

# 应用图像边缘检测方法在线监测输电线路覆冰厚度研究

王小朋, 胡建林, 孙才新, 杜林

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 讨论了用基于小波的图像边缘检测方法在线监测输电线路覆冰厚度的原理, 提出了一种新的输电线路导线与绝缘子覆冰厚度的在线监测方法, 即通过对安装在高压铁塔上的摄像机和图像采集卡获得的导线与绝缘子覆冰图像进行实时处理, 提取其边界轮廓来测量导线与绝缘子上的覆冰厚度。主要对测量系统中的图像处理过程步骤作了说明, 重点论述了通过提取边界轮廓来测量覆冰厚度的算法的实现, 并在实验室的人工气候室中进行了试验验证。试验结果表明, 该输电线路覆冰厚度在线监测方法测量精度高, 监测可靠, 可应用于高压输电线路覆冰厚度的在线监测。

**关键词:** 输电线路; 覆冰厚度; 在线监测; 图像处理; 边缘检测

中图分类号: TM764.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0069-05

## On-line Monitoring of Icing-thickness on Transmission Line with Image Edge Detecting Method

WANG Xiao-peng, HU Jian-lin, SUN Cai-xin, DU Lin

(State Key Laboratory of Transmission & Distribution Equipment and Power System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The principle of icing-thickness on-line monitoring of transmission line based on image edge detecting through wavelet transform is described, and a new method of on-line monitoring icing-thickness on transmission line is proposed. In this method, the pictures of iced transmission line and insulators taken by the camera on iron tower are processed immediately to extract the edges of transmission line and insulators, thus icing-thickness can be gained. The processing detail of the pictures in the monitoring system is discussed, and the implementation of the image edge extracting algorithm for calculating icing-thickness is described. An experiment in artificial climate chamber is conducted to verify the method, and the result shows that the proposed method performs well in accuracy and reliability, which infers the method can be used to on-line monitor icing-thickness on transmission line.

**Key words:** transmission line; icing-thickness; on-line monitoring; image processing; edge detecting

## 0 引言

在输变电系统中, 输电线路的覆冰现象十分普遍。覆冰可引起导线舞动、倒杆、断线及绝缘子闪络等重大事故, 严重威胁电力系统的安全运行, 并造成巨大的经济损失<sup>[1-3]</sup>。例如 2008 年春节前后中国南方发生大面积的冰雪灾害, 共造成 36 740 条 10 kV 及以上电力线路、1 743 座变电站停运, 各电压等级线路杆塔倒塌及损坏 97 万多基, 导致 1 亿多人口停电, 国家电网和南方电网直接经济损失分别为 104 亿

和 50 亿元, 由停电造成的间接经济损失以及社会影响更是难以估计。

目前, 为了掌握输电线路的覆冰情况, 传统的做法是在重覆冰区域设置覆冰观测哨所, 架设模拟导线。此法原理简单, 易于操作, 但由于覆冰观测哨所多建在崇山峻岭之中, 这就提高了成本, 增大了危险性, 而且由于影响输电线路覆冰的因素非常多<sup>[4]</sup>, 该方法无法准确地反映输电线路的真实覆冰厚度。近年来出现的输电线路覆冰的遥测方法实现了覆冰厚度的在线检测<sup>[5]</sup>。该方法首先通过安装在输电线路上的各种传感器获得导线的重力变化、杆塔绝缘子

收稿日期: 2009-07-21

作者简介: 王小朋(1982), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路状态参数在线监测。

的倾斜角、导线舞动频率以及线路现场的温度、湿度、风速、风向、雨量等信息,然后再通过建立数学模型近似计算出当前的导线等效覆冰厚度。该方法测量装置和原理均比较复杂,而且由于该方法是通过建立一定的数学模型(对实际问题进行了简化),再经过模拟分析的方法得出当前的导线覆冰厚度,这样得出的覆冰厚度与所选取的数学模型有很大的关系,模型不同,得出的覆冰厚度值可能相差很大。

