

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107914

基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测*

黄梦涛, 连一鑫

(西安科技大学电气与控制工程学院 西安 710600)

摘 要:针对目前锂电池极片表面存在低对比度微小缺陷难以检测的问题,提出了一种基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测方法。首先,使用双边滤波改善高斯滤波在降噪时可能造成的图像边缘模糊问题,并在此基础上引入多尺度细节增强算法来增强低对比度图像;其次,基于 Sobel 算子的 3×3 梯度模板计算极片图像的梯度幅值和梯度方向;最后,基于最大熵和 Otsu 算法自动获取图像的高、低阈值,通过逻辑与运算对两种算法阈值分割后的检测结果进行边缘融合,并利用形态学闭运算和细化算法修复不连续边缘,得到最终检测边缘。实验结果表明,传统 Canny 算子和 Otsu-Canny 算法难以有效检测不同类型的暗斑、露箔和划痕缺陷,而本文算法对这些缺陷均取得了较好的检测效果,能够在突出目标缺陷区域的同时,有效减少同色度背景噪声,正确检测率达 98%,具有一定实用价值。

关键词: 锂电池极片表面缺陷;改进 Canny 算子;多尺度细节增强;最大熵;Otsu 算法

中图分类号: TP391 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

Lithium battery electrode plate surface defect detection based on improved Canny operator

Huang Mengtao, Lian Yixin

(College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710600, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to detect the small defects with low contrast existing on the surface of lithium battery electrode plate, a new lithium battery electrode plate surface defect detection method based on improved Canny operator is proposed. Firstly, bilateral filtering is used to solve the image edge blur problem caused by Gaussian filtering when reducing noise, and on this basis, multi-scale detail enhancement algorithm is introduced to enhance the low contrast image. Secondly, the 3×3 gradient template of Sobel operator is used to calculate the gradient amplitude and gradient direction of electrode plate images. Finally, based on the maximum entropy and Otsu algorithm, the high and low thresholds of the image are automatically obtained. The detection results of the two algorithms after threshold segmentation are edge-fused with logic and operation, and the discontinuous edges are repaired with morphological closed operation and thinning algorithm to obtain the final detection edge. The experiment results show that the traditional Canny operator and Otsu-Canny algorithm are difficult to effectively detect the defects, including different types of dark spots, exposed foil and scratches. However, the algorithm in this paper can achieve good detection results for these defects, which can effectively reduce the same color background noise, while highlight the target defect area. The correct detection rate reaches 98%, the propose algorithm has a certain practical value.

Keywords: lithium battery electrode plate surface defect; improved Canny operator; multi-scale detail enhancement; maximum entropy; Otsu algorithm

收稿日期: 2021-05-11 Received Date: 2021-05-11

* 基金项目: 陕西省重点研发计划(2019GY-097)、陕西省教育科学“十三五”规划课题(SGH18H158)项目资助

0 引言

随着社会经济的发展,人们对电动汽车、电动工具等储能设备、固定和移动储能应用,以及对大规模可再生能源储能的需求不断增长。可行的电动汽车和运行时间长不需要充电的便携式电子设备都需要开发更轻便、更强大的电池。而在所有可用的不同技术中,锂离子电池因其具备高能量密度、无记忆效应、低自放电率和相对便宜的生产成本等优点,成为目前市场上应用最为广泛的储能解决方案,因此锂离子电池的整体性能和使用安全尤为重要^[1-2]。但是在锂电池极片的制造过程中,很难避免由于涂布机、辊压轴的原因造成正负极的划痕、暗斑、露箔等缺陷^[3-4],这些缺陷会对电池的整体性能和使用寿命产生影响。因此,有必要在锂电池压膜组装之前对极片进行缺陷检测。

由于极片的生产环境复杂及极片表面缺陷类型不定,锂电池极片瑕疵检测的相关研究还相对有限。Badmos 等^[5]提出将改进的卷积神经网络模型用于电极微结构瑕疵检测。苑玮琦等^[6]提出一种对光照分布和油污不敏感的灰度差分模型和突变点阈值选取方法,用于圆柱形覆膜锂电池圆周边凹坑检测。从更广泛的角度来看,锂电池极片的缺陷检测问题也可作为颜色单一材料的表面缺陷检测。比如钢轨表面的缺陷检测^[7-8],其中闵永智等^[7]提出基于图像局部灰度梯度特征自适应平滑方法用于钢轨表面瑕疵检测,并对差分图像进行阈值分割和连通域标记。甘福宝等^[8]提出一种改进的 Otsu 阈值分割算法用于输送带撕裂检测。刘涵等^[9]通过边缘检测拟合方法和卷积神经网络用于焊缝缺陷检测和识别。陆华才等^[10]提出基于 Otsu 的改进 Canny 算法与高斯混合模型相结合的方法来检测运动目标。Eshkevari 等^[11]提出一种启发式阈值分割方法实现从非均匀背景中提取玻璃瓶的边界。王伟江等^[12]提出基于融合卡通纹理分解和最优双曲正切曲线的图像增强方法用于机柜表面缺陷检测,并通过梯度阈值分割方法获取缺陷。黎浩等^[13]利用 Sobel、Canny 边缘检测和阈值优化相结合的图像分割算法用于带钢表面缺陷图像的边缘检测。Gong 等^[14]通过基于双边滤波的改进 Canny 算法来提取手势边缘。刘丽霞等^[15]通过基于 Otsu 阈值分割算法的改进 Canny 算法来实现遥感图像的分割。在极片缺陷边缘检测研究中,大都基于阈值分割法或边缘检测算法。然而上述方法对图像噪点的鲁棒性不高,检测精度有限。

针对现有方法对低对比度微小缺陷难以检测的问题,本文提出一种基于改进 Canny 算子的锂离子电池极片表面缺陷检测方法。通过对传统 Canny 检测目标边缘时存在噪声干扰、弱边缘漏检,以及分割阈值需人工设置

