

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191116

# 基于 AVMD-自适应小波包法的电缆局部放电去噪研究

吴童<sup>1</sup>, 孙抗<sup>1</sup>, 师文文<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. 中铝物流集团中州有限公司, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 为准确提取检测到的局部放电信号, 针对高压电力电缆的噪声抑制问题, 提出了自适应变分模态分解(AVMD)结合自适应小波包分解的方法提取纯净的局放信号。首先运用 AVMD 将周期性窄带干扰、白噪声和局放信号分解在不同的基本模态分量中, 将周期性窄带干扰滤出, 得到仅含有白噪声的局放信号。再运用自适应小波包分解, 将信号分解在高、中、低频的分量中, 根据阈值法将不含局放信号的分量滤出, 得到较为纯净的局放信号, 并将所提方法分别与其中单独一种算法进行比较分析。仿真结果表明, 所提方法抑制噪声效果更明显, 与仿真信号的相似度最高。

**关键词:** 局部放电; AVMD; 自适应小波包分解; 周期性窄带干扰; 白噪声

## Research on cable partial discharge denoising based on an AVMD-adaptive wavelet packet method

WU Tong<sup>1</sup>, SUN Kang<sup>1</sup>, SHI Wenwen<sup>2</sup>

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

2. Chinalco Logistics Group Zhongzhou Co., Ltd., Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In order to extract the detected PD signal accurately and solve the problem of noise suppression of a high voltage power cable, AVMD combined with adaptive wavelet packet decomposition is proposed to extract a pure PD signal. First, the periodic narrow-band interference, white noise and PD signals are decomposed into different basic modal components by AVMD. The periodic narrowband interference is filtered out to obtain the partial discharge signal with white noise only. Then adaptive wavelet packet decomposition is used to decompose the signal in the high, middle and low frequency components. According to the threshold method, the components without a PD signal are filtered out to get a pure PD signal. The method is compared with one of the other methods. The simulation results show that the noise suppression effect of this method is more apparent, and the similarity with the simulation signal is the highest.

This work is supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 61403130).

**Key words:** partial discharge; AVMD; adaptive wavelet packet decomposition; periodic narrow-band interference; white noise

## 0 引言

相比于架空线路, 高压电缆的优点在于不占用地上空间, 比较美观, 且线损较小<sup>[1-2]</sup>。但缺点在于深埋于地下的电缆所处环境较为恶劣, 绝缘易被腐蚀, 老化速度快<sup>[3]</sup>。电缆刚发生故障时, 检测到的信号往往伴随着大量噪声, 而局放信号却很微弱。因此, 如何在多种噪声并存的情况下提取出较为纯净的局放信号, 不仅是电缆局部放电在线监测<sup>[4]</sup>与定位的核心问题, 也是电缆局部放电模式识别<sup>[5-6]</sup>中预处理环节的核心问题。

局放信号的干扰包括两大类: 周期性窄带干扰与白噪声<sup>[7-8]</sup>。这两种类型的信号由不同原因产生。周期性窄带干扰主要是由高次谐波引起, 白噪声干扰主要是由设备的热噪声引起。目前, 从干扰中提取局放信号的主要方法有小波分解<sup>[9-10]</sup>、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)<sup>[11]</sup>、变分模态分解(Variational Mode Decomposition, MD)<sup>[12-14]</sup>。小波包变换能很好地表示机械振动、地震和局放等非平稳信号, 能够更好地进行时频局部化分析。但是小波包分解存在分解尺度选择困难、小波基的选择困难以及频率混叠等问题。EMD 算法能自适应地将含噪局放信号分解为单一尺度的基本模态分量(Intrinsic Mode Function, IMF)而受到广泛关注<sup>[15-17]</sup>。但缺点是无法确定局放信号中的干扰信号的频带中

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

心与宽度。VMD 算法将信号较完美地分解到几个独立的频带内, 通过调节惩罚因子将周期性窄带信号和局放信号分解到相应的频带内, 从而达到抑制窄带干扰信号的目的。但是 VMD 也存在自身的问题, 即模态数的设定问题。模态数过大, 造成过分解, 增加计算量; 模态数过小, 造成模态丢失。

综合上述分析, 根据各算法的优缺点, 本文提出自适应变分模态分解<sup>[18]</sup>(Adaptive VMD, AVMD) 结合自适应小波包分解抑制周期性窄带干扰和白噪声干扰, 提取局放信号。仿真结果表明, 提取的局放信号满足各评价参数的要求, 波形失真度小, 是一种很好的去噪方法。

## 1 自适应变分模态与自适应小波包分解

### 1.1 自适应变分模态分解原理

#### (1) 变分问题的得出

VMD 的核心是变分问题的构造与求解<sup>[19]</sup>。

即首先把预估中心频率加入到通过 Hilbert 变换所得解析信号中, 再通过计算解调信号梯度的平方范数, 估计每个基本模态函数的带宽, 最后得出变分问题为

$$\min_{\{u_k, \omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ (\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] * e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (1)$$

s.t.  $\sum_k u_k = x(t)$

式中,  $u_k(t)$  为  $k$  个基本模态分量。

#### (2) 变分问题的求解

求解思路为首先引入两个参数: 惩罚因子  $\beta$  和 Lagrange 乘法算子  $\lambda(t)$ ,  $\beta$  与  $\lambda(t)$  的作用分别是提高信号重构准确度与增强方程约束力。将方程由约束性转变为非约束性, 求出最优解:

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \beta \sum_k \left\| \partial_t \left[ (\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] * e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (2)$$

采用乘法算子交替方向法交替更新  $u_k^{n+1}$ 、 $\omega_k^{n+1}$  和  $\lambda^{n+1}$ , 寻求 Lagrange 扩展表达式的“鞍点”。

基本模态分量  $u_k^{n+1}$  表达式为

$$u_k^{n+1} = \arg \min_{u_k \in X} \left\{ \beta \left\| \partial_t \left[ (\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] * e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_{i \neq k} u_i(t) + \frac{\lambda(t)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (3)$$

式中,  $\omega_k = \omega_k^{n+1}$ 。

进一步用 Parseval/Plancherel Fourier 等距变换, 将  $u_k^{n+1}$  转换到频域。

$$\hat{u}_k^{n+1} = \arg \min_{\hat{u}_k, \omega_k \in X} \left\{ \beta \left\| j\omega \left[ (1 + \operatorname{sgn}(\omega + \omega_k)) * \hat{u}_k(\omega + \omega_k) \right] \right\|_2^2 + \left\| \hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (4)$$

将  $\left\| j\omega \left[ (1 + \operatorname{sgn}(\omega + \omega_k)) * \hat{u}_k(\omega + \omega_k) \right] \right\|_2^2$  中的  $\omega$  用  $\omega - \omega_k$  代替, 并在非负频率区间求积分得:

$$\hat{u}_k^{n+1} = \arg \min_{\hat{u}_k, \omega_k \in X} \left\{ \int_0^\infty [4\beta(\omega - \omega_k)^2 * \hat{u}_k^2(\omega) + 2 \left| \hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right|^2] d\omega \right\} + \int_0^\infty \left| \hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right|^2 d\omega \quad (5)$$

此时, 可得待求解的二次优化问题解为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\beta(\omega - \omega_k)^2} \quad (6)$$

同理, 中心频率取值问题转换到频域上的表达式为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \arg \min_{\hat{u}_k, \omega_k \in X} \left\{ \int_0^\infty (\omega - \omega_k)^2 * |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega \right\} \quad (7)$$

式中:  $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$  表示当前剩余量  $\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega)$  的维纳滤波;  $\hat{u}_k^{n+1}(t)$  进行傅里叶变换等于  $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 。

由式(7)可得中心频率的更新式为

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (8)$$

式中,  $\omega_k^{n+1}$  为当前基本模态函数功率谱的重心。

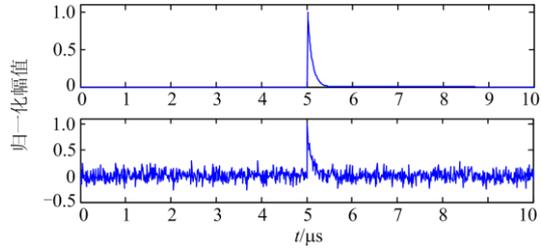
### 1.2 自适应小波包分解原理

#### 1.2.1 小波包分解存在的问题及改进

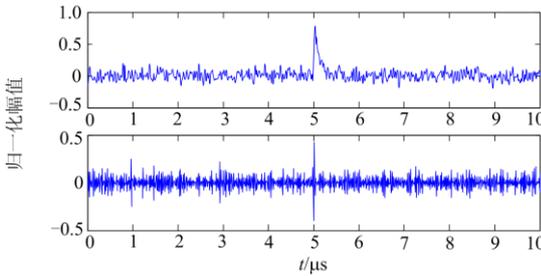
为了保证信噪分离时, 信号分解的无冗余性, 减少局放信号损失, 需要选择合适的分解尺度; 为了获取更好的信号特征, 需要选择最佳小波基。采用门限函数<sup>[20]</sup>和紧支性<sup>[21]</sup>作为优选指标来寻找最佳小波基。通过大量的 Matlab 仿真算法研究, db4

小波基<sup>[22]</sup>与高频电流传感器所采集的电缆局放信号有最大相似度, 因此本文采用最佳小波基 db4 进行信噪分离。

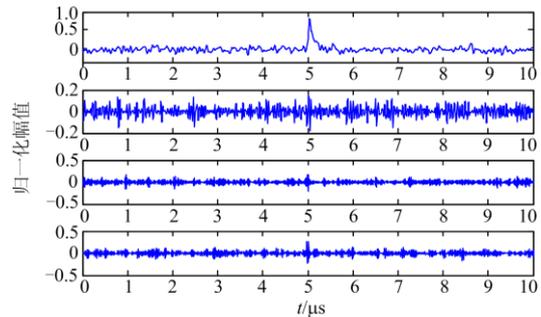
采用含有白噪声的单指数衰减模型仿真电缆局放信号<sup>[23]</sup>来考察小波包分解尺度对分解结果的影响, 在信噪比 SNR 为-13 dB 时, 分别设定不同的分解尺度  $J(J=1,2,3,4)$  进行小波包分解, 其分解图如图 1 所示。



