

基于智能图像处理的线路覆冰厚度检测技术研究

曾寒焯¹, 李庆东², 刘成铖¹, 黎柏城³, 李亚伟³

(1. 云南电网有限责任公司昭通永善供电局, 云南 永善 657300; 2. 云南电网有限责任公司昭通供电局, 云南 昭通 657000; 3. 西南民族大学电气工程学院, 四川 成都 610041)

摘要:针对雨雪天气严重影响线路覆冰图像质量与标准覆冰厚度计算的问题,提出一种基于智能图像处理的线路覆冰厚度检测方法,并在实验室对导线进行人工覆冰并模拟人工冷雾,采集有雾和无雾条件下的覆冰图像,用所提方法检测导线覆冰厚度。对采集的图像通过去雾、灰度化、直方图均衡化和空间滤波进行预处理,采用多种算子对处理后的图像进行边缘检测,计算出覆冰厚度。结果表明,覆冰图像去雾处理后采用直方图均衡化和空间滤波可较好地改善图像质量,配合使用 Canny 算法进行导线覆冰图像边缘检测时更具优势,即使在有雾的情况下,也可以得到较为准确的覆冰厚度检测结果。

关键词:输电线路; 覆冰厚度; 图像处理; 边缘检测

中图分类号: TM 755 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2025)01-0057-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250108

Research on Line Icing Thickness Detection Technology Based on Intelligent Image Processing

ZENG Hanye¹, LI Qingdong², LIU Chengcheng¹, LI Bocheng³, LI Yawei³

(1. Zhaotong Yongshan Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yongshan 657300, Yunnan, China; 2. Zhaotong Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Zhaotong 657000, Yunnan, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to solve the problem that rain and snow weather seriously affect the quality of line icing image and the calculation of standard icing thickness, a line icing thickness detection method based on intelligent image processing is proposed. The wire is manually iced and simulated in the laboratory, and artificial cold fog is simulated. The icing images under foggy and fog-free conditions are collected, and the proposed method is used to detect the wire icing thickness. The pre-processing for these collected images is carried out through defogging, grayscale processing, histogram equalization and spatial filtering, and the edge detection of the processed images is also carried out by a variety of operators to calculate the icing thickness. The results show that histogram equalization and spatial filtering can improve the image quality after defogging icing images, and Canny algorithm is proven to have more advantages to detect the edges of icing images, which can obtain more accurate detection results of icing thickness even in foggy conditions.

Key words: transmission line; icing thickness; image processing; edge detection

0 引言

近年来,中国架空输电线路的数量与规模不断扩大,覆冰事故也随之增多,严重危及电力系统的安全稳定运行^[1-2]。

当架空输电线路出现覆冰现象时,如何实时、准确地掌握架空输电线路的覆冰状态至关重要,尤其

是其覆冰厚度。目前,国内外对研究覆冰状态的检测方法有模型法、导线倾角-弧垂测量法、光学测量法、模拟导线法以及深度学习法等^[3-7]。然而这些方法在实际运用中都存在着一些问题:模型法由于存在不确定变量,使得模型的检测准确度不高;导线倾角-弧垂测量法在较大间距的杆塔之间以及进行远距离观测时才具备较高的精确度;光学测量法受环境影响较大,且设备成本较高;模拟导线法无法很

好地模拟出实际输电线路实时状态,所以得到的覆冰状态精确度和可信度依然比较低;深度学习法应用于覆冰厚度计算时,也存在一定的局限性。

图像处理法因其非接触、高精度、设备成本低廉和实时性好的特点^[8],已在国内外得到广泛研究与应用。因此,下面基于智能图像处理开展覆冰厚度检测技术研究,旨在更加精确地计算覆冰厚度,进而准确掌握输电线路的覆冰状态,为预防覆冰事故的发生以及电力系统的安全稳定运行提供依据。

1 智能图像处理及覆冰厚度计算原理

1.1 图像预处理

在图像采集过程中,受到雾霾、风沙等客观条件的限制,所采集的图像可能并不理想,对图像识别、边缘检测等后续处理产生负面影响。为了解决这些问题,需对采集的图像进行图像去雾、图像灰度化、直方图均衡化和图像空间滤波等一系列预处理。

