

数学形态学算子在电力系统 突变信号检测中应用

全玉生,李学鹏,杨俊伟,马彦伟,李静一

(华北电力大学 高电压与电磁兼容研究所,北京 102206)

摘要: 数学形态学是一种非线性图像(信号)处理和分析工具,对信号特征的提取完全在时域中进行,信号的相位移和幅值特征不会变化。详细介绍了一维情况下灰度形态变换、形态学算子构造的滤波器和提取暂态突变特征等。应用电力系统暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC,仿真结果表明,在选择合适结构元素的条件下,数学形态算子有很好的滤波功能,对突变信号的检测具有速度快、时延小、易于分辨等特点。

关键词: 电力系统; 数学形态学; 突变信号; 信号检测

中图分类号: TM 77; TN 713⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)03-0001-04

0 引言

在电力系统中,系统故障通常反应为电压、电流信号的突变,及时准确地检测出突变信号是继电保护装置可靠动作的前提条件。但是,往往信号的突变量并不明显,如何把不太明显暂态突变特征更明显地表示出来,以便易于检测,是继电保护工作要解决的问题。傅里叶变换和小波变换作为常用的积分工具,在用积分变换处理电力系统突变量时,需要保证足够宽度的采集数据窗口,并且其积分变换结果相对于输入信号会带来相位移和幅值衰减^[1]。

数学形态学(mathematical morphology)是一种非线性图像(信号)处理和分析工具^[2],它是以集合论和积分几何学为基础发展的对物体形态处理的学科,其主要内容是设计一整套的变换(运算)、概念和算法,用以描述图像(信号)的局部特征或基本结构。数学形态学用集合描述目标信号,在考察信号时设计一种结构元素的探针,通过该探针在信号中的不断移动,提取有用的信息进行特征分析和描述。相对傅里叶和小波等积分变化而言,数学形态学是一种非线性的分析方法,其对信号特征的提取完全在时域中进行,而不是把信号变换到频域空间处理,因此,信号的相位移和幅值特征不会变化。数学形态变换能够把复杂的信号分解为具有物理意义的各个部分,并将其与背景剥离,同时保持其主要的形状特性,且形态变换计算过程简单,主要是加减运算和取极值运算,不涉及乘除运算,与传统的处理方法相比实时性好、速度快、时延小。利用数学形态变换构成的滤波器不仅能够很好地抑制噪声干扰,而且能保持原信号的主要特征。

本文首先介绍了一维灰度形态变换的基本运算。在此基础上,介绍了几种形态学算子在继电保护中的成果应用。

1 数学形态学的基本运算

数学形态学思想对图像处理理论产生重大影响,作为几何形态分析和描述的工具,已成为计算机数字图形处理的主要研究领域^[3]。

腐蚀和膨胀是二值形态变换中最基本的变换,将二值形态变换推广到函数领域,便成为灰度形态变换。电力系统继电保护信号多为一维信号,可用集合方式表示,本文主要介绍一维情况下灰度形态变换。

设输入序列 $f(n)$, $g(n)$ 分别是定义在 $F=\{0,1,\dots,N-1\}$ 和 $G=\{0,1,\dots,M-1\}$ 上离散函数,且 $N \geq M$ 。用序列函数 $g(n)$ 对信号 $f(n)$ 灰度膨胀和腐蚀分别定义为

$$(f \oplus g)(n) = \max \left\{ f(n-m) + g(n) \mid n-m \in F \right\} \quad (1)$$

$$(f \ominus g)(n) = \min \left\{ f(n+m) - g(n) \mid n+m \in F \right\} \quad (2)$$

在形态学中,集合 g 称为结构元素。结构元素可看作是一个探针,去局部探测图形中每一区域的几何特征,看能否将这个结构元素填放在图像内部,同时验证填放结构元素的方法是否有效,通过不断的移动结构元素,便可以提取出图像中的特征信息作分析和描述。

腐蚀和膨胀运算可以用多种方法解释,下面以腐蚀运算为例,给出一种集合意义比较明显的几何解释。图 1(a)为腐蚀运算的直观表示,实线所围的区域为 A 被 B 腐蚀的结果。图中横轴和纵轴代表像素点位置的横、纵坐标。 $A \ominus B$ 相当于将 B 在 A 图中逐点移动,若 A 图中被 B 框出的部分与 B 完全吻合,

则将 B 的 原点 所在 的 位置 予以 保留; 只要 有 一点 不 吻合 便 滤 掉。 腐蚀 运算 与 结构 元素 的 形状、 原点 位置、 大小 密切 相关 (见 图 1(a)(b)(c) 的 示意)。

