

文章编号: 1005-5630(2022)01-0070-10

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.01.011

基于光伏充电的高效热电散热系统研究

刘周晓, 刘张妙歌, 王宁

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对大功率光学器件和设备的热严重影响其稳定性、性能和使用寿命的问题, 提出了一种基于能量回馈的智能高效热电散热系统。利用基于改进的增量式比例积分微分(PID)算法快速实现高精度温度控制, 通过能量回收机制实现热电制冷器(TEC)制冷效率的提升。采用光伏充电为主、电源充电为辅的电源管理策略, 通过上位机监测与控制实现对两组蓄电池的高效充放电切换。同时, 利用 Python+PyQt5 为散热系统搭建可视化图形操作界面。研究表明, 设计的实验系统实现了对 TEC 器件的电路信息监测与温度高效控制, 可为解决大功率光学器件和系统的散热问题提供参考。

关键词: 能量反馈; 能量管理系统; 改进 PID 算法; 温控系统; 热电制冷; 半导体制冷
中图分类号: TB 61 **文献标志码:** A

High efficiency thermoelectric refrigeration system based on energy feedback

LIU Zhouxiao, LIU Zhangmiaoge, WANG Ning

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problem that the heat of high-power optical devices and equipment seriously affects their stability, performance and service life, an intelligent and efficient thermoelectric cooling system based on energy feedback is proposed. Based on high precision temperature control realized by the improved incremental proportional integral differential (PID) algorithm, energy recovery mechanism is used to promote the efficiency of the thermoelectric cooler (TEC) refrigeration. Photovoltaic (PV) power management strategy is used through PC monitoring and control of the two groups of efficient storage battery charging and discharging switch. At the same time, Python+PyQt5 is used to build a visual operation graphical interface. The results show that an experimental system for circuit information monitoring and temperature efficient control of TEC device is designed and realized. This study is expected to provide a feasible cooling scheme

收稿日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61804096); 国家重点研发计划(2017YFB0503102、2018YFC1313803、2018YFA0701800)

作者简介: 刘周晓(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为热电制冷、能量收集。

Email: lzx17602199631@163.com

通信作者: 王宁(1984—), 男, 副教授, 研究方向为热点制冷、能量收集、高速互联。Email: nwang@usst.edu.cn

for high-power optical devices and systems.

Keywords: energy feedback; energy management system; improved PID algorithm; temperature control system; thermoelectric refrigeration; semiconductor refrigeration

引 言

随着现代电子工业的发展, 器件性能的持续提升造成较大的功耗, 例如大功率 LED 芯片和大功率激光器等^[1-3]。然而, 功耗的上升不仅引起不可忽略的散热问题, 也容易降低器件的性能和寿命^[4-5]。

传统的器件散热手段有自然冷却、风冷和水冷等^[1], 但容易产生噪声、机械损耗、环境污染等问题。而基于帕尔帖效应的半导体制冷器 (TEC) 相较于传统散热制冷手段, 有着无噪声、无机械振动和无环境污染等优点, 在器件散热应用上有着巨大的优势。在一些特殊的应用领域, 如航空航天、工业电子和医疗装备等, 半导体制冷器相比传统制冷器, 更有着其不可取代的独特优势与应用价值^[6-9]。

近年来, 随着对半导体制冷器的材料与结构研究的深入, 制冷效率已得到一定程度的改进^[10-12], 并且随着人们对制冷器环保、无噪声污染的需求重视, 市面上出现了一批基于半导体制冷器的降温设备^[13-18], 半导体制冷器的商用已经逐步得到市场认可。但是, 相较于传统的压缩机型制冷设备, TEC 在制冷效率方面依然有较大劣势, 严重制约了 TEC 的发展和应用^[19-19]。

本文提出了一种基于光伏充电的高效热电散热系统, 通过上位机智能控制使太阳能光伏电池和蓄电池两组电池产生交替充电模式, 同时对传统比例积分微分 (PID) 控制的过充和调控时间过长等问题进行算法改进, 在保证 TEC 散热的前提下最大化地减少电能损耗。

1 系统方案设计

1.1 系统框图

系统框图如图 1 所示, 由三部分构成: 光伏充电切换, 温度控制, 能量反馈与利用。其中电

源部分的监测与切换、温度控制部分的温度获取与电流控制、能量回馈部分的开关控制均由上位机 Raspberry pi 4B 通过传感器和控制信号实现。

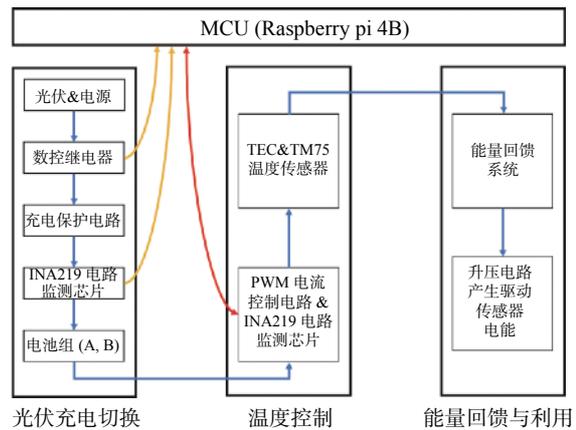


图 1 系统框图

Fig. 1 Diagram of circuit

1.2 光伏充电切换设计

在航空等特定领域中, 为大功率电子设备散热的 TEC 器件的供能可以从周围环境中获取。本文设计了两种充电方案, 光伏发电与传统电源供电, 并且配置双电源 (保持一组充电一组放电)。通过电流监测芯片对两组蓄电池的充放电情况进行监控, 智能切换充放电电池组与充电方式。图 2 为控制电路简图, 通过对 6 组数控继电器实现充电方式与充放电电池组切换的上位机控制。表 1 为各个状态对应的上位机数字信号输出。