笔者提出一种新的输电线路覆冰厚度在线监测方法,即直接对由高压杆塔上摄像机采集到的导线及绝缘子覆冰图像进行实时处理,提取其边界轮廓,通过导线及绝缘子覆冰前后的边界比较得出其覆冰厚度。该方法原理简单,成本低,同时弥补了现有覆冰在线监测系统由于采用简化的数学模型计算导线覆冰厚度而导致结果可靠性差的不足。另外,由于笔者所提方法能同时监测计算导线及绝缘子的覆冰厚度,弥补了以往方法只能给出导线覆冰厚度,而对绝缘子覆冰厚度无法进行定量描述的不足。

### 1 图像法监测覆冰厚度的装置和原理

笔者提出的基于图像法的输电线路覆冰厚度在线监测系统通过安装在杆塔上的一套嵌入式系统作为数据平台,采用工业级摄像机,采集现场图像数据,再通过 CDMA(GPRS)网络将图像数据传输至电力系统的控制中心,控制中心内的计算机系统对采集到的图像进行滤波,边缘检测,并通过合理的二值化处理和边界跟踪记录下边界轮廓点在图像中的坐标,最后通过综合比较导线和绝缘子覆冰前后的边界点坐标,并用导线直径进行标定就可得出当时输电线路的覆冰厚度。系统的基本组成以及标定计算过程见图 1、2。

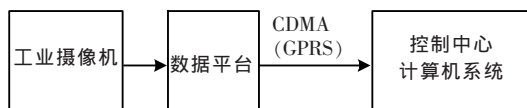


图 1 图像法监测覆冰厚度系统的基本组成

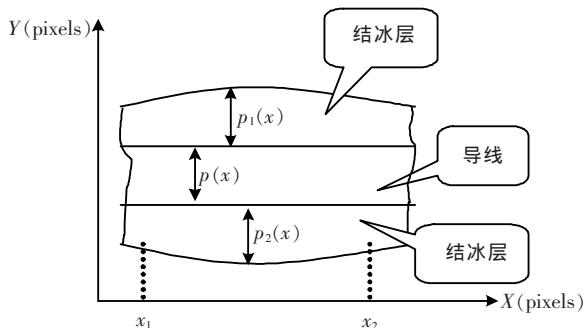


图 2 图像法监测覆冰厚度计算原理图

图 2 中,  $p(x)$  表示导线的直径所对应的像素点数;  $p_1(x)$  和  $p_2(x)$  分别表示导线的上下边缘结冰层所对应的像素点数;另设导线直径  $D(\text{mm})$  已知,则导线的上下边缘的平均覆冰厚度  $h_1(\text{mm})$  和  $h_2(\text{mm})$  分别为

$$h_1 = D \frac{\sum_{x=x_1}^{x_2} p_1(x)}{\sum_{x=x_1}^{x_2} p(x)} \quad (1)$$

$$h_2 = D \frac{\sum_{x=x_1}^{x_2} p_2(x)}{\sum_{x=x_1}^{x_2} p(x)} \quad (2)$$

由式(1),(2)可得整个导线的平均覆冰厚度  $h(\text{mm})$  为

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (3)$$

对绝缘子覆冰厚度的标定计算类似于  $h_1$  的计算,需要重点考虑的是绝缘子对应图像中的横坐标范围与导线对应的横坐标范围可能不同,设绝缘子对应的横坐标范围是  $x_3 \sim x_4$ ,并且绝缘子表面结冰层对应的像素点数是  $p_3(x)$ ,则绝缘子表面平均覆冰厚度  $h_3(\text{mm})$  为

$$h_3 = D \frac{x_2 - x_1 \sum_{x=x_3}^{x_4} p_3(x)}{x_4 - x_3 \sum_{x=x_1}^{x_2} p(x)} \quad (4)$$

### 2 图像法监测覆冰厚度的算法步骤

笔者介绍的图像法最核心的就是要提取导线和绝缘子的边界轮廓,并对其进行正确地跟踪记录。以下将以实验室人工气候室中拍摄的模拟导线的光滑铜管(图 3)为例对算法进行详细阐述。



