

锂电池 X 射线图像增强算法研究^{*}曾德榕¹ 谭 淦¹ 钟敏良¹ 高巍巍^{1,2} 蓝杰钦^{1,2}

(1. 福建理工大学电子电气与物理学院 福州 350118; 2. 福建理工大学应用物理研究所 福州 350118)

摘 要: 锂电池作为当前新能源市场的重要组成部分,广泛应用于消费电子、电动汽车和储能领域。为确保锂电池的安全性,在出厂前通常利用 X 射线对其内部进行检测,从而剔除有缺陷的产品。然而,利用 X 射线成像的锂电池原始图片通常对比度低、对比度不均匀、灰度值集中在狭窄区域,导致无法判别样品的细节信息。针对锂电池 X 射线图片的以上特点,本文提出了两种方法增强锂电池 X 射线图片的对比度。第 1 种方法是利用自定义非线性灰度变换函数结合 CLAHE 算法来增强对比度,第 2 种方法是利用同态滤波结合 CLAHE 变换实现对对比度的增强。本文编写程序实现了该想法,并在圆柱形卷绕锂电池图片上进行了测试。结果显示,本文提出的对比度增强算法使图片的信息熵提高约 20%,灰度直方图显示更加均匀,有着更高的对比度,显著提高了锂电池 X 射线图像质量。这项研究将为微焦点 X 射线锂电池缺陷检测和自动识别提供技术支持。

关键词: 锂电池; X 射线成像; 图像增强

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Research on lithium battery X-ray image enhancement algorithm

Zeng Derong¹ Tan Gan¹ Zhong Minliang¹ Gao Weiwei^{1,2} Lan Jieqin^{1,2}

(1. School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. Institute of Applied Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Lithium batteries, as an important component of the current new energy market, are widely used in consumer electronics, electric vehicles, and energy storage fields. To ensure the safety of lithium batteries, they are usually inspected internally using X-rays before leaving the factory to eliminate defective products. However, the original images of lithium batteries using X-ray imaging often have low contrast, uneven contrast, and concentrated grayscale values in narrow areas, making it difficult to distinguish the detailed information of the sample. This article proposes two methods to enhance the contrast of lithium battery X-ray images based on the above characteristics. The first method is to use a custom designed nonlinear grayscale transformation function combined with the CLAHE algorithm to enhance contrast, the second method is to use homomorphic filtering combined with CLAHE transform to enhance contrast. This article developed a program to implement the idea and tested on cylindrical wound lithium battery images. The results showed that the contrast enhancement algorithm proposed in this article increased the information entropy of the image by about 20%, made the grayscale histogram display more uniform, has higher contrast ratio, and then the quality of lithium battery X-ray images improved significantly. This study will provide technical support for the micro focus X-ray defect detection and automatic recognition of lithium batteries.

Keywords: lithium battery; X-ray imaging; image enhancement

0 引 言

锂离子电池,又称锂电池,凭借其能量密度高、使用寿命长、放电功率大、绿色环保等优势,已成为目前新能源和储能领域的核心力量。随着锂电池需求的迅速增长,锂电

池市场规模在不断扩大,这也对锂电池产品安全性和质量提出了新要求。锂电池的内部缺陷、材料劣化及结构变化是影响其使用寿命和安全性的关键因素。如何有效检测和评估锂电池内部的潜在缺陷,已成为目前锂电池制造业领域的研究热点之一。X 射线成像技术作为一种非侵入式检

测手段,因其能够穿透锂电池内部被广泛应用于检测正负极材料、隔膜、电解液等原材料以及成品电池的内部结构^[1]。X 射线图片可以呈现出材料内部的孔洞、杂质等,从而判断质量是否符合要求。目前,利用 X 射线对锂电池内部缺陷进行无损检测,实时剔除有瑕疵产品已经成为锂电池生产线的重要组成部分^[2]。

X 射线是波长较短的电磁波,具有较强的穿透力。当一束 X 射线穿过物体时,会通过相干散射、光电效应以及康普顿效应与物质进行相互作用。单能窄束 X 射线在物质中的衰减遵循指数规律,其强度随穿透深度增加而逐渐减弱,线性衰减系数是关键参数,受物质密度、原子序数和 X 射线能量影响^[3]。从衰减规律可以看出,电池内部不同材料的密度、厚度和原子序数决定了它们对 X 射线的吸收程度。这些衰减后的信息被平板探测器接收,形成 X 射线影像。金属电极材料会吸收更多的 X 射线,显示为较暗的区域,而电解质或隔膜等低密度材料则吸收较少,显示为较亮的区域。这一差异在图像上表现为不同的灰度级。大部分锂电池极片和隔膜厚度在几十至上百微米量级。这一微小的厚度差使探测板上呈现的 X 射线图像灰度差别非常小,导致锂电池 X 射线图片的对比度低、光照不均匀、图像模糊、灰度值挤压在狭窄的区域等问题,给后续的分析 and 缺陷识别带来了困扰。因此,对锂电池 X 射线图像进行增强处理,是缺陷检测工作中提高准确率需要解决的技术问题。

传统图像增强技术有基于灰度变换^[4]、基于直方图均衡化^[5]、基于图像锐化^[6-8]以及基于小波的图像增强^[9]等。这些算法都有自己的优势,例如基于灰度变换和直方图均衡化的算法会大幅度提高图像对比度,基于锐化滤波的方法会使图像的边缘变得清晰。而 Retinex 算法^[10-11]不仅可以改善图像的灰度范围,还可以起到保真和局部细节增强的效果,在图像去雾处理中效果明显。随着 X 射线图像处理需求的不断增大,Retinex 算法及其改进型的算法在 X 射线锂电池图像增强中也得到了广泛的应用^[12]。限制对比度自适应直方图均衡化(contrast limited adaptive histogram, CLAHE)算法在低照度图像的对比度增强方面有着很好的效果^[13],对 X 射线图像增强有着重要意义。近些年,基于各类优化算法的工业 X 射线图像增强技术^[14]得到了迅速发展。由于传统 X 射线图像增强技术对参数有很大的依赖性、算法缺乏自适应性的特点,伴随着机器学习的不断成熟,近年还发展了基于神经网络的工业 X 射线图像增强算法^[15-17]以及基于注意力机制的无监督图像增强算法^[18]等。随着微焦点 X 射线源的发展^[19-20],缺陷检测精度不断提高,这对锂电池 X 射线图像处理技术提出了新要求。为了适应微焦点 X 射线锂电池图像处理需求本研究在已有 X 射线图像处理技术的基础上进一步探索锂电池 X 射线图像的对比度增强方法。针对图像中的对比度低,图像模糊等问题,本文提出并验证了两种改进的对比度增强方案。第 1 种方案是在传统非线性灰度变换的基础上自定