从 图 中 可 以 看 出, 腐 蚀 运 算 保 持 了 原 图 的 基 本 形 态, 消 除 了 原 图 边 界 上 那 些 不 光 滑 的 凸 起 部 分, 且 运 算 结 果 比 原 图 小。

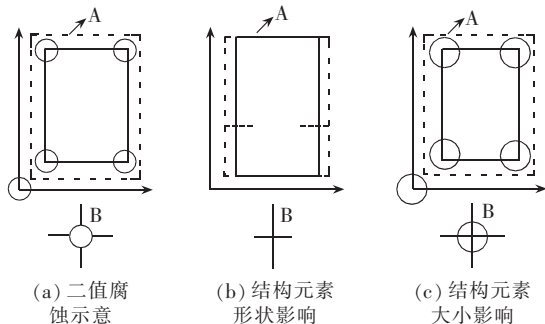


图 1 腐蚀运算实现

Fig.1 Realization of erosion operation

2 数学形态学滤波器

腐蚀运算可消除图形边缘小突起部分; 膨胀运算可填充图形中的小孔, 它们对信号有一定程度的平滑作用, 但是腐蚀和膨胀并不是互逆运算, 因此, 可以利用它们的不同级联方式构成不同的形态学滤波器。例如, 可以先对信号进行腐蚀, 然后对其结果进行膨胀运算, 或者是先对信号进行膨胀运算再腐蚀其结果 (这里使用同一种结构元素)。这就构造了 2 种新的形态学变换, 前一种称为开运算, 后一种称为闭运算。它们分别定义如下:

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

$$(f \cdot g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (4)$$

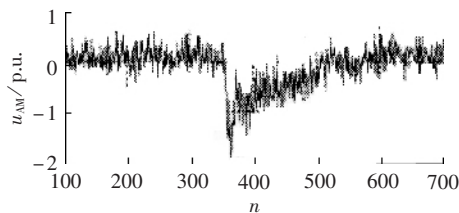
开运算和闭运算都具有低通特性, 开运算能够使图像边缘光滑, 抑制信号中的峰值 (正脉冲) 噪声, 闭运算能够弥补裂缝, 滤除信号中的低谷 (负脉冲) 噪声。但是, 它们本身都是单边算子, 在具体的滤波过程中, 为得到更好的滤波效果, 可考虑对开运算和闭运算采用不同的级联方式, 构成更复杂的滤波器^[4-5], 以达到双边滤波的目的。例如, 为了同时滤除信号中的正负 2 种脉冲噪声, 采用开、闭运算的不同级联方式构造了形态开-闭 (open-closing) 和形态闭-开 (closing-open) 滤波器^[6]。分别定义如下:

$$OC(f(n)) = (f \circ g \cdot g)(n) \quad (5)$$

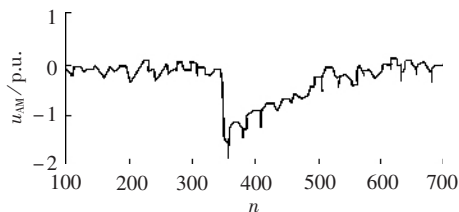
$$OC(f(n)) = (f \cdot g \circ g)(n) \quad (6)$$

其中 $f(n)$ 和 $g(n)$ 同上分别为输入序列和结构元素序列。另外还可以根据需要, 采用 2 个不同的结构元素进行构造, 得出更为复杂的滤波器。

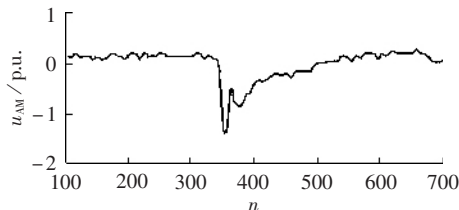
图 2 给出了在直流输电线路发生故障后的原始波形加入 30% 白噪声后的加噪波形及加噪波形经过开和开、闭算子滤波后的波形, 算例采用了长度为 5 的扁平结构元素。其中横坐标为选择的数据点 (n), 纵坐标为单位幅值 u_{AM} (图 4~7 同)。



