

# 一种电压闪变实时检测的新方法

吴昊, 戴本祁, 居继涛

(华东理工大学, 上海 200237)

**摘要:** 提出了一种基于数学形态学均值滤波与能量算子包络检测的电压闪变实时检测的新方法。区别于其它去噪滤波算法, 改进的数学形态学的滤波器只含有加减和一次除法运算, 而能量算子包络检测只需要对被测波形的三个样本进行两次乘法和一次减法运算, 使得所提出的算法快速、简洁。仿真结果表明, 所提算法能够准确地检测出闪变波形的包络, 并且克服了Teager能量算子算法对噪声和突变的敏感性, 适合电压闪变的实时检测。

**关键词:** 数学形态学; 包络检测; 能量算子; 电压闪变

## A novel real-time detection of voltage flicker

WU Hao, DAI Ben-qi, JU Ji-tao

(East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** In this paper, a novel method based on mathematical morphology average filter and energy operator is developed for voltage flicker detection. Compared with other algorithms, the improved mathematical morphology filter preserves only addition, subtraction and one division. Furthermore, the energy operator uses only three samples of the signal and requires only three arithmetic operations per each time shift, which makes the algorithm concise and quick. The simulation results indicate that the idea presented has excellent time resolution and overcomes Teager energy operator insensitive to noise and break, therefore it fits to real-time detection.

**Key words:** mathematical morphology; envelope tracking; energy operator; voltage flicker

中图分类号: TM76; TN713 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)08-0030-04

## 0 引言

随着各种精密电子设备的普及, 电压波动和闪变的检测受到了越来越多的重视。通常, 电压闪变是通过注入包络的反向电压来消除的, 因此, 检测的准确度十分重要。

电压闪变的检测主要通过计算和预测来实现, 传统的计算方法有傅立叶变换<sup>[1]</sup>和小波变换<sup>[2]</sup>。其中傅立叶变换在非平稳信号的处理中有着重大的缺陷, 而小波变换并不适合低频信号的处理, 此外, 这些算法都需要大量的计算, 限制了它们在电压闪变实时检测中的应用。

后来有人提出通过预测来检测电压闪变, 如卡尔曼滤波<sup>[3]</sup>, 最小绝对值估计<sup>[4]</sup>, 自适应神经网络<sup>[5]</sup>等方法。同样, 由于预测均需要大量的计算, 阻碍了这些方法在电压闪变实时检测方向上的发展。

在文献[6]中, 作者提出用TEO(Teager能量算子)的办法来实现电压闪变的实时检测, 由于其不依赖于任何预测和最优化, 只需用到3个样本和两次乘

加, 使得该算法能很快地收敛, 实现电压闪变的实时检测, 但是此算法对噪声和电压突变极其敏感, 因此实际应用受到一定的局限。文献[7]提出了基于数学形态学去噪滤波与TEO相结合的计算方法, 虽然取得了较好的效果, 但是前置的多重滤波器增加的计算负担抵消了因采用TEO检测所带来的好处。

因此, 本文提出一种改进的方法, 优化数学形态学滤波器, 改进的能量算子算法在相同的计算量下保留了TEO的所有优点, 但算法对噪声和突变的敏感性大幅降低。

## 1 电压闪变的模型

电压闪变表现为电压振幅的缓慢变化, 可以通过振幅调制模型来模拟, 其数学表达式为:

$$s(t) = \left( A_0 + \sum_{i=1}^m A_i \cos(\omega_i t + \theta_i) \right) \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (1)$$

设:  $A = A_0 + \sum_{i=1}^m A_i \cos(\omega_i t + \theta_i)$ , 可得:

$$s(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (2)$$

根据电压闪变的消除方法不难发现, 电压闪变实时检测的主要任务就是要计算出信号的包络  $A$ 。

## 2 改进的数学形态学去噪滤波算法

G.Matheron和J.Serra在1964年提出了数学形态学的概念, 式(3)和式(4)分别表示数学形态学中最重要膨胀运算和腐蚀运算:

$$(f \circ G)(x) = \max\{f(x-z) | z \in G\} \quad (3)$$

$$(f \bullet G)(x) = \min\{f(x+z) | z \in G\} \quad (4)$$

式中:  $f$ 表示原始信号,  $G$ 表示滤波器空间, 文献[8]的作者提出一种基于数学形态学的中值滤波去噪算法, 在此基础上, 本文提出一种基于数学形态学的均值滤波算法。假设滤波器空间 $G$ 关于原点对称, 由此膨胀运算式(3)可以化为:

$$(f \circ G)(x) = \max\{f(x+z) | z \in G\} \quad (5)$$

均值滤波器可以表示成:  $\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m f(x+z) | z \in G$ 。