等问题,引入双边滤波与多尺度细节增强^[16]、最大熵和 Otsu 算法。针对极片图像滤波过程中传统 Canny 算法中的高斯滤波容易模糊图像边缘的问题,采取双边滤波算法进行处理;同时针对低对比度锂电池极片图像中缺陷与背景区分度低的问题,引入多尺度细节增强算法。在边缘点双阈值连接过程中,考虑到人工设置双阈值的方法不具备自适应性,提出基于最大熵与 Otsu 算法的阈值自适应获取方法,运用逻辑与运算融合最大熵和 Otsu 算法的边缘检测效果,并利用形态学运算和细化操作进一步修复边缘,以得到最终极片缺陷的检测结果。

1 极片图像特征分析

如图 1 所示为锂电池极片图像采集示意图,检测系统采用两个 4 K 分辨率的线阵相机拍摄极片正负极图像,先将采集到的极片图像传到 PC 端,再进一步处理图像并检测缺陷。极片最高可检测面幅为 700 mm,由于同步采集正负极图像,所以分别采用光照相对均匀的线性光源打光,但考虑到外部环境因素,采集过程中时常会存在低对比度极片图像,从而导致缺陷漏检的现象。

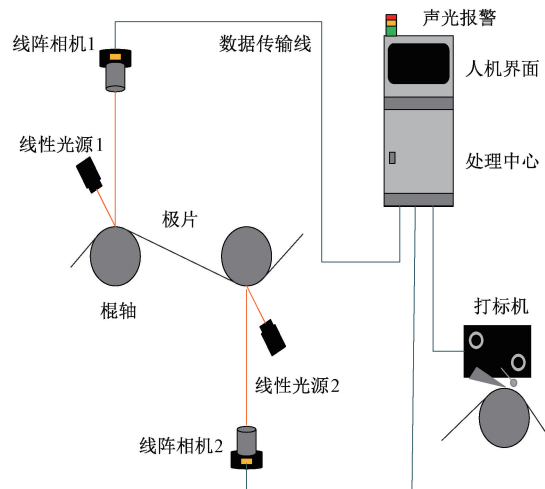


图1 锂电池极片图像采集系统

Fig. 1 Image acquisition system of lithium battery electrode plate

图2为极片表面图像的灰度及梯度分布,极片表面缺陷形态、大小各异,相较划痕和露箔缺陷,其中暗斑缺陷的对比度偏低,最容易出现漏检情况,暗斑缺陷如图2(a)所示。从图2(b)可知,灰度分布范围为[83, 147],灰度变化为64,分布相对平缓。从图2(c)可知,目标缺陷区域的梯度无法突出。由此可知,极片图像的缺陷与邻域背景的像素对比度偏低,弱边缘难以检测,在图像滤波处理时,极易将低对比度缺陷和微小缺陷当成背景噪声滤除。

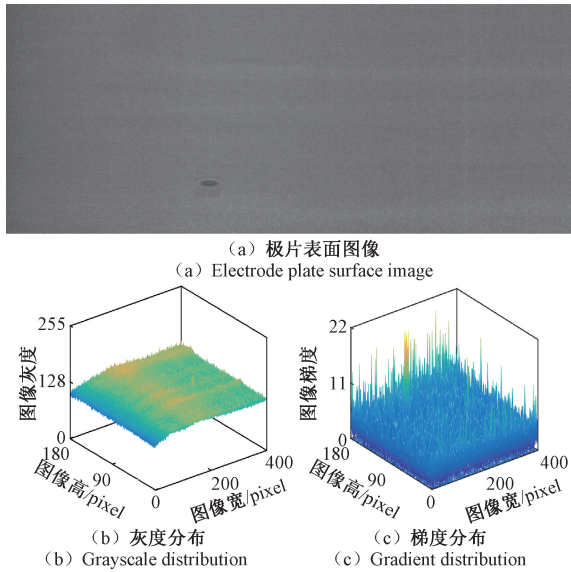


图 2 极片图像及其灰度、梯度分布

Fig. 2 Electrode plate image and its grayscale and gradient distribution

2 基于 Canny 算子的极片瑕疵检测改进算法

2.1 Canny 算子边缘检测原理

在采集极片图像过程中,由于会受到周围环境影响,Canny 算子^[17]需要先对图片降噪,再检测目标轮廓。该算子相比于 Roberts 算子、Sobel 算子、LOG 算子、Prewitt 算子等^[18]具有信噪比大、准确率高的优点,其遵循 3 个基本原则:1) 尽可能检测出所有目标边缘;2) 检测到的边缘尽量接近目标边缘;3) 尽量满足单像素边缘。

Canny 算法的核心是采用图像的梯度幅值与方向的极大值来标识边缘。其主要步骤包括:先利用二维高斯函数对图像降噪;再计算 2×2 邻域内的梯度幅值和方向;最后对梯度图中冗余点做非极大值抑制,并利用双阈值连接边缘。但是该算法采取高斯函数对图像降噪会模糊极片缺陷边缘,特别对目标缺陷与邻域对比度低的情况,可能会漏检。梯度计算是在 2×2 邻域内进行,计算简单,但极易导致目标边缘信息丢失或者将噪点当成边缘点。双阈值连接处理用来筛选边缘点,高、低阈值需要手动设置,不具备自适应性,设定过高可能会造成边缘信息丢失;过低可能会存在非边缘点。

