测试仿真

徐卓<sup>1</sup>, 王辉<sup>2</sup>, 杨晓峰<sup>2</sup>, 吴凡<sup>1</sup>, 闫伟<sup>1\*</sup>

1. 山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250014;

2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

**摘要:**为在发动机冷试测试过程中得到较为精准的传递信号,在分析总结小波降噪的文献资料基础上,构造一种对发动机冷试测试过程中的故障诊断信号进行降噪处理的改进小波阈值函数,使用 MATLAB 进行降噪模拟仿真对比分析,并对冷试的柴油机缸盖高速振动信号加噪后进行仿真验证。结果表明:本文中提出的基于改进小波阈值函数的降噪方法效果较好;MATLAB 仿真试验中,经改进的小波阈值函数处理后的信号信噪比为 26.941 3,均方根误差为 0.525 8;在柴油机降噪仿真试验中,经改进的小波阈值函数处理后的信号信噪比为 3.086 8,均方根误差为 2.288 1。改进小波阈值函数降噪方法对柴油机冷试振动信号具有较好的降噪效果。

**关键词:**小波降噪;阈值函数;冷试测试;故障诊断;发动机

中图分类号:TB535;TK421.6

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)01-0050-08

**引用格式:**徐卓,王辉,杨晓峰,等.改进小波阈值函数降低发动机冷试噪声测试仿真[J].内燃机与动力装置,2024,41(1):50-57.

XU Zhuo, WANG Hui, YANG Xiaofeng, et al. Simulation of reducing signal noise of engine cold test based on improved wavelet threshold function[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024,41(1):50-57.

## 0 引言

随着发动机行业冷试测试技术的发展,对冷试测试过程中故障诊断准确性的要求越来越高,对故障诊断信号降噪处理的研究具有十分重要的现实意义。发动机装配过程的质量检测成为各大生产企业的研究重点,前期各企业主要采用热试技术,但是在安全、成本、环境保护等综合需求提升的情况下,热试逐渐被冷试技术取代。冷试技术是一种在无燃料条件下对发动机总成进行测试的方法,开展冷试测试技术的研究和推广具有重要的现实意义<sup>[1]</sup>。冷试测试的过程中,在设备上加装电机,以此来带动发动机旋转,通过发动机上各处安装的传感器采集检测数据,并将这些数据一同汇集到计算机中,利用故障映像技术判断发动机装配是否合格<sup>[2]</sup>,因此故障诊断信号的准确性直接影响冷试结果,对故障诊断信号进行降噪处理尤为重要。

Donoho<sup>[3]</sup>首次提出小波阈值降噪方法,并给出软阈值与硬阈值的阈值函数,对信号进行分解-处理-重构,得到降噪信号;马臣岗<sup>[4]</sup>改进了软、硬阈值折中法,并使用该方法在雷达图像的降噪过程中起到关键作用;李明珠<sup>[5]</sup>构造新的阈值函数,改进了小波阈值神经网络的激励函数;刘同珊<sup>[6]</sup>对阈值函数进行优

收稿日期:2023-09-12

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2020CXGC011004);山东省工程机械智能装备创新创业共同体项目(GTT2021102)

第一作者简介:徐卓(1997—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要研究方向为能源动力,E-mail:353824504@qq.com。

\*通信作者简介:闫伟(1973—),男,济南人,工学博士,教授,主要研究方向为新能源汽车技术、发动机冷试技术等,E-mail:yanwei@sdu.edu.cn。

化,随着分解层数的增加,阈值函数逐渐减小,且保证降噪后的小波系数与原小波系数的偏差逐渐减小;齐凤<sup>[7]</sup>对阈值函数进行改进,在具有较强灵活性的同时,通过阈值作用保证了小波系数的平滑过渡。

本文中基于小波降噪方法开展柴油机冷试测试中故障诊断的信号降噪研究,针对小波函数硬阈值可能导致重构后的信号出现振荡现象,以及软阈值可能使重构后的信号失真的固有缺点,提出了一种新的阈值函数,在 MATLAB 环境中进行信号降噪的模拟仿真,比较不同方法的信噪比和均方根误差,验证针对柴油机冷试振动信号构造的改进小波阈值的降噪效果。

## 1 小波降噪的相关理论

除了小波阈值函数降噪外,传统降噪方法还有 Fourier 去噪等,Fourier 去噪主要针对目标是平稳信号,而小波阈值函数降噪虽然可以用于处理非平稳信号的噪声,但若想要达到较好的降噪效果,需要选取合适的阈值函数<sup>[8]</sup>。