对比文献[8]中的中值滤波器, 取原始信号  $S=(1+0.1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot t)) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t)$ , 叠加方差为  $\sqrt{0.05}$  的噪声, 通过 Matlab 仿真, 两者的去噪误差如图 1 所示:

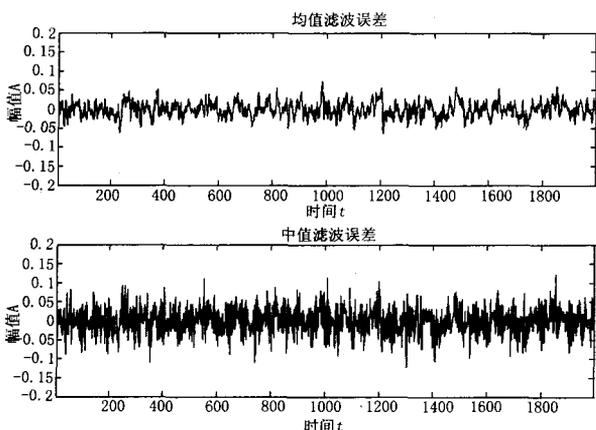


图 1 均值滤波器和中值滤波器的误差比较

Fig.1 Comparison of average filter's error and median filter's error

通过观察可以发现, 本文提出的基于数学形态学的均值滤波器的去噪性能要优于文献[8]中的中值滤波器。

为了更客观地评价两滤波器的性能, 仿真过程

中在不同噪声背景下对它们进行了测试。假设原始信号为基波信号, 噪声为加性噪声, 测试结果和采用的相应滤波器如表 1 所示。

表 1 两种滤波器的去噪性能分析

Tab.1 Analysis of two filter's noise reduction

噪声能量 $\sigma^2$	0.01pu	0.05pu	0.1pu	0.2pu
去噪前平均误差	0.007 9	0.040 3	0.078 7	0.081 1
均值滤波平均误差	0.005 8	0.015 7	0.031 0	0.060 2
中值滤波平均误差	0.007 5	0.026 0	0.043 0	0.076 4
均值滤波均方差	0.006 9	0.019 6	0.038 8	0.075 4
中值滤波均方差	0.009 4	0.032 7	0.052 7	0.096 2

从表1中不难看出, 本文所提出的基于数学形态学的均值滤波器在各种噪声背景下的性能都要优于文献[8]中提出的中值滤波器, 而且由于信号随机发生, 在不能预知信号统计特性的情况下, 取均值的极限速度( $O(n)$ )要快于求中值(排序)的极限速度( $O(n \log(n))$ )。另外, 均值滤波克服了中值滤波滤波器长度必须为奇数<sup>[8]</sup>的缺点。与其它的去噪方法(傅立叶变换, 小波变换)相比, 均值滤波在去噪性能上并不突出, 但是其运算只需要有限的加减和一次取均值, 而性能相近的小波滤波器(三层软阈值去噪)至少需要48次乘加, 傅立叶变换(7阶巴特沃兹滤波器)需要14次乘加。显然, 在实时性方面, 本文提出的基于数学形态学的均值滤波器要优越得多。

## 3 能量算子检测算法

### 3.1 Teager 能量算子的数学原理

Teager 在文献[9]中证明, 正弦信号的能量算子正比于正弦信号的振幅, 并给出了 Teager 能量算子的计算方法:

$$TEO = \left(\frac{du}{dt}\right)^2 - u \left(\frac{d^2u}{dt^2}\right) = A^2 \omega^2 \quad (6)$$

随后 kaiser 在文献[10]中证明:

$$TEO = E = A^2 \omega^2 = v_k^2 - v_{k-1} v_{k+1} \quad (7)$$

其中:  $v_k, v_{k-1}, v_{k+1}$  表示原始信号不同时刻的三个采样。信号的包络  $A$  可以通过  $\sqrt{v_k^2 - v_{k-1} v_{k+1}} / \omega$  来计算。

文献[6, 7]都采用了基于 TEO 的包络检测算法, 尽管其在快速检测方面具有极好的效果, 但是当信号含有幅度突变或者噪声时, 检测包络会在突变处产生巨大的尖峰误差, 而这对于包络的能量计算和有效消除都是极其有害的。

