

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106283

基于热成像与灰度转换技术的光伏阵列缺陷检测方法^{*}

柳 扬^{1,2} 陈美珍^{1,2} 徐胜彬^{1,2} 郭俊锋^{1,2} 张永强^{1,2} 林金阳^{1,2}

(1. 福建工程学院 电子信息与电气技术国家级实验教学示范中心 福州 350118;

2. 福建工程学院 微电子技术研究中心 福州 350118)

摘 要: 光伏阵列的缺陷检测及其影响评估对于提高其系统的性能和可靠性具有重要意义。针对光伏阵列热斑缺陷的检测图像存在细节缺失和易受噪声干扰的问题,为了能够快速识别缺陷,准确地分析其损坏程度,提出了一套系统性的检测方案。使用手持热成像仪对光伏阵列进行拍摄,将所获取的图像传输到计算机上,并通过灰度化处理将原始红绿蓝色彩模式(RGB)图像转化为灰度图像。针对传统热成像检测技术存在效率低与缺少缺陷衡量标准等缺点,提出了一种灰度转换算法,首先将灰度图像进行K均值聚类(K-means),再进行线性增强,将各个区域灰度值线性增加,接着采用阈值分割算法将图像颜色簇进行灰度转换,最后根据所提出缺陷程度表对图像进行定量分析,数据与图形结合表示出光伏阵列的缺陷情况。实验结果表明该方法在缺陷程度检测方面与传统二值化处理算法相比,检测偏差小于2%,并且能详细地显示轻微缺陷与重度缺陷区域缺陷的细节。同时针对图像的非均匀性噪声干扰有较好的抑制效果,提高检测精度。

关键词: 热斑效应;热成像;K-means 聚类;图像增强;阈值分割

中图分类号: TK514; TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Defect detection method for photovoltaic arrays based on thermal imaging and gray conversion technology

Liu Yang^{1,2} Chen Meizhen^{1,2} Xu Shengbin^{1,2} Guo Junfeng^{1,2} Zhang Yongqiang^{1,2} Lin Jinyang^{1,2}

(1. National Demonstration Center for Experimental Electronic Information and Electrical Technology Education, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. Research Center for Microelectronics Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The defect detection and impact assessment of photovoltaic arrays are of great significance for improving the performance and reliability of their systems. Due to the problems of missing details and susceptibility to noise interference in the detection images of photovoltaic array hot spot defects, in order to be able to quickly identify defects and accurately analyze their damage, a set of systematic inspection schemes are proposed. Use a handheld thermal imager to take pictures of the photovoltaic array and transfer the acquired images to the computer, and convert the original red-green-blue color mode (RGB) image into grayscale through grayscale processing image. Due to the shortcomings of traditional thermal imaging detection technology such as low efficiency and lack of defect measurement standards, this paper proposes an improved gray conversion algorithm. First, perform K-means clustering of grayscale images, and perform linear enhancement, it can linearly increase the gray value of each area. Then use threshold segmentation algorithm to perform regional correction of image color clusters. Finally, analyze the image quantitatively according to the defect degree table. Data and image combined to show the defects of the photovoltaic array. The experimental results show that compared with the traditional binarization processing algorithm, the deviation of the algorithm proposed in this paper is less than 2% in defect detection, and show the areas of slight defects and severe defects in detail. It also can suppress image non-uniform noise and improve the accuracy of detection.

Keywords: hot spot effect; thermal imaging; K-means clustering; image enhancement; threshold segmentation

0 引 言

如今,光伏发电已经成为主流的可再生能源技术之一,

具有零污染、零成本、维护费用低的优势被应用于各种领域,各种房顶上的光伏阵列随处可见。但是在使用过程中,由于各种各样的环境因素,光伏阵列不可避免会出现各种

收稿日期:2021-04-02

^{*} 基金项目:平板显示国家地方联合工程实验室开放基金项目(KF1802.GY-Z18038)、面向医学图像语义分割的新型卷积神经网络模型设计方法研究(2020J01879)资助

