

DOI: 10.7652/xjtuxb201312006

矿用电缆局部放电监测的最优二代小波包基降噪

唐明, 梁得亮, 王青山, 刘骧

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了提高局部放电信号的信噪比,以便更准确地提取局部放电脉冲,在二代小波基础上,构造基于插值细分法的二代小波包,对矿用电缆在线监测中染噪的局部放电信号进行降噪处理。在搜索最优小波包基时,以均方根误差、信噪比与峰值误差作为评价指标,比较了阈值熵、香农熵、log energy 熵、SURE 熵以及 NORM 熵的降噪效果。实验结果表明,从以上各种熵所搜索的最优小波包基去噪情况分析,阈值熵的综合性能最好,其均方根误差与峰值误差分别为 $8.792\ 4\times 10^{-4}$ 及 0.021 1,细小毛刺干扰信号已被滤除,信号较为光滑,且保留了原始信号的大多数特征信息。

关键词: 矿用电缆;在线监测;局部放电;最优小波包;信噪比

中图分类号: TP311 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)12-0032-06

Second Generation Wavelet Packet Based Mining Power Cables Partial Discharge On-Line Data Denoising

TANG Ming, LIANG Deliang, WANG Qingshan, LIU Xiang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the signal-to-noise ratio (SNR) of the partial discharge (PD) signal and accurately extract the PD pulses, second generation wavelet transform packet is proposed for effective denoising of the partial discharge data obtained from on-line monitoring of mining power cables. Noting the advantage of statistical properties of white noise, the variance is taken as the criterion to search the best wavelet packet tree. Compared with Shannon entropy, log energy entropy, SURE entropy and NORM entropy, the threshold entropy is able to restore PD signal from noise polluted data with very low SNR, the root mean square error and amplitude error approach to $8.792\ 4\times 10^{-4}$ and 0.021 1, respectively. In the denoised PD signal remaining the original characteristics, the slight interferences are filtered out.

Keywords: mining power cables; on-line monitoring; partial discharge; optimized wavelet packet; signal-to-noise ratio

矿井中的高压电缆是煤矿电力传输的关键设备,担负着安全生产的重任。统计数据显示,2010 年全国煤矿共发生一次死亡 10 人以上重大和特别重大火灾事故 5 起,机电事故占 4 起,其中 3 起由井下电缆老化着火所致。因此,对矿井中高压电缆绝缘缺陷进行在线监测,对降低矿井停电次数、减少矿

井停电时间、保证井下安全用电具有重要意义^[1]。

在矿用电缆绝缘状态检测中,局部放电在线监测是一种行之有效的手段。但是,电缆在线监测所采集的局部放电信号常常淹没在背景噪声中,信噪比极低,给信号提取及故障诊断带来很大挑战^[2-3]。

近年来的工程实践表明,小波分析在信号去噪

中具有很多优越性,信号提取的实质是探求被测信号中包含与小波基函数最相关的分量^[4]。只有构造出与被测信号最相似的基函数,才可以在小波变换过程中提取最大的小波系数。文献[5]认为 db2 小波的波形形态与局部放电波形最为相似,采用该小波提取局部放电信号可得到最为理想的效果,并用仿真予以证明。文献[6]采用 Bior1.5 小波,从仿真分析、实验验证和现场测试等方面验证了该小波在局部放电信号降噪中的应用效果。

近年来,二代小波引入分裂、预测与更新步骤,其特有的数据原位计算可有效降低内存需求。文献[7]将二代小波应用于电缆局部放电在线监测信号去噪,证明二代小波在计算效率与降噪效果等方面均优于一代小波。再者,二代小波变换直接在时域内构造小波,执行效率相应提高,更适合并行处理^[7-11]。同一代小波相比,二代小波通过设计合理的预测器与更新器可构造出与局部放电信号最相似的小波,从而得到最佳匹配效果^[12-13]。文献[14]将二代小波应用于电缆局部放电在线监测信号去噪,证明二代小波在计算效率与降噪效果等方面均优于一代小波。但是,采用二代小波对局部放电降噪时,仍旧存在小波函数并非最优基函数的缺点^[15]。

