



# 含窄带噪声和白噪声的复杂染噪局部 放电信号提取及应用

孙抗<sup>1\*</sup>, 李万建<sup>1</sup>, 张静<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 河南 焦作 454000; 2. 国网河南省电力公司商丘供电公司 河南 商丘 476000)

**【摘要】**复杂噪声环境下, 电力设备局部放电信号的高完备度提取是实现其运行状态在线评估的关键。该文提出一种基于自适应噪声的总体集合经验分解(CEEMDAN)和改进小波包结合的复杂染噪局放信号提取方法。首先, 通过自适应CEEMDAN将染噪信号进行分解, 利用奇异值分解(SVD)算法对分量中包含的窄带噪声和频率混叠进行抑制, 再根据信号间的相关系数确定有效分量并重构。最后, 采用改进的小波包阈值法对重构信号中的白噪声进行滤除。利用该文算法分别对仿真数据和实测数据进行去噪处理, 定量分析表明, 该方法可有效去除白噪声和窄带噪声干扰, 提取的局放信号波形畸变小、能量损失小, 能够满足后续的工程应用需求。

**关键词** 自适应总体集合经验模态分解; 相关系数; 去噪; 局部放电; 奇异值分解  
**中图分类号** TM93 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2020245

## Denoising of Complex Noisy Partial Discharge Pulses with Narrowband Interference and White Noise

SUN Kang<sup>1\*</sup>, LI Wan-jian<sup>1</sup>, and ZHANG Jing<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University Jiaozuo Henan 454000;  
2. Shangqiu Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company Shangqiu Henan 476000)

**Abstract** In a complex noise environment, the high completeness extraction of partial discharge (PD) signals of power equipment is the key to the online evaluation of its status. This paper proposes a method for extracting complex noisy PD signals based on adaptive complete ensemble empirical mode decomposition (CEEMDAN) and wavelet packet. Firstly, the noisy PD signal is decomposed by adaptive CEEMDAN, and the narrowband noise and frequency aliasing contained in the component are suppressed by using singular value decomposition (SVD) algorithm. Then, the effective components are determined according to the correlation coefficient to reconstruct the signals. Finally, the modified wavelet packet threshold method is employed to filter the white noise in the reconstructed signal. The algorithm is used to denoise the simulated data and the measured data separately. The quantitative analysis results show that the method can effectively remove white noise and narrowband noise interference. The waveform of the extracted PD signal has small distortion and energy loss, which can meet the subsequent application.

**Key words** adaptive complete ensemble empirical mode decomposition; correlation coefficient; denoising; partial discharge; singular value decomposition

局部放电(以下简称局放)作为高压电气设备绝缘性能退化的主要表征形式,局放监测是评估电气设备在线运行状态的主要技术手段<sup>[1-4]</sup>。然而,局放信号十分微弱,且容易被运行环境中多种较高水平的噪声严重干扰甚至淹没,难以实现高完备度的提取,进而影响后续的局放定位精度<sup>[5-6]</sup>以及模式识别准确率<sup>[7-8]</sup>。

在实际运行条件下,局放信号中通常含有白噪声、周期性脉冲干扰和周期性窄带干扰这3类噪声干扰<sup>[9]</sup>。其中,周期性脉冲干扰具有很强的规律性,容易滤除。白噪声的频带分布较广,可能在各个频段上与局放信号重叠;周期性窄带干扰由于常见且强度较大,针对这两类噪声的局放信号去噪是当前的研究重点和难点。

收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-07-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61403130); 河南省科技攻关项目(202102210092)

作者简介: 孙抗(1982-),男,副教授,主要从事设备在线监测、智能电器等方面的研究。E-mail: sunkang@hpu.edu.cn

近年来, 国内外学者针对局放信号去噪做了较深入的研究。文献 [10] 将广义 S 变换与奇异值分解相结合, 对局放信号中的白噪声进行抑制, 但算法复杂度高, 难以满足在线监测应用需求; 文献 [11] 利用快速独立分量分析法 (FastICA) 对局放信号中的窄带干扰进行抑制, 但去噪后信号的幅值和相位无法确定; 文献 [12] 利用量子粒子群改进基于稀疏分解的去噪算法, 但该算法必须事先构建过完备原子库; 文献 [13] 采用紧支性准则选择小波基, 克服了传统小波去噪算法中小波基选择的盲目性, 但没有考虑到分解层数的问题; 文献 [14] 利用经验模态分解方法实现局部放电去噪, 算法的自适应性虽得到了验证, 但其模态混叠以及端点效应对去噪效果的影响不可忽略。

针对现有方法的缺陷, 本文提出一种基于自适应噪声集合经验模态分解<sup>[15]</sup>结合小波包的染噪局放信号提取算法, 能够在复杂噪声环境下, 无需先验数据, 实现快速自适应的局放信号去噪。首先, 利用 CEEMDAN 对染噪信号进行自适应分解, 并通过 SVD 分解对分量中的窄带干扰及频率混叠进行抑制; 然后, 以信号间的互相关系数为准则判别有效分量并进行重构; 最后, 利用小波包阈值法滤除重构信号中残留的白噪声。实验结果表明, 本文方法提取的局放信号波形畸变小、能量损失小, 能够满足后续局放定位及模式识别等工作的需求。

## 1 自适应噪声的完全集合经验模态分解

### 1.1 自适应噪声的完全集合经验模态分解原理

针对经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 存在的频率混叠、虚假分量以及端点效应的问题, 文献 [16] 提出了集合经验模态分解 (EEMD), EEMD 算法在信号中添加一定强度的白噪声后对其进行 EMD 分解, 重复  $n$  次, 通过求解各固有模态分量 (IMF) 的  $n$  次平均值确定最终的分量, 但残留的白噪声使得重构信号与原信号相比有较大的误差; 文献 [17] 提出了一种完全经验模态分解 (CEEMD), 通过成对的加入正负噪声来减少 EEMD 重构信号中残存的白噪声, 但分解过程中计算量较大且重构信号的完备性较差。CEEMDAN 算法以 EMD 为基础, 在原始列中自适应的加入白噪声, 既解决了 EEMD 加入噪声后分解模态个数不确定的问题, 又减少了分解过程中的计算量, 且可以得到完整度较高的重构信号。

