

文章编号: 1000-582X(2011)10-015-06

Hilbert-Huang 变换与大电机局部放电超声信号消噪

陈学军^{1,2}, 杨永明¹, 汪泉弟¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;
2. 莆田学院电子信息工程系, 福建 莆田 351100)

摘要: 通过分析 Hilbert-Huang 变换 (HHT) 的核心经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 算法及其实现过程, 提出了基于 EMD 算法的数据压缩消噪。运用仿真模型信号和实验信号对提出地消噪算法效果进行验证; 对同样条件下的数据源, 与基于 db2 小波、db8 小波的数据压缩消噪的效果进行了分析比较。此外, 运用研制地硬件系统, 在重庆某电机厂进行实验, 采集在电机运行地真实环境下局部放电超声信号, 并对其进行基于 EMD 算法、db2 小波和 db8 小波数据压缩消噪分析和比较。仿真和实验结果分析表明, 基于 EMD 算法的数据压缩消噪, 与基于 db2 小波、db8 小波的数据压缩消噪能达到同样的消噪效果, 甚至更优, 而且不损耗原信号能量; 在对真实信号处理方面, 前者更优于后者。

关键词: Hilbert-Huang 变换; 局部放电; 电机; 声波; 消噪

中图分类号: TM835

文献标志码: A

Hilbert-Huang transform and denoising for partial discharge ultrasonic signals of large motor

CHEN Xue-jun^{1,2}, YANG Yong-ming¹, WANG Quan-di¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. Department of Electronic Engineering, Putian University, Putian 351100, Fujian, P. R. China)

Abstract: Empirical mode decomposition (EMD) algorithm is introduced as the core of the Hilbert-Huang transform (HHT), and implementation process of EMD is analyzed. Then data compression denoising algorithm based on EMD is proposed, simulation and experimental signals are used for verification of the effect of EMD. In the same data sources, the comparison of data compression denoising approaches based on the EMD, db2 wavelet and db8 wavelet are conducted. In addition, physical experiment of the same analysis and comparisons are conducted on a running motor in a Chongqing electrical plant. Simulation and experimental results show that data compression denoising algorithm based on EMD can achieve the same denoising effect, or even better than based on db2 wavelet, db8 wavelet. The former is more perfect than the latter in the real signal processing, and denoising based on EMD is not loss of the original signal energy.

Key words: Hilbert-Huang transformation; partial discharges; motor; acoustic waves; denoising

收稿日期: 2011-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50877081); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目 (2007DA10512709206)

作者简介: 陈学军 (1980-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事电气设备状态在线监测与诊断方向研究, (E-mail) cxjnet@126.com。
杨永明 (联系人), 女, 重庆大学教授, 博士生导师, (Tel) 023-65112607; (E-mail) yangyym@cqu.edu.cn。

目前,大型电机在电力系统和工业各个生产部门起着关键的作用,其安全运行越来越受到人们的高度关注。电机在运行过程,长期受热、电、机械应力等因素影响,绝缘中存在薄弱环节在局部场强作用下,气隙内产生局部放电,长时间持续放电最终会导致绝缘击穿,引起电机损坏。根据日本和欧洲的统计资料,电机故障的 15%~25%与定子绕组的绝缘有关^[1]。为此,国内外运用局部放电方法来诊断高压大电机绕组主绝缘的老化状态,已经使用了 70 多年,并成为一种常用的监测手段^[2-3]。然而,电机运行的现场环境下,局部放电信号显得非常微弱,且参杂有大量的干扰,为了获得真实的局放信号,对局部放电监测在硬件上必须有足够高灵敏度的传感器和相应信号处理器,而且在软件上要有处理效果较好的算法进行消噪。

在软件算法的处理上,在过去几十年里,通常采用基于小波分析方法对局部放电进行消噪。本课题组已在局部放电降噪方面做了大量的研究工作,不仅利用小波和复小波,而且也应用了直接陷波法滤波器对局部放电信号进行干扰抑制,显著提高了信噪比^[4-8]。而近年来的信号处理算法取得很多进步,特别是 Hilbert-huang 变换(HHT)理论的提出和应用,是对非平稳信号处理的一次重大突破。国内外研究学者已经利用 HHT 作为一种新的信号处理工具在声音分析^[9]、金融数据时间序列分析^[10]、航空重力分析^[11]、机械故障诊断^[12]、地震动信号分析^[13]、医疗信号处理^[14]等领域进行研究和应用。

