

# 基于混沌控制和多重滤波的局部放电去噪研究

臧怀刚, 郭小星, 李小俚

(燕山大学电气工程学院工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 采集局部放电信号时, 经常受到外界的干扰, 主要包括周期性窄带干扰、白噪声干扰和随机脉冲干扰。噪声太大时, 局部放电信号会被淹没。为了提高变压器局部放电信号定位的准确性, 提出混沌控制和多重滤波的方法, 在线检测去除干扰。利用相关性和谱分析识别周期干扰并确定窄带干扰的周期, 设置合适参数控制混沌系统, 精确去除噪声, 采用多重滤波的方法去除白噪声干扰, 以及利用脉冲极性鉴别法抑制随机脉冲干扰, 并在虚拟仪器平台上进行仿真实验。实验结果表明, 该方法可以有效抑制干扰, 为变压器局部放电信号的定位系统奠定了技术基础。

**关键词:** 局部放电; 混沌系统; 多重滤波; 小波变换; 虚拟仪器

## De-noising of partial discharge based on chaotic control and multiple-filter

ZANG Huai-gang, GUO Xiao-xing, LI Xiao-li

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The collection of partial discharge signals is often disturbed by the environment, which includes periodic narrow-band interference, white-noise interference, and random pulse shaped interference. When the noise is very large, partial discharge signals will be overwhelmed. In order to improve the accuracy of location of partial discharge signals, this paper describes the method to no-line detect and remove the disturbance based on chaotic control and MFT. Using relativity and spectrum analysis to identify the periodic disturbance and determine the periodic of narrow bandwidth interference, setting appropriate parameter to control chaotic system to denoise accurately. It proposes a multiple filter to remove white-noise and uses pulsive polarity distinguishing method to suppress random pulse noise and conduct a simulation based on a virtual instrumentation. The result shows that this method can suppress noise effectually. It lays a technique foundation for the location system of partial discharge signals of transformers.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90820016).

**Key words:** partial discharge; chaotic system; MFT; wavelet transform; virtual instrument

中图分类号: TM83 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0086-05

## 0 引言

在电力系统中, 电力设备的状态直接关系到电力系统的安全, 变压器设备出现故障将会造成严重的生产损失和安全事故。在高电压下, 变压器设备故障发生时的早期征兆是产生局部放电。为了监测变压器的运行状态, 预报早期故障并确定故障发生位置, 需要对变压器局部放电信号进行带电检测。超声波法可以在不断电的情况下, 测量放电量并能精确确定放电位置<sup>[1]</sup>。与传统停电检测相比, 在线监测可以长时间连续检查变压器绝缘情况, 提高检测的可靠性, 降低维修费用。本文还采用 DSP 进行

数据采集, LabVIEW 开发上位机监控软件。

## 1 数据采集系统

该系统主要是在线采集局部放电信号, 通过布置在变压器外壳上的超声波传感器接收信号, 传输到数据采集系统。采用 TI 公司生产的 TMS320LF2407DSP 芯片, 预处理采集到数据, 提取放电信号, 采用定点运算方式, 计算速率快, 可以完成 FFT 变换、IIR 滤波和小波变换, 去除部分干扰。并且内嵌 CAN 总线控制器, 支持 CAN2.0 协议, 为 CAN 总线传输数据做准备。

由于变压器在强电磁的干扰下, 需要采集多路超声波信号, 数据采集量大, 计算所需要的内存空间大, 这个系统可以克服一般单片机的不足。

基金项目: 国家自然科学基金 (90820016)

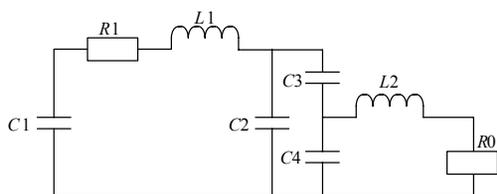
## 2 局部放电模型

变压器内部发生局部放电, 就一定会产生频率在 20 kHz 以上的超声波信号。超声波的穿透能力很强, 从局部放电处以球面波的方式向四周传播, 通过绝缘介质到达油箱壁, 安装在变压器外壳上的超声波传感器就会接收到信号<sup>[2]</sup>, 这里采用的超声波传感器为压电传感器, 选用的频率范围为 70~150 kHz。

由放电波形图 1 可知: 局部放电信号呈现指数衰减振荡, 利用回归归纳法可以确定局放的形式为:

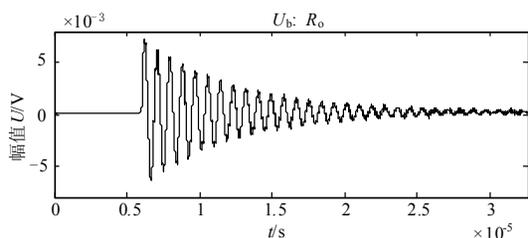
$$f(t) = Ae^{-t/\tau} \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

其中  $f_c = 1 \text{ MHz}$ ,  $A$  为脉冲幅值取 0.5 V,  $\tau = 10 \text{ } \mu\text{s}$ 。



(a) 局部放电信号等效电路图

$L1=4 \text{ PH}$  为充电回路的等效电感,  $R1=200 \text{ k}\Omega$  为充电回路的等效电阻,  $L2=30 \text{ } \mu\text{H}$  为局部放电回路的等效电感,  $R0=8 \text{ } \Omega$  为局部放电回路的等效电阻,  $C1=0.3 \text{ } \mu\text{F}$  为耦合电容,  $C2=10 \text{ PF}$ 、 $C3=40 \text{ PF}$ 、 $C4=600 \text{ PF}$  为绝缘部分等效电容。



(b) 模拟局放信号放电波形图

图 1 局部放电

Fig.1 Partial discharge

$$R_{yy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T y(t)y(t+\tau) dt =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T (f(t) + n(t))(f(t+\tau) + n(t+\tau)) dt =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T (f(t)f(t+\tau) + f(t)n(t+\tau) + n(t)f(t+\tau) + n(t)n(t+\tau)) dt = \quad (5)$$

$$R_{ff}(\tau) + R_{fn} + R_{nf} + R_{nn}$$

因为局放信号与噪声是两个完全独立的信号, 所以  $R_{fn}(\tau)=0$ ,  $R_{nf}(\tau)=0$ 。则相关性处理后:

$$R_{yy}(\tau) = R_{ff}(\tau) + R_{nn}(\tau) \quad (6)$$

## 3 去噪方法

变压器正常运行时存在多种噪声干扰源, 如周期干扰、白噪声和脉冲型干扰等<sup>[3]</sup>。在检测中如果不能有效地消除噪声干扰, 就不能有效分离局部放电信号。在变压器局部放电信号去噪过程中, 经小波变换后, 采集到的信号发生畸变, 影响周期性干扰的去除。所以, 一般先去除周期性干扰。

### 3.1 混沌控制抑制周期干扰

窄带周期干扰是变压器放电检测中很严重的干扰。此类干扰和局部放电信号在频率上非常接近, 可以应用相关性分析法对干扰进行识别。设  $x(t)$ ,  $y(t)$  为两个信号函数, 则两个信号的互相关函数表达式如式 (2); 当信号  $y(t)=x(t)$  时, 该表达式将变为  $x(t)$  的自相关函数。局部放电信号的自相关函数随着  $\tau$  的增加幅值逐渐衰减为零; 然而周期干扰信号随着  $\tau$  的增加, 其自相关函数也表现为周期性。据此就可以发现周期干扰的存在。

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (2)$$

假设, 局部放电信号中分别加入频率  $f_s$  为 10 kHz 和 30 kHz 的正弦周期干扰信号:

$$n(t) = \sin(2\pi f_s t) \quad (3)$$

接收到的信号是局放信号和周期性干扰信号的叠加。

$$y(t) = f(t) + n(t) \quad (4)$$

接收到的信号的自相关函数为:

图 2 为自相关函数图。

混沌控制利用 Duffing-homes 振子对白噪声和局部放电信号免疫的特点, 将谱分析得到干扰信号的周期作为混沌系统的参数扰动, 有效去除周期干扰。

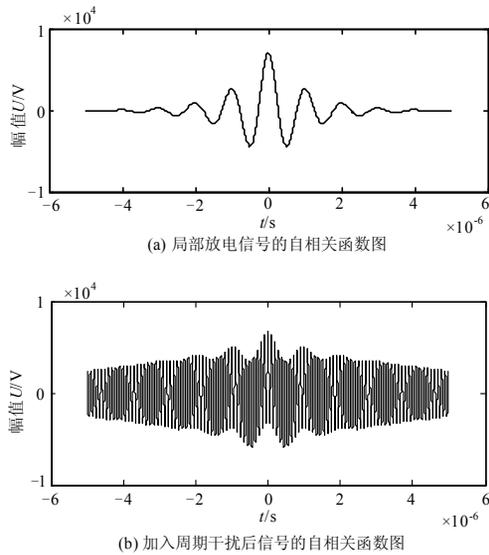


图2 自相关函数图

Fig.2 Autocorrelation function

混沌振子方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega y \\ \dot{y} = (x^3 - cx^5 - ky + \gamma \cos \omega t)\omega \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $c = 1 + \beta u(t) - \alpha \delta_T(t)$ ,  $k = 0.5$  为阻尼比。 $0 \leq \beta \leq 1$ ,  $\beta$  值的选取由局部放电信号的幅值决定, 确保  $\beta u(t)$  的幅值小于 1。 $0 \leq \alpha \leq 1$ , 当  $\alpha = 0$  时系统中没有周期干扰噪声, 当  $\alpha \neq 0$  时系统中包含周期干扰噪声。

首先, 取  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0$  通过实验的方法使混沌振子系统处于混沌与大尺度周期的交界状态, 将局部放电信号输入混沌系统中, 如果含有周期干扰, 则混沌系统进入大尺度周期状态, Lyapunov 指数  $\lambda < 0$ 。

其次, 根据谱分析得到的周期干扰噪声的周期  $\omega$  设置一个与周期干扰同频率的周期信号  $\cos \omega t$  作为参考与局部放电信号互相关, 得到周期信号的初始相位  $\phi$ 。将  $u(t) - \alpha \cos(\omega t - \phi)$  输入混沌系统, 计算 Lyapunov 指数  $\lambda$ , 如果  $\lambda > 0$  系统处于混沌状态,  $\lambda < 0$  系统处于大尺度周期状态且存在周期干扰。调整  $\alpha$  的值, 多次重复将  $u(t) - \alpha \cos(\omega t - \phi)$  输入混沌系统, 直到  $\lambda > 0$  [4]。

将局部放电信号输入到已经调整好的混沌振子系统, 判断系统状态就可以判定是否包含周期性干扰。当混沌振子从大尺度周期状态进入混沌状态时, 就可以抑制周期干扰。仿真信号及处理结果见图 3。

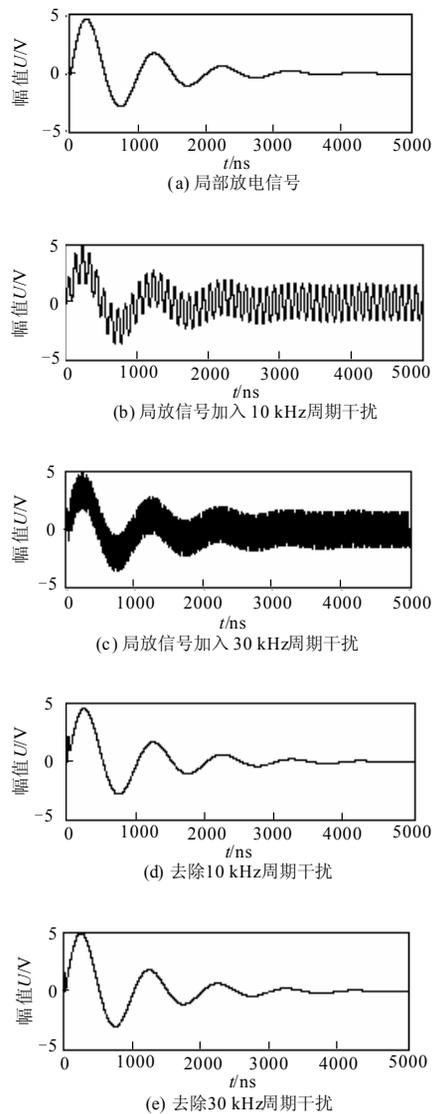


图3 仿真信号及处理结果

Fig.3 Schematic diagram of simulating PD signal and method results

### 3.2 脉冲极性法去除随机脉冲干扰

脉冲型干扰包括随机脉冲和周期脉冲, 主要是由高压端的电晕放电和系统中其他非检测设备的放电产生的干扰, 在时域上是一个或者多个连续的脉冲, 在频域上是由很多频率成分组成的信号, 时域和频域上都具有与局部信号相似的特征。它在局放信号背景噪声中最难滤除的, 这里采用脉冲极性鉴别法 (图 4)。

图 4 中  $C1$ ,  $C2$  为测试电容,  $ZD1$ ,  $ZD2$  为检测阻抗, 变压器内部发生局部放电时, 测量到在测试点 A, B 处的两个相反极性的信号, 若放电脉冲来自外部, 则在两个检测阻抗中产生相同方向的脉

