

基于模糊控制的光子辐射制冷功率测量系统

周玉晟^{1,2}, 朱虹雨^{1,2}, 陈犇^{1,2}, 陈嘉诚^{1,2}, 詹耀辉^{1,2*}, 李孝峰^{1,2**}¹苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;²江苏省先进光学制造技术重点实验室, 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 依据热平衡原理设计了以单片机为控制核心, DS18B20 数字温度传感器和铂电阻 PT100 为测温元件, 正温度系数 (PTC) 效应加热器为执行元件的温控及制冷功率测量系统。通过模糊 PID (Proportional Integral Derivative) 控制算法输出不同占空比的脉宽调制波, 控制辐射冷却材料温度和环境温度保持一致性, 同时利用 3D 打印工艺完成装置的搭建, 最终测算出辐射制冷功率。实验结果表明, 系统测量计算的辐射制冷功率与理论预测值接近, 该系统可以有效满足多种辐射冷却材料的测量。

关键词 测量; 辐射制冷; 制冷功率; 单片机; 温度调控; 模糊 PID

中图分类号 TB61; TP273 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231087

1 引言

近年来, 随着能源紧缺和绿色发展理念的不断深入, 辐射制冷技术迎来了快速的发展, 并逐渐由夜间转为日间辐射制冷, 取得了良好的降温效果^[1]。辐射制冷是一种以热辐射的形式, 促使地表物体(热源)通过大气窗口(8~13 μm)与深空冷能进行能量交换的技术。为了保证在日间阳光直射下达到降温效果, 辐射冷却材料的设计需要满足特定的条件, 即在可见光波段具有较高的反射率(或透过率)和在大气窗口波段具有较高的发射率^[2]。从发射率角度来看, 辐射冷却材料可具体分为选择性和宽带两种类别^[3]。而当衡量其性能表现时, 一般引入温度差与制冷功率作为测量指标。在整个红外波段, 类似黑体的宽带材料表现出更高的净制冷功率, 红外选择性材料旨在最大化其与环境之间的温差^[3-4]。

不同的结构设计会决定冷却材料的光谱, 加之太阳辐射等环境因素的影响, 其对外性能表现将有所不同。2014年, Raman等^[5]在*Nature*上发表了阳光直射下的辐射冷却效果, 并利用镀铝聚酯薄膜、聚乙烯材料, 在木制框架基础上搭建了测量装置, 实现了日间降温 and 幅值测量。2016年, Chen等^[6]在真空环境下, 利用K型热电偶实现了降温测量和温差与环境温度之间的函数模型估算。2021年, Wang等^[7]利用三元乙丙橡胶和疏水性二氧化硅颗粒组成一种多孔复合膜, 可在无空气对流的密封环境下将温度下降12 $^{\circ}\text{C}$ 。2023年,

Yang等^[8]采用二氧化锆颗粒嵌入聚二甲基硅氧烷(PDMS)中制备了柔性辐射冷却膜, 冷却后温度相较于环境温度下降了16.1 $^{\circ}\text{C}$, 该薄膜具备更好的降温效果。此外, Ma团队^[9]分析研究了辐射冷却与光伏电池等太阳能收集系统的组合应用, 促进了辐射制冷与光伏发电的结合, 提高能源利用率; Pal等^[10]将辐射冷却聚合物材料与传统口罩相结合, 达到4 $^{\circ}\text{C}$ 的冷却效果, 提高了用户的佩戴舒适性, 扩展了辐射制冷在生活中的应用。

目前针对辐射冷却材料的测量大多是温度差测量, 但该指标与环境气候和经纬度等相关, 会导致较大的地区差异, 如Zhao等^[1]在北京、合肥两地对 SiO_2 反射镜发射器进行测试后出现了5 $^{\circ}\text{C}$ 的差异。而制冷功率测量可降低此类外在因素的影响, 更为全面、客观地反映材料的降温性能。对于辐射制冷功率的测量, 一般采用将材料保持在环境温度时量化加热功率^[11-12]。如Cheng等^[12]在冷却材料上增设电加热片, 在反馈控制材料温度与环境温度保持一致的情况下, 将加热功率视作制冷功率。Raman等^[5, 13-14]采用半导体制冷器控温, 实现了系统内部的冷却功率测量。Li等^[15]则基于珀尔贴效应设计了一种加热和冷却双模式的温度控制系统, 结合PID控制将材料与环境之间的温差降至最小, 达到加热/冷却功率测量的目的。此外, Zhu等^[16]在可见、红外及微波多光谱测量中以及Li等^[17]在聚合物薄膜材料测量中均选用铜板、加热器作为热平衡器件, 聚乙烯等材料限制热对流传导, 有利于实现功

收稿日期: 2023-06-02; 修回日期: 2023-08-03; 录用日期: 2023-09-21; 网络首发日期: 2023-10-01

基金项目: 国家自然科学基金(62175174)、江苏省自然科学基金(BK20221357)

通信作者: *yhzhan@suda.edu.cn; **xfli@suda.edu.cn

率测量计算。但上述所涉及的测量装置较为复杂,没有考虑降温性能差异对温控反馈参数的影响,即更换冷却材料后需要手动修改 PID 参数才能使温控精度保持一致,这些装置无法满足多种材料功率测量的应用需求。因此,本文系统地考虑以上问题,设计并制造了一种辐射制冷功率测量装置,并采用模糊控制算法,实时自适应修改系统 PID 参数,有效地完成了多种材料的功率测量,为后续研究工作提供了一种衡量方法与思路。

2 基本原理

为了提高辐射制冷功率的测量准确性与可参考性,本文理论分析了其工作原理,图 1(a)展示了地球表面的被动日间辐射冷却器与深空之间的热交换,图中 T_m 、 ΔT_A 、 ΔT_B 、 ΔT_C 分别为冷却材料温度、地表 A 点的测量温差、地表 B 点的测量温差、地表 C 点的测量温差, T_s 为深空温度。辐射制冷功率计算公式^[5,18-19]为

$$P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{atm}) - P_{sun} - P_{con}(T, T_{amb}), \quad (1)$$

$$P_{cool}(T) = P_E(U) - P_w(T), \quad (2)$$

式中: P_{cool} 为净制冷功率; T 为材料温度; $P_{rad}(T)$ 为物体热辐射功率; $P_{atm}(T_{atm})$ 为大气对物体的辐射功率; T_{amb} 为环境温度; P_{sun} 为太阳辐射功率; P_{con} 为热对流和传导损失功率; P_E 为加热电功率; U 为工作电压值; P_w 为传热损耗功率,其值受材料热阻的影响。地球表面物体温度约为 300 K,辐射冷却材料则利用 8~13 μm 的大气窗口向 3 K 的深空冷源辐射热量,同时吸收太

