

复杂背景中输电线路不均匀覆冰厚度测量方法

贺晓倩^{1,2}, 吴先用^{1,2}, 魏业文^{1,2}

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为提高输电线路覆冰厚度测量精度, 提出一种复杂背景图像中输电线路不均匀覆冰厚度测量的新方法。首先, 采用图像灰度化、中值滤波去噪及最大类间方差图像分割法对输电线路覆冰图像进行预处理; 然后, 结合输电线路覆冰信息和背景噪声的连通域特征, 提取复杂背景下覆冰输电线路轮廓; 最后, 针对局部覆冰厚度不均匀的现象, 采用一种垂线逼近的方法获取输电线路的覆冰厚度。实验结果表明, 采用连通域参数特征的输电线路目标提取方法可在背景复杂、对比度低的图像中准确提取覆冰输电线路轮廓。对于局部覆冰不均匀的区域, 垂线逼近方法明显优于传统的霍夫变换方法, 可以显著提高输电线路覆冰厚度测量精度。

关键词: 输电线路; 覆冰厚度; 连通域; 图像处理

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.025 中图分类号: TM755 文章编号: 1673-9140(2023)03-0224-06

Measurement method for thickness of uneven icing on transmission line in complex background

HE Xiaoqian^{1,2}, WU Xianyong^{1,2}, WEI Yewen^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To enhance the measurement accuracy of icing thickness on transmission lines, a novel method for measuring the thickness of uneven icing on transmission lines in complex background images was proposed. Firstly, a series of preprocessing steps, including image grizzling, median filter denoising, and maximum inter-class variance method, were applied to the transmission line icing images. Subsequently, by leveraging the connected domain characteristics of transmission line icing information and background noise, the contour of the icing transmission line was extracted from the complex background. Finally, to address the issue of local uneven icing thickness, a vertical approximation method was employed to obtain the pixel width of icing transmission lines. The experimental results demonstrate that the proposed transmission line target extraction method, based on the parameter features of connected domain, can accurately extract the icing transmission line contour from images with complex backgrounds and low contrast. Moreover, the vertical line approximation method is obviously superior to the traditional Hough transform method in areas with local uneven icing, significantly improving the measurement accuracy of icing thickness on transmission lines.

Key words: transmission line; ice-covered thickness; connected domain; image processing

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-10-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52107108); 湖北省输电线路工程技术研究中心开放课题(2019KXL06); 湖北省重点研发计划(2020BAB110)

通信作者: 吴先用(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事控制理论与控制工程研究; E-mail: wuxianyong@ctgu.edu.cn

输电线路覆冰是一种由于过冷水滴凝固粘附于输电线路而形成的自然现象^[1],常见于气候极寒、高中海拔等地区。当覆冰较厚或持续时间较长时,作用在输电线路上的拉力及作用在铁塔上的重力超出其极限承载能力,极易造成断线或倒塔事故,且事故一般发生于气候恶劣且交通不便的山区地带,抢修需要花费巨大的人力物力。因此,有必要对输电线路覆冰现象进行持续监测、准确预警以及高效举措,严防断线倒塔事故的发生。为此,国内外学者对输电线路覆冰厚度的精准测量开展了广泛研究^[2-3]。

目前,人工巡线法、弧垂测量法、图像识别法以及预埋传感器法^[4]等是几种常用的覆冰厚度测量方法,其中,图像识别法因初期投资少、运维费用低、自定化程度高且检测数据准确,成为了热点研究方向。文献[5]采用自适应概率滤波器、最大类间方差法及霍夫变换与直线编组连接得到输电线路轮廓,并对比覆冰前、后的输电线路边缘像素距离得到覆冰厚度;文献[6]利用图像滤波、自适应阈值变换和基于LOG算子的边缘检测技术,得到覆冰输电线路指定位置的覆冰厚度;文献[7]采用霍夫变换对覆冰输电线路边缘线进行连接,实现覆冰厚度的自动计算;文献[8]采用浮动阈值和形态学提取覆冰图像边缘,通过比较输电线路覆冰前、后的边缘获取覆冰厚度;文献[9]主要通过毯维分形的方法来提取覆冰输电线路的边缘,并采用Koch曲线将不连续的输电线路边缘连接起来;文献[10]利用随机霍夫变换和最小二乘法确定了覆冰输电线路边缘。已有研究成果对输电线路覆冰厚度测量提供了可行的方案,但当输电线路位于灰度级交错的复杂环境中时,覆冰输电线路边缘的提取效果并不理想;将覆冰输电线路轮廓拟合为一条直线^[5,7,10],忽略了输电线路覆冰在局部呈现不均匀分布的现象,能否精确计算覆冰厚度仍有待考证。近年来,深度学习在输电线路覆冰厚度测量的应用逐渐成为热点课题^[11-13],但深度学习需大量实拍图集作为训练集和测试集,在只能提供有限数据量的应用场景下,深度学习算法不能够对数据的规律进行无偏差的估计。

