

基于 CEEMDAN-改进小波阈值的大坝变形 数据处理方法

石佳晨¹, 岳春芳¹, 朱明远^{2,3}, 皮李浪¹

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对现有方法对大坝变形监测数据去噪精度低、易将部分高频有用信息误判为噪声的问题,提出了一种自适应噪声完备集合经验模态分解(CEEMDAN)和改进小波阈值联合去噪的方法。该方法利用 CEEMDAN 对原始数据进行分解,通过 t 检验对分解获得的多个本征模态函数(IMF)分量进行特征分析,筛选出含噪分量并利用 Pearson 相关系数和方差贡献率进行校验,最后采用改进的小波阈值对筛选出的含噪分量进行精细化去噪,并重构去噪后的模态函数分量,得到去噪后的数据。仿真试验和工程实例验证结果表明,该方法在多种不同指标上均优于对比的3种方法,同时能够更有效地保留数据的高频有用信息,提高准确度和平滑性,可用于大坝中的非线性变形数据去噪处理。

关键词: 大坝安全监测; CEEMDAN 分解; t 检验; 改进小波阈值; 去噪; 精度分析; 乌鲁瓦提水库

中图分类号: TV698.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)05-0080-07

Dam deformation data processing method based on CEEMDAN and improved wavelet threshold//SHI Jiachen¹, YUE Chunfang¹, ZHU Mingyuan^{2,3}, PI Lilang¹ (1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China; 3. College of Water Conservancy and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To address the issues of low denoising accuracy and the misclassification of useful high-frequency information as noise in existing methods for dam deformation monitoring data, a denoising method combining the adaptive noise complete ensemble empirical mode decomposition (CEEMDAN) and improved wavelet threshold was proposed. This method decomposes the original data using CEEMDAN and performs feature analysis on the intrinsic mode function (IMF) components obtained from the decomposition through t -tests, screening out noisy components. These components were verified using the Pearson correlation coefficient and variance contribution rate. Finally, the identified noise-containing components are finely denoised using an improved wavelet thresholding method, and the denoised IMF components are reconstructed to obtain the denoised data. Simulation tests and engineering case verification results show that this method outperforms three comparative methods across various indicators, while effectively preserving useful high-frequency information, improving accuracy and smoothness, and can be used for denoising nonlinear deformation data in dams.

Key words: dam safety monitoring; CEEMDAN decomposition; t -test; improved wavelet threshold; denoising; precision analysis; Wuluwati Reservoir

变形是反映大坝是否安全运行最直观的指标之一^[1]。变形监测数据的准确性和可靠性对于诊断大坝健康服役性态至关重要^[2-3]。然而,受仪器、环境等因素的影响,监测数据往往存在较大的噪声干扰和非平滑现象,严重影响了定量分析和安全评估的精度和可靠性。因此,如何对大坝变形数据进行

有效去噪,已成为当前大坝监测与安全评估中亟待解决的问题^[4-5]。

目前,已有多种去噪方法应用于大坝非线性监测序列中,包括傅里叶变换^[6]、卡尔曼滤波^[7]、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)及其衍生族^[8-10]和小波分析^[11-12]等。其中,傅里叶变换

基金项目:新疆维吾尔自治区水利科技专项资金资助项目(XSKJ-2023-23)

作者简介:石佳晨(1998—),男,硕士研究生,主要从事大坝安全监测研究。E-mail:jiachen1232023@163.com

通信作者:岳春芳(1972—),女,教授,博士,主要从事水利水电工程安全管理研究。E-mail:mycf12@sina.com

凭借频域分析和噪声抑制能力被广泛应用于信号处理领域,但对于非平稳信号、非线性信号以及噪声与信号重叠的情况,该方法的准确性和适用性则有所下降。卡尔曼滤波具有估计性能好、实时性强、计算复杂度低等优点,石强等^[13]基于传统卡尔曼滤波构建了时空卡尔曼对于变形去噪的新方法,较好地实现了随机噪声的分离。然而,初始状态估计不准确、对非高斯噪声和离群值的处理能力有限等缺点,限制了其准确性和鲁棒性。因此,在实际应用中,需要综合考虑傅里叶变换和卡尔曼滤波的优点与局限性,选择合适方法来处理数据和抑制噪声。近年来,EMD方法在数据去噪方面的应用取得了显著进展,并取得了良好的效果。许承权等^[14]以EMD为基础,建立了变形数据的最小失真准则与独立分量分析相结合的去噪方法,去噪效果得到了显著提升。由于EMD方法采用递归式筛选分量和基于三次样条插值建立包络线的方法,导致断点效应和模态混叠现象的产生,进而造成信号失真^[15]。为解决这些问题,自适应噪声完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise,CEEMDAN)对EMD进行了改进,但单独使用CEEMDAN也存在不足之处^[16],如在处理包含突变和低信噪比等情况下的信号时,CEEMDAN的结果可能并不理想。这是因为CEEMDAN对于突变的处理能力较弱,可能导致分解结果受到干扰而失真,因此需要结合其他信号处理方法,以提高其适用性和准确性。