1.1.1 图像去雾

图像去雾技术是一种在图像处理中广泛应用的技术,主要用于改善因雾、霾等天气条件导致的图像质量下降问题。而架空输电线路由于天气、环境等因素的影响,采集到的覆冰图像往往会出现模糊、对比度低等问题,导致图像质量下降。采用图像去雾算法对图像进行处理,可以提高图像的质量和清晰度。该算法以大气散射模型为基础,通过精确地估计大气光和传输图,有效地恢复清晰的无雾图像。

首先,依据颜色衰减先验理论获取场景 a 的深度,再选择图像亮度前 0.1% 的像素点,计算其最大亮度值作为大气光值;最后,根据式(1)恢复无雾图像。

$$H(a) = F(a)t(a) + A_0[1 - t(a)] \quad (1)$$

其中,

$$t(a) = e^{-rd(a)} \quad (2)$$

式中: $H(a)$ 为去雾图像; $F(a)$ 为无雾图像; $t(a)$ 为介质传输率,即透射率; $d(a)$ 为场景深度; A_0 为全球大气光成分; r 为散射系数,取值一般为 $1^{[9]}$ 。

1.1.2 图像灰度化

灰度化处理是将彩色图像转换为灰度图像,使每个像素只有一个亮度信息,而不再包含色彩信息。对于覆冰厚度检测来说,由于所采集的彩色图像数据量相对较大,为了简化后续处理过程,通常需要将图像转换为灰度图像。灰度化处理有助于突出输电线路的轮廓信息,因为轮廓的对比度在灰度图像中

往往更加明显。

在图像处理中,当红、绿、蓝三原色的灰度值相同时,即为灰度颜色。灰度图像包含 $2^8 = 256$ 个灰度级,灰度值范围为 $0 \sim 255$,如图 1 所示。



图 1 $0 \sim 255$ 的灰度条

将彩色图像转换为灰度图像的主要方法有平均值法、最大值法和加权平均值法^[10]。为更准确得到彩色图像转换后的灰度值,提出采用加权平均值法来进行灰度化操作,灰度值的计算式^[11]为

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.144B \quad (3)$$

式中: Y 为彩色图像转换后的灰度值; R 、 G 、 B 分别为红、绿、蓝三原色的灰度值。

1.1.3 直方图均衡化

直方图均衡化是通过调整图像的像素值分布,使得图像的直方图尽可能均匀分布,从而提高图像的对比度。电力传输线覆冰前后图像受外部因素干扰,需妥善处理光照问题。通过调整灰度分布,使图像灰度值均匀分布,增强图像效果。直方图均衡化方法可提高图像整体对比度,使细节更加清晰。

在进行直方图均衡化时,假设原始图像在 (x, y) 处的灰度为 f ,增强后图像的灰度为 g 。图像增强函数定义为 $g = A(f)$ 。为确保增强效果,映射函数需满足两个条件:

1) 在定义域 $[0, 255]$ 上, $A(f)$ 应为严格的单值单增函数,以确保增强后灰度值的排列顺序不变;

2) 原始图像的灰度 f 与增强后图像的灰度 g 均应在 $[0, 255]$ 内,确保变换前后灰度值的动态范围一致。

1.1.4 图像空间滤波

图像空间滤波是通过对图像中的像素值进行空间域的运算,以达到平滑图像、减少噪声等目的。

某些噪声源于特定的气候条件,如降雪和风沙,这些噪声会干扰传输线的识别。均值滤波法算法简单,易于实现,不会丢失过多的图像细节,且对于一些噪声点密集的情况有明显的抑制效果,故提出采用均值滤波法对图像进行处理,计算式为

$$g(x, y) = \frac{A}{(2K + 1)^2} \quad (4)$$

$$A = \sum_x \sum_y f(x, y) \quad (5)$$

式中: $g(x, y)$ 为滤波后的像素值; $f(x, y)$ 为原始图

像的像素值; K 为滤波窗口半径; A 为原始函数; $(2K+1)^2$ 为图像 $f(x,y)$ 的均值滤波窗口。

1.2 图像边缘检测

图像边缘检测是对图像中的边缘信息进行提取,为后续的计算提供关键的数据支持。主要运用3种方法:一阶微分算子法、二阶微分算子法及Canny算子法。这些方法的核心步骤在于首先提取图像的梯度模,然后通过设定合理的阈值对图像进行分割处理,以准确识别边缘信息。