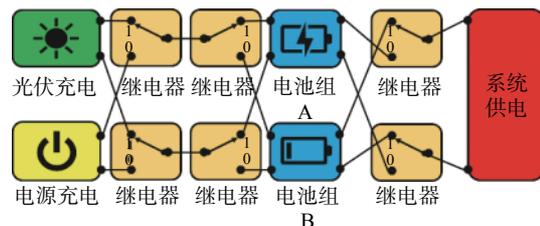


图 2 控制电路简图

Fig. 2 Diagram of control circuit

表 1 充放电电平状态

Tab. 1 State mode of charge and discharge switching

充电方式	A放,B充	B放,A充
光伏充电	111111	110000
电源充电	001111	000000

另外采用电路监控芯片对电流和功率进行监测。设监测周期为 T ，放电组 n 个周期内的测量电流为 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ (mA)，充电组为 $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ (mA)。电池在 n 次循环中充放电的大小分别为：

$$Q_{\text{disc}} = \sum_{k=1}^n \int_0^T I_k dt \quad (1)$$

$$Q_c = \sum_{k=1}^n \int_0^T i_k dt \quad (2)$$

在开关电源过程中，上位机的电源开关指令是通过输出高低电平对继电器实现控制。充电部分由普通电源充电和太阳能板充电两部分组成。后者需要一个升压电路和一个充电保护电路来辅助电池的正常充电。

两组蓄电池的充电都需要充电保护与升压，本文在系统中采用 ADP5091 芯片来提供管理。ADP5091 可提供智能集成式能量采集，可转换来自 PV 电池或热电发生器 (TEG) 的直流电源。该器件可对储能元件 (如可充电锂电池、薄膜电池、超级电容和传统电容) 进行充电，并对小型电子设备和无电池系统上电^[20]。图 3 为该芯片外围电路的印刷电路板 (PCB) 电路图，通过该能量回收芯片实现 5 V 的稳定电压输出，从而可对蓄电池进行安全充电。

1.3 改进 PID 算法与控制电路

本文提出的散热控温系统采用增量式 PID 算法进行温度控制，维持器件温度的稳定。增量式 PID 算法为

$$\Delta_{\text{OUT}_k} = K_p[(e_k - e_{k-1}) + \frac{T}{T_I} e_k + \frac{T_D}{T} (e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2})] \quad (3)$$

式中： K_p 、 T 、 T_I 、 T_D 分别为比例系数、调节周期，积分调节周期、微分调节周期； e_k 、 e_{k-1} 、 e_{k-2} 分别是第 k 个误差、第 $k-1$ 个误差和第 $k-2$ 个误差。

热介质的导热性的存在使得热传导具有滞后

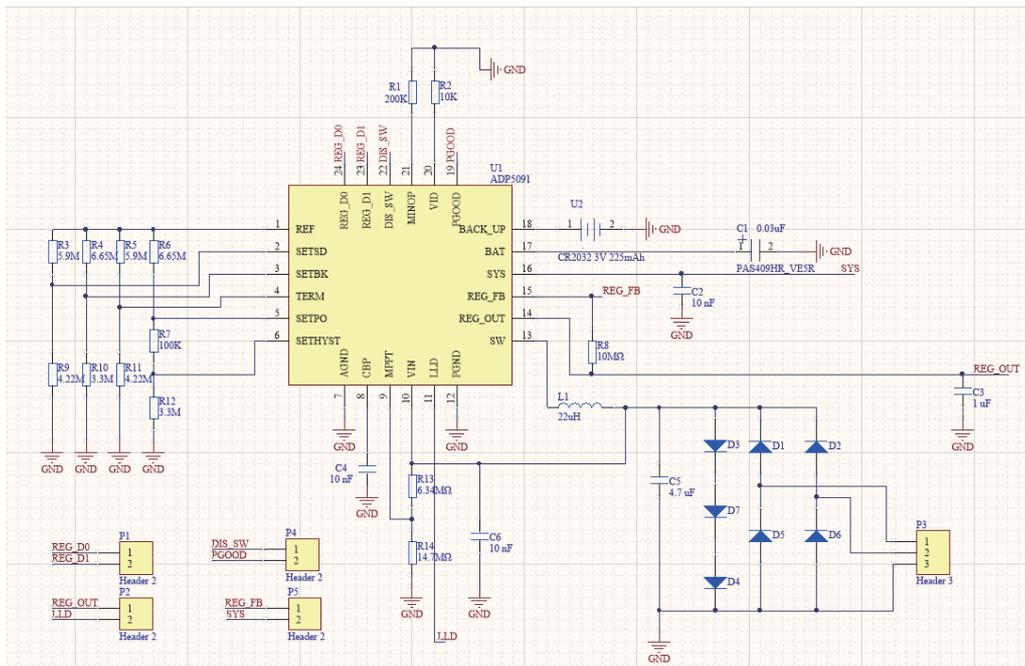


图 3 ADP5091 PCB 电路图

Fig. 3 ADP5091 PCB circuit diagram

和惯性的特点。通常, PID 反馈调节直接应用于 TEC 的温度控制时, 会存在调节时间长(震荡), 温度波动大(过冲)等问题。本文基于 PID 算法提出一种多段式 PID 控制算法, 在一定程度上克服了传统 PID 算法所引起的震荡与过冲问题。

