

数学形态学在行波滤波中的应用

吴军基¹, 吴伊昂¹, 贺济峰², 杨伟¹

(1. 南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 徐州供电公司, 江苏 徐州 221005)

摘要: 行波故障测距需对行波信号进行采样, 采样率往往取得较高, 易受到各类噪声的影响。为了克服传统方法和小波方法在抑制噪声方面的不足, 引入数学形态学理论。在故障行波上模拟噪声, 比较形态学和小波变换算法对各种行波噪声干扰的抑制效果。仿真结果证明形态学算法滤除脉冲干扰的优越性明显, 滤除白噪声的效果比小波算法略优。

关键词: 数学形态学; 小波分析; 行波; 测距

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)17-0021-06

0 引言

输电网是系统联网、电能传输的重要设备, 迅速准确地进行故障测距, 才能及时排除故障恢复供电, 减少经济损失。在利用行波进行故障测距时, 采用的是故障暂态高频电气量, 为了能够捕捉行波波头, 准确地判断行波波头的到达时刻, 采样率往往取得较高。而高采样频率容易受到各种噪声影响^[1], 都给信号的检测带来困难。

噪声抑制的传统方法一般是低通滤波, 各种低通滤波算法虽然可以较好地滤除白噪声, 但在抑制脉冲噪声方面显得无能为力^[2]。目前将小波理论应用于行波测距的研究较多, 但小波的低通滤波器同样也有以上不足。小波多尺度分析的去噪能力取决于分解的层数和滤波器的阶数, 只有当它们数值较高时才能获得较好的滤波效果, 这一方面将带来计算量的线性增加; 另一方面现有的硬件在满足多尺度分解算法对计算量、计算速度及数据存储容量的要求方面也有一定难度。而且, 多级低通滤波在滤除噪声的同时也减缓了行波波头的梯度, 对测距精确不利。为此, 需要寻找一种快速有效的算法来满足行波测距等电力信号检测的需要。

一种称为数学形态学的信号处理工具可以作为解决上述问题的新方法。数学形态学目前在电力系统的运用还比较少, 在电能质量分析方面的研究, 开始有相关报道^[3,4], 数学形态学应用于电力系统暂态波形, 国内外也都还处于起步阶段^[2,5,6]。

1 数学形态学及其基本原理

基金项目: 南京理工大学科研发展基金资助项目

数学形态学是 1964 年由法国 G Matheron 和 J. Serra 在积分几何研究成果的基础上创立的。数学形态学 (MM)^[7] 的主要内容是设计一整套变换、概念和算法, 最初是用于数字图像的处理和识别。数学形态学在考察信号时, 要设计一种收集信号信息的“探针”, 称为结构元素 (相当于滤波窗)^[8]。当在信号中不断移动结构元素, 便可以提取有用的信息做特征分析和描述, 达到提取信号、保持细节和抑制噪声的目的。

形态变换主要优点是计算简单和并行快速, 主要为 BOOL 运算及少量的加减运算而不需要做乘法运算, 易于硬件实现。利用数学形态学构成低通滤波器, 即使原始信号伴随较强的噪声、甚至发生了严重的畸变, 其基本形状仍可被识别及重构。

1.1 形态学的基本运算

形态学的基本变换包括腐蚀、膨胀、形态开和形态闭等, 以及形态开、闭的级联组合。

1) 腐蚀和膨胀

因为电力信号一般为二维信号, 设 $f(n)$ 是一维多值信号, $g(n)$ 为结构元素。 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的腐蚀和膨胀分别定义为:

$$\begin{aligned} (f \ominus g)(n) &= \min\{f(n+m) - g(m)\} \\ (f \oplus g)(n) &= \max\{f(n+m) + g(m)\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $n = 0, 1, 2, \dots, N - M$, $m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$, 且

$N \geq M$ 。 M 为结构元素的长度, 其取值与信号采样率、脉冲噪声宽度及白噪声特性有关。腐蚀 (erosion) 和膨胀 (dilation) 是最基本的形态变换。腐蚀变换是一种收缩变换, 膨胀变换是一种扩张过程^[9]。

