

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210113

# 基于多点平抛运动的光伏热斑故障模型研究\*

陈功<sup>1,2</sup> 王奕<sup>1,2</sup> 强浩<sup>1</sup>

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

**摘要:** 长时间遮挡会导致光伏板光电转换受到影响,产生热斑,对应光伏阵列的输出  $U-I$  曲线随之会发生变化,相应的  $U-P$  曲线也会包含多个峰值。为了准确定位热斑,需要分析热斑产生的机理,构建具有通用性的阴影遮挡下光伏阵列模型,针对传统工程模型不能准确描述诸如 CTCT 等复杂光伏阵列的电气参数,本文提出一种阴影遮挡下的多点平抛运动的光伏阵列数学模型。为验证该模型的准确性,采用 Matlab/Simulink 建模仿真并搭建热斑模拟平台,改变光照强度模拟阴影遮挡以及光伏板的连接方式,得到并分析光伏阵列  $U-I$ 、 $U-P$  特性曲线,相比于工程模型,本文所提出的模型使运算时间降低到 2.5%,其能更全面地描述局部阴影条件下复杂结构的光伏阵列的输出特性。

**关键词:** 热斑;阴影遮挡模型;平抛运动;光伏阵列

**中图分类号:** TM914.4;TM615 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.30

## Research on photovoltaic hot spot fault model based on multi-point horizontal projectile motion

Chen Gong<sup>1,2</sup> Wang Yan<sup>1,2</sup> Qiang Hao<sup>1</sup>(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China;  
2. School of Electrical and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

**Abstract:** Long-term shielding will affect photovoltaic panel photoelectric conversion and produce hot spots, and the output  $U-I$  curve of the corresponding photovoltaic array will also change, and the corresponding  $U-P$  curve will contain multiple peaks. In order to accurately locate hot spots, it is necessary to analyze the mechanism of hot spots generation and build a universal pv array model with shadow occlusion. In view of the traditional engineering model cannot accurately describe the electrical parameters of complex PV array such as CTCT, this paper proposes a multi-point flat throw motion pv array mathematical model with shadow occlusion. In order to verify the accuracy of the model, Matlab/Simulink modeling and simulation was used to build a hot spot simulation platform, and the light intensity was changed to simulate shadow occlusion and the connection mode of photovoltaic panels. The  $U-I$  and  $U-P$  characteristic curves of photovoltaic array were obtained and analyzed, compared with the engineering model, the proposed model reduces the operation time to 2.5%, and can describe the output characteristics of the complex photovoltaic array under local shadow more comprehensively.

**Keywords:** hot spot; shadow occlusion model; horizontal projectile motion; photovoltaic array

## 0 引言

近些年来,太阳能发电作为新兴的绿色能源实现了快速发展,成为 21 世纪最具潜力的替代能源<sup>[1]</sup>,但是实际应用中,由于环境等因素,光伏阵列受到的光照并不均匀,有些部分甚至会被遮挡,这就产生光伏热斑,从而影响光伏系统的输出特性。因此如何将光伏组件的检测贯穿于其生

产、应用和修复的过程中成为目前研究的热点,是不容忽视的重要问题<sup>[2]</sup>。要实现光伏组件的检测就必须研究光伏单体以及光伏阵列的电气输出特性,即适合的光伏阵列模型。通过模型分析并诊断热斑故障,根据阴影遮挡的严重程度进行及时补救。

目前,国内外对于光伏板模型已经做了比较深入的理论、实验和仿真研究,王潇然等<sup>[3]</sup>提出了光伏电池板的工程

收稿日期:2022-05-25

\* 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)资助

用数学模型及仿真模型,该工程模型仅依照相关光伏电池板上提供的属性参数  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $I_m$ 、 $V_m$  就可以在一定的工程环境下精确地重现光伏电池及其阵列的外部输出特性,但是它没有考虑到阴影遮挡的影响。颜景斌等<sup>[4]</sup>对工程用数学模型进行了改进,使之能够直接用于模拟光伏阵列,甚至用于光伏电站的大型光伏系统,避免了构建光伏系统模型中大量的理论分析与推导。其所需工程模型参数并未增加,但提高了原有模型的精度。但他的模型仅能用于串并联阵列。胡义华等<sup>[5]</sup>根据工程模型建立了光伏阵列数学模型,汪石农等<sup>[6]</sup>结合最小二乘法对工程模型进行求解,使得参数求解运算量大为减少,但是他们都没有考虑阴影遮挡的情况。