本文算法的流程如图 4 所示。设置三个特殊温差, 以 T_f 、 T_c 、 T_s (其中 $T_f > T_c > T_s$) 分别表示第一段调节判断的温差阈值、第二段调节判断的温差阈值、控制停止判断的温差阈值。当给定温度与设定温度的差值大于 T_f 时, 系统被判定此时温度严重偏离设定温度。随后将电流调整到其

最大值, 使 TEC 工作在最大功率状态, 此时测试点的温度急剧下降。当给定温度和设定温度的差值小于 T_f 大于 T_c 时, 判断系统处于第二段控制阶段, 并设置最大脉宽调制(PWM)输出的较大值作为缓冲器, 此时测点的温度逐渐向目标温度调整。当给定温度小于 T_c 大于 T_s 时, 系统的温度接近于目标温度, 根据 T_s 的值将 PWM 最大值设定到一个合适的区间来调整 PID 反馈。对测点温度进行微调后, 温度在目标温度上下浮动, 并逐渐向目标温度推进。在连续的调节周期中, 当温差小于 T_s 时, 系统判定此时在目标温度下是稳定的, 从而停止调节。

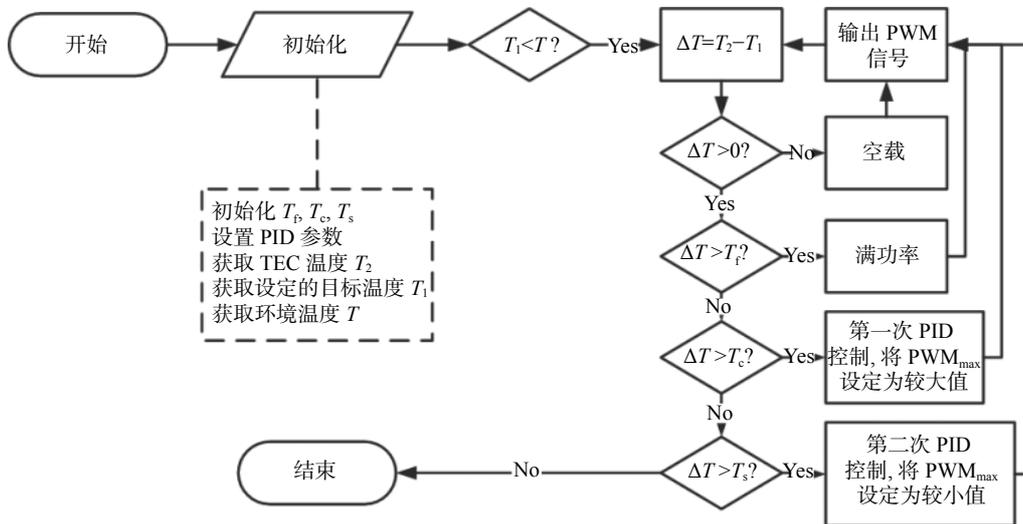


图 4 结合状态机控制的改进 PID 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the improved algorithm that combines the PID algorithm and state machine control with three states

在每个控制周期内, 上位机通过算法计算出 PWM 信号, 通过 H 桥电路控制 TEC 的电流和方向。图 5 为系统的 H 桥控制电路, PWM 信号连接至 PWM_COOL 端口, 通过控制 Q1、

Q4 或 Q2、Q3 的通断来实现 TEC 的电流控制。具体信号的输入端口视 TEC 连接方式而定。

1.4 能量回馈方案设计

1.4.1 系统原理

系统通过输出不同占空比的 PWM 波来控制 H 桥电路的通断。在 TEC 处于空载状态时, 通过能量反馈电路收集反向的塞贝克电压。在该状态下的每一个周期中, 利用 TEC 两端的温差(图 6 灰色部分)作为热电发电机(TEG)来发电和收集电能。

作为半导体热泵, TEC 负载时, 两端施加的电压(V)应等于施加的正向电压(V_R)减去反向塞贝克电压(V_S), 即

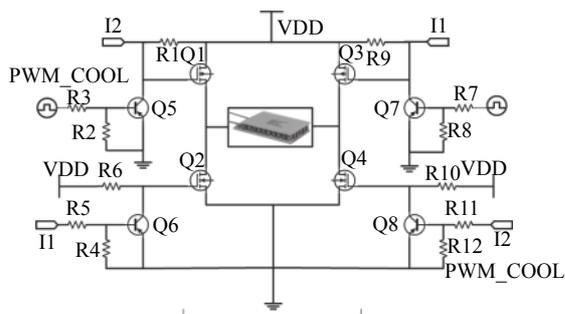


图 5 H 桥控制电路

Fig. 5 H bridge control circuit

$$V = V_R + V_S = V_R + S_{np}(T_h - T_l) \quad (4)$$

式中： S_{np} 为 Seebeck 系数； T_h 为热端温度； T_l 为冷端温度。施加的正向电流会使 TEC 两侧表面产生温差，即 $\Delta T = T_h - T_l$ ，根据帕尔贴效应，从冷端到热端传递的热量为 $\pi_{np}I$ (π_{np} 为帕尔贴系数， I 为电流)。由于 TEC 两端的温差，热量从热端转移到冷端，假设设备的总热导率为 K ，则产生的热回流为 $K\Delta T$ 。此外，由于器件有内阻，也会产生相应的焦耳热，并均匀地传递到器件的冷端和热端。如果器件的内阻为 R ，则单位时间内流入热端的热量为 $I^2R/2$ 。将制冷装置认为是一个理想的封闭的绝热系统，则冷端热平衡式可以表示为

$$Q_c + \frac{1}{2}I^2R - \pi_{np}I = -K(T_h - T_l) \quad (5)$$

由此可得循环制冷效率

$$COP = \frac{Q_c}{P} = \frac{S_{np}T_lI - \frac{1}{2}I^2R - K\Delta T}{I^2R + S_{np}\Delta TI} \quad (6)$$