小波阈值函数降噪方法利用小波变换分解信号,信号分解后的各分解层均有对应的小波系数,计算后得到一部分偏大的小波系数,余下大量展开系数,而这些小波系数偏大和偏小的分解层分别是信号的主要能量和噪声能量的主要集中之处<sup>[9]</sup>。因此与噪声信号相比,原始信号的小波系数幅值更高,且小波系数个数少很多,故选择幅值较小的系数,并将其手动置零舍去,只保留较大的系数,在信号重构时仅使用这些保留的系数,便可以达到降噪的效果。

采用基于小波阈值函数的降噪算法时,应当遵循如下步骤。

### 1) 选择小波基函数

常用的小波基函数有 symN 小波系、dbN 小波系、Morlet 小波、Haar 小波、Meyer 小波系和 coifN 小波等,针对不同的信号特点,需要选择合适的小波基函数,才能够使降噪效果最优<sup>[10]</sup>。

### 2) 选择分解层数

在小波分解的过程中,分解层数过多或过少,都对信号重构产生影响,造成信号失真或噪声去除不彻底。一般来说,分解层数为 3~5<sup>[11]</sup>。

### 3) 选取阈值

常用的阈值有极大极小阈值(minimaxi)、固定阈值(sqrtwolog)、启发式阈值(heursure)和无偏风险估计阈值(rigrsure)<sup>[12]</sup>。

### 4) 选取阈值函数

Donoho<sup>[3]</sup>提出的硬阈值和软阈值函数虽然应用较为广泛,但是自身存在一定的不足。而由于阈值函数在小波阈值降噪方法中的关键地位,通过改进原有的阈值函数或构造新的阈值函数提高降噪效果是目前众多研究人员的主要研究方向。

## 2 阈值函数改进

### 2.1 现有阈值函数

硬阈值函数的算法原理是:在确定阈值  $T$  后,对处于阈值范围内的小波系数,设其值为 0;对阈值范围之外的小波系数,则保留其原值,不做处理。硬阈值函数的表达式<sup>[10]</sup>为:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} W_{j,k}, & |W_{j,k}| \geq T \\ 0, & |W_{j,k}| < T \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $j,k$  为向量组  $\mathbf{W}$  中数据的坐标; $\hat{W}_{j,k}$  为含噪信号进行硬阈值函数处理后得到的信号预估小波系数; $W_{j,k}$  为含噪信号未经处理时的原始小波系数; $T$  为阈值,通常根据使用情况自行设定。

软阈值函数的原理是:在确定阈值  $T$  后,对处于其范围内的小波系数,直接将值设为 0;对阈值范围之外的小波系数,则用其原值减掉阈值,向 0 收缩。软阈值函数的表达式<sup>[10]</sup>为:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(W_{j,k}) (|W_{j,k}| - T), & |W_{j,k}| \geq T \\ 0, & |W_{j,k}| < T \end{cases}, \quad (2)$$

使用硬阈值函数可以保证处理后的信号具有较好的边缘性,但由于硬阈值函数本身不连续,可能导致信号重构后出现振荡现象;软阈值函数虽然具有连续性,但阈值范围之外预估所得的小波系数与原始小波系数本就存在固定偏差,这个偏差可能导致信号重构后出现失真的状况<sup>[13]</sup>。正是由于硬阈值函数和软阈值函数存在的这些不足,许多学者尝试构造新的阈值函数或改进原有的阈值函数来解决这些问题。

马臣岗<sup>[4]</sup>改进的阈值函数为:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(W_{j,k}) \left( |W_{j,k}| - \left( 1 - \frac{\sigma_n^2}{\sigma_{\max}^2} T \right) \right), & |W_{j,k}| \geq T \\ 0, & |W_{j,k}| < T \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $\sigma_n^2$  为小波包分解后的各高频子带方差;  $\sigma_{\max}^2$  为小波包分解后的各高频子带最大方差。

刘同珊<sup>[6]</sup>改进的阈值函数为:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(W_{j,k}) \left( |W_{j,k}| - \frac{pT}{1 + \exp(q(|W_{j,k}| - T))} \right), & |W_{j,k}| \geq T \\ 0, & |W_{j,k}| < T \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $p, q$  为调节因子。

齐凤<sup>[7]</sup>改进的阈值函数为:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(W_{j,k}) \left( |W_{j,k}| - \frac{T^2}{|W_{j,k}| + T \exp(\sqrt{|W_{j,k}| - T})} \right), & |W_{j,k}| \geq T \\ 0, & |W_{j,k}| < T \end{cases}. \quad (5)$$