义了一种新的非线性灰度变换函数进行灰度直方图的展开,然后利用 CLAHE 算法进行图像增强。第 2 种方案是首先利用同态滤波对光照不均匀的 X 射线图片进行增强处理。使用同态滤波进行图像增强的研究过程,本文尝试了改进的高斯高通滤波器和改进的巴特沃斯高通滤波器作为同态滤波器。实验结果表明改进的巴特沃斯高通同态滤波器结合 CLAHE 算法可以大大提高图像对比度。最后将这两种方法在圆柱形卷绕锂电池 21700 产品的 X 射线图像上进行了测试。结果显示,利用本文提出的两种图像增强方案,可使 X 射线锂电池图片的直方图分布更加均匀,有着较好的结构相似性和灰度均方根值。此外,本文提出的算法在提高信息熵和对比度两个客观评价图像质量指标上比其他方法更有优势。

1 图像预处理

1.1 图像感兴趣区域提取

锂电池主要由正极、负极、隔膜、电解质和外壳等部分组成^[21]。圆柱形卷绕锂电池结构如图 1 所示。由图 1 可以看出,卷绕锂电池从侧面照射的图片会呈条纹形状,并且越靠近中心位置厚度越大,穿透的 X 射线也越少,在图中表现为较暗的像素点。本文所使用的原始图像是 21700 圆柱形卷绕锂电池在型号为 nanoVoxel-4000 的 X 射线 micro-CT 扫描仪上测量的图像。测试电压为 200 kV,测试电流为 250 μ A,仪器分辨率为 13.11 μ m/pixel。电脑端获得的图像为 24 位图,图像分辨率为 3 072 \times 3 072。

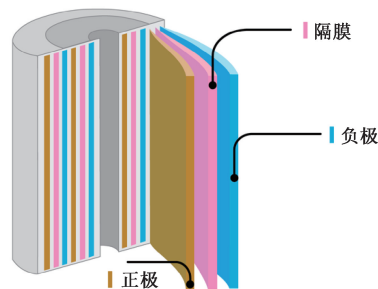


图 1 圆柱形卷绕锂电池结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cylindrical wound lithium battery structure

图 2 为 X 射线检测物体及其成像原理的简单示意。如图 2 所示,射线从 X 射线管发出后经过待测物体,部分 X 射线被吸收,剩下的部分被平板探测器接收。平板探测器将探测到的 X 射线转换成数字信号,并在电脑端呈现出数字图像。因此,样品扫描后采集得到的初始图不仅包含了锂电池图像,还有部分生产线等无关的背景信息。由于探测板面积较大,X 射线在穿过锂电池之外的区域时会在图像中留下白色背景。图像感兴趣区域(region of interest, ROI)提取是从一幅图像中截取关注的部分,以便进一步分析和处理。ROI 提取可以大大减少计算量,提高图像处理

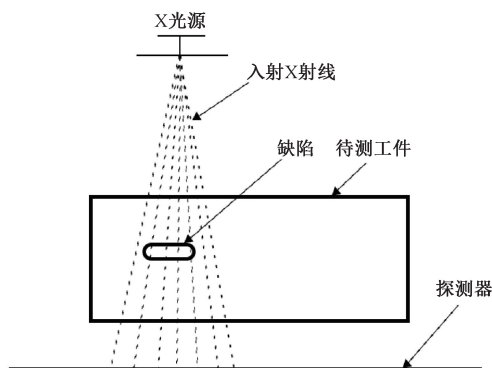


图 2 X 射线成像原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of X-ray imaging principle

效率,是图像预处理的一项基本工作。本文使用了简单的动态 ROI 提取方法。根据所处理 X 射线图片的特点,使用阈值分割方法来提取 ROI。具体方法是设定一个灰度阈值,然后从一幅图 x, y 两个方向的边界分别查找,大于阈值的认为是背景,小于阈值的认为是感兴趣区域。一直循环直至找到 x, y 方向最大值 x_{\max}, y_{\max} 以及最小值 x_{\min}, y_{\min} ,从而确定感兴趣区域边界。利用该算法提取感兴趣区域的结果如图 3 所示。

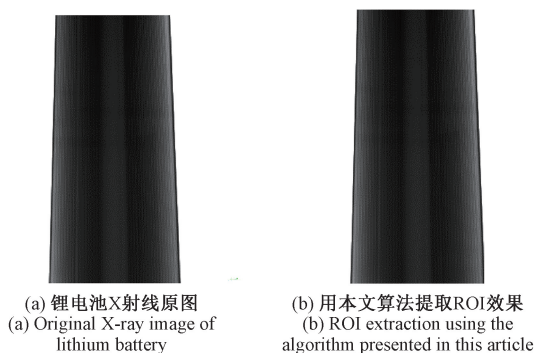


图 3 ROI 区域提取效果

Fig. 3 ROI region extraction result

1.2 图像降噪处理

锂电池 X 射线图像的噪声来源主要有阴极发射电子的涨落噪声,倍增电子的涨落噪声,图像采集的热噪声和测量系统内部的闪烁噪声,在图像上表现为高斯噪声和随机噪声^[19]。这些噪声相对感兴趣的信息来说是冗余的,需要降噪处理。通过降噪可以有效减少噪声的干扰,使图像中的重要特征更加清晰可辨。根据噪声的特点,本文选择了空域滤波的二维高斯滤波器进行降噪。高斯滤波是一种线性平滑滤波,适用于消除随机噪声。具体操作是用一个模板去扫描图像中的每一个像素,用模板确定的邻域内像素的加权平均灰度值去替代模板中心像素点的值。

