

高压强磁环境下电气信号的小波分频降噪方法

陈朝晖¹, 袁康健², 丁晓兵¹, 陈旭¹, 汤涛², 刘玮³

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广州 510663; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114; 3. 广东电网电力调度控制中心, 广州 510600)

摘要: 高电压强磁场环境噪声及各种扰动直接影响电气信号的准确检测, 干扰电气信号的时频特征分析。为滤除噪声及扰动分量, 提出了一种基于小波分频阈值与分频阈值函数的电气信号自适应降噪方法。首先, 对信号进行小波包分解, 将最后两层小波包树节点系数按频率大小排序, 分别估算不同频段的节点系数阈值(分频阈值)。其次, 通过相邻层节点系数能量之比构造降噪调节系数, 对分频阈值进行自适应优化。再次, 通过降噪调节系数构造融合软硬阈值优点的改进阈值函数(分频阈值函数), 实现不同节点阈值函数的自适应调整。最后, 重构小波包树得到降噪后的信号。Simulink仿真和高压强磁下的实测录波信号降噪结果表明该方法在白噪声的干扰下能有效去除尖峰、毛刺等影响, 降噪效果显著, 信号波形还原度好, 在电气信号检测中具有一定的应用价值。

关键词: 频率排序; 降噪方法; 小波包原理; 谐波扰动; 能量比

Wavelet Frequency Division Method for Noise Reduction of Electrical Signals in High Voltage and Strong Magnetic Field Environments

CHEN Zhaohui¹, YUAN Kangjian², DING Xiaobing¹, CHEN Xu¹, TANG Tao², LIU Wei³

(1. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 3. Power Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: Noise and various disturbances in the high voltage and strong magnetic field environment directly impact the accurate detection of electrical signals, as well as interfere with the time-frequency characteristics of these signals. To mitigate noise and disturbance components, an adaptive noise reduction method is proposed based on wavelet frequency division threshold and frequency division threshold function. Firstly, following wavelet packet decomposition of the signal, the node coefficients from the final two layers of the wavelet packet tree are arranged in order of frequency magnitude, and the node coefficient thresholds for different frequency bands (frequency division thresholds) are estimated. Secondly, the noise reduction adjustment coefficient is constructed by the ratio of energy of adjacent layer node coefficients, and the frequency division threshold is adaptively optimized. Subsequently, an improved threshold function (frequency division threshold function) is constructed by incorporating the benefits of both soft and hard thresholds, utilizing the noise reduction adjustment coefficient to achieve adaptive adjustment of threshold functions of different nodes. Finally, the denoised signal is obtained by reconstructing the wavelet packet tree. Simulink simulation and noise reduction results of the measured recorded waveform signal under high-voltage strong magnetism show that the method can effectively remove some effects, such as spikes, burrs, etc. The noise reduction effect is significant and the signal waveform restoration is excellent. The method holds certain application value in electrical signal detection.

Key words: frequency sorting; noise reduction method; wavelet packet principle; harmonic disturbance; energy ratio

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52207075); 中国南方电网有限责任公司科技项目(ZDKJXM20220004)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52207075); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (ZDKJXM20220004).

0 引言

电网全景感知的关键在于信号的准确采集。电气测量装置常安装于结构紧凑的一次设备之间,甚至紧贴一次设备外壳,电气信号在收集、传递和处理的过程中容易受到高电压强磁场带来的各种噪声干扰,从而导致电气信号变形或失真,检测精度难以满足电网要求,尤其对于检测微弱信号的传感器(如隧道磁电阻传感器)来说,信号检测更加困难。因此,高电压强磁场环境下电气信号的准确检测至关重要。

高电压强磁场环境带来的电气噪声频段分布广,幅值具有随机差异性,严重影响电能质量和电气信号的准确检测。目前,我国电力系统正在升级改造,未来将会引入更多的一次设备,给电力测量装置带来更多的噪声源,而可靠的降噪技术是提高信噪比的关键。因此,如何在保留有效信息的同时高质量地去除噪声是目前亟待解决的问题。

近年来,国内外学者提出了大量的信号降噪方法,如小波包变换、经验模态分解、S变换、奇异值分解和数学形态学等^[1-3]。其中小波包降噪在时域和频域都具有良好的局部变化特性,能够自适应地区分低频和高频的不同特征,在降噪过程中可有效保留有用信息,可作为高效降噪的解决方案。然而,小波阈值和阈值函数的选取不合理会导致信号降噪后仍存在尖峰、毛刺等问题,因此,二者的选择是信号降噪效果优劣的关键所在。

小波阈值主要用于区分有用信号和噪声信号。Donoho提出了基于尺度相关SURE的阈值选择方法,该方法简洁、有效,并在实际工程中得到了广泛应用^[4-7]。文献[8]提出一种采用梯度下降法的自适应最优阈值法,但该方法计算过程繁琐,对不同的信号降噪效果表现不一致。文献[9]提出遗传算法优化的自适应阈值法,能够减少降噪信号的畸变,但遗传算法依赖初始种群和参数选取,整体降噪效果有待提高。文献[10]结合小波系数的传播特性和噪声方差贡献率选取阈值,该方法对噪声统计特性的依赖性较高。此外,上述方法均由第一层小波变换后的最小均方误差准则来估算降噪阈值,其缺点是全频段阈值固定,对多层分解后的节点系数降噪精度不高。

阈值函数决定了小波系数的处理方式,它的选取

决定了信号的还原程度和波形平滑度。硬阈值函数在阈值点处存在跳动问题,软阈值函数存在小波系数偏差问题。为此,文献[11]提出了软硬阈值折中法,缩小了小波系数固定偏差,一定程度提高了信号还原度,但调节参数的灵活性较低,难以平衡软硬阈值,噪声抑制效果可能欠佳。文献[12]在Garrote阈值函数的基础上加入自由因子来合理控制函数的逼近速度,提升降噪效果,但是自由因子需人为调整,难以实现小波系数的实时处理和自适应降噪。

为此,本文提出一种高电压强磁场环境下电气信号的小波分频降噪方法。该方法针对各小波包树的系数节点进行分频阈值估计,并通过各相邻节点之间的能量比构造降噪调节系数,优化各节点阈值,克服了传统方法阈值固定单一的问题。同时,利用降噪调节系数建立分频阈值函数,控制阈值函数的逼近速度,实时处理不同节点系数,避免了阈值点的跳动问题,减小了降噪偏差问题。二者结合能自适应保留更多细节信号,减少波形畸变,提升降噪波形的还原性和平滑度。为验证所提方法的实用性,对高电压强磁场下的实测录波信号进行处理,结果表明,分频阈值和分频阈值函数对白噪声降噪更具针对性,更有效地消除了白噪声,降噪效果显著。