阳辐射和大气热辐射,并与周围环境产生热交换,其自身的太阳反射率和红外发射率会直接影响 $P_{rad}(T)$ 、 P_{sun} 的数值,进而影响制冷功率^[20]。

此外,根据能量守恒原理,在控制温度保持一致的情况下,可由加热电功率计算得到材料的制冷功率。因此,本文通过反馈控制温度,测量计算所消耗的加热功率,同时使用仪器测量辐射冷却材料的太阳反射率和红外发射率,计算制冷功率值,并进行比较分析。根据辐射制冷的基本形式,从温度控制角度出发,设计了辐射制冷功率测量的系统装置,装置测量原理如图 1(b)所示,装置内部设置了双载物台及相应的 PTC 加热器和温度传感器,该装置可在相同环境条件下对不同材料进行横向对比说明,利于实验功能验证和后续测量。被动日间辐射冷却材料(PDRC)在太阳辐射和向深空发射红外辐射的双重作用下产生一定的降温效果,装置通过检温元件与控制器的得到所降的温差值,利用输出信号加热铜片与辐射冷却材料,辐射冷却材料与测量环境之间达到热平衡,测量计算的功率数据保存在远端计算机中。在温度控制过程中,控制器 IO 端口输出随温差调节的脉冲宽度调制(PWM)波,温差小则脉宽值小,温差大则脉宽值大,从而有效避免超调,实现温度的精准调控。在自定义的单位时间(例如本文采用 2 s)内,PWM 波的脉宽保持不变,在下一个单位时间节点,脉宽会随温差发生变化,而 PWM 波的脉宽决定 PTC 加热器两端的有效电压值。在得到电压值后,每隔单位时间计算热量和电功率值,进而根据 PDRC 的面积求得瞬时制冷功率并对其进行显示存储,经 Python 程序处理后得到材料的辐射制冷功率。

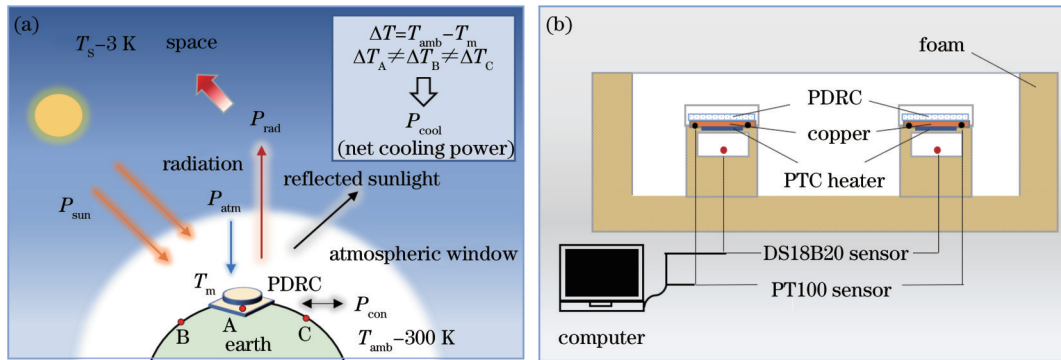


图 1 系统原理示意图。(a)辐射制冷原理;(b)功率测量原理及系统

Fig. 1 Schematic diagrams of system. (a) Radiative cooling principle; (b) power measurement principle and system

3 系统装置设计

3.1 机械结构设计

系统在测量过程中涉及到热平衡及转化,空气热对流和热传导会严重影响系统制冷功率的测量。整体装置设计如图 2(a)所示,主要由载物台、LCD 显示屏口、双镂空辐射窗口隔板、开关和电源线通孔等组成。利用绘图软件进行三维建模,使用耐温树脂材料经 3D

打印工艺制作成型,在有限元模块下进行应力分析^[21-22],结构满足日常使用及功率测量所需硬度。装置侧壁中空,填充聚氨酯材料(PU),其具有良好的保温隔热效果;顶部设置有双镂空的隔板,镂空部分贴附有聚乙烯薄膜(PE),实际使用的 PE 膜的太阳波段透过率均在 90% 以上,在保证透光的基础上最大程度地减少空气对流;内部设置双载物台,使用聚乙烯薄膜密封,测量时各器件置于载物台上,位置结构如图 2(b)

所示,铜片作为传热元件,处于材料和 PTC 加热器的中间,铂电阻 PT100 用于测量铜片与辐射冷却材料的

整体温度。

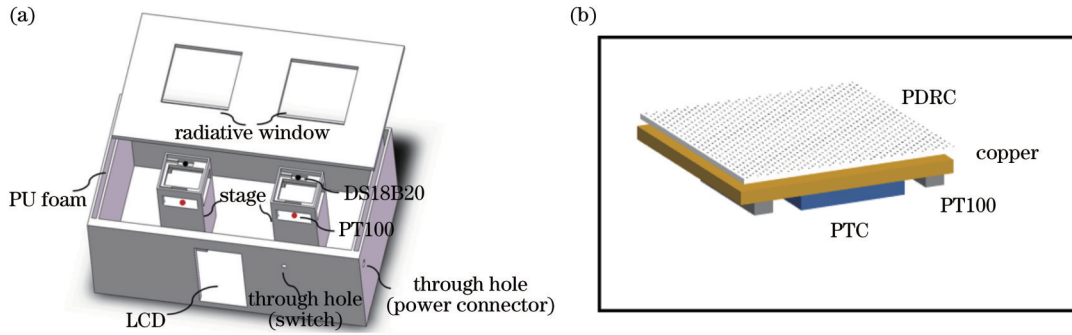


图 2 三维建模结构示意图及测量位置结构。(a)装置结构;(b)测量组件位置结构

Fig. 2 Schematic diagrams of 3D modeling structure and measurement position structure. (a) Device structure; (b) measurement component position structure

