

基于图像处理的光伏组件热斑缺陷检测方法

林维修[†], 李峰, 王海峰, 许育燕, 金科扬

(宁波送变电建设有限公司运维分公司, 浙江 宁波 315000)

摘 要: 为精准检测光伏组件热斑缺陷, 分析热斑所占面积和位置, 提出了基于图像处理的光伏组件热斑缺陷检测方法。计算每一块区域热量发射功率, 分析光伏组件热斑红热外图像灰度直方图特征。采用空间域方法处理图像中像素点, 通过构建图像线性增强函数改善图像清晰度。在 Image Net 数据库上, 提取热斑特征, 采用 B 样条最小二乘拟合法, 求取样条基函数关于范数的最佳逼近问题, 获取热斑曲线和样本点之间偏差最小值, 消除直方图中毛刺和局部起伏, 检测出图像中热斑。实验结果可知, 该方法正常情况下热斑面积结果与实际数据最小差值为 0.1 cm^2 ; 非均匀性噪声影响情况下, 热斑位置检测结果与原始图像一致, 说明使用所研究方法检测结果精准。

关键词: 图像处理; 光伏组件; 热斑缺陷检测; B 样条; 最小二乘拟合

中图分类号: TK514

文献标识码: A

Photovoltaic Module Hot Spot Defect Detection Method Based on Image Processing

LIN Weixiu[†], LI Feng, WANG Haifeng, XU Yuyan, JIN Keyang

(Operation and Maintenance Branch, Ningbo Power Transmission and Transformation

Construction Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract: In order to accurately detect the hot spot defects of photovoltaic modules, analyze the area and position occupied by the hot spots, and propose a thermal spot defect detection method for photovoltaic modules based on image processing. The heat emission power of each area was calculated, and the grayscale histogram characteristics of the red hot external image of the PV module were analyzed. The spatial domain method is used to process the pixels in the image, and the image clarity is improved by constructing the image linear enhancement function. On the Image Net database, the hot spot features are extracted, the B-spline least squares fitting is used, the best approximation problem of the spline basis function on the norm is obtained, the minimum deviation between the hot spot curve and the sample point is obtained, the glitch and local undulation in the histogram are eliminated, and the hot spot in the image is detected. The experimental results show that the minimum difference between the hot spot area results and the actual data under normal conditions is 0.1 cm^2 , and the hot spot position detection results are consistent with the original images under the influence of non-uniform noise, indicating that the detection results using the studied method are accurate.

Key words: image processing; PV module; hot spot defect detection; B-spline; least squares fitting

目前, 光伏发电已是一种主要的可再生能源技术, 它具有零污染、零成本、维护费用低等优点, 被

广泛地用于各个行业, 在各类屋顶上都可以看到光伏阵列。然而, 在使用过程中, 由于受到各种因素

的干扰,光伏阵列不可避免地会出现各种问题,从而导致光伏阵列的工作效率下降,严重的还会导致光伏阵列损坏。因此,光伏组件的故障探测受到了越来越多的重视,在光伏组件上进行热斑缺陷检测是非常关键的一项工作。在光伏阵列运行过程中,有些光伏阵列会因为被遮蔽、有杂质等因素,导致被遮蔽部位的温度比未被遮蔽部位的温度高很多,随着时间的推移,会形成一片显著的高温斑点,高温斑点达到某种程度后,会导致光电阵的焊接部位熔化,栅线破裂,从而造成整个光电阵列烧损,这就是所谓的“热斑点”。数据显示,“热斑点”现象会大幅降低光伏发电的发电效率,缩短光伏组件的使用年限,使光伏组件的寿命减少 10%。当前,对光伏组件的热斑缺陷进行诊断的方法,一般都是以电流电压和神经网络为主。文献[1]采用基于离群因子检测光伏组件热斑缺陷,该方法具有快速、自动化程度高的反应速率和高度的自动控制能力,但是该方法难以获得特定的缺陷位置和缺陷的表达式;文献[2]提出了基于轻量化卷积神经网络的检测方法,与常规反向传播神经网络相比,该方法具有较高的识别效率,不仅可以快速有效地进行光伏热斑缺陷的检测,而且可以有效地预防因错位引起的无法弥补的损失。然而,该技术仅能探测到有无热斑缺陷,不能提供热斑缺陷的详细信息,也无法精确定位热斑位置。面对上述传统方法存在的问题,结合图像处理技术检测光伏组件热斑缺陷。该方法采用空间域方法对图像进行线性增强处理,提高图像清晰度。结合 B 样条最小二乘拟合法,检测图像中的热斑点。

