

小波变换去噪在绝缘子污秽放电声发射监测中的应用

李红玲, 文习山, 舒乃秋, 姚刚

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 研究了绝缘子污秽放电声发射监测中用小波变换进行信号提纯与消噪的实现问题。在大量绝缘子污秽放电声发射试验基础上, 分析总结了污秽放电声发射信号的共有特点。并提出一种基于声发射信号小波变换的小波基选取方法。采用选取的最优小波函数 $rbio3.9$ 对声发射信号进行频谱分析, 提取了声信号的特征频带, 并对重构后的信号进行二重小波分解消噪。两组声发射信号的小波变换消噪结果表明, 小波变换提高了信号信噪分离结果的可靠性, 有效地降低了噪声对污秽放电声发射信号的影响。

关键词: 绝缘子; 污秽放电; 声发射; 小波变换; 频谱分析; 降噪

Application of wavelet transforms denoising in acoustic emission detection of polluted insulator discharge

LI Hong-ling, WEN Xi-shan, SHU Nai-qiu, YAO Gang

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper studies how to use wavelet transform method to purify and denoise in acoustic emission monitoring of polluted insulator discharge. Based on numerous acoustic emission experiments of polluted insulators discharge, the common characteristics of acoustic emission wave emitted from polluted insulators discharge are summarized. And an effective method to select best wavelet basis is proposed based on wavelet transform of acoustic emission signals. Then the appropriate wavelet function is chosen. And frequency analysis of acoustic emission signals is realized using wavelet transform with optimal wavelet function of $rbio3.9$. Characteristic frequency bands are extracted to reconstruct the signal, and then duplicate wavelet decomposition is applied to reduce noise of reconstructed signal. Two examples using wavelet analysis to denoise in acoustic emission signals are given. Experimental result shows that the reliability of separating the signal from noise is improved and noise influence on acoustic emission signal is reduced effectively after using wavelet transform method.

Key words: insulator; polluted discharge; acoustic emission; wavelet transform; frequency analysis; denoising

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0056-04

0 引言

绝缘子污闪是一个电弧不断爬伸的缓慢的、渐进的过程^[1]。在污秽放电发展的整个过程中, 放电声发射波在放电开始及结束时被激发, 由微弱的辉光放电到强烈的局部电弧, 声信号由弱到强发展。即污秽放电声发射波动态表征污秽绝缘子放电强度。因此, 通过监测绝缘子污秽放电时发出的声信号, 可实现对绝缘子污秽放电进行监测, 则在闪络尚未发生之前发出报警是可行的。该方法使用设备简单, 操作方便, 适用于不同结构的绝缘子。其缺点在于易受环境背景噪声的影响很大, 需要采用有效的数据处理方法对其声发射监测信号进行相关处理和分析。

绝缘子污秽放电声发射信号是一种机械波, 具有波动性和衰减性。此外, 还具有瞬态性和多样性

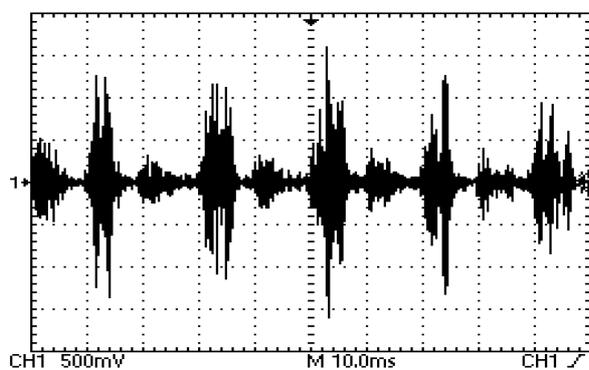
的特点, 属于典型的非平稳信号。人工污秽试验所采集的声发射信号往往包含许多尖峰或突变部分, 并且噪声也不是平稳的白噪声, 因此需要对信号进行预处理, 提取有用信号。小波分析具有同时在时域和频域表征信号局部特征的能力, 这对于分析含有瞬态信息的放电声发射信号是适合的^[2]。

1 绝缘子污秽放电声信号的特点

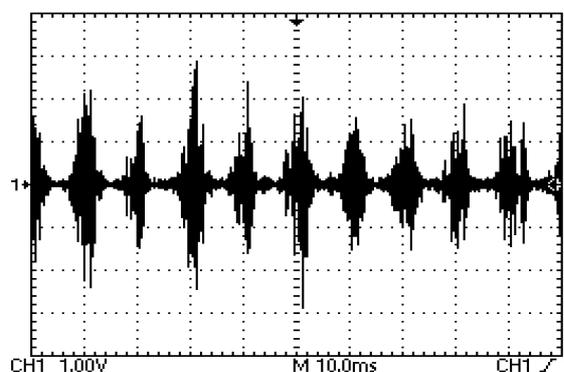
在绝缘子污秽放电过程中, 带电质点由于电场的作用而获得加速, 同时由于电弧产生的高温, 空气分子剧烈的热运动, 都会使空气分子发生碰撞, 从宏观上看, 对与放电通道相邻的空气产生了压力, 使之向外运动, 而由于空气的弹性作用, 产生了阻力, 使这部分空气达到最大位移后又开始向平衡位置运动, 这样就在平衡位置附近产生振动, 这种振动通过相邻的空气媒质会一直传播下去^[3]。

