

基于 GANR-UNet 的绝缘子红外图像分割及低零值故障诊断研究

李 博^{1,3}, 刘会斌¹, 王胜辉³, 田立山², 张欣伟¹, 尚 鑫¹,
买佳敏³, 律方成³

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 国网内蒙古东部电力有限公司建设分公司, 内蒙古 呼和浩特 010000; 3. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 为实现瓷绝缘子低/零值故障的识别与诊断, 提取了绝缘子红外图像的颜色特征并根据分析结果提出了低/零值故障的诊断判据。通过采用残差网络 ResNet18 与分割网络 UNet 相结合构建了深度 R-UNet 网络, 实现了红外图像中绝缘子串区域的分割, 进而基于生成对抗网络 (generative adversarial network, GAN) 提出了优化的 GANR-UNet 分割模型, 提高绝缘子分割的准确性。对分割得到的绝缘子串进行位置校正后, 提取正常及低/零值绝缘子长轴方向特征区域的 HSV 颜色分布, 找到了识别故障绝缘子的特征信息。最后提出了一种基于颜色序列相似距离量度的低/零值绝缘子诊断方法。测试结果表明: 利用提出的 GANR-UNet 分割模型和故障诊断方法, 能够处理绝缘子的红外图像并准确识别出绝缘子的绝缘状态。

关键词: 低/零值绝缘子; UNet 分割; HSV; 相似度; 诊断

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2691 (2026) 02-0132-11

Research on Insulator Infrared Image Segmentation Based on GANR-UNet and Low/Zero Resistance Fault Diagnosis

LI Bo^{1,3}, LIU Huibin¹, WANG Shenghui³, TIAN Lishan², ZHANG Xinwei¹, SHANG Xin¹,
MAI Jiamin³, LÜ Fangcheng³

(1. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010010, China;

2. Electric Power Branch of State Grid East Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd., Hohhot 010000, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To achieve the identification and diagnosis of low/zero fault of porcelain insulator, the color features of insulator infrared images are extracted and the diagnostic criteria for low/zero fault are proposed. Firstly, a deep R-UNet network is constructed by combining the residual network ResNet18 with the segmentation network UNet to segment the insulator string region in infrared images. Furthermore, based on the GAN network, an optimized GANR-UNet segmentation model is proposed to enhance the accuracy of insulator segmentation. Then, after position correction of the segmented insulator string, the HSV color distribution of the feature region of normal and low / zero insulators is extracted. Finally, by calculating the similarity distance parameters of insulator color sequences, the diagnosis method for low/zero-value insulators based on similarity distance measurement of color sequences are proposed. The results of the examples indicate that the proposed GANR-UNet model and fault diagnosis method can effectively process infrared images of insulators and accurately identify their insulation status.

Key words: low/zero resistance insulator; UNet segmentation; HSV; similarity; diagnosis

0 引言

盘型悬式瓷绝缘子是输电线路中广泛使用的电气元件之一,在持续的机械应力、冷热交替和外界雷击等因素作用下,其绝缘性能会逐渐丧失并最终可能发展为低零值绝缘子^[1-3]。基于红外图像的低零值绝缘子状态检测方法,其主要步骤有^[4-9]:红外图像预处理、目标区域定位分割、特征信息提取分析和目标状态的识别与诊断。

目前,不少学者研究了红外图像中绝缘子串的定位分割方法^[10-13],实现了绝缘子串区域与现场背景分离。红外图像分割方法主要分为两类,一类是基于视觉图像处理的分割法,如文献[10]首先提取红外图像的 SURF (Speeded Up Robust Features) 特征点并基于 FCM (Fuzzy C-means) 算法对特征点进行聚类划分,然后根据绝缘子串的形状特征实现目标区域定位和分割。该方法可以有效提取出红外图像中的绝缘子,但是对于 500 kV 绝缘子串,其长度较长、所占红外图像的比例较小,导致了它的红外图像分割效果欠佳;进而文献[11]采用泛洪填充 (Floodfill) 算法和改进的分水岭算法,显著提高了 500 kV 绝缘子串红外图像分割的效果和准确率。

另一类是基于深度学习神经网络的分割法,如文献[12]构建了多尺度特征融合的全卷积神经网络 (Fully Convolutional Networks, FCN) 模型学习绝缘子的纹理、形状等特征,实现了劣化绝缘子片的分割,但该模型在复杂环境中的识别精度和检测效率有待提升。进而文献[13]使用实例分割网络 Mask-RCNN 对红外图像中的绝缘子目标进行检测和分割,该模型的检测效率明显提高。以上研究表明,基于卷积神经网络的图像分割法效率更高且更适合在线检测应用^[13],但仍面临较大挑战,如受检测距离、拍摄角度等因素影响,采集到的现场红外图像不易处理,红外图像中目标区域的识别准确度也有待提升。

对于故障绝缘子状态的识别与诊断方面,目前现场广泛使用 DL/T 664-2016《带电设备红外诊断应用规范》规程和基于温度特征的诊断方法,即以相邻绝缘子铁帽温差为 1℃ 作为劣化绝缘子的诊断标准,但实际中应用该标准识别低零值绝缘子的正确率偏低^[14-16]。如文献[17]通过试验验证了采用红外热像法可以发现异常发热的绝缘子,且经绝缘电阻测试均为低值绝缘子,但依据

1℃ 的判据并不能得出正确结论。针对该问题,文献[18]提出通过生成待测绝缘子串的缺陷诊断温度特征向量,再结合温度上下阈值实现低零值绝缘子的诊断。该方法中诊断阈值随检测对象的变化而变化,有效提高了劣化检测的正确率,但由于瞬时检测特性,劣化温度特征有时并不稳定,可能会导致漏检。因此文献[19]提出采用一种时间序列模型对绝缘子串的温度时间序列进行拟合、预测,得到较长一段时间的温度预测结果后更容易发现温度曲线的劣化特征,但实际检测中该方法识别位于两端的劣化绝缘子相比识别位于中间段的效果更好。

以上研究表明仅使用红外图像温度信息来检测劣化瓷绝缘子的效率低且漏检率较高,因此表征绝缘子低零值的颜色特征、纹理特征等,结合深度神经网络的模型诊断方法在研究人员努力下也取得了不错的成果^[7,8,20]。如文献[8]通过分析绝缘子红外图像的灰度共生矩阵,提出了使用 3 种纹理特征并结合支持向量机进行绝缘子状态识别。而文献[20]则提出了基于中心线颜色矩阵的劣化绝缘子红外诊断模型,以 RGB 通道下的像素矩阵为特征量,采用 BP 神经网络实现低零值绝缘子的识别与诊断。以上研究表明采用网络模型的诊断方法识别精度较高,但复杂的特征提取过程及模型训练需要耗费较多时间。