本文在上述研究的基础上,提出一种新的输电

线路覆冰厚度测量算法。首先对输电线路覆冰图像进行预处理,并通过对比分析覆冰输电线路和背景噪声的连通域特征,提取复杂背景下覆冰输电线路目标;然后针对局部覆冰厚度不均匀的现象,采用一种垂线逼近的方法实现输电线路覆冰厚度的精确计算。实验验证表明,所建立的方法具有较好的普适性和精度,希望对相关研究提供一定参考。

1 算法原理

1.1 图像预处理

1.1.1 图像灰度化

原始输电线路覆冰图像一般是RGB格式,为有效提高图像处理速度和覆冰厚度计算效率,将RGB图像转换为灰度图像。目前较为常用的图像灰度处理方法包括最大值法、平均值法和加权平均值法。本文采用平均值法,取RGB的3个分量亮度值 $R(i, j)$ 、 $G(i, j)$ 、 $B(i, j)$ 的均值作为灰度图像的灰度值 $F(i, j)$,即

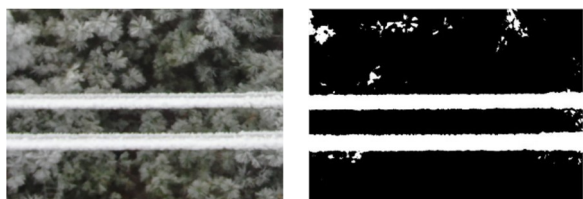
$$F(i, j) = [R(i, j) + G(i, j) + B(i, j)] / 3 \quad (1)$$

1.1.2 图像去噪

获取输电线路覆冰图像时一般伴随着雨雪或风沙天气,雨雪和风沙使得图像中出现类似于椒盐噪声的背景噪声,严重影响覆冰输电线路的识别。常见的图像去噪方法有高斯滤波、中值滤波、自适应维纳滤波以及小波变换滤波等,通常去除椒盐噪声比较常用的算法是中值滤波,基本原理:对以像素 (x, y) 为中心邻域内所有像素统计排序,再用其中值像素点代替该点像素灰度值,完成滤波。

1.1.3 图像阈值分割

图像目标检测、特征提取和目标识别的精度均依赖于图像分割的质量。阈值分割因其易于操作、实时性较好而被广泛应用,其原理是利用覆冰输电线路与背景信息在灰度值上的差异,把图像分为具有不同灰度级的2类区域。阈值分割方法的关键在于阈值的选择,本文采用计算简单、自适应强且使用最广泛的 $Otsu$ 最大类间方差法进行图像分割。图像预处理后得到的输电线路覆冰图像如图1所示。



(a) 原始图像 (b) 分割图像

图1 最大类间方差阈值分割

Figure 1 Maximum inter-class variance thresholding segmentation

1.2 覆冰输电线路目标提取

本文通过对比分析覆冰输电线路和背景噪声连通域的几何特征,采用一种基于连通域特征的覆冰输电线路目标提取方法,消除覆冰输电线路图像中的背景噪声,最终达到准确提取复杂背景下覆冰输电线路目标的目的。

连通域是指图像中具有相同像素值且位置相邻的目标像素点组成的区域,其特征参数通常包括连通域面积(P)、最小外接矩形长宽比(T)和连通域内最远距离(D),如图2所示,其数值计算为

$$P = \int f(x, y) dx \quad (2)$$

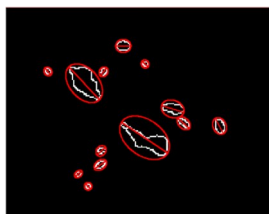
$$T = \frac{L}{H} \quad (3)$$

$$D = \sqrt{2\mu_{20} + \mu_{02} + \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}} \quad (4)$$