3.2 硬件电路设计

本文中辐射制冷功率测量系统装置由主控制器 STM32F103 芯片、PTC 加热模块、隔离驱动模块、温

度传感器模块和上位机模块等组成。图 3 为电路系统结构示意图。

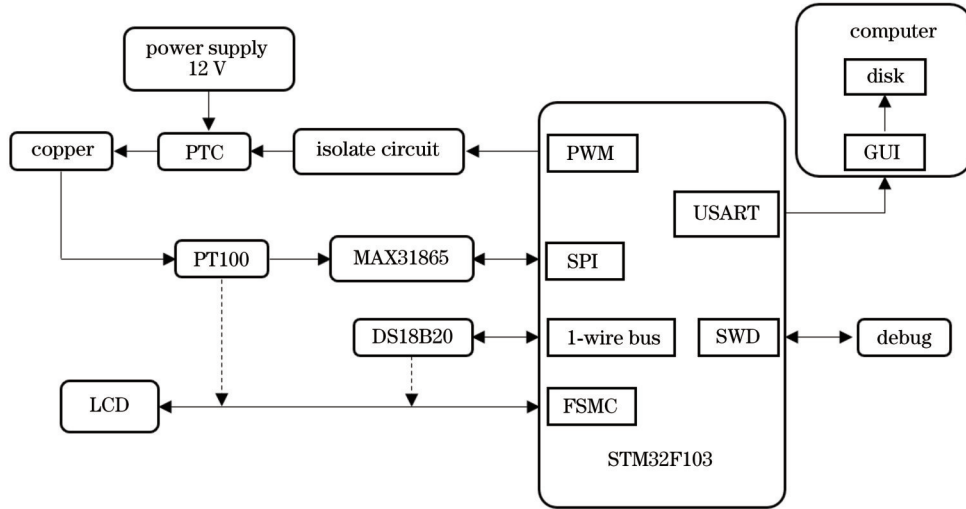


图 3 电路系统结构图

Fig. 3 Circuit system block diagram

以单载物台为例的实物连接如图 4(a)所示。其中,隔离驱动模块选用 YNMOS-1 型号的光耦隔离,输入 12 V 直流电源和 PWM 波控制信号,调控输出电压,将电源、控制信号与 PTC 加热器进行隔离。当控制信号处于高电平时,模块导通,输出 12 V 电压信号,实现加热;测温模块如图 4(b)、(c)所示,选用 PT100 铂电阻和 DS18B20 数字温度传感器分别以 SPI 通信协议和单总线通信与控制器连接。MAX31865 模块负责将 PT100 随温度变化的电阻值转化为当前材料表面的温度值;PTC 加热模块如图 4(d)所示,为正温度系数平板型加热器,两端连接电源后将自热升温,具备较好的加热控温效果;LCD 屏如图 4(e)所示,用于当前测量数据的显示。

该电路系统的工作原理为:由 DS18B20 数字温度

传感器测量载物台下方腔内环境温度,铂电阻 PT100 测量辐射冷却材料温度。在一定条件下材料与环境温度产生温差后,将数据传输至主控制器,由 PID 算法计算输出脉宽调制(PWM)信号并控制驱动电路的导通,产生不同的有效电压值,进而使 PTC 工作在不同的功率状态下。系统实时采集环境温度与材料温度,根据温差值不断改变 PWM 波的占空比,完成温度的精准控制。在达到温度一致的动态平衡后,计算 PTC 的加热电功率,并将其转化为辐射制冷功率。此外,LCD 屏用于在装置控制端实时显示测量温度、电功率和制冷功率。

3.3 温度探测器校准

装置在功率测量过程中,需要对环境和材料表面温度分别进行测量,且对温度数据要求较高,故在两种

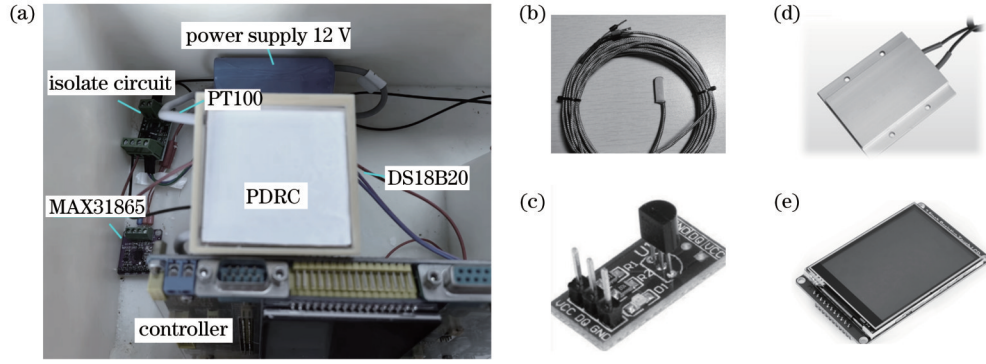


图 4 系统硬件组成图。(a)实物连接图;(b)PT100铂电阻;(c)DS18B20 数字温度传感器;(d)PTC 加热器;(e)LCD 屏
Fig. 4 System hardware composition diagram. (a) Physical connection diagram; (b) PT100 platinum resistance; (c) DS18B20 digital temperature sensor; (d) PTC heater; (e) LCD screen

场景下选用不同的温度传感器。DS18B20 数字温度传感器的测量精度高,抗干扰能力强,处理简单,适用于非接触式环境温度的测量;铂电阻 PT100 温度传感器使用范围广,测温精度高,性能稳定,适用于低温表面温度测量。

在测温前,通常需要对测量器件进行校准处理,如图 5 所示,对不同传感器分别在空气中和测量载物台密闭空间内进行测试。结果显示,空气中热对流波动较大,两种不同传感器之间存在 0.6 °C 左右的软硬件偏差,且 PT100 之间也存在固定误差和较小的线性误差。

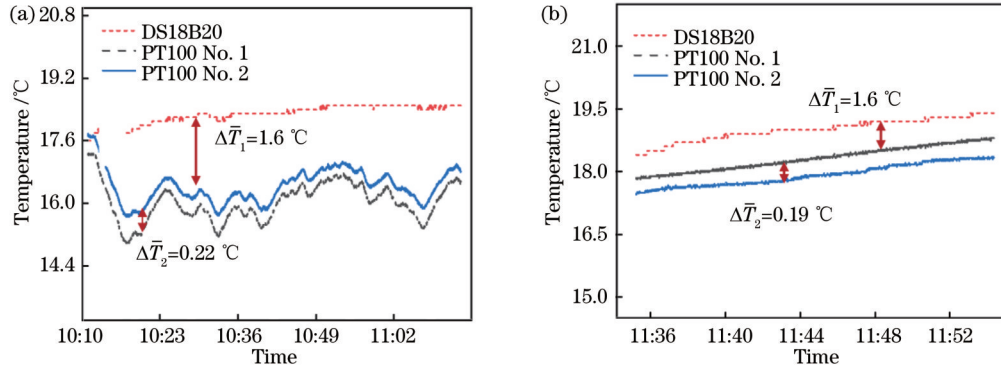


图 5 温度传感器的误差测试。(a)开放空间测试环境;(b)密闭空间测试环境
Fig. 5 Error test of temperature sensor. (a) Open space testing environment; (b) sealed space testing environment

所用温度传感器在控制器端进行固定误差补偿,并采用分段线性拟合算法对误差进行进一步的消除^[23-24]。图 6 为校准后的温度测量图,DS18B20 处在装置内部环境下,PT100 温度传感器处在装置载物台的密闭环境下,对其进行再次测试,其相对误差保持在