图 3 铜管原始图像

#### 2.1 滤波处理

由于现实中导线和绝缘子处在自然环境下,其背景是不可能非常理想的,再加上摄像机的因素以及图像在由输电线路现场传回控制中心的过程中不可避免的会引入一些噪声。这些噪声会对图像边缘的提取产生影响,有时可能会产生伪边缘,直接致使边缘检测精度的下降,甚至导致无法找到准确的边缘。笔者采用中值滤波法对图像进行处理,中值滤

波器输出的像素值是由邻域像素的中间值决定的,这使得在去除图像噪声的同时,避免了图像边缘的模糊,从而更有利于图像边缘的检测和提取<sup>[6]</sup>。

2.2 边缘提取

提取边缘的方法主要分为传统方法和现代方法。传统方法基于空间运算,通过将算子模板与图像进行卷积完成,主要有 Robert、Prewitt、LOG、Canny 等算子。传统的边缘检测方法算法简单,速度快,但对噪声都比较敏感。现代方法主要有小波方法、数学形态学方法、模糊数学方法和遗传算法等,这些方法都有各自的优缺点和适用范围。根据待处理图像特点以及提取导线和绝缘子边缘轮廓的目的,笔者采用小波方法来提取边缘。小波变换在时域和频域同时具有良好的局部性质,因而成为信号分析和图像处理的强有力工具。1992年, Mallat 在其文<sup>[7]</sup>中提出了多分辨率的思想,在对图像进行边缘提取时,当小波变化的尺度参数较小时,能检测出灰度发生的细变化,而当尺度参数较大时,能检测出图像发生的粗变化。正是这一性质,使得小波变换在图像的去噪、边缘检测以及轮廓提取等方面具有很大优势。多尺度边缘检测算法基本原理如下<sup>[8]</sup>。

设二维平滑函数  $\theta(x,y)$  满足条件(5)和(6)

$$\iint_{R^2} \theta(x,y) dx dy = 1 \tag{5}$$

$$\lim_{x^2+y^2 \rightarrow \infty} \theta(x,y) \rightarrow 0 \tag{6}$$

则可定义两个有方向性的小波函数

$$\psi^x(x,y) = \frac{\partial \theta(x,y)}{\partial x} \tag{7}$$

$$\psi^y(x,y) = \frac{\partial \theta(x,y)}{\partial y} \tag{8}$$

设  $\theta_s(x,y)$  为

$$\theta_s(x,y) = \frac{1}{s^2} \theta\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \tag{9}$$

式中,尺度  $s=2^j$  ( $j=1,2,3,\dots$ ),则二维子波在尺度  $s$  下有如下定义

$$\psi_s^x = \frac{\partial \theta_s(x,y)}{\partial x} = \frac{1}{s^2} \psi^x\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \tag{10}$$

$$\psi_s^y = \frac{\partial \theta_s(x,y)}{\partial y} = \frac{1}{s^2} \psi^y\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \tag{11}$$

则小波变换沿  $x$  和  $y$  方向的两个分量可用矢量形式表示为

$$\begin{bmatrix} W_s^x f(x,y) \\ W_s^y f(x,y) \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f \times \theta_s)(x,y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f \times \theta_s)(x,y) \end{bmatrix} = s (f \times \theta_s)(x,y) \tag{12}$$

