

一种新的三端电气量行波测距方案

焦征南, 吕飞鹏, 胡亚平, 周 鑫

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:在现有的行波测距基础上,提出了基于数学形态学的三端电气量行波测距方案,先利用广义形态滤波器滤除现场信号中的噪声和脉冲信号,再利用综合数学形态梯度提取行波模板大值,快速准确检测出故障点。通过仿真验证了在选取合适的结构元素下,此方案是有效可行的。

关键词:数学形态学;广义形态滤波;综合数学形态梯度;行波测距

Abstract: On the basis of the existing travelling wave fault location, a new scheme of three-terminal travelling wave fault location based on mathematical morphology is proposed. Firstly, the general mathematical morphology is used to filter the noise and pulsing signal mixed in the wave signal, and then, the modulus maxima of synthetic mathematical gradient transform is used to find the fault location. The results of simulation verify this scheme is effective and feasible by selecting appropriate structural element.

Key words: mathematical morphology; general mathematical morphology filter; synthetic mathematical gradient; travelling wave fault location

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0054-04

0 引 言

在行波测距中,为了准确捕获故障行波波头到达时刻,采样频率往往取得很高,采样信号很容易受到各种噪声信号的干扰,此时需要运用较高灵敏度的检测工具,但高灵敏度的检测工具在准确检测行波波头的同时也放大了噪声信号。通常采用低通滤波方法抑制噪声信号。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,且他们在滤除噪声的同时会衰减行波波头的陡度^[1]。目前将小波理论应用于行波测距的研究较多,但小波变换在处理脉冲噪声时同样不理想,其结果相对于输入信号还会带来相位偏移和幅值衰减^[3]。

数学形态学是从集合论和积分几何学发展起来,作为一种新型的信号分析手段,已经在电力系统故障行波信号分析中得到应用^[2],文献[1]证明形态学滤波算法能有效滤除白噪声和脉冲噪声,而且不影响行波波头的陡度。形态变换只做一些逻辑运算和少量加减运算,相比傅立叶、小波变换具有更快的计算速度。

在现有行波测距基础上,提出了基于数学形态学

的三端电气量行波测距方案。利用广义形态滤波后,通过综合形态梯度变换提取故障行波波头模板大值,找出畸变点,确定故障位置。

1 数学形态学基本概念

数学形态学是一门建立在积分几何以及随机集论的基础之上的学科^[4],相对傅立叶和小波等积分变换而言,数学形态学是一种非线性分析方法,其对信号波形特征的研究不是将信号变换到频域空间处理,而是完全在时域中进行,它通过改变输入信号波形的几何特征对信号进行识别、重构及增强。数学形态学的优点在于他只做一些逻辑运算和少量加减运算,和傅立叶变换和小波变换相比具有更快的计算速度,其线性相位上的良好表现取得更好的滤波效果^[3]。在电力系统中,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。

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^[5]。因为电力信号一般为二维信号,所以下面只介绍一维情况下的形态变换即灰度形态变换。设 $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别表示一

维原始信号和一维结构元素,一维欧基里德空间记为 E 两个函数的定义域分别为 $D_f \subseteq E$ 和 $D_g \subseteq E$ 则结构元素 $g(x)$ 对数据 $f(x)$ 的灰度膨胀和腐蚀定义为

$$(\oplus g)(x) = \max\{f(x-z) + g(z) \mid (x-z) \in D_f \text{ 且 } z \in D_g\} \quad (1)$$

$$(\ominus g)(x) = \max\{f(x+z) - g(z) \mid (x+z) \in D_f \text{ 且 } z \in D_g\} \quad (2)$$

在灰度腐蚀和膨胀的基础上定义的形态开、闭运算为

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

$$(f \bullet g)(x) = (\oplus g \ominus g)(x) \quad (4)$$

利用上述四种基本运算,可进一步推导出用于行波测距的广义形态滤波器和综合形态梯度算子。广义形态滤波器能够对强干扰下的电力信号进行有效滤波处理,综合形态梯度算子可以用于突变信号检测。

