

DOI:10.19783/j.cnki.pspc.201657

基于 Grabcut 分割和填充物面积判别的复合绝缘子断串诊断

闫丽梅, 刘永强, 徐建军, 许爱华, 李宏玉, 高金兰

(东北石油大学电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 针对传统 GrabCut 算法需要人工初始化而引起图像分割效率低的问题, 结合 Otsu 方法, 提出了一种新的 Grabcut 自动化算法对复合绝缘子进行分割。首先, 对原始图像进行 HSV 空间转换和加权的灰度化处理。其次, 对 V 通道图像和灰度化后的图像进行 Otsu 分割并进行或逻辑融合, 以此来确定目标绝缘子区域, 并结合最大连通域定位绝缘子位置坐标完成 Grabcut 框取初始化, 实现 Grabcut 的自动化。最后, 针对绝缘子断串判别准确率低的问题, 通过对绝缘子分割图像的最小外接矩形加框、填充、去原图的方式, 提出一种新的面积判别方式来诊断并定位故障位置。实验结果表明: Grabcut 自动化算法可以很好地分割出目标绝缘子, 分割准确率可以达到 96.6% 以上。所提出的面积判别方法对于具有断串故障的绝缘子检测率可以达到 96.6% 以上, 对于无故障的误检率为 6.7% 以下。

关键词: Otsu; Grabcut; 自动化 Grabcut; 填充物面积判别; 绝缘子断串识别

Broken string diagnosis of composite insulator based on Grabcut segmentation and filler area discrimination

YAN Limei, LIU Yongqiang, XU Jianjun, XU Aihua, LI Hongyu, GAO Jinlan

(School of Electrical Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: In view of the low efficiency of image segmentation caused by manual initialization of traditional Grabcut algorithm, a new Grabcut automatic algorithm for composite insulator segmentation is proposed based on Otsu method. First, the original image is transformed into HSV space and weighted grayscale. Secondly, the V-channel image and the grayed image are segmented by Otsu and fused by logic to determine the target insulator area, and the initialization of Grabcut frame is completed by combining the position coordinates of the largest pass domain positioning insulator, so as to realize the automation of Grabcut. Finally, in view of the low accuracy of insulator broken string identification, a new area discrimination method is proposed to diagnose and locate the fault location by adding frame, filling and removing the original picture of the smallest external rectangle of the insulator segmentation image. The experimental results show that the Grabcut automatic algorithm can segment the target insulator well, and the segmentation accuracy can reach more than 96.6%. The detection rate of the proposed area discrimination method can reach more than 96.6% for the insulator with broken string fault and less than 6.7% for no fault.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No. LH2019E016).

Key words: Otsu; Grabcut; automatic Grabcut; area discrimination of filler; identification of broken insulator string

0 引言

当前电网输电线路大量使用复合绝缘子, 占线路绝缘子用量 50% 以上。绝缘子断串是输电线路常见的故障之一, 并且绝缘子作为一种特殊的绝缘控件, 在架空输电线路中对导线支撑和防止电流回地

等方面起到至关重要的作用^[1]。因此, 对于输电线路复合绝缘子断串的识别显得十分重要。随着人工智能在输电线路故障方向的发展^[2], 通过无人机航拍图像分析输电线路绝缘子故障成为越来越重要的巡检手段。目前, 国内外学者通过航拍对绝缘子断串进行了很多方面的研究。

对于绝缘子分割: 文献[3]通过区域与阈值分割对红外图像进行绝缘子串自动提取和状态识别; 文

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目资助(LH2019E016)

献[4]通过 LAB 颜色空间来避免光照影响,利用 Otsu 粗略分割出绝缘子串后进行形态学运算,得到纯净的绝缘子串图像。这种两种分割方式对于复杂背景图像分割效果差,鲁棒性低。文献[5-6]分别通过提取绝缘子局部二进制纹理、整体纹理特征去识别和定位绝缘子。这种通过边缘特征分割绝缘子的方法在处理受到腐蚀、污染的绝缘子时,会受到光照、反射的影响,从而影响特征提取,导致识别率较低。文献[7]通过深度学习的方式进行绝缘子识别与定位。这类方法需要大量图像数据,当图像数据不足,或者图像质量差时,容易出现过拟合。

