

## 局部放电信号检测的HHT-MDL自适应阈值算法

赵妍, 董爽, 李天云

(东北电力大学输变电技术学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 基于局部放电信号特征, 将 HHT 与信息论的 MDL 判据相结合应用于局部放电信号的提取。该算法以多分辨率的 EMD 为基础, 结合 MDL 判据自适应地确定 EMD 得到的 IMF 的阈值, 来提取局部放电信号, 同时还得到局部放电信号的时间-相位-幅值谱。对于强周期窄带干扰, 提出了先用 FFT 预处理后, 再用 HHT 和 MDL 降噪的简单算法。该算法综合了这两种方法的优点: 无需定义任何基函数, 无需事先知道噪声的水平, 不需要预置阈值、不需要选择阈值行为方式, 有较强的自适应性。仿真结果表明, 本方法能够有效地消除局部放电中的噪声, 其效果优于基于小波和 MDL 准则的降噪算法, 为局部放电信号的降噪提供了一种新思路。

**关键词:** 局部放电; Hilbert-Huang变换; MDL; 自适应阈值算法

### A new adaptive threshold algorithm to partial discharge processing based on HHT-MDL criterion

ZHAO Yan, DONG Shuang, LI Tian-yun

(Power Transmission and Transformation Technology College, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** According to the characteristics of partial discharge(PD), a new method using Hilbert-Huang transform(HHT) and Minimum Description Length (MDL) criterion is applied to extract PD signals from excessive noises. Firstly PD signals are decomposed by Empirical Mode Decomposition, the most appropriate coefficients are obtained by MDL criterion, finally the corresponding coefficients are reconstructed to achieve de-noised PD. And time-phase-amplitude spectrum can be obtained. For narrow-band interference, FFT is put forward to suppress the interference based on the differences between the PD and interference. The algorithm has wonderful virtues such as free from any parameters estimation about noise, free from presetting threshold and threshold choosing behavior, so the algorithm is highly adaptive. Large amount of simulation proves that this method can wipe off narrow-band interference and white noise efficiently, prior to the de-noising algorithm of wavelet and MDL, so it provides a new way for PD de-noising.

**Key words:** PD; Hilbert-Huang transform; MDL; adaptive threshold algorithm

中图分类号: TM835 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0045-06

## 0 引言

对高压电力设备进行局部放电检测, 以诊断其绝缘故障, 可以避免严重的后果<sup>[1-3]</sup>。但现场存在着强烈的电磁干扰, 局部放电信号往往被淹没在噪声中, 直接影响到检测的灵敏度和可靠性。因此如何实现强噪声背景下的局部放电信号提取是值得研究的课题。

干扰的类型主要包括: 连续周期型干扰、随机噪声干扰、脉冲型和周期窄带干扰。其中连续周期型干扰可通过高频检测法加以避免<sup>[3]</sup>。目前随机噪声干扰的抑制方面, 研究较多的方法是小波阈值降噪法<sup>[4-7]</sup>。小波能将信号在不同尺度下进行多分辨率分解, 但在实际应用时也存在如下问题: 最优小波基

的选择; 多态性局部放电信号的处理; 阈值的选择。第一个问题源于小波基函数的不唯一性, 第二个问题则是因为小波基函数选择的唯一性与局部放电波形多样性之间存在矛盾。

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)是近年发展起来的一种新的非线性非平稳信号分析方法, 该方法基于信号的局部变化特征, 可以自适应地将复杂的信号分解成若干阶固有模式分量(Intrinsic Mode Function, IMF), EMD方法对于时频平面的铺砌方式没有任何限制, 分解所得的每个 IMF 都反映了信号中的一种特有频率信息; 与常规的小波算法相比, 不受小波基函数和最佳分解层数选取的限制, 去噪效率和准确性大大提高。现在主要有基于 EMD 的时空滤波方法, 该法可以实

现局放信号的预处理，但因局放信号本身频率过高，经时空滤波后的信号中仍然存在部分与局放信号频率相近的高频噪声，影响到检测精度。如果要提取出较光滑的局放信号，则需对 IMF 作进一步的处理，即阈值化处理。因此基于 EMD 的消噪算法与小波消噪的方法一样，同样存在着阈值的选择的问题。且目前基于 EMD 的消噪法主要是针对白噪声的，没有考虑含有窄带干扰的实际情况<sup>[8]</sup>。由于 EMD 方法是基于极值包络思想的，对于强周期窄带干扰，信号完全被淹没。这样仅用 EMD 的消噪方法的效果不够理想，虽然能提取出局放信号，但是失真会很大。