为了研究污秽放电声发射信号的典型信号特征,进行了多组人工污秽放电试验。试验选取几种常用绝缘子作试品,分别为普通型瓷绝缘子(型号:XP-160),玻璃绝缘子(型号:LD-120)以及定做的复合绝缘子。每种型号绝缘子的盐密依次分为0.025、0.05、0.1、0.2、0.4 mg/cm²五个等级。在试验的升压过程中,用声发射检测装置采集放电声信号,观察不同电压等级下,不同绝缘子在不同盐密下的表面污秽放电信号波形。其中,声发射检测装置主要包括声传感器、放大和滤波电路等,对声信号进行采集和放大及滤波处理。

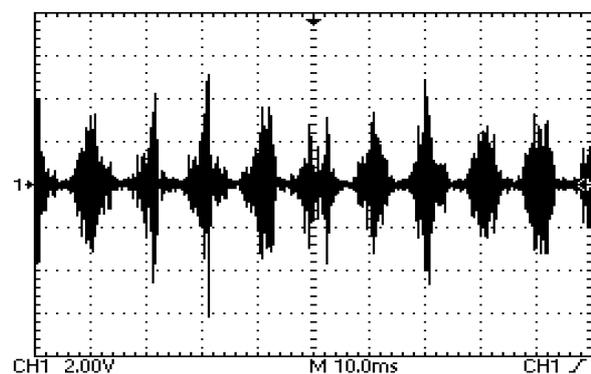
在污秽放电发展的整个过程中,声发射波在放电开始及结束时被激发。放电的出现是间歇的、时强时弱的,但放电总的趋势是确定的,即由微弱的辉光放电到强烈的局部电弧。在这个过程中的声信号由弱到强,从开始的轻微的电晕声,到后面嗡嗡的电弧声。污秽放电的主频范围一般为20~200 kHz,中心频率约为40 kHz。如图1所示为武汉大学高压实验大厅实测的污秽放电信号。其中,试品为XP-160,盐密为0.025 mg/cm²,灰密为2.0 mg/cm²,从(a)~(d)实验电压依次升高。



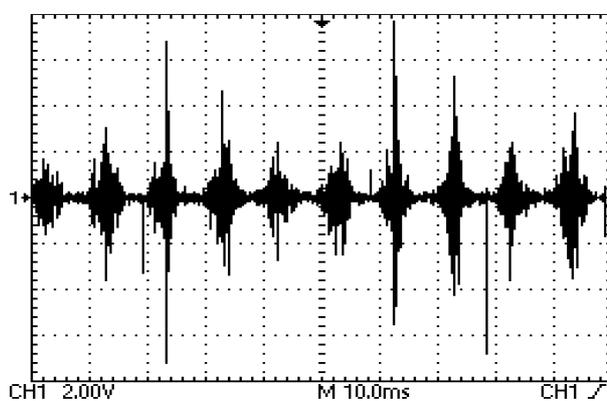
(a)



(b)



(c)



(d)

图1 绝缘子污秽放电信号

Fig.1 Acoustic signal of polluted insulator discharge

根据对绝缘子的污秽放电声发射信号的分析,绝缘子污秽放电声发射波具有以下特征:

(1) 污秽放电信号是个渐变的过程,绝缘子污秽闪络的出现有一个渐进的过程。

(2) 声发射信号在时域通常表现为一类具有一定的冲击特性和近似指数衰减性质的波形信号,且具有一定持续时间。

(3) 污秽放电强弱与声波信号的幅值和频度有关。随着试验电压的增加,污秽放电强度随之增加,声发射信号越来越强,声信号的幅值越来越大,信号越来越密集,波形从无到周期变化再到声脉冲密集发生。

(4) 绝缘子污秽放电的频谱很宽,主要分布在超声波范围之内。

(5) 绝缘子污秽放电声信号测试环境伴随有多种干扰声信号,如喷雾声及异物撞击声等。绝缘子实际位置的现场污秽放电声信号中也会包含多种干扰噪声。虽然在硬件上已经采取了相应的干扰抑制措施,但对于白噪声干扰很难抑制,采集的声信号