在矿井中,从中央变电所到移动变电站,再到采区变电所,电缆长度通常从 500 m 到 10 km 不等,多数电缆长度在 1~3 km,比城市电网中电缆长度普遍更长。因此,局部放电信号从电缆缺陷位置传播到检测位置,信号幅值衰减得更厉害;再加上电缆在线监测时,系统中其他电力设备如干式变压器的正常局部放电量可达几千 pC^[16],导致局部放电信号噪比极小。

为了提高局部放电信号的信噪比,以便更容易地提取局部放电信号,本文在二代小波的基础上,构造基于插值细分法的二代小波包,对染噪的局部放电信号进行降噪处理。在搜索最优小波包基时以均方根误差、信噪比和峰值误差作为评价指标,比较阈值熵、香农熵、log energy 熵、SURE 熵以及 NORM 熵的降噪效果。本文以软阈值算法搜索最优小波包基,结果表明,在上述所有熵函数中,以阈值熵综合降噪效果最好,可有效提高信噪比。

1 二代小波原理

设原始信号序列为 $S = \{x(k), k \in Z\}$,插值细分二代小波变换采用分裂、预测与更新 3 个步骤实

现信号的分解与重构^[4]。

(1)分裂。将原始信号分解成偶序列 s_e 和奇序列 s_o 。

$$\left. \begin{aligned} s_e(k) &= x(2k) \\ s_o(k) &= x(2k+1) \end{aligned} \right\}, k \in Z \quad (1)$$

式中: k 为子序列 s_o 和 s_e 中的样本序列号。

(2)预测。用相邻 $M(M=2D, D$ 为正整数)个偶序列预测奇序列,将预测误差 $d(k)$ 定义为小波细节系数

$$d(k) = s_o(k) - P(s_e(k)), k \in Z \quad (2)$$

式中: P 为预测器算子,表示为

$$P(s_e) = p_1 s_e(k-D+1) + \cdots + p_M s_e(k+D) \quad (3)$$

式中: $p_1, p_2, \cdots, p_M$ 为预测器系数。

(3)更新。用相邻 $N(N=2D', D'$ 为正整数)个细节系数 $d(k)$ 更新偶数序列 $s_e(k)$,定义更新后的信号系列 $s(k)$ 为小波逼近系数如下

$$s(k) = s_e(k) + U(d(k)), k \in Z \quad (4)$$

式中: U 为更新器算子,其计算式为

$$U(d(k)) = u_1 d(k-D') + \cdots + u_N d(k+D'-1) \quad (5)$$

式中: $u_1, u_2, \cdots, u_N$ 为更新器系数。

预测器系数个数 M 与更新器系数个数 N 可取不同数值,构成不同小波,具体数值由应用决定。但需注意, M 与 N 只能取偶数。

(4)预测器与更新器系数。假定预测器个数为 M ,即 $p = \{p_l, l=1, 2, \cdots, M\}$,则滤波器系数 $g = \{g_k, k=-(M-1), \cdots, M-1\}$ 与预测器系数 p 的关系为^[4]

$$\left. \begin{aligned} g(2l-1) &= -p_l \\ g(2l) &= \delta(l-M/2) \end{aligned} \right\}, l=1, 2, \cdots, M \quad (6)$$

式中

$$\delta(k) = \begin{cases} 1, & k=0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}$$

式(6)可表示为

$$g = [-p_1, 0, -p_2, \cdots, -p_{(M/2-1)}, 1, -p_{(M/2+1)}, \cdots, p_M]$$

由于离散小波变换对应的对偶等效滤波器 g 的系数具有相同的消失矩^[17],可表示如下

$$\sum_{k=-M+1}^{M-1} k^r g_k = 0 \quad (7)$$

式中: $0 \leq r < M$ 。

当 $r=0, 1, \cdots, M-1$ 时,式(7)展开如下

$$\begin{bmatrix} (-M+1)^0 & \cdots & (-1)^0 & 0^0 & 1^0 & \cdots & (M-1)^0 \\ (-M+1)^1 & \cdots & (-1)^1 & 0^1 & 1^1 & \cdots & (M-1)^1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ (-M+1)^{M-1} & \cdots & (-1)^{M-1} & 0^{M-1} & 1^{M-1} & \cdots & (M-1)^{M-1} \end{bmatrix} \mathbf{g}^T = 0$$