本文将信息论中的 MDL<sup>[9-10]</sup>判据 (Minimum Description Length, MDL) 和 Hilbert-Huang 变换<sup>[11-13]</sup>

(Hilbert Huang Transform, HHT) 相结合，提出了处理局放信号的 HHT-MDL 自适应阈值算法。该算法以多分辨率的 EMD 为基础，结合 MDL 判据自适应地确定 EMD 的 IMF 的阈值，来提取局放波形。

该算法综合了这两种方法的优点：不需要基函数，是一种完全的数据驱动方法 (HHT 方法的优点)；不需要阈值选择 (MDL 的优点) 能最大限度地抑制了噪声干扰，较好地保留了局放波形。此外，该算法能够同时得到局放信号的时间-相位-幅值谱对原放电信号作进一步描述，从而为研究局放信号提供了更多有价值的信息。通过仿真和实际数据分析验证了本文方法的可行性和有效性。

### 1 HHT-MDL 自适应阈值算法

#### 1.1 Hilbert-Huang 变换

Hilbert-Huang 变换包括两部分，一部分是 EMD 多分辨率分解，另一部分是 Hilbert 变换。

##### 1.1.1 EMD 多分辨率分解

EMD 方法建立于如下假设：“任何信号都是由不同的固有振动模态组成，每个振动模态可以是线性或非线性”基础上。这样，可将一时间序列信号分解为一组包含不同尺度的从高频到低频的 IMF 之和。IMF 需满足两个条件：在整个数据段上，极值点的个数与过零点的个数不大于 1；信号上、下包络线的均值在任何时刻均为零。任何信号可按如下步骤来筛选 IMF 分量：

先将原数据分解成第一个 IMF 和随时间变化的均值之和，然后将均值考虑为新的数据，将其分解为第二个 IMF 和新的均值。持续这种分解过程直至获得最后一个 IMF，最终得到：

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \tag{1}$$

式中： $c_i(t)$  为第  $i$  个 IMF 分量； $r(t)$  为余项。

整个分解过程中没有能量的损失，可以用分解得到的各 IMF 和余项来精确重构原始信号。

借助于 IMF 能够构造一种新型的滤波方式——时空滤波，且滤波信号可表示如下：

$$x_{lh}(t) = \sum_{j=l}^h c_j(t) \tag{2}$$

其中： $l, h \in [1, \dots, n]$ ， $l \leq h$ 。当  $l=1$  且  $h < n$  时，为高通滤波信号；当  $l > 1$  且  $h = n$  时，为低通滤波信号；当  $1 < l \leq h < n$  时，为带通滤波信号。

对于局部放电这类非平稳信号来说，其在频域上表现为包含着所有的谐波成分连续频谱。因此，应用频域滤波方法处理局部放电信号时，面临着很大的困难。与传统方法相比，基于 EMD 的时空滤波的一个显著的优点就是滤波后的结果能够充分保留原始信号本身所固有的非平稳特征，是一种良好的数据预处理方法。

#### 1.1.2 局部放电信号的瞬时参数谱

对于任一 IMF 分量，可得到它的 Hilbert 变换为：

$$Y_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \tag{3}$$

其反变换为：

$$c_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Y_i(\tau)}{\tau - t} d\tau \tag{4}$$

得到解析信号  $Z(t)$ ：

$$Z_i(t) = c_i(t) + jY_i(t) = a_i(t)e^{j\phi_i(t)} \tag{5}$$

式中： $a_i(t)$  为瞬时幅值； $\phi_i(t)$  为相位。

$$a_i(t) = [c_i(t)^2 + Y_i(t)^2]^{\frac{1}{2}} ; \phi_i(t) = \arctan \frac{Y_i(t)}{c_i(t)}$$

进一步可以给出如下的定义式：

$$IPS(t, \varphi, a) = f(t, \sum_{i=1}^n \varphi_i(t), \sum_{i=1}^n a_i(t)) \tag{6}$$