CEEMDAN 的第一个固有模态分量的求解与 EEMD 相似, 在原始含噪局放信号  $y(t)$  中加入  $n$  次不同的白噪声  $s(t)$  后进行 EMD 分解, 对  $n$  次得到的第一个固有模态分量求均值即为 CEEMDAN 的第一个固有模态函数 IMF:

$$\text{IMF}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_1(y(t) + s_i(t))) \quad (1)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

去除  $\text{IMF}_1$  得到第一个剩余分量:

$$M_1(t) = y(t) - \text{IMF}_1 \quad (2)$$

对剩余分量加入特定白噪声, 构造新的余量信号进行分解, 求得  $\text{IMF}_2$ :

$$\text{IMF}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_1(M_1(t) + \sigma_1 F_1(s_i(t))) \quad (3)$$

以此类推, 得到第  $k$  个剩余分量为:

$$M_k = M_{k-1}(t) - \text{IMF}_k \quad (4)$$

式中,  $k = 2, 3, \dots, K$ 。

第  $k$  个固有模态分量:

$$\text{IMF}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_k(M_k(t) + \sigma_k F_k(s_i(t))) \quad (5)$$

当剩余分量为单调函数时, 停止分解, 则原始信号可表示为:

$$y(t) = \sum_{k=1}^K \text{IMF}_k + M_K(t) \quad (6)$$

式中,  $F_k(\cdot)$  表示经 EMD 分解的第  $k$  个 IMF;  $\sigma_k$  为噪声系数, 本文通过计算剩余分量  $M_K(t)$  的标准差对噪声系数进行确定。

### 1.2 CEEMDAN 有效分量拾取

CEEMDAN 算法去噪的关键在于分解后对有效分量的拾取。在当前研究中, 主要依靠自相关系数<sup>[18]</sup>、能量门限<sup>[19]</sup>、峭度值<sup>[20]</sup>等作为有效分量的判别依据, 但当分量中含有较多的窄带干扰信号时, 上述方法可能会丢失部分有效分量, 对去噪效果造成不良影响。

根据奇异值分解 (SVD) 理论可知, 在分解得到的非零奇异值中, 前  $q$  个较大的奇异值对应有效成分, 其余的奇异值则被认为对应冗余成分。因此, 可选取前  $q$  个奇异值对应的分量进行重构, 从而实现信号的提纯。研究发现, 局放信号在常见的高斯白噪声与窄带噪声的干扰下, 对应的奇异值特征具有明显的差异, 如图 1 所示。

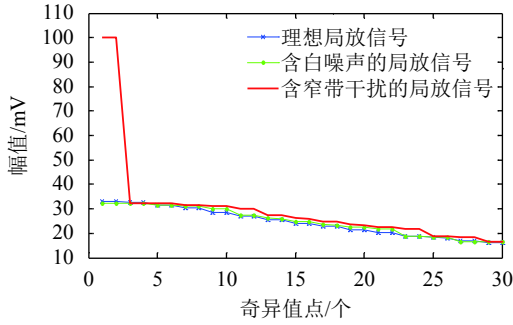


图 1 奇异值特征曲线图

通过观察可知, 3 组信号奇异值特征曲线中后段变化趋势基本相同, 其中含有白噪声的局放信号相对于原始局放信号仅在幅值上略微增加。而含有窄带噪声的局放信号则在前几个奇异值处出现幅值突然增大的现象。根据此特点, 可利用奇异值分解抑制 CEEMDAN 分解得到的窄带干扰分量。

为了对  $\text{IMF}_k$  进行 SVD 分解, 首先对各个分量构造 Hankel 矩阵<sup>[21]</sup>。

$$\mathbf{H}_k = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_m \\ x_2 & x_3 & x_4 & \cdots & x_{m+1} \\ x_3 & x_4 & x_5 & \cdots & x_{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n-m+1} & x_{n-m+2} & x_{n-m+3} & \cdots & x_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中,  $\text{IMF}_k = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), 1 < m < n$ 。

之后对矩阵  $\mathbf{H}_k$  进行奇异值分解:

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{U}$  为  $m \times m$  正交矩阵;  $\mathbf{V}$  为  $n \times n$  正交矩阵;  $\mathbf{D}$  为  $m \times n$  对角阵。

利用式 (9) 对奇异值突增量进行置零, 再对新得到的奇异值矩阵进行 SVD 逆运算, 即可剔除  $\text{IMF}_k$  中的窄带干扰:

$$\mathbf{D}_{ii} = \begin{cases} \mathbf{D}_{ii} & \mathbf{D}_{ii} - \mathbf{D}_{i-1i-1} \leq \zeta(\mathbf{D}_{i-1i-1} - \mathbf{D}_{i-2i-2}) \\ 0 & \mathbf{D}_{ii} - \mathbf{D}_{i-1i-1} > \zeta(\mathbf{D}_{i-1i-1} - \mathbf{D}_{i-2i-2}) \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\zeta$  为常数参数,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

在有效分量的拾取中, 采用互相关系数法。互相关系数法在信号处理领域用来表示两个信号之间的相似性度量, 通过已知信号来发现未知信号的特征<sup>[18]</sup>。通常情况下局放信号和噪声的相关系数非常小, 但当 IMF 中局放信号含量较高、噪声水平较低时, 对应的互相关系数较大; 相应地, IMF 中放信号含量较低、噪声水平较高时, 互相关系数较小, 且互相关系数与信号幅值无关。互相关系数计算公式如下:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (y(i) - \bar{y})(\text{IMF}_k(i) - \overline{\text{IMF}_k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y(i) - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{IMF}_k(i) - \overline{\text{IMF}_k})^2}} \quad (10)$$

