

# 介损在线监测数据趋势提取方法的研究

王楠, 律方成, 刘云鹏, 李燕青

(华北电力大学, 河北 保定 071003)

## Study on Trend Extraction Method for On-line Monitoring Data of $\tan\delta$

WANG Nan, LU Fang-cheng, LIU Yun-peng, LI Yan-qing

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**摘要:** 基于介损在线监测数据的变化规律,建立了数据趋势模型,提出了基于小波变换和形态滤波的两种趋势提取方法,两种方法均能有效地克服数据中周期性因素和各种加性噪声的影响,还原数据的基本变化趋势。通过实例验证了这两种方法的有效性。

**关键词:** 介质损耗角正切; 在线监测; 趋势; 相对比较; 小波变换; 形态滤波

**中图分类号:** TM835

**文献标识码:** A

**Abstract:** Based on the regularity of on-line monitoring data of  $\tan\delta$ , the trend of the data is modeled. Two methods of wavelet transform and morphological filter used to extract trend are proposed in this paper. A practical example verifies the effectiveness of both methods, which can remove the influences of periodical factors and additional noise among the data, and reproduce the original trend of the data sequence.

**Key words:**  $\tan\delta$ ; on-line monitoring; trend; comparison; wavelet transform; morphological filter

## 1 前言

当前,随着不断引入先进的传感器、计算机、网络等相关技术,电容型设备绝缘在线监测技术的应用水平有了显著的提高。但是目前的研究工作大多偏重于信号提取、计算方法和抗干扰等方面,基于数据的分析研究较少,缺乏行之有效的诊断方法。尽管已认识到离线数据与在线数据之间的有效性差异很大,但由于在线运行经验统计不足,在线监测技术应用水平不一,合理的、公认的在线监测规程仍未出台。

在线监测是一个动态的测量过程,可以实时地通过测得的介质损耗角正切( $\tan\delta$ ,简称介损)反映电容型设备的绝缘状况。考虑到绝缘的老化、受潮是一个缓慢的增长变化模式,以分析某段时间内的介损变化趋势进行故障诊断较为合理,可以克服仅仅

依据单个数据阈值比较时测量随机误差的影响<sup>[1-3]</sup>。但是,在线监测是在复杂的现场条件下进行的,不仅会受到信号传输过程中难以避免的同步偏差、传输错误和信道噪声等随机干扰的影响,绝缘特性还会受到环境温湿度的影响,信号传感器(尤其是穿心式传感器)角差特性也与温度有关,加之操作时产生的强烈电磁干扰影响等等,造成介损数据稳定性、重复性差,难以直接观察出变化趋势。

目前主要采用相对比较的方法提高数据的稳定性,便于趋势分析,但是需要一定的应用条件<sup>[4]</sup>。笔者在研究介损在线监测数据变化规律性的基础上,基于滤波思想将小波变换和形态滤波用于趋势提取。实例分析表明,两种方法均能有效地克服数据中周期性因素、白噪声和脉冲性噪声的影响,还原数据的基本变化趋势。

## 2 介损在线监测数据变化规律性分析

在线监测的介损数据虽然波动性大,但其变化还是在一定范围内的,满足相应的变化规律。考虑到设备绝缘的老化是一个非常缓慢的过程,所以数据的总体发展趋势是缓慢的增长趋势。但由于影响因素如环境温度、湿度而呈现出日周期性、季节周期性变化,反映到介损数据上也存在某些周期性变化规律。此外,信号传输、现场电磁干扰的影响随机性很强,使数据出现锯齿状波动和剔点,可以认为数据中还存在一定量的附加白噪声与脉冲性噪声。

基于以上思想,结合数据频谱分析<sup>[4]</sup>,可以建立介损组合变化趋势模型来描述绝缘特性:

$$\tan\delta(t) = \tan\delta_0(t) + \Delta\tan\delta_w(t) + \Delta\tan\delta_r(t)$$

其中: $\tan\delta(t)$ 为实际介损在线监测序列; $\tan\delta_0(t)$ 反映绝缘基本状况,呈缓慢递增趋势,可以考虑近似为 $\tan\delta(t)$ 的直流分量; $\Delta\tan\delta_w(t)$ 反映气象等慢变因素日周期性、季节周期性变化对绝缘特性的影响,可以考虑为 $\tan\delta(t)$ 的低频分量; $\Delta\tan\delta_r(t)$ 反映特殊天