## 2.2 改进的阈值函数

构造阈值函数的基本思想是使本身处于阈值范围内的小波系数直接向零收缩,处于阈值范围之外的小波系数逐渐增大时,预估小波系数与原始小波系数之间的偏差必须逐渐缩小,趋近于  $y = x$  函数,并且阈值函数本身具有连续性<sup>[14]</sup>。基于这一原理并借鉴其他学者的思想后,本文中构造出一种新的小波降噪阈值函数,其数学表达式为:

$$\hat{W}_{j,k} = f(W_{j,k}) \frac{|W_{j,k}|}{\sqrt{W_{j,k}^2(W_{j,k}^2 + 1) + \exp(T^b)} - |W_{j,k}| \sqrt{W_{j,k}^2 + 1} + 1}, \quad (6)$$

式中:  $f(x)$  为 softsign 函数,  $f(x) = \frac{x}{1 + |x|}$ ;  $b$  为调节因子。

对式(6)的连续性和偏差性进行分析,其推导过程如下所示:

1) 连续性

当  $W_{j,k} \rightarrow T^+$  时,

$$\lim_{W_{j,k} \rightarrow T^+} \hat{W}_{j,k} = \lim_{W_{j,k} \rightarrow T^+} f(W_{j,k}) \frac{|W_{j,k}|}{\sqrt{W_{j,k}^2(W_{j,k}^2 + 1) + \exp(T^b)} - |W_{j,k}| \sqrt{W_{j,k}^2 + 1} + 1} = \frac{f(T) T}{\sqrt{T^2(T^2 + 1) + \exp(T^b)} - T \sqrt{T^2 + 1} + 1}. \quad (7)$$

当  $W_{j,k} \rightarrow T^-$  时,

$$\lim_{W_{j,k} \rightarrow T^-} \hat{W}_{j,k} = \lim_{W_{j,k} \rightarrow T^-} f(W_{j,k}) \frac{|W_{j,k}|}{\sqrt{W_{j,k}^2(W_{j,k}^2 + 1) + \exp(T^b)} - |W_{j,k}| \sqrt{W_{j,k}^2 + 1} + 1} = \frac{f(T) T}{\sqrt{T^2(T^2 + 1) + \exp(T^b)} - T \sqrt{T^2 + 1} + 1}. \quad (8)$$

由式(7)(8)可知,  $\lim_{W_{j,k} \rightarrow T^+} \hat{W}_{j,k} = \lim_{W_{j,k} \rightarrow T^-} \hat{W}_{j,k} = \hat{W}_{j,k}|_{W_{j,k}=T}$ , 证明函数在  $T$  处具有连续性。同理可证,  $\lim_{W_{j,k} \rightarrow -T^+} \hat{W}_{j,k} = \lim_{W_{j,k} \rightarrow -T^-} \hat{W}_{j,k} = \hat{W}_{j,k}|_{W_{j,k}=-T}$ , 表明函数在  $-T$  处也具有连续性。由此表明, 函数在定义域内具有连续性。

2) 偏差性

当  $W_{j,k} \rightarrow +\infty$  时,

$$\lim_{W_{j,k} \rightarrow +\infty} (\hat{W}_{j,k} - W_{j,k}) = \lim_{W_{j,k} \rightarrow +\infty} (f(W_{j,k}) \cdot |W_{j,k}| - W_{j,k}) = \lim_{W_{j,k} \rightarrow +\infty} (|W_{j,k}| - W_{j,k}) = 0 \quad (9)$$

当  $W_{j,k} \rightarrow -\infty$  时,

$$\lim_{W_{j,k} \rightarrow -\infty} (\hat{W}_{j,k} - W_{j,k}) = \lim_{W_{j,k} \rightarrow -\infty} (f(W_{j,k}) \cdot |W_{j,k}| - W_{j,k}) = \lim_{W_{j,k} \rightarrow -\infty} (|W_{j,k}| - W_{j,k}) = 0 \quad (10)$$

由式(9)(10)可知,  $\lim_{W_{j,k} \rightarrow +\infty} (\hat{W}_{j,k} - W_{j,k}) = \lim_{W_{j,k} \rightarrow -\infty} (\hat{W}_{j,k} - W_{j,k}) = 0$ , 当  $|W_{j,k}|$  逐渐增大时,  $\hat{W}_{j,k}$  与  $W_{j,k}$  的偏差逐渐减小并趋于相同。