式中,  $\bar{y}$  和  $\overline{\text{IMF}}$  分别为  $y$  与 IMF 的平均值。

## 2 自适应小波包阈值法

对上述有效分量进行重构后, 信号中仍含有少量的白噪声, 采用改进的小波包阈值法对白噪声进行抑制。如何提高阈值函数及阈值对噪声大小的自适应性, 进而提高去噪后波形的拟合程度, 是影响去噪效果的关键一步。文献 [22] 提出的阈值函数的广泛应用证明了小波阈值法去噪的优越性, 但传统硬阈值函数的非连续性、软阈值函数的恒定误差会使去噪后波形发生较大畸变。随着相关研究的深入, 更多的改进阈值函数被提出, 有代表性的 3 种改进阈值函数<sup>[23-24]</sup> 分别如式 (11)~(13) 所示:

$$d_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k})(|d_{j,k}| - a\sigma) & |d_{j,k}| \geq \sigma \\ 0 & |d_{j,k}| < \sigma \end{cases} \quad (11)$$

$$d_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k}) \left( |d_{j,k}| - \frac{\sigma}{(|d_{j,k}|^2 - \sigma^2)^J + 1} \right) & |d_{j,k}| \geq \sigma \\ 0 & |d_{j,k}| < \sigma \end{cases} \quad (12)$$

$$d_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k}) \left[ |d_{j,k}| - \sin\left(\frac{\pi}{2} \left| \frac{\sigma}{d_{i,j}} \right|^n \right) \sigma \right] & |d_{j,k}| \geq \sigma \\ 0 & |d_{j,k}| < \sigma \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $d_{j,k}$  表示小波包分解中第  $j$  层第  $k$  个小波系数;  $\sigma$  为阈值, 其计算公式为:

$$\sigma = \text{median}(|d_{j,k}|) \sqrt{2 \ln N} / 0.6745$$

式中,  $N$  为  $d_{j,k}$  的长度。

式 (11) 中通过调整系数  $a(0 < a < 1)$  来调节软阈值函数的恒定误差; 式 (12) 中引入分解层数  $J$  作为调节因子对恒定误差进行调节; 式 (13) 中为了增强函数的连续性以及与原函数的相似程度, 引入了正弦函数, 并利用参数  $n$  进行调节。但实际上, 上述 3 种函数并没有从根本上解决含噪信号的小波系数与估计小波系数的恒定偏差。基于此, 本文引入一种新的阈值函数:

$$d_{j,k} = \begin{cases} (1-b)\text{sign}(d_{j,k})(|d_{j,k}| - \mu\sigma) + bd_{j,k} & |d_{j,k}| \geq \sigma_1 \\ 0 & |d_{j,k}| < \sigma_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中,

$$\sigma_1 = \text{median}(|d_{j,k}| - \text{median}(d_{j,k})) \times \sqrt{2 \ln N} / 0.6745 / \log(e + j - 1)$$

$$\mu = \exp\left(-m \frac{|d_{j,k}| - \sigma}{|d_{j,k}| + \sigma}\right) \quad m > 0$$

$$b = 1 - \exp\left(-u \frac{|d_{j,k}| - \sigma}{|d_{j,k}| + \sigma}\right) \quad u > 0$$

为了验证该阈值函数的优越性, 以正切函数为例, 设其阈值为 0.3, 利用式 (11)~(14) 分别对其进行处理, 其结果与图 2a~图 2d 一一对应。

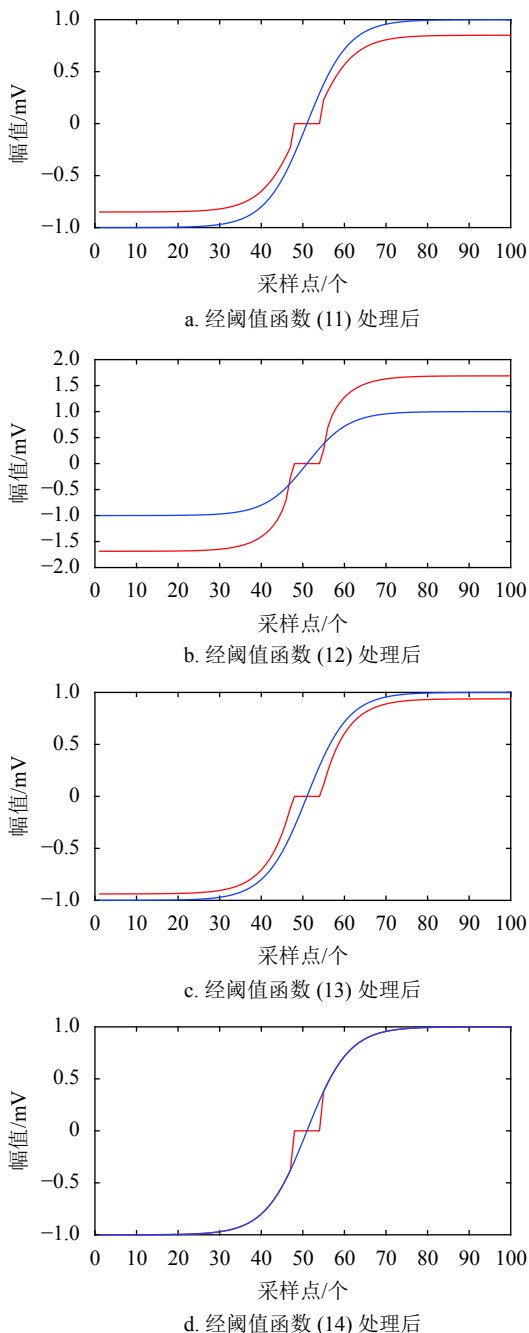


图 2 不同阈值函数拟合结果对比

从上图可以明显看出, 图 2b 的拟合程度最差, 图 2a 和图 2c 次之, 图 2d 的拟合程度最好, 基本上消除了偏差。这表明本文提出的阈值函数较之其他 3 种改进的阈值函数可以更有效地消除含噪信号小波系数与估计小波系数的恒定偏差。

