

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406162

基于平均灰度值与图像融合算法的 光伏板积灰程度识别

陈佳豪, 杨建蒙, 李斌, 王广溢
(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003)

[摘要] 为了精确分析光伏板积灰情况, 采用搭建的光伏积灰可视化实验台, 引入平均灰度值参数, 对光伏板图像进行数值化分析, 验证了光伏板图像的平均灰度值与光伏板积灰密度之间存在明确的对应关系。基于此, 采用5种融合方法对双光谱影像融合实验台采集的可见光图像与红外图像进行融合, 将5类融合图像与可见光图像、红外图像汇总构成图像数据集, 对这7类图像进行识别与分析。结果表明红外图像对光伏板积灰程度的识别效果受辐照度的影响最小, 精度最高, 反映出来的积灰程度变化最明显。该结论可以为积灰规律的研究提供理论基础, 对光伏板积灰程度的识别具有重要意义。

[关键词] 积灰检测; 平均灰度值; 图像融合; 积灰程度

[引用本文格式] 陈佳豪, 杨建蒙, 李斌, 等. 基于平均灰度值与图像融合算法的光伏板积灰程度识别[J]. 热力发电, 2025, 54(3): 131-139. CHEN Jiahao, YANG Jianmeng, LI Bin, et al. Identification of degree of ash accumulation on photovoltaic panels based on average grayscale value and image fusion algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(3): 131-139.

Identification of degree of ash accumulation on photovoltaic panels based on average grayscale value and image fusion algorithm

CHEN Jiahao, YANG Jianmeng, LI Bin, WANG Guangyi
(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to accurately analyze the ash accumulation on photovoltaic panels, a photovoltaic dust visualization experimental platform was built, and the average grayscale value was introduced to numerically analyze the photovoltaic panel images. The clear correspondence between the average grayscale value of photovoltaic panel images and the dust density of photovoltaic panels was verified. On this basis, five fusion methods were used to fuse the visible light images and infrared images collected from the dual spectral image fusion experimental platform. The five types of fusion images were combined with visible light images and infrared images to form an image dataset. These seven types of images were identified and analyzed. The results showed that, the recognition effect of infrared images on the degree of ash accumulation on photovoltaic panels was the least affected by irradiance, with the highest accuracy, and the most significant change in the degree of ash accumulation was reflected. This conclusion can provide a theoretical basis for the study of ash accumulation rules and is of great significance for the recognition of the degree of ash accumulation on photovoltaic panels.

Key words: ash accumulation detection; average grayscale value; image fusion; ash accumulation degree

在全球能源危机日益加剧的背景下, 人们积极探寻新的可再生能源, 其中光伏因其直接、高效的太阳能利用方式, 逐渐成为关注的焦点^[1-2]。随着光

伏技术的广泛应用和行业需求激增, 对光伏系统性能的分析与检测显得尤为关键^[3-5]。光伏板作为系统的核心构件, 其输出功率受到众多因素的制约, 积

收稿日期: 2024-06-08 网络首发日期: 2024-12-09

第一作者简介: 陈佳豪 (1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏图像识别、光伏积灰检测, 1163019677@qq.com。

通信作者简介: 李斌 (1969), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为传热、传质及多相流技术, libin@ncepu.edu.cn。

灰便是光伏板在长期运行中无法避免的问题。由于气象条件多变,光伏板积灰程度亦会不断变动^[6-8]。因此,精确识别光伏板的积灰程度,对于全面把握光伏系统的工作状态与性能至关重要。

针对光伏板积灰程度的识别国内外学者已做了相关研究。Yang 等人^[9]开发了一种基于黑白比例处理的图像算法,旨在检测光伏组件表面的灰尘积累,并深入分析了成像条件对算法识别精确度的潜在影响。Simonazzi 等人^[10]借助一种创新的传感器技术,探索了计算机视觉在光伏组件积灰检测和运维决策制定方面的实际应用。文献[11]利用 Google Earth 引擎和随机森林算法,通过卫星图像光谱分析,预测了秘鲁沙漠光伏电站的损失率,预测误差较低。文献[12]使用图像分割技术精确评估光伏电池板状态,结果显示深度学习模型分割准确度高。Fan 等人^[13]则设计实验系统,利用大气散射模型准确评估光伏板灰尘积聚,识别了 5 种污染物,自然积灰拟合效果最佳,准确率达 83.78%。综上可见,对于积灰程度检测的图像识别算法而言,其准确度仍有待提高,存在较大的优化空间。

曹珍贵等^[14]采用可见光方式进行煤矸石图像采集,发现识别结果容易受光照、粉尘等环境因素的影响。冯麒麟等^[15]发现非结构环境下柑桔水果图像识别存在识别率低、易受光照影响等问题。董翔宇等^[16]发现基于图像识别的道路导航受光照影响,存在很大的局限性。张炜等^[17]研究变电站巡检机器人对指针式仪表的图像识别,发现机器人在进行可见光检测时易受光照度的影响,导致识别效果较差。由此可见,光照的存在给图像识别带来了负面影响,因此必须进行光伏积灰程度识别方法的对比研究,提高图像识别的准确度。