而大电机局部放电超声信号是一种典型的非平稳信号,鉴于 HHT 对非平稳信号分解依赖于信号本身,信号数据的分解有真实的物理意义,并且具有更高的时频分辨率。因此,利用 HHT 对局部放电超声信号进行数据压缩消噪,是用超声信号进行大电机绝缘监测的基础。

1 Hilbert-huang 变换

Hilbert-huang 变换(HHT)是上世纪末黄锷等人根据近代数学家希尔伯特的数学理论进行设计,突破以傅立叶变换为基础的线性和稳态谱分析方法,首次提出的一种全新适用于非平稳和非线性信号的分析方法。

1.1 Hilbert-huang 变换原理

Hilbert-huang 变换由经验模态分解方法(empirical mode decomposition, EMD)和 Hilbert 变换谱分析两部分组成,其核心部分是 EMD 分解^[15-16]。EMD 分解是将信号分解为若干个内禀模

态函数(intrinsic mode function, IMF)分量之和,各分量信号则在时域内具有各自的瞬时频率,即可对每个 IMF 分量进行时频分析。在对所要研究应用的信号进行 EMD 分解,所得到的每一个 IMF 都必须满足两个条件^[15-17]:1)在整个信号序列时间长度上,每个 IMF 的极值点个数和过零点个数相等或至多相差一个;2)在任意点,由局部极大值构成的上包络线和由局部极小值构成下包络线的平均值为零。

因此,进行 EMD 分解时,主要是基于判断每一个 IMF 是否满足上述的 2 个条件进行循环分解计算。EMD 算法的实现归纳为如下几个步骤^[15-17]

1)初始化 $i=j=1$ 。

2)计算出信号 $X(t)$ 所有的局部极大值和局部极小值点。

3)用三次样条插值将所有的局部极大值点连接构成上包络线 $X_{upper}(t)$,局部极小极值点连接构成下包络线 $X_{lower}(t)$,其上、下包络线应该包络所有的信号 $X(t)$ 数据点。

4)计算上、下包络线的均值为 $M_{i,j}(t) = (X_{upper}(t) + X_{lower}(t))/2$ 。

5)将信号 $X(t)$ 去掉平均值 $M_{i,j}(t)$ 后得到 $H_{i,j}(t)$,即: $H_{i,j}(t) = X(t) - M_{i,j}(t)$ 。

6)计算比较筛选条件:若 $H_{i,j}(t)$ 满足 IMF 条件,则 $H_{i,j}(t)$ 为 $X(t)$ 第一个 IMF 分量;否则,令 $H_{i,j}(t)$ 为 $X(t)$, j 加 1,并重复步骤 2-5,直至得到一个 IMF,记为 $c_i(t)$ 。

7)判断终止条件:计算余项 $r_i(t) = X(t) - c_i(t)$,判断 $r_i(t)$ 是一个单调信号或 $r_i(t)$ 的值是否小于预先给定的阈值,若是分解结束,否则令 $r_i(t)$ 为 $X(t)$, i 加 1,重复步骤 2-7,直至得到的余项 $r_n(t)$ 符合终止条件。

因此,原信号 $X(t)$ 可分解为如下表达式

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

式(1)中 $c_i(t)$ 代表原信号 $X(t)$ 的各个 IMF 分量,其包含了原信号从高到低不同频率段的成分,且其分解构成无能量损失; $r_n(t)$ 为残余函数,表现为信号自适应趋势,或是一个常数序列,或是一个单调序列。

1.2 基于 EMD 去噪

原始信号经过 EMD 算法分解后,获得多个不同频率段的 IMF 和残余函数组成,这说明原始信号可以由多个分辨率信号分量组成,这将为由不同频率的噪声信号和研究对象信号组成的原始信号进行时空滤波提供依据^[18-19]。时空滤波器根据各个 IMF 分量的