对于阴影遮挡方面的建模,朱艳伟等<sup>[7]</sup>分析局部阴影条件下光伏阵列的输出特性得出光伏阵列的输出功率峰值点个数最多为阵列并联数加 1 的结论。周亮等<sup>[8]</sup>对阴影条件下的光伏阵列的输出特性进行了分析,提出一种遮挡情况下光伏阵列快速建模的方法并探讨了光伏阵列的极值点分布情况,但没有考虑阴影条件下复杂结构的光伏阵列。薛阳等<sup>[9]</sup>构建了局部遮挡环境下光伏电池的仿真模型,但仅对串联阵列进行了验证,其他的拓扑结构并未涉及。裴婷婷等<sup>[10]</sup>在光伏阵列优化模型基础上,结合光照强度和温度的可变性,构造出一种能够根据动态阴影实时调整输出特性的光伏模型。滕哲铭<sup>[11]</sup>考虑到对光伏阵列造成遮挡的云层是实时移动的,通过对实云层进行采样和对有移动云层遮蔽的光伏阵列研究,结合实际的光伏阵列模型,分析了对光伏阵列产生移动阴影的典型样本并在此基础上建立了在移动阴影条件下的光伏阵列模型。Reinoso<sup>[12]</sup>根据动态阴影建立了光伏系统的模型,但是他在对光伏阵列进行建模时,由于对一段时间内变化的光照强度的采样结果是离散的数据点,所以模型不具备实时性。秦岭等<sup>[13]</sup>给出了太阳电池稳态、动态特性的解析表达式,推导出其等效电路及动态模型,但没有拓展到光伏阵列。Chanchang<sup>[14-18]</sup>等研究了积灰特性与光伏组件输出功率之间的关系,在此基础上范思远等<sup>[19]</sup>对积灰情况下的光伏组件进行建模,但该模型仅考虑积灰造成的遮挡,并没有考虑其他遮挡情况。

综合上述文献分析,已有光伏热斑模型存在运算量大,适用范围小的局限性,本文基于光伏电池的工程模型<sup>[3]</sup>,结合光伏电池运动学模型<sup>[20]</sup>,通过分析光伏阵列输出电压和电流、输出电压和功率之间的关系,仿真模拟热斑的形成,构建局部阴影遮挡下基于多点平抛运动的光伏热斑故障模型,并与工程模型进行比对。

## 1 阴影遮挡下光伏阵列模型

### 1.1 光伏电池工程模型

目前普遍应用的是一种适用于不同温度、光照条件下的光伏组件的工程模型<sup>[3]</sup>:

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

$$\begin{cases} C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \exp\left(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}\right) \\ C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1\right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)\right]^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_{ref} \\ \Delta S = S - S_{ref} \\ I_{sc} = I_{scref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ V_{oc} = V_{ocref} \ln(e + b \Delta S) (1 - c \Delta T) \\ I_m = I_{mref} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ V_m = V_{mref} \ln(e + b \Delta S) (1 - c \Delta T) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $I_m$ 、 $V_m$  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。 $I_{scref}$ 、 $V_{ocref}$ 、 $I_{mref}$ 、 $V_{mref}$  分别为标准条件下的短路电流、开路电压、最大功率点处电流和最大功率点处电压。 $T_{ref}$  为标准条件温度,  $T_{ref} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $S_{ref} = 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ,  $S_{ref}$  表示标准光照强度。系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  均为常数,其中  $a = 0.002\ 5\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $b = 0.5\ \text{m}^2/\text{W}$ ,  $c = 0.002\ 88\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

该工程模型能依据光伏电池原始属性参数实现对其的仿真,适合工程应用。但在光伏发电系统中,为了提高光伏电源输出的电压和功率,会对光伏电池进行串并联组成各种拓扑结构的光伏阵列<sup>[4]</sup>,由于外界环境因素的影响光伏阵列受到阴影遮挡,长时间会引起热斑效应,导致光伏阵列的  $U$ - $I$  曲线呈阶梯状,  $U$ - $P$  曲线呈多峰值,此时该工程模型便无法适用。

### 1.2 局部阴影下光伏阵列建模

为了解决工程模型的不足,傅望等<sup>[20]</sup>通过研究发现光伏电池  $I$ - $V$  特性曲线和质点平抛运动轨迹在一定程度上有极大的相似性,将二者曲线结合起来构建出了光伏单体的运动学模型。但该模型仅能描述正常光照条件下的光伏阵列输出特性,在有阴影遮挡情况下光伏阵列的输出伏安特性曲线呈阶梯状,如图 1 所示。