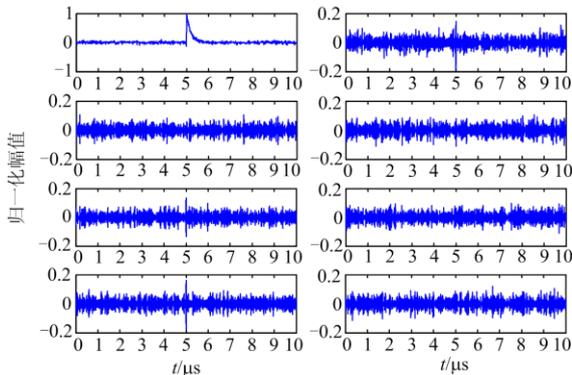
(a) 单指数衰减仿真电缆局放信号及染噪信号



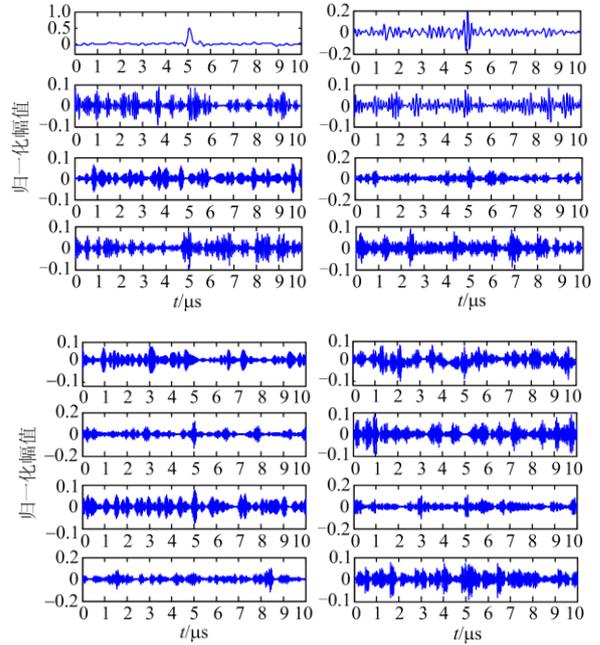
(b)  $J=1$ , db4小波包分解



(c)  $J=2$ , db4小波包分解



(d)  $J=3$ , db4小波包分解



(e)  $J=4$ , db4小波包分解

图 1 不同尺度下噪声抑制, 提取信号分解

Fig. 1 Noise suppression at different scales to extract signal decomposition map

从图 1 可以看出随着分解尺度的增加, 分量 1 噪声不断减小, 在  $J$  为 1 时, 分量 1 噪声含量较高,  $J$  为 4 时, 波形失真和能量损失严重。为了选择合适的分解尺度, 需要进一步计算前 6 个分量与染噪声局放信号的相关系数  $\rho_k$ 、分量 1 与仿真局放信号的相关系数 NCC、提取的局放信号信噪比 SNR 和幅值相对误差  $d$ , 对波形进行定量分析, 分别如表 1 所示。

表 1 不同分解尺度下的各相关系数

Table 1 Correlation coefficients under different decomposition scales

$J$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_5$	$\rho_6$	NCC	SNR/ dB	$d/\%$
$J=1$	0.80	0.61				0.67	-0.1	10.0
$J=2$	0.67	0.42	0.41			0.77	2.6	16.7
$J=3$	0.45	0.25	0.25	0.21	0.24	0.83	4.6	23.3
$J=4$	-0.00025	-0.006	0.0018	0.01	0.07	0.82	4.8	43.3

从表 1 中可以看出在分解尺度为 1 时, 幅值相对误差小, 但抑噪能力较差, 与仿真信号相似度低, 在分解尺度为 4 时分解抑噪能力较好, 但幅值相对误差大, 在分解尺度为 3 时, 抑噪能力好, 与仿真信号相似度最高, 幅值相对误差适中, 因此在染噪声信号信噪比为-13 dB 时, 小波包三尺度分解为最优。

基于上述分析我们提出自适应小波包分解法, 即首先根据信号特征确定小波基为 db4, 设定阈值,

从基本分解尺度进行分解,若分解后各分量与原信号之间的相关系数存在小于阈值 $a$ (根据上述分析本文取 $a=0.3$ )的情况,则停止分解。自适应小波包分解的流程如图2所示。

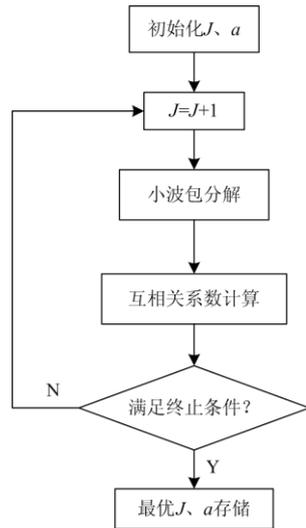
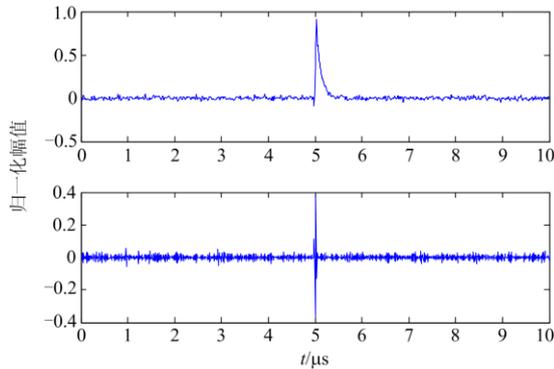


