

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003516

# 光伏热斑模拟建模及热成像分析\*

陈功<sup>1,2</sup> 蔡磊<sup>1,2</sup> 张琳<sup>2</sup> 左佑<sup>1</sup> 束双昊<sup>1</sup> 路宗祥<sup>1</sup> 王振刚<sup>1</sup> 朱颖<sup>1</sup>

(1.常州工学院 电气信息工程学院 常州 213032; 2.常州大学 机械与轨道交通学院 常州 213164)

**摘要:**机载热成像检测太阳能光伏板表面时,热斑的产生存在不确定性,为解决上述问题,分析热斑产生的机理,构建阴影遮挡下的光伏板等效电路模型,得到局部阴影条件下的光伏板表面发热量与输出电流的数学表达式,经MATLAB/Simulink仿真及温度实测验证。搭建无人机热斑模拟检测平台,改变输入电流及检测高度得到光伏板表面热成像图,建立表征不同温度下的像素统计值的分段函数,采用K均值聚类算法搭建特征值数据库,用于后续故障光伏板的定位。实验结果表明,该方法具有电流对光伏板表面温度的可控性且采用分段函数-K均值聚类混合算法构建的红外热成像特征库能准确表示热斑。

**关键词:**光伏板;热斑;等效电路;阴影遮挡;热成像;模拟检测平台;K均值聚类;特征值

**中图分类号:** TN215; TM615 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.30

## Photovoltaic hotspot simulation modeling and thermal imaging analysis

Chen Gong<sup>1,2</sup> Cai Lei<sup>1,2</sup> Zhang Lin<sup>2</sup> Zuo You<sup>1</sup> Shu Shuanghao<sup>1</sup>Lu Zongxiang<sup>1</sup> Wang Zhengang<sup>1</sup> Zhu Ying<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China;

2. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** In order to solve the uncertainty of hotspot when airborne thermal imaging detects the surface of solar photovoltaic panels. The mechanism of hotspot is analyzed, and the equivalent circuit model of photovoltaic panels under shadow shading is constructed to obtain the partial shadow conditions. The mathematical expressions of the surface heat and output current of the photovoltaic panel are verified by MATLAB/Simulink simulation and temperature measurement. Build a UAV hotspot simulation detection platform, change the input current and detection height to obtain a thermal imaging map of the photovoltaic panel surface, establish a segmentation function that characterizes the pixel statistical value at different temperatures, and use the K-means clustering algorithm to build a feature value database, which will be used to locate the subsequent faulty photovoltaic panel. The experimental results show that the method has the controllability of the current on the surface temperature of the photovoltaic panel, the infrared thermal imaging feature library constructed by the piecewise function-K-means clustering hybrid algorithm can accurately represent the hotspot features.

**Keywords:** photovoltaic panel; hotspots; equivalent circuit; shadow occlusion; thermal imaging; simulation testing platform; K-means clustering; eigenvalues

## 0 引言

近年来,中国光伏发电产业在政策及投资热情的推动下实现了快速发展<sup>[1]</sup>。其中光伏电站的运营维护工作

显得日益重要,如何在光伏组件的应用、生产和修复中对其进行检测与监控已成为未来不容忽视的重要问题<sup>[2]</sup>。

国内外对光伏板热斑进行了一系列的理论和实验研究。目前,光伏组件的失效类型主要为热斑、材料变色、玻璃碎裂、电池碎裂、电位诱发衰减(PID)、电路失效、旁

收稿日期: 2020-09-30 Received Date: 2020-09-30

\* 基金项目:江苏高校文化创意协同创新中心研究课题(XYN1805)、南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室开放基金(EW201980089)、教育部产学研合作协同育人项目(20192156019、201902156031)