### 3 仿真试验验证分析

为了验证此次改进阈值函数的去噪效果, 选取 MATLAB 软件中的 bumps 信号并添加高斯白噪声进行仿真试验<sup>[15]</sup>, 基于上述阈值函数, 利用小波降噪方法对加噪信号进行降噪处理, 共选取 2 048 个点。在结果评价时, 利用信噪比  $S_{NR}$  和均方根误差  $\delta_{RMSE}$  评价降噪效果, 其中信噪比的计算结果表示式中 2 个信号之间的能量比, 均方根误差的计算结果表示式中 2 个信号之间的离散程度, 两者的表达式为:

$$S_{NR} = 10 \lg \left( \frac{\sum_{i=1}^n f^2(i)}{\sum_{i=1}^n (\hat{f}(i) - f(i))^2} \right) \quad (11)$$

$$\delta_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\hat{f}(i) - f(i))^2} \quad (12)$$

式中:  $f(i)$  为未经处理的原始信号;  $\hat{f}(i)$  为去噪后的信号。

若要评价此小波降噪方法的降噪效果好, 需证明该方法噪声去除多, 信号失真程度小, 即去噪信号的信噪比大, 均方根误差小。

在 MATLAB 软件中选取 bumps 信号并加噪, 对加噪的 bumps 信号进行降噪处理, 为了对比更多不同阈值函数的降噪效果, 在使用其他学者改进的阈值函数和本文改进的阈值函数进行降噪的同时, 选用传统的硬阈值函数和软阈值函数进行降噪, 基函数分别选用 sym10 和 db10 小波基两者以增加样本量, 分解层数折中选取为 5, 阈值选用极大极小阈值, 调节因子  $p=0.5, q=0.1, b=0.5$ , 经过以上步骤, 所得的原始 bumps 信号及加噪的 bumps 信号如图 1 所示, 传统硬阈值函数和软阈值函数的降噪仿真结果如图 2 所示, 其他学者及本文中改进的阈值函数降噪仿真结果如图 3 所示, 以上提到的各种阈值函数的降噪结果数据评价对比如表 1 所示。