小波分析因具有良好的多分辨分析能力和时域频域上局部化特性,长期以来一直是研究热点。张瑞鹏等^[17]、文俊等^[18]采用小波分析-卡尔曼滤波分别对桥梁和大坝变形进行了去噪处理,提高了模型的精度和泛化性。然而,在非平稳环境下,特别是当出现非平稳的高频信号和低信噪比信号时,由于阈值较大,传统的小波去噪方法往往将信号的小波系数误判为噪声并剔除^[19],EMD-小波阈值去噪^[20]、集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition,EEMD)-小波阈值去噪^[21]等数据处理方法虽然可以克服模态混叠问题,但会引起噪声传递问题,对去噪效果产生一定影响。为了解决以上问题,本文提出了一种新的去噪方法,将CEEMDAN与改进的小波阈值法相结合(CEEMDAN-改进小波阈值法)来实现大坝非线性变形数据的去噪处理。

1 去噪方法

1.1 CEEMDAN

CEEMDAN是对EMD的改进。它借鉴了

EEMD的思想,引入了高斯白噪声,通过多次迭代叠加与平均的方式来抑制噪声,具体的分解步骤可参见文献[22]。

通过在改进过程中引入白噪声,CEEMDAN在较少的平均次数下能够实现更小的重构误差,相较于EEMD方法具备更好的完备性,所以CEEMDAN在平均次数和计算速度方面都表现出更佳的特性^[23-24]。另外,EEMD可能会产生多个幅值较小的低频本征模态函数(intrinsic mode function,IMF)分量,而CEEMDAN可以解决这一问题。

1.2 模态函数分量特征分析

为了确定每个IMF是由信号主导还是由噪声主导,并确保重构信号的准确性,使用 t 检验进行特征分析。根据CEEMDAN原理,每个IMF在时间轴上满足上下包络线的局部对称性。高频IMF通常具有多个信号峰值点并连接形成上下包络线,表明IMF在时间轴上呈现出对称的特性,均值趋近于零。相比之下,低频IMF具有较长的周期,其上下包络线通过插值得到,与原信号的趋势关联度较低,因此信号分量呈现非对称特性,难以保证均值为零^[25]。基于上述特性,对分解得到的 k 个IMF(即IMF1、IMF2、 $\dots$ 、IMF k)进行高低频区分。指标1代表IMF1,指标2代表IMF1和IMF2之和,指标 i 代表前 i 个IMF分量的总和。通过对指标1到指标 i 的均值进行 t 检验,判断它们是否与零存在显著差异。若IMF i 在某一指标显著不为0,则IMF1、IMF2、 $\dots$ 、IMF $i-1$ 为高频(含噪)分量,剩余为低频(纯净)分量。这种基于均值和 t 检验的分类方法能够更好地理解变形数据的频率特性,并为进一步的分析和处理提供基础。

1.3 改进小波阈值函数

为克服软阈值函数的恒定偏差问题和硬阈值函数的不连续性,Choi^[26]提出了非负死区阈值函数去噪算法。其可以看作是软硬阈值的一种折中方法,然而非负死区阈值函数对变换模值按指数规律减小的特点没有充分考虑,在 $|W_{jk}| < \lambda$ 区间内,其与软硬阈值方法一样会将小波系数置零,从而导致部分信息的损失和信号失真问题的出现^[27]。考虑到上述因素,本文引入了一种改进的自适应阈值函数,它基于非负死区阈值函数和指数函数的设计。随着尺度 j 的增大,该阈值函数能够逐渐减小阈值 λ ,充分考虑带噪信号的噪声与信号特性,并与噪声在小波变换各个尺度上的传播特性保持一致,从而更准确地估计阈值 λ ^[28]。其阈值函数的定义为

$$\hat{W}_{jk} = \begin{cases} \operatorname{sgn}(W_{jk}) |W_{jk}| - \frac{\lambda^2}{2|W_{jk}|} e^{2(\lambda - |W_{jk}|)} & |W_{jk}| \geq \lambda \\ \operatorname{sgn}(W_{jk}) \frac{\lambda(e^{8|W_{jk}|} - e^{8\rho})}{2(e^{8\lambda} - e^{8\rho})} & |W_{jk}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\lambda = \sigma \frac{\sqrt{2\ln N}}{2^{j-1}\ln(j+1)} g(\gamma)$

