

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210582

基于小波增强与 Canny 算法融合的锂电池极片缺陷检测方法^{*}

周新颖^{1,2} 胡跃明^{1,2}

(1. 华南理工大学自动化科学与工程学院 广州 510640;

2. 精密电子制造装备教育部工程研究中心广东省高端芯片智能封装装备工程实验室 广州 510640)

摘要: 针对目前锂电池极片表面存在亮度不均、低对比度微小缺陷难以检测的问题,提出了一种基于小波增强与 Canny 算法融合的锂电池极片缺陷检测方法。首先使用 K-近邻均值滤波抑制图像背景噪声,然后基于小波变换分别采用线性调整和多尺度细节增强方法处理图像的低高频分量,进行图像增强,接着利用 PSO-OTSU 算法自适应获取增强后图像的最佳高低阈值,最后利用哈夫检测法连接边缘点。通过测试漏金属、亮点、划痕、孔洞等缺陷各 700 张图片,定量分析比较了 3 种算法的准确率,实验结果表明,相对于其他两种算法,本文算法可以较好地保留缺陷边缘细节,检测低对比度微小缺陷,提取精确完整的缺陷轮廓,检测准确率达 97.85%,具有一定的实用价值。

关键词: 锂电池表面缺陷;小波变换;图像增强;PSO-OTSU 算法;Canny 算子;算法融合

中图分类号: TP391.41;TM912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1

Lithium battery electrode defect detection method based on fusion of wavelet enhancement and Canny algorithm

Zhou Xinying^{1,2} Hu Yueming^{1,2}

(1. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Ministry of Education & Guangdong Provincial Engineering Laboratory for Advanced Chip Intelligent Packaging Equipment, Engineering Research Center for Precision Electronic Manufacturing Equipment, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Current methods have limitations in detecting the uneven brightness and low contrast micro defects on the surface of the lithium battery electrode. To solve this problem, a algorithm based on the fusion of wavelet enhancement and the Canny operator was proposed. Firstly, the K-nearest mean filter algorithm was introduced to suppress the image background noise. Afterward, wavelet transform was implemented to separate the low-frequency and high-frequency components of the image. Subsequently, linear adjustment was adopted to process the low-frequency components, while the multi-scale detail enhancement method was used to process the high-frequency. Then PSO-OTSU adaptive algorithm was used to obtain the best threshold of the enhanced images. Finally, the Hough test was performed to connect the edge points. Through test defects such as leakage of metal, bright spots, scratches, holes each 700 images, the accuracy of quantitative analysis and comparison of 3 kinds of algorithm, experimental results show that compared with other algorithms, this algorithm had a detection accuracy of 97.85% and better performance in retaining the details of the defect edge, detecting low-contrast and micro defects, and extracting the defect contour.

Keywords: lithium battery surface defects; wavelet transform; image enhancement; PSO-OTSU algorithm; Canny operator; fusion algorithm

0 引言

锂电池极片作为锂电池的关键组成部分,直接决定其

电化学性能及安全性^[1]。在涂布、辊压的生产制造过程中,很容易产生漏金属、亮点、划痕、孔洞等各种缺陷^[2-3],这些缺陷可能直接影响电池的整体性能和寿命,甚至导致安全

收稿日期:2022-07-06

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61573146)、国家重大科技专项 02 专项(2014ZX02503)资助

事故。因此,有必要通过检测缺陷来保证产品的可靠性,以避免不良产品进入市场。目前,由于锂电池极片生产过程中可形成缺陷的环节较多,导致缺陷表现形式多样,亟待研究一种针对低对比微小缺陷的高效、精确的检测方法。

为了解决锂电池极片缺陷的自动化检测问题, Li 等^[4]提出了一种基于传统 Canny 算子对划痕缺陷进行检测的缺陷检测算法,但该算法未对其他类型的缺陷检测进行研究; Xu 等^[5]提出一种基于多特征融合和粒子群算法优化支持向量机 (particle swarm optimization support vector machine, PSO-SVM) 的锂电池极片缺陷检测方法,可有效检测多种缺陷,但该算法需人为设置 Canny 算子的高低阈值,鲁棒性较差; 许长路等^[6]结合伽马变换和 LOG 算法对锂电池极片的 5 种缺陷进行分类检测,但该算法难以满足光照不均的低对比微小缺陷的检测需求; 陈功等^[7]设计一种高斯混合模型算法,用于对锂电池极片的 5 种缺陷进行分类检测,其分类精度为 94%, 但该算法的识别准确率有限。黄梦涛等^[8]提出一种基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测方法,取得了较好的检测效果,但该方法并未研究亮点等微小缺陷,且对于划痕缺陷的检测准确度较低。