### 3 基于 CEEMDAN 结合小波包的去噪方法

综上所述, 本文提出一种基于 CEEMDAN 结合小波包的复杂染噪局放信号提取方法, 步骤如下。

- 1) 将染噪局放信号进行 CEEMDAN 自适应分解, 得到  $N$  个 IMF。
- 2) 构造各 IMF 对应的 Hankel 矩阵, 对其进行 SVD 分解, 将奇异值不连续的点置零后进行信号重构。
- 3) 计算各个固有模态分量与原始信号的互相关系数, 提取其中有效 IMF。
- 4) 将各有效 IMF 进行合成, 利用改进的小波包阈值法对合成信号中的残留白噪声进行抑制。

详细流程如图 3 所示。

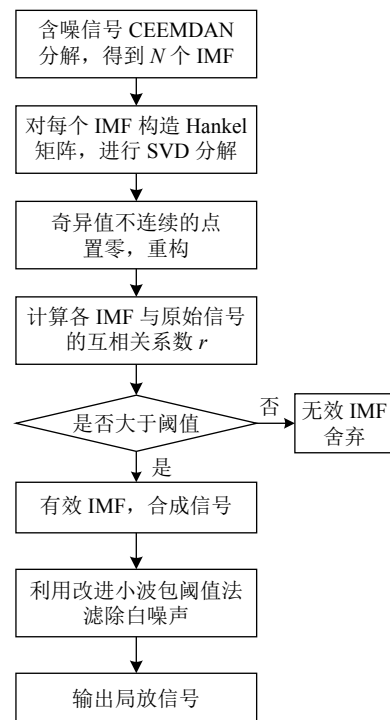


图 3 算法流程

### 4 仿真实验及结果分析

#### 4.1 复杂染噪局放信号生成

文献以及现场实验证明, 不同类型电气设备局



部放电信号可由如下两种数学模型表达<sup>[25]</sup>。

单指数振荡衰减模型:

$$f(t) = Ae^{-t/\tau} \sin(2\pi f_c t) \quad (15)$$

双指数振荡衰减模型:

$$f(t) = A(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(2\pi f_c t) \quad (16)$$

式中,  $A$  为信号幅值;  $\tau$  为衰减系数;  $f_c$  为振荡频率。

在仿真实验中, 采用归一化幅值的单指数振荡衰减模型与双指数振荡衰减模型模拟局放信号。设置采样频率为 20 MHz, 衰减系数分别为  $2 \mu\text{m}$ 、 $1.3 \mu\text{m}$ , 采样时长为  $200 \mu\text{m}$ , 振荡频率为 1.2 MHz, 如图 4a 所示。在生成的局放信号中添加白噪声与窄带干扰模拟现场环境噪声, 白噪声采用均值为 0, 方差为 0.3 分布的高斯白噪声; 根据现场测量经验, 窄带干扰采用频率分别为 100 KHz、500 KHz、1.2 MHz、5 MHz、7 MHz 的叠加正弦信号模拟。含噪局放信号如图 4b 所示, 经计算, 上述设置含噪信号的信噪比为  $-6.5 \text{ dB}$ 。

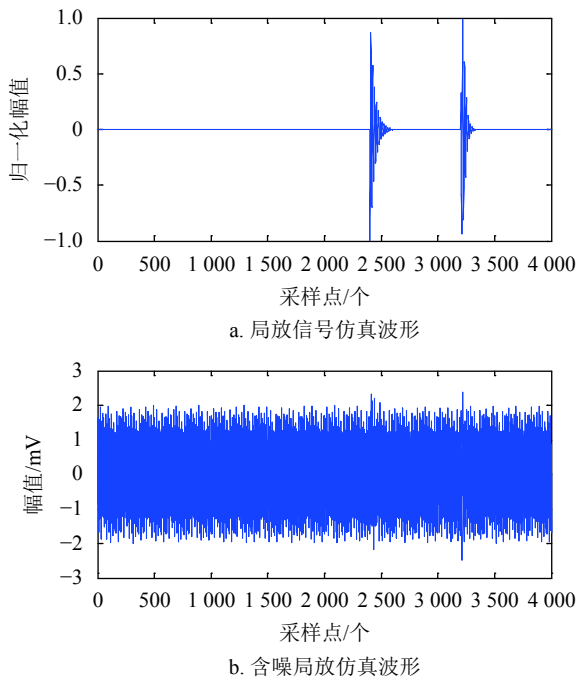


图 4 局放信号仿真波形

## 4.2 去噪实验及结果分析

利用本文方法对含噪局部放电信号进行去噪, 在 CEEMDAN 分解中, 设置白噪声强度为 0.2, 循环次数为 100 次<sup>[26]</sup>。经 CEEMDAN 分解后的各个固有模态分量及其频谱如图 5 所示。

