

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200040

# 基于 EWT 的高压电缆局部放电信号降噪研究

马星河<sup>1</sup>, 张登奎<sup>1</sup>, 朱昊哲<sup>2</sup>, 许丹<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 2. 南水北调中线建管局河南分局, 河南 郑州 450016)

**摘要:** 在测量高压电缆的局放信号时会混入以周期性窄带干扰和随机白噪声为主的噪声成分。为抑制噪声成分对局放信号测量精确度的影响, 提出一种基于经验小波变换(Empirical Wavelet Transform, EWT)的高压电缆局放信号降噪方法。利用自适应经验小波变换对含噪信号进行分解, 通过计算模态分量的峭度值, 实现对脉冲信号的定位, 将筛选出的有效特征分量进行重构。最后利用改进阈值函数去除重构信号中的冗余噪声, 实现对多噪声的有效抑制。经仿真对比及现场试验测试, 该方法能有效抑制窄带干扰和白噪声, 较大程度地保留高压电缆局放中的有效信息, 且在不同噪声环境下的降噪表现较为稳定。

**关键词:** 高压电缆; 局部放电; 经验小波变换; 峭度; 改进阈值; 降噪

## Research on noise reduction of a partial discharge signal of a high voltage cable based on EWT

MA Xinghe<sup>1</sup>, ZHANG Dengkui<sup>1</sup>, ZHU Haozhe<sup>2</sup>, XU Dan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Henan Branch, Construction Management Department and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Zhengzhou 450016, China)

**Abstract:** When measuring partial discharge signals of high-voltage cables, noise components dominated by periodic narrowband interference and random white noise are mixed. In order to suppress the influence of noise components on the accuracy of partial discharge signal measurement, a partial discharge signal noise reduction method for high-voltage cable based on Empirical Wavelet Transform (EWT) is proposed. The noisy signal is decomposed using adaptive EWT. By calculating the kurtosis value of the modal component, the pulse signal can be located, and the effective feature components screened are reconstructed. Finally, the redundant noise of a reconstructed signal is removed using an improved threshold function to effectively suppress multiple noise. By conducting simulation comparison and field test, it is shown that the method in this paper can effectively suppress narrow-band interference and white noise, retain the effective information in partial discharge of high-voltage cable to a large extent, and perform stable noise reduction in different noise environments.

This work is supported by Natural Science Foundation of Henan Province (No. 182300410280) and Science and Technology Research Project of Henan Province (No. 182102310936).

**Key words:** high voltage cable; partial discharge (PD); empirical wavelet transform (EWT); kurtosis; improved threshold; denoising

## 0 引言

高压电缆在长时间的工作下, 由于绝缘老化和电场不均等原因, 会引起局部放电(Partial Discharge, PD)现象<sup>[1]</sup>。对局部放电进行检测可以对高压电缆的绝缘状况进行评估, 对于维护电缆使用稳定性和安全性有着重要意义。由于局放信号较为微弱, 且在进行局部放电采集时, 测试现场会存在周期性窄带

河南省科技攻关项目资助(182102310936)

干扰<sup>[2]</sup>、白噪声<sup>[3]</sup>等大量的电磁干扰, 使局放信号检测的准确性难以得到保障<sup>[4]</sup>。因此对采集到的含噪局放信号所包含的各种噪声信息进行降噪处理, 是保障电缆绝缘状况评估准确性的重要步骤<sup>[5]</sup>。

在局部放电的噪声抑制方面, 文献[6]提出快速傅里叶变换功率谱对频域进行降噪, 该方法对周期性窄带干扰具有很好的效果, 但局放信号组成较为复杂, 以及频谱泄漏等问题, 限制了在复杂噪声环境下的降噪效果。小波变换虽然克服了傅里叶变换时窗口大小不随频率变化等短板<sup>[7]</sup>, 但其时频谱在

基金项目: 河南省自然科学基金项目资助(182300410280);

频率方向仍有过多冗余。文献[8-9]提出将经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)应用于局部放电信号降噪中, 因其自适应分解的特点受到广泛应用, 但 EMD 分解时易受非平稳信号的突变影响, 引起过包络和欠包络现象, 易导致模态混叠、端点效应等问题<sup>[10]</sup>, 限制了降噪效果。文献[11]提出基于变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)的降噪方法, 其自适应变分模态有效避免 EMD 的模态混叠等缺陷, 但二阶惩罚因子以及模态数  $K$  的手动选取使其无法达到自适应降噪的要求。