针对现有方法对低对比度、光照不均微小缺陷难以检测的问题,本文提出一种基于小波增强与 Canny 算法融合的锂电池极片缺陷检测方法。该方法先使用 K-近邻均值滤波算法抑制图像背景噪声,在抑制噪声的同时保留图像边缘信息,接着基于小波变换分别采用线性调整和多尺度细节增强方法处理图像的高低频分量,进行图像增强,达到消除照度不均、增强缺陷细节信息的目的。然后利用粒子群算法优化最大类间方差算法 (particle swarm optimization otsu, PSO-OTSU) 自适应获取增强后图像的最佳高低阈值,并利用哈夫检测法连接边缘点,最终可以较好地保留缺陷边缘细节,检测低对比度微小缺陷,提取精确完整的缺陷轮廓。

1 锂电池极片图像特征分析

锂电池极片表面图像如图 1 所示,极片表面缺陷形态大小不一,孔洞缺陷、亮点缺陷的对比度相比于划痕、漏金属缺陷的对比度较低,易出现漏检情况。因此基于 HSI 颜色空间将 I 通道图像提取出来作为处理对象更易于后续图像处理 and 缺陷检测。

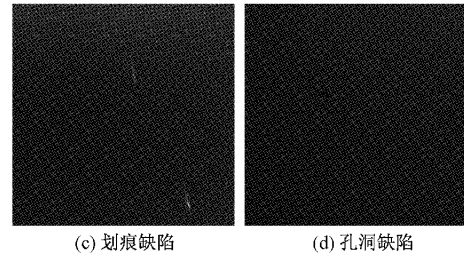
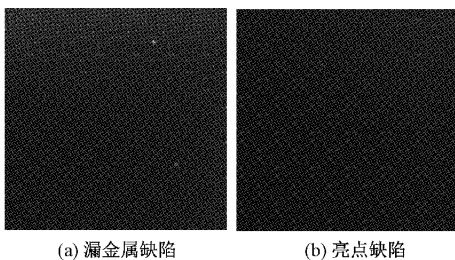


图 1 锂电池极片表面图像

2 图像预处理

2.1 图像降噪

锂电池的生产环境复杂,其表面不仅存在环境中的微尘,还存在涂布过程中产生的微小纹理,这些噪声会对后续的缺陷提取造成干扰。为了在降噪的同时保留缺陷的边缘细节,本文采用 K-近邻均值滤波算法对图像进行降噪处理。K-近邻均值滤波也称为边界保持滤波器,通过选取某个像素作为中心,在其 $m \times m$ 的邻域内搜索与该中心灰度差最小的 K 个像素,并将该像素中心处的灰度值替换成这 K 个像素的平均值^[9]。本文中 m 选 3, K 选 5。

2.2 图像增强

在采集图像的过程中,环境中灰尘、光学器件、光照和极片极耳反光等因素都会造成图像表面照度不均。在提取极片图像 I 分量降噪后,图像的整体灰度较高但缺陷目标与背景的对比度不够明显,造成边缘不清晰,特别是有些漏金属与亮点缺陷在整幅图像中的占比较小,有些甚至还和噪声混合在一起。为了进一步检测和识别缺陷,需对图像进行增强,以突出极片图像的缺陷信息。

图像经小波变换后可分解成低频平滑子图和高频细节子图,从而分别可以从不同的层次对图像的文本信息进行描述,因此小波变换在图像处理领域取得了良好的实际效果^[10]。数字图像通常用二维信号描述,可以通过离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT) 分解为低频系数和高频系数,二维离散小波分解的公式如下^[11]:

$$L_{\omega}(j_0, x_k, y_k) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f_I(x, y) \omega_{j_0, x_k, y_k}(x, y) \quad (1)$$

$$H_{\varphi}^{(i)}(j, x_k, y_k) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f_I(x, y) \varphi_{(j, x_k, y_k)}^{(i)}(x, y) \quad (2)$$