$g(\gamma) = \sqrt{2/\ln(0.05\gamma)}$ $\gamma = 10\lg(\mu_g/\mu_a)$

式中: W_{jk} 为小波系数; $\hat{W}_{jk}$ 为去噪后的小波系数; λ 为阈值; $\rho \in (0, \lambda)$; σ 为小波系数 $\hat{W}_{jk}$ 的方差; N 为信号序列长度; j 为分解尺度; $g(\gamma)$ 为谱平坦度函数; γ 为谱平坦度; μ_g 为含噪声信号的小波功率谱密度的几何平均值; μ_a 为含噪声信号小波功率谱密度算术平均值。

1.4 去噪步骤

CEEMDAN-改进小波阈值法去噪的具体步骤为:①使用 CEEMDAN 对大坝变形数据进行分解,得到若干 IMF 分量;②通过 t 检验辨识出含有噪声的高频分量,并通过计算每个模态分量的 Pearson 相关系数和方差贡献率进行校核;③利用改进的小波阈值分析法对含噪的模态分量进行去噪;④通过对去噪后的模态分量和不含噪分量进行重构,得到纯净数据。

2 仿真信号分析

为了验证本文提出的 CEEMDAN-改进小波阈值去噪方法的可行性和通用性,使用该方法对仿真信号进行去噪分析。常见的仿真信号,如 blocks 和 doppler 等,虽然具有渐变性和突变性,但其由单一成分组成,不包含诸如大坝的固有频率等各种变形特征,无法准确地模拟实际大坝的变形情况。通常情况下,大坝环境振动的固有频率较低,为 0.1 ~ 5 Hz。基于此,本文在仿真信号中加入信噪比为 10 dB 的人工噪声,以便更好地模拟实际环境中的干扰。其加噪前后的仿真信号波形图如图 1 所示,数学表达式为

$$y(t) = y_1(t) - y_2(t) - y_3(t) + \alpha(t) \quad (2)$$

其中 $y_1(t) = 4\sin(4\pi t)$ $y_2(t) = \operatorname{sgn}(t - 0.3)$

$$y_3(t) = \operatorname{sgn}(0.72 - t)$$

式中: t 为采样点数, $t=200$; $\alpha(t)$ 为人工噪声信号。

由于仿真信号中纯净信号已知,因此采用信噪比、均方误差(mean squared error, MSE)和波形相似系数(normalized correlation coefficient, NCC)来评价去噪效果^[29]。并分别采用小波阈值法、CEEMDAN 法、CEEMDAN-小波阈值法和 CEEMDAN-改进小波

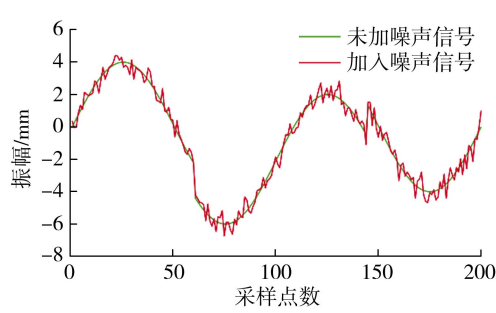


图 1 仿真信号

阈值法对仿真信号 $y(t)$ 进行去噪处理,去噪结果如图 2 所示,可以看出,CEEMDAN-改进小波阈值法去噪后的信号既保留了仿真信号的特征,又几乎完全消除了之前添加的随机噪声,达到了很好的去噪效果。与其他 3 种方法相比,该方法最全面地保留了原始信号的特征,表现最佳。