路二极管失效、接线盒脱落、组件分层、阴影遮挡<sup>[3-4]</sup>。发生热斑效应会严重破坏太阳电池,很可能使有光照的太阳电池所产生的部分能量被受遮挡的电池所消耗<sup>[5]</sup>,严重的地方局部温度可能较高,有的甚至超过 150 ℃,导致组件严重损坏<sup>[6-7]</sup>。时亚涛等<sup>[8]</sup>所提出的太阳能光伏电池缺陷检测能够有效地检测出太阳能光伏电池中多种类型的缺陷,如隐裂、断栅和碎片等,但不能清晰地检测出热斑缺陷。王宇翠<sup>[9]</sup>、董梦男<sup>[10]</sup>、李兵峰<sup>[11]</sup>主要采用异物遮挡具有一定厚度的常规单晶硅和多晶硅光伏板表面实现热斑模拟,并通过测量光伏单体的电压和电流实现故障定位,但并没有提出热斑工程模型。杜博伦等<sup>[12]</sup>、蹇康等<sup>[13]</sup>利用电磁感应大幅提高 EL 对缺陷的检测能力,将热成像图片与 EL(电致发光)图结合,准确定位缺陷电池片,但是 EL 图片只定位,不能判断缺陷类型。张映斌等<sup>[14]</sup>认为阴影遮挡环境下被遮挡组件区域温度和太阳电池反向电流成正向相关性,即反向漏电流越大,组件温度越高,从而导致严重的热斑失效,但没有提到如何检测热斑。Tsanakas 等<sup>[15-16]</sup>通过现场红外热像测量设备获取运行中的光阵列的红外热图像,采用 Canny 边缘检测算子作为一种诊断工具,检测导致热斑加热效应的模块相关故障,但光伏组件表面的玻璃的发射率会随着拍摄角度的变化而变化,从而导致红外热像仪接收到的热辐射量变化,这种引起的红外图像上的灰度变化会和热斑引起的实际变化混淆。王培珍等<sup>[17]</sup>提出了将待分析图像与正常工作的太阳能光伏阵列的红外图像作差运算,再采用二维阈值化与模糊聚类相混合的方法,提取目标特征的方案,仅仅是理论分析,并未付出实践。从已有文献可知,热斑具有不可预知性,采用热成像实时检测热斑的文献较少。

针对现实光伏发电中热斑产生的不确定性,以太阳能电池的工程用模型<sup>[18]</sup>为基础,结合电路的串并联理论,通过分析光伏板表面温度与输出电流之间的关系,在实验室模拟热斑的形成,构建光伏板热斑发热量与光伏板的输出电流的数学模型,对其进行仿真及实测验证。在此基础上,搭建无人机热斑模拟检测平台,改变输入电流及检测高度得到光伏板表面热成像图,建立表征不同温度下的像素统计值的分段函数,采用 K 均值聚类算法搭建特征值数据库,用于后续故障光伏板的定位。

## 1 光伏板热斑模拟原理及仿真

由于热斑是长时间的阴影遮挡光伏板所形成,根据传统的光伏板单体等效电路模型<sup>[19]</sup>(图 1),提出了一种阴影遮挡后的光伏板的等效电路模型(图 2)。阴影遮挡等效为电流源的缺失,等效为电路中存在反向电流源。 $I'$  是流经  $R$  的输入电流,  $I'_d$  是流经二极管 D 的电流,  $I'_{sh}$  是

流经并联电阻  $R_{sh}$  的电流。

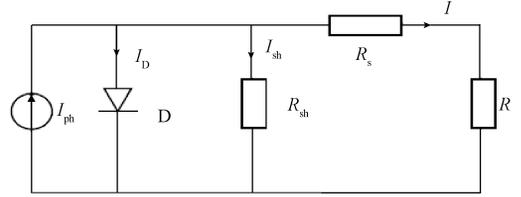


图 1 光伏板单体等效电路模型

Fig. 1 Single photovoltaic panel equivalent circuit model

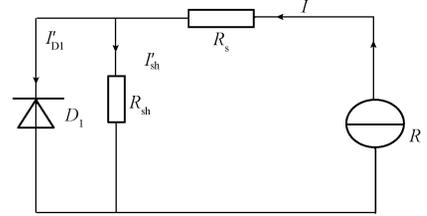


图 2 遮挡后的光伏板的等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of the shaded photovoltaic panel

图 1 中  $I_{sc}$  为光伏板在标准条件下的短路电流,  $V_{oc}$  为光伏板在标准条件下的开路电压,  $I_m$  为光伏板在标准条件下的最大功率点电流,  $V_m$  为光伏板在标准条件下的最大功率点电压。

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp \left( \frac{V}{C_2 V_{oc}} - 1 \right) \right] \right\} \quad (1)$$

$$\text{其中常数 } C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left( - \frac{V_m}{C_2 V_{oc}} \right), \text{ 常数 } C_2 =$$

$$\left( \frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) \left[ \ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1}, \Delta T = T - T_{ref}, \Delta S = S - S_{ref},$$

$$I_{sc} = I_{scref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a\Delta T), V_{oc} = V_{ocref} \ln(e + b\Delta S) (1 - c\Delta T),$$

$$I_m = I_{mref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + 1 + a\Delta T), V_m = V_{mref} \ln(e + b\Delta S) (1 -$$