气、不确定因素、随机干扰的影响,可以考虑为  $\tan\delta(t)$  的剩余噪声分量。可见,如果能够从介损在线监测数据中提取出  $\tan\delta_0(t)$  的变化趋势作为诊断的依据,将大大提高诊断的有效性。

### 3 基于滤波思想的趋势提取方法

由频域分析可知,绝缘基本特性  $\tan\delta_0(t)$ , 气象因素影响  $\Delta\tan\delta_w(t)$ , 干扰影响  $\Delta\tan\delta_i(t)$  的频率特性差别很大, 可以考虑选择合适的低通滤波器, 将数据中外界因素影响分量、干扰分量滤除, 得到反映绝缘基本特性的  $\tan\delta_0(t)$  变化趋势。另外, 从时域的角度, 可以认为  $\tan\delta_0(t)$ ,  $\Delta\tan\delta_w(t)$  和  $\Delta\tan\delta_i(t)$  的变化周期差异很大,  $\Delta\tan\delta_w(t)$  的周期远远小于  $\tan\delta_0(t)$  的周期, 而  $\Delta\tan\delta_i(t)$  的周期又远远小于  $\Delta\tan\delta_w(t)$  的周期。因此, 选择合适宽度的平滑滤波器, 同样能够实现数据的消噪。但是介损在线监测序列不满足平稳性条件, 是一时变序列, 常规的平稳序列分析方法如 FFT, 3 $\sigma$  准则等无法进行有效的处理。此外, 干扰分量主要由白噪声、脉冲性噪声和有色噪声组成, 噪声的频带很宽, 传统的数字滤波处理方法也有着明显的局限性。为有效解决以上问题, 从频域和时域两个方面, 提出了基于小波变换和形态滤波的两种滤波方法应用于趋势提取。

#### 3.1 基于小波变换的趋势提取方法

近年来, 小波变换已成为处理非平稳信号强有力的工具, 小波变换在频域和时域同时具有局部性, 能够计算某一特定时刻的频率分布。通过多分辨率分析(MRA), 能将各种交织在一起的不同频率组成的混合信号分解成不同频率的信号块<sup>[5]</sup>。此外, 白噪声、有色噪声等宽带噪声随着小波分解层数的增加而迅速衰减。因此, 利用小波构造低通滤波器不仅解决了傅立叶变换只能处理全局信息的问题, 还可以克服传统数字滤波方法处理宽带噪声明显的局限性, 能在低信噪比的情况下灵活、有效地进行滤波。

多分辨率分析的概念及离散二进制小波处理过程详见文[4]。采用多分辨率分析将数据分解到不同尺度上的尺度系数与小波系数, 认为一般随机干扰、白噪声和不确定因素对  $\Delta\tan\delta_i(t)$  的影响主要集中在高频段, 因而集中分布在较低尺度的小波系数中, 在较高尺度的小波系数中已有了较大的衰减; 温湿度等慢变因素对  $\Delta\tan\delta_w(t)$  的影响频率相对较低, 应存在于较大尺度小波系数中; 而  $\tan\delta_0(t)$  应存在于最大尺度的尺度系数中。从频域的角度可以理解, 随着层次的增加, 尺度系数中含有的高频信息会随之逐渐减少, 最后剩下的就是序列的发展趋势。为保证有效地滤除周期性分量与噪声, 分解的层数  $L$  必须足够大, 满足:

$$F_s/2^L < F_0 \quad \text{即} \quad L > \log_2(F_s/F_0) - 1$$

式中:  $F_s$  为数据的采集频率,  $F_0$  为低通滤波器的截至频率。如一介损序列一天采集 48 点, 需滤除日周期分量, 则  $L > \log_2 48$ , 最小取 6。考虑到实际中影响因素的周期也是有一定变化的, 在实际处理中可适当增大  $L$  值。

#### 3.2 基于形态滤波的趋势提取方法

形态滤波技术是近年来得到普遍关注的一种非线性滤波方法, 并已在电力系统继电保护行波去噪<sup>[6]</sup>、电能质量检测<sup>[7]</sup>等方面得到成功应用。形态滤波的基本思想是基于信号的几何结构特性, 利用预先定义的结构元素对信号进行匹配或局部修正, 以达到提取信号、抑制噪声的目的。从数学形态学的角度理解, 可以认为由于环境周期性因素  $\Delta\tan\delta_w(t)$  的影响和各种噪声  $\Delta\tan\delta_i(t)$  的存在, 使得本应平缓、光滑的介损在线监测数据曲线发生了很大的形变, 因而能够利用形态运算构成低通滤波器, 恢复  $\tan\delta_0(t)$  的基本形态特征。形态滤波器是由基本的形态变换组合而成的, 为了便于分析问题, 首先简要介绍一维情况下的几种基本数学形态变换。