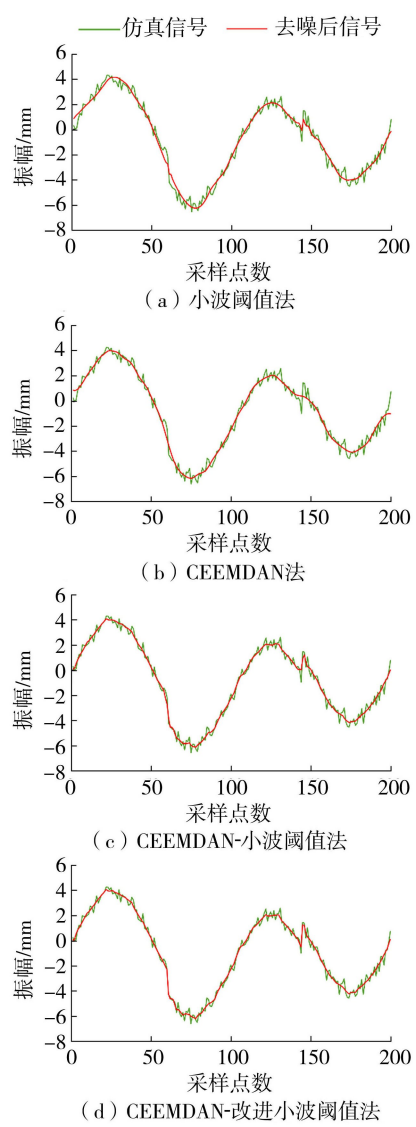


图 2 不同方法对仿真信号去噪后的波形图对比

去噪后信号与原始纯净信号之间的信噪比、MSE 和 NCC 指标计算结果见表 1。可以看出,CEEMDAN-改进小波阈值法去噪后的各项指标均为

最佳值,相较于另外 3 种方法,信噪比分别提高了 13. 88、8. 49、3. 20 dB;MSE 分别降低了 0. 061 3、0. 015 8、0. 003 6;NCC 则显示去噪后的信号接近纯净信号。此外尽管 CEEMDAN-小波阈值法在仿真信号去噪精度方面相较于单一方法有明显改善,但仍有较大提升空间。传统的小波阈值法和 CEEMDAN 法不仅去噪效果差,还会导致原始信号中有用成分的损失。显然,仅使用一种方法对此类信号进行去噪的效果不佳。因此,从理论上证明了该方法的可靠性和有效性。

表 1 仿真信号不同方法去噪效果对比

方法	信噪比/dB	MSE	NCC
小波阈值法	21. 72	0. 063 9	0. 996 6
CEEMDAN 法	27. 11	0. 018 4	0. 999 0
CEEMDAN-小波阈值法	32. 40	0. 005 5	0. 999 7
CEEMDAN-改进小波阈值法	35. 60	0. 002 6	0. 999 9

3 实例验证

3.1 工程概况

乌鲁瓦提水库位于新疆维吾尔自治区和田县境内,是一座具有灌溉、发电、生态保护、防洪等多种综合效益的大(2)型水利枢纽工程。水库坝址控制流域面积为 199 万 hm²,总库容为 3. 47 亿 m³,由多个重要建筑物组成,包括拦河坝、溢洪道、泄洪排沙洞、冲沙洞、发电引水洞、水电站厂房等。通过水库的调节,该工程新增灌溉面积 4. 6 万 hm²,改善灌溉面积 7. 53 万 hm²,多年平均发电量为 1. 97 亿 kW,为和田地区摆脱贫困面貌发挥了巨大作用^[30]。

3.2 变形数据采集

变形数据采用国电南瑞科技股份有限公司的 DAMS-IV 型智能分布式采集系统采集。由于堆石坝体是受水压作用的支撑体,大坝最大断面通常会出现最大变形值。因此,本文以河床最大断面 0+190. 00 m(图 3)的水平位移监测点 H2-2 共 645 期监测数据(图 4)为样本甄选出精度较高的去噪模型。

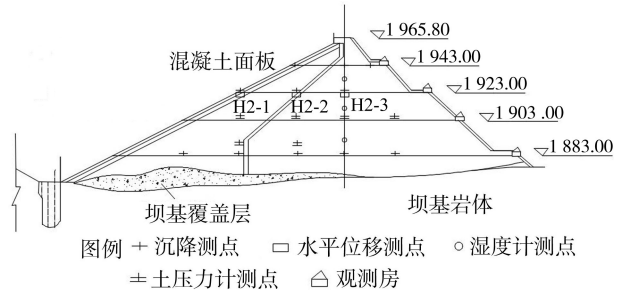


图 3 0+190. 00 m 断面监测仪器布置(单位:m)