$c\Delta T)$ 。  $I_{scref}$  为标准条件下的短路电流,  $V_{ocref}$  为标准条件下的开路电压,  $I_{mref}$  为标准条件下的最大功率点处电流,  $V_{mref}$  为标准条件下的最大功率点处电压。

$I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $I_m$ 、 $V_m$  分别为实际温度为  $T$ 、光照强度为  $S$  时,光伏组件的短路电流、开路电压、最大功率点处电流及最大功率点处电压。  $T_{ref}$  为标准条件温度,  $T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $S_{ref} = 1\ 000 \text{ W/m}^2$ ,  $S_{ref}$  表示标准光照强度。系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  均为常数,其中  $a = 0.002\ 5/^\circ\text{C}$ ,  $b = 0.5 \text{ m}^2/\text{W}$ ,  $c = 0.002\ 88/^\circ\text{C}$ 。

得到输出电流方程:

$$I = I_{scref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a\Delta T)$$

$$\left\{ 1 - C_1 \left[ \exp \left[ \frac{V}{C_2 V_{ocref} \ln(e + b\Delta S) (1 - c\Delta T)} \right] - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

考虑到单体内阻的变化,如图 2 所示,在无光照的情况下,电路中二极管  $D_1$  和电阻  $R_{sh}$  并联,二极管反向接通。推导得反向电流密度以及二极管反向输出电流:

$$j \propto [1 - e^{(-qV/k_B T)}]$$

$$I'_D = K(1 - e^{-\frac{u_D}{U_T}}) \tag{3}$$

式中:  $u_D$  为二极管两端的加压,  $U_T$  在常温下取 26 mV,  $K$  是一个微安级的常数。由热量公式  $Q = I^2 R t, Q = cm \Delta T$ , 得到部分遮挡条件下单体的热量公式:  $Q_{\text{总}} = I'_{D_1}{}^2 R_{D_1} t + I'_{sh}{}^2 R_{sh} t + I'^2 R_S t$ , 考虑到电路中反向流经二极管的电流忽略不计,得到:

$$Q_{\text{总}} \approx A I' t + I'^2 R_S t \tag{4}$$

式中:  $Q$  为单体的发热量;  $A$  为由光伏板的性质推出的常数;  $I'$  为遮挡条件下的输出电流;  $R_S$  为电路模型中的串联电阻;  $t$  为遮挡时间。

根据式 (1) 改变光照强度模拟阴影遮挡, 验证发热量就是观察仿真结果下功率的变化。采用 3×3 型串并联光伏板的输出特性模拟仿真如图 3 所示, 改变电路中一个单体的光照强度, 观察光伏板在不同遮光情况下的电气参数输出如图 4 所示。

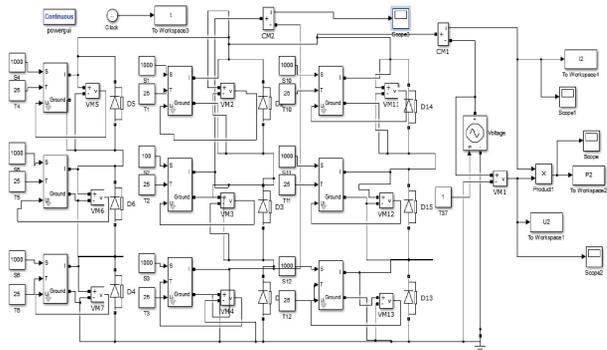


图 3 串并联光伏板模拟仿真

(光照强度初始为 1 000 W/m<sup>2</sup>, 衰减间隔 200 W/m<sup>2</sup>)

Fig. 3 Simulation of series and parallel photovoltaic panels

(The light intensity is initially 1 000 W/m<sup>2</sup>, and the attenuation interval is 200 W/m<sup>2</sup>)