式(12)表明,  $W_s^x f(x,y)$  和  $W_s^y f(x,y)$  分别反映了  $f(x,y)$  图像灰度沿  $x$  和  $y$  方向的梯度。向量的模值为

$$\text{Mod}[W_s f] = [ |W_s^x f(x,y)|^2 + |W_s^y f(x,y)|^2 ]^{1/2} \tag{13}$$

图像边缘处在向量的局部模极大值处。通过改变尺度  $s$ , 就可以实现图像边缘的多尺度提取。

笔者采用多孔算法<sup>[9]</sup>对采集到的铜管图像进行多尺度小波分解。算法步骤如下: 用原数字图像  $f(m,n)$  的每一行与  $h(n)$  作卷积,再用每一列与  $h(n)$  作卷积,求得  $f_s(m,n)$ ; 用  $f(m,n)$  的每一行与  $g(n)$  作卷积,求得  $W_s^x f(m,n)$ ; 用  $f(m,n)$  的每一列与  $g(n)$  作卷积,求得  $W_s^y f(m,n)$ ; 根据式(13)计算并保存该级小波变换的模值; 对  $h(n)$  和  $g(n)$  进行上采样,即在它们系数间隔中插入  $2^{j-1}-1$  个零值( $j$  为下一级的分解级数),并令  $f(m,n)=f_s(m,n)$ ; 重复以上步骤 到步骤 ,直到分解级数  $j=J$  ( $J$  为要求达到的分解级数)。

以上算法中的  $h(n)$  和  $g(n)$  是由小波函数构造的低通和高通滤波器。本算法采用样条滤波器,见表 1。

表 1 样条滤波器系数

$n$	$h(n)$	$g(n)$
-1	-0.5	0.125
0	0.5	0.375
1		0.375
2		0.125

图 4 是用该算法对图 3 进行处理后得到的第一级小波变换的模值图像。

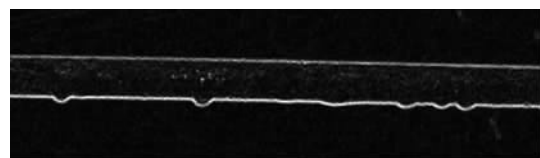


图 4 铜管的第一级小波变换模值图像

2.3 边界跟踪

2.2 节得出了原始图像的小波变换模值图像,本节主要是从这些模值图像中跟踪记录导线和绝缘子的边界轮廓。传统方法<sup>[10,11]</sup>采用一定的阈值将模值图像转换成二值图像,然后利用行扫描和列扫描找到起始边界点,并在此基础上进行跟踪得出整个边界轮廓。这些方法共同的问题是阈值的选择以及初始边界点的寻找。阈值选择过大会丢失部分真实轮廓;过小,虽然轮廓保留较完整,但同时噪声也会被大量的保留下来。而当噪声较多时,用逐行和逐列扫描的方法很难找到准确的起始边界点,因此得到的轮廓也是不准确的。基于此,笔者根据导线和绝缘子

的形状特点提出了一种浮动阈值法。

该方法首先将阈值取为最高值，然后逐渐降低阈值，在每一个阈值处都要将原模值图像转化为相应的二值图像，同时检测导线和绝缘子的初始部分的边界轮廓（初始部分大小根据图像大小及分辨率来定），直到找到满足一定特征的初始部分边界轮廓（所选的初始边界轮廓是一段近似水平直线段）。检测边界轮廓的初始部分而不是检测初始点，这样可以大大降低噪声的干扰。

检测到初始边界轮廓后，在此基础上继续搜索边界轮廓其他部分（表 2 显示了图像中各像素间邻域关系）。具体步骤如下（以图 4 铜管为例）：将起始边界轮廓最后一个点设为  $f(i,j)$ ；检测当前像素的右下方像素  $f(i+1,j+1)$  是否为 1，是，则记录下新的边界点  $f(i+1,j+1)$  的横纵坐标，并将该点置为  $f(i,j)$ ，同时令  $count=0$ ，再转步骤；否，则转步骤；检测当前像素的正右方像素  $f(i+1,j)$  是否为 1，是，则记录下新的边界点  $f(i+1,j)$  的横纵坐标，并将该点置为  $f(i,j)$ ，同时令  $count=0$ ，再转步骤；否，则将此时的  $f(i,j)$  点坐标保存在  $P$  中，并转步骤 ( $s=0$ ) 或转步骤 ( $s=1$ )；记录下  $f(i+1,j)$  点为新的边界点，并将该点置为  $f(i,j)$ ，同时令  $count=count+1,s=1$ ，并转步骤；记录下  $f(i+1,j+1)$  点为新的边界点，并将该点置为  $f(i,j)$ ，同时令  $count=count+1,s=0$ ，并转步骤；判断  $count$  是否大于  $a$  ( $a$  可以根据图像大小设定)，是，则转步骤；否，则转步骤；减小此时的阈值，并重新用新阈值将原模值图像二值化，同时将  $P$  中的坐标赋值给  $f(i,j)$ ，然后转步骤；判断边界轮廓是否搜索完毕（根据设定的行值或列值），是，则结束搜索；否，则转步骤。

