

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208974

## 基于改进 EEMD 的局部放电信号降噪方法\*

付伟 李宁

(1. 中国平煤神马集团设备租赁分公司 平顶山 467000; 2. 中国平煤神马集团机械装备集团河南矿机有限公司 平顶山 467000)

**摘要:** 噪声环境下的电缆局部放电信号的高完备提取是电缆绝缘在线监测研究的关键。本文提出一种基于改进 EEMD 的局部放电信号降噪方法。首先对原始局部放电信号进行 EEMD 分解,对分解得到的每一阶模态分量(IMF)进行傅里叶变换,计算其对应的幅值方差作为阈值,结合局部加权回归散点平滑算法对筛选出的噪声与有效信号混合的 IMF 分量进行滤波,最后与纯净 PD 信号 IMF 分量进行叠加重构,得到滤波后的局部放电信号。通过仿真、实验室数据分析,降噪处理后的局部放电信号的信噪比和波形相似系数均有所提高,证明本文所提降噪方法的有效性。

**关键词:** PD;EEMD;傅里叶变换;最小二乘平滑滤波

**中图分类号:** TP85 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4037

## Research on partial discharge signal processing based on improved EEMD

Fu Wei Li Ning

(1. China Pingmei Shenma Group Equipment Leasing Branch, Pingdingshan 467000, China;

2. China Pingmei Group Machinery Equipment Group Henan Mining Machinery Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

**Abstract:** In the noisy environment, the highly complete extraction of cable partial discharge signal is the key to the research of cable insulation on-line monitoring. In this paper, a partial discharge signal denoising method based on improved EEMD is proposed. Firstly, EEMD decomposition is carried out on the original partial discharge signal, Fourier transform is carried out on each order modal component (IMF) decomposed, and its corresponding amplitude variance is calculated as the threshold. Combined with the local weighted regression scatter smoothing algorithm, the IMF component mixed with noise and effective signal is filtered. Finally, it is superimposed and reconstructed with the IMF component of pure PD signal to obtain the filtered partial discharge signal. Through simulation and laboratory data analysis, the signal-to-noise ratio and waveform similarity coefficient of partial discharge signal after noise reduction are improved, which proves the effectiveness of the noise reduction method proposed in this paper.

**Keywords:** PD;EEMD;Fourier transform;least square smooth filtering

## 0 引言

电缆绝缘在线监测能够及时发现绝缘缺陷问题,排除潜在威胁,对保障电网稳定运行有重要意义。局部放电现象是电缆绝缘劣化的前期特征,当电缆中发生局部放电现象时,就相当于证明该电缆的绝缘已经出现缺陷,随着日积月累,局部放电不断发展,最终使绝缘击穿。因此如何准确提取电缆中的局部放电信号是电缆绝缘在线监测的关键<sup>[1]</sup>。但是实际检测到的局部放电信号往往淹没在噪声干扰中,识别困难。噪声干扰主要有随机脉冲干扰、周期窄带干扰和白噪声,而局部放电信号检测中最主要的干扰是白噪声,其分布范围大,影响时间长,因此本文针对如何有效抑制白噪声展开研究<sup>[2]</sup>。

目前,国内外学者们提出很多噪声抑制方法,如小波分析法、形态学滤波法、奇异值分解法、经验模态分解法等。小波分析在抑制噪声方面被广泛应用,但小波基函数及分解层数不具有自适应性<sup>[3-4]</sup>。形态学滤波法运算量大,去噪效率不高<sup>[5-6]</sup>。奇异值分解法,其有效阶次的选取过大或过小将导致波形发生畸变<sup>[7-8]</sup>。EMD 广泛应用于非线性、非稳定信号处理方面,并取得不错的降噪效果<sup>[9]</sup>。但由于 EMD 存在模态混叠等效应,Wu 等将 EMD 算法作为前提,设计出总体经验模态分解,EEMD 方法可以将信号分解为一系列固有模态函数(intrinsic mode function,IMF)分量,若直接将噪声主要集中的高频分量直接去除,则会遗漏部分有用信号,导致检测信号特征不够完全<sup>[10]</sup>。为了最大限

