

基于激光点云的输电线路铁塔覆冰厚度识别

王红霞^{1,2}, 杨洋^{1,2}, 李孟^{1,2}, 赵莫冠^{1,2}

(1. 国网新疆电力有限公司 电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆输变电设备极端环境运行与检测技术重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:输电线路铁塔覆冰厚度图像识别容易受到主观因素和恶劣天气的影响,导致识别结果与实际不一致。为了解决该问题,提出了基于激光点云的输电线路铁塔覆冰厚度识别方法。在综合考虑温度、湿度、风速气象因素的影响下,通过机载激光雷达获取输电线路铁塔 LiDAR 点云数据,利用三维坐标转换算法将其转换为统一坐标系下的三维坐标,以此构建输电线路铁塔三维空间。通过构建的三维空间,获取地面目标三维坐标,通过对图像灰度化处理、边缘提取,选择投影,并构建投影模型。根据点云-像素投影关系,获取实际成像。对比覆冰前后铁塔图像上下边界像素宽度,得到覆冰厚度图像识别结果。由实验验证结果可知,该方法在风速为 2 m/s 时,与实验数据存在最大误差,为 0.5 cm,其余均一致,具有精准的识别效果。

关键词:机载激光点云;气象因素;输电线路;铁塔覆冰厚度;图像识别

中图分类号:P237;TM93 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.003

Identification of icing thickness on transmission line towers based on laser point cloud

WANG Hong-xia^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, LI Meng^{1,2}, ZHAO Ming-guan^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Urumqi 830000, China;
2. Xinjiang Power Transmission and Transformation Extreme Environment Operation and Testing Technology Autonomous Region Key Laboratory, Urumqi 830000, China)

Abstract: The image recognition of ice thickness on transmission line towers is easily affected by subjective factors and adverse weather, resulting in inconsistent recognition results with reality. To address this issue, a method for image recognition of ice thickness on transmission line towers based on airborne laser point clouds is proposed. Taking into account the influence of temperature, humidity, and wind speed meteorological factors, LiDAR point cloud data of transmission line towers is obtained through airborne LiDAR. The three-dimensional coordinate conversion algorithm is used to convert it into three-dimensional coordinates in a unified coordinate system, thereby constructing a three-dimensional space for transmission line towers. By constructing a three-dimensional space, the three-dimensional coordinates of the ground target are obtained. Through grayscale processing and edge extraction of the image, projection is selected and a projection model is constructed. Obtain actual imaging based on the point cloud pixel projection relationship. Compare the pixel widths of the upper and lower boundaries of the iron tower images before and after icing, and obtain the recognition results of the icing thickness image. According to the experimental verification results, it can be

基金项目:国网新疆电力科技项目(No. 5230DK230005)资助。

作者简介:王红霞(1986-),女,硕士,工程师,主要研究方向为气象预测、输变电设备运维等。E-mail:fygwjygn@163.com

收稿日期:2024-06-26

seen that this method has the maximum error with the experimental data at a wind speed of 2 m/s, which is 0.5 cm. The rest are consistent, and it has accurate recognition effect.

Keywords: airborne laser point cloud; meteorological factors; transmission lines; the ice thickness of the iron tower; image recognition

1 引言

输电线路铁塔覆冰厚度图像识别是保障电网安全运行的重要环节。然而,目前该领域仍面临诸多挑战,如覆冰厚度的准确测量与识别、恶劣天气条件下的监测难题等。传统的覆冰厚度监测方法主要依赖于人工巡检和定点摄像头监测,但这些方法存在效率低下、精度不高、受环境影响大等问题。近年来,随着计算机视觉和图像处理技术的发展,基于图像识别的覆冰厚度监测成为研究的热点。然而,现有方法仍面临许多技术难题和实际应用的局限性。