0.5% 以内,满足使用需求。

4 系统算法与仿真

4.1 温控系统的数学模型

根据上述原理,可对物体热辐射功率进行简化处理,在固定发射角度和波长范围(8~13 μm)后,可得物体热辐射功率 $P_{rad}(T)$ ^[5]为

$$P_{rad}(T) = A \int d\Omega \int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T, \lambda) \epsilon(\lambda, \theta) = D \frac{1}{\exp(B/T) - 1} - D' \frac{1}{\exp(B'/T) - 1}, \quad (3)$$

式中: A 为辐射冷却材料面积; I_{BB} 为黑体辐射; ϵ 为物体的发射率; B 、 D 和 B' 、 D' 为常数。经 Matlab 数据拟合后可得近似线性函数。夜间下测量可忽略太阳辐射功率 P_{sun} ,并在简化后得到系统的辐射热量损失。

考虑到加热片和冷却材料的热传导^[25],整个系统包含散热与辐射冷却两个热输出,加热片产生热输入。

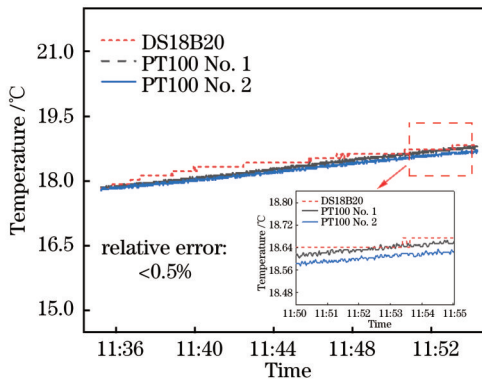


图 6 校准后的温度传感器测试
Fig. 6 Temperature sensor test after calibration

因此可建立热平衡方程：

$$\Delta Q_i - \Delta Q_o - \Delta Q_{cool} = \frac{dQ}{dt}, \quad (4)$$

式中： ΔQ_i 为单位时间加热片产生的热量； ΔQ_o 为单位时间内的系统散热量； ΔQ_{cool} 为单位时间内的冷却材料净辐射热量。对式(4)进行拉氏变换，并考虑到时滞环节^[26]，可得系统传递函数 $G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$ ，其中 K 为增益系数， T 为惯性时间常数， τ 为纯滞后时间^[27]。

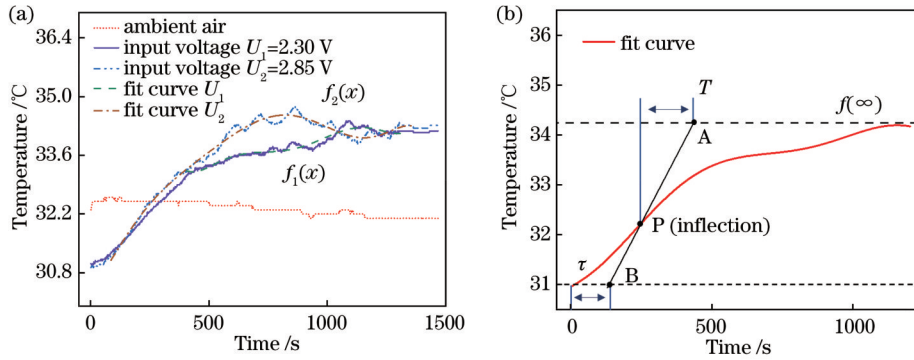


图 7 系统阶跃响应。(a) 阶跃响应；(b) 拟合曲线

Fig. 7 System step response. (a) Step response; (b) fit curve

4.2 模糊 PID 控制

不同的辐射冷却材料的性能有所差异，进而会影响系统传递函数的变化。传统的 PID 调控已无法满足辐射制冷功率测量系统下的温度控制要求。图 8(a) 展示了夜间黑漆材料产生降温效果后的温度调控结果，在得到系统传递函数参数后，可以根据经验整定法^[29]，设置比例增益 (P) 为系统允许值 (系统出现振荡) 的 60%，积分时间常数 (I) 可取较大的初值，微分时间常数 (D) 一般可先取 0，在仿真调试后进行实测联

调，最终确定 PID 的参数，结果显示其超调量为 1.2%，稳态误差在 0.1 °C 以内。图 8(b) 展示了近似环境条件下 200 μm 厚度的聚偏氟乙烯 (PVDF，掺杂空气小球) 冷却材料的温度调控效果，可以发现其达不到理想效果，其主要原因是该测量系统采用了由黑漆材料确定的 PID 参数值，其积分时间常数值过小，使得稳态误差过大，无法满足温控精度要求。因此本文引入模糊 PID 控制，从而适应多种辐射冷却材料的功率测量需求。

设置合理的电压值，求取系统的阶跃响应曲线，图 7(a) 为不同阶跃输入电压下系统的温度变化情况，对所得温度数据经 Python 多项式进行拟合处理后，采用一阶迟滞系统两点法^[28] 确定参数，如图 7(b) 所示。考虑到辐射冷却材料的多样性，本文采用黑漆作为测试初始材料，用于初步设置模糊控制器。经计算最终得到黑漆材料下的系统传递函数为 $G(s) = \frac{1.4}{344s + 1} e^{-77s}$ 。

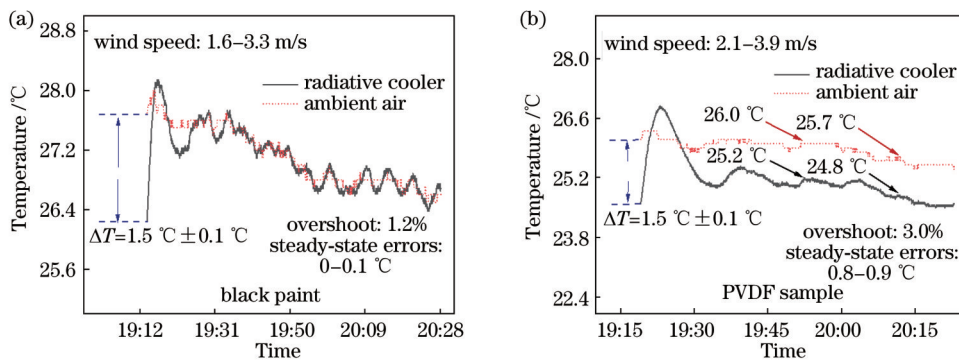


图 8 温度调控结果。(a) 黑漆 (2022-05-31)；(b) PVDF 薄膜 (2022-06-01)

Fig. 8 Temperature regulation results. (a) Black paint (2022-05-31); (b) PVDF film (2022-06-01)