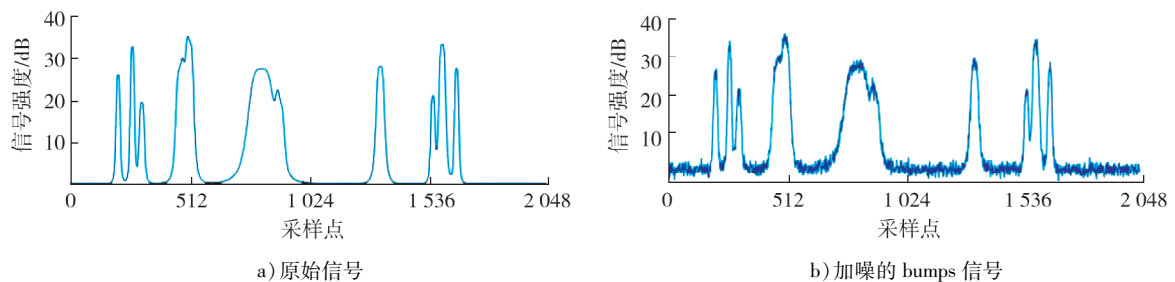


图1 原始信号及 bumps 加噪信号

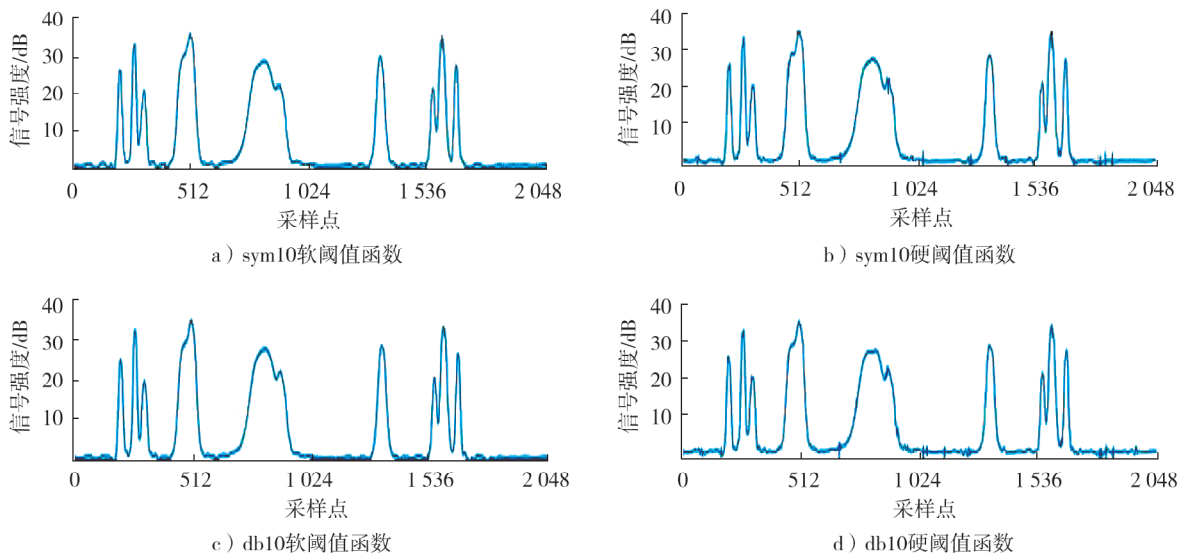


图2 传统阈值函数降噪后的信号

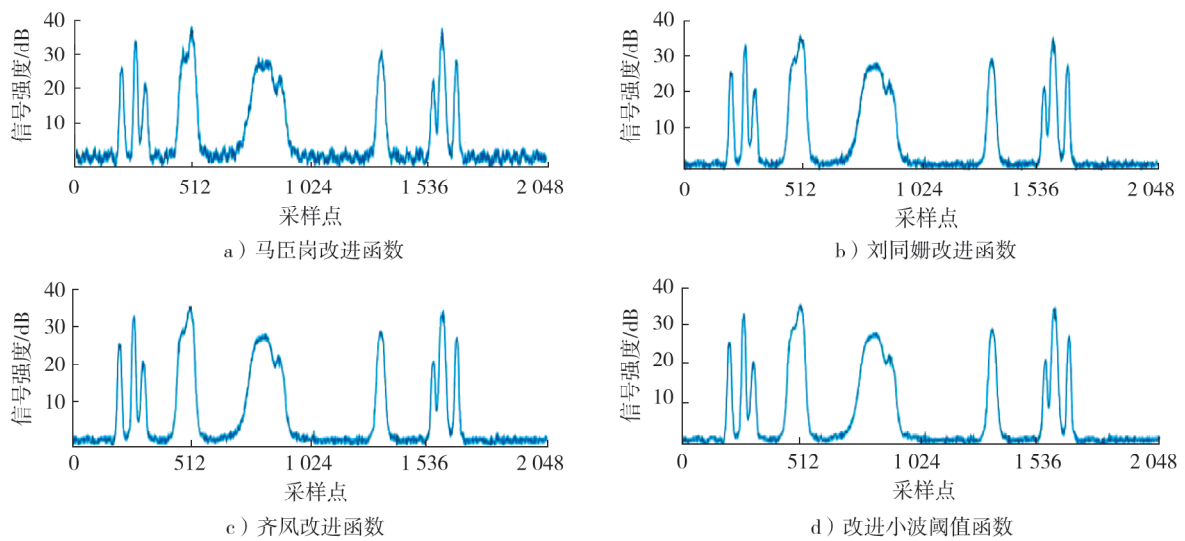


图3 不同改进阈值函数降噪后的信号

表1 bumps 信号及不同处理方式的降噪效果对比

信号	$S_{NR}$	$\delta_{RMSE}$	信号	$S_{NR}$	$\delta_{RMSE}$
bumps 加噪后	21.277 2	1.009 3	马臣岗 <sup>[4]</sup> 阈值函数处理后	19.465 0	1.243 4
sym10 软阈值函数处理后	26.454 6	0.556 1	刘同珊 <sup>[6]</sup> 阈值函数处理后	24.416 0	0.703 2
sym10 硬阈值函数处理后	26.924 9	0.526 8	齐凤 <sup>[7]</sup> 阈值函数处理后	25.778 8	0.601 1
db10 软阈值函数处理后	26.469 5	0.555 1	改进的小波阈值函数处理后	26.941 3	0.525 8
db10 硬阈值函数处理后	26.903 6	0.516 0			

由图2可知,传统的几种阈值函数均可有效消除噪声。由图3和表1可知:对加噪的 bumps 信号进行降噪处理时,就降噪效果而言,sym10 与 db10 小波基的去噪效果基本一致,而无论是 sym10 小波基还是 db10 小波基,传统的硬阈值函数都优于软阈值函数,除此之外,本文中提出的改进阈值函数信噪比为 26.941 3,高于其它阈值函数,均方根误差为 0.525 8,小于其它阈值函数,说明改进小波阈值函数比其它阈值函数有更好的降噪效果。