2) 开运算和闭运算

腐蚀和膨胀是不可逆运算,先膨胀后腐蚀与先腐蚀后膨胀均不能使目标还原,而是产生两种新的形态学变换。先腐蚀后膨胀称为开运算(opening),先膨胀后腐蚀是闭运算(closing)。这两种运算的结果通常不同。序列 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的开运算和闭运算分别定义为:

$$\begin{aligned} f \circ g &= f \ominus g \oplus g \\ f \cdot g &= f \oplus g \ominus g \end{aligned} \quad (2)$$

形态开闭运算可理解为基本的滚球变换。“球”的形状由结构元素决定。其轨迹是光滑的,开运算使目标轮廓光滑,并去掉毛刺和孤立点,锐化了角,以抑制信号中的峰值噪声;闭运算则填平了小沟,弥合了孔洞和裂缝,以滤除信号中的底谷噪声。

3) 开—闭和闭—开运算及线性组合形态学滤波器

采用开闭运算的级联组合形式,定义形态开—闭(open—closing)和闭—开(closing—opening)滤波器。形态开—闭(oc)和闭—开(co)滤波器分别为

$$\begin{aligned} F_{oc}(f(n)) &= (f \circ g \cdot g)(n) \\ F_{co}(f(n)) &= (f \cdot g \circ g)(n) \end{aligned} \quad (3)$$

形态开—闭和闭—开滤波器虽然可以同时滤除信号中的正、负脉冲噪声,但由于互补的形态运算(腐蚀和膨胀;开和闭;开—闭和闭—开),产生了相反的偏差。为了有效地抑制电力系统故障时伴随的各种噪声,需采用一定的组合加权。文中采用 2 种滤波器的平均组合形式。设有采样信号 $f(n)$,对该信号进行各种形态计算,滤波输出信号由式(4)得到:

$$f_{denoise} = \frac{F_{oc} + F_{co}}{2} \quad (4)$$

4) 结构元素

根据形态学在其他领域中的应用经验,不同信号的处理,所选的结构元素也不同。结构元素的形状、高度、宽度(或长度)决定了结构元素的特征。在进行噪声消除时,结构元素形状越复杂,宽度越长其提取信号的能力就越强,但同时所要耗费的时间也长^[8]。为了保证结构元素相对于待滤波函数的“探针”作用,结构元素宽度应远小于待滤波的周期宽度。

考虑电力系统的信号特点,以及简化程序资源的需要,论文选取的是直线形结构元素,它与水平方向成 0 角。这样的结构元素在进行噪声消除时既能保持信号的形状,又能最大限度地消除毛刺形状

的噪声。

1.2 评价参数

为了方便本章后续讨论消噪算法的性能,定义了如下的评价参数。

令输入原始信号为 $x(n)$,变换输出后的信号为 $\hat{x}(n)$,其中 $n = 1, 2, \dots, M$

$$\text{a) 误差: } E_{av} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M |x(n) - \hat{x}(n)| \quad (5)$$

b) 均方根误差:

$$E_{ab} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M |x(n) - \hat{x}(n)|^2} \quad (6)$$

c) 信噪比:

$$SNR = 10 \cdot \lg \left[\frac{\sum_{n=1}^M |x(n)|^2}{\sum_{n=1}^M |x(n) - \hat{x}(n)|^2} \right] \quad (7)$$

2 仿真实例分析

采用如图 1 的系统,用仿真得到的故障行波信号验证形态学滤波算法。就四种情况:正负脉冲、脉冲群、脉冲群叠加在波头、白噪声进行形态学和小波滤波算法的比对分析。



图 1 仿真系统图

Fig 1 System simulation

采样频率为 1 MHz,设 0.02 s 在 F 点发生 A 相接地故障,线路 MF 75 km,线路 FN 60 km。截取 0.02 ~ 0.021 s 之间 1 000 μ s 的电流行波信号进行以下的分析,将观测零点移至 0.02 s。

