DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.332 **中图分类号**：TN919.5 **文献标志码**：A

改进小波阈值函数在高功率电源信号去噪中的应用

孙克仲[1]，鲁迎春[1]，杨笑笑[1]，黄连生[2](中国电源学会高级会员)，
陈晓娇[2](中国电源学会高级会员)
(1.合肥工业大学微电子学院，合肥 230009；2.中国科学院等离子体物理研究所，合肥 230031)

摘要：当对高功率电源输出信号(电压/电流)进行数据采集时，不可避免地会受到电磁噪声的干扰，影响对电压/电流信号的分析。因此，对高功率电源信号进行降噪处理是必要环节。针对高功率电源输出信号的特征分析，提出1种改进小波阈值函数叠加形态滤波算法的去噪方法。改进小波阈值降噪方法可通过调节参数对随机噪声进行滤除，能够在兼顾软、硬阈值函数优点的基础上，更加有效地从含噪信号中恢复出有用信号，减少不必要的失真；形态滤波则主要用于对脉冲型干扰进行滤波。通过仿真验证，该算法在对高功率电源信号进行降噪时，效果较为明显，可极大程度地保留实际信号的特征。将所提方法与形态滤波叠加其他改进小波算法对比，信噪比提升了17.5%，实验结果进一步验证了所提算法的优越性。

关键词：高功率电源信号；小波阈值降噪；电磁噪声；形态滤波

Application of Modified Wavelet Threshold Function in High-power Power Supply Signal Denoising

SUN Kezhong[1], LU Yingchun[1], YANG Xiaoxiao[1], HUANG Liansheng[2], *Senior Member*, *CPSS*,
CHEN Xiaojiao[2], *Senior Member*, *CPSS*
(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The collection of data from high-power power supply output signals (voltage/current) will be unavoidably interfered by electromagnetic noise, which affects the analysis of voltage/current signals. Therefore, the denoising of high-power power supply signals is an essential process. For the analysis of output signal characteristics of high-power power supply, a denoising method is proposed, in which a morphological filter is superimposed on a modified wavelet threshold function. The modified wavelet threshold denoising method can filter random noises by adjusting parameters, which can recover useful signals from noisy signals more effectively and reduce unnecessary distortion while taking into account the advantages of soft/hard threshold functions. In comparison, the morphological filter is mainly used to filter impulse interference. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively reduce noise in the high-power power supply signal, which largely preserves the characteristics of the actual signal. From the comparison between the proposed method and other modified wavelet algorithms on which the morphological filter is superimposed, it is found that the signal-to-noise ratio is improved by 17.5%. In addition, the superiority of the proposed method was verified by experimental results.

Keywords: High-power power supply signal; wavelet threshold denoising; electromagnetic noise; morphological filter

收稿日期：2022-07-19；**修回日期**：2022-09-13；**录用日期**：2022-09-27；**网络首发日期**：2022-12-06

基金项目：中国科学院合肥物质科学研究院院长基金资助项目(YZJJ2021QN15)；中国科学院重大科技基础设施维修改造资助项目(DSS-WXGZ-2021-0009)；等离子体物理研究所科学基金资助项目(DSJJ-2021-07)

This work is supported by Hefei Institutes of Physical Science Fund, Chinese Academy of Sciences under the grant YZJJ2021 QN15; Upgrade Plan for Major Science and Technology Infrastructure of Chinese Academy of Sciences under the grant DSS-WXGZ-2021-0009; Science Foundation of Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences under the grant DSJJ-2021-07

目前，高功率电源系统作为电气设备的核心装置，在日常生活中不可或缺，因此针对电源输出信号的检测与分析是十分必要的。在实际情况中，当对高功率电源信号进行数据采集时，实际目标信号会受所处电磁环境中电磁噪声的干扰，导致实际信号在产生突变点时可能会被噪声所覆盖，从而影响对输出信号的判断，极有可能导致电源设备发生故障。因此，在对电源信号进行分析之前，通过滤波算法来处理实际采集信号中复杂且具有不确定性因素的电磁噪声尤为重要[1]。在实际电源工作现场中，电磁噪声主要包含白噪声与脉冲型干扰，白噪声一般幅值较小，但噪声频率遍布整个频率范围[2]。脉冲型干扰在时域中持续时间短但幅值较大，对实际信号影响较为严重。