1 小波包降噪工作原理

1.1 小波包分解原理

小波包分解是小波变换的改进方法,保留了小波变换的优点,克服了小波变换中高频段分辨率较低的问题,对信号高频部分的分析更为细化。

小波包降噪通常使用的是正交法,选取用于分解的高通滤波器和低通滤波器,分别设置为 $H(n)$ 和 $G(n)$,其中 n 为序列值,其长度应与小波基的长度一致^[13-15]。得到分解方程为:

$$\begin{cases} W_{2n}(x) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} H(n) W_n(2x-n) \\ W_{2n+1}(x) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} G(n) W_n(2x-n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为函数的自变量; N 为滤波器长度; $W_{2n}(x)$ 为描述函数, $n=0,1,2,3,\dots,2N-1$; $W_n(x)$ 为生成描述函数的母函数; $W_0(x)$ 为尺度函数; $W_1(x)$ 为小波基函数。

为描述小波包函数,由式(1)得到与描述函数

$W_n(x)$ 以及正交小波函数相关的两个参数。

$$\begin{cases} m \in N, (j, b) \in Z^2 \\ W_{j,m,b} = 2^{-\frac{j}{2}} W_m(2^{-j}x - b) \end{cases} \quad (2)$$

式中: b 为各时间位置的参数; j 为小波尺度数; m 为振荡参数; Z 为整数; $W_m(x)$ 为第 m 个小波包原型函数; $W_{j,m,b}$ 为由第 m 个小波包原型函数经过尺度伸缩、平移和能量归一化后构成的一个特定频带成分的基函数。

小波包分解主要基于离散变换的思想, 针对信号不同频段进行分解。信号3层小波包分解示意图如图1所示, 小波包分解过程在不同频段的划分更细致, 方法也更灵活, 保留了高频系数, 对数据的处理更为全面。

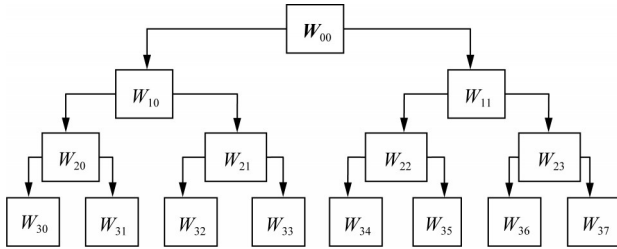


图1 小波包树分解原理图

Fig. 1 Wavelet packet tree decomposition schematic diagram

小波包分解的算法公式为^[16-17]:

$$\begin{cases} d_l^{j,2n} = \sum_b H(k-2l) d_b^{j+1,n} \\ d_l^{j,2n+1} = \sum_b G(k-2l) d_b^{j+1,n} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $d_l^{j,2n}$ 、 $d_l^{j,2n+1}$ 与 $d_b^{j+1,n}$ 为小波包系数; b 、 l 为平移参数。

1.2 小波包降噪重构原理

高电压强磁场环境下电压或磁场的变化会引起电气设备的金属部件或电子元件产生微小的振动或位移, 进而产生白噪声等电气噪声, 原始纯净信号主要受白噪声等噪声影响, 导致其难以获取。二者在能量分布特点上存在差异, 纯净信号的能量分布相对集中, 且主要体现在较高幅值的节点系数上; 白噪声分布特点主要体现在其功率谱密度上, 在整个频率范围内幅值分布具有随机性。对于只含有噪声的小波包, 其节点系数往往较小^[18-20]。

基于以上特性, 选取一个合适的阈值, 结合阈值函数, 对节点系数进行信号处理可以有效去除噪声信号。阈值和阈值函数的选取将直接关系到信号

的降噪质量。

在阈值降噪处理后, 将获得的新节点系数进行逆变换重构, 得到降噪后的信号。降噪原理如图2所示。

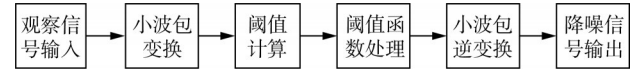


图2 降噪基本原理图

Fig. 2 Basic principle of noise reduction

通过逆变换公式可由 $d_l^{j,2n}$ 与 $d_l^{j,2n+1}$ 得到 $d_l^{j+1,n}$, 如式(4)所示^[21-23]。

$$d_l^{j+1,n} = \sum_b H'(l-2b) d_b^{j,2n} + G'(l-2b) d_b^{j,2n+1} \quad (4)$$

式中: $d_l^{j+1,n}$ 为小波包重构后的小波包节点系数; $H'(\cdot)$ 和 $G'(\cdot)$ 分别为重构的高通、低通滤波器组。

2 自适应分频小波包降噪方法

自适应分频降噪法通过提取分频重序后的小波包树 T 节点系数阈值, 再配合降噪条件系数得到优化后的分频阈值。该方法细化了单个阈值的使用范围, 提升了阈值处理的精准度和灵活性, 其具体步骤如下。

步骤1: 对小波包分解后的倒数两层各节点系数按频率从小到大进行排序后得到小波包树 T 。

步骤2: 分频重序后, 计算能量比, 提取各节点系数阈值, 得到优化的分频阈值。

步骤3: 利用分频阈值函数对最后一层小波包系数进行阈值处理, 得到新的节点系数。

步骤4: 用新小波包系数置换小波包树 T 最后一层原节点系数, 得到新小波包树 T' , 逆变换重构得到降噪后的信号。

2.1 小波包节点系数频率排序

小波包分解的过程中每层的节点系数并非按频率顺序由小到大排列。因为小波包分解的运算过程中, 高通滤波器存在的“翻转”会导致分解频率顺序不一致, 且在所有小波包分解中该情况均相同。