式(2)~(4)中, $f(x, y)$ 为某连通域内坐标 (x, y) 处的像素点; L 、 H 分别为某连通域最小外接矩形的长、宽; D 为相同标准二阶中心距椭圆长轴; μ_{20} 、 μ_{02} 、 μ_{11} 为连通域轮廓二阶中心距。



(a) 连通域面积 (b) 连通域最小外接矩形



(c) 连通域内最远距离

图2 连通域特征

Figure 2 Characteristics of connected domains

从输电线路覆冰图像预处理后的图像中可知:覆冰输电线路连通域 P 值较大,而背景噪声表现为随机散落的点块,其连通域 P 值远小于覆冰输电线路;覆冰输电线路连通域通常具有一定的长度,其 D 值较大,而噪声区域 D 值较小;覆冰输电线路连通域较为狭长,呈现一定的线性特点,其 T 值较大,而噪声在大多数情况下是块状的,其 T 值较小。

基于以上分析,可得到裂缝信息的提取流程,如图3所示。

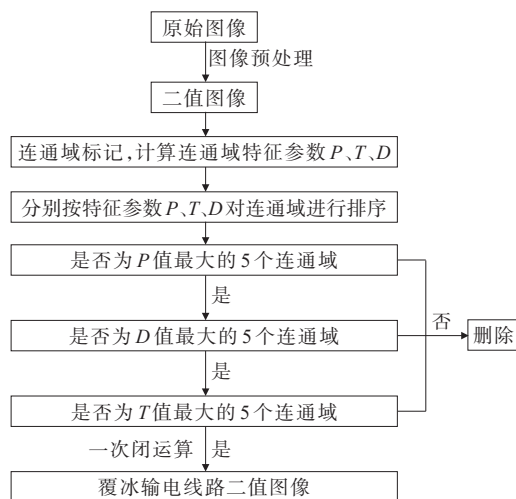


图3 覆冰输电线路信息提取流程

Figure 3 Flow chart of icing transmission line information extraction

1.3 覆冰厚度计算方法

目前,霍夫变换在覆冰输电线路边缘检测中得到了广泛应用^[5,7,10],基于霍夫变换的输电线路覆冰厚度计算方法,将覆冰输电线路边缘拟合为一条直线,虽可得到覆冰厚度计算结果,但对于图4中圈定区域内的输电线路局部覆冰厚度不均匀的现象,该方法对局部覆冰厚度的突然变化缺乏足够的适应性,直接将覆冰边缘拟合为直线或曲线显然难以得到准确的结果。因此,本文提出一种垂线逼近方法计算覆冰输电线路垂线方向的厚度值。



图4 局部覆冰厚度不均匀图像

Figure 4 Image of local icing thickness in uniformity

垂线逼近方法首先需获取如图 5 所示覆冰输电线路边缘和单像素骨架线。覆冰输电线路骨架线是一组具有输电线路长度和方向信息的中心像素点集合,本文针对图像预处理后的二值图像进行灰度形态学运算,得到覆冰输电线路骨架线;覆冰输电线路边缘线是包含厚度信息的覆冰输电线路 2 个外边缘像素的集合,文中采用 canny 边缘检测算法提取覆冰输电线路边缘。

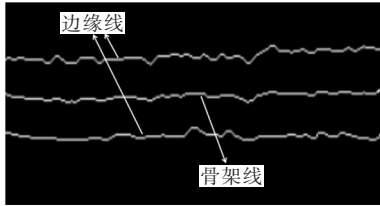


图 5 覆冰输电线路骨架提取

Figure 5 Extraction of ice-covered transmission line skeleton

当垂线逼近方法计算图 6 中 O 点处的覆冰厚度时,首先选取 O 点上下相邻的各 i 个像素点,组成包含 $2i+1$ 个像素点的集合,并采用最小二乘法将集合内的像素点拟合为一条直线 K ,直线 K 可近似作为 O 点处骨架线的切线。由于输电线路覆冰图像是 m 行 n 列的离散点矩阵, i 太大则该段直线在此区段不能近似于骨架线切线, i 太小则像素排列形式带来的误差较大。根据目前采用的检测设备分辨率分析表明, $i=3$ 时将直线 K 作为骨架线切线,能得到最小的覆冰厚度计算误差,即选取 $O(x_0, y_0)$ 点上下相邻的各 3 个像素点,组成包含 7 个像素点的集合,采用最小二乘法将集合内的像素点拟合为一条斜率为 k 的直线 K ,则 O 点处骨架线的垂线方程为

