

# 基于形态小波的输电线路故障电流行波消噪研究

康忠健, 王升花, 樊建川

(中国石油大学电气工程系, 山东 东营 257061)

**摘要:** 高压输电线路故障产生的电流行波信号含有大量的噪声信号, 在行波保护和行波故障测距中需要对其进行预处理, 去除噪声并提取真实信号。利用小波变换能敏感地检测到奇异点和形态学滤波器能有效地滤除脉冲噪声且能保留原信号的全局和局部特征的优点, 提出了一种基于形态小波的输电线路行波信号消噪新算法。MATLAB 仿真结果表明形态小波在滤除脉冲干扰和白噪声方面具有良好的消噪能力。

**关键词:** 输电线路; 故障电流行波; 数学形态学; 小波分析; 消噪

## Study on the noise reduction of power line fault current traveling wave based on morphological wavelet

KANG Zhong-jian, WANG Sheng-hua, FAN Jian-chuan

(Department of Electric Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** The current traveling wave, including plentiful noise signal, should be come forth when the power line fault occurs. The signal should be deal with by reducing noise and holding real signal before traveling wave protection and fault distance location calculation. With the advantage of wavelet transform detecting singularity points sensitively and morphological filter reducing plus noise as well as hold signal global characteristic, the arithmetic of traveling wave based on morphological wavelet is proposed to reduce noise in the paper. The MATLAB simulation results show that the morphology wavelet arithmetic has an excellent ability to reduce pulse noise and white noise.

**Key words:** power transmission line; fault current traveling wave; mathematical morphology; wavelet analysis; noise reduction

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)19-0036-04

## 0 引言

高压输电线路故障产生的行波信号含有许多尖峰或突变部分, 并且噪声也不是平稳的白噪声, 对这种信号进行分析, 首先需要进行预处理, 将信号的噪声部分去除, 提取有用信号, 才能精确测距。

由于小波变换能敏感地检测到奇异点, 但不能去脉冲噪声; 形态学滤波器能有效地滤除脉冲噪声, 而又同时保留原信号的全局和局部特征, 在图像处理、心电信号处理等领域得到广泛应用, 本文基于数学形态学的基本理论, 将其应用于电力行波消噪<sup>[1]</sup>, 提出了基于形态小波的行波消噪算法。

## 1 数学形态学及其基本运算

数学形态学是一门建立在集合理论基础之上的学科, 它的基本思想是利用一个称作结构元素的“探针”在信号中的不断移动来考察信号各个部分

之间的关系, 并提取信号的主要特征<sup>[2]</sup>。

形态变换主要优点是计算简单和并行快速, 主要为布尔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 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(某个一维的集合)。则 $f(n)$ 和 $g(n)$ 分别为定义在 $F=\{0, 1, \dots, N-1\}$ 和 $G=\{0, 1, \dots, M-1\}$ 上的离散函数, 且 $N \geq M$ 。 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的腐蚀和膨胀分别定义为:

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

(1)

其中: $n=0, 1, 2, \dots, N-M$ ,  $m=0, 1, 2, \dots, M-1$ 。 $M$ 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。考虑电力系统的信号特点, 以及简化程序资源的需要, 本文选取的是直线形结构元素, 它与水平方向成 $0^\circ$ 角。因为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。

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, 这种变换使目标收缩, 孔洞扩张。作为对偶, 膨胀变换是一种扩张过程, 使目标扩张, 孔洞收缩。

### 1.2 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:

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

开闭运算均具有低通特性, 其组合可用作形态学滤波。在实际应用中, 对于电力系统这样的一维信号, 开运算主要是平滑并抑制信号正脉冲噪声, 闭运算则抑制信号负脉冲噪声。

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-open)滤波器。它们分别定义如下:

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

## 2 基于形态小波的行波消噪算法研究

### 2.1 线性组合形态学滤波器

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, 开-闭滤波器输出幅度偏小, 而闭-开滤波器的输出幅度偏大, 单独使用不能取得最好的滤波效果。为了有效地抑制电力系统故障时伴随的各种噪声, 采用一定的组合加权。对于对称分布的输入噪声, 通过相同的加权可以得到无偏差的输出, 但对于非对称分布的输入噪声, 两个滤波器算子不相同的加权平均能更好地去除偏差。