对某信号进行3层小波包分解, 其第3层8个节点频谱图由上至下按自然分解顺序排列如图3所示。由图3可知, 其自然频率顺序并非按正序依次排列。

对 n 层小波包分解, 小波系数节点自然顺序为 $k=0, 1, 2, \dots, 2n$, $g(k)$ 为第 k 个节点对应的频率顺序。

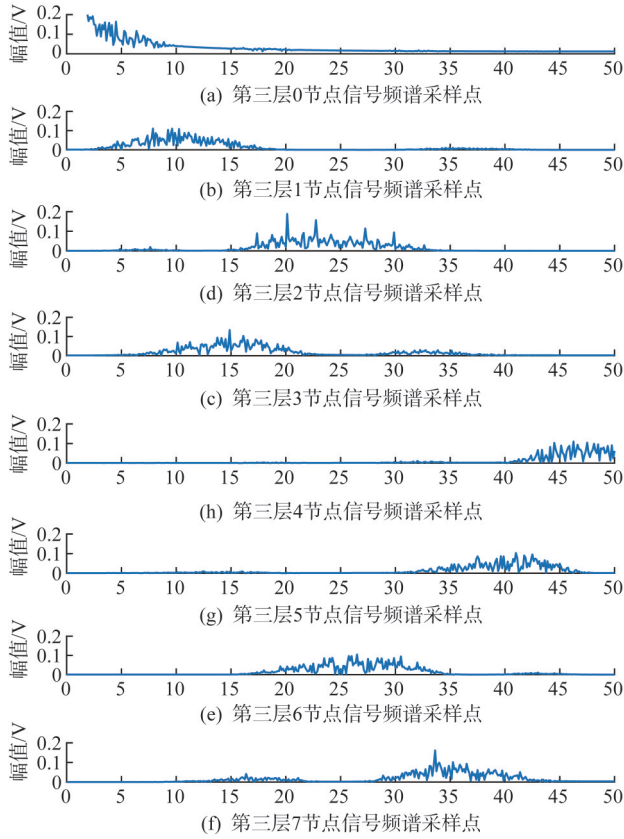


图3 小波包树第三层各节点系数频谱图

Fig. 3 Spectral diagram of node coefficients in the third layer of wavelet packet tree

k 的二进制数表示为:

$$k = (k_{n-1}k_{n-2}\cdots k_2k_1k_0) \quad (5)$$

$g(k)$ 的二进制数表示为:

$$g(k) = (g_{n-1}g_{n-2}\cdots g_2g_1g_0) \quad (6)$$

可得:

$$\begin{cases} g_i = k_i \oplus k_{i+1} \\ g_{n-1} = k_{n-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\oplus$ 为异或运算符号。

根据以上的定义,可求解 n 层的小波包分解的频率排序。以 3 层小波包分解为例,其小波包树和频率排序如图 4 以及表 1 所示。

因此,为保证后文新阈值与节点系数相匹配,需在分解时对小波系数节点进行重新排序,如图 5 所示。

2.2 降噪调节系数提取

利用 2.1 节所提方法得到按频率排列的新小波树,提取小波系数节点能量之比对分频阈值进行优化,在去除噪声系数的同时保留有效信号系数。

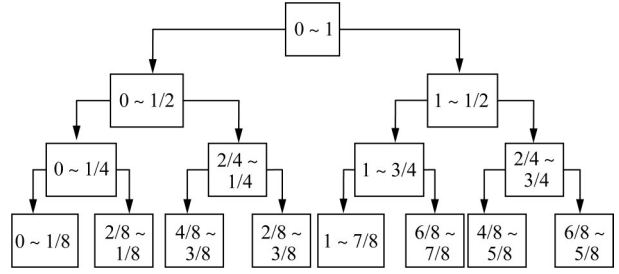


图4 小波包自然频率顺序分解示意图

Fig. 4 Schematic diagram of natural frequency sequence decomposition of wavelet packet

表1 第3层小波包分解自然顺序与频率顺序对应表

Tab. 1 The third layer of wavelet packet decomposition natural order and frequency order correspondence table

小波包序号	[3 0]	[3 1]	[3 2]	[3 3]
分解频率/Hz	0 ~ 1/8	2/8 ~ 1/8	4/8 ~ 3/8	2/8 ~ 3/8
频率序号	1	2	4	3
波包序号	[3 4]	[3 5]	[3 6]	[3 7]
分解频率/Hz	1 ~ 7/8	6/8 ~ 7/8	4/8 ~ 5/8	6/8 ~ 5/8
频率序号	8	7	5	6

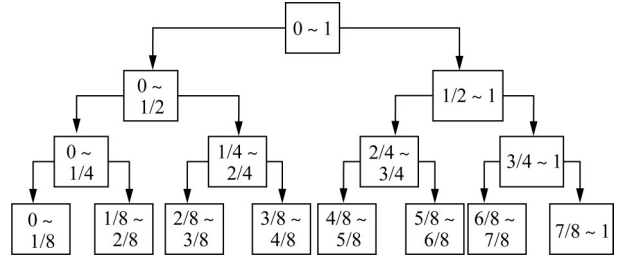


图5 小波包重新排序频率分解示意图

Fig. 5 Wavelet packet reordering frequency decomposition diagram

以 $n=3$ 小波包分解为例,利用能量公式(8)计算最后两层各节点系数 $W_{i,j}$ 的能量 $E_{i,j}$ 。

$$E_{N,i} = \sum_{n=1}^{M_{N,i}} W_{N,i}^2(n) \quad (8)$$

式中: $W_{N,i}(n)$ 为第 N 层第 i 个节点的小波包系数; $M_{N,i}$ 为第 N 层第 i 个节点小波包系数的最大长度; $n=1,2,3,\dots,M_{N,i}$ 。

降噪调节系数 $K_{N,i}$ 定义为小波包分解后倒数第二层各段节点系数能量与下层节点系数能量之比,如式(9)所示。

$$K_{N,i} = \frac{E'_{N,i}}{E_{N,2i}} \text{ 或 } K_{N,i} = \frac{E'_{N,i}}{E_{N,2i-1}} \quad (9)$$

式中 $E'_{N,i}$ 为 $E_{N,i}$ 上一层树干节点系数所对应的节点系数能量。

利用降噪调节系数优化各节点系数的分频阈值,在有效降噪的同时保留更多的有用信号,提高降噪精度。

2.3 分频阈值和分频阈值函数的选取

传统降噪法采取基于最小均方误差准则的阈值处理方法选取阈值,通过最小化信息的均方误差确定阈值,且该阈值为全频段固定阈值。本文利用该方法计算各频段节点系数的阈值,具体计算如式(10)所示,再利用降噪调节系数优化分频阈值。

$$\lambda_{N,i} = \sigma \sqrt{2 \log(L_{N,i})} \quad (10)$$

式中: $\lambda_{N,i}$ 为第 N 层第 i 个节点的分频阈值; $L_{N,i}$ 为分频后节点 $W_{N,i}$ 的长度; σ 为小波包系数均方差。