基于此,本文采用 UNet 语义分割网络和深度残差网络相结合构建了绝缘子串的 R-UNet 分割模型,实现了绝缘子串区域与背景分离;进一步基于对抗博弈提出了优化的 GANR-UNet 模型,得到了边缘更完整的绝缘子串分割图像。通过检测绝缘子串长轴与水平方向的夹角以实现绝缘子串位置校正,提取出绝缘子长轴方向上特征区域的 HSV 颜色分布。通过计算颜色序列相似距离的评价参数提出了绝缘子低/零值故障的诊断方法和相关判据。绝缘子的实例诊断结果验证了本文所提诊断方法的有效性。

1 绝缘子串分割模型

1.1 残差 UNet 分割网络

从红外图像中分割绝缘子串属于小样本的目标分割问题,其特点是训练样本较少,语义分割模型 UNet 用于小样本分割时能获得准确的分割结果。UNet 模型结构简单,整个网络由编码部分和解码部分构成,在编码网络中逐步压缩图像尺寸,

提取绝缘子串红外图像的抽象特征和深层语义特征;在解码网络中恢复图像尺寸,并通过跳跃连接结构融合利用网络不同层次的特征信息,以实现绝缘子串的精确分割。

深度残差 ResNet 网络具有良好的特征提取和分析能力,该网络通过残差模块将一部分输入不经过卷积层直接连接到输出,不仅减少了网络中浅层信息的丢失,还有效缓解了深度网络梯度消失的问题^[21],因此本文在大型数据集上预训练了 ResNet18 网络,并将其作为 UNet 模型的编码网络进行迁移学习训练,得到的 R-UNet 分割网络结构如图 1 所示。

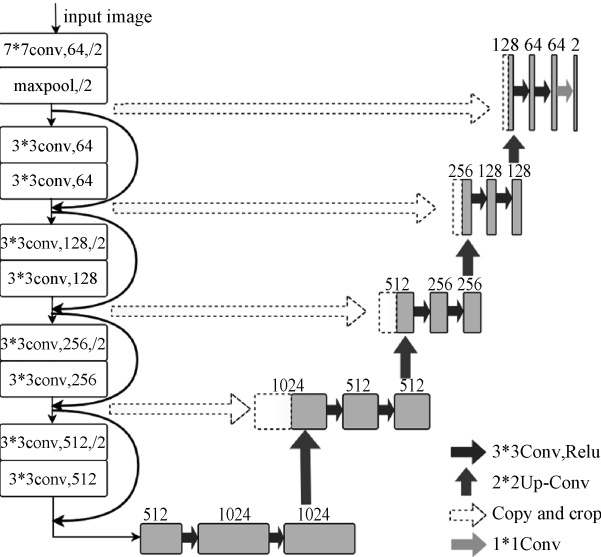


图 1 R-UNet 网络结构

Fig. 1 R-UNet network structure

1.2 基于 GAN 网络的绝缘子串分割模型优化

生成对抗网络 (GAN) 是一种基于博弈论思想的网络模型^[22],该模型由生成器和判别器构成,其中判别器对数据来源是否为真实数据进行真假判别,而生成器通过拟合真实数据输出合成数据以混淆判别器的判断,GAN 网络的最终训练目的是激励生成器合成的数据更接近其对应的真实图像。基于 GAN 网络,本文提出了一种用于绝缘子串红外图像分割的优化分割模型 GANR-UNet,以提高绝缘子串边缘获取的准确性,模型结构见图 2 所示。

在图 2 生成对抗网络的构建中,本文采用 1.1 节提出的 R-UNet 分割网络作为生成器,将原始图像输入到生成器中得到分割图像。将分割图像和原始图像组合成两通道的假图像样本,对应的标签图像和原始图像组合成真图像样本,进而在判

别器中利用多层卷积核提取图像特征,最终得到输入图像是否属于真实数据的预测概率值,判别器网络结构见图 3 所示。

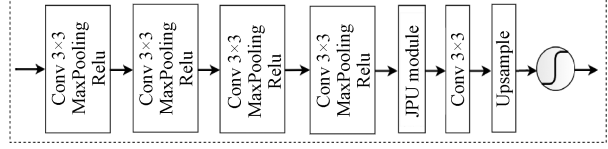


图 2 判别器网络结构

Fig. 2 Discriminator network structure

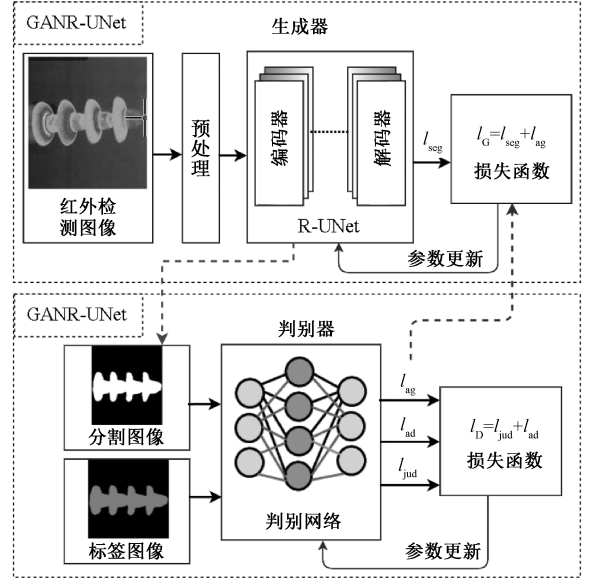


图 3 GANR-UNet 网络结构

Fig. 3 GANR-UNet network structure

生成对抗网络中,判别器提升鉴别能力以将分割图像判别为假,而生成器提高分割精度以使分割图像被判别为真,经对抗训练和网络优化后,生成器网络在测试中能得到精确的绝缘子串分割图像。

生成对抗网络采用 Adam 算法进行网络学习优化,通过计算生成器网络的损失函数 l_G 和判别器网络的损失函数 l_D ,反向更新模型的参数。其中 l_G 由分割网络的交叉熵损失函数 l_{seg} 和来自判别器网络的附加约束函数 l_{ag} 构成; l_D 由判别器网络的交叉熵损失函数 l_{jud} 和附加约束函数 l_{ad} 构成; l_G 和 l_D 的表达式如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} l_G = l_{seg} + l_{ag} \\ l_{seg} = -\frac{1}{mn} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij} \log(g(x_{ij})) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (1 - y_{ij}) \log(1 - g(x_{ij})) \right] \\ l_{ag} = E_{z \in Z} [\log(1 - D(z))] \end{cases} \quad (1)$$