缺陷,从而导致发电效率下降甚至是损坏,有关光伏系统缺陷引发的火灾事故屡见报道,光伏缺陷检测引起了研究者们更多的关注^[1]。因此对光伏阵列的缺陷检测是光伏发电领域中极其重要的一个内容。

常见的缺陷类型有热斑效应、表面裂纹、栅线断裂等,其中热斑效应影响相对较大。当光伏阵列工作时,一部分光伏阵列由于遮挡或者异物的原因,覆盖部分的温度远远高于没有被覆盖的部分,时间一长就会出现明显的热斑,当其到达一定程度时会使阵列的焊点融化,栅线断裂,进而使光伏阵列整块损坏,这种现象称为热斑效应。据统计,热斑效应让光伏电站的发电率大大减少,并且减少电站 10% 的寿命。

目前检测光伏缺陷的方式主要围绕着电流电压、热成像、神经网络这几个大方向,文献[2]采用基于电压电流的离群因子检测光伏缺陷,响应速度快,自动化高,但很难在这个方法中获取光伏阵列的具体缺陷部位以及缺陷表现。文献[3]提出一种基于长短期记忆神经网络的光伏发电系统缺陷检测模型,检测率相比传统反向传播神经网络(back propagation neural network, BP)更高,并且可对光伏热斑缺陷进行提前预判,避免对阵列造成不可逆转的损失。但其只能检测是否发生热斑缺陷,不能显示出热斑缺陷的具体细节,无法量化损坏的程度。文献[4-5]采用最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)控制方法,前者基于学习因子改进鸽群算法,后者基于光伏组件各项参数与公式以调节占空比 D ,能够在多峰状态下规避陷入局部最优,具有良好的追踪效果,使整个系统的输出效率提高。文献[6]提出一种基于改进的变分模态分解和卷积神经网络相结合的缺陷检测方法,可有效地解决缺陷特征提取困难,特征参数奇异性差,以及由于特征参数差而引起的缺陷检测率低等问题。文献[7]采用神经网络建立预测模型与中值滤波的方法检测光伏缺陷,具有检测范围广、数量大的优势,但是准备工作较复杂,精度低,容易受到环境噪声的影响出现误检。

基于上述检测方法在热斑图像的损坏量化与噪声干扰方面存在的不足,本文提出了一种改进的热成像检测光伏缺陷的方法,该方法能够在基于热成像技术的热斑效应检测的基础上,清晰地显示出热斑损坏程度,将具体的缺陷(轻微缺陷、重度缺陷)分离显示,防止细节缺失。同时能够避免因光伏图像存在的非均匀性噪声干扰而产生的误检,提高了检测精度。

1 基于热成像技术的光伏阵列缺陷检测

光伏发电实际上是太阳照射在半导体的 $p-n$ 结上,形成空穴-电子对,在 $p-n$ 结电场的作用下,空穴由 p 区流向 n 区,电子由 n 区流向 p 区,两侧形成电位差,然后外部接通电路,在该电压的作用下形成电流^[8]。

实际整个过程如图 1 所示,太阳辐射照射在光伏阵列

上,由金手指的密集矩阵收集并转换为电流并流向母线,然后通过母线流向接线端子进而给负载供电。其中,入射辐射被分为 3 部分,即电流、热量和反射辐射。缺陷区域会产生更高的温度因为更多的辐射都被转化为热量^[9]。

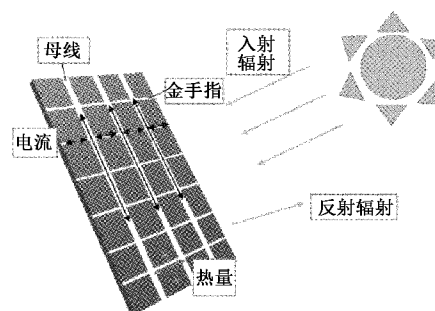


图 1 光伏阵列

光伏阵列的表面温度是使用热成像仪通过红外热成像技术测量的。对于黑体以外的材料,单位面积的热辐射功率(P)由式(1)给出。热成像仪感测到的热信号是辐射与局部发射率值的乘积^[10]。

