

形态学滤波器结构元素选取原则研究与分析

赵昭¹, 刘利林², 张承学¹, 李海涛¹, 汪建敏¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中南电力设计院, 湖北 武汉 430071)

摘要: 形态学滤波器作为一种非线性滤波工具, 以其良好的消噪性能越来越地被运用到电力系统采样数据的处理中。形态学滤波器所选用的结构元素对滤波效果有着重要的影响, 但目前结构元素的选取还没有针对具体应用背景的选取原则。针对电力系统中的常见噪声, 通过数值仿真, 对几种常用结构元素的滤波效果及计算速度进行了详细的分析研究, 进而给出了结构元素类型的一般选取原则。同时提出了关于结构元素宽度及幅值选取的一些规律, 为形态学滤波器的设计提供了参考依据。

关键词: 数学形态学; 形态学滤波器; 结构元素; 去噪

Research and analysis of morphological filter's structure element selection principle

ZHAO Zhao¹, LIU Li-lin², ZHANG Cheng-xue¹, LI Hai-tao¹, WANG Jian-min¹

(1. Electrical Engineering School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China)

Abstract: As a kind of non-linear filter, morphology filter is widely applied in sampled power system signal processing with its effective denoising performance. The structure element (SE) has an important impact on the filtering effect, but there has no SE selection principle for specific application background. With respect to different types of the interference possibly encountered in power system, through numerical simulation, this paper analyzes the denoising performance and calculation speed of some common SEs in detail and then gives the general SE type selection principle. Meanwhile, some selection laws about the amplitude and width of SE are proposed. These results may provide useful references for morphology filter design.

Key words: mathematical morphology; morphologic filter; structure element; denoising

中图分类号: TM93 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0021-05

0 引言

数学形态学^[1,2]是在积分几何研究成果的基础上创立的, 是基于集合论的数学分支。它提供了非常有效的非线性滤波技术。目前, 数学形态学越来越多地应用到电力系统现场采集数据的数字处理中^[3-5]。形态学滤波器的滤波效果与所选用的结构元素密切相关。但是, 对于何种结构元素比较适合处理何种具体的问题, 目前仍然缺少系统的分析与研究。本文针对电力系统数据集中的常见噪声, 通过仿真详细比较了几种常用结构元素的滤波效果, 进而给出了结构元素类型的一般选取原则。同时总结了结构元素幅值及宽度对滤波效果影响的规律。

1 形态学滤波器的基本原理

1.1 数学形态学的基本运算

形态学的运算以腐蚀和膨胀这两种基本运算为基础, 并引出其它几个常用的形态运算。由于电

力系统数据采集中一般只涉及一维信号, 这里只介绍一维离散情况下的多值形态变换。包括腐蚀、膨胀、形态开和形态闭, 以及形态开闭的级联组合。

设一维离散输入信号 $f(n)$ 和序列结构元素 $g(m)$ 的定义域分别为 $D_f = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$ 和 $D_g = \{y_0, y_1, \dots, y_{M-1}\}$, 且 $N > M$, 则 $f(n)$ 关于 $g(m)$ 的腐蚀(\ominus)和膨胀(\oplus)分别定义为:

$$(f \ominus g)(n) = \min\{f(n+m) - g(m)\} \quad (1)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max\{f(n-m) + g(m)\} \quad (2)$$

其中: $(n+m), (n-m) \in D_f, m \in D_g$

基于式(1)和式(2), 形态开(\circ)和闭(\bullet)运算相应地定义为:

$$(f \circ g)(n) = [(f \ominus g) \oplus g](n) \quad (3)$$

$$(f \bullet g)(n) = [(f \oplus g) \ominus g](n) \quad (4)$$

进而得到形态开-闭(OC)和闭-开(CO)^[3]运算:

$$OC[f(n)] = (f \circ g \bullet g)(n) \quad (5)$$

$$CO[f(n)] = (f \bullet g \circ g)(n) \quad (6)$$

形态开运算主要是平滑并抑制信号峰值噪声，能够消除信号的散点和毛刺；而闭运算则抑制信号波谷噪声，填平信号中的小沟结构。通过不同的组合构成的滤波器可对信号进行不同噪声的滤除。

