

# 基于改进型 UL-PCNN 的绝缘子图像分割

杜小燕, 钟俊\*

四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065

**摘要** 绝缘子图像分割是通过图像处理技术实现绝缘子识别和提取的基础性操作。为了能够准确地分割出绝缘子图像,提出一种基于改进型单位连接脉冲耦合神经网络(UL-PCNN)的绝缘子图像分割算法。根据相邻神经元之间的关系,改进原始 UL-PCNN 模型中的连接输入和耦合系数;利用改进的 UL-PCNN 模型对绝缘子图像进行分割,得到多幅输出图像;利用梯度算法计算原始图像和输出图像的边缘,并分别计算输出图像和原始图像边缘的均方误差(MSE),均方误差值最小的输出图像即为分割效果最好的绝缘子图像。实验结果表明,本文算法能够准确地分割出不同环境下的绝缘子图像,并具有较好的抗噪性能。

**关键词** 图像处理; UL-PCNN; 均方误差; 评价准则; 图像分割

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.151005

## Insulator Image Segmentation Based on Improved Unit-Linking Pulse-Coupled Neural Network

Du Xiaoyan, Zhong Jun\*

School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

**Abstract** Insulator image segmentation is the basic operation used to conduct insulator recognition and extraction using image processing. To segment insulator images accurately, an improved unit-linking pulse-coupled neural network (UL-PCNN)-based insulator image segmentation method is proposed in the present study. First, the link input and coupled parameters of the original UL-PCNN model are improved based on the relationship between a neuron and its neighbors. Next, the improved model is used to segment an insulator image to obtain multiple output images. Finally, the gradient algorithm is used to calculate the edges of the original image and output images, and the mean square error (MSE) of the edge of the original image and MSE of each output image are calculated. The output image with the smallest MSE is considered as the optimal result of insulator image segmentation. The experimental results demonstrate that this improved method can accurately segment insulator images in different environments and has good anti-noise performance.

**Key words** image proceeding; unit-linking pulse-coupled neural network; mean square error; evaluation criteria; image segmentation

**OCIS codes** 100.2960; 100.3008; 100.2000

## 1 引言

绝缘子在输电线路中担负着电气绝缘和机械支撑的重要任务,其长期暴露在野外,极易产生破裂、掉串和闪络等现象<sup>[1]</sup>,极易引发事故。因此,寻求有效的手段检测绝缘子性能,对保障输电线路安全运行非常必要<sup>[2]</sup>。目前,国内采用图像处理技术进行

绝缘子图像分割的方法较多。其中,文献[3]中采用红蓝色差和改进 K-means 算法进行绝缘子图像分割,该方法可以将绝缘子图像背景去除,但该算法的聚类效果受初始码本的影响比较严重。文献[4]中采用 MUL-PCNN 算法对绝缘子图像进行分割,避免了传统的脉冲耦合神经网络(PCNN)模型参数多的问题,但未能准确找出分割效果最佳的图像。文

收稿日期: 2019-01-21; 修回日期: 2019-02-26; 录用日期: 2019-03-06

基金项目: 四川省科技支撑计划(2016GZ0145)

\* E-mail: zhongjun55@163.com

献[5]中根据绝缘子的形状,提出了一种自底向上感知聚类平行线段的方法来分割绝缘子图像,但准确率不高,受拍摄环境的影响严重。文献[2]中采用改进型的PCNN分割绝缘子,但该算法只能分割绝缘子在整幅图像中占比较大的图像,有很大的局限性。

PCNN起源于1990年Eckhorn等提出的哺乳动物神经元模型,是模拟哺乳动物视觉系统的第3代神经网络。与传统的神经网络相比,PCNN具有计算速度快、灵敏度高、无需训练等特点<sup>[6]</sup>,在图像分割中的应用越来越多。虽然PCNN性能优越,但手工调试参数需要花费大量的时间<sup>[7]</sup>。因此,标准的PCNN模型通常被简化,以降低计算复杂度。简化模型中应用最多的为UL-PCNN<sup>[8]</sup>。本文提出了一种改进型UL-PCNN图像分割算法,该算法不需要人为设置参数,通过改进连接输入,并最小化原始图像边缘与分割后图像边缘的均方误差,来寻找分割最优结果。实验结果表明,该算法能够取得较好的分割效果。