表 2 图像中各像素邻域关系

$f(i-1,j-1)$	$f(i,j-1)$	$f(i+1,j-1)$
$f(i-1,j)$	$f(i,j)$	$f(i+1,j)$
$f(i-1,j+1)$	$f(i,j+1)$	$f(i+1,j+1)$

在以上算法中， $count$  是用来记录边界搜索过程中出现中断时的中断长度（像素数），当中断长度超过一定值  $a$  时，则回到断点初始位置，并减小阈值重新将模值图像二值化，然后再从断点处重新进行搜索。这样可以最大限度抑制噪声的干扰，从而找到真实的边界轮廓；算法中  $s$  是用来指定当出现断点时的搜索方向，根据图 4 中铜管的边缘走向采用了向正右方和右下方交替进行搜索的方式，这样可以最大程度地跟踪真实边界轮廓的走向。

图 5 展示了应用笔者提出的浮动阈值法对图 4 进行处理得到的铜管边界轮廓图像。

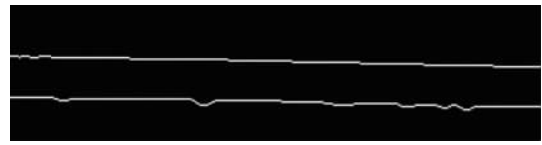


图 5 铜管边界轮廓图像

为了进一步提高算法的可靠性，在检测初始边界轮廓时，可以从边界轮廓的两端同时进行检测，找到两端的边界轮廓初始部分，然后再从两端向中间进行搜索。最后通过检查两端搜索的对接情况就可以判断此次边界轮廓检测是否准确。另外，由于小波具有多分辨率的特性，随着分解层数的增加，噪声会越来越小，当然定位精度也会越来越低。当从第 1 层小波模值图像中无法找到准确的边界轮廓时，算法可以对第 2 层或第 3 层小波模值图像进行相同的处理，一般均能找到准确的边界轮廓（此时定位精度要低些）。

### 3 实验室试验验证及分析

为了检验所提方法检测导线和绝缘子覆冰厚度的效果，选取实验室人工气候室内拍摄的铜管和绝缘子覆冰前后的图像作为测试图像，见图 6~9，提取其边界轮廓，并计算其覆冰厚度。



图 6 铜管覆冰前图像



图 7 绝缘子覆冰前图像



图 8 铜管覆冰后图像



图 9 绝缘子覆冰后图像

图 10 和图 11 是应用笔者所提出的方法提取的

铜管和绝缘子边界轮廓。图10中,外面两条是铜管覆冰后的边界轮廓,内部两条是铜管覆冰前的边界轮廓;图11中,上面两条是绝缘子覆冰后的边界轮廓,下面两条是绝缘子覆冰前的边界轮廓。