经验小波变换<sup>[12-13]</sup>是学者 Giles 在 2013 年提出的, 创造性地将 EMD 和小波变换理论相结合, 克服了 EMD 的模态混叠缺陷, 且较大程度地减少频谱分割时引起的过分解等误差。

基于此, 本文依据高压电缆局放信号的局放特性, 提出基于经验小波变换(EWT)的降噪方法, 解决高压电缆局放信号采集过程中存在的窄带干扰、白噪声问题。通过仿真信号以及现场测试信号进行去噪实验, 引入多种降噪指标, 与传统降噪方法进行对比, 从多角度验证了本文所提降噪方法的有效性和自适应性。

## 1 基本原理

### 1.1 经验小波变换

经验小波变换(EWT)是一种通过构建自适应小波来提取不同 MF 的非平稳信号的分解方法<sup>[12]</sup>。EWT 可以避免分解时出现的模态混叠问题, 该方法步骤如下。

1) 定义  $\hat{f}$  和  $\check{f}$  分别为傅里叶变换和其反变换。

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

2) 将傅里叶变换应用到信号  $f(t)$  中,  $t = \{t_i\}_{i=1,2,\dots,M}$ ,  $M$  为样本个数, 求出  $X(z)$ ,  $M = \{M_i\}_{i=1,2,\dots,N}$ , 在傅里叶谱中求出  $M$  的最大值并推出相应的频率。接下来对傅里叶谱  $[0, Fs/2]$  进行  $N$  段分割, 确定分段的边界。  $N$  表示最大的模式个数。

3) 通过傅里叶频谱进行适当的分割, 提取出不同的频率分量。将分割的两个连续最大值的边界定义为  $\Omega_i$ 。

$$\Omega_i = \frac{z_i + z_{i+1}}{2} \quad (2)$$

式中:  $z_i$  和  $z_{i+1}$  为分割的两个频率; 边界  $\Omega$  定义为  $\Omega = \{\Omega_i\}_{i=1,2,\dots,N-1}$ 。

4) 定义滤波器: 由一个低通滤波器和  $n-1$  个基于边界的带通滤波器组成的  $n$  个小波滤波器组, 以

此对每个检测到的频率分段进行尺度变换和低通滤波<sup>[14]</sup>。尺度函数  $\varphi_1(\omega)$  的傅里叶变换表达式和经验小波  $\psi_i(\omega)$  的表达式如式(3)和式(4)所示。

$$\varphi_1(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq (1-\gamma)\Omega \\ \cos\left(\frac{\pi}{2}\alpha(\gamma, \Omega_i)\right), & (1-\gamma)\Omega_i < |\omega| \leq (1+\gamma)\Omega \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$\psi_i(\omega) = \begin{cases} 1, & (1+\gamma)\Omega_i < |\omega| < (1-\gamma)\Omega_{i+1} \\ \cos\left(\frac{\pi}{2}\alpha(\gamma, \Omega_{i+1})\right), & (1-\gamma)\Omega_{i+1} \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\Omega_{i+1} \\ \sin\left(\frac{\pi}{2}\alpha(\gamma, \Omega_i)\right), & (1-\gamma)\Omega_i \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\Omega \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\alpha(\gamma, \Omega_i) = \beta((1/2)\gamma\Omega_i)(|\omega| - (1-\gamma)\Omega_i)$ ,  $\gamma$  保证两个连续变换之间不重叠, 将  $\beta(x)$  定义为

$$\beta(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3) \quad (5)$$

5) 执行尺度和小波变换获得不同模式的分量, 近似相关系数可用具有经验尺度函数  $\varphi_1$  和经验小波函数  $\psi_i$  的分析信号  $f$  的内积表示。

$$W_f(1, t) = \langle f, \varphi_1 \rangle = \int f(\tau)\overline{\varphi_1(\tau-t)}d\tau \quad (6)$$

同样, 通过经验小波分析信号  $f$  的内积可以求出系数:

$$W_f(i, t) = \langle f, \psi_i \rangle = \int f(\tau)\overline{\psi_i(\tau-t)}d\tau \quad (7)$$

式中,  $W_f(i, t)$  表示第  $i$  个滤波器在  $t$  时间点的系数。故信号  $f(t)$  重构的公式为

$$f(t) = W_f^e(0, t) * \varphi_1(t) + \sum_{n=1}^N W_f^e(n, t) * \psi_n(t) \quad (8)$$