### 3.2 改进的能量算子算法

通过研究发现,TEO对噪声和突变的敏感性是由于不同时刻的三个采样的包络A其实是不同的。当信号连续时,幅值没有突变,所以误差很小,当信号含有噪声和幅度突变时,检测结果将出现巨大的毛刺。因此,本文提出一种改进的算法,使用信号的一个采样,保证包络A的唯一性,通过角度偏移器获得信号的两个样本。原始信号 $S(t) = A\sin(\omega t + \delta)$ ,设 $\theta = \omega t + \delta$ ,则信号 $S(t)$ 可以表示为 $S(t) = A\sin(\theta)$ ,通过角度偏移器很容易得到信号的两个样本:

$$S(t^-) = A\sin(\theta - \alpha) \quad (8)$$

$$S(t) = A\sin(\theta) \quad (9)$$

$$S(t^+) = A\sin(\theta + \alpha) \quad (10)$$

式中: $\alpha$ 表示偏移角,利用三角函数的计算公式易得:

$$(10)^2 - (9) \cdot (11) = S^2 - S^- \cdot S^+ = A^2 \sin^2(\alpha) \quad (11)$$

定义EO能量算子为:

$$EO = A^2 \sin^2(\alpha) \quad (12)$$

由式(12)很容易得到信号的包络:

$$A = \sqrt{\frac{s^2 - s^- \cdot s^+}{\sin^2(\alpha)}} \quad (13)$$

通过该式不难看出,新的能量算子(EO)算法保持了TEO的所有优点<sup>[6]</sup>:1)与信号的初始相位 $\delta$ 无关;2)对称性,即 $\alpha \rightarrow -\alpha$ ,算子值不变。3)健壮性,计算没有除法,即使信号过零点也不会影响算子的结果。4)快速响应能力,该算法同样只使用了信号的两个样本,算子能迅速跟踪包络的变化。

图2中的原始信号为 $\sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t)$ ,左图在0~515 s,1335~2000 s叠加振幅为0.1,频率为10 Hz的包络;在515~1335 s叠加振幅为0.2,频率为15 Hz的包络;右图在原始信号上叠加振幅为0.1,频率为10 Hz的包络,然后加上方差为0.1的噪声。通过仿真发现EO很好地克服了TEO因信号突变和噪声带来的尖峰误差。

### 3.3 偏移角度的选择

在研究的过程中发现,当偏移角度 $\alpha$ 不同时,EO的检测效果并不一样。设原始信号 $S = (1 + 0.1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot t)) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t)$ ,对其分别叠加能量为0.01,0.05,0.1,均值为0的随机噪声,EO检测的偏移角度从0变化到90°,通过Matlab仿真,试验结果如图3所示。

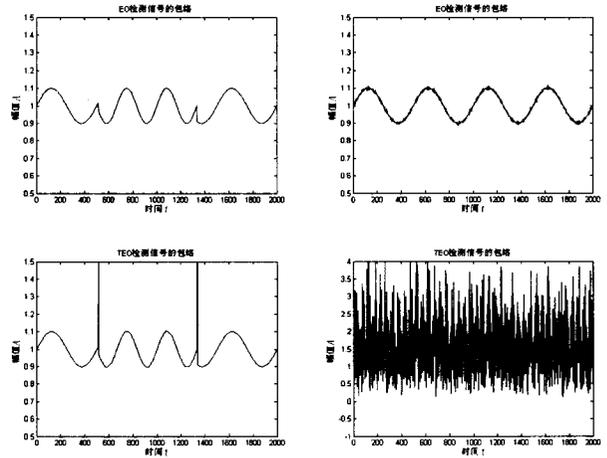


图2 EO算法和TEO算法性能对比

Fig.2 Comparison of EO arithmetic and TEO arithmetic

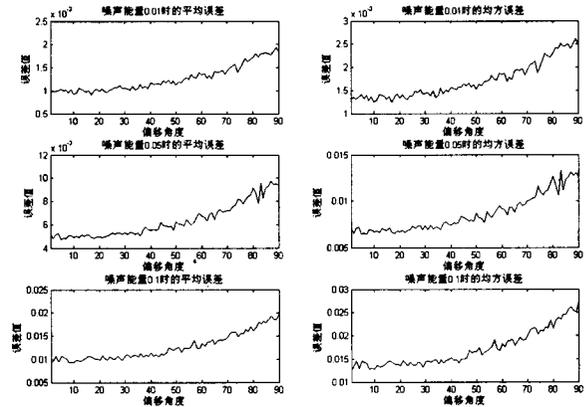


图3 不同噪声背景下的误差分析

Fig.3 Analysis under different noise background

从仿真结果可以看出,当偏移角度小于40°时,误差基本上维持在较低水平,当角度进一步增大时,误差开始变大,当偏移角度变化到90°时,误差将达到低偏移的两倍以上。所以,在实际应用中,可以根据硬件的相关特点,考虑实现难度,在0°~40°之间选择合适的偏移角度。

## 4 仿真结果

由前面的图2发现,EO算法仍然对噪声具有一定的敏感性,所以本文提出了基于数学形态学的均值滤波去噪算法。图4采用和图2相同的信号,将信号的含噪量提高4倍,提取包络,发现信号开始出现大量的毛刺,通过滤波器对包络滤波,图像毛刺减少,变得较为光滑,误差基本上控制在±2%以内。