国内外众多学者针对高功率电源信号的滤波也进行了较多深入研究。目前常用的抑制高斯白噪声的方法主要包括：有限冲击响应 FIR(finite impulse response)滤波法、自适应滤波算法[3]、经验模态分解法[2]和小波变换[4-5]等。FIR 滤波器在抑制电磁噪声方面效果较好，但需要提前设置参数，且如果想达到更好的滤波效果，就需要更高的阶数，极大地增加了计算量；自适应滤波算法相对于 FIR 滤波算法降低了计算量，但需要获取期望信号，在实际场景中较难实现。以上方法虽然在高功率电源信号中能有效滤除干扰信号，但相比之下小波变换更为简单有效，且小波变换具有良好的时域定位特性，能够更好地分解非平稳信号，有效滤除噪声干扰。考虑到小波阈值降噪虽然对白噪声滤除效果较好，但对脉冲型干扰滤除效果不佳，因此，本文通过叠加形态滤波算法实现对高功率电源信号的脉冲干扰进行处理[6]。

针对小波变换去噪算法，可选择的方法也较多，更为常用的方法包括模极大值法、系数相关法和阈值降噪法[7]。与前两者相比，小波阈值法降噪具有计算速度快、信号更完整等特点，更受青睐并得到了广泛应用。因此，在综合考虑下本文选择小波阈值去噪方法。在小波阈值降噪方法中，硬、软阈值函数是较为传统的阈值方法，在实际应用中由于硬阈值函数在阈值处不连续，会导致信号在重构时产生振荡现象；软阈值函数相对于硬阈值函数而言整体趋势较为平滑，虽然函数连续，但会导致真实值与去噪后的值之间存在振幅偏差[8]。针对此问题，研究人员也采取了很多方法进行改进。文献[9]中提出 1 种利用粒子群优化算法调整参数的改进小波阈值函数，并结合贝叶斯收缩阈值法，重构小波系数，有效改进了上述函数中存在的问题，但应用在高功率电源信号中是否有效还需要进一步实验验证；文献[10]中提出改进小波阈值函数的方法，并且采用小波熵和自适应阈值相结合的方法以确定阈值，该方法滤波效果明显，但存在多个不确定参数，计算量较大；文献[11]中也提出改进小波阈值方法，并且选用多种小波基进行比较，滤波效果有所改观，但阈值函数中存在多个暂定参数，因此依旧有提升空间。

对此，本文提出改进小波阈值函数的方法。在有效降低计算量的条件下，在不同程度高斯白噪声干扰下更好地提升对电压信号的特征提取效果，并通过叠加形态滤波算法，实现对脉冲噪声的滤除。

1　小波阈值去噪

1.1　小波阈值去噪原理

首先需要将采集的电源信号进行小波分解，分解得到的小波系数主要包含 2 个部分：近似系数和细节系数。由于有用信号在进行小波变换时，在不同尺度上与母小波的相似程度比噪声更高，对应的系数也相对较大，所以噪声的能量主要分布在较小的系数上。根据实际有用信号与噪声系数分布差异化这一特性，可通过对分解后的小波系数进行处理来达到降噪效果[12]。

假设含噪声的信号模型表示为

$$y(t)=x(t)+e(t) \tag{1}$$

式中：$y(t)$ 为含噪信号；$x(t)$ 为目标信号；$e(t)$ 为高斯白噪声。

小波变换的目的是从被噪声污染的信号 $y(t)$ 中，在尽量保证不失真的情况下恢复信号 $\hat{x}(t)$，使

得 $\hat{x}(t)$ 尽可能逼近 $x(t)$，从而最大限度地抑制或消除噪声。

1.2 小波阈值函数

小波阈值降噪法因简单有效，一经提出便在实践中广泛应用。小波阈值降噪方法中 2 个常用的阈值函数是由 Donoho 提出的经典函数，即硬阈值和软阈值，分别表示为

$$\hat{d}_{j,k}=\begin{cases}d_{j,k} & |d_{j,k}|\geqslant\lambda\\ 0 & |d_{j,k}|<\lambda\end{cases} \tag{2}$$

$$\hat{d}_{j,k}=\begin{cases}\mathrm{sgn}(d_{j,k})(|d_{j,k}|-\lambda) & |d_{j,k}|\geqslant\lambda\\ 0 & |d_{j,k}|<\lambda\end{cases} \tag{3}$$