## 4 冷试振动信号降噪的实例仿真

为了验证小波改进阈值函数的降噪方法对冷试振动信号的有效性,选用柴油机冷试的高速缸盖振动信号进行仿真试验。高速振动测试时,柴油机转速为 1 500 r/min,采样周期为曲轴转角  $0.35^\circ$ ,在曲轴转角  $720^\circ$ 内共采集 2 048 次数据,在 MATLAB 中对高速缸盖振动信号添加 10 dB 的高斯白噪声,得到加噪后的信号如图 4 所示。

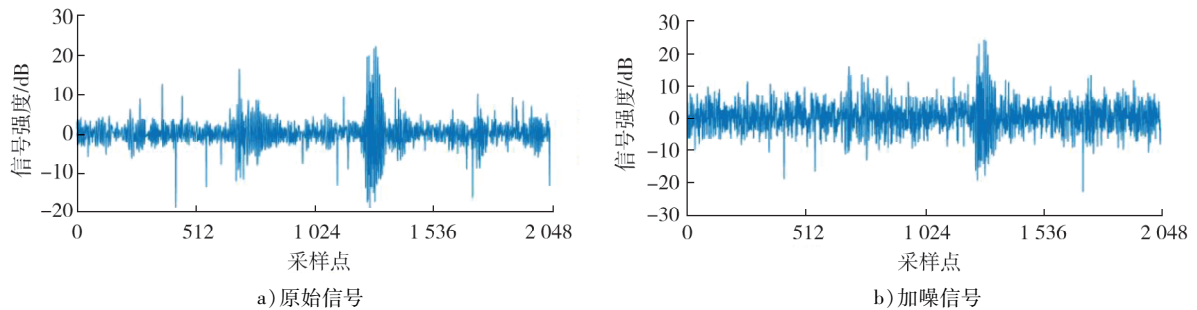
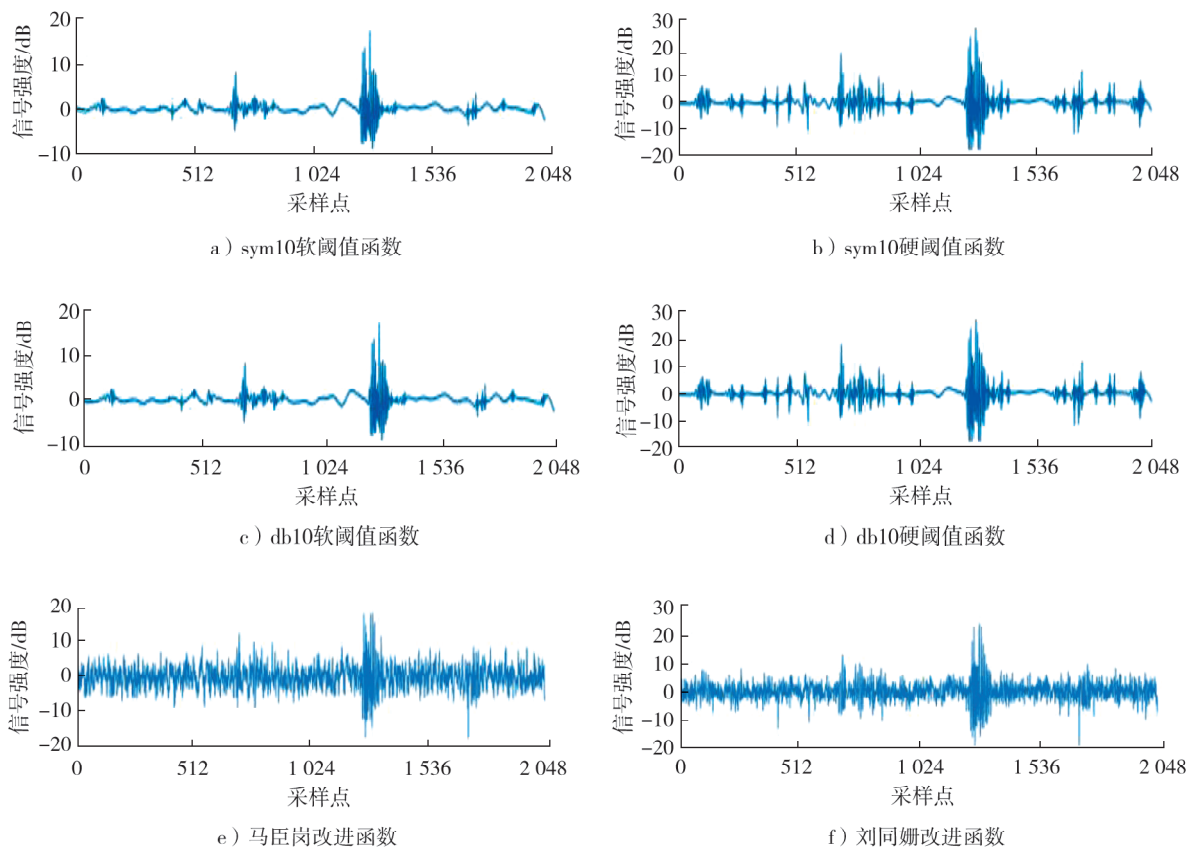


