

doi: 10.7690/bgzd.2025.06.006

基于轻量级 Fast-Unet 网络的绝缘子图像分割方法

袁新平¹, 王忠军², 路 辉¹

(1. 云南电网有限责任公司信息中心, 昆明 650500;

2. 南方电网数字平台科技(广东)有限公司 广东 深圳 518000)

摘要: 为快速查找图像中绝缘子缺陷, 降低电力事故的发生几率, 基于轻量级 Fast-Unet 网络设计一种绝缘子图像分割算法。对绝缘子航拍图像进行预处理, 使其实现重构归一化, 通过转换图像元素, 计算元素共生概率, 从而获取图像的颜色、纹理、形状特征; 细化通道空间信息特征值, 组成一个初始的网络结构, 生成分割结果树状图; 通过计算图像的模块度和相对模块度, 建立轻量级 Fast-Unet 网络分割模型。实验结果表明: 该分割算法在无噪声图像中的综合质量平均值为 0.72, 在简单背景和复杂背景图像中的综合质量平均值分别为 0.57 和 0.46, 可见降噪处理对图像分割的质量起到了正向作用。

关键词: 轻量级 Fast-Unet 网络; 绝缘子串; 绝缘子图像; 图像分割算法; 图像预处理

中图分类号: TP394.41 **文献标志码:** A

Insulator Image Segmentation Based on Lightweight Fast-Unet Network

Yuan Xinping¹, Wang Zhongjun², Lu Hui¹

(1. Information Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650500, China;

2. China Southern Power Grid Digital Platform Technology (Guangdong) Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In order to quickly find the insulator defects in the image and reduce the probability of power accidents, an insulator image segmentation algorithm is designed based on the lightweight Fast-Unet network. The method comprises the following steps of preprocessing an aerial image of an insulator to realize reconstruction and normalization; calculating the element symbiosis probability by converting image elements so as to obtain the color, texture and shape characteristics of the image; refining the channel space information characteristic value to form an initial network structure and generate a segmentation result dendrogram. By calculating the modularity and relative modularity of the image, a lightweight Fast-Unet network segmentation model is established. The experimental results show that the average comprehensive quality of the proposed algorithm is 0.72 in noise-free images, and 0.57 and 0.46 in simple and complex background images, respectively. Therefore, denoising has a positive effect on the quality of image segmentation.

Keywords: lightweight Fast-Unet network; insulator string; insulator image; image segmentation algorithm; image preprocessing

0 引言

随着科学技术的发展, 电力设备普及到了城市与乡村的各个角落, 电网供电安全性与可靠性成为了一个重点问题, 对电力生产设备的稳定运行提出了更高的要求。为避免电力事故的发生, 需要多方面共同努力, 其中绝缘子就是一个不可忽视的关键点。一旦绝缘子或者绝缘子串出现故障, 会造成多发元件故障、闪络、击穿等问题, 严重威胁电力系统的运行安全, 严重时甚至造成电力事故和经济损失。使用人工方法对绝缘子进行巡检, 需要大量的人力成本; 因此, 需要设计一种针对绝缘子的自动巡检监测技术。

文献[1]提出了一种 2 维熵值最大优化算法, 通过增加图像的对比度, 对其进行灰度化和去噪处理

等方式, 解决了图像边缘提取程度不足的问题, 优化了 Canny 算子的熵值, 提高了裂纹检测的精度。文献[2]结合最佳阈值确定法对绝缘子图像分割算法进行优化, 通过拟合算法识别故障位置, 并对其进行图像分割处理, 所得到的算法识别准确率有较大的提高。文献[3]将注意力模型改进 U-Net 算法应用于图像分割算法中, 并利用注意力机制提高绝缘子目标的辨识能力, 通过对背景噪声的干扰, 实现更准确的图像分割。文献[4]针对不同光照条件, 提出了一种基于联合分量灰度化算法以及深度学习算法的绝缘子图像分割算法, 这种算法可以对图像进行细分割, 并获取动态分块阈值特征, 在合并同类目标的基础上, 对目标物体进行精准识别。文献[5]在 U-Net 的编码阶段嵌入注意力机制通道注意神经