文献[1]提出了基于图像边缘检测和法向探测的监测方法,该方法主要基于图像的边缘检测和法向探测技术,通过分析图像中铁塔表面的特征,提取覆冰的边缘和表面法线方向等信息,进而计算出覆冰的厚度。然而,这种方法对于薄层覆冰或不同颜色、纹理的输电线路铁塔表面,识别精度可能会下降;文献[2]提出了基于航拍图像的辨识方法,利用无人机或直升机搭载的航拍相机获取输电线路铁塔的图像,并通过图像处理技术识别出覆冰的厚度。然而,这种方法受到天气、能见度和飞行高度等因素的影响,可能导致获取的图像质量较差或无法获取;文献[3]利用灰色关联法分析温度、湿度、风速、降雨量和气压对线路覆冰厚度的影响,提出一种基于历史统计数据的输电线路覆冰厚度预测模型,并采用改进量子粒子群算法对支持向量机模型参数进行寻优,以实现线路覆冰的测量。然而,输电线路覆冰是一个动态变化的过程,环境因素的微小变化都可能对覆冰厚度产生显著影响。而基于历史统计数据的预测模型可能无法实时地反映出这些变化,导致预测结果存在较大的误差。文献[4]展示了阿尔弗雷德·韦格纳研究所冰鸟运动使用新的雷达技术准确测量北极海冰上的高分辨率雪深数据,并与其他数据进行比较。该方法主要应用于北极海冰上的雪深测量,不能直接适用于输电线路铁塔覆冰厚度的识别,因为两者在环境和物理特性上存在差异。

机载激光点云技术可以获取地物的三维信息,包括输电线路铁塔的形状和位置。通过将激光点云

数据与气象因素(如温度、湿度、风速等)进行结合,可以更准确地估计覆冰的厚度。气象因素对覆冰厚度有直接影响,例如较低的温度和较高的湿度有利于冰的形成。因此,为了提高对覆冰厚度的识别准确性,提出基于激光点云的输电线路铁塔覆冰图像识别方法。

2 基于机载激光点云的输电线路铁塔三维空间构建

输电线路铁塔的空间形态是指铁塔在三维空间中的结构形式和布局。输电线路铁塔通常由基础、塔身、横担等部分组成,它们在空间中呈现出一定的形态。机载激光点云技术可以提供高精度和高密度的地物三维坐标数据,通过构建输电线路铁塔的三维空间,可以实现对铁塔位置和形态的精确定位。这对于后续的覆冰厚度识别和分析至关重要,可以确保准确的空间位置信息。因此,在综合考虑气象因素的基础上,基于机载激光点云构建输电线路铁塔三维空间。

由于输电线路铁塔覆冰是缓慢的变化过程,在不同气象因素下的力学状态也有所不同。在覆冰过程中,铁塔所承受的载荷逐渐增加,当覆冰达到一定厚度时,铁塔可能会出现变形、扭曲甚至倒塌等现象^[5]。因此,通过机载激光点云,构建输电线路铁塔三维空间。机载激光点云是通过机载激光雷达技术获取的输电线路铁塔周围的三维点云数据,机载激光雷达通过向地面发送激光脉冲并测量反射回来的时间,可以获取高精度的三维坐标信息,具体步骤如下:

通过机载激光雷达获取的输电线路铁塔 LiDAR 点云数据,可以利用三维坐标转换算法将其转换为统一坐标系下的三维坐标^[6]。将所有激光点钟的最大值和最小值作为初始凸包点,按照顺时针方向得到初始凸包,并将初始凸包激光点划分到各个子块激光点数据集中,如图1所示。

利用这些三维坐标点,通过三角形连接的方式构建不规则三角网(TIN),在构建完单个输电线路铁塔的三维空间后,需要将相邻的输电线路铁塔三

维空间连接起来,形成连续的输电线路。通过在两个相邻输电线路铁塔之间建立直线或曲线连接,将它们之间的 LiDAR 点云数据连接起来,形成连续三维空间^[7-8]。

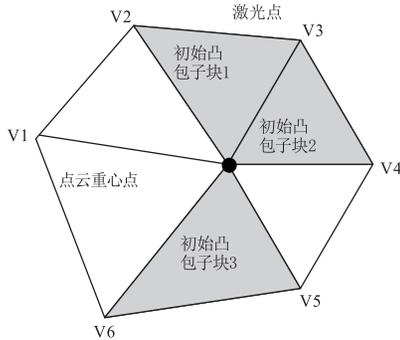


图1 铁塔机载激光点云数据分块原理

Fig. 1 Blocking principle of airborne laser point cloud data for iron towers

为了提高三维空间精度并避免数据冗余,需要剔除一些档距较大的边,这些边可能是由于测量误差、地形变化等原因形成的^[9]。通过设定阈值,剔除那些大于阈值的边,从而得到更为精确的输电线路铁塔三维空间。