图4 高速缸盖振动信号波形图

在本文中改进的阈值函数的基础上,对加噪的柴油机冷试高速缸盖振动信号使用小波阈值降噪的方法进行处理,其中小波分解层数仍然选取为 5,为了方便对比,小波基函数仅选取 sym10,阈值仍然选取为极大极小阈值,调节因子  $p=0.5, q=0.1, b=0.5$ 。为了验证使用不同阈值函数的降噪方法的效果,与前文仿真试验相同,选取 4 种传统阈值函数和 3 种改进函数及本文中改进函数的降噪方法进行对比,如图 5 所示。采用 2 种数据评价指标评价降噪效果,得到仿真中不同阈值函数的降噪效果对比,如表 2 所示。



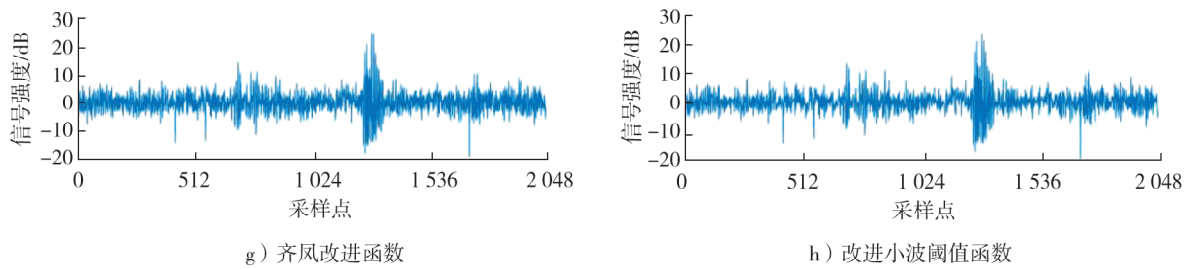


图5 不同阈值函数降噪后的仿真结果

表2 几种降噪方法的评价结果

信号	$S_{NR}$	$\delta_{RMSE}$	信号	$S_{NR}$	$\delta_{RMSE}$
加噪后的高速缸盖振动信号	0.561 6	3.060 0	马臣岗 <sup>[4]</sup> 阈值函数处理后	-0.592 9	3.495 1
sym10 软阈值函数处理后	2.028 2	2.584 6	刘同珊 <sup>[6]</sup> 阈值函数处理后	2.164 3	2.544 4
sym10 硬阈值函数处理后	2.361 7	2.485 7	齐凤 <sup>[7]</sup> 阈值函数处理后	2.681 9	2.397 2
db10 软阈值函数处理后	1.805 6	2.651 7	改进的小波阈值函数处理后	3.086 8	2.288 1
db10 硬阈值函数处理后	1.996 0	2.594 2			

由图5及表2可知:在传统阈值函数与其他学者改进的阈值函数中,齐凤改进阈值函数的降噪效果较好,信噪比与均方根误差分别为2.681 9、2.397 2;本文中提出的改进小波阈值函数的信噪比与均方根误差分别为3.086 8、2.288 1。说明改进的小波阈值函数比其它阈值函数有更好的降噪效果,缸盖振动仿真试验结果与MATLAB仿真试验结果整体趋势吻合。

## 5 结论

构造了一种基于改进小波阈值函数的降噪方法,可以实现柴油机冷试振动信号的有效降噪。传统的小波降噪方法包括小波硬阈值降噪方法、小波软阈值降噪方法,将改进的小波阈值函数降噪方法与传统的小波降噪方法和其他学者改进的小波阈值函数的降噪方法进行对比,在这几种降噪方法的基础上先后进行MATLAB仿真试验与实例仿真试验,通过比较信噪比和均方根误差判断各降噪方法的降噪效果。在2次仿真试验中,改进的小波阈值函数的降噪效果更好,优于传统阈值函数及其他学者改进的阈值函数,实现柴油机冷试振动信号的有效降噪。