2.2 Canny 算子的改进

针对传统 Canny 算子边缘检测的不足,本文分别在图像降噪、梯度增强和双阈值连接 3 个方面进行改进,实现极片表面的缺陷检测,算法改进框图如图 3 所示。

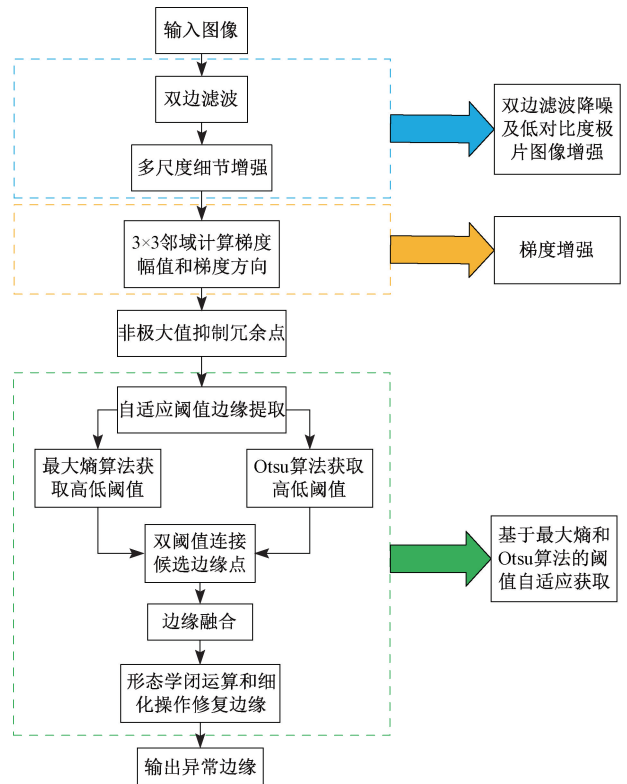


图 3 算法改进框图

Fig. 3 Algorithm improvement block diagram

1) 双边滤波降噪及低对比度极片图像的多尺度细节增强

(1) 双边滤波降噪

除高斯滤波外,常用的滤波方法有中值滤波、均值滤波。这些方法针对彩色图像的常见噪声类型都有比较好的去噪效果,但是对表面颜色单一的极片图像效果不佳。为此,本文采取双边滤波算法改善高斯滤波易于模糊图像边缘的问题。

双边滤波^[19]是在高斯滤波的基础上引入高斯标准差 σ_r , 即同时考量了灰度相似性和空间分布情况,表达式如下:

$$f_b(x, y) = \frac{\sum_{k, l} f(k, l) \omega(x, y, k, l)}{\sum_{k, l} \omega(x, y, k, l)} \quad (1)$$

$$d(x, y, k, l) = \exp\left(-\frac{(x-k)^2 + (y-l)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (2)$$

$$r(x, y, k, l) = \exp\left(-\frac{\|f_b(x, y) - f(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (3)$$

式中: $f(k, l)$ $f_b(x, y)$ 为极片图像滤波前后的像素值; $\omega(x, y, k, l)$ 为权重系数,是根据像素间距分配权重的定义域核 $d(x, y, k, l)$ 和根据像素差异分配权重的值域核 $r(x, y, k, l)$ 的乘积决定。

(2) 极片图像的多尺度细节增强

为了兼顾常规极片图像和低对比度极片图像的缺陷检测,本文在滤波处理之后采用多尺度细节增强算法提升目标缺陷与背景的对比度。低对比度图像增强方法有基于模糊熵的方法^[20]、伽马校正^[21]等。这些方法对低对比度图像有较好的增强效果,但是参数值固定,不能直接用于锂电池极片的图像增强。为此,本文采用多尺度细节增强方法^[22],实现锂电池极片表面目标缺陷区域的对比度增强。

本文利用多尺度细节增强方法增强目标缺陷信息,采用 3 个不同尺度的高斯模糊图像,与双边滤波后的图像做差分运算,以获取不同程度的图像细节,然后以加权融合的方式将图像细节附加到双边滤波后的图像中,从而增加图像信息,表达式如下:

$$B_1 = g_1 * f_b, B_2 = g_2 * f_b, B_3 = g_3 * f_b \quad (4)$$

式中: f_b 为双边滤波处理后的极片图像; g_i 为 3 种不同尺度的高斯核; B_i 为不同尺度的高斯模糊图像, $i = 1, 2, 3$ 。 d_i 为尺度不同的细节图像,包括精细节 d_1 、中等细节 d_2 和粗细节 d_3 , 定义如下:

$$d_1 = f_b - B_1, d_2 = B_1 - B_2, d_3 = B_2 - B_3 \quad (5)$$

然后通过对这 3 个尺度细节进行加权融合并附加到双边滤波后的极片图像中,实现极片图像的目标缺陷细节增强,表达式如下:

$$f^* = \lambda_1 \times d_1 + \lambda_2 \times d_2 + \lambda_3 \times d_3 + f_b \quad (6)$$

式中: λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别为 3 个尺度细节图像的权重,权重之和为 1,其值是由目标缺陷的梯度分布情况确定,获取不同尺度的分配占比。本文的权重分别取 0.25、0.5 和 0.25。 f^* 为最终的增强图像。增强前后的缺陷局部结果如图 4 所示。

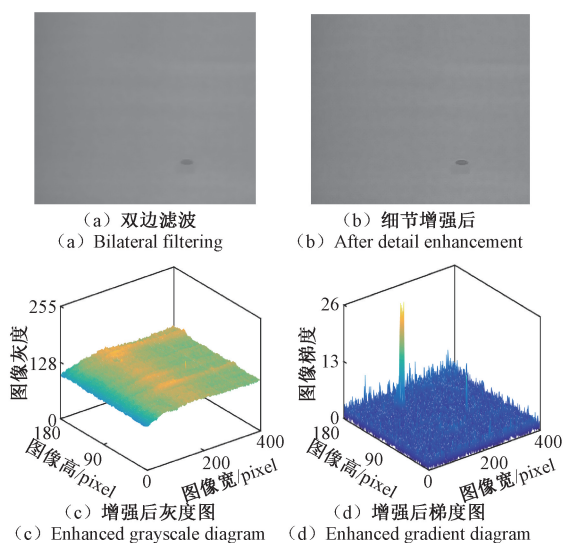


图 4 多尺度细节增强及灰度、梯度分布

Fig. 4 Multi-scale detail enhancement and grayscale, gradient distribution

2) 梯度增强

传统的梯度幅值计算方法是在 2×2 邻域内求有限差分获得,虽然计算简单,但极易检测到噪点,对极片表面的微小缺陷并不适用。本文采用 Sobel 算子来改进梯度计算方法,该算子采取了城市距离,且本身考虑了 x 、 45° 、 y 和 135° 的梯度加权求和,是一个 3×3 的梯度算子。Sobel 算子的梯度模板如图 5 所示。