鉴于以上方法的局限性,本文采取了新的方法,即通过数值化处理光伏板图像的灰度直方图,并引入平均灰度值的概念,结合光伏积灰可视化实验台的实际测试,验证了平均灰度值与光伏板积灰密度之间的明确联系。基于这一结论,采用 5 种融合方法对双光谱影像融合实验台采集的可见光图像与红外图像进行融合,将 5 类融合图像与可见光图像、红外图像汇总到一起构成图像数据集,对这 7 类图像进行识别与分析。结果表明,红外图像对光伏板积灰程度的识别精度最为突出,且其反映的积灰程度变化最为显著。这一结论为光伏板积灰程度的准

确识别提供了重要的参考价值。

1 实验系统

1.1 光伏积灰可视化实验台搭建

为了深入研究光伏板积灰密度与光伏图像之间的关系,在某大学教学楼楼顶搭建光伏积灰可视化实验台。该实验台由多块中四角型号的光伏板构成,用来收集图像与积灰数据,进而探寻光伏板积灰密度与光伏图像之间的潜在关联。光伏积灰可视化实验台如图 1 所示,光伏板的参数见表 1。



图 1 光伏积灰可视化实验台

Fig.1 Photovoltaic ash accumulation visualization experimental platform

表 1 光伏板参数

Tab.1 Photovoltaic panel parameters

| 项目 | 数值 |
|---------------|-------|
| 尺寸/(cm×cm) | 63×54 |
| 电池片面积/(cm×cm) | 58×50 |
| 开路电压/V | 21.85 |
| 短路电流/A | 2.85 |
| 工作电压/V | 18.20 |
| 工作电流/A | 2.70 |
| 最大功率/W | 50 |

该实验台一直处于自然积灰状态,可以定期进行收灰工作,收取的积灰利用电子天平进行测量,电子天平的参数见表 2。该实验台还配备了相应的图像采集装置,能够准确记录光伏板的表面积灰情况,每次进行收灰工作前使用该装置对积灰板进行拍照,所用设备照相机参数见表 3。

表 2 电子天平设备参数

Tab.2 Parameters of electronic balance equipment

| 项目 | 参数 |
|--------|-----------|
| 规格型号 | LQ-A20002 |
| 测量参数 | 灰尘质量 |
| 精度/mg | ±1 |
| 测量范围/g | 0~100 |

表3 照相机设备参数
Tab.3 Camera equipment parameters

| 项目 | 参数 |
|-------------|-----------|
| 相机名称 | 佳能 3000D |
| 产品质量/g | 436 |
| 传感器/(mm×mm) | 22.3×14.9 |
| 有效像素 | 1 800 万 |
| 显示屏像素 | 23 万像素液晶屏 |
| 电池类型 | LP-E10 |

1.2 双光谱影像融合实验台搭建

为了研究可见光图像、红外图像和融合图像的识别效果,在某大学教学楼楼顶搭建光伏实验台,双光谱影像融合实验台(图2),图3为光伏板实物,图3左侧的光伏组件于每日12时由人工清洗方式进行清洁,视为清洁组件;右侧2块光伏组件保持自然积灰状态,中间光伏板每15天清洗1次,最右侧光伏板每30天清洗1次,均视为积灰组件。通过光伏板前方的摄像头进行图像的采集,为了避免降雨对摄像头电路的损伤,将摄像机放置在防水铁箱中,设定每次对清洁组件进行人工清洗之后进行拍摄,所拍图像为可见光图像,当天的晚上11点进行红外图像拍摄,所拍摄图像通过远程数据传输装置传送到电脑端。



图2 双光谱影像融合实验台
Fig.2 Dual-spectral image fusion experimental platform

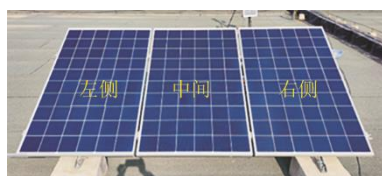


图3 光伏板实物
Fig.3 Physical photovoltaic panels

实验系统中使用的光伏组件为 YL285P-29b 多晶硅光伏组件,该组件在标准测试条件(组件温度 25 °C、辐照度 1 000 W/m²、大气质量 AM1.5)下测量的参数见表4。