式中: l_{seg} 中 x_{ij} 和 $m \times n$ 为生成器输入图像在 i 行 j 列的像素值和图像大小, y_{ij} 为标签图像像素值, 而 $g(x_{ij})$ 为生成器输出的生成图像结果。 l_{ag} 中 E 代表期望值; z 和 Z 代表判别器输入的假图像样本和其所属的样本集, $D(z)$ 代表假图像在判别器中被判别为真的概率。

$$\begin{cases} l_D = l_{jud} + l_{ad} \\ l_{jud} = -\frac{1}{N} \left[\sum_i q_i \log(p_i) + \sum_i (1 - q_i) \log(1 - p_i) \right] \\ l_{ad} = -E_{w \in W} [\log(D(w))] - E_{z \in Z} [\log(1 - D(z))] \end{cases} \quad (2)$$

式中: l_{jud} 中 N 为判别器输入的图像样本总数, p_i 和 q_i 代表第 i 个样本被预测为真的概率和样本所属的实际类别标签。 l_{ad} 中 E 代表期望值, w 和 W 代表判别器输入的真图像样本和其所属的样本集, $D(w)$ 代表真图像数据在判别器中被判别为真的概率。

1.3 绝缘子串红外图像分割结果分析

本文首先对绝缘子红外图像进行滤波去噪、直方图均衡化、尺寸归一化等操作^[23,24], 得到 335 张训练集图像; 通过人工标定得到对应的标签图像; 设置网络参数并完成网络训练, 最后采用测试集图像检验分割网络的性能。使用的网络性能评价指标有: 交并比 (IoU)、精度 (Precision) 和召回率 (Recall), 各指标的定义式如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} IOU = \frac{TP}{FN + TP + FP} \\ Precision = \frac{TP}{TP + FP} \\ Recall = \frac{TP}{TP + FN} \end{cases} \quad (3)$$

式中: TP 代表真阳性, FP 代表假阳性, FN 代表假阴性, TN 代表真阴性。精度 (Precision) 代表准确预测的绝缘子像素在预测的总绝缘子像素中的占比; 召回率 (Recall) 代表准确预测的绝缘子像素在实际的总绝缘子像素中的占比。

将绝缘子红外图像分别进行 R-UNet 分割和 GANR-UNet 分割, 其分割结果如图 4 所示。

从图 4(a) 中可以看出, 原始红外图像中包含绝缘子串、导线、金具及图例说明等内容。首先采用 R-UNet 分割网络提取其中的绝缘子串区域, 得到的结果如图 4(b)。由于深度残差网络具有较强的特征提取能力, R-UNet 网络能够完整地

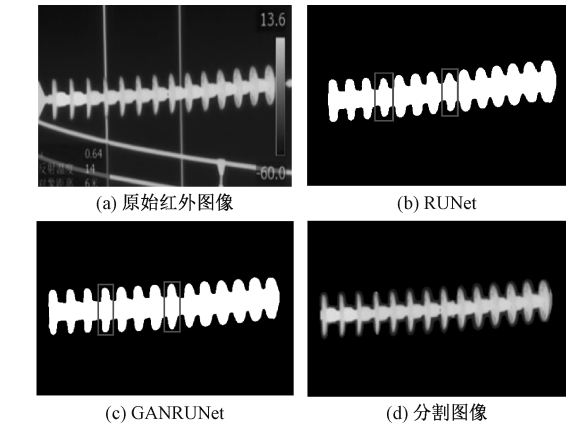


图 4 绝缘子串区域分割的效果示意图
Fig. 4 Diagram of insulator string area segmentation

缘子重合的地方存在绝缘子欠分割问题, 见图 4(b) 中的标记。GANR-UNet 网络的分割结果如图 4(c) 所示, 可以看出该方法可以有效解决绝缘子欠分割的问题以获得正确的绝缘子边缘, 提高了网络识别分割绝缘子的精度, 有助于获得准确的目标特征信息。

使用绝缘子测试集红外图像检验各分割模型的能力并计算其性能评价指标, 统计结果如表 1 所示。

表 1 性能指标结果

网络模型	IoU	Precision	Recall
UNet	88.06	92.17	93.10
R-UNet	89.19	92.90	93.50
GANR-UNet	89.47	93.53	94.65

比较表 1 中数据可知, 模型 GANR-UNet 的 IoU、Precision 和 Recall 指标得分在三种模型中最高, 表明其在绝缘子红外图像的分割任务中表现较好。与 R-UNet 模型相比, 模型 GANR-UNet 的 Precision 提高了 0.63% 且 Recall 提高了 1.15%, 表明其能分割出更完整且更准确的绝缘子图像。

2 绝缘子红外图像特征提取

绝缘子长轴方向上中心轴线附近的特征信息丰富, 且受图像背景信息的干扰较小。为研究红外图像中正常、低值和零值绝缘子的色彩差异, 本文将分割出的绝缘子串目标校正至水平位置后, 提取其单片绝缘子中心轴线附近的 HSV 颜色值进行对比分析。

2.1 绝缘子串位置校正

利用霍夫 (Hough) 变换^[25] 和旋转矩阵将分割

出的绝缘子串区域图像校正至水平位置,其中 Hough 变换的原理是在图像中检测直线并获取直线与水平方向的夹角,进而利用该夹角和旋转矩阵处理图像中任意像素点的坐标实现坐标变换,改变目标区域在图像中的位置。旋转矩阵的公式如式(4)所示,将图 4(d) 进行位置校正后得到的图像如图 5 所示。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{4}$$

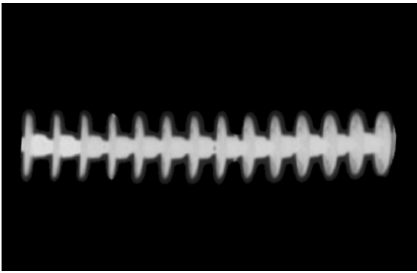


图 5 位置校正后的分割图像
Fig. 5 Image after position correction

2.2 绝缘子特征区域的颜色值分布

采用人工处理的方法从绝缘子串分割图像中切分出单片绝缘子,图 6 展示了不同状态下单片绝缘子的颜色图像,从图 6 中可以看出在 RGB 模型中,零值绝缘子颜色较正常绝缘子稍暗而低值绝缘子颜色稍亮。在 HSV (Hue, Saturation, Value) 模型中,正常绝缘子的色度 (Hue, H) 偏橙黄色,低值绝缘子的色度 H 偏橙红色,而零值绝缘子的色度 H 更接近黄色,得出正常、低值和零值绝缘子的色度 H 具有明显不同。