式中：$d_{j,k}$ 为小波变换中第 j 层分解尺度下的第 k 个小波系数；$\hat{d}_{j,k}$ 为处理后的小波系数；λ 为阈值。

实践表明，这 2 种阈值方法均存在一些潜在缺点。通过对式(2)和式(3)的分析可以看出，当使用硬阈值函数处理时，虽然降噪效果较好，但由于 $\hat{d}_{j,k}$ 在阈值 λ 处存在跳变点，所以使用硬阈值降噪会使信号在重构过程中产生吉布斯现象。软阈值函数虽然克服了硬阈值函数不连续的问题，使得小波系数的处理更平滑，但当 $|d_{j,k}|\geqslant\lambda$ 时，处理后的小波系数总会存在偏差，将影响重构信号的失真程度。因此，在选择小波阈值法进行降噪时，要对阈值函数进行改进以克服缺点，更好地提升小波阈值的降噪效果。

在小波阈值降噪过程中，影响因素较多，相对更为难确定的是阈值和阈值函数。针对阈值的选择，如果阈值选取太大，会将部分有用系数去除，造成失真；反之则会导致信号去噪不完全，达不到预期效果。目前，阈值方法的选取有多种方式，使用最为广泛且较其他方法更简单有效的就是通用阈值[13]。

通用阈值定义为

$$\lambda=\sigma\sqrt{2\log N} \tag{4}$$

式中：N 为小波系数的数量；σ 为噪声标准偏差，σ 的计算公式为

$$\sigma=\frac{\mathrm{median}(|d_{j,k}|)}{0.674\,5} \tag{5}$$

2 改进小波阈值函数

2.1 小波阈值函数的改进

通过对小波原理的分析，可以看出传统小波变换中软、硬阈值函数在对目标信号去噪过程中的弊端。因此，为了保证信号在滤除过后不再出现振荡和偏差等问题，本文对传统阈值函数进行了改进，使得阈值函数具有自适应性。通过调节可变参数以适应不同特征的信号滤波，极大地提高了小波阈值降噪在实际情况下的滤波效果。在保证目标信号不失真的情况下，提高信噪比。

本文提出 1 种新的改进阈值函数，即

$$\hat{d}_{j,k}=\begin{cases}d_{j,k}-\mathrm{sign}(d_{j,k})\dfrac{\lambda}{\mathrm{e}^{b\left(\sqrt{\frac{|d_{j,k}|}{\lambda}}-1\right)}} & |d_{j,k}|\geqslant\lambda\\ 0 & |d_{j,k}|<\lambda\end{cases} \tag{6}$$

式中，b 为系数。

分析式(6)可得，当小波系数 $d_{j,k}$ 小于阈值时，将其认定为由噪声产生并置零，反之认为该部分系数来自于有用信号，便对其进行阈值处理。式(6)中，b 的取值为非负数，当 b=0 时，$|\hat{d}_{j,k}|=d_{j,k}-\lambda$，此时改进阈值函数可达到软阈值效果；当 $b\to+\infty$ 时，$\dfrac{\pm\lambda}{\mathrm{e}^{b\left(\sqrt{\frac{|d_{j,k}|}{\lambda}}-1\right)}}\to 0$，此时阈值函数等同于硬阈值函数。因此，通过对参数 b 进行调节，能够影响小波阈值降噪的性能。当 $|d_{j,k}|\to\lambda$ 时，$\hat{d}_{j,k}\to 0$，可知该函数是连续的；当 $d_{j,k}\to+\infty$ 时，$|\hat{d}_{j,k}|=d_{j,k}$。因此，本文提出的改进小波阈值函数同时解决了传统软、硬阈值函数的不连续和偏差问题，兼顾了软、硬阈值函数的优点，可实现自我调节。

参数 b 取 0.01、1、3、5、10、20 的改进阈值函数如图 1 所示，可以看出，当 b=0.01 时，改进阈值函数基本实现了达到软阈值函数的效果；当 b=20 时，本文阈值函数在短期内迅速上升，使得已处理的小波系数 $\hat{d}_{j,k}$ 快速趋于 $d_{j,k}$，且本文改进

阈值函数上升趋势更为平缓，函数值在阈值λ连续，能够更好地对目标信号进行降噪。

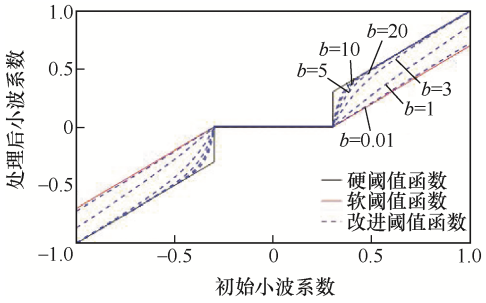


图 1　参数 *b* 取 0.01、1、3、5、10、20 的改进阈值函数

Fig.1 Modified threshold function with different values of parameter *b* (e.g., 0.01, 1, 3, 5, 10 and 20)

