

基于模糊理论的电能质量检测去噪算法

唐良瑞, 杨雪

(华北电力大学信息工程系, 北京 102206)

摘要: 利用模糊隶属度函数的概念, 提出了一种新的电能质量检测去噪算法, 该算法针对电能质量信号的每个点设计了 1×5 模板和基于该模板的 5 个掩模, 利用最大隶属度原则选取一个掩模, 对该点进行去噪, 对每个点应用此算法直至完毕。实验仿真结果表明, 该算法在去噪和突变点信息保留方面的效果远远优于传统的中值滤波和均值滤波, 拥有良好的去噪能力和保留突变点信息的能力。本算法新颖、便捷, 有广阔的发展前景。

关键词: 电能质量检测; 隶属度函数; 去噪; 中值滤波; 均值滤波

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)06-0044-05

0 引言

近年来, 随着科学技术的不断创新、国民经济的快速发展以及工业水平的迅速提高, 电能质量的问题也随之日益突出, 已受到电力部门及其用户的高度关注, 电网中的谐波、电压波动、三相不平衡和电暂态等电能质量问题越来越受到重视。对电能质量进行控制、治理的前提是对电能质量的各类扰动进行有效的检测分析^[1]。但是, 在实际信号的采集过程中, 由于设备安装的位置、外界的电磁干扰等因素, 会在测试信号上叠加噪声, 而这些噪声的干扰会降低后续扰动检测分析方法的有效性, 甚至会使用它们失效, 因此, 去噪在电能质量检测中是一个十分突出和关键的问题。

针对电能质量检测去噪问题, 目前已有各种各样的算法。中值滤波和均值滤波作为常用方法虽然简单、方便, 但对于大面积高斯白噪声去噪能力差, 不利于处理突变点信息, 不适合于电能质量检测对突变点信息保留的要求。小波分析方法具有良好的时频局部化特性和多分辨率分析特性, 是电能质量检测中一个有力的工具^[2,3], 但该方法处理强噪环境下的信号效果不理想, 同时, 小波变换运算复杂、速度慢, 硬件实现起来比较困难。

模糊检测具有良好的检测微弱信号的能力, 适用于信号处理排除噪声和干扰, 隶属度函数是模糊论的基础, 它不去鉴别元素属于或者不属于某个集合, 而是对每个元素确定一个数, 借以表示该元素对

所言集合的隶属程度, 从而得到最佳隶属集合^[4,5]。本文利用模糊隶属度函数的概念, 提出了一种新的电能质量检测去噪算法。该算法针对电能质量信号的每个点设计了 1×5 模板和基于该模板的 5 个掩模, 分别计算此点对这 5 个掩模的隶属度, 选取最大隶属度的掩模, 利用该掩模内所有点的均值对该点去噪。实验仿真结果表明, 该算法简单实用, 不仅能处理大面积的强弱噪声, 还较好地保留了突变点的信息, 在实际电能质量检测去噪处理中效果明显。

1 电能质量检测去噪算法

1.1 中值滤波和均值滤波

电能质量检测的去噪算法有很多种, 最常用的去噪工具是均值滤波器和中值滤波器, 它们分别是线性滤波器和非线性滤波器的代表。

中值滤波是一种去除噪声的非线性处理方法, 其基本原理是把数字序列中一点的值用该点的一个邻域内各点值的中值来代替。该方法计算简单, 速度快, 可以有效地去除脉冲噪声和寄生振荡, 并且能够较好地保留信号的斜坡和跳变部分, 而且容易自适应化, 可以进一步提高滤波的特性。但由于其仅考虑滤波窗内输入数据的排序信息, 而未考虑输入数据的时序源信息, 会删除一些重要的细节(例如突变点的信息), 同时, 对于大面积的噪声污染, 例如高斯分布的白噪声, 在均方误差准则下, 中值滤波平滑噪声的能力大大降低。