2 广义形态滤波

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(正脉冲和噪声),闭运算能够弥补裂缝,滤除信号中的低谷(负脉冲和噪声)。但是形态开滤波器输出幅度偏小,而形态闭滤波器的输出幅度偏大,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,构成形态开-闭和形态闭-开滤波器。

$$OC(f(x)) = (f \circ g \bullet g)(x) \quad (5)$$

$$CO(f(x)) = (f \bullet g \circ g)(x) \quad (6)$$

形态开-闭和闭-开滤波器可同时滤除信号中的正、负脉冲噪声,但由于开运算的扩展性和闭运算的反扩展性,它们均存在统计偏移现象,此时开-闭滤波器输出幅度偏小,而闭-开滤波器的输出幅度偏大,在很多情况下,单独使用它们并不能取得最好的滤波效果。采用了形态开-闭和形态闭-开平均组合形式的广义数学形态滤波器。

$$H(f(x)) = \frac{OC(f(x)) + CO(f(x))}{2} \quad (7)$$

3 综合数学形态梯度

在腐蚀和膨胀的基础上定义基本数学形态梯度

(MG)。

$$G_{\text{md}} = (\oplus g)(x) - (\ominus g)(x) \quad (8)$$

由上式可知, MG 是原始信号 $f(x)$ 经结构元素 $g(x)$ 膨胀、腐蚀后的数学差分,是由结构元素定义域内的极大和极小值之差决定的,所以形态梯度的运算受结构元素的大小和原点位置的影响。

MG 运算是突现边缘信息的有效工具,可用来检测加于稳态信号之上的暂态信息。为了提高检测的灵敏度,文献 [3] 给出了一种多分辨形态梯度 (MMG),采用一种斜线型结构元素分别提取上升和下降边沿,利用多分辨思想逐层提取暂态信号。然而,利用多分辨形态梯度提取暂态分量,需选取多层不同的结构元素进行分析,此时要综合考虑这些层之间结构元素的方向、高度和窗宽的配合,因此其适应能力将会受到影响。

从理论上说,对原始信号进行一次综合形态梯度运算,形态膨胀和开运算的结果保留了负奇异信号,形态腐蚀和闭运算的结果保留了正奇异信号,两者进行差分,平稳输出部分抵消,就能得到全部的奇异信号。根据式 (1)、(2)、(8) 定义综合形态梯度检测算子如下:

$$G_{\text{mg}} = (f \circ g \oplus g)(x) - (f \bullet g \ominus g)(x) \quad (9)$$

4 结构元素选取

除了运算方式的组合外,结构元素 (SE) 的选取对形态滤波和信号检测结果有很大的影响。与小波分析的基函数选取类似,形态学分析的结构元素选取同样还没有针对具体应用背景的选择原则,要根据滤波后要保留的信号和要去除的噪声而设计,从而,对于何种 SE 比较适合处理何种具体的问题,需要一次次的试探和证明。在实际应用中,一维信号宜采用非封闭曲线,如直线 SE、斜线 SE、三角折线 SE 等。与此同时还应注意 SE 的长度,因为长度越长,形状越复杂,需要的计算量会快速的增加。经过反复试探,应用长度为 6 的菱形 SE 进行滤波;采用长度为 4、角度为 90 的直线 SE 进行行波模极大值提取,取得较好的结果。

5 三端电气量行波测距方法介绍

如图 1 所示电力系统。

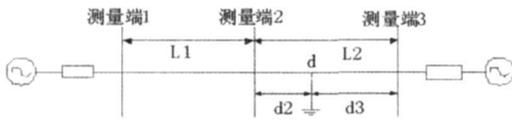


图 1 仿真模型

行波故障测距装置分别装于母线 1、2、3 端, 测量端 1 与 2 之间距离为 L_1 , 测量端 2 与 3 之间距离为 L_2 . 设故障点距测量端 2 的距离为 d , 距测量端 3 的距离为 d_3 , 采样频率为 f 时刻对应的采样样本序号为 n 故障发生时刻为 fn_0 , 当故障发生在 L_2 上 d 点时, 测量端 1、2、3 分别测到故障行波波头到达时间为 fn_1 、 fn_2 、 fn_3 , 设 L_1 、 L_2 线路参数基本相同, 则行波在两条线路上的传播速度 $v_1 \approx v_2 = v$ 有

$$\begin{cases} (fn_1 - fn_0)v = L_1 + d \\ (fn_2 - fn_0)v = d \\ (fn_3 - fn_0)v = d_3 \\ d_2 + d_3 = L_2 \end{cases} \quad (10)$$