$$y = -\frac{1}{k}x + (y_0 + \frac{1}{k}x_0) \quad (5)$$

式中, k 为拟合直线 K 的斜率。

记录该垂线方程与 2 条输电线路覆冰边缘线的交点 $O_1(x_1, y_1)$ 、 $O_2(x_2, y_2)$,则输电线路覆冰后的像素宽度为

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (6)$$

采用垂线逼近法求得的不均匀覆冰厚度输电线路各点的像素宽度 d 如图 7 所示。设无覆冰状态下输电线路的实际直径为 h ,其在图像中的实际像素宽度为 d_1 ,则输电线路覆冰厚度 H 为

$$H = \frac{h(d - d_1)}{2d_1} \quad (7)$$

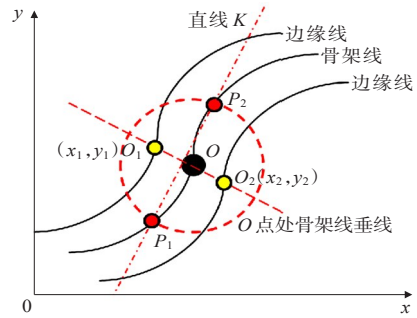


图 6 覆冰输电线路像素宽度计算原理

Figure 6 Calculation principle of icing transmission line pixel width

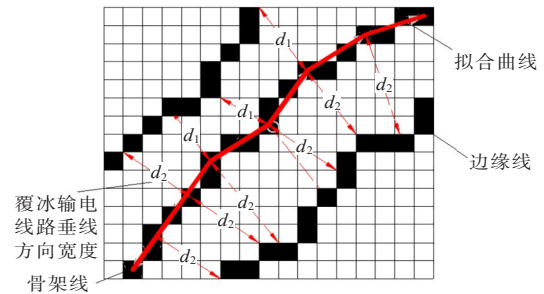


图 7 覆冰输电线路像素宽度

Figure 7 Diagram of ice-covered transmission line width

2 精度分析

为验证复杂背景图像中输电线路不均匀覆冰厚度测量方法的适用性和准确性,对图 1(a)的输电线路覆冰图像进行目标提取效果分析和覆冰厚度计算精度分析。

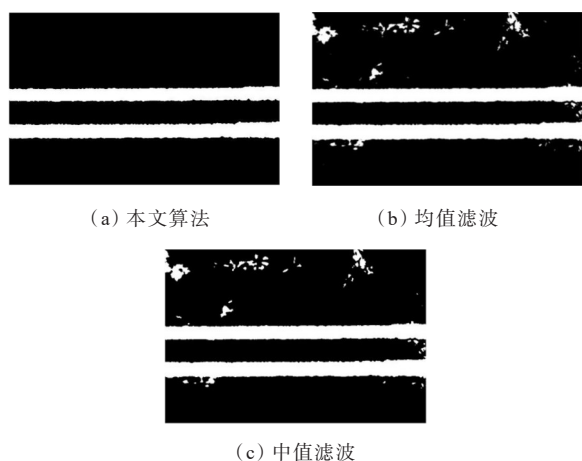
2.1 输电线路目标提取效果分析

对输电线路覆冰图像进行图像灰度化、中值滤波去噪及最大类间方差图像分割等预处理操作后,分别采用本文提出的覆冰输电线路目标提取方法、传统均值滤波算法及中值滤波算法对预处理后的图像进行输电线路目标提取,提取效果如图 8 所示。

通过图 8 中对比可知,本文方法可以去除覆冰输电线路图像中的大部分背景噪声,另外 2 种算法无法有效去除大部分背景噪声。为量化本文与传统方法的提取效果,提出有效性系数 Q 作为评价参数,其定义为残余背景噪声与覆冰输电线路连通域像素点数之比, Q 值越小,目标提取效果越好。

