



一种基于半导体的光伏发电系统 冷却装置研究

原晓楠, 刘羽霄, 黄汉骐, 刘文字, 李永强

(西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 随着新能源的发展, 光伏发电得到不断的推广应用, 但目前光伏发电系统仍存在散热冷却不足导致发电效率低的问题。该文综合对比多种光伏发电系统散热冷却方法, 设计了一种基于半导体散热原理的光伏发电系统冷却装置, 基于珀尔帖元件制作散热冷却模块, 脉冲宽度调制信号与金属-氧化物半导体场效应晶体管相结合实现散热冷却模块的功率控制, 设计增量比例-积分-微分算法实现系统的反馈调节, 基于 MATLAB 设计人机交互界面便于系统智能调控, 通过模拟测试与实物测试相结合, 发现在设定冷却温度为 18 °C 的条件下, 装置能够将光伏板表面温度波动幅度保持在 1 °C 以内, 对光伏发电系统发电效率的提升具有重要意义。

关键词: 光伏发电; 半导体散热; 珀耳帖元件; 增量 PID 算法; 发电效率

中图分类号: TM930.2

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230418

Research on the Semiconductor-Based Photovoltaic Cooling Device

YUAN Xiaonan, LIU Yuxiao, HUANG Hanqi, LIU Wenyu, LI Yongqiang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the development of new energy, photovoltaic power generation has been continuously promoted and applied. However, the current photovoltaic power generation system still has the problem of low power generation efficiency caused by insufficient cooling. The paper comprehensively compares various heat dissipation and cooling methods for photovoltaic power generation systems, and designs a cooling device for photovoltaic power generation systems based on the semiconductor heat dissipation principle. A heat dissipation and cooling module is made based on Peltier components, and pulse width modulation (PWM) signals are combined with the metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) to achieve the power control of the heat dissipation and cooling module. An incremental proportional-integral-differential (PID) algorithm is designed to achieve feedback regulation of the system. The human-computer interaction interface is designed based on MATLAB to realize the intelligent control of the system. Through simulation testing and physical testing, it is found that when the cooling temperature is set at 18 °C, the device can keep the fluctuation range of the surface temperature of the photovoltaic panel within 1 °C, which is of great significance to the improvement of the power generation efficiency of the photovoltaic power generation system.

Key words: photovoltaic power generation; semiconductor heat dissipation; Peltier element; incremental PID algorithm; power generation efficiency

光伏发电系统在工作过程中会产生很多热量, 而这些热量集聚在光伏板表面会使光伏工作效率降低、运行寿命缩短。在标准测试条件下, 单结光伏电池的理论最高转化效率为 33.7%, 多结光伏电池的理论最高转化效率可超过 60%。即便

如此, 实际仍有一半以上的太阳能无法转化为电能, 而未转化的太阳能将转变为热量积聚在电池中, 对电池的性能、寿命造成不利影响。过高的温度会使光伏板的运行寿命降低约 30% 左右, 因此运行温度是光伏发电系统设计时需重点考虑的

收稿日期: 2023-09-08; 修回日期: 2024-02-04

基金项目: 2022 年西安交通大学课程思政专项研究项目(KCSZ202235); 2022 年国家级大学生创新创业训练项目(GJ202110698048)。

作者简介: 原晓楠(1993-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电工电子技术实验方面的教学研究。E-mail: yxn0002017060@xjtu.edu.cn

参数之一。当运行温度过高, 需要采取一定的冷却散热措施来降低高温对光伏电池的损害。

当前, 光伏发电系统冷却方式主要分为被动式和主动式两种, 具体包括传统的风冷和液冷方式以及新型的蒸发冷却、热电冷却、辐射冷却、相变材料冷却等技术^[1-2]。各种冷却方式的技术在近年来都有较大进步, 如文献 [3-5] 采用风冷技术, 通过在光伏板背面的空气流道中间增加金属薄板从而提高空气与光伏板背面的对流传热; 文献 [6-8] 则采用了液冷的方式对光伏表面进行冷却, 达到了较好的冷却效果; 文献 [9-13] 采用数值模拟的方式计算冷却前后光伏表面的温度, 通过毛细管深入光伏板内部的方式进行冷却; 文献 [14] 提出使用相变材料对光伏材料进行冷却。