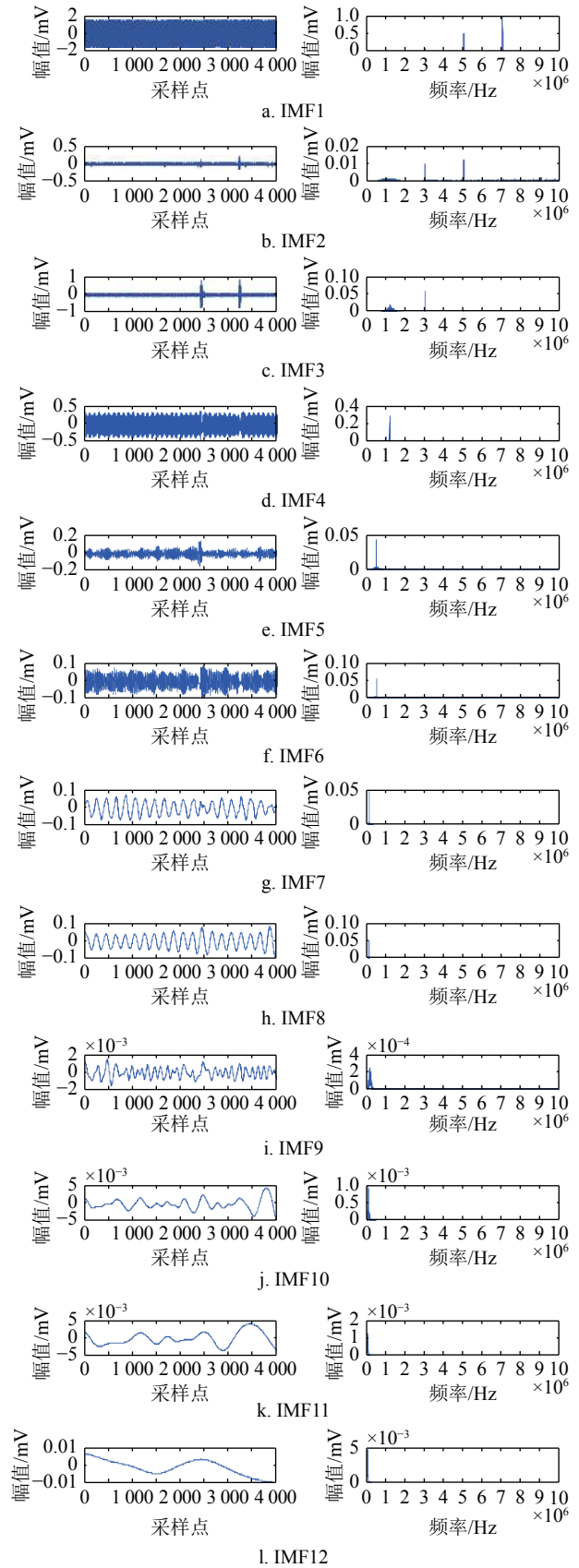


图 5 染噪信号固有模态分量及其频谱

由各个固有模态分量的时域图可直观确定 IMF2、IMF3 为有效分量, 但仅对这两个分量进行

合成必定会损失原始信号能量。本文通过计算各个固有模态分量与原始信号的互相关系数, 如表 1 所示, 以进一步对有效分量进行拾取。

表 1 各固有模态分量与原始信号的相关系数

固有模态分量	相关系数	固有模态分量	相关系数
IMF1	0.2956	IMF7	0.0055
IMF2	0.5572	IMF8	-0.0036
IMF3	0.8296	IMF9	0.0686
IMF4	0.0162	IMF10	-0.0042
IMF5	0.0808	IMF11	-0.0054
IMF6	0.0079	IMF12	-0.0026

通过分析多组实验数据可知, 当互相关系数大于 0.001 时, 可认为该固有模态分量为有效分量。分别对 IMF1、IMF2、IMF3、IMF4、IMF5、IMF6、IMF7、IMF9 进行 Hankel-SVD 计算, 波形变化如图 6 所示, 左图为有效分量, 右图为经 Hankel-SVD 处理后的有效分量。

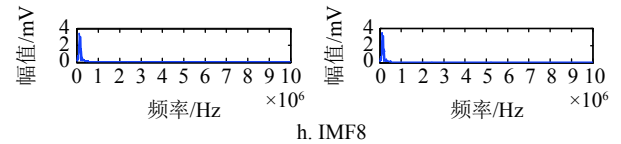


图 6 Hankel-SVD 计算前后波形频谱对比

观察图 6 可知, 有效分量中的窄带干扰已经明显得到了抑制, 但各分量中仍存在大量白噪声。本文选择 db10 小波基, 结合前述阈值函数对合成分量进行小波包阈值去噪, 得到波形如图 7a 所示。为了验证方法的有效性, 利用 CEEMD 降噪方法<sup>[27]</sup>和 VMD 小波阈值法<sup>[28]</sup>的处理结果进行对比。基于 CEEMD 的方法首先对信号进行 CEEMD 分解, 通过峭度值对分量中的虚假分量进行滤除, 之后对有效分量合成, 再利用小波阈值法进一步去噪。VMD 小波阈值法首先选择合适的分解层数对信号进行 VMD 分解, 利用相似系数选择有效分量后进行阈值降噪, 将降噪后的分量合成后进一步利用小波阈值去噪。这两种方法的去噪结果如图 7b、图 7c 所示。

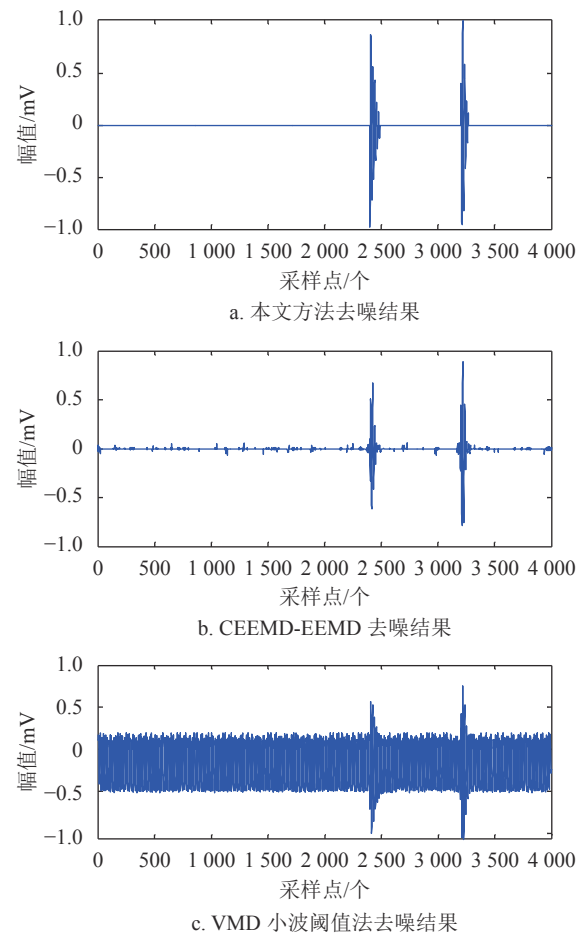
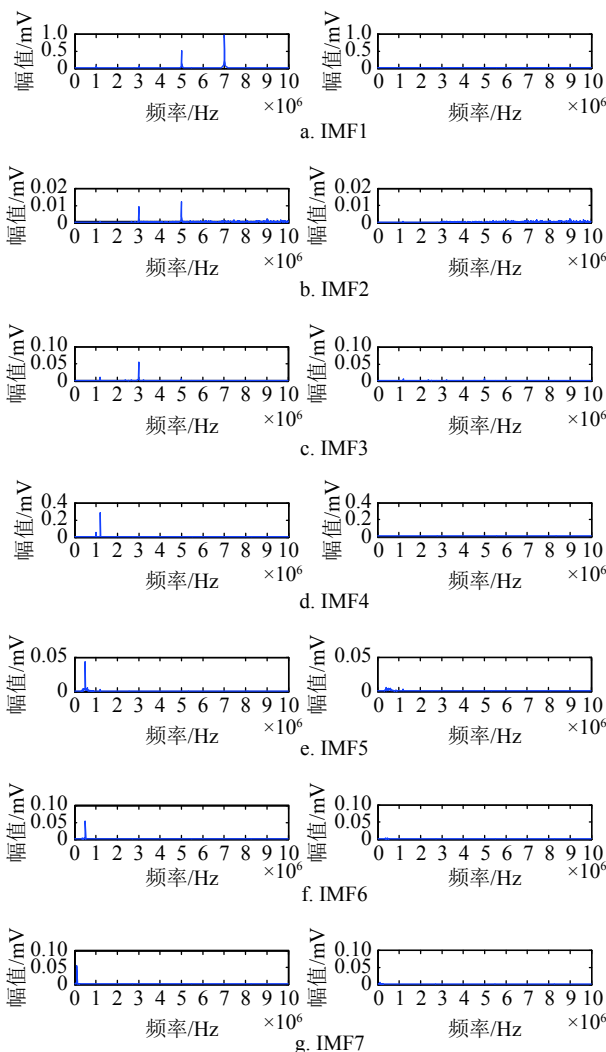