式中： Q_c 为单位时间内 TEC 吸收的热量； P 为单位时间内输入的电能。在能量反馈的 TEC 制冷系统中，假设周期为 $T = a + b$ ，其中 a 、 b 分别为 TEC 加载和空载时间。其循环制冷效率定义为

$$COP = \frac{aQ_c - Q_g}{aP_c - bP_g} \quad (7)$$

式中： Q_c 为冷端吸热； Q_g 为热端回热； P_c 为输入功率； P_g 为回收功率。其中：

$$Q_g = S_{np}\Delta TI' + K\Delta T \quad (8)$$

$$P_g = \frac{S_{np}^2\Delta T^2R_1}{(R + R_1)^2} \quad (9)$$

式中： R_1 为负载电阻； I' 为 TEC 在空载状态下反向塞贝克电流。

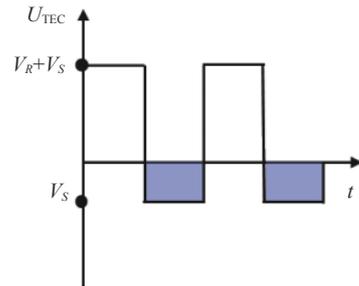
结合式(5)、(6)、(7)可得

$$COP_{feedback} = \frac{a(S_{np}T_lI - \frac{1}{2}I^2R - K\Delta T) - b(S_{np}\Delta TI' + K\Delta T)}{a(I^2R + S_{np}\Delta TI) - b\left(\frac{S_{np}^2\Delta T^2R_1}{(R + R_1)^2}\right)} \quad (10)$$

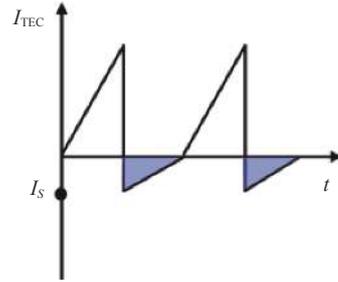
式中

$$I' = \frac{S_{np}\Delta T}{R} \quad (11)$$

式(7)和式(11)表明，协同能量反馈可以通过调控系统占空比的值进行调整。在一定范围内，输出的 PWM 信号占空比越高，则通过 TEC 的电流越大。这说明在空载时，TEC 的温差较大，但回收塞贝克电流的时间也较短。



(a) PWM 信号和 MOSFET 电压



(b) TEC 瞬态电压和电流

图 6 热电偶臂 TEC 器件的瞬态 U/I 变化。

Fig. 6 Transient U/I variation in the PWM and TEC devices

当系数 (S_{np} 、 a 、 b 、 K) 为限定值时 (由器件性能与施加的占空比范围决定)，通过迭代计算不等式，得到 $COP_{feedback} > COP$ 。这说明了本文提出的带有能量反馈的 TEC 制冷系统能够有效地提高 TEC 制冷效率，降低能量损耗，在一定程度上克服了 TEC 能量利用效率低下的缺陷。

1.4.2 系统电路与仿真

为了验证本文方案的可行性，利用 Multisim 仿真软件对所设计的能量反馈方案进行了仿真。为了回收 MOSFET 关闭时的倒灌电流，TEC 两侧的能量反馈电路 MOSFET 导通。能量反馈电路在 H 桥电路导通时关闭，在 H 桥电路断开时打开，由此设计了如图 7 所示的开关电路，其中 PWM 信号的输入由上位机控制。当 TEC 供电电路接通时，TEC 工作；当电路断开时，TEC