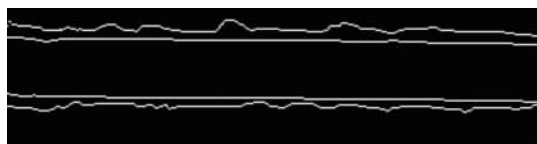


图10 铜管覆冰前后综合边界轮廓图像



图11 绝缘子覆冰前后综合边界轮廓图像

利用所提方法进行计算,得出铜管覆冰的平均厚度为4.6 mm,绝缘子左半部分的平均冰厚为7.3 mm,右半部分的平均冰厚为5.2 mm。

实际测量铜管的平均冰厚为4.7 mm,绝缘子左半部分冰厚为6.8 mm,右半部分冰厚为6 mm。

由上述数据可见,所提方法在检测模拟导线的光滑铜管覆冰厚度时精度较高,与实际测量仅相差0.1 mm;绝缘子左右半部分的计算值与测量值分别相差0.5 mm和0.8 mm,由于所用图像的像元大小是 $0.67 \times 0.67$  mm,0.5 mm和0.8 mm的误差仅相当于一个像元左右的误差,精度也是比较高的。如果增加图像的分辨率,可以大大地减小误差的绝对值。

需要说明的是,笔者所提方法在实际应用时还有很多问题需要深入研究,如杆塔上的摄像机处于低温环境下,需要采取特殊措施以保证其正常工作,通常做法是加装防护罩,同时还可在摄像头处加装雨刷,这样可进一步保证摄取的图像的清晰度;另外,实际线路的覆冰导线都存在或强或弱的舞动,这样会使拍摄到的覆冰导线的边界点较覆冰前的边界点产生很大的几何偏移,此时不能直接利用笔者给出的公式进行计算,需要进行一定的转换。具体做法是,分别求出导线覆冰前后直径所对应的像素数,计算出其平均覆冰厚度。由于导线舞动,其距离摄像机

的远近是不同的,这样得出的平均覆冰厚度值也是不同的,通过短时间内(相对于结冰速度而言)的多次测量取中间值可以得到比较满意的结果。

#### 4 结语

针对现有的输电线路覆冰厚度检测方法的不足,提出一种新的基于图像法的输电线路覆冰厚度在线监测方法,通过提取导线和绝缘子覆冰前后的边界轮廓来计算其覆冰厚度。笔者采用中值滤波方法对原始图像进行预处理,去除噪声同时避免了边界的模糊;边缘检测采用小波变换方法,可以充分利用小波变换的多层次性,提高了算法的抗噪性和可靠性;边界跟踪处理中,采用了浮动阈值法而非传统的单一阈值法,并把传统的寻找初始点改为寻找初始线段,提高了边缘提取的准确度。试验结果表明,该方法测量精度高,监测可靠,具有一定的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 孙才新,司马文霞,苏立春.大气环境与电气外绝缘[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 蒋兴良.输电线路导线覆冰机理和三峡地区覆冰规律及影响因素研究[D].重庆:重庆大学,1997.
- [3] 胡毅.电网大面积冰灾分析及对策探讨[J].高压电技术,2008,34(2):215-219.
- [4] 王守礼.影响电线覆冰因素的研究与分析[J].电网技术,1994,18(4):18-24.
- [5] 黄新波,孙钦东,程荣贵,等.导线覆冰的力学分析与覆冰在线监测系统[J].电力系统自动化,2007,31(14):98-101.
- [6] 徐飞,施晓红.MATLAB应用图像处理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [7] MALLAT S,ZHONG S.Characterization of Signals from Multi-scale Edges[J].IEEE Transform PAMI,1992,14(7):710-732.
- [8] 唐晓初.小波分析及其应用[M].重庆:重庆大学出版社,2006.
- [9] OLIVIER RIOUL,PIERRE DUHAMEL.Fast Algorithms for Discrete and Continuous Wavelet Transforms[J].IEEE Transactions on Information Theory. 1992,38(2):569-586.
- [10] 田莹,王丽君,苑玮琦.一种基于边界特征的耳廓提取新方法[J].光电工程,2007,34(4):39-43.
- [11] 叶林,王颖,黄琴,等.基于摄像的结冰厚度测量方法的研究[J].计量与测试技术,2006,33(6):4-8.

#### 简讯

#### 中国电器工业协会电力电容器分会第五届三次会员大会在西安召开

中国电器工业协会电力电容器分会第五届三次会员大会于2009年11月21-24日在西安召开,来自全国电力电容器行业的65个单位的98位代表参加了本次会议。