上述研究主要包括阈值分割、边缘分割、区域分割等传统方式和深度学习^[8]、红外图像^[9-10]间间接的方式。但是对于图论和能量泛函的分割方式很少,这类方式中 Grabcut 分割在不同领域都有着很好的分割效果。文献[11]在雾天实现了船只的精确分割。文献[12]实验了复杂背景下的建筑物自动提取。文献[13]为了提高复杂背景下黄瓜彩色图像的质量检测精度和处理效率,提出了一种自动化的 Grabcut 算法提取黄瓜边界。在较高的分割评价指标下,准确率达到 93.88%。由此针对现有的绝缘子分割方法对复杂图像分割效果差,图像质量要求高,分割算法鲁棒性低等问题,本文提出一种新的 Grabcut 自动化算法对绝缘子进行分割。

对于绝缘子断串或者自爆诊断的研究:文献[14]采用最大距离法对自爆缺陷定位,这种方法适用于影像分辨率高且背景复杂的绝缘子自爆缺陷自动检测,准确率可达 92.43%。文献[4]通过绝缘子片之间的距离判别该绝缘子串是否存在自爆缺陷,其准确率仅达 72%。文献[15]实现了对绝缘子间无明显重叠和有明显重叠图像的前景提取与识别功能。采用基于空间序列关系建立的特征检测算法,实现对图像中部无明显重叠绝缘子的自爆缺陷故障检测和定位工作,其自爆缺陷的检测成功率是 76.9%。文献[16]采用的绝缘子自爆特征定位方式是通过先统计标定区域内白色像素点的面积比例和区域面积,再与预先设定的比例阈值进行比较,判断是否存在自爆,过程中对比了不同分割效果的识别率,其中受到分割结果的影响,绝缘子分割图像效果差的断串判别率为 80.3%,绝缘子分割图像效果好的断串判别率为 90.8%。本文针对绝缘子断串判别率低,对绝缘子分割效果要求高等问题,采用一种新的面积比较方式识别复合绝缘子断串问题。其绝缘子分割和断串诊断总体过程为:首先,通过建立自动框取模型实现 Grabcut 算法的自动分割;其次,通过固定区域填充提取填充物面积;最后,通过填充物面

积大小比较诊断绝缘子是否断串。

1 自动框取模型

Grabcut 算法是 Rother、Kolmogorov 和 Blake 提出的一种基于迭代 Graphcut 的算法。该算法使用多维高斯混合模型(gaussian Mixture Model, GMM)来估计目标对象和背景的颜色分布。由模型参数的迭代来实现吉布斯(Gibbs)能量最小化,再用最大流最小分割方法求取有向图的最优解,得到分割结果^[17],其主要步骤如图 1 右半部分。传统的 Grabcut 算法需要人机交互完成矩形输入,本文通过阈值分割和最大连通域提取构成的自动框取模型来实现矩形框取,实现 Grabcut 算法的自动化。

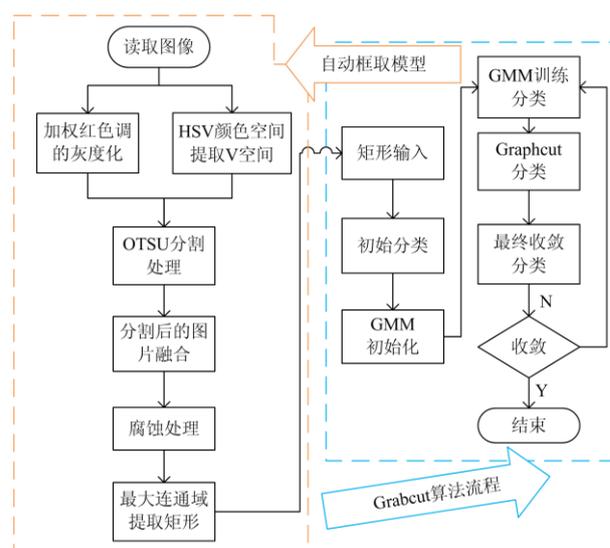


图 1 自动框取流程图

Fig. 1 Automatic framing flow chart

1.1 图像预处理的选择

1) 复合绝缘子基本以红色为主体^[18],这里选择红与绿蓝色差的方式,增强红色调来减少分割后的噪声,红与绿蓝色差的灰度化处理(H 处理)如式(1)。

$$\begin{aligned} Gray(i, j) = & 0.80 \times R(i, j) + \\ & 0.10 \times G(i, j) + 0.10 \times B(i, j) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $Gray$ 代表灰度化; R 、 G 、 B 分别代表红、绿、蓝颜色通道的变化,结果图为图 2 中③所示。

