

基于改进小波阈值函数的桥梁应变监测数据降噪研究

万正华¹,林志威¹,方世书²

(1.中南安全环境技术研究院股份有限公司,湖北武汉430051;2.三峡大学土木与建筑学院,湖北宜昌443002)

摘要:为了减少噪声对桥梁应变监测信号的影响,进一步提高应变监测数据的可靠性,提出一种改进的小波阈值函数,通过改进软硬阈值折衷函数,构造了基于麻雀搜索(SSA)算法的适应度函数,并利用麻雀搜索算法对阈值函数中的调整因子进行寻优,克服了硬阈值函数的不连续以及软阈值函数存在恒定偏差的缺陷,同时也避免了传统试错法获取调整因子的缺陷;然后利用数值仿真软件建立了仿真信号,利用降噪效果评价指标,与其他改进阈值函数的去噪效果进行了比较,验证了该方法的降噪效果。研究表明:所提的桥梁应变监测信号降噪方法降噪效果更好,能较好地保留桥梁应变信息和基本特征。通过对兰家湾高墩钢栈桥应变监测数据降噪实例,验证了改进降噪方法的有效性。

关键词:桥梁健康监测;应变数据;小波降噪;阈值函数;麻雀搜索算法

中图分类号:U448.22;U446

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)08-0262-06

0 引言

桥梁应变监测信号在采集和传输过程中不可避免地受到外部因素干扰,例如结构自身噪声、外部环境噪声、传感器或线路老化引起的噪声等。应变监测信号分为真实信号和噪声信号两部分,通常认为噪声信号为服从高斯分布的白噪声^[1]。为提升识别结果的时效性,如何从含有噪声的原始数据中提取能够反映结构安全状况的真实有效数据显得十分重要。

目前,信号降噪方法主要有神经网络、滤波和小波分解重构等。小波分析采用小波函数将原始信号分解为高频信号和低频信号。赵炎等^[2]认为小波阈值去噪能够区分高频信号与噪声信号,避免噪声和数据相互重叠。张凯南^[3]针对某运营隧道的加速度信号,采用小波包将其分解为高频、中频和低频信号,采用不同的小波阈值准则对其进行处理,重构获得了加速度响应数据。张瑞鹏等^[4]发现小波阈值去噪法与联合小波-卡尔曼滤波降噪法对数据的处理效果好于卡尔曼滤波。任普^[5]发现随着信噪比的提高,小波阈值去噪法分解层数的增加,数据中的高频信号将被彻底分解,分离后的数据最大程度包含了真实信号。移动平均滤波器的降噪效果也随着信噪比的提高而提高,但是对于噪声较为复杂的强噪声

数据,移动平均滤波器降噪效果并不理想。对比不同的小波基函数与小波阈值函数组合在处理桥梁振动、位移、角度信号数据时的降噪效果,杨志良等^[6]发现选用db小波基的软阈值降噪效果较好。吴叶丽等^[7]、曹玲玲等^[8]提出了含调节因子的新阈值函数,可以根据实际需求改变调整因子的数值。金炜等^[9]基于改进遗传算法对经过小波变换后的图像信号寻求最优的阈值,改善了降噪后图像的视觉效果。蒋淑霞等^[10]结合广义交叉验证小波阈值理论与模拟退火算法对轨道静态信号的小波分解高频系数进行阈值寻优量化处理,提高了信号的信噪比和功率谱密度图的可视性,降低了均方根误差。袁开明等^[11]为了获得较好的信号降噪效果,在小波阈值选取时采用了退火算法。宋立业等^[12]、牛宏侠等^[13]、杨旭等^[14]利用粒子群优化算法及其改进型对各自的小波阈值函数参数进行寻优处理,不伦图像信号还是数据信号均获得了较好的降噪效果。

综上所述,国内外学者针对信号降噪问题开展了广泛研究,取得了丰富的研究成果。但是桥梁健康监测中的信号处于复杂的噪声环境,如何合理有效地降噪,提升桥梁应变监测数据的实效性还需要深入研究。本文提出一种改进的小波阈值函数,首先利用降噪效果评价指标,改进软硬阈值折衷函数,构造基于麻雀搜索算法(SSA)的适应度函数,通过对阈值函数的调整因子进行寻优确定,然后利用数值仿真软件建

