

doi: 10.7690/bgzdh.2026.06.020

基于图像处理的光伏面板表面清洁度评估方法

刘宏科, 陶卫军

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210000)

摘要: 为了解决光伏面板表面清洁作业效果自动评估问题, 提出一种基于图像形态学滤波的光伏面板表面清洁度评估方法。通过对光伏面板清洁后的效果进行实时检测与评估, 将采集到的光伏面板表面图像进行实验验证。考虑到光伏面板表面的栅线和可能存在的遮挡物在灰尘量化过程中产生的不利影响, 采用基于直方图的二值化分割方法和基于 2 个方向的闭运算处理的掩膜制作方法, 对光伏板栅线区域和可能存在的遮挡物区域进行消除。实验结果表明: 该方法可以有效去除光伏面板图像中的栅线和遮挡物区域, 有效检测顽固污渍或遮挡物, 实现对光伏面板表面清洁度的实时评估。

关键词: 形态学滤波; 二值化分割; 掩膜; 图像处理

中图分类号: TP931.41 **文献标志码:** A

Evaluation Method of Photovoltaic Panel Surface Cleanliness Based on Image Processing

Liu Hongke, Tao Weijun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to solve the problem of automatic evaluation of photovoltaic panel surface cleaning effect, an evaluation method of photovoltaic panel surface cleanliness based on image morphological filtering is proposed. Through the real-time detection and evaluation of the cleaning effect of photovoltaic panels, the collected surface images of photovoltaic panels are verified by experiments. Considering the adverse effects of grid lines and possible occlusions on the surface of photovoltaic panels in the process of dust quantification, a histogram based binary segmentation method and a mask making method based on two directions of closed operation are used to eliminate the grid lines and possible occlusions on the surface of photovoltaic panels. The experimental results show that the proposed method can effectively remove the grid lines and occlusion areas in the image of photovoltaic panels, effectively detect stubborn stains or occlusions, and realize the real-time evaluation of the surface cleanliness of photovoltaic panels.

Keywords: morphological filtering; binary segmentation; mask; image processing

0 引言

随着太阳能发电技术的成熟, 理论瓶颈不断被突破, 太阳能发电领域取得了丰硕的研究成果。光伏发电是利用光伏面板内部的半导体界面的光生伏特效应而将光能直接或间接转化为电能的一种技术^[1]。光伏面板的长时间工作会在表面沉积灰尘, 甚至残留鸟粪、树叶等遮挡物, 严重阻碍光伏面板的发电效率^[2]。光伏面板清洁效果的评估工作可以有效检测光伏面板表面灰尘的累积状况和鸟粪树叶等顽固污渍或遮挡物的遮挡情况, 便于清洁装备规划合理的清洁策略。张姝伟^[3]提出一种基于改进的三阶插值算法以消除光伏面板图像的条带噪声, 在去噪声图像的基础上统计灰尘的灰度占比, 以此量化光伏面板上的灰尘累积量。此方法可以有效降低条带噪声对统计灰尘灰度占比的不利影响, 但该方法

无法排除鸟粪、树叶等顽固污渍或遮挡物对统计灰尘灰度占比的影响。朱聘^[4]提出一种基于直方图的自适应阈值的二值化分割方法以凸显出灰尘特征, 在二值化图像的基础上, 统计灰尘像素点数量占整张图像像素点数量的百分比, 以此量化地面上的灰尘累积情况。在此过程中, 通过自适应阈值可以有效凸显灰尘特征, 但是仅针对单一背景下的灰尘识别有效, 无法适用于具有条带噪声的光伏面板背景。灰尘在光伏面板上大多均匀分布, 不具备明显边界, 基于深度学习的目标识别模型很难学习其特征并推理, 很难发挥目标识别模型的优越性^[5-6]。针对目前所述方法的缺陷和不足, 采用基于图像形态学滤波的方法来有效去除光伏面板条带噪声, 消除鸟粪树叶等顽固污渍或遮挡物对灰尘量化的不利影响, 从而提出一种光伏面板表面清洁度评估方法