收稿日期:2022-02-07

\* 基金项目:河南省科技攻关项目(182102310936)资助

度的保留噪声 IMF 分量中的有用信号,本文综合运用傅里叶频谱分析和局部加权回归散点平滑算法来优化 EEMD,通过多次仿真、实验和现场挂网运行结果分析,证明了该方法较高程度地抑制电缆局部放电信号中的白噪声,实现了提取的局部放电信号波形完整且特征明显的目标,满足电缆绝缘在线监测的需求。

## 1 基本原理

### 1.1 EEMD 算法

EMD 在处理非平稳及非线性的信号上具有明显的优势,EEMD 值在 EMD 分解前向信号,这个过程中利用白噪声频率分布的统计特性,增加了高斯白噪声,经过多次分解,从而抑制模态混叠效应<sup>[11]</sup>。

将原始信号  $x(t)$ , EMD 做分解处理,则信号  $x(t)$  分解为一系列的 IMF 分量  $C_i$  和余项  $r_n$  和,如下:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n-1} c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

1) 在目标信号  $x(t)$  中加入随机高斯白噪声序列

$$x_m(t) = x(t) + kn_m(t) \quad (2)$$

式中:  $k$  为加入的白噪声幅值系数,  $nm(t)$  为白噪声。

2) 将白噪声的信号利用 EMD 分解为一组 IMF 分量;

3) 每次加入不同的白噪声序列,重复步骤 1);

4) 计算分解后的 IMF 的均值,把分解得到的各个 IMF 的均值作为最终结果。

$$c_i = \frac{\sum_{N=1}^{m-1} c_{i,m}}{N} \quad (3)$$

式中:  $N$  为 EEMD 的集成次数;  $C_{i,m}$  为第  $m$  次 EMD 所产生的第  $i$  个 IMF。

### 1.2 局部加权回归散点平滑算法

作为一种自适应的滤波方式,具有无需信号的模型,简化计算,不依赖相关的统计特征,并有很强鲁棒性。该算法原理是基于多项式加权来拟合局部数据,然后应用最小二乘法对结果分析<sup>[12]</sup>。算法步骤:

1) 对信号  $\{x_i, y_i\}, i = 1, 2, \dots, n$  建立多项式拟合模型:

$$y_i = \beta_{i0} + \beta_{i1}x_i + \dots + \beta_{id}x_i^d + \epsilon_i, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中:  $\beta_{i0}, \beta_{i1}, \dots, \beta_{id}$  为相对应  $x_i$  的系数;  $\epsilon_i$  为随机误差项。

2) 对每一个  $x_i$  计算其周围点  $x_{i,j} = (1, 2, \dots, n)$  到它的距离为:

$$d_{ij} = |x_i - x_j| \quad (5)$$

式中:  $h_i$  为  $d_{ij}, j = (1, 2, \dots, n)$  中第  $r$  小的值,  $r$  为离  $f_n$  最近的整数,  $r = f_n$  为对局部数据进行回归时选择的窗口宽度,  $f \in (0, 1]$  代表影响点  $y_i$  的  $x_i$  范围。

3) 给定一个权函数  $W(x)$ , 对每一个在窗内的  $x_i, k = 1, 2, \dots, n$  计算权重:

$$W_k(x_i) = W(h_i^{-1}(x_k - x_i)) \quad (6)$$

4) 参数  $\beta_{ik} (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, d)$  的估计公式为:

$$(\hat{\beta}_{i1}, \dots, \hat{\beta}_{id}) = \arg \min \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_j - \beta_{i0} - \beta_{i1}x_i - \dots - \beta_{id}x_i^d)^2 \quad (7)$$

得到  $y_i$  的拟合值

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^d \hat{\beta}_{ik} x_i^k \quad (8)$$

### 1.3 改进 EEMD 的降噪方法

通常, EEMD 降噪方法会舍弃噪声主导的 IMF 分量, 再把其余的有效分量重构, 这种降噪有效但也损失部分信息<sup>[13]</sup>。为了最大限度的保留噪声 IMF 分量中的有用信号, 本文综合运用傅里叶频谱分析和局部加权回归散点平滑算法, 从充分利用 IMF 分量中的有效信号角度对 EEMD 算法进行改进。