$$P = \epsilon * \sigma * A * T^4 \quad (1)$$

式中: ϵ 是发射率; σ 是斯特藩-玻尔兹曼常数; A 是表面积; T 是温度。

基于以上条件,使用红外热成像仪拍摄光伏阵列,随后进行人工或者计算机识别,达到检测目的。图 2 是含有热斑缺陷的光伏阵列的红外热成像。

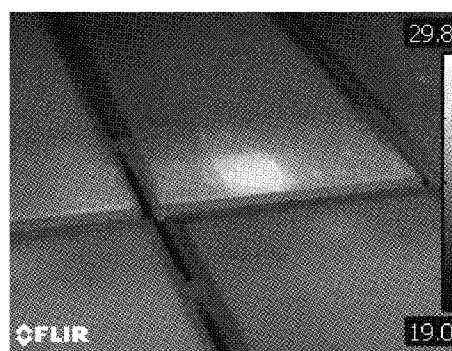


图 2 红外热成像

2 改进的基于热成像技术的光伏阵列缺陷检测算法

基于热成像技术的缺陷检测法所处理的图像含有大量颜色信息,在检测量较大的情况下计算量大,效率低,无法满足大型光伏电站高频率的检测需求;同时由于所含的颜色过多,缺少一个衡量热斑故障程度的标准,增加后期人工复检的难度。因此针对以上问题,本文提出了一种改进的热成像光伏阵列检测方法。

2.1 灰度预处理

在 RGB 模型中,如果 $R=G=B$,则该模型的颜色可以表示成某个灰度色,其中 $R=G=B$ 所对应的值称为灰度

值。灰度图像除了有黑白两色以外,还有很多不同层级的颜色深度。

灰度图像是在电磁波频谱内测量各个像素对应的亮度值得到的。它的每个像素所含的灰度值只有 1 Byte 大小,范围是 0~255。通常用每个采样像素 8 位的非线性尺度来保存,可以保存 256 级灰度。这种精度不仅能够免除可见条带失真,并且编程难度较低^[11]。

2.2 缺陷灰度转换算法

经过灰度预处理的图像滤除了大量多余的颜色信息,提高了检测效率,但仍然还没有达到检测热斑缺陷的精度,因此利用本文提出的缺陷灰度转换算法进行下一步处理。流程如图 3 所示。

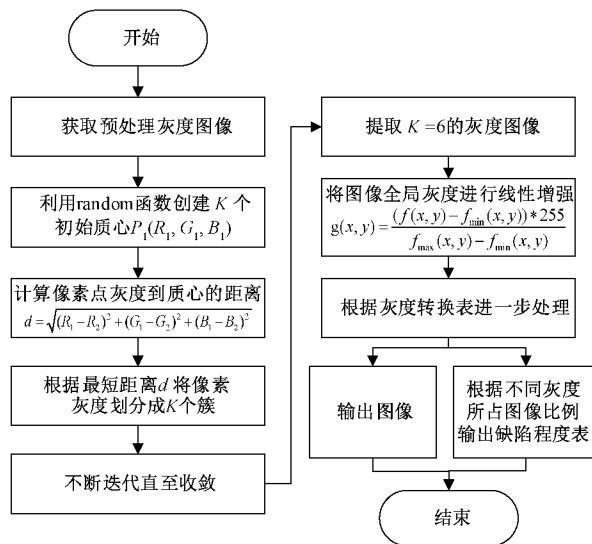


图 3 缺陷灰度转换算法

1) 颜色聚类

颜色聚类是利用人眼对色彩存在惰性的原理,将原图像中相近的颜色合并为一种从而达到颜色数降低的目的,使聚类前后的图像对于人眼的认识误差最小,即聚类误差最小^[12]。利用此方法把图像分块以便于识别出缺陷区域和正常区域。