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

(a) x 方向
(a) x direction

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

(b) y 方向
(b) y direction

图 5 Sobel 梯度模板

Fig. 5 Sobel gradient template

设 $f^*(x, y)$ 表示增强后图像中像素点 (x, y) 处的灰度值, g_x 、 g_y 分别代表像素点 (x, y) 处沿 x 方向和 y 方向边缘检测的灰度值,公式如下:

$$g_x = [f^*(x+1, y-1) + 2*f^*(x+1, y) + f^*(x+1, y+1)] - [f^*(x-1, y-1) + 2*f^*(x-1, y) + f^*(x-1, y+1)] \quad (7)$$

$$g_y = [f^*(x-1, y-1) + 2*f^*(x, y-1) + f^*(x+1, y-1)] - [f^*(x-1, y+1) + 2*f^*(x, y+1) + f^*(x+1, y+1)] \quad (8)$$

设 $gradient_A$ 为图像中像素点 (x, y) 处的梯度幅值, $\theta(x, y)$ 为梯度方向,则有:

$$gradient_A = |g_x| + |g_y| \quad (9)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (10)$$

3) 非极大值抑制冗余点

为了更准确地定位目标缺陷,减少计算量,必须对梯度幅值做非极大值抑制,如图 6 所示。具体方法是:在 3×3 邻域内,将 $A(i, j)$ 周围像素分为 8 个方向邻域,对于每个像素点,如果 $A(i, j)$ 的梯度幅值比其梯度方向上相邻 2 个像素点 A_1 和 A_2 的梯度幅值大,将该点标记为候选边缘点。

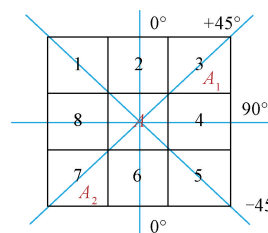


图 6 3×3 邻域梯度幅值的非极大值抑制

Fig. 6 Non-maximum value suppression of the gradient amplitude in 3×3 neighborhood

4) 基于最大熵和 Otsu 算法的阈值自适应获取

传统高、低阈值的设定是通过多次实验来人为设置的,该方法的适应能力较差。常见的阈值自适应获取方法有 Otsu 算法、微分运算^[23]。上述方法对高对比度图像有一定的效果,但对于本文单一色度的极片表面缺陷检测并不适用,容易存在较多背景噪点。本文受图像信息熵的启发,提出基于最大熵和 Otsu 算法的自适应阈值获取方法,融合最大熵算法对目标与背景的良好区分性、Otsu 算法对目标区域的边缘识别能力,实现锂电池极片表面缺陷的有效检测。

(1) 最大熵算法自适应获取高低阈值

设非极大值抑制后的结果为 $\bar{f}$, 大小为 $M \times N$, 灰度级为 n , 灰度级 i 对应的概率为 p_i , t 为图像分割阈值 ($0 < t < n$)。根据阈值 t 将图像 $\bar{f}$ 的灰度级划分为 C_1 、 C_2 两类, 其中 C_1 包括在灰度级 $[0, t]$ 内的所有像素, C_2 包括在灰度级 $[t+1, n]$ 内的所有像素。像素属于类 C_1 的概率设为 $P_1(t)$, 像素属于类 C_2 的概率设为 $P_2(t)$, 表达式如下:

$$P_1(t) = \sum_{i=1}^t P_i \quad (11)$$

$$P_2(t) = 1 - P_1(t) \quad (12)$$

C_1 、 C_2 两类的信息熵如式 (14)、(15) 所示:

$$H_{C_1} = - \sum_{i=1}^t \frac{P_i}{P_1(t)} \ln \left(\frac{P_i}{P_1(t)} \right) \quad (13)$$

$$H_{C_2} = - \sum_{i=t+1}^n \frac{P_i}{1 - P_1(t)} \ln \left(\frac{P_i}{1 - P_1(t)} \right) \quad (14)$$

则 C_1 、 C_2 两类信息熵的判别函数为:

$$\text{MaxEnt}(t) = H_{C_1} + H_{C_2} \quad (15)$$

当函数 $\text{MaxEnt}(t)$ 取最大值时, 对应的 t 值为图像 $\bar{f}$ 的高阈值, 低阈值一般取 $0.5 * t$ 。接着根据双阈值连接^[24]方法, 利用高低阈值对 $\bar{f}$ 进行检测并连接边缘, 得到检测结果 $F1$ 。

(2) Otsu 算法自适应获取高低阈值

Otsu 算法类似于最大熵算法, 先设灰度图像 $\bar{f}$ 的大小为 $M \times N$, 灰度级为 n , 灰度级 i 对应的概率为 p_i , k 为图像分割阈值 ($0 < k < n$)。根据阈值 k 将输入图像 $\bar{f}$ 的灰度级划分为 D_1 、 D_2 两类, 其中 D_1 包括在灰度级 $[0, k]$ 内的所有像素, D_2 包括在灰度级 $[k+1, n]$ 内的所有像素。像素属于类 D_1 、 D_2 的概率设为 $P_1(k)$ 、 $P_2(k)$, $u_1(k)$ 、 $u_2(k)$ 为类 D_1 、 D_2 的平均灰度级, 则有:

$$P_1(k) = \sum_{i=1}^k P_i \quad (16)$$

$$P_2(k) = 1 - P_1(k) \quad (17)$$

$$u_1(k) = \sum_{i=1}^k \left(i \frac{P_i}{P_1(k)} \right) \quad (18)$$

$$u_2(k) = \sum_{i=k+1}^n \left(i \frac{P_i}{P_2(k)} \right) \quad (19)$$

图像类间方差 $\sigma^2(k)$ 为:

$$\sigma^2(k) = P_1(k) u_1^2(k) + P_2(k) u_2^2(k) \quad (20)$$

当类间方差 $\sigma^2(k)$ 取最大值时, 对应的 k 值为图像 $\bar{f}$ 的高阈值, 低阈值一般取 $0.5 * k$ 。接着根据双阈值连接方法, 利用高低阈值对 $\bar{f}$ 进行检测并连接边缘, 得到检测结果 $F2$ 。