(a) 加入 30% 白噪声后的电压行波



(b) 经开运算滤波后的电压行波



(c) 经开、闭运算滤波后的电压行波

图 2 加噪及经形态学算子滤波后的波形

Fig.2 Noise-added waveform and those filtered by morphology operators

从图中可看出, 形态学算子具有很明显的低通滤波特性, 且滤波效果较好。从图中也可看到, 选择不同的形态变换对滤波的效果有明显影响。由于单边算子的统计偏倚性及腐蚀和膨胀算子的对偶性, 使用组合的形态变换要比单纯使用单边算子的形态变换滤波效果好得多。在选择了具体的形态变换后, 结构元素的选择, 对滤波效果是有决定性影响。

3 数学形态学用于突变信号检测

文中使用了正在研究的直流输电线路暂态行波数据, 只是为了说明形态学算子在突变信号检测中的应用。所用的直流系统仿真模型如图 3 所示。文中所有信号均由电力系统暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 仿真得到。

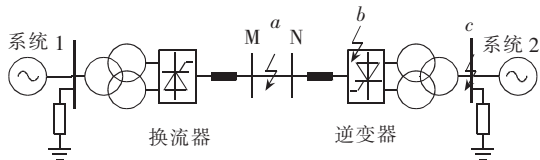


图 3 仿真系统模型

Fig.3 Model of simulation system

3.1 数学形态学梯度

基本的形态学梯度定义为函数 $f(x)$ 被扁平结构函数 $g(x)$ 膨胀和腐蚀运算结果的数学差分^[7]。

$$G_{\text{grad}}(f) = (f \oplus g)(n) - (f \ominus g)(n) \quad (7)$$

从定义可见, 所定义的梯度和在数学上定义的数学梯度是不同的。因为对于扁平的结构元素, 它对

信号的腐蚀和膨胀运算具有取局部极大值和极小值形态滤波的效果。通常形态学梯度用于对信号的边沿检测。形态学梯度的每一个点均由扁平结构函数定义域内的极大和极小值之差决定,所以形态学梯度受结构元素的大小及其原点位置影响。

图 4 分别给出了图 2 中(a)和(c)经形态学梯度变换后的结果。形态变换中选择长度为 6 的阶梯型结构元素。从图中可看出,形态学梯度变换把原始信号的下降沿变成一个向上的脉冲;把上升沿变成一个向下的脉冲,并且脉冲幅值增大易于检测。加噪后的波形经梯度变换后仍得到易于检测的结果,可见这种变换对噪声干扰不敏感,利于突变信号检测。

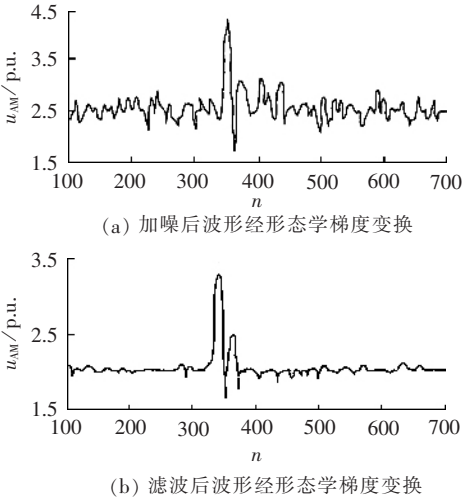


图 4 加噪和滤波后波形经梯度变换后结果

Fig.4 Waveforms after morphology gradient transform for the noise-added waveform and filtered

文献[8]给出了一种多分辨形态梯度运算,并设计一种可变并具有不同原点位置的扁平结构元素,其定义为

$$g^+ = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, \underline{g}_l\} \quad (8)$$

$$g^- = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, \underline{g}_l\} \quad (9)$$

其中的结构元素 g^+ 和 g^- 分别对应于提取突变信号上升和下降沿。结构元素宽度为 $l=2^{l-a}l_a$, a 为多分辨形态梯度的分析级数, l_1 为结构元素在第 1 级的初始宽度。在 g^+ 和 g^- 中的下划线点分别表示原点位置。结合形态学梯度定义式与上面定义的结构元素,可以定义出多分辨形态梯度:

$$G_{g^+}^a(n) = (f^{a-1} \oplus g^+)(n) - (f^{a-1} \ominus g^+)(n) \quad (10)$$

$$G_{g^-}^a(n) = (f^{a-1} \ominus g^-)(n) - (f^{a-1} \oplus g^-)(n) \quad (11)$$

$$G_g^a(n) = G_{g^+}^a(n) + G_{g^-}^a(n) \quad (12)$$

当 $a=1$ 时, $f^0=f$ 是输入信号。因 $\{(f^{a-1} \oplus g(n)) \subset (f^{a-1} \ominus g)(x) : D_g \neq \emptyset\}$, 所以, 式中 $G_{g^+}^a(n) > 0$ 和式 $G_{g^-}^a(n) < 0$, 其符号正好与暂态波形中的上升和下降边沿对应。式中的 G_g^a 不仅能够给出信号的突变点且能指示出其变化的极性。另外, 随着多分辨形态梯度处理级数的增大, 信号波形中更细微的变换也会被揭示出来。

