

基于小波变换和自相关分析的电力电缆故障测距

王星海¹, 许珉¹, 谢志棠², 王钰³

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2 香港理工大学电机系, 香港; 3 郑州市电业局, 河南 郑州 450053)

摘要: 随着电力电缆应用的增多,对电缆故障测距的精度要求也不断提高。文中分析了行波法故障测距存在误差的原因,在此基础上引入小波变换和自相关分析。运用小波变换进行信号滤波和奇异性检测,运用自相关分析为前者提供约束条件,从而实现故障的自动精确测距,并给出了实现该程序的流程图。试验结果表明,此方法可取得较高的故障测距精度。

关键词: 电力电缆; 故障测距; 小波变换; 自相关分析

中图分类号: TM855 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)12-0032-04

0 引言

电力电缆具有安全、可靠、美化城市布局等优点,在当前的电力系统中获得了越来越广泛的应用。但在运行中由于各种因素的影响,电力电缆也会发生故障,快速排除故障对提高电力系统供电可靠性和稳定性具有决定性作用。

目前,行波法是电力电缆故障测距中广泛应用的方法。根据测试原理和所用设备不同,行波法可以分为低压脉冲反射法、直闪法和冲闪法等。低压脉冲反射法适用于低阻故障,并可测试电缆的全长和行波在电缆中的传播速度。直闪法适用于高阻故障。冲闪法主要用于直闪法不易测试的泄漏性高阻故障,也可以对闪络性高阻故障进行有效的测试。由于实际中高阻及闪络性故障约占整个电缆故障总数的 90% 以上,所以冲闪法在其中应用最广的方法。该方法又可以采用电压取样和电流取样两种方式测试,并且以电压取样测量居多。其故障信号波形如图 1 所示。

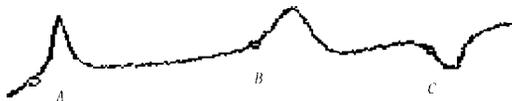


图 1 故障信号波形

Fig 1 Waveform of fault signal

取前 2 个周期, A、B、C 分别为发射脉冲、放电脉冲和反射脉冲的起始点。由绝缘介质击穿放电理论可知,击穿过程需要一定的时间,所以 AB 之间存在一个击穿延迟时间 T , 实际故障点距离应以 BC 为准。则故障距离 L_x 为:

$$L_x = \frac{(C - B)V}{2f_s} \quad (1)$$

式中: L_x 为故障距离, 单位: m; V 为行波速度, 单位: m/ μ s; f_s 为信号采样频率, 单位: MHz。

现场测试中由于中间接头的反射干扰,故障性质和部位的不同,得到的故障波形可能会千差万别。除此之外,还不可避免地存在如采集系统本身固有的高频干扰,使用现场的空间电磁干扰等,严重时可能淹没放电脉冲和反射脉冲的起始点。这一切都给操作人员的分析判断带来困难,造成测距误差较大^[1]。因此,在冲闪法测距的基础上做进一步研究,引入小波变换和自相关分析,以期能实现无需人工干预的自动测距技术有广泛的应用前景。

1 二进小波变换和信号的奇异性检测理论

1.1 基本概念

在连续小波变换中,如果只对尺度参数进行二进离散 ($a = 1/2^j, j \in Z$), 而平移参数保持连续变化 ($b \in R$), 则小波变换取得半离散的形式:

$$(Wf)\left(\frac{1}{2^j}, b\right) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \{2^{j/2} \psi(2^j(t-b))\}^* dt \quad (2)$$

这种小波变换称为二进小波变换。对应的小波函数 $\psi(t)$ 称为二进小波。它应满足稳定性条件。

二进小波变换由于只是对尺度参数进行了离散,而变量 t 仍保持连续变化,因此,它不破坏信号的平移不变性。 $f(t)$ 具有某种性质时,它的小波变换也具有这种性质。此外,二进小波变换是一种超完备的表达,从而对小波函数的要求大大降低。譬如可以选择平滑函数的导数作为小波函数^[3]。

B 样条小波有很多优良的性质。首先,每个 B 样条函数及其各阶导数都有显式表达式,便于理论分析和计算。一般利用 $(m + 1)$ 阶 B 样条函数的一

阶导数来构造小波函数。其次,它具有最小支集,B样条小波的小波变换具有线性相位。相比较三次B样条小波,五次B样条小波和Haar小波也可以作为检测小波。五次B样条小波光滑性高,重构效果好,但其支撑集大,定位效果变差,也使计算量加大。Haar小波光滑性低,平滑噪声能力差,但其支撑集小,定位效果好。三次B样条小波兼顾平滑噪声和奇异性检测两个方面,这是选用三次B样条小波进行二进小波变换的主要原因。表1给出了相应的分解和重构滤波器系数。