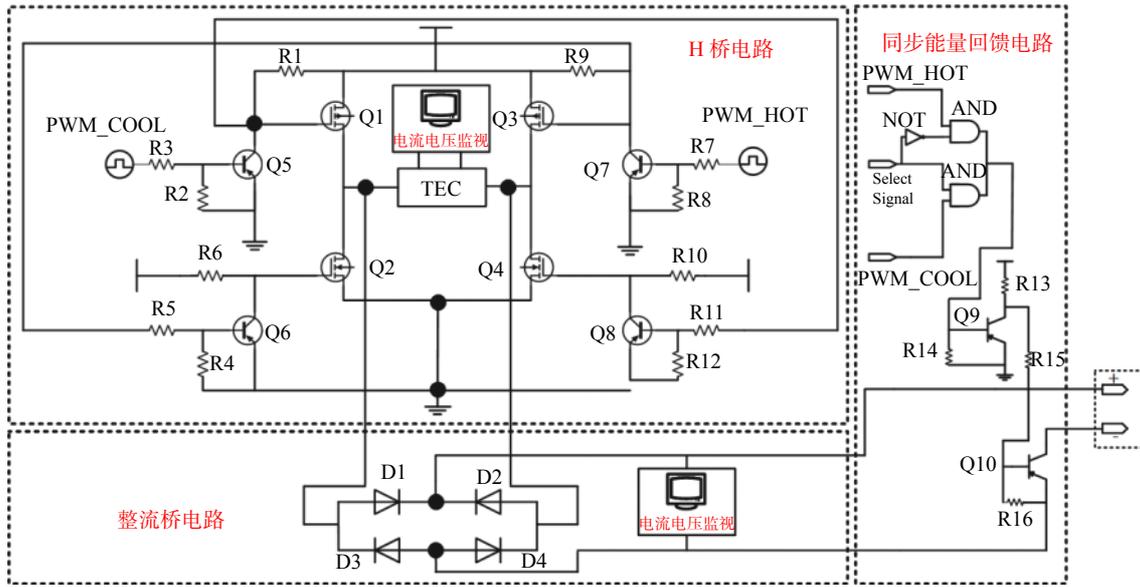


图 7 温度控制与能量回馈电路仿真框图

Fig. 7 Circuit of temperature control and energy feedback system.

等效于 TEG 产生 Seebeck 电能并通过异步反馈电路输出。

仿真系统由三部分组成, 如图 7 所示。电流控制由 H 桥电路实现, 关断 H 桥电路后, 启动整流桥电路和异步反馈电路。同时, 由于 TEC 内部温差较大, 整流电路回收塞贝克电压产生的电流。因此, 在没有负载的情况下收集 TEC 产生的反向塞贝克电压。这些能量可以通过稳压电路提供, boost 电路为系统传感器等低功耗器件供电, 提高 TEC 的能源利用效率。

当工作电压为 12 V、内阻为 3 Ω 时, Bi₂Te₃ 制成的 TEC 的仿真结果表明: 在 25% 的 PWM 占空比控制下, 最高可回收电压为 0.37 V; 在 50% 的 PWM 占空比控制下, 回收电压 0.76 V; 在 75% 的 PWM 占空比控制下, 回收电压为 1.2 V。

2 关键组件设计

2.1 光伏充电与电源切换

在实验室中, 使用三组氙弧灯模拟太阳光源, 使用常规的太阳能板(6 V/5 W)进行光伏发电。此外, 另一充电接口通过蓄电池充电器接至电网进行充电。光伏发电装置如图 8 所示, 两块光伏板在三组氙弧灯的照射下产生电能并通

过图 3 所示的升压回收电路为蓄电池供电。

由于氙弧灯工作导致的发热远比正常阳光下的更为剧烈, 会使光伏板发电性能降低, 因此在图 8 的实验平台中配备了散热风扇与散热底座进行辅助散热, 使模拟的光照环境更接近实际的应用环境。

通过图 3 的 PCB 定做的 ADP5091 能量回收电路如图 8 左下图所示, 该模块能较好地使光伏板产生电能并输出稳定的 5 V/3 V 电压。

图 9 为单块光伏板在模拟的光照强度在 400~700 W/m² 之间测试产生的电流与电压数据散点图。

实线为电压 5 阶拟合曲线, 点虚线为电流 5 阶拟合曲线。通过对数据进行 5 阶拟合产生电流、电压在不同光照强度下的拟合曲线。从曲线中可以看出, 在 400~700 W/m² 的光照强度之间, 单块光伏板能产生电压为 7.06~7.27 V, 电流为 0.37~0.56 A 的电能。随着光照强度的进一步加强, 伴随着光伏板性能与散热问题, 产生的电能并不能进一步加强。而实验室采用的蓄电池组要求的充电电压为 12 V/1 A, 通过两组光伏板进行发电并经过升压稳压电路, 在光照强度为 400~700 W/m² 时, 能够对蓄电池实现较好的充电效果。