该实验台中光伏组件的图像由热成像双光谱网络球机拍摄,设备如图4所示,该热成像双光谱网络球机的分辨率为 1 920×1 080,支持 RS485 传

输图像。

表4 YL285P-29b 光伏组件参数
Tab.4 YL285P-29b photovoltaic module parameters

| 项目 | 参数 |
|---------------|--------|
| 尺寸/(cm×cm) | 163×97 |
| 电池片面积/(cm×cm) | 161×95 |
| 最大功率/W | 285 |
| 开路电压/V | 38.20 |
| 短路电流/A | 9.55 |
| 工作电压/V | 31.50 |
| 工作电流/A | 9.05 |



图4 热成像双光谱网络球机
Fig.4 Thermal imaging dual-spectral network ball machine

2 平均灰度值计算

2.1 图像灰度化

对实验台所拍摄的图像进行灰度化处理,图像灰度化的优点如下:

- 1) 简化计算 灰度化操作可以将 3 个颜色通道合并为 1 个,大大减少计算量和存储空间需求^[18]。
- 2) 强调图像结构 灰度图像能够突出图像的轮廓和纹理特征^[19]。
- 3) 兼容性 某些算法或技术可能仅适用于灰度图像。

本文图像灰度化处理采用加权平均法^[20],计算公式为:

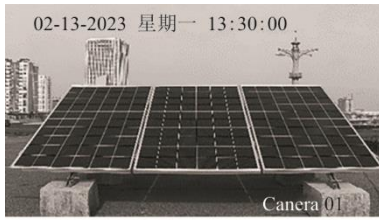
$$G_{ray} = R \times 0.3 + G \times 0.59 + B \times 0.11 \quad (1)$$

式中: G_{ray} 为灰度值; R 为红色分量; G 为绿色分量; B 为蓝色分量。

图5为所拍摄双光谱影像融合实验台图像及灰度化处理后的图像。



a) 实验台图像



b) 灰度化之后的图像

图 5 图像灰度化处理

Fig.5 Image grayscale processing

2.2 图像透视变换

对灰度图像进行透视变换处理, 透视变换的优点如下:

1) 校正透视畸变 在实际应用中, 由于拍摄角度、镜头畸变或物体摆放位置等因素, 图像可能会产生透视畸变。透视变换可以通过对图像进行几何变换, 校正这种畸变, 使得图像中的物体恢复到应有的形态和位置^[21]。

2) 改善图像质量 由于摄像机与所拍摄物体平面之间有一倾斜角, 而不是垂直拍摄(正投影), 可以利用透视变换将图像校正成正投影的形式, 从而提高图像的质量和准确性^[22]。

通用的透视变换公式为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: a_{ii} ($i=1,2,3$) 为透视变换矩阵的元素; $(x, y, 1)$ 为原图像中的坐标; (X, Y, Z) 为变换后图像中的坐标。

原图像平面坐标点为 (X, Y, Z) , 透视变换后的图像平面坐标点为 (X', Y', Z') , 因为处理的是二维的图像, 所以令 $Z'=1$, 并将透视变换后的图像坐标除以 Z' , 将三维图像转换为二维图像, 计算过程可以表示为:

$$\begin{cases} X' = \frac{X}{Z} \\ Y' = \frac{Y}{Z} \\ Z' = \frac{Z}{Z} \end{cases} \begin{cases} X' = \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}} \\ Y' = \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}} \\ Z' = 1 \end{cases} \quad (3)$$

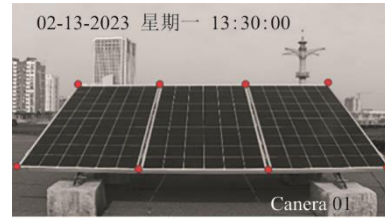
令 $a_{33}=1$, 展开式(3), 得到一个点的情况。

$$\begin{cases} a_{11}x + a_{12}y + a_{13} - a_{31}xX' - a_{32}X'y = X' \\ a_{21}x + a_{22}y + a_{23} - a_{31}xY' - a_{32}Y'y = Y' \end{cases} \quad (4)$$

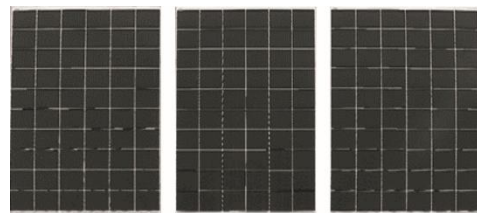
方程中共有 8 个未知数, 在求解的时候, 需要列出 8 组方程, 即分别在源图像和目标图像上人为