1.2 形态学滤波器的构建

形态开、闭运算级联组合形成的形态 OC 及 CO 滤波器具有开闭运算的所有性质，因此可以同时滤除信号中的正、负脉冲噪声。但由于开运算的反扩展性和闭运算的扩展性使得形态 OC 滤波器的输出幅度偏小、而形态 CO 滤波器的输出幅度偏大，因此单独使用它们并不能获得很好的效果。而用两者的平均值能进一步使处理结果接近原信号。常用的一种效果较好的形态滤波器为：

$$denoise_g[f(n)] = \frac{1}{2}(OC[f(n)] + CO[f(n)]) \quad (7)$$

此外还有并联形态学滤波器^[6]及串联形态学滤波器^[7]，考虑到这些滤波器均以式(7)为基础，因此本文仍采用了式(7)构建形态学滤波器。

2 结构元素选取原则的研究

2.1 研究方法

确定形态学滤波器的运算方式后，所选取的结构元素就是影响滤波器输出的主要因素。常用结构元素有余弦、半圆、三角、直线及其结合等，如图1。结构元素的形状是影响其滤波效果的关键因素。对于前三种结构元素，其形状由幅值(A)和宽度(L)共同决定，选取不同的A值和L值也就会获得不同的滤波效果；对于直线结构元素，其形状仅由L值决定，故只需研究其宽度对滤波效果的影响。

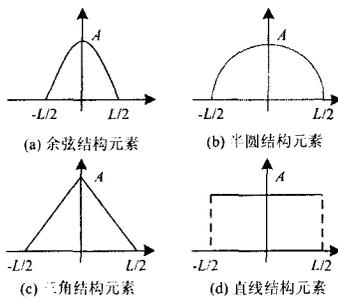


图1 几种常用的结构元素

Fig.1 Several common structure elements

考虑电力系统数据采集集中常见的几种噪声干扰，如高频噪声、白噪声、脉冲噪声及直流偏移量。在工频正弦信号上分别叠加上述干扰信号，采用基于式(7)的形态学滤波器对染噪信号进行处理。通

过改变结构元素种类、幅值及宽度来分析几种常用结构元素对于不同种类噪声的滤波效果，进而得出结构元素的一般选取原则。

2.2 滤波效果的衡量

对含噪信号进行处理时，采用信噪比(SNR)和滤波误差(E)两个标准对滤波效果进行衡量。相应的计算公式为：

$$SNR = 10 \log(p_s / p) \quad (8)$$

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_o(i) - f(i)| \quad (9)$$

式(8)中： p_s 为信号方差， p 为噪声方差。式(9)中： $f_o(i)$ 为滤波后信号序列， $f(i)$ 为不含噪的原始信号序列。信噪比越大，滤波误差越小，则滤波效果越好。对含脉冲干扰的信号进行处理时，还要比较处理前后的脉冲幅值及波形光滑程度来衡量滤波效果。对含直流偏移量的信号进行处理时，通过检测所提取的直流量的幅值来判断滤波效果的好坏。

2.3 运算速度的比较

在实际工程应用中，滤波器的运算速度是一个需要重点考虑的因素。由式(1)~(7)可以看出，当待处理信号采样频率一定时，形态学滤波器的运算量仅由结构元素的宽度来决定。因此，在滤波效果相近的情况下，应优先选择宽度较小的结构元素，以提高形态学滤波算法的运算速度和实时性。

3 仿真分析

3.1 高频连续噪声干扰

图2为50 Hz工频信号叠加了1.5 kHz高频干扰信号的波形。其中，工频信号的幅值为1 V，高频噪声的幅值为0.2 V。采样频率定为6.4 kHz(下文皆选用此采样频率)。待处理信号的信噪比 $SNR_0 = 13.98$ dB，误差 $E_0 = 12.72 \times 10^{-2}$ 。相对于工频信号幅值，直线结构元素A值取0.1不变，另外三种结构元素A值取1、0.8、0.5、0.3、1/10、1/20、1/30七种情况，L值皆取为2~100间变化，按式(7)对染噪信号进行处理。