式中:  $*$  表示卷积; 信号  $f(t)$  可分为  $N$  个经验模态分量函数:

$$f_0(t) = W_f^e(0, t) * \varphi_1(t) \quad (9)$$

$$f_k(t) = W_f^e(k, t) * \psi_k(t), \quad (k = 1, 2, \dots, N-1) \quad (10)$$

### 1.2 峭度准则

峭度(Kurtosis)是一种归一化 4 阶中心距, 用以表示信号的分布特性。局放信号具有明显的衰减振荡和陡峭的上升沿, 通常认为是局放信号中的突变成分, 峭度指标可用以表示局放信号中非平稳信号成分, 并将其进行定位<sup>[15]</sup>, 峭度公式如式(11)所示。

$$K = \frac{E(x-\mu)^4}{\sigma^4} \quad (11)$$

式中:  $\mu$  表示信号的均值;  $\sigma$  为信号的标准差;  $E(x-\mu)^4$

为其 4 阶数学期望。

电缆未产生局部放电时，测量到的信号峭度值约等于 3，其幅值趋于正态分布。随着局放信号的增加，测量的峭度值会随之增加，峭度值越大，说明局放信号越强烈 [16]。

### 1.3 改进阈值

实际采集到的局放信号包含复杂的噪声成分，在对信号进行分析之后仍需要对信号进行阈值降噪 [17] 才可以得到较为理想的信号波形。在阈值的量化上通常有硬阈值和软阈值之分 [18]，硬阈值函数为

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} W_{j,k} & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |W_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (12)$$

软阈值函数为

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(W_{j,k})(|W_{j,k}| - \lambda) & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |W_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (13)$$

式中： $W_{j,k}$  为小波系数； $\lambda$  为应用后的小波系数阈值。硬阈值在  $|W|=\lambda$  处不连续，软阈值虽然在  $|W|=\lambda$  处连续，但在  $|W| \geq \lambda$  内会对小波系数过度压缩，影响信号的处理效果。文献[19-20]提出的一种改进阈值函数降低了软阈值和硬阈值的偏差，其改进的阈值函数如式(14)所示。

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(W_{j,k})(|W_{j,k}| - \lambda e^{(\lambda - W_{j,k})}) & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ W_{j,k} e^{-f} & |W_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (14)$$

改进的阈值函数始终连续，降低了软硬阈值带来的偏差，提高了阈值函数的噪声抑制能力。除了阈值函数，阈值  $\lambda$  也会影响降噪的效果，引入文献[20]中的公式，如式(15)所示。

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N} / \log_2(1 + j) \quad (15)$$

式中： $N$  表示信号长度； $\sigma$  为信号的标准差，根据小波系数  $w$  来估计：

$$\sigma = \frac{|\text{median}(W_{j,k})|}{0.6745} \quad (16)$$

## 2 基于经验小波变换的降噪方法

本文选择经验小波变换降噪法对局放信号进行分析处理，加入峭度准则的 IMF 筛选，最后进行降噪处理，最终得到较为接近真实情况的局放脉冲波形。具体步骤如下：

1) 利用 EWT 的自适应性，将提取到的含噪局放信号进行分解，得到若干 IMF 分量的和。

2) 对分解所得到的 IMF 分量分别进行峭度值  $K$  的计算，剔除与原始信号相关度低、含噪成分较大

的模式分量，选取出  $K$  的值较大的 IMF 分量，将其进行信号重构。

3) 利用改进阈值法对步骤 2) 得到的重构信号进行降噪处理，得到最终的降噪信号。

信号降噪流程如图 1 所示。

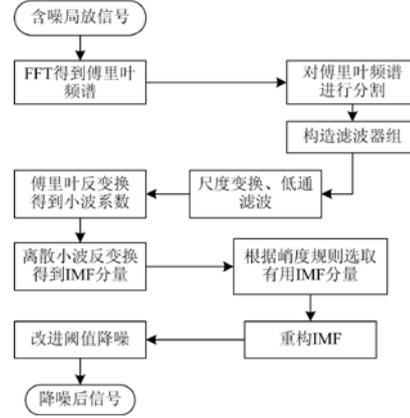


图 1 信号降噪流程图

Fig. 1 Noise reduction flowchart

## 3 仿真分析

### 3.1 局放脉冲模型

为验证本文所提方法的实际效果，模拟 4 组脉冲信号进行降噪处理。查阅文献以及大量的现场局放信号采集，局部放电信号分为单指数衰减、单指数振荡衰减、双指数衰减、双指数振荡衰减 [21-22] 四种数学模型，表达式如式(17)一式(20)所示。