作为最常用的一种线性滤波, 均值滤波对滤波窗(即邻域)中的噪声进行了求均值运算, 在某种程度上对噪声进行了平滑。传统的均值滤波算法是一

基金项目: 国家自然科学基金(Na 60402004)

种简单且对高斯噪声具有良好抑制能力的算法,但是均值滤波方法也有如下其自身难以克服的缺陷:均值滤波对奇异点十分敏感,其根本原因在于在均值运算中,各个点的权值都一样,当滤波窗内存在突变点时,突变点在很大程度上影响了滤波效果,同时突变点的存在经均值滤波其影响还会扩散到其附近的点,它的均值运算对于检测突变点的准确性造成了影响。

1.2 基于模糊理论的电能质量检测去噪算法

针对线性滤波器和非线性滤波器的缺点,本文利用模糊隶属度函数的概念,设计一种新的去噪算法,在保留突变点信息和平滑噪声方面有好的效果。

采集到的电能质量信号是一个离散数字序列,针对该数字序列的每一个点,将其作为中心点,引入如图 1 所示的 5 个掩模,其中小黑点为中心点,小圆圈为邻域点,采用五点模板,共有 5 个掩模。计算每个掩模的隶属度。模糊理论中的隶属度函数的意义是判断某个元素对于所言集合的隶属程度,就本例而言,哪一种掩模的隶属度函数的值最大,该点使用此掩模内进行去噪处理后得到的数据最接近于原始数据。

基于此,本文建立如下模糊规则:如果某点的值最接近于其所在掩模 x 内的所有点的平均值,则此点隶属于掩模 x ,在确定了该点的掩模以后,在去噪时,该点的值用其所隶属的掩模内的所有点的平均值来代替。

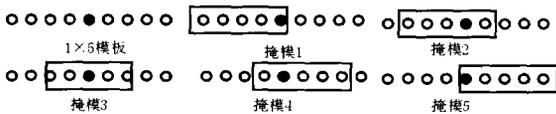


图 1 去噪掩模的选择

Fig 1 The selected templates for denoising

本算法采用 1×5 模板和此模板下的 5 个掩模,有其自身的优势。当然可以采用 1×3 模板或 1×7 模板等,但是,采用模板点数过少会忽略数字信号的时序信息和信号点间的相互关联,导致去噪效果不明显,而采用模板点数过多会影响突变点的信息,平滑突变点,从而影响突变点的检测,而且采用模板点数过多会影响运算效率,增加计算量。

本算法具体算法实现如下:

1) 分别计算中心点 i 点所在 5 个掩模内的所有点的平均值:

$$\begin{cases} u_1 = [f(i-4) + f(i-3) + f(i-2) + f(i-1) + f(i)] / 5 \\ u_2 = [f(i-3) + f(i-2) + f(i-1) + f(i) + f(i+1)] / 5 \\ u_3 = [f(i-2) + f(i-1) + f(i) + f(i+1) + f(i+2)] / 5 \\ u_4 = [f(i-1) + f(i) + f(i+1) + f(i+2) + f(i+3)] / 5 \\ u_5 = [f(i) + f(i+1) + f(i+2) + f(i+3) + f(i+4)] / 5 \end{cases} \quad (1)$$

2) 计算该中心点 i 所在 5 个掩模内所有点 (共 9 个) 的最大最小值 f_{\max} 和 f_{\min} :

$$\begin{cases} f_{\max} = \max\{f(i-4), f(i-3), f(i-2), f(i-1), \\ f(i), f(i+1), f(i+2), f(i+3), f(i+4)\} \\ f_{\min} = \min\{f(i-4), f(i-3), f(i-2), f(i-1), \\ f(i), f(i+1), f(i+2), f(i+3), f(i+4)\} \end{cases} \quad (2)$$

3) 分别计算中心点 i 对 5 个掩模的隶属度:

$$g_m(i) = 1 - \frac{|u_m - f(i)|}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (3)$$

其中: $g_m(i)$ 为 i 点对第 m 个掩模的隶属度, u_m 为第 m 个掩模的点的平均值, $f(i)$ 为中心点的值。

4) 利用最大隶属度原则,判断该点 i 所隶属的掩模:

假定 u_x 是 u_1 至 u_5 的最大值,则由最大隶属度原则可以判断该点属于第 x 个掩模。

5) 对该点进行去噪:

用第 x 个掩模对 i 点进行去噪,即取 $f(i) = u_x$ 。

6) 对该数字序列所有点均作上述处理,直至完毕。

1.3 硬件设计

该算法的硬件实现简单易行,有多种芯片可选取。本实验选取 Intel 公司生产的 87C169KC 单片机,因为该单片机 16 kB 的程序存储器可有效地固化程序,运算速度快(主频可运行到 20 MHz),它集成了完全可编程、自校准、高精度的模拟数据采集系统,用其完成本算法结构简单,无需大量复杂外设及外围电路,在同等性能 16 位单片机中,价格低廉。

本文采用 C 语言对该芯片进行开发,图 2(a)为主程序流程图。系统上电后,首先进行初始化,以对寄存器和 I/O 端口进行设置,然后执行自检程序,自检无误后开放中断,执行去噪处理子程序并进行显示处理,如此不断循环,以等待接收数据触发的中断子程序。图 2(b)为中断子程序流程图。当接收到数据后,程序进入相应的中断子程序。首先对程序现场进行保护,再接收数据,并将数据存储到数据采集存储器中去。执行完毕后退出中断,等待下一个中断。图 2(c)为去噪处理子程序。逐步实现本文

去噪算法。

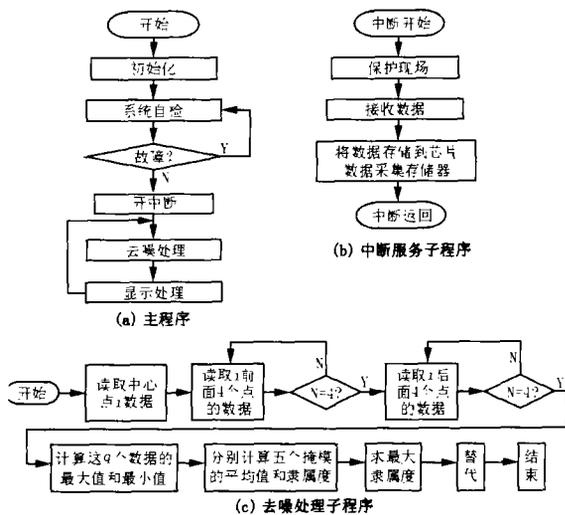


图 2 硬件开发流程图

Fig 2 Flow chart of hardware development

2 实验仿真结果

2.1 仿真信号

本文主要采用电能质量问题中常见的电压凹陷(即电压暂降)信号进行仿真实验。电压凹陷是指供电电压均方根值在短时间突然下降的事件,其典型持续时间为 0.5~30 周波。国际电工委员会(IEC)将其定义为电压均方根值下降到额定值的 90%~1%;电气与电子工程师协会(IEEE)将其定义为下降到额定值的 90%~10%。当电压的均方根值降低到接近于零时,称为电压中断。当输电系统中发生短路故障、感应电机启动、雷击、开关操作、变压器以及电容器组的投切等事件时,均可引起电压凹陷。在电压凹陷的分析中,通常将暂降时的电压均方根值与额定电压均方根值的比值定义为暂降的幅值,将暂降从发生到结束之间的时间定义为持续时间。

由于实际系统发生的电压暂降多为单相事件,而且很多电压暂降不仅会引起电压幅值的降低,还会引起电压的相位跳变。电压暂降的幅值、持续时间和相位跳变是标称电压凹陷(暂降)的最重要的三个特征量。

基于此,本文引入如下电压凹陷信号,某一相电压均方根值为 220 V,频率为 31.25 Hz(即周期是 32 ms),在 40~144 ms 之间发生了具有 30 相位跳变、50%的暂降,暂降期间的电压为正弦波。如图 3(a)所示。