表1 滤波器系数

n	h_n	g_n	k_n
-2	0	0	-0.007 812 5
-1	0.125	0	-0.054 685
0	0.375	2.0	-0.171 875
1	0.375	-2.0	0.171 875
2	0.125	0	0.054 685
3	0	0	0.007 812 5

公式(2)中的小波都是定义在无穷区间上的,而实际问题常常是有限区间的。如电力系统中采样的故障信号。一般处理方法大致有两种:将有限区间上的数据向区间外延拓,如补零方法、对称延拓方法、平滑方法以及周期延拓方法;构造区间小波,如区间周期小波折叠小波、平均插值小波等。一般来说,这些方法对不在端点附近的点都能较好地处理,但对于边界点及其附近点来说都存在很大的误判。针对本文处理电缆故障波形的实际情况,采用对称延拓方法处理信号以减小边缘效应即可满足故障测距的需要。

基于Mallat的小波分解算法实质上就是用两个性能优良的滤波器把信号不断二分到各个尺度上,重构算法则是逆过程。如果把某一尺度上的特定频带的分量置0,则重构的信号就不会再包含这一特定频带的分量,从而达到滤波的功能。

1.2 信号的奇异性检测理论

首先给出小波变换的模极大值定义。设 $W_a f(t)$ ($a=2^j$)是函数 $f(t)$ 的小波变换,在尺度 a 下,在 t_0 的某一邻域内,对一切 t 有 $|W_a f(t)| \leq |W_a f(t_0)|$,则称 t_0 为小波变换的模极大值点, $W_a f(t_0)$ 为小波变换的模极大值。小波变换的模极大值点与信号的突变点是一一对应的。

一个突变信号在其突变点一定是奇异的。信号的奇异性可以用Lipischitz指数来描述。定义如下:

设 $0 < \alpha < 1$,在点 t_0 若存在唯一常数 K ,对 t_0 的邻域 I 使得下式成立 $|f(t) - f(t_0)| \leq K|t - t_0|^\alpha$,则称函数 $f(t)$ 在 t_0 处的Lipischitz指数是 α 。如果函数 $f(t)$ 在 t_0 是可微的,则 $\alpha = 1$;如果函数在 t_0 间断,则 $\alpha = 0$;如果函数在 t_0 为冲击函数,则 $\alpha = -1$ 。

信号在某一点的Lipischitz指数非负,则在小波变换中对应的模极大值随尺度的增大而增大;在某一一点的Lipischitz指数为负,其模极大值随尺度的增大而衰减。利用小波变换模极大值在小波分解各个尺度之间的传播特性,可以精确定位故障信号波形的突变点^[4]。

2 自相关分析

在数字信号处理中,经常要研究两个信号的相似性,或一个信号经过一段延时后自身的相似性,以实现信号的检测、识别与提取等。相关函数是研究这一类问题的有力工具。

信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的互相关函数定义为:

$$R_{xy}(r) = \sum x(n)y(n+r) \quad (3)$$

式(3)表示 $x(n)$ 将保持不动而 $y(n)$ 左移 r 个采样点后两个序列对应相乘再相加的结果。如果 $x(n) = y(n)$,式(3)定义的互相关函数就变成自相关函数。

在实际工程中,采样信号 $f(t)$ 的长度是有限的, $t=0, 1, 2, \dots, (N-1)$,对于不同的 r 值,实际上只有 $(N-r)$ 项 $f(t)$ 与 $f(t+r)$ 的乘积,上式用 $(N-r)$ 除,可得采样信号 $f(t)$ 的自相关函数:

$$R_f(r) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=0}^{N-r-1} f(n)f(n+r) \quad (4)$$

$r = 0, 1, \dots, N-1$

由数字信号处理的有关知识可知,周期信号的自相关函数也是周期性的,并且和原信号同周期。利用自相关函数可以检测原信号中隐藏的周期性^[5]。

3 基于小波变换和自相关分析的故障测距原理

3.1 预设故障范围

因为故障距离不会超过测试电缆的全长,所以根据全长预设故障范围不仅可以避免不合理的结果出现,同时又可以使采样得到的故障信号长度取值适当,最大限度地节省存储空间,减少不必要的计算。