常见的颜色聚类的方法有很多种,例如八叉树算法、中位切分算法、流行度算法、均匀量化等。文献[13]采用八叉树算法,该方法虽然图像具有很好的质量和压缩比,但与其他算法相比各方面都不是非常突出,处理的不确定性较大;文献[14]采用了中位切分算法,图像具有较好的鲁棒性和透明性,对图片信息的保密性也非常好,但处理的效率较低。本文采用的是 K-means 聚类算法,此操作将 n 个颜色分成 k 个颜色簇,即原来的每个颜色将被重新归为新图像中最近均值的颜色簇。即它会最小化等式(2)中给出的欧氏距离。

$$d = \sqrt{(R_1 - R_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2} \quad (2)$$

式中: d 是欧几里德距离; (R_1, G_1, B_1) 和 (R_2, G_2, B_2) 是

颜色。

根据 K-means 聚类算法,具有较高温度范围的区域为 1 个颜色簇,具有正常温度范围的区域将获得不同且灰度值较低的颜色簇。

由于光伏阵列的热成像的缺陷区域灰度值较集中,仅需要少数几块颜色簇就能很好地表示出缺陷,因此 K-means 聚类的 K 值小于 10 即可。如图 4 所示,与原始图像(图 4(f))相比,若取值较小时精确度较低,误差较严重(图 4(a)、(b)),而取值较大时则产生过拟合现象(图 4(d)、(e))。根据多次实验结果得出,将 K 值设置为 6 时(图 4(c))较符合聚类要求,将原始 RGB 图像分割成 6 个颜色簇。

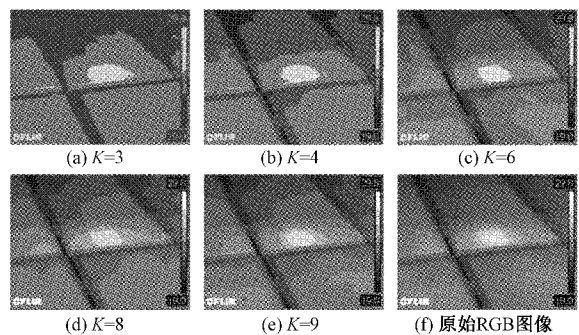


图 4 不同取值情况下的 K-means 聚类

通过本方法可以将大量颜色的热成像转换成指定数量颜色的图像,去除多余的信息,保留足够的有用信息,有助于良好和清晰地表示热模式,图 5 是使用 K-means 聚类算法处理后的图像。

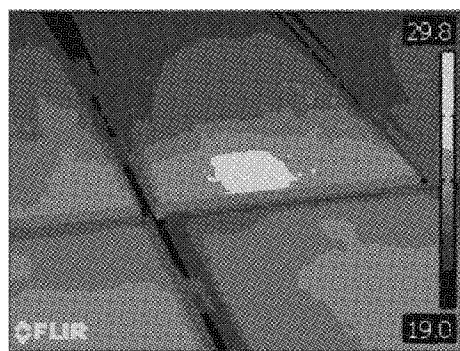


图 5 K=6 的聚类图像

2) 图像线性增强

在图像形成的过程中,存在很多因素影响热成像的清晰度,例如不均匀的光照、不合适的拍摄角度、图像传输过程中产生的噪声污染等。如图 2 和 5 所示,原来的图像在前期传输与处理的过程产生部分噪声,导致图像模糊,质量低,因此需要对图像进行线性增强,以改善图像质量。

图像增强算法原理是在原图像的基础上附加一部分信息或一定程度上改变数据,有目的地突出图像中某些特征或者抑制某些不重要的特征,使图像与视觉响应特性相匹

配。它可分为基于空域和基于频域两类算法^[15]。

由于频域法在图像降噪的过程中容易导致边缘信息损失,计算时间相比空域法更长,因此在红外图像处理领域空域法更加适用。空域法是对图像中的像素点进行操作,其原理如式(3)所示。