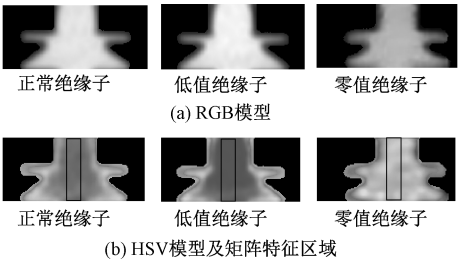


图 6 单片绝缘子颜色图像
Fig. 6 Color image of single insulator

为进一步分析不同状态绝缘子图像的饱和度 (Saturation, S) 和明度 (Value, V) 的情况,在绝缘子长轴方向的中心轴线附近选定矩形特征区域,其示意图见图 6(b),该区域宽度为 10 个像素,长度等于绝缘子的高度。针对正常、低值和零值绝缘子,分别提取其特征区域的 H、S 和 V 颜色值分布,

得到的结果如图 7 所示。
图 7(a) 为绝缘子特征区域的 H 颜色值分布图,其中正常绝缘子的 H 颜色值在 27~33 之间,零值绝缘子的 H 颜色值比正常的稍低在 22~28 之间;而低值绝缘子的 H 颜色值分为两段,其中一段在 80~90 之间对应着含钢帽的大部分绝缘子区域,剩余绝缘子区域的 H 颜色值则分布在 30 附近。

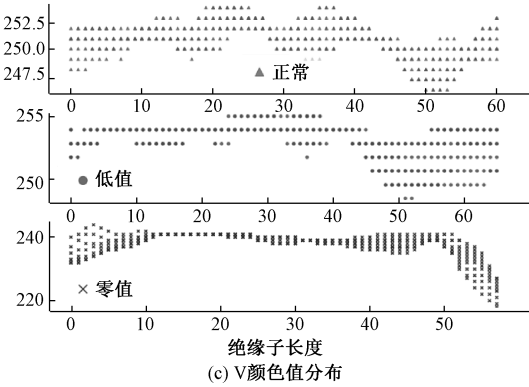
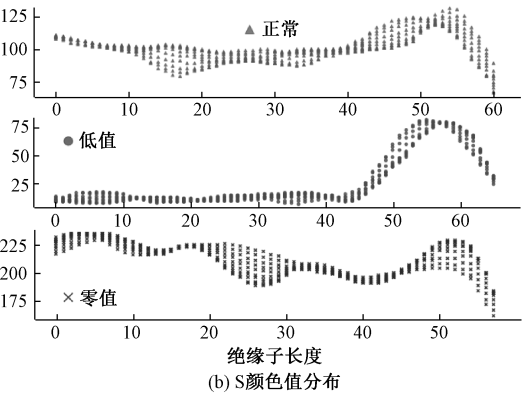
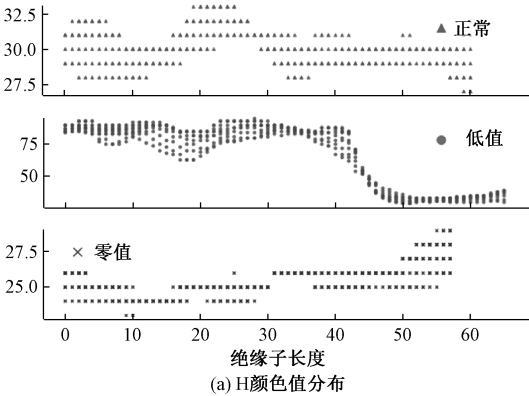


图 7 绝缘子特征区域的 HSV 颜色值分布
Fig. 7 HSV color distribution of the feature region

从图 7(b) 中可知,对于绝缘子特征区域的 S 颜色值,正常绝缘子的分布在 100 附近且随长度在±20 的范围内波动,零值绝缘子的分布在 200 附近且随长度在±25 的范围内波动;对于低值绝缘

子,其长度为 0~40 时 S 颜色值分布在 15 附近且上下波动较小,长度为 40~60 时 S 颜色值呈明显升高趋势。

图 7(c) 为绝缘子特征区域的 V 颜色值分布图,其中正常和低值绝缘子的 V 颜色值集中分布在 245~255 的范围内,两者分布的整体变化趋势差异较小;零值绝缘子的 V 颜色值分布范围在 220~245 之间,与正常绝缘子相比,零值的 V 颜色值数值较低且分布范围波动性稍大。

以上分析可知,从颜色值的分布范围及波动性来看,正常和低值绝缘子的 H、S 颜色值分布差异较明显,且低值绝缘子伞裙部位与钢帽部位的颜色差异也体现在 H 和 S 通道上。对于正常和零值绝缘子,其颜色值差异主要体现在 S 和 V 通道上。

3 低零值绝缘子红外诊断依据及实例验证

3.1 相似距离量度

绝缘子矩形特征区域的颜色值是按照像素点分布的,以绝缘子长度为横坐标,在不同的位置计算出每列像素的颜色值均值,最终从特征区域中可提取出按照长度分布的颜色均值序列。据此得到正常绝缘子的 H 颜色均值序列,其示意图如图 8 所示。

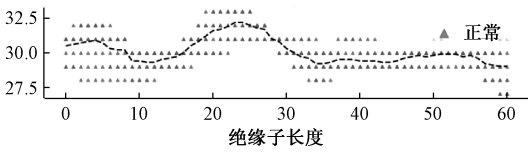


图 8 正常绝缘子的 H 颜色序列

Fig. 8 H color sequence of normal insulator

为进行序列与序列之间的相似性评估,常用的方法有动态时间规整 (Dynamic Time Warping, DTW) 算法^[26];豪斯多夫距离 (Hausdorff Distance, HD) 算法和离散弗雷歇距离 (Fréchet Distance, FD) 算法^[27,28];由于采用动态规划的思想,这些方法适用于长度相同或不同的序列。

动态时间规整算法 (DTW),其主要思想是寻找两条序列之间的最优匹配路径 $\gamma_{\min}$ 并计算路径的长度,长度越短时表明两条序列的相似程度越高。对于 P 和 Q 两条序列,首先计算 P 、 Q 各点之间的欧式距离得到距离矩阵 $\mathbf{W}_{M \times N}$,其表达式如式(5)所示。进而根据矩阵 $\mathbf{W}$ 计算得到 P 、 Q 各点

之间的累计距离矩阵 $\mathbf{D}_{M \times N}$,矩阵 $\mathbf{D}$ 中各元素的计算公式如式(6),最终元素 $D(M, N)$ 即为找到的最优匹配路径 $\gamma_{\min}$ 的长度。

$$\begin{cases} P = \{(x_1, y_1), \dots, (x_p, y_p), \dots, (x_M, y_M)\} \\ Q = \{(x_1, y_1), \dots, (x_q, y_q), \dots, (x_N, y_N)\} \\ \mathbf{W}_{M \times N} = \begin{bmatrix} d(1,1) & d(1,2) & \dots & d(1,N) \\ d(2,1) & d(2,2) & \dots & d(2,N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d(M,1) & d(M,2) & \dots & d(M,N) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} D(1,q) = \sum_{n=1}^q d(1,n), q \in [1,N] \\ D(p,1) = \sum_{m=1}^p d(m,1), p \in [1,M] \\ D(p,q) = d(m,n) + \min_{\substack{2 \leq m \leq M \\ 2 \leq n \leq N}} \left\{ \begin{matrix} D(p-1,q) \\ D(p,q-1) \\ D(p-1,q-1) \end{matrix} \right\} \end{cases} \quad (6)$$