我们可以用一个三维 (时间-相位-振幅) 谱对原放电信号做进一步的描述，以下称该三维谱为瞬时参数谱。

#### 1.2 MDL 原理

HHT 阈值去噪方法的思路是：(1) 对含噪信号  $s(k)$  进行 EMD，得到 IMF 序列  $c_{i,k}$  和剩余分量  $r_k$ ；(2) 通过对  $c_{i,k}$  进行阈值处理，得出估计 IMF 分量  $\hat{c}_{i,k}$ ，使得  $\|\hat{c}_{i,k} - c_{i,k}\|$  尽可能小；(3) 利于  $\hat{c}_{i,k}$  进行重构，得到估计信号  $\hat{s}(k)$ ，即为去噪之后的信号。

不难看出, 阈值的选取和处理方法是上述算法的核心部分。

Kraft 不等式在概率分布和编码长度间建立了等价关系, 由编码长度可以确定一种概率分布, 反之概率分布可以反映编码长度。根据香农源编码理论定义样本的最短描述长度为概率分布的熵:

$$L(X) = -\sum_{i=1}^N \log p(x_i) \quad (p \text{ 为概率})$$

这样, 就建立了概率分布与编码长度的对应关系, 即编码长度可以看成概率分布的另外一种表示方式。MDL 判据就是在给定模型库中寻找能够用最短的编码长度来描述数据和模型本身的最佳模型, MDL 判据的近似表达式为<sup>[14]</sup>:

$$\text{AMDL}(k, m) = \min\left\{\frac{3}{2}k \log_2 N + \frac{N}{2} \log_2 \|(I - \Theta^{(k)})C_m\|^2\right\} \quad (7)$$

式中:  $m$  是变换模型索引,  $0 < k < N$ ;  $k$  代表保留的 IMF 系数的个数,  $\Theta^{(k)}$  代表阈值运算, 保留分解后 IMF 模值最大的  $k$  个不变, 其余置零;  $I$  是同一算子,  $C_m$  代表应用索引号  $m$  的 IMF。

从上式可见: AMDL 由两项组成, 前项为模型长度, 描述模型为原始信号通过 EMD 后经过阈值运算  $\Theta^{(k)}$  得到的子集, 集合容量为  $k$ , 记为  $\hat{\alpha}^{(k)}$ , 其随着保留  $k$  的增加而线性增加; 后项代表实际信号与估计信号的偏差, 其随着  $k$  的增加而减少。存在某一  $k^*$  可使 AMDL 达到最小, 就能找到真实信号的最优化估计模型  $\hat{\alpha}_m^{(k)}$ 。它实际上强调的是信号压缩比和信号失真之间的一个最好的折中。

传统的小波阈值消噪算法, 由于需要预先进行阈值设置, 而且针对不同的信号类型, 不同的应用目的, 以及不同的噪声水平需要采用不同的阈值策略, 因此缺乏自适应性。而根据 MDL 判据进行阈值的选择, 不需要进行参数和阈值的设置, 模型选择判据能够根据信号进行动态变化, 找到保真度和信号压缩效率之间的平衡点, 具有信号自适应性, MDL 可以用于不同噪声水平的局放信号的消噪。

以下将 HHT 与 MDL 相结合的方法称为 HHT-MDL 方法。

## 2 仿真分析

本算例中, 采用单指数和双指数振荡衰减模型来模拟。

$$s_1(t) = A_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin 2\pi f_c t \quad (7)$$

$$s_2(t) = A_2 \left( e^{-\frac{2.2t}{\tau}} - e^{-\frac{1.3t}{\tau}} \right) \sin 2\pi f_c t \quad (8)$$

式中:  $f_c$  为振荡频率;  $\tau$  为衰减系数;  $A$  为信号幅值。在仿真中  $f_c$  均取为 1 MHz,  $\tau$  分别为 1  $\mu$ s, 2  $\mu$ s, 4  $\mu$ s, 幅值为 0.2 mV, 1 mV, 采样频率为 10 MHz。加入均值为 0、方差为 0.15<sup>2</sup> 的白噪声进行模拟。