采用互补的形态算子 $f_{oc}$ 和 $f_{co}$ 通过取它们的平均值, 可以构造出线性组合滤波器, 线性组合滤波器的定义为:

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

### 2.2 小波消噪算法

硬阈值法进行小波消噪算法如式(5)所示:

$$WT = \begin{cases} WT, & |WT| > Th \\ 0 & |WT| \leq Th \end{cases} \quad (5)$$

式中: $WT$ 为小波系数,  $Th$ 为阈值。式(5)的含义为把信号的小波系数的绝对值和阈值进行比较, 小于或等于阈值的点变为0, 大于阈值的点保持不变。

硬阈值法小波消噪具体步骤如下:

① 信号的小波分解。选择适当的小波并确定小波的分解层次, 本文选用的db4小波, 分解层次为5, 然后对行波信号进行5层小波分解。

② 小波分解的各高频系数的阈值量化。对第1到第5层的每一层高频系数, 选择适当的阈值进行硬阈值量化处理。

③ 一维小波的重构。根据小波分解的第5层的低频系数和经过量化处理后的第1层到第5层的高频系数, 进行信号的小波重构。

### 2.3 基于形态小波的行波消噪

由于小波变换能敏感地检测到奇异点, 但不能去脉冲噪声, 而形态学滤波器能有效地滤除脉冲噪声, 且能同时保留原信号的全局和局部特征, 将二者结合形成的形态小波消噪算法可有效地消除电流行波中的白噪声和脉冲噪声信号。

基于形态小波进行输电线路行波消噪可分为两步, 首先应用小波硬阈值法去除白噪声, 然后应用线性组合形态学滤波器消除脉冲噪声。其算法框图如图1所示。

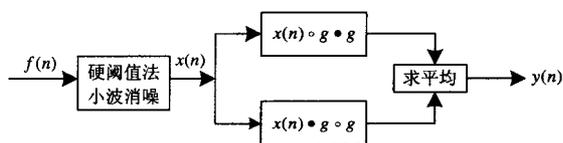


图1 形态小波消噪流程

Fig.1 Diagram of morphology wavelet reducing noise

## 3 仿真算例

为了验证算法并比较仿真结果, 采用故障行波波形, 故障系统仿真模型如图2所示。针对脉冲干扰和白噪声进行形态小波消噪和小波消噪算法的比分析。

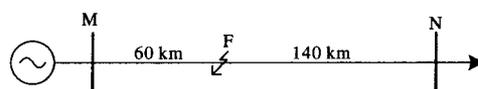


图2 仿真系统模型

Fig.2 Model of simulation system

采样频率为1 MHz, 设0.025 s在F点发生A相接地故障, 线路长度如图所示。图3为M侧观测到的 $\alpha$ 模量电流行波; 截取0.025~0.026 s之间1000  $\mu$ s的电流行波信号进行以下的分析, 将观测零点移至0.025 s, 如图4所示。

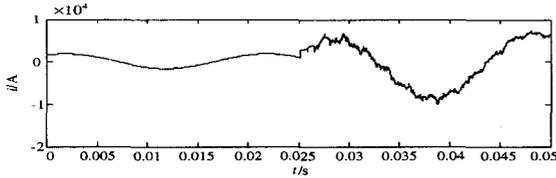


图3 故障行波局部展宽图

Fig.3 The local wave of the fault traveling wave

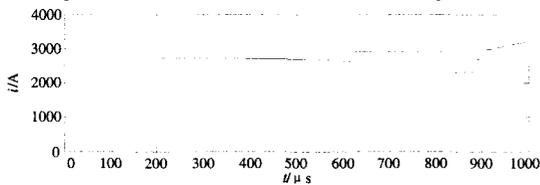


图4  $\alpha$  模量故障行波

Fig.4 The fault traveling wave of  $\alpha$  model

### 3.1 对脉冲噪声的滤除

图5给出了对图4的电流行波故障分量在100 $\mu$ s和150  $\mu$ s分别叠加了正、负脉冲信号后的波形如图5所示。

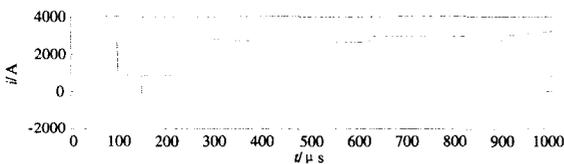


图5 叠加脉冲的行波信号

Fig.5 The fault traveling wave added by pulse

图6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, 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尺度才有明显地减小。