图 7 不同方法去噪结果对比

为了定量对比去噪效果, 引入信噪比 (signal noise ratio, SNR)、波形相似系数 (normalized correlation

coefficient, NCC)、变换趋势参数 (variation trend parameter)、幅值相对误差 4 个参量作为评价指标<sup>[29]</sup>。其中, SNR 越大表示算法的噪声抑制能力越强; NCC 用于评价去噪后信号与理想局放信号的波形相似度, 其值越接近 1, 代表波形相似度越高; VTP 表示去噪前后波形变化趋势的相似程度, 越接近 1, 表示两种波形的变化趋势越相似; 幅值相对误差则体现了去噪过程中信号的能量损失程度。分别计算上述 3 种去噪方法的评价指标, 结果如表 2 所示。

表 2 各方法去噪效果评价参数

评价参数	去噪方法	脉冲1	脉冲2
SNR	本文方法	16.2860	14.9465
	CEEMD-EEMD	1.3714	7.7682
	VMD小波阈值法	1.8403	3.7937
NCC	本文方法	0.9894	0.9932
	CEEMD-EEMD	0.8313	0.5842
	VMD小波阈值法	0.6551	0.8328
VTP	本文方法	0.9765	1.0133
	CEEMD-EEMD	1.5948	1.1698
	VMD小波阈值法	0.8975	0.7888
幅值相对误差/%	本文方法	0.80	1.68
	CEEMD-EEMD	32.68	11.53
	VMD小波阈值法	7.95	14.90

根据对比图 7 及表 2 所示的去噪结果和定量指标, 可以得出以下结论。

1) 本文所提出的基于 CEEMDAN-Hankel-SVD 的局放信号去噪方法, 去噪后信噪比高, 波形未发生大幅度畸变, 能量损失最小。

2) 基于 CEEMD 的去噪方法对信号进行两次阈值处理, 虽然噪声得到了良好的抑制, 但去噪过程中的能量损失过大。

3) VMD 小波阈值法由于窄带干扰与局放信号的振荡频率一致, 使其无法有效滤除, 从而导致算法失效。

图 8 为本文方法对两种局放脉冲信号去噪前后的波形叠加对比图。由图可直观发现, 本文所述基于 CEEMDAN-Hankel-SVD 的去噪算法, 对局放信号中的窄带干扰与白噪声有着良好的抑制效果, 能最大限度的还原局放脉冲信号, 且波形畸变小。

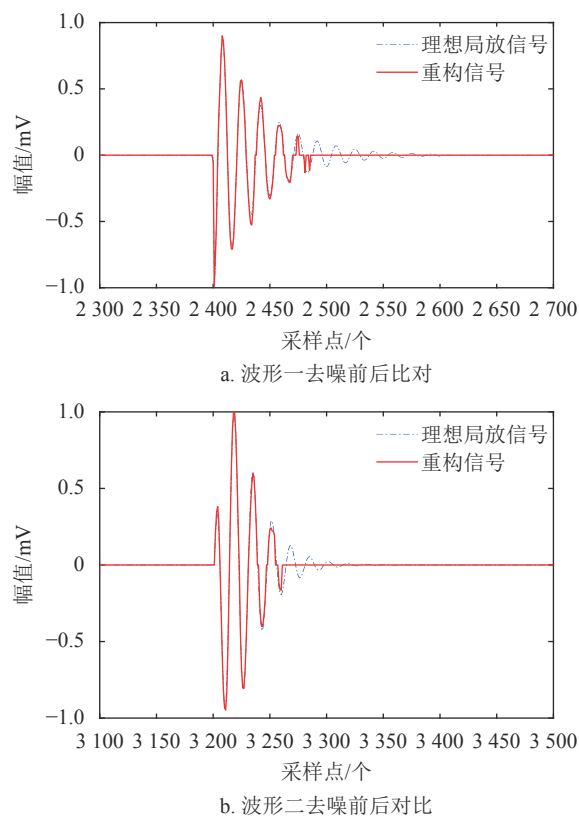


图 8 去噪前后波形对比图

## 5 实测局放信号去噪应用

为了进一步验证算法的实用性, 将其应用于电力电缆局部放电的在线定位。在基于高频电流传感器 (HFCT) 的定位方法中, 脉冲到达时间是保证局放定位精度的关键, 实验采用时变峰度法提取局放脉冲到达时间。局放信号实验采集平台如图 9 所示, 局放信号通过将 HFCT 套在电缆接地铜线上检测, 示波器采样频率为 100 MHz, 得到局部放电波形如图 10a 所示。