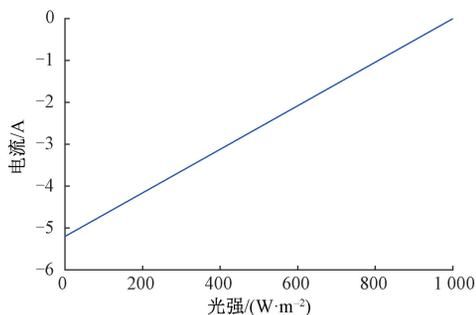


图 4 光强与反向电流关系

Fig. 4 Relationship between light intensity and reverse current

在普通的串并联光伏板中,随着遮光率的增加,流经电路的反向电流在增大,单体的损耗功率在增加,光伏板的发热量在增加,温度会升高。

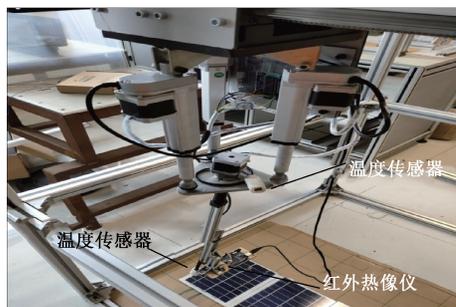
## 2 模拟无人机热斑检测装置平台

如图 5 所示,搭建一个长方体外部框架,框架内部空间即模拟无人机装置的运动范围。在框架顶部,安装滚珠丝杠和滑台,两者相垂直且丝杠平分滑台,作为模拟无人机装置在空间  $X$ 、 $Y$  轴上运动的导轨,在丝杠和滑台一侧分别安装步进电机,用于控制模拟无人机装置在空间  $X$ 、 $Y$  轴的运动,模拟无人机不同飞行方案。模拟无人机装置安装在滑台下方的滑块上,由 3 个电动推杆、一个步进电机和一块正三角形钢板组合而成。步进电机安装在钢板中心位置处,电机转动可模拟无人机飞行时的自身旋转,3 个电动推杆同时移动,可模拟无人机在空间  $Z$  轴上的升降飞行。若电动推杆移动的距离不同,模拟无人机装置将会倾斜一定角度,模拟出无人机的倾斜飞行。采用触发式限位开关安装在滑台两端两侧和平台左侧型材两端。

平台中涉及的传感器有 MLX90614 温度传感器和 AMG8833 红外热像仪,温度传感器的分辨率为 0.02 °C。红外热像仪的参数指标包括准确性 ± 2.5 °C;分辨率 8 bit;最小工作温度 0 °C,最大工作温度 80 °C。



(a) 整体图  
(a) Overall



(b) 局部图  
(b) Partial

图 5 模拟无人机热斑检测装置平台

Fig. 5 Simulated UAV hotspots detection device platform

### 3 热斑模拟实测及分析

将两块同型号的光伏板放置在一起,分别串联和并联,观察温度的变化如图 6、7 所示。实验中改变电流的大小,模拟光伏板遮挡率,电流越大,代表遮挡率越高。



(a) 串联 (a) Series (b) 并联 (b) Parallel

图 6 串并联接线

Fig. 6 Series and parallel wiring diagram

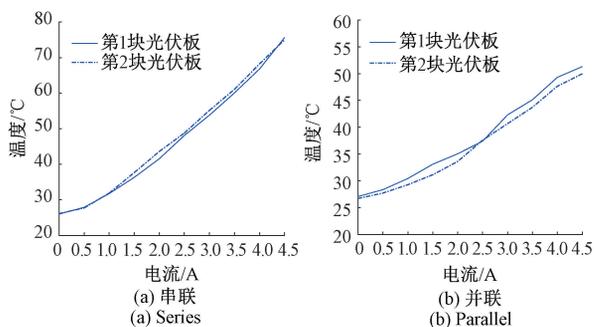


图 7 串并联温度变化曲线

Fig. 7 Series and parallel temperature change curve

图 7 中,随着电流的增大,温度增加,随着遮挡率的增加,光伏板的温度在逐渐升高,串并联电路中,两块光伏板温度变化规律近似。其中,注入相同的电流,串联连接比并联连接温度上升更快,说明光伏发电中,串联的光伏板更容易形成热斑。

将两块同型号光伏板水平放置,给其中的一块光伏板注入电流,模拟光伏热斑的产生。依据红外热像仪不同的成像位置,得出不同热斑模拟状态下的热成像图,输入 4 A 时,3 个不同位置的红外热成像图如图 8 所示。

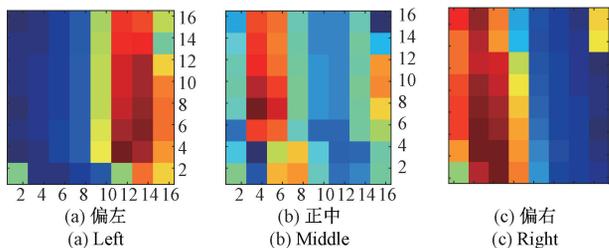


图 8 热成像传感器检测位置

Fig. 8 Thermal imaging sensor detects position

从图 8 可以看出,同一光伏板的测量区域,红蓝颜色两极分化越严重,表示温差越大。热成像传感器放置于左右两边时,可以观察到注入电流的光伏板比普通光照下的光伏板温度高。放置中间时,温差相对不明显。