为了更准确高效地对信号进行去噪处理，本文采用对基于通用阈值公式进行改进的阈值计算方法。因为噪声的小波系数主要集中在第 1 层细节系数，且随尺度的增加而减小，所以当尺度变化时阈值也应该随之改变。由于传统的通用阈值不符合噪声随小波变换的规律，从而影响对信号的去噪性能[14-15]。因此，本文选用文献[16]中改进的通用阈值，经实验验证，改进后的阈值对噪声的滤除效果更好。

改进阈值公式为

$$\lambda_j = \frac{\sigma\sqrt{2\log(N_j)}}{\log(1+j)} \tag{7}$$

式中，N_j为第j层高频系数的数量。

由式(7)可见，阈值λ是可变的，在分母中增加了尺度，可通过分解层数的增加，对其进行修正。

2.2　参数 *b* 的改进

通过式(6)可以看出，可变参数 b 的设定需要对实际信号和干扰噪声的特征进行分析，根据以往经验判断给出 1 个粗略的初值。b 值的选定对信号的降噪效果会产生极大影响，因此本文通过滤波后信号中噪声强度的对比，判断目前改进阈值函数中参数 b 是否适用。若滤波后信号所含噪声强度增大，则需对参数 b 进行自适应调节，反之则保持不变。根据反馈不断对 b 值进行修正，以提高信噪比。具体实现流程如图 2 所示。

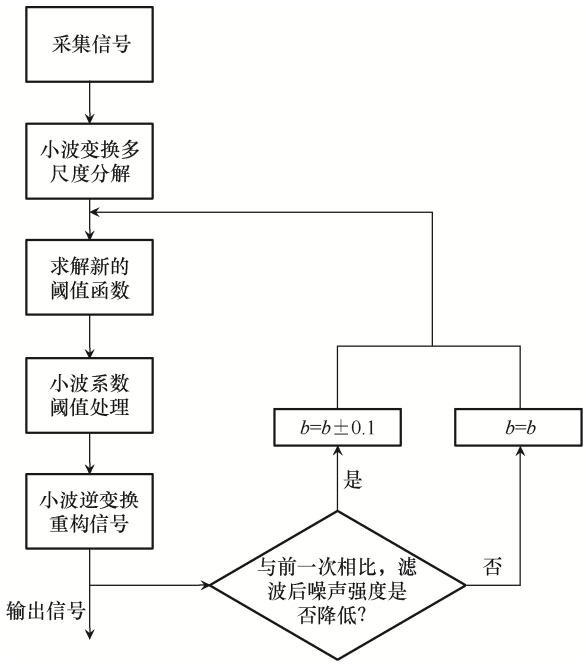


图 2　改进小波阈值降噪流程

Fig.2 Flow chart for modified wavelet threshold denoising

3　形态学滤波原理

由于小波阈值降噪仅对白噪声的滤波效果较好，对脉冲干扰效果较差，故本文在小波降噪的基础上引入了形态滤波，在电磁噪声中该滤波算法更适用于滤除脉冲干扰，对其他干扰效果不佳。形态学滤波包括腐蚀、膨胀、开运算和闭运算等计算方式。膨胀和腐蚀是最基础的 2 种方式，腐蚀是求局部最大值的操作，膨胀则相反[16-17]。设信号 $f(n)$、$g(n)$ 分为 F=(0, 1, …, N−1)和 G=(0, 1, …, M−1)上的离散函数，且 N>>M，则 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的腐蚀与膨胀运算分别定义为

$$(f\Theta g)(n) = \min\left[f(n+h) - g(h)\right]$$
$$h \in 0, 1, \cdots, M-1 \tag{8}$$

$$(f \oplus g)(n) = \max\left[f(n-h) + g(h)\right]$$
$$h \in 0, 1, \cdots, M-1 \tag{9}$$

式中：Θ 表示腐蚀运算；$\oplus$ 表示膨胀运算。

由式(8)和式(9)可得开运算和闭运算的定义分别为

$$(f \circ g)(n) = (f\Theta g \oplus g)(n) \tag{10}$$

$$(f\cdot g)(n)=(f\oplus g\Theta g)(n) \tag{11}$$

式中：$\circ$表示开运算；$\cdot$表示闭运算。

考虑到单一运算滤波效果较差，一般采用混合多种运算方式，在综合分析不同运算形态的优缺点后，本文选择交替混合滤波法，即

$$\left[(f)\mathrm{ah}(g)\right](n)=\frac{(f\circ g\cdot g)(n)+(f\cdot g\circ g)(n)}{2} \tag{12}$$