收稿日期:2023-07-31

作者简介:万正华(1977—),男,本科,高级工程师,从事路桥工程检测工作。

立仿真信号,验证该方法的降噪效果,并与其他改进的阈值函数的降噪效果比较。研究成果为桥梁健康监测应变数据分析提供理论依据。

1 基于麻雀搜索算法改进的小波基函数

1.1 小波阈值去噪原理

小波阈值降噪法是利用信号和噪声经过小波变换后,信号与噪声对应小波系数幅值的大小不同,在不同尺度上选取合适的阈值,滤除小于阈值的小波系数,经过小波逆变换重构信号,达到抑制噪声的效果^[15]。阈值函数分为硬阈值函数、软阈值函数以及基于改进阈值函数等,这些方法采用了不同的处理策略和阈值估计方法。

硬阈值函数设定小波分解系数的绝对值 $\omega(j, k)$ 小于设定阈值 λ 的部分是噪声信号,将这一部分小波分解系数全部归为零值,大于设定阈值的小波分解系数全部保留。

$$\omega_h(j, k) = \begin{cases} \omega_h(j, k), & |\omega_h(j, k)| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_h(j, k)| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

软阈值函数设定小波分解系数的绝对值 $\omega(j, k)$ 小于设定阈值 λ 的部分是噪声信号,将这一部分小波分解系数全部归为零值,其他部分小波分解系数加以抑制。

$$\omega_h(j, k) = \begin{cases} \text{sign}[\omega_h(j, k)][(|\omega_h(j, k)| - \lambda), & |\omega_h(j, k)| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_h(j, k)| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)可以看出,传统硬阈值函数将信号分为小于阈值和大于阈值两部分,采用直接保留和直接归零的方法,会导致在阈值 λ 处的不连续。式(2)虽保证了在阈值处的连续性,但由于对大于阈值部分进行了压缩,会导致降噪后的信号会与实际信号间存在不可避免的误差^[16]。

1.2 改进阈值函数

硬阈值函数和软阈值函数从不同维度进行降噪处理,两类方法均采用了线性组合的加权平均阈值函数。软、硬阈值函数通过引入调整因子,可获得改进的阈值函数。软硬阈值折衷阈值函数如下:

$$\omega_h(j, k) = \begin{cases} \text{sign}[\omega_h(j, k)][(|\omega_h(j, k)| - a\lambda), & |\omega_h(j, k)| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_h(j, k)| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中: a 为调整因子,取值范围均为 $[0, 1]$ 。当 $a=0$ 时,式(3)为硬阈值函数;当 $a=1$ 时为软阈值函数。阈值函数可以根据信号进行相应调整,提高对信号的去

噪效果。但上述阈值函数直接将低频信号滤除,其中含有的真实信号也可能被滤除,一定程度上造成了信号损失。

因此,本文结合文献[17-19]的思路,对软硬阈值折衷函数进行改进,改进的表达式如下:

$$\omega_h(j, k) = \begin{cases} \text{sign}[\omega_h(j, k)][(|\omega_h(j, k)| + (a-1) \cdot b\lambda), & |\omega_h(j, k)| \geq \lambda \\ (1-a)b \cdot \omega_h(j, k) \div 10, & |\omega_h(j, k)| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

式中的阈值函数利用两个调整因子 a, b 进行调整,对于情况多变、工况较多的实际工程更加适用。式中调整因子 a, b 取值范围均为 $[0, 1]$,当 $a=1$ 或 $b=0$ 时,该阈值函数即为硬阈值函数,当 $a=0$ 或 $b=1$ 时,该阈值函数即为软阈值函数。

调整因子 a 可对全部的小波分解系数进行折减,小波分解系数大于阈值的部分和小于阈值的部分, a 的调整作用相反,即当 a 对大于阈值部分折减度缩小时,对小于阈值部分折减度增大。调整因子 b 对小于阈值的小波分解系数进行折减。同时,可以通过调节 b 使阈值函数更具连续性。

信噪比(SNR)和均方根误差(RMSE)可以反映信号降噪的效果,依次定义如下:

$$\text{SNR} = 10 \times \log \frac{\sum_i^n f_i^2}{\sum_i^n |f_i^2 - f_n|^2} \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_i^n |f_i^2 - f_n|^2} \quad (6)$$