图 9 电力电缆局放信号采集装置

由于实验室中噪声水平较低, 局放信号波形较为明显, 进一步添加与第 4 节实验同等水平的窄带干扰与白噪声, 提高干扰强度, 得到的染噪局放信号如图 10b 所示。为了便于后续处理, 将

测量到的信号幅度归一化, 采用本文算法的去噪结果如图 10c 所示。利用时变峰度法拾取重建信号的局放脉冲到达时间, 其时变峰度曲线如图 10d 所示, 算法拾取结果与手动拾取结果一致, 皆为第 262 个采样点, 验证了去噪算法的有效性。

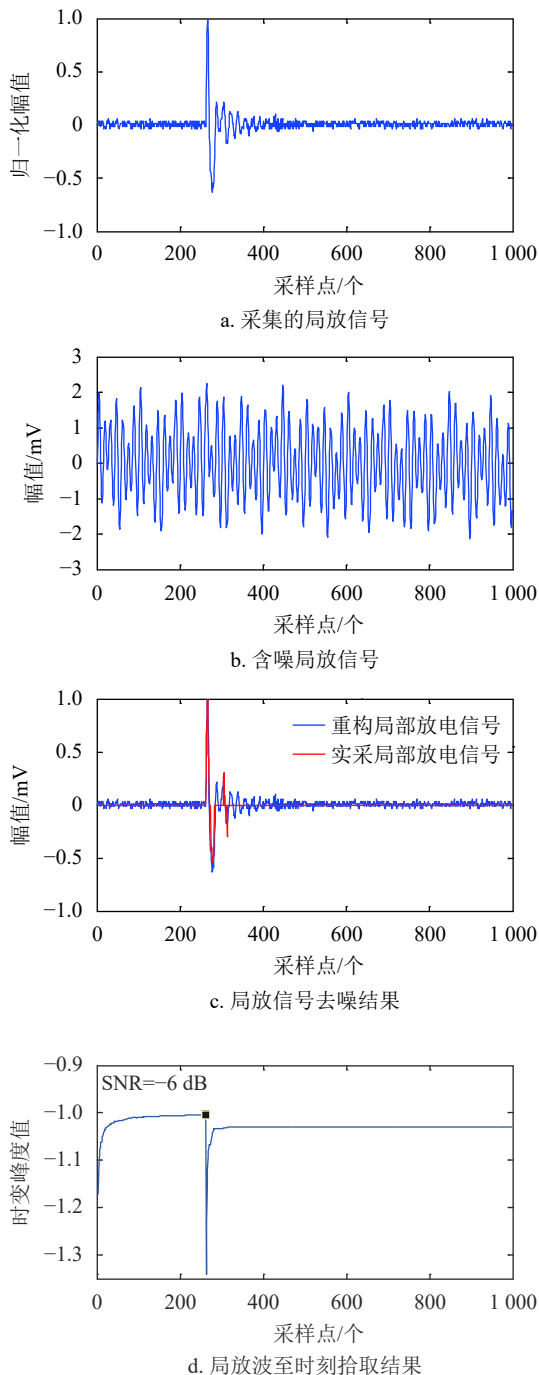


图 10 局部放电脉冲提取及拾取结果

## 6 结束语

1) 本文采用的 Hankel-SVD 算法可有效抑制 CEEMDAN 固有模态分量中的频率混叠与窄带干

扰, 以此为基础的局放信号提取方法能够最大程度的还原原始信号。

2) 本文改进了阈值函数及阈值计算方法, 阈值函数结合了软、硬阈值的优点, 算得的阈值大小适中, 既保留了信号的连续性, 又减小了恒定误差。

3) 本文方法可有效去除白噪声和窄带噪声干扰, 提取的局放信号波形畸变小、能量损失小, 能够满足后续的局放定位等应用需求。

## 参考文献

- [1] 刘平原, 贺景亮, 王洪新. 交联聚乙烯 (XLPE) 电缆在线监测方法的探讨[J]. 高压技术, 2001(4): 26-28.  
LIU Ping-yuan, HE Jing-liang, WANG Hong-xin. Discuss on method of on-line monitoring of XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2001(4): 26-28.
- [2] 徐卫东, 聂一雄, 周文文, 等. 固体绝缘开关柜局部放电模式识别优化算法[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 100-107.  
XU Wei-dong, NIE Yi-xiong, ZHOU Wen-wen, et al. Optimization algorithm for partial discharge pattern recognition of solid insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 100-107.
- [3] 徐龙, 赵艾莹, 李嘉明, 等. 多次操作冲击对含刀痕缺陷 10 kV 电缆终端局部放电特性的影响[J]. 高压技术, 2020, 46(2): 673-681.  
XU Long, ZHAO Ai-xuan, LI Jia-ming, et al. Effects of multiple switching impulses on partial discharge characteristics of 10 kV cable termination with knife incision[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 673-681.
- [4] 黄涛, 黄烜城, 魏海增, 等. 电厂开关柜局部放电振动信号降噪方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 109-116.  
HUANG Tao, HUANG Xuan-cheng, WEI Hai-zeng, et al. Study on de-noise method for partial discharge vibration signal of switch cabinet of power plant[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 109-116.
- [5] 孙抗, 师文文, 郭景蝶. 基于 FAVMD-时变峰度的电缆局部放电多传感器在线检测与定位[J]. 传感技术学报, 2019, 32(3): 362-368.  
SUN Kang, SHI Wen-wen, GUO Jing-die. Multi sensor online detection and location of cable partial discharge based on FAVMD-Time varying kurtosis[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(3): 362-368.
- [6] 孙抗, 郭景蝶, 杨延举, 等. 基于 AIC 准则和时窗能量比的电缆局部放电在线检测与定位[J]. 传感技术学报, 2017, 30(8): 1209-1214.  
SUN Kang, GUO Jing-die, YANG Yan-ju, et al. On line partial discharge detection and localization based on AIC criterion and time-window energy ratio[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(8): 1209-1214.
- [7] 钱露先. 基于 EEMD 与概率神经网络的变压器局部放电噪声抑制与模式识别研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.  
QIAN Lu-xian. Study on noise suppression and pattern



