数学形态学在输电线路雷击类型识别中的应用综析

输电线路的可靠运行对电力系统的安全稳定具有重要作用。为了能够尽量避免输电线路受到雷击侵害，对实际运行中的输电线路所遭受的雷击跳闸事故进行雷击故障类型识别是基础性研究内容。针对这一内容，首先分析了数学形态学基本算子、适合于提取稳态量的形态滤波算法；适合于提取暂态量的形态梯度算法。其次对雷击和故障特征进行了分析，对直击雷中的反击和绕击进行了对比总结，对数学形态学的形态滤波算法和形态梯度算法在雷击识别中的应用进行了较为深入的提炼，表明数学形态学在输电线路雷击防护的应用前景广泛。

李字明[1] 刘宝柱[2]/1. 国网黑龙江省电力有限公司 2. 华北电力大学

李字明/高级工程师

关键词/Keywords
输电线路·
数学形态学·
雷击识别·
形态滤波算法·

0 引言

随着电力系统的发展，输电电压等级升高，输电距离延长，远远高于地面架设，遭受雷击的机会增加，给供电可靠性带来了严峻考验。一般来说，由于巨大雷电流通过杆塔等流入到线路中，会造成线路故障，断路器动作跳闸。对雷击后续发展结果进行深入分析研究，对于防雷是具有重要意义的基础性工作。

总结雷击类型规律，可将其分为直击雷和感应雷。当直击雷发生时，巨大雷电流注入线路，并向雷击线路两侧以行波的形式传播；由于在母线处会重新分配能量，从而行波会发生反射和折射现象，形成谐波。这些谐波会在一定程度上影响雷击类型的准确识别，从而对故障判断及切除带来困扰。因此，根据落雷形式，对雷电流中的高次谐波进行滤除，识别直击雷的暂态特性，对完善输电线路防雷治理有重要意义。

在非线性信号分析方法中，数学形态学是一种有效方法[1]。数学形态学在一定程度上不存在时滞、非线性相移等问题，算法简便易行且物理意义明确，因此在电力系统中受到了很大关注[2,3]。该方法关注所要处理信号的局部特征，对所处理的信号波形在时域中完成。

数学形态学用一整套变换（运算）、概念和算法来描述所处理信号的基本特征，其对随机信号也能很好地处理。将数学形态学基本方法形成的滤波器用于雷击信号分析，能够保留原有雷电流信号的局部特征和全局特性，有效地克服雷电流行波信号中的高频噪声干扰，对雷击信号进行波头特征提取和稳态信号处理，有效识别雷击类型。

1 数学形态学方法概述

1.1 几种基本运算

数学形态学的两种基本运算是膨胀和腐蚀。与此同时开运算、闭运算对于一维信号的处理也经常被用到。

设$f(x)$是定义域为$D_f=\{0,1,\cdots,N-1\}$的一维原始信号，$g(x)$是定义域为$D_g=\{0,1,\cdots,M-1\}$的结构元素，并定义其原点在0处，且有$M<N$。则信号$f(x)$关于$g(x)$的膨胀和腐蚀分别定义为

$$(f\oplus g)(x)=\max_y\{f(x-y)+g(y)\} \quad (1)$$

$$(f\Theta g)(x)=\min_y\{f(x+y)-g(y)\} \quad (2)$$

式中，符号Θ为腐蚀运算；$\oplus$为膨胀运算。

腐蚀变换是一种属于收缩型的变换方法。该变换使研究对象孔洞扩张，肢

中国知网 https://www.cnki.net

体收缩。膨胀变换则为一种扩张型的分析过程。膨胀变换能够让研究对象孔洞收缩、肢体扩张。将腐蚀和膨胀组合，能产生两个新的重要形态学变换算子，即开运算和闭运算

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

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

式中，$\circ$和$\bullet$分别为开运算和闭运算符号。

在雷击信号分析处理中，经雷电采集装置得到的故障电流为一维信号。开运算一般用来对研究对象进行平滑、消除散点和毛刺；闭运算用来修补填平孔洞，将两个邻近部分进行连接。开运算主要是对雷击电流信号进行平滑、抑制雷击电流信号中存在的峰值噪声干扰；闭运算可以抑制电流信号波谷谐波噪声。闭运算和开运算的组合，则可以构成相应的滤波器，进而可对雷电信号进行其他噪声信号的滤除。