以下的形态学滤波分析是先对故障信号进行形态学滤波再进行小波变换检测波头,与用小波方法滤波和检测行波波头的方法相比较。

2.1 正负单脉冲

图 2 为 M 侧观测到的 1 000 μ s 的电流行波信号,254 μ s 观测到初始行波波头。在 100 μ s 和 140 μ s 分别叠加了正、负脉冲,幅值为 200 A 和 -300 A。图 3 是对图 2 信号进行形态滤波后的结果。对比图 2,正、负脉冲的影响已完全滤除,行波各梯度的斜率没有削弱,滤波效果良好。

图 4 为对此信号进行小波分解 1 ~ 5 尺度的结果,图中所示正、负脉冲的模值随着分解尺度的增加而减小,而行波波头的模值随着尺度的增加而增加,正负脉冲的影响要分解到第 5 尺度才有明显的削

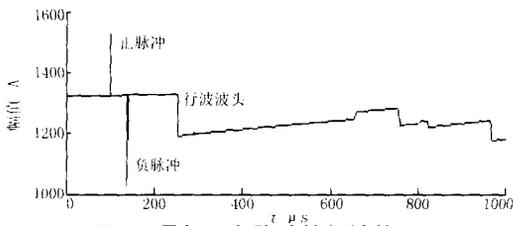


图 2 叠加正负脉冲的行波信号

Fig 2 Traveling wave with plus minus impulse

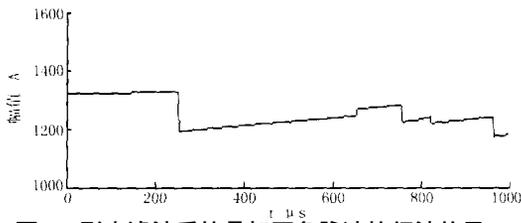


图 3 形态滤波后的叠加正负脉冲的行波信号

Fig 3 Filtered traveling wave by the morphology

弱。小波 2 尺度模极大值如图 5 所示,除能观测到初始故障行波波头外,还能明显观测到正、负脉冲的影响,正、负脉冲幅值比较大。该正、负脉冲是叠加在行波波头之前,很可能将其误认为故障突变信号,从而误判。