二维高斯滤波器的公式为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中, x, y 表示图像某像素点的位置; σ 是高斯函数的标准差,用于控制滤波器的平滑程度。 σ 越大图像的平滑程度越高^[22]。

滤波后的图像像素值可表示为:

$$I'(x, y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N G(i, j) \cdot I(x+i, y+j) \quad (2)$$

其中, $G(i, j)$ 是高斯滤波模板, I 是原图像的像素值。本文采用了一个 3×3 高斯模板,取 $\sigma = 2$,对图 3 中的 (b) 图进行滤波处理。滤波后的结果如图 4(a) 所示。滤波后图像对应的灰度直方图如图 4(b) 所示。

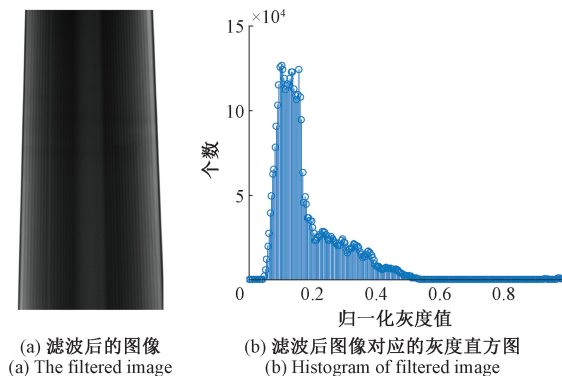


图 4 高斯滤波效果

Fig. 4 Gaussian filtering result

由于滤波后的图灰度值仍然挤压在很小的范围,因此整幅图片比较暗,看不出高斯滤波的效果。为了突出细节,本文将原图与高斯滤波后的图片进行局部放大显示,从图片的中心位置截取一块 250×1300 像素点的区域用三维的彩色图进行呈现,以便更好的展现原图和滤波后图片的差别(如图 5 所示)。从局部放大的图可以明显看出经过高斯滤波后的图像变得更加光滑,消除了噪声带来的涨落。

2 图像增强算法研究

2.1 自定义非线性灰度变换函数结合 CLAHE 算法的图像增强研究

1) 自定义非线性灰度变换函数

灰度变换是指根据某种目标条件,逐点改变原图像中每一个像素灰度值的方法。其目的是改善图像质量,使显示效果更加清晰。选择合适的灰度变换函数应根据图像的性质和处理目的来决定。标准是经过灰度变换后,像素的动态范围增加,图像的对比度扩展,使得图像变得更加清晰、细腻、容易辨别。

从图 4(a) 可以看出,经过降噪后的图像依然很模糊。尤其靠近中心位置处穿透的 X 射线较少,在图像上表现为灰度值低,看不到细节信息。为了使图像能够显示更多细节信息,本文分别使用了传统的灰度线性变换、非线性变换直方图均衡化、Retinex 增强和基于边缘检测的图像增强方案。通过调节参数,未能得到满意的结果。为此本文根据

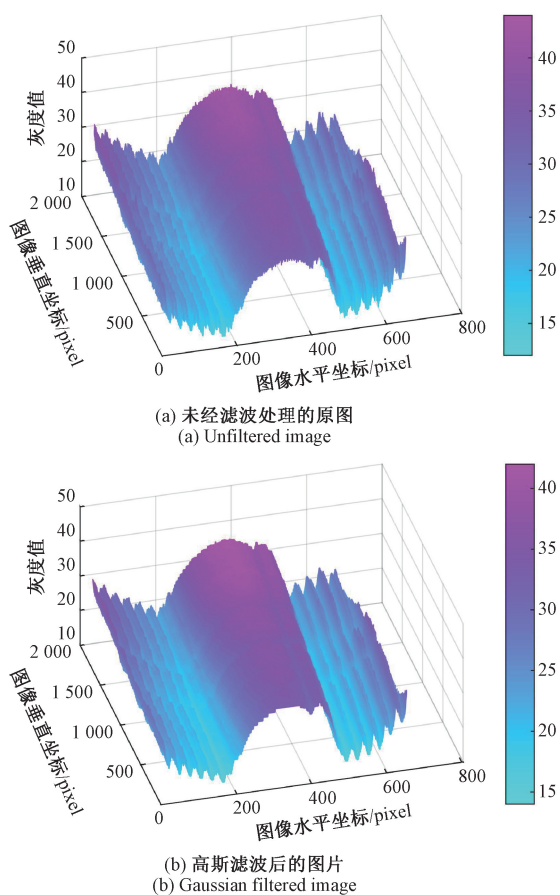


图 5 滤波前后局部图像的立体放大显示, x 、 y 坐标分别代表图像的两个尺度, z 轴表示灰度值

Fig. 5 Stereoscopic enlargement of local images before and after filtering, x and y represent the two scales of the image, z -axis represents the grayscale

图 4(b)所示的灰度直方图提出了一种自定义非线性变换函数。

由图 4(b)可以看出待处理图像的灰度值集中在低灰度区域。因此本文希望构造的函数在低灰度区域(灰度值小于 0.5)有较大的斜率,从而使变换后的图片灰度值展开,而在高灰度区域比较平缓。本文利用了能够将所有正实数映射到 $0 \sim 1$ 空间的经典单调递增函数 $y = x/(1+x)$ 。但是该函数的特点是,当自变量取值 $0 \sim 1$ 区间时接近线性变换,不符合灰度变换需求。因此本文结合了正弦函数和 γ 变化提出了如下形式的非线性灰度变换函数。

$$y = 2 \times \sin\left(\frac{\pi}{2}x\right)^\gamma / (1 + \sin\left(\frac{\pi}{2}x\right)) \quad (3)$$

其中, γ 可以灵活调节不同灰度区间的斜率。根据所要处理图像的直方图分布特点来确定参数 γ , 不同的 γ 值所对应的拉伸区域不同。在本文研究中一共有 4 800 张测试结果图。从这 4 800 张测试图中随机选取 20 张图片分析了其灰度直方图的分布情况。通过分析可知,这些锂电池 X 射线图像的灰度直方图中像素点的最概然归一化灰