式中: f_i 为不含噪声的原始干净信号, f_n 为采用小波降噪后的信号。当采集信号的信噪比SNR值越大,均方根误差RMSE值越小,表明降噪信号与原始信号吻合,也说明降噪效果越好。值得注意的是,在桥梁实际监测中,不含噪声的原始干净信号一般来说都是未知的,因此,通常用噪声信号 y_n 替代 f_n 、降噪后得到的信号用 y_n' 替代 f_i 进行计算^[20-21]。

1.3 基于麻雀搜索算法优化

调整因子的取值直接影响到降噪效果,不理想的调整因子会导致降噪不充分或有用信号被滤除,依赖经验通过试错法获取调整因子的方式具有很大的局限性,难以获取最优数值,且费时费力。

因此,本文采用麻雀搜索算法(SSA),对公式(4)提出的阈值函数中的调整因子 a, b 进行寻优,得到在 a, b 取值范围内使降噪效果最优的阈值函数,并

对信号进行降噪处理。

麻雀搜索算法是Xue等^[22]受麻雀觅食与反捕食行为启发在2020年提出的一种元启发群体智能优化算法,相较于其他算法,麻雀搜索算法具有更高的求解效率。麻雀搜索算法数学模型如下^[23-24]:

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & \cdots & x_{1,d} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & \cdots & x_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & x_{n,3} & \cdots & x_{n,d} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: d 为优化问题的维度,即待优化的自变量个数; n 为麻雀的数量。则麻雀的适应度值可用如下公式表示:

$$X = \begin{bmatrix} f(x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, \cdots, x_{1,d}) \\ f(x_{2,1}, x_{2,2}, x_{2,3}, \cdots, x_{2,d}) \\ \vdots \\ f(x_{n,1}, x_{n,2}, x_{n,3}, \cdots, x_{n,d}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

发现者的位置在每次迭代过程中的更新方式可用如下公式表示:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \times \exp\left(\frac{-i}{\alpha \times iter'_{\max}}\right), R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + Q \times L, R_2 \geq ST \end{cases} \quad (9)$$

式中: $X_{i,j}^t$ 表示在 t 次迭代中第 i 只麻雀的在 j 维中的位置; $iter'_{\max}$ 是一个常数,表示最大迭代次数; α 为 $(0,1]$ 内的一个随机数; R_2 ($R_2 \in [0,1]$)、 ST ($ST \in [0.5,1]$)分别是预警值和安全值; Q 是一个服从正态分布的随机数; L 是一个元素均为1的 $1 \times d$ 矩阵。当 $R_2 < ST$ 时,表示该区域没有天敌,发现者可以在该区域内进行广泛的搜索。若 $R_2 \geq ST$,表示一些麻雀个体已经发现了天敌的存在,并向整个种群发出了警报,此时所有麻雀随即飞往其他区域觅食。

在觅食过程中,一些加入者麻雀个体随时监视着发现者,当他们察觉到发现者找到更好的食物后,它们会立即离开现在所处位置去争夺食物。如果他们在竞争中获胜,则立刻获得该发现者的食物,否则需要继续搜寻。加入者位置更新方式如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \times \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t + X_{i,j}^t}{i^2}\right), i < \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \times A^+ \times L, i \geq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: X_p 表示当前发现者所占据的最好位置, X_{worst} 则表示当前全局最差位置; A 是一个元素随机赋值为-1或1的 $1 \times d$ 矩阵, A^+ 的定义为: $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。当 $i > n/2$ 时表示第 i 个加入者的适应度较低,需要

飞往其他区域觅食。

假设种群内10%~20%的麻雀个体为警戒者,警戒者的初始位置在种群中随机产生,位置更新如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta \times |X_{i,j}^t - X_{\text{best}}^t|, f_i > f_g \\ X_p^{t+1} + K \times \frac{|X_{i,j}^t - X_{\text{worst}}^t|}{f_i - f_w + \varepsilon}, f_i = f_g \end{cases} \quad (11)$$