同一光伏板,设置不同高度,分别注入电流,观察温度变化,温度变化的曲线如图 9 所示。

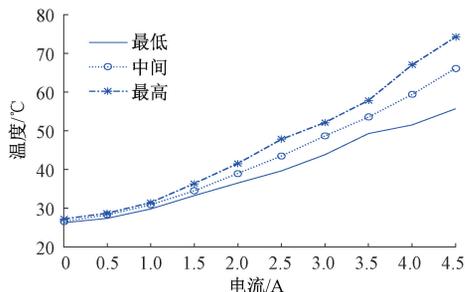


图 9 温度随高度变化曲线

Fig. 9 Temperature change curve with height

由图 9 可知,距离对传感器影响较大,距离越高,热成像传感器检测的温度降低。使用温度传感器检测光伏板表面热斑时,贴近光伏板效果最显著。

### 4 热斑的检测及特征库的建立

#### 4.1 不同温差分段函数的建立

改变光伏板注入电流,从 0 增加到 4.5 A,记录不同电流下的热成像图以及不同电流下温度数据,将温度数据结合分段函数构建温差分布。

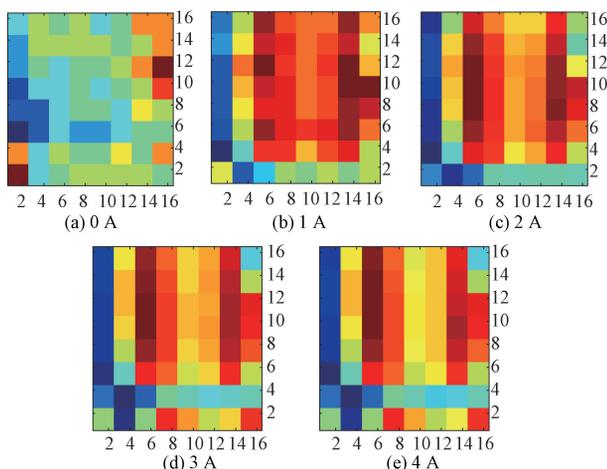


图 10 不同电流下热成像图片

Fig. 10 Thermal imaging pictures under different currents

图 10 所示为不同电流下的热成像温差,图 11 所示为输入不同电流的温差分布。图 10 不能明显地观察到温度分布,图 11 能清楚地表示温差分布,0 A 时,温度分

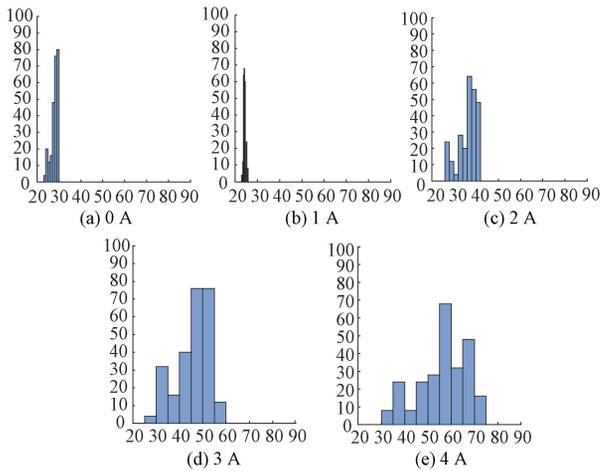


图 11 不同电流下的温差分布

Fig. 11 Temperature difference distribution diagram under different currents

布在 20 °C ~ 26 °C, 近似于室温; 1 A 时, 温度分布在 20 °C ~ 30 °C, 温度开始升高, 但不明显; 2 A、3 A 时, 温度分别分布在 26 °C ~ 42 °C, 25 °C ~ 60 °C, 温度进一步升高, 温差变大; 4 A 时, 温度分布在 30 °C ~ 75 °C, 温度持续升高, 温差很明显。光伏板输入电流较小时, 温差较小, 直方图显得较窄, 温度普遍小于 30 °C, 同一温度数据很多, 大部分检测区域颜色接近; 输入大电流后, 光伏板的温差变大, 直方图变宽, 变得较为均匀, 温度呈现整体上升趋势, 但颜色模块变化不明显, 热成像图基本不变。

热成像的颜色组由 16 个像素组成, 下式为温差分布公式:

$$X(i) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_1} S_1(i), 0 < S_1 \leq a \\ \sum_{i=1}^{N_2} S_2(i), a < S_2 \leq 2a \\ \sum_{i=1}^{N_3} S_3(i), 2a < S_3 \leq 3a \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{N_{16}} S_{16}(i), 15a < S_{16} \leq 16a \end{cases} \quad (5)$$

$$a = \frac{\max X(i) - \min X(i)}{16}$$

式中:  $X(i)$  表示整个温差分布;  $S$  表示不同的颜色模块;  $i$  表示该颜色模块在整个热成像图中的个数;  $a$  表示每两个相邻颜色之间的温度差;  $N_j$  为不同区间统计个数,  $j$  表示热成像传感器的颜色像素值。图 10 由式 (5) 所得。