求解上式便可得到预测器系数。当 $M=2$ 时, $\mathbf{g} = \{-p_1, 1, -p_2\}$, 对应矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -p_1 \\ 1 \\ -p_2 \end{bmatrix} = 0 \tag{8}$$

求解式(8), 可得 $M=2$ 的预测器系数为 $p_1 = 0.5, p_2 = 0.5$ 。

更新器系数可通过求解类似矩阵得到。当 M 为其他值时, 可类推得到预测器与更新器系数。

表 1 给出不同 M 与 N 组合的预测与更新系数以作参考。预测系数与更新系数有如下特性。

- (1) 所有预测系数和为 1, 所有更新系数和为 0.5。
- (2) 当 $M=N$ 时, 预测系数为更新系数的 2 倍, 即 $p_k = 2u_k$ 。
- (3) 预测系数与更新系数具有对称性, 即 $p_1 = p_N, p_2 = p_{N-1}, \cdots, p_{N/2} = p_{N/2+1}$
 $u_1 = u_N, u_2 = u_{N-1}, \cdots, u_{N/2} = u_{N/2+1}$

表 1 常用预测系数与更新系数

(M, N)	预测系数	更新系数
(2, 2)	0.5, 0.5	0.25, 0.25
(2, 4)	0.5, 0.5	-0.031 25, 0.281 25, 0.281 25, -0.031 25
(4, 2)	-0.062 5, 0.562 5, 0.562 5, -0.062 5	0.25, 0.25
(4, 4)	-0.062 5, 0.562 5, 0.562 5, -0.062 5	-0.031 25, 0.281 25, 0.281 25, -0.031 25
(6, 2)	0.011 7, -0.097 7, 0.585 9, 0.585 9, -0.097 7, 0.011 7	0.25, 0.25
(6, 6)	0.011 7, -0.097 7, 0.585 9, 0.585 9, -0.097 7, 0.011 7	0.005 85, -0.048 85, 0.292 95, 0.292 95, -0.048 85, 0.005 85
(8, 2)	-0.002 4, 0.023 9, -0.119 6, 0.598 1, -0.119 6, 0.023 9, -0.002 4	0.25, 0.25
(8, 8)	-0.002 4, 0.023 9, -0.119 6, 0.598 1, -0.119 6, 0.023 9, -0.002 4	-0.001 2, 0.011 95, -0.059 8, 0.299 05, 0.299 05, -0.059 8, 0.011 95, -0.001 2

2 二代小波包构造

二代小波包不仅对低频分量分解, 还对高频分量进一步细化, 由分解与重构步骤组成^[9]。

原始信号通过式(1)分解成偶序列 s_e 和奇序列 s_o , 然后通过下式可得第二代小波包第 l 层分解的各频带细节信号与逼近信号

$$s_{l1} = s_{(l-1)1o} - P(s_{(l-1)1e}) \tag{9}$$

$$s_{l2} = s_{(l-1)1e} + U(s_{l1}) \tag{10}$$

$\vdots$

$$s_{l(2^{l-1})} = s_{(l-1)2^{l-1}o} - P(s_{(l-1)2^{l-1}e}) \tag{11}$$

$$s_{l2^l} = s_{(l-1)2^{l-1}e} + U(s_{l(2^{l-1})}) \tag{12}$$

式中: l 为分解层数; $s_{l(2^{l-1})}$ 为第 l 层细节系数; s_{l2^l} 为第 l 层逼近系数。

在采用二代小波包的信号去噪过程中, 首先对原始信号进行 l 层分解, 对每一层的小波系数根据所选阈值法去除噪声频带系数, 保留有效信号频带系数, 然后将保留的频带系数进行重构以得到去噪后信号。重构步骤的详细数学推导可参考文献[4], 二代小波包分解与重构示意图如图 1 所示。