1.2.1 一阶微分算子

一阶微分法通过设定阈值对图像梯度进行二值化处理,从而有效检测图像边缘,梯度表达式为

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) \quad (6)$$

为了精确地描述图像的梯度,采用差分运算来近似函数的偏导数。图像函数 $f(x,y)$ 在 x 和 y 方向上的一阶差分可表达为

$$\begin{cases} f_x = f(x+1, y) - f(x, y), x \text{ 方向} \\ f_y = f(x, y+1) - f(x, y), y \text{ 方向} \end{cases} \quad (7)$$

经典的一阶微分算子有Sobel算子、Roberts算子和Prewitt算子^[12]。

Sobel算子包含两组 3×3 矩阵,一组用于横向计算,另一组用于纵向计算。在 3×3 的领域范围内,该算子可以分别在 x 方向和 y 方向计算偏导数 s_x 、 s_y ,表达式为:

$$s_x = f(x+1, y-1) + f(x+1, y) + f(x+1, y+1) - \{f(x-1, y-1) + f(x-1, y) + f(x-1, y+1)\} \quad (8)$$

$$s_y = f(x-1, y+1) + f(x, y+1) + f(x+1, y+1) - \{f(x-1, y-1) + f(x, y-1) + f(x+1, y-1)\} \quad (9)$$

在式(8)与式(9)中 $f(x,y)$ 的梯度模为

$$|\nabla f| \approx s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \text{ 或 } |\nabla f| \approx s = |s_x| + |s_y| \quad (10)$$

Roberts算子是在 2×2 大小的邻域内计算对角导数。式(11)代表在点 (x,y) 处, $f(x,y)$ 的近似梯度模,其通过方向差分的均方差进行近似表示。

$$|\nabla f| = |f(x, y) - f(x+1, y+1)| + |f(x, y+1) - f(x+1, y)| \quad (11)$$

Prewitt算子通过检测像素点上下、左右相邻像素间灰度差的极值来识别边缘,对图像中的噪声具有一定的抑制作用。

1.2.2 二阶微分算子

图像边缘与图像梯度函数一阶微分的极大值点

有关,而边缘也对应于二阶微分的过零点。因此,可以利用二阶微分算子提取图像边缘信息。对图像 $f(x,y)$ 进行二阶微分,其运算可表达为

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (12)$$

常用的二阶微分算子是LOG算子,其表达式如式(13)所示。

$$\nabla G_\sigma(x, y) = \frac{\partial^2 G_\sigma(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G_\sigma(x, y)}{\partial y^2} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (13)$$

式中: $\nabla G_\sigma(x,y)$ 为LOG算子,又称为高斯拉普拉斯算子; σ 为高斯标准差。

1.2.3 Canny算子

Canny算子具有高信噪比、精确识别目标边缘和优异的噪声抑制能力的特点。具体检测步骤如下^[13]:

1) 设定标准差 σ ,并用高斯滤波器对图像进行滤波处理。

2) 计算梯度幅值和方向,采用一阶有限差分近似梯度,获得偏导数矩阵。

3) 搜索局部极大值,抑制非极大值元素,再采用带有滞后作用的双阈值 T_a 和 T_b ($T_a < T_b$) 进行处理。如果边缘像素的对比度较高,其值将大于 T_b ;如果对比度较低,其值将位于 T_a 至 T_b 之间。