$$f_1(t) = A_1 e^{-t/\tau} \quad (17)$$

$$f_2(t) = A_1 e^{-t/\tau} * \sin(2\pi f_{c1} t) \quad (18)$$

$$f_3(t) = A_2 (e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \quad (19)$$

$$f_4(t) = A_2 (e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) * \sin(2\pi f_{c2} t) \quad (20)$$

式中： $A$  为信号幅值， $A_1=2$  mV、 $A_2=10$  mV； $\tau$  为衰减系数，均为  $5 \mu\text{s}$ ；采样时间为  $50 \mu\text{s}$ ； $f_{c1}$  和  $f_{c2}$  为振荡频率，分别为  $5$  MHz 和  $10$  MHz。本文所用仿真软件为 MATLAB2016a，模拟信号采样频率设定为  $50$  MHz，模拟 4 类型的局放脉冲，在  $50 \mu\text{s}$  内加入以上四种形式的脉冲模型，如图 2 所示。

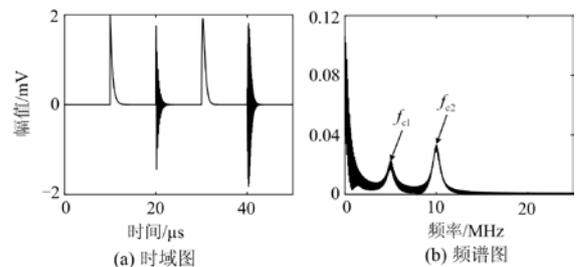


图 2 纯净脉冲信号及其频谱

Fig. 2 Pure pulse signal and its spectrum

在实际采集电缆的局放信号时, 会混入常见的随机白噪声和周期性窄带干扰。故在原始 PD 脉冲基础上叠加(0, 0.5<sup>2</sup>)分布的高斯白噪声信号模拟随机噪声干扰。而连续的周期性窄带干扰, 其时域波形一般为正弦或余弦状<sup>[23]</sup>, 其公式如式(21)所示。

$$p(t) = A_i \sum_{i=1}^n \sin(2\pi f_i t) \quad (21)$$

式中:  $A_i$  为各干扰的幅值, 均设为 0.1 mV; 窄带干扰的频率  $f_i$  分别设为 1.2 MHz、8 MHz、16 MHz、20.7 MHz。最终含噪的高压电缆局放波形如图 3 所示。

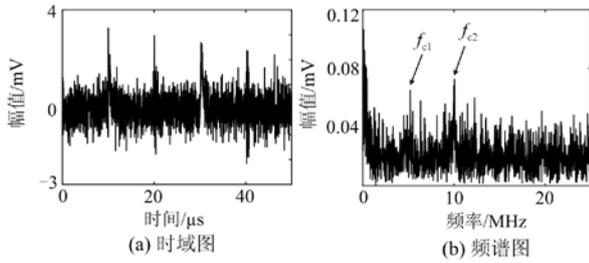


图 3 含噪局放信号及其频谱

Fig. 3 Signal with noise and its spectrum

从图 3 中左侧时域图可以看出局放的脉冲信号已完全淹没在噪声信号中, 从右侧 FFT 图中可以看出  $f_{c1}$  和  $f_{c2}$  两频率峰值已失去原有信息。

### 3.2 EWT 自适应降噪分析

#### 3.2.1 降噪评价指标

本文选用信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)、均方根误差(Root-mean-square Error, RMSE)以及波形相似系数(Normalized Correlation Coefficient, NCC)来评价降噪质量的好坏<sup>[24-25]</sup>, 公式定义如下。

$$SNR = 10 \lg \left( \frac{\sum_{i=1}^n x^2(i)}{\sum_{i=1}^n (x(i) - \hat{x}(i))^2} \right) \quad (22)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}(i) - x(i))^2} \quad (23)$$

$$NCC = \frac{E((x - \mu_x)(\hat{x} - \mu_{\hat{x}}))}{\sigma_x \sigma_{\hat{x}}} \quad (24)$$