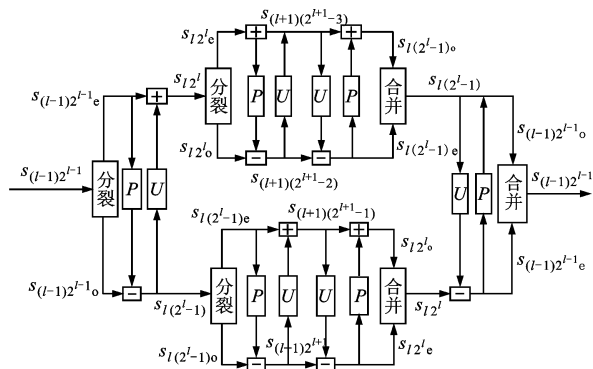


图 1 二代小波包分解与重构示意图

3 信号降噪实现

选用表 1 中各 M 与 N 组合所确定的预测器系数与更新器系数, 构造各种对应的尺度函数与小波函数, 并分别比较所构造尺度函数和小波函数与局部放电信号的相似性。通过作者大量地比较, 发现基于 $M=6$ 与 $N=6$ 所确定的预测器系数与更新器系数构造的尺度函数与小波函数, 其形状与局部放电信号较为相似, 如图 2 所示, 其横、纵坐标的量均

进行归一化处理。因此,根据信号提取的本质,基于 $M=6$ 与 $N=6$ 的尺度函数与小波函数可提取出局部放电信号中最多的小波系数。

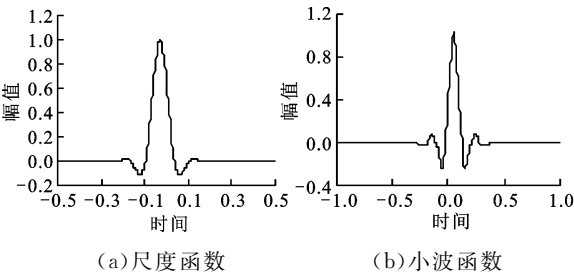


图 2 $M=6$ 与 $N=6$ 的尺度函数与小波函数

确定了预测器系数与更新器系数后,选定分解层数,对信号进行小波分解,获得高频系数与逼近系数所构成的完整小波包二叉树。采用各种熵函数作为代价函数,在小波包二叉树中寻找最优的小波包树。从小波包二叉树中选取最优小波包树时,可用 log energy 熵、阈值熵、SURE 熵、NORM 熵、香农熵等作为代价函数进行搜索。搜索最优小波包树与去噪的具体步骤如下。

- (1)确定分解层数,采用 $M=6$ 与 $N=6$ 的预测器系数与更新器系数对局部放电信号进行满二叉树分解,得到各节点的小波高频系数与逼近系数。
- (2)计算各小波系数熵函数,如阈值熵等。
- (3)以熵函数为代价函数搜索最优小波包树。
- (4)对求出的最优小波包树,采用软阈值法处理高频系数^[10]

$$\hat{L}_l = \text{sgn}[L_l][|L_l| - T_j] = \begin{cases} 0, & |L_l| \leq T_j \\ L_l - T_j, & L_l > T_j \\ L_l + T_j, & L_l < -T_j \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\hat{L}_l$ 为第 l 个小波包的节点系数; $\hat{L}_l$ 为第 l 个小波包进行阈值量化后的节点系数。各尺度阈值 T_j 按下式确定