## 2 脉冲耦合神经网络模型

### 2.1 原始UL-PCNN模型

PCNN与一般的人工神经网络不同,其为一个脉冲耦合神经元构成的二维单层神经元阵列,不需要任何训练<sup>[9]</sup>。PCNN的基本原理见文献[9]。由于传统PCNN的参数很多且需要人为设置,在实际应用中耗费人力物力。因此,研究者在传统PCNN的基础上提出了许多简化的PCNN模型。其中,UL-PCNN模型是PCNN简化模型中最典型的一种,也是应用最广泛的一种。UL-PCNN模型主要改进了神经元的连接输入和动态阈值,减少了参数设置。原始UL-PCNN模型的离散数学迭代方程为

$$F_{ij}(n) = S_{ij}(n), \quad (1)$$

$$L_{ij}(n) = \begin{cases} 1, & \sum_{k \in N(i,j)} Z_k(n-1) > 0 \\ 0, & \sum_{k \in N(i,j)} Z_k(n-1) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$U_{ij}(n) = F_{ij}(n) [1 + \beta_{ij} L_{ij}(n)], \quad (3)$$

$$Y_{ij}(n) = \begin{cases} 1, & U_{ij}(n) > E_{ij}(n-1) \\ 0, & \text{other} \end{cases}, \quad (4)$$

$$E_{ij}(n) = E_{ij}(n-1) - \mu + V_E Y_{ij}(n-1), \quad (5)$$

式中: $S_{ij}$ 为图像 $S$ 在像素 $(i, j)$ 点处的灰度值<sup>[10]</sup>;  $F_{ij}(n)$ 为神经元的第 $n$ 次反馈输入项;  $L_{ij}(n)$ 为第 $n$ 次连接输入,即每个神经元若邻域内有一个神经元点火(不包括该神经元自身),则 $L_{ij}(n)$ 为1,否则

为0;  $Z_k(n)$ 为第 $n$ 次连接时神经元点火数;  $N(i, j)$ 为坐标 $(i, j)$ 的邻域;  $U_{ij}(n)$ 为内部活动项;  $\beta_{ij}$ 为内部活动项的耦合系数;  $Y_{ij}(n)$ 为PCNN的第 $n$ 次二值输出;  $E_{ij}(n)$ 为动态阈值,为了减少参数设置,直接用 $E_{ij}(n-1) - \mu$ 代替;  $\mu$ 为循环次数的倒数;  $V_E$ 为较大常数。在图像分割中,循环次数取20次已经足够。在最后输出的20个分割结果中,UL-PCNN采用最大信息熵(MIEP)准则寻找分割效果最好的图像。其中信息熵的定义为

$$H = -P_0 \text{lb}(P_0) - P_1 \text{lb}(P_1), \quad (6)$$

式中: $P_0$ 为分割结果中像素值为0的概率;  $P_1$ 为分割结果中像素值为1的概率。

### 2.2 改进UL-PCNN模型

UL-PCNN相对传统的PCNN模型简化了许多,但原始的UL-PCNN模型依旧存在以下问题。1)当反馈输入直接为图像的灰度值且相差不大时,容易出现误分割。2)原始模型中的 $\beta_{ij}$ 取0.2,为固定常数;  $\beta_{ij}$ 表示中心神经元与周围邻域神经元的耦合强度,反映中心神经元与周边神经元的差异,取固定值不能反映出不同神经元之间的差异。3)原始UL-PCNN模型采用MIEP准则找出分割效果最好的图像。根据(6)式可以看出,当 $P_0 = P_1$ 时,信息熵最大,即目标和背景各占整幅图的1/2时效果最好。很显然这不符合所有图像。

针对以上问题,本文对UL-PCNN模型作如下改进:

1)在本文改进的UL-PCNN中,可以适当增强反馈输入 $F_{ij}(n)$ 的对比度,增强或抑制该区域的激活,避免图像中灰度值相差不大的区域块出现误分割现象。

$$F_{ij}(n) = \begin{cases} \max(S_{kl}), & S_{ij}(n) > \omega(n) \\ \min(S_{kl}), & S_{ij}(n) < \omega(n) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $S_{kl}$ 为坐标点 $(i, j)$ 八邻域的灰度值;  $\omega(n)$ 为 $S_{ij}$ 像素八邻域的平均值。采用(7)式代替(1)式。通过(7)式可以看出,若当前像素大于该像素周围八邻域像素的平均值,则 $F_{ij}(n)$ 取当前像素周围八邻域像素中的最大值,以此增强图像该区域块的激活;反之,取该像素周围八邻域像素中的最小值,以此来抑制图像该区域块的激活<sup>[11]</sup>。

2)原始UL-PCNN中 $\beta_{ij}$ 取值为固定常数,不能反映神经元之间的差异。因此,本文对 $\beta_{ij}$ 作改进,则

$$\beta_{ij} = \left[ \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 (S_{kl} - S_{ij})^2 / m \right]^{1/2}, \quad (8)$$

式中: $m$ 为坐标 $(i, j)$ 邻域内神经元的个数。 $\beta_{ij}$ 值越

小,表示邻域内神经元与中心点神经元的离散程度越小,点火越容易;反之,离散程度越大,点火越困难。

3) 原始 UL-CNN 采用的是 MIEP 分割准则,不能找出分割效果最佳的图像。文献[4]考虑分割图像与原始图像有一定的对应关系,利用均方误差来描述这种对应关系,计算公式为

$$E_{MS} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (S_{ij} - Y_{ij})^2, \quad (9)$$

式中: $E_{MS}$ 为均方误差; $S_{ij}$ 和 $Y_{ij}$ 分别为 $(i, j)$ 处原图像和分割后图像对应的灰度值。由于 $Y_{ij}$ 为二值图像,需对原始图像进行归一化。由(9)式可以看出,使用参考文献[4]中的分割准则进行分割,图像归一化之后略小于0.5(即灰度值略小于128)的像素点,会被分割为目标。但实验表明,此灰度值附近的像素点可能是背景,无法找出最佳分割结果,易导致严重的误分割。

针对以上问题,本文结合图像边缘特性寻找最佳分割效果。由于图像梯度能反映相邻像素间的像素值变化,计算图像梯度对检测图像的边缘具有重要意义。对于图像 $S$ 中的像素 $(i, j)$ ,其 $x$ 、 $y$ 方向上的梯度可以定义为<sup>[12]</sup>

$$G_{x,i,j} = \frac{S_{i+1,j} + S_{i+1,j+1} - S_{i,j} - S_{i,j+1}}{2}, \quad (10)$$

$$G_{y,i,j} = \frac{S_{i,j+1} + S_{i+1,j+1} - S_{i,j} - S_{i+1,j}}{2}, \quad (11)$$

$$G_{i,j} = \sqrt{G_{x,i,j}^2 + G_{y,i,j}^2}, \quad (12)$$

式中: $G_{x,i,j}$ 为 $x$ 方向上的梯度; $G_{y,i,j}$ 为 $y$ 方向上的梯度; $G_{i,j}$ 为梯度的模值。通过以上算法计算图像的梯度,得到原始图像和输出图像的边缘。

边缘检测不仅可以提出图像的大致轮廓,还可

保留图像目标的细节部分。通过计算分割前后2幅图像边缘的均方误差 $E_{MS}$ 可找出分割效果最好的图像,计算公式为

$$E_{MS} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (G_S - G_Y)^2, \quad (13)$$

式中: $G_S$ 和 $G_Y$ 分别为通过梯度算法求得的原图像和分割后图像的边缘; $M$ 为图像的行数; $N$ 为图像的列数。由(13)式可以看出,均方误差越小,分割后的图像与原始图像越接近,分割效果越好,反之则分割效果越差。