度值主要出现在 $0.12 \sim 0.18$ 区间,且 95% 以上像素点归一化灰度分布在 0.5 以下。根据灰度直方图的这一分布特点选择参数 $\gamma = 0.8$ 。在图 6 中给出了当 x 在 $0 \sim 1$ 区间取值时的线性灰度变换、指数变换、对数变换、正弦变换曲线以及本文自定义非线性变换曲线。分析图中的曲线发现,当 x 取值 0.5 时自定义的非线性灰度变换函数接近 0.9,意味着该函数在 $0 \sim 0.5$ 灰度区间拉伸效果明显,符合图片处理需求。当所要处理图像的直方图分布不同时,可以通过调节 γ 这一参数实现对不同灰度区域的拉伸。

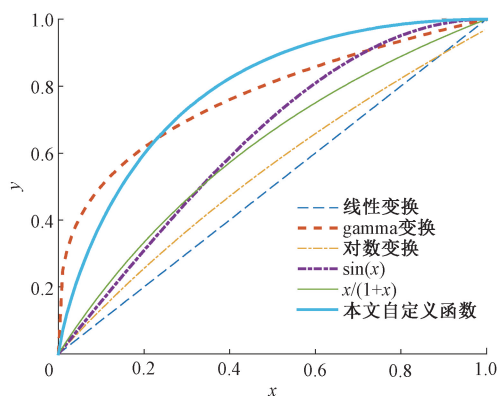


图 6 各种灰度拉伸函数的曲线对比

Fig. 6 Comparison of various grayscale stretching functions

2) 使用 CLAHE 算法进行对比度增强

直方图均衡(histogram equalization, HE)的经典算法是对整幅图的像素使用相同的变换。但是图中包含明显的亮点或者暗区域时经典算法作用有限。自适应直方图均衡(adaptive histogram equalization, AHE)算法通过对局部区域进行直方图均衡来解决上述问题。但是自适应直方图均衡会过度放大图像中相对均匀区域的噪音。CLAHE 引入了直方图修剪,用修剪后的直方图均衡图像,使得图像对比度更加自然。CLAHE 算法首先将输入图划分为大小相等不重叠的子块,本文使用的是 8×8 的模块。然后计算子块直方图并设置剪切阈值,选择剪切阈值为 0.02。接着对每个子块进行像素点重新分配。最后直方图均衡化并对像素点灰度用双线性差值进行重构。使用以上参数对自定义非线性拉伸变换后的图像进行 CLAHE 变换,得到了如图 7 所示的结果。

从图 7 可以看出,本文提出的第 1 种图像增强方案,即自定义非线性变换函数结合 CLAHE 变换使图像对比度得到了进一步提高。图像的灰度直方图分布变得更加均匀。对比图 4(a)和图 7(a)发现,图 7(a)呈现出了更多细节信息。

2.2 同态滤波结合 CLAHE 算法的图像增强研究

从图 4(a)可以看出待处理的 X 射线图片犹如在光线不足情况下采集的图片,感兴趣部分的灰度范围很小,图像细节无法辨认。同态滤波是以入射光和反射光为基础,把

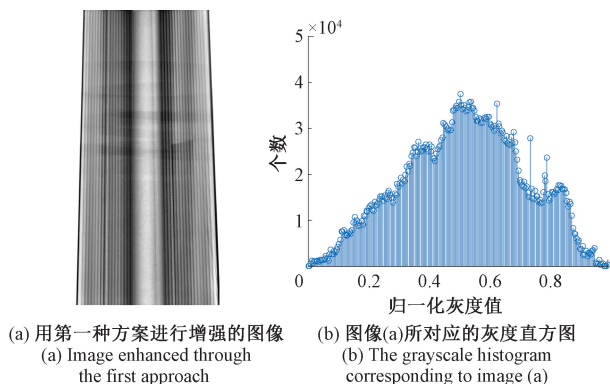


图 7 自定义非线性拉伸函数结合 CLAHE 变换的结果

Fig. 7 Results of combining custom defined nonlinear stretching function with CLAHE transformation

频率滤波和灰度变换结合起来的图像增强方案。它能够减少低频并且增加高频,从而能减少光照不均匀,锐化边缘细节^[23]。这个模型认为图像由两个主要成分表征。第 1 个组成部分是入射到观察物体上的照射分量 $i(x,y)$,第 2 个是物体的反射分量 $r(x,y)$ 。根据这个模型,一幅图 $f(x,y)$ 可以表示为:

$$f(x,y) = i(x,y) \times r(x,y) \quad (4)$$

在这个模型中 $i(x,y)$ 相对于 $r(x,y)$ 是缓慢变化的量。也就是在频域 $i(x,y)$ 的频率小于 $r(x,y)$ 频率。利用这一事实,同态滤波技术通过减少图像的低频分量来提高 $r(x,y)$ 的重要性。本文按照下面的步骤编程实现了同态滤波:

1) 对函数两边同时取对数,

$$z(x,y) = \ln i(x,y) + \ln r(x,y) \quad (5)$$

2) 利用傅里叶变换把图像变换到频域,

$$\mathcal{F}\{z(x,y)\} = F_i(u,v) + F_r(u,v) \quad (6)$$

其中, $F_i(u,v) = \mathcal{F}\{\ln i(x,y)\}$ 为 $\ln i(x,y)$ 的傅里叶变换, $F_r(u,v) = \mathcal{F}\{\ln r(x,y)\}$ 为 $\ln r(x,y)$ 的傅里叶变换。

3) 获得经高通滤波器 $H(u,v)$ 滤波后的图 $S(u,v)$:

$$S(u,v) = H(u,v)F_i(u,v) + H(u,v)F_r(u,v) \quad (7)$$

本文尝试了两种高通滤波器作为 $H(u,v)$,它们分别是高通滤波器和巴特沃斯高通滤波器。两种方法的具体结果在下文给出。

4) 进行傅里叶逆变换得到空间域中的滤波图像:

$$S(x,y) = \mathcal{F}^{-1}\{H(u,v)F_i(u,v) + H(u,v)F_r(u,v)\} \quad (8)$$

5) 对滤波后的图像取指数变换,进而得到同态滤波后的最终图像:

$$g(x,y) = \exp\{S(x,y)\} \quad (9)$$

步骤 3) 中的 $H(u,v)$ 是频域滤波器。首先利用改进型高通滤波器进行频域滤波。该滤波器的形式为:

$$H(u,v) = (\gamma_H - \gamma_L) \left[1 - \exp \left\{ -c \left(\frac{D(u,v)}{D_0} \right)^2 \right\} \right] + \gamma_L \quad (10)$$