$$T_j = \sigma(2 \lg N)^{1/2} \quad (14)$$

式中: j 为分解尺度; N 为小波包系数长度; σ 为噪声方差,按下式估计

$$\sigma = \text{media}(p_l)/0.6745 \quad (15)$$

式中:media()为中值函数,其中低频系数需要全部保留。

- (5)将阈值处理后保留的小波包系数逐层重构;
- (6)得到降噪后的信号,对降噪效果做分析。

上述思路的流程如图 3 所示。

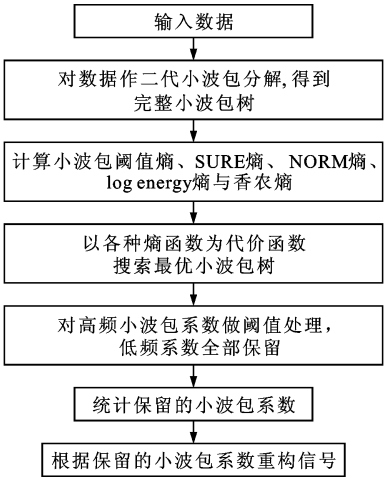


图 3 电缆局部放电在线监测数据降噪流程图

4 性能指标

为定量评价二代小波包算法在电缆在线局部放电监测信号降噪中的效果,引入均方根误差 δ 、信噪比 ϵ 、峰值误差 λ 等 3 项评价指标

$$\delta = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (s_k - \hat{s}_k)^2 \right)^{1/2} \quad (16)$$

$$\lambda = \max(|s_k - \hat{s}_k|) \quad (17)$$

$$\epsilon = 10 \lg \left(\sum_{k=1}^N s_k^2 / \sum_{k=1}^N (s_k - \hat{s}_k)^2 \right) \quad (18)$$

式中: s_k 为实测原始信号幅值; $\hat{s}_k$ 为降噪后信号幅值。

5 算法验证

在实验室中,采用尖板放电模型产生放电信号,放电信号通过空气耦合到电缆中,采用高频电流传感器探测耦合到电缆中的局部放电信号。所用示波器采样速率为 125×10^6 /s,因此一个工频周期总采样点数为 2.5×10^6 。采样时,为保证所采集的信号是有效局部放电信号而不是干扰信号,在施加局部放电高压信号前,先采集一定样本的背景噪声,确定背景噪声最大值;调节触发电平,使触发电平比背景噪声略大,以保证示波器未被误触发;逐渐调节施加电压并调节尖板放电模型的尖与板间隙,使得模型可在较低电压下放电。实验中发现,从 4 kV 开始有轻微局部放电,以 2 kV 为间隔记录每个电压的放电信号,从 4~10 kV 一共记录 4 个电压点。当激励电压为 6 kV 时,采集的局部放电信号波形如图 4 所示。

在 MATLAB 中用函数 $y = \text{awgn}(y, -10, 'measured')$ 向信号加噪,加噪后信号如图 5 所示。

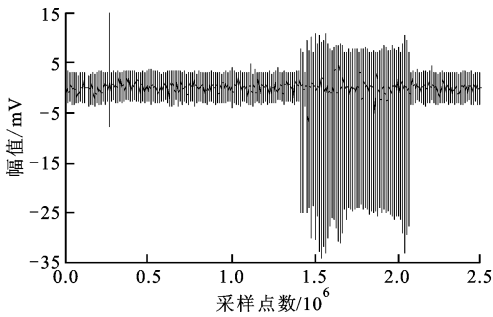


图 4 原始局部放电数据

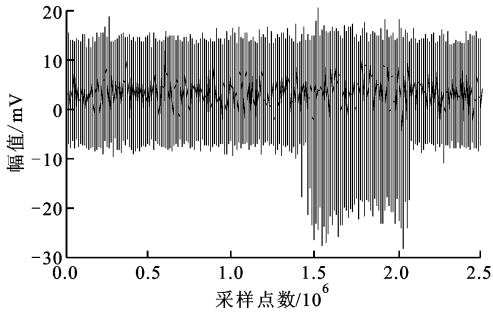


图 5 染噪信号

以 $M=6$ 与 $N=6$ 的预测器与更新器系数对信号进行 5 层分解,得到小波系数的高频与逼近系数的小波包二叉树。基于高频系数与逼近系数求小波包阈值熵,以阈值熵为代价函数搜索最优小波包树。得到最优小波包树后,以软阈值法处理高频信号,以实现信号去噪,去噪结果如图 6 所示。从图 6 中可见,噪声均被消除,但是有效信号幅值的绝对值也有削弱,从原来的 34.2 mV 变成 12.5 mV。