频率进行设定各种滤波器,可以把是噪声的 IMF 分量直接滤除掉,只获取有用的研究对象信号。但是,往往现场采集的原始信号经常包含的噪声信号频率覆盖了整个有用的信号频率范围,因此,仅用时空滤波器是无法实现理想的消噪,甚至有时会把有用的信号成份滤除,导致本身微弱原始信号能量损耗。

考虑到小波消噪的原理,对原始信号进行小波分解后,对高频部分进行信号数据压缩。通过设定数据压缩率,即假设当信号小波分解高频部分脉宽小于设定值时,后续高频部分均表示为噪声,则这些高频项置为零。同理,对于 EMD 数据压缩算部分,先对原始信号进行 EMD 分解,其将被分解为多个不同频率段的 IMF 和残余函数组成。此时,噪声亦被分解成相应不同频率段的 IMF 和残余量,噪声部分的 IMF 分解量相对于原信号量的 IMF 分解量要小得多,故对于每个 IMF 分量小于数据压缩设定值,则认为其为噪声,置为零。最后,再对数据压缩后每个 IMF 进行 EMD 重构,从而达到对原始信号进行消噪,其原理方框图如图 1 所示。

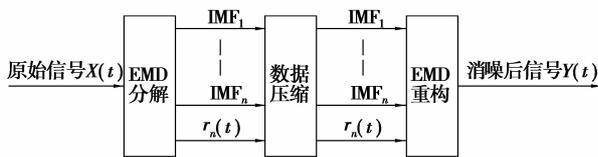


图 1 EMD 数据压缩消噪原理框图

2 大电机局部放电超声信号仿真及消噪

因大电机运行过程存在振动、电磁等噪声干扰的影响,直接采用实际真实信号去实现,很难验证说明 EMD 数据压缩消噪的效果。为此,构建了局部放电超声信号仿真信号进行验证。

局部放电超声信号属于振荡衰减型局放脉冲,因此,可以用双指数衰减模型来模拟局部放电超声信号,其数学模型为

$$f(t) = A \cdot (e^{-1.3t/\tau} - e^{-2t/\tau}) \quad (2)$$

式(2)中: A 为信号幅值; τ 为衰减系数。仿真时取幅值 A 为 1.2 V , 衰减系数 τ 为 $0.5 \mu\text{s}$, 采样频率为 100 MHz , 把这些相应的参数代入公式(2), 并取其数学模型信号的实部作为局部放电信号, 得到的波形图如图 2(a)所示。并在其仿真信号的基础上施加最大幅值为 0.1 V 的随机噪声信号, 如图 2(b)所示。图 2(b)相对于图 2(a)增加了噪声干扰信号, 噪声信号相对比较弱。