选择 4 个点。

图 6 为图像透视变换处理。图 6a) 中红点为 8 个源目标点, 取点方式为人工取点, 左侧 4 个为清洁板目标点, 中间 4 个为积灰板 (15 天清洗 1 次) 目标点, 右侧 4 个为积灰板 (30 天清洗 1 次) 目标点, 其透视变换结果分别如图 6b)~图 6d) 所示。



a) 图像区域标点划分



b) 左侧清洁板 c) 中间积灰板 d) 右侧积灰板

图 6 图像透视变换处理

Fig.6 Image perspective transformation processing

2.3 平均灰度值

灰度直方图是用来描述图像灰度级分布的函数, 用来统计图像中不同灰度值在图像中出现的频率^[23], 表示为:

$$P(k) = \frac{n_k}{n} \quad (5)$$

$$\sum_{k=0}^{L-1} P(k) = 1 \quad (6)$$

式中: $P(k)$ 为不同灰度值在图像中出现的频率; k 为在第 k 级的灰度值 ($k=0, 1, \dots, L-1$); n_k 为灰度值为 k 时的像素个数; n 为图像中的总像素数; L 为灰度的级数。

根据上面得到的积灰板与清洁板图像, 做出其对应的灰度直方图, 结果如图 7 所示。通过直方图来判断积灰与清洁的差别, 结果并不明显, 故引入平均灰度值 (mean gray value) 的概念, 可表示为:

$$M_{GV} = \frac{\sum_{i=0}^{255} i \times N_i}{n} \quad (7)$$

式中: M_{GV} 为平均灰度值; i 为灰度值 (0~255); N_i 为 i 灰度值下的像素个数; n 为图片的像素总数。

通过式(7)计算积灰板和清洁板的平均灰度值,

左侧清洁板平均灰度值为 57.1，中间积灰板平均灰度值为 68.2，右侧积灰板平均灰度值为 70.1，2 个积灰板在相同时间段内达到的平均灰度值相近，且均大于清洁板的平均灰度值。

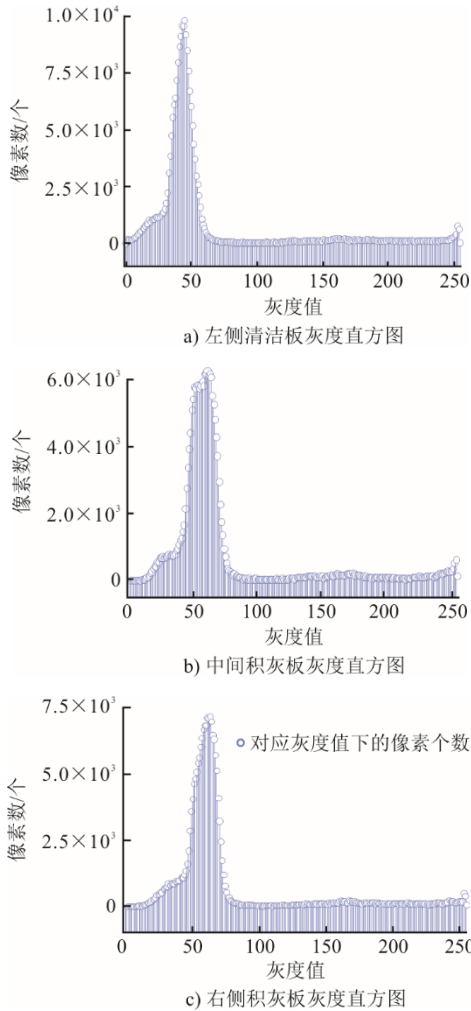


图7 图像灰度直方图
Fig.7 Image grayscale histogram

2.4 平均灰度值与积灰密度的关联分析

在 2023 年 3 月 1 日至 2023 年 4 月 20 日，依托光伏积灰可视化实验台进行了一系列实验。实验过程中，按照固定的时间间隔进行收灰操作，并在每次收灰之前，利用相机捕捉光伏板的积灰状态。

收灰的具体流程：首先使用湿巾细致地擦拭光伏板上的积灰，确保积灰被有效移除；随后，将湿巾放入装有水的铁盘中，进行彻底的清洗，待湿巾清洗完毕后，将铁盘转移至烘干箱内，进行烘干处理，直至铁盘内的水分完全蒸发；完成烘干后，对铁盘进行称重，并减去空铁盘的原始质量，所得差值即为收集到的积灰量。将这一积灰量除以光伏板的表面积，从而计算出积灰密度。

在整个实验期间，共执行了 51 次收灰操作。为了直观地看出积灰密度的变化，挑选 4 张实验所拍摄的图像（图 8），分别对应积灰 7 天、积灰 14 天、积灰 21 天及积灰 28 天的光伏板积灰状态，图 8 中 4 张图像的积灰密度分别为 0.39、0.88、1.18、1.81 g/m²。接着对每次操作前拍摄的 51 张图片进行灰度化和透视变换处理，利用灰度直方图计算这些图片的平均灰度值，积灰密度与平均灰度值的对应关系如图 9 所示。