其中, $L_{\omega}(j_0, x_k, y_k)$ 为小波分解后的低频分量, j_0 为尺度因子,通常设为 0, (x_k, y_k) 表示相对于 (x, y) 的偏移量, $f_I(x, y)$ 表示 I 通道的降噪图像, M, N 表示该图像的大小, $\omega_{j_0, x_k, y_k}(x, y)$ 表示二维尺度函数, $H_{\varphi}^{(i)}(j, x_k, y_k)$ 为小波分解后的高频分量, i 取 0、1、2 分别代表水平、垂直、对角部分, $\varphi_{(j, x_k, y_k)}^{(i)}(x, y)$ 表示小波函数。将图像进行二级小波分解后所得结果如图 2 所示。

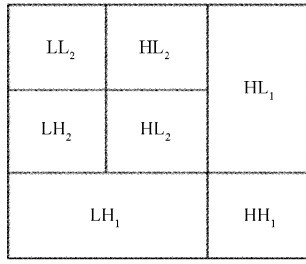


图 2 图像的二级小波分解示意图

其中 LL_2 代表低频系数,是图像基本信息的表征, HL_2 、 LH_2 、 HH_2 代表高频系数,是图像细节信息的表征。为消除图像的照度不均和突出图像的缺陷细节信息,对低频系数采用线性调整的方式进行非均匀光照校正,对高频系数引入多尺度细节增强方法来增强目标缺陷信息^[12]。引入多尺度细节增强方法的小波变换流程如图 3 所示。

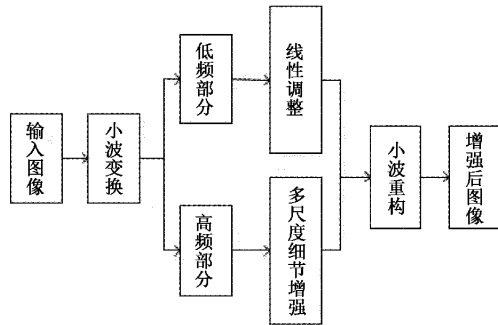


图 3 引入多尺度细节增强方法的小波变换流程

3 锂电池极片表面缺陷分割

3.1 最大类间方差法

最大类间方差法 (otsu algorithm, OTSU) 将一幅图像划分成目标和背景两部分,通过利用这两部分的最大类间方差来确定阈值^[13]。目标和背景之间的类间方差准则表示为:

$$\sigma^2(t) = P_1(t)U_1^2(t) + P_2(t)U_2^2(t) \quad (3)$$

其中, $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$ 分别表示目标和背景的概率, $U_1(t)$ 、 $U_2(t)$ 分别代表目标和背景的平均灰度。遍历图像的灰度级,使得 $\sigma^2(t)$ 最大时的阈值 t 是较优的分割阈值 t_{best} 。

3.2 PSO-OTSU 算法

在图像边缘检测中,抑制噪声和边缘精确定位是无法同时满足的,而 Canny 算子力图在抗噪声干扰和精确定位之间寻求最佳折中方案^[14]。但在锂电池极片表面缺陷分割过程中,由于缺陷目标占比较小,且受到光照及其他外部条件的影响,如果直接使用传统 Canny 进行检测,需人工设置高低阈值,阈值一旦过高,缺陷边缘细节会被去除,微小缺陷甚至会被忽略,阈值一旦过低,噪声会干扰检测结果。

由于 OTSU 原始算法存在计算量大,耗时多等问题,

本文通过将类间方差 σ^2 作为粒子群算法 (particle swarm optimizer algorithm, PSO) 中的适应度函数来优化传统的 OTSU 算法,就是 PSO-OTSU 算法^[15],通过 PSO-OTSU 算法自适应获取的高低阈值分割缺陷,避免了阈值不当的影响。