提取倒数第二层节点系数分频阈值,以相邻层节点系数能量之比优化阈值得到最后一层节点系数新阈值,细化全频段阈值分布,提高了阈值的适应性,保证降噪精度,优化后的分频阈值 $\lambda'_{N,i}$ 为:

$$\lambda'_{N,i} = K_{N,i} \times \lambda_{N,i} \quad (11)$$

根据软、硬阈值函数的特点构造阈值邻域内连续平滑的改进阈值函数,并引入降噪调节系数进行调整,得到分频阈值函数如式(12)所示。

$$F[W_{N,i}(n)] = \begin{cases} 0, |W_{N,i}(n)| < \lambda_{N,i} \\ (W_{N,i}(n) - \frac{\lambda_{N,i}^2}{W_{N,i}(n) \times e^{\frac{|W_{N,i}(n) - \lambda_{N,i}|}{K_{N,i}}}}), |W_{N,i}(n)| \geq \lambda_{N,i} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $W_{N,i}(n)$ 为第 N 层第 i 个节点系数中的小波包系数; $F[W_{N,i}(n)]$ 为阈值处理后的小波包系数。

高压强磁场环境下白噪声的分布频域广,幅值具有随机差异性,固定阈值降噪法难以胜任。采用本文方法,依据各频段能量特征自适应确定各频段分频阈值与分频阈值函数,更适合于含白噪声电气信号的降噪处理。

分频阈值函数既保留了软阈值函数的连续性,又避免了硬阈值函数的模糊性,无需人为调整,即可实时得到不同阈值不同节点系数所对应的分频阈值函数,能适应不同信号不同频段特征,实现非平稳信号的优化,具有较好的鲁棒性,公式简单易于实现,进而达到高质量的降噪效果。

图6为某节点系数在软阈值、硬阈值函数以及本文阈值函数3种情况下的阈值处理效果图。可以看出,本文阈值函数逼近硬阈值,但保留了在阈值

处的连续性,避免了阈值点的跳动问题,减小了降噪偏差问题,提升了降噪波形的还原性和平滑度。

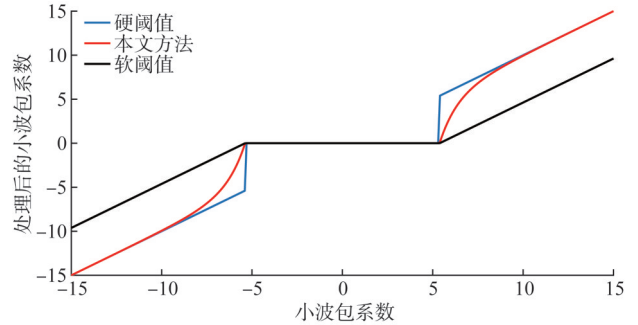


图6 阈值函数特性比较

Fig. 6 Comparison of threshold function characteristics

图7为小波包分解第4层前6个节点的阈值处理效果图,即阈值函数特性图。

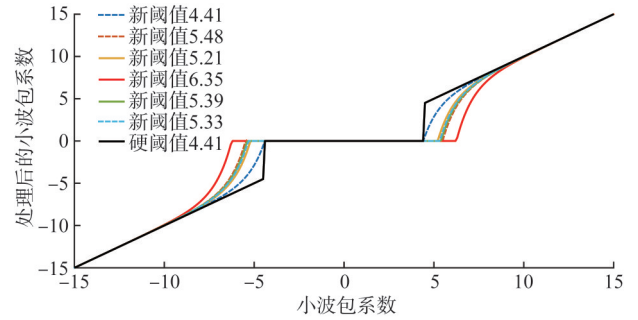


图7 不同节点分频阈值函数特性比较

Fig. 7 Comparison of frequency threshold function characteristics of different nodes

由图7可知,该方法可根据不同节点系数的阈值自动调整分频阈值函数,即通过自适应调整降噪调节系数控制阈值函数对软、硬阈值函数的逼近速度,进而实现各节点系数的自适应降噪处理。

获得最后一层新节点系数后,与原小波包树 T 的原节点进行置换,得到新的小波包树 T' ,最后逆变换重构新小波包树得到降噪后的信号。

3 MATLAB 仿真实验

3.1 仿真参数和评估依据

本文使用 MATLAB/Simulink 进行仿真实验,在纯净信号上叠加白噪声。设置采样频率为 10 240 Hz,纯净信号幅值为 10 V,频率为 50 Hz;设置白噪声信号的方差和均值为 1,种子数量为 23 341,采样时间为 0.01 s。纯净信号和含噪信号如图8—9所示。

对信号进行小波包降噪前,需对分解后的小波

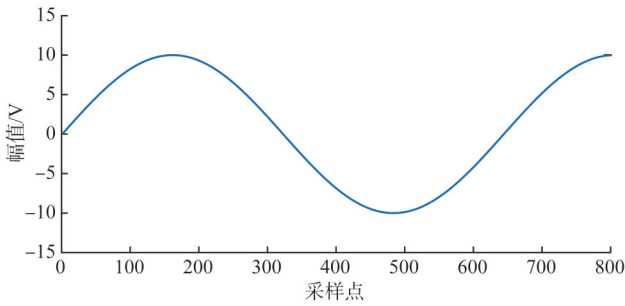


图8 原信号波形图

Fig. 8 Original signal waveform diagram

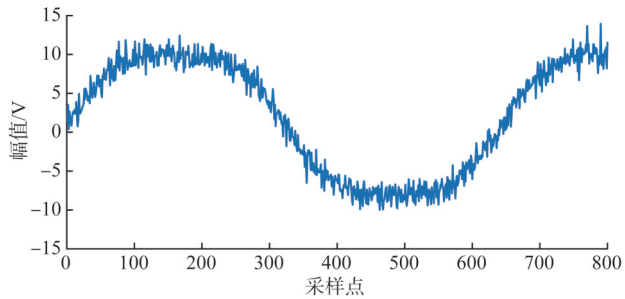


图9 含噪声信号波形图

Fig. 9 Waveform diagram of signal with noise

系数频率进行重新排序。图3中的信号经频率重排后的频谱图如图10所示。

以4层小波包分解为例,使用本文所提方法进行降噪,同时,利用文献[4-8]所提的启发式阈值处理法(heursure)、最小二乘准则法(rigrsure)和软阈值法、Garrote 阈值法4种方法来进行降噪效果对比。为便于评估降噪效果,以降噪后信号的信噪比(S_{SNR})、根均方差(R_{RMSE})、波形相似系数(N_{NCC})和平滑度(R_{R})作为评估依据,其公式分别为:

$$S_{\text{SNR}} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{k=1}^N s_k^2}{\sum_{k=1}^N |s_k^2 - s_k'^2|} \quad (13)$$