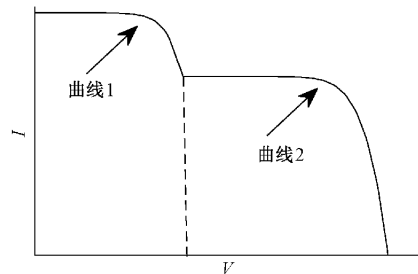


图 1 局部阴影下光伏阵列  $I$ - $V$  曲线

本文先将曲线分解为多个抛物线模拟多点平抛运动,在光伏单体运动学模型的基础上依次推导出对应的方程,最后把每段抛物叠加得出局部阴影下光伏阵列模型。

每段抛物线都可以和质点平抛运动轨迹建立在同一坐标系中,将其分为 $(0, xV_m)$ ,  $(xV_m, V_m)$ ,  $(V_m, V_{oc})$  3 段,如图 2 所示,将横坐标电压  $V$  当作质点的运动时间,纵坐标电流  $I$  便是其在竖直方向上的位移,那么光伏电池的  $I-V$  特性曲线可以看作质点从点 $(0, I_{sc})$ 的位置做平抛运动的轨迹图,其初速度设为  $V_0$ 。在质点的平抛运动轨迹中,假设存在 3 个不同的重力场  $g_0=0$ (质点做匀速直线运动)、 $g_1$ 、 $g_2$ , 3 个重力场的分界与  $I-V$  特性曲线相同。通过运动学理论推导出重力场的公式,从而推出质点的运动轨迹方程,即为光伏阵列模型的  $I-V$  特性方程。

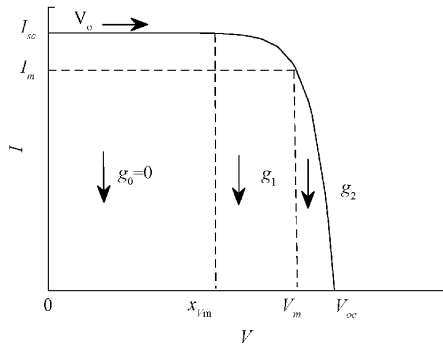


图 2 模型推导曲线

由运动学理论可以推导出小球的运动轨迹方程为:

$$I = \begin{cases} \sum_{i=1}^n I_{sc_i}, (V_{oc_{i-1}} \leq V < X_i V_{mi}, V_{oc_0} = 0) \\ \sum_{i=1}^n \left[ I_{sc_i} - \frac{1}{2} g_{i1} \left( \frac{V - X_i V_{mi}}{V_i} \right)^2 \right], (X_i V_{mi} \leq V < V_{mi}) \\ \sum_{i=1}^n \left[ I_{mi} - \frac{1}{2} g_{i2} \left( \frac{V - V_{mi}}{V_i} \right) - g_{i1} \left( \frac{V - X_i V_{mi}}{V_i} \right) \left( \frac{V - V_{mi}}{V_i} \right) \right], (V_{mi} \leq V < V_{oc_i}) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $g_{i1}$  和  $g_{i2}$  的值如下:

$$\begin{cases} g_{i1} = \frac{2(I_{sc_i} - I_{mi})V_i^2}{(V_{mi} - X_i V_{mi})^2} \\ g_{i2} = \frac{2V_i^2 I_{mi}(V_{mi} - X_i V_{mi}) - 4V_i^2(I_{sc_i} - I_{mi})(V_{oc_i} - V_{mi})}{(V_{mi} - X_i V_{mi})(V_{oc_i} - V_{mi})^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $I_{sc_i}$ 、 $V_{oc_i}$ 、 $I_{mi}$ 、 $V_{mi}$  分别为光照强度为  $S$  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,  $(n-1)$  为受阴影遮挡的模块数。傅望等<sup>[20]</sup>通过对大量实测数据进行对比分析得出结论:无论是单晶硅还是多晶硅太阳能电池,在一般陆地光照和温度的环境条件下,  $x$  的取值与光照强度正相关,与电池温度关系不大,进而拟合出  $x$  最佳取值公式为:  $x = 0.00027S + 0.5492$ 。该公式对于基于平抛运动的模型具有通用性,本文提出的模型也是基于平抛运动得出的,因此本文的模型中  $x$  的取值同上。

## 2 仿真实证

为了验证本文所建立模型的优越性以及适用性,在 MATLAB/Simulink 中搭建各种拓扑结构(串联、并联、SP、TCT、CTCT)的光伏阵列进行仿真,其中 CTCT 阵列(每一行光伏模块先并联连接,行与行之间再串联连接,然后一组模块之间再并联连接,之后继续串联连接,具体串联连接和并联连接的次数根据实际情况来确定<sup>[21]</sup>)仿真如图 3 所示。

如图 4~8 为工程模型、多点平抛模型二者的电压-电流、电压-功率对比图。单个光伏模块的基本参数与后文实测中光伏板性能参数一致均为:  $V_{oc} = 10.2 \text{ V}$ ,  $I_{sc} = 0.62 \text{ A}$ ,  $V_m = 9 \text{ V}$ ,  $I_m = 0.56 \text{ A}$ , 参考温度为:  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 参考光照为:  $1000 \text{ W/m}^2$ , 遮挡部分光照为:  $500 \text{ W/m}^2$ 。从电压-电流、电压-功率对比图中可以看出多点平抛模型输出特性和工