通过以上步骤,得到了单个输电线路铁塔的三维空间和相邻输电线路铁塔之间的连接关系^[10]。根据连通规则,将这些输电线路铁塔连接起来,形成完整的输电线路铁塔的三维空间,可表示为:

$$\begin{cases} x_s = x_0 + d - \frac{\mu d(l-d)}{2f \cos \theta_x} \\ y_s = y_0 + d + \frac{\mu d(l-d)}{2f \cos \theta_y} \\ z_s = z_0 + d + \frac{\mu d(l-d)}{2f \cos \theta_z} \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x_s, y_s, z_s) 表示完整的输电线路铁塔的三维空间坐标; (x_0, y_0, z_0) 表示输电线路铁塔端点坐标; d 表示铁塔三维空间上任意点与端点水平距离; μ 表示铁塔载比^[11]; l 表示档距; f 表示水平应力^[12]; $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别表示覆冰悬挂点与 x, y, z 方向的连线夹角。

构建输电线路铁塔三维空间可以为后续的覆冰厚度图像识别提供一个参考框架,该框架可以帮助确定图像中各个部分的位置和方向,有助于更准确地识别和测量覆冰厚度。

3 基于铁塔三维空间的覆冰厚度图像识别

通过分析输电线路铁塔三维信息,使用架设在

铁塔上的遥控摄像机,在固定位置和固定角度拍摄了输电线路铁塔和覆冰铁塔的图像。该类图像只能明确较广范围上的铁塔信息,不能准确分辨出覆冰厚度。而输电线路铁塔的覆冰会对线路的安全性和可靠性产生重要影响。当厚度超过一定程度时,冰会增加导线的负载、降低绝缘子的绝缘性能,并可能导致断裂或倒塌,引发停电事故。通过基于铁塔三维空间信息,在不同气象因素下,结合机载激光点云识别输电线路铁塔覆冰厚度,以及早发现和评估覆冰情况,减轻其对线路运行的影响,提高线路的安全性。

温度是影响覆冰形成和厚度的主要因素,在低温条件下,水汽容易在输电线路铁塔上凝华或凝结成冰,导致覆冰厚度的增加;高湿度环境会增加水汽的含量,从而增加铁塔表面覆冰的概率和厚度;风速和风向也会影响覆冰的形成和分布;不同的降水类型(如雨、雪、冰雹等)和强度会影响覆冰的成分和厚度。在不同气象因素下,图像识别的具体步骤如下所示:

步骤一:通过机载激光扫描设备获取地面目标的激光点云数据,这些数据通常包括一系列三维坐标 (x_s, y_s, z_s) 的信息。

步骤二:将输电线路铁塔和覆冰铁塔两幅图像进行灰度化处理,获得对应的灰度图像。远距离摄像机采集到的铁塔影像,背景复杂,对比度低,并且受到多种噪音的干扰,严重影响了铁塔边缘的提取^[13]。为了消除噪声,提高对比度,提取出图像的边界信息,为铁塔边界提取做好准备。图像灰度处理是一种将彩色图像转换为黑白图像的方法,首先,需要从文件或设备中读取彩色图像,该图像通常由像素组成,每个像素由红色(R)、绿色(G)和蓝色(B)三个分量表示。从每个像素中提取红色、绿色和蓝色分量值,这些值通常介于 0 ~ 255 之间,代表了该分量的亮度级别。

图像灰度化处理公式,可表示为:

$$c = \frac{R + G + B}{3(x_s^2 + y_s^2 + z_s^2)} \quad (2)$$

式中, R, G, B 分别表示红、绿、蓝三个通道像素值^[14]。将转换后的灰度值重新组合成图像,并存储或输出。此时,图像只包含一个通道的亮度信息,而不是原来的三个通道的彩色信息,仍能够反映原始彩色图像的基本亮度信息。