收稿日期: 2024-12-08; 修回日期: 2025-01-21

第一作者: 刘宏科(1999—), 男, 山东人, 硕士。

并应用于光伏面板清洁过程中，对清洁后的效果进行实时评估并进行了实验验证。

1 光伏面板表面清洁度评估方法

光伏面板清洁机器人在执行光伏面板清洁任务的过程中，需要实时评估清扫后的效果，以对光伏面板清洁机器人下一步的动作进行决策。在这里，提出了一种基于图像形态学滤波的光伏面板表面清洁度评估方法来解决光伏面板表面灰尘的量化问题和顽固污渍的识别问题，从而实现光伏面板清洁效果的实时评估。

1.1 光伏面板表面图像处理流程

若要准确评估光伏面板表面的清洁效果，需去除光伏面板上的栅线以及鸟粪、树叶等顽固污渍或遮挡物等的不利影响。由此，提出基于形态学滤波制作掩膜的图像处理方法并通过此方法来消除这些不利影响，其具体处理流程如图 1 所示。

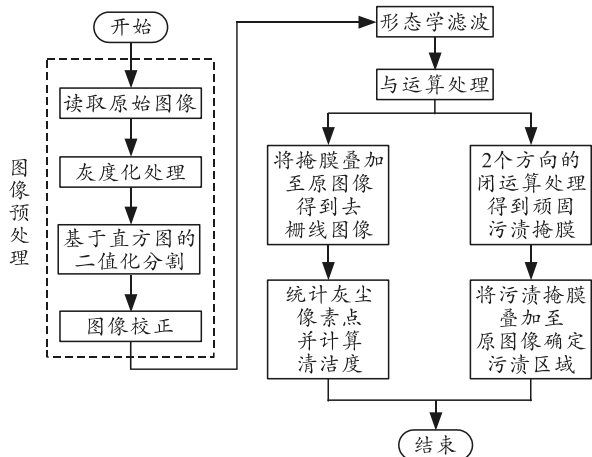


图 1 图像处理流程

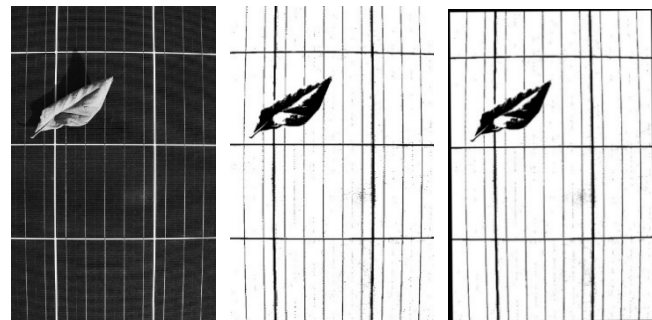
1.2 图像预处理

根据图 1 所示的光伏面板表面图像的处理流程，选取一种具有叶子作为遮挡物的典型光伏面板表面图片作为对象。在此过程中，利用 Visual Studio 2015 平台编制软件针对所选取的图片进行如图 1 中所述的处理流程，为光伏面板清洁效果实时评估提供支撑。图像预处理后如图 2 所示。

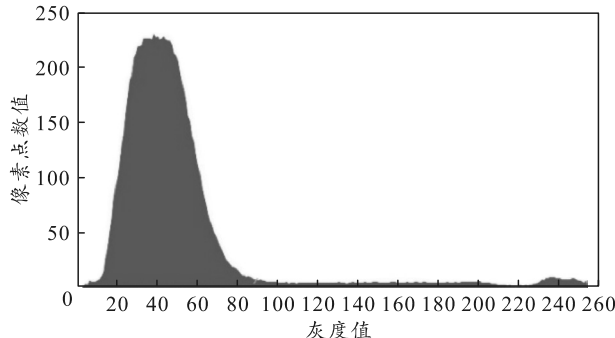
1) 灰度化处理。采集到的原始图像包含大量无关信息，为简化图像所包含的信息，加快处理速度，方便后续图像处理操作，对采集到的原始图像进行灰度化处理，将原始彩色三通道图像变换为单通道图像。

2) 基于直方图的二值化分割。图像二值化是指基于图像的灰度级进行图像分割的基本方法^[7]。对

原始彩色图像进行灰度化处理，通过遍历整张图像的像素点值并与设定阈值进行比较。



(a) 光伏面板图像 (b) 二值化分割 (c) 图像校正



(d) 灰度值统计

图 2 图像预处理后

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) > T \\ 255, & f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (1)$$

式中： $g(x, y)$ 为二值化处理后的图像的像素点值； $f(x, y)$ 为二值化处理前图像的像素点值； T 为二值化分割阈值； x 为图像像素点横坐标； y 为图像像素点纵坐标。