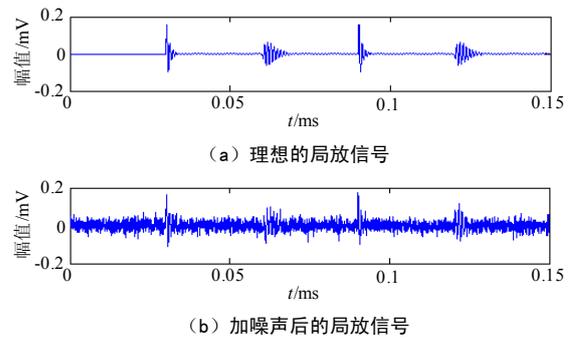


图 1 局部放电仿真信号

Fig. 1 Simulated PD signals

对上述含有噪声的局部放电信号进行 EMD, 得 9 个 IMF 和 1 个剩余分量, 如图 2 所示。其中, 第一个 IMF 分量代表了高频噪声的特征, 第二、三个 IMF 分量则代表了局部放电信号的主要特征。

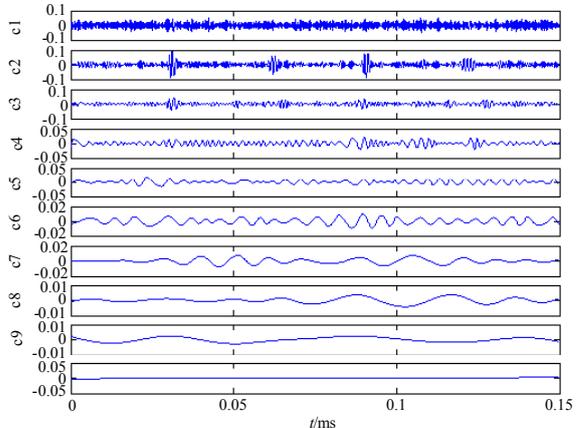


图 2 EMD 分解结果

Fig. 2 EMD decomposition of the PD signals

通过 FFT 频谱来分析, 见图 3。局放信号的频谱几乎分布在频率轴上, 能量很分散, 且能量主要集中在低频段; 而白噪声的频谱与局放信号的频谱相重叠, 在整个坐标空间内呈杂乱分布; 第一个 IMF 显然代表了高频噪声应该滤除, 至于 EMD 时空滤波器保留哪几个 IMF, 本文采用互相关系数来判断, 见图 4。点划线表示保留的 IMF 的个数, 虚线表示除掉第一个 IMF 后保留的 IMF 的个数。实线表示除掉第一、二个 IMF 后保留的 IMF 的个数。

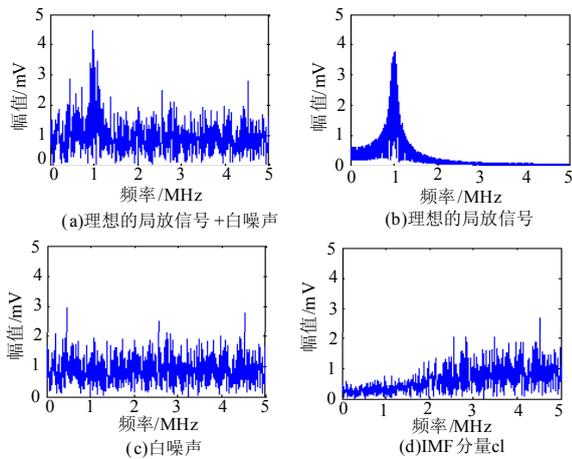


图3 局放信号的频谱

Fig. 3 FFT spectrum of PD signals

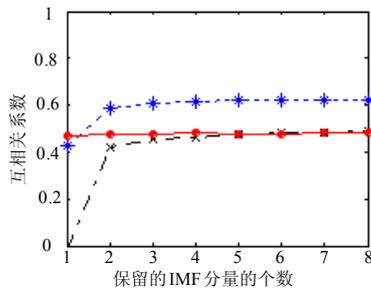


图4 保留IMF个数的互相关系数

Fig. 4 Mutual correlation coefficient of reservations of IMF number

可见，第二种方法的互相关系数最高，这是由于第一个 IMF 主要的成分 is 高频噪声，而第二个 IMF 含有局放的主要特征。所以，EMD 时空滤波采用第二种，从图可知，保留的 IMF 的个数超过 3 个互相关系数变化不是很明显。对不同的局部放电进行大量仿真表明，当保留 3 或 4 个 IMF 时，一般均能取得好的消噪效果。

本例将C2~C4组合，构成时空滤波器，即可得到滤波后的局放信号，如图5所示。但是仅用这种方法，互相关系数为0.588 9，检测精度不高。因此仅能作为数据预处理的方法。