3.2 信号的滤波处理

要实现准确测距的关键是BC的精确测定,解

决该问题的方法之一是提高系统采样频率^[6]。但同时也不可避免地会采集到高频噪声。通过高速 A/D 采集到故障信号 $f(t)$, 为实现精确测距, 利用小波变换 Mallat 算法在第 3 尺度上重构得到故障信号 $f(t)$ 。相比于故障信号 $f(t)$, $f(t)$ 不仅滤除了高频噪声和系统白噪声, 同时又保持了故障信号的基本特征。

3.3 信号的自相关分析

使用冲闪法得到的故障信号 $f(t)$ 在经过小波变换消噪后得到了 $f(t)$, 它保持了原有的突变特性, 近似为一衰减的周期信号。对此做自相关分析, 可得到与 $f(t)$ 同周期的自相关函数 $R_f(r)$ 。考虑到故障距离为 $f(t)$ 的第 2 个周期, 即放电脉冲和反射脉冲之间的距离, 所以取自相关函数 $R_f(r)$ 的第 2 周期长度 L 作为在 $f(t)$ 定位放电脉冲与反射脉冲的约束条件, 即两者的距离不超过 L 。

3.4 放电脉冲与反射脉冲的定位

由于反射脉冲变换较缓, 在较低尺度上小波变换模极大值与一些缓慢变化部分的模极大值易于混淆, 而其在较大尺度上的模极大值将逐渐增大。因此, 小波分解的最大尺度, 主要考虑到反射脉冲的可靠检测, 实际上分解到第 5 尺度即可实现故障放电脉冲与反射脉冲的精确检测^[7]。为排除边缘效应和发射脉冲所对应的模极大值的影响, 从第 3 个模极大值开始搜索, 先搜索得到第 5 尺度上模极大值最大点 B_5 , 从此点起, 在范围 L 之内, 搜索得到模极大值最大点 C_5 。之所以在范围 L 内搜索主要是避免故障波形第 3 周期及其后续波形在小波变换中也有可能出现较大的模极大值点, 干扰对 C_5 的判断。由于突变点的模极大值具有传递性, 第 4 尺度上在 B_5 和 C_5 的值的附近搜索得到 B_4 和 C_4 。同理依次在第 3、2、1 尺度上找出 B_n 和 C_n ($n=3, 2, 1$)。最后将 B_1 和 C_1 代入式 (1), 即可计算出故障距离。

3.5 程序流程图

图 2 为基于小波变换和自相关分析的故障测距算法流程图。根据该流程图可以编写出自动测距程序。

4 实例分析

某电缆绝缘材料为油浸纸, 故障属泄漏性高阻故障。先采用低压脉冲反射法测试电缆全长, 预设故障范围为 1.5 km。再使用冲闪法得到的故障信号波形如图 3。采用三次 B-样条小波函数, 在第 3 尺度上分解重构消噪后的信号波形如图 4。把重构

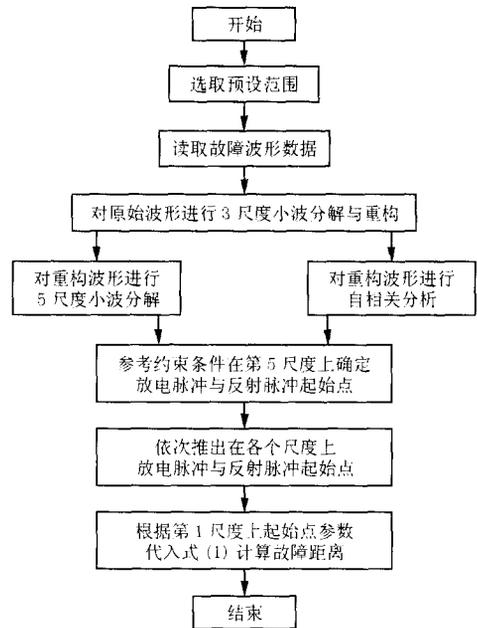


图 2 基于小波变换和自相关分析的故障测距算法流程图

Fig 2 Flow chart of fault location based on wavelet transform and autocorrelation analysis