中仍存在噪声信号。因此，从采集的含有噪声的混合声信号中提取有用声信号，提高和改进声发射信号分析能力至关重要。

2 绝缘子污秽放电声信号中小波基选取

经过对绝缘子污秽放电声发射信号的特征分析可知，声发射信号是一类瞬态的非平稳时变信号，小波变换是目前分析这一类信号最有效的方法。能否取得好的分析效果关键在于如何选取小波基^[4]。根据绝缘子污秽放电声信号的特点和小波基的性质^[5]可得到如下结论：

(1) 由于绝缘子污秽放电声信号是个渐变的过程，为了解决计算量的问题，选取可进行离散小波变换的小波基。

(2) 小波变换是不同尺度下的小波基函数与信号的互相关。小波基与信号的相关性越好，小波变换对信号的特征提取量就越多，用小波基分析信号的特征就越准确。放电声信号在时域通常表现为具有一定冲击特性和近似指数衰减性质的波形信号，且具有一定持续能力。因此，选择的小波基应具有类似的性质才能对放电声信号的特征提供较好的分析效果。

(3) 放电声信号具有瞬态性，为准确拾取突发的AE信号，优先考虑选择在时域具有紧支性的小波基。同时为了保证小波基在频域的局部分析能力，要求小波基在频域具有快速衰减性。

根据以上分析，选择时、频域特性与放电声发射波最相似的小波为备选基函数。通过比较发现 Daubechies 小波系中的 db10 和 Biorthogonal 小波系中的 bior3.7、bior3.9 小波以及 reverse Biorthogonal 小波系中的 rbio3.7、rbio3.9 小波符合要求^[6]。其小波函数如图 2 所示。

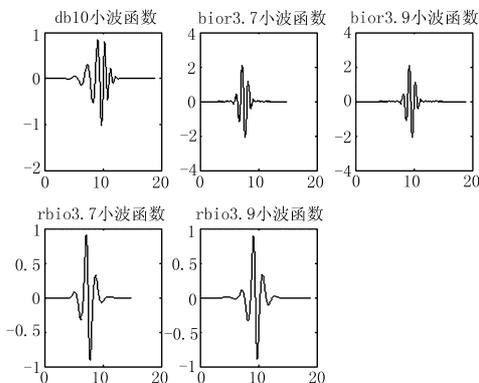


图2 备选小波函数
Fig.2 Alternative wavelet function

采用以上5种小波函数对4组声信号进行两个

尺度的小波分解，再按小波分解平均总熵值最小标准，从上述5种小波中选择最优小波函数。结果见表1所示。

表1 4组典型放电声发射信号小波分解的熵值

Tab.1 Entropies of wavelet decomposition for 4 group typical acoustic emission signals

小波函数	信号1	信号2	信号3	信号4
db10	2.721 8	1.950 2	2.523 5	1.392 1
bior3.7	3.130 5	2.328 9	2.940 3	1.748 6
bior3.9	3.143 6	2.339 6	2.953 1	1.769 9
rbio3.7	2.416 3	1.675 6	2.223 3	1.147 6
rbio3.9	2.364 5	1.640 2	2.172 0	1.116 3

从表1可见：就放电声发射波而言，rbio小波系比bior小波系和db小波系分解效果好；用rbio3.9分解时4次总熵值都是最小。故可选rbio3.9小波作为放电声发射波检测小波函数。

3 小波变换对绝缘子污秽放电声信号的频谱分析

绝缘子污秽放电声信号中存在干扰信号。按时域信号特征，通常将干扰分为连续的周期型干扰、脉冲型干扰和白噪三大类^[7]。对于前二者的干扰信号，由于声信号采集装置中已设置带通滤波和限幅电路等，已在硬件上采取的抑制措施中给予有效的抑制。因此，装置所采集的绝缘子污秽放电声信号中主要包含白噪声干扰。这里主要研究含白噪声的声信号的小波消噪方法。

采用rbio3.9小波函数对一声发射信号进行2个尺度的小波分解，各尺度分解的重构波形信号及其所对应的频谱见图3。其中的声信号的数据长度2 500点，采样时间5 ms，采样间隔2 μs，采样频率500 kHz。经小波变换，绝缘子污秽放电声发射检测信号被分解到3个频带中，即a2: 0~62.5 kHz, d2: 62.5~125 kHz, d1: 125~250 kHz。声发射信号经过小波分解后各级频带能量占整个信号能量的百分比分别为：a2: 94.27%，d2: 5.67%，d1: 0.06%。可见，经过小波分解后低频以及第2级的高频信号所携带的能量占总能量的99%以上，是信号的主能量频带，分析小波变换后各级的信号时域波形，同样能获得类似的结论。因此，低频和第2级的高频分解信号可用于分析绝缘子污秽放电声信号的特征。可以用这两级信号进行信号重构。