式中:  $x(i)$  为含噪信号;  $\hat{x}(i)$  为消噪后的信号;  $\mu_x$  和  $\mu_{\hat{x}}$  分别为  $x$ 、 $\hat{x}$  的期望;  $\sigma_x$  和  $\sigma_{\hat{x}}$  分别为  $x$ 、 $\hat{x}$  的标准差。SNR 指标越高, 表明降噪后信号所含信息量越多; RMSE 的值越接近 0, 说明降噪后脉冲信号畸变越小; NCC 的值越接近于 1, 则降噪信号与原始

信号相似度越高。以上三项指标从不同方面综合评估降噪的结果。

#### 3.2.2 EWT 结果分析

将 EWT 分解方法应用于含噪的局放信号, 其结果如图 4 所示。

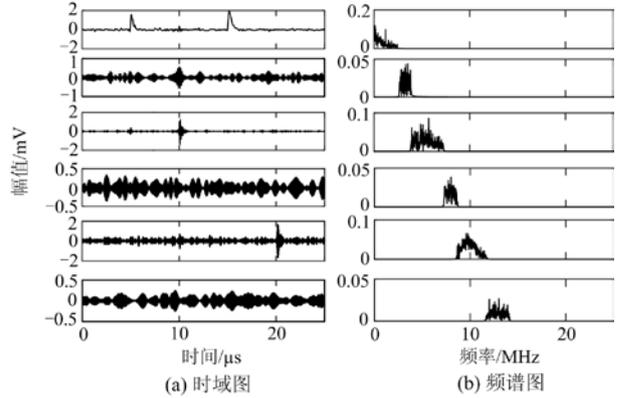


图 4 EWT 分解时域及频谱图

Fig. 4 EWT decomposition time-domain and spectrum diagrams

EWT 将局放信号分解为从低频到高频依次排列的模态分量, 避免了模态混叠, 其中 IMF1、IMF3、IMF5 与实际脉冲分量一致。在对应的 FFT 频谱图中, 频率均匀地分布在各个不同频段, 有效信息对应频率为实际所添加干扰频率。

本文所提出的 EWT 分解方法在处理多分量信号时表现出更加良好的分解性能, 可实现对不同分量信号的区分, 在分解的自适应性以及分解精确度上更具优越性。

#### 3.2.3 IMF 重构降噪

经 EWT 分解后的 IMF 波形分量(图 4)根据峭度值进行筛选, 各 IMF 峭度值如表 1 所示。

表 1 IMF 分量峭度值

Table 1 Kurtosis value of IMF components						
IMF	1	2	3	4	5	6
峭度值	24.235 4	3.042 8	20.295 9	3.881 1	22.879 4	2.994 2

从表 1 中可以看出, IMF1、IMF3、IMF5 的峭度值远远大于 3, 证明在三处 IMF 分量存在明显的局放脉冲, 而 IMF2、IMF4、IMF6 的峭度值平均为 3.22, 故不作为信号重构的成分, 最终选择 IMF1、IMF3、IMF5 进行信号重构。重构信号如图 5 所示。