图2 自适应小波包分解流程

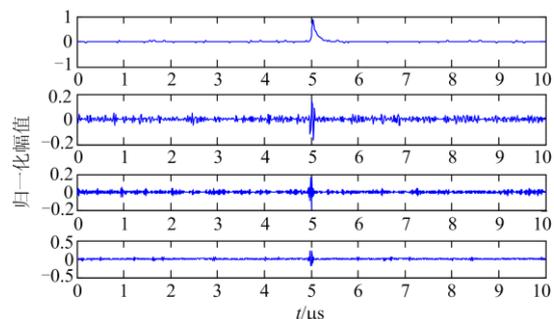
Fig. 2 Adaptive wavelet packet decomposition flow

### 1.2.2 自适应小波包分解提取局放信号性能分析

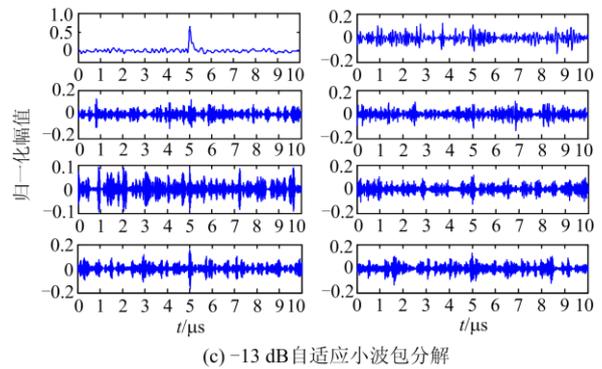
对图1(a)所示信号分别添加信噪比为0 dB、-2.5 dB、-13 dB 的白噪声干扰,运用自适应小波包分解,分解结果如图3所示。



(a) 0 dB 自适应小波包分解



(b) -2.5 dB 自适应小波包分解



(c) -13 dB 自适应小波包分解

图3 不同程度的白噪声自适应小波包分解

Fig. 3 Adaptive wavelet packet decomposition with varying degrees of white noise

如图3所示,在不同程度的白噪声干扰下,自适应小波包分解选择合适的分解尺度进行分解,在抑制白噪声、提取局放信号时,既保证了与原信号的相似度,又不至于能量损失过多,为了说明其效果进行定量分析,进一步计算NCC、抑噪后信噪比,如表2所示。

表2 不同程度染噪信号自适应小波包分解去噪结果

Table 2 Adaptive wavelet packet decomposition and denoising results of signal with different degrees of noise

染噪信号信噪比/dB	0.0	-2.5	-13.0
NCC	0.950 7	0.939 7	0.829 4
抑噪后信噪比/dB	10.2	9.4	4.6

如表2所示,自适应小波包分解在能量损失小的情况下,抑制白噪声,提取的局放信号与仿真信号波形相似度较高,说明自适应小波包分解能够有效地对不同程度白噪声干扰下的局放信号自适应选择最佳分解尺度,抑制噪声能力强。

## 2 AVMD-自适应小波包分解提取局放信号

大量文献和试验证明<sup>[24-25]</sup>,由于局放信号在沿电缆传播过程中会有很大的振荡和衰减,故本文采用四种数学仿真模型模拟实际局放信号:单指数衰减函数、双指数衰减函数、单指数振荡衰减函数和双指数振荡衰减函数,如式(13)、式(14)、式(15)和式(16)所示。

(1) 单指数衰减模型,即

$$f(t) = Ae^{-(t-t_0)/\tau} \quad (13)$$

(2) 双指数衰减模型,即

$$f(t) = A(e^{-1.3(t-t_0)/\tau} - e^{-2.2(t-t_0)/\tau}) \quad (14)$$

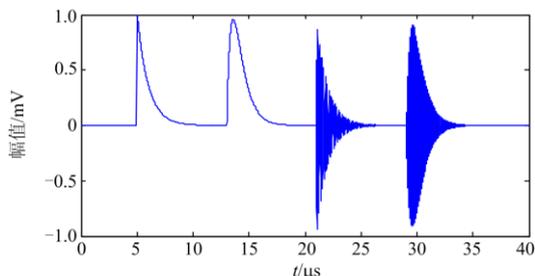
(3) 单指数振荡衰减模型,即

$$f(t) = Ae^{-(t-t_0)/\tau} \sin(2\pi f_c(t-t_0)) \quad (15)$$

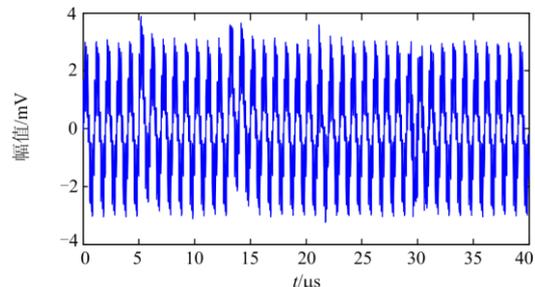
(4) 双指数振荡衰减模型, 即

$$f(t) = A(e^{-1.3(t-t_0)/\tau} - e^{-2.2(t-t_0)/\tau}) \sin(2\pi f_c(t-t_0)) \quad (16)$$

式中:  $A$  为信号幅值, 分别为 1 mV、5 mV;  $\tau$  为衰减系数, 取 1  $\mu$ s;  $f_c$  为振荡频率, 取 5 MHz;  $t_0$  为延时时间; 采样频率为 100 MHz, 采样时间为 40  $\mu$ s。得到四种电缆局放脉冲如图 4(a)所示; 添加信噪比为 -4 dB 的高斯白噪声干扰。由于窄带干扰主要呈现正弦或余弦状<sup>[26]</sup>, 因此可利用不同频率的正弦函数进行叠加对周期性窄带干扰进行模拟。窄带干扰频率设置为 8 MHz、10 MHz、15 MHz, 幅值分别为 2 mV、1 mV、0.5 mV, 添加两种类型的噪声后的染噪信号如图 4(b)所示。经计算染噪后的局放信号的信噪比 SNR 为 -16.6 dB, 此时在时域上已经无法识别局放信号。