收稿日期: 2024-08-05; 修回日期: 2024-09-10

第一作者: 袁新平(1987—), 男, 云南人。

网络,提高模型提取语义特征的能力,从而提高对绝缘子检测的准确性,实现对图像的准确分割。

综合上述研究,笔者设计一种基于轻量级 Fast-Unet 网络的绝缘子图像分割算法。

1 绝缘子图像预处理

在使用无人机拍摄绝缘子图像时,经常会带有大量的背景信息,这会对绝缘子在计算机中的分割造成一定程度的干扰^[5-6]。对图像的系数进行重构归一化处理,将各元素转换成 0~255 之间的整数:

$$F(a, b) = I \left(\frac{F(a, b) - \min(F(a, b))}{\max(F(a, b)) - \min(F(a, b))} \right) \quad (1)$$

式中: $F(a, b)$ 为经过重构处理的归一化系数; I 为取整运算; $\min F(a, b)$ 和 $\max F(a, b)$ 分别为图像的最小值与最大值。创建共生矩阵,矩阵中的每个元素均需要经过上述归一化处理^[7-8]。在灰度值与梯度值的共生作用下,计算同时满足 3 种原色共生的概率:

$$P_{mnq} = \frac{k_{mnq}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^q k_{mnq}} \quad (2)$$

式中: P_{mnq} 为 3 种原色的共生概率; k_{mnq} 为图像灰度值; m 、 n 、 q 分别为红、黄、蓝 3 种元素的像素点数量。

尽管经过归一化处理后的图像相比原始图像有了很大的提升,但仍然会混杂大量的噪声,且在一些背景环境较为复杂的图像中,噪声点的数量与噪声深度均很大。当图像被高斯噪声污染后,图像内的每个像素点均会随机生成,一旦不能及时清除,就会对目标状态造成巨大的影响。此时图像的颜色特征通常是直接从空间中提取得到,但由于色彩模型自身的优势,很多经过初步处理后的图像色域极为广阔,在弥补了 RGB 模型色彩分布不足的缺点之后,该图像的颜色取值范围由原本的 [127, -128] 大幅度提升^[9-10]。

纹理特征则是利用高斯低通滤波器提取得到的,根据能量矩阵后分析图像能量信息的纹理特征,并获取图像的空间位置信息:

$$D(i, j) = \frac{\exp(-(i-p-1)^2 + (j-p-1)^2 / 2\lambda_s^2)}{2\pi\lambda_s^2} \quad (3)$$

式中: $D(i, j)$ 为矩阵内 (i, j) 位置的元素空间信息; λ_s 为滤波系数; p 为纹理特征的取值。将绝缘子图像的颜色特征与纹理特征按照 2:5 的比例取值,获取预处理过后的绝缘子图像。