2) 由于 HSV 颜色空间中的 V 分量和材料的透射比和反射比相关,而且 V 分量可以充分地表达颜色特性。绝缘子和周围的环境背景的亮度差别较大,可以很好地起到突出绝缘子的效果^[19]。HSV 空间明度分量 V 提取(V 处理)如式(2)。

$$V = \max(R, G, B) \quad (2)$$

其中结果图为图 2 中⑤所示。

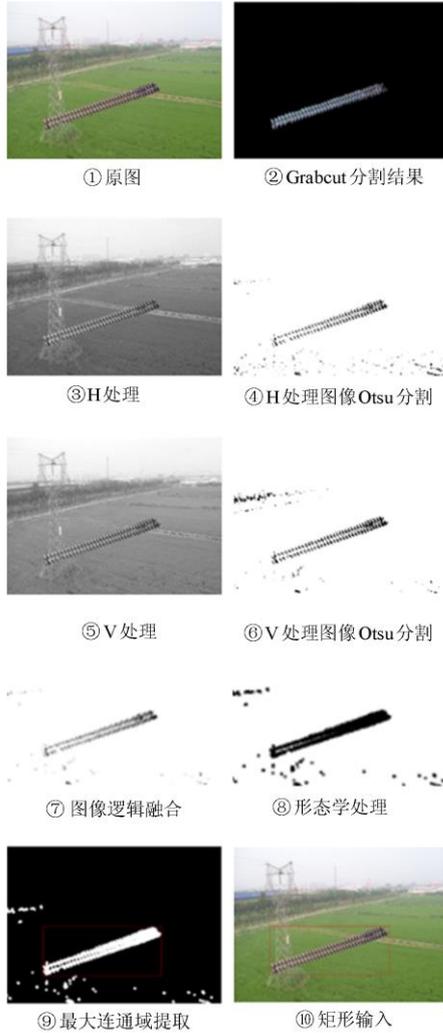


图 2 步骤效果图

Fig. 2 Effect picture of each step

1.2 最大阈值分割 (Otsu) 突出噪声

假设存在阈值 TH 可以把图像分为两类 A 和 B , 则像素各自的均值分别为 a 、 b 。图像全局均值为 ab 。同时像素被分为 A 类和 B 类的概率分别为 Pa 、 Pb 。因此:

$$Pa \cdot a + Pb \cdot b = ab \quad (3)$$

$$Pa + Pb = 1 \quad (4)$$

根据方差的概念, 类间方差表达式为

$$\sigma^2 = Pa(a - ab)^2 + Pb(b - ab)^2 \quad (5)$$

其中, σ^2 表示方差。将式(3)、式(4)代入式(5)中可得

$$\sigma^2 = Pa \cdot Pb \cdot (a - b)^2 \quad (6)$$

求能使上式最大化的灰度级 K 得到最佳阈值。其结果图如图 2 中④、⑥所示, 可以看出: 通过 H

处理后的图像主要存在与红色加权同级别的灰度噪声, 这里主要为红色调噪声。通过 V 处理后的图像主要存在颜色特征或者明度与绝缘子相同的噪声。

1.3 图像去噪与目标区域提取

1) 将主要存在红色调噪声的 H 处理分割图(如图 2 中④ H 处理图像 Otsu 分割), 与主要存在绿蓝色调噪声的 V 处理分割图(如图 2 中⑥ V 处理图像 Otsu 分割)进行或逻辑融合。即对图像(灰度图像或彩色图像均可)每个像素值进行二进制“或”操作, $1|1=1, 1|0=1, 0|1=1, 0|0=0$ 。本文采用 0 为目标区域的方式达到去噪的效果, 其效果图如图 2 中⑦所示。