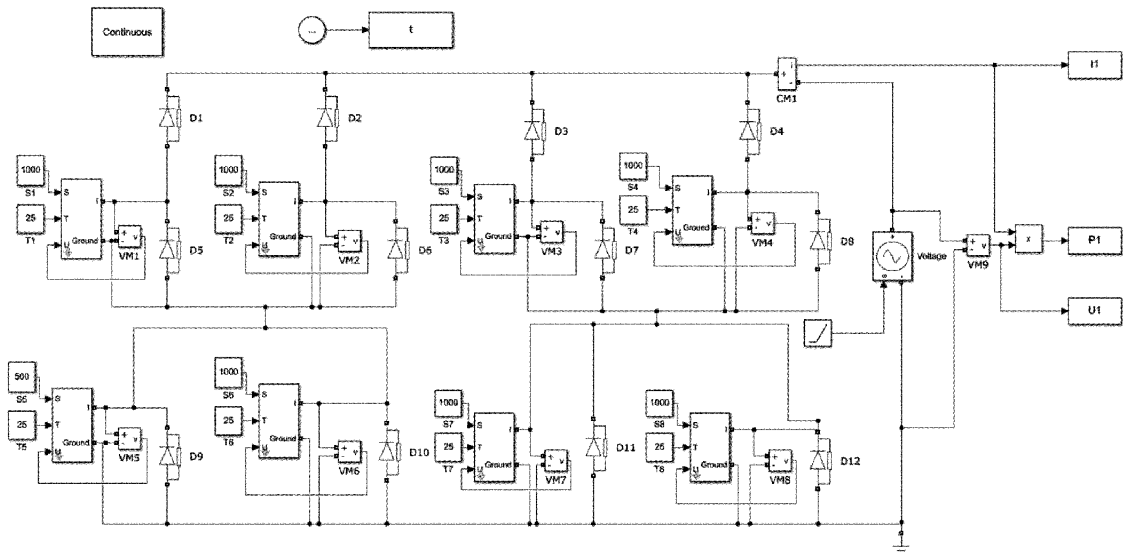
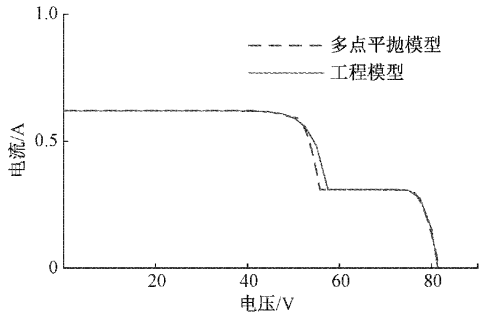
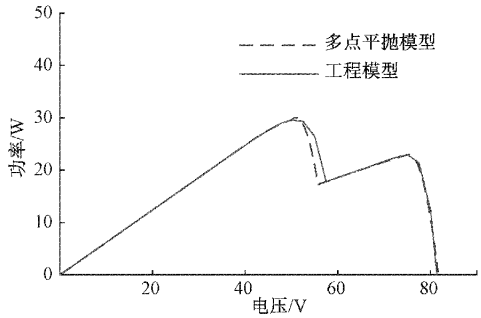