式中:矩阵 $\mathbf{W}$ 的元素值 $d(p, q)$ 为点 (x_p, y_p) 与点 (x_q, y_q) 之间的欧式距离。

豪斯多夫距离算法 HD,在序列 P 和 Q 之间的定义式如式(7)所示。

$$\begin{cases} hd(P, Q) = \max_{p \in P} \{ \min_{q \in Q} (\|p - q\|) \} \\ hd(Q, P) = \max_{q \in Q} \{ \min_{p \in P} (\|q - p\|) \} \\ HD(P, Q) = \max \{ hd(P, Q), hd(Q, P) \} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\| \cdot \|$ 表示两点之间的距离范式; $hd(P, Q)$ 和 $hd(Q, P)$ 分别代表从 P 到 Q 和从 Q 到 P 的单向豪斯多夫距离,而 $HD(P, Q)$ 为双向豪斯多夫距离。

单向 $hd(P, Q)$ 的计算过程为:首先计算点集 P 中的每个点 p_i 与另一点集 Q 中距离该点最近的 q_j 之间的距离值 $\|p_i - q_j\|$,然后将所有距离值进行大小排序,得到的最大值记为 $hd(P, Q)$ 。 $hd(Q, P)$ 的求解方法同理。最后取 $hd(P, Q)$ 和 $hd(Q, P)$ 中的较大值作为双向 $HD(P, Q)$ 的值, HD 的值越小,表明点集的相似匹配度越大。

离散弗雷歇距离算法 FD,其具体求解过程为:首先计算序列 P 和 Q 各点之间的欧式距离得到距离矩阵 $\mathbf{W}_{M \times N}$,同公式(5);然后创建一个新的矩阵 $\mathbf{F}$,其各元素由下列公式(8)确定。此时矩阵 $\mathbf{F}$ 中的元素值 F_{MN} 即为序列 P 和 Q 之间的弗雷歇距离。

$$F_{ij} = \begin{cases} \max \left\{ \begin{matrix} d_{ij}, \\ \min \left\{ \begin{matrix} d_{i-1,j-1}, \\ d_{i,j-1}, d_{i-1,j} \end{matrix} \right\} \end{matrix} \right\} & i > 0, j > 0 \\ \max (d_{ij}, d_{0,j-1}) & i = 0, j > 0 \\ \max (d_{ij}, d_{i-1,0}) & i > 0, j = 0 \\ d_{ij} & i = 0, j = 0 \end{cases} \quad (8)$$

3.2 低零值绝缘子红外诊断依据

为实现基于红外图像的绝缘子状态识别,本文提出基于颜色序列相似距离量度的低零值绝缘子诊断方法,其具体流程如图 9 所示。首先提取多个正常绝缘子的 H、S、V 颜色序列并求平均,可得到 3 个颜色序列结果作为参考;然后提取出待识别绝缘子的 H、S 和 V 颜色序列,则每个通道的颜色序列与对应参考序列都可计算出 3 个相似距离量度,包括 DTW、HD 和 FD 参数;最后根据计算结果和绝缘子在低值/零值状态下参数诊断依据,对待测绝缘子的绝缘状态作出评估。

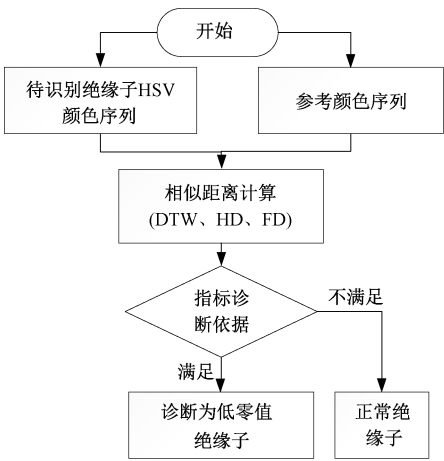


图 9 低零值绝缘子诊断流程

Fig. 9 Diagnosis process of low/zero resistance insulator

图 9 中计算两条颜色序列的相似距离量度,具体方法为:将颜色分布长序列划分为多个短序列,再计算对应短序列之间的距离参数,最后求解距离参数在所有短序列下的方差结果。一个短序列包含一定数目的像素点,当像素点的数目较多时关注序列的整体差异,而当像素点的数目较少时更关注序列的局部差异,经过多次试验后确定序列的划分方法为:每 3 个像素点构成一个短序列且相邻两个短序列的点不重复。

按照所述方法计算不同状态绝缘子的各颜色序列与参考序列的距离参数,结果如图 10、图 11

和图 12 所示。图 10 和图 11 分别对应正常和低值绝缘子的相似距离计算结果,图中距离参数 (DTW、HD 和 FD) 的数值越大对应区域的颜色越深;认为距离越近时两个序列的相似度越好。从图 11 中可知,低值绝缘子的 H、S 序列与参考序列之间距离较远,与正常绝缘子的差异明显;其 V 序列与参考序列之间距离较近,与正常绝缘子的差异较小。