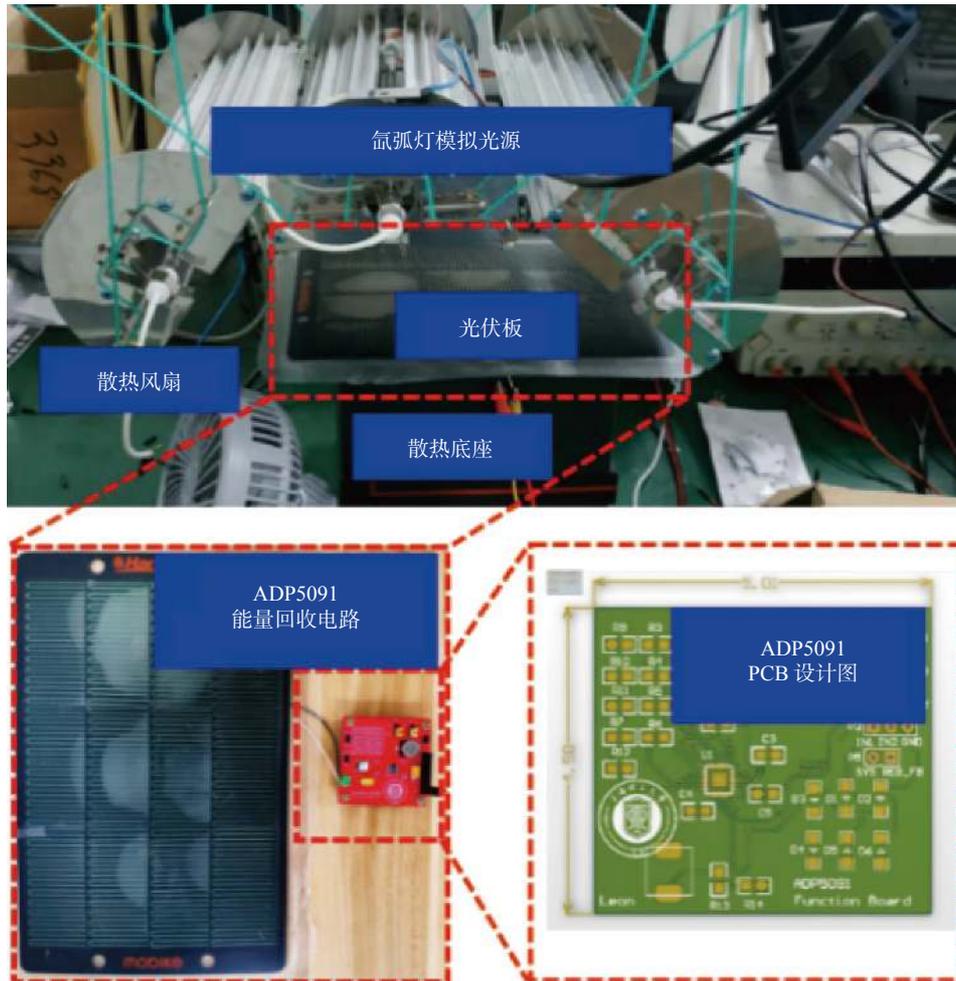


图 8 光伏发电装置实验图

Fig. 8 Experimental diagram of photovoltaic power generation unit

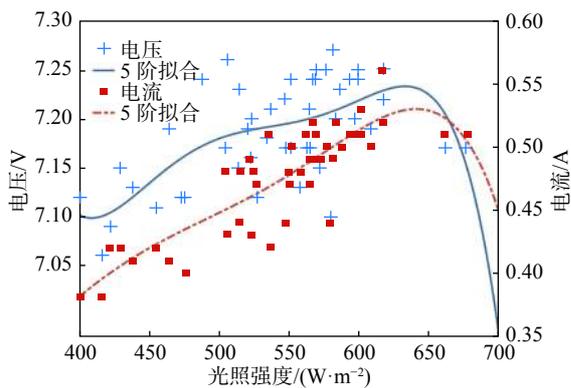


图 9 单块光伏板光照强度与产生电流电压关系

Fig. 9 Relationship between the light intensity of a single photovoltaic panel and the generated current and voltage

2.2 上位机软件设计

本文提出的系统采用 Raspberry pi 4B 作为

主控板。为了在上位机(Raspberry Pi 4B)上构建一个可视化的界面,系统使用 PyQt5 进行界面开发。利用 PyQt5 及其图形库开发了实时数据显示和图形界面。此外,上位机的 GPIO(通用输入/输出)接口可以输出数字信号来控制 MOSFET 和继电器,并通过 I²C 与传感器通信来获取数据。随后,这些数据被整合并实时显示在软件中。

由于需要处理的数据量较大,系统被划分为三个线程。第一个线程从温度传感器获取数据进行控制算法的运算,并输出控制信号。第二个线程用于监视功率和电流并用于计算和判断,同时数字信号被输出到继电器以切换电源。第三个线程用于动态绘图和数据显示,在接收到设置 TEC 温度、切换电源、调整 PID 参数、保存和导出数据等指令时执行相关操作。图 10 为上位

机的显示界面, 该界面分为四块区域: A 块为监测与控制部分, 主要实现电路信息、待测物体实时温度、环境温度的实时监测与温度的设定; B 块为温度变化曲线的实时曲线图, 从此处可以

实时清晰地观察整个控制过程的温度曲线; C 块为测试与数据保存部分, 主要用于传感器通信数据的调试与数据的保存; D 块为两组电池状态的显示与 PID 参数的实时调控。

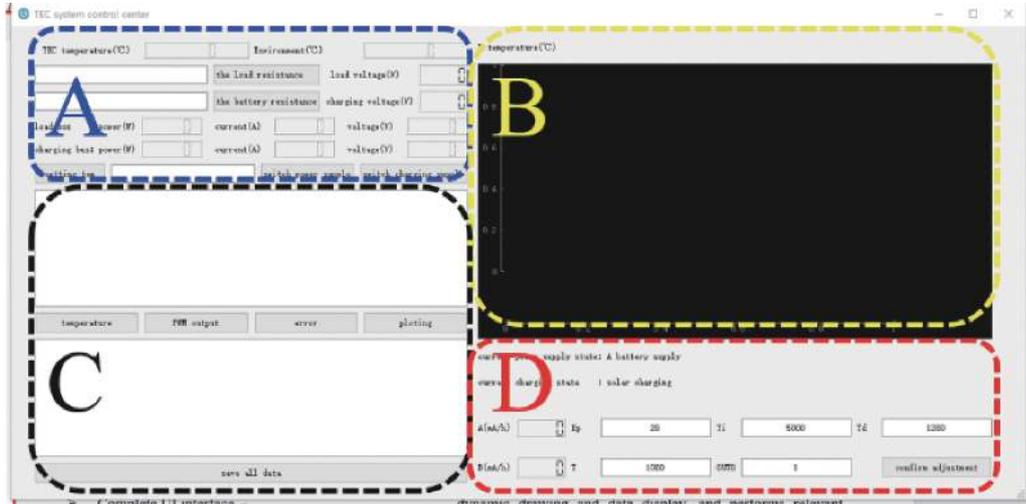


图 10 上位机显示界面

Fig. 10 Computer display interface

利用 Python+PyQt5 编写上位机软件, 并直接在主控板上运行, 利用外接显示器或者远程连接可直接在上位机可视化交互界面上对 TEC 的工作状态进行实时监测与控制。