### 5.2 K 均值聚类算法构建特征库

改变注入电流, 测量不同高度, 不同位置, 观察热成像图, 采集不同情况下的温差分布图, 基于 K 均值聚类算

法<sup>[20]</sup>, 得到不同情况下温度数据统计值的中心点, 观察中心点差异, 分析规律。

图 12 所示为输入电流为 4.5 A 时不同高度的热成像图, 图 13 所示为对应的温度数据直方图。检测距离低时, 温度数据分布于 45 °C ~ 85 °C, 大部分超过 60 °C。检测距离高时, 温度数据分布于 20 °C ~ 80 °C, 在 40 °C 时温度数据达到峰值。

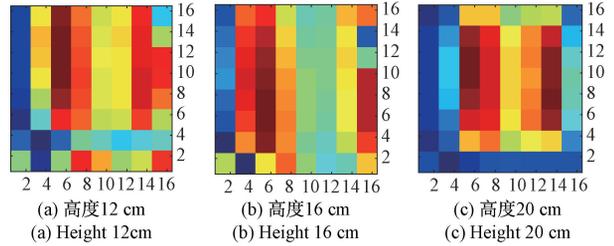


图 12 输入电流为 4.5 A 时不同高度的热成像图片

Fig. 12 Thermal imaging of different heights

when the input current is 4.5 A

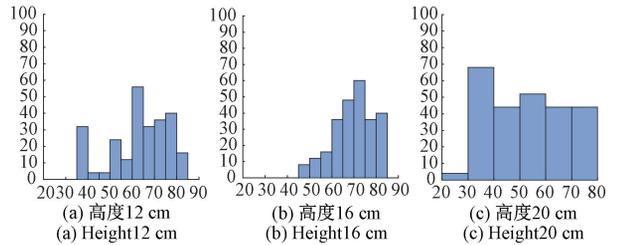


图 13 输入电流为 4.5 A 时温差分布

Fig. 13 Distribution diagram of temperature difference when input current is 4.5 A

根据图 13 电流 4.5 A 温差分布得到图 14 (c), 图中横坐标表示温度, 纵坐标表示当前温度值个数。图 14 所示为 3 组电流恒定时不同高度的的温度分布及中心点。输入电流增大后, 随着热成像传感器检测距离的减小, K 均值聚类中心点往右偏移, 表示中心点温度升高。图 14 (c) 中的中心点对比图 14 (a) 的中心点次序全部准确; 与图 14 (b) 相比, 不仅中心点次序准确, 且间隔距离更大, 有利于光伏板故障点定位。

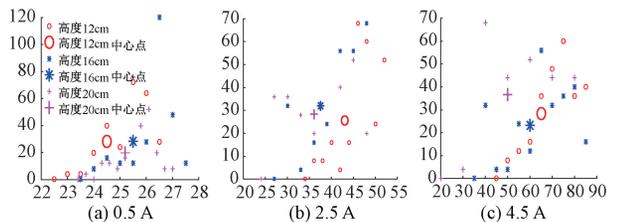


图 14 输入电流恒定时不同高度的温度分布及中心点

Fig. 14 Temperature distribution and center point at different heights when the input current is constant

图 15 所示为高度恒定时输入不同电流的温度分布及中心点。高度恒定时,随着电流升高,光伏板表面温度上升,K 中心点往右偏移,温度增大。随着热成像传感器检测距离减小,图 15 中的中心点表示的温度升高,间隔距离增大。

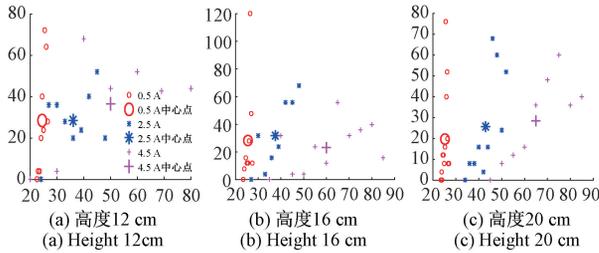


图 15 高度恒定时输入不同电流的温度分布及中心点  
Fig. 15 Temperature distribution and center point of different current input when the height is constant