2) 将融合后的图像进行腐蚀操作使得目标区域连通, 其中用集合 B (原始 disk 5)去腐蚀原图 A :

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (7)$$

3) 通过最大连通域提取目标区域, 并完成坐标提取, 在原图标记复合绝缘子, 至此完成绝缘子的自动框取, 效果图如图 2 中⑩所示。

1.4 自动分割 Grabcut 分割流程

1) 结合 Otsu 算法与原始 Grabcut 分割方法, 具体步骤如图 1 所示。

2) 每个步骤的效果图如图 2 所示。

2 绝缘子断串故障诊断

本文根据通过比较填充绝缘子空隙而得到的填充物面积判别绝缘子是否断串, 其主流程如图 3 所示。

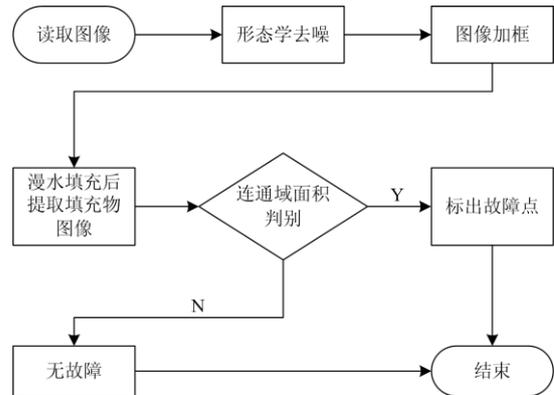


图 3 断串诊断流程图

Fig. 3 Fault diagnosis flow chart

2.1 绝缘子加框

求最小外接矩形, 即给出一个多边形, 求出外接该多边形且面积最小的简单外接矩形, 其主要步骤: 1) 首先求出平行于 x 轴或 y 轴的外接矩形, 记为简单外接矩形。2) 旋转原始多边形(循环, $0 \sim 90^\circ$), 求旋转每个度数后的多边形的简单外接矩形, 记录

简单外接矩形的面积、顶点坐标以及此时旋转的度数。3) 比较在旋转过程中所有的简单外接矩形, 求出面积最小的简单外接矩形。4) 根据记录的角度将面积最小的外接矩形图像反方向旋转到初始状态, 完成目标物体的最小矩形框选。绝缘子加框效果图如图 4 中②所示。在绝缘子加框前进行形态学去噪处理, 防止绝缘子加框过大, 其图为图 4 中①所示。

2.2 漫水填充孔洞与提取填充物

采用漫水填充图像中的孔洞并提取填充物图像具体步骤如下: 1) 将原始图片进行二值化操作得到二值化图像; 2) 从(0,0)点开始进行漫水填充; 3) 对漫水填充后的结果取反; 4) 将二值化图像与取反的漫水填充图像进行逻辑或操作得到填充的二值化图像; 5) 将填充的二值化图像与原始二值化图像做图像减法得到填充物图像^[20]。其中漫水的填充目标图为图 4 中③所示, 结果图为图 4 中④所示, 填充物图像为图 4 中⑤所示。

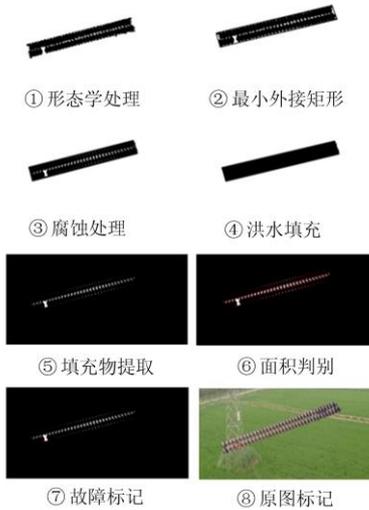


图 4 自动框取流程图

Fig. 4 Automatic framing flow chart

2.3 填充物面积判别

经过保留填充物图像的处理后, 若发生故障, 则连通域面积 s_i 较大的故障区域被凸显出来, 若无故障, 则填充图像中连通域面积无明显大小差别。因此, 本文通过比较连通域面积大小的方式定位断串故障, 具体步骤如下所述。