其中, $D(u,v)$ 是频域坐标 (u,v) 到中心频率的距离。常数 c 为同态滤波器的衰减系数,控制滤波器的形状和高低频之间的过渡速率。较大的 c 值将使滤波器对高频成分的增强和低频成分的抑制更为显著。选择 $c = 0.05$ 作为一个中间值,能够在增强图像细节的同时,避免由于过度增强而导致的噪声放大。截止频率 D_0 用于控制滤波器在频域中的作用范围。较小的 D_0 值意味着滤波器对低频成分的抑制较强,有助于更好地消除大面积光照变化的影响,从而提升局部细节的清晰度。本文选取 $D_0 = 0.04$ 。 γ_H 和 γ_L 分别是控制高频 (反射分量) 和低频 (光照分量) 的增益。 γ_H 用于增强反射分量,以有效提升图像细节。而 γ_L 则用于抑制入射分量,以减少光照不均匀的影响。本文中设 $\gamma_H = 0.1$ 和 $\gamma_L = 0.03$ 。通过精确设置这些参数,能够有效改善图像的整体对比度和视觉效果。但是靠近图像中心位置,灰度值较小的地方细节信息仍不够理想。

为了进一步改善图像效果,还尝试了改进型的二维巴特沃斯高通滤波器作为 $H(u,v)$,如式(11)所示。

$$H(u,v) = (\gamma_H - \gamma_L) \left[1 - \frac{1}{1 + [(u^2 + v^2)/a]^n} \right] + \gamma_L \quad (11)$$

其中, $[(u^2 + v^2)/a]$ 为过渡点, n 为巴特沃斯滤波器滤波阶数,决定了过渡点的斜率。图 8 给出了截止频率 $D_0=1$ 时的高斯高通滤波器和 1-4 阶巴特沃斯高通滤波器的幅频响应曲线。

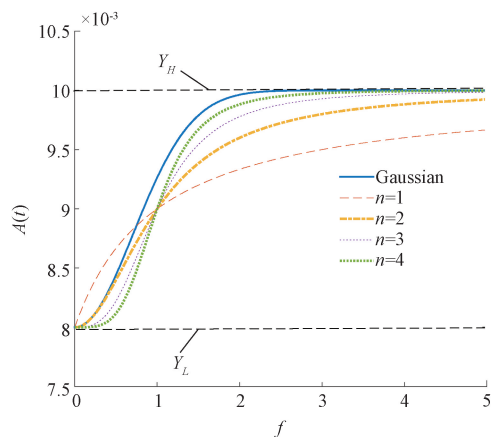
图 8 高通滤波器和巴特沃斯高通滤波在截止频率 $D_0 = 1$ 的幅频响应曲线

Fig. 8 Amplitude frequency response curves of Gaussian high pass filtering and Butterworth high pass filtering at cutoff frequency $D_0 = 1$

可以看出,巴特沃斯高通滤波器在截止频率处可以让更多的信号通过,更适合本文的图像。通过调试发现,高频增益和低频增益之差不能太大,过大的增益差导致图像变

黑,且过大的低频增益也会导致图像整体变暗。此外,滤波阶数 n 的取值不宜太大,较大的阶数会导致图像的边缘变得圆滑和图像光照不均匀。通过调节,使用 $n = 1$ 阶的巴特沃斯高通滤波器(如图 9 所示)。取 $\gamma_H = 0.01, \gamma_L = 0.008, a = 200$ (相当于截止频率 $D_0 = \sqrt{200}$) 在 X 射线锂电池图像处理方面得到了较好的效果。

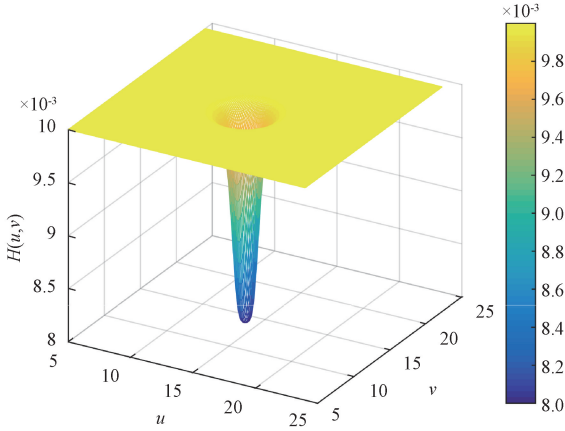


图 9 本文使用的二维巴特沃斯高通滤波器

Fig. 9 The two-dimensional Butterworth high pass filter used in this article

利用以上巴特沃斯高通滤波器参数,对图像 4(a)进行同态滤波,然后再使用 CLAHE 变换,得到了如图 10 所示的效果。

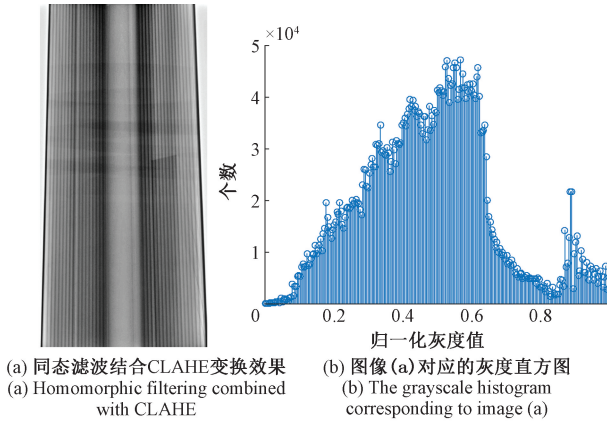


图 10 同态滤波结合 CLAHE 变换的结果展示

Fig. 10 The results of homomorphic filtering combined with CLAHE transformation

从图 10 能够看出本文提出的第 2 种图像增强方案,即利用巴特沃斯高通滤波作为同态滤波器结合 CLAHE 算法也能够使图像达到增强的目的,进而显示更多细节信息。