对 IMF 分量进行重构后, 对重构信号进行改进阈值法降噪处理, 得到最终的降噪波形, 最终降噪效果如图 6 所示。

本文提出的方法从降噪波形与时域图可看到降噪后信号相较于原始局放信号已较大程度上还原, 脉

冲波形以及幅值相较于纯净脉冲信号未有明显变化，

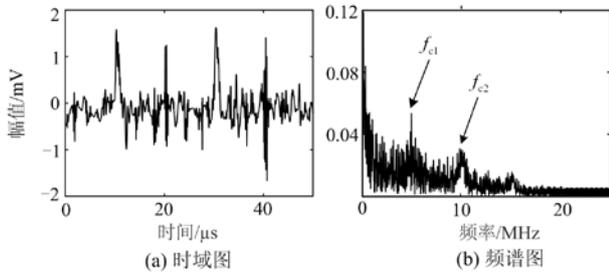


图 5 重构后信号  
Fig. 5 Reconstructed signal

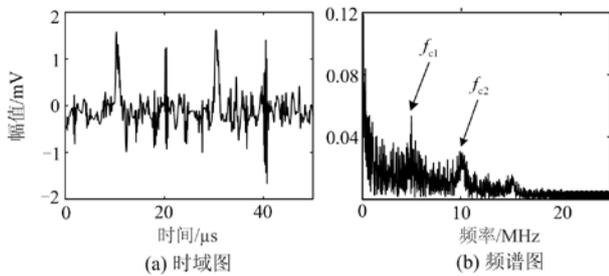


图 6 最终降噪结果  
Fig. 6 Final denoising results

整体波形较为平滑，右侧 FFT 图两处频率峰值基本清晰可见，且毛刺较少，对窄带干扰和高斯白噪声有着较好的抑制能力。

本文采用三种降噪方法对含噪局放信号进行对比。方法一为 EMD 分解和小波降噪，采用 db6 小波、5 层分解；方法二为 EWT 分解和小波降噪，采用 db5 小波、4 层分解；方法三为本文所提方法。表 2 为仿真波形降噪前后各评价参数指标。

表 2 降噪前后评价参数

Table 2 Evaluation parameters before and after denoising

标准	降噪前	方法一	方法二	方法三
RMSE	0.393 4	0.156 5	0.070 1	0.029 8
SNR	4.051 5	8.054 4	11.547 4	16.718 2
NCC	0.421 9	0.536 8	0.611 8	0.847 3

### 3.3 不同噪声环境下降噪效果

为验证本文所提方法在不同噪声环境下的降噪表现，向采集到的局放信号加入信噪比分别为 3 dB、8 dB、12 dB 的白噪声信号，降噪方法仍选用 EMD 分解后小波降噪、EWT 分解后小波降噪以及本文所提方法。各方法降噪的评价指标如表 3 所示。结果表明：本文所提方法在不同噪声环境下的降噪表现优于其他两种方法，是更为理想的高压电缆局

部放电信号去噪方法。

表 3 各方法对局放信号降噪的评价指标

Table 3 Evaluation indicators for partial discharge signals denoising of each method

标准	所加噪声/dB	降噪前	方法一	方法二	本文方法
RMSE	3	0.109 6	0.123 1	0.059 1	0.015 6
	8	0.734 5	0.250 8	0.137 7	0.051 3
	12	1.399 8	0.520 3	0.352 5	0.134 5
SNR	3	6.438 4	9.096 5	12.285 3	19.059 3
	8	1.339 8	6.006 5	8.609 3	12.340 1
	12	-1.460 5	3.990 3	5.330 3	11.718 2
NCC	3	0.509 4	0.268 4	0.712 2	0.907 3
	8	0.344 5	0.250 4	0.553 8	0.779 9
	12	0.240 1	0.162 2	0.320 6	0.660 6

## 4 现场试验

为进一步论证本文所提方法的有效性，将所提方法应用于实际高压电缆的局放信号进行降噪处理。选择实验室 6 kV XLPE 电缆，电缆其中三处经不同程度锤击处理后，加入 6 kV 高压测量，实验接线如图 7 所示。测试采用实验室自制高频电流传感器作为采集装置，最大带宽为 80 MHz，示波器采用 Agilent MSO7034B(带宽为 350 MHz，采样率上限为 2 GSa/s)。由于实验室环境达不到现场噪声标准，故在其监测信号中加入 0.4 mV、25 MHz 的窄带干扰信号。图 8 是实验室采集到的局放信号。

由于现场大量的噪声干扰，所采集信号已无法提取有效的电缆局放信息。

图 9 为本文所提降噪方法的处理结果。该方法对局放信号中的窄带干扰和白噪声有较强的抑制能力，降噪后波形整体趋于平稳，有效还原了高压电缆局放信号中的有效成分，具有较强的实际应用能力。