4) 采用双阈值算法进行边缘检测,并将弱像素连接到强像素,以完成边缘连接。

1.3 覆冰厚度计算方式

所提出的计算覆冰厚度的方法为:首先,将覆冰线路划分为若干个等长区段,并计算每个区段输电线路的平均轮廓宽度;然后,将所有区段输电线路的平均轮廓宽度进行汇总,并求其平均值得到覆冰输电线路的直径;接着,从覆冰输电线路的直径中减去原始输电线路的直径,得到上下两个方向覆冰厚度的总和,并除以2得到平均覆冰厚度。这种方法能有效避免局部误差对整体结果的影响,并能通过观察各区段平均值的差异和变化,预估覆冰的均匀性和形态特点。例如,平均值均匀则覆冰分布均匀,差异大则分布不均。特定规律如小值区段包围大值区段,可能意味着产生了冰吊现象。

将图像中的覆冰导线分为 n 个长为 i 像素的区段,其中某一段如图2中 $\{(x_1, y_1), (x'_1, y'_1)\}$, $\{(x_i, y_i), (x'_i, y'_i)\}$ 所示。区段中横坐标为 x_k ($k=1, 2, \dots, i$) 的截面的直径,即该处轮廓的宽度

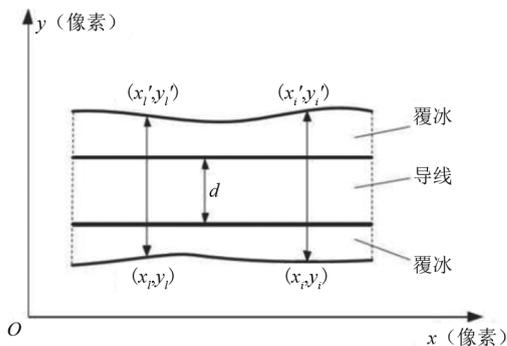


图 2 覆冰厚度计算方法

为 $(y'_k - y_k)$, 此区段输电线路轮廓的平均宽度 D_q 为

$$D_q = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i (y'_k - y_k) \quad (14)$$

式中, D_q 为 q 区段输电线路轮廓的平均宽度。

根据式(14)可得 n 个区段的输电线路轮廓平均宽度为

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n D_q \quad (15)$$

若线路原始直径为 d , 则线路覆冰平均厚度 T_m 的计算式为

$$T_m = \frac{1}{2}(\bar{D} - d) \quad (16)$$

2 覆冰图像处理及覆冰厚度计算

2.1 人工覆冰及图像采集

实验场地选在一个可以监测气象参数的室内环境, 确保实验过程中温度、湿度等参数的稳定性。

首先, 准备 4 根不同型号的架空交联聚乙烯绝缘铝芯电缆, 线径从小到大依次为 13 mm、16 mm、19 mm 和 20 mm。将 4 根导线模型悬挂于实验场地并保持在自然状态, 以便模拟真实环境中导线的覆冰情况。

然后, 为模拟自然环境中导线遭遇到的水滴对导线进行喷水, 喷水过程中需特别注意喷水均匀性和控制喷水量。喷水每 30 min 进行一次, 以模拟不同时间段的覆冰情况, 并采集图像。实验中所采集图像的分辨率为 4032×3024 , JPEG 格式。图 3 为无雾状态下覆冰导线。