要将目标物体从图像背景中提取出来，需要选取合适的二值化阈值。可根据光伏面板图像的灰度值分布直方图来进行计算从而得到合适阈值^[8]。具体而言，在图 2(d)所示的光伏面板表面图像的灰度分布直方图中，可看到有 2 个波峰。左边第一个波峰代表光伏面板蓝色背景，左边第二个波峰代表光伏面板白色栅线、部分灰尘以及遮挡物。以这 2 个波峰间的波谷所在的灰度值(如图 2(d)中所取的灰度值 88)作为分割阈值，可将白色栅线、部分灰尘以及遮挡物有效分割出来，二值化处理后的图像如图 2(b)所示，栅线和遮挡物能够被较为完整的分割出来，但也保留了部分灰尘，此部分灰尘可通过后续形态学滤波消除。

3) 图像校正。形态学处理依赖于光伏面板图像中栅线水平和垂直分布的形态特点，但由于光伏面板清洁机器人在转弯时，图像中的栅线不可避免地

出现倾斜, 从而影响形态学处理的效果。由此可见, 在对图像进行形态学处理之前需要对图像进行校正: 首先, 对二值化分割图像进行 Canny 算子边缘检测以获得光伏面板图像中的栅线边缘; 其次, 采用霍夫线变换^[9-10]找出光伏面板图像中的所有直线; 计算并筛选出斜率 k 在区间 $[-1, 1]$ 的直线, 求出筛选出的每条直线的倾斜角并以其平均值作为光伏面板栅线的倾斜角; 在此基础上, 根据求出的光伏面板倾斜角进行仿射变换^[11]来对此图像的倾斜角度进行校正, 校正后的图像如图 2(c)所示, 图像中的栅线被校正到理想位置, 在校正过程中, 由于整张图像会旋转指定倾斜角度, 故图像边缘会产生黑色边缘。

1.3 图像形态学滤波和与运算处理

形态学滤波是指根据图像中目标物体的形状和规律进行的一系列操作, 最基本的形态学滤波包括膨胀和腐蚀^[12] 2 种。在进行形态学滤波时, 需要人为定义一核, 该核可以是任意形状和大小, 在核中定义一参考点, 一般取核的中心位置为参考点。膨胀处理是指取局部最大值的操作^[13], 其数学表达式为:

$$g(x, y) = \max_{(i, j) \in k} f(x+i, y+j) \quad (2)$$

式中: x 为图像像素点的横坐标; y 为图像像素点的纵坐标; $g(x, y)$ 为膨胀处理后图像中点 (x, y) 处的像素值; $f(x+i, y+j)$ 为膨胀处理前图像中被核覆盖的像素点的像素值; k 为选定的核区域。

腐蚀处理是指取局部最小值的操作^[13]:

$$g(x, y) = \min_{(i, j) \in k} f(x+i, y+j) \quad (3)$$

式中: x 为图像像素点的横坐标; y 为图像像素点的纵坐标; $g(x, y)$ 为腐蚀处理后图像中点 (x, y) 处的像素值; $f(x+i, y+j)$ 为腐蚀处理前图像中被核覆盖的像素点的像素值; k 为选定的核区域。

闭运算是指对图像先进行膨胀操作再进行腐蚀操作, 通过闭运算可以有效消除二值化图像中的小黑点噪声^[14]。

分析图 2(c)所示的光伏面板二值化图像可知, 光伏面板栅线具有狭长的形状特点, 并且有水平和垂直 2 个方向的位置排布, 仅通过选取合适的核的形状和大小一次性提取栅线位置较为困难。