3 算法测试

3.1 图像对比度的评价参数

本节首先给出客观评价图像质量的参数及其计算公式,为评价图像增强效果提供依据。本文使用的图像质量

客观评价指标有信息熵、灰度均方根值、结构相似性和对比度 4 个参数。

1) 信息熵

图像中的熵属于信息熵范畴。每一个像素点对应一个灰度值,像素灰度值出现的概率越大其包含的信息量也就越小,反之该像素点所携带的信息量就越大。所有像素点的期望值就是这些像素所包含的信息熵 $H(X)$ 。信息熵可以用来衡量图像的不确定性,与图像质量之间存在着密切的关系。对同一幅图而言图像的信息熵较大时,灰度级别越分散,细节越清晰,图像的质量越好。图像信息熵的计算公式如式(12)所示。

$$H(X) = - \sum_i^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (12)$$

其中, $p(x_i)$ 是第 i 个灰度级出现的概率。

2) 灰度均方根值

本文用到的另外一个评价图像质量的参数是灰度的均方根值。灰度均方根值是衡量灰度分布的统计量,反映了图像灰度值相对于均值的离散程度以及纹理特征,公式如下^[24]:

$$\text{RMS}_{\text{contrast}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [I(i, j) - \bar{I}]^2} \quad (13)$$

其中, M, N 分别为图像在 x, y 两个方向上的最大尺寸。 $I(i, j)$ 代表在第 (i, j) 个像素点上的灰度值, \bar{I} 代表整幅图灰度平均值。

3) 结构相似性

结构相似性(structural similarity, SSIM)是衡量处理后图像失真程度的指标。SSIM 的计算如式(14)所示^[25]。

$$\text{SSIM} = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (14)$$

其中, μ_x, μ_y 为两幅图像素平均值, σ_x, σ_y 为两幅图的灰度值标准差, $\sigma_{x,y}$ 为两幅图的协方差, $C_1 = (K_1 \times L)^2$, $C_2 = (K_2 \times L)^2$, 其中 L 为像素动态范围 K_1 和 K_2 为两个参数,通常取 $K_1 = 0.01, K_2 = 0.03$ 。SSIM 越接近 1,说明两幅图的相似性越高。

4) 对比度

对比度是用于衡量不同区域亮度差异的指标^[26]。当图像的相邻像素之间灰度差异较大时图像的对比度增加,意味着图像更清晰,细节更明显。对比度的计算公式如式(15)所示。

$$\text{CR} = \sum_i \sum_j \delta(i, j)^2 P_{\delta(i, j)} \quad (15)$$

其中, $\delta(i, j)$ 为相邻像素点灰度差, $P_{\delta(i, j)}$ 为相邻像素点灰度差为 δ 的像素出现的概率。高对比度意味着相邻像素点的灰度差较大,图像视觉效果更佳清晰,细节更鲜明。

3.2 测试结果

分别使用本文提出的第 1 种方法,即自定义非线性变换函数结合 CLAHE 算法以及第 2 种方法,即同态滤波结

合 CLAHE 算法,在另外一幅锂电池 X 射图片上进行增强处理。该图属于锂电池正负极 overhang 部分。为了进行对比还给出了线性拉伸、gamma 变换、直方图均衡化、LoG 边缘检测以及高斯形中心环绕 Retinex 算法的增强结果。测试结果如图 11 所示。

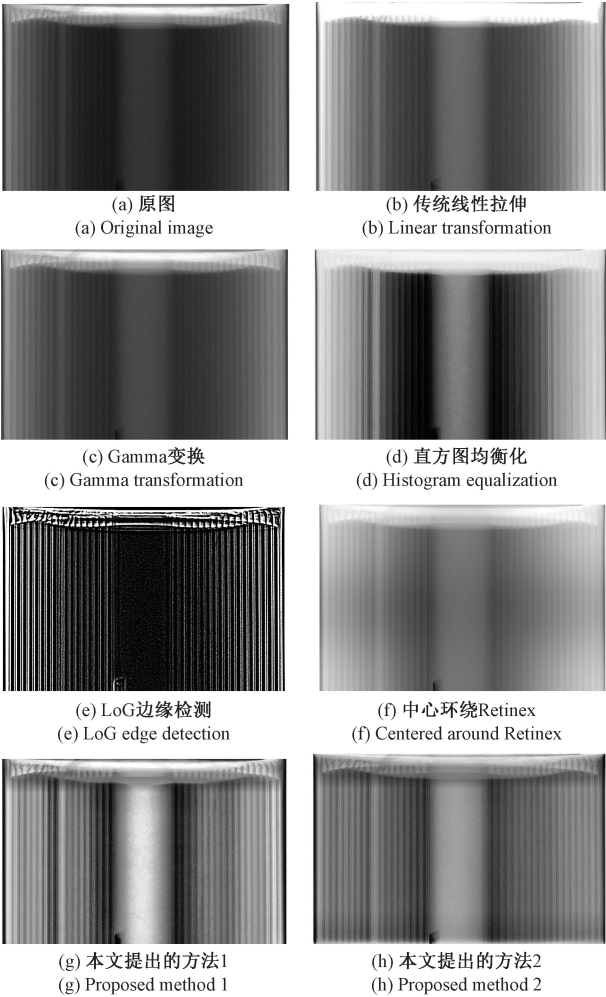


图 11 图像增强算法测试结果对比

Fig. 11 Comparison of various image enhancement algorithms

进一步给出图 11 所对应的每个子图的灰度直方图分布,如图 12 所示。

从视觉效果和灰度直方图分布均可以看出本文提出的两种方法可以明显提高图像的质量。由图 11 还发现,图片底部,靠近电池中心位置处的电极,在原图中几乎看不到。通过本文的图像增强方法处理后,此电极变得非常清晰。这意味着,如果图片中存在缺陷,用本文的图像增强算法也能够使缺陷信息变得更加明显。通过图 12 发现,本文提出的方法其灰度直方图分布更加均匀,使得图像整体不会太暗或者太亮。除了视觉效果的评价以外,本文还利用文章提到的图像增强效果评价指标来进行评估。分别计算了图 11 中的 8 幅图的均方根灰度值、信息熵、结构相似性和