完成导线覆冰后, 利用超声波起雾装置模拟自然环境中的雾气条件, 并采集图像, 如图 4 所示。

2.2 图像预处理分析

2.2.1 图像去雾

根据第 1.1.1 节介绍的图像去雾方法, 用 Matlab

软件进行去雾操作, 结果如图 5 所示。

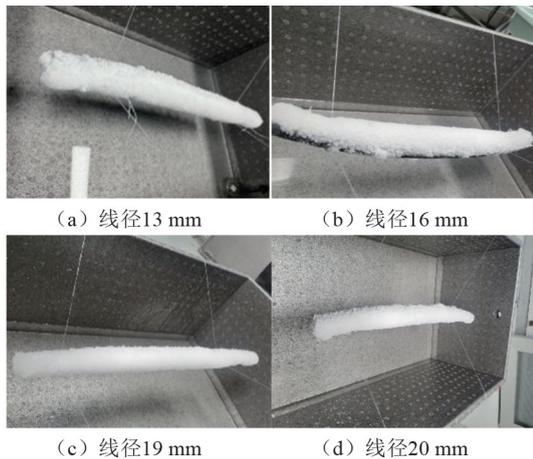


图 3 无雾的覆冰导线图像

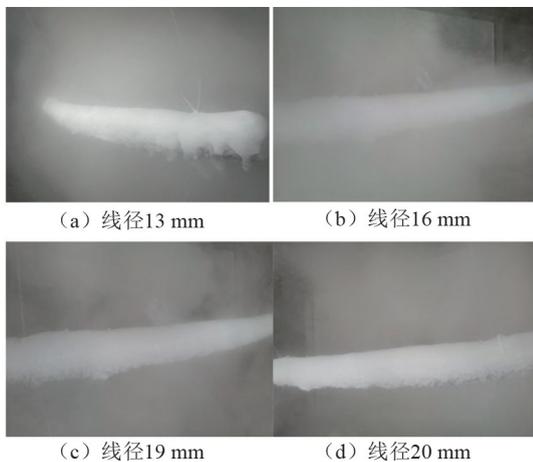


图 4 有雾的覆冰导线图像

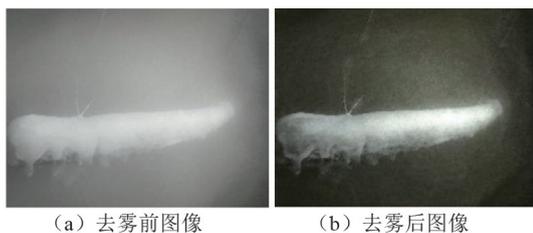


图 5 去雾运行结果

从图 5 可以看出, 经过去雾处理, 原本因雾气影响而模糊不清的图像变得更为清晰。清晰的图像能够更准确地反映输电线路的覆冰情况, 为后续的图像处理和覆冰厚度检测工作提供更为可靠的基础。

2.2.2 灰度化处理

根据第 1.1.2 节介绍的灰度化处理方法在 Matlab 软件中进行灰度化处理, 处理后的结果如图 6 所示。

从图 6 可以看到处理后的灰度图像从原本丰富的色彩信息已经被转化为单一的亮度信息, 图像中的每个像素只代表一个亮度值。这样的转换不仅简化了图像的信息量, 也降低了后续处理的计算复杂度。

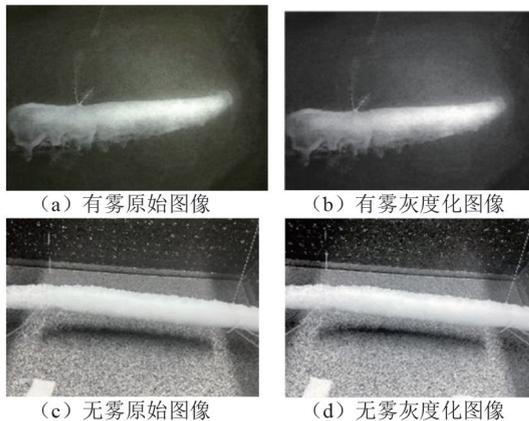
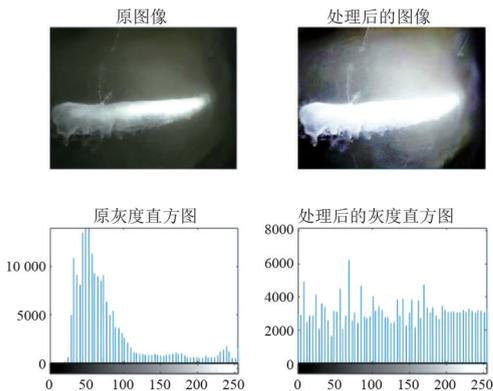


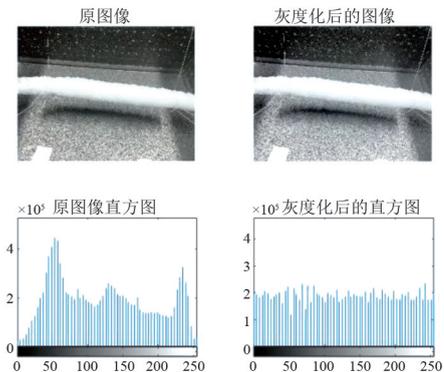
图 6 灰度化运行结果

2.2.3 直方图均衡化

对于覆冰厚度检测来说,直方图均衡化有助于改善图像的亮度分布,使得图像的细节信息更加突出。在 Matlab 软件中进行直方图均衡化处理,处理后的结果如图 7 所示。