解方程得故障距离为

$$d_2 = \frac{(n_2 - n_3)L_1}{2(n_1 - n_2)} + \frac{L_2}{2} \quad (11)$$

由上式可知, 故障距离只与故障行波波头到达测量端 1、2、3 的采样样本序号有关。

6 仿真研究

用 Matlab 建立如图 1 所示双电源 500 kV 系统模型。设距测量端 2 为 100 km 处发生 A 相接地故障, 故障发生时刻为 $t=0.004$ s 加入正负脉冲和噪声情况下, 用所提滤波和检测方法进行计算。采样频率 $f=1$ MHz 线路 L_1 、 L_2 分别为 200 km、150 km。线路结构参数为

- $R_1 = 0.026 \Omega / \text{km}$
- $R_0 = 0.1946 \Omega / \text{km}$
- $X_1 = 0.279 \Omega / \text{km}$
- $X_0 = 0.650 \Omega / \text{km}$
- $C_1 = 0.0127 \mu\text{F} / \text{km}$
- $C_0 = 0.0085 \mu\text{F} / \text{km}$

以测量端 1 处检测波形为例, 对比图 2、3 可见通过广义形态滤波, 掺杂在故障行波中的脉冲和噪声信号被有效去除, 行波波头的陡度保持不变。

测量端 1、2、3 处故障行波滤波后, 经综合数学形态梯度变换结果如图 4 所示。

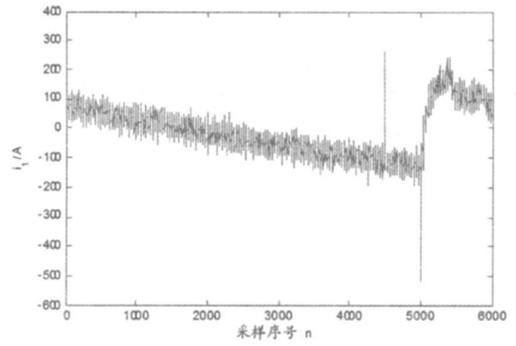


图 2 1 端原始故障波形

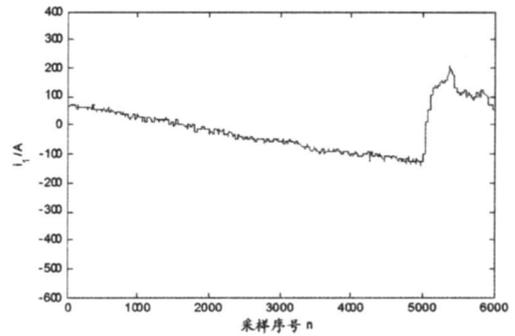
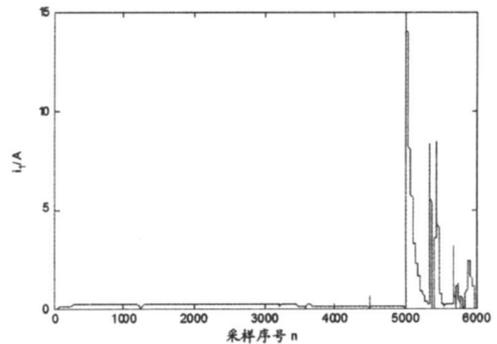
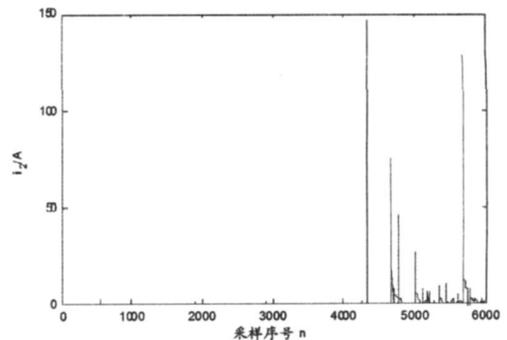