膨胀与腐蚀是最基本的形态变换。膨胀变换是一种扩张变换, 这种变换使目标肢体扩张、孔洞收缩。而腐蚀变换是膨胀变换的对偶运算, 所以是一收缩过程, 使肢体收缩、孔洞扩张。设输入信号  $f(n)$  和序列结构元素  $g(n)$  分别为定义在  $D_f = \{0, 1, \dots, N-1\}$  和  $D_g = \{0, 1, \dots, M-1\}$  上的离散函数, 且  $N \geq M$ 。则  $f(n)$  关于  $g(n)$  的膨胀和腐蚀分别定义为:

$$(f \oplus g)(n) = \max\{f(n-m) + g(m) \mid (n-m) \in D_f, m \in D_g\} \quad (1)$$

$$(f \ominus g)(n) = \min\{f(n+m) - g(n) \mid (n+m) \in D_f, m \in D_g\} \quad (2)$$

一般情况下, 膨胀与腐蚀不是互为逆运算, 所以它们可以级连结合使用, 而产生新的形态变换, 这就是开运算与闭运算, 它们也是数学形态学中的重要运算。先腐蚀后膨胀就构成了开运算, 而先膨胀后腐蚀就构成了闭运算。由式(1), (2)的定义可得开闭运算的表达式如下:

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

$$(f \bullet g)(n) = (f \oplus g) \ominus g(n)$$

通常, 形态开、闭运算用于形态滤波, 它们以不同的方式平滑信号, 形态开可以抑制信号中的峰值(正脉冲)噪声, 而形态闭可以抑制信号中的低谷(负脉冲)噪声。

为了同时抑制信号中的正、负脉冲噪声, 采用相同尺寸的结构元素, 通过以不同顺序级连开闭运算, 构造了一类形态开-闭和闭-开滤波器<sup>[8]</sup>。其定义如下:

$$OC(f(n)) = (f \circ g \bullet g)(n)$$

$$CO(f(n)) = (f \bullet g \circ g)(n)$$

但是, 由于开运算的扩展性和闭运算的反扩展

性,开-闭和闭-开滤波器均存在统计偏移现象,此时开-闭滤波器的输出幅值偏小,而闭-开滤波器的输出幅值偏大,在很多情况下,单独使用很难取得最好的滤波效果。为减弱这种输出偏移,可以取这两个对偶运算的均值构成组合滤波器<sup>[9]</sup>,其输出如下:

$$y(s)=[OC(f(s))+CO(f(s))]/2$$

采用形态滤波提取介损在线监测数据趋势的效果很大程度上取决于结构元素的选取,结构元素起到滤波窗的作用,对窗内的数据平滑并使之具有和结构元素相同的形态特征,因此结构元素的形状与大小对形态学运算产生决定性的影响。为消除数据中周期性因素  $\Delta \tan \delta_w(t)$  的影响和各种噪声  $\Delta \tan \delta_r(t)$  的存在,可以认为相对于  $\tan \delta_0(t)$ ,  $\Delta \tan \delta_w(t)$  也是一种脉冲干扰,其脉冲宽度较之  $\Delta \tan \delta_r(t)$  产生的脉冲宽度要大很多。采用形态学滤波来滤除脉冲干扰,结构元素的窗宽  $M$  应大于数据中最大脉冲噪声的宽度。因此,扩展滤波的范畴,使得结构元素的时域窗宽大于  $\Delta \tan \delta_w(t)$  的周期,不仅可以滤除  $\Delta \tan \delta_w(t)$ ,由于  $\Delta \tan \delta_r(t)$  的周期远小于  $\Delta \tan \delta_w(t)$ ,  $\Delta \tan \delta_r(t)$  也将得到抑制,有效地提取了趋势项  $\tan \delta_0(t)$ 。另外,要考虑结构元素形状的选取取决于滤波处理后要保持的波形,为还原介损数据平滑、缓慢的变化趋势,在保证某种凸性的同时,采用圆形或椭圆形结构元素较为合适。