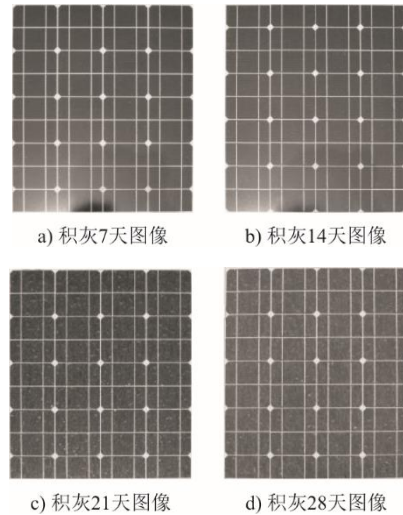


图8 积灰密度变化
Fig.8 Changes in ash density

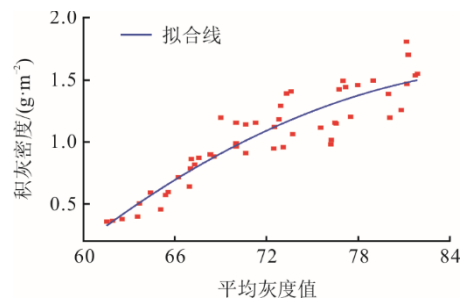


图9 积灰密度与平均灰度值关系
Fig.9 Relationship between ash density and average grayscale value

由图 9 可见，积灰密度与平均灰度值之间存在对应关系。而积灰密度又可以很好地反映积灰程度，故选取平均灰度值作为积灰程度的度量。

3 光伏板积灰程度识别方法

3.1 图像融合方法

本文利用 MATLAB 软件实现对红外图像和可见光图像的融合，采用的图像融合方法如下。

1) 对应像素取大(小)值 假定进行图像融合操作的图像分别为 A、B，图像大小均为 M×N，

融合之后的图像为 F , 图像融合的计算过程表示为:

$$F(m,n) = \max(\text{or min})\{A(m,n), B(m,n)\} \quad (8)$$

式中: m 、 n 分别为图像中像素对应的行号和列号。

图像融合时, 对于原始图像 A 和 B 中的每一对对应位置 (m, n) 的像素, 比较它们的灰度值。然后, 选取灰度值较高 (或较低) 的像素, 将其作为融合图像 F 在相同位置 (m, n) 的像素。

2) 对应像素取均值 计算 2 张原始图像在对应位置处像素灰度值的加权平均, 并将这个加权平均结果设置为融合图像在该位置的像素灰度值^[24]。

3) 区域能量算法 虽然通常涉及像素的灰度值和其邻域, 但在某些情况下, 可以简化为仅考虑单个像素点及其周围区域。为了计算中心像素的区域能量, 选取一个 3×3 的图像区域, 将每个像素的灰度值乘以相应的权重, 然后将这些加权值相加。通过遍历整个图像, 得到一个与原始图像大小相同的区域能量矩阵^[25]。其数学表达式为:

$$A_{RE}(i, j) = \sum_{-p}^p \sum_{-q}^q w(p, q) \times |L_{A, N}(i + p, j + q)| \quad (9)$$

式中: p 、 q 为区域的大小; w 为权重; $L_{A, N}$ 为金字塔的第 n 层; (i, j) 为邻域的中心点, 也是能量矩阵中的第 (i, j) 点。

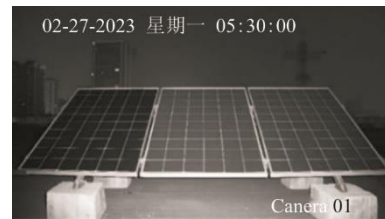
3.2 图像识别效果对比

基于双光谱影像融合实验台, 通过摄像头在自然条件下捕捉光伏板的积灰状态, 分别在凌晨和中午 2 个时段拍摄, 凌晨采集得到红外图像, 而中午则采集得到可见光图像。本文采用数据集涵盖了从 2023 年 2 月 13 日至 2023 年 3 月 10 日期间的图像数据。在 2023 年 2 月 13 日, 对 3 块光伏板进行清洁处理, 确保 3 块光伏板的起始状态一致; 随后, 右侧 2 块光伏板在自然环境中自然积灰, 而左侧光伏板则始终保持清洁状态。2023 年 3 月 1 日对中间光伏板进行清洁处理后继续在自然条件下积灰。

在整个实验期间, 共拍摄 26 张红外图像和 26 张可见光图像, 对图像进行融合处理, 将融合图像与可见光图像、红外图像汇总到一起构成图像数据集, 7 类图像数据集如图 10 所示。