1 光伏组件热斑红外图像灰度直方图特征分析

光伏发电本质上指的是阳光照射在半导体结构上,从而产生了一个空穴和一个电子对。在半导体结构结电场的影响下,空穴从一区流入另一区,电子流向正好相反,双方之间产生了一个电位差^[3]。之后,在这个电压的影响下,会产生一个新的电流。光伏组件传热过程如图 1 所示。

太阳光被光伏阵列吸收,再被密集矩阵采集,转化成电能流入母线,再从母线流入终端,为负载提供电能。在此基础上,将入射光分成三个部分,分别是电流、导热和反射^[4]。由于大部分的射线都

被转换成了热能,所以这个缺损区将会变得更高。利用红外热成像仪对光伏阵列的表面温度进行了测定。除了黑色主体之外,其他物质的每一块区域热量发射功率可以通过下列公式得到:

$$P = \lambda \cdot \epsilon \cdot S \cdot T$$

(1)

公式(1)中, λ 表示太阳光照射率; ϵ 表示玻尔兹曼常数; S 表示热斑面积; T 表示热斑附近温度。图像的灰阶直方图是代表图像中的灰阶像素数,以其横轴为灰阶,以其所见的频率为纵轴^[5]。在一个“波峰”的灰色柱状结构中,代表这个灰色区域内的像素有更多的频率,也就是说对应的像素出现概率高,相反,“波谷”表示这个灰色的像素的出现频次少,也就是说对应的像素出现概率低,如图 2 所示。

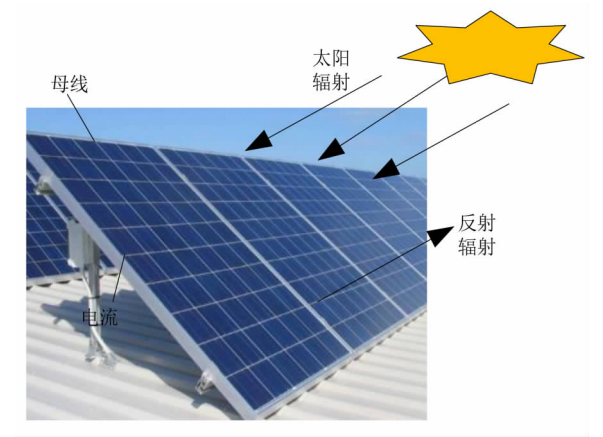


图 1 光伏组件传热过程

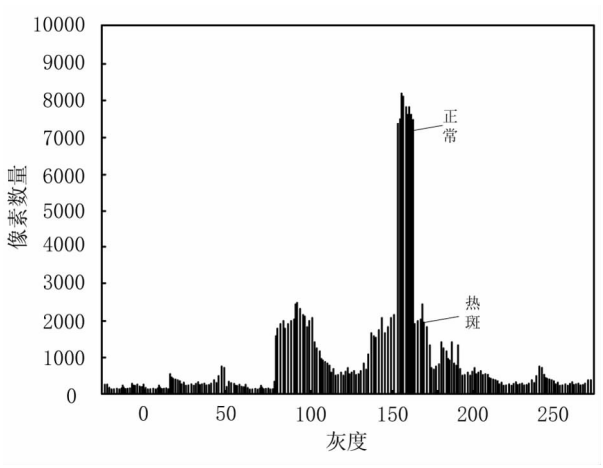


图 2 灰度直方图特征

由图 2 可知,灰度直方图中呈现 1 个峰值和多个波谷,其中光伏组件正常部分的像素数量较高,即为峰值,距离该峰值最近且靠右的第二峰值即为热斑。

2 基于红热外图像的光伏组件热斑缺陷检测方法

基于热成像技术的光伏组件热斑缺陷检测方法需要对包含丰富色彩的图像进行分析,在大规模检测时存在着计算量大、效率不高等问题,不能适应大规模光伏组件高频检测的需求。另外,因其包含的色彩较多,且没有统一的评判指标,给后续人工复检带来困难。为此,提出了基于红热外图像的光伏组件热斑缺陷检测方法。