图 16(a) 所示为输入电流为 4.5 A 时不同光伏板的温度数据组 K 均值聚类中心点,不同光伏板的 K 均值聚类中心点相近。图 16(b) 所示为输入电流为 4.5 A 时同一光伏板热成像不同位置温度数据组 K 均值聚类中心点。观察位置在中间时温度数据组的 K 均值聚类中心点温度值最大,更便于分析。

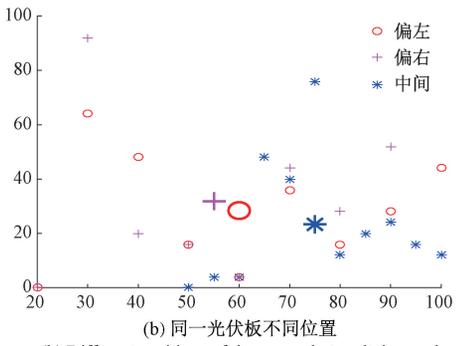
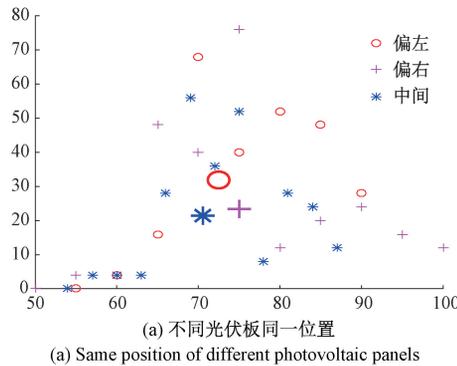


图 16 温差分布图 K 均值聚类中心点

Fig. 16 K-means clustering center point of temperature difference distribution map

热成像图差异不明显且包含信息量较多,采用直方图和 K 均值聚类算法,可将图像信息降维,并突显区分度。如果数据库中设定热斑温度阈值,经识别算法可快

速检测热斑区域,更易于故障光伏板的定位和维护。

### 5 结 论

针对光伏板热斑产生的不确定性,所采用的反向电流注入法能准确建立光伏板表面温度与电流之间的关系,仿真及实验表明温度与电流呈二次函数关系,符合理论推导公式,实现了不同连接形式的光伏板热斑温度的可控性。根据上述可控热斑所设计分段函数和 K 均值聚类算法能准确表征热斑热成像图的温差分布值,经最小欧氏距离定位判别验证,准确率达 95%。

### 参考文献

[ 1 ] 吴鸣寰, 吴光军, 周猛. 浅谈光伏电站精益运维管理[J]. 水电与新能源, 2019, 33(6): 70-73.  
WU M H, WU G J, ZHOU M. On the lean operation and maintenance management of photovoltaic power stations [ J ]. Hydropower and New Energy, 2019, 33(6): 70-73.

[ 2 ] 冷佳骏. 光伏系统最大功率点跟踪及其故障诊断方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
LENG J J. Research on maximum power point tracking and fault diagnosis of photovoltaic system [ D ]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[ 3 ] JORDAN D C, SILVERMAN T J, WOHLGEMUTH J H, et al. Photovoltaic failure and degradation modes [ J ]. Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2017, 25: 318-326.

[ 4 ] JORDAN D C, SILVERMAN T J, SEKULIC B, et al. PV degradation curves: non-linearities and failure modes [ J ]. Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2017, 25: 583-591.

[ 5 ] 钱念书, 刘阔, 郭建, 等. 光伏电池建模及其输出特性研究 [ J ]. 电源学报, 2012, 8(5): 78-82.  
QIAN N SH, LIU K, GUO J, et al. Modeling and output features simulation of photovoltaic cells [ J ]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 8(5): 78-82.

[ 6 ] 田琦, 赵争鸣, 邓夷, 等. 光伏电池反向模型仿真分析及实验研究 [ J ]. 中国电机工程学报, 2011, 31(23): 121-128.  
TIAN Q, ZHAO ZH M, DENG Y, et al. Simulation and experimental study about reverse model of photovoltaic cells [ J ]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(23): 121-128.

[ 7 ] 孔凡建. 太阳能电池组件 I-V 特性曲线异常 [ J ]. 电源技术, 2010, 34(2): 181-185.  
KONG F J. Analysis of I-V curve abnormality of solar module [ J ]. Chinese Journal of Power Sources, 2010, 34(2): 181-185.