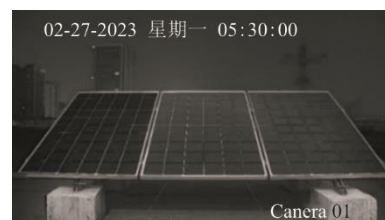
a) 可见光图像



b) 红外图像



c) 对应像素取大值融合图像



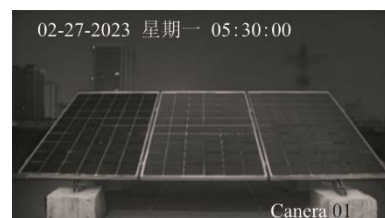
d) 对应像素取小值融合图像



e) 对应像素取均值融合图像



f) 区域能量取大值融合图像



g) 区域能量取小值融合图像

图 10 7 类图像数据集

Fig.10 Seven types of image datasets

分别对这 7 类图像进行图像识别, 左侧清洁板图像在 7 种处理方式下的平均灰度值变化如图 11 所示。由图 11 可见, 实验期间左侧清洁板积灰程

度虽略有波动，但整体稳定。

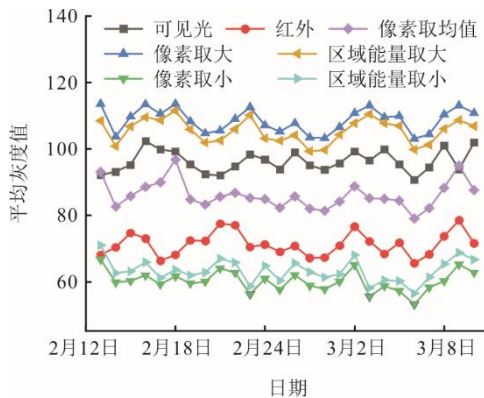


图 11 左侧清洁板平均灰度值变化

Fig.11 Change of the average grayscale value of the left cleaning board

中间积灰板图像在 7 种处理方式下的平均灰度值变化如图 12 所示。由图 12 可见，2023 年 2 月 13 日至 2023 年 2 月 28 日期间，由于中间积灰板处于自然积灰状态，通过图像识别反映出来的光伏板积灰程度持续增大，2023 年 3 月 1 日对中间积灰板进行清洗，光伏板的积灰程度瞬间降低，基本与 2023 年 2 月 13 日的起始积灰程度持平，之后积灰程度又处于持续增大的状态。

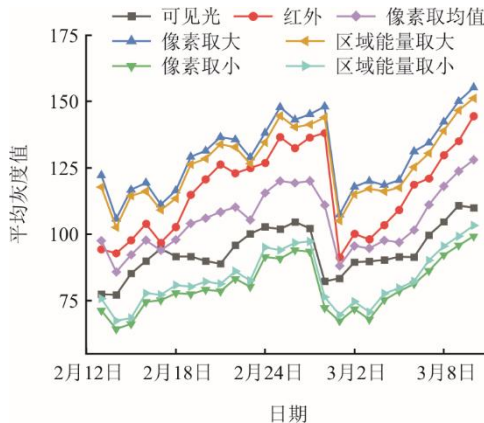


图 12 中间积灰板平均灰度值变化

Fig.12 Change in average grayscale value of the middle ash accumulation board

右侧积灰板图像在 7 种处理方式下的平均灰度值变化如图 13 所示，由图 13 可见，在实验期间，右侧积灰板一直处于自然积灰状态，通过图像识别反映出来的积灰程度处于持续增大的状态，变化趋势明显。

将实验期间每天对应的右侧积灰板平均灰度值与左侧清洁板平均灰度值作差，可以更加直观地观察积灰程度的变化，平均灰度值差值的变化如图 14 所示。

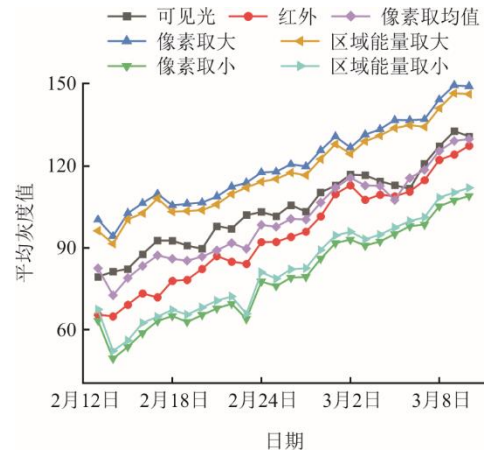


图 13 右侧积灰板平均灰度值变化

Fig.13 Change of the average grayscale value of the right ash accumulation board

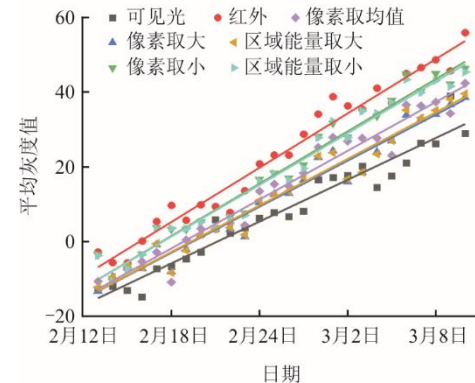


图 14 平均灰度值差值变化

Fig.14 Change of the average grayscale value difference

分别对这 7 类图像计算出来的平均灰度值差值变化进行线性拟合，使用 R^2 来评价拟合曲线的拟合效果^[26]， R^2 越大，拟合效果越好，计算公式为：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