1.2 结构元素的选择

结构元素是数学形态学的重要组成部分。为了实现噪声的滤除，结构元素的选取对雷击信号处理结果影响很大。一般的结构元素包括直线型、多边形等。相对而言，结构元素形状简单，其滤除信号的能力就稍差，但分析速度会很快。

考虑到工程计算的要求和雷击电流信号的特点，一般选取水平方向的直线形结构元素。在进行雷击信号噪声消除时，希望能保持雷击信号的典型形状特征，也能尽量地消除其他噪声信号干扰。对于含有丰富的暂态成分的信号，当需要进行直流量类型信号提取时，直线型结构元素能很好地进行信号提取，降低噪声的综合效果明显。

1.3 形态滤波算法

开运算能去掉不相符的凸起部分，保留相符的凸起特征。闭运算可以填充不相符的凹陷区间，保留相符的凹陷部分。它们两者均具有单边滤波器的特征[4]。

对于所要分析的雷电流信号而言，将开、闭运算进行合理地组合即可形成其他滤波效果的形态学滤波器，达到双边滤波效果。闭运算具有扩张特点，导致闭开CO滤波器的输出信号数值值增大；开运算具有收缩性，从而导致开闭OC滤波器的输出数值减小，即两种滤波器都可能存在统计偏差，直接影响到形态滤波器的噪声抑制性能。为降低此类偏差程度，通常可以将开闭滤波器OC和闭开滤波器CO进行适当组合，对信号进行适当的扩张和收缩，使分析结果能够更接近原始信号特征。

定义如下。

1）闭开。$CO(n)=(f\bullet g\circ g)(n)$。

2）开闭。$OC(n)=(f\circ g\bullet g)(n)$。

设一维的雷电流信号$f(n)$，由可以分解为原始信号$x(n)$和干扰噪声信号$s(n)$，即

$$f(n)=x(n)+s(n)\ (n=1,2,\cdots,N) \quad (5)$$

则OC滤波器和CO滤波器的组合算法为

$$y(n)=\frac{OC(f(n))+CO(f(n))}{2} \quad (6)$$

1.4 多刻度形态梯度算法

形态梯度是由扁平结构元素定义域内的极大值和极小值之差决定的。对于要分析的雷击信号而言，形态梯度可实现所分析信号的边沿特征处理。水平直线型结构元素的腐蚀运算和膨胀运算，能够有效提取信号局部极值的效果。针对电力系统雷击暂态信号，文献[5]设计了一种多分辨形态梯度技术。应用这种技术可以有效地抑制雷击电流中的直流稳态分量，同时能进一步地突出雷击电流波形的暂态特征。

基本形态学梯度（MG）定义为：原始采样信号$f(x)$分别经结构元素$g(x)$腐蚀和膨胀后的数字差分，表达形式为

$$G_{grad}(f)=(f\oplus g)(x)-(f\Theta g)(x) \quad (7)$$

为了能够提取暂态波形中的上升和下降边沿，可采用一种可变并具有不同原点位置的扁平结构元素

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

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

式中，g^{+}、g^{-}分别用来处理雷击电流信号中上下边沿的提取。宽度为$l=2^{1-\alpha}$，α为分析层数，l_1为结构元素第一层的初始宽度。在g^{+}和g^{-}中的下划线采样点g，分别表示它们的原点位置。