步骤三:在图像边缘相邻像素的灰度值发生了很大的变化,因此,在对图像进行边缘检测时,首先要解决的问题就是如何找到相邻灰度出现“跃变”的像素。一阶偏导差分方法通过对像素邻域内的灰度值进行差分运算,可以近似计算出相邻像素点之间的灰度变化程度,这样可以有效地捕获图像中的覆冰厚度边缘信息。为此,采用一阶偏导差分方法求取梯度值的大小和方向,并用它来表征像素的灰度变化,从而得到图像的边缘。为此,提出了Canny算子,该算子是一种多阶段的算法,用于检测图像中的边缘^[15]。它采用了高斯滤波器平滑图像、计算图像的梯度强度和方向、非极大值抑制以及双阈值检测等步骤来确定边缘。其计算公式为:

$$E(i,j) = \frac{c}{|G(i,j)| \cdot |F(i,j)| \cdot |T(i,j)|} \quad (3)$$

式中, $G(i,j)$ 表示像素点 (i,j) 处的梯度值; $F(i,j)$ 表示像素点 (i,j) 处的梯度方向; $T(i,j)$ 表示像素点 (i,j) 处的阈值。通过该公式保留了梯度值较大的点,去除伪边缘像素。

步骤四:根据上述确定的边缘,选择投影,建立像素坐标系,构建如图2所示的投影模型。

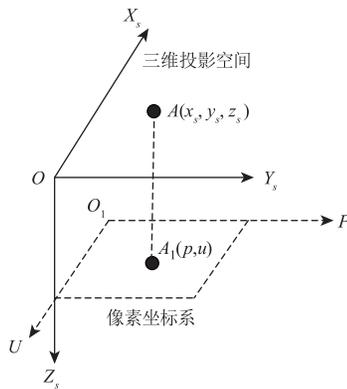


图2 投影模型
Fig.2 Projection model

图中, $O - X_s Y_s Z_s$ 为三维投影空间, O_1 为外包矩阵坐标系原点, P 为正东方向的轴, U 为正南方向的轴,由此建立投影像素坐标系 O_1-pu , 铁塔坐标 $A(x_s, y_s, z_s)$ 的投影坐标为 $A_1(p, u)$ 。图像边缘在投影图像下对应的像素坐标,可表示为:

$$\begin{cases} p = W \cdot \left(\frac{y_s - y_{smin}}{y_{smax} - y_{smin}} \right) + 1 \\ u = \left[E(i,j) - H \cdot \left(\frac{x_s - x_{smin}}{x_{smax} - x_{smin}} \right) \right] + 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, W 表示投影图像宽度; H 表示图像高度; y_{smin}, x_{smin} 表示 y_s, x_s 的投影位置。在此基础上,通过最近邻接法取整,并赋予 (p, u) 最接近的像素坐标,并记录点云坐标与像素坐标之间的对应关系,建立点云-像素索引,以便于随后的反向投影查询。

步骤五:根据点云-像素投影关系,构建如图3所示的实际成像模型。

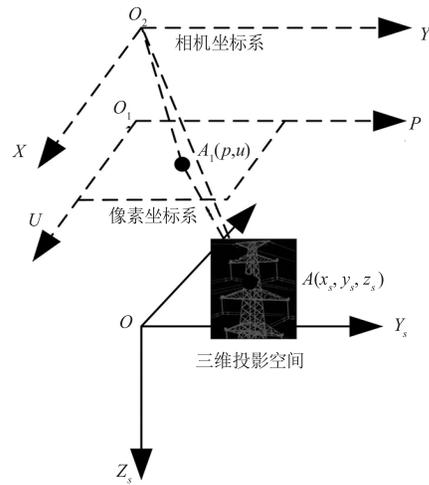


图3 实际成像模型
Fig.3 Actual imaging model

将点云数据与成像模型相结合,用二维直方图表示每一段输电线路铁塔上下边界像素宽度,由此计算该段输电线路铁塔平均像素宽度值,公式为:

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^m g_i}{m \times (p, u)} \quad (5)$$