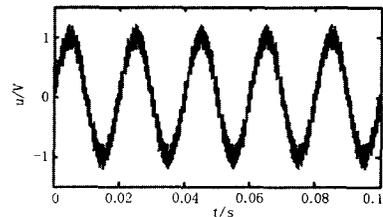


图2 叠加高频噪声的工频信号

Fig.2 Power frequency signal superimposed with high frequency noise

表 1 给出了图 2 信号经四种结构元素滤波后所得到的最大信噪比 (SNR_{max})、最小滤波误差 (E_{min}) 以及相应的 A 、 L 组合。可见, 对于高频干扰, 余弦结构元素的滤波效果最好, 半圆结构元素的效果与其相近。图 3 为余弦结构元素取表 1 中的最优 A 、 L 值时所得到的滤波结果同工频信号的对比图, 可见二者基本上是重叠的。半圆结构元素取其最优 A 、 L 值时也可达到类似的效果。

表 1 不同结构元素对高频噪声的最佳滤波效果比较

Tab.1 Comparison of best filtering effect for high frequency noise by using different SEs

结构元素	SNR_{max} /dB	E_{min}	A 、 L
余弦形	44.956	0.32×10^{-2}	0.5、24
半圆形	44.058	0.37×10^{-2}	0.8、18
三角形	33.622	1.18×10^{-2}	0.1、8
直线形	27.965	2.23×10^{-2}	/、4

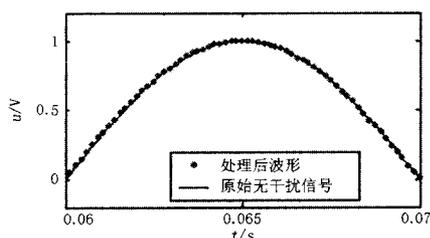


图 3 余弦结构元素的最佳滤波效果

Fig.3 The best filtering effect by using cosine type SE

表 2 列出了满足不同信噪比要求时两种结构元素的最小 L 值, L_{min1} 和 L_{min2} 分别为使用余弦和半圆结构元素的情况。由表 2 可知, 余弦结构元素可以以较小的宽度达到与半圆结构元素相同的滤波效果, 因此运算速度更快。在处理高频噪声时, 可优先选取半圆结构元素。

表 2 满足一定信噪比要求的最小 L 值

Tab.2 The minimum value of L to meet certain SNR requirement

信噪比/dB	L_{min1}	L_{min2}
35	4($A=0.1$)	8($A=0.3$)
38	8($A=0.3$)	10($A=0.5$)
40	10($A=0.3$)	14($A=0.5$)
42	12($A=0.3$)	12($A=0.5$)
44	16($A=0.5$)	18($A=0.8$)

图 4 给出了信号经余弦结构元素滤波后的信噪比随 L 值变化的曲线。曲线 1~7 分别表示 A 值为 1、0.8、0.5、0.3、1/10、1/20、1/30 的情况。

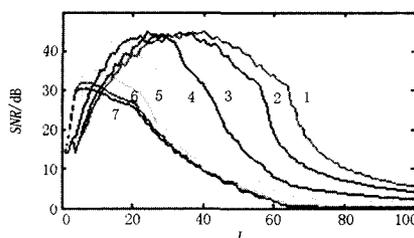


图 4 改变余弦结构元素幅值和宽度获得的信噪比曲线
Fig.4 The SNR curves vs different amplitude and width of cosine type SE

可以看出, 对于每一条曲线, 均存在一个最优 L 值使滤波后的信噪比达到最大值。且曲线 A 值越小, 相应的最优 L 值也越小。因此可以将余弦结构元素的幅值选的稍小一些, 这样能够在选取较小的 L 值时获得最佳滤波效果, 以带来更快的计算速度。但同时也要注意, 当幅值选取过小时, 无论怎样选取 L 值也难以达到很好的滤波效果, 如曲线 6、7。