经过特征频带提纯的信号中仍然存在的噪声可通过小波消噪来抑制或衰减。对提取的特征频段小波系数作二重小波分解，即再用rbio3.9小波二层分解提取有用频段小波系数然后选用软阈值消噪。消噪重构的小波波形见图4。

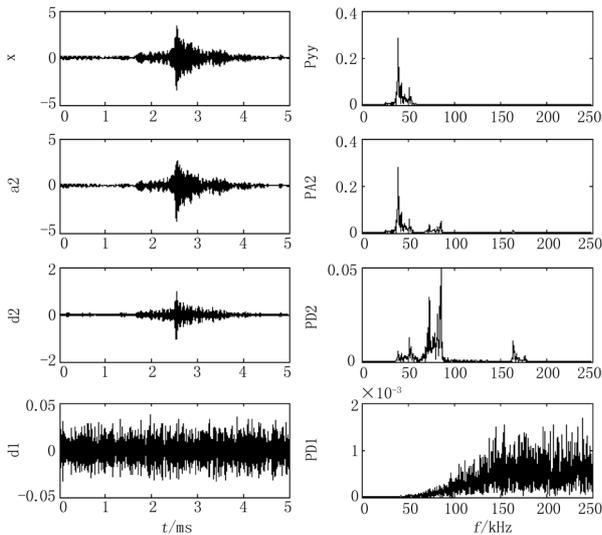


图3 声信号小波分解后5个尺度的重构波形及其频谱
Fig.3 Reconstruct wave and its frequency spectrum of acoustic signal with 5 scales wavelet decomposition

对比小波消噪后的重构信号与原始信号可发现, 经过小波基预处理绝缘子污秽放电声发射信号后可保留原始信号的全部特征而波形平滑, 无关信息及噪声已大大减小甚至可以被全部消除。

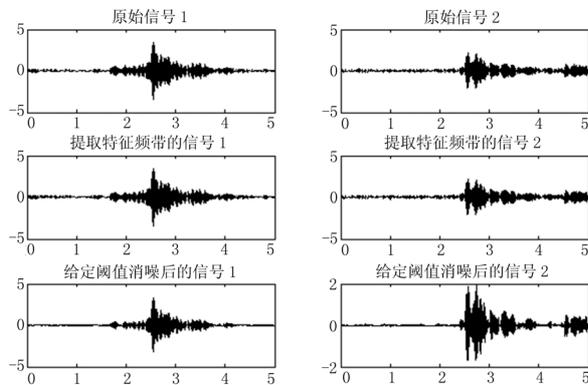


图4 小波消噪效果图
Fig.4 Effect of wavelet denoising

4 结论

污秽放电声发射波动态表征污秽绝缘子放电强度, 因此声发射检测技术能很好地应用于绝缘子污秽放电监测。人工污秽试验揭示了绝缘子声发射信号典型特征。将小波变换应用于声发射信号预处理, 可对声发射信号进行时频分析, 提取声发射信号的特征频带进行重构, 并对重构后的信号进行二重小波分解消噪。实验结果表明, 小波变换提高了放电

声发射信号信噪分离结果的可靠性和稳定性。

参考文献

- [1] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] Qing N, Misada Y. Analysis of AE Signals by Wavelet Transform[J]. Journal of Society Material Science, 1998, 47(3): 305-311.
- [3] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [4] 谭善文, 秦树人, 汤宝平. 小波基时频特性及其在分析突变信号中的应用[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2001, 24(2): 12-17.
TAN Shan-wen, QIN Shu-ren, TANG Bao-ping. Time-frequency Characteristic of Wavelet Base and Its Application Transient Signal Detection[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2001, 24(2): 12-17.
- [5] 陈志奎, 徐铭陶, 秦树人, 等. 工程信号中的小波采样与小波分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1996, 19(5): 1-9.
CHEN Zhi-kui, XU Ming-tao, QIN Shu-ren, et al. Wavelet Sample and Wavelet Analysis on Engineering Signals[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 1996, 19(5): 1-9.
- [6] 王成江, 聂德鑫. 放电声发射波检测中小波基的选择[J]. 高电压技术, 2003, 29(10): 39-40, 57.
WANG Cheng-jiang, NIE De-xin. Selection of Best Wavelet Basis for Acoustic Emission Detection of Discharge[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10): 39-40, 57.
- [7] 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.

收稿日期: 2009-04-24; 修回日期: 2009-05-19

作者简介:

李红玲(1977-), 女, 博士生, 研究方向为电气设备在线监测; E-mail: lihongling8401@163.com

文习山(1962-), 男, 博士研究生, 教授, 博导, 长期从事高电压技术科研工作;

舒乃秋(1954-)男, 博士研究生, 教授, 博导, 长期从事电气设备在线检测监测科研工作。