图 3 CTCT 阵列仿真图

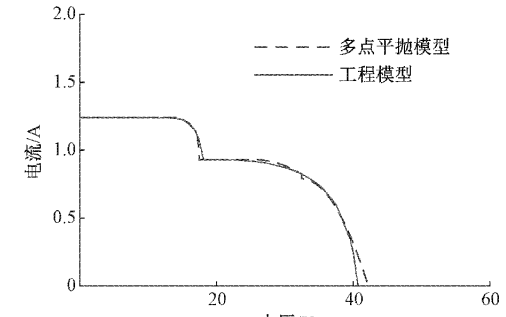


(a) 电压-电流对比图

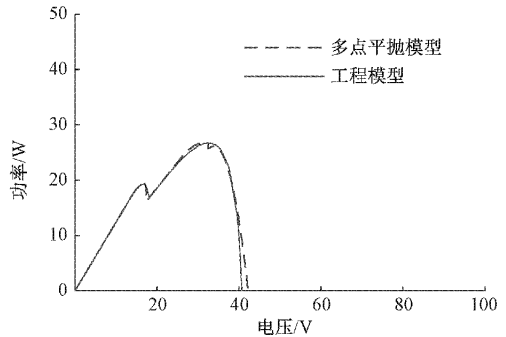


(b) 电压-功率对比图

图 4 串联阵列

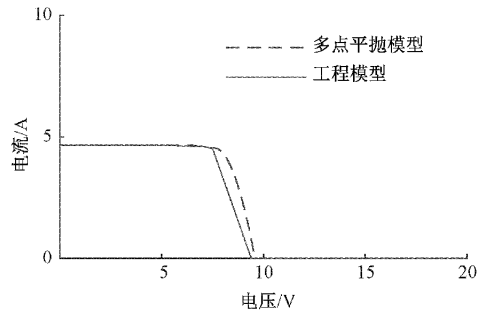


(a) 电压-电流对比图

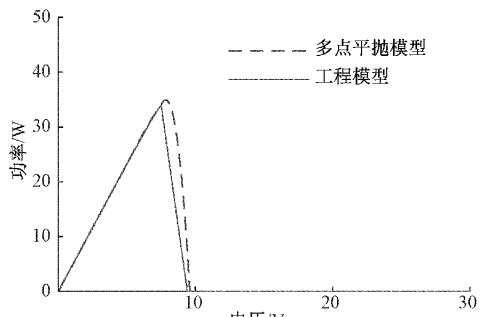


(b) 电压-功率对比图

图 6 SP 阵列

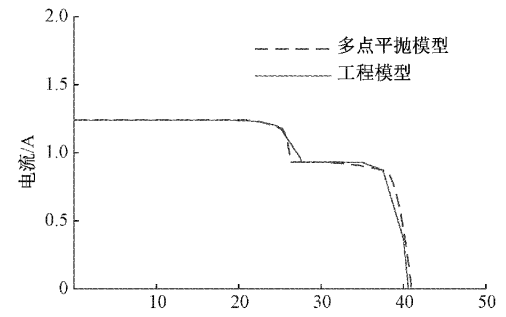


(a) 电压-电流对比图

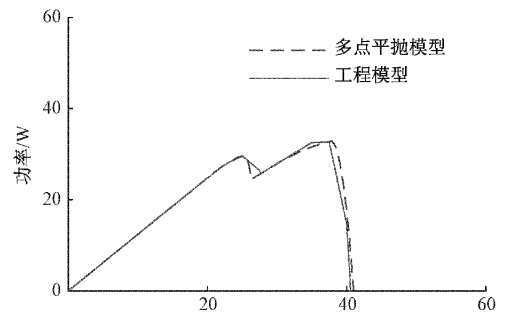


(b) 电压-功率对比图

图 5 并联阵列



(a) 电压-电流对比图



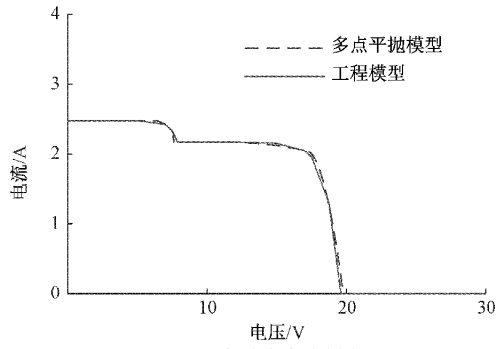
(b) 电压-功率对比图

图 7 TCT 阵列

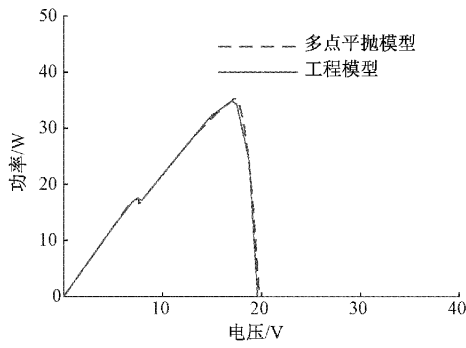
程模型略有出入,但是误差在工程允许的精度(5%)之内,输出曲线基本重合,两种模型的功率曲线具有相同的波峰。

刘晓艳等<sup>[22]</sup>建立了局部阴影条件下的光伏阵列电流方程模型,其适用于阴影条件下简单结构的光伏阵列,该模型与工程模型、多点平抛模型在串联结构与 SP 结构

下的电压-电流、电压-功率对比图如图 9、10 所示。由于电流方程模型中的电压取决于光伏阵列每列电压的最大值,这就导致遮挡部分的电压取值有误差。此外,因为该模型的电流是将每列分为两段来计算的,所以对应的光伏阵列