2 建立轻量级 Fast-Unet 网络分割模型

Fast-Unet 网络结构如图 1 所示。

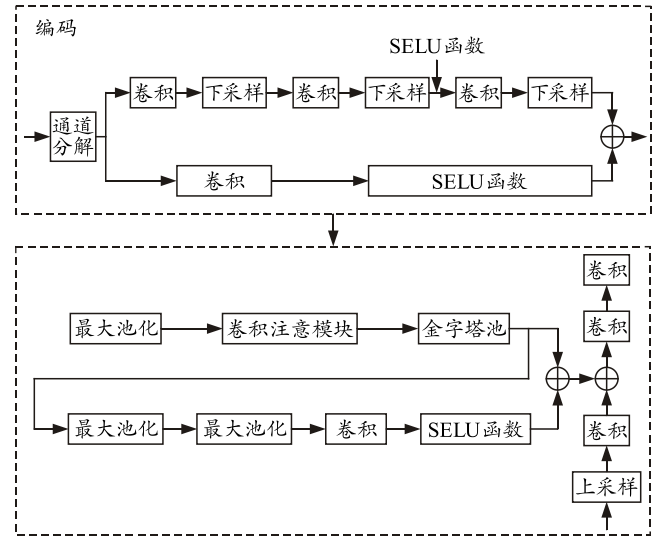


图 1 分 Fast-Unet 网络结构

轻量级 Fast-Unet 网络一般被应用于典型的神经网络语义分割中,在医学和遥感领域均具备较好的应用效果;因此,将其添加进绝缘子图像分割算法中,也可以起到应有的作用。在轻量级 Fast-Unet 网络中,分别对初始的图像进行不断的分割,在 Unet 的基础上,输入模块将网络中所有的卷积核数量减少至原有的一半。提取冗余信息,尽量保证模型的监测精度不会降低,并适当增加池化属性,提高信息节点的融合程度。原有的网络编码特征尺寸为 32×32 ,卷积核约等于原本的 $1/16$,此时的网络会提取最大全局信息的赤化结构,同步设置网络信息尺寸为 16×16 ,此时的特征通道数量不发生变化^[11]。经过结构运算后,可以继续参与到残差卷积网络的训练中,改进自身网络结构。此时的细化通道空间信息特征可以表示为:

$$F_k(t) = \eta(w(K_{cavg}), U(K_{cmax})) \quad (4)$$

式中: $F_k(t)$ 为细化通道空间信息特征值; η 为该特征下的激活函数; w 为求和合并函数; U 为网络共享函数; K_{cavg} 和 K_{cmax} 分别为平均池化特征和最大池化特征^[12-13]。在对这些特征值图像进行补充后,可以寻找到最具备代表性的空间信息,计算公式为:

$$F_m(t) = \eta(f^{7*7}d[K_{cavg}, K_{cmax}]) \quad (5)$$

式中: $F_m(t)$ 为该图像的特征空间信息; f^{7*7} 为 7×7 的卷积运算。

建立网络分割模型,相比于传统的分割方法,该分割模型内部的信息均可以作为节点,提供构建图像网络。将不同的像素连接,组成一个初始的网

络结构，模型公式为：

$$\text{dist} = \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} / 2. \quad (6)$$

式中：dist 为模型复合特征值； (a_1, b_1) 和 (a_2, b_2) 分别为 2 个像素位置^[14]。综合上述公式，可以得到该模型的分割结果树状图。

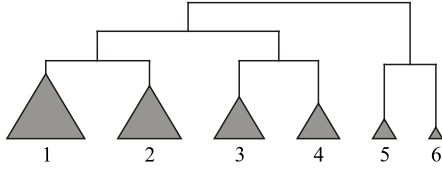


图 2 分割结果树状图

结合上图生成邻接矩阵，并计算模块度和相对模块度：

$$\left. \begin{aligned} Q_i &= \sum_{i=1}^n (d_{ii} - k_i^2) \\ \Delta Q_i &= d_{ij} + d_{ji} - 2d_i d_j \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： Q_i 为图像分割模块度； ΔQ_i 为不同分割区域的相对模块度； d_{ii} 为模块边权值； d_i 和 d_j 为邻接矩阵的 2 个相对权值； k_i 为图像分割前后的相似度^[15-16]。根据模块度的划分，可以得到并建立轻量级 Fast-Unet 网络分割模型。

3 设计图像分割算法

通过上述分割模型，可以结合轻量级 Fast-Unet 网络设计一种绝缘子航拍图像的分割算法，算法流程如图 3 所示。

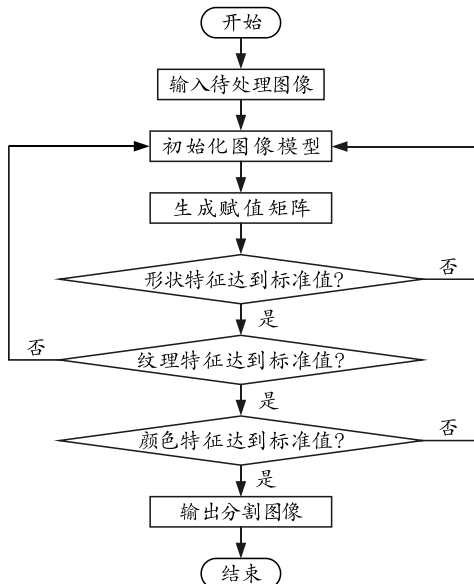


图 3 图像分割算法流程

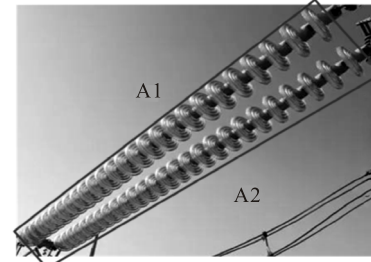
图 3 中，需要输入待处理图像，并初始化图像模型，在轻量级 Fast-Unet 网络分割模型的协助下，生成幅值矩阵。针对不同类型的图像，均需要分别