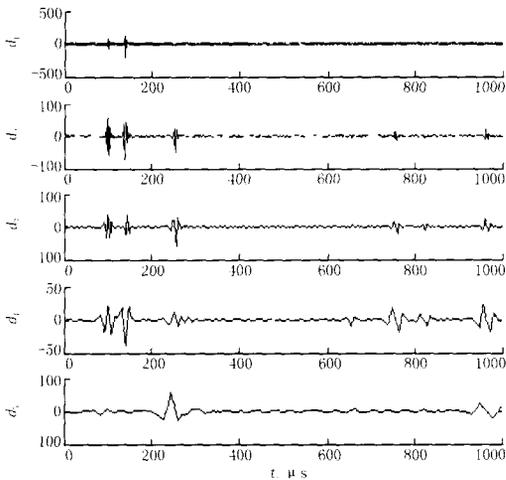


图 4 行波 1~5 尺度小波分解

Fig 4 Traveling wave and its output of 1~5 resolution wavelet transform

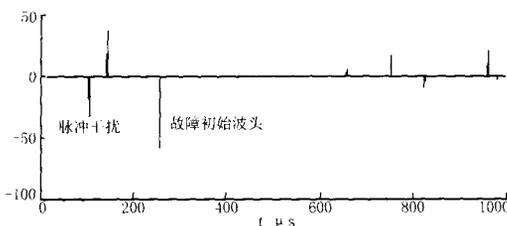


图 5 行波模极大值

Fig 5 Modulus maxima of the traveling wave

2.2 脉冲群

对单个脉冲群,小波滤波也要在 5 尺度下才能较好地滤除,效果不是很令人满意。为了分析在强随机噪声环境中的形态滤波和小波滤波的效果,在上例的 M 端电流行波中加入强干扰信号,在 230 ~ 235 μs 分别叠加幅值为 -100 A, 50 A, -100 A, 100 A, -100 A, 100 A 的 6 个脉冲信号,并且该脉冲群已经逼近行波波头,如图 6 所示,该图是局部展宽图。图 7 为对该信号进行形态滤波后的效果,发现经形态学滤波后,脉冲群的干扰已完全消除,再将此形态滤波后的信号经小波变换,检测行波波头的突变位置。

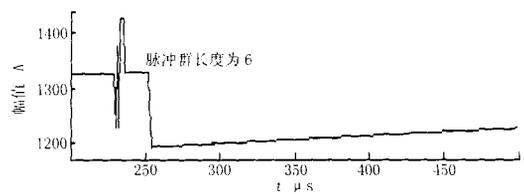


图 6 叠加 6 个脉冲的行波局部展宽图

Fig 6 Traveling wave with six impulses

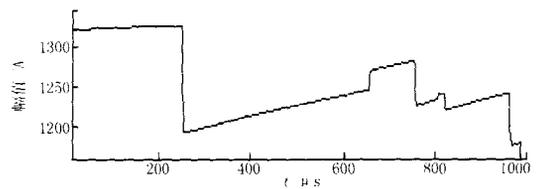


图 7 形态学滤波后的叠加 6 个脉冲的行波信号

Fig 7 Filtered traveling wave by the morphology

用小波方法对叠加 6 个脉冲群干扰的信号进行滤波,与形态学方法进行对比。图 8 为小波 2 尺度模极大值图,除在 254 μs 检测到故障初始行波,幅值为 -51.436,比未加干扰的波头幅值略有减小,还在 234 μs 检测到脉冲群的影响,该干扰的幅值为 104.78,大于故障波头的幅值,按照这种方法,从幅值上判断将会造成初始波头误检测。

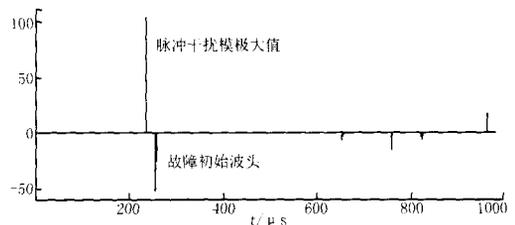


图 8 脉冲群消噪的小波模极大值

Fig 8 Traveling wave and its output of wavelet transform modulus maxima

2.3 脉冲群叠加在行波波头

考虑在极端的情况下,叠加长度为 6 的脉冲群在波头位置 250 ~ 255 μ s,幅值分别为 - 100 A, 50 A, - 100 A, 100 A, 100 A, 100 A。波头附近的局部展宽图见图 9,形态学消噪后的图形见图 10,消噪后波头陡度有所减小。为了分析脉冲群叠加在行波波头上是否会影响测距,将形态学消噪后的信号进行小波变换,图 11 所示为小波模极大值图,发现幅值有所削弱,为 - 25. 282,但记录的波头时刻仍然是 254 μ s,对测距没有影响。