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) \quad (3)$$

式中: $f(x,y)$ 是原图像灰度; $h(x,y)$ 为空间转换函数; $g(x,y)$ 表示进行处理后的图像灰度。

基于式(3)所示的空域法原理,本文提出对图像像素点的灰度值进行线性增强,其公式如式(4)所示。

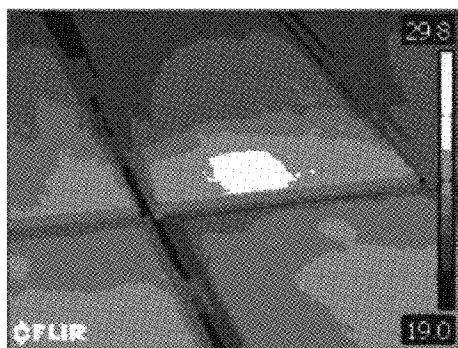
$$g(x,y) = \frac{(f(x,y) - f_{\min}(x,y)) * 255}{f_{\max}(x,y) - f_{\min}(x,y)} \quad (4)$$

式中: $f_{\min}(x,y)$ 、 $f_{\max}(x,y)$ 是原图像灰度的最小值和最大值; 255 是增强后的最小值和最大值之差; $f(x,y)$ 是图像某个像素点的灰度值; $g(x,y)$ 是增强后的灰度值。

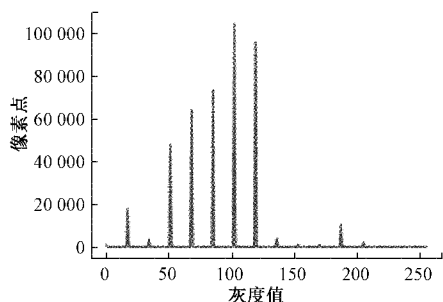
如图 6 所示,从图 6(a)中可以看出经过线性增强后图像的清晰度明显提高,经过增强后热斑现象更加明显。图 6(b)为增强前的灰度直方图,图 6(c)为增强后的灰度直方图。通过两图对比,可以看出采用了线性增强算法后,原先的灰度值越小上升的幅度越小,原先的灰度值越大上升的幅度越大,图像整体灰度值的变化呈线性上升。

3) 阈值分割

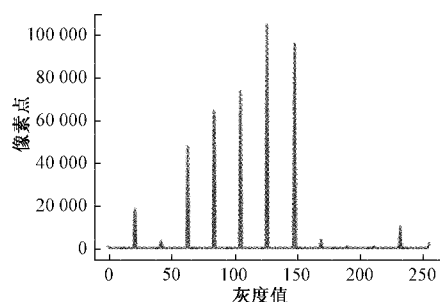
阈值分割法是一种基于区域的图像分割技术,原理是基于给定的某个阈值,把图像像素点分为若干类。因其算法简单、计算速度快、性能较稳定而成为图像分割中最常用的分割技术。它通过大幅度压缩数据量,简化了后续处理过程,因此常用于图像分析、特征提取和模式识别等领域。



(a) 增强图像



(b) 增强前的灰度直方图



(c) 增强后的灰度直方图

图 6 线性增强

其公式如式(5)所示。

$$g^*(x,y) = \begin{cases} a, & g(x,y) \geq T \\ b, & g(x,y) < T \end{cases} \quad (5)$$

式中: $g(x,y)$ 是像素点原始灰度值; $g^*(x,y)$ 是分割后的像素点灰度值; T 是分割阈值。

基于阈值分割理论,本文提出了一个灰度转换表。如表 1 所示,它能够将先前处理的图像颜色区域进行二次划分,重新定义出 3 个缺陷区域,分别为常温区、中温区、高温区。处理的结果结合上文 K 值为 6 的聚类算法,很好地弥补了 K-means 聚类算法需要手动设置阈值的不足。

表 1 灰度转换表

灰度	灰度转换		
转换前的灰度 g	$50 < g \leq 130$	$130 < g \leq 180$	$180 < g \leq 255$
转换后的灰度 g^*	100	160	255

3 实验结果与分析

3.1 硬件与软件

本文实验使用 FLIR T420 红外热成像仪来采集光伏阵列的红外热成像,处理图像的软件使用 Visual Studio 2017,语言环境为 Python 3.6,曲线拟合使用的软件为 Origin 2018。

3.2 实验环境

实验地点位于福州大学,纬度 $26^{\circ}3'56.42''N$,经度 $119^{\circ}12'15.69''E$,平均海拔 84 m。日平均温度 $16.7^{\circ}C$,天气晴朗。