PSO-OTSU 算法在寻求较优解的过程中,速度和阈值会不断依据自身最大类间方差和全局最大类间方差来作出改变,直到粒子达到较优阈值。粒子根据如下公式来更新速度和位置。

$$v_{i_d} = \omega v_{i_d} + c_1 r_1 (pb_{i_d} - x_{i_d}) + c_2 r_2 (gb_{i_d} - x_{i_d}) \quad (4)$$

$$x_{i_d} = x_{i_d} + v_{i_d} \quad (5)$$

式中: x_{i_d} 、 v_{i_d} 分别代表粒子当前位置和速度, ω 为权重, c_1 、 c_2 为学习因子, r_1 、 r_2 是 $[0,1]$ 之间的随机数。

3.3 哈夫检测连接边缘点

通过传统 Canny 算子检测形成的边缘往往存在不完整、不闭合、不准确的情况。为了获取连续准确的边界,本文采用哈夫变换的方法检测连接边缘点。哈夫变换将图像空间中的线转换到哈夫空间的点 (r, θ) , 实现了检测共线点向找到并发曲线问题的转化^[16]。本文所使用曲线方程式如式(6)所示。其中参数 B 取值为 $0 \sim M$, 参数 k 取值为 $0 \sim \pi$ 。

$$y = B \sin(kx) \quad (6)$$

将图像空间参数映射成参数空间,方程如式(7)所示。

$$B = \frac{y}{\sin(kx)} \quad (7)$$

其中,参数 x 取值为 $0 \sim M$, y 取值为 $0 \sim N$, M 、 N 为图像的像素大小。

若共线点大于 3 即可认为是曲线参数。若满足以下条件之一即可判断其为边缘点:

- 1) 通过点-线对偶性判断点与式(7)的关系,满足共曲线。
- 2) 该像素点与其梯度方向的像素点共曲线。

通过哈夫变换边缘检测处理后,可得到准确清晰完整的边缘。

4 实验结果及分析

本文的实验环境为 Intel(R) Core (TM) i5-12500H、16 G RAM、Win11, Visual Studio 2019, OpenCV。为验证本文提出的检测算法的有效性,进行了 3 组实验。第 1、2 组实验分别通过比较分析常用的滤波算法和增强算法,验证了 K-近邻均值滤波算法和引入多尺度细节增强方法的小波增强算法的性能;第 3 组实验比较分析了传统 Canny 算子、改进 Sobel 的 Canny 算子和本文方法的边缘检测效果,验证本文算法的高效性和准确性。

4.1 滤波算法结果分析

将本文方法分别与均值滤波、高斯滤波和中值滤波做比较分析,漏金属、亮点、划痕与孔洞缺陷的处理效果分别

如下图所示。观察可知, 高斯滤波、均值滤波虽然具有较好的降噪效果, 但会造成图像模糊, 对后续的边缘提取造成不利影响, 中值滤波和 K-近邻均值滤波在降噪的同时能较好地保留目标缺陷边缘, 但低对比微小缺陷在中值滤波后容易损失边缘细节。各个滤波算法效果对比如图 4 所示。