#### 4 实例分析

图 1(a)为山东某变电站 2 号变 B 相套管介损连续 50 天的在线监测曲线。直观地分析在线数据可以发现,介损的变化既有周期性又有随机性,但周期不均匀且波动幅度大,还存在大量的噪声干扰,使得曲线发生了很大的形变,很难直接看出介损的发展趋势。采用小波变换和形态滤波方法来提取数据的变化趋势。小波函数选用分频能力较强而计算量相对较小的 Daubechies 4 (db4) 小波,最大分解层数  $L$  为 6;形态滤波的结构元素选择圆形结构,宽度  $M$  为 50,大于每天 48 点的数据采集数,处理的效果见图 1(b),(c)。原始的介损序列中的日周期性分量与噪声分量已被有效的抑制,数据变化平滑,但其中还有一些较宽的波动,主要由天气变化所致,通常天气变化的影响周期有可能要在一天以上。将分解层数  $L$  扩大到 7,形态滤波结构元素的宽度  $M$  增加到 100,再对图 1(a)数据进行处理,处理效果见图 1(d),(e)。可见,处理后的数据已经没有大的波动,变得更为缓慢、平滑,其趋势代表了绝缘基本特性。

#### 5 讨论

对比图 1(b),(c),(d)和(e),可以发现数据的

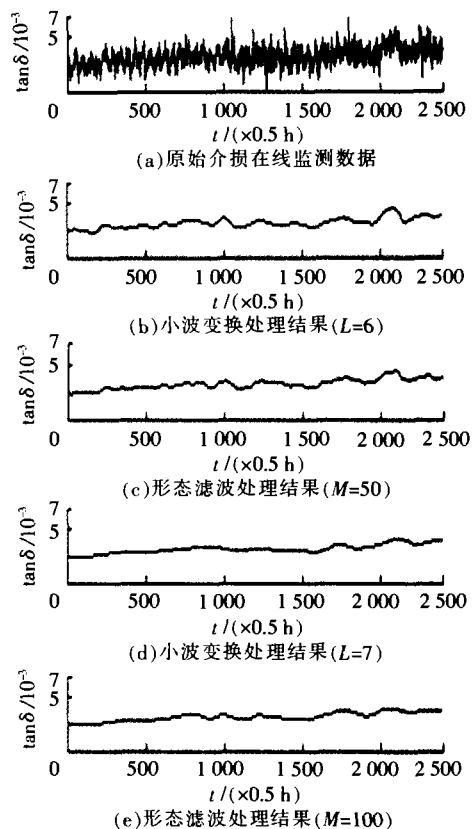


图 1 采用小波变换和形态滤波处理的介损在线监测数据

变化很一致,即图 1(b),(d)上数据有增长趋势,在图 1(c),(e)相同时间段也是增长变化。本质上讲,小波变换是表明处理对象在各频段上的分量与小波函数系的相似程度,而形态滤波则是利用结构元素来匹配处理对象中与之相似的部分。可见两种方法虽然解决方式一为频域分析,一为时域分析,但在对频域与时域统一的基础上,均存在相似逼近的思想,进一步证明了两方法均能在介损在线监测数据变化规律的基础上解决问题,同时也使得处理效果很接近。此外,两种处理方法还存在另外一个较大的相似之处<sup>[6]</sup>:小波变换的处理效果取决于小波函数的设计和选择,通常每种小波的应用都有一定的针对性,同时在选择的时候基本采用试探法,没有一种通用的原则;与此类似,结构元素的设计与选择也对处理效果起着决定性作用,但目前也没有设计形态滤波器结构元素的具体方法。当然,对比两种方法处理的效果也不可能完全一样,仍存在一些偏差,除了方法原理上的差异外,小波函数和结构元素的选择也是一个重要的影响因素。

小波变换主要是以卷积为主的浮点运算,而形态滤波则主要是以加减为主的布尔运算,因而可以在上位机很容易地利用高级语言实现以上的算法程序。此外,上位机接收的介损数据周期一般都很长(通常在 0.5 h 以上),因此两种算法完全能满足介损在线监测实时性的要求。

在应用中需要注意的一点是,采用小波变换实现滤波,其频带是固定的,即只取决于每天的监测点数,因而在具体分析时,由于带宽限止,在滤除某一周期性分量的同时也可能滤除了另一需要保留的周期性分量,造成信息丢失;而采用形态滤波,结构元素的宽度选择是任意的,可以事先估计出抑制对象的周期,使结构元素的宽度略大于该周期宽度即可,不会影响到数据中周期更大的分量,因而处理较为灵活。但是,对于去除一些大的周期性因素影响,由于结构元素宽度要增大很多,使得处理运算量大大增加;而对于小波变换,分解计算量是逐层减半的,且频带的划分也较宽,更适合用于长期的趋势分析。