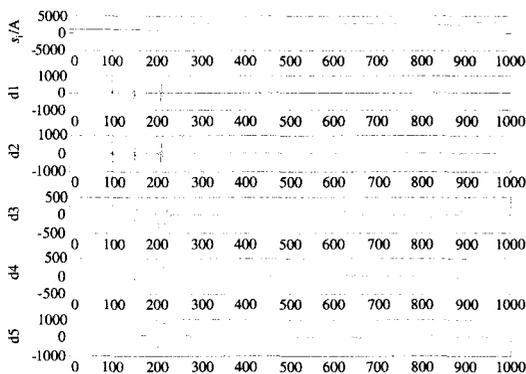


图6 行波1-5尺度小波分解

Fig.6 The traveling wave wavelet decomposition from 1<sup>st</sup> to 5<sup>th</sup> scales

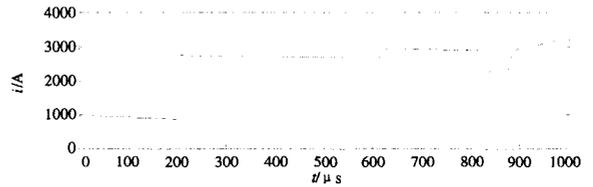


图7 形态滤波后的叠加正负脉冲的行波信号

Fig.7 The traveling wave added by pulse noise after morphology filter

低尺度下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、负脉冲幅值较大。该正、负脉冲是加在行波波头之前, 很可能将其误认为故障突变信号, 从而影响保护和测距误判。图7是对图5信号进行形态滤波后的结果, 图中的正、负脉冲影响已完全滤除, 但行波各梯度的斜率没有削弱, 滤波效果良好。

### 3.2 对白噪声的滤除

对原行波信号叠加白噪声, 在100  $\mu$ s和150  $\mu$ s分别叠加了正、负脉冲信号后的波形如图8。用硬阈值小波消噪、形态学消噪及形态小波消噪, 输出波形和原信号绘于同一坐标系中, 如图9~11所示。