式中，ah 表示混合运算。

4 仿真验证与分析

本文使用 MATLAB R2018b 对不同工况下的电压信号进行仿真实验。采样频率设置为 12.8 kHz，采样点数为 2 048。首先，针对电源信号中出现的电压暂升，分别叠加 5、10、15 和 20 dB 高斯白噪声进行对比，以验证改进小波阈值函数的优越性。然后，针对高功率电源信号中可能出现的电压暂降、电压中断等工况，叠加信噪比为 5 dB 的高斯白噪声和脉冲干扰，以验证本文方法的有效性和实用性。由小波变换的性质可知，小波基的选择在很大程度上会影响小波阈值降噪的效果。根据所采集信号的特点，选择多种小波基进行实验对比，本文选择 db4 作为小波基[18]，分解层数设置为 5 层[19]。选用软、硬阈值函数和文献[11]所提阈值函数，以及本文的改进阈值函数对信号进行降噪处理。计算去噪后信号的信噪比 SNR(signal-to-noise ratio)和均方根误差 RMSE(root mean square error)作为不同方法降噪效果的评判依据，即

$$R_{\mathrm{SN}}=10\log_{10}\frac{\sum_{i=1}^{N}s_i^2}{\sum_{i-1}^{N}(\hat{s}_i-s_i)^2} \tag{13}$$

$$E_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\hat{s}_i-s_i)^2} \tag{14}$$

式中：s_i为初始信号；$\hat{s}_i$为去噪后信号。

从式(13)和式(14)可以看出，信噪比越大且均方根误差越小，降噪的性能越好。

2 种电压工况下仅叠加 5 dB 高斯白噪声的滤波效果见表 1。可以看出，本文所提改进小波阈值算法在对高功率电源信号中出现的不同电压工况进行降噪时，比其他阈值方法效果更显著。

表 1 不同阈值函数处理结果对比

Tab.1 Comparison among processing results with different threshold functions

电压工况	评判标准	硬阈值函数	软阈值函数	文献[11]所提阈值函数	本文改进阈值函数
电压暂降	信噪比/dB	30.744 2	44.670 3	44.870 5	45.839 0
	均方根误差	0.139 5	0.069 5	0.069 1	0.065 6
电压中断	信噪比/dB	31.832 5	47.677 0	47.777 3	48.826 1
	均方根误差	0.129 8	0.058 9	0.058 6	0.055 5

对电压暂升信号添加不同程度高斯白噪声后，采用 4 种阈值方法降噪后的信噪比和均方根误差的对比分别如图 3 和图 4 所示。可以看出，本文的改进阈值函数降噪效果较好，且在高斯白噪声为 5 dB 时相较于文献[11]的方法更优，能适应更恶劣的噪声环境。