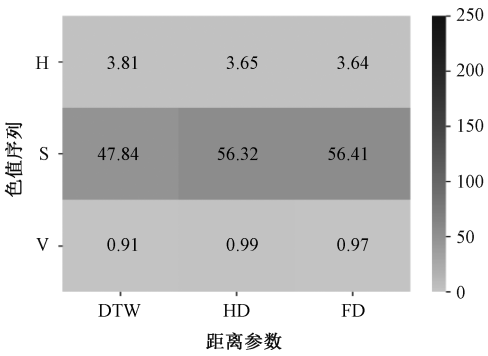


图 10 正常绝缘子的距离参数

Fig. 10 Distance parameters of normal insulator

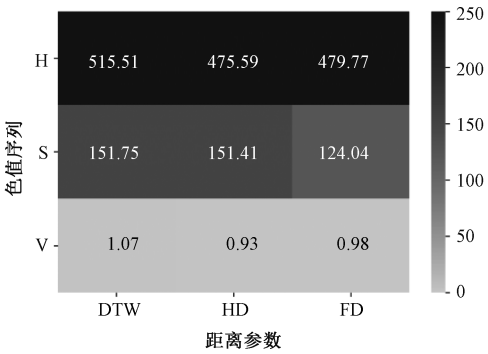


图 11 低值绝缘子的距离参数

Fig. 11 Distance parameters of low-value insulator

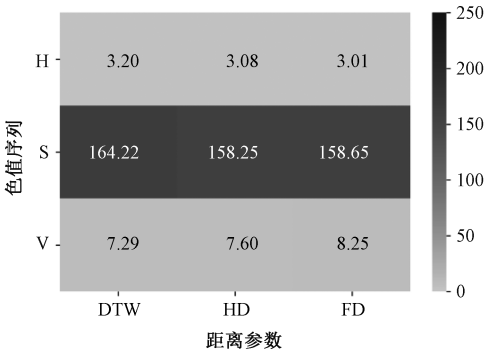


图 12 零值绝缘子的距离参数

Fig. 12 Distance parameters of zero-value insulator

从图 11 中可以看出,HD 和 FD 参数在不同颜色序列下的数值低于或接近 DTW 参数,以 H 序列

为例,其 HD 和 FD 参数较 DTW 参数分别降低了 7.7% 和 6.9%,分析原因是:这两个参数在反映序列最大不相似度的基础上,仍能关注到序列之间的局部最短距离,并且从原理上 FD 参数较 HD 参数对最短距离的表征能力更好。对于 S 序列,FD 参数比 HD 参数降低了 18.1%,表明低值绝缘子的 S 序列中部分短序列与参考序列的分布距离较其他短序列明显缩小。

图 12 是零值绝缘子颜色序列与参考序列的相似距离计算结果。从图 12 中可以看出,零值绝缘子的 S、V 序列与参考序列之间距离较远,与正常绝缘子的差异明显,其 H 序列与参考序列距离较近,与正常绝缘子的差异较小。

根据图 10 和图 11 的对比分析结果,可提出低值绝缘子的诊断依据,如式(9)所示:

$$\begin{cases} S_1 = \min \{ DTW(H), HD(H), FD(H) \} > 380 \\ S_2 = \min \{ DTW(S), HD(S), FD(S) \} > 90 \\ S_3 = \frac{DTW(H) - FD(H)}{DTW(H)} \times 100\% > 5\% \\ S_4 = \frac{DTW(S) - FD(S)}{DTW(S)} \times 100\% > 7\% \end{cases} \quad (9)$$

式中: S_1 和 S_2 分别表示绝缘子 H 颜色序列三种距离参数的最小值和 S 颜色序列三种距离参数的最小值; S_3 和 S_4 分别表示绝缘子 H 序列和 S 序列的 FD 参数较 DWT 参数的降低幅度;当 S_1-S_4 同时满足一定的阈值条件时,可充分认为待测绝缘子是低值绝缘子。

同理,根据图 10 和图 12 的对比分析结果,可提出零值绝缘子的诊断依据,如式(10)所示:

$$\begin{cases} Ds_1 = \min \{ DTW(H), HD(H), FD(H) \} > 3 \\ Ds_2 = \min \{ DTW(S), HD(S), FD(S) \} > 120 \\ Ds_3 = \min \{ DTW(V), HD(V), FD(V) \} > 5 \end{cases} \quad (10)$$

式中: Ds_1 表示绝缘子 H 颜色序列三种距离参数的最小值; Ds_2 表示绝缘子 S 颜色序列三种距离参数的最小值和 Ds_3 表示绝缘子 V 颜色序列三种距离参数的最小值;当 Ds_1-Ds_3 同时满足一定阈值条件时,可充分认为待测绝缘子是零值绝缘子。

3.3 实例验证的结果及分析

为验证本文提出的低/零值绝缘子诊断过程及阈值判据的合理性,本文采集了 10 个绝缘子红外图像进行故障诊断研究,其中含 3 个正常绝缘

子、3 个零值绝缘子和 4 个低值绝缘子,部分实例验证的结果如图 13 和图 14 所示,两幅图提取出的实例绝缘子的颜色均值序列结果。

图 13 显示了实例 1 的 H 和 S 色值曲线在绝缘子长度上分为趋势不同的两段,长度为 0~65 的一段与正常绝缘子的距离明显;图 14 显示了实例 2 的各通道色值曲线在绝缘子长度上无明显趋势变化,且与正常绝缘子的距离明显。

进而计算出实例 1 和实例 2 的颜色序列与对应参考序列的各种距离参数,再根据式(9)和式(10)判据对实例绝缘子的状态进行诊断,得到的具体诊断结果如表 2 所示。

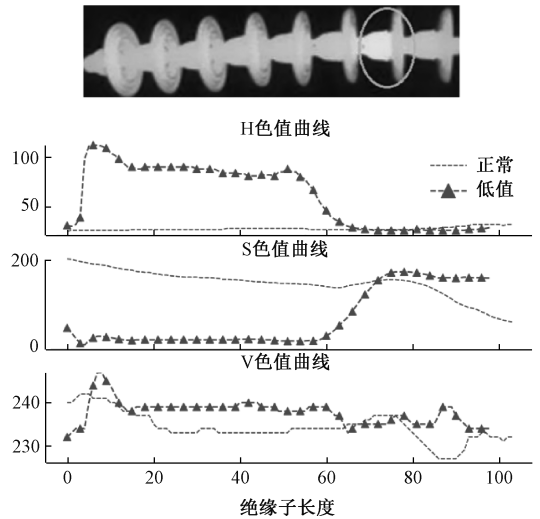


图 13 实例 1

Fig. 13 Example 1

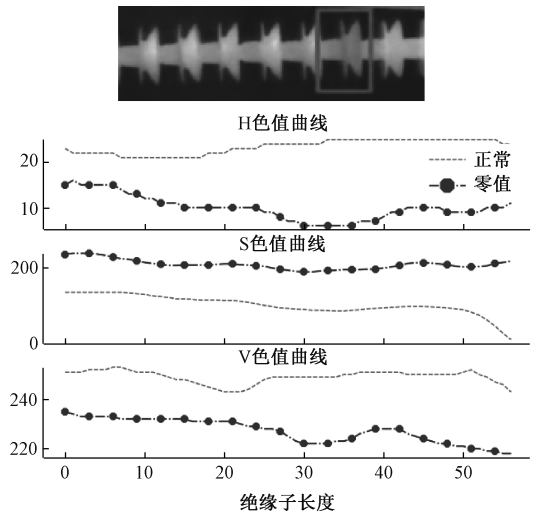


图 14 实例 2

Fig. 14 Example 2

从表 2 中可知:实例 1 的 $S_1 \sim S_4$ 诊断参数计

算值同时大于所提阈值条件,且各诊断参数的灵敏度均大于 1.2,因此可得出实例 1 是低值绝缘子的诊断结论。同理,实例 2 的 Ds_1-Ds_3 诊断参数计算值均大于所提阈值条件,且各参数灵敏度分别达到了 7.14、2.62 和 4.47,据此可作出实例 2 是零值绝缘子的诊断结论。