$$Q = \frac{C_0}{C} \quad (8)$$

式中, C_0 为残余背景噪声像素点数; C 为覆冰输电线路像素点数。



(a) 本文算法 (b) 均值滤波

(c) 中值滤波

图8 覆冰输电线路目标提取

Figure 8 Target extraction of iced transmission lines

采用本文方法、传统均值滤波算法及中值滤波算法对200幅随机拍摄的输电线路覆冰图像进行目标提取,目标提取效果对比结果如表1所示。

表1 目标提取效果对比

Table 1 Comparison of target extraction effects

方法	Q	
	平均值	标准差
中值滤波	0.117 1	0.125 4
均值滤波	0.125 3	0.148 7
本文方法	0.007 3	0.001 9

从表1可以看出,基于连通域特征的覆冰输电线路目标提取方法的有效性系数 Q 最小,且结果稳定、鲁棒性较好,明显优于传统的均值滤波算法和中值滤波算法。

2.2 覆冰厚度计算精度分析

为验证垂线逼近输电线路覆冰厚度计算方法的准确性,分别采用传统的霍夫变换方法^[10]和垂线逼近方法计算图4中圈定区域内覆冰输电线路的像素宽度。应用人工检测方法精确测量覆冰输电线路的真实像素宽度,其结果如图9所示,该结果将用于评价霍夫变换方法和垂线逼近方法的计算精度。

霍夫变换方法和垂线逼近方法的覆冰输电线路像素宽度计算误差如图10所示,正值表示计算结果比真实覆冰输电线路像素宽度大,负值则表示计算结果比真实覆冰输电线路像素宽度小。

从图10中可以看出,霍夫变换方法在求解覆冰输电线路像素宽度时的误差最大可达 -8 pixel,而此处覆冰输电线路真实像素宽度为 45 pixel,由此可知,霍夫变换方法可能在局部得到误差达到 16% 的

覆冰输电线路像素宽度。而垂线逼近方法的误差均集中于 $(-1, 1)$ pixel,覆冰输电线路各点像素宽度求解误差较小,且方差仅为 0.31 。通过计算2种方法的平均误差可得,霍夫变换方法的平均误差(2.24 pixel)明显大于垂线逼近方法的平均误差(0.47 pixel),后者的覆冰输电线路像素宽度计算精度较前者提高约 79% 。

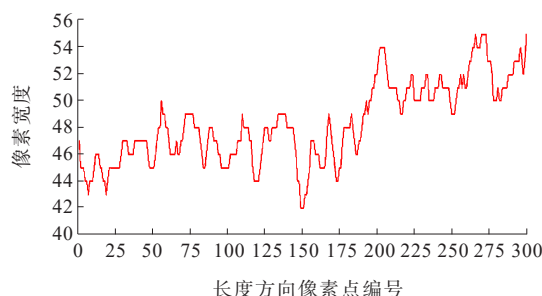


图9 真实覆冰输电线路像素宽度

Figure 9 Pixel width of true ice-covered transmission line

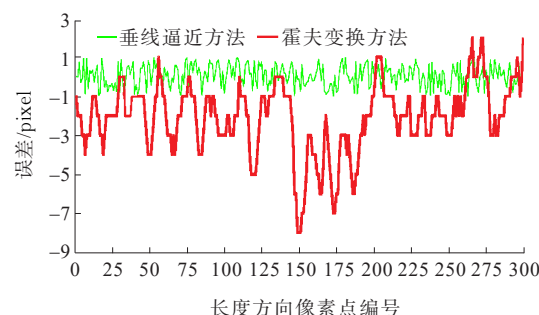


图10 覆冰输电线路宽度计算误差

Figure 10 Error in width calculation of ice-covered transmission line

输电线路覆冰厚度计算误差可表示为

$$\Delta H = \frac{h}{2d_1} |d_1 - d| \quad (9)$$

式中, d_1 为覆冰输电线路在图像中的实际像素宽度; d 为计算得到的覆冰输电线路像素宽度。

由式(9)可得,输电线路覆冰厚度计算误差 ΔH 与 $|d_1 - d|$ 的大小成正比, $|d_1 - d|$ 则表示输电线路覆冰像素宽度计算值的误差,其数值越大,输电线路覆冰厚度计算误差越大。由此可知,当采用垂线逼近方法计算输电线路覆冰厚度时,其计算精度将明显优于霍夫变换方法。

3 结语

本文提出一种复杂背景图像中输电线路不均

匀覆冰厚度测量方法。首先分别采用图像灰度化、中值滤波去噪以及最大类间方差图像分割法对输电线路覆冰图像进行预处理,并结合输电线路覆冰信息和背景噪声的连通域特征,提取复杂背景下覆冰输电线路轮廓;然后针对局部覆冰厚度不均匀的现象,采用一种垂线逼近的方法获取覆冰输电线路的像素宽度。通过实验验证了该方法在输电线路覆冰厚度测量中的适用性:

1) 采用连通域面积参数可以有效提取覆冰输电线路目标,其在精确性、稳定性等方面都明显优于传统中值滤波和均值滤波提取方法;