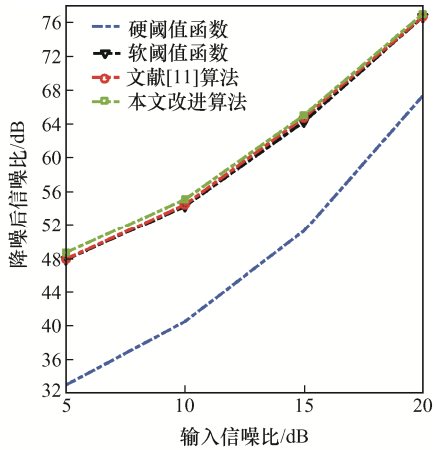


图 3 降噪后信噪比对比

Fig.3 Comparison of SNR after denoising

针对包含白噪声和脉冲干扰的电压暂降信号的滤波处理结果如图 5 所示。由滤波后的图形可以看出，本文改进阈值函数叠加形态滤波的方法

较文献[11]中阈值函数叠加形态滤波的方法降噪性能更佳。

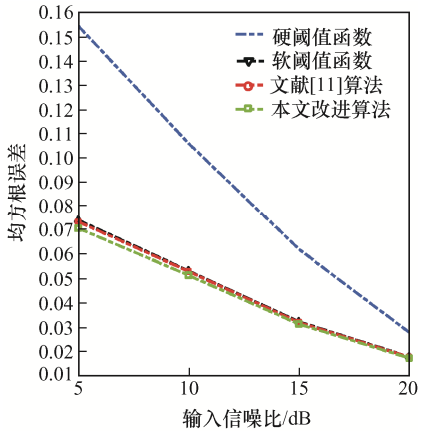


图 4　降噪后均方根误差对比

Fig.4 Comparison of RMSE after denoising

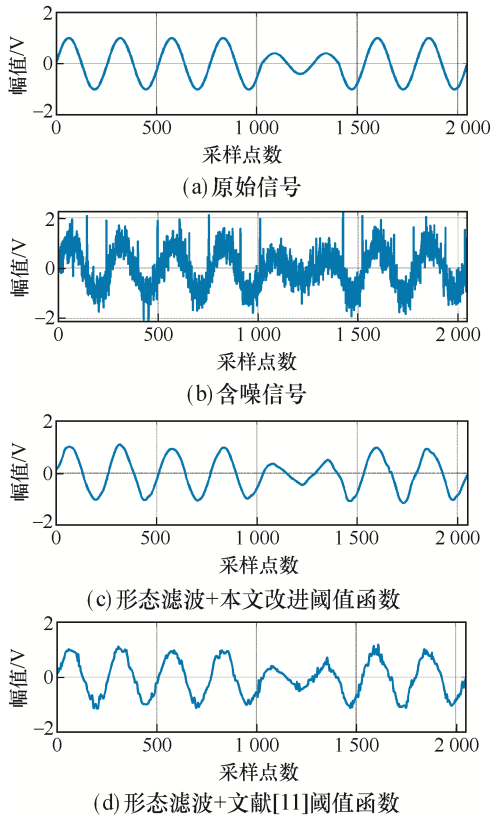


图 5　电压暂降信号去噪对比

Fig.5 Comparison of voltage sag signal denoising

对电压中断信号的滤波处理结果如图 6 所示。由图 6(b)可见，形态滤波仅滤除了脉冲干扰，再将图 6(b)中的波形进行改进小波阈值降噪处理，可将噪声基本滤除。本文所提方法虽然在电压中断处存在轻微波动，但整体效果良好，与形态滤波算法叠加文献[11]中小波去噪方法相比，效果更好。不同方法处理结果对比见表 2。

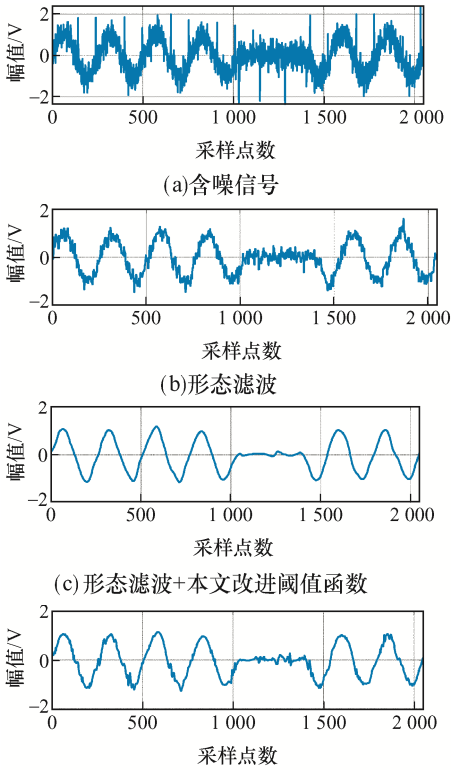


图 6　电压中断信号去噪对比

Fig.6 Comparison of voltage interruption signal denoising

表 2　不同方法处理结果对比

Tab.2 Comparison of treatment result among different methods

电压工况	评判标准	形态滤波+硬阈值函数	形态滤波+软阈值函数	形态滤波+文献[11]阈值函数	本文方法
电压暂降	信噪比/dB	25.372 9	33.753 0	35.275 7	42.231 5
	均方根误差	0.182 5	0.120 0	0.111 2	0.078 6
电压中断	信噪比/dB	27.132 0	36.709 6	39.782 5	46.739 5
	均方根误差	0.164 2	0.101 7	0.087 2	0.061 6