式中, g_i 表示第 i 段输电线路铁塔上下边界像素宽度; m 表示铁塔像素段。

对比覆冰前后铁塔图像上下边界像素宽度,结合实际铁塔宽度计算覆冰厚度,公式为:

$$c = \frac{(\bar{g}_2 - \bar{g}_1) \cdot r}{2 \bar{g}_1} \quad (6)$$

式中, r 表示铁塔宽度; \bar{g}_1, \bar{g}_2 分别表示无、有覆冰时的铁塔图像像素宽度。

通过上述计算结果,可实现输电线路铁塔覆冰厚度图像的有效识别。

4 实验与分析

4.1 实验环境

以某铁塔的输电线路为研究对象,该输电线路铁塔覆冰现场观测图,如图4所示。



图 4 铁塔覆冰现场观测图

Fig. 4 Observation map of iron tower icing on site

铁塔长时间覆冰会造成铁塔倾斜,甚至倒塌。

4.2 实验模拟

利用机载激光雷达获取上述输电线路铁塔的点云数据,如图 5 所示。

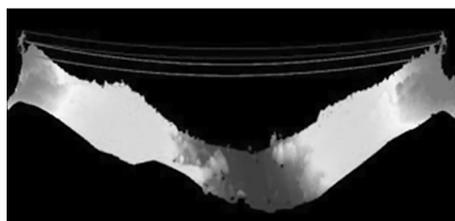


图 5 点云数据

Fig. 5 Point cloud data

分别收集不同情况下的气象因素。以下是具体的数值设置情况。温度:根据气象数据,设置不同的温度值为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$;湿度:湿度是影响覆冰的重要因素之一,设置相对湿度为 30%、90%;风速:风速可以影响覆冰的分布和厚度,设置不同的风速值为 2 m/s 、 10 m/s 。

不同气象因素下覆冰厚度图像,如图 6 所示。由图 6 可知,温度升高和湿度加大,对铁塔覆冰厚度影响程度最大。气象因素温度和湿度是直接影响冰的生成和积累过程的关键因素。温度升高会增加结霜和冰晶融化的作用,从而导致更多的水分重新冻结在铁塔表面,增加覆冰厚度。而湿度加大则会提供更多的水分供应,进一步增加铁塔表面冰晶和结霜的形成,增加覆冰厚度。因此,温度升高和湿度加大对铁塔覆冰厚度的影响程度最大。而本文机载激光点云技术可以提供高精度和高密度的地物三维坐标数据,包括铁塔的形状和位置。结合图像识别方

法,可以获取铁塔表面的冰层分布情况,进而计算出覆冰厚度。通过精确的空间定位和表面信息,能够准确地评估覆冰厚度,包括微小的变化。

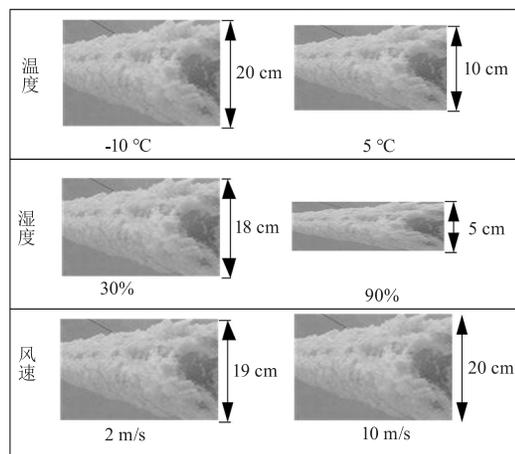


图 6 不同气象因素下覆冰厚度图像

Fig. 6 Icing thickness images under different meteorological factors

将基于图像边缘检测和法向探测的监测方法、文献[2]基于航拍图像的辨识方法、文献[3]基于改进 QPSO-SVM 的监测方法与基于机载激光点云图像识别方法的铁塔覆冰厚度图像进行识别,以不同气象因素下的覆冰厚度为衡量指标,对比结果如图 7 所示。

