

基于贝叶斯优化模糊 PID 的控温四探针系统设计^{*}

袁 强 伍滨和

(东华大学物理学院 上海 201600)

摘 要: 为了研究薄膜样品在变温条件下的方块电阻变化特性,设计了一台集成贝叶斯优化模糊 PID 控温系统与四探针法的测量设备。采用贝叶斯优化算法为模糊控制器寻找最佳超参数组合,显著提升了系统控温精度,同时大幅降低了参数优化过程的实验成本。并为四探针系统设计了具备高稳定性的恒流源电路和高精度数字电压表,确保在薄膜阻值发生 2~3 个数量级变化时仍能提供稳定的电流和精准测量出电压变化。通过嵌入式系统与上位机间的高效双向通信协议,实时同步传输 PWM 的占空比、温度与电压数据,实现高精度温度控制与薄膜样品的方块电阻的实时计算。

关键词: 模糊 PID;贝叶斯优化;四探针法;恒流源;数字电压表

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Design of a temperature-controlled four-point probe system
based on Bayesian optimization of a fuzzy PID controller

Yuan Qiang Wu Binhe

(College of Physics, Donghua University, Shanghai 201600, China)

Abstract: To study the variation characteristics of sheet resistance of thin film samples under variable temperature conditions, a device integrating a Bayesian optimization fuzzy PID temperature control system and a four-probe method was designed. The Bayesian optimization algorithm was used to find the optimal parameter combination for the fuzzy controller, significantly improving the temperature control accuracy of the system and greatly reducing the experimental cost of the parameter optimization process. A highly stable constant current source circuit and a high-precision digital voltmeter were designed for the four-probe system to ensure stable current supply and accurate voltage measurement even when the resistance of the thin film changes by two to three orders of magnitude. Through an efficient two-way communication protocol between the embedded system and the host computer, the duty cycle of PWM, temperature and voltage data were synchronously transmitted in real time, achieving high-precision temperature control and real-time calculation of the sheet resistance of the thin film samples.

Keywords: fuzzy PID; Bayesian optimization; four-probe method; constant current source; digital voltmeter

0 引 言

温度作为实验测试中最常见且关键的变量之一,其精确控制直接决定了化学反应速率、仪器性能、生物系统活性、测量精度以及实验的安全性与可重复性。为实现精准控温,本文使用融合模糊逻辑与 PID 算法相结合的模糊 PID 控制器作为核心调控方法。模糊控制器凭借其灵活的推理机制,在各类加热装置中具有广泛的应用潜力。然而,其控制性能很大程度上依赖于一组关键超参数(如 PID 增益、隶属度函数、模糊规则及比例因子等)的人工调校。这

些参数配置对系统性能影响显著,需经过细致选择。当前,超参数整定过程主要面临两方面的挑战:一方面,参数之间存在着复杂的非线性耦合关系,需进行精细权衡;另一方面,验证不同参数组合的实际效果通常需要大量时间与实验资源,从而导致研发成本大幅上升。这种高度定制化的参数适配需求,严重制约了模糊控制器的快速部署与规模化工程应用。

在过去几十年间,在机器学习算法中已开发出多种超参数优化(hyperparameter optimization, HPO)^[1]方法,如网格搜索(grid search, GS)、随机搜索(random search, RS)

等简单算法以及进化策略、贝叶斯优化^[2] (Bayesian optimization, BO) 和竞速算法等高级算法^[3], 旨在辅助并自动化搜索高性能超参数配置。张家刘等^[4] 提出改进鲸鱼算法 (whale optimization algorithm, WOA) 优化的模糊 PID 控制器用于反激式开关电源的控制中, 并在开关电源动态响应过程中取得良好的控制效果。杨洪涛等^[5] 提出蛭螂算法 (dung beetle optimizer, DBO) 优化模糊 PID 量化因子与比例因子的温度控制方法, 进一步提高了试验箱温控系统的响应速率与稳定性。刘运忠等^[6] 提出粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 的模糊 PID 控制应用于机器人抛磨系统, 通过智能优化控制参数, 显著提高了作业过程中的接触压力稳定性。但无论是 WOA 算法、DBO 算法以及 PSO 算法, 均需通过海量的函数评估与种群迭代才能逼近最优解。当在面对评估成本高昂的优化问题时, 这一特性便成为显著弊端, 会导致计算时间与资源消耗呈指数级增长, 实践代价高昂。