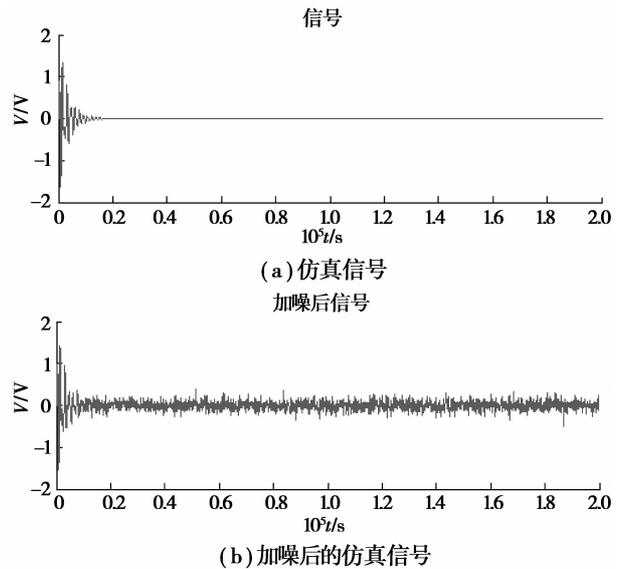
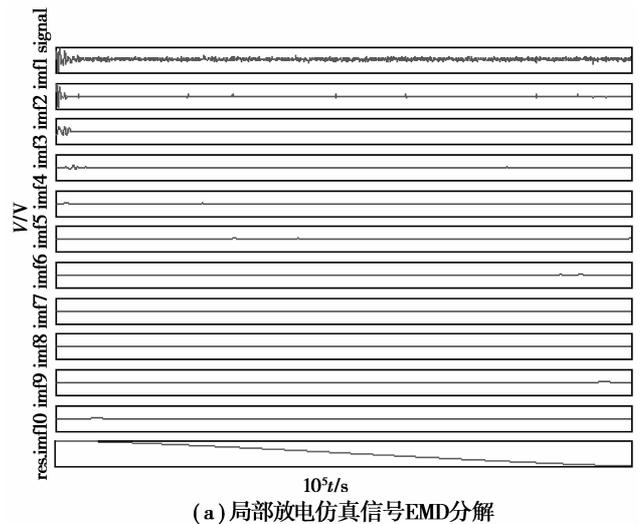
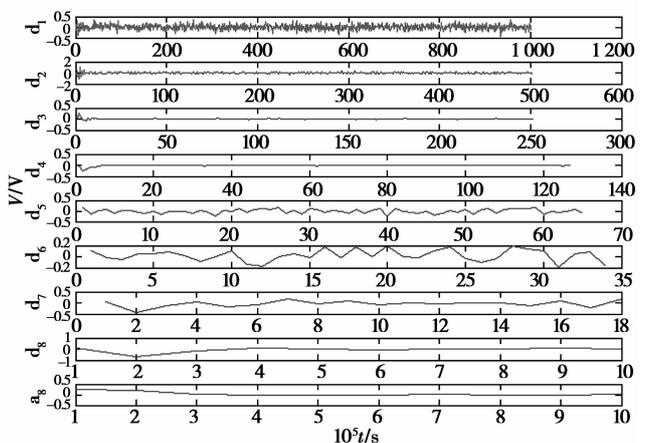


图 2 局部放电仿真信号

图 3(a)为图 2(b)中的信号经 EMD 分解后的结果,与小波分解类似,原始信号一共被分解为 10 阶固有模态函数和 1 阶残差。从图中可以很清楚看



(a) 局部放电仿真信号 EMD 分解



(b) 局部放电仿真信号 db2 分解

图 3 局部放电仿真信号分解

出,信号分解后各个 IMF 分量都存在噪声分量。同样的应用 db2 小波对上述同一个仿真局部放电信号进行小波分解,如图 3(b)所示。比较图 3(a)、(b),以及分析各自的算法实现,可以看出,EMD 是自适应的分解,而小波是非自适应的分解,而且 EMD 更能真实地反映信号的分解物理构成,具有不失原信号能量。

运用 EMD 数据压缩实现对上述仿真信号去噪,并进行信号重构,如图 4(c)所示。对比图 2(b),可以明显看出,噪声毛刺几乎消掉,起到很好的消噪效果。文献[20]中介绍应用小波对局部放电信号进行消噪。因此,选用经典小波 db2 和 db8 小波进行分解,运用与文中介绍 EMD 同样的数据压缩率消噪,设定同样的数据压缩率,再次消噪后的信号进行小波重构,其波形图如图 4(a)、(b)所示。