EEMD 分解之后的各 IMF 分量进行傅里叶频谱分析结果差别较大, 噪声部分的傅里叶频谱图, 相较于有用信号的傅里叶频谱图更为复杂, 应用方差分析数据的离散变化趋势, 需要在每一阶对有用信号 IMF 分量和噪声 IMF 分量计算, 若为噪声 IMF 分量, 则方差变化较大, 反之, 方差越小, 则为有用信号 IMF 分量。最后运用局部加权回归散点平滑算法, 再次滤波处理, 将处理后的分量与纯净有效信号分量重构<sup>[14]</sup>。改进流程如图 1 所示, 具体步骤如下:

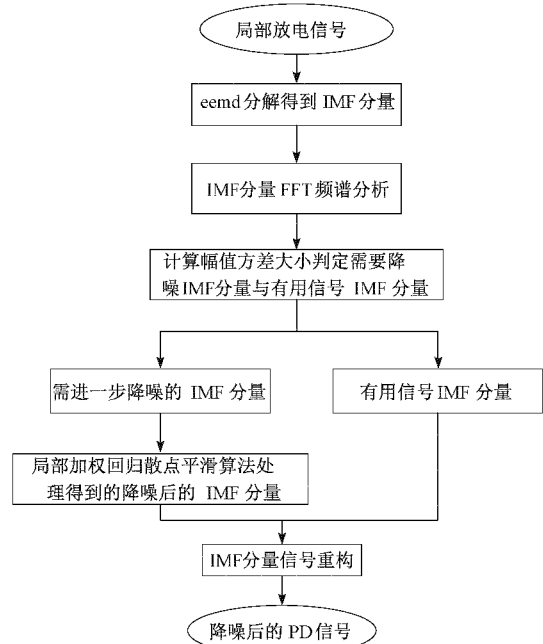


图 1 改进的 EEMD 去噪算法流程

1) 首先利用 EEMD 将原信号分解为一系列高频到低频的 IMF 分量;

2) 对各个分量进行频谱分析, 计算其对应的幅值方差;

3) 确定需要进一步降噪的 IMF 分量, 进行信号重构;

4)通过局部加权回归散点平滑算法对重构分量进行二次滤波;

5)将二次滤波后的分量和纯净有用信号分量进行叠加,得到降噪后的局部放电信号分量。

## 2 仿真与结果分析

### 2.1 降噪效果评价体系

为了对比降噪效果,本文引入信噪比(SNR)和波形相似系数(NCC)作为评价信号降噪效果指标,信噪比越大,NCC 越接近 1,降噪效果越好<sup>[15]</sup>

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{n=1}^{N-1} s^2(n)}{\sum_{n=1}^{N-1} (s(n) - y(n))^2} \quad (9)$$

$$NCC = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} s(n)y(n)}{\sqrt{(\sum_{n=1}^{N-1} (s^2(n))) (\sum_{n=1}^{N-1} (y^2(n)))}} \quad (10)$$

式中: $s(n)$ 代表原始 PD 信号, $y(n)$ 代表降噪后 PD 信号。

### 2.2 降噪仿真分析

阅读大量论文,研究实验数据,本文采用单指数衰减震荡、双指数衰减震荡模型模拟 PD 信号,数学表达式分别为<sup>[16]</sup>:

$$S_1(t) = A_1 e^{-t/\tau_1} \sin(2\pi f_c t) \quad (11)$$

$$S_2(t) = A_2 (e^{-1.3t/\tau_2} - e^{-2.2t/\tau_2}) \sin(2\pi f_c t) \quad (12)$$

染噪信号模型可以表示为:

$$Y(t) = S(t) + z(t) \quad (13)$$

式中: $A$ 为信号幅值, $A_1$ 、 $A_2$ 分别取 0.01 mV,0.015 mV,衰减系数取 0.5  $\mu$ s、1  $\mu$ s,振荡中心频率  $f_c$ 取 5 MHz,采样频率 50 MHz,采样点数 2 048。

$Y(t)$ 是染噪 PD 信号, $Z(t)$ 是噪声信号, $S(t)$ 是纯净的 PD 信号,得到仿真 PD 信号及频谱图(图 2(a)),白噪声利用高斯白噪声模拟产生,添加 3 dB 白噪声的 PD 信号及频谱图(图 2(b))。