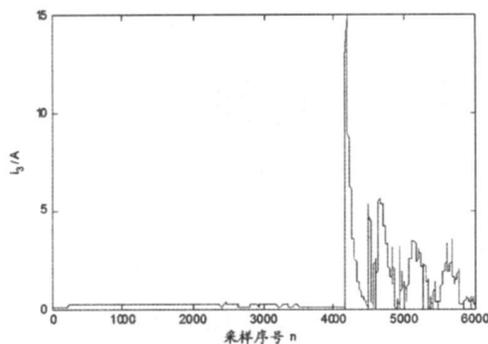
图 3 图 2 信号经广义形态学滤波后波形



(a) 1 端故障波形变换后结果



(b) 2 端故障波形变换后结果



(c) 3端故障波形变换后结果

图 4 三端故障波形经综合数学形态梯度变换后结果

由图 4 可见,经综合形态梯度变换能够准确检测出故障行波波头到达时刻。故障发生时,测得采样序号 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为 5 000、4 339、4 173,带入式 (11) 中,求得故障距离为 100.341 4 km,相对误差为 0.34%。不同故障距离仿真结果见表 1,不同故障类型仿真结果见表 2,不同接地电阻仿真结果见表 3。

表 1 A相接地不同故障距离时仿真结果

故障点位置 /km	测距结果 /km	相对误差 /%
20	19.955 5	0.22
40	39.888 9	0.27
80	79.748 8	0.31
100	100.341 4	0.34
120	119.592 6	0.33

表 2 100 km处不同故障类型时仿真结果

短路类型	测距结果 /km	相对误差 /%
AG	100.341 4	0.34
BC	99.962 2	0.03
ABG	99.962 2	0.03
ABCG	99.962 2	0.03

表 3 100 km处不同接地电阻时仿真结果

接地电阻	测距结果 /km	相对误差 /%
20	100.341 4	0.34
50	100.341 4	0.34
100	100.341 4	0.34
200	100.341 4	0.34

通过表 1~3 可以看出,运用提出的故障测距方案可以准确检测出故障点,且不受故障距离、故障类型和接地电阻的影响。

7 结 论

所提出的基于数学形态学的三端电气量行波测距方案,可以有效分离故障信号与噪声和脉冲信号,快速准确找出故障点,适用于复杂环境下故障测距。这种故障测距方案与结构元素的选取密切相关,为了得到更准确的检测精度,如何选择一种更有效的结构元素,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 全玉生,李学鹏,杨俊伟,等. 数学形态学算子在电力系统突变信号检测中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(3): 1—4.
- [3] 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.
- [4] 崔屹. 图形处理与分析——数学形态学方法及应用 [M]. 北京:北京科学出版社, 2000.
- [5] Heijmans H J A M. Morphological Image Operators [M]. New York: Academic Press, 1994.
- [6] 束洪春,李义,宣映霞,等. 对不受波速影响的输电线路单端行波法故障测距的探讨 [J]. 继电器, 2006, 34(8): 1—6.
- [7] 张峰,梁军,张利,等. 基于三端行波测量数据的输电线路故障测距新方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8).
- [8] 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, (5): 55—57.
- [9] 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.

作者简介:

焦征南 (1985—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究;

吕飞鹏 (1968—),男,博士,教授,从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究。

(收稿日期: 2009—06—10)

(上接第 16 页)

- [7] 电力工业局,贵州省气象科研所编著. 覆冰文集 [C]. 贵州电力技术, 1992.
- [8] 云南省气象科学研究所编著. 云南高海拔地区电线覆冰问题研究 [C]. 云南:云南科技出版社, 1993.
- [9] 戚大安,刘星灿. 多措并举,积极防治电网覆冰灾害 [J]. 国家电网, 2007, (1): 53—55.

- [10] 苑吉河,蒋兴良,易辉等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状 [J]. 高电压技术, 2004, (1): 6—9.

作者简介:

赵永生 (1982—),男,硕士,从事高电压技术、输电技术的研究。

王富荣 (1952—),男,副教授,长期从事高电压技术、输电线路运行维护的研究。

(收稿日期: 2009—10—29)