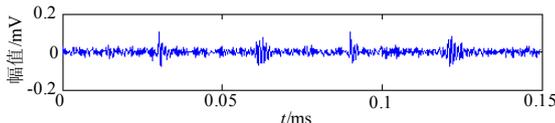


图5 时空滤波后的波形

Fig.5 Processing result of the time-space filtering

下面对时空滤波的后信号用 MDL 进行阈值处理，根据 MDL 自动搜索保留的最优的  $k$  为 228，压缩比为 24.8%，均方根误差为 1.09%，SNR=3.7470

dB, AMDL=-3 320.09。

同时作为参考，也用小波加 MDL 的方法对上述数据进行分析。其中，小波基选取为信号处理中较常用的 Haar 小波和与本算例中局部放电波形匹配较好的 Db8 小波。为了便于比较，小波方法的分解层数与本文方法一致。图 6 给出了三种算法的处理结果。

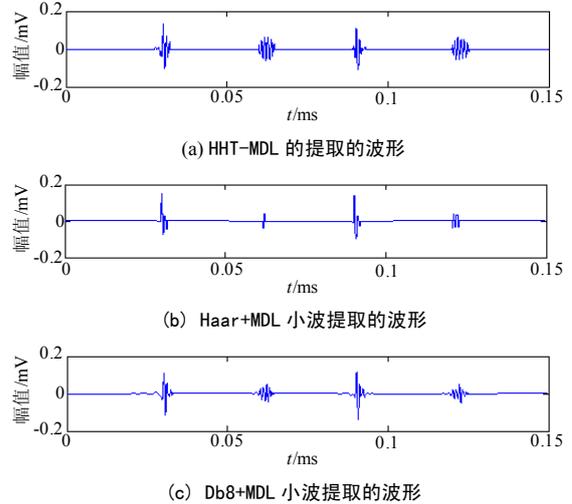


图6 三种方法局部放电信号提取结果

Fig. 6 Processing result of the PD with three methods

对于局部放电信号的提取，即要求最大限度地抑制噪声干扰，又应尽量保持原始局部放电波形失真较小，通常情况下，这两个方面是相互矛盾的。从以上提取结果不难看出：Haar小波虽能有效地抑制噪声，但提取的波形存在一定失真，这不利于对单个局部放电脉冲波形的处理。相比之下，Db8小波和HHT-MDL算法则可在消噪的同时，较好地保留了原局放信号局部特征分量。

为了进一步比较各种方法的处理性能，将上述方法提取的局放信号的性能指标列于表1。表中还列出了利用Matlab小波消噪工具箱提供的软硬阈值进行消噪结果，取最优结果列于表中。

从表1不难看出HHT-MDL方法有很好的消噪效果，可以大大提高信号的信噪比，失真度小，与理想局部放电信号的波形相似度最大。然后是db8+MDL，db8阈值消噪法，Haar小波最差。即MDL判据无论与小波相结合，还是与HHT方法相结合都可以提高消噪效果。这也反映了MDL算法和传统小波阈值消噪方法的不同，MDL是基于数据压缩提出来的，而在压缩的同时能够完成信号的消噪的目的。能够在信号保真度和信号压缩效率即消噪的水平之间找到最佳的契合点，是真正意义的自适应阈值算法。

表1 消噪指标  
Tab.1 Indicators of denoising

	信噪比/dB	均方根误差	互相关系数
含噪信号	-5.767 8	—	—
Haar小波	1.295 6	0.011 65	0.580 1
Db8小波	3.141 2	0.013 2	0.779 8
Haar小波+MDL	1.494 1	0.014 3	0.678 8
b8小波+MDL	3.549 2	0.011 2	0.822 4
HHT-MDL	3.747 0	0.010 9	0.829 3

由于小波方法的实质是用小波基的伸缩来逼近待分析信号, 因此, 与本算例的局放波形匹配较好的Db8小波处理结果明显优于Haar小波。此外, 小波方法中的分解层数对分析结果也有一定影响<sup>[15]</sup>。在实际应用中很难找到一种适应于任何信号分析的小波基和通用的最佳分解层数。但HHT方法无需借助一组固定的基, EMD的基是自适应的, 完全基于信号局部特征进行自适应的分析, 能够很好地表现信号的局部特性及其变化规律, 非常适于处理局部放电这类非平稳信号。而本文的方法正是融合了MDL和HHT的优点来处理局放信号的。