式中: X_{best} 表示当前全局的最优位置; β 是一个服从均值为0,方差为1的正态分布随机数,是步长控制参数; $K \in [0,1]$ 内的一个随机数; f_i 是当前麻雀个体的适应度值, f_g 、 f_w 分别是当前的最优、最差适应度值; ε 是为了避免分母为0的一个最小常数。

总而言之, $f_i > f_g$ 表示麻雀正处于种群的边缘,很容易受到攻击;当 $f_i = f_g$ 时,表示处于种群中间的麻雀个体意识到了危险,需要与其他麻雀互相靠近以降低被天敌捕食的风险。 K 是麻雀移动的方向与步长控制参数。信噪比是衡量降噪效果的重要指标,降噪方法的信噪比越大,代表其降噪效果更加理想,因此,本文采用信噪比的倒数作为麻雀搜索算法中的适应度函数。即

$$f_{\text{fitness}} = \begin{cases} \frac{1}{\text{SNR}}, \text{SNR} \geq \text{SNR}_1 \\ 2, \text{SNR} < \text{SNR}_1 \end{cases} \quad (12)$$

式中:可将用其他的阈值函数降噪得到的信噪比 SNR_1 与公式(5)所示阈值函数得到的信噪比 SNR 作比较,若 $\text{SNR} \geq \text{SNR}_1$ 时,输出适应度 f_{fitness} 的值;否则输出数值2,即代表用公式(5)所示阈值函数的降噪效果不如其他函数阈值的降噪效果理想。

利用麻雀搜索算法对小波阈值函数调整因子进行自适应寻优,克服以往依赖经验,通过试错法获取调整因子,提升小波阈值函数整体的降噪效果。具体步骤如下:(1)将信号进行小波分解,得到不同尺度下的小波分解系数 $\omega_h(j,k)$ 。(2)定义最大迭代次数 G ,麻雀种群中发现者所占比例 PD ,麻雀种群中警戒者的所占比例 SD ,警戒值 R_2 ,麻雀种群中麻雀的数量 N 等相关参数。建立适应度函数 $f(x)$,初始化 X 。(3)对初始 X 下的所有适应度进行排序,找到当前局部适应度最优、最差位置,并定义为全局最优、最差位置。(4)由公式(9)、(10)、(11)分别更新发现者、加入者、警戒者麻雀个体的位置。找到当前最新局部适应度最优。(5)相比于全局最优位置,若步骤4找到的局部适应度最优位置更佳,则更新全局最优位置。(6)确定全局最优位置 X_{best} 、全局最优适应度 f_g ,取得全局最优位置下调整因子 a 、 b 的取值,并输出

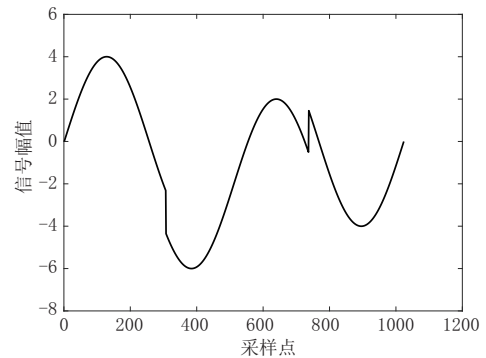
经由该最优小波阈值函数下小波阈值降噪法降噪后的信号。

2 改进的小波阈值降噪法验证

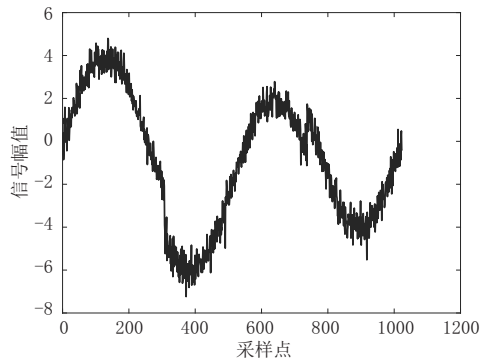
为了验证麻雀搜索算法优化小波阈值降噪的降噪性能,本文首先构建仿真信号,然后运用本文所提的小波阈值函数对仿真信号进行降噪处理,进一步对比分析传统软硬阈值函数及其他阈值函数的降噪效果。