通过仿真验证发现，含噪信号先进行形态滤波再经过小波阈值降噪与先经过小波阈值降噪再进行形态滤波相比，前者效果更好，滤波后信号更光

滑。因此，叠加滤波算法时，选择先后顺序至关重要。本文采取先将含噪信号进行形态滤波，再进行改进小波阈值降噪的方法。

5 实验验证

将本文方法应用于高功率电源设备中，采样频率设为 20 kHz。图 7 为高功率电源柜和控制柜，图 8 为信号采集装置，所采集的电流信号为常规测试波形中的梯形波。



图 7 高功率电源柜和控制柜

Fig.7 High-power power supply cabinet and control cabinet

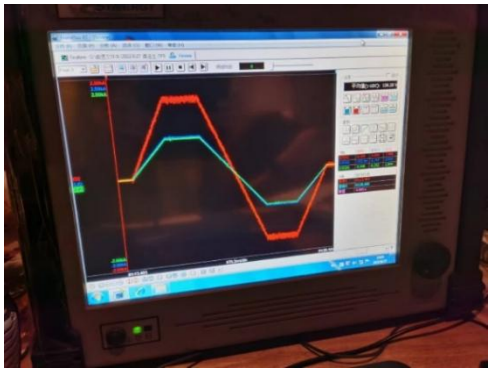


图 8 信号采集装置

Fig.8 Signal acquisition device

考虑到实际波形持续时间较长，图 9 仅显示部分已滤除的电流信号，该部分信号为梯形波的上升沿部分。由图 9 可见，电流信号中存在大量的随机噪声和脉冲干扰，对输出电流信号的分析判断造成极大影响。将电流信号采用本文方法进行降噪后，可极大程度地从噪声中提取出目标信号，如图 10 所示。

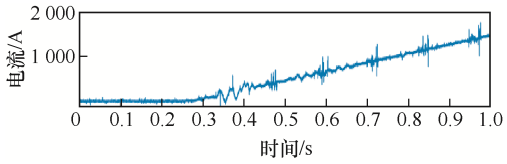


图 9 原始电流信号

Fig.9 Original current signal

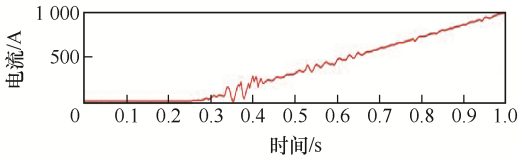


图 10 滤波后电流信号

Fig.10 Filtered current signal

图 9 和图 10 中 0.46~0.50 s 间的电流片段如图 11 所示。可以看出，采用本文所提方法滤波后的电流信号能够与实际信号吻合，保留了信号的实际特征，验证了本文所提滤波算法的实用性。

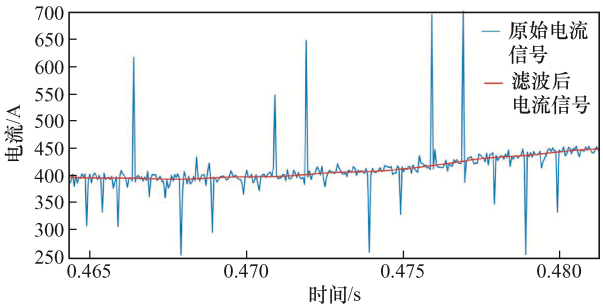


图 11 局部电流信号

Fig.11 Local current signal

6 结语

本文提出将改进小波阈值函数与形态滤波算法相叠加的方式应用于高功率电源信号降噪领域。MATLAB 仿真实验及在实际高功率电源中的应用均验证了该方法的有效性，不仅克服了传统软、硬阈值函数的缺点，与其他文献中的方法相比也有较大改进，能达到实际预期效果。

参考文献：

[1] Deng Weimin, Xu Da, Xu Yuhan, et al. Detection and classification of power quality disturbances using variational mode decomposition and convolutional neural

networks [C]// 2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). NV, USA, 2021: 1514-1518.

[2] 魏海增, 马宏忠, 黄涛, 等. 基于 EMD 的 ICA 降噪方法在电厂开关柜局部放电信号中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(5): 110-116.
Wei Haizeng, Ma Hongzhong, Huang Tao, et al. Application of ICA de-noise method based on EMD in partial discharge signal of switch cabinet in power plant [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(5): 110-116. (in Chinese)

[3] 李建闽, 曹远远, 姚文轩, 等. 基于自适应移频滤波的电力系统谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4015-4024.
Li Jianmin, Cao Yuanyuan, Yao Wenxuan, et al. Power system harmonic analysis method based on adaptive frequency-shift filtering [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4015-4024. (in Chinese)

[4] 黄道友, 任丽佳, 康健. 小波包变换与支持向量机的电力变压器故障诊断方法[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 251-258.
Huang Daoyou, Ren Lijia, Kang Jian. Fault diagnosis method for power transformer based on wavelet packet transform and support vector machine [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 251-258. (in Chinese)

[5] 唐杰, 姜有华. 基于自适应小波变换与 HHT 的混合储能容量配置[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 224-230.
Tang Jie, Jiang Youhua. Hybrid energy storage capacity allocation based on adaptive wavelet transform and HHT [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 224-230. (in Chinese)