此外, HHT-MDL算法可以在消噪的同时, 得到局放信号的瞬时参数, 如图7所示。瞬时参数谱反映了局部放电信号的振幅和相位随时间的变化规律, 为我们研究放电信号特征提供了更多信息。例如, 此处我们可以通过脉冲信号最大振幅出现位置的相位信息很容易地实现两种放电模式的识别。

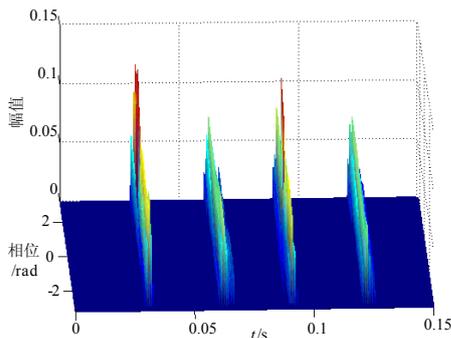


图7 局部放电信号的瞬时参数谱

Fig. 7 Instantaneous parameters spectrum of PD signals

### 3 实例分析

为了进一步验证算法有效性, 对某发电厂一号水轮发电机A相局放电流信号进行了分析。本算例取了通过耦合电容测得的800个采样数据(已归一化), 如图8(a)到局放信号中除了白噪声干扰还有很强的窄带干扰, 原信号完全湮没于干扰信号之中, 由前面的EMD原理可知, 它是利用信号极值进行三

次样条插值取包络来进行信号处理的, 也就是说它是基于信号的极值包络分析计算的, 对这样的强混合干扰信号而言, 直接使用HHT-MDL消噪方法的效果不够理想, 虽然能提取出局放信号, 但是失真会很大。所以针对这种含有高幅值窄带干扰的局放信号, 这里采用了FFT预处理。预处理后再采用HHT-MDL方法处理的结果见图8(b)。

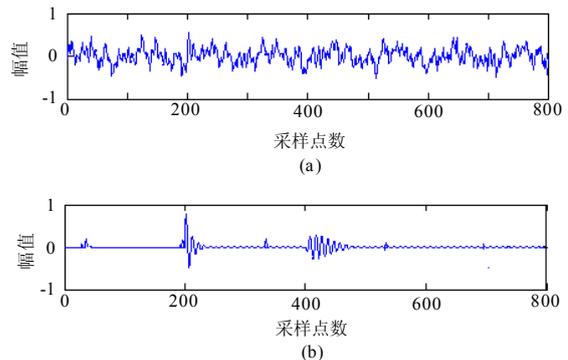


图8 实测的局放信号处理结果

Fig. 8 Processing result of real PD signals

比较处理前后的波形可知, 本文的算法不仅最大限度地消除了噪声干扰, 而且提取出了较完整的局部放电波形, 从而进一步验证了本文方法的有效性和可行性。图9给出了本文的算法得到的瞬时参数谱。限于篇幅, 本章不再重复比较各种方法的处理结果。

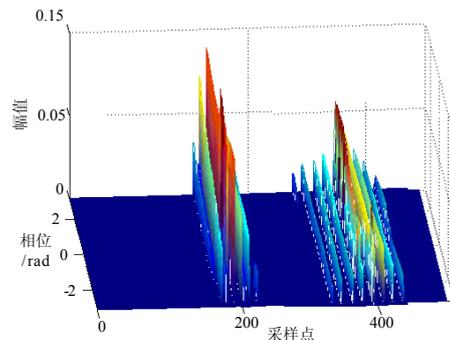


图9 局部放电信号的瞬时参数谱

Fig. 9 Instantaneous parameter spectrum of PD signals

### 4 结论

(1) HHT-MDL算法吸收了HHT和MDL判据的诸多优点, 是一种完全的数据驱动型方法, 无需定义任何基函数, 无需事先知道噪声的水平, 不需要预置阈值、不需要选择阈值行为方式, 有数据自适应性。