(a) 四种类型电缆局放模拟信号



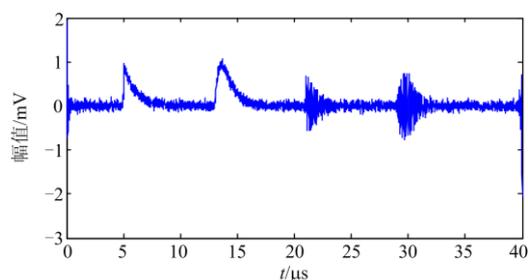
(b) 添加两种噪声的染噪信号

图 4 模拟含有两种干扰的局放信号

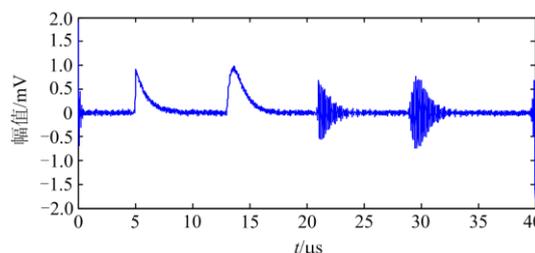
Fig. 4 Simulating a partial discharge signal with two kinds of interference

对上述信号进行 AVMD 分解, 去除周期性窄带干扰所在的模态, 然后将剩余的模态合成, 其结果如图 5(a)所示。再经自适应小波包分解, 根据阈值法<sup>[27]</sup>去除含有高斯白噪声的分量, 将剩余分量合成, 进一步提取局放信号, 如图 5(b)所示。四种类型的局放信号去噪前后细节图对比如图 5(c)、5(d)、5(e)、5(f)所示。为了验证该算法的有效性, 将四种类型的局放幅值降低, 由原局放幅值为 1 分别降低为 0.9、0.7、0.5, 此时局放信号已经完全被噪声淹没。降低局放幅值后, 经计算染噪信号信噪比分别

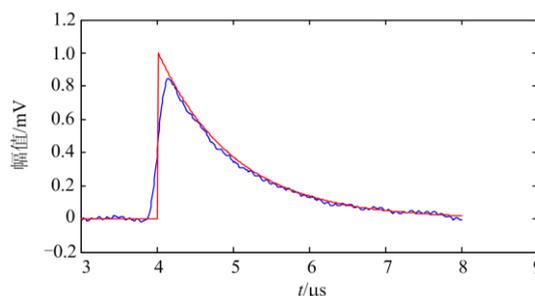
-22.7 dB、-19.7 dB、-17.6 dB, 分析去噪效果, 如图 5(g)、5(h)、5(i)所示。