## 6 结语

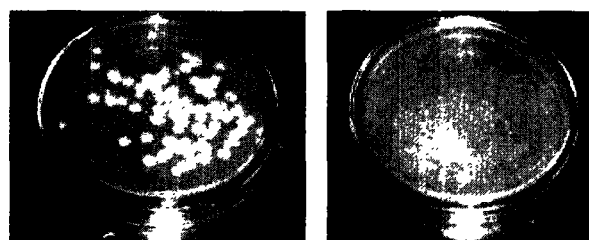
笔者在研究介损在线监测数据规律性的基础上,提出采用滤波思想实现趋势提取。从频域分析的角度介绍了小波变换,从时域的角度介绍了形态滤波这两种方法,及其在介损在线监测数据趋势提取中的应用。通过对实际的介损在线监测数据进行处理,验证了两种方法的有效性。同时也对这两种方法本质上的联系与适用性进行了深入的探讨。

(上接第4页)

进行培养,用以与处理后的试样进行对比。

### 4.2 灭菌试验结果

上述处理后与未处理的试验在培养 24 h 后的菌斑见图 6。



(a)未处理

(b)处理 1 min 后

图 6 处理前后的菌培养后的菌斑图(稀释 1 000 倍)

图 6(a)的芽孢杆菌菌斑很多,芽孢杆菌数目为  $10^5$  数量级;图 6(b)则已无芽孢杆菌。也就是说,芽孢杆菌在经过纳米二氧化钛等离子体放电催化处理 1 min 后,其杀灭效率即达 100%。

## 5 结语

(1)纳米二氧化钛等离子体放电催化能有效降解甲醛。

## 参考文献:

- [1] 尚勇,杨敏中,严璋,等.高压电力设备绝缘状态检测判据选择[J].中国电力,2001,34(4):53-56.
- [2] 史保壮.在线监测电容型设备绝缘方法研究[J].高电压技术,2002,28(4):24-25.
- [3] 黄新红,廖瑞金,胡雪松,等.“综合相对测量法”于介质损耗在线检测中的应用[J].高压电器,2001,37(12):1-4.
- [4] 王楠,律方成.基于小波变换的介损在线监测数据趋势提取[J].高电压技术,2003,29(3):31-33.
- [5] 陈继东.小波分析应用于在线监测中信噪分离的研究[J].电网技术,1999,23(11):54.
- [6] 林湘宁,刘沛,刘世明.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.
- [7] 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.
- [8] P Maragos, R W Schafer. 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.
- [9] 崔屹.图象处理与分析——数学形态学方法及应用[M].北京:科学出版社,2000.

作者简介:王楠(1977-),男,河南洛阳人,博士研究生,主要从事电气设备在线监测与故障诊断方面的研究工作。

(2)纳米二氧化钛等离子体放电催化能有效杀灭细菌,1 min 内对芽孢杆菌的杀灭率达 100%。

## 参考文献:

- [1] 马晓敏,王怡中.二氧化钛光催化氧化杀菌的研究及进展[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(5):15-18.
- [2] 薛向东,金奇庭.水处理中的高级氧化技术[J].环境保护,2001(6):13-15.
- [3] 尚静,杜尧国,徐自力.  $TiO_2$  纳米粒子气-固复相光催化氧化 VOCs 作用的研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2000,1(3):67-76.
- [4] 陈士夫,赵梦月,陶跃武,等.玻璃纤维负载  $TiO_2$  光催化降解有机磷农药[J].环境科学,1996,17(4):33-35.
- [5] 葛飞,易晨俞,陈鹏,等.  $TiO_2$  固定膜光催化降解甲胺磷农药废水[J].中国给水排水,2001,17(10):9-11.
- [6] Kayano Sunada, Yoshihiko Kikuchi, Kayuhito Hashimoto, et al. Bactericidal and Detoxification Effects of  $TiO_2$  Thin Film Photocatalysts[J]. Environmental Science and Technology, 1998, 32(5): 726-728.

作者简介:杨学昌(1945-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统与设备状态监测和故障定位以及电工环保技术。