PD 信号经 EEMD 分解的得到 12 阶 IMF 分量,对其进行傅里叶变换,得到每阶 IMF 分量对于的频谱图。如图 3 所示。

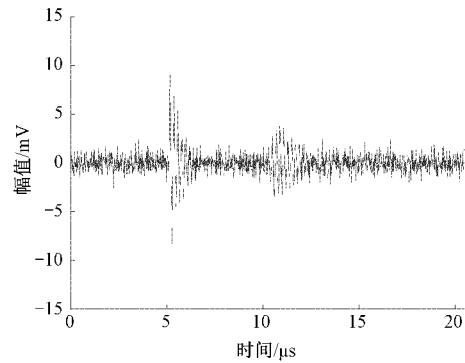
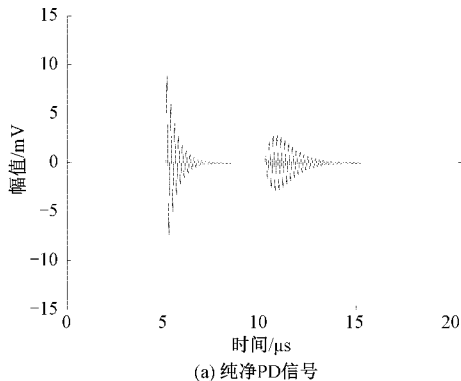
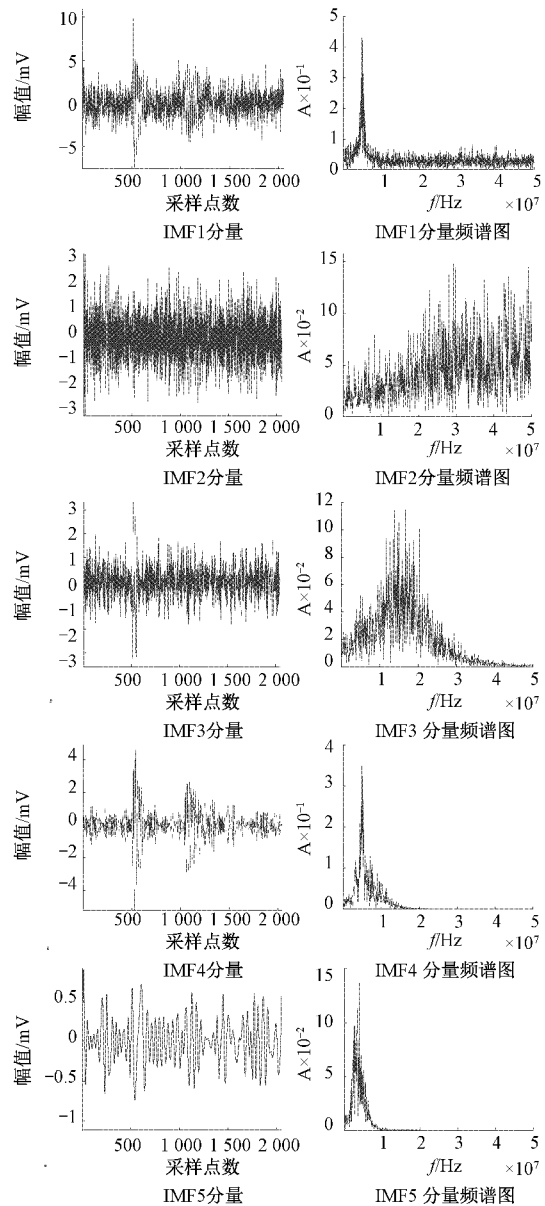