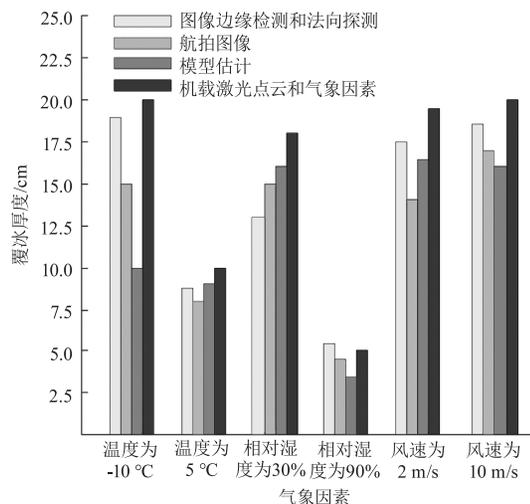


图 7 不同方法覆冰厚度对比分析

Fig. 7 Comparative analysis of ice thickness using different methods

由图 7 可知,使用基于图像边缘检测和法向探测的监测方法,在相对湿度为 30% 时,与实验数据存在最大误差,为 5 cm,其余均不一致;使用基于航拍图像的辨识方法,在风速为 2 m/s 时,与实验数据存在最大误差,为 5 cm,其余均不一致;使用基于模型估计的监测方法,在温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,与实验数

据存在最大误差,为 10 cm,其余均不一致;使用基于机载激光点云图像识别方法,在风速为 2 m/s 时,与实验数据存在最大误差,为 0.5 cm,其余均一致。其主要原因是本文方法结合了机载激光点云和气象因素,在评估铁塔覆冰厚度时综合考虑了多个重要因素。通过综合考虑温度、湿度和风速的影响,该方法能够更全面、准确地评估铁塔覆冰厚度,有助于提供更可靠的结果。因此,在大部分情况下本文方法能够准确地预测覆冰厚度,并与实际观测结果相符合。这种一致性验证了方法的可靠性和准确性。

为进一步验证基于机载激光点云图像识别方法的性能,选用覆冰厚度测量精度作为对比指标,进行对比测试,结果如表 1 所示。

表 1 覆冰厚度测量精度对比结果

Tab.1 Comparison results of ice thickness measurement accuracy

迭代次数/次	本文方法/%	文献[2]方法/%	文献[3]方法/%
10	98.5	90.1	86.7
20	98.1	89.6	85.9
30	98.6	88.7	84.3
40	97.6	90.2	84.2
50	95.9	89.6	82.3
60	96.3	85.6	81.6
70	97.4	84.9	81.5
80	96.5	87.3	83.4
90	97.4	86.2	82.1
100	96.8	88.5	79.2

根据表 1 可以看出,本文方法的测量精度始终在 95 % 以上,而文献[2]方法的测量精度在 84 % ~ 91 % 之间徘徊,始终低于本文方法,文献[3]方法的测量精度在 79 % ~ 87 % 之间徘徊,相较于文献[2]方法更低,由此表面本文方法可以更准确地测量出覆冰的厚度,具有实用性。

5 结 论

本文提出的基于激光点云的输电线路铁塔覆冰厚度识别方法,结合了机载激光点云数据的优势和现代图像处理技术,通过对点云数据的预处理、图像识别步骤,实现了对覆冰厚度的自动识别。此外,引入了气象因素作为预测覆冰厚度的关键指标,提高了识别的准确性和可靠性。综上所述,基于激光点云的输电线路铁塔覆冰厚度识别方法为输电线路的覆冰监测和管理提供了一种新的解决方案。

参考文献:

- [1] Yang Jun, Gao Yufeng, Zhang Ke, et al. A conductor icing monitoring method based on image edge detection and normal direction detection [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 24 - 32. (in Chinese)
杨俊, 高昱峰, 张可, 等. 基于图像边缘检测和法向探测的导线覆冰监测方法 [J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 24 - 32.
- [2] Shu Zhengyu, Shen Jiyuan, Li Huangqiang, et al. Research on the identification of transmission line ice thickness based on aerial images [J]. China Measurement & Test, 2023, 49(4): 21 - 25, 59. (in Chinese)
舒征宇, 沈佶源, 李黄强, 等. 基于航拍图像的输电线路覆冰厚度辨识研究 [J]. 中国测试, 2023, 49(4): 21 - 25, 59.
- [3] Qiao Peng, Tian Junmei. Prediction of Ice thickness of transmission lines based on improved QPSO-SVM [J]. Automation & Instrumentation, 2023, 38(2): 10 - 14, 34. (in Chinese)
乔鹏, 田俊梅. 基于改进 QPSO-SVM 的输电线路覆冰厚度预测 [J]. 自动化与仪表, 2023, 38(2): 10 - 14, 34.
- [4] Jutila A, King J, Paden J, et al. High-resolution snow depth on arctic sea ice from low-altitude airborne microwave radar data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60(1): 1 - 16.
- [5] Jiang Lan, Cheng Ruoheng, Tang Bo, et al. Tension test method for guy cables of transmission line guyed tower based on image edge recognition [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4469 - 4477. (in Chinese)
姜岚, 程若恒, 唐波, 等. 基于图像边缘识别的输电线路拉线塔拉线张力测试方法 [J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4469 - 4477.
- [6] He Jinqiang, Li Ruihai, Li Hao, et al. Visible light image automatic recognition and segmentation method for overhead power line insulators based on Yolov5 and grabcut [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 128 - 135. (in Chinese)
何锦强, 李锐海, 李昊, 等. 基于 Yolov5 与 Grabcut 的架空线路绝缘子可见光图像自动识别与分割方法 [J]. 南方电网技术, 2023, 17(6): 128 - 135.
- [7] He Xiaoqian, Wu Xianyong, Wei Yewen. Measurement method for thickness of uneven icing on transmission line in complex background [J]. Journal of Electric Power Sci-