2.2 噪声信号

本实验使用高斯白噪声作为仿真噪声。所谓高斯白噪声是指它的概率统计特性服从高斯分布而它的功率谱密度又是均匀的。确切的说,白噪声只是一种理想化的模型,因为实际的噪声功率谱密度不可能具有无限宽的带宽,否则它的平均功率将是无限大,是物理上不可实现的。然而白噪声在数学处理上比较方便,所以它在通信系统的分析中有十分重要的作用。一般地说,只要噪声的功率谱密度的宽度远大于它所作用的系统的带宽,并且在系统的带内,它的功率谱密度基本上是常数,就可以作为白噪声处理了。本文给电压信号引入的噪声采用均值为 0,方差为 0.05 的高斯白噪声。

2.3 仿真实验结果分析

本实验模拟电压凹陷信号,均值为 0,方差为 0.05 的高斯白噪声信号,并编程开发实现本文算法(1×5)、本文算法(1×3)、中值滤波(1×5)和均值滤波(1×5)。通过比较去噪电压波形图、比较几个有代表性的点使用各算法去噪前后电压值、计算比较原始信号加噪后的信噪比和使用各算法去噪后的信噪比,三个方面进行仿真试验并进行结果分析。同时,还采用了电能质量中其它常见信号如:电压崩溃信号、电压膨胀信号等重复上述步骤验证了本算法的优越性。本文给出了电压凹陷信号的试验仿真结果。

2.3.1 仿真实验波形图分析

本例所采用的电压凹陷信号,在 40~144 ms 之间发生了具有 30 相位跳变、50%的暂降, $t=40$ 点突然凹陷, $t=144$ 点起恢复为正常信号,即凹陷区间为 $t \in [40, 143]$,突变点为 $t=40$ 点和 $t=144$ 点。图 3(a)为电能质量电压凹陷波形;图 3(b)为加入噪声后电压凹陷的波形;图 3(c)为使用本文算法(1×5 模板)进行一次去噪后的波形;图 3(d)为使用本文算法(1×3 模板)进行一次去噪后的波形;图 3(e)为采用均值滤波(1×5 模板)算法进行一次去噪后的波形;图 3(f)为采用中值滤波(1×5 模板)算法进行一次去噪后的波形。

从图 3 中可以看出,在去噪能力方面,采用本文算法(1×5 模板)去噪后得到的信号平滑度明显优于中值滤波(1×5)去噪结果,即本文算法(1×5 模板)去噪能力强于中值滤波算法;在突变点信息的保留方面,采用本文算法(1×5)后 $t=40$ 点和 $t=144$ 点信号的幅值最接近于原始信号,而采用均值滤波使得突变点两侧的信号点明显严重受到了突变