模糊控制器的超参数组合搜索问题属于典型黑盒优化, 其目标函数不具备解析形式与梯度信息, 且函数评估成本高昂。对此, BO 作为一种样本效率极高的全局优化算法, 展现出卓越性能。BO 的显著优势在于其出色的样本效率, 使其特别适用于评估代价高昂的优化问题。不同于其他依赖大规模测试的智能算法, BO 通过构建控制器性能指标的概率代理模型, 通常为 GP^[7], 在已有有限样本的基础上, 对整个参数空间的目标函数值及其不确定性进行联合建模与预测。在此基础上, BO 通过启发式采集函数引导采样过程, 主动选择具有最大期望性能提升或最大信息增益的参数组合进行下一次评估。该“探索—利用”平衡策略不仅显著减少了所需的评估次数, 还能快速收敛至全局最优区域。因此, 为克服传统超参数优化方法计算成本高昂的局限, 本文采用 BO 算法为模糊 PID 控制器搜寻超参数配置, 来提高温控系统的响应速率与稳定性。

有些半导体材料的阻值会随着外部温度的变化而发生改变, 例如, 二氧化钒 (VO_2) 薄膜凭借出色的金属—绝缘相变^[8] (metal insulator transition, MIT) 特性, 在传感器、电子器件、类神经网络、智能窗和存储器等领域拥有重要的研究及应用价值^[9]。 VO_2 薄膜在室温下呈高阻状态 (通常为兆欧级), 而在接近其相变临界温度时, 阻值可骤降至数百欧姆, 呈现出明显的非线性突变行为。因此, 需要采用配备温控系统的四探针测试仪来测量 VO_2 薄膜完整的相变过程方块电阻的变化。然而, 市售四探针测试仪器种类繁多, 性能各异, 主要分为普通型和商用型两类。如果采用普通仪器来测量 VO_2 薄膜变温条件下的方块电阻时, 存在明显局限: 1) 缺乏配套温控系统; 2) 测量范围与精度不足, 难以覆盖相变过程中的宽阻值区间; 3) 通常仅支持单点测试, 无法实现连续数据记录与动态跟踪。虽然商用型四探针测试仪克服了上述局限, 能够实现 VO_2 薄膜在整个相变过程中方块电阻的连续测量, 但其价格昂贵, 难以普及。Sirjita 等^[10]

通过使用 Keithley 系列源表和 Linkam 控温台搭建了控温四探针装置, 来测量 VO_2 薄膜的电学性能并进行评估。然而, 此类设备价格依然较高, 难以在实验室中广泛应用。

鉴于 VO_2 薄膜独特的 MIT 特性, 本研究专门设计了一套四探针系统, 其核心功能在于提供稳定的电流值并精确测量电压值。该系统主要由恒流源电路和数字电压表构成: 设计的恒流源电路可以在待测样品阻值发生几个数量级的变化时仍能提供恒定的电流, 数字电压表则用于精确测量电压信号。最后, 将电流值和电压值传给上位机从而计算出 VO_2 薄膜的方块电阻。

1 控温四探针系统基本结构

整个控温四探针系统结构如图 1 所示, 主要由主控制器 STM32 单片机、计算机、恒流源模块、电压采集模块、电机驱动模块和温度采集模块等构成。该系统工作原理为: 温度采集模块采用铂电阻 PT100 与 MAX31865 芯片实时测量加热片温度; 双 H 桥驱动器 L298N 构成电机驱动模块, 为加热片和中间继电器提供功率驱动; 恒流源电路主要由运算放大器与 NMOS 管构建, 给待测样品提供稳定电流; 电压采集模块由 24 位模数转换器 ADS1256 构成对电压信号进行实时测量。恒流源输出端与电压采集端通过中间继电器分别连接至四探针, 并通过控制继电器通断, 实现电流与电压在不同探针之间切换。