冲电流, 测量点 AB 的极性将相同, 然后将输出端接入差动鉴别电路, 从而有效抑制干扰信号。

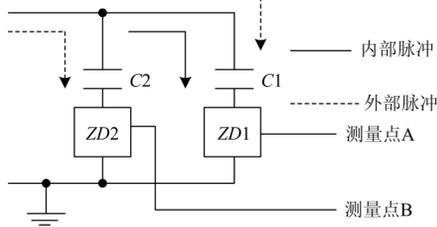


图 4 脉冲极性法原理图

Fig.4 Schematic diagram of pulsive polarity method

### 3.3 多重滤波去除白噪声

白噪声干扰的均值为零, 方差为  $\delta$  普遍存在局部放电中, 几乎分布在变压器局部放电所有的频带上, 是一种非平稳信号<sup>[5]</sup>, 多采用小波变化去除, 小波阈值方法主要有两种硬阈值和软阈值<sup>[6]</sup>。但是, 小波变换有时由于阈值选取不合适会造成滤波效果不佳, 为了避免这一缺点, 先利用带通滤波器提取局部放电信号。

白噪声形式:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{s})^2} \quad (8)$$

其中:  $s = [E(x - \mu)^2]^{1/2}$ ;  $\mu = E(x) = 0$ 。

母小波的带宽与标准偏差的关系表示为:

$$\Delta\omega_g = 0.7358 \times \frac{E}{s} \quad (9)$$

小波分析 (wavelet Analysis) 克服了短时傅里叶变换在单分辨率上的缺陷, 具有多分辨率分析的特点, 在时域和频域都有表征信号局部信息的能力, 时间窗和频率窗都可以根据信号的具体形态进行动态调整。一般情况下, 低频部分 (信号较平稳) 采用较低的时间分辨率, 提高频率分辨率; 高频情况下 (频率变化不大) 可以采用较低的频率分辨率来换取精确的时间定位。小波变换更适应分析局部突变信号和强奇异性信号<sup>[7-9]</sup>。

这里采用小波函数 dbN (其中 N 为阶数) 去除白噪声。

小波变换函数:

$$W_f(a, b) = 1/\sqrt{a} \int \psi(\frac{t-b}{a}) dt \quad (10)$$

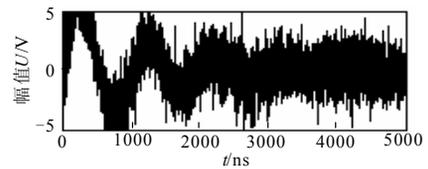
其中: a 为伸缩因子; b 为平移因子;  $\psi(x)$  是基本小波, 并且满足:  $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\psi(x)}{|x|} dx < \infty$ 。

去除白噪声过程中, 首先用小波函数 db6 对信

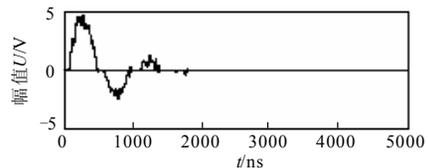
号进行 4 层分解 (为减少计算量, 分解的层数不宜太多), 估计噪声强度并获取降噪过程中的阈值, 利用 wpdencmp 对信号进行降噪, 最后用 wrcoef 重构低频信号<sup>[10]</sup>。

## 4 仿真结果分析

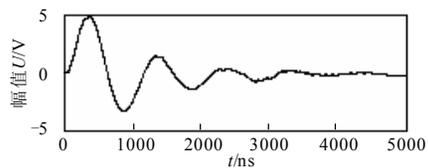
本实验主要是在 LabVIEW 环境中通过 Matlab Script 节点调用 Matlab 程序, 完成小波去噪。在局部放电去除噪声过程中, 带通滤波器不仅可以缩小需要处理信号的范围, 更重要的是扩大小波函数的选择范围, 使去噪效果更加理想。如果不加带通滤波器, 小波函数有时会将噪声误认为是局放信号, 进行放大, 或将局放信号误认为是噪声而抑制, 从而增大滤波结果误差。去除白噪声的仿真结果见图 5。