本文中使用的干净信号采用 Matlab 中的“heavy sine”进行仿真模拟,并根据桥梁工程中实际信号的特点,添加信噪比为 40dB 高斯白噪声,模拟桥梁健康监测系统的实际监测信号,如图 1 所示。由图 1 可知,采用数值方法构建的噪声仿真信号,符合工程实际信号的特点。

基于麻雀搜索算法,设定麻雀搜索算法的种群规模 $pop=50$,最大迭代次数 $G=300$,调整因子搜索区间为 $[0, 1]$,麻雀种群中发现者所占的比例 $PD=0.2$,麻雀种群中警戒者所占的比例 $SD=0.2$,安全阈值 $ST=0.8$ 。将降噪效果与传统软、硬阈值函数以及将麻雀搜索算法与文献[17-19]的降噪效果进行对比分析,如图 2 所示。由模拟的干净信号计算图 2 中的信噪



(a)干净信号



(b)加噪后信号

图 1 仿真信号

比 SNR 与均方根误差 RMSE。

由图 2 可知,相比于其他文献的方法,本文降噪方法效果更好,能较好地保留应变信息和基本特征。

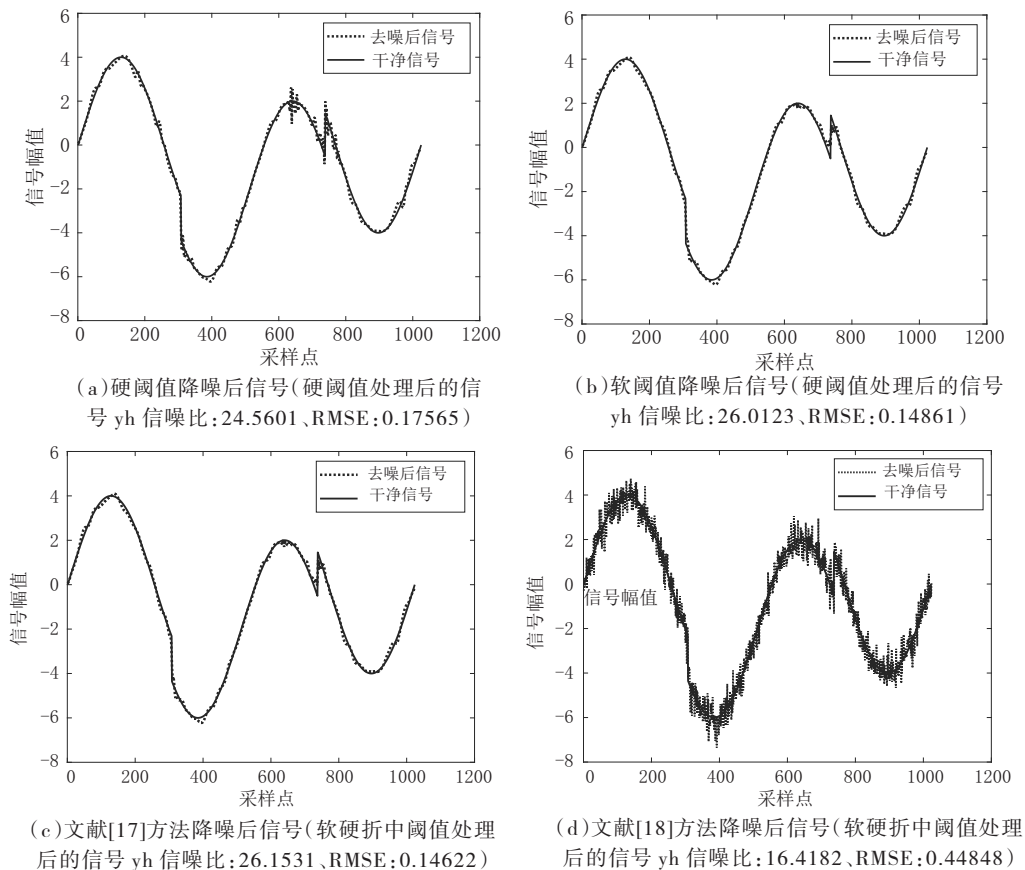
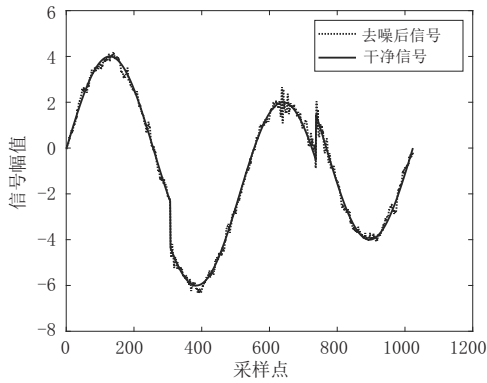
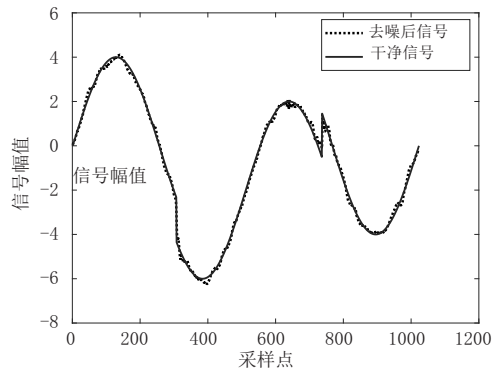