(3) 边缘融合

为了融合最大熵算法对目标与背景的良好区分性、Otsu 算法对目标区域的边缘识别能力, 本文根据图像的逻辑运算, 将两幅尺寸相同的二值图像 $F1$ 和 $F2$ 处于 (i, j) 点位置的像素灰度值设为 h_{ij}^1 和 h_{ij}^2 , 其中 $h_{ij} \in [0, 1]$, 数值 0 显示纯黑色, 1 显示纯白色。并将 h_{ij}^1 和 h_{ij}^2 进行与运算, 令 $F1$ 作为背景掩膜。只有在对应点的灰度值全为 1 时, 输出才为 1; 否则, 输出为 0, 得到融合后的缺陷边缘图像, 最后利用形态学闭运算和细化操作对融合结果进行处理, 修复不连续边缘并确保 Canny 算法的单像素边缘响应, 结果如图 7 所示。表达式如下:

$$F3 = F1 \cap F2 \quad (21)$$

$$F4 = (F3 \oplus s) \ominus s \quad (22)$$

式中: “ $\cap$ ” 表示按位逻辑与运算符, $F3$ 为融合后的缺陷边缘图像。 s 为 3×3 的交叉形结构元素, “ $\oplus$ ” 为膨胀运算符, “ $\ominus$ ” 为腐蚀运算符, $F4$ 为形态学修复后的检测结果。

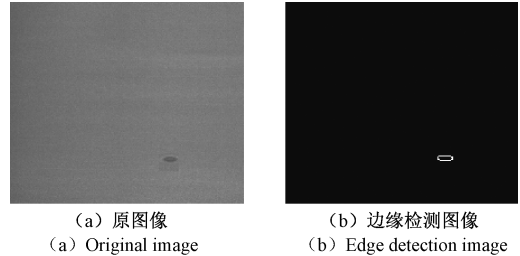


图 7 边缘检测结果

Fig. 7 Edge detection result

3 实验结果与分析

为验证本文图像滤波算法和缺陷边缘检测算法的有效性, 第 1 组实验对高斯滤波、均值滤波、自适应中值滤波和本文的双边滤波算法进行比较分析; 第 2 组实验, 在双边滤波算法与多尺度细节增强算法结合后, 对传统 Canny 算子、Otsu-Canny 和本文方法的边缘检测效果做比较分析。选取大小为 400×180 的 3 种缺陷类型图片, 包括暗斑、露箔和划痕, 本文的实验环境为 Intel (R) Core (TM) i5-4210U、4G RAM、Python3.7、MATLABR2016a。

3.1 图像滤波算法结果及分析

将本文方法分别与高斯滤波、均值滤波和自适应中值滤波做比较,由于缺陷区域占整幅极片图像的比例非常小,为了更直观地显示滤波结果,统一截取缺陷区域,裁剪尺寸为 123×72 。高斯滤波、均值滤波、自适应中值滤波的卷积核取 3,双边滤波模板取 7。部分实验结果如图 8 所示,图 8(a1)~(a3)分别为小尺寸暗斑缺陷、露箔缺陷和划痕缺陷,图 8(a4)~(a6)分别为大尺寸暗斑缺陷、露箔缺陷和划痕缺陷。通过对比可以看出,自适应中值滤波和双边滤波都能够较好的保留目标缺陷边缘,但自适应中值滤波处理后的结果仍存在干扰噪声,且对低对比度缺陷会丢失一些边缘细节,如图 8(d2)、(d3)所示。而双边滤波处理的结果即能有效平滑图像,又能够突出缺陷目标。为了客

观地比较不同算法的降噪效果,本文引入峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 作为评价去噪效果的指标。实验数据如表 1 所示。PSNR 定义如下:

$$MSE = \frac{1}{hw} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w (f(i,j) - g(i,j))^2 \quad (23)$$

$$PSNR = 10 \lg \frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \quad (24)$$

式中: $f(i,j)$ 表示原图像在 (i,j) 处的灰度值; $g(i,j)$ 为滤波处理后图像在 (i,j) 处的灰度值; h, w 表示图像的长和宽; MSE 表示原图像与滤波后图像的均方误差; n 表示每像素的比特数,一般取 8,即像素灰度阶数为 256; $PSNR$ 的单位为 dB。当 MSE 越小、 $PSNR$ 越大,滤波降噪后的图像越接近原图像,降噪效果越好。



图 8 图像滤波结果

Fig. 8 Image filtering results

表 1 图像滤波质量评价对比结果

Table 1 Quality evaluation comparison results of image filtering

评价指标	滤波算法	a1	a2	a3	a4	a5	a6
PSNR	高斯滤波	40.642 2	31.661 4	32.663 9	39.643 5	24.478 2	33.692 0
	均值滤波	42.712 9	32.000 8	32.790 0	39.071 2	28.096 9	36.098 0
	自适应中值滤波	39.519 4	32.580 0	32.906 4	39.752 2	29.794 0	37.016 9
	双边滤波	42.961 8	32.022 8	33.279 0	40.452 3	30.021 1	37.735 6