图 2 仿真 PD 信号



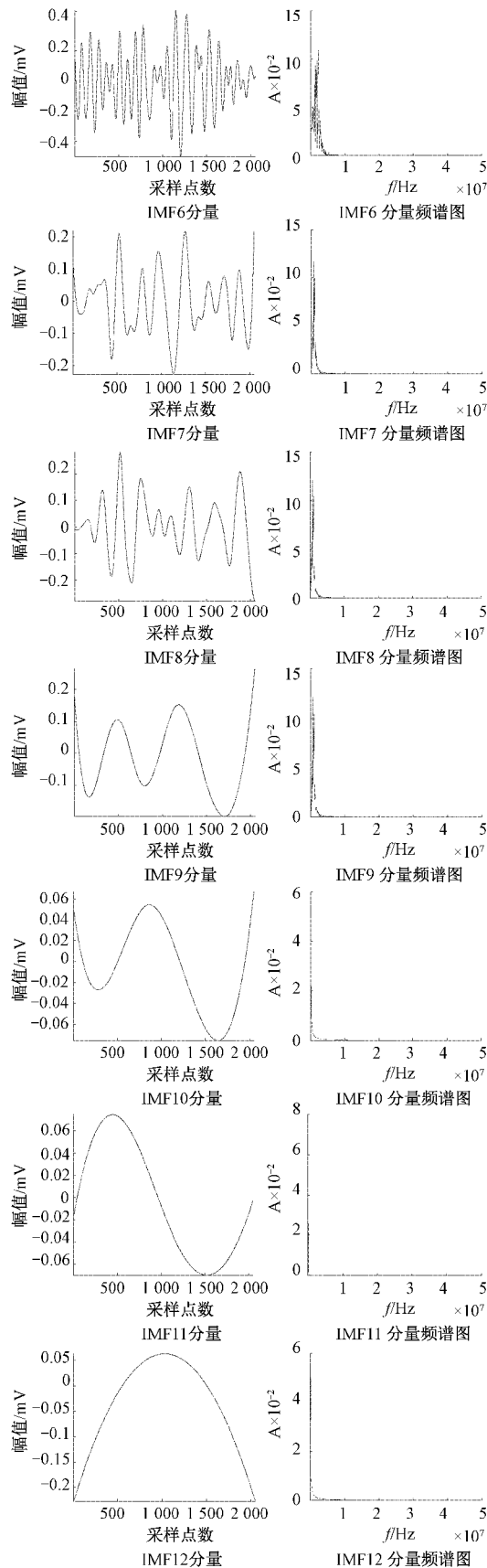


图 3 各阶分量和频谱图

为防止不同阶的经由傅里叶变换后的 IMF 分量的幅值的数量级不相同,对幅值应用归一化处理,减小数量级的影响,再分别计算它们的方差大小并绘制出方差大小的变化曲线,列出信噪比为 3 dB, -1 dB 的仿真信号分析结果如表 1,并绘制不同信噪比的局部放电信号 IMF 分量傅里叶变换幅值方差,如图 4 所示。

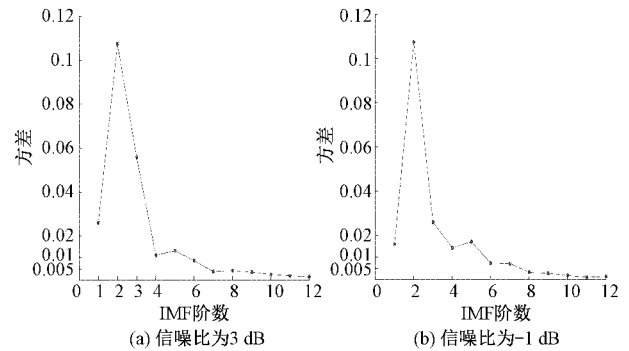


图 4 不同信噪比的局部放电信号 IMF 分量傅里叶变换幅值方差

由图 4 中可以看出无论添加 3 dB 还是一 dB 白噪声的局部放电仿真信号经过 EEMD 分析可知,傅里叶变换处理过后,当方差低于 0.005 时,IMF 7~12 分量的方差变化较小,离散性较小,对应为纯净有用信号,对其进行保留。剩余的 IMF 1~7 分量中包含噪声,需要对其进行局部加权回归散点平滑二次滤波得到降噪后的 IMF 分量,将二次滤波后的分量和纯净有用信号分量进行叠加,得到降噪后的局部放电信号分量。结果如图 7 所示,与纯净局部放电信号相比波形相似度高,波形畸变小,由图 8 可以看出。

为了检验本文方法的降噪有效性,下文给出了与 EEMD 算法、小波降噪对信噪比为 3 dB 的局部放电仿真信号去噪效果对比,图 5 是 EEMD 算法去噪效果图,图 6 是采用选用 dB6 小波,分解层数为 5 层全阈去噪效果图,可以看出改进的 EEMD 对局部放电信号降噪效果相比于 EEMD 和小波降噪更好,特征更加明显。