利用基本形态学梯度和可变扁平结构元素，可形成多分辨形态梯度（MMG）

$$\rho_{g^{+}}^{\alpha}=(\rho_{g^{+}}^{\alpha-1}\oplus g^{+})(x)-(\rho_{g^{+}}^{\alpha-1}\Theta g^{+})(x) \quad (10)$$

$$\rho_{g^{-}}^{\alpha}=(\rho_{g^{-}}^{\alpha-1}\Theta g^{-})(x)-(\rho_{g^{-}}^{\alpha-1}\oplus g^{-})(x) \quad (11)$$

中国知网 https://www.cnki.net

$$\rho_g^{\alpha} = \rho_{g^+}^{\alpha}(x) + \rho_{g^-}^{\alpha}(x) \quad (12)$$

式中，$\rho_{g^+}^{\alpha} > 0$和 $\rho_{g^-}^{\alpha} < 0$ ，其符号与暂态波形中的上升和下降边沿相对应。因此，式中 ρ_g^{α} 不仅能够指示出雷击信号变化的极性，而且还能够定位雷击信号波形中的暂态突变。

2 基于数学形态学的输电线路故障性雷击识别方法

2.1 不同的行波特征分析

由于雷击未造成故障而引起的电流行波特征[5]如下。

1）发生绕击时，三相电流相差较大；雷击相电流大于其他相，该相极性与其他相相反。

2）三相电流及其模分量电流围绕时间轴正负交替变化，并随时间衰减，最终消失。

3）对于雷击档距中央和杆塔两种情况时，三相电流大小相近、波形一致，线模分量明显小于零模分量。

故障行波的特征[5]如下。

1）在较短的时间内，故障相电流行波变化趋势总体单调；若过零，则其行波低频分量能量较低。

2）故障相电流行波能量明显增强，显著高于其他相的行波能量。

2.2 故障行波的数学形态学识别方法

文献 [5] 提出了一种对雷击线路后的非故障行波与故障行波识别方法：故障行波在较短时间内总体单调，可以用一条直线对故障行波进行拟合。若拟合出来的直线与行波特征一致，则为故障；当拟合的结果为其波形为围绕时间轴正负交替变化时则为非故障，拟合出来的直线与其波形很不一致。因此该文定义了一种“波形一致性系数”，以此进行区分。基本步骤简述如下。

1）检测线路电流行波，进行相模变换，计算零模分量与线模分量。

2）对4个模分量0 α β γ 进行数学形态学变换：得到变换后的曲线，取其变化量最大时刻，它对应的时间认为是初始行波出现的时刻T_{ini}。

3）寻找初始行波能量最大的线模分量。从该量的初始行波开始时刻T_{ini}起，每 100 μs 计算一次行波的平均值，得到n个平均值 $A_{vr}(1)$，$A_{vr}(2)$，…，$A_{vr}(n)$。

4）对 n 个平均值 $A_{vr}(1)$，$A_{vr}(2)$，…，$A_{vr}(n)$用直线$y=ax+b$ 进行拟合，得到a和b。

5）当$a>Kc$时认为所检测到的行波是故障行波，否则为非故障行波。Kc的取值需结合实际系统数据进行大量仿真计算得出。

3 基于数学形态学的输电线路绕击和反击识别方法

绕击和反击是两种典型的雷击侵害。两者雷击后造成的过电压特征，主要不同之处在于在雷电流波形的波头部分。数学形态学中的形态滤波器能有效地滤除电压波形中尺度较小的干扰信号，使突变点的形态特征更明显。因此形态滤波器能够更有效地提高绕击和反击识别的准确率。

3.1 绕击和反击特征分析

3.1.1 反击电磁暂态特征

反击过程包括杆塔电位升高和绝缘子串击穿两个过程[6]。在绝缘子串击穿之前的一段时间内，雷电流通过杆塔和避雷线流入大地。由于杆塔电位上升而导致绝缘子串击穿，雷电流将流入输电线路，线路中电流将发生大幅跃升。

3.1.2 绕击电磁暂态特征

雷电击中导线发生绕击时，大量雷电流直接流向线路，输电线路电压大幅上升。当绝缘子串两端承受的电位差大于绝缘子串冲击闪络电压时，绝缘子串发生闪络，导线通过杆塔对地放电，绕击时导线中的电流行波全部为雷电流分量[6]。