3.3 CEEMDAN-改进小波阈值去噪处理

经过 CEEMDAN 算法分解后,原始的监测数据

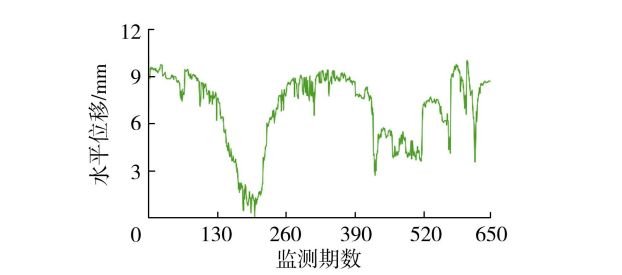


图 4 H2-2 测点水平位移监测数据

被分解成了 9 个 IMF 分量和 1 个残差趋势项,如图 5 所示。本文根据相关研究成果^[14,31-33],引入基准模型法得到的 CEEMDAN 分解参数,其中正负高斯白噪声的标准偏差为 0. 3,噪声的加入次数为 100,以及最大 10 000 次筛选迭代。经过 *t* 检验分析,分解后的各模态分量可以确定 IMF1 至 IMF7 为高频分量,IMF8 和 IMF9 为低频分量。

计算所有 IMF 分量的 Pearson 相关系数和方差贡献率,结果见表 2。可以看出,各个 IMF 分量与原始数据之间的相关系数和方差贡献率均存在很大差异。其中,IMF8 和 IMF9 的 Pearson 相关系数均大于 0. 75,方差贡献率均大于 0. 60,可以视为数据的主导分量;而 IMF1 至 IMF7 的 Pearson 相关系数均小于 0. 40,方差贡献率均小于 0. 10,推断 IMF1 至 IMF7 中含有较多的噪声。方差贡献率和 Pearson 相关系数筛选得出的结果与 *t* 检验分析的结论一致,可确定 IMF1 至 MF7 中存在噪声。

表 2 IMF 分量的 Pearson 相关系数和方差贡献率

评价指标	相关系数	方差贡献率	评价指标	相关系数	方差贡献率
IMF1	0. 11	0. 011	IMF6	0. 27	0. 040
IMF2	0. 10	0. 001	IMF7	0. 38	0. 076
IMF3	0. 12	0. 006	IMF8	0. 89	0. 682
IMF4	0. 16	0. 010	IMF9	0. 77	0. 640
IMF5	0. 22	0. 021			

通过对 IMF1 至 IMF7 进行重构,得到了新的分量 IMF(1-7),并以 IMF(1-7)为新的信号进行分析。考虑支撑长度、消失矩、正则性等因素,最终选择 db4 作为小波基函数,并进行三层分解,阈值函数选择改进的小波阈值函数。图 6 为去噪处理前后的 IMF(1-7),由此可见,噪声信号已被有效消除。

3.4 去噪效果评估

在仿真试验中,通常使用信噪比、波形相似系数等指标来衡量数据去噪的效果,并要求得到纯净数据但实际工程中很难获得纯净数据。因此,引入均方根误差(root mean square error, RMSE)和平方和误差(sum of squared errors, SSE)来评估去噪效果,这两个指标的值越小,表示去噪效果越好^[32]。