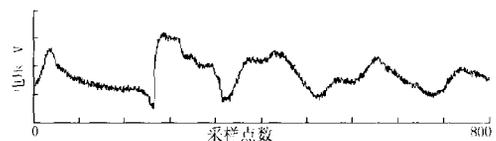


图 3 故障信号波形

Fig 3 Waveform of fault signal

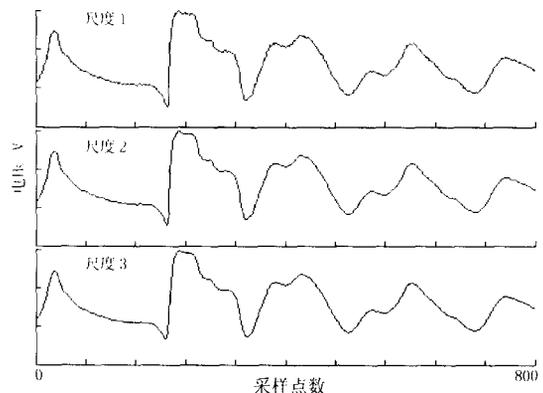


图 4 重构信号波形

Fig 4 Waveform of wavelet-reconstructing signal

信号做自相关分析得到约束条件 L , 如图 5。用同一小波对重构信号在 5 个尺度上分别求模极大值, 如图 6。最后根据约束条件, 由程序自动搜索得到 B_n 和 C_n ($n=4, 3, 2, 1$)。

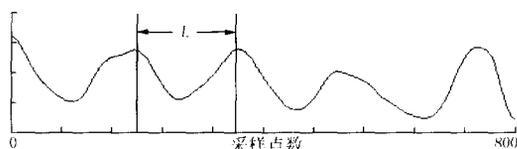


图 5 重构信号自相关分析

Fig 5 Autocorrelation analysis of wavelet-reconstructing signal

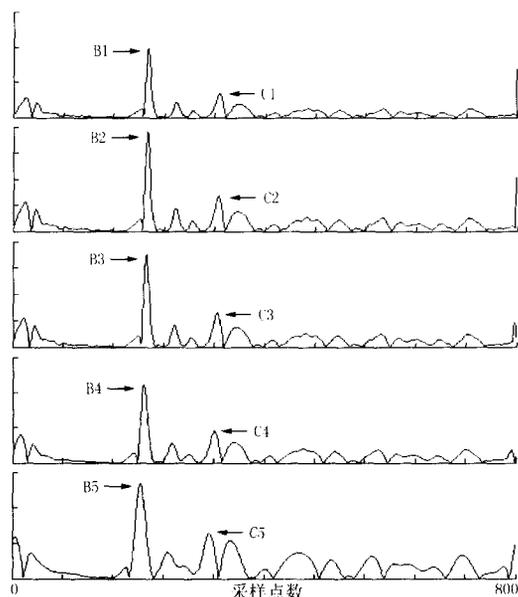


图 6 重构信号的模极大值

Fig 6 Module maxima of wavelet-reconstructing signal

由程序得到 $(C_1 - B_1)$ 为 110, 代入式 (1)。此外行波速度 v 取 $160 \text{ m}/\mu\text{s}$, 信号采样频率 f_s 为 40 MHz , 最后计算出故障距离 220 m 。而实际故障距离为 217.6 m , 误差小于一个采样间距, 满足要求。

5 结论

由于测距过程中存在各种干扰, 使得电力电缆故障测距是一个非常复杂的问题且难度较大, 通常要花很长时间才能准确地找到故障点。本文首先利用自相关分析, 消除部分干扰, 为定位放电脉冲与反射脉冲的起始点提供约束条件。之后再利用模极大值理论精确定位起始点, 以实现故障距离的精确测量。基于上述两点, 使电力电缆故障测距完全由程序实现成为可能, 也为自动、准确和高智能测量提供一种新方法。

参考文献:

- [1] 徐丙垠, 李胜祥, 陈宗军. 电力电缆故障探测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
XU Bing-yin, LI Sheng-xiang, CHEN Zong-jun Power Cable Fault Location Technique [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [2] 范毅, 谢俊, 杜泽明. 小波变换在电缆故障定位中的应用 [J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 9-10.
FAN Yi, XIE Jun, DU Zeming The Application of Wavelet Transform in Cable Fault Location [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 9-10.
- [3] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
YANG Fu-sheng The Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [4] 程正兴. 小波分析算法与应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
CHENG Zheng-xing Algorithm and Application of Wavelet Analysis [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.
- [5] 徐科军. 信号处理技术 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2001.
XU Ke-jun Signal Processing Technology [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2001.
- [6] 牟龙华, 刘建华. 电力电缆故障测距方法的基本工作原理 [J]. 继电器, 1999, 27(4): 22-24.
MU Long-hua, LIU Jian-hua Basic Work Principle of Cable Fault Location [J]. Relay, 1999, 27(4): 22-24.
- [7] 张正团, 文峰, 徐丙垠. 基于小波分析的电缆故障测距 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 49-52.
ZHANG Zheng-tuan, WEN Feng, XU Bing-yin Wavelet Analysis Based Power Cable Fault Location [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(1): 49-52.