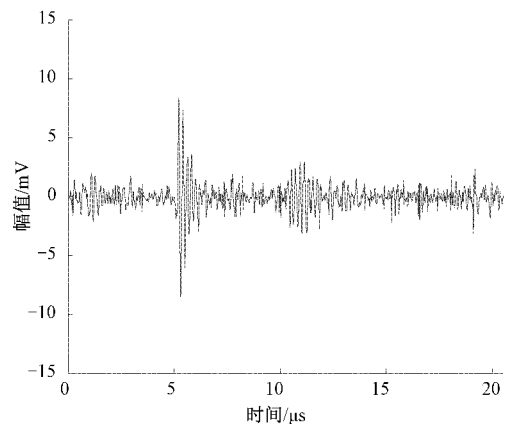


图 5 EEMD 算法降噪

表 1 局部放电信号 IMF 分量傅里叶变换幅值方差大小

3 dB	方差	3 dB	方差	-1 dB	方差	-1 dB	方差
IMF1	0.026 1	IMF7	0.003 8	IMF1	0.015 9	IMF7	0.007 2
IMF2	0.107 5	IMF8	0.004 3	IMF2	0.107 0	IMF8	0.003 2
IMF3	0.558 0	IMF9	0.003 5	IMF3	0.025 9	IMF9	0.002 8
IMF4	0.101 12	IMF10	0.002 5	IMF4	0.143 0	IMF10	0.001 8
IMF5	0.011 3	IMF11	0.001 9	IMF5	0.017 1	IMF11	0.001 4
IMF6	0.008 7	IMF12	0.001 5	IMF6	0.007 4	IMF12	0.001 3

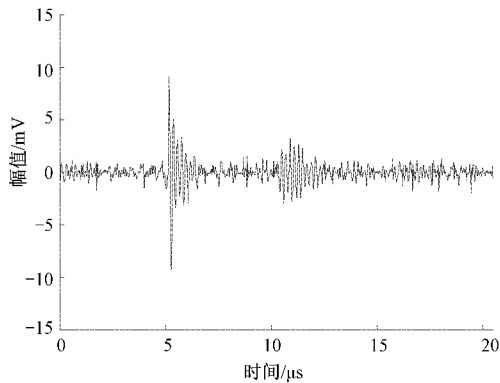


图 6 小波降噪

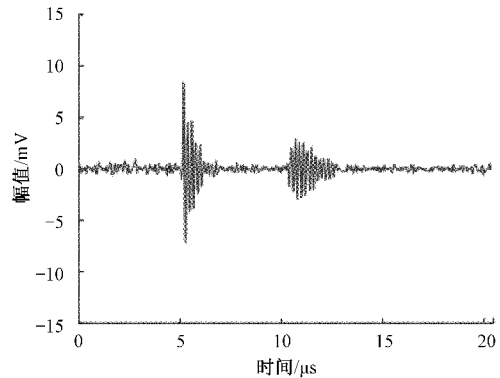


图 7 本文方法降噪

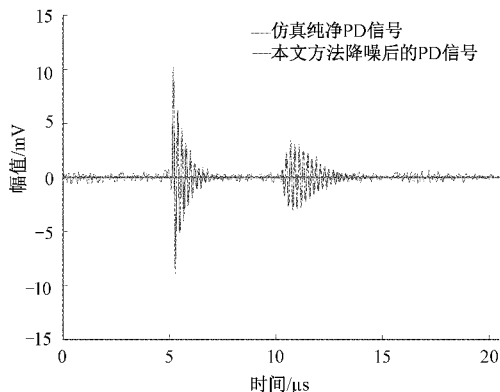


图 8 本文方法处理后 PD 信号与纯净 PD 信号对比

将 3 种滤波方法进行实验并对比,可知本文所提方法

的评价指标均优于所对比方法,具有更好的适应性,噪声抑制更好,与原信号相似度更高。

表 2 局部放电仿真信号 3 种方法去噪性能对比

指标	降噪前	小波降噪	EEMD	改进的 EEMD
SNR	-17.091	4.863	5.249	6.986
NCC	0.150	0.789	0.823	0.927

### 3 实 验

为了进一步说明本文方法滤除实测局放信号中噪声的有效性,将其应用于电缆绝缘在线监测实验测试。在基于局部放电法的电缆绝缘在线监测中,能否准确提取到局部放电信号是判断电缆绝缘是否由缺陷的关键。选择实验室 10 kV XLPE 电缆,电缆其中 3 处经不同程度锤击处理后,加入 10 kV 高压测量,实验接线如图 9 所示。测试采用实验室自制高频电流传感器(频率 50 MHz),型号 Agilent MSO7034B 的示波器,将高频电流传感器装在锤击电缆的接地线上,采集故障电缆的中的局部放电信号。