图 2 仿真信号降噪结果对比



(e)文献[19]方法降噪后信号(软硬折中阈值处理后的信号 yh 信噪比:23.9654、RMSE:0.19028)



(f)本文方法降噪后信号(软硬折中阈值处理后的信号 yh 信噪比:26.1907、RMSE:0.14559)

图2 仿真信号降噪结果对比

在原始信号未知的情况下,可利用降噪后的信号作为原始信号进行相关计算,不同降噪方法对比结果见表1。

表1 不同降噪方法对仿真信号的降噪效果比较

降噪方法	信噪比 SNR	均方根误差 RMSE
染噪信号	16.512 9	0.443 62
硬阈值降噪	26.460 9	0.141 13
软阈值降噪	26.631 0	0.138 39
文献[17]方法	26.759 6	0.136 36
文献[18]方法	14.442 9	0.447 21
文献[19]方法	25.101 9	0.165 03
本文方法	27.111 7	0.130 94

由表1可以看出,相比于其他方法,本文所提出的降噪方法信噪比 SNR 更大,均方根误差 RMSE 更小,说明本文所提的降噪方法降噪效果较好。

3 工程应用

兰家湾高墩钢栈桥位于四川省汉源县,栈桥全长 1 42 m,桥宽 25.5 m,其中 1 000 多 m 位于汉源湖深水区范围内。兰家湾高墩钢栈桥健康监测系统的监测项目主要由三部分:应变监测、几何变形监测以及振动特性监测。应变监测采用振弦式表面应变传感器。

取应变原始数据序列的 345 个数据点,应用改进的小波阈值函数进行降噪处理,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,采用改进的小波阈值函数,对兰家湾高墩钢栈桥应变监测数据进行降噪处理,效果良好,进一步验证了本文方法的合理性。

4 结语

本文提出了一种新的小波阈值函数,利用数值

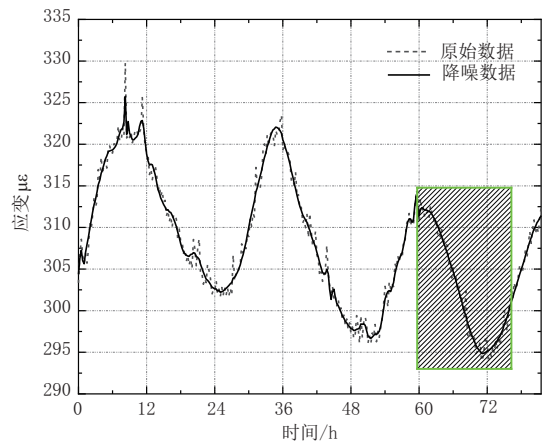


图3 兰家湾高墩钢栈桥应变监测数据降噪

仿真软件建立了仿真信号,验证了该方法的降噪效果,并与其他改进阈值函数的去噪效果进行了比较。结论如下。

(1)考虑到硬阈值函数、软阈值函数、软硬阈值折衷函数等传统阈值函数的不足,对软硬阈值折衷函数进行改进,构造了适用性更广,降噪效果更好的阈值函数。

(2)针对新阈值函数中调整因子的取值问题,利用降噪效果的评价指标构造了麻雀搜索算法的适应度函数。采用麻雀搜索算法对调整因子进行寻优,改变了以往依赖经验通过试错法获取调整因子的方式,调整因子的取值更具灵活性、更加贴合数据,降噪效果也得到进一步提升。