### 3 仿真实验与分析

为了测试本文方法的可行性,选取不同天气和不同信噪比(SNR)情况下的图像,从主观视觉和客观准则评价两方面进行分析。对比方法包括:基于MIEP的分割算法、参考文献[4]、[11]中的算法和本文的算法。客观评价准则包括区域内部均匀性(UM)、形状测度准则(SM)和区域对比度(CM)等分割准则<sup>[13]</sup>,客观评价准则的定义与计算参见文献[13]。其中,本文采用的实验环境为:Windows 7系统,处理器为Intel(R) Core(TM) i5-6500 CPU@ 3.20 GHz。

图1为不同天气情况下的绝缘子图像分割结果。其中,第1组和第2组分别为天气晴朗和有晚霞时的绝缘子图像。图1(c)中,第1组图像的上部出现误分割现象,第2组图像出现的误分割现象十分严重,基本无法分割绝缘子图像;图1(d)中,2组图像都出现了严重的过度分割现象,没有完整保留绝缘子部分;图1(e)中,第1组图像出现误分割现象比较严重,绝缘子部分基本无法识别,第2组图像基本能够正确分割出绝缘子,误分割现象不严重;

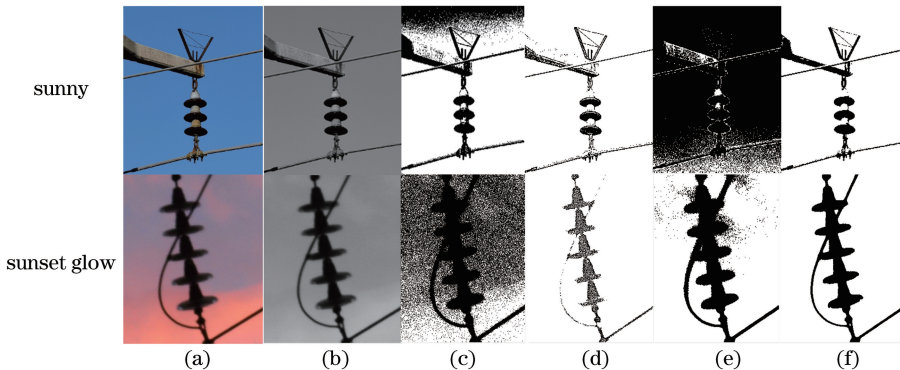


图1 不同天气情况下的绝缘子图像分割结果。(a)原始图像;(b)灰度图像;(c)MIEP分割结果图;(d)文献[11]算法的分割结果图;(e)文献[4]算法的分割结果图;(f)本文算法分割结果图

Fig. 1 Segmentation results of insulator images under different weather conditions. (a) Original images; (b) gray images; (c) segmentation results of MIEP; (d) segmentation results of algorithm in Ref. [11]; (e) segmentation results of algorithm in Ref. [4]; (f) segmentation results of proposed method



图 1(f)中,2 组图像的分割结果相比其他几种算法,不论是在哪种天气情况下,本文算法都能够较好地分割绝缘子图像,而且对绝缘子部分保留完整。因此,本文算法能够抵抗一定的天气干扰。

表 1 4 种算法在不同天气情况下的分割性能对比

Table 1 Comparison of segmentation performance of four methods under different weather conditions

Weather	Method	UM	SM	CM	Comprehensive evaluation	Runtime
Sunny	MIEP	0.9216	0.7021	0.6669	0.7943	1.882485
	Ref.[11]	0.9737	0.9118	0.9465	0.9440	1.667535
	Ref.[4]	0.6791	0.7286	0.7612	0.7230	1.810260
	Proposed	0.9789	0.9582	0.9943	0.9866	1.772112
Sunset glow	MIEP	0.6280	0.4901	0.4107	0.5096	1.735032
	Ref.[11]	0.9087	0.6185	0.7346	0.7539	1.431268
	Ref.[4]	0.9138	0.7028	0.7947	0.8038	1.887225
	Proposed	0.9791	0.9657	0.9641	0.9696	1.681153

根据表 1 可以看出,不论在什么天气情况下,相比于 MIEP、文献[11]和文献[4]中的算法,本文算法在不同评价准则下的数据都相对更加稳定,更加趋近于 1,且总体的综合指标都优于其他算法,且比

图 1 分割结果的具体客观数据如表 1 所示,具体数据包含 UM、SM、CM、综合评价指标和运行时间。表中的综合评价(comprehensive evaluation)为区域内均匀性、形状测度准则和区域对比度的均值。