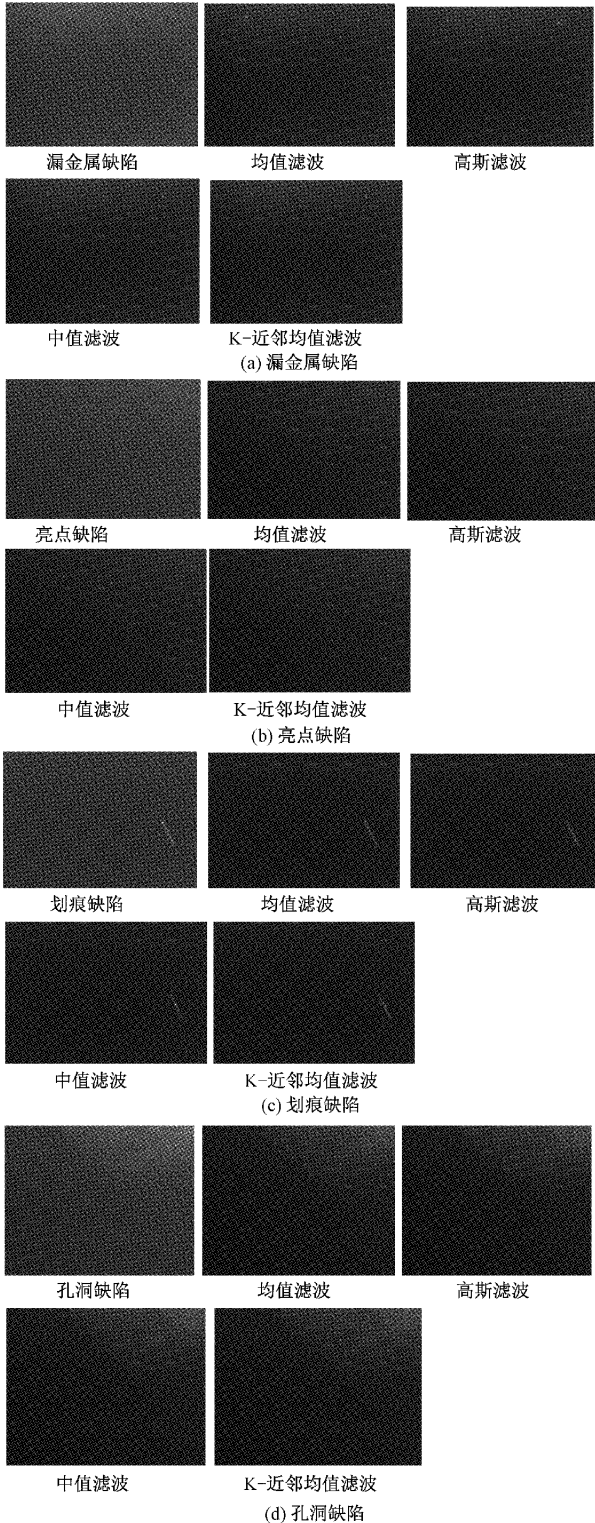


图 4 各个滤波算法效果对比

为了客观比较不同滤波算法的降噪效果, 本文采用峰值信噪比 (peak signal noise ratio, PSNR) 作为评估指标。从数据集中选取 80 张图像进行实验, 通过如下公式计算 PSNR 的平均值和标准偏差, 分别用 $PSNR_{ave}$ 和 $PSNR_{\sigma}$ 表示。实验结果如表 1 所示。

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(x, y) - f_1(x, y))^2 \quad (8)$$

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{MSE} \quad (9)$$

$$PSNR_{ave} = \frac{\sum_{k=1}^{80} PSNR_k}{80} \quad (10)$$

$$PSNR_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{80} (PSNR_k - PSNR_{ave})^2}{80 - 1}} \quad (11)$$

其中, M, N 分别代表图像长宽的像素大小, $f(x, y), f_1(x, y)$ 分别表示原图像和滤波后图像在像素点 (x, y) 处的灰度值, MSE 代表图像的均方误差。当 $PSNR_{ave}$ 越大, $PSNR_{\sigma}$ 越小代表图像的降噪效果越好, 失真越小, 和原图像越接近。

表 1 图像滤波质量评价对比结果

评估指标	均值滤波	高斯滤波	中值滤波	本文滤波
$PSNR_{ave}$	42.702 2	41.709 1	42.710 9	44.276 8
$PSNR_{\sigma}$	0.031 51	0.029 32	0.021 57	0.028 63

通过观察表 1 数据可得, 本文采用的 K-近邻均值滤波的 $PSNR_{ave}$ 最大, $PSNR_{\sigma}$ 较小, 表明 K-近邻均值滤波的滤波效果优于其他算法。因此本文采用的滤波方法在降噪的同时能更好地保留目标缺陷边缘。

4.2 增强算法结果分析

将本文方法分别与直方图均衡化 (histogram equalization, HE) 算法、Retinex 算法 (retinex algorithm, Retinex) 同态滤波算法做比较分析, 以对比度较高和对比度较低的划痕缺陷和亮点缺陷的增强处理效果作为部分实验结果, 增强效果分别如图 5 所示。

通过观察对比可知, HE 算法不仅没有消除光照不均, 甚至导致图像的质量更差; 同态滤波和 Retinex 算法都在一定程度上改善了照度不均, 但前者会削弱缺陷信息, 难以辨别微小的低对比缺陷与背景, 后者导致图像表面出现微小纹理, 不利于后续的目标分割; 本文引入多尺度细节增强方法的小波变换处理后的图像, 很大程度修正了光照不均, 并提高了图像的整体灰度值, 增强了缺陷细节信息, 甚至亮点等微小缺陷也得到突出, 方便进一步检测和识别缺陷。