图 5(a)中给出了去噪波后信号波形和对其经 2 级分辨后的波形, 可以看出形态变换对信号突变沿的变换情况。图(b)为了能更清楚看到变换结果, 只给出了变换后的波形。

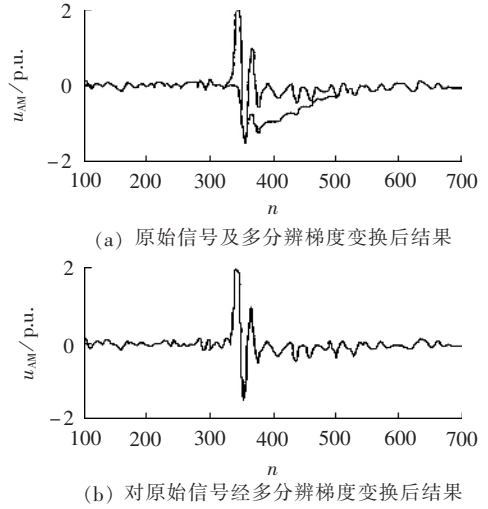


图 5 多分辨梯度变换后波形

Fig.5 Waveforms after multi-resolution morphological gradient transform

从图中可看出, 多分辨的形态变换, 不仅能明显分辨信号的跃变沿, 而且可看出信号的极性信息。这对构造行波方向保护, 距离保护等都具有重要价值。这种多分辨变换的益处在于, 一则可以很方便的单独设计只针对上升沿或下降沿更有效的结构元素; 再则, 可进行更细致地变换, 以揭示信号更细微的变换。

3.2 形态学算子用于边缘检测

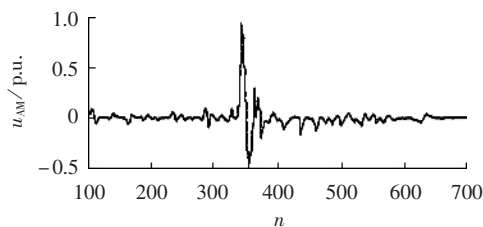
开运算是 对信号的一种非扩张性运算, 可以抑制信号中的峰值噪声; 闭运算是 对信号的一种非扩张性运算, 可抑制信号中的低谷噪声。因此, 数学形态学应用于边缘检测的基本思想是对图像用一定的结构元素进行基本操作后与原图像相减^[9], 这种思想在一维灰度运算中就体现为用原始信号减去对其进行形态学运算后的结果。如果用原始信号减去对其进行开运算后的结果, 便可得到原始信号中的波峰等标记点; 用原始信号减去对其进行闭运算后的结果, 便可得到波谷的标记点。所得到的这 2 种算子形态学中分别称为 Top-Hat 算子和 Bottom-Hat 算子, 在一维灰度下分别定义如下:

$$Th(n) = f(n) - (f \circ g)(n) \quad (13)$$

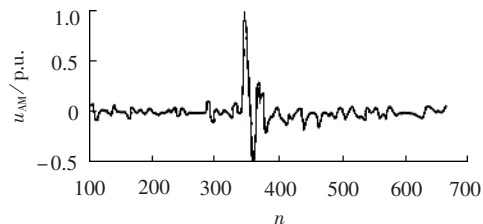
$$Bh(n) = f(n) - (f \cdot g)(n) \quad (14)$$

式中 f 为原始信号; g 为结构元素。

图 6 的(a)和(b)分别给出了图 2(c)中的信号经过 Top-Hat 和 Bottom-Hat 算子变换后的结果。变换中选择了阶梯型的结构元素。从图中可见 Top-Hat 和 Bottom-Hat 算子变换产生了和形态学梯度变换几乎相同的结果。可见选择合适的结构元素, 这种变换对于检测突变信号也能得出满意的效果。