点的影响,即本文算法(1×5模板)保留突变点信号能力优于均值滤波(1×5)算法。同时,比较图3(c)和图3(d)的信号平滑度以及突变点处的信息可见,

本文算法采用(1×5)模板去噪效果优于采用(1×3)模板。

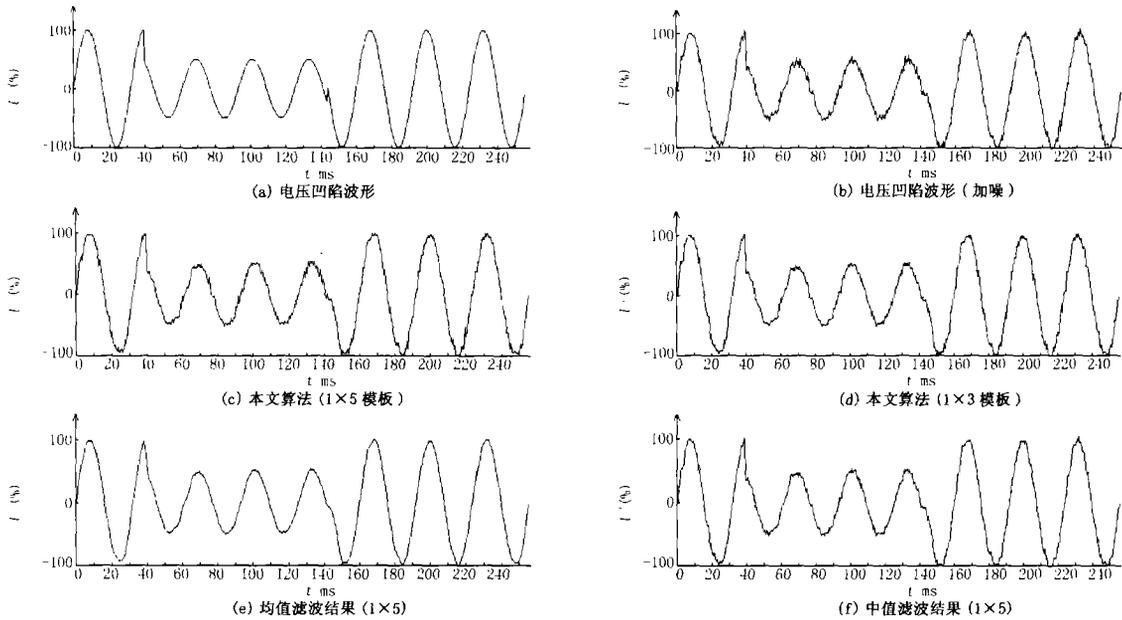


图3 实验仿真结果

Fig 3 Denoising results in simulated experiment

2.3.2 仿真实验数据分析

为了进一步说明本文算法的优越性,我们可通过实验仿真结果数据表(表1),从数据上予以分析说明。表1给出了图3电压凹陷波形所有信号点中

的7个有代表性的点,信号在 $t \in [40, 143]$ 内发生凹陷。 $t=11, 70, 232$ 点主要用于判断各种算法的去噪能力; $t=39, 40, 144, 145$ 点主要用于判断算法对突变点信息的保留能力。

表1 实验仿真结果数据表

Tab 1 Data sheet of denoising results in simulated experiment

信号点 t/ms	11	39	40(突变点)	70	144(突变点)	145	232
电压凹陷信号/V	201.46	217.89	157.63	164.53	110.0	99.22	220
电压凹陷信号加噪/V	199.57	224.54	148.21	163.03	110.95	95.99	228.28
本文算法(1×5)结果/V	201.29	216.43	149.72	163.31	103.17	95.86	219.51
本文算法(1×3)结果/V	200.15	220.48	150.63	161.79	101.62	93.11	221.65
均值滤波(1×5)结果/V	201.29	203.18	179.57	163.31	95.86	93.11	219.51
中值滤波(1×5)结果/V	192.74	221.42	148.19	152.51	95.99	78.44	224.40

分析实验仿真数据表,由 $i=11, 39, 70, 145, 232$ 点数据,各种算法进行一次去噪后,本文算法(1×5模板)的数据结果非常接近未加噪声前的信号值。由 $i=40, 144$ 点数据,使用各种算法进行各一次去噪后,本文算法(1×5模板)数据结果最接近于未加噪声前的信号值,即它保留突变点信息的能力是最强的。综合表中各点数据,本算法(1×5模板)在去噪和突变点信息保留方面效果显著。

2.3.3 信噪比分析

为了从整体上更清晰地说明去噪效果、比较各算法的去噪精度,引入信噪比:

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{n=0}^L s^2(n)}{\sum_{n=0}^L [x(n) - s(n)]^2} \quad (4)$$

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{n=0}^L s^2(n)}{\sum_{n=0}^L [x(n) - s(n)]^2} \quad (5)$$

其中: SNR 表示去噪处理前的信噪比, SNR 为去噪处理后的信噪比, L 为信号长度,即信号点的个数, n 为信号点的位置, $s(n)$ 为第 n 个点原始信号值, $x(n)$ 表示该点加噪后的值, $x(n)$ 表示该点经过去