判断形状特征、纹理特征以及颜色特征是否达到标准值，如果没有达到标准值，则需要返回到图像模型的初始化阶段；如果达到标准值，则可以继续提取灰度值，并输出分割图像，此时即可得到绝缘子图像的分割算法。

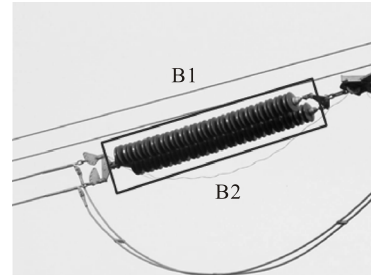
4 实验研究

4.1 实验图像与数据准备

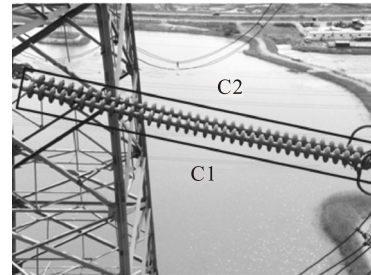
为验证笔者设计的基于轻量级 Fast-Unet 网络的绝缘子图像分割算法是否具备有效性，设计多组对比实验，实验初始图像如图 4 所示。



(a) 无噪声图像



(b) 简单背景



(c) 复杂背景

图 4 实验初始图像

图 4 中，A1 和 A2 为无噪声背景下的绝缘子图像，B1、B2 为简单背景下的绝缘子图像，C1、C2 为复杂背景下的绝缘子图像。实验在 Pytorch 环境中完成，使用 C++ 将模型安装在工程项目中。实验主机硬件部分，CPU 为 i5-7500，GPU 为 P1000，操作系统为 Window10 专业版。实验以综合质量指标分析初始图像的质量，计算公式为：

$$U_p = \frac{1}{3} \times ((U_{pri} + 1) / U_{voi} + U_{gc}). \quad (8)$$

式中: U_p 为初始图像在经过绝缘子图像分割后的综合质量; U_{pri} 为分割后不同分图之间的边缘契合度; U_{voi} 为分割图像的变化系数; U_{gc} 为分割图像的全局一致性。在高斯相似度最佳的基础上, 设置标准差分别为 0.5、1.0、1.5、2.0, 并获取不同标准差下分割算法的质量, 如图 5 所示。

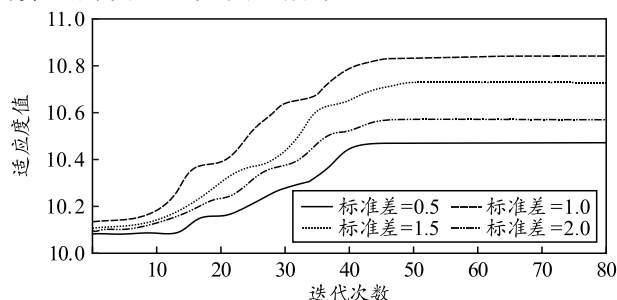
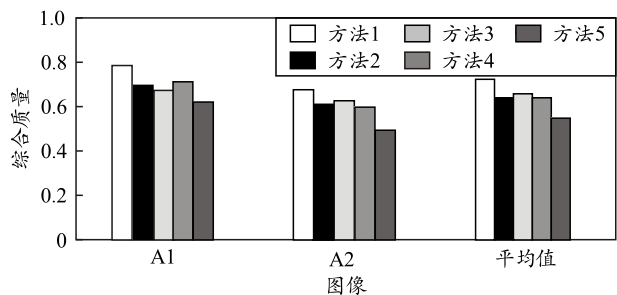