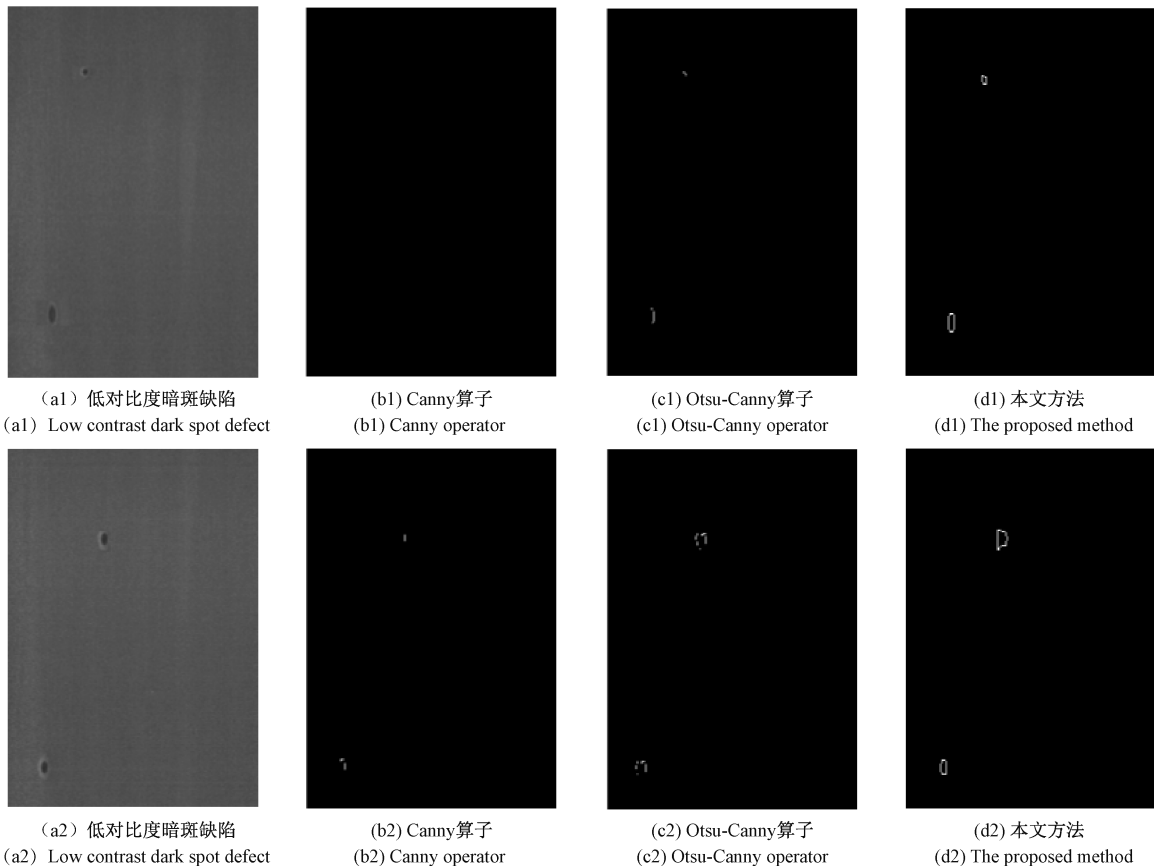
由表 1 数据可以看出,本文采用的双边滤波算法的 *PSNR* 均高于高斯滤波和均值滤波算法,图 8(a2)的自适应中值滤波的 *PSNR* 值稍大于双边滤波,是因为 *PSNR* 是基于像素点间误差敏感度的,并未考虑人眼对空间频率较低的对比差异敏感度,因此双边滤波对背景噪声的滤除效果更好,保边去噪的效果更佳。

3.2 图像边缘检测结果及分析

通过上述分析,高斯滤波、均值滤波和自适应中值滤波不能有效解决极片表面缺陷的保边去噪问题,所以采用双边滤波进行图像降处理,但由于图 8(a1)为低对比度暗斑缺陷,对应的双边滤波结果虽没有丢失缺陷边缘,

但仍不够清晰。为此,本文将双边滤波与多尺度细节增强算法结合来增强目标缺陷。

基于上述滤波增强方法,利用传统 Canny 算子、Otsu-Canny 算法及本文改进的 Canny 算法进行极片缺陷检测,其中传统 Canny 算子、Otsu-Canny 算法的高斯滤波卷积核取 3,分割阈值取(100, 50),双边滤波模板取 7 时检测效果最佳,部分检测结果如图 9 所示。其中图 9(a1)、(a2)是低对比度暗斑,属于类圆形缺陷;图 9(a3)、(a4)是对比度较高的露箔缺陷,形状包括类圆形和线形;图 9(a5)、(a6)是划痕缺陷,属于偏细长的线形缺陷。