不同的冷却方式有不同的优缺点, 自然风冷无法实现温度控制, 而强制风冷和液冷装置的运行寿命都相对较低, 因此文献 [15] 提出使用半导体散热方式进行冷却, 其运行寿命长且能实现很好的温度控制, 但尚未实际应用于光伏发电系统中。为弥补上述缺陷, 本文采用半导体散热方式, 利用珀耳帖元件设计光伏发电系统冷却装置, 利用增量 PID 算法实现光伏发电系统表面温度的控制, 并根据设定温度实现自主反馈调节, 以期提高光伏发电系统的发电效率。

1 系统设计

1.1 设计原理

热电效应是半导体独特的效应之一, 是在外加电场的作用下, 电子发生定向移动, 从而实现内能传递的一种效应。在实际应用中主要包括塞贝克 (Seebeck) 效应和珀耳帖 (Peltire) 效应两种热电效应。本文中用的是珀耳帖效应, 即当电流通过不同的导体组成的回路时, 除产生不可逆的焦耳热外, 在不同导体的接头处随着电流方向的不同会分别出现吸热、放热现象。珀耳帖效应所对应的元件即珀耳帖元件, 其工作原理如图 1 所示。

珀耳帖元件在外加电场的作用下能够持续将温度从冷端向热端转移, 从而使得其冷端温度降低, 因此本文将珀耳帖元件的冷端紧贴在光伏板背面实现冷端吸热, 在热端部分加装散热翅片以加强散热。

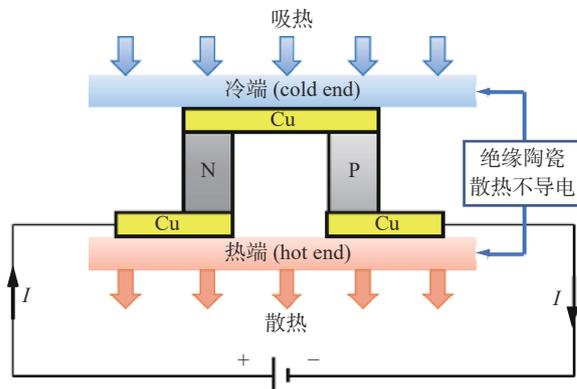


图 1 珀耳帖元件工作原理图

1.2 设计思路

系统设计结构图如图 2 所示, 首先利用温度采集模块对光伏板表面的温度进行采集处理后传输给上位机, 上位机根据设定温度和采集温度差值发出控制信号, 由 PWM 发生器和 MOSFET 作为中间器件最终控制半导体散热模块的冷却功率, 实现对光伏表面温度的控制, 整体实现了负反馈调节, 其中 PWM 发生器和 MOSFET 均采用开关电源供电。同时设计了系统冷却调控的人机交互界面, 在该界面中可以很好地对系统的整体运行状态进行观察以及调控控制参数, 相应的数据也能及时保存在上位机中便于后续数据处理或查看。

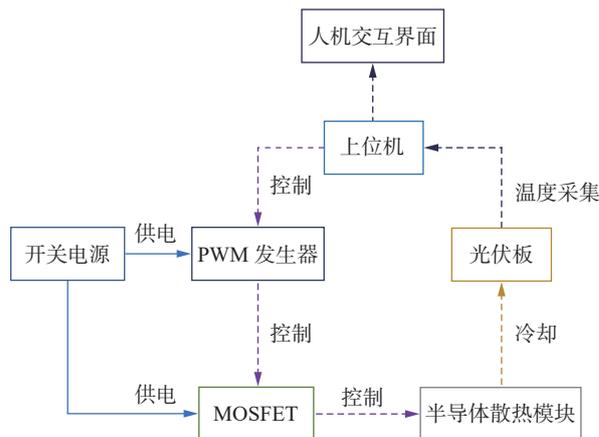


图 2 系统设计结构图

2 硬件设计

2.1 元件选型

2.1.1 温度采集元件

温度采集元件主要包括 K 型热电偶、温度变送器、模拟量测量模块 (A/D) 以及 RS485 转 USB 转换器, 考虑到系统采集的数据可能存在电压、

电流过大而无法直接测量，使用温度变送器统一将信号变选为 0~5 V 电压信号输出到模拟量测量模块中，利用 RS485 转 USB 转换器便于数据传输。

2.1.2 冷却元件

珀耳帖元件采用 TEC1-12706a，额定电压为 12 V，尺寸为 40 mm×40 mm×3.7 mm。为了增强半导体元件的冷却散热效果，采用一体化组装的散热模块，如图 3 所示，包括上层铝板、下层散热 4 铜管分叉结构、与铜管相连接的两层散热翅片和位于翅片中的散热风扇。