(a) 加入白噪声后的仿真结果



(b) 只有小波变换去白噪声多重滤波去白噪声



(c) 多重滤波去白噪声

图 5 去除白噪声

Fig.5 Suppress the white noise

## 5 结论

本文利用多重滤波方法有效去除了变压器放电时产生的噪声, 克服了传统滤波方法的缺点, 为接下来局部放电的定位创造了条件。实验室仿真表明, 本方法符合实际应用, 滤波精度较高。然而, 在 LabVIEW 环境中调用 Matlab 程序进行信号的分析、处理时, 存在实时性不是很好的缺点。但对于变压器局部放电检测, 实时性要求不是很高的应用环境中, 信号处理的延时在允许范围之内。在实验过程

中, 对于同时出现的多点放电, 如何区分不同的超声波信号, 是进一步研究的重点。

参考文献

[1] 李茂军, 刘建明. 变压器局放信号监测中白噪声和周期干扰的抑制[J]. 长沙理工大学学报, 2007(4): 45-48.  
LI Mao-jun, LIU Jian-ming. Suppression of white noise and periodical narrow-band noise for on-line partial discharge monitoring of transformer[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2007(4): 45-48.

[2] 李燕青. 超声波法检测电力变压器局部放电的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2003.  
LI Yan-qing. Study on ultrasonic-based method to detect partial discharge in transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003.

[3] 陈群, 贺建伟, 陈灵根, 等. 基于LS\_SVM高精度抑制局部放电信号窄带干扰的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 22-27.  
CHEN Qun, HE Jian-wei, CHEN Ling-gen, et al. A high accuracy algorithm for the suppression of narrowband interference in partial discharge detection based on LS\_SVM[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 22-27.

[4] 周立行, 李卫国, 邓本再. 基于混沌控制的周期窄带干扰抑制方法研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 39-41.  
ZHOU Li-xing, LI Wei-guo, DENG Ben-zai. Study of suppressing the periodic narrow bandwidth noise in partial discharge detection based on chaotic control[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(10): 39-41.

[5] 李红玲, 文习山, 舒乃球, 等. 小波变换去噪在绝缘子污秽放电声发射监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 56-59.  
LI Hong-ling, WEN Xi-shan, SHU Nai-qiu, et al. Application of wavelet transforms denoising in acoustic emission detection of polluted insulator discharge[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 56-59.

[6] 李加升, 黄文清, 戴瑜兴. 基于自定义阈值函数的小波去噪算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(10): 21-24.  
LI Jia-sheng, HUANG Wen-qing, DAI Yu-xing. Wavelet-based power quality disturbances de-noising by customized thresholding[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(10): 21-24.

[7] 王东升, 丁立健, 于龙滨. 变压器局部放电在线监测技术[J]. 东北电力技术, 2007(4): 34-37.  
WANG Dong-sheng, DING Li-jian, YU Long-bin. On-line monitoring system for transformer partial discharge[J]. Northeast Electric Power Technology, 2007(4): 34-37.

[8] Uros Lotric. Wavelet based denoising integrated into multilayered perceptron[J]. Neurocomputing, 2004(62): 179-196

[9] Shih Yen-Yu, Chen Jyh-Cheng, Liu Ren-Shyan. Development of wavelet de-noising technique for PET images[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2005(29): 297-304.

[10] 董长虹. Matlab小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.  
DONG Chang-hong. Wavelet analysis toolbox theory and application on Matlab[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.

收稿日期: 2010-03-18; 修回日期: 2010-04-26

作者简介:

臧怀刚(1960-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为超声波、微波、红外等的智能仪器仪表的开发与研制, 以及实用型通信技术的研究与开发等;

郭小星(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为信号的处理, 超声波智能仪器等; E-mail: guoxiaoxingandzhu@126.com

李小隼(1970-), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为脑电信息处理。

(上接第 85 页 continued from page 85)

[6] 迟长春, 李奎, 岳大为. 基于热积累的过载保护算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 52-56.  
CHI Chang-chun, LI Kui, YUE Da-wei. Heat accumulation based over-load protection algorithm[J]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2008, 20(1): 52-56.

[7] 牟龙华, 邢锦磊. 反时限过载保护精确算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 36-38.  
MU Long-hua, XING Jin-lei. Precise algorithm for inverse-time over load protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 36-38.

[8] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电动机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

[9] 陈世坤. 电动机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

[10] 鲍里先科 А И, 丹科 В Г. 电动机中的空气动力学与热传递[M]. 魏书慈, 邱建甫, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985.

[11] 杨世铨, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-05-12

作者简介:

杨明发(1977-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为电动机电器及其系统智能化与在线检测技术; E-mail: yangmf@fzu.edu.cn

张培铭(1943-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电器及其系统智能化与在线检测技术。