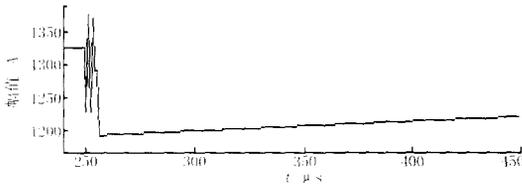


图 9 脉冲群叠加波头的行波波形
Fig 9 Traveling wave with impulse group

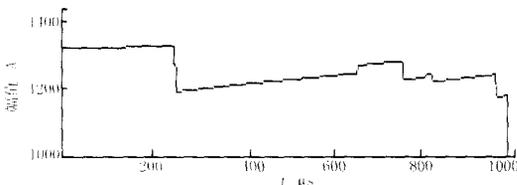


图 10 形态学消噪后的脉冲群叠加波头的行波波形
Fig 10 Filtered traveling wave by the morphology

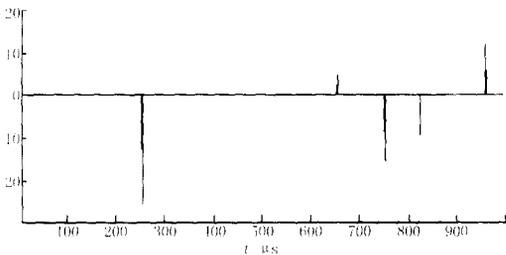


图 11 脉冲群叠加波头的行波波形及形态学消噪后小波模极大值图

Fig 11 Modulus maxima about the filtered traveling wave by the morphology

2.4 白噪声

小波用于消除白噪声是比较常见的,下面比较形态学和小波在消除白噪声方面的效果。在原信号上叠加均值为 0,标准差为 10 的白噪声,又在信号的 230 ~ 235 μ s 位置叠加脉冲群,幅值分别为 - 100 A, 50 A, - 100 A, 100 A, 100 A, 100 A,见图 12。

对此信号直接用形态学滤波,输出波形和原来未加白噪声和脉冲干扰的信号绘于同一坐标系中如图 13 所示,发现脉冲群的干扰已经去除了,但仍然

可见白噪声的一些影响。比较去噪前后的波形变换,发现形态学算法较好地恢复了原波形,与原行波各波头梯度基本重合。

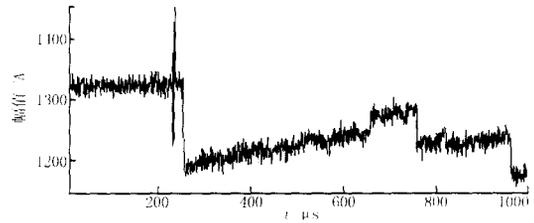


图 12 叠加白噪声和尖脉冲的行波波形

Fig 12 Traveling wave with white noise and impulse noise

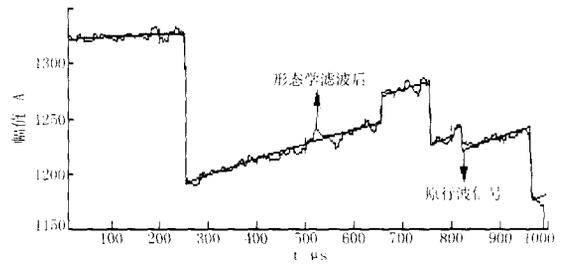


图 13 形态学滤波与原波形

Fig 13 Traveling wave and its output of morphology filter

将图 12 的信号直接用小波固定阈值法“sqtwolog”^[10] 2 尺度消噪和原来未加干扰的信号绘于同一坐标系中如图 14。比较图 13 和图 14,在消除白噪声方面,形态学和小波方法效果比较相近。在滤除脉冲干扰方面,小波方法明显劣于形态学。

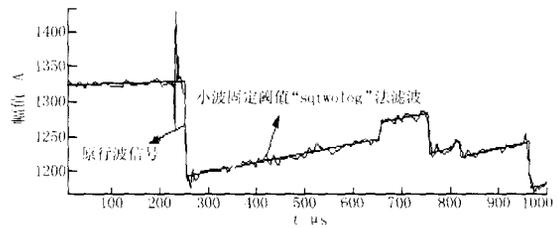


图 14 小波滤波与原波形

Fig 14 Traveling wave and its output of wavelet transform

表 1 评价参数

Tab 1 Assessment parameter

	原信号 加干扰	小波 (sqtwolog) 滤波后	小波 (minimaxi) 滤波后	形态学 滤波后
信噪比	41. 698	47. 893	47. 714	50. 547 5
误差	8 106 9	3. 617 8	3. 557 8	2. 920 4
均方误差	12 249	7. 103	7. 530 2	3. 732 9