模糊 PID 控制以系统误差 e 及其变化率 e_c 为输入，在确定模糊控制规则后，经过精确值模糊化、模糊推理、解模糊处理，对系统 PID 参数进行实时修改，以适应变化的 e 和 e_c 对 PID 参数自整定的要求^[30]。本文的温度控制系统中只存在 PTC 加热，无降温器件，故

其控制规则如下：调节初期，为了提高系统的响应速度，应增大比例增益 K_p ，同时取积分时间常数 $K_i = 0$ 防止饱和，微分时间常数 K_d 值可适当增大，从而避免超调；调节中期，为减小系统的超调量， K_p 取较小值， K_i 、 K_d 取适中值；调节后期，在保证系统稳态误差的前

提下应适当减弱积分作用,防止余热导致的系统超调增大,同时取适当的 K_d 值,避免系统振荡。此时 PID 的修正值为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为比例增益、积分时间常数、微分时间常数的初始值; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为误差 e 和变化率 e_c 经模

糊推理后比例增益、积分时间常数、微分时间常数的增量。

利用 Matlab 的 Fuzzy 工具箱建立模糊控制器^[31], 选择论域、隶属函数和解模糊化方法,并在 Simulink 中搭建仿真模型,如图 9 所示。图中 T_0 为仿真系统的设定温度(即实测环境温度), $\Delta u/\Delta t$ 为温差的变化率, $\text{num}(s)/\text{den}(s)$ 为系统传递函数, ΔT 为控制增量, T_1 为系统输出温度(即冷却材料温度)。

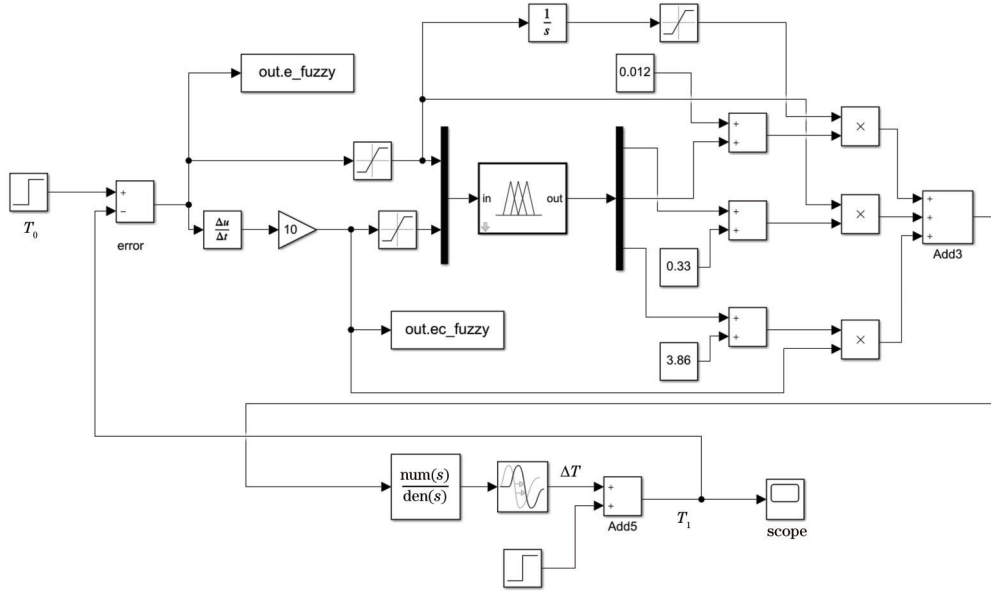


图 9 模糊 PID 控制仿真模型

Fig. 9 Fuzzy PID control simulation model

给定环境温度与 PID 的初始值,不断调整传递函数的值,模拟多种材料的测试。比较模糊 PID 与传统 PID 的控制效果,如图 10 所示,模糊 PID 控制展

现出了较好的控制稳定性和鲁棒性,从理论上说明模糊 PID 控制可以满足多种辐射冷却材料的测量需求。

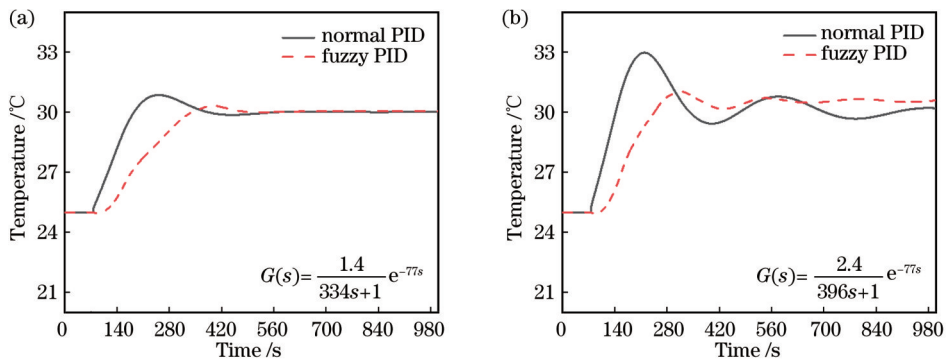


图 10 不同控制器的响应曲线。(a) $K=1.4, T=344$; (b) $K=2.4, T=396$

Fig. 10 Response curves of different controller. (a) $K=1.4, T=344$; (b) $K=2.4, T=396$

5 实验测试与分析

为了切实准确地测量辐射制冷功率,搭建了如图 11 所示的测量装置,前期将模糊控制器转为代码语言写入控制器,并根据电路系统结构图连接各模块。装置内部放置控制器、温度传感器、待测材料 PDRC 及

12 V 锂电池并连接 PTC,外部接入电源供上位机使用,温度探测器经单总线和 SPI 协议将所测温度传输至控制器并显示至 LCD 屏。上位机操作及人机交互界面采用 Labview 编写,通过 USART 协议将数据传输至上位机,对数据进行显示并保存至磁盘。