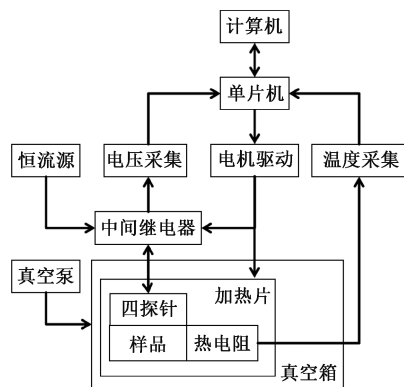


图 1 控温四探针系统结构

Fig. 1 Temperature control four-pin probe system structure

控温过程为: BO 首先为模糊 PID 控制器寻找一组超参数组合, 上位机加载参数后运行模糊 PID 控制器, 根据实时温度的误差和误差变化率计算脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 并输出至单片机。单片机通过引脚生成 PWM 的占空比值来控制电机驱动模块, 实时调节加热片功率, 最终实现 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 级高精度控温。

1.1 温控系统设计

模糊控制器的结构为双输入三输出, 2 个输入变量分别为温度偏差 E 和温度偏差变化率 EC , 3 个输出变量分别为 PID 控制器比例参数、积分参数和微分参数的补偿值 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d , 并设计了 49 条模糊规则, 如表 1 所示。模

表 1 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 模糊规则
Table 1 Fuzzy rule of ΔK_p , ΔK_i and ΔK_d

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	ZO/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

糊控制器的输入输出变量模糊子集都划分为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大这 7 个等级,用符号表示为{NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}。

传统 PID 算法和模糊逻辑控制器相结合构成模糊 PID 控制器更适用于非线性变化的温度控制中,其广泛使用的模糊规则中的隶属函数包括三角形、梯形、高斯、钟形等。三角形和梯形属于线性隶属函数,是最自然且无偏的。高斯和钟形隶属函数是非线性的,在模糊控制研究中应用更多^[11]。广义钟型函数凭借可调宽幅参数 a 和衰减速率 b ,在模糊 PID 控温中平衡非线性适应、控制平滑性与抗干扰能力而受到关注,其公式如式(1)所示。

$$f(x,a,b,c)=\frac{1}{1+\left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}}\tag{1}$$

为了实现更好的控制性能,本文中模糊输入输出隶属函数均采用广义钟型隶属度函数,利用加权平均法对模糊量清晰化。 E 的基本论域为 $(-1,1)$, EC 的基本论域为 $(-0.3,0.3)$ 。为了将 E 和 EC 的基本论域映射到模糊子集论域中,引入 E 的量化因子 $k_e=3$ 和 EC 的量化因子 $k_{ec}=10$ 。输入量 E 、 EC 和输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊子集论域为 $(-3,3)$,并采用非均匀广义钟形隶属度函数来实现更好的控温效果^[12]。其隶属函数如图 2 所示。

模糊控制器的 K_p 、 K_i 和 K_d 是根据增益后的 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 映射回来获得,其增益因子分别为 α 、 β 和 γ ,初始参数值为 K_{p0} 、 K_{i0} 和 K_{d0} ,模糊控制器的输出参数如式(2)~(4)所示。

$$K_p=K_{p0}+\alpha\Delta K_p\tag{2}$$

$$K_i=K_{i0}+\beta\Delta K_i\tag{3}$$

$$K_d=K_{p0}+\gamma\Delta K_d\tag{4}$$

1.2 BO 算法的基本原理与方法

BO 是一类基于模型的序贯优化方法,其特点是在每一次评估完成后再进行下一次评估,从而能够在有限的评估代价下逼近最优解^[13]。该方法尤其适用于维度不超过 20 的优化问题,并且能够有效应对函数评估过程中的随机噪声^[14]。

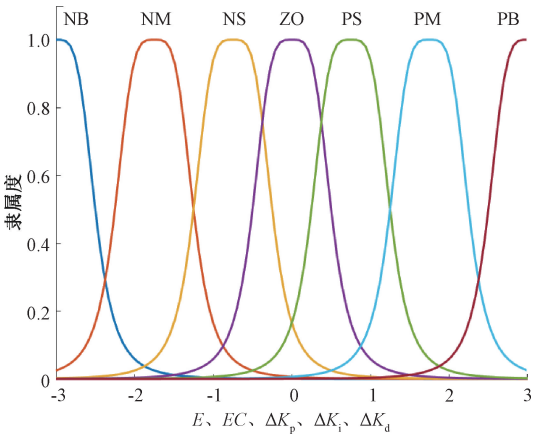


图 2 E 、 EC 、 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的域和隶属函数
Fig. 2 Domain and membership function of E 、 EC 、 ΔK_p 、 ΔK_i and ΔK_d