如图 3 所示通过闭运算分别对水平和垂直 2 个方向分布的栅线进行形态学滤波。

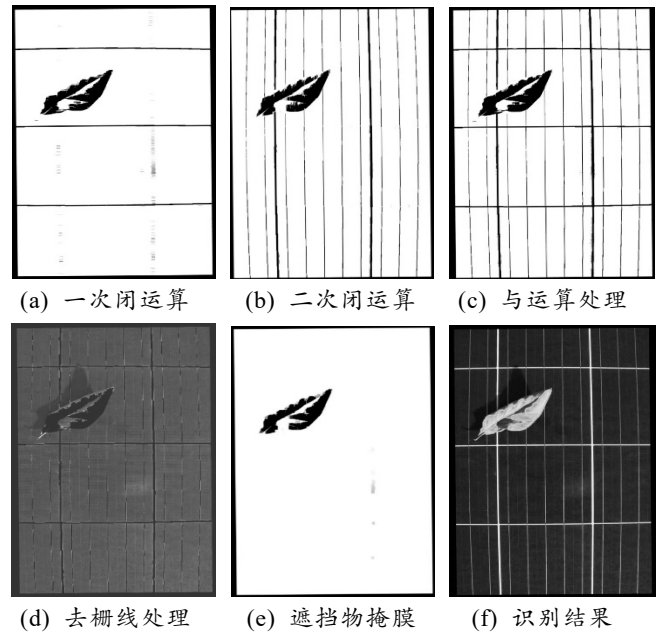


图 3 闭运算和与运算处理后

1) 垂直分布栅线的闭运算。此处形态学滤波的目的是消除光伏面板二值化图像中的垂直分布的栅线。从水平方向看, 由于消除的是具有狭窄特征黑色像素点区域, 故采用闭运算, 选取核的尺寸为长 10 个像素点、宽 1 个像素点的水平方向的矩形区域, 闭运算处理后的图像如图 3(a)所示, 图像中垂直分布的栅线被消除, 水平分布的栅线和遮挡物区域被较为完整的保留下来。

2) 水平分布栅线的闭运算。此处形态学滤波的目的是消除光伏面板二值化图像中的水平分布的栅线。从垂直方向看, 由于消除的是具有狭窄特征黑色像素点区域, 故采用闭运算, 选取核的尺寸为长 10 个像素点、宽 1 个像素点的垂直方向的矩形区域, 闭运算处理后的图像如图 3(b)所示, 图像中水平分布的栅线被消除, 垂直分布的栅线和遮挡物区域被较为完整的保留下来。

3) 图像的与运算处理。获得 2 个方向的闭运算处理图像后, 需将 2 个图像叠加得到完整掩膜图像, 对 2 次闭处理结果进行如下操作:

$$g(x, y) = f_1(x, y) \& f_2(x, y) \quad (4)$$

式中: x 为图像像素点的横坐标; y 为图像像素点的纵坐标; $f_1(x, y)$ 为图像 1 中像素点 (x, y) 的灰度值; $f_2(x, y)$ 为图像 2 中像素点 (x, y) 的灰度值; $g(x, y)$ 为 2 张图像与运算处理后对应像素点的灰度值。与运算处理后的图像如图 3(c)所示, 经过 2 个方向的闭运算和与运算处理后, 不仅可以获得完整的光伏面板栅线掩膜图像, 而且可以消除杂乱的黑点噪声。将

完整掩膜图像与原始灰度化图像叠加，便得到了去栅线的光伏面板表面图像，如图 3(d)所示，原始图像中的栅线和遮挡物区域基本被消除，为后续准确计算清洁度提供支撑。

4) 顽固污渍及遮挡物的识别。为了进一步确定出光伏面板表面是否有顽固污渍或遮挡物，可对上述得到的完整掩膜图像再次进行 2 个方向的闭运算处理，处理结果如图 3(e)所示，图像中的栅线区域被消除，只保留下了遮挡物区域。将遮挡物掩膜图像与原始图像叠加，并对叠加后的图像进行轮廓检测，筛选出合适大小的轮廓曲线，便可识别出图像中的顽固污渍或遮挡物区域，处理结果如图 3(f)所示，原始图像中的遮挡物区域被绿色轮廓线框选出来，有效实现了遮挡物的识别功能。

1.4 光伏面板表面清洁度计算与评估方法

对于光伏面板上的积灰累积状况，采用“清洁度”这一指标来表述，“清洁度”的定义如下：

$$\eta = \theta_1 / \theta_2 \quad (5)$$

式中： η 为清洁度； θ_1 为图像中灰尘像素点的总数量； θ_2 为图像中所有像素点的总数量。以“清洁度”指标衡量光伏面板表面的灰尘累积状况，遍历去栅线图像所有像素点的灰度值，筛选出满足下列条件的像素点：

$$C = \{(x, y) | f(x, y) > T\} \quad (6)$$

式中： C 为满足上述条件的像素点集； $f(x, y)$ 为图像中像素点 (x, y) 的灰度值； T 为分割灰尘和光伏面板背景的阈值，统计满足条件的像素点数量并计算清洁度。