- ence And Technology, 2023, 38(3): 224 - 229. (in Chinese)
- 贺晓倩, 吴先用, 魏业文. 复杂背景中输电线路不均匀覆冰厚度测量方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 224 - 229.
- [8] Sun Lingcui, Feng Huizong, Zhu Shiyu. Fast image recognition method of fine grained based on transfer learning [J]. Computer Simulation, 2022, 39(9): 217 - 220, 383. (in Chinese)
- 孙令翠, 冯辉宗, 朱世宇. 基于迁移学习的细粒度图像快速识别方法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 217 - 220, 383.
- [9] Du Juan, Shen Siyun, Yao Lingzhi, et al. Image region recognition of flexible printed circuit based on differential geometry [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(1): 132 - 139. (in Chinese)
- 杜娟, 沈思昀, 姚灵芝, 等. 基于微分几何的柔性电路板图像区域识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(1): 132 - 139.
- [10] Wu Zhengrong, Fan Lingmeng, Wu Xinqiao, et al. Fast detection method for tree barrier of transmission line using airborne laser point cloud [J]. Applied Laser, 2022, 42(3): 128 - 134. (in Chinese)
- 吴争荣, 樊灵孟, 吴新桥, 等. 基于机载激光点云的输电线路树障隐患快速检测方法[J]. 应用激光, 2022, 42(3): 128 - 134.
- [11] Ma Weifeng. Research on key technologies of transmission line inspection form ALS point cloud [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(9): 1612. (in Chinese)
- 麻卫峰. 机载激光点云输电线路巡检关键技术研究 [J]. 测绘学报, 2023, 52(9): 1612.
- [12] Zeng Xu, Chen Bojian, Pan Lei, et al. Power grid insulator identification method based on airborne laser point cloud [J]. Laser Technology, 2023, 47(1): 80 - 86. (in Chinese)
- 曾旭, 陈伯建, 潘磊, 等. 基于机载激光点云的电网绝缘子识别方法[J]. 激光技术, 2023, 47(1): 80 - 86.
- [13] Hui Zhenyang, Hu Haiying, Li Na, et al. Airborne LiDAR point cloud filtering method based on multiconstrained connected graph segmentation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 425 - 434. (in Chinese)
- 惠振阳, 胡海瑛, 李娜, 等. 基于多约束连通图分割的机载 LiDAR 点云滤波方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 425 - 434.
- [14] Zhou Yihuan, Feng Simeng, Cai Yong, et al. Design and experimental study of CW laser cleaning system for high voltage transmission lines ice-covered [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(1): 41 - 45. (in Chinese)
- 周艺环, 冯思朦, 蔡勇, 等. 高压输电线覆冰连续激光清除系统设计与实验研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(1): 41 - 45.
- [15] Yu Jin, Liu Zhizhi, Fang Congqi, et al. Airborne LiDAR point cloud classification based on dynamic graph convolution with enhanced feature fusion [J]. Applied Laser, 2023, 43(6): 132 - 144. (in Chinese)
- 余锦, 刘智慧, 方琮淇, 等. 增强特征融合的动态图卷积的机载 LiDAR 点云分类[J]. 应用激光, 2023, 43(6): 132 - 144.