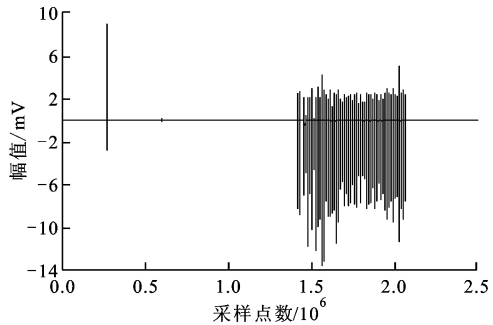


图 6 阈值熵最优小波包基降噪

为对比公平起见,在求小波包系数的香农熵、log energy 熵、SURE 熵以及 NORM 熵时,也对信号作 5 层分解。以上述熵为代价函数搜索最优小波包树,然后采用与阈值熵为代价函数相同的阈值处理办法对高频系数做处理,并重构信号,所得去噪后结果分别见图 7~图 10 所示。

从以上各种熵所搜索的最优小波包基去噪情况分析,阈值熵的效果较好,保留了原始信号的大多数

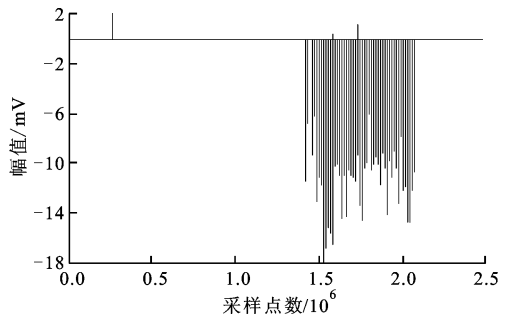


图 7 香农熵最优小波包基降噪

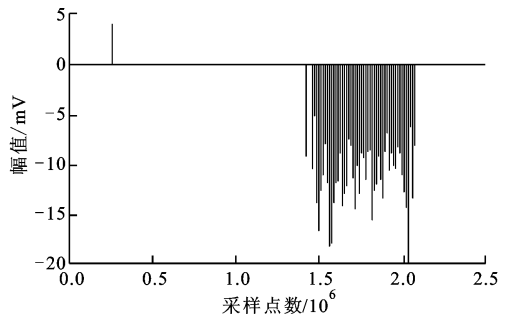


图 8 log energy 熵最优小波包基降噪

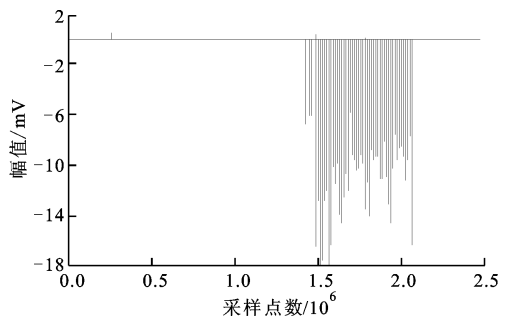


图 9 SURE 熵最优小波包基降噪

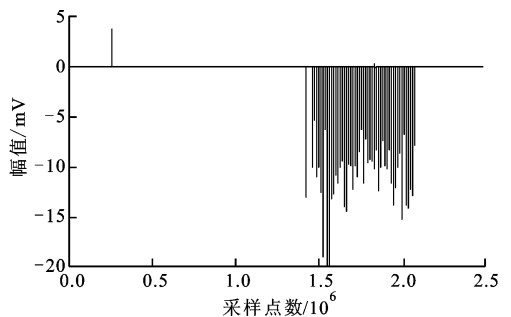


图 10 NORM 熵最优小波包基降噪

特征信息,而基于其他熵搜索到的最优小波包均有不足。

分别给出原始信号、染噪信号以及以阈值熵为代价函数搜索的最优小波包基去噪结果的一个局部放电脉冲波形,如图 11 所示。从图中可见,局部放电脉冲信号的上升沿约为 36 ns,脉冲宽度约为 160 ns;原始信号脉冲幅值约为 25 mV,去噪后脉冲