对于光伏面板上的顽固污渍检测，采用“是否有顽固污渍”这一指标来表述。在顽固污渍及遮挡物识别的过程中，若筛选出合适大小的轮廓，则检测结果为“有顽固污渍”；若没有筛选出合适大小的轮廓则检测结果为“无顽固污渍”。

2 实验平台及结果分析

实验平台为光伏面板清洁系统，光伏面板清洁系统由光伏面板清洁机器人和远程地面站 2 部分组成。其中光伏面板清洁机器人运行于光伏面板表面执行清洁任务；地面站用于监测机器人的运行状态并执行图像处理算法以评估清洁效果。

如图 4 所示，光伏面板清洁机器人由清扫模块、驱动模块和图像采集模块 3 部分组成。其中，清扫模块用于清洁光伏面板表面的污渍；驱动模块负责

机器人的运动；图像采集模块用于捕获实时图像。光伏面板清洁机器人内部安装有电源模块、数传模块、控制器、图传模块等，图传模块可以将图像采集模块采集到的图像实时传输到远程地面站。

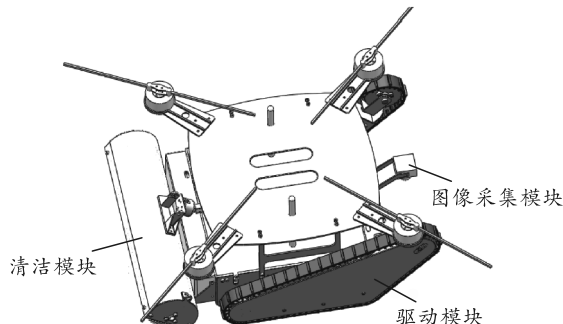


图 4 光伏面板清洁机器人

根据上述的图像处理方法与光伏面板表面清洁度计算方法，分别对 3 张不同积灰状况的现场采集图片进行处理，得到如图 5 所示的实验结果。

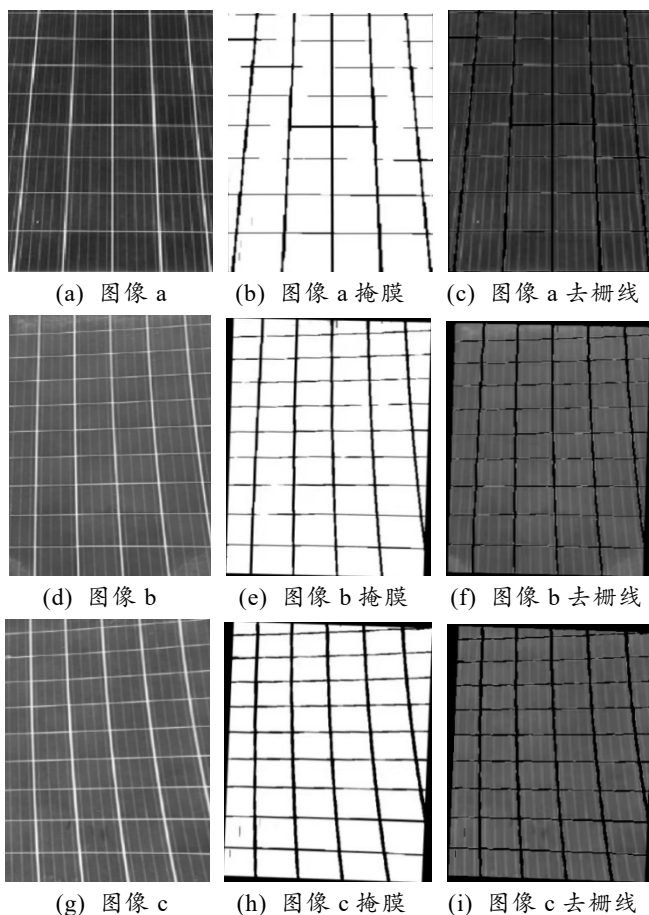


图 5 去栅线处理后对比

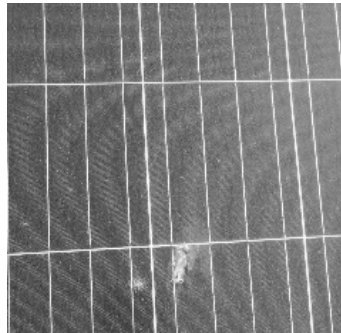
从图 5 中可见，基于形态学滤波制作掩膜的图像处理方法能够有效去除不同积灰状况的光伏面板图像中的栅线区域从而准确计算清洁度。不同积灰状况的光伏面板的清洁度如表 1 所示。