为了评估本文提出的去噪方法对实际数据的效

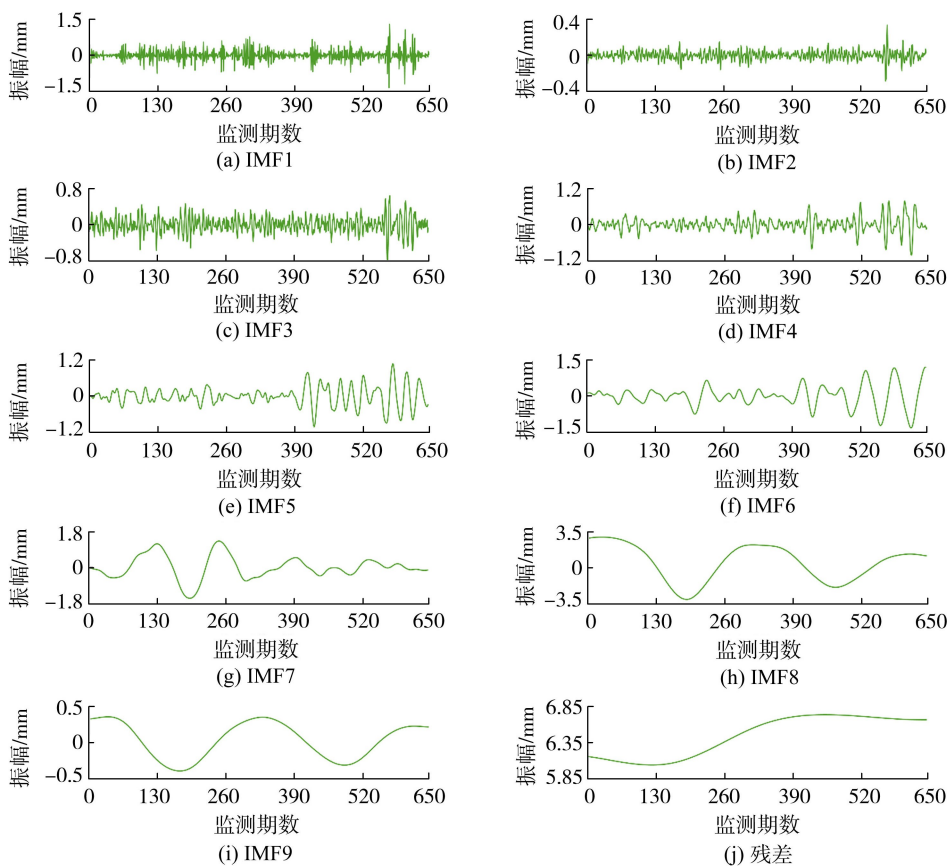


图5 监测数据 CEEMDAN 分解结果

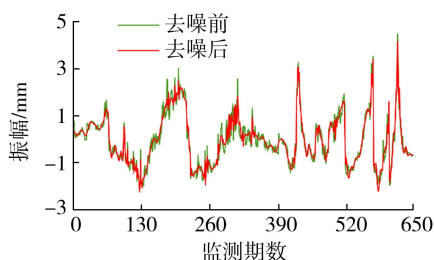


图6 改进小波阈值去噪处理前后的 IMF (1-7)

果,仍采用上文3种方法进行对比分析,得到小波阈值法、CEEMDAN法、CEEMDAN-小波阈值法和CEEMDAN-改进小波阈值法的RMSE分别为0.62、0.52、0.48、0.24;SSE分别为23.98、17.56、14.91、3.71。可以看出,相较于前三种方法,CEEMDAN-改进小波阈值法的RMSE分别降低了0.38、0.28、0.24,SSE分别降低了20.27、13.85、11.20。同时,两种方法联合使用的去噪效果总体上优于单独使用一种方法的去噪效果。图7为监测数据经过不同方法去噪处理后的效果对比。具体来看,小波阈值法去噪效果最差,特别是对高频噪声的去噪效果有待提高;CEEMDAN法虽在高频噪声去除方面有所作为,但是在某些区域未能完全实现有效去噪,有些区域则会滤除数据中关键的局部变化;CEEMDAN-小波阈值法结合了前两种方法的优点,在一定程度上

优化了去噪效果,但在彻底去噪和保留数据特征方面仍有较大改进空间;而CEEMDAN-改进小波阈值法不仅在去噪性能上优于其他方法,而且在彻底去除高频噪声和保持大坝变形局部变化规律方面具有明显的优越性。联合图6和图7可以看出,CEEMDAN-改进小波阈值法在有效保留数据的原始完整性的同时,更有效地消除了数据中的噪声成分,为大坝变形数据的后续分析提供了更高的准确性和可靠性。

4 结 语

本文以乌鲁瓦提水库为依托,提出了一种CEEMDAN-改进小波阈值对变形数据去噪的新方法。通过仿真试验和工程实例验证可知,使用 t 检验进行特征分析可以高效区分高频含噪分量和低频纯净分量。提出的CEEMDAN-改进小波阈值法去噪效果优于小波阈值法、CEEMDAN法和CEEMDAN-小波阈值法,不仅进一步提高了去噪的精度,还全面保留了原始信号特征,尤其是对峰值部分和其他有用信息的保留更为显著。该方法的提出有效弥补了传统方法在去噪程度和对有用局部变形特征信息丢失方面的不足,为大坝变形监测提供了新的思路。