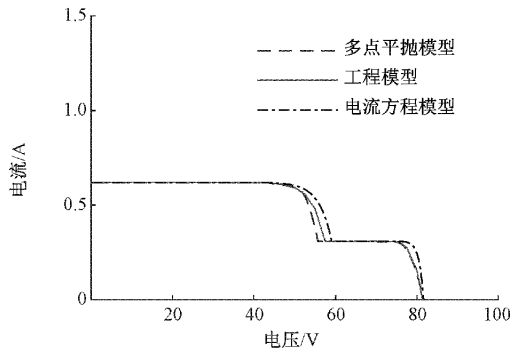
(a) 电压-电流对比图



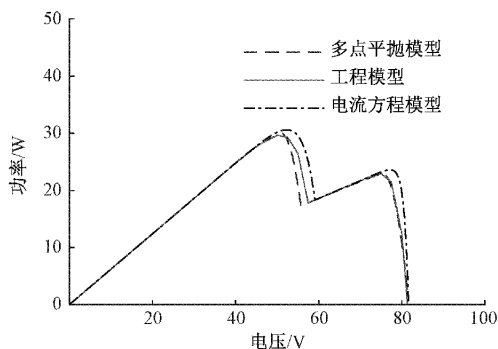
(b) 电压-功率对比图

图 8 CTCT 阵列

中至少有 2 个光伏模块串联,如果遇到并联、TCT 以及 CTCT 这些复杂光伏阵列便无法准确描述。



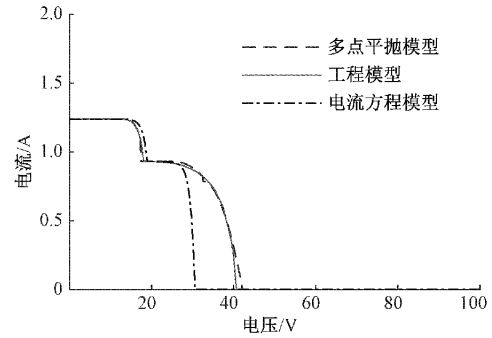
(a) 电压-电流对比图



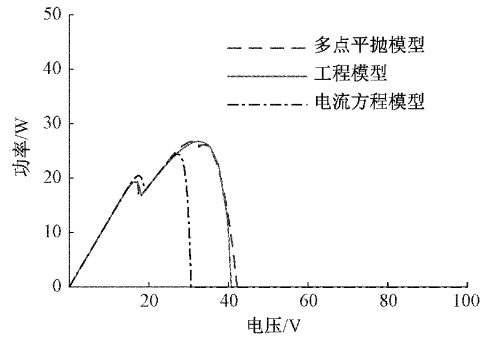
(b) 电压-功率对比图

图 9 串联阵列

在实际应用中,光伏电池的最大功率点随大气条件变



(a) 电压-电流对比图



(b) 电压-功率对比图

图 10 SP 阵列

化而偏移<sup>[23]</sup>,所以必须实时调整系统的工作电压,使阵列在任意时刻都能工作在最大功率点处,向外输出最多的电量。表 1、2 分别为 3 个模型(工程模型、电流方程模型和多点平抛模型)的  $U_m$ 、 $I_m$  对比表以及各模型与工程模型  $U_m$  误差对比表。

表 1 三个模型  $U_m$ 、 $I_m$  对比

	工程模型		电流方程模型		多点平抛模型	
	$U_m/V$	$I_m/A$	$U_m/V$	$I_m/A$	$U_m/V$	$I_m/A$
串联	50	0.592	52.4	0.585	51.15	0.584
并联	7.5	4.535	—	—	7.837	4.427
SP	32.5	0.822	27.4	0.889	31.54	0.851
TCT	37.5	0.872	—	—	37.76	0.871
CTCT	17	2.049	—	—	17.19	2.047
运算时间	4 s		0.237 348 s		0.113 692 s	

表 2 各模型与工程模型  $U_m$  误差对比表

	串联	并联	SP	TCT	CTCT
电流方程模型	4.8%	—	15.7%	—	—
多点平抛模型	2.3%	4.5%	2.9%	0.6%	1.1%

通过对比可以明显看出电流方程模型最大功率点所在的电压和电流值与工程模型相比偏移较大,对于光伏电站最大功率实时输出对应的工作电压的调整有影响,而多点平抛模型和工程模型的最大功率点对应电压和电流参数几乎一致。由于工程模型涉及到指数运算,所以计算繁琐复杂。而本文提出的模型在误差达到 5% 以内的前提



下,相较于工程模型来说计算量明显减小,求解较为简单。此外,本文构建的多点平抛模型的应用范围广泛,其不仅仅局限于串并联、SP、TCT 结构,还适用于其他复杂的光伏阵列结构。

### 3 热斑模拟平台实测分析

为了验证本文提出模型的正确性,搭建热斑模拟平台,该平台由 8 块光伏板、电流输入配电隔离器模块、信号采集模块、控制模块组成。硬件电路原理框图如图 11 所示。

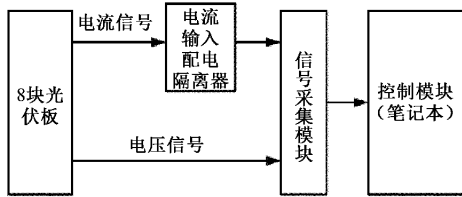


图 11 硬件电路原理框图

各光伏板之间接入继电器,通过控制继电器的通断来实现光伏阵列拓扑结构的变换,平台中采用 MY1521 电流输入配电隔离器,其功能就是把光伏阵列输出的直流电流信号进行隔离,然后将其转换为标准电压信号。通过电流输入配电隔离器采集的输出电流与输出电压经信号采集模块进入控制模块(笔记本),具体实物如图 12 所示。