3.2 随机背景噪声干扰

图 5 为 1 V 工频信号叠加白噪声后的波形。其信噪比为 12.86 dB, 误差为 12.79×10^{-2} 。采取与 3.1 节相同的方式, 改变四种结构元素的 A 值同 L 值, 按式 (7) 对图 5 中的信号进行处理。待处理信号经各种结构元素滤波后所得到的最大信噪比、最小误差以及相应的 A 、 L 组合如表 3 所示。

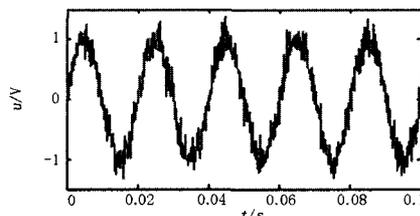


图 5 叠加白噪声的工频信号

Fig.5 Power frequency signal superimposed with white noise

由表 3 可见, 对于白噪声干扰, 余弦、半圆、三角三种结构元素的滤波效果很接近, 均优于直线结构元素。图 6 为余弦结构元素取最优 A 、 L 组合时的滤波效果, 可见波形已经比较光滑, 但不如对高频噪声的处理效果好。

表 3 不同结构元素对白噪声的最佳滤波效果比较

Tab.3 Comparison of best filtering effect for white noise by using different SEs

结构元素	SNR_{max}	E_{min}	A 、 L
余弦形	22.609	4.15×10^{-2}	0.3、18
半圆形	22.394	4.28×10^{-2}	0.5、20
三角形	22.039	4.36×10^{-2}	0.3、16
直线形	20.049	5.60×10^{-2}	/、6

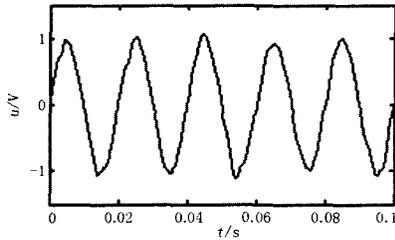


图6 余弦结构元素的最佳滤波效果

Fig.6 The best filtering effect by using cosine type SE

表4列出了使用三种结构元素达到不同信噪比要求时的最小L值, L_{min1} 、 L_{min2} 、 L_{min3} 分别表示使用余弦、半圆和三角结构元素的情况。可以看出, 达到相同的滤波效果时, 三种结构元素的宽度非常接近, 因而运算速度相差不大, 相对而言余弦结构元素略有优势。

表4 满足一定信噪比要求的最小L值

Tab.4 The minimum value of L to meet certain SNR requirement

信噪比/dB	L_{min1}	L_{min2}	L_{min3}
20	4(A=1/30)	4(A=1/30)	4(A=1/30)
21	6(A=0.1)	6(A=0.1)	6(A=0.1)
22	12(A=0.3)	14(A=0.3)	16(A=0.3)

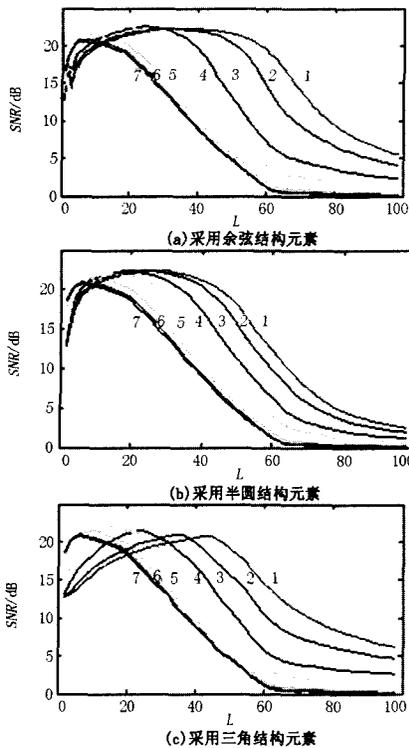


图7 改变结构元素幅值和宽度获得的滤波效果曲线
Fig.7 The SNR curves vs different amplitude and width of different type SEs