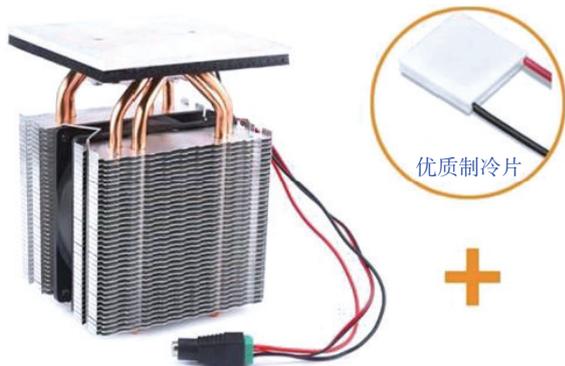


图 3 半导体一体化散热模块

2.1.3 其他元件

系统通过反馈调节电压大小从而控制珀耳帖元件的冷却功率。PWM 控制是常用的电压控制策略，选择 PWM 信号发生器配合 MOSFET 进行信号转换，实现系统控制功能。系统供电采用 24 V 开关电源，由于半导体散热模块额定电压为 12 V，需要通过 DC-DC 变换器将 24 V 电压转换为 12 V。由于实验测试的功率限制，半导体和光伏板的功率不能过大，实验选用 20 W 的单晶硅光伏板进行测试。

2.2 结构设计

2.2.1 冷却结构设计

初步实验发现，光伏板在工作过程中正反面温度变化几乎相同，如果将冷却系统布置在正面不仅会影响光伏板的输出功率同时也会在一定程度上遮挡光线从而降低发电效率，因此选择将冷却系统布置在光伏板背面。但由于光伏板面积过大而半导体散热模块较小，直接使用无法达到较好的冷却效果，因此选择将额外的紫铜片叠放在半导体散热模块之上以加强冷却效果，其中紫铜片的厚度为 0.5 mm，长宽均为 20 mm，能够覆盖

光伏板背面核心发热区域。为进一步加强铜片和半导体模块的散热，二者之间加入了导热银硅脂加强换热，具体的硬件结构如图 4 所示。

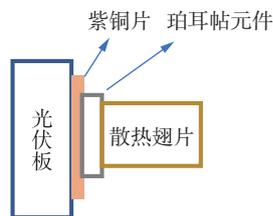


图 4 冷却结构示意图

2.2.2 控制电路结构设计

上位机通过比较设定温度和实际采集温度的大小对 PWM 信号发生器的占空比进行设置，进而控制 MOSFET 的导通与关断。通过 MOSFET 控制开关电源提供的等效输出电压，半导体散热模块的输出功率根据等效输出电压变化，从而实现系统对冷却功率的控制，具体的控制电路原理如图 5 所示。

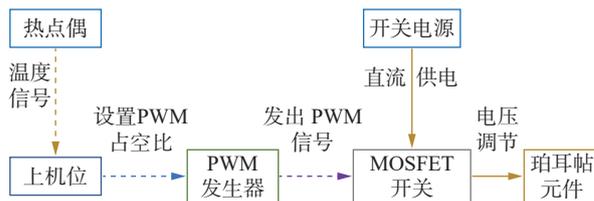


图 5 控制电路原理图

3 算法设计

3.1 数据传输

光伏板表面温度数据经由温度采集模块后利用 MATLAB 自带的串口通信模块进行接收和发送数据。采用通用的 MODBUS 通信协议，通信格式如图 6 所示，以读取模数转换器的数据为例，通信地址为 03，读取数据的功能码为 04，数据部分包括数据长度字符以及相应长度的数据，最后的两位是为了保证数据完整性的 CRC 差错校验，其数值是根据前面所有字节计算出来的 4 位 16 进制数，从而完成数据传输功能。