图 5 不同标准差下算法适应度值

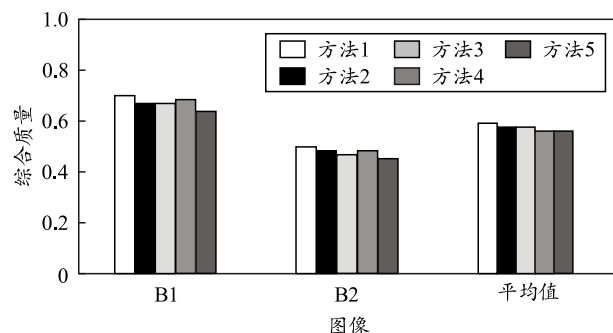
图 5 中, 4 种标准差下的算法初始适应度值分别为 10.08、10.14、10.11、10.09, 随着迭代次数的不断增加, 适应度值也不断上升, 直至迭代次数达到 50, 适应度值不再发生大幅度变化。当迭代次数达到 80 时, 4 种标准差的适应度值分别为 10.46、10.85、10.73、10.57。由此可见, 当标准差为 1.0 时, 图像分割质量最佳。

4.2 不同分割算法质量对比

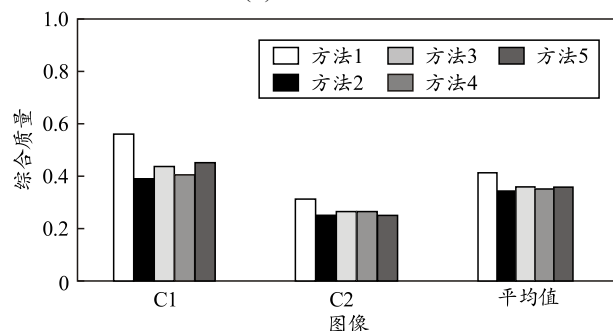
为判断笔者设计的绝缘子图像分割算法是否更具优越性, 将本文中算法与传统的“2 维最大熵阈值优化方法”“改进 GA-KSW 熵法”“改进 U-Net 算法”“联合分量灰度化算法和深度学习算法”4 种算法进行对比。本文中算法在实验中被标记为方法 1, 上述 4 种对比算法则分别为方法 2—5。图 4 每张图像均含 2 个绝缘子串, 分别对这 2 个绝缘子串进行分割处理, 可以得到二者的综合质量评价, 取平均值作为实验结果。结合图 4 所示的 3 种绝缘子航拍图像, 分别对无噪声图像、简单背景图像、复杂背景图像的综合质量进行对比。在实验中, 设置每一幅图像的像素数量小于等于 300, 标准差为 1.0, 特征权重比为 2:5, 得到结果如图 6 所示。



(a) 无噪声图像



(b) 简单背景



(c) 复杂背景

图 6 图像分割质量对比结果

分析图 6 结果可知: 在无噪声图像中, 2 个绝缘子串图像分割的综合质量评价平均值分别为 0.72、0.65、0.67、0.65、0.55。在简单背景图像中, B1 绝缘子串的综合质量远大于 B2 绝缘子串, 这是因为 B1 相距摄像机更近, 拍摄结果更加清晰, 在综合质量的平均值的对比中, 本文中算法为最大值。在复杂背景图像中, C1 绝缘子串和 C2 绝缘子串的综合质量均明显小于前 2 类图像, 这是因为 C 和 C2 所在区域图像背景极为复杂, 在分割过程中难度较大。且 C1 因为距离摄像头较近的原因, 所在区域的分割精度远大于 C2 区域。综合上述图像可以明显看出, 本文中算法的图像分割综合质量明显优于其他几种对比算法, 本文中的绝缘子图像分割算法具备更好的效果。

为进一步从定性与定量 2 个角度对比分析本文中算法在图像分割中的应用效能, 设计消融试验, 通过改变轻量级 Fast-Unet 网络的结构来分析其对图像分割性能的影响。

消融试验中, 共设置 3 种网络结构, 分别为常规的卷积神经网络(A 组)、Unet 网络(全卷积神经网络)(B 组)、轻量级 Fast-Unet 网络(C 组)。