图7(a)~(c)分别给出了经三种结构元素滤波后的信噪比随L值变化的曲线。曲线1~7的含义与3.1节相同。与图4相似, 图7~图9中每条曲线均存在一个最优L值使得滤波后信号的信噪比达到最大值; 且曲线A值越小, 相应的最优L值也越小。因此可将结构元素的幅值选得稍小一些, 这样最优L值也会较小, 运算速度就会更快。

3.3 脉冲噪声干扰

图8为1V工频信号叠加了三个脉冲干扰的波形。脉冲干扰的幅值均为0.5V, 分别位于过零点、极值点和其它任意一点。

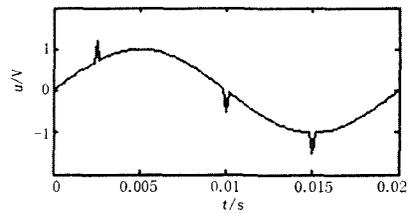


图8 叠加了不同位置脉冲干扰的工频信号
Fig.8 Power frequency signal with impulses

仍按前文的方式改变结构元素的幅值和宽度。经四种结构元素处理后所能达到的最小平均幅值 δ'_{min} 及相应的最优A、L组合如表5所示。可以看出, 对于多个不同位置脉冲干扰的情况, 余弦结构元素的处理效果最佳。

表5 不同结构元素对脉冲干扰的最佳滤波效果比较
Tab.5 Comparison of filtering effect for impulse by using different SEs

结构元素	δ'_{min}	A、L
余弦形	1.32×10^{-2}	1、62
半圆形	4.05×10^{-2}	0.8、38
三角形	4.83×10^{-2}	1/30、4
直线形	4.15×10^{-2}	1、2

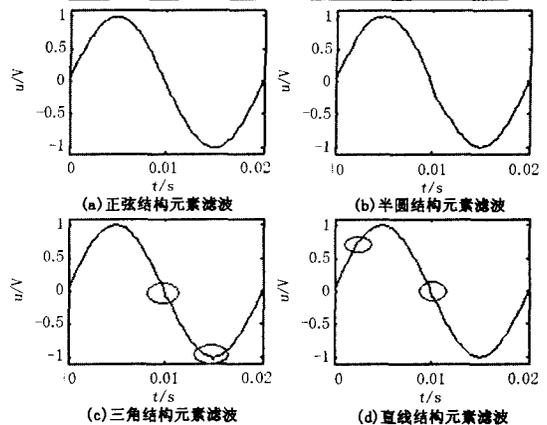


图9 不同结构元素的最佳处理结果
Fig.9 Best filtering effect by using different SEs

四种结构元素分别取表 5 中的 A 、 L 值时, 对原信号进行处理所得到的波形如图 9 所示。

可以看出: 对于三个位置的脉冲干扰, 余弦结构元素都能较好的滤除; 半圆结构元素在处理过零点处的干扰时波形出现了轻微失真, 但各个位置的脉冲都已经很好的滤去, 得到的波形也较为光滑; 三角结构元素对极值点及过零点处的脉冲不能很好地滤除; 直线结构元素对极值点的干扰能很好地滤除, 但对其余位置干扰的处理不甚理想。在电力系统的数据采集过程中, 干扰的位置不可能得到先验性的确认, 余弦和半圆结构元素对多个不同位置的脉冲噪声均有很好的滤波效果, 且半圆结构元素的最优 L 值更小, 计算速度更快, 因此对于脉冲噪声的滤除可优先考虑半圆结构元素。