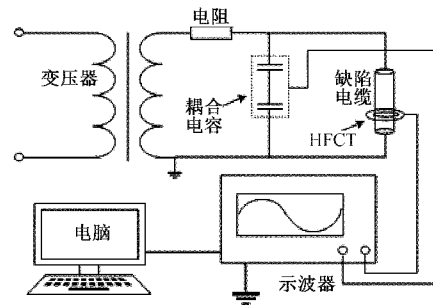


图 9 实验平台

测得的 PD 信号(图 9 所示),由此可看出,PD 信号四周被噪声全覆盖,用本文方法对染噪信号进行处理(图 10),得到降噪后的 PD 信号(如图 10 所示),可以看出波形畸变较小,本文方法有效抑制了 PD 信号中的白噪声,实现了在干扰信号中提取到特征明显的局部放电信号的目标。

将应用本文降噪算法的电缆绝缘在线监测系统在平煤供电公司挂网运行。主要测试方法:打开 10 kV 环网柜,将高频电流传感器卡接于其中一条高压电缆屏蔽层的接地线上,数据采集装置放在传感器周围,进行局部放电

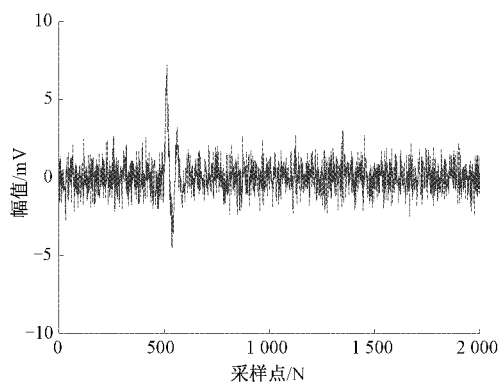


图 10 实测含噪 PD 信号

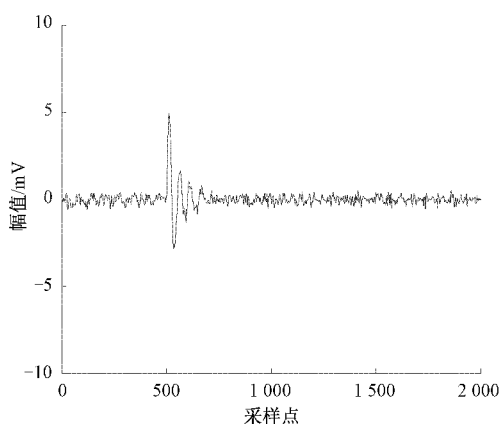


图 11 本文方法去噪后 PD 信号

信号数据采集。通过尾纤和通信模块将数据传送到笔记本上进行局部放电信号的检测。图 12 为现场安装图。

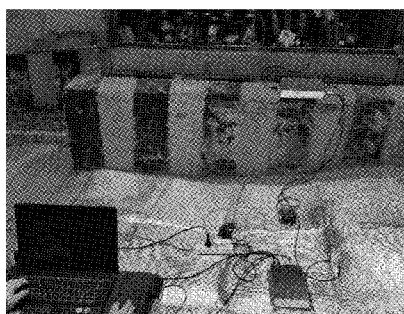


图 12 现场安装设备图

将采集到的信号传输到软件,后台软件显示的波形图如图 13 所示,经过对比可以看出经过降噪算法处理,信号的信噪比从  $-8.05$  dB 提高到  $4.69$  dB,波形相似系数从  $0.12$  提高的  $0.84$ ,可以看出噪声得到了很大程度的抑制,局部放电的特征得以显现出来。

检测到局部放电信号后,对测量的电缆进行排查,找到了电缆缺陷处,如图 14 所示,检查发现是由于导体表面受到了挤压导致从而导致了局部放电现象。证明了本文所提的基于改进 EEMD 的局部放电信号提取算法的有效性,能够满足电缆绝缘在线监测的需求。