(a) 有雾图像均衡化结果



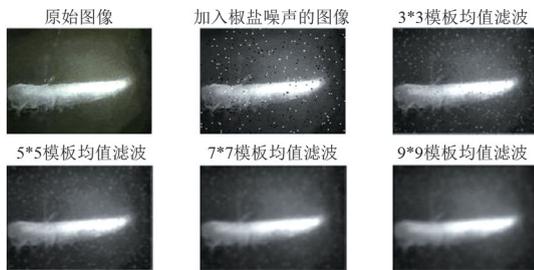
(b) 无雾图像均衡化结果

图 7 直方图均衡化运行结果

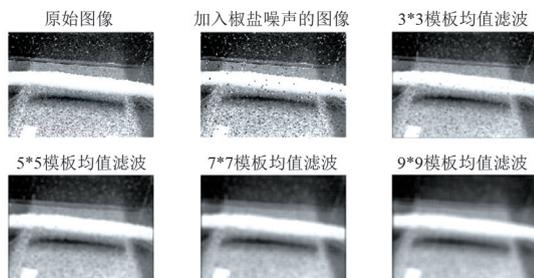
在图 7 中,可以看到经过直方图均衡化处理后,原本亮度分布不均匀的图像被调整为均匀分布,图像的对比度得到了显著提升。这样的处理有助于后续的覆冰厚度检测工作,因为更加清晰的图像轮廓信息可以使得检测结果更加准确。

2.2.4 图像空间滤波

对于覆冰厚度检测而言,图像空间滤波可以有效减少图像中的噪声干扰,提高图像的质量。根据第 1.1.4 节介绍的均值滤波方法在 Matlab 软件中进行图像空间滤波处理,结果如图 8 所示。



(a) 有雾图像均值滤波结果



(b) 无雾图像均值滤波结果

图 8 图像空间滤波运行结果

从图 8 可以看出,经过图像空间滤波处理后,图像中的噪声得到了有效的抑制,图像质量得到了提升。这对于后续的覆冰厚度检测工作是有益的,因为更加平滑的图像可以减少噪声对检测结果的影响,从而提高检测的准确性和稳定性。

2.3 边缘检测分析

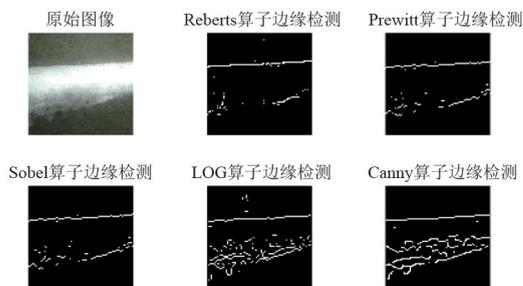
边缘检测是覆冰厚度计算中至关重要的一步,通过捕捉图像中被检测物体与背景间的差异性来实现。根据第 1.2 节介绍的几种算法对图像进行边缘检测,并对结果进行比较分析。在 Matlab 软件进行边缘检测运行结果如图 9 所示。

从图 9 的对比结果来看,Canny 算法在边缘定位和噪声抑制方面表现更为出色,能够更准确地提取出覆冰输电线路的边缘信息。

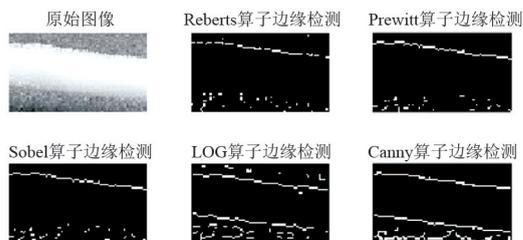
2.4 覆冰厚度检测结果

根据第 1.3 节提出的覆冰厚度计算方式,结合智能图像处理结果,进行覆冰厚度计算,计算结果如表 1 所示。

从表 1 的结果可以看出,无论是有雾还是无雾的情况下,通过智能图像处理方法计算得到的覆冰厚度与实际测量的覆冰厚度之间存在一定的误差,这种误差可能源自多个因素,例如图像处理过程中