测试前期,利用相反转法将 PVDF、丙酮、水按照

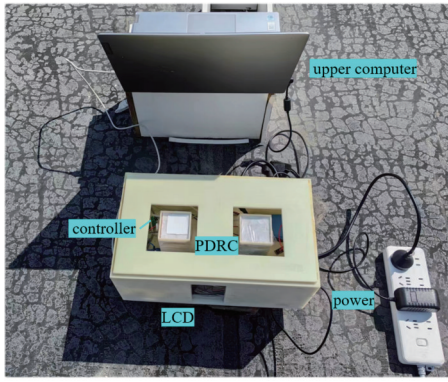


图 11 开放环境测量装置图

Fig. 11 Diagram of open environment measurement device

一定比例混合成为前驱体溶液,之后将溶液涂布成膜并在室温下自然蒸发,由于丙酮和水的蒸发,薄膜内形

成了微米孔和纳米孔结构,即多级孔结构。在涂布成膜的过程中,使用不同深度的凹槽模板则可以有效地更改厚度。在此次实验测试中,选用 $100\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 厚度的 PVDF 薄膜进行制冷功率测量,其宏观形态与表面形貌如图 12(a)、(b) 所示,不同厚度的薄膜表面形貌类似,多级孔的粒径在 $2\sim 16\ \mu\text{m}$ 范围内,样品整体呈现白色柔性形态;太阳波段反射率以及红外发射率如图 12(c)、(d) 所示,红外发射率在 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 波段高达 95% 左右,厚度的影响并未带来明显差异。而由于多级孔和厚度对于散射效应的影响,太阳波段反射率出现了较大差异,进而导致降温性能的不同。设置大气温度为 312 K,并代入其他环境条件数据,可在 Matlab 中计算得到材料的理论制冷功率值为 $P_{\text{cool}-100\ \mu\text{m}} = 56.75\ \text{W}/\text{m}^2$, $P_{\text{cool}-200\ \mu\text{m}} = 70.38\ \text{W}/\text{m}^2$ 。

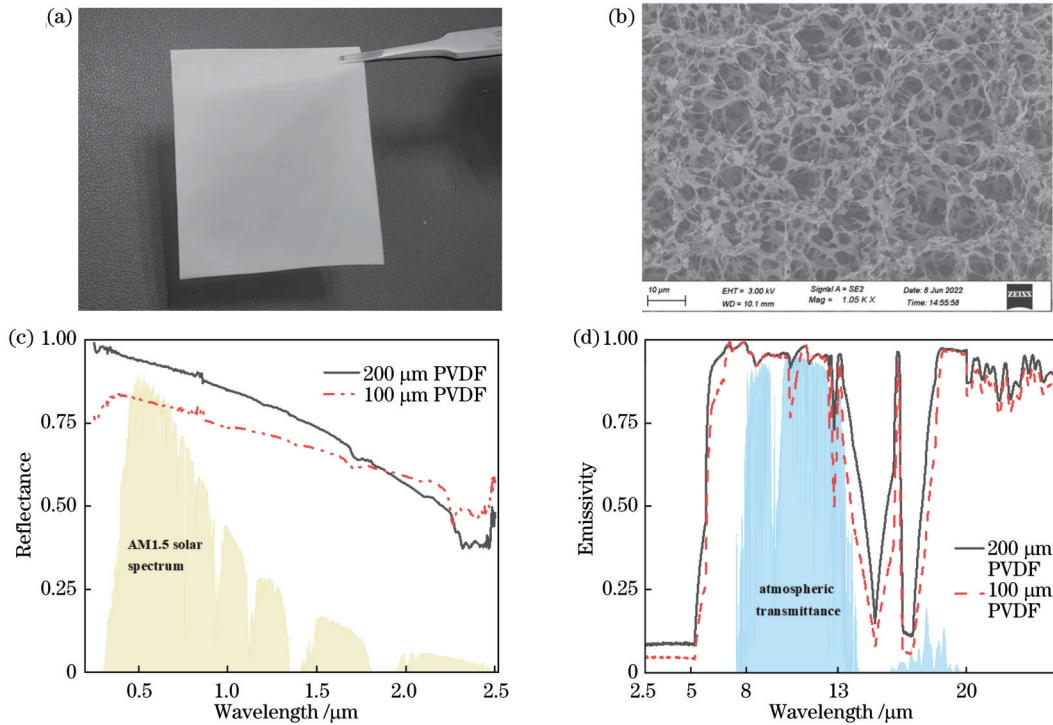


图 12 PVDF 薄膜结构和光谱图。(a)宏观形态;(b)表面形貌;(c)反射率;(d)发射率

Fig. 12 PVDF film structure and spectrogram. (a) Macroscopic appearance; (b) surface topography; (c) reflectance; (d) emissivity

实验共分两种测试场景:温度差测量和制冷功率测量。图 13 显示了两种材料在户外环境下的温度变化情况,正午时刻,由于太阳辐射能量较高,材料无实际降温效果。14:30 至 16:30 时间段的平均温度分别下降 $(3.1\pm 0.2)\ ^\circ\text{C}$ 和 $(3.6\pm 0.2)\ ^\circ\text{C}$, 16:30 至 21:30 时间段的平均温度分别下降 $(5.7\pm 0.2)\ ^\circ\text{C}$ 和 $(7.0\pm 0.2)\ ^\circ\text{C}$ 。在此天气条件下,两种辐射冷却材料表现出了明显的日间辐射冷却效果,并存在性能差异。

在保证环境天气条件一致的情况下,利用模糊 PID 反馈控制温度,对相同材料进行制冷功率测量。如图 14 所示,确保装置环境密闭良好,可最大限度地减少传导和对流^[13,32]。系统装置的温度控制效果良

好,基本无超调量,稳态误差保持在 $0.1\ ^\circ\text{C}$ 以内,并依此测得 15:00 至 21:50 时间段,厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 的 PVDF 薄膜的制冷功率为 $53.33\ \text{W}/\text{m}^2$,厚度为 $200\ \mu\text{m}$ 的 PVDF 薄膜的制冷功率为 $67.45\ \text{W}/\text{m}^2$ 。通过与理论计算值进行对比分析,可以得出在一定的实验误差范围内,系统测量的制冷功率与理论预测值保持着相同的变化趋势,材料温度始终与环境温度保持一致,说明该系统可以满足多种辐射冷却材料的性能测试需求。

本文中装置所需核心元件仅为主控制器、温度传感器和 PTC 加热片,对比使用 12 片半导体制冷器的控温装置^[13],从硬件数量和装置复杂度上进行简化;同

时,借助于模糊PID算法,该装置在测量不同材料的制冷功率时无须重置控制器参数或更改程序,减少了测试流程。此外,测量装置在切换测试材料时,只需要更改装置载物台上的材料载片,从而进一步降低测量误差的影响,满足多种材料功率测量的应用需求。