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (s_k - s_k')^2} \quad (14)$$

$$N_{\text{NCC}} = \frac{\sum_{k=1}^N s_k s_k'}{\sqrt{\sum_{k=1}^N s_k^2 \sum_{k=1}^N s_k'^2}} \quad (15)$$

$$R_{\text{R}} = \frac{\sum_{k=1}^N [s_k' - s_k']^2}{\sum_{k=1}^N [s_k - s_k]^2} \quad (16)$$

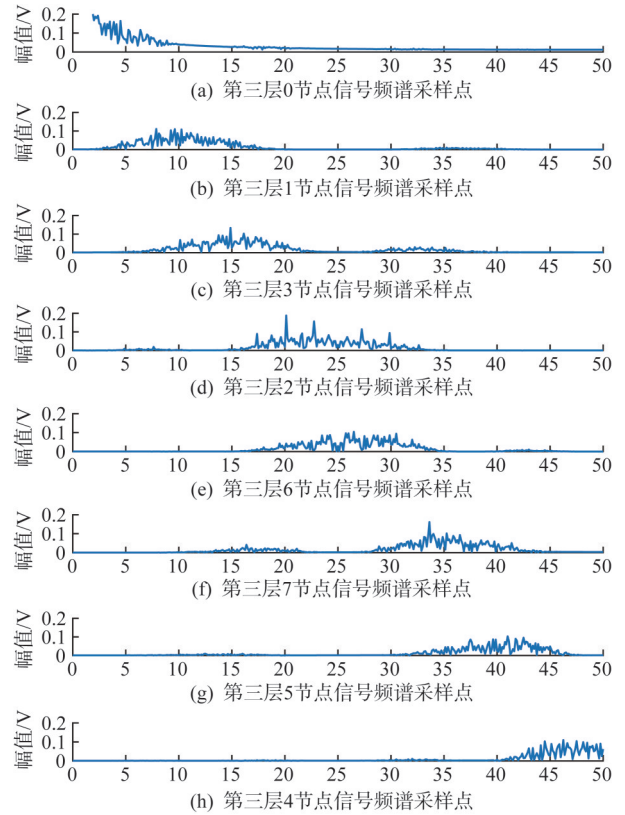


图10 实测录波信号重新排序频谱图

Fig. 10 Reordering spectrogram of the recorded wave signal

式中: s_k' 为降噪后的信号; s_k 为原始信号。

相比于其他小波, db4 小波对非平稳信号的灵敏度更高,对于电能质量信号更为适合^[24-27],故本文选取 db4 作为该仿真的小波基。

3.2 降噪效果分析

降噪调节系数和分频阈值是本文方法降噪的关键所在。对含噪信号进行4层分解,得到能量比和第4层分频阈值如表2—3所示。

表2 各频段节点系数降噪调节系数

Tab. 2 Node coefficients of various frequency band noise reduction adjustment coefficient

降噪调节系数 $K_{N,i}$	$K_{4,1}$	$K_{4,2}$	$K_{4,3}$	$K_{4,4}$	$K_{4,5}$	$K_{4,6}$	$K_{4,7}$	$K_{4,8}$
数值	0.98	1.22	1.64	2.00	1.84	2.00	1.55	2.31
降噪调节系数 $K_{N,i}$	$K_{4,9}$	$K_{4,10}$	$K_{4,11}$	$K_{4,12}$	$K_{4,13}$	$K_{4,14}$	$K_{4,15}$	$K_{4,16}$
数值	1.48	2.19	1.74	2.46	1.57	2.52	1.78	2.10

采用3.1所述4种小波降噪方法和本文所提方法分别对含噪信号进行处理,其信号降噪效果分别如图11所示。

从图11中看出,所提降噪方法消除了白噪声

表 3 各频段节点系数分频阈值

Tab. 3 Frequency division threshold of node coefficients in various frequency bands

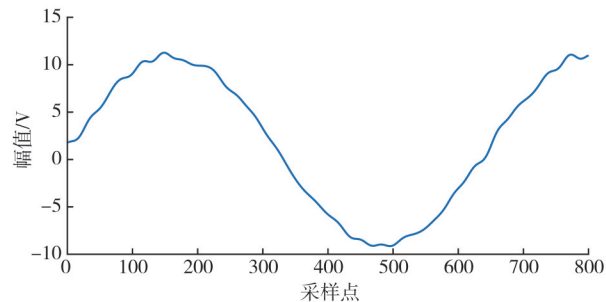
分频阈值函数 $\lambda_{i,j}$	$\lambda_{4,1}$	$\lambda_{4,2}$	$\lambda_{4,3}$	$\lambda_{4,4}$	$\lambda_{4,5}$	$\lambda_{4,6}$	$\lambda_{4,7}$	$\lambda_{4,8}$
数值	4.41	5.48	5.21	6.25	5.39	5.33	4.06	6.05
分频阈值函数 $\lambda_{i,j}$	$\lambda_{4,9}$	$\lambda_{4,10}$	$\lambda_{4,11}$	$\lambda_{4,12}$	$\lambda_{4,13}$	$\lambda_{4,14}$	$\lambda_{4,15}$	$\lambda_{4,16}$
数值	4.62	6.83	5.89	8.33	4.14	6.66	5.62	6.63