3.3 实验对比

图 7 采用 3 组实验比较了本文的方法和传统的二值化处理算法检测热斑效应的结果。二值化处理算法采用文献[16]所提出的基于最小二乘法的灰度直方图曲线拟合的方法。该方法首先采用中值滤波和灰度化的方法对图像进行预处理,再采用最小二乘法对它的灰度直方图进行曲线拟合,去除了因外界环境产生的直方图噪声,并将拟合曲线的最高“峰”右边第 1 个“谷”所对应的值提取为阈值,最后采用人工阈值分割法将热成像转换成二值图像输出。

其中图 7 的 a 列是原始 RGB 图像,b 列是采用基于最

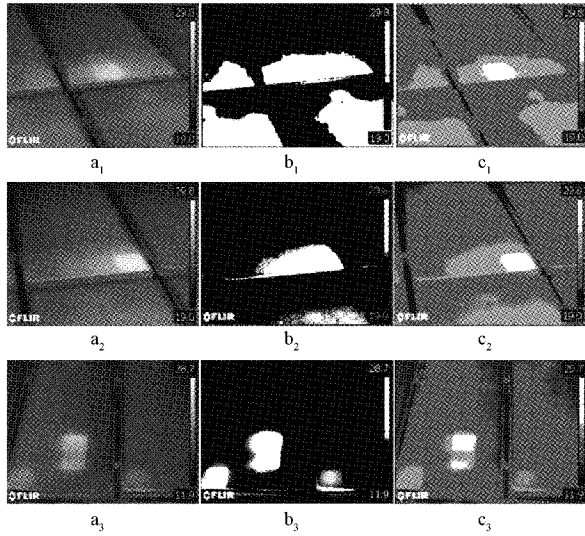


图 7 实验对比 I

小二乘法曲线拟合的灰度直方图法, c 列是采用本文的方法。表 2~4 分别是 3 组实验所对应的缺陷程度表, 其中表 2 中采用曲线拟合法检测出热斑面积为 31.95%, 本文算法检测出轻微缺陷为 25.43%, 严重缺陷为 4.61%, 合计 30.04%; 表 3 采用曲线拟合法检测出热斑面积为 12.89%, 本文算法检测出轻微缺陷面积为 9.95%, 严重缺陷为 3.31%, 合计 13.26%; 表 4 采用曲线拟合法检测出热斑面积为 10.65%, 本文算法检测出轻微缺陷面积为 7.56%, 严重缺陷为 3.51%, 合计 11.07%。表中的缺陷检测偏差为两种算法检测缺陷区域的差值, 表示在某种情况下的检测效果差异。表中 3 组实验的缺陷检测偏差均小于 2%, 说明本文算法与传统的二值化处理算法在常规的热斑缺陷检测方面的效果接近, 能够较完好地突出热斑缺陷, 不易出现较大的误检。但通过图 7 与表 2~4 也可得知, 二值化处理算法的输出为二值图像, 无法体现出阵列缺陷的具体损坏程度, 而本文算法可以较清晰地表现出中温区(轻微缺陷)和高温区(严重缺陷)。

表 2 缺陷程度表 I

算法	正常	缺陷程度		偏差
		轻微缺陷	严重缺陷	
b ₁	68.05	31.95		1.91
c ₁	69.96	25.43	4.61	

表 3 缺陷程度表 II

算法	正常	缺陷程度		偏差
		轻微缺陷	严重缺陷	
b ₂	87.11	12.89		0.37
c ₂	86.74	9.95	3.31	

表 4 缺陷程度表 III

算法	正常	缺陷程度		偏差
		轻微缺陷	严重缺陷	
b ₃	89.35	10.65		0.42
c ₃	88.93	7.56	3.51	

如图 8 所示, 当光伏阵列热成像存在非均匀性噪声, 实际表现为阵列区域内温度不均时, 其中部分低温区域还不足以达到热斑缺陷的标准, 整体仍然处于正常工作状态。在此情况下, 灰度直方图曲线拟合算法的缺点被放大, 不能很好地表现出光伏阵列的实际情况。