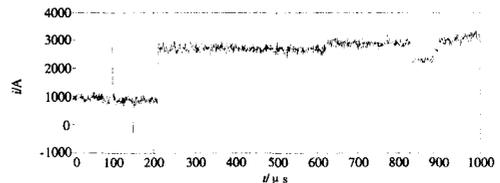


图8 叠加白噪声和尖脉冲的行波波形

Fig.8 The traveling wave added by pulse and white noise

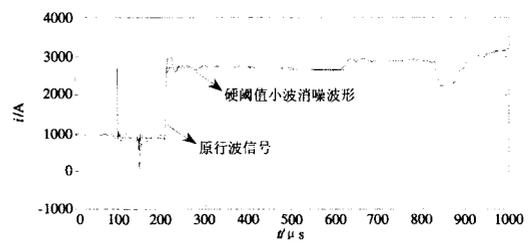


图9 硬阈值小波消噪效果

Fig.9 The fixed valve wavelet reducing noise effect

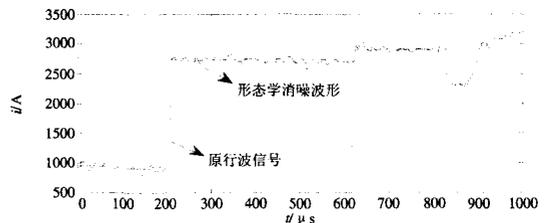


图10 形态学消噪效果

Fig.10 The morphology filter reducing noise effect

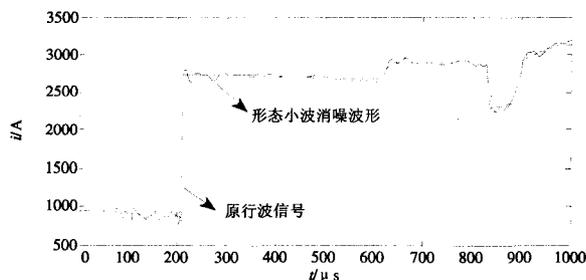


图11 形态小波消噪效果

Fig.10 The morphology wavelet reducing noise effect

比较去噪前后的波形,发现硬阈值小波消噪算法能够较好地滤除大部分噪声,但不能滤除尖脉冲。形态学消噪算法能够完全滤除尖脉冲的影响,较好的滤除大部分噪声,消噪效果优于硬阈值小波消噪法。而形态小波消噪算法不仅能够完全滤除尖脉冲的影响,在滤除白噪声方面,较单纯的小波消噪和形态学消噪波头平滑,较好的保持原信号形状,准确反映输电线路故障电流行波信号的突变时刻,为行波波头的准确检测提供了保证。

#### 4 结论

为了克服传统小波方法在抑制噪声方面的不足,引入数学形态学的理论。在故障行波上模拟噪声,Matlab 仿真结果证明形态小波在滤除脉冲干扰方面的优越性明显,在滤除白噪声方面略优于单纯小波和形态学消噪,在输电线路行波保护和行波故障测距中具有良好的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 岳蔚,刘沛.基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测

(上接第 35 页 continued from page 35)

#### 参考文献

- [1] IEC 61850, Communication Networks and Systems in Substation[S].  
 [2] 胡道徐,李广华.IEC 61850 通信冗余实施方案[J].电力系统及其自动化,2007,31(8):100-102.  
 HU Dao-xu,LI Guang-hua.Application of Redundant Communication Using IEC 61850[J].Automation of Electric Power Systems,2007,31(8):100-102.  
 [3] 孙一民,李延新,黎强.分阶段实现数字化变电站系统的工程方案[J].电力系统及其自动化,2007,31(5):90-93.  
 SUN Yi-min,LI Yan-xin,LI Qiang.A Grading Solution for Building Digital Station[J].Automation of Electric Power Systems,2007,31(5):90-93.  
 [4] 李九虎,郑玉平,古世东,等.电子式互感器在数字化

方法[J].电力系统自动化,2002,26(7):13-17.

YUE Wei, LU Pei. Detection of Power Quality Disturbances Based on Mathematical Morphology MM Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7):13-17.

- [2] 崔屹.图像处理与分析-数学形态学方法及应用[M].北京:科学出版社,2000.  
 CUI Yi. Process and Analysis of Image- The Method and Application of Morphological Method in Math[M]. Beijing: Science Press, 2000.  
 [3] 林湘宁,刘沛,刘世明,等.电力系统超高速保护的形态学一小波综合滤波算法[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.  
 [4] 胡昌华,张军波,夏军,等.基于 MATLAB 的系统分析与设计一小波分析[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. Analysis and Design Based on the System of Matlab-Wavelet Analysis[M]. Xi'an: Xidian University Press,1999.

收稿日期: 2008-02-26

作者简介:

康忠健(1971-),男,博士,副教授,从事电力系统分析与控制、电力系统故障检测与诊断和油田自动化设备开发及相关教学与科研工作;E-mail:kangzjzh@163.com

王升花(1979-),女,硕士,助教,研究方向电力系统故障检测与诊断;

樊建川(1982-),男,硕士研究生,研究方向电力系统故障检测与诊断。

变电站的应用[J].电力系统及其自动化,2007,31(7):94-98.

LI Jiu-hu,ZHENG Yu-ping, GU Shi-dong, et al. Application of Electronic Instrument Transformer in Digital Substation[J].Automation of Electric Power Systems,2007,31(7):64-98.

收稿日期: 2007-12-29; 修回日期: 2008-02-15

作者简介:

李益民(1966-),男,工学硕士,副教授,从事电力电子与电力系统自动化的教学与研究;

董张卓(1962-),男,博士,从事电力系统自动化的教学与研究;

王玲(1983-),女,硕士研究生,从事电子系统自动化的教学与研究。E-mail:wangling\_xust@126.com