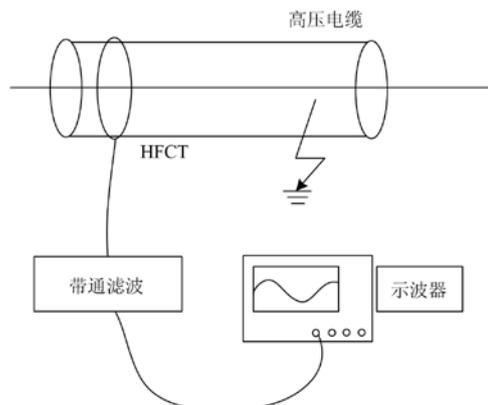


图 7 现场接线图

Fig. 7 Field wiring diagram

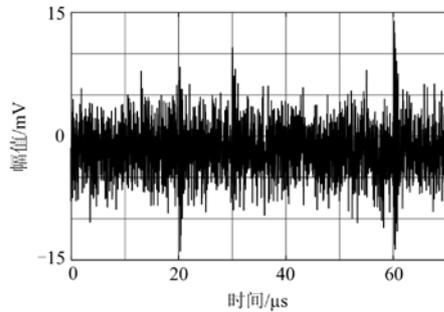


图 8 实测含噪声局放信号

Fig. 8 Actual measured partial discharge signal with noise

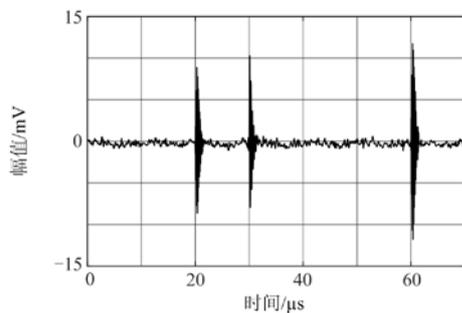


图 9 降噪后局放信号

Fig. 9 Partial discharge signal after denoising

## 5 结论

本文基于经验小波变换, 结合峭度值选取规则以及改进阈值自适应降噪算法, 实现对高压电缆局放信号的降噪, 提升高压电缆绝缘状况的监测精度。通过仿真实验以及现场试验验证, 得出结论如下:

1) 本文使用 EWT 算法对含噪声局放信号进行分解处理, 利用 EWT 的自适应性将信号分解为不同频率成分模态分量的和, 有效避免了模态混叠等现象。

2) 通过对 IMF 分量进行峭度  $K$  的计算, 提取有效信息的特征分量, 并对重构信号进行改进阈值自适应降噪, 进一步提升噪声抑制效果。

3) 通过实验室仿真分析以及现场实测局放信号处理, 利用不同噪声环境对本文方法进行验证, 并与文中所提两种传统降噪方法作对比, 结果表明本文所提方法可较高程度地抑制高压电缆局放信号中的高斯白噪声和窄带干扰, 可实际应用 to 高压电缆的局放监测中。

## 参考文献

[1] 侯慧娟, 盛戈皞, 姜文娟, 等. 基于信号模型参数辨识的变电站局部放电电磁波信号重构[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 209-216.

HOU Huijuan, SHENG Gehao, JIANG Wenjuan, et al. Reconstruction of partial discharge electromagnetic wave signal in substation based on signal model parameter identification[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 209-216.

[2] 赵妍, 董爽, 李天云. 局部放电信号检测的 HHT-MDL 自适应阈值算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 45-50.

ZHAO Yan, DONG Shuang, LI Tianyun. HHT-MDL adaptive threshold algorithm for partial discharge signal detection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 45-50.

[3] 王恩俊, 张建文, 马晓伟, 等. 基于 CEEMD-EEMD 的局部放电阈值去噪新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 93-98.

WANG Enjun, ZHANG Jianwen, MA Xiaowei, et al. CEEMD-EEMD-based new method of partial discharge threshold denoising[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 93-98.

[4] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.

LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review of partial discharge detection technology for electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.

[5] HUSSEIN R, SHABAN K B, EL-HAG A H. Wavelet transform with histogram-based threshold estimation for online partial discharge signal denoising[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64: 3601-3614.

[6] 罗新, 牛海清, 胡日亮, 等. 一种改进的用于快速傅里叶变换功率谱中的窄带干扰抑制的方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 167-175, 200.

LUO Xin, NIU Haiqing, HU Riliang, et al. An improved method for narrowband interference suppression in fast Fourier transform power spectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 167-175, 200.

[7] 李天云, 程思勇, 杨梅, 等. FFT 与小波分析应用于抑制局部放电窄带干扰[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 71-74, 123.

LI Tianyun, CHENG Siyong, YANG Mei, et al. Application of FFT and wavelet analysis to suppress narrow-band interference of partial discharge[J]. High Voltage Technology, 2007, 33(12): 71-74, 123.

[8] 姚林朋, 黄成军, 钱勇. 基于 EMD 的局部放电窄带干扰抑制算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(5): 33-38.

YAO Linpeng, HUANG Chengjun, QIAN Yong. Partial discharge narrowband interference suppression algorithm based on EMD[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2007, 19(5): 33-38.