收稿日期: 2004-09-23; 修回日期: 2004-10-29

作者简介:

王星海 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统监视与控制; E-mail: lshy2@163.com

许珉 (1956 -), 男, 副教授, 从事电力系统监视与控制方面的研究;

谢志棠 (1955 -), 男, 副教授, 从事电力系统分析与稳定控制方面的研究。

Cable fault location based on wavelet transform and autocorrelation analysis

WANG Xing-hai¹, XU Min¹, C. T. Tse², WANG Yu³

(下转第 47 页 continued on page 47)

5 结语

本文探讨了状态诊断技术对电气设备智能化的重要意义,分析了诊断专家系统在状态诊断技术应用中的特点。专家系统在设备诊断中发挥越来越大的作用,但是专家系统非常依赖于人的经验。当外界环境变化时,旧的规则可能已经不适用,而新的情况会不断出现。所以在以后的实际运行当中,专家系统还要不断修改旧规则,适时增加新规则,随着环境的变化及时更新,真正做到智能化诊断。

参考文献:

- [1] 尤龙. 智能化电器和智能化开关柜的现状与发展[J]. 西北电力技术, 2003, (4): 23-26
YOU Long Present Situation and Prospect of Intelligent Apparatus and Switchgear[J]. Northwest Electric Power, 2003, (4): 23-26
- [2] 张红先, 陆佳政, 曹一家. 状态监测中专家系统的开发[J]. 湖南电力, 2003, 23(2): 21-23
ZHANG Hong-xian, LU Jia-zheng, CAO Yi-jia Development of Expert System for Condition-based Maintenance [J]. Hunan Electric Power, 2003, 23(2): 21-23
- [3] Cepin M, Marko B. A Dynamic Fault Tree[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, (75): 83-91
- [4] 麻秀范, 鲍海, 张粒子, 等. 智能化供电设备状态检修

决策支持系统设计[J]. 东北电力学院学报, 2002, 22(2): 43-44.

MA Xiu-fan, BAO Hai, ZHANG Li-zi Design of Intelligent Condition Based Maintenance Decision Support System for Power Supply Equipment[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2002, 22(2): 43-44.

- [5] 褚卫华, 李岳, 温熙森. 机械设备智能监测与诊断系统的研究与实现[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(2): 285-287.

ZHU Wei-hua, LI Yue, WEN Xi-sen Research and Implementation of an Intelligent Fault Diagnostic System Applicable to Mechanical Equipment[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(2): 285-287.

- [6] Giarratano J, Riley G 专家系统原理与编程[M]. 北京:机械工业出版社, 2000

Giarratano J, Riley G Principle and Program of Expert System[M]. Beijing: China Machine Press, 2000

收稿日期: 2004-10-14; 修回日期: 2005-01-20

作者简介:

廖力清(1965-),男,教授,从事电力系统自动化、智能电器方面的研究;

曹强(1979-),男,硕士研究生,从事电力系统分析、智能电器方面的研究。E-mail: caq2000@sina.com

Application of diagnosis expert system in switchgear condition monitoring

LIAO Li-qing, CAO Qiang, LI NG Yu-hua, CAI Su-xiong
(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Condition monitoring is an important content of intelligent switchgear, while intelligency gradually becomes an important tendency of switchgear development. First, the important meaning of intelligent condition monitoring is discussed, then some key technologies of switchgear condition monitoring with diagnosis expert system is analysed. Finally, an example of temperature monitoring is introduced to illustrate the process building of the diagnosis expert system.

Key words: diagnosis expert system; switchgear; condition monitoring; intelligent

(上接第 35 页 continued from page 35)

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. Department of Electric Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;

3. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450053, China)

Abstract: With the increasing of power cable application in transmission and distribution system, the higher demand to cable fault location accuracy is necessary. The error for cable location used in the traditional impulse-flesh experiment is analyzed and wavelet transform and autocorrelation analysis are introduced into the traditional impulse-flesh experiment in this paper. Signal filtration and singularity detection can be realized by wavelet transform, restriction can be achieved through autocorrelation analysis. Furthermore, the principle of automatic fault location and the flow chart of program can be realized by the method presented previously. The result of real experiment shows that the method has enough accuracy of power cable fault location.

Key words: power cable; fault location; wavelet transform; autocorrelation analysis