注: $\lambda_{i,j}$ 为第 i 层第 j 个节点的分频阈值函数

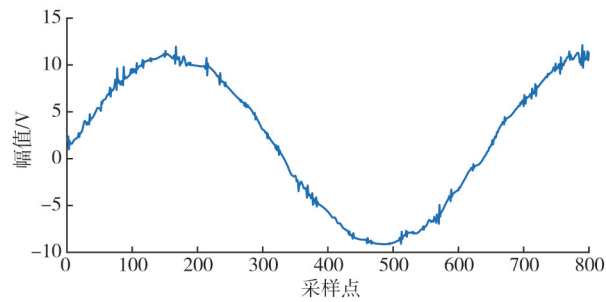
带来的毛刺、形变等问题, 波形明显更为平滑, 波形还原度更高。同时, 对含噪信号和降噪后的信号进行频谱对比分析, 其结果如图 12 所示。

对于在各频段分布的白噪声, 通过本文方法降噪处理后, 在各频段无规律的白噪声干扰已明显消除, 极大程度地消除了白噪声对原始信号的干扰, 表明所提方法可有效去除白噪声。

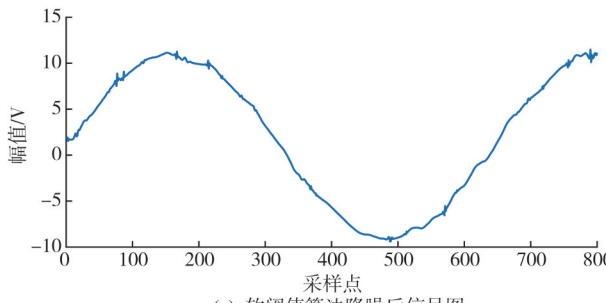
利用 S_{SNR} 、 R_{RMSE} 、 N_{NCC} 和 R_{R} 对各种降噪方法进行降噪效果评估, 结果如表 4 所示。



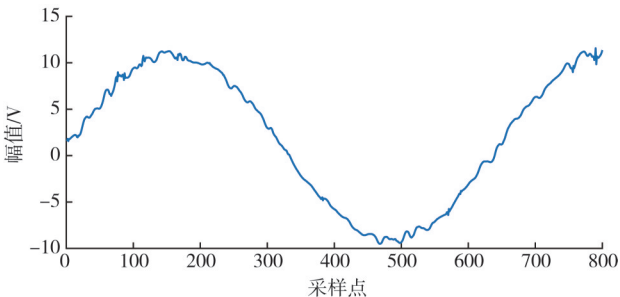
(a) heursure算法降噪后信号图



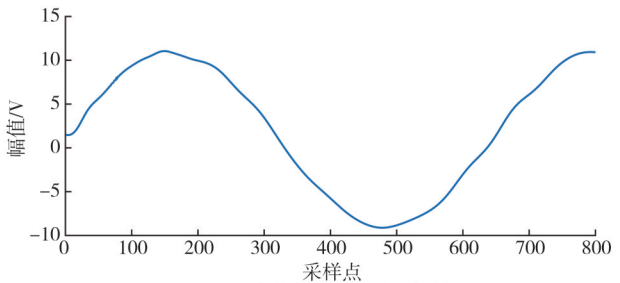
(b) rigrsure算法降噪后信号图



(c) 软阈值算法降噪后信号图



(d) Garrote國值函数降噪后信号图



(e) 本文算法降噪后信号图

图 11 各方法降噪后信号波形图

Fig. 11 Waveform diagrams of signals after noise reduction by various methods

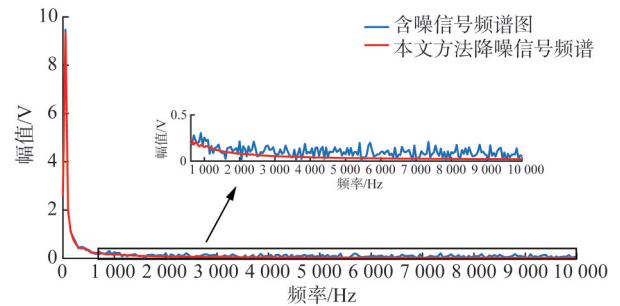


图 12 频谱对比图

Fig. 12 Spectral contrast diagram

表 4 降噪效果评价表

Tab. 4 Noise reduction effect evaluation form

参数	S_{SNR}	R_{RMSE}	N_{NCC}	R_{R}
Heusure	16.843 5	0.402 9	0.974 7	1.097 5
Rigrsure	16.788 2	0.376 5	0.945 8	1.102 3
软阈值	16.842 3	0.342 1	0.963 5	1.105 6
本文方法	17.493 6	0.310 8	0.991 3	1.206 2

由图 11 和表 4 可知, 本文所提方法能减少波形畸变, 提升降噪波形的还原性和平滑度, 降噪效果更好, 降噪质量更高。

对比文献 [12] 的 Garrote 降噪法, 本文所提方法在曲线平滑度具有明显优势, 消除了降噪后信号存在毛刺、不稳定差的缺点。

对本文降噪法和最小均方误差降噪法进行对比实验,仿真结果如图 13 所示。由图可知,和最小均方误差降噪法相比,本文所提分频阈值的降噪方法在高、低频段均有较好的降噪效果。