2.1 基于空域法的红外图像线性增强处理

面对图像检测过程中受到光照不均匀以及非均匀噪声影响而导致图像清晰度不高的问题,采用红外线热像技术对光伏阵列进行采集,再由手动或计算机进行辨识^[6-8]。辨识的光伏组件热斑缺陷红热外图像如图 3 所示。

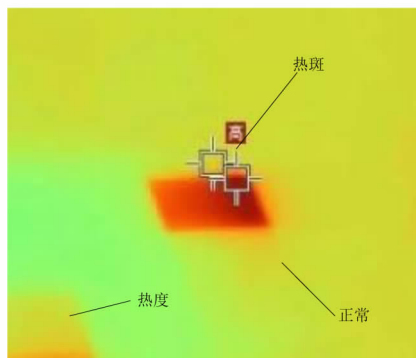


图 3 光伏组件热斑缺陷红热外图像

从图 3 中可看出,光伏组件的正常元件与热斑缺陷部位之间有显著的灰色等级差别。原始的图像在传送和加工时会有一些噪声,造成图像的模糊和画质不佳。为了提高图像的品质,必须采用线性增强方法^[9]。图像线性增强算法的基本原理是:在原图像上添加一些信息,或对其进行一定修改,有目的地强调图像中的一些特点,或者对一些不显著的特点进行压制,从而让图像与人们的视觉反应属性保持一致^[10-11]。

因为频率域法在去图像降噪时易丢失边界信息,且计算时间较空间域法更长,所以空间域方法更适合处理红外图像^[12-13]。结合空间域法对图像像素点进行的线性增强处理函数,表达式为:

$$I(x, y) = \frac{(F(x, y) - F_{\min}(x, y)) \times 255}{F_{\max}(x, y) - F_{\min}(x, y)} \quad (3)$$

公式(3)中, $F_{\max}(x, y)$ 、 $F_{\min}(x, y)$ 分别表示图像灰度最大和最小值。通过对图像线性增强处

理后,图像清晰度会提高,且热斑现象明显。

2.2 基于 VGG16 的热斑特征提取

通过对图像进行线性增强处理后,获取的图像较为清晰,且热斑特征也相对明显。为了分析热斑缺陷,需要提取热斑特征。在深度学习方法中,以 CNN 网络为整体模型的特征抽取网络,这是非常关键的一环。由特征网络所抽取的特征将对最后的特征抽取结果产生直接影响,进而对热斑检测效果产生影响。通常情况下,特征抽取网络的层数越深,其获取的特征效果越高。但是网络选择过深,会增加训练过程的困难。所以,在特征提取网络中选用了 VGG16 网络^[14]。基于 VGG16 的热斑特征提取过程如图 4 所示。

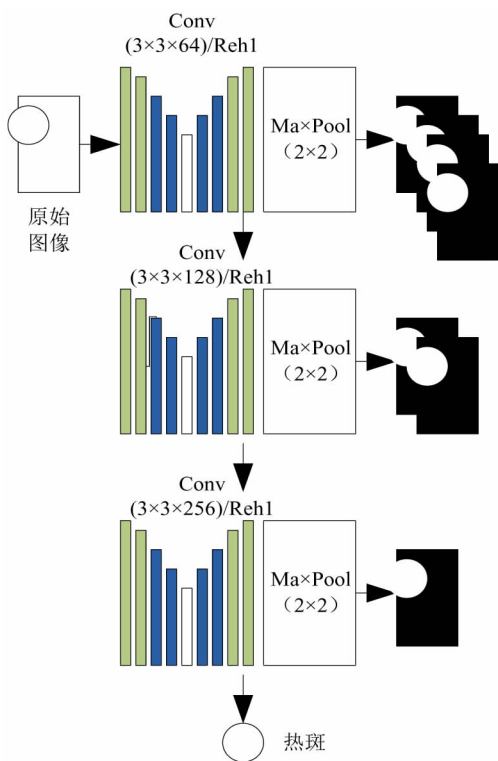


图 4 基于 VGG16 的热斑特征提取

由于 VGG16 网络中全连通层的参数所占的比重较大,故剔除最后两层的全连通层,取而代之的是一个具有 1024 个神经元的全连通层,其他的则不改变。除此之外,选取了迁徙学习的方法来防止过拟合问题的出现,从在 Image Net 数据库中提取出图像的图像特征参量,并通过学习进行调整。