幅值约为 7 mV,信号的细小毛刺干扰信号已被滤除,信号较为光滑。从图中可知,在信噪比较低时,基于阈值熵的二代最优小波包也可有效提取局部放电信号。

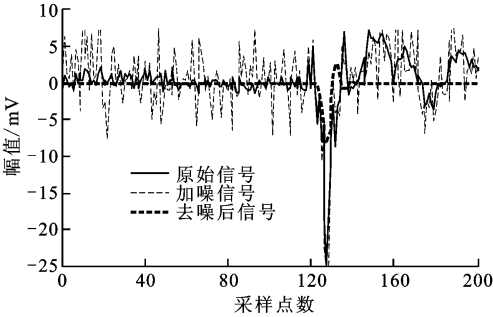


图 11 阈值熵最优小波包基降噪单个脉冲

上述最优小波包基各种熵降噪性能参数对比见表 2。从表中可见,以均方根误差 δ 、信噪比 ϵ 、峰值误差 λ 作为评价指标,阈值熵的降噪效果较其他各种熵综合效果更优。

表 2 各种熵降噪性能比较

熵	δ	ϵ	λ
阈值熵	$8.792\ 4\times 10^{-4}$	1.410 1	0.021 1
香农熵	$8.801\ 6\times 10^{-4}$	0.077 4	0.021 3
log energy 熵	$8.825\ 5\times 10^{-4}$	1.398 3	0.025 6
SURE 熵	$8.799\ 0\times 10^{-4}$	1.379 7	0.023 5
NORM 熵	$8.821\ 1\times 10^{-4}$	1.409 1	0.026 5

6 结 论

本文以细分插值方法构造二代小波包,采用放电模型产生局部放电信号,然后在采集的原始局部放电信号基础上加入噪声。经综合比较,发现采用 $M=6$ 与 $N=6$ 组合构成的预测器系数与更新器系数构造的小波函数和尺度函数与局部放电信号最为相似。在此基础上,分别基于阈值熵、香农熵、log energy 熵、SURE 熵以及 NORM 熵,对尖板放电模型中产生并耦合到电缆中的局部放电信号进行降噪,结果表明,采用均方根误差、信噪比和峰值误差作为评价指标,以软阈值算法对高频小波系数进行处理,与其他熵降噪结果相比,阈值熵综合性能最好。

参考文献:

[1] 李海英,李玄,宋建成. 基于雷达图法的矿用高压电缆安全预警模型[J]. 煤炭学报,2012,37(11): 1940-1946.
LI Haiying, LI Xuan, SONG Jiancheng. Early safety warning model for mining HV cable based on radar

chart method [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1940-1946.
[2] SHIM I, SORAGHAN J J, SIEW W H. Digital signal processing applied to the detection of partial discharge: an overview [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(3): 6-12.
[3] SHIM I, SORAGHAN J J, SIEW W H. A noise reduction technique for on-line detection and location of partial discharges in high voltage cable networks [J]. Measurement Science & Technology, 2000, 11(12): 1708-1713.
[4] 何正嘉,张西宁. 现代信号处理及工程应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社,2007: 195-205.
[5] MA X, ZHOU C, KEMP I J. Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection [J]. IEEE Trans Dielectr Electr Insula, 2002, 9: 446-457.
[6] ZHANG Hao, BLACKBURN T R, PHUNG B T, et al. A novel wavelet transform technique for on-line partial discharge measurements; 1. WT de-noising algorithm [J]. IEEE Trans Dielectr Electr Insula, 2007, 14(1): 3-14.
[7] 盖广洪,屈梁生,李崇晟. 二代小波消噪在数字信号处理器中的实时实现[J]. 西安交通大学学报,2004,38(3): 278-281.
GAI Guanghong, QU Liangsheng, LI Chongsheng. Real time implementation of signal denoising based on second generation wavelet using digital signal processors chip [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(3): 278-281.
[8] 陈景龙,訾艳阳,何正嘉,等. 自适应冗余多小波及其在故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报,2012,46(7): 44-49
CHEN Jinglong, ZI Yanyang, HE Zhengjia, et al. Adaptive redundant multiwavelet with applications to fault diagnosis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(7): 44-49.
[9] 谢全民,龙源,郭涛,等. SGWP 算法在爆破振动信号分析中的应用研究[J]. 振动与冲击,2012,31(18): 40-45.
XIE Quanmin, LONG Yuan, GUO Tao, et al. Application of SGWP algorithm in blasting vibration signal analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(18): 40-45.
[10] RAM I, ELAD M, COHEN I. Generalized tree-based wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(9): 4199-4209.

(下转第 76 页)