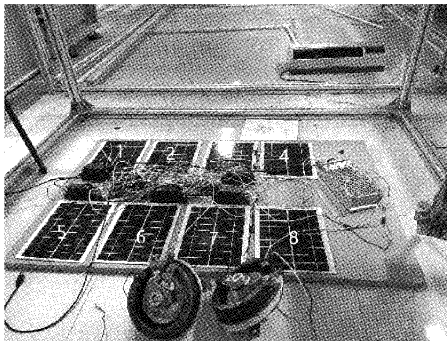
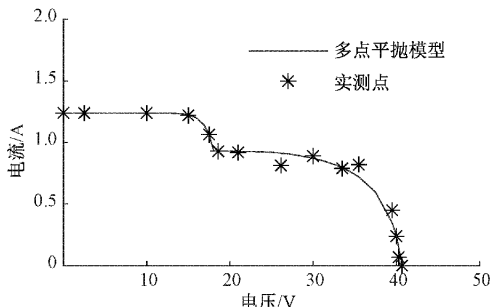
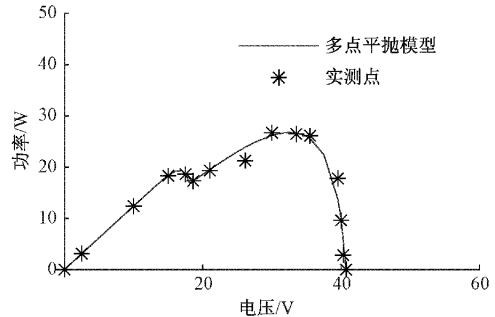


图 12 模拟热斑平台

实验时通过遮挡 1 号光伏板一半的面积模拟热斑故障,分别测量 SP、TCT、CTCT 结构下光伏阵列的输出电流与电压并将多点平抛模型的电压-电流、电压-功率曲线与实验测得的数据进行比较如图 13~15 所示。

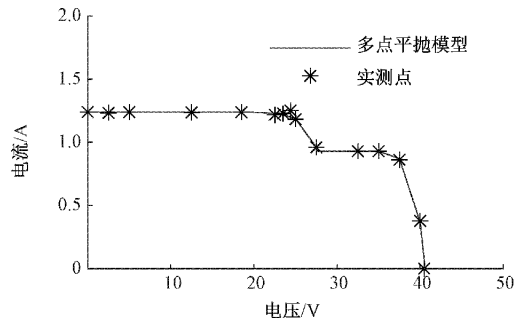


(a) 电压-电流对比图

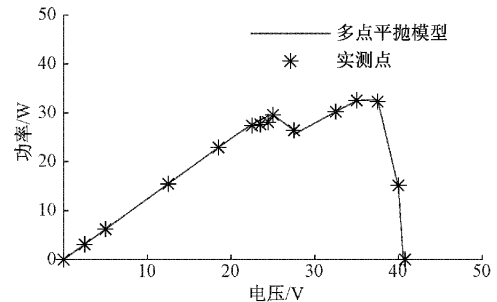


(b) 电压-功率对比图

图 13 SP 阵列



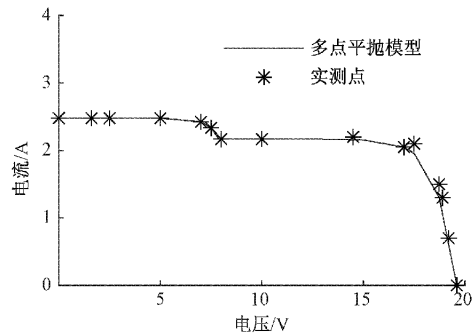
(a) 电压-电流对比图



(b) 电压-功率对比图

图 14 TCT 阵列

从图中可以看出推导模型理论输出曲线与实验测得的数据有些许差别,多点平抛模型的最大功率点电压  $U_m$  与 SP、TCT 结构的光伏阵列的实测数据一致,与 CTCT 结构的光伏阵列的实测数据相比提高了 3%,这是因为理论模型是在理想条件下推导从而忽略了光伏板内部二极管