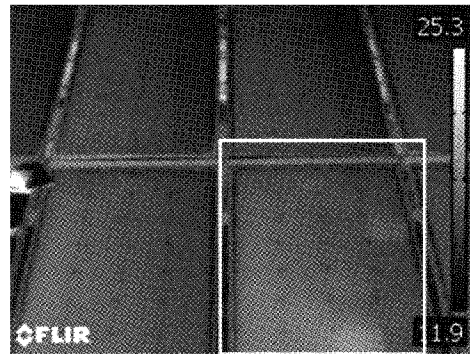
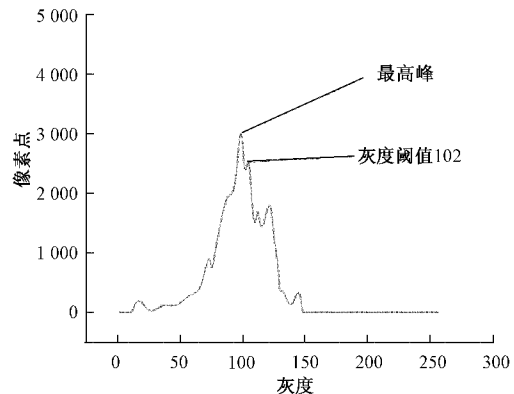
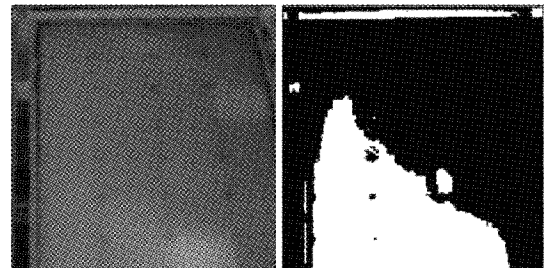


图 8 非均匀性噪声

针对以上情况, 利用灰度直方图曲线拟合算法进行处理, 如图 9 所示, 其中图 9(a) 为该算法的关键步骤, 即利用



(a) 最小二乘法拟合曲线



(b) 处理过程

图 9 采用灰度直方图曲线拟合算法处理的非均匀性噪声图像

最小二乘法将灰度直方图拟合后的曲线图,根据算法思想,提取最高“峰”右侧第 1 个“谷”的灰度值,即图中的灰度值 102 作为分割阈值。图 9(b)是处理流程,从图 b_2 中可以很清晰地观察到该算法将正常区域错误判断为缺陷区域。而采用本文算法处理的结果如图 10 所示,能够观察到图像尚未出现误检现象,说明本文算法对非均匀性噪声有较好的抑制效果。

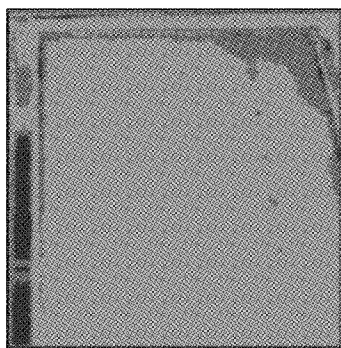


图 10 本文算法处理结果

以相同的方式处理其他含有非均匀性噪声的光伏阵列热成像,实验对比如图 11 所示, a 列是原始 RGB 图像, b 列是采用基于最小二乘法曲线拟合的灰度直方图法, c 列是采用本文的方法。实验结果进一步证明本文算法的优势。