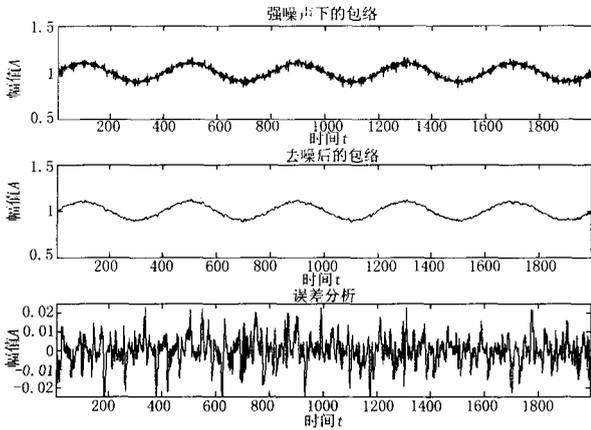


图 4 强噪声下的包络检测

Fig.4 Dectection under bad noise background

最后, 为了检测所提出算法的通用性, 本文测试了在不同闪变污染下算法的性能: 分别采用含普通包络  $1+0.1\sin(a\omega_0)$ , 含频率突变的包络  $1+0.1[t_0, t_1]\sin(a_1\omega_0)+0.1[t_2, t_3]\sin(a_2\omega_0)$ , 含多个分量的包络  $1+\sum a_i \sin(b_i\omega_0)$ , 含幅度突变的包络  $1+0.1[t_0, t_1]\sin(a\omega_0)+0.2[t_2, t_3]\sin(a\omega_0)$ , 叠加方差为  $\sqrt{0.05\text{pu}}$  的噪声, 通过 Matlab 仿真, 结果如表 2 所示:

表 2 各种闪变污染背景下算法性能分析

Tab.2 Analysis under various flicker background

闪变类型	普通包络	频率突变包络	多分量包络	幅度突变包络
平均误差	0.005 7	0.006 1	0.005 6	0.006 2
均方误差	0.007 8	0.008 5	0.007 7	0.008 3

由表 2, 不难发现, 本文所提出的算法具有非常好的适用性, 在各种闪变污染下均能取得良好的效果, 而且相差不大。

## 5 总结

与基于频域、时域的信号处理方法相比, 形态学方法能较好地消除噪声, 并且计算量小, 易于实现, 很容易用于电能质量信号的实时处理。而改进的能量算子方法(EO)在保持 TEO 的优点的前提下, 有效地克服了其对噪声和突变敏感的缺点。仿真结果进一步表明, 所提的算法能有效、精确、实时地

对信号的包络进行提取, 适用于电压闪变的在线检测。

## 参考文献

- [1] Srinivasan K. Digital Measurement of the Voltage Flicker[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991,6(4):1593-1598.
- [2] Huang S J, Lu W C. Enhancement of Digital Equivalent Voltage Flicker Measurement via Continuous Wavelet Transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004,19(2):663-670.
- [3] Girgis A A, Makram E B. Measurement of Voltage Flicker Magnitude and Frequency Using a Kalman Filtering Based Approach[A]. In: IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. 1996.659-662.
- [4] Girgis A A, Stephens J W, Makram E B. Measurement and Prediction of Voltage Flicker Magnitude and Frequency[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995,10(3):1600-1605.
- [5] Dash P K, Pradhan P K, Salama M M A. Estimation of Voltage Flicker Magnitude and Frequency Using Fourier Linear Combiners to Improve Power Quality[J]. Elect Power Components Syst J, 2001,29:1-13.
- [6] 黄文清, 戴瑜兴. 基于 Teager 能量算子的电能质量扰动实时检测方法[J]. 电工技术学报, 2007, 6: 154-158.
- [7] SHU Hong, WANG Yi. Detection of Voltage Flicker Based on Mathematical Morphology Filter and Teager Energy Operator[A]. In: 2006 International Conference on Power System Technology[C]. 2006.
- [8] JI Zhen, LI Hui-hui, LI Qi, et al. A Novel Mathematical Morphology Filter and Its Performance Analysis in Noise Reduction[J]. Chinese Journal of Electronics, 2005, 14(1).
- [9] Teager H M. Private communication[Z]. 1985.
- [10] Kaiser J F. On a Simple Algorithm to Calculate the Energy of a Signal[A]. In: Proc Acoustics Speech, and Signal Processing[C]. 1990.381-384.

收稿日期: 2008-06-05

作者简介:

吴昊(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量。E-mail: wuhao\_wuritian@126.com