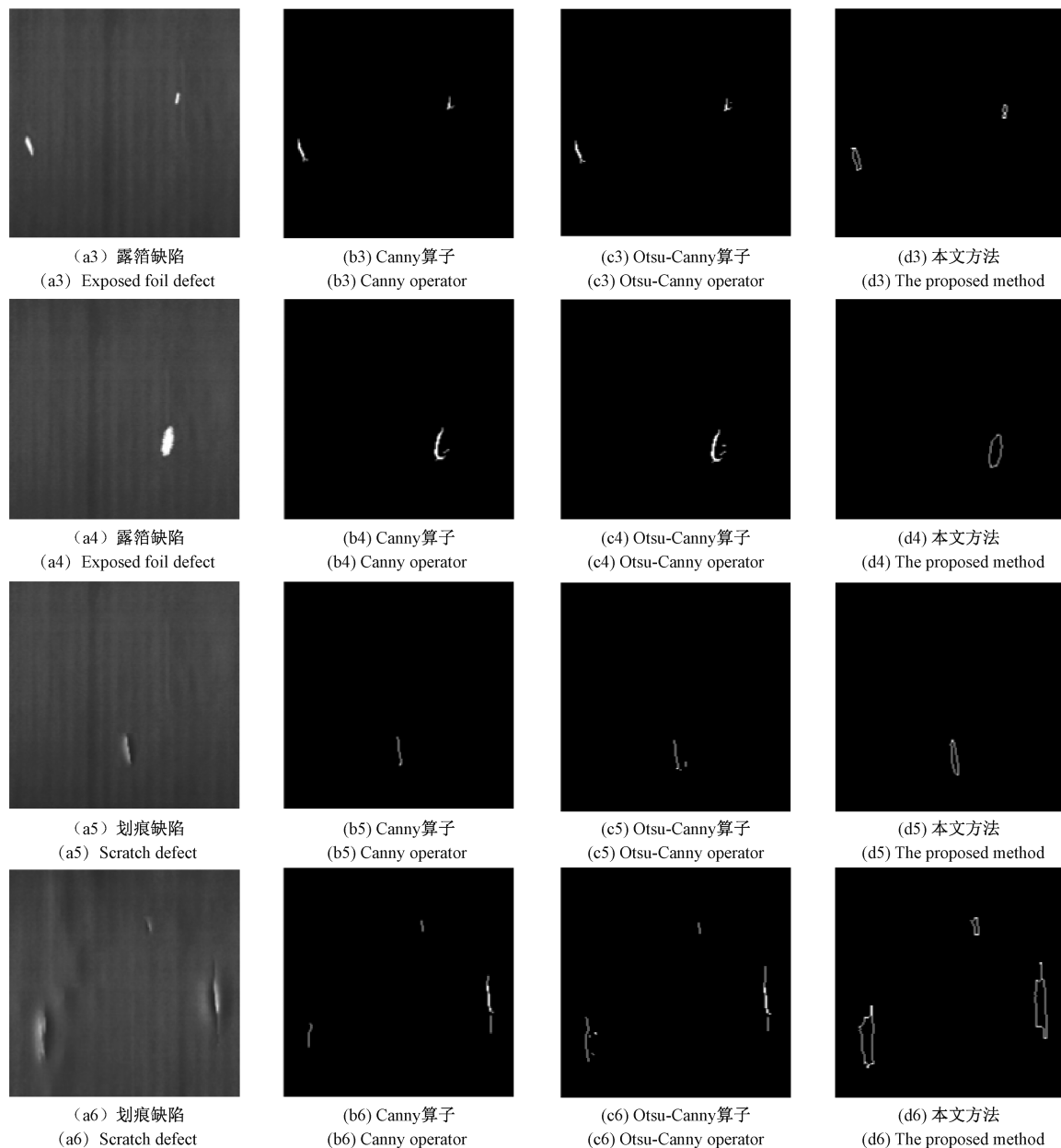


图9 极片缺陷检测结果

Fig. 9 Electrode plate defect detection results

由图9可知,传统Canny算子在对图9(a1)、(a2)进行检测时,低对比度暗斑缺陷被漏检,Otsu-Canny算法的检测结果不完整。由图9(a3)、(a4)露箔缺陷的检测结果可知,传统Canny算子与Otsu-Canny算法均定位到目标缺陷,但检测结果不完整,边缘单像素精度低。由图9(a5)、(a6)划痕缺陷的检测结果可知,传统Canny算子和Otsu-Canny算法在对偏细长的线形缺陷有很好的检测效果,但检测结果基本只存在单侧轮廓,得不到完整的缺陷区域。

为了进一步说明本文方法的有效性,对极片表面暗

斑、露箔和划痕等3种类型各600幅的缺陷样本边缘检测结果进行定量分析,比较3种算法的缺陷检测准确率,如表2所示。结果表明传统Canny算子对掉料和划痕缺陷有较好的检测效果,对低对比度暗斑缺陷的检测正确率偏低;Otsu-Canny算法对暗斑缺陷的检测效果有所提升,但划痕缺陷的正确率下降。而本文方法对极片表面低对比度缺陷有效检测1767张,正确率达98%。检测效果相对较弱的是划痕缺陷,误检数量为31张,这是由于本文算法为了能够有效检测低对比度缺陷区域,对图像梯度更加敏感。又由于划痕缺陷的形状大小及深浅程

度不一,同一划痕中也有可能会出现多条深浅不同的印迹,导致检测出来的划痕轮廓精度不高。

表 2 3 种不同算法对极片缺陷检测结果的比较

Table 2 Comparison of the electrode plate defect detection results for three different algorithms 张

极片缺陷	暗斑缺陷	掉料缺陷	划痕缺陷
传统 Canny	279	600	560
Otsu-Canny	553	580	455
本文方法	598	600	569

本文方法对于 3 类缺陷不仅能够有效检测出目标缺陷,而且能够得到相对完整且边缘连续的缺陷轮廓。为了进一步说明本文方法的检测结果的缺陷边缘连续性,计算图 9 中缺陷边缘检测结果的 8 连通数,实验数据如表 3 所示。

表 3 对极片缺陷检测结果的 8 连通数统计

Table 3 The 8 connected number statistics of electrode plate defect detection results

极片缺陷	传统 Canny	Otsu-Canny	本文方法
a1	0	15	46
a2	14	36	61
a3	53	54	62
a4	71	74	56
a5	24	29	56
a6	89	118	255

由表 3 可知,本文算法对图 9(a4)缺陷图的 8 连通数统计结果低于其他 3 种算法,对其他缺陷检测结果均高于其他 3 种算法,这是因为传统 Canny 算法和改进的 Otsu-Canny 算法提取到的边缘单像素精度低,并未接近真实缺陷边缘,这是导致 8 连通数统计结果高于本文算法的原因。故本文算法能够检测出较多的缺陷边缘像素点,同时也遵循了 Canny 算法的 3 个基本准则,尽可能接近真实目标缺陷区域,最大限度地抑制了虚假边缘。

4 结 论

针对锂电池极片表面存在低微缺陷难以检测的问题,本文通过对 Canny 算子进行滤波增强和阈值自适应获取开展锂离子电池极片表面缺陷检测方法研究,主要结论如下:

1) 本文采用双边滤波进行极片图像去噪,并结合多尺度细节增强算法增强图像对比度,结果表明,对极片图

像进行双边滤波能够达到保边去噪的效果,峰值信噪比均高于其他几种滤波算法,而且通过细节增强能够突出极片缺陷细节,有利于后续检测。

2) 本文通过逻辑与运算对最大熵算法与 Otsu 算法进行边缘融合。结果表明,本文所提出的阈值自适应获取算法能够有效检测出极片缺陷,实现更加完整的缺陷边缘检测,检测正确率达 98%。

3) 实验结果表明,本文算法能够获取划痕大致位置,但由于划痕区域灰度变化复杂,划痕缺陷边缘定位精度还有待提高。因此,在后续工作中需要继续改进该方法,同时将该方法用于其他单一色度涂布产品的质量检测中。