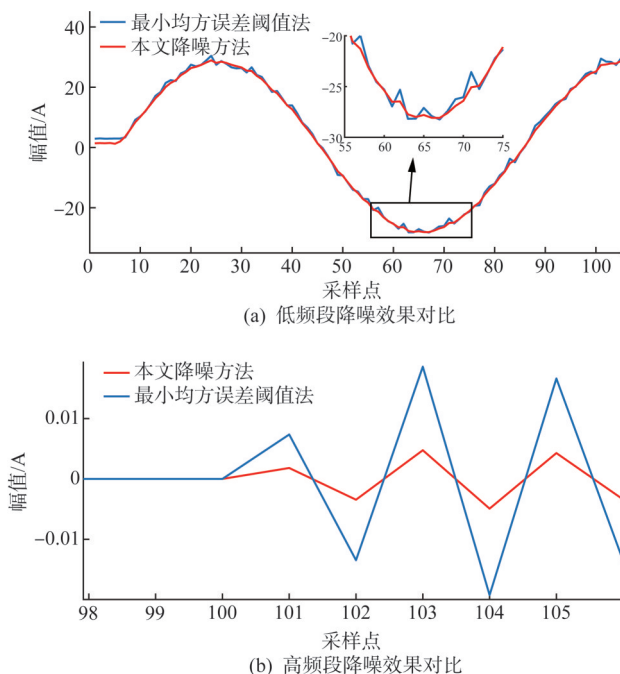


图 13 阈值降噪效果对比图

Fig. 13 Comparison of threshold noise reduction effect

4 实测信号降噪试验

为进一步验证所提方法的有效性,通过配电网试验场对电气信号进行实测,实测工况如图 14 所示。

对高电压强磁场中的实测录波故障信号(中性点不接地系统 B 相瞬时接地故障相电压、中性点不



图 14 实测信号实验设备

Fig. 14 Experimental equipments for measured signals

接地系统 C 相泥土接地故障相电流、中性点不接地系统 A 相高阻接地故障相电流)进行降噪处理,实测录波波形及降噪波形如 15—17 所示。

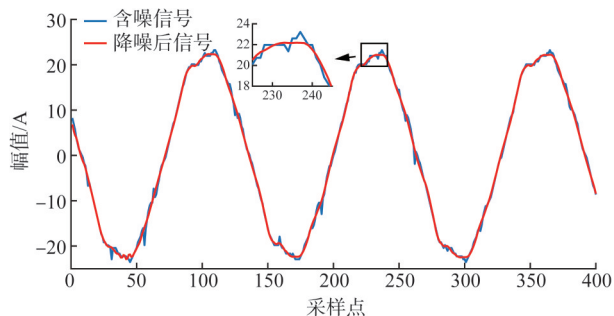


图 15 中性点不接地系统 B 相瞬时接地故障相电流

Fig. 15 Transient ground fault phase currents in phase B of neutral ungrounded system

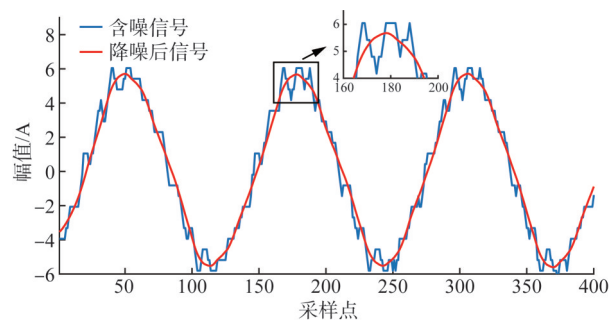


图 16 中性点不接地系统 C 相泥土接地故障相电流

Fig. 16 Phase C earth ground fault phase currents of Neutral ungrounded system

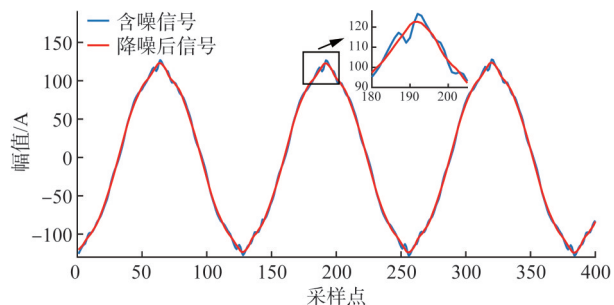


图 17 中性点不接地系统 A 相高阻接地故障相电流

Fig. 17 Field signal waveform after noise reduction

由以上结果可知,对于不同故障场景受干扰的实测电气信号,本文所提降噪方法能够有效去除白噪声的干扰,减少波形畸变,较为真实地还原实际电气信号,波形平滑度、还原度较高,降噪效果好。

5 结语

针对高电压强磁场环境下电气信号检测易受白

噪声影响的问题,提出了一种小波分频降噪方法。该方法重新排序了小波包树各节点系数,根据不同频段节点系数和降噪调节系数提取并优化了分频阈值。相对传统固定阈值而言,分频阈值细化了阈值作用范围,提高了降噪精度,保留了更多的有效信号。同时,该方法引入降噪调节系数构造分频阈值函数,保留了软硬阈值的优点,可通过降噪调节系数控制阈值函数的逼近速度,实现不同节点的自适应降噪处理,进而提升了降噪效果。经MATLAB仿真对比分析可知,本文所提方法降噪效果最优,波形还原度最好。