- recognition of partial discharge of transformer based on EEMD and probabilistic neural network[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [8] 徐卫东, 周文文, 彭丹, 等. 基于 ASVDD 算法固体绝缘开关柜局部放电模式识别[J]. 电器与能效管理技术, 2018(13): 19-25.  
XU Wei-dong, ZHOU Wen-wen, PENG Dan, et al. Pattern recognition of partial discharge in solid insulated switchgear based on ASVDD algorithm[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2018(13): 19-25.
- [9] LIU Yu-shun, ZHOU Wen-jun, LI Pen-fei, et al. An ultrahigh frequency partial discharge signal denoising method based on a generalized s-transform and module time-frequency matrix[J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 941-960.
- [10] 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 Yu-shun, ZHOU Wen-jun, LI Peng-fei, et al. Partial discharge ultrahigh frequency signal denoising method based on generalized S-transform modular time-frequency matrix[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(9): 211-220.
- [11] 张宇辉, 段伟润, 李天云. 局部放电信号中抑制周期性窄带干扰的逆向分离方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 232-239.  
ZHANG Yu-hui, DUAN Wei-run, LI Tian-yun. A reverse separation method of suppressing periodic narrowband noise in partial discharge signal[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(6): 232-239.
- [12] 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 Yong-qiang, XIE Jun, LV Fang-cheng. PD signal denoising method based on improved quantum-behaved particle swarm optimization sparse decomposition[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(12): 320-329.
- [13] 高圣伟, 张牧, 袁臣虎, 等. 变压器局部放电信号分析中小波基函数的选择和比较[J]. 天津工业大学学报, 2011, 30(3): 72-75.  
GAO Sheng-wei, ZHANG Mu, YUAN Chen-hu, et al. Comparison and choice of wavelet basis function in wavelet analysis of partial discharge signal[J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2011, 30(3): 72-75.
- [14] 孙博, 张建文, 潘磊落. 基于 EMD 的局部放电去噪方法的研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 89-93.  
SUN Bo, ZHANG Jian-wen, PAN Lei-luo. Study on denoising method of partial discharge based EMD[J]. *Insulated Material*, 2014, 47(3): 89-93.
- [15] ALTAY Y A, KREMLEV A S. Improved noise resistance processing electrocardiosignals adaptive noise CEEMDAN as a method of solving the basic problems of the application of Hilbert-Huang transform[C]//2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). [S.l.]: IEEE, 2017: 621-623.
- [16] MARIA E T, MARCELO A C, Gaston S et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]//IEEE International Conference on Acoustics. [S.l.]: IEEE, 2011: 4144-4147.
- [17] YEH J, SHIEH J, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2010, 2(2): 135-156.
- [18] CHANG F, HONG W, ZHANG T, et al. Research on wavelet denoising for pulse signal based on improved wavelet thresholding[C]//First International Conference on Pervasive Computing. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2010: 564-567.
- [19] FANG Min, PENG Jie-gang. A denoising method of vortex flowmeter signal in oscillatory flow based on Hilbert Huang transformation[C]//2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. Wuhan, China: IEEE, 2010: 4859-4862.
- [20] BOYA C, ROJASMORENO M V, RUIZLLATA M, et al. Location of partial discharges sources by means of blind source separation of UHF signals[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2015, 22(4): 2302-2310.
- [21] ZHOU B, LIU Z. Method of multi-resolution and effective singular value decomposition in under-determined blind source separation and its application to the fault diagnosis of roller bearing[C]//International Conference on Computational Intelligence & Security. [S.l.]: IEEE, 2016: 462-465.
- [22] 师文文. 复杂环境下交联聚乙烯电缆局部放电在线检测与定位[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.  
SHI Wen-wen. On-line detection and localization of partial discharge of cross-linked polyethylene cable in complex environment[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019.
- [23] LI J. Wavelet de-noising of partial discharge signals based on genetic adaptive threshold estimation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2012, 19(2): 543-549.
- [24] WANG Xiao-yu, XIAO Xu. Image denoising based on improved wavelet threshold function for wireless camera networks and transmissions[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 11(9): 1550-1329.
- [25] 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 En-jun, ZHANG Jian-wen, MA Xiao-wei, et al. A new method for partial discharge threshold denoising based on CEEMD-EEMD[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(15): 93-98.
- [26] 姚林朋, 郑文栋, 钱勇, 等. 基于集合经验模态分解的局部放电信号的窄带干扰抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 133-139.  
YAO Lin-peng, ZHENG Wen-dong, QIAN Yong, et al. A narrow-band interference suppression method based on EEMD for partial discharge[J]. *Power System Protection*

- and Control, 2011, 39(22): 133-139.
- [27] 潘云, 张晓星, 张英, 等. 基于互补集合经验模态分解法的变压器局部放电信号去噪方法[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 93-98.  
PAN Yun, ZHANG Xiao-xing, ZHANG Ying, et al. Denoising method for transformer partial discharge signals based on complete ensemble empirical mode decomposition[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(10): 93-98.
- [28] JIAO Shang-bin, SHI Wen-wen, LIU Qian. Self-adaptive partial discharge denoising based on variational mode decomposition and wavelet packet transform[C]//2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan, China: IEEE, 2017: 7301-7306.
- [29] 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(12): 66-70.  
TANG Ju, GAO Li, PENG Li, et al. Study on new evaluation parameters for denoising performance of non-stationary oscillating partial discharge signals[J]. High Voltage Technology, 2007(12): 66-70.

编辑 刘飞阳