(a) Top-Hat 算子变换后波形



(b) Bottom-Hat 算子变换后波形

图6 经形态学算子变换后波形

Fig.6 Waveforms after morphological operator transform

在上面定义的2个算子的基础上,为了能够同时检测到信号中的峰值点和波谷点,可以把上面的2个算子结合起来,构造出1个新的算子,为了同时检测峰、谷可以把2个算例结合起来如下:

$$De(n) = Th(n) + Bh(n) =$$

$$2f(n) - (f \circ g)(n) - (f \cdot g)(n) \quad (15)$$

图7给出了图2(c)中的信号经过式(15)变换后的结果。从结果可见,变换过程采用了上面2种算子之和的形式,因此得到的脉冲幅值更大,更有利于信号检测。

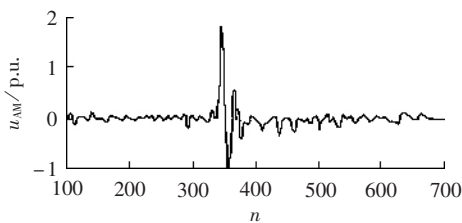


图7 经峰谷检测器变换后波形

Fig.7 Waveforms after apex-vale inspector transform

本文所使用的结果元素是经过大量的试验分析比较后给出的最好效果。试验证实它们是可用的,但是可能并不是最优的,针对不同的原始信号和要滤除的干扰信号及对要保留的图形的要求,可以针对性地设计出效果更好的结构元素。

4 结语

本文详细介绍了几种形态学算子在电力系统突变信号边缘检测中的应用。与传统的傅里叶变换和小波变换相比,这些算子都是在全时域形态下对信号进行变换,速度快、时延小。仿真计算结果和分析也证明了,这种变换技术具有运算速度快、变换结果易于分辨、对噪声等干扰不太敏感等优点,在电力系统暂态突变信号的检测和构造超高速暂态保护方案方面都将具有很大的应用前景。

参考文献:

- [1] 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-jian. Morphological filtering techniques and applications in protection relaying[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2003,27(7):45-49.
- [2] SERRA J. Image analysis and mathematical morphology[M]. London:Academic Press,1982.
- [3] 崔屹. 图形处理与分析-数学形态学方法及应用[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [4] 林湘宁,刘沛,刘世明,等. 电力系统超高速保护的形态学-小波综合滤波算法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(9):19-24.
LIN Xiang-ning,LIU Pei,LIU Shi-ming,et al. A novel integrated morphology-wavelet filter algorithm used for ultra-high speed protection of power systems[J]. **Proceedings of the CSEE**,2002,22(9):19-24.
- [5] 刘云鹏,律方成,李成榕,等. 形态学-小波综合滤波器抑制局放现场干扰[J]. 高电压技术,2004,30(2):29-31.
LIU Yun-peng,LÜ Fang-cheng,LI Cheng-rong,et al. Study of novel integrated morphology-wavelet filter insuppressing PDS field noise[J]. **High Voltage Engineering**,2004,30(2):29-31.
- [6] MARAGOS P,SCHAFERR W. Morphological filters. Part II:their relations to median,order-statistics and stack filters[J]. **IEEE Trans. on Acoustics,Speech and Signal Processing**,1987,35(8):1170-1184.
- [7] 林湘宁,刘沛,高艳. 基于故障暂态和数学形态学的超高速线路方向保护[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):13-18.
LIN Xiang-ning,LIU Pei,GAO Yan. Ultra-high-speed line directional protection based on transient and mathematical morphology[J]. **Proceedings of the CSEE**,2005,25(4):13-18.
- [8] WU Q H,ZHANG J F,ZHANG D J. Ultra-high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**,2003,18(3):1127-1133.
- [9] MARAGOS P. Tutorial on advances in morphological image[J]. **Processing and Analysis Optical Engineering**,1987,26(7):623-632.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

全玉生(1955-),男,北京人,教授,研究方向为电力系统分析与控制和高压电气设备故障检测与诊断技术(E-mail: qysh@163.vip.com);

李学鹏(1979-),男,北京人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: pipigou001@163.com)。

Application of several mathematical morphology operators in power system saltation signal detection

QUAN Yu-Sheng, LI Xue-peng, YANG Jun-wei, MA Yan-wei, LI Jing-yi

(North China Electric Power University Institute of High Voltage & EMC, Beijing 102206, China)

Abstract: Mathematical morphology is a tool to process and analyze nonlinear images (signals) with which the extraction of signal features is performed in time domain and the features of phase and amplitude will not change. The grey morphology transform, filter construction and transient saltation extraction with mathematical morphology operators in one dimension are introduced in detail. Simulations are carried out with PSCAD/EMTDC. Results show that, with appropriate structural elements, the mathematical morphology operators has not only favorable filter ability, but also rapid speed, small time delay and easy detection of saltation signal.

Key words: power system; mathematical morphology; saltation signal; signal detection