2) 垂线逼近方法求得的覆冰输电线路像素宽度计算精度较霍夫变换方法提高约79%,其输电线路覆冰厚度计算精度也明显优于霍夫变换方法。

为提高算法的适用性,后续将在更为复杂的背景环境中验证算法的可靠性,并持续改进和完善。

参考文献:

- [1] 刘闯,何沁鸿,卢银均,等.输电线路 PSOEM-LSSVM 覆冰预测模型[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(6):131-137.
LIU Chuang, HE Qinrong, LU Yinjun, et al. PSOEM-LSSVM forecasting model for the transmission lines icing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(6):131-137.
- [2] 张璐,李晨语,蔡永翔,等.考虑潮流越限风险的柔性交流配电网融冰优化策略[J]. 电力系统自动化,2022,46(16):160-169.
ZHANG Lu, LI Chenyu, CAI Yongxiang, et al. Optimal de-icing strategy for flexible AC distribution network considering risk of power flow over limit[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(16):160-169.
- [3] 韩兴波,吴海涛,郭思华,等.用于覆冰环境测量的旋转多导体直径选择方法研究[J]. 电工技术学报,2022,37(15):3973-3980.
HAN Xingbo, WU Haitao, GUO Sihua, et al. Research on diameter selection method of rotating multi-conductor for measurement of icing environmental parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15):3973-3980.
- [4] 杨知,赵彬,李闯,等.基于星地融合的输电线路覆冰预警优化方法研究[J]. 电测与仪表,2022,59(11): 54-62.
YANG Zhi, ZHAO Bin, LI Chuang, et al. Study on optimization method of transmission line icing prediction based on satellite-ground fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(11): 54-62.
- [5] 麻卫峰,王成,王金亮,等.基于激光点云的高压输电线路覆冰厚度反演[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(4):89-95.
MA Weifeng, WANG Cheng, WANG Jinliang, et al. Inversion of ice thickness for high voltage transmission line based on a LiDAR point cloud[J]. Power System Protection and Control,2021,49(4):89-95.
- [6] 李昭廷,郝艳捧,李立涅,等.利用远程系统的输电线路覆冰厚度图像识别[J]. 高电压技术,2011,37(9):2288-2293.
LI Zhaoting, HAO Yanpeng, LI Licheng, et al. Image recognition of ice thickness on transmission lines using remote system[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2288-2293.
- [7] 姚景岩,杨世勇,舒征宇,等.基于航拍的输电线路覆冰厚度监测研究[J]. 高压电器,2021,57(8):105-114.
YAO Jingyan, YANG Shiyong, SHU Zhengyu, et al. Research on monitoring of ice-coating thickness of transmission line based on aerial image[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(8): 105-114.
- [8] WANG X P, HU J L, WU B, et al. Study on edge extraction methods for image-based icing on-line monitoring on overhead transmission lines[C]//IEEE International Conference on High Voltage Engineering & Application (IEHVE), Chongqing, China, 2008.
- [9] YANG M, CAI L, SU P, et al. Image recognition of icing thickness on power transmission line based on fractal edge detection[J]. Revista de la Facultad de Ingenieria, 2017,32(11):320-329.
- [10] 胡京,邓颖,蒋兴良,等.输电线路覆冰垭口微地形的特征提取与识别方法[J]. 中国电力,2022,55(8):135-142.
HU Jing, DENG Ying, JIANG Xingliang, et al. Feature extraction and identification method of ice-covered saddle microtopography for transmission lines[J]. Electric Power, 2022,55(8):135-142.
- [11] 罗聪,范力栋,赵学文,等.基于VMD-IGWO-LSSVM的覆冰预测模型研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(6):9-17.
LUO Cong, FAN Lidong, ZHAO Xuewen, et al. Research on ice coating prediction model based on VMD-IGWO-LSSVM [J]. Power System and Clean Energy, 2021,37(6):9-17.
- [12] 阳林,念路鹏,郝艳捧,等.基于数值模拟的导线覆冰类型临界条件分析[J]. 智慧电力,2021,49(5):101-107.
YANG Lin, NIAN Lupeng, HAO Yanpeng, et al. Critical condition analysis of wire icing type based on numerical simulation[J]. Smart Power, 2021,49(5):101-107.
- [13] 林泽超.基于深度学习的输电线路覆冰厚度检测方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
LIN Zechao. Research on detection method of transmission line ice thickness based on deep learning[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.