BO 凭借其在无梯度黑箱函数优化方面的独特优势,展现出极强的算法适应性,已在机器学习超参数优化等复杂参数空间优化问题中得到广泛应用。BO 的目标是找到目标函数 f 的最优解^[15],如式(5)描述的全局最优解为收敛目标,实现了探索与开发过程的高效平衡。

$$\mathop{\text{Min}}_{x\in X}f(x)\tag{5}$$

BO 主要由两个核心组成部分构成:概率代理模型与采集函数。其中,代理模型用于对目标函数进行建模,能够在未观测点上提供函数的预测值及其不确定性(通常以方差表示),常用的代理模型包括 GP、随机森林、核密度估计、深度模型等。GP 是常用的非参数模型,也是 BO 中最广泛应用的概率代理模型,用于近似真实目标函数。凭借其良好的不确定性建模能力,GP 已在回归、分类以及各类黑箱函数推断等任务中得到广泛应用^[16],其数学形式为:

$$f(x)\sim\text{GP}(m(x),k(x,x'))\tag{6}$$

其中, $m(x)$ 是均值函数, $k(x,x')$ 是协方差函数。

采集函数用于衡量在未知点处进行采样的价值,并据此确定下一次实验所需的最佳参数组合,常用的采集函数分别为期望提升(expected improvement, EI)、概率提升

(probability improvement, PI) 和置信度上界 (upper confidence bound, UCB)。给定 GP 的后验分布, 虽然可以直接选择后验均值 $\mu_n(x)$ 最大的点作为下一采样点, 但这样容易陷入局部最优。为在局部搜索和全局探索之间取得平衡, 采集函数同时兼顾预测均值 $\mu(x)$ 与不确定性 $\sigma(x)$, 为每个候选点 x 分配一个采样价值 $\alpha(x)$ 。因此, 选取下一轮采样位置即转化为对采集函数 $\alpha(x)$ 的最优化问题:

$$x_{n+1} = \operatorname{argmax}_{x \in X} \alpha(x) \quad (7)$$

1.3 BO 寻找超参数组合

Snoek 等^[17]的研究表明: GP 作为计算机实验中的高效代理模型, 在敏感性分析、参数校准和预测等任务中表现优异。结合 EI、UCB 等采集函数, GP 能够在多峰黑盒函数的全局优化中实现较高采样效率, 显著减少函数评估次数。

本文使用 GP 作为概率代理模型, UCB 作为采集函数对模糊控制器的超参数进行优化。优化空间由模糊控制器各参数构成, 以系统控温性能为目标函数, 评估指标为积分绝对误差 (integral of absolute error, IAE) 与超调惩罚值 (overshoot penalty, P_{os}) 的加权和, 其公式如式 (8)~(10) 所示。

$$J = w_1 \times IAE + w_2 \times P_{os} \quad (8)$$

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (9)$$

$$P_{os} = \max_{t \geq 0} (y(t) - y_{ref} - \Delta T) \quad (10)$$

式中: $y(t)$ 为实际温度; y_{ref} 为设定温度; ΔT 为允许的超调裕度。

本文基于 BO 的模糊控制器超参数优化过程如下: 首先, 为 8 个参数 (即: 宽幅参数 a 、衰减速率 b 、初始值 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 和缩放因子 α 、 β 、 γ) 设定合理的搜索区间, 并以获得最小 IAE 与 P_{os} 的加权和的值作为优化目标。随后, 在上位机中运行 BO 算法, 其通过 GP 概率代理模型对已有样本进行预测均值与不确定度的联合建模, 并利用 UCB 采集函数在参数空间中平衡探索与利用, 以迭代地寻找潜力参数组合。在每轮迭代中, 将候选参数组导入模糊 PID 控制器运行, 并根据计算出的加权和值更新 GP 模型。经过随机初始化与多轮迭代后, 算法从历史评估结果中选取损失最小的参数组合作为最终配置, 并加载至模糊 PID 控制器中运行来提高控温性能。