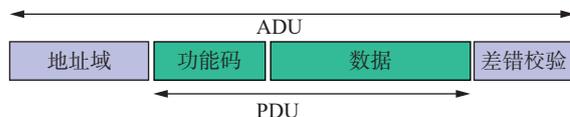


图 6 MODBUS 通信格式

PWM 信号发生器也采用 RS485 转 USB 转换器连接到上位机电脑上，其与模数转换器的

MODBUS 地址不同, 因此可以直接相连。上位机获取信息即读操作只读取模数转换器的信息, 下发控制指令即写操作只控制 PWM 模块。

3.2 温度控制算法设计

系统利用 PWM 信号控制 MOSFET 的通断, 从而控制冷却系统的冷却功率。PWM 信号选用频率设定为 25 Hz(经测试发现在此频率下调节占空比功率变化较为明显), 设计 PID 算法通过调节 PWM 信号占空比实现功率调节。

在工业过程中, 连续控制系统的理想 PID 控制规律为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: $u(t)$ 为 PID 控制器的输出信号; $e(t)$ 为给定值与测量值之差即偏差量; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; K_p 为比例增益; K_i 为积分增益; K_d 为微分增益。

由于系统采用数字式控制器, 其采样周期是离散的, 因此式(1)需要转化为离散形式, 即位置式 PID 控制:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

式中: k 为离散的第 k 个采样点。

位置式 PID 算法随着运行时间的推移需要很大的存储空间, 为了进一步优化, 采用增量式 PID 算法, 利用增量对控制器的输出进行修正, 可以大幅减少存储量, 计算公式如下:

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3)$$

式中: $\Delta u(k)$ 为 PID 控制器的输出信号增量。

由式(3)可见, PID 控制器输出信号增量的计算需获取当前时间点以及前两个时间点的温度数据, 而在系统开始启动时并没有历史数据, 此时系统会将所有历史温度设置为当前温度。由于控制器只需要存储 3 个温度数据, 因此随着采样时间推移, 会依次交互更迭 3 个温度数据, PID 控制器输出信号增量计算时也会进行相应调整。

由于项目的被控量是温度, 而且被控对象是半导体冷却模块, 其惯性时间比较大, 因此选用较大的采样周期 10 s, 算法设计流程图如图 7 所示。

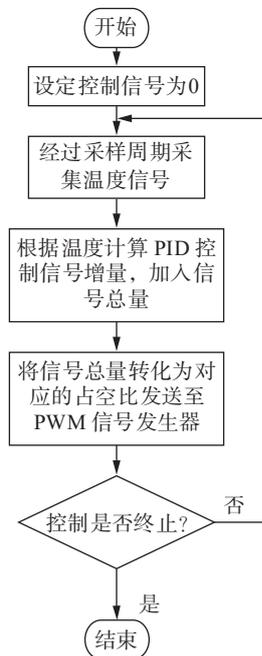


图 7 算法设计流程图

3.3 人机交互界面设计

系统采用 MATLAB 的 app designer 控件进行人机交互界面的设计, 如图 8 所示。在界面的上方可看到表面温度的记录图像和光伏板的开路电压, 这里只记录了一块光伏板的温度和电压, 若要记录多块光伏板的数据只需读取数据后添加到图像上即可。界面的下方可设定当前冷却系统的工作温度和 PID 参数, 右下方是启动记录和暂停记录的按钮, 可以控制整个冷却系统的运行。界面最下方可显示冷却系统的当前运行状态, 即时刻、运行总时间、PWM 占空比(冷却系统的控制参量)、表面温度和开路电压。开路电压在实际应用当中可以变成工作电压, 这里为了体现冷却效果换成了开路电压。