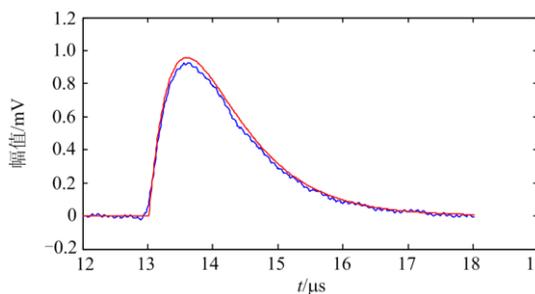
(a) AVMD分解提取局放信号结果



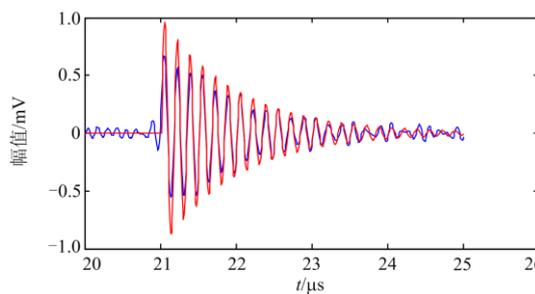
(b) 自适应小波包分解进一步提取局放信号结果



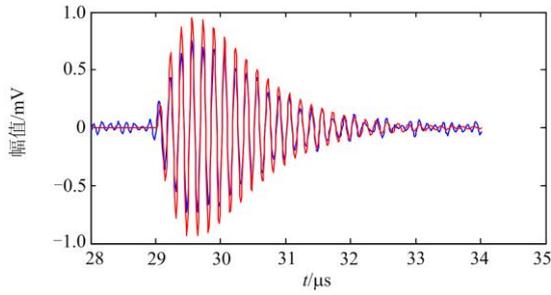
(c) 脉冲1



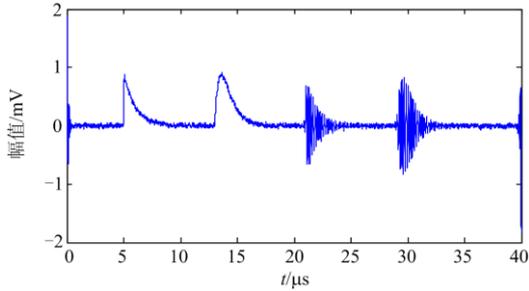
(d) 脉冲2



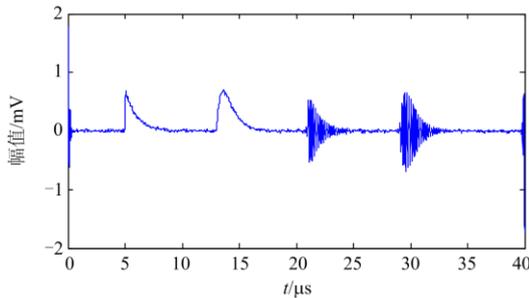
(e) 脉冲3



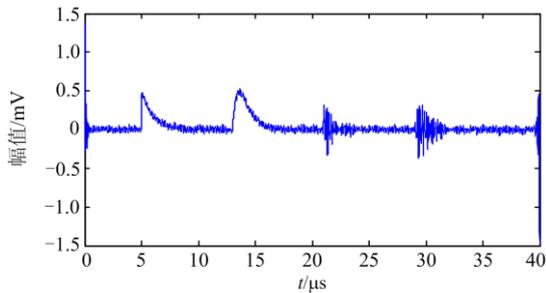
(f) 脉冲4



(g) 自适应小波包分解进一步提取局放信号结果(幅值0.9)



(h) 自适应小波包分解进一步提取局放信号结果(幅值0.7)



(i) 自适应小波包分解进一步提取局放信号结果(幅值0.5)

图5 AVMD 结合自适应小波包分解提取局放信号结果

Fig. 5 AVMD combined with adaptive wavelet packet decomposition to extract PD signal results

由图 5(c)、5(d)、5(e)和图 5(f)可知, 经 AVMD 结合自适应小波包分解提取的局放信号在幅值及相位上都与原信号保持高度的一致性, 它们对后续的局放信号分析几乎不产生影响。将原局放幅值为 1 分别降低为 0.9、0.7、0.5, 经过 AVMD 结合自适应小波包分解提取的局放信号分别如图 5(g)、5(h)、

5(i)。为了对提取的局放信号波形进行分析, 进一步计算提取的局放信号的仿真波形的相似系数  $NCC$ 、抑噪后的信噪比  $SNR$ 、波形变化趋势参数  $VTP$ , 得到的结果见表 3—表 6 所示。

表 3 未降低局放幅值时提取局放信号评价参数

Table 3 Extraction of PD signal evaluation parameters when PD amplitude is not reduced

脉冲序号	$NCC$	$SNR$	$VTP$
脉冲 1	0.990 3	16.092 4 dB	1.275 6
脉冲 2	0.998 4	22.835 9 dB	1.041 2
脉冲 3	0.984 1	13.871 1 dB	1.354 4
脉冲 4	0.988 1	11.684 5 dB	1.386 6
整体	0.995 7	17.239 0 dB	1.264 5

由表 3 结果可知, 提取的局放信号与仿真信号保持高度的相似性, 相似度高达 0.999 6, 细节的波形变化趋势同样保持高度的一致性, 最接近时达到 1.041 2; 抑制噪声后的信噪比最高可达到 22.8 dB, 与去噪前的 -16.6 dB 相比, 达到了良好的抑噪效果, 可以说明 AVMD 结合自适应小波包分解方法能够有效地抑制周期性窄带干扰和白噪声。

由表 4—表 6 结果可知, 随着局放幅值的逐渐减小, 该算法的去噪效果逐渐变差。在局放幅值为 0.5 时, 去噪后的单指数振荡衰减信号与双指数振荡衰减信号与原始信号的相似度差别较大, 不能满足精确提取的条件。另外在局放幅值为 0.7 时的去噪效果要略优于 0.9, 这是因为 AVMD 去噪算法自适

表 4 局放幅值为 0.9 时提取局放信号评价参数

Table 4 Extraction of PD signal evaluation parameters when PD amplitude is 0.9

脉冲序号	$NCC$	$VTP$	$SNR$
脉冲 1	0.990 4	1.724 4	17.186 0
脉冲 2	0.998 2	1.071 5	24.467 2
脉冲 3	0.984 7	2.021 8	14.980 5
脉冲 4	0.995 4	1.663 1	19.526 2
整体	0.992 2	1.620 2	19.040 0

表 5 局放幅值为 0.7 时提取局放信号评价参数

Table 5 Extraction of PD signal evaluation parameters when PD amplitude is 0.7

脉冲序号	$NCC$	$VTP$	$SNR$
脉冲 1	0.990 8	1.462 1	17.373 2
脉冲 2	0.999 1	1.057 1	27.461 9
脉冲 3	0.987 8	2.162 9	16.143 0
脉冲 4	0.997 9	1.977 4	23.563 4
整体	0.994 0	1.664 9	21.135 4

表 6 局放幅值为 0.5 时提取局放信号评价参数

Table 6 Extraction of PD signal evaluation parameters

when PD amplitude is 0.5

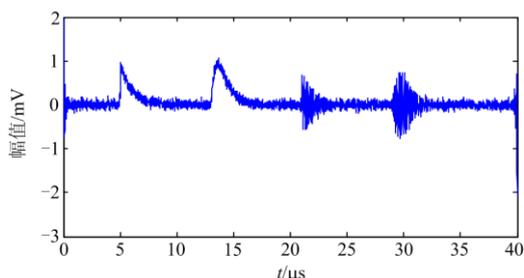
脉冲序号	<i>NCC</i>	<i>VTP</i>	<i>SNR</i>
脉冲 1	0.980 9	8.096 6	14.165 3
脉冲 2	0.992 9	3.646 7	18.409 2
脉冲 3	0.816 7	3.653 9	4.445 3
脉冲 4	0.859 3	3.212 5	4.742 5
整体	0.912 5	4.652 4	10.440 6