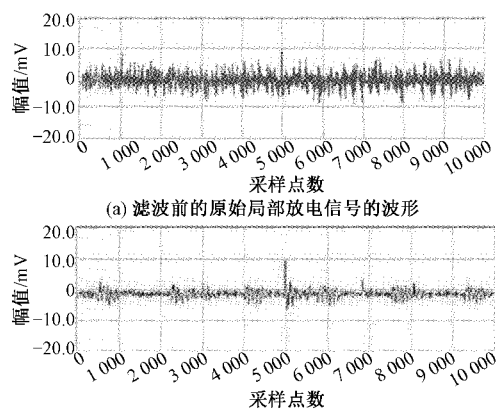


图 13 滤波前后的局部放电信号的波形

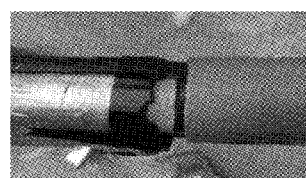


图 14 缺陷点解剖排查

## 4 结 论

EEMD 可以自适应将原始局部放电信号分解成不同频率的 IMF 分量,并能够较好的分离。在一定程度上改善了 EMD 模态混叠现象,而且不需要人为选择分解层数。

对于 EEMD 降噪后,仍有少量噪声的存在的问题,本文选择对各个分量进行频谱分析,计算其对应的幅值方差,以方差分布离散程度大为标准筛选出噪声和有效信号混叠的 IMF 分量,利用局部加权回归散点平滑算对其进行二次滤波,从而将信号中的噪声进一步滤除。

通过仿真结果分析,本文方法在不同噪声强度下的降噪效果的对比,相同信号下本文方法与 EEMD、小波处理的降噪效果对比,信噪比和均方根误差均有所提高,结果表明本文方法更准确地保留信号的特征形态。

将改进 EEMD 的局部放电降噪算法应用在电缆绝缘在线监测系统中,通过实验室测试和现场实验,分析指标数据,验证了本文方法有效抑制了 PD 信号中的白噪声,实现了在干扰信号中提取到特征明显的局部放电信号的目标。

## 参考文献

- [1] 王文凯,邓斌.基于 DAE-IPSO-SVM 的电缆早期故障识别方法[J].国外电子测量技术,2021,321(8):29-35.
- [2] 张讯培.电缆局部放电高频信号的提取及处理技术研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [3] 米翰宁,王昕,任广振,等.自适应小波阈值去噪算法用于局部放电白噪声去噪[J].高压电器,2021,57(6):

- 94-101.
- [4] ALTAY O, KALENDERLI O. Wavelet base selection for de-noising and extraction of partial discharge pulses in noisy environment[C]. IET Science Measurement & Technology, 2015.
- [5] 肖洒, 陈波, 沈道贤, 等. 改进 VMD 和阈值算法在局部放电去噪中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 251(11): 206-214.
- [6] 杨志超, 范立新, 杨成顺, 等. 形态学滤波与自适应噪声抵消在 GIS 局部放电超高频信号去噪中的应用[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 41-46, 54.
- [7] ASHTIANI M, SHAHRTASH S. Partial discharge de-noising employing adaptive singular value decomposition[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 775-782.
- [8] 饶显杰, 周凯, 汪先进, 等. 基于改进 SVD 算法的局部放电窄带干扰抑制方法[J]. 高电压技术, 2020, 5(6): 1-9.
- [9] 阮羚, 李成华, 宿磊, 等. 基于奇异值分解的局部放电模式识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 223-228.
- [10] 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.
- [11] 郑近德, 程军圣, 杨宇. 改进的 EEMD 算法及其应用研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 21-26.
- [12] 彭炜文, 刘伟杰, 许家浩, 等. 一种基于相关系数的 EEMD 局部放电去噪方法[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 203-209.
- [13] 刘嘉蔚, 李奇, 陈维荣, 等. 基于核超限学习机和局部加权回归散点平滑法的 PEMFC 剩余使用寿命预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7272-7279, 7500.
- [14] 彭炜文, 田慕琴, 宋建成, 等. 一种基于 EEMD 和高阶统计量的局部放电白噪声抑制方法[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 54-59, 64.
- [15] 侯北平, 张晓刚, 朱文, 等. 基于频域滤波的电缆线芯图像纹理消除研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 210-219.
- [16] 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.

#### 作者简介

付伟, 工学学士, 高级工程师, 主要研究方向为矿用机电设备技术管理。

E-mail: hpummm@126.com