4.3 检测结果及分析

为了验证本文所提算法的优越性, 将本文算法与传统 Canny, 改进 Sobel 的 Canny 算法进行比较分析。后两者的

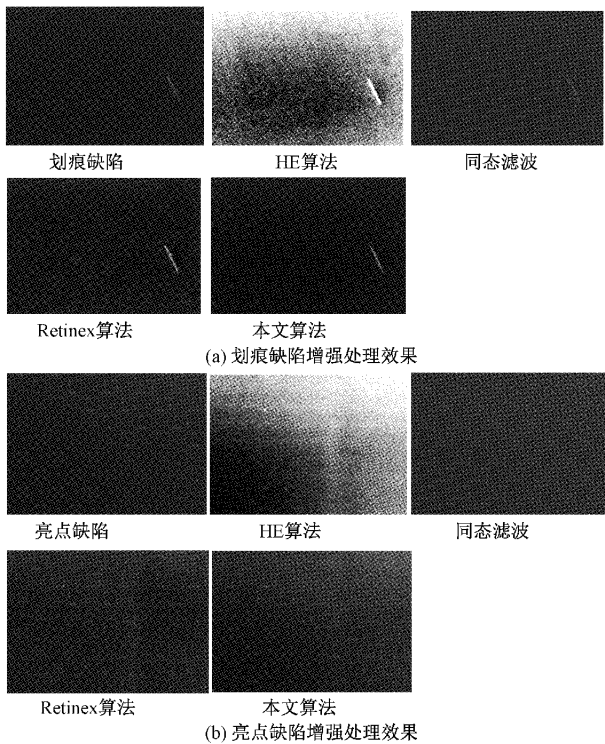


图5 各个增强算法效果对比

高低阈值人工设置为(120,45),高斯卷积核大小均取3,各个算法的处理效果如图6所示。

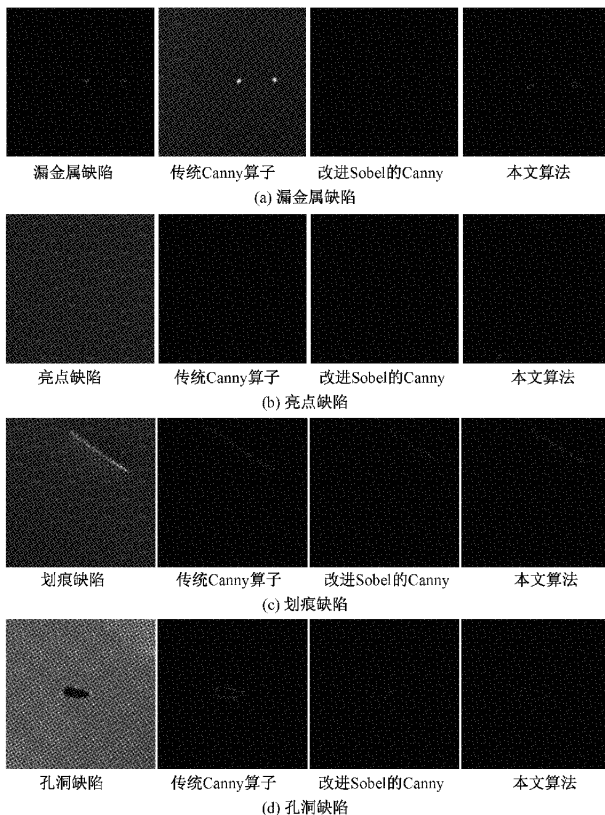


图6 各个检测算法效果对比

由图6可知,传统Canny算子对每种缺陷的检测效果均不佳,特别在针对低对比缺陷时,缺陷被噪声淹没,易出现漏检情况;改进Sobel的Canny算子可定位到目标缺陷,但缺陷区域不完整,边缘出现断续;本文算法不仅定位到目标缺陷,得到完整连续的边缘,特别在针对微小的低对比缺陷时,也得到完整的闭合轮廓。