2.3 B 样条最小二乘拟合的热斑检测

对图像像素灰度直方图进行识别和检测,通过设置一个垂直坐标系统,将图像像素的灰度等级增加作为 x 轴方向,将图像像素的灰度等级出现频次作为 y 轴方向,从而构建图像的灰度直方图^[15]。

由于在直方图中,会有噪声和环境干扰的问题,具体表现在直方图中会有一些毛刺和一些小的局部波动,这会给之后找直方图的波峰波谷造成许多麻烦。因此,提出了 B 样条最小二乘拟合的热斑检测方法,其函数为:

$$s(t) = \sum_{i=0}^n \alpha_i B_i(t) \tag{4}$$

公式(4)中, $B_i(t)$ 表示第 i 个样条基函数; α_i 表示 $B_i(t)$ 的系数; n 表示拟合次数。在引入函数范数之后, B 样条最小二乘数据拟合问题就是寻找采样条基函数关于范数的最佳近似问题。使曲线与采样点的距离达到最小值,可表示为:

$$\| \gamma(t) - s'(t) \| = \min \| \gamma(t) - s(t) \| \tag{5}$$

公式(5)中, $\gamma(t)$ 表示范数函数; $s'(t)$ 表示最佳 B 样条曲线函数。令:

$$G(\alpha) = \| \gamma(t) - s(t) \| \tag{6}$$

基于此,构建问题的解方程组:

$$a = \sum_{i=0}^n \omega_i(t) \sum_{i=0}^n B_i(t) \alpha_i \tag{7}$$

公式(7)中,表示权函数,由公式(8)求取唯一解,可表示为:

$$b = (B_i(x_i))_{i=1}^n Y \tag{8}$$

公式(8)中, x_i 表示热斑中心点的横坐标; Y 表示热斑中心点的纵坐标集通过这种方式得到的曲线比较平滑,可以去除直方图中的毛刺和局部波动,而在直方图中,最高峰右侧的波谷就是光伏组件图像中的热斑。

3 实 验

3.1 实验样本采集

为了使样本训练出来的热斑缺陷检测鲁棒性更强,在自然条件下进行实验样本采集,并对采集到的图像中热斑大小和位置进行统计,用于热斑缺陷检测的训练与实验。采集的图像共有 6 张,对采集到的图像进行随机翻转、旋转操作,实验样本集如图 5 所示。

由图 5 可知,在实验样本中每张图片都包含热斑缺陷。在光伏组件内,若有一块热斑产生,则其所属部位电池片会升温,此部位的红外线照射效应将会增强。红外辐射效果的变化,能够通过红外热像仪检测捕捉。不同的辐射强度以不同的颜色展示,最终得到一幅具有鲜明色彩的红外图像,同时,该图像还具有着与自身的温度成正相关的特征。在光伏组件上,对光伏阵列进行了整体的热红外拍

摄,得到了一幅颜色鲜艳的图像,每一个部位的辐射场都能够在图像中得到清晰展示。因野外工作条件的复杂性,导致各单元的发电效果及特性存在一定的差别,也就是每个单元的温度存在一定的差别,并且在红外成像中会出现不同的色彩,基于该原理检测光伏组件热斑缺陷。

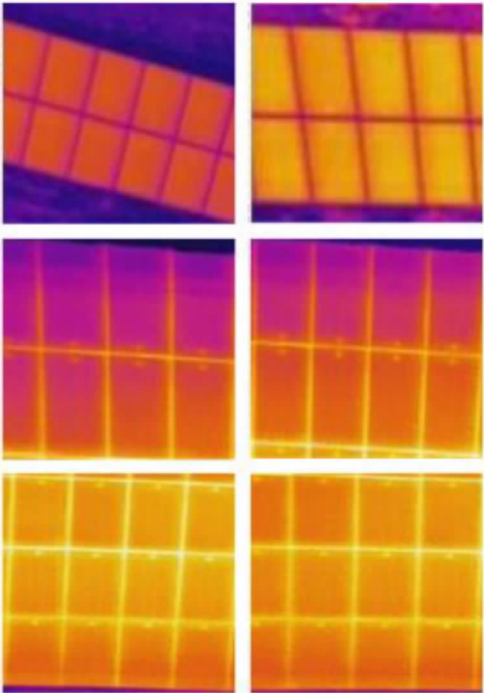


图 5 实验样本集

3.2 实验系统

实验系统是以 Ti25 型红外热图像装置和一台计算机为基础,如图 6 所示。

Ti25 红外热像仪是一种手持式的外置热像仪,可以进行可视化 and 红外热成像,在实验过程中主要用于获取红外线热像信息。需要指出的是,因为热像仪在进行拍照的时会引发自反射,所以在采集数据集时,视角应该尽量靠近光电模块,除此之外,热像仪应该与光电模块的矢量形成 0° 到 40° 的夹角。