3.4 直流偏移量干扰

在电力系统现场数据采集中, 直流偏移量也是经常出现的一种信号污染。由于直流偏移量的存在不会改变被处理信号的形状, 因此使用余弦、半圆及三角结构元素对含直流偏移量的信号进行处理时, 所得到的结果将与处理不含直流偏移量的信号是相同的。而当使用直线结构元素时, 输出结果中将保留下与之相匹配的部分, 即直流分量。大量仿真证明: 当直线形结构元素的宽度大于待处理信号周期长度的 $1/2$ 时, 将起到单纯提取直流偏移量的作用。对于低频波动的直流分量, 直线结构元素一样有良好的提取效果^[8]。

如图 10 所示, 对 1 V 工频信号同时加入恒定的和呈正弦波动的直流偏移量。恒定直流偏移量的幅值为 0.5 V; 波动偏移量的幅值为 0.2 V, 频率为 1 Hz。直线结构元素提取偏移量的效果如图 11 所示。

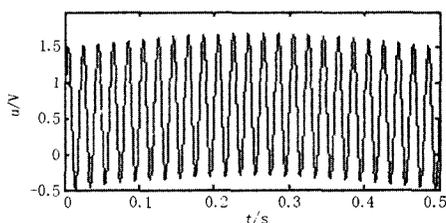


图 10 叠加了直流偏移量的工频信号

Fig.10 Power frequency signal with DC offset

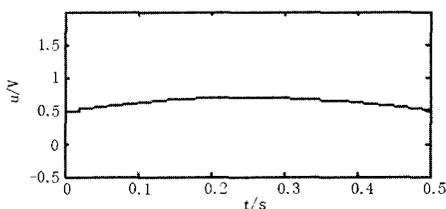


图 11 使用直线结构元素所提取到的偏移量

Fig.11 The offset extracted by using linear structure element

4 结论

针对电力系统数据采集中常见的噪声干扰, 通过 Matlab 仿真, 考察了四种常用结构元素的滤波效果, 得出了以下结论:

(1) 对于高频连续干扰, 余弦结构元素的滤波效果最好, 且运算速度较快。因此在处理高频噪声时, 可优先考虑使用余弦结构元素。

(2) 对于随机背景噪声, 余弦、半圆、三角三种结构元素的效果相近, 均优于直线结构元素。余弦结构元素的运算速度略快, 但三者相差不大。

(3) 对于脉冲噪声干扰, 余弦和半圆结构元素对于多个不同位置的脉冲噪声都能很好的滤除。而半圆结构元素又具有计算速度上的优势, 因此可首选半圆结构元素。

(4) 对于直流偏移量干扰, 直线结构元素对其有提取作用。仿真证明, 当直线结构元素的宽度等于待处理信号半周期长度时, 能很好地提取出信号中恒定的或呈低频波动的直流分量。

(5) 在处理连续噪声干扰时(如高频连续干扰及随机背景噪声), 当结构元素的幅值一定时, 总有一个最优宽度使得滤波效果达到最佳, 且结构元素幅值越小, 相应的最优宽度也越小。因此, 可将结构元素的幅值选得较小一些, 使得最优宽度也较小, 从而获得更快的计算速度。

(6) 本文确定了针对不同噪声结构元素类型的选取原则。对于结构元素幅值及宽度的确定, 通过仿真给出了 6.4 K 采样频率下的最优值。由于信号采样频率的不同、信号所含噪声种类和幅值的未知, 任何结构元素都不可能具有一个普遍适用的 A/L 值(直流偏移量的提取除外), 在使用形态学原理滤波时应通过预先仿真或加入自适应算法来实现参数的最优设置。

参考文献

- [1] 唐常青, 吕宏伯, 黄铮, 等. 数学形态方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [2] 尹文琴, 刘前进. 数学形态学在电力系统中的应用综述[J]. 继电器, 2007, 35(19): 76-83.
YIN Wen-qin, LIU Qian-jin. Mathematical Morphology Review and Its Applications in Power System[J]. Relay, 2007, 35(19): 76-83.
- [3] 岳蔚, 刘沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 13-17.
YUE Wei, LIU Pei. Detection of Power Quality Disturbances Based on Mathematical Morphology(MM) Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 13-17.