- [ 8 ] 时亚涛,戴芳,杨畅民. 太阳能光伏电池缺陷检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 232(4): 162-169.  
SHI Y T, DAI F, YANG CH M. Defect detection of solar photovoltaic cell [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 232 ( 4 ): 162-169.
- [ 9 ] 王宇翠. 光伏电池老化故障内部参数变化规律的研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
WANG Y C. Research of PV internal parameters change rules in the process of PV aging [ D ]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [ 10 ] 董梦男. 光伏电池模型参数辨识及老化故障的研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.  
DONG M N. Extracting parameters of photovoltaic cell model and research of aging fault [ D ]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [ 11 ] 李兵峰. 光伏阵列故障检测方法的研究 [ D ]. 天津: 天津大学, 2010.  
LI B F. Research on fault detection of PV array [ D ]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [ 12 ] 杜博伦,何赟泽,杨瑞珍,等. 电磁感应对硅光伏电池可视化检测技术的改性[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 158-165.  
DU B L, HE Y Z, YANG R ZH, et al. Modification of visual detection for silicon photovoltaic cells based on electromagnetic induction [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 158-165.
- [ 13 ] 蹇康,张臻,梁旭丹,等. 缺陷晶体硅太阳能电池热斑实验[J]. 电源技术, 2018, 42(11): 1657-1659.  
JIAN K, ZHANG ZH, LIANG X D, et al. Hot-spot test for defective crystalline silicon solar cells [ J ]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(11): 1657-1659.
- [ 14 ] 张映斌,夏登福,全鹏,等. 晶体硅光伏组件热斑失效问题研究 [ J ]. 太阳能学报, 2017, 38 ( 7 ): 1854-1861.  
ZHANG Y B, XIA D F, QUAN P, et al. The study on hot spots failure of polycrystalline wafer based photovoltaic modules [ J ]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(7): 1854-1861.
- [ 15 ] TSANAKAS L A, BOTSARIS P. On the detection of hotspots in operating photovoltaic arrays through thermal image analysis and a simulation model [ J ]. Materials Evaluation, 2013, 71(4): 457-465.
- [ 16 ] TSANAKAS J A, CHRYSOSTOMOU D, BOTSARIS P N, et al. Fault diagnosis of photovoltaic modules through image processing and Canny edge detection on field thermographic measurements [ J ]. International journal of sustainable energy, 2015, 34(6): 351-372.
- [ 17 ] 王培珍,郑诗程. 基于红外图像的太阳光伏阵列故障分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(2): 197-202.

WANG P ZH, ZHENG SH CH. Fault diagnosis of photovoltaic array based on infrared image [ J ]. Acta energias solaris sinica, 2010, 31(2): 197-202.

- [ 18 ] 杨海柱. 阴影条件下光伏微网系统控制策略研究[M]. 北京: 煤炭工业社, 2016: 12-20.  
YANG H ZH. Research on Control Strategy of Photovoltaic Microgrid System Under Shadow Conditions [ M ]. Beijing: Coal Industry Society, 2016: 12-20.
- [ 19 ] 邓娟娟. 晶硅组件热斑效应的分析 [ D ]. 北京: 北京交通大学, 2015.  
DENG J J. Hot spot effect analysis on silicon cell modules [ D ]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [ 20 ] YU H, WEN G Q, GAN J Z, et al. Self-paced learning for K-means clustering algorithm [ J ]. Pattern Recognition Letters, 2020, 132: 69-75.

## 作者简介



**陈功**, 2001年于常州技术师范学院获得学士学位, 2004年于海军工程大学获得硕士学位, 2007年于解放军理工大学获得博士学位, 现为常州工学院副教授, 主要研究方向为光伏热斑检测。

E-mail: realchengong@sina.com

**Chen Gong** received his B. Sc. degree from Jiangsu University of Technology in 2001, M. Sc. degree from Naval University of Engineering in 2004, Ph. D. degree from Army Engineering University of PLA in 2007. Now he is an associate professor at Changzhou Institute of Technology. His main research interest includes photovoltaic hotspot detection.



**蔡磊**, 2018年于常州工学院获得学士学位, 现为常州大学硕士研究生, 主要研究方向为新能源的开发和利用。

E-mail: 824676224@qq.com

**Cai Lei** received his B. Sc. degree from Changzhou Institute of Technology in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Changzhou University. His main research interests include development and utilization of new energy.



**张琳** (通信作者), 1992年于湘潭大学获学士学位, 1995年于南京工业大学获硕士学位, 2006年于南京理工大学获博士学位, 现为常州大学教授, 主要方向为过程装备与控制工程。

E-mail: z3281315@yeah.net

**Zhang Lin** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Xiangtan University in 1992, M. Sc. degree from Nanjing Tech University in 1995, Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2006. Now she is a professor at Changzhou University. Her main research interests include process equipment and control engineering.