1) 提取填充物图像连通域面积^[21], 并按照一定的面积规则分类。

$$S = \begin{cases} a, s_i = s_{\max} \\ b, s_i \geq 0.9s_{\max} \\ c, s_i \leq 0.9s_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

$$2s_{\text{cmid}} < s_{\max} \quad (9)$$

式中: S 代表连通域类别; s_{\max} 代表最大连通域面积; a 、 b 、 c 分别代表连通域 a 类、 b 类、 c 类; $2s_{\text{cmid}}$ 代表连通域中面积大小位于 c 类中的中值。

2) 故障判断: 当 c 类不存在或者(9)条件不成立, 则绝缘子无断串故障。反之, 当 c 类存在并且式(9)中条件成立, 则存在故障。并经坐标转换在原图标记 a 类、 b 类对应区域定位故障位置。

判别方式存在的不足: 在定位过程中当有多个连续断串与较少连续断串或者单独断串同时存在时, 会出现只能定位最大面积的断串区域问题。如图 5 所示, A 、 B 、 C 、 D 为绝缘子图像空隙的填充物面积, 其中 A 、 B 为连续断串填充物(记为 AB), C 为单独断串填充物。 D 为其他空隙填充物。根据本文判据: AB 面积最大为 a 类, C 和 D 为 c 类。根据面积判别公式得出结论: AB 为故障区, 而 C 不是故障区。这就导致只能定位到最大连续断串位置。



图 5 假设图

Fig. 5 Hypothesis diagram

3 对比分析

为了验证本文提出算法的有效性, 随机选取了 90 张断串绝缘子图像, 其中单串、双串绝缘子各 30 张进行对比效果实验, 随机选取没有故障的绝缘子 30 张做识别判定实验。绝缘子分割方法与传统 Otsu 算法、原始的 Grabcut 算法进行比较分析如图 6; 整体实验数据如表 1。根据图 6(2)列效果图可以得出本文方法对于分割绝缘子这种结构简单、颜色明确的目标有很好的分割效果。通过对图 6(2)行对比可以得出: 单绝缘子串分割效果优于双绝缘子串; 绝缘子周围环境以天空为主体背景时, 分割效果更加优秀; 在光线昏暗、颜色相近的条件下也可以完整分割目标绝缘子。根据图 6(4,5,6)行效果图可以得出本文方法有良好的定位断串位置的能力。

将本文方法与传统的 Otsu、Grabcut 算法进行比较, 其中本文方法与传统的 Grabcut 算法对比效果图如图 6(2,4)行结果图所示。可以得出: 本文提出的方法可以达到传统 Grabcut 算法提取目标的效果, 而且人机交互过程中存在人为因素的影响, 当框选区域过大时, 分割结果可能达不到预期效果, 如图 6(4)行中实验图 2。对比图 6(2,3)行可以得出: 当绝缘子周围环境清晰时, Otsu 也可以很好地分割出绝缘子, 但是当绝缘子周围环境复杂时 Otsu 分割效果表现不好, 当颜色整体昏暗、光照不明显时效果更差。本文方法较好地解决了此类问题。



图 6 对比分析效果图

Fig. 6 Contrast analysis effect picture

表 1 实验结果表

Table 1 Table of experimental results

类别	有断串故障绝缘子		无故障绝缘子
	单串(30)	双串(30)	单双随机(30)
有效分割	29	29	29
精确分割	27	27	28
有故障	29	29	2

根据表 1 实验数据结果，在有缺陷的样本中验证本文算法的识别率，根据数据可得本文算法有效的分割率为 96.6%，精确分割率为 91%。根据识别出故障绝缘子的个数可以得出，有效分割的绝缘子几乎可以百分百判断出故障绝缘子，总体识别率由有效分割的效果决定。得出有故障的绝缘子总体的识别率为 96.6%。在无故障的样本中判断本文方法的误检率，根据表 1 数据可得误检率为 6.7%。通过表 2 的数据可知，本文方法与采用卷积神经网络法、纹理特征法和多特征融合法的绝缘子分割方法相比，其诊断准确率都有很好的表现，误检率也处于中等水平，而且本文方法有很好的灵敏性，大大降低了漏检的可能性。