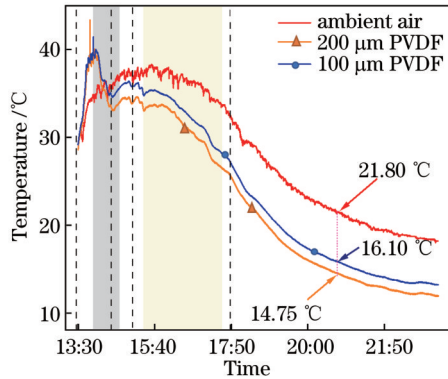


图 13 PVDF 薄膜户外温度测量

Fig. 13 Outdoor environment temperature measurement by using PVDF film

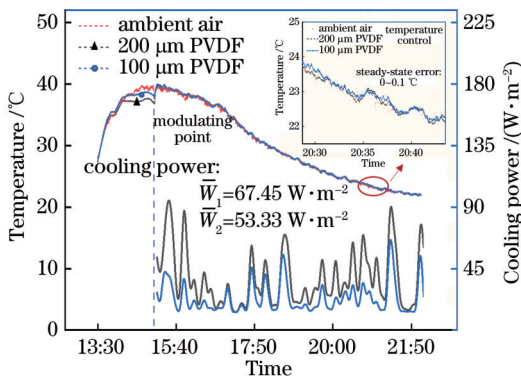


图 14 PVDF 薄膜制冷功率测量

Fig. 14 Cooling power measurement by using PVDF film

6 结 论

辐射制冷功率是衡量材料冷却性能的重要指标,故需要一种切实有效的仪器来进行标准化测量和表征。通过对辐射制冷的工作原理和热学平衡的分析与研究,设计了一种基于模糊PID控制算法、以STM32F103芯片为主控制器的功率测量系统。系统优化了硬件结构,避免了类似装置的复杂性,以更为小型化、实用化的方式为研究者们提供测量平台。实验结果表明,系统在制冷功率测量过程中可针对不同材料均实现良好的温控效果,稳定后的控制精度可达到 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,测得实验室制备的PVDF辐射冷却材料样本的制冷功率为 53.33 W/m^2 和 67.45 W/m^2 。所得制冷功率值与理论预测值变化趋势相同,具有一定的应用前景,这些结果可为辐射制冷功率的标准化制定提供一种思考。

参 考 文 献

- [1] Zhao B, Hu M K, Ao X Z, et al. Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 155: 660-666.
- [2] 杜汐然, 王雪畅, 朱斌. 个人辐射制冷织物的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(13): 1316006.
- [3] Du X R, Wang X Y, Zhu B. Personal radiative cooling textile generation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(13): 1316006.
- [4] Yu X X, Chan J Q, Chen C. Review of radiative cooling materials: performance evaluation and design approaches[J]. Nano Energy, 2021, 88: 106259.
- [5] Muntasir M H, Min G. Radiative cooling: principles, progress, and potentials[J]. Advanced Science, 2016, 3(7): 1500360.
- [6] Raman A P, Anoma M A, Zhu L X, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight[J]. Nature, 2014, 515(7528): 540-544.
- [7] Chen Z, Zhu L X, Raman A, et al. Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day-night cycle[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13729.
- [8] Wang H D, Xue C H, Guo X J, et al. Superhydrophobic porous film for daytime radiative cooling[J]. Applied Materials Today, 2021, 24: 101100.
- [9] Yang X B, Geng J L, Tan X Y, et al. A flexible PDMS@ZrO₂ film for highly efficient passive radiative cooling[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2023, 151: 110586.
- [10] Ahmed S, Li Z P, Javed M S, et al. A review on the integration of radiative cooling and solar energy harvesting[J]. Materials Today Energy, 2021, 21: 100776.
- [11] Pal S K, Choi D Y, Kim G. Radiative cooling face mask[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(8): 5888-5895.
- [12] Mandal J, Fu Y K, Overvig A C, et al. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling[J]. Science, 2018, 362(6412): 315-319.
- [13] Cheng Z M, Han H, Wang F Q, et al. Efficient radiative cooling coating with biomimetic human skin wrinkle structure[J]. Nano Energy, 2021, 89: 106377.
- [14] Yoon S, Chae D, Seo J, et al. Development of a device for characterizing radiative cooling performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 213: 118744.
- [15] Zhu Y N, Luo H, Yang C Y, et al. Color-preserving passive radiative cooling for an actively temperature-regulated enclosure [J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 122.
- [16] Li X Q, Sun B W, Sui C X, et al. Integration of daytime radiative cooling and solar heating for year-round energy saving in buildings[J]. Nature Communications, 2020, 11: 6101.
- [17] Zhu H Z, Li Q, Tao C N, et al. Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling[J]. Nature Communications, 2021, 12: 1805.
- [18] Li D, Liu X, Li W, et al. Scalable and hierarchically designed polymer film as a selective thermal emitter for high-performance all-day radiative cooling[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(2): 153-158.
- [19] Kou J L, Jurado Z, Chen Z, et al. Daytime radiative cooling using near-black infrared emitters[J]. ACS Photonics, 2017, 4(3): 626-630.
- [20] 赵海鹏, 章新源, 何云斌, 等. 基于二氧化钒热致相变的自适应温度调控[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1523001.
- [21] Zhao H P, Zhang X Y, He Y B, et al. Self-adaptive temperature modulation based on thermal induced phase changing of vanadium dioxide[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1523001.
- [22] Ulpiani G, Ranzi G, Shah K W, et al. On the energy modulation of daytime radiative coolers: a review on infrared emissivity dynamic switch against overcooling[J]. Solar Energy, 2023, 254: 111000.