应地将染噪信号分解到最优分解层数, 最终结合自适应小波包得到的。其中提取的双指数衰减信号相似度最高, 高达 0.999 1, 细节波形变化趋势同样保持高度一致性, 最接近时达到 1.057 1; 抑制噪声后的信噪比最高可达到 27.5 dB, 与去噪前的-19.7 dB 相比, 达到了良好的抑噪效果。经计算, 当减小局放幅值至 0.57, 即信噪比为-21.9 dB 时, 该算法将不能精确提取信号。

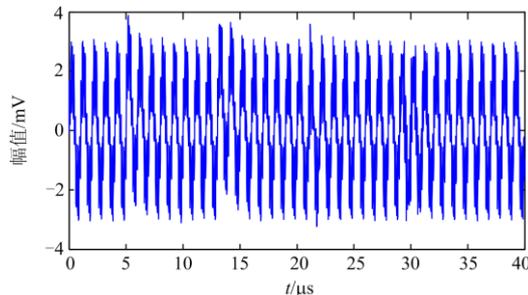
### 3 抑制噪声效果对比分析

对图 4(b)中染噪信号分别进行 AVMD、自适应小波包、AVMD 结合自适应小波包分解, 提取局放信号的结果如图 6(a)、6(b)、6(c)所示。

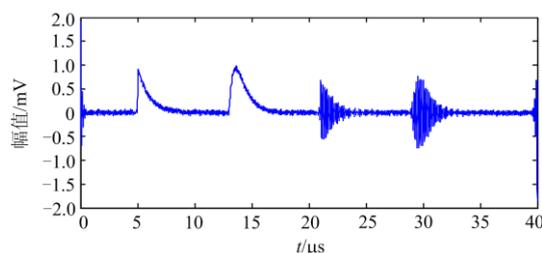
由图 6 结果可知, 经过 AVMD 分解, 提取局放信号后, 还存在白噪声干扰; 经过 AVMD 结合自适应小波包分解, 提取的局放信号, 噪声极大降低, 且波形与仿真波形一致性较高。进一步计算提取的局放信号的仿真波形的相似系数 *NCC*、抑噪后信噪比 *SNR*, 定量地对去噪后的波形进行分析, 得到结果如表 7 所示。



(a) AVMD分解抑制噪声结果



(b) 自适应小波包抑制噪声结果



(c) AVMD结合自适应小波包抑制结果

图 6 各方法抑制噪声效果图

Fig. 6 Effect diagram of noise suppression by each method

表 7 抑制噪声提取局放信号评价参数

Table 7 Evaluation parameters of partial discharge signal for noise suppression extraction

提取局放信号方法	AVMD		自适应小波包		AVMD 结合自适应小波包	
	<i>NCC</i>	<i>SNR</i> /dB	<i>NCC</i>	<i>SNR</i> /dB	<i>NCC</i>	<i>SNR</i> /dB
脉冲 1	0.934 7	4.429 1	0.124 4	-10.7	0.984 0	16.092 4
脉冲 2	0.965 5	7.142 7	0.106 3	-12.9	0.999 6	21.137 1
脉冲 3	0.970 6	3.162 5	0.001 8	-19.3	0.969 2	9.877 8
脉冲 4	0.994 6	7.985 5	0.096 9	-20.1	0.988 1	11.684 5
整体	0.966 4	5.678 0	0.082 4	-15.8	0.985 2	14.698 0

由表 7 可知, 本文提出的 AVMD 结合自适应小波包分解抑制噪声能力最好, 所提取的局放信号与仿真信号的相似程度最高, 尤其是双指数衰减信号, 高达 0.999 6, 失真性小, 各局放脉冲评价参数最优, 效果明显优于另外两种方法。

综上所述, 本文提出的方法在电缆局放信号在线监测系统中能较好地抑制噪声, 提取局放信号。

## 4 结论

1) 经过参考大量文献和试验仿真, 以门限函数和紧支性为参数, 确定了与电缆局放信号最相似的小波基 db4。

2) 针对小波包分解尺度的选择问题, 本文提出了自适应小波包分解, 使小波包在去除不同程度白噪声时, 能自适应选择分解尺度, 尽量减小局放信号能量损失。

3) 对两种噪声同时存在的染噪信号, 提出 AVMD 结合自适应小波包分解“两步法”抑制噪声的方法, 经仿真分析表明, 本方法能够很好地抑制噪声, 提取的局放信号与仿真信号相似性极高, 满足后续对局放信号的分析要求。

4) 与单纯的 AVMD 和自适应小波包分解相比,

本文提出的方法抑制噪声能力最好,提取的局放信号与仿真信号的相似度最高,相似系数高达0.999 6,而自适应小波包方法最差。

参考文献

[1] 刘洋,曹云东,候春光. 基于经验模态分解及维格纳尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4086-4093.  
LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4086-4093.

[2] 张姝,林圣,唐进,等. 基于双层阻抗模型的三相单芯电缆自恢复故障定位[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 1-10.  
ZHANG Shu, LIN Sheng, TANG Jin, et al. Fault location of self-clearing fault in three phase single core cables based on double impedance model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 1-10.