最后,对高电压强磁场下的实测录波故障信号进行降噪处理。结果表明所提方法可有效去除白噪声干扰,还原信号波形,降噪效果显著,对高电压强磁场环境下电气信号的准确检测具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] SHUKLA S, MISHRA S, SINGH B. Power quality event classification under noisy conditions using EMD-based denoising techniques [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1044 - 1054.
- [2] 胡卫红,舒泓,栾宇光.基于奇异值分解的电能质量信号去噪[J].电力系统保护与控制,2010,38(2):30-33.
HU Weihong, SHU Hong, LUAN Yuguang. Power quality signal denoising based on singular value decomposition [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 30 - 33.
- [3] 刘宇舜,周文俊,李鹏飞,等.基于广义S变换模时频矩阵的局部放电特高频信号去噪方法[J].电工技术学报,2017,32(9):211-220.
LIU Yushun, ZHOU Wenjun, LI Pengfei, et al. De-noising method of partial discharge UHF signal based on generalized S-transform mode time-frequency matrix [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 211 - 220.
- [4] 吴光文,王昌明,包建东,等.基于自适应阈值函数的小波阈值去噪方法[J].电子与信息学报,2014,36(6):1340-1347.
WU Guangwen, WANG Changming, BAO Jiandong, et al. Wavelet threshold denoising method based on adaptive threshold function [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(6): 1340 - 1347.
- [5] 马丹丹,王晓茹.基于小波模极大值的单端行波故障测距[J].电力系统保护与控制,2009,37(3):55-59.
MA Dandan, WANG Xiaoru. Single-ended traveling wave fault location based on Wavelet mode maximum [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55 - 59.
- [6] 江天炎,李剑,杜林,等.粒子群优化小波自适应阈值法用于局部放电去噪[J].电工技术学报,2012,27(5):77-83.
JIANG Tianyan, LI Jian, DU Lin, et al. Particle swarm optimization wavelet adaptive threshold method for partial discharge denoising [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 77 - 83.
- [7] 叶瑞丽,郭志忠,刘瑞叶,等.基于小波包分解和改进Elman神经网络的风电场风速和风电功率预测[J].电工技术学报,2017,32(21):103-111.
YE Ruili, GUO Zhizhong, LIU Ruiye, et al. Prediction of wind farm wind speed and wind power based on wavelet packet decomposition and improved Elman neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 103 - 111.
- [8] ZHANG X P, DESAI M D. Adaptive denoising based on sure risk [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1998, 5(10): 2114 - 2116.
- [9] 李剑,程昌奎,江天炎,等.遗传算法用于局部放电小波自适应阈值去噪[J].高电压技术,2009,35(9):2114-2113.
LI Jian, CHENG Changkui, JIANG Tianyan, et al. Genetic algorithm for partial discharge wavelet adaptive threshold denoising [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2114 - 2116.
- [10] 刘卫东,刘尚合,胡小锋,等.小波阈值去噪函数的改进方法分析[J].高电压技术,2007,33(10):59-63.
LIU Weidong, LIU Shanghe, HU Xiaofeng, et al. Improved method analysis of wavelet threshold denoising function [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 59 - 63.
- [11] 火元莲,张健,连培君,等.基于改进小波阈值函数的闪电电场信号去噪研究[J].传感技术学报,2021,34(2):218-222.
HUO Yuanlian, ZHANG Jian, LIAN Peijun, et al. Research on Lightning Electric Field Signal denoising based on improved Wavelet Threshold Function [J]. Chinese Journal of Sensing Technology, 2021, 34(2): 218 - 222.
- [12] 李维松,许伟杰,张涛.基于小波变换阈值去噪算法的改进[J].计算机仿真,2021,38(6):348-351,356.
LI Weisong, XU Weijie, ZHANG Tao. An improved denoising algorithm based on wavelet transform threshold [J]. Computer Simulation, 2021, 38(6): 348 - 351, 356.
- [13] 吴叶丽,行鸿彦,李瑾,等.改进阈值函数的小波去噪算法[J].电子测量与仪器学报,2022,36(4):9-16.
WU Yeli, XING Hongyan, LI Jin, et al. Wavelet denoising algorithm with improved threshold function [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 9 - 16.
- [14] 高淑萍,徐振曦,宋国兵,等.基于小波阈值去噪和CEEMD的混合三端直流输电线路故障测距[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):29-40.
GAO Shuping, XU Zhenxi, SONG Guobing, et al. Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 29 - 40.
- [15] 石安平,周吕,王成,等.结合EMD与小波阈值去噪的GB-RAR桥梁监测信号去噪[J].测绘通报,2022(S2):227-232,240.
SHI Anping, ZHOU Lü, WANG Cheng, et al. GB-RAR bridge monitoring signal denoising based on EMD and wavelet threshold denoising [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022, (S2): 227 - 232, 240.
- [16] 栾孝驰,沙云东,柳贡民,等.基于WPD-KVI-Hilbert变换相结合的滚动轴承早期故障特征精准识别[J].推进技术,2022,43(2):362-373.
LUAN Xiaochi, SHA Yundong, LIU Gongmin, et al. Accurate identification for early fault features of rolling bearings based on WPD-KVI-Hilbert transform [J]. Journal of Propul-

- sion Technology, 2022, 43 (2): 362 – 373.
- [17] 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.
CAO Lingling, LI Jing, PENG Zhen, et al. Rolling bearing fault diagnosis method based on improved wavelet threshold denoising [J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35 (2): 454 – 463.
- [18] 李化, 杨新春, 李剑, 等. 基于小波分解尺度系数能量最大原则的GIS局部放电超高频信号自适应小波去噪[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 84 – 85.
LI Hua, YANG Xinchun, LI Jian, et al. Adaptive wavelet denoising of GIS partial discharge UHF signal based on the principle of maximum energy of wavelet decomposition scale coefficient [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 84 – 85.
- [19] 孙曙光, 庞毅, 王景芹, 等. 一种基于新型小波阈值去噪预处理的EEMD谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 42 – 48.
SUN Shuguang, PANG Yi, WANG Jingqin, et al. EEMD Harmonic detection method based on novel wavelet threshold denoising preprocessing [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 42 – 48.
- [20] 王宏强, 尚春阳, 高瑞鹏, 等. 基于小波系数变换的小波阈值去噪算法改进[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 165 – 168.
WANG Hongqiang, SHANG Chunyang, GAO Ruipeng, et al. Improvement of wavelet threshold denoising algorithm based on wavelet coefficient transformation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(10): 165 – 168.
- [21] 赵景波, 唐勇伟, 张磊. 基于改进小波变换的故障电弧检测方法的研究[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(2): 90 – 97.
ZHAO Jingbo, TANG Yongwei, ZHANG Lei. Research on fault arc detection method based on improved wavelet transform [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(2): 90 – 97.
- [22] 杨懿颖, 孙曼, 贾峰. 含噪电能质量信号小波降噪的方法与改进[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(6): 9 – 12.
YANG Xieying, SUN Man, JIA Feng. Method and improvement of wavelet denoising for noisy power quality signal [J]. Laboratory Research and Exploration, 2017, 36(6): 9 – 12.
- [23] 王维博, 董蕊莹, 曾文入, 等. 基于改进阈值和阈值函数的电能质量小波去噪方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 409 – 418.
WANG Weibo, DONG Ruiying, ZENG Wenru, et al. Power quality wavelet denoising method based on improved threshold and Threshold function [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 409 – 418.
- [24] PARAMESWARIAH C, COX M. Frequency characteristics of Wavelets[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17 (3): 800 – 803.
- [25] 邹春明, 谢妮娜. 改进小波阈值在电能质量信号在去噪中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(3): 114 – 116.
WU Chunming, XIE Nina. Application of improved wavelet threshold in power quality signal denoising [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(3): 114 – 116.
- [26] 张雅晖, 杨凯, 杨帆. 基于小波包能量分析和信号融合的异步电机转子故障诊断[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 161 – 168.
ZHANG Yahui, YANG Kai, YANG Fan. Rotor fault diagnosis of induction motor based on wavelet packet energy analysis and signal fusion [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 161 – 168.
- [27] 肖勇, 李博, 曹敏. 基于小波阈值的电力谐波信号去噪研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 78 – 83.
XIAO Yong, LI Bo, CAO Min. Research on de-noising of power harmonic signal based on wavelet threshold [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 78 – 83.

收稿日期: 2024-04-10; 网络首发日期: 2024-07-30

作者简介:

陈朝晖(1979), 男, 通信作者, 高级工程师, 博士, 研究方向为电网继电保护整定计算与管理, chenzh@csg.cn;

袁康健(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制, 1120008940@qq.com;

丁晓兵(1979), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护, dingxb@csg.cn。