表 2 对比分析表

Table 2 Comparative analysis table

方法	卷积神经网络法 ^[22]	纹理特征法 ^[23]	多特征融合法 ^[24]	本文方法
缺陷图像的识别率	90%	88.9%	89.7%	96.6%
无缺陷图像的误检率	10%	4%	8.5%	6.7%

4 结语

本文考虑了输电线路现场图像背景复杂的因素，Grabcut 算法对于目标简单的绝缘子图像可以有

效实现对复杂背景的去，且保留了完整的绝缘子部分。为后续的绝缘子断串识别奠定了基础，有效分割的准确率可以达到 96.6%。同时在面积判别过程中，采用高容错的方式检测有断串问题的绝缘子。判别方法对于具有断串故障的绝缘子检测率可以达到 96.6%，对于无故障绝缘子检测的误检率为 6.7%。虽然在定位过程中当有多个连续断串与较少连续断串或者单独断串同时存在时，可能会出现定位错误问题，但是这种情况仍然可以诊断出最大故障位置，判定绝缘子为故障绝缘子，避免漏检。

参考文献

- [1] 李鸿泽. 复合绝缘子断串原因分析及防范措施[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 51-56.
LI Hongze. Composite insulators fracture fault and preventing methods[J]. Electric Power Engineering, 2018, 37(4): 51-56.
- [2] 颜肃, 张玮亚, 李宏仲, 等. 基于人工智能的输电线路故障快速诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 94-99.
YAN Su, ZHANG Weiya, LI Hongzhong, et al. Research on fast fault diagnosis method of transmission line based on artificial intelligence[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 94-99.
- [3] 姚建刚, 付鹏, 李唐兵, 等. 基于红外图像的绝缘子串自动提取和状态识别[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(2): 74-80.
YAO Jiangan, FU Peng, LI Tangbing, et al. Algorithm research of automatically extracting the area of insulator from infrared image and state identification[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2015, 42(2): 74-80.
- [4] 陈文浩, 姚利娜, 李丰哲. 无人机电网巡检中的绝缘子缺陷检测与定位[J]. 计算机应用, 2019, 39(增刊 1): 210-214.
CHEN Wenhao, YAO Lina, LI Fengzhe. Insulator defect detection and location in UAV grid inspection[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(S1): 210-214.
- [5] HUANG X B, ZHANG H Y, ZHANG Y. Automatic identification and location technology of glass insulator self-shattering[J]. Journal of Electronic Imaging, 2017, 26(6): 1-14.
- [6] YAN B, CHEN D, YE R, et al. Insulator detection and recognition of explosion based on convolutional neural networks[J]. International Journal of Wavelets Multiresolution and Information Processing, 2019, 17(2): 1-22.
- [7] 彭向阳, 梁福逊, 钱金菊. 基于机载红外影像纹理特征的输电线路绝缘子自动定位[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 922-928.
PENG Xiangyang, LIANG Fuxun, QIAN Jinju. Automatic recognition of insulator from UAV infrared image based on periodic textural feature[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 922-928.
- [8] HU Zhuangli, HE Tong, ZENG Yihui, et al. Fast image recognition of transmission tower based on big data[J].

- Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 149-158. DOI: 10.1186/s41601-018-0088-y.
- [9] 冯振新, 周东国, 江翼, 等. 基于改进 MSER 算法的电力设备红外故障区域提取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 123-128.
FENG Zhenxin, ZHOU Dongguo, JIANG Yi, et al. Fault region extraction using improved MSER algorithm with application to the electrical system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 123-128.
- [10] 周可慧, 廖志伟, 陈琳韬, 等. 基于双重背景分离及自适应网格的电压致热型设备红外图像状态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 123-130.
ZHOU Kehui, LIAO Zhiwei, CHEN Lintao, et al. Research on state analysis of voltage-heating equipment based on dual background separation and adaptive meshing of infrared image[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 123-130.
- [11] 张东萍. 改进 Grabcut 算法在无人机影像船只识别中的应用与研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
ZHANG Dongping. Research on automatic ship detection based on improved Grabcut from UAV images[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [12] FUTAGAMI T, HAYASAKA N. Automatic extraction of building regions by using color clustering[C] // 2019 58th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), September 10-13, 2019, Hiroshima, Japan: 415-419.
- [13] YE Haijian, LIU Chengqi, NIU Peiyun. Cucumber appearance quality detection under complex background based on image processing[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(4): 193-199.
- [14] 陈文贺, 李彩林, 袁斌, 等. 有效的绝缘子自爆缺陷定位方法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(8): 2346-2352.
CHEN Wenhe, LI Cailin, YUAN Bin, et al. Effective method to locate self-explosion defects of insulators[J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(8): 2346-2352.
- [15] 韩正新, 乔耀华, 孙阳, 等. 基于图像识别的无人机输电线路绝缘子故障检测方法研究[J]. 现代电子技术, 2017, 40(22): 179-181, 186.
HAN Zhengxin, QIAO Yaohua, SUN Yang, et al. Research on image recognition based insulator fault detection method for UVA transmission line[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(22): 179-181, 186.
- [16] 熊杰. 航拍图像的绝缘子自爆特征识别研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
XIONG Jie. Study on self-explosion feature of insulator recognition in aerial image[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [17] 杨国萍, 刘本永. 基于目标轮廓增强的 GrabCut 图像分割方法[J]. 软件, 2020, 41(2): 28-32.
YANG Guoping, LIU Benyong. Grabcut image segmentation method based on target edge enhancement[J]. Computer Engineering & Software, 2020, 41(2): 28-32.
- [18] 黄新波, 刘新慧, 张焯, 等. 基于红蓝色差和改进 K-means 算法的航拍绝缘子分类识别方法[J]. 高压电技术, 2018, 44(5): 1528-1534.
HUANG Xinbo, LIU Xinhui, ZHANG Ye, et al. Classification recognition method of insulator in aerial image based on the red-blue difference and developed K-means algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1528-1534.
- [19] 朱邵成, 高清维, 卢一相, 等. 基于频率调谐的绝缘子识别与定位[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5573-5580.
ZHU Shaocheng, GAO Qingwei, LU Yixiang, et al. Identification and location of insulator string based on frequency-tuned[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23): 5573-5580.
- [20] 陈佳鑫, 贾英民. 一种基于漫水填充法的实时彩色目标识别方法[J]. 计算机仿真, 2012, 29(3): 4-9.
CHEN Jiaxin, JIA Yingmin. Real-time color object recognition method based on flood fill algorithm[J]. Computer Simulation, 2012, 29(3): 4-9.
- [21] 徐正光, 鲍东来, 张利欣. 基于递归的二值图像连通域像素标记算法[J]. 计算机工程, 2006(24): 186-188, 225.
XU Zhengguang, BAO Donglai, ZHANG Lixin. Pixel labeled algorithm based on recursive method of connecting area in binary images[J]. Computer Engineering, 2006(24): 186-188, 225.
- [22] 陈庆, 闫斌, 叶润, 等. 航拍绝缘子卷积神经网络检测及自爆识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6): 942-953.
CHEN Qing, YAN Bin, YE Run, et al. Insulator detection and recognition of explosion fault based on convolutional neural networks[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(6): 942-953.
- [23] 张晶晶, 韩军, 赵亚博, 等. 形状感知的绝缘子识别与缺陷诊断[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(8): 1194-1201.
ZHANG Jingjing, HAN Jun, ZHAO Yabo, et al. Insulator recognition and defects detection based on shape perceptual[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(8): 1194-1201.
- [24] 姜云土, 韩军, 丁建, 等. 基于多特征融合的玻璃绝缘子识别及自爆缺陷的诊断[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 52-58, 64.
JIANG Yuntu, HAN Jun, DING Jian, et al. The identification and diagnosis of self-blast defects of glass insulators based on multi-feature fusion[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 52-58, 64.

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-03-23

作者简介:

闫丽梅(1971—), 女, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为电力系统分析及控制; E-mail: 565735794@qq.com

刘永强(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统故障分析; E-mail: 554147099@qq.com

徐建军(1971—), 男, 通信作者, 博士研究生导师, 主要研究方向为能源变换与控制、智能电网。E-mail: junjianxu@163.com

(编辑 魏小丽)