1)在MATLAB仿真试验中,对比所有阈值函数的数据评价指标,改进的小波阈值函数信噪比最高,均方根误差最小,分别为26.941 3、0.525 8。

2)在实例仿真试验中,对比所有阈值函数的数据评价指标,改进的小波阈值函数信噪比最高,均方根误差最小,分别为3.086 8、2.288 1。

### 参考文献:

- [1] 樊刘杨. 基于智能理论的柴油机冷试关键技术研究[D]. 济南:山东大学,2023.
- [2] 卜宇君. 发动机冷试排气测试故障检测与诊断方法[D]. 上海:上海交通大学,2013.
- [3] DONOHO D L, JOHNSTONE I M, KERKYCHATIAN G, et al. Wavelet shrinkage-asymptopia[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B-Methodological, 1995, 57(2):301-337.
- [4] 马臣岗. 基于小波包分析的合成孔径雷达图像降噪算法研究[D]. 太原:中北大学,2011.
- [5] 李明珠. 车载光电精密测量仪器振动信号小波降噪研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2017.

- [6] 刘同珊. 基于小波降噪车辆传动轴承工作状态远程监控系统研究[D]. 沈阳:东北大学,2018.
- [7] 齐凤. 井下接收信号的小波降噪方法研究[D]. 西安:西安石油大学,2019.
- [8] 孟湘,曾洪涛,刘冬,等. 基于 VMD-SWT 的降噪方法在转子振动信号中的应用[J]. 中国农村水利水电,2021(6):164-168.
- [9] 陆建华,沈科宇. 基于动态小波阈值的齿轮箱振动信号降噪方法[J]. 起重运输机械,2022(2):56-60.
- [10] 盛祖维. 基于小波去噪的阈值函数改进及其应用研究[D]. 南昌:江西财经大学,2021.
- [11] 谭洁,李恒,张国银,等. 一维小波去噪在雷声信号处理中的应用[J]. 数据通信,2019(3):19-22.
- [12] 罗烈. 小波变换在变形监测数据去噪和信息提取中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [13] 卢莉蓉,王鉴,牛晓东. 基于 VMD 和小波阈值的 ECG 肌电干扰去噪处理[J]. 传感技术学报,2020,33(6):867-873.
- [14] 李敏. 基于新阈值函数的小波图像去噪算法研究[J]. 控制工程,2021,28(12):2360-2365.
- [15] 冯巨龙. 油井侧向力测试仪参数测量与处理改进技术研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2019.

## Simulation of reducing signal noise of engine cold test based on improved wavelet threshold function

XU Zhuo<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>, YANG Xiaofeng<sup>2</sup>, WU Fan<sup>1</sup>, YAN Wei<sup>1\*</sup>

1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250014, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

**Abstract:** In order to obtain a more accurate signal transmission in the process of engine cold test, this paper proposes a wavelet improved threshold function to reduce the noise of fault diagnosis signals in the process of engine cold test on the basis of analyzing and summarizing the literature of wavelet noise reduction, and uses MATLAB to simulate and compare the noise reduction, and selects the high-speed cylinder head vibration signal noise of diesel engine cold test for simulation verification. The results show that the noise reduction method based on wavelet improved threshold function performs quite well. In the MATLAB simulation test, the signal-to-noise ratio of the improved threshold function is 26.9413 and the root mean square error is 0.5258, and in the diesel engine noise reduction simulation test, the signal-to-noise ratio of the improved threshold function is 3.0868 and the root mean square error is 2.2881. This noise reduction method has a better effect on the cold test vibration signal of diesel engine.

**Keywords:** wavelet noise reduction; threshold function; cold test; fault diagnosis; engine

(责任编辑:刘丽君)

(上接第49页)

aftertreatment system under high-speed (60 km/h) and parking conditions are simulated, the thermal management of the aftertreatment system is carried out. The results show that due to the influence of vehicle speed, the heat transfer loss increases, and the temperature of the aftertreatment system can not meet the working requirements. After adding insulation layer, the solid wall temperature of the aftertreatment system is significantly increased, and the minimum temperature of the solid wall is increased by 58.83 °C in high-speed condition and 58.50 °C in parking condition. The insulation increases with the increasing insulation layer thickness, and the temperature rise difference decreases with the increasing insulation layer thickness.

**Keywords:** fluid-structure coupling; aftertreatment system; thermal management

(责任编辑:刘丽君)