为了进一步验证本文算法的有效性,用上述算法分别测试了漏金属、亮点、划痕、孔洞等缺陷各700张图片,定量分析比较了3种算法的准确率,结果如表2所示。结果表明,传统Canny算子相比于其他算法,整体准确性偏低;改进Sobel的Canny算子在检测准确度上优于传统Canny,但亮点、孔洞等低对比缺陷检测准确率偏低。本文方法对极片表面缺陷有效检测2740张,准确度达97.85%,特别是亮点等微小的低对比缺陷检测准确度达98.8%。检测效果相对较弱的是孔洞缺陷,误检数量为28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,对细节更加敏感,孔洞缺陷大小形状不一,褶皱较多,易重叠,检测的轮廓精度不高。

表2 不同算法的极片检测结果

极片缺陷	漏金属	亮点	划痕	孔洞
传统Canny	473	458	507	436
改进Sobel的Canny	587	537	528	496
本文算法	691	692	685	672

5 结 论

本文针对锂电池表面光照不均、低对比度微小缺陷难以检测的问题,提出了一种基于小波增强与Canny算法融合的锂电池极片缺陷检测方法。使用K-近邻均值滤波抑制图像背景噪声的同时保留了图像边缘细节信息。基于小波变换分别采用线性调整和多尺度细节增强方法处理图像的高低频分量,不但解决了照度不均的问题,同时图像的缺陷细节信息还得到了增强。引入PSO算法优化OTSU算法,自适应搜索得到最佳阈值,最后通过哈夫检测,将边缘点进行连接,得到准确清晰完整的边缘。实验结果表明,本文提出的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,检测准确率达97.85%,特别对于亮点等低对比的微小缺陷,检测准确率达98.8%,但由于孔洞区域灰度变化复杂,孔洞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。

参考文献

- [1] 刘斌斌,杜晓钟,闫时建,等. 制片工艺对动力锂离子电池性能的影响[J]. 电源技术, 2018, 42(6): 788-791, 894.
- [2] 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.
- [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] LI K, TIAN D. Research and design of inspection of LR6 battery negative surface scratches online defects based on computer vision [C]. 2013 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)IEEE, 2013:120-123.
- [5] XU C, LI L, LI J, et al. Surface defects detection and identification of lithium battery electrode based on multifeature fusion and PSO-SVM[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 85232-85239.
- [6] 许长路,李林升,立济伟. 基于 Gamma 矫正与 LOG 算法融合的锂电池极片缺陷检测方法[J]. *机械设计与研究*, 2020, 36(6):105-109.
- [7] 陈功,朱锡芳,许清泉,等. 最大熵和高斯模型在锂电池缺陷识别中的应用[J]. *电源技术*, 2014, 38(6): 1063-1065.
- [8] 黄梦涛,连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(10):199-209.
- [9] 张鹏帆,席剑辉,朱琳琳. 基于梯度极值 Otsu 算法的 Canny 边缘检测改进[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2021, 38(5):58-65.
- [10] 王延年,刘航宇,刘宏涛,等. 基于小波深度残差网络的图像超分辨率重建[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(9):160-164.
- [11] 常戩,贺春泽,董育理,等. 改进双边滤波和阈值函数的图像增强算法[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(3): 207-213.
- [12] KIM Y, KOH Y J, LEE C, et al. Dark image enhancement based on pairwise target contrast and multiscale detail boosting [C]. *IEEE International Conference on Image Processing IEEE*, 2015:1404-1408.
- [13] 宋森森,贾振红,杨杰,等. 结合 Ostu 阈值法的最小生成树图像分割算法[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(9):178-183.
- [14] 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.
- [15] 于洋,孔琳,虞闯. 自适应粒子群集优化二维 OSTU 的图像阈值分割算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(6):827-832.
- [16] 徐武,张强,王欣达,等. 基于改进 Canny 算子的图像边缘检测方法[J]. *激光杂志*, 2022, 43(4):103-108.

作者简介

周新颖, 硕士, 主要研究方向为图像处理与机器视觉。

E-mail:1928506647@qq.com

胡跃明, 博士, 教授, 主要研究方向为机器视觉技术及应用、复杂系统建模与控制、半导体封装测试技术、精密电子制造技术。

E-mail:auymhu@163.com