2.3 温度控制设计

本文提出的散热系统的核心部分, 即温度控

制部分如图 11 所示。该部分由继电器、主控板、电流监控芯片、PWM 模块(H 桥式电路)、温度传感器组成。

通过 INA219 芯片与主控板通信, 实现对两组电源的充放电监控, 并将其反馈于主控板。主控板利用反馈的数据计算两组充放电的电量与充电速度, 利用图 2, 图 8 所示的设计实现充放电

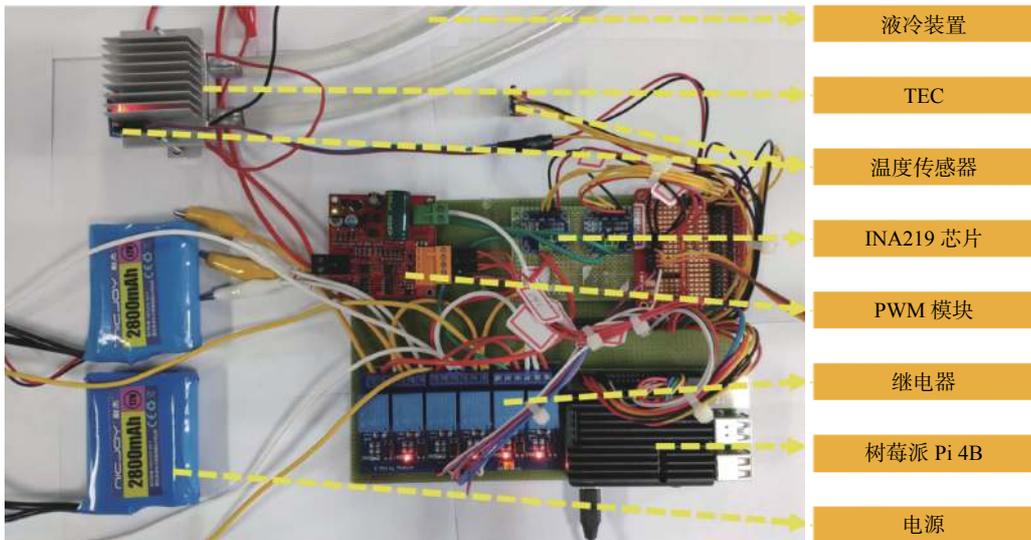


图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental platform

的电池组切换及充电方式的智能切换，从而保证系统的续航。

温度传感器测得数据通过与主控板通信反馈到上位机，与上位机设定的目标温度进行差计算，再通过图 4 所示的算法实现温度控制。

上位机基于联网 Linux 板卡，通过计算机的局域网远程连接，可在计算机上显示实时的用户交互界面，并在该界面中进行监测与操作。

3 实验结果与讨论

使用图 2 的控制电路，使两组电池交替充放电，由此可得到图 12 所示的实验数据。从数据可以看出，放电组能维持在 1 A 的电流输出，而充电组则保持在 1 A 左右的充电电流。该充电方案能够同时实现智能电源管理与高效充电，可为 TEC 控温系统的电力续航提供保障。

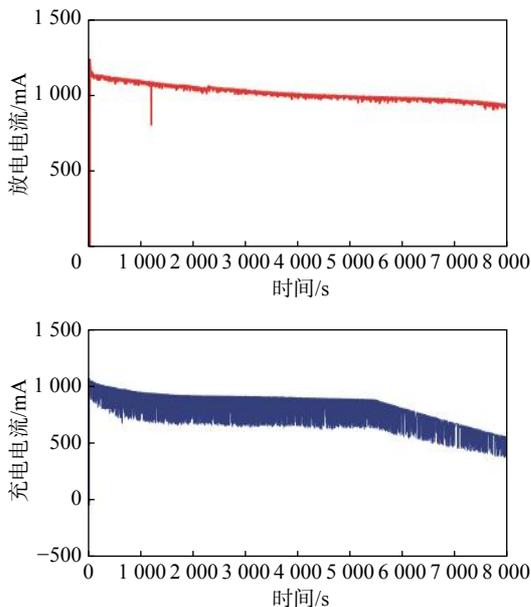


图 12 充电、放电电池组电流数据

Fig. 12 Current data of charging and discharging battery pack

在系统的控温部分，为验证本文提出系统控制算法的优势，在环境温度为 22 ℃ 的室内并将目标温度控制在 10 ℃，分别利用传统 PID 算法与本文提出的改进算法，通过图 10 所示的上位机界面对 TEC 进行调控，得到图 13 所示的数据对比图。