(下转第 35 页 continued on page 35)

- Systems, 2006, 30 (16): 105-107.
- [3] 沈健, 黄国方, 周斌. IEC61850 GOOSE 在变电站综合自动化系统中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30 (增刊): 433-436.
SHEN Jian, HUANG Guo-fang, ZHOU Bin. The Applications of IEC61850 GOOSE in Substation Automation[J]. Power System Technology, 2006, 30(S): 433-436.
- [4] 范建忠, 马千里. GOOSE 通信与应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 85-90.
FAN Jian-zhong, MA Qian-li. GOOSE and Its Application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 31 (19): 85-90.
- [5] 徐成斌, 孙一民. 数字化变电站过程层 GOOSE 通信方案研究[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 91-94.
XU Cheng-bin, SUN Yi-min. A Communication Solution of Process Layer GOOSE in Digitized Substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 31 (19): 91-94.
- [6] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEC 61850 的通用变电站事件模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (19): 45-50.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. Generic Substation Event Model Based on IEC 61850[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 29 (19): 45-50.
- [7] DL/T 860. 2-2004, 第 2 部分: 变电站和馈线设备的基本通信结构[C].
DL/T 860. 2-2004, Part 2: Communication Networks and Systems in Substations[S].
- [8] 段吉泉, 段斌. 变电站 GOOSE 报文在 IED 中的实时处理[J]. 电力自动化, 2007, 31 (11): 65-69.
DUAN Ji-quan, DUAN Bin. Real-time Processing of GOOSE Message in Substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 31 (11): 65-69.
- [9] 孙军平, 盛万兴, 王孙安. 基于以太网的实时发布者/订阅者模型研究与实现[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36 (12): 1299-1302.
SUN Jun-ping, SHENG Wan-xing, WANG Sun-an. Research on the Real-Time Publisher/Subscriber Model Based on Ethernet and Its Implementation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36 (12): 1299-1302.

收稿日期: 2008-08-31; 修回日期: 2009-01-14

作者简介:

宋丽君 (1976-), 女, 本科, 主要从事电力系统自动化的研究和设计工作;

王若醒 (1972-), 男, 硕士, 主要从事变电站自动化研究开发工作; E-mail: ruoxingw@xjgc.com

狄军峰 (1978-), 男, 硕士, 主要从事变电站自动化研究开发工作。

(上接第 25 页 continued from page 25)

- [4] 吴青华, 张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 45-49.
WU Qing-hua, ZHANG Dong-jiang. Morphological Filtering Techniques and Application in Protection Relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 45-49.
- [5] 王楠, 律方成. 数学形态学滤波预处理 $\tan \delta$ 在线监测数据[J]. 高电压技术, 2003, 29(7): 32-33.
WANG Nan, Lü Fang-cheng. Data Preprocessing of Online Monitoring $\tan \delta$ Based on Mathematical Morphology Filter[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(7): 32-33.
- [6] 李庚银, 罗艳, 周明, 等. 基于数学形态学和网格分形的电能质量扰动检测及定位[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 25-30.
LI Geng-yin, LUO Yan, ZHOU Ming, et al. Power Quality Disturbance Detection and Location Based on Mathematical Morphology and Grille Fractal[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 25-30.
- [7] 舒泓, 王毅. 基于数学形态滤波和 Hilbert 变换的电压闪变测量[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 111-114.
SHU Hong, WANG Yi. Voltage Flicker Detection Method Based on Mathematical Morphology Filter and Hilbert Transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 111-114.
- [8] 欧阳森, 王建华, 宋政湘, 等. 基于数学形态学的电力系统采样数据处理方法[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 61-65.
OUYANG Sen, WANG Jian-hua, SONG Zheng-xiang, et al. A New Power System Sampled Data Processing Method Based on Morphology Theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 61-65.

收稿日期: 2008-08-18; 修回日期: 2008-11-21

作者简介:

赵昭 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: estarzhao@sina.com

刘利林 (1983-), 男, 硕士, 从事送电电气设计工作;

张承学 (1952-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制。