(a) 光伏组件

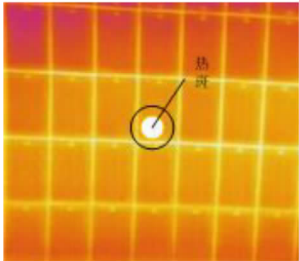


(b)热像仪

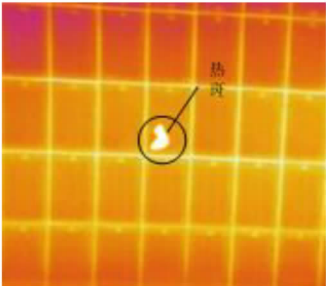
图 6 光伏组件与热像仪

3.3 实验结果

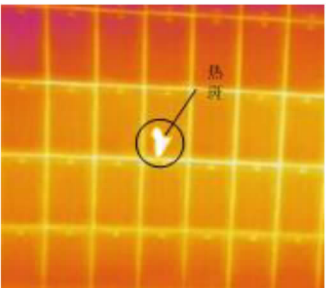
实验设置了两种情况,一种是正常情况,另一种是存在非均匀性噪声影响。在正常情况下,分别使用基于离群因子检测方法、基于轻量化卷积神经网络和基于图像处理检测方法,对比分析热斑效应检测结果,如图 7 所示。



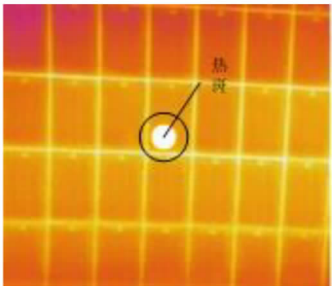
(a)原始图像



(b)离群因子



(c)轻量化卷积神经网络



(d)图像处理

图 7 正常情况下不同方法热斑效应检测结果

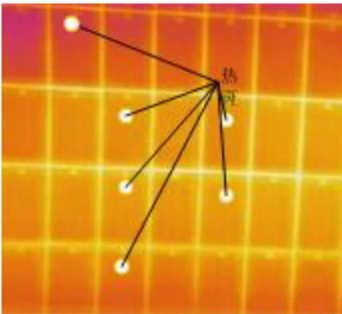
由图 7 可知,使用基于图像处理检测方法检测结果与原始图像一致,其余两种方法均与原始图像存在一定差别。对于表 7 检测结果,用表 1 显示数据检测结果。

表 1 不同方法热斑面积检测结果/cm ²				
检测次数/次	原始图像	离群因子	轻量化卷积神经网络	图像处理
1	25.0	20.0	19.3	25.1
2	23.9	21.2	18.5	24.5
3	24.5	19.5	18.6	24.9
4	25.2	19.8	17.9	25.0
5	25.0	22.1	17.5	25.0

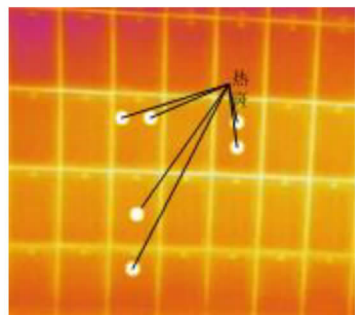
由表 1 可知,使用基于轻量化卷积神经网络的检测方法与实际数据差值最大,其次是基于离群因子检测方法,差值最小的是基于图像处理检测方法,与实际数据的最小差值为 0.1 cm²。