图 13 的实线与虚线分别代表改进算法与传

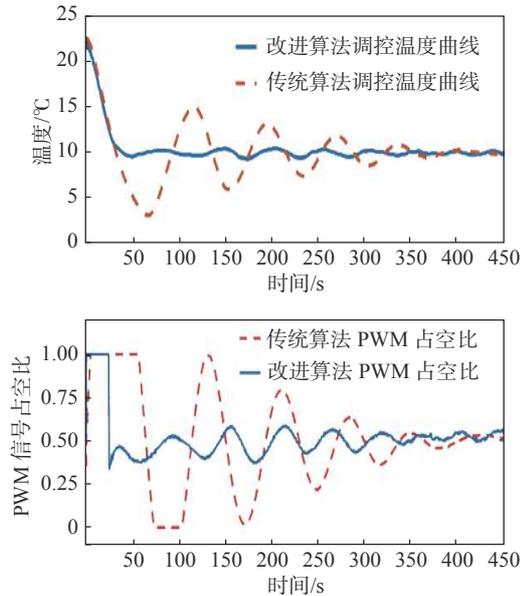


图 13 传统 PID 与本系统控制算法的数据对比图

Fig. 13 The data comparison diagram of the traditional PID and the control algorithm of this system

统算法的当前温度调控曲线与输出 PWM 信号的占空比曲线。从图 13 可以明显看出，在目标温度与当前温度相差较大时，改进的算法能直避免多余的 PID 计算，迅速地将温度调控至目标温度附近，再进行小范围内的 PID 调控。在第一次 PID 调控后的三个周期内，通过误差数据对 PID 参数进行修正。在距离目标温度更小的区间内，进入第二次 PID 调控，此时能够较为精确地将温度调控并稳定在目标温度上。

实验数据分析可得：优化后的温度控制算法比传统的 PID 温度控制算法更具明显的优势。当误差为±0.35 ℃ 时，PID 优化算法需要的控制时间为 30.5 s，而传统温度控制算法需要 287 s 才能达到相同的精度。相比之下，当环境温度为 22 ℃、设定温度为 10 ℃ 时，优化后的温度控制算法比传统温度控制算法快 256.5 s，耗时仅为传统算法的 9.5%。

4 结 论

本文提出了一种基于 TEC 的能量回馈系统，实现了两组蓄电池交替切换充放电的智能电源管理。建立了一个完整的上位机系统，并由主控板和多个电路监测芯片组成了控制电路。同

时, 提出了改进 PID 控制算法, 对散热目标实现了快速、高精度的温度控制。实验证明, 本文提出的改进算法实现了比传统算法更为快速、精确的控温效果, 能够高效地实现电子设备或大功率器件的散热。

参考文献:

- [1] 苟哲铭, 魏震, 颜少航, 等. 微型制冷系统研究进展 [J]. 制冷学报, 2020, 41(1): 1–9.
- [2] GOULD C, EDWARDS R. Review on micro-energy harvesting technologies[C]//2016 51st international universities power engineering conference (UPEC). Coimbra: IEEE, 2016.
- [3] LI J H, ZHANG X R, ZHOU C, et al. New applications of an automated system for high-power LEDs[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(2): 1035–1042.
- [4] 田红, 胡学功, 王际辉. LED 散热器三角槽扩展表面散热性能 [J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1223002.
- [5] AL-SHEHRI S A. Cooling computer chips with cascaded and non-cascaded thermoelectric devices[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(11): 9105–9126.
- [6] 王影影, 张明兰, 李铁栋. 便携式湿度发生器设计 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39(3): 106–108.
- [7] XIE K, GUPTA M C. High-temperature thermoelectric energy conversion devices using Si-Ge thick films prepared by laser sintering of Nano/micro particles[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(5): 2113–2119.
- [8] 张月, 苏云, 王彬, 等. 用于月球矿物探测的 LCTF 成像光谱仪热控系统的设计 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 3963–3968.
- [9] 刘冰, 黄学进, 李晋川, 等. 用于生物舱细胞培养的小型恒温箱的研制 [J]. 制冷与空调, 2011, 25(3): 284–287.
- [10] 胡浩茫. 基于帕尔贴效应的热电器件能量运输过程及其热设计研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [11] 张晓波, 徐象国. 多目标约束下半导体制冷片几何结构参数的优化设计 [J]. *制冷学报*, 2018, 39(3): 22–30.
- [12] 吴雷, 高明, 张涛, 等. 热电制冷的应用与优化综述 [J]. *制冷学报*, 2019, 40(6): 1–12.
- [13] 黄翔, 孙哲, 刘佳莉. 分体式蒸发空调器的设计与实验 [J]. *制冷学报*, 2014, 35(5): 38–43.
- [14] 邱兰兰, 王瑜, 朱洁茹, 等. 应用半导体制冷的冷藏链用储藏箱性能实验研究 [J]. *制冷学报*, 2020, 41(1): 131–140.
- [15] 杨峰. 帕尔贴石墨烯 3D 打印快速冷冻成型平台设计 [J]. *制冷学报*, 2018, 39(6): 91–96.
- [16] 何丽娟, 吴心伟, 王荻, 等. 伞口直径对半导体制冷空调伞性能的影响 [J]. *制冷学报*, 2018, 39(4): 119–122, 134.
- [17] FATAHIAN E, KORDANI N, FATAHIAN H. Smart portable cryotherapy system involving controlled thermoelectric cooling modules for medical applications[J]. *IIUM Engineering Journal*, 2018, 19(1): 117–128.
- [18] HATO T, TSUKAMOTO A, TANABE K. "Portable cryostat with temperature control function for operation of HTS-SQUID at a higher slew rate[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5): 1600304.
- [19] 贾艳婷, 徐昌贵, 闫献国, 等. 半导体制冷研究综述 [J]. *制冷*, 2012, 31(1): 49–55.
- [20] WANG N, GAO C, DING C, et al. A thermal management system to reuse thermal waste released by high-power light-emitting diodes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(11): 4790–4797.

(编辑: 刘铁英)