如图 3 和 4 所示, 在超参数优化过程中, 随机搜索算法经过约 550 次连续迭代后, 模糊控制器在整个控温过程结束时的 IAE 与 P_{os} 值相较于初始组合已显著下降, 并收敛至较低水平, 维持在较小区间内波动。相比之下, BO 算法仅经过约 350 次迭代, 就使得 IAE 与 P_{os} 值同样实现了明显降低, 并迅速收敛至相近的低波动区间。结果表明, BO 算法在为模糊控制器寻找超参数组时表现出显著的效率优势。与 RS 算法相比, BO 迭代次数减少约 36%, 这意味着在达到相近控制精度时, BO 能够显著节省更多资源与

时间成本。至于这些波动可能受到外部环境因素的影响, 如环境温湿度度的不同。

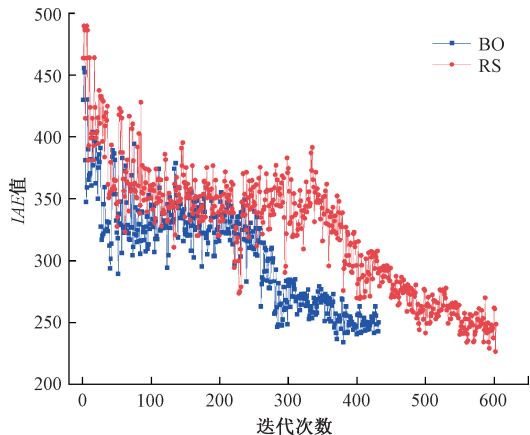


图 3 每组超参数优化迭代后获得的 IAE 值

Fig. 3 The IAE values obtained after each group of hyperparameters optimization iterations

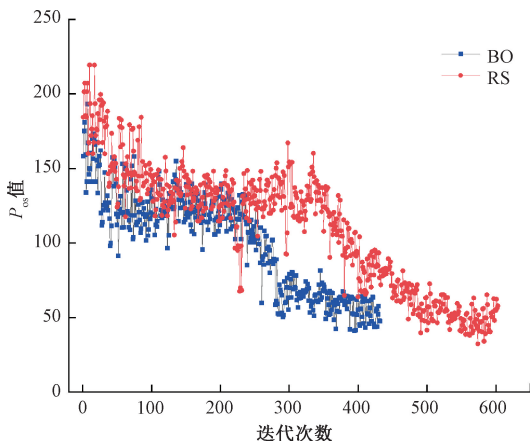


图 4 每组超参数优化迭代后获得的 P_{os} 值

Fig. 4 The P_{os} values obtained after each group of hyperparameters optimization iterations

为评估贝叶斯优化所得超参数组的综合性能, 采用了多设定点动态测试方法, 即通过改变设定温度 (包括调整升温/降温速率及设定不同稳态值), 以筛选出兼具快速响应、超调量小与高稳定性的最优超参数组。如图 5 所示, 每次控温过程时长为 1 800 s, 其右下角显示的是在 1 000~1 020 s 实际温度与设定温度之间的对照。如图 6 所示, 当设定温度在快速上升转为水平过程中有所超调误差在 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内, 但系统会快速响应将误差控制到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内。如图 7 所示, 显示为图 5 中 A 处 930~985 s 时间段, 实际温度在该区间内与设定温度 (80°C) 的偏差及波动均小于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

2 四探针系统

2.1 探针定位校正因子范德堡法

在四探针测量薄膜方块电阻的研究中, Hurand 等^[18]

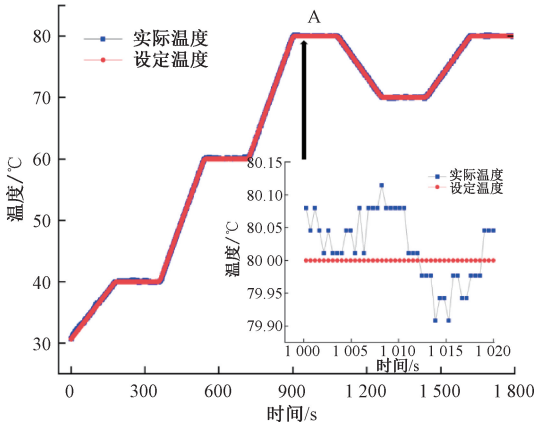


图 5 多次调整设定温度下的温度控制效果

Fig. 5 Temperature control effect under multiple adjustments of the set temperature