[3] 张磊祺,盛博杰,姜伟,等. 交叉互联高压电缆系统的局部放电在线监测与定位[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2706-2715.  
ZHANG Leiqi, SHENG Bojie, JIANG Wei, et al. On-line partial discharge localization in cross-bonded HV cable systems[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2706-2715.

[4] 陶诗洋,冯义,张天辰,等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 145-149.  
TAO Shiyang, FENG Yi, ZHANG Tianchen, et al. On line PD monitoring device of high voltage switchgear based on pulse current method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 145-149.

[5] ALVAREZ F, ORTEGO J, GARNACHO F, et al. A clustering technique for partial discharge and noise sources identification in power cables by means of waveform parameters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 469-481.

[6] 邵宝珠,李胜辉,白雪,等. 非负约束自动编码器在电缆早期故障识别中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 22-29.  
SHAO Baozhu, LI Shenghui, BAI Xue, et al. Application of nonnegative constraint autoencoder in cable incipient fault identification[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 22-29.

[7] 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 Linpeng, ZHENG Wendong, 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.

[8] 宋哲. 基于超声波的电力电缆局部放电检测方法的研究[J]. 电气开关, 2017, 23(2): 64-66.  
SONG Zhe. Research on the test method of power cable partial discharge based on ultrasonic waves[J]. Electric Switcher, 2017, 23(2): 64-66.

[9] 唐炬,孙才新,宋胜利,等. 局部放电信号中的白噪声和窄带干扰[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 8-10.  
TANG Ju, SUN Caixin, SONG Shengli, et al. Application of wavelet packet transform to the suppression of white-noise and periodic narrowband interference in partial discharge signals[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(12): 8-10.

[10] GAOUDA A M, AYMAN EL-HAG, ABDEL-GALIL T K, et al. On-line detection and measurement of partial discharge signals in a noisy environment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 1162-1173.

[11] 康守强,王玉静,杨广学,等. 基于经验模态分解和超球多类支持向量机的滚动轴承故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(14): 96-102.  
KANG Shouqiang, WANG Yujing, YANG Guangxue, et al. Rolling bearing fault diagnosis method using empirical mode decomposition and hypersphere multiclass support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(14): 96-102.

[12] 高艳丰,朱永利,闫红艳,等. 基于VMD和TEO的高压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 24-33.  
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. Study on lightning fault locating of high-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 24-33.

[13] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.

[14] 汤吉鸿,朱军飞,李勇,等. 基于变分模态分解的电力系统泛频带振荡辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 1-8.  
YANG Jihong, ZHU Junfei, LI Yong, et al. Identification method of power system pan frequency oscillation based

- on variational mode decomposition[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 1-8.
- [15] 刘震宇, 刘振英, 范贺明, 等. 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, et al. Study on signal de-noising of high voltage cable partial discharge based on EMD-ICA[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(24): 83-87.
- [16] 赵超, 杨庆东. 基于 EMD 和小波包能量法的信号去噪[J]. *北京信息科技大学学报: 自然科学版*, 2019, 34(1): 75-79.
- ZHAO Chao, YANG Qingdong. Signal denoising based on EMD and wavelet packet energy method[J]. *Journal of Beijing University of Information Technology: Natural Science Edition*, 2019, 34(1): 75-79.
- [17] GRISPINO A S, PETRACCA G O, DOMINGUEZ A E. Comparative analysis of wavelet and EMD in the filtering of radar signal affected by brown noise[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2013, 11(1): 81-85.
- [18] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 531-544.
- [19] 吕中亮. 基于变分模态分解与优化多核支持向量机的旋转机械早期故障诊断方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- LÜ Zhongliang. Research on early fault diagnosis of rotating machinery based on multi-core support vector machine with variational mode decomposition and optimization[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [20] 廖瑞金, 吕江, 杜言, 等. 电缆局部放电检测中周期性窄带干扰的抑制[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2006, 29(9): 48-51.
- LIAO Ruijin, LÜ Jiang, DU Yan, et al. Suppression of periodic narrowband interferences in cable partial discharge detections[J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2006, 29(9): 48-51.
- [21] 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 Shengwei, ZHANG Mu, YUAN Chenhu, 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.
- [22] 罗新, 牛海清, 来立永, 等. 粒子群优化自适应小波神经网络在带电局放信号识别中的应用[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(10): 326-333.
- LUO Xin, NIU Haiqing, LAI Liyong, et al. Application of adaptive wavelet neural network based on particle swarm optimization algorithm in online PD pattern recognition[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(10): 326-333.
- [23] 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 Jingdie, YANG Yanju, 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.
- [24] 律方成, 谢军, 王永强. 局部放电信号稀疏表示去噪方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(10): 2625-2633.
- LÜ Fangcheng, XIE Jun, WANG Yongqiang. Partial discharge signal denoising method based on sparse representation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(10): 2625-2633.
- [25] 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.
- [26] 唐炬, 黄江岸, 张晓星, 等. 局部放电在线监测中混频周期性窄带干扰的抑制[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(13): 121-127.
- TANG Ju, HUANG Jiang'an, ZHANG Xiaoxing, et al. Suppression of mixing periodic narrow band interference in partial discharge online monitoring[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(13): 121-127.
- [27] YU Binbin. An improved infrared image processing method based on adaptive threshold denoising[J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2019(1): 1-12.

收稿日期: 2019-09-14; 修回日期: 2019-12-24

作者简介:

吴童(1994—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为智能电器。E-Mail: wewq\_1234@163.com

(编辑 张爱琴)