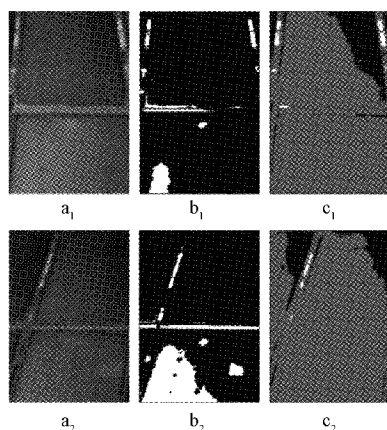


图 11 实验对比 II

4 结 论

本文使用基于红外热成像的方法检测光伏阵列热斑缺陷,相比于常见的电流电压检测算法和神经网络算法,以图像输入和输出的形式,更加地直观清晰。根据传统热成像检测算法本身存在的细节缺失与易受噪声干扰问题,本文提出了一种缺陷灰度转换算法,采用 K-means 聚类算法,并结合线性增强与阈值分割技术,通过图像处理结果和缺陷程度表证明,本文方法与传统的二值化处理算法相比,偏差率不超过 2%,并且能在检测出缺陷的基础上更好地表现出光伏阵列热斑缺陷的损坏程度,检测缺陷精度更高。同

时在处理含有非均匀性噪声的图像时,误检率低,效果更好。在之后的研究中,会考虑在图像预处理阶段加入优化算法,过滤多余的背景噪声,提高检测精度。

参考文献

- [1] ALAM M K, KHAN F H, JOHNSON J, et al. PV faults: Overview, modeling, prevention and detection techniques[C]. 2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Salt Lake City, UT, USA, 2013: 1-7.
- [2] YE Z, BALBONI F, ARNAUD T, et al. Fault experiments in a commercial-scale PV laboratory and fault detection using local outlier factor [C]. 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Denver, CO, USA, 2014: 3398-3403.
- [3] 张文军,林永君,李静,等. 基于长短期记忆神经网络的光伏阵列故障诊断[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 60-68.
- [4] 陈忠华,刘博,郭瑞,等. 基于改进鸽群算法的光伏阵列 MPPT 方法[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 2021: 1-10.
- [5] 刘晓东,肖晶,周恒俊,等. 基于改进型光伏系统 MPPT 控制策略的研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(22): 50-54.
- [6] 姜媛媛,张书婷. 基于改进的 VMD 和 CNN 神经网络的光伏逆变器软故障诊断方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 158-163.
- [7] YILDIZ T, GOL M. A malfunction detection method for PV systems[C]. 2019 IEEE Milan PowerTech, Milan, Italy, 2019: 1-6.
- [8] 尹春杰,宋彦嶷,王亚男,等. 光伏发电组件在线监测与故障诊断系统研制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2020(4): 122-126.
- [9] AKRAM M W, LI G, JIN Y, et al. Improved outdoor thermography and processing of infrared images for defect detection in PV modules [J]. Solar Energy, 2019, 190: 549-560.
- [10] SPAGNOLO G S, VECCHIO P D, MAKARY G, et al. A review of IR thermography applied to PV systems[C]. 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, Italy, 2012: 879-884.
- [11] 王晓红,韩娇,李珊珊. 基于人脸检测器的实时视频人脸检测与跟踪[J]. 信息通信, 2019(2): 56-57.
- [12] 程国建,魏洁洁. 基于 K-Means 的颜色量化算法在岩石图像预处理中的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(3): 114-119.
- [13] 吴振华,沈虎峻,公佐权,等. 一种基于自适应分块八叉树颜色量化的图像压缩技术[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(2): 291-298.

- [14] 马玉洁. 一种模糊核聚类的彩色图像量化算法[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(1): 45-48.
- [15] 李良福, 冯建云, 宋睿. 基于图像重生成的桥梁裂缝检测方法研究[J]. 光电子·激光, 2019, 30(12): 1298-1308.
- [16] JIANG L, SU J H, LI X. Hot spots detection of operating PV arrays through IR thermal image using method based on curve fitting of gray histogram[C]. MATEC Web of Conferences, 2016: 597-600.

作者简介

柳扬, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与缺陷检测方面研究。

E-mail: 475357553@qq.com

陈美珍, 硕士研究生, 主要研究方向为神经网络与预测模

型方面研究。

E-mail: 616792377@qq.com

徐胜彬, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统应用研究。

E-mail: 441052302@qq.com

郭俊锋, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统应用研究。

E-mail: 1187349600@qq.com

张永强, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统应用研究。

E-mail: 1372148500@qq.com

林金阳, 博士, 副教授, 主要研究方向为平板显示方面研究。

E-mail: lin1299217@163.com