在给定阈值条件下,诊断参数的灵敏度越高对绝缘子状态的诊断结论则越可信。实例 1 和实例 2 的诊断结果与实际相符,且其他实例均可得到正确的诊断结果,表明表明本文所提的低/零值绝缘子诊断过程和阈值条件具有一定的适用性。

表 2 诊断结果

Tab. 2 Diagnostic results					
实例序号	距离参数	阈值条件	计算值	灵敏度	诊断结论
1	S_1	380	810.54	2.133	低值
	S_2	90	219.79	2.44	
	S_3	5%	6.2%	1.24	
	S_4	7%	9.5%	1.35	
	Ds_1	3	21.41	7.14	
2	Ds_2	120	314.82	2.62	零值
	Ds_3	5	22.33	4.47	

4 结 论

1) 基于 UNet 语义分割网络和残差网络 Res-Net18 相结合构建了 R-UNet 网络,分割提取红外图像中绝缘子串区域,基于 GAN 模型提出了改进的 GANR-UNet 网络,解决绝缘子与导线重合时欠分割的问题。

2) 采用 Hough 变换和旋转矩阵可将分割出的绝缘子串目标校正至水平位置,提取了绝缘子长轴方向上特征区域的 HSV 颜色值,结果表明正常与低值绝缘子的 H、S 颜色分布差异明显,正常与零值绝缘子的 S、V 颜色分布差异明显。

3) 提出了基于序列相似距离量度的低零值绝缘子诊断方法。通过计算绝缘子颜色序列与参考序列的 DTW、HD 和 FD 参数,提出了低值绝缘子和零值绝缘子的诊断依据;采用实例验证本文所提诊断及阈值判据具有一定的合理性,所用诊断参数的灵敏度均大于 1.2。

参考文献:

[1] 隋东阳,周显明,冯恩刚,等.一起输电线路耐张绝缘子断串事故分析[J].农村电气化,2021,413(10):27-29.
SUI Dongyang, ZHOU Xianming, FENG Engang, et

al. Fault analysis of a link strain insulators break off of transmission line [J]. Rural Electrification, 2021, 413(10): 27-29 (in Chinese).
[2] 常彬,吴旭涛,闫振华,等.一起 220 kV 瓷绝缘子钢帽炸裂故障分析[J].电工材料,2021,174(3):28-29+33.
CHANG Bin, WU Xutao, YAN Zhenhua, et al. Analysis on the cracking failure of a steel cap of 220 kV porcelain insulator [J]. Electrical Engineering Materials, 2021, 174(3): 28-29+33 (in Chinese).
[3] 赵建坤,王森,安凯月,等.盘形悬式瓷绝缘子炸裂事故原因分析及防范措施[J].内蒙古电力技术,2019,37(1):94-97.
ZHAO Jiankun, WANG Sen, AN Kaiyue, et al. Analysis of burst accident of ceramic cap and pin insulator and its preventive measures [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2019, 37(1): 94-97 (in Chinese).
[4] ZHAO Z B, XU G Z, QI Y C. Representation of binary feature pooling for detection of insulator strings in infrared images [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2858-2866.
[5] CHENG L, LIAO R J, YANG L J, et al. An optimized infrared detection strategy for defective composite insulators according to the law of heat flux propagation considering the environmental factors [J]. IEEE Access, 2018, (6): 38137-38146.
[6] HE H Y, LUO D H. Insulator infrared image denoising method based on wavelet generic gaussian distribution and MAP estimation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3279-3284.
[7] 廖志伟,臧晓春,周可慧,等.基于红外图像特征与 BP 神经网络的绝缘子串低零值故障和污秽故障识别方法[J].电瓷避雷器,2019,(3):204-211.
LIAO Zhiwei, ZANG Xiaochun, ZHOU Kehui, et al. A detection method of low/zero fault and contamination fault of insulator string based on infrared image feature and BP neural network [J]. Insulators and Surge Arresters, 2019, (3): 204-211 (in Chinese).
[8] 姜香菊,杜晓亮.基于深度学习和灰度纹理特征的铁路接触网绝缘子状态检测[J].光电子·激光,2022,33(5):513-520.
JIANG Xiaoju, DU Xiaoliang. State detection of railway catenary insulators based on deep learning and grayscale texture features [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2022, 33(5): 513-520 (in Chinese).
[9] 苑利,赵锐,谭孝元,等.基于红外成像技术的零值绝缘子检测[J].高压电器,2018,54(2):97