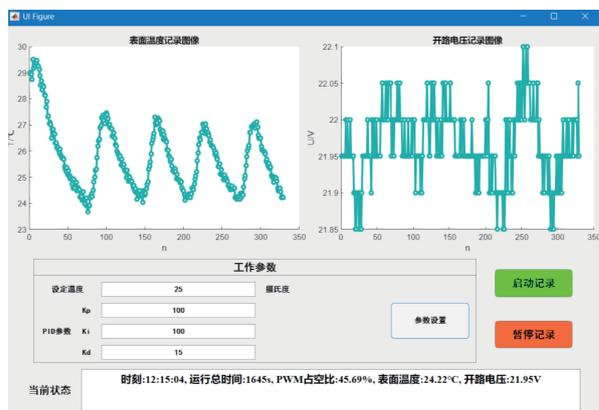


图 8 人机交互界面

在系统运行过程中，可动态调整参数的设定，系统可及时响应。由于使用的是 MATLAB 的动态图绘制，因此在交互界面可动态地看到温度调控以及开路电压的调整变化。

4 系统测试

4.1 模拟测试

模拟测试部分采用 1000 W 的钨丝灯模拟太阳光照射情况，设置两块光伏板进行对比实验。利用钨丝灯对两块光伏板进行照射加热升温后让其冷却，其中一块光伏板加装冷却系统，另一块光伏板不加装冷却系统，通过对比升温过程和降温过程中的两块光伏板的温度变化来判断冷却装置

是否有效。

设定系统控制温度为 18 ℃，采用式(3)提出的增量式 PID 控制算法，通过调节不同的 PID 参数可得到不同的温度控制效果，绘制图像如图 9 所示。加入冷却系统后光伏板的温度变化基本在控制温度处波动，而未加入冷却系统的光伏板温度依靠自然风冷只能随环境缓慢变化，说明冷却系统的加装对于光伏板温度的稳定是初步有效的。同时，通过多次实验反复调整 PID 参数进行效果对比，在不同的 PID 参数中得出较好的一组 PID 参数为 $K_p=40$ ， $K_i=35$ ， $K_d=15$ ，其响应速度快，超调量较小。

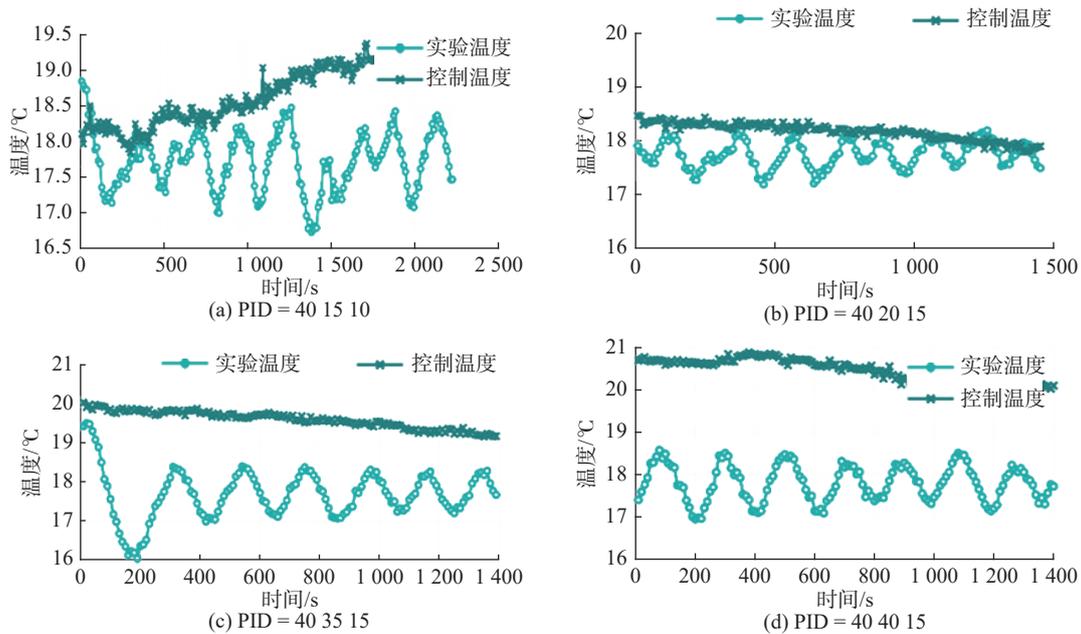


图 9 部分 PID 参数调节实验组与对照组冷却效果图

4.2 实测结果

选取春季某一天在室外进行测试，由于此时环境温度较低，因此冷却温度设定为较低水平，仍为 18 ℃。选取两块相同的光伏板，一块加装冷却系统，另一块不加装冷却系统，两块光伏板在工作一段时间后的温度变化如图 10 所示，上方曲线为未加装冷却系统的光伏板温度变化曲线，下方曲线为加装冷却系统后的光伏板温度变化曲线，可见加装冷却系统后，在环境扰动较小的情况下，利用增量 PID 算法可以很好地控制光伏板表面的温度。