(a) 电压-电流对比图

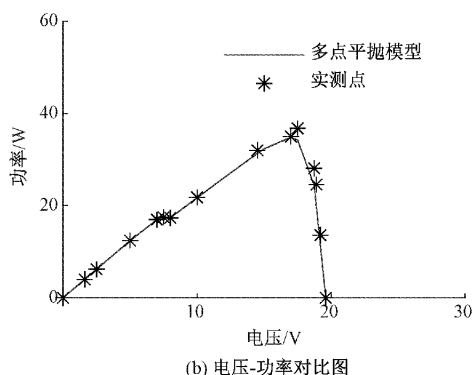


图15 CTCT阵列

的损耗以及实验中温度变化的影响。但大部分实测点的变化趋势与理论曲线一致。因此本文提出的多点平抛模型可以准确描述阴影遮挡情况下复杂光伏阵列的输出特性。

#### 4 结 论

本文结合光伏单体工程模型和运动学模型建立局部阴影条件下多点平抛运动光伏阵列模型并对其进行仿真验证和实验验证,分析局部阴影条件下多点平抛运动光伏阵列模型的输出特性。与工程模型和其他改进模型相比,多点平抛运动光伏阵列模型能够适用于局部阴影条件下的复杂拓扑结构光伏阵列建模,该模型的输出特性曲线与工程模型相比误差小于5%,该模型可为光伏系统的最大功率跟踪研究提供理论和实验依据,降低光伏系统输出电量的损失。

#### 参考文献

- [1] 李紫倩,梁飞,孙荣霞,等. 太阳能电池按经纬和时间自跟踪控制器设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(4): 6-10.
- [2] 陈功,蔡磊,张琳,等. 光伏热斑模拟建模及热成像分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 191-197.
- [3] 王潇然,边敦新. 光伏阵列在局部阴影下的建模与特性分析[J]. 现代电子技术, 2019, 42(8): 109-112,117.
- [4] 颜景斌,佟尧,曹雷,等. 局部阴影条件下光伏电池建模与输出特性仿真[J]. 电源技术, 2018, 332(5): 83-86,90.
- [5] 胡义华,陈昊,徐瑞东,等. 光伏电池板在阴影影响下输出特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 123-128,134.
- [6] 汪石农,陈其工,高文根. 太阳能电池模型工程求解及其应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(4): 193-198.
- [7] 朱艳伟,石新春,但扬清,等. 粒子群优化算法在光伏阵列多峰最大功率点跟踪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 42-48,20.
- [8] 周亮,武美娜,胡安. 局部遮挡下光伏阵列的快速建模及极值点分布特征研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 572-581.

- [9] 薛阳,张佳栋. 部分阴影条件下的光伏阵列仿真建模与特性分析[J]. 华东电力, 2011, 39(6): 949-952.
- [10] 裴婷婷,郝晓弘. 局部阴影条件下光伏阵列的动态建模[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 274-280.
- [11] 滕哲铭. 有移动云阴影遮蔽的光伏阵列模型及MPPT算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [12] REINOSO C R, MILONE D H, BUITRAGO R H. Simulation of photovoltaic centrals with dynamic shading[J]. Applied energy, 2013, 103(1): 278-289.
- [13] 秦岭,谢少军,杨晨,等. 太阳能电池的动态模型和动态特性[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 19-26,123.
- [14] CHANCHANGI Y N, GHOST A, SUNDARAM S, et al. Dust and PV performance in nigeria: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 121(4): 109704.
- [15] CHANCHANGI Y N, GHOST A, SUNDARAM S, et al. An analytical indoor experimental study on the effect of soiling on PV, focusing on dust properties and PV surface material [J]. Solar Energy, 2020, 203(6): 46-68.
- [16] KAZEM H A, CHAICHAN M T. Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in northern oman [J]. Solar Energy, 2016, 139(12): 68-80.
- [17] SAID S A M, WALWIL H M. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance[J]. Solar Energy, 2014, 107(9): 328-337.
- [18] PAUDYAL B R, SHAKYA R. Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu [J]. Solar Energy, 2016, 135(10): 103-110.
- [19] 范思远,王煜,曹生现,等. 积灰对光伏组件输出特性影响建模与分析[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 83-91.
- [20] 傅望,周林,郭珂,等. 基于平抛运动模型的数字式光伏阵列模拟器[J]. 华东电力, 2011, 39(3): 468-473.
- [21] 宋文海,李田泽,乔家振,等. TCT结构光伏阵列故障检测方法研究[J]. 电源技术, 2019, 43(7): 1164-1167.
- [22] 刘晓艳,祁新梅,郑寿森,等. 局部阴影条件下光伏阵列仿真模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(5): 1125-1131.
- [23] 张严,王亚君,余佳琪. 基于神经网络-自适应模糊的光伏MPPT算法[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(4): 62-69.

#### 作者简介

陈功,博士,副教授,主要研究方向为光伏热斑检测。

E-mail: realchengong@sina.com

王葵,硕士研究生,主要研究方向为新能源技术与装备。

E-mail: 1402058950@qq.com

强浩(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为新能源发电、电力电子。

E-mail: qhao@cczu.edu.cn