3.2 基于MMG 的过电压波头特征分析

由于形态梯度MMG 能很好地抑制稳态分量的影响，使暂态信号特征更突出。当所要分析的雷电流波形的奇异点经过滤波器前，滤波器系数模值较小且相对平稳；而当奇异点进入滤波器时，MMG表现为振荡式增加，在经过滤波器中心时，MMG的系数出现一个局部极大值对应该奇异点；当奇异点渐渐移过滤波器时，MMG 系数恢复到最初的水平。从这个观点可以看出，MMG 系数的局部极大值准确地定位了处理信号的突变点。

因此文献 [8] 基于 MMG 变换后局部极大值及定位的避雷器放电时间对雷电过电压进行特征

中国知网 https://www.cnki.net

提取。

1）发生反击和绕击时，在避雷器的击穿和放电时刻，电压均会出现一次大的极性变化，所以其MMG变换后会出现两次或两次以上的局部极大值，而前面两次的极大值对应的就是避雷器的放电起始时刻。

12）反击电压初始波头呈正极性，基于MMG提取的局部极大值要远远大于绕击提取结果。提取 MMG变换的局部极大值F和前两次局部极大值间的时间T作为识别反击和绕击过电压的有效特征量。

3）反击时，由于雷电流较小及干扰持续时间短，过电压在形成短时振荡后恢复正常，所以相对应的 MMG 变换后只会在线路刚遭受雷击时出现一个局部模极大值，并且其幅值 小于1 000。

3.3 绕击和反击智能识别

为了获得雷击信号故障特征，需要从多个角度联合进行分析，借助可有效蕴涵雷击后电磁暂态特征的状态量来进行绕击与反击识别。文献［8］采用数学形态学分析雷击特征，提出了4种能够进行绕击与反击识别的特征向量（如表1所示），并给出了各个特征向量的数值区间。

表1 综合识别特征量

特征量	物理表达
T	MMG变换定位的避雷器放电时间
F	MMG变换后的形态梯度最大值
P	电压波形原始波头极性
I	绝缘子闪络前的电磁耦合电流

上述4个特征量的典型分布区间如表2所示。

表2 综合识别特征量的典型区间值

特征量	反击典型区间	绕击典型区间
T	67~81	34~54
F	3200~5000	1 000~2 000
P	正极性	负极性
I	行波幅值最大值的5%	0

根据数学形态学变换可到T、F、P和I值，当有其中的3个特征量位于给定的典型区间内时，可以判定属于该类型的雷击故障。

参考文献

[1] 唐长青，黄诤. 数学形态学方法及其应用[M]. 北京：科学出版社，1990.

[2] 邹力. 数学形态学在电力系统继电保护中的应用研究[D]. 武汉：华中科技大学，2006.

[3] 林湘宁，刘海峰，鲁文军，等. 基于广义多分辨形态学梯度的自适应单相重合闸方案[J]. 中国电机工程学报，2006，26(7)：101-106.

[4] 赵春晖. 数字形态滤波器理论及其算法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，1998.

[5] 司大军，束洪春，陈学允，等. 输电线路雷击的电磁暂态特征分析及其识别方法研究[J]. 中国电机工程学报，2005，25（7）：64-69.

[6] 杜林，戴斌，司马文霞，等. 架空输电线路雷电过电压识别[J]. 高电压技术，2010，36（3）：590-597.

[7] 谢博. 输电线路雷电过电压的识别分类方法研究[D]. 重庆：重庆大学，2010.

（收稿日期：2015-05-15）EA

作者简介

李宇明（1968-），男，硕士，高级工程师，主要从事送电、带电作业、电力电缆专业技术工作。

刘宝柱（1974-），男，博士，副教授，主要研究方向为电力系统分析与控制。

中国知网 https://www.cnki.net