MIEP 和文献[4]中算法运行更快。直观视觉观察和客观数据分析都表明,本文算法有一定的优越性。

在不同信噪比情况下,采用不同算法对绝缘子图像进行分割,分割结果见图 2。

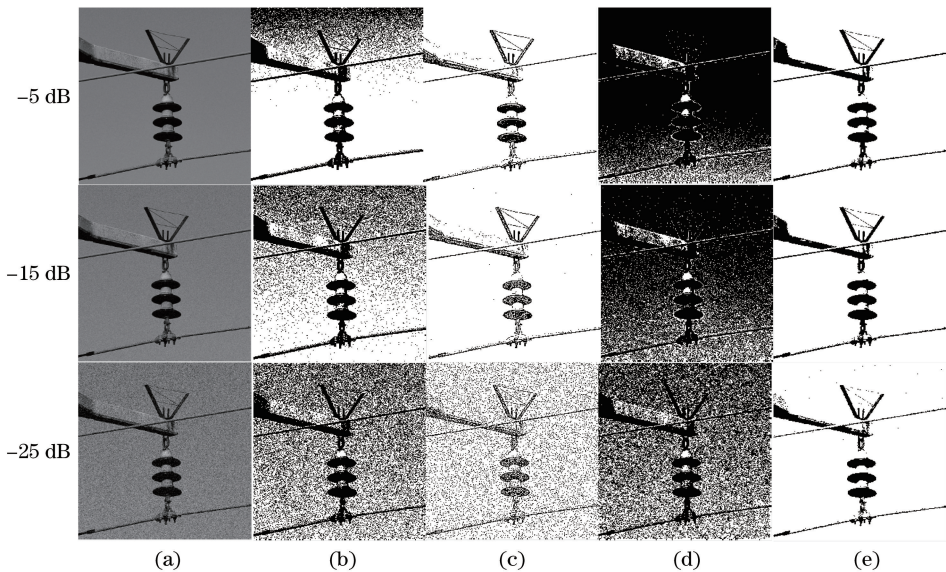


图 2 不同信噪比下的绝缘子图像分割结果。(a)加噪后的灰度图;(b)MIEP 分割结果图;(c)文献[11]算法的分割结果图;(d)文献[4]算法的分割结果图;(e)本文算法的分割结果图

Fig. 2 Segmentation results of insulator images under different SNRs. (a) Gray images after adding noise; (b) segmentation results of MIEP; (c) segmentation results of algorithm in Ref. [11]; (d) segmentation results of algorithm in Ref. [4]; (e) segmentation results of proposed method

图 2 是不同信噪比情况下的绝缘子图像分割结果,其中不加噪声的分割效果图见图 1。图 2 中第 1 组为加入 -5 dB 白噪声的分割结果图;第 2 组为加入 -15 dB 白噪声的分割结果图;第 3 组为加入 -25 dB 白噪声的分割结果图。可以明显看出,噪声对其他算法分割结果的影响很大,而对本文算法的影响很小,只有在加入 -25 dB 白噪声时

分割结果中才出现了过度分割的现象,但绝缘子图像依旧保持完整,说明本文算法具有一定的抗噪声性能。

由综合评价的定义可知,综合评价值的大小能够反映出绝缘子图像整体分割效果的好坏。综合评价值越趋近 1,说明分割效果越好。因此,在不同信噪比情况下计算综合评价值,结果如图 3 所示。

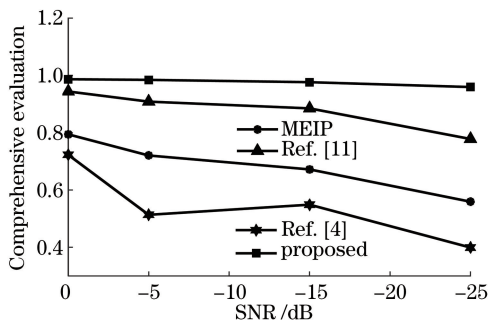


图3 不同信噪比下的综合评价结果

Fig. 3 Comprehensive evaluation results under different SNRs

图3中给出了MIEP、文献[11]算法、文献[4]算法和本文算法在不同信噪比情况下综合评价价值的变化趋势。可以看出,随着信噪比增大,综合评价价值总体呈下降趋势。本文算法以外的其他3种算法的下降幅度较大,尤其是文献[11]算法的综合评价价值在加入噪声后骤降。从分割的结果图也可以看出,文献[11]算法完全不能分割出绝缘子图像。而本文算法的综合评价价值虽然也呈下降趋势,但降幅不大,一直趋近于1。客观数据表明,本文算法的抗噪性能更强。