表 1 评价参数中,具体列出了原信号加干扰、小波固定阈值法 (sqtwolog) 滤波后、小波极大极小值法 (minimaxi) 滤波后、形态学滤波后的信噪比和各项误差的具体数值,信噪比在滤波后提高了,误差在滤波后缩小了。总体看形态学滤波效果优于小波法,

信噪比的增加和误差的减小均比小波法要大。(小波极大极小值法消噪的具体波形省略,与固定阈值法相似)。表 1 中的信噪比、误差、均方误差均由公式 (5)、(6)、(7) 计算得到。

3 结构元素对算法性能的影响

进一步分析结构元素尺寸变化对滤波算法性能的影响,在上述对叠加干扰的行波信号的滤波中,结构元素取为直线形,与水平方向夹角为 0° ; 长度 M 为 7, 高度 H 为 1, 即 $g(n) = \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$ 。改变结构元素的高度 H 和长度 M , 分别对原行波信号叠加均值为 0, 标准差为 10 的白噪声的信号进行滤波, 表 2 为不同长度和高度的结构元素滤波后的均方根误差。相应的三维图如图 15 所示, 可以看出结构元素的高度对输出的均方根误差影响很小, 而长度对均方根误差影响较大。同一长度, 不同高度时, 均方根误差基本没有变化; 同一高度, 不同长度时, 均方根误差有较大变化。

表 2 不同长度和高度时结构元素滤波后的均方根误差 (长度、高度单位: 1)

Tab 2 Different filtering result of different construction element

长度	高度			
	0	1	2	3
3	4.965 5	4.965 5	4.965 5	4.965 5
5	4.003 6	4.003 6	4.003 6	4.003 6
7	2.920 4	2.920 4	2.920 4	2.920 4
9	2.748	2.748	2.748	2.748

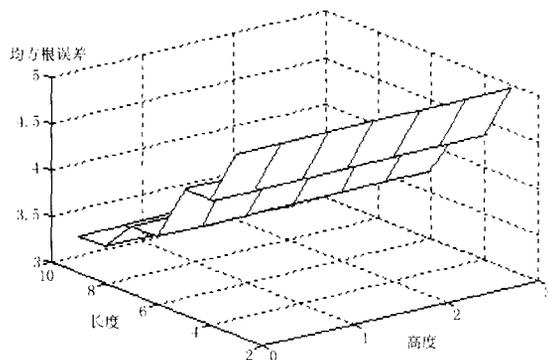


图 15 均方根误差

Fig 15 Different filtering result of different construction element

4 结论

由于行波信号的采样率很高, 易受各种干扰的影响, 本文引入了数学形态学理论这一新型的信号处理工具, 编制了形态学滤波的算法, 用 Matlab 模拟各种行波噪声, 形态学算法均能有效地识别滤除,

该算法只用了基本的形态运算, 过程简单, 计算快速。

就各种模拟噪声, 和以往的小波滤波算法的适用性进行逐一比较, Matlab 仿真结果证明形态学算法滤除脉冲干扰的优越性明显, 滤除白噪声的效果比小波算法略优一些。

本文还对形态学的滤波特性进行了分析, 发现结构元素的长度是影响滤波效果的关键, 结构元素的高度基本不影响滤波性能。

参考文献:

- [1] 艾斌, 吕艳萍. 基于小波模极大值极性的行波信号识别 [J]. 电网技术, 2003, 27 (5): 55-58
A I B in, L Ü Yan-ping Traveling Wave Signal Identification Based on Wavelet Polarity of Modulus Maxima [J]. Power System Technology, 2003, 27 (5): 55-58
- [2] 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
L N Xiang-ning, L U Pei, L U Shiming, 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
- [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, L U Pei Detection of Power Quality Disturbances Based on MM Filter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (7): 13-17.
- [4] 欧阳森, 王建华. 一种基于数学形态学的电能质量信号快速定位方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (19): 25-29.
OU YANG Sen, WANG Jian-hua A New Fast Disturbance Location Method Based on Mathematical Morphology for Power Quality Signal [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (19): 25-29.
- [5] Sedaaghi M H, Wu Q H. Real-time Implementation of Grey-scale Morphology Operators [J]. Electronics Letter, 1997, 33 (21): 1761-1763.
- [6] Sun P, Wu Q H. Morphological Systems for Signal and Imaging Processing in Power Systems, Thesis [D]. Liverpool: The University of Liverpool, 1998.
- [7] Serra J. Morphological Filtering: an Overview [J]. Signal Processing, 1994, 38 (4): 3-11.
- [8] 龚伟, 石青云, 程民德. 数字空间中的数学形态学——理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
GONG Wei, SHI Qing-yun, CHENG Min-de Mathematical Morphology in Digital Space—Theory and Application

- [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [9] 唐常青,吕宏伯,等. 数学形态学方法及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
TANG Chang-qing, LÜ Hong-bo, et al. Mathematical Morphology Method and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [10] 胡昌华,张军波,夏军,等. 基于 Matlab 的系统分析与设计——小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
HU Chang-hua, ZHANG Jun-bo, XIA Jun, et al. System Analysis and Design of Wavelet Based on Matlab [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1999.

收稿日期: 2005-01-05; 修回日期: 2005-04-08

作者简介:

吴军基 (1955 -), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统及其自动化、电力市场等方面的教学与研究工作;

吴伊昂 (1980 -), 女, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护与控制;

贺济峰 (1963 -), 男, 硕士, 从事电力系统及其自动化方面的工程与管理工

作; 杨伟 (1965 -), 男, 副教授, 从事电力系统及其自动化方面的教学与研究工作。E-mail: yangwei807@vip.sina.com

Application of mathematical morphology in transmission line fault location

WU Jun-ji¹, WU Yi-ang¹, HE Ji-feng², YANG Wei¹

(1. School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221005, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the traditional method in eliminating the noise of the traveling wave, a novel algorithm named mathematical morphology is introduced. The algorithm aims to improve the filter performance when such a filter is applied to filter random and pulsed noises contained in traveling wave. Mathematical morphology is more effectively compared with wavelet morphology on pulsed noises.

Key words: mathematical morphology; wavelet analysis; traveling wave; fault location

电力系统继电保护类技术标准电子版

为满足用户的需求,中电协继电保护及自动化设备分会技术标准中心隆重推出:电力系统继电保护类技术标准电子版。

该电子版标准汇编囊括了截止 2004 年底正式发布的继电器、保护及自动化装置所使用的各项国家、行业标准,分为以下 8 卷:

远动通讯、规约标准汇编,包括 IEC 61850 系列 (14 个标准), IEC 60870 系列 (101、102、103、104 规约等 12 个标准);电磁兼容标准汇编 (GB 17626 系列、GB 14598 系列等 26 个标准);基础技术标准汇编 (量、单位、术语、定义、符号及型号、技术要求等 54 个标准);产品标准汇编 (继电器、保护及自动化装置的产品标准,如 GB 14047、GB 14285、JB 9568 等 85 个标准);直流电源设备标准汇编 (JB 5777. 4、DL 5044 等 13 个标准);检测、试验标准汇编 (继电器及装置的试验方法、要求,如 GB 7261、GB 14537、GB 14598 等 22 个标准);机械工艺结构标准汇编 (屏、柜、台的尺寸、公差等要求,如 GB 7267、GB 7268 等 23 个标准);计算机软件工程规范标准汇编 (GB 11457、GB 8567 等 37 个标准)。

本汇编适用于电力系统继电保护设备制造厂家、信息情报机构、商检和技术监督、各级地方政府产业主管部门、全国各大电力院校及科研院所等。请您留下这份资料,在您需求的时候和我们联系。

咨询热线: 0374 - 3212252 传真: 0374 - 3212473

联系人: 孙富韬 E-mail: futaos@powerkingdom.com