(3)本文降噪方法对桥梁应变监测信号降噪效果更好,能较好的保留应变信息和基本特征,验证了改进降噪方法的有效性,应用于兰家湾高墩钢栈桥应变监测数据降噪,取得了良好的效果。

参考文献:

[1] Han Chunguang, Luo Xu, Li Xinping, et al. Study on Modern Bridge Structure Health Monitoring System Based on Damage Identification [J]. Tehni?ki Vjesnik, 2021, 28(1): 151-157.

[2] 赵炎,胡殿印,石炜,等.基于光纤光栅变形光谱的疲劳裂纹扩展监测方法[J].推进技术,2022,43(2):383-391.

[3] 张凯南.运营隧道结构健康监测预警与安全评价研究[D].武汉:华中科技大学,2019.

[4] 张瑞鹏,李仲勤,吴梦瑶.基于小波变换的组合模型在桥梁变形分析中的应用[J].测绘地理信息,2022,47(3):52-55.

[5] 任普.基于大数据的桥梁监测数据清洗方法研究[D].南京:东南大学,2019.

[6] 杨志良,孙兴丽,姚金杰,等.基于小波阈值的桥梁形变参数降噪方法[J].国外电子测量技术,2021,40(3):68-71.

[7] 曹玲玲,李晶,彭镇,等.基于改进小波阈值降噪的滚动轴承故障诊断方法[J].振动工程学报,2022,35(2):454-463.

[8] 吴叶丽,行鸿彦,李瑾,等.改进阈值函数的小波降噪算法[J].电子测量与仪器学报,2022,36(4):9-16.

[9] 金炜,潘英俊,魏彪.基于改进遗传算法的图像小波阈值降噪研究[J].计算机工程与应用,2005(22):66-69.

[10] 蒋淑霞,张红.模拟退火算法小波阈值在轨道谱分析中的应用[J].中南林业科技大学学报,2010,30(12):177-183.

[11] 袁开明,舒乃秋,孙云莲,等.基于阈值寻优法的小波降噪分析[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(1):74-80.

[12] 宋立业,周乐,刘昕明.基于邻域相关性多阈值新函数寻优法的小波降噪分析[J].信息与控制,2019,48(1):57-64.

[13] 牛宏侠,张肇鑫,宁正,等.基于小波变换的阈值自适应寻优降噪方法[J].传感器与微系统,2020,39(2):33-36.

[14] 杨旭,邱明,陈立海,等.基于 PSO-RWE 的自适应小波阈值函数滚动轴承振动信号降噪方法 [J]. 航空动力学报,2020,35(11):2339-2347.

[15] Donoho, D. L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 41(3):613-627.

[16] Tomic M, Sersic D. Point-Wise Adaptive Wavelet Transform for Signal Denoising [J]. Informatica, 2013, 24(4):637-656.

[17] 张金武,冯毅,李文.基于一种改进阈值函数的小波降噪方法研究 [J]. 电子设计工程,2017,25(9):137-140,144.

[18] 徐长宝,古庭赟,高云鹏,等.基于改进小波阈值函数和变分模态分解的电能质量扰动检测[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(6):77-86.

[19] 李树勋,王志辉,康云星,等.基于改进小波阈值函数的安全阀排放声信号降噪[J].振动与冲击,2021,40(12):143-150.

[20] 苏丽.远程心电图监护诊断系统心电信号处理方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.

[21] 杨旭,邱明,陈立海,等.基于 PSO-RWE 的自适应小波阈值函数滚动轴承振动信号降噪方法[J].航空动力学报,2020,35(11):2339-2347.

[22] Xue J, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering An Open Access Journal, 2020, 8(1):22-34.

[23] 庄梦祥.基于 LSTM 的空调负荷预测以及空调能耗的优化控制[D].江苏:苏州科技大学,2021.

[24] 温泽宇.麻雀搜索算法的研究及其在锅炉燃烧建模优化中的应用 [D].山西:太原理工大学,2021.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com