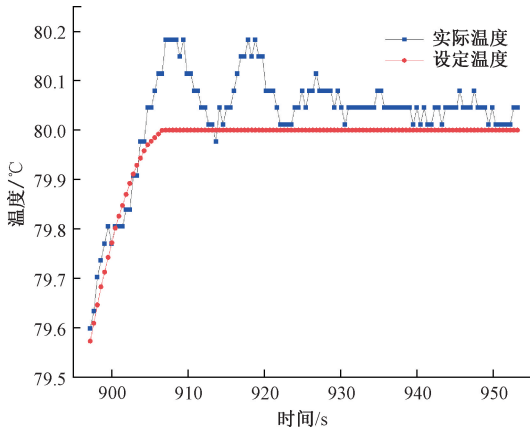


图 6 900~950 s 内设定温度由上升转为恒定后,实际温度与设定温度的误差

Fig. 6 The graph of the error between the actual temperature and the set temperature during the period from 900~950 s when the set temperature changed from rising to constant

提出了一种基于近似闭合形式解析函数的方法,可简便、高效地实现包含各向异性 and 探针定位校正因子的范德堡法(van der pauw, VDP)测量。该方法通过拟合得到的解析函数,有效简化了传统 VDP 中复杂的数学表达式,在保证精度的同时也节省了计算时间。

如图 8 所示,样品呈边长为 a 的正方形, A、B、C 和 D 为 4 个接触电极并形成边长为 $2w$ 的正方形结构,并且与样品正方形对齐并居中排列。为消除实验中可能存在的电压偏移,计算 $R_{AB} = (R_{AB,CD} - R_{AB,DC})/2$, 其中 $R_{AB,CD}$ 为电流从 C 流向 D 时 A 与 B 之间的电压降平均值, $R_{BC,AD}$ 也是类似定义。

定义沿 x 轴方向的伪电阻 $R_{xx} = (R_{AD} + R_{BC})/2$ 和 y 轴方向的伪电阻 $R_{yy} = (R_{AB} + R_{DC})/2$, 其中 $f(A_{\text{vdp}})$ 是各向异性校正因子, 定义为 $A_{\text{vdp}} = R_{yy}/R_{xx}$ ($R_{yy} > R_{xx}$)。如表 2 所示, 给出了 7 个自由参数的拟合值。这些参数仅适

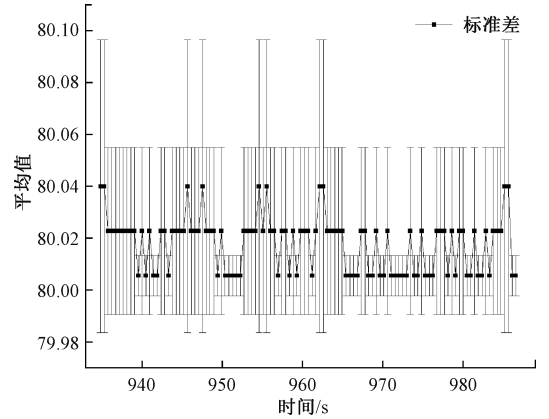


图 7 实际温度与设定温度在 930~985 s 区间的误差棒

Fig. 7 The error bars representing the difference between the actual temperature and the set temperature within the range of 930~985 s

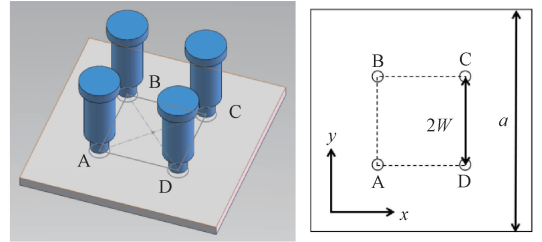


图 8 带有探针位置校正因子的 VDP 四探针测量

Fig. 8 The VDP four-probe measurement with probe position correction factor

用于 A_{vdp} 在 $1 \sim 10^4$ 范围, 当 A_{vdp} 超过 10^4 时, 由于误差会迅速变得非常大, 因此不应使用该参数。CF 是探针位置校正因子, 用于考虑接触探针未放置在样品角落的情况, 如表 3 所示, CF 各个参数值取决于 w/a 的值。薄膜方块电阻 R_s 的计算公式为:

$$R_s = \left(\frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{R_{xx} + R_{yy}}{2} \times f(A_{\text{vdp}}) \right) \times CF \left(\frac{w}{a} \right) \quad (11)$$

$$f(A_{\text{vdp}}) = A_0 + \frac{A_1}{1 + (\lg A_{\text{vdp}}/x_1)^{p_1}} + \frac{A_2}{1 + (\lg A_{\text{vdp}}/x_2)^{p_2}} \quad (12)$$

$$CF = B_0 + B_1 \left(\frac{w}{a} \right) + B_2 \left(\frac{w}{a} \right)^2 + B_3 \left(\frac{w}{a} \right)^3 + B_4 \left(\frac{w}{a} \right)^4 + B_5 \left(\frac{w}{a} \right)^5 + B_6 \left(\frac{w}{a} \right)^6 + B_7 \left(\frac{w}{a} \right)^7 + B_8 \left(\frac{w}{a} \right)^8 + B_9 \left(\frac{w}{a} \right)^9 \quad (13)$$

2.2 恒流源电路设计

恒流源电路^[19]在照明、充电、传感器、化学电镀、焊接、实验室分析及医疗研发等众多领域均有广泛应用, 其核心价值在于保证输出的电流值恒定, 从而提升系统可靠性与

表 2 函数 $f(A_{\text{vdp}})$ 中各个参数值

Table 2 The values of each parameter in the function $f(A_{\text{vdp}})$	
函数 $f(A_{\text{vdp}})$	参数值
A_0	0.035 44
A_1	0.840 57
A_2	0.124 00
x_1	1.364 59
x_2	4.497 93
P_1	2.001 43
P_2	1.859 37

表 3 不同 w/a 范围内的校正系数 CF 中各个参数值

Table 3 The values of each parameter in the correction factor CF within different w/a ranges

参数	$w/a \leq 0.25$	$w/a \geq 0.25$
B_0	2.000 00	2.075 59
B_1	-0.001 52	0.138 71
B_2	-39.501 69	-73.517 38
B_3	-6.781 79	463.773 09
B_4	1 165.689 10	-1 451.695 75
B_5	-152.095 44	2 852.299 17
B_6	-43 376.918 99	-3 815.659 52
B_7	227 826.250 62	3 467.706 09
B_8	-500 281.349 89	-1 949.672 13
B_9	424 033.039 93	513.807 66

从而显著提高系统的可靠性及实验结果的可重复性。

整个串联负反馈式恒流源电路^[20]是由供电电压模块(V_1 、 V_2)、调节晶体管 M_1 、前级比较放大和后级反馈放大的两级运算放大器(U_3 、 U_1)、负载电阻 B_1 和采样电阻 R_4 构成,基本电路如图 9 所示。根据基尔霍夫定律以及运算放大器的“虚短”和“虚断”原理,可得出如下公式:

$$I_{B1} = \frac{V_1}{R_4}$$

(14)

对于恒流源电路而言,经过负载的电流 I_{B1} 的稳定时间、超调量及稳态误差是评价其性能的关键指标。为验证该恒流源在 VO_2 薄膜阻值跨越多个数量级变化条件下的电流稳定性,本文在 LTspice 软件中进行了动态负载仿真。具体方法为:通过周期性正弦变化来迅速调节可变负载 B_1 的阻值,在 $0 \sim 0.5 \text{ s}$ 内将阻值由 $12.5 \text{ M}\Omega$ 平滑降低至 $100 \text{ }\Omega$,再在 $0.5 \sim 1 \text{ s}$ 内由 $100 \text{ }\Omega$ 平滑回升至 $12.5 \text{ M}\Omega$,其变化规律如式(15)所示。

$$R(B_1) = \frac{12\,500\text{ k} + 100}{2} + \frac{12\,500\text{ k} - 100}{2} \times \cos(2\pi \times \text{time}/1)$$

(15)