式中： y_i 为第 i 个样本的实际值； \hat{y}_i 为第 i 个样本的预测值； \bar{y} 为所有真实值的平均值。拟合效果见表 5。

表 5 拟合效果
Tab.5 Fitting effect

| 图像类型 | R^2 |
|-----------|-------|
| 可见光图像 | 0.914 |
| 红外图像 | 0.964 |
| 对应像素取大值融合 | 0.935 |
| 对应像素取小值融合 | 0.932 |
| 对应像素取均值融合 | 0.928 |
| 区域能量取大值融合 | 0.937 |
| 区域能量取小值融合 | 0.935 |

由表 5 可见, 红外图像对应下的平均灰度值差值拟合效果最好, 红外图像对光伏板积灰程度的识别精度最高, 在 7 类图像的识别中, 红外图像识别反映出来的平均灰度值差值拟合线的斜率最大, 积灰程度变化趋势更显著, 可以精准地反映出光伏板积灰程度的变化。

4 结 论

本文基于光伏积灰可视化实验台, 证实光伏板的积灰密度与光伏板图像的平均灰度值存在对应关系, 基于此对应关系, 采用 5 种图像融合方法对可见光图像与红外图像进行图像融合, 将融合之后的 5 类图像与可见光图像、红外图像汇总, 分别对这 7 种图像进行识别与分析, 得到以下结论。

1) 根据光伏积灰可视化实验台, 建立光伏板积灰密度与积灰板图像平均灰度值之间的对应关系, 进一步推出可用平均灰度值代替积灰密度, 以此来反映光伏板积灰程度。

2) 对融合之后的 5 类图像与可见光图像、红外图像进行识别与分析, 结果表明红外图像对光伏板积灰程度的识别效果受辐照度的影响最小, 精度最高, 反映出来的积灰程度变化最明显。

[参 考 文 献]

- [1] 田川, 李兴华, 屈美州. 分布式光伏发电技术特性分析[J]. 光源与照明, 2023(12): 98-100.
TIAN Chuan, LI Xinghua, QU Meizhou. Analysis of characteristics of distributed photovoltaic power generation technology[J]. Light Source and Illumination, 2023(12): 98-100.
- [2] 于洋, 刘博杰, 唐庆辉, 等. 双碳目标下电力行业改革路径探析——基于低碳基荷发电技术碳减排成本研究[J]. 建筑经济, 2023, 44(增刊 2): 65-69.
YU Yang, LIU Bojie, TANG Qinghui, et al. Exploration of the reform path of the power industry under the dual carbon target: based on the research of carbon emission reduction cost of low-carbon base load power generation technology[J]. Building Economy, 2023, 44(Suppl.2): 65-69.
- [3] 张仲华, 刘悦晗, 周立. “光储直柔”建筑技术体系的研究与应用[J]. 建设科技, 2023(24): 30-32.
ZHANG Zhonghua, LIU Yuehan, ZHOU Li. Research and application of the “light storage, straight and flexible” architectural technology system[J]. Construction Technology, 2023(24): 30-32.
- [4] 王海, 伍俊研, 谢沛烁. 液浸背板式聚光光伏系统性能实验研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(27): 50-53.
WANG Hai, WU Junyan, XIE Peishuo. Experimental study on the performance of liquid immersion backboard concentrated photovoltaic system[J]. Technological Innovation and Application, 2023, 13(27): 50-53.
- [5] 张颖, 杨刘元, 王浩翔, 等. 光伏储热储氢综合能源系统设计与研究[J]. 新能源科技, 2023, 4(1): 46-49.
ZHANG Ying, YANG Liuyuan, WANG Haoxiang, et al. Design and research of photovoltaic thermal and hydrogen storage integrated energy system[J]. New Energy Technology, 2023, 4(1): 46-49.
- [6] 陈纳新, 刘震, 陈一锋, 等. 光伏组件表面清洁技术的研究及应用进展[J]. 太阳能, 2023(8): 72-78.
CHEN Naxin, LIU Zhen, CHEN Yifeng, et al. Research and application progress of surface cleaning technology for photovoltaic modules[J]. Solar Energy, 2023(8): 72-78.
- [7] 姚天祺, 柴琳, 肖凡, 等. 基于改进天鹰优化算法的光伏阵列多峰最大功率跟踪控制[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 98-105.
YAO Tianqi, CHAI Lin, XIAO Fan, et al. Multi peak MPPT control of photovoltaic array based on improved aquila optimizer[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 98-105.
- [8] 栗遇春, 王刚, 李瑞, 等. 基于氢能的分布式家庭能源系统容量配置[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 49-58.
LI Yuchun, WANG Gang, LI Rui, et al. Capacity configuration of distributed home energy system based on hydrogen energy[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 49-58.
- [9] YANG M D, JI J, GUO B. Soiling quantification using an image-based method: effects of imaging conditions[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, 10(6): 1780-1787.
- [10] SIMONAZZI M, CHIORBOLI G, COVA P, et al. Smart soiling sensor for PV modules[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 114: 113789.
- [11] ARIAS VELÁSQUEZ R M, PANDO EZCURRA T T. Dust analysis in photo-voltaic solar plants with satellite data[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2024, 15(1): 102314.
- [12] CRUZ-ROJAS T, FRANCO J A, HERNANDEZ-ESCOBEDO Q, et al. A novel comparison of image semantic segmentation techniques for detecting dust in photovoltaic panels using machine learning and deep learning[J]. Renewable Energy, 2023, 217: 119126.
- [13] FAN S, WANG X, WANG Z, et al. A novel image enhancement algorithm to determine the dust level on photovoltaic(PV) panels[J]. Renewable Energy, 2022, 201: 172-180.
- [14] 曹珍贵, 吕旻妹, 张宗唐. 基于热成像技术和深度学习的煤矸石识别方法[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2021, 31(1): 48-52.
CAO Zhenguan, LYU Minshu, ZHANG Zongtang. Coal gangue recognition method based on thermal imaging technology and deep learning[J]. Journal of Hunan University of Engineering (Natural Science Edition), 2021, 31(1): 48-52.
- [15] 冯麒燊, 李洋鹏, 陈芝源, 等. 面向非结构环境的柑桔图像分割聚类方法[J]. 福建电脑, 2021, 37(8): 12-14.
FENG Qishen, LI Yangpeng, CHEN Zhiyuan, et al. An unstructured environment oriented clustering method for the citrus fruit image segmentation[J]. Fujian Computer, 2021, 37(8): 12-14.
- [16] 董翔宇, 张中, 朱俊, 等. 一种基于深度神经网络的变电站巡检机器人路面识别方法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(增刊 2): 389-391.
DONG Xiangyu, ZHANG Zhong, ZHU Jun, et al. A road surface recognition method for substation inspection robots based on deep neural networks[J]. Computer Application Research, 2020, 37(Suppl.2): 389-391.