[6] 樊高瞻, 周俊, 朱昆莉. 基于改进形态-小波阈值降噪的轴承复合故障声学诊断[J]. 振动与冲击, 2020, 39(12): 221-226, 288.
Fan Gaozhan, Zhou Jun, Zhu Kunli. An improved morphological-wavelet threshold de-noising method based acoustic diagnosis for bearing composite faults [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(12): 221-226, 288. (in Chinese)

[7] Wang Yuanhui, Zhang Bo, Ding Fuguang, et al. Estimating dynamic motion parameters with an improved wavelet thresholding and inter-scale correlation [J]. IEEE Access, 2018, 6: 39827-39838.

[8] 刘凤山, 吕钊, 张超, 等. 改进小波阈值函数的语音增强算法研究[J]. 信号处理, 2016, 32(2): 203-213.
Liu Fengshan, Lü Zhao, Zhang Chao, et al. Research on speech enhancement algorithm based on modified wavelet threshold function [J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(2): 203-213. (in Chinese)

[9] 唐鹏, 郭宝平. 改进型阈值函数寻优法的小波去噪分析[J]. 信号处理, 2017, 33(1): 102-110.
Tang Peng, Guo Baoping. Wavelet denoising based on modified threshold function optimization method [J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(1): 102-110. (in Chinese)

[10] 陈晓娟, 王文婷, 李楠. 小波熵自适应阈值的电能质量信号去噪新方法[J]. 电测与仪表, 2014, 51(15): 68-73.
Chen Xiaojuan, Wang Wenting, Li Nan. A novel denoising method for power quality signal based on wavelet entropy adaptive threshold [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(15): 68-73. (in Chinese)

[11] Luo Yan, Xue Wei, Yu Yunyun. Ultrasonic signal denoising based on a new wavelet thresholding function [C]// 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). Wuhan, China, 2018: 4363-4367.

[12] 姜涛, 高淦, 李筱静, 等. 基于小波耗散能量谱的电力系统强迫振荡源定位[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1737-1750.
Jiang Tao, Gao Han, Li Xiaojing, et al. Forced oscillation source location in power system using wavelet dissipation energy spectrum [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1737-1750. (in Chinese)

[13] Ray P, Maitra A K, Basuray A. A new threshold function for de-noising partial discharge signal based on wavelet transform [C]// 2013 International Conference on Signal Processing, Image Processing & Pattern Recognition. Coimbatore, India, 2013: 185-189.

[14] Qian Ying. A method of denoising ECG signals based on improved threshold and modulus maxima [C]// 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). Wuhan, China, 2018: 4011-4016.

[15] Liu Hui, Zhong Yi. Research on noise reduction of motor ripple based on improved wavelet threshold function [C]//

2021 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST). Guangzhou, China, 2021: 467-470.

[16] Lu Jingyi, Lin Hong, Ye Dong, et al. A new wavelet threshold function and denoising application [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 3195492.

[17] Bai Jiansheng, Yao Jinjie, Yang Zhiliang, et al. Transient electromagnetic weak signal extraction method based on multi-scale combined difference product morphological filtering [J]. IEEE Access, 2022, 10: 22140-22149.

[18] 关维国, 姚清志, 高阳, 等. 基于 db4 小波的配电网暂态电能质量扰动的检测与定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 102-106.
Guan Weiguo, Yao Qingzhi, Gao Yang, et al. Transient power quality detection and location of distribution network based on db4 wavelet transform [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 102-106. (in Chinese)

[19] 王维博, 董芯蕊, 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 Xinrui, Zeng Wenru, et al. A wavelet de-noising method for power quality based on an improved threshold and threshold function [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 409-418. (in Chinese)



孙克仲

作者简介：

孙克仲(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：高电磁环境下的信号处理。E-mail：507065629@qq.com。

鲁迎春(1979—)，男，博士，副教授。研究方向：集成电路硬件技术安全，集成电路抗辐照加固技术和集成电路测试技术。E-mail：luyingchun@hfut.edu.cn。

杨笑笑(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：硬件加速。E-mail：yangxiaoxiao@air4.wecom.work。

黄连生(1983—)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，研究员。研究方向：聚变工程磁体电源，控制系统设计及电磁兼容技术应用。E-mail：huangls@ipp.ac.cn。

陈晓娇(1989—)，女，中国电源学会高级会员，博士，副研究员。研究方向：磁体电源技术。E-mail：chenxj@ipp.ac.cn。

(责任编辑：耿越)