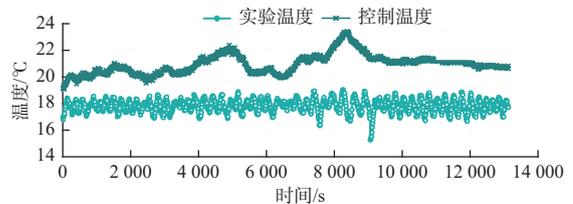


图 10 某天加装冷却系统前后温度变化对比图

5 结束语

论文通过分析现有光伏发电系统冷却方案的优缺点及各自的适用范围，提出了一种基于珀耳帖元件的半导体散热冷却方案。基于珀耳帖效应通过多次实验自主设计冷却结构，利用 MOSFET

开关对半导体元件的散热功率进行控制,设计增量PID算法通过调整参数的方式实现系统的反馈调节,使光伏板表面的温度趋于设定温度。同时为了便于用户实时观测与调控,基于MATLAB平台设计了人机交互界面,实现系统状态的动态直观调控及数据存储,设计了一种采用半导体散热的智能化光伏发电系统冷却装置。通过多次模拟测试与实际环境测试发现,系统能将温度波动范围控制在1℃以内,对于光伏发电系统发电效率的提高具有重要意义。

参考文献

- [1] 梁宁文,任能,吉影.光伏板风冷及水冷技术研究进展[J].中外能源,2020,25(5):28-34.
- [2] 邱昊,袁芬,芮明奇,等.聚光光伏系统散热研究进展[J].广州化学,2021,46(1):25-31.
- [3] 郭玮,刘杰.关于光伏电池最佳风冷方案的模拟研究[J].可再生能源,2020,38(9):1163-1168.
- [4] 王兆萌,全贞花,赵耀华,等.风冷式建筑一体化光伏光热组件夏季性能研究[J].建筑科学,2020,36(6):56-63.
- [5] 肖梦晴.屋顶集成光伏低风速下的散热及结构优化研究[D].上海:东华大学,2022.
- [6] CHEN H B, CHEN X L, LI S Z, et al. Comparative study on the performance improvement of photovoltaic panel with passive cooling under natural ventilation[J]. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2014, 3(4): 374-379.
- [7] TANAGNOSTOPOULOS Y, THEMELIS P. Natural flow air cooled photovoltaics[C]//AIP conference proceedings. America: AIP Publishing, 2010: 1013-1018.
- [8] 梁宁文.基于数值模拟的光伏板水冷特性研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2021.
- [9] 王芳,宓雪,杨熠邦,等.冷却光伏板的毛细管换热装置设计与传热分析[J].山西建筑,2021,47(10):152-154.
- [10] GREEN M A, EMERY K, HISHIKAWA Y, et al. Solar cell efficiency tables(version 47)[J]. Progress in Photovoltaic: Research and Applications, 2016, 24(1): 3-11.
- [11] SCHÄFER J. Device and method for cooling solar cells by means of a flowing cooling medium: US2012-0060896[P]. 2012-03-15.
- [12] SKOPLAKI E, PALYVOS J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations[J]. Solar Energy, 2009, 83(5): 614-624.
- [13] WILSON E. Theoretical and operational thermal performance of a 'wet' crystalline silicon PV module under Jamaican conditions[J]. Renewable Energy, 2009, 34(6): 1655-1660.
- [14] 伍森怡.基于相变材料的光伏热管理系统研究进展[J].制冷,2019,38(3):51-56.
- [15] 朱丽,陈萨如拉,杨洋,等.太阳能光伏电池冷却散热技术研究进展[J].化工进展,2017,36(1):10-19.

编辑 葛晋