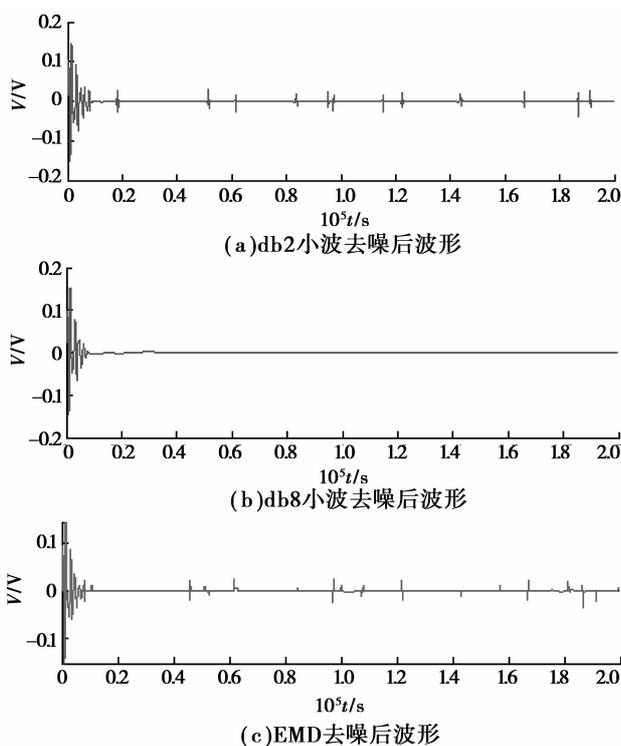


图 4 局部放电仿真信号消噪后的波形

从图 4 图形上比较,可以明显的看出,db8 相对于 db2 和 EMD 噪声消除得干净,但小波会存在失原信号能量的特性。为了能定量的分析比较三者的消噪效果,引入信噪比(SNR)、相对误差和均方差进行衡量,并分析比较了三者的运算时间,对上述的实验仿真数据计算结果如表 1 所示。同时发现,3 种去噪算法对于不同的数据运算分析结果,会存在有所变化。

表 1 EMD 与 db2、db8 小波分析去噪结果及运算时间比较

算法	SNR/dB	相对误差	均方差	运算时间/s
db2	8.871 1	0.360 1	0.001 4	0.029
db8	9.484 3	0.335 6	0.001 2	0.016
EMD	9.722 9	0.326 5	0.001 1	0.029

3 实验与分析

3.1 实验信号采集硬件

为了对大型电机局部放电超声信号进行采集、分析和处理,本课题研制了局部放电超声监测系统,其硬件结构如图 5 所示。其主要由 4 部分组成:前端 PXR04 型声发射传感器、PXPAII 宽带声发射前置放大器、研华 PCI-1714UL 数据采集卡和基于虚拟仪器技术的人机界面化及后台数据库监测系统平台。

超声传感器 PX04 的频率响应范围 20~165 kHz,主频在 90 kHz 左右,能够很好的响绝缘局部放电超声信号。PXPA II 宽带声发射前置放大器带宽介于 15 kHz 到 2 MHz,增益为 40 dB,并且噪音低,与 PXR04 型声发射传感器通过 BNC 接口可以紧密配合连接^[21]。监测系统数据采集模块采用研华公司的高速同步 4 路 PCI-1714UL 数据采集卡,人机界面采用 NI 公司的 LabVIEW 虚拟仪器软件开发实现。

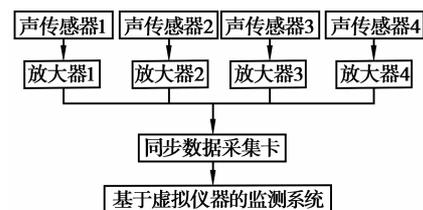


图 5 系统硬件结构图

3.2 实验结果与分析

为了检测大型电机局部放电超声信号在实际运行的情况下受到环境影响后的信号进行验证 EMD 消噪效果,以重庆某电机厂的新生产出厂正进行性能试验高压异步电动机作为实验对象。如图所 6 所示,在异步发电机其中一端部外壳上安放两个超声波传感器。其电机在空载条件下运行,在距超声传感器 30~40 cm 的地方用电火花打火机进行模拟局部放电。测得两路信号时域图如图 7(a)所示。从其中图可以看出,其噪声和振动幅值比较大,完全淹没了模拟局部放电信号。

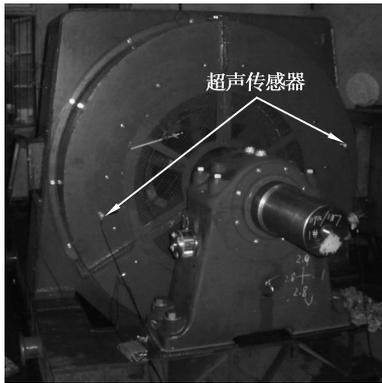


图 6 新异步电机局部放电实验图

由前期的实验可知,模拟局部放电的主要频率及超声传感器对其敏感响应主要集中在 90~100 kHz。为此,对其中一路超声传感器应用巴特沃斯 4 阶带通滤波器进行滤波,获得模拟局部放电信号的时域图如图 7(b)所示。并对图 7(b)的波形信号同样运用