(a) 有雾图像边缘检测结果



(b) 无雾图像边缘检测结果

图 9 图像边缘检测运行结果

表 1 覆冰厚度计算结果

导线组别	图像有雾时的覆冰厚度/mm	图像无雾时的覆冰厚度/mm	实际测量厚度/mm	有雾时的计算误差/%	无雾时的计算误差/%
1	16.979	17.348	18.055	5.96	3.92
2	13.137	13.494	14.309	8.19	5.69
3	10.935	11.144	11.920	8.26	6.51
4	9.898	10.344	10.982	9.87	5.81

的噪声影响、边缘检测的精确度局限以及覆冰厚度计算模型的简化等,相对而言,这些误差并不显著。

在有雾条件下,覆冰厚度检测的平均误差为 8.07%,最大误差为 9.87%。在无雾情况下,覆冰厚度检测的平均误差为 5.48%,最高为 6.51%。相对而言,无雾情况下的计算误差较小,但两者误差均在可接受的范围内。

3 结 论

上面对输电线路覆冰厚度检测进行了深入探讨,通过运用图像处理技术,将复杂的图像信息转化为可处理的数字信号,进而精确检测覆冰厚度,得到的主要结论如下:

1) 去雾处理和灰度化,以及使用直方图均衡化和空间滤波可有效消除图像中的噪声,提高图像质量,便于进行覆冰边缘检测。

2) Canny 算法在边缘定位和噪声抑制方面优于一阶微分算子和二阶微分算子,更适用于模糊背景下的覆冰图像边缘检测。

3) 覆冰图像采用直方图均衡化和空间滤波可较好地改善图像质量,配合使用 Canny 算法进行导线覆冰图像边缘检测。在有雾的条件下,其覆冰厚度检测误差也未超过 10%,完全满足现场应用要求。

参考文献

- [1] 李红坤,陈芳芳,高鑫. 架空线路覆冰研究现状综述[J]. 电气技术, 2017(10):13-15.
- [2] 胡毅,刘凯,吴田,等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3491-3499.
- [3] 韩叶良,苏国锋,袁宏永,等. 基于粗糙集的电网覆冰事故预警模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(12):1930-1933.
- [4] 刘杰. 基于弧垂的输电线路等值覆冰厚度监测方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2021.
- [5] 武剑,刘佳,张午阳,等. 基于光学成像和测距原理的测定架空输电导线覆冰厚度的装置及其方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(2):105-111.
- [6] 王小朋. 应用图像法在线监测输电线路覆冰厚度研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- [7] 罗会兰,陈鸿坤. 基于深度学习的目标检测研究综述[J]. 电子学报, 2020, 48(6):1230-1239.
- [8] 李昊,王俊裸. 基于图像处理的输电线路冰区发展趋势估计方法[J]. 现代电子技术, 2017, 40(22): 98-100.
- [9] 张国强,杨燕,李一菲. 基于构造简化模型和局部大气光遮盖的去雾算法[J]. 测控技术, 2021, 40(2): 64-69.
- [10] 徐恒. 基于图像处理的输电线路覆冰厚度检测方法研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2018.
- [11] 冯玲,黄新波,朱永灿. 基于图像处理的输电线路覆冰厚度测量[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 76-80.
- [12] 刘鹏. 基于图像处理的输电线路覆冰检测方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [13] 李斌,宋人杰,赵立权. 基于 Canny 算子的高压输电铁塔图像边缘检测研究[J]. 无线互联科技, 2016(18): 145-146.

作者简介:

曾寒焯(1984),男,硕士,工程师,研究方向为配电网的故障检测与诊断技术;

李庆东(1987),男,工程师,研究方向为配电网在线监测;

刘成斌(1992),男,工程师,从事配电网运维工作。

(收稿日期:2024-05-19)