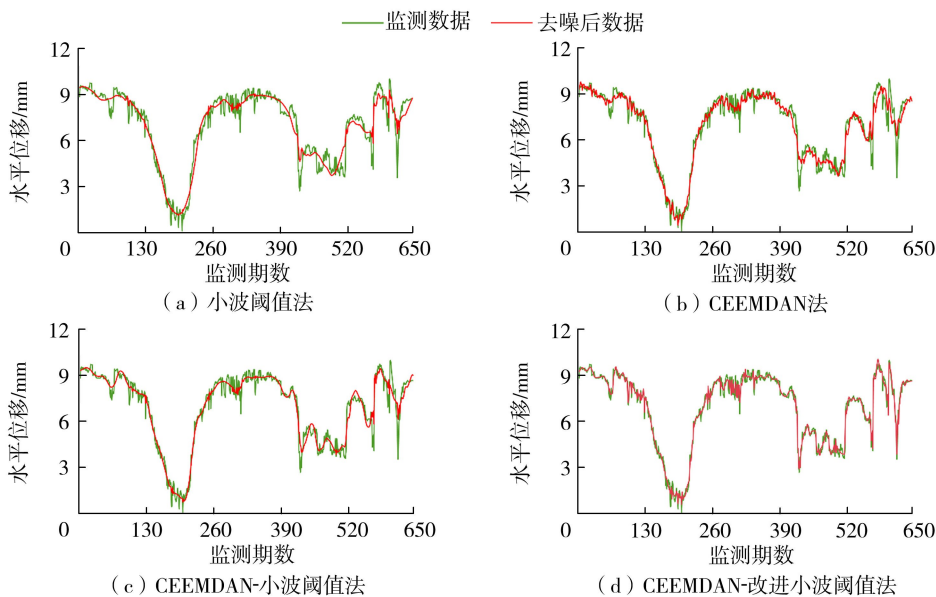


图7 不同方法去噪效果对比

参考文献:

- [1] 赵二峰,李章寅,袁冬阳.基于双阶段注意力机制的大坝变形深度学习预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 44-52. (ZHAO Erfeng, LI Zhangyin, YUAN Dongyang. Deep learning model for deformation prediction of dam based on dual-stage attention mechanism [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 44-52. (in Chinese))
- [2] 胡江,马福恒,王春红.特高拱坝变形监测的分区及其模型构建方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 148-154. (HU Jiang, MA Fuheng, WANG Chunhong. Zoned deformation monitoring and its model building method for super high arch dams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 148-154. (in Chinese))
- [3] 康俊锋,胡祚晨,陈优良.基于布谷鸟搜索算法优化LSTM的大坝变形预测[J]. 排灌机械工程学, 2022, 40(9): 902-907. (KANG Junfeng, HU Zuochen, CHEN Youliang. Dam deformation prediction based on optimization of LSTM by using cuckoo search algorithm [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(9): 902-907. (in Chinese))
- [4] LI Yanlong, YIN Qiaogang, ZHANG Ye, et al. Deformation prediction model of concrete face rockfill dams based on an improved random forest model[J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(4): 390-398.
- [5] 葛盼猛,陈波,刘庭赫,等.基于KPCA-ICFSFDP-MOGP的拱坝多测点变形数据预处理及预测方法[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(4): 92-97. (GE Panmeng, CHEN Bo, LIU Tinghe, et al. Preprocessing and prediction method for multi-point deformation data of arch dams based on KPCA-ICFSFDP-MOGP [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(4): 92-97. (in Chinese))
- [6] 杨庆,任超.大坝变形的去噪傅里叶模型预测[J]. 测绘科学, 2019, 44(2): 158-163. (YANG Qing, REN Chao. Prediction of dam deformation based on de-noising Fourier model [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(2): 158-163. (in Chinese))
- [7] 邓思源,周兰庭,柳志坤.基于卡尔曼滤波、分形和LSTM的大坝变形趋势分析方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 121-126. (DENG Siyuan, ZHOU Lanting, LIU Zhikun. Analysis method of dam deformation trend based on Kalman filter, fractal and LSTM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 121-126. (in Chinese))
- [8] ZHANG Jianwei, JIANG Qi, MA Bin, et al. Signal denoising method for vibration signal of flood discharge structure based on combined wavelet and EMD [J]. Journal of Vibration and Control, 2017, 23(15): 2401-2417.
- [9] 马佳佳,苏怀智,王颖慧.基于EEMD-LSTM-MLR的大坝变形组合预测模型[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(5): 47-54. (MA Jiajia, SU Huaizhi, WANG Yinghui. Combinatorial prediction model for dam deformation based on EEMD-LSTM-MLR [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(5): 47-54. (in Chinese))
- [10] 侯回位,郑东健,刘永涛,等.基于EEMD-SE-LSTM的混凝土坝变形监测模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 61-66. (HOU Huiwei, ZHENG Dongjian, LIU Yongtao, et al. Deformation monitoring model of concrete dams based on EEMD-SE-LSTM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 61-66. (in Chinese))