表 1 实验数据

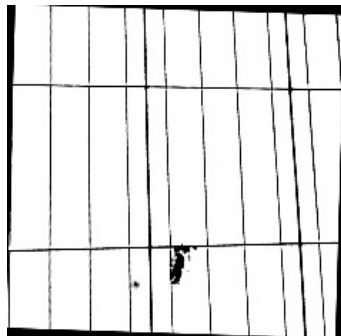
图序 i	灰尘像素点数量 θ_1	图像像素点数量 θ_2	清洁度 $\eta/\%$
1	347, 20	793, 99	4.4
2	436, 81	753, 71	58.0
3	470, 59	778, 28	60.5

从表 1 中可见：所提出的光伏面板清洁度计算方法能够有效量化不同积灰状态下的光伏面板表面的积灰量。

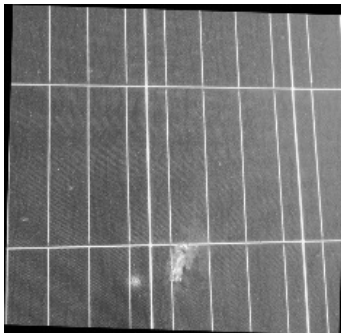
对于光伏面板上有顽固污渍或遮挡物的情况，该方法识别效果如图 6 所示。



(a) 光伏面板图像



(b) 掩膜



(c) 污渍识别结果

图 6 顽固污渍识别

从图 6 中可见，所提出的基于形态学滤波制作掩膜的图像处理方法可以有效识别出顽固污渍和遮挡物的存在。

3 结束语

笔者提出了一种基于图像形态学滤波的光伏面板表面清洁度评估方法，并应用于光伏面板的清洁作业中。实验结果表明，该清洁效果评估方法可以有效去除光伏面板表面栅线以及遮挡物对灰尘量化的不利影响，2 个方向的闭运算处理不仅可以完整提取栅线区域，也有效抑制了小型黑洞噪声。对于光伏面板有顽固污渍或者遮挡物的情况，该方法可以有效检测顽固污渍或者遮挡物目标区域，实现了对光伏面板表面清洁度的实时评估。

参考文献：

- [1] 曲君乐, 吕斌, 吴承璇, 等. 太阳能电池板智能清洁装置的研制[J]. 山东科学, 2013(4): 51-55.
- [2] 杨景发, 邱鹏飞, 李冰, 等. 太阳能电池板跟踪与除尘装置的设计[J]. 机械设计与制造, 2013(9): 60-66.
- [3] 张姝伟. 基于视觉的光伏板积灰状态监测与性能评估管[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.
- [4] 朱聘. 基于深度学习的地面清洁度等级评估关键技术研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2022.
- [5] 王一田. 基于计算机视觉的垃圾检测与清洁度评定方法研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [6] 张亚东. 基于机器视觉的双臂机器人桌面清理算法研究及应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [7] 黄钰雯. 基于无人机视觉的大规模光伏电池板检测技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [8] 马永力, 曾瑄, 黄志开, 等. 数字碑帖图像的二值化算法研究[J]. 湖北理工学院学报, 2022, 38(4): 18-22.
- [9] 顾友霖, 郑再象, 刘洋, 等. 基于霍夫变换的车道线检测跟踪及车道偏离预警[J]. 农业机械与装备, 2023: 129-132.
- [10] 徐硕, 刘倩. 应用霍夫变换对车道线进行检测[J]. 网络安全技术与应用, 2023(8): 53-55.
- [11] 丁昕祯. 基于机器视觉的实训作品评价系统[J]. 机械设计, 2023, 40: 184-188.
- [12] 周波, 张尚悦. 基于小波包变换和形态学滤波的小目标检测算法[J]. 计算机与数字工程, 2023, 51(4): 916-919.
- [13] 苏国庆. 荒漠化地区光伏板表面积尘的识别与分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- [14] 丁世浩. 基于计算机视觉的光伏组件缺陷诊断研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.