[9] 刘震宇, 刘振英, 范贺明. 基于 EMD-ICA 的高压电缆局部放电信号去噪研究[J]. 电力系统保护与控制,

- 2018, 46(24): 83-87.
- LIU Zhenyu, LIU Zhenying, FAN Heming. Research on partial discharge signal denoising of high voltage cable based on EMD-ICA[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 83-87.
- [10] 刘志刚, 李文帆, 孙婉璐. Hilbert-Huang 变换及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 109-116.
- LIU Zhigang, LI Wenfan, SUN Wanlu. Hilbert-Huang transformation and its application in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 109-116.
- [11] 马星河, 朱昊哲, 刘志怀, 等. 基于 VMD 的电力电缆局部放电信号自适应阈值降噪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 145-151.
- MA Xinghe, ZHU Haozhe, LIU Zhihui, et al. VMD-based adaptive threshold noise reduction method for partial discharge signals of power cables[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 145-151.
- [12] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16): 3999-4010.
- [13] GILLE S, JERM E, TRAN G, et al. 2D empirical transforms, wavelets, ridgelets, and curvelets revisited[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2014, 7(1): 157-186.
- [14] DAUBECHIES I, HEIL C. Ten lectures on wavelets[J]. Computers in Physics, 1998, 6(3): 1671-1671.
- [15] 徐学伟, 李静鹏, 马驰, 等. 基于 UHF 信号特征参数指纹图谱的局部放电定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 84-91.
- XU Xuewei, LI Jingpeng, MA Chi, et al. Partial discharge location method based on fingerprint of UHF signal characteristic parameters[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 84-91.
- [16] 张安安, 何聪, 孙茂一, 等. 基于峭度和时域能量的局放脉冲提取算法[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(4): 559-564.
- ZHANG An'an, HE Cong, SUN Maoyi, et al. Partial discharge pulse extraction algorithm based on kurtosis and time domain energy[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(4): 559-564.
- [17] 沙宇洋, 席丽霞, 张晓光, 等. 基于小波阈值去噪的偏振模色散测量[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 226-231.
- SHA Yuyang, XI Lixia, ZHANG Xiaoguang, et al. Measurement of polarization mode dispersion based on wavelet threshold denoising[J]. Chinese Laser, 2018, 45(11): 226-231.
- [18] 程浩, 袁月, 王恩德, 等. 基于小波变换的自适应阈值微震信号去噪研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2018, 39(9): 1332-1336.
- CHENG Hao, YUAN Yue, WANG Ende, et al. Research on denoising of adaptive threshold microseismic signal based on wavelet transform[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2018, 39(9): 1332-1336.
- [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. An EEMD harmonic detection method based on new wavelet threshold denoising preprocessing[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 42-48.
- [20] CUI Huimin, ZHAO Ruimei, HOU Yanli. Improved threshold denoising method based on wavelet transform[J]. Physics Procedia, 2012, 33(1): 1354-1359.
- [21] 钱勇, 黄成军, 陈陈, 等. 多小波消噪算法在局部放电检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 89-95.
- QIAN Yong, HUANG Chengjun, CHEN Chen, et al. Application of multi-wave denoising algorithm in partial discharge detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 89-95.
- [22] 周凯, 谢敏, 赵世林, 等. 基于改进 Fast-ICA 的局部放电在线监测窄带干扰高保真性抑制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2604-2612.
- ZHOU Kai, XIE Min, ZHAO Shilin, et al. High-fidelity suppression method for on-line monitoring of narrow-band interference based on improved Fast-ICA[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2604-2612.
- [23] 王永强, 谢军, 律方成. 基于改进量子粒子群优化稀疏分解的局放信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 320-329.
- WANG Yongqiang, XIE Jun, LÜ Fangcheng. Partial discharge signal denoising method based on improved quantum particle swarm optimization sparse decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 320-329.
- [24] HUSSEIN R, SHABAN K B, EL-HAG A H. Denoising different types of acoustic partial discharge signals using power spectral subtraction[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 44-50.
- [25] 唐炬, 高丽, 彭莉, 等. 非平稳振荡局放信号去噪效果评价参数研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 66-70.
- TANG Ju, GAO Li, PENG Li, et al. Research on evaluation parameters of denoising effect of non-stationary oscillation partial discharge signal[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 66-70.

收稿日期: 2020-01-09; 修回日期: 2020-03-20

作者简介:

马星河(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电气设备状态监测; E-mail: maxinghe@hpu.edu.cn

张登奎(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化与控制。E-mail: zhangdengkui@home.hpu.edu.cn

(编辑 魏小丽)