- 2020, 209: 278-301.
- [21] 王琛, 周微艺, 张晨赟. 基于 3D 打印 TPU 材料的硫氯分析仪电解池保护套的设计应用[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2): 113-119.
Wang C, Zhou Z Y, Zhang C Y. Design and application of electrolytic cell protective sleeve of sulfur and chlorine analyzer based on 3D printing TPU material[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2): 113-119.
- [22] 于宏博, 孙博宇, 杨文禹, 等. 基于 Solidworks 的汽车搬运器结构设计及有限元分析[J]. 现代信息科技, 2023, 7(7): 151-153.
Yu H B, Sun B Y, Yang W Y, et al. Structural design and finite element analysis of car carrier based on solidworks[J]. Modern Information Technology, 2023, 7(7): 151-153.
- [23] 许晓青, 李锁印, 刘晨, 等. 一种在片薄膜铂电阻温度传感器的校准方法[J]. 计量学报, 2022, 43(12): 1605-1609.
Xu X Q, Li S Y, Liu C, et al. Calibration method of on-chip thin film platinum resistance temperature sensor[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(12): 1605-1609.
- [24] 周志炜, 邓天雨, 师亮, 等. 压阻式压力传感器的温度补偿及现场校准方法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(10): 145-148.
Zhou Z W, Deng T Y, Shi L, et al. Temperature compensation and field calibration method of piezoresistive pressure sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(10): 145-148.
- [25] 陈宇峥. 薄层界面热传导机理及热测量研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020: 7-14.
Chen Y Z. Study on heat conduction mechanism and thermal measurement of thin layer interface[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020: 7-14.
- [26] 卢燕, 张艳荣, 胡小林. 基于模糊 PID 控制的半导体激光器温度控制系统设计[J]. 机械与电子, 2018, 36(6): 50-53.
Lu Y, Zhang Y R, Hu X L. Design of semiconductor laser temperature control system based on fuzzy PID[J]. Machinery & Electronics, 2018, 36(6): 50-53.
- [27] 高家鑫, 宋延嵩, 刘洋. 非线性 PID 自抗扰控制在快反镜温控系统中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5): 0523001.
Gao J X, Song Y S, Liu Y. Application of nonlinear PID active disturbance rejection control in the temperature control system of fast steering mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 0523001.
- [28] 丁锋, 徐玲, 刘喜梅. 传递函数辨识(1): 阶跃响应两点法和三点法[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1-14.
Ding F, Xu L, Liu X M. Transfer function Identification. Part A: two-point and three-point methods based on the step responses[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 1-14.
- [29] 许新玉, 周家成, 刘政, 等. 基于高精度 PID 温控的宽带腔增强大气二氧化氮探测技术研究[J]. 光学学报, 2023, 43(24): 2430001.
Xu X Y, Zhou J C, Liu Z, et al. Research on broadband cavity enhanced atmospheric nitrogen dioxide detection technology based on high precision PID temperature control[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(24): 2430001.
- [30] 张安迪, 张艳荣, 李涛. 论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1214003.
Zhang A D, Zhang Y R, Li T. Application of variable domain fuzzy PID control in semiconductor laser temperature control system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1214003.
- [31] 焦仁雷, 宋慧波, 任亚宁, 等. 模糊自适应 PID 控制系统的研究及 MATLAB 仿真[J]. 装备制造技术, 2015(2): 87-89.
Jiao R L, Song H B, Ren Y N, et al. Study on fuzzy adaptive PID control system and simulation based on MATLAB[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(2): 87-89.
- [32] Qin J E, Zhang Z H, Li Y W, et al. Design and manufacture of a radiative cooler to measure the subambient cooling effect and cooling power[J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(5): 054901.

Photonic Radiative Cooling Power Measurement System Based on Fuzzy Control

Zhou Yusheng^{1,2}, Zhu Hongyu^{1,2}, Chen Ben^{1,2}, Chen Jiacheng^{1,2}, Zhan Yaohui^{1,2*},
Li Xiaofeng^{1,2**}

¹School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;

²Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract

Objective As a form of passive cooling, radiative cooling can reduce the temperature of objects below the ambient temperature without additional energy consumption, and has become a research hotspot in thermal management in recent years. Daytime radiative cooling has been achieved by radiating out heat through the atmospheric transparent window (ATW, 8–13 μm) and simultaneously reflecting incident sunlight to avoid heating, which has been employed in green buildings, solar cells, and other fields. Generally, the physical quantities that measure the cooling material performance are temperature difference and radiative cooling power. Compared to the variability value of temperature differences measured under different circumstances (e. g., locations, atmospheric temperatures), the radiative cooling power is stable and can reflect the cooling performance more objectively. However, there are no specialized instruments measuring the radiative cooling power, especially those compatible with various materials with different cooling capabilities, which has become an obstacle to standardized radiative cooling evaluation. Therefore, we design a kind of measurement device for

measuring radiative cooling power, and hope to provide a helpful tool for the material development and large-scale applications of radiative cooling technology.

Methods According to the thermal balance principle, we design a cooling power measurement system consisting of a single-chip microcomputer as the control unit, a DS18B20 digital temperature sensor and a platinum resistance of PT100 as the temperature sensor, and a positive temperature coefficient heater as the executive source. The temperature sensors measure the ambient temperature and surface temperature of the sample to be tested and transfer the data to the controller in the form of SPI communication and 1-wire bus communication. Thus, the temperature differences and their changing rates can be obtained. In data processing, we adopt the idea of fuzzy control. First, we finish the value fuzzification about temperature differences and their changing rates, and then determine the membership functions. After the fuzzy inference process, we leverage gravity method to defuzzify and obtain accurate control quantity. On this basis, the fuzzy proportional-integral-derivative (PID) control algorithm is utilized to output pulse width modulation waves with different duty cycles, and then adjust the effective voltage value and working power on the PTC. Then, we control the temperature of radiative cooling materials to be consistent with ambient temperature and finally calculate the radiative cooling power based on the electric power consumption. Additionally, we design a CAD model and fabricate the mechanical structure by employing the 3D printing process.

Results and Discussions Radiative cooling is a surface cooling technology with zero energy consumption. During the measurement, cooling materials initially achieve a ambient temperature drop due to thermal emissions, and then can be heated and maintain consistency with the ambient temperature under the action of the PTC heater. Meanwhile, we adopt the effective voltage changes of the PTC as input and the temperature change of the sample material as output. After Laplace transformation, we can obtain the system's transfer function. On this basis, we develop a simulation model for a fuzzy PID controller (Fig. 9), which realizes higher-accuracy temperature control and enhances the system's anti-interference capability (Fig. 10). Traditional PID control cannot meet the accuracy requirements of temperature control when dealing with cooling materials with different cooling performance, which is because the steady-state errors will occur under the unchanged parameters. The employed fuzzy PID control algorithm can adaptively change the PID parameters according to the values and changing rates of the temperature differences returned from different materials. Additionally, it can adjust the controller which outputs multiple PWM waves without interfering with each other to meet the testing requirements of various radiative cooling materials. The outdoor test results show that the homemade PVDF films of different thicknesses achieve cooling temperatures of 5.7 °C and 7.0 °C respectively in the evenfall (Fig. 13). After adopting the fuzzy PID controller, the system achieves the ideal results with no overshoot, and the steady-state error remains within 0.1 °C (Fig. 14). We also obtain the actual cooling power. The calculation results show that the cooling power values are 53.33 W/m² and 67.45 W/m² respectively. The measured cooling power maintains the same trend as the theoretical prediction.

Conclusions We design a radiative cooling power measurement system based on the fuzzy PID control algorithm by employing the STM32F103 chip as the main controller. From the component point of view, since the core components of the system are only the main controller, temperature sensor, and PTC heater, the system is simplified from the number of hardware and device complexity. Meanwhile, the system meets the power measurement requirements of different radiative cooling materials based on a fuzzy PID control algorithm. In the simulation model, the system shows excellent stability and anti-interference capability. The actual outdoor test results indicate that an ideal temperature control effect can be yielded for different materials, and the control accuracy after stabilization can reach ± 0.1 °C. On this basis, the system initially realizes the miniaturization and practical applications of the measuring device, with promising application prospects.

Key words measurement; radiative cooling; cooling power; single-chip microcomputer; temperature control; fuzzy PID