在非均匀性噪声影响下,再次对比这三种方法检测效果,如图 8 所示。

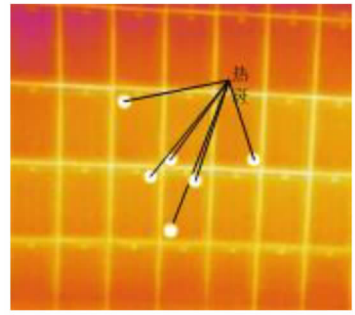
由图 8 可知,使用这三种方法均能检测出热斑个数,但是检测位置均不同,使用基于离群因子检测方法、基于轻量化卷积神经网络的检测方法,热斑位置检测结果与原始图像不一致,使用基于图像处理检测方法,热斑位置检测结果与原始图像一致。



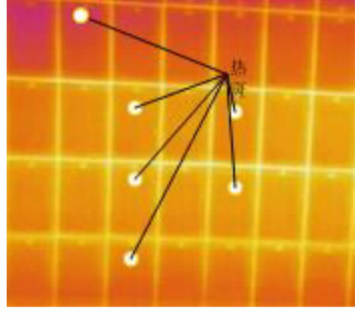
(a)原始图像



(b) 离群因子



(c) 轻量化卷积神经网络



(d) 图像处理

图 8 非均匀性噪声影响下
不同方法热斑效应检测结果

4 结 论

针对采用基于离群因子、轻量化卷积神经网络的检测方法受到非均匀性噪声影响,导致检测结果不精准问题,提出了基于图像处理的光伏组件热斑缺陷检测方法,并得到如下结论:

- (1)通过对热斑红热外图像灰度直方图特征分析,结合空间域方法线性增强图像,能够改善图像清晰度。
- (2)通过构建 VGG16 网络,能够直接在 Image Net 数据库上提取热斑特征。
- (3)通过使用 B 样条最小二乘拟合法,能够检测出图像中热斑。

参考文献

[1] 刘灏,朱世佳,毕天姝. 基于局部离群因子的 PMU 连续坏数据检测方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(1):25—32.

[2] 刘怀广,丁晚成,黄千稳. 基于轻量化卷积神经网络的光伏电池片缺陷检测方法研究[J]. 应用光学,2022,43(1):87—94.

[3] 王道累,李超,李明山,等. 基于深度卷积神经网络的光伏组件热斑检测[J]. 太阳能学报,2022,43(1):412—417.

[4] 于腾,杨玉军,宋彬,等. 真空电弧重熔过程中白斑缺陷的成因分析[J]. 金属功能材料,2022,29(2):28—33.

[5] SOVETKIN, E. Encoder-decoder semantic segmentation models for electroluminescence images of thin-film photovoltaic modules [J]. IEEE Journal of Photovoltaics 11—2(2021).

[6] 杨忠华,付泽宇,付海霞. 窄间隙埋弧焊对锅炉低合金调质钢过渡焊接接头缺陷的影响[J]. 金属功能材料,2022,29(2):71—76.

[7] 夏杰锋,唐武勤,杨强. 光伏航拍红外图像的热斑自动检测方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2022,56(8):1640—1647.

[8] 孙海蓉,李号. 基于深度迁移学习的小样本光伏热斑识别方法[J]. 太阳能学报,2022,43(1):406—411.

[9] LI F. Correlation of UV fluorescence images with performance loss of field-retrieved photovoltaic modules[J]. IEEE Journal of Photovoltaics,2021,11—14.

[10] 何宁辉,王世杰,刘军福,等. 基于深度学习的航拍图像绝缘子缺失检测方法研究[J]. 电力系统保护控制,2021,49(12):132—140.

[11] 章涛,柳玉宾,崔承刚,等. 基于语义分割的光伏组件积灰检测与分析[J]. 科学技术与工程,2022,22(32):14259—14266.

[12] 周颖,常明新,叶红,等. 基于元迁移的太阳能电池板缺陷图像超分辨率重建方法[J]. 计算机科学,2022,49(3):185—191.

[13] 黄福杰,罗斌. 基于光流的视频缺陷检测及修复方法[J]. 计算机应用研究,2023,40(1):299—303.

[14] LIU L, ZUO H, QIU X. Research on defect pattern recognition of light guide plate based on deep learning semantic segmentation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1865(2):22—33.

[15] 齐冬莲,韩译锋,周自强,等. 基于视频图像的输变电设备外部缺陷检测技术及其应用现状[J]. 电子与信息学报,2022,44(11):3709—3720.

[15] QI D L, HAN Y F, ZHOU Z Q, et al. External defect detection technology of power transmission and transformation equipment based on video image and its application status[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44 (11):3709—3720.