- 102.
- YUAN Li, ZHAO Rui, TAN Xiaoyuan, et al. Zero insulator detection based on the infrared imaging technology [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54 (2): 97-102 (in Chinese).
- [10] 赵利鸿, 高强, 于晓, 等. 基于红外图像的绝缘子提取方法 [J]. 红外技术, 2020, 42 (9): 840-845.
- ZHAO Lihong, GAO Qiang, YU Xiao, et al. Insulator extraction method based on infrared image [J]. Infrared Technology, 2020, 42 (9): 840-845 (in Chinese).
- [11] 刘正庭, 尹骏刚, 李凯迪, 等. 基于分水岭算法的绝缘子串红外图像分割方法 [J]. 电瓷避雷器, 2020, (2): 216-221.
- LIU Zhengting, YIN Jungang, LI Kaidi, et al. Infrared image segmentation method of insulator string based on watershed algorithm [J]. Insulators and Surge Arresters, 2020, (2): 216-221 (in Chinese).
- [12] 刘云鹏, 张喆, 裴少通, 等. 基于深度学习的红外图像中劣化绝缘子片的分割方法 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (9): 63-68+118.
- LIU Yunpeng, ZHANG Zhe, PEI Shaotong, et al. Faulty insulator segmentation method in infrared image based on deep learning [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59 (9): 63-68+118 (in Chinese).
- [13] 黄新宇, 张洋, 王黎明, 等. 基于 Mask-RCNN 算法的复合绝缘子串红外图像分割与温度读取 [J]. 高压电器, 2021, 57 (9): 87-94.
- HUANG Xinyu, ZHANG Yang, WANG Liming, et al. Infrared image segmentation and temperature reading of composite insulator string based on mask-RCNN algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57 (9): 87-94 (in Chinese).
- [14] 李唐兵, 龙洋, 万亚玲, 等. 基于铁帽和盘面温升特征的劣化绝缘子红外检测方法 [J]. 红外技术, 2018, 40 (12): 1193-1197+1205.
- LI Tangbing, LONG Yang, WAN Yaling, et al. Infrared image synthetic diagnosis method of faulty insulators based on temperature rise characteristics of steel caps and disks [J]. Infrared Technology, 2018, 40 (12): 1193-1197+1205 (in Chinese).
- [15] 付伟平, 王伟, 董俊虎, 等. 利用红外热像技术检测劣化绝缘子的适用性分析研究 [J]. 高压电器, 2018, 54 (2): 110-114+120.
- FU Weiping, WANG Wei, DONG Junhu, et al. Study on the applicability of detecting deterioration insulator based on infrared thermal image [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54 (2): 110-114+120 (in Chinese).
- [16] 王胜辉, 姜婷玥, 李伟, 等. 零值绝缘子串红外和紫外成像特性试验及耦合场仿真研究 [J]. 高压电器, 2021, 57 (12): 1-9.
- WANG Shenghui, JIANG Tingyue, LI Wei, et al. Study on infrared and UV imaging characteristics test and coupling field simulation of zero-value insulator strings [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57 (12): 1-9 (in Chinese).
- [17] 张宝栋, 邵明燕, 李晓磊, 等. 悬式瓷质绝缘子零值缺陷的综合诊断分析 [J]. 山东电力技术, 2018, 45 (12): 31-35.
- ZHANG Baodong, SHAO Mingyan, LI Xiaolei, et al. The application of infrared thermal imaging technology in state detection of porcelain insulators [J]. Shandong Electric Power, 2018, 45 (12): 31-35 (in Chinese).
- [18] 李堂兵, 陈国锋, 饶斌斌, 等. 一种改进的劣化盘形悬式瓷绝缘子红外热像诊断方法 [J]. 电瓷避雷器, 2014, (6): 8-13.
- LI Tangbing, CHEN Guofeng, RAO Binbin, et al. A improved method of detecting deterioration insulator based on infrared thermal image [J]. Insulators and Surge Arresters, 2014, (6): 8-13 (in Chinese).
- [19] 周友维, 姚建刚, 王欣, 等. 基于时间序列模型的劣化绝缘子红外热像检测方法 [J]. 电瓷避雷器, 2020, (1): 149-155.
- ZHOU Youwei, YAO Jiangang, WANG Xin, et al. Infrared image detection for faulty insulators based on time series model [J]. Insulators and Surge Arresters, 2020, (1): 149-155 (in Chinese).
- [20] 付伟平, 施凤祥, 王伟, 等. 基于颜色矩阵的绝缘子单片红外图像故障诊断方法 [J]. 电瓷避雷器, 2018, 285 (5): 226-232+240.
- FU Weiping, SHI Fengxiang, WANG Wei, et al. Single insulator infrared image fault diagnosis method based on color matrix [J]. Insulators and Surge Arresters, 2018, 285 (5): 226-232+240 (in Chinese).
- [21] 袁刚, 许志浩, 康兵, 等. 基于 DeepLabv3+ 网络的电流互感器红外图像分割方法 [J]. 红外技术, 2021, 43 (11): 1127-1134.
- YUAN Gang, XU Zhihao, KANG Bing, et al. Deep-labv3 + network - based infrared image segmentation method for current transformer [J]. Infrared Technology, 2021, 43 (11): 1127-1134 (in Chinese).

[22] 杨懿男, 齐林海, 王红, 等. 基于生成对抗网络的小样本数据生成技术研究 [J]. 电力建设, 2019, 40 (5): 71-77.
YANG Yinan, QI Linhai, WANG Hong, et al. Research on generation technology of small sample data based on generative adversarial network [J]. Electric Power Construction, 2019, 40 (5): 71-77 (in Chinese).

[23] 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 Jiangang, 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 Sciences), 2015, 42 (2): 74-80 (in Chinese).

[24] 高嵩, 陆倚鹏, 王笑倩, 等. 基于深度学习的悬式瓷绝缘子红外图像识别方法 [J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35 (5): 119-125.
GAO Song, LU Yipeng, WANG Xiaoqian, et al. Infrared image recognition method of porcelain disc-suspended insulators based on deep learning technology [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35 (5): 119-125 (in Chinese).

[25] 姜苗苗, 史国友, 许拴梅, 等. 基于自适应 K 均值聚类和霍夫变换的船舶干舷视觉检测 [J]. 上海海事大学学报, 2021, 42 (2): 34-39.
JIANG Miaomiao, SHI Guoyou, XU Shuanmei, et al. Ship freeboard visual detection based on adaptive K-means clustering and Hough transform [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2021, 42 (2): 34-39 (in Chinese).

[26] 刘浩, 毛宏霞, 肖志河, 等. 基于动态时间规整的火箭尾喷焰识别仿真 [J]. 系统仿真学报, 2022, 34 (1): 126-133.
LIU Hao, MAO Hongxia, XIAO Zhihe, et al. Simulation of rocket exhaust plumes recognition based on dynamic time warping [J]. Journal of System Simulation, 2022, 34 (1): 126-133 (in Chinese).

[27] 陈青燕, 梁丹, 徐文兵, 等. 一种线目标豪斯多夫相似距离度量指标 [J]. 测绘科学, 2016, 41 (8): 14-18.
CHEN Qingyan, LIANG Dan, XU Wenbing, et al. Study of the linear object similarity measure based on Hausdorff distance [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41 (8): 14-18 (in Chinese).

[28] 唐冬来, 倪平波, 张捷, 等. 基于离散弗雷歇距离的户变关系识别方法 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (6): 223-230.
TANG Donglai, NI Pingbo, ZHANG Jie, et al. Identification method for relationship between household transformers based on discrete Frechet distance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (6): 223-230 (in Chinese).

作者简介:
李博(1990),男,硕士研究生,通信作者,研究方向为输电设备状态检测与评价,E-mail:qq1064006847@163.com。

(上接第 118 页)

[20] 唐登平, 蔡文嘉, 邹立, 等. 改进卷积神经网络在互感器故障诊断中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(11): 239-247.
TANG Dengping, CAI Wenjia, ZOU Li, et al. Application of improved convolution neural network in fault diagnosis of transformer [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(11): 239-247 (in Chinese).

[21] MARREL A, IOOSS B, LAURENT B, et al. Calculations of Sobol indices for the Gaussian process metamodel [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94(3): 742-751.

[22] ARCHER G E B, SALTELLI A, SOBOL I M. Sensitivity measures, anova like techniques and the use of bootstrap [J]. Journal of Statistical Computation and Simulation, 1997, 58(2): 99-120.

作者简介:
谷伟康(2000),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制,E-mail:gwkcncpu@163.com;
尹忠东(1968),男,教授,通信作者,研究方向为电能质量评估、主动配电网中电力电子技术,E-mail:yzdncpu@163.com;
杨雅淮(1999),男,硕士研究生,研究方向为配电设备检测,E-mail:yyh060599@163.com。