- [17] 张炜, 黄锋, 梁俊斌. 变电站巡检机器人读取仪表指针示值方法研究[J]. 机械设计与制造, 2023(5): 296-299.
ZHANG Wei, HUANG Feng, LIANG Junbin. The research on the method of identify pointer meter by robot in spection in substation[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2023(5): 296-299.
- [18] ALHUMAIDAN B, ALGHOFAILY S, QHAHTANI A M, et al. Parallel image processing: taking grayscale conversion using open MP as an example[J]. Journal of Computer and Communications, 2024, 12(2): 1-10.
- [19] YANG Y G, WANG B P, ZHOU Y H, et al. Efficient color image encryption by color-grayscale conversion based on steganography[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 82(7): 10835-10866.
- [20] ELAZAB A, WANG C, JIA F, et al. Segmentation of brain tissues from magnetic resonance images using adaptively regularized kernel-based fuzzy C-means clustering[J]. Computational & Mathematical Methods in Medicine, 2015(5): 485495.
- [21] VELTRUP R, KNIESBURGES S, SEMMLER M. Influence of perspective distortion in laryngoscopy[J]. Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR, 2023, 66(9): 3276-3289.
- [22] MARCEL, GAOL F L, SUPANGKAT S H, et al. Toward digital transformation adoption: a conceptual framework from transformational leadership perspective[J]. Procedia Computer Science, 2024, 234: 1175-1182.
- [23] RIVERA-AGUILARBEATRIZ A, CUEVAS E, PÉREZ M, et al. A new histogram equalization technique for contrast enhancement of grayscale images using the differential evolution algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2024, 36(20): 12029-12045.
- [24] 袁桂霞, 周先春. 基于双正交小波变换耦合区域梯度特征的遥感图像融合算法[J]. 光学技术, 2018, 44(6): 8.
YUAN Guixia, ZHOU Xianchun. Remote sensing image fusion algorithm based on biorthogonal wavelet transform coupled with regional gradient features[J]. Optical Technology, 2018, 44(6): 8.
- [25] FIDES R S, DARIN P C, FRANCESCA R, et al. Evaluation of the impact of a novel denoising algorithm on image quality in dual-energy abdominal CT of obese patients[J]. European Radiology, 2023(10): 33.
- [26] 牛海明, 崔青汝, 刘厚旭. 积灰对光伏电池板输出特性影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 110-117.
NIU Haiming, CUI Qingru, LIU Houxu. Effect of ash accumulation on output performance of photovoltaic panels[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 110-117.

(责任编辑 杜亚勤)