参考文献

- [1] MASIAS A, MARCICKI J, PAXTON W A. Opportunities and challenges of high-energy lithium metal batteries for electric vehicle applications[J]. ACS Energy Letters, 2021, 6: 621-630.
- [2] OUYANG D, CHEN M, HUANG Q, et al. A review on the thermal hazards of the lithium-ion battery and the corresponding countermeasures[J]. Applied Sciences, 2019, 9(12): 2483.
- [3] BOCKHOLT H, INDRIKOVA M, NETZ A, et al. The interaction of consecutive process steps in the manufacturing of lithium-ion battery electrodes with regard to structural and electrochemical properties[J]. Journal of Power Sources, 2016, 325: 140-151.
- [4] MOHANTY D, HOCKADAY E, LI J, et al. Effect of electrode manufacturing defects on electrochemical performance of lithium-ion batteries: Cognizance of the battery failure sources[J]. Journal of Power Sources, 2016, 312: 70-79.
- [5] BADMOS O, KOPP A, BERNTHALER T, et al. Image-based defect detection in lithium-ion battery electrode using convolutional neural networks[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, 31(4): 885-897.
- [6] 苑玮琦, 郭绍陶. 圆柱型覆膜锂电池圆周面凹坑检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 146-156.
- [7] YUAN W Q, GUO SH T. Research on the detection method of pit on the cylindrical surface of cylindrical coated lithium battery[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 146-156.
- [7] 闵永智, 岳彪, 马宏锋, 等. 基于图像灰度梯度特征

- 的钢轨表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 220-229.
- MIN Y ZH, YUE B, MA H F, et al. Detection of rail surface defects based on image gray gradient features[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 220-229.
- [8] 甘福宝, 黄友锐, 韩涛, 等. 基于狮群优化二维 Otsu 算法的输送带撕裂检测方法[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 55-60, 79.
- GAN F B, HUANG Y R, HAN T, et al. Conveyor belt tear detection method based on group optimization two-dimensional Otsu algorithm [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 55-60, 79.
- [9] 刘涵, 郭润元. 基于 X 射线图像和卷积神经网络的石油钢管焊缝缺陷检测与识别[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 247-256.
- LIU H, GUO R Y. Detection and identification of SAWH pipe weld defects based on X-ray image and CNN[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 247-256.
- [10] 陆华才, 贺华展, 黄宜庆, 等. 改进 Canny 边缘算子和高斯混合模型的运动目标检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 142-147.
- LU H C, HE H ZH, HUANG Y Q, et al. Improved canny edge operator and gaussian mixture model for moving target detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (10): 142-147.
- [11] ESHKEVARI M, REZAEI M J, ZARINBAL M, et al. Automatic dimensional defect detection for glass vials based on machine vision: A heuristic segmentation method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 17(2): 973-989.
- [12] 王伟江, 彭业萍, 曹广忠, 等. 面向机柜表面缺陷检测的不均匀光照和低对比度图像增强方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 134-142.
- WANG W J, PENG Y P, CAO G ZH, et al. Non-uniform and low illumination image enhancement for cabinet surface defect detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 134-142.
- [13] 黎浩, 汤勃, 孔建益, 等. 基于阈值优化的带钢表面缺陷图像边缘检测研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020, (8): 122-125.
- LI H, TANG B, KONG J Y, et al. Research on edge detection of steel plate surface defects image based on threshold optimization [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020, (8): 122-125.
- [14] GONG SH J, LI G Q, ZHANG Y J, et al. Application of static gesture segmentation based on an improved canny operator[J]. IEEE the Journal of Engineering, 2019, 3(15): 543-546.
- [15] 刘丽霞, 李宝文, 王阳萍, 等. 改进 Canny 边缘检测的遥感影像分割[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(12): 54-58, 180.
- LIU L X, LI B W, WANG Y P, et al. Remote sensing image segmentation based on improved canny edge detection[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(12): 54-58, 180.
- [16] KIM Y, KOH Y J, LEE C, et al. Dark image enhancement based on pairwise target contrast and multi-scale detail boosting[C]. IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2015: 1404-1408.
- [17] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [18] BU C, SUN Z, TANG Q, et al. Thermography sequence processing and defect edge identification of the structure debonding defects detection using long-pulsed infrared wave non-destructive testing technology [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2019, 55(1): 80-87.
- [19] NANDINI D U, LENI E S. Efficient shadow detection by using PSO segmentation and region-based boundary detection technique[J]. The Journal of Supercomputing, 2019, 75(7): 3522-3533.
- [20] LI C, YANG Y, XIAO L, et al. A novel image enhancement method using fuzzy Sure entropy [J]. Neurocomputing, 2016, 215(26): 196-211.
- [21] GUPTA B, TIWARI M. Minimum mean brightness error contrast enhancement of color images using adaptive gamma correction with color preserving framework [J]. Optik, 2016, 127(4): 1671-1676.
- [22] QIN Y Y, CUI W, LI Q, et al. Traffic sign image enhancement in low light environment [J]. Procedia Computer Science, 2019, 154: 596-602.
- [23] LI X, ZHANG H. An improved canny edge detection

algorithm [C]. 78th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2017: 275-278.

- [24] 汤勃, 孔建益, 王兴东, 等. 钢板表面低对比度微小缺陷图像增强和分割[J]. 中国图象图形学报, 2020, 25(1): 81-91.

TANG B, KONG J Y, WANG X D, et al. Image enhancement and segmentation algorithm for low-contrast small defects on steel plate [J]. Journal of Image and Graphics, 2020, 25(1): 81-91.

作者简介



黄梦涛, 2006 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安科技大学电气与控制工程学院教授、硕士生导师, 主要研究方向为计算机控制、智能系统、图像的测量与识别等。
E-mail: 656228336@qq.com

Huang Mengtao received Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2006. She is a professor and master student supervisor in College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology now. Her main research interest includes computer control, intelligent system and image measurement and recognition, etc.



连一鑫 (通信作者), 2019 年于西安邮电大学获得学士学位, 现为西安科技大学硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与机器视觉。

E-mail: 1617282360@qq.com

Lian Yixin (Corresponding author) received B. Sc. degree from Xi'an University of Posts & Telecommunications in 2019. She is a M. Sc. candidate in Xi'an University of Science and Technology now. Her main research interest includes image processing and machine vision.