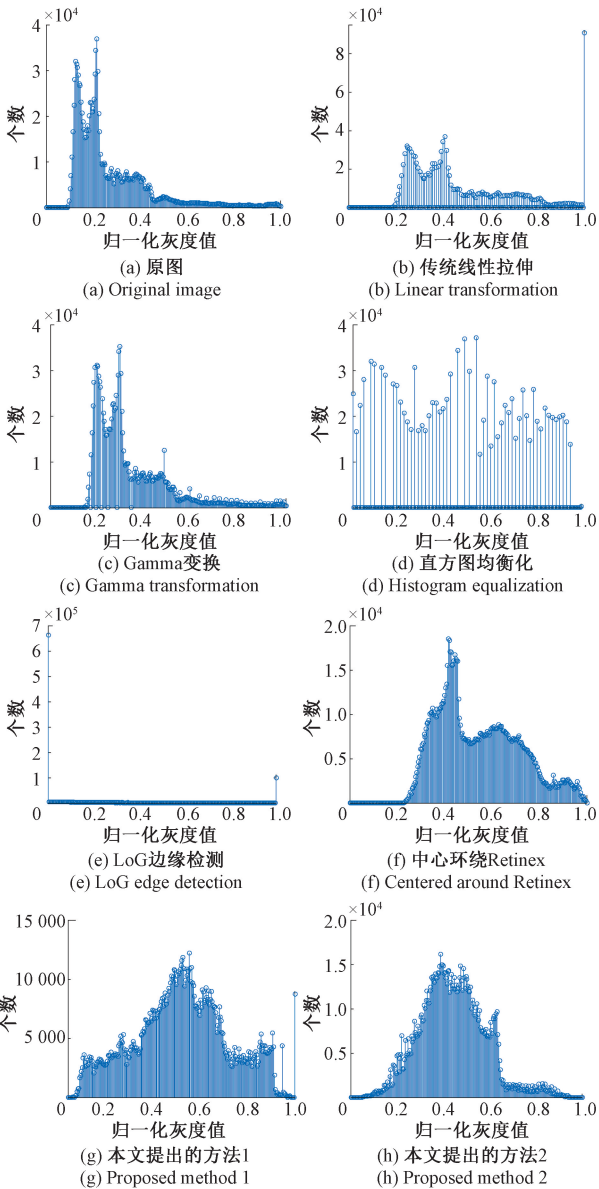


图 12 各种图像增强算法测试结果对应的灰度直方图

Fig. 12 Gray histograms corresponding to the test results of various image enhancement algorithms

对比度,结果如表 1 所示。

表 1 各种图像增强算法评价指标

方法	$RMS_{contrast}$	$H(X)$	SSIM	$CR(10^{-5})$
传统线性拉伸	0.230 1	6.351 7	0.772 7	7.71
传统非线性拉伸	0.163 9	6.728 8	0.970 1	4.90
直方图均衡化	0.277 3	5.733 2	0.667 2	18.86
LoG 锐化	0.324 1	4.202 2	0.554 7	1 410
高斯环绕 Retinex	0.170 0	7.306 8	0.719 0	2.78
本文提出的方法 1	0.210 7	7.663 0	0.596 6	32.82
本文提出的方法 2	0.141 6	7.161 4	0.707 6	18.19

从图 12(e)可以看出由于 LoG 锐化的图像增强方案使大部分灰度值挤压在 0 的像素点上,这将导致其客观评价指标里的灰度均方根值和对比度明显增大,参考意义不大。去除基于 LoG 锐化的图像增强方案,对比表 1 中其他几种图像增强算法不难发现,本文采用的两种方法有较高的信息熵,从而可以丰富图像的细节信息。另外,本文提出的两种方法有着较高的对比度,因此图像更加容易分辨,这对后期的缺陷检测非常重要。本文提出的第 1 种方法其均方根灰度值与 Retinex 算法相当,而结构相似性方面第 2 种方法则与 Retinex 算法相当。通过这一测试进一步验证了本文提出的两种方案在提升图像对比度和增强细节方面有着良好的效果。

4 结 论

本文针对锂电池 X 射线图像对比度低,图像模糊等特点展开了图像增强算法研究。在对比度增强研究中应用了传统的线性变换、伽马变换和对数变换。结果表明,传统方法在图像质量改善上效果有限。因此,本文采用了自定义的非线性灰度变换函数与 CLAHE 算法结合的方法,取得了显著的增强效果。此外,还尝试了同态滤波结合 CLAHE 的方案,结果表明使用巴特沃斯高通滤波器作为同态滤波器可以明显提高图像细节的清晰度和对比度,编码实现了以上想法并通过实际案例进行了测试。通过计算图像的均方根灰度值、信息熵、结构相似性和对比度等评价图像质量的客观指标,最终确认了本文提出的两种图像处理方案在锂电池 X 射线图像处理中的优越性。

参考文献

- [1] 王鲁凯,林宏健,吴坤,等.金属卤化物闪烁体薄膜的 X 射线成像研究进展[J].发 光 学 报,2024,45(8):1266-1280.
WANG L K, LIN H J, WU K, et al. Research progress in X-ray imaging of metal halide scintillator films[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2024, 45(8): 1266-1280.
- [2] 周佳禾,宫元九.利用卷积神经网络检测锂电池电极缺陷[J].电子测量技术,2019,42(19):182-186.
ZHOU J H, GONG Y J. Detection of electrode defects in lithium batteries based on convolutional neural networks[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(19): 182-186.
- [3] LAM R K, RAJ S L, PASCAL T A, et al. Soft X-ray second harmonic generation as an interfacial probe[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(2): 023901.
- [4] 游达章,陶加涛,张业鹏,等.基于灰度变换及改进 Retinex 的低照度图像增强[J].红外技术,2023,45(2):161-170.
YOU D ZH, TAO J T, ZHANG Y P, et al. Low-

light image enhancement based on gray scale transformation and improved Retinex [J]. Infrared Technology, 2023, 45(2): 161-170.