噪处理后的值。

表 2 信噪比比较表

Tab 2 Comparison of SNR

去噪前信噪比 SNR/dB	27.117 957
本文算法 (1 \times 5) SNR/dB	27.283 714
本文算法 (1 \times 3) SNR/dB	27.280 766
均值滤波 (1 \times 5) SNR/dB	31.512 245
中值滤波 (1 \times 5) SNR/dB	24.522 946

分析表 2 中的数据,采用中值滤波后的信噪比小于原始信噪比 SNR ,说明该算法没有达到去噪效果,甚至给带来了更大的噪声。本文算法 (1 \times 5) SNR 大于本文算法 (1 \times 3) SNR ,即前者去噪效果优于后者。而采用均值滤波后的信噪比大于本文算法 (1 \times 5),说明其去噪效果优于本文算法 (1 \times 5)。所以,单纯就去噪效果来说,本文算法 (1 \times 5) 优于除均值滤波外的其它去噪算法。

但是,均值滤波保留突变点信息的能力远远不及本文算法 (1 \times 5)。见表 1 中 40 点和 144 点的电压值,使用均值滤波后,突变点的电压值与该点原始电压值有很大的出入,而本文算法 (1 \times 5) 去噪后,却比较接近于该点原始电压值。所以,综合考虑去噪能力和保留突变点信息的能力,本文算法 (1 \times 5) 是最合适的去噪算法。同时,经仿真证实,使用该芯片,该算法一次完成 500 个点去噪的时间在 30 ms 左右,运算速度快。

通过上述电压凹陷信号实验结果图和实验仿真数据表、信噪比比较表的分析以及其它电能质量信号的实验仿真验证,本文所采用的算法,克服了中值滤波对大面积高斯噪声去噪能力差和均值滤波无法准确保留突变点的信息的缺点,可以良好地应用于电能质量信号的去噪和突变点信息保留。

A denoising method of power quality detection based on fuzzy theory

TANG Liang-ru, YANG Xue

(Dept of Information Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: As familiar de-noising methods, median filter and average filter both have many disadvantages. By using fuzzy theory and membership function, a new denoising method of power quality detection is proposed. For each point of power quality signal, this method designs 1 \times 5 template and 5 cover templates. By using the most membership principle, it selects a cover template and carries on the denoising to the point. Use this method to each point. The simulation experiment result indicates that, for the effects of denoising and keeping the brake points' information, this method is much better than median filter and average filter. It has better ability of denoising and keeping the break points' information. This method is novel and convenient with wide developmental foreground.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60402004).

Key words: power quality detection; membership function; de-noising; median filter; average filter

3 结论

本文提出的基于模糊理论的电能质量检测去噪算法,利用模糊论和最大隶属度原则,结合电压凹陷信号,同时实现了大面积噪声的去噪和原始信号突变点保留。其实现方案,系统结构简单,运行可靠,具有较高的去噪精度和较快的去噪速度,因而对改善电能质量、降低损耗具有重要作用,具有很好的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
XIAO Xiang-ning. Analysis and Control of Power Quality [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] Dkarimi M, Mokhtari H, Iravani M R. Wavelet Based On-line Disturbance Detection for Power Quality Applications [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (4): 1212-1220.
- [3] Yang H T, Liao C C. A Denoising for Enhancing Wavelet Based Power Quality Monitoring System [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16 (3): 353-359.
- [4] 贾鑫, 卢昱. 模糊信息处理 [M]. 长沙:国防科学技术大学出版社, 1996.
JIA Xin, LU Yu. Fuzzy Information Processing [M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 1996.
- [5] Choi Y, Krishnapuram R. A Robust Approach to Image Enhancement Based on Fuzzy Logic [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6 (6): 808-825.

收稿日期: 2005-08-16; 修回日期: 2005-10-10

作者简介:

唐良瑞 (1966 -), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统通信、无线通信、图像处理等; E-mail: tangliangrui@163.com

杨雪 (1982 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统通信、信号处理等。