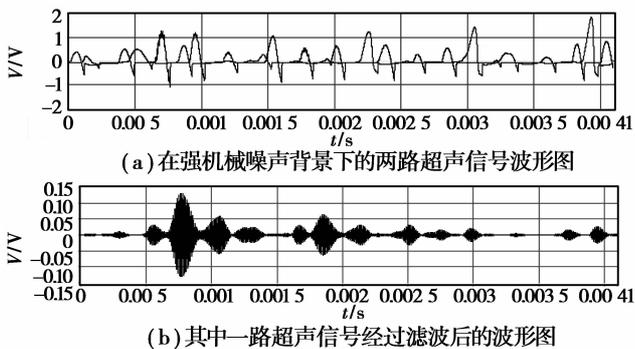


图 7 实验获取的信号波形图

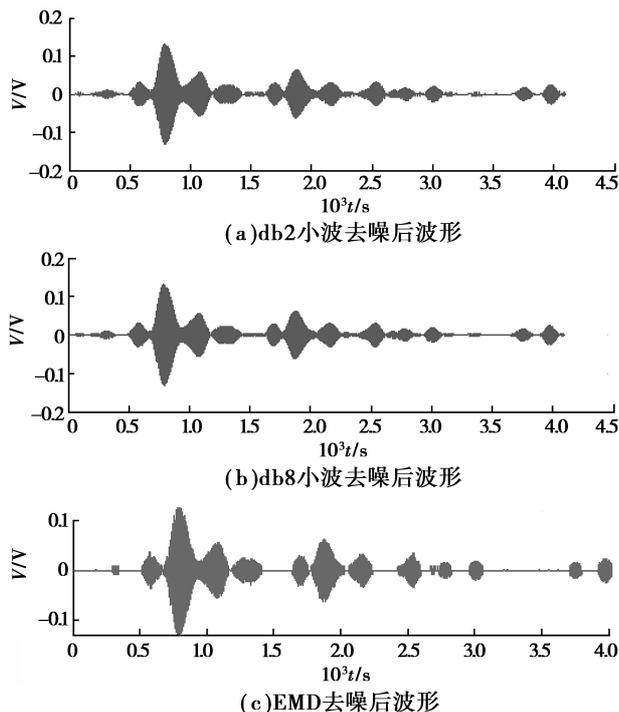


图 8 局部放电超声信号消噪后的波形

db2 小波、db8 小波和 EMD 数据压缩进行消噪,其结果波形分别如图 8(a)、(b)和(c)所示。可以明显看出,图 8 的(c)相对于(a)、(b)在噪声分布的信号段明显没有毛刺,消噪效果显而易见;比较仿真信号去噪后的波形图,真实信号运用 EMD 算法去噪的效果相对好些,可见,去噪算法对不同的信号去噪的效果亦发生变化。

4 结 论

介绍了 HHT 的核心 EMD 算法和实现,提出了基于 EMD 的数据压缩消噪算法。运用局部放电仿真模型进行放电信号仿真,并进行加噪,在同样的仿真数据源条件下,对比了经过 db2 小波、db8 小波和 EMD 算法的数据压缩消噪效果。基于研制的硬件系统,在实际大型电机运行下,进行局部放电信号采集,并对其进行同样消噪分析。实验结果分析表明,基于 EMD 算法的数据压缩消噪,与基于 db2 小波、db8 小波的数据压缩消噪能达到同样的消噪效果,在相对误差和均方差方面甚至更优;3 种不同的算法对真实信号的消噪效果,EMD 算法显得更优。为此,基于 EMD 算法的数据压缩消噪可以为后期的课题进行大型电机局部放电超声信号的研究打下良好的基础。

参考文献:

- [1] 苏鹏声,汪小明,曹海翔. 大型发电机定子绕组局部放电在线监测系统的研究[J]. 电工电能新技术,2000(2): 49-52.
SU PENG-SHENG, WANG XIAO-MING, CAO HAI-XIANG, et al. Research of on-line monitoring and diagnosis system for large generator stator windings partial discharge [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2000(2):49-52.
- [2] OLIVER B M. Directional electromagnetic couplers [J]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1954, 42: 1686-1694.
- [3] NATTRAS D H. The early history of partial discharge research [J]. IEEE Electr Insul Mag, 1993, 19(4): 27-31.
- [4] 孙才新,李新,杨永明. 从白噪声中提取局部放电信号的小波变换方法研究[J]. 电工技术学报,1999,14(3): 47-50.
SUN CAI-XIN, LI XIN, YANG YONG-MING. The method of drawing the PD signals from white noise by wavelet analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical society, 1999, 14(3):47-50.
- [5] 杨永明,孙才新,李新. 用小波分析去除局部放电在线

- 监测中的白噪干扰[J]. 高压电器,1999(3): 8-12.
- YANG YONG-MING, SUN CAI-XIN, LI XIN. The method of eliminating white noise at on-line detection of partial discharge by wavelet analysis[J]. High Voltage Apparatus,1999(3): 8-12.
- [6] 杨永明,严欣平,孙才新. 抑制宽频带局部放电在线监测系统中周期性干扰的直接陷波滤波法的研究[J]. 仪器仪表学报,2001(4): 419-421.
- YANG YONG-MING, YAN XIN-PING, SUN CAI-XIN. The study of direct trap wave filtering to reject periodic interference in partial discharge widebanded measurement system on line [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2001(4):419-421.
- [7] 唐炬,许中荣,孙才新,等. 应用复小波变换抑制 GIS 局部放电信号中白噪声干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(16):30-34.
- TANG JU, XU ZHONG-RONG, SUN CAI-XIN, et al. Application of complex wavelet transform to suppress white-noise interference in GIS PD signals [J]. Proceedings of the Csee,2005,25(16):30-34.
- [8] 唐炬,邓志勇,周倩,等. 一种抑制 PD 白噪干扰的有效复合信息技术[J]. 重庆大学学报,2008, 31(4): 401-407.
- TANG JU, DENG ZHI-YONG, ZHOU QIAN, et al. An effective technique of combining information for reducing the white noise of partial discharge signals [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(4): 401-407.
- [9] ADAM O. Advantages of the Hilbert Huang transform for marine mammals signals analysis [J]. J Acoust Soc Am, 2006, 120(5): 2965-2973.
- [10] HUANG N E, WU M L, QU W D, et al. Applications of Hilbert-Huang transform to non-stationary financial time series analysis[J]. Appl Stochastic Models Bus Ind, 2003(19):245-268.
- [11] HASSAN H H, PEIRC E J W. Empirical mode decomposition (EMD) of potential field data: airborne gravity data as an example [J]. Canadian Society of Exploration Geophysicists Recorder, 2008, 33(1): 25-30.
- [12] YAN R Q, GAO R X. Hilbert-Huang Transform-Based vibration signal analysis for machine health monitoring [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(6):2320-2329.
- [13] 曹晖,曹永红. HH 变换在震动信号分析中的应用[J]. 重庆大学学报,2008,31(8): 922-927.
- CAO HUI, CAO YONG-HONG. Application limitation of the Hilbert-Huang transform to earthquake ground motion analysis [J]. Journal of Chongqing University,2008,31(8): 922-927.
- [14] ZOU Q, TANG J T, TANG Y. Hilbert-Huang transform for ECG de-noising [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2007, 24(4):309-312.
- [15] HUANG N E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society, 1998, 454(A):903-995.
- [16] HUANG N E, WU Z. An adaptive data analysis method for nonlinear and nonstationary time series: The empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Wavelet and Its Application, Macao, China: IEEE, 363-376.
- [17] HUANG N E, WU Z. A review on Hilbert-huang transform; method and its applications to geophysical studies [J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2): 1-23.
- [18] WU Z, HUANG N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 2004, 460(2046):1597-1611.
- [19] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES P. Empirical mode decomposition as a filter bank [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2):112-114.
- [20] 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.
- [21] 北京鹏翔科技有限公司. PXR 系列谐振式声发射传感器技术参数[M]. 北京:北京鹏翔科技有限公司,2009.

(编辑 张小强)