综上,本文算法能够很好地保留图像的细节部分,并且不会误分割,对天气条件有更强的适应性,同时具备很强的抗噪性能。相比较于其他算法,本文算法的分割效果更理想,但检测玻璃材质的绝缘子效果不佳,这是由于玻璃绝缘子为透明状态,绝缘子容易受到背景图像的影响。

## 4 结 论

通过改进原始UL-PCNN,优化了UL-PCNN在图像分割方面的性能,使其能够高效准确地分割出绝缘子串。实验结果表明,该方法提取效果较好,并且对多种绝缘子图像都适用,为进一步研究绝缘子掉串、污秽和覆冰等提供了参考,并且可进一步加快输电线路对绝缘子检测的智能化和自动化。

## 参 考 文 献

- [1] Tong W G. Research on methods for recognition and status detection of power line based on aerial images [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011: 65-73.  
全卫国. 基于航拍图像的输电线路识别与状态检测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 65-73.
- [2] Xu X T, Li B S, Cui K B, *et al.* The application of

improved PCNN in infrared insulator image segmentation [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2013, (3): 24-29.

徐雪涛, 李宝树, 崔克彬, 等. 改进型PCNN在绝缘子图像分割中的应用[J]. *电瓷避雷器*, 2013, (3): 24-29.

- [3] Huang X B, Liu X H, Zhang Y, *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.  
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.
- [4] Cui K B. Research on the key technologies in insulator defect detection based on image [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016: 34-49.  
崔克彬. 基于图像的绝缘子缺陷检测中若干关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 34-49.
- [5] Zhang J J, Han J, Zhao Y B, *et al.* Insulator recognition and defects detection based on shape perceptual[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(8): 1194-1201.  
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.
- [6] Zhang J Y, Huang J D. An image segmentation algorithm research based on optimized PCNN[C]// 2018 11th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), September 22-23, 2018, Changsha, China. New York: IEEE, 2018: 86-90.
- [7] He F L, Guo Y C, Gao C. Improved PCNN method for human target infrared image segmentation under complex environments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0215003.  
贺付亮, 郭永彩, 高潮. 复杂环境下用于人体目标红外图像分割的改进PCNN方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0215003.
- [8] Gu X D. Feature extraction using unit-linking pulse coupled neural network and its applications [J]. *Neural Processing Letters*, 2008, 27(1): 25-41.
- [9] Ma Y D, Li L, Zhan K, *et al.* Pulse coupled neural network and digital image processing [M]. Beijing: Science Press, 2008: 8-22.  
马义德, 李廉, 绽琨, 等. 脉冲耦合神经网络与数字图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 8-22.

- [10] Su J, Li B, Wang Y Z. Infrared image enhancement based on PCNN segmentation and fuzzy set theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0910001.  
苏娟, 李冰, 王延钊. 结合 PCNN 分割和模糊集理论的红外图像增强 [J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0910001.
- [11] Lin L B, Li J X, Luo K, *et al.* A modified pulse coupled neural network model for nut image segmentation [J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science Edition)*, 2018, 34(6): 19-23.  
林龙彬, 李建兴, 罗堪, 等. 基于改进脉冲耦合神经网络的螺母工件图像分割 [J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(6): 19-23.
- [12] Xu C, Ping X L. Line detection algorithm based on improved random hough transformation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051001.  
徐超, 平雪良. 基于改进随机 Hough 变换的直线检测算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 051001.
- [13] Sahoo P K, Soltani S, Wong A K C. A survey of thresholding techniques [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, 41(2): 233-260.