- [5] 陈春谋.基于直方图均衡化与拉普拉斯的铅条图像增强算法[J].国外电子测量技术,2019,38(7):131-135.
CHEN CH M. Lead line image enhancement algorithm based on histogram equalization and Laplacian [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(7): 131-135.
- [6] 肖鑫.电池内部缺陷图像识别算法研究[D].天津:河北工业大学,2021.
XIAO X. Research on image recognition algorithm for internal defects of battery [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021.
- [7] 郑涵今,薛健,吕科,等.基于 X-Ray 图像的锂电池电极检测方法[J].无线电通信技术,2023,49(3):532-540.
ZHENG H J, XUE J, LYU K, et al. Lithium battery electrode detection method based on X-Ray image[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(3): 532-540.
- [8] 张文璐.工业 X 射线图像增强算法的研究[D].太原:中北大学,2022.
ZHANG W L. Research on industrial X-ray image enhancement algorithms[D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [9] 周新颖,胡跃明.基于小波增强与 Canny 算法融合的锂电池极片缺陷检测方法[J].电子测量技术,2023,46(4):149-154.
ZHOU X Y, HU Y M. Lithium battery electrode defect detection method based on fusion of wavelet enhancement and Canny algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(4): 149-154.
- [10] 秦琛,孙晨.基于改进 Retinex 算法的航拍图像质量增强仿真[J].计算机仿真,2023,40(8):235-239.
QIN CH, SUN CH. Simulation of aerial image quality enhancement based on improved Retinex algorithm[J]. Computer Simulation, 2023, 40(8): 235-239.
- [11] 钱玉洋,魏巍,陈灯.基于改进 MSR 的锂电池 X 射线图像增强算法[J].电子测量技术,2022,45(9):113-120.
QIAN Y Y, WEI W, CHEN D. X-ray image enhancement algorithm of lithium battery based on improved MSR [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(9): 113-120.
- [12] 赵爱玲,张鹏程,刘伟.基于 Retinex 和同态滤波的 X 射线电池图像增强算法[J].测试技术学报,2021,35(2):128-133.
ZHAO AI L, ZHANG P CH, LIU Y. X-ray battery

- image enhancement algorithm based on Improved Retinex and homomorphic filtering[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 35(2): 128-133.
- [13] 弭永发,迟明善,张强,等. 基于颜色校正与改进的 CLAHE 多尺度融合水下图像增强[J]. 无线电工程, 2024, 54(6): 1470-1480.
- MI Y F, CHI M SH, ZHANG Q, et al. Underwater image enhancement based on color correction and improved CLAHE multi-scale fusion [J]. Radio Engineering, 2024, 54(6): 1470-1480.
- [14] 王紫荆,刘卫星,杨爱民. 基于改进鲸鱼优化算法的工业 CT 图像增强方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(11): 160-168.
- WANG Z J, LIU W X, YANG AI M. Industrial CT image enhancement method based on improved whale optimization algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(11): 160-168.
- [15] 闫弘绪. 基于神经网络的工业 X 射线图像增强算法研究[D]. 太原:中北大学,2024.
- YAN H X. Research on industrial X-ray image enhancement algorithm based on neural networks[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [16] 吴振才. 基于卷积神经网络的微光图像增强算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2024.
- WU ZH C. Research on low light image enhancement algorithm based on convolutional neural network[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024.
- [17] 王树森,李萍,黄大伟,等. 基于深度学习的焊缝缺陷 X 射线检测图像识别与增强[J]. 无损检测, 2024, 46(6):17-23.
- WANG SH S, LI P, HUANG D W, et al. Image recognition and enhancement of X-ray detection of weld defects based on deep learning [J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(6): 17-23.
- [18] 吴梦飞. 基于注意力机制的无监督图像增强方法研究[D]. 北京:中国科学院大学,2023.
- WU M F. Research on unsupervised image enhancement method based on attention mechanism [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [19] 王鑫. 工业微焦点 X 射线成像中的图像增强及缺陷自动识别算法的研究[D]. 成都:电子科技大学,2019.
- WANG X. Research on image enhancement and automatic defect recognition algorithm in industrial microfocus X-ray imaging[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [20] 王艳,刘冠宏,王雷程,等. 基于碳纳米管冷阴极的微焦点 X 射线源及其应用[J]. 真空电子技术, 2023(6): 10-16.
- WANG Y, LIU G H, WANG L CH, et al. Micro-focus X-ray source based on carbon nanotube cold cathode and its application[J]. Vacuum Electronics, 2023(6): 10-16.
- [21] HUI Z L, WANG R J, FENG N N, et al. State of health prediction for lithium-ion batteries based on ensemble Gaussian process regression[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2024, 15(3): 397-407.
- [22] RAWASH Y Z, AI-NAAMI B, ALFRAIHAT A, et al. Advanced low-pass filters for signal processing: A comparative study on Gaussian, Mittag-Leffler, and Savitzky-Golay filters[J]. Mathematical Modelling of Engineering Problems, 2024, 11(7): 1841-1850.
- [23] 梁传晖,王玉丹,杜国浩,等. 同步辐射 X 射线图像对比度增强算法研究[J]. 光学学报,2015, 35(3): 97-106.
- LIANG CH H, WANG Y D, DU G H, et al. Research on the contrast enhancement algorithm of synchrotron radiation X-ray image[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 97-106.
- [24] PELI E. Contrast in complex images[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics and Image Science,1990, 7(10): 2032-2040.
- [25] 林立芃,杨朝阳,伍明诚,等. 改进型 CLAHE 图像增强算法及其 FPGA 实现[J]. 电子测量技术, 2024, 47(10): 126-133.
- LIN L P, YANG ZH Y, WU M CH, et al. Research on the improved CLAHE image enhancement algorithm and its FPGA-based implementation [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(10): 126-133.
- [26] 周浔. 工业射线图像增强算法的研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- ZHOU X. Research on industrial ray image enhancement algorithm[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

作者简介

曾德榕, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与识别。

E-mail: 694428034@qq.com

谭 淦, 硕士研究生, 主要研究方向为真空电子器件。

E-mail: 1769157034@qq.com

钟敏良, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术。

E-mail: 1247924172@qq.com

高巍巍, 副教授, 博士, 主要研究方向为加速器物理、自由电子激光、X 射线源。

E-mail: aoww@ustc.edu.cn

蓝杰钦(通信作者), 副教授, 博士, 主要研究方向为加速器物理、X 射线源、图像处理。

E-mail: lanjq@mail.ustc.edu.cn