试验以算法收敛速度为分析指标, 收敛速度越快, 表明算法的稳定性越高, 分割效果越好。试验结果如图 7 所示。

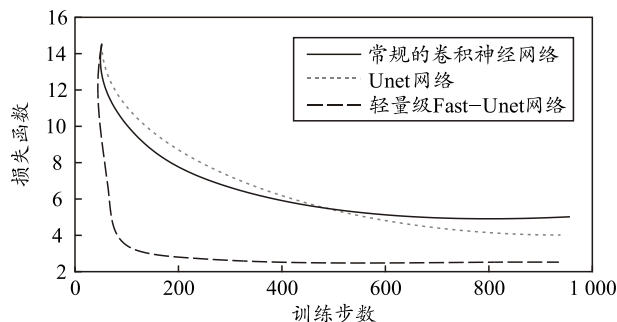


图 7 消融试验结果

从图 7 可以看出：轻量级 Fast-Unet 网络的收敛速度更快，在训练步数为 100 左右就趋于稳定。而分别为常规的卷积神经网络、Unet 网络的收敛速度则相对较慢。可以得出，在建立绝缘子图像分割模型的过程中，采用轻量级 Fast-Unet 网络能够进一步模型的性能，可得到最佳的分割效果。

5 结束语

笔者设计一种基于轻量级 Fast-Unet 网络的绝缘子图像分割算法，并利用该算法分别针对无噪声图像、简单背景图像、复杂背景图像进行分割实验。实验结果表明，本文中算法的分割质量明显优于传统算法。

下一步，可以针对绝缘子进行人工特征提取，并增加样本数量，使实验结果更加可靠，为后续对绝缘子缺陷实际检测奠定基础。

参考文献：

- [1] 李浩然, 李镇翰, 吴田, 等. 二维最大熵阈值优化的 Canny 算子的绝缘子边缘检测研究[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 205-211, 220.
- [2] 吕泽卿, 付兴建, 张世卓. 基于改进 GA-KSW 熵法的无人机拍摄绝缘子故障识别[J]. 机床与液压, 2022, 50(8): 188-192.
- [3] 韩谷静, 何敏, 雷宇航, 等. 基于改进 U-Net 的输电线路绝缘子图像分割方法研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(3): 93-99.
- [4] 黄新波, 高玉菡, 张烨, 等. 基于联合分量灰度化算法

和深度学习的玻璃绝缘子目标识别算法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 203-209.

- [5] HAN G Z, ZHANG M, WU W Z, et al. Improved U-Net based insulator image segmentation method based on attention mechanism[J]. Energy Reports, 2021, 7(S7): 210-217.
- [6] 刘彪, 袁文海, 董小顺, 等. 基于改进边缘连接 Canny 算法的绝缘子憎水性图像分割研究[J]. 高压电器, 2022, 58(1): 162-169.
- [7] 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.
- [8] 唐小煜, 熊浩良, 黄锐珊, 等. 基于改进的 U-Net 和 YOLOv5 的绝缘子掩模获取与缺陷检测[J]. 数据采集与处理, 2021, 36(5): 1041-1049.
- [9] 李俊, 任景, 王晔琳, 等. 基于改进 U-net 和 CNN 的绝缘子自爆检测方法研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(8): 98-103.
- [10] 李浩然, 高健, 吴田, 等. 基于改进 Canny 算子的绝缘子裂纹检测研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 91-98.
- [11] 唐小煜, 黄进波, 冯洁文, 等. 基于 U-net 和 YOLOv4 的绝缘子图像分割与缺陷检测[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, 52(6): 15-21.
- [12] 黄化入, 谢维成, 张彼德, 等. 基于改进 PCM 聚类方法的绝缘子图像分割[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 181-189.
- [13] 王彬, 王宝丽. 基于卷积神经网络的接触网绝缘子缺陷检测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 90-94, 112.
- [14] 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.
- [15] 柯良斌, 李宗刚, 杜亚江, 等. 谱聚类图像分割在绝缘子憎水性批量检测系统中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(7): 1833-1840.
- [16] 黄玲, 赵锴, 李继东, 等. 基于特征金字塔和多任务学习的绝缘子图像检测[J]. 电测与仪表, 2021, 58(4): 37-43.