- [11] YIN Chuang, WU Zhenyu. Separate modeling technique for deformation monitoring of concrete dams [J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(6): 2968-2989.
- [12] ZHANG Caiyi, FU Shuyan, OU Bin, et al. Prediction of dam deformation using SSA-LSTM model based on empirical mode decomposition method and wavelet threshold noise reduction [J]. Water, 2022, 14(21): 3380.
- [13] 石强, 戴吾蛟, 晏慧能, 等. 时空 Kalman 滤波在变形分析中的应用研究 [J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2125-2138. (SHI Qiang, DAI Wujiao, YAN Huineng, et al. Research on application of spatio-temporal Kalman filter in deformation analysis [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2125-2138. (in Chinese))
- [14] 许承权, 范千. 基于 ICEEMD-ICA 与 MDP 准则的变形监测数据去噪方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(11): 1658-1665. (XU Chengquan, FAN Qian. Denoising method for deformation monitoring data based on ICEEMD-ICA and MDP principle [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(11): 1658-1665. (in Chinese))
- [15] 黄珍, 单德山, 李乔. 大跨斜拉桥运营模态分析方法对比 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(1): 144-155. (HUANG Zhen, SHAN Deshan, LI Qiao. Comparison of operational modal analysis methods for long span cable-stayed bridge [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(1): 144-155. (in Chinese))
- [16] TAREK K, ABDERRAZEK D, KHEMISSI B M, et al. Comparative study between cyclostationary analysis, EMD, and CEEMDAN for the vibratory diagnosis of rotating machines in industrial environment [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(9): 2747-2775.
- [17] 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. (ZHANG Ruipeng, LI Zhongqin, WU Mengyao. Application of combined models based on wavelet transform in bridge deformation analysis [J]. Journal of Geomatics, 2022, 47(3): 52-55. (in Chinese))
- [18] 文俊, 岳春芳, 吴艳, 等. 基于小波包-卡尔曼的大坝变形数据处理研究 [J]. 人民黄河, 2022, 44(2): 129-132. (WEN Jun, YUE Chunfang, WU Yan, et al. Research on data processing of dam deformation based on wavelet Packet-Kalman [J]. Yellow River, 2022, 44(2): 129-132. (in Chinese))
- [19] 周云耀, 王海斌, 向涯, 等. 改进阈值函数的提升小波在人工震源数据处理中的应用 [J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(6): 639-645. (ZHOU Yunyao, WANG Haibin, XIANG Ya, et al. Application of lifting wavelet with improved threshold function in artificial seismic source [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(6): 639-645. (in Chinese))
- [20] 易清根, 刘心龙, 刘万科. 基于 EMD 和小波的 GPS/BDS 变形监测中的多路径误差削弱方法 [J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(5): 462-466. (YI Qinggen, LIU Xinlong, LIU Wanke. Multipath mitigation method by combined EMD and wavelet in GPS/BDS deformation monitoring [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(5): 462-466. (in Chinese))
- [21] ZHANG Yan, LIAN Jijian, LIU Fang. An improved filtering method based on EEMD and wavelet-threshold for modal parameter identification of hydraulic structure [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 68-69: 316-329.
- [22] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C]//2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Prague: IEEE, 2011: 4144-4147.
- [23] HASSAN A R, SUBASI A, ZHANG Yanchun. Epilepsy seizure detection using complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 191: 105333.
- [24] 梁益丰, 许江宁, 吴苗, 等. 北斗卫星钟差的 CEEMDAN 分解与周期项提取方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(4): 476-484. (LIANG Yifeng, XU Jiangning, WU Miao, et al. CEEMDAN decomposition and periodic term extraction method of the BDS clock bias [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2022, 30(4): 476-484. (in Chinese))
- [25] CHEN Yinsheng, ZHANG Tinghao, ZHAO Wenjie, et al. Fault diagnosis of rolling bearing using multiscale amplitude-aware permutation entropy and random forest [J]. Algorithms, 2019, 12(9): 184.
- [26] CHOI J Y. Translation-invariant wavelet denoising method based on a new thresholding function for underwater acoustic measurement [J]. Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 2006, 16(11): 1149-1157.
- [27] 覃爱娜, 戴亮, 李飞, 等. 基于改进小波阈值函数的语音增强算法研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(4): 136-140. (QIN Aina, DAI Liang, LI Fei, et al. A speech enhancement algorithm based on improved wavelet threshold function [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(4): 136-140. (in Chinese))
- [28] BARRI A, DOOMS A, SCHELKENS P. The near shift-invariance of the dual-tree complex wavelet transform revisited [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2012, 389(2): 1303-1314.

(下转第 102 页)