(2) 对于强的窄带干扰, 经过FFT预处理后, HHT-MDL算法能够从被背景噪声淹没的局部放电

数据中提取出较完整的波形。

(3) HHT-MDL 算法能够在去噪的同时, 可以提供局部放电的瞬时参数谱, 瞬时参数谱能够反映局部放电信号的振幅和相位随时间的变化规律, 为局放信号特征的研究提供了更多信息, 并为故障模式的识别提供了新思路。

### 参考文献

- [1] 唐炬, 侍海军, 许高峰, 等. 用于 GIS 局部放电检测的内置传感器超高频耦合特性研究[J]. 高电压技术, 2003, 29 (2): 29-31.  
TANG Ju, SHI Hai-jun, XU Gao-feng, et al. The Analysis of the Response Characteristic About Two Internal Sensor Applied to Detect PD in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (2): 29-31(in Chinese).
- [2] Sher Zaman Khan, ZHU De-heng, JIN Xian-he, et al. A New Adaptive Technique for On-line Partial Discharge Monitoring[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2 (4): 700-707.
- [3] 王国利, 郑毅, 郝艳捧, 等. 用于变压器局部放电检测的超高频传感器的初步研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (4): 154-160.  
WANG Guo-li, ZHENG Yi, HAO Yan-peng, et al. Study on the Ultra-high-frequency Sensors for PD Detection in Power Transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (4): 154-160(in Chinese).
- [4] 王立欣, 诸定秋, 蔡维铮. 局部放电在线监测中基于小波变换的阈值消噪算法研究[J]. 电网技术, 2003, 27 (4): 46-48, 78.  
WANG Li-xin, ZHU Ding-qiu, CAI Wei-zheng. Wavelet Transform Based Denoise Algorithm by Thresholding in On-line Partial Discharge Detection[J]. Power System Technology, 2003, 27 (4): 46-48, 78(in Chinese).
- [5] Satish L, Nazneen B. Wavelet-based Denoising of Partial Discharge Signals Buried in Excessive Noise and Interference[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10 (2): 354-367.
- [6] Ma X, Zhou C, Kemp I J. Automated Wavelet Selection and Thresholding for PD Detection [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18 (2): 37-45.
- [7] 张毅刚, 郁惟塘, 范春菊, 等. 尺度空间滤波在局部放电脉冲提取中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (23): 33-36.  
ZHANG Yi-gang, YU Wei-yong, FAN Chun-ju, et al. Application of Scale Space Filtering Technique in Partial Discharge Pulse Extraction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (23): 33-36.
- [8] 钱勇, 黄成军, 陈陈, 等. 基于经验模态分解的局部放电去噪方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (12): 53-60.  
QIAN Yong, HUANG Cheng-jun, CHEN Chen, et al. Denoising of Partial Discharge Based on Empirical Mode Decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (12): 53-60.
- [9] Brron A, Rissanen J. The Minimum Description Length Principle in Coding and Modeling[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1998, 44 (6): 2743-2760.
- [10] Effrina Yanti Hamid, Zen-Ichiro Kawasaki. Wavelet-based Data Compression of Power System Disturbances Using the Minimum Description Length Criterion[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (2): 460-466.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 1998, 454: 903-995.
- [12] Vasudevan K, Cook F A. Empirical Mode Skeletonization of Deep Crustal Seismic Data: Theory and Applications[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2000, 105 (B4): 7845-7856.
- [13] Loh C H, Wu T C, Huang N E. Application of the Empirical Mode Decomposition-Hilbert Spectrum Method to Identify Near-fault Ground-motion Characteristics and Structural Responses[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91 (5): 1339-1357.
- [14] Saito N. Simultaneous Noise Suppression and Signal Compression Using a Library of Orthonormal Bases and the Minimum Description Length Criterion[M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [15] 张吉先, 钟秋海, 戴亚平. 小波门限消噪法应用中分解层数及阈值的确定[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (2): 118-122.  
ZHANG Ji-xian, ZHONG Qiu-hai, DAI Ya-ping. The Determination of the Threshold and the Decomposition Order in Threshold De-noising Method Based on Wavelet Transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (2): 118-122(in Chinese).

收稿日期: 2009-04-01; 修回日期: 2009-04-26

作者简介:

赵妍 (1974-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为非线性系统理论在电力系统中的应用; E-mail: zjb\_112006@126.com

李天云 (1945-), 男, 教授, 从事自动控制理论、信号处理、非线性系统理论的教学及其在电力系统中的应用研究工作。