仿真结果如图 10 所示。在阻值下降阶段($0 \sim 0.5 \text{ s}$),

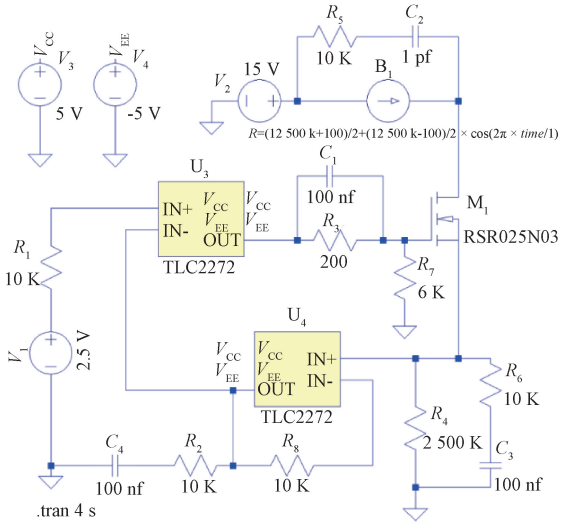


图 9 串联负反馈恒流源电路

Fig. 9 Series negative feedback constant current source circuit

电流初始时因负载突变产生轻微超调,随后逐渐减小并趋于稳定;在阻值上升阶段($0.5 \sim 1 \text{ s}$),电流初始时有所降低,随后逐渐回升并稳定。整个周期内,流经负载电阻 B_1 的电流始终维持在 $1 \text{ }\mu\text{A}$ 附近,最大相对偏差不超过 $\pm 1\%$ 。仿真结果表明,该恒流源电路在负载阻值迅速变化下仍能快速恢复和稳定输出,展现出优异的动态响应特性与稳定性^[21]。

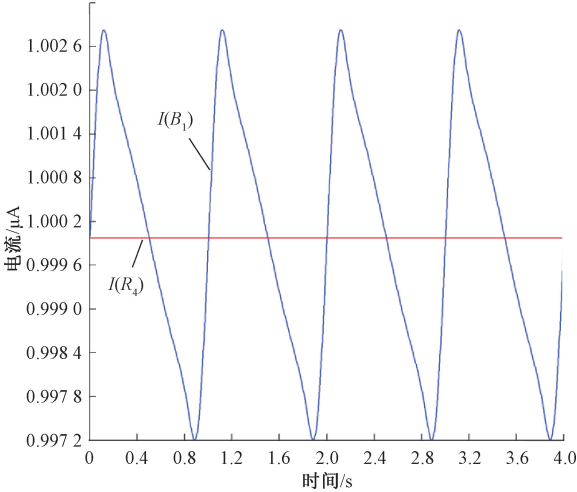


图 10 采样电阻 R_4 和负载电阻 B_1 在周期性电阻变化期间中流过的电流值

Fig. 10 The current values flowing through the sampling resistor R_4 and the load resistor B_1 during the periodic resistance variation period

2.3 数字电压表设计

本文中采用 24 位高精度模数转换芯片 ADS1256 作为数字电压表的 A/D 转换核心^[22],并设计由 AD8629 高精度运算放大器构成的电压跟随器,通过 SPI 总线精确采集

输入电压信号,采集到的原始数据首先传输至 STM32 单片机进行实时处理,随后通过串口发送至上位机,同时在 OLED 显示屏上实时刷新显示测量电压值。

由 ADS1256 测量到的电压值可通过式(16)计算获得,其中, D 是十进制编码是软件处理后的中间值, V_{REF} 是 2.5 V 的参考电压,可编程增益放大器 (programmable gain amplifier, PGA) 是增益倍数。

$$V_{DAC} = \frac{2V_{REF} \times D}{PGA \times (2^{23} - 1)}$$

(16)

如表 4 所示,不同 PGA 设置对应不同的满量程输入电压范围。为充分发挥 ADS1256 内置低噪声 PGA 的性能,以准确测量 VO₂ 样品在变温过程中的电压信号,在单片机中实现了 PGA 设置的自动切换功能:初始状态下 PGA 设置为 1,当在低增益模式 (PGA=1) 下,若检测到电压绝对值低于 20 mV,则将 PGA 切换至 64;当在高增益模式 (PGA=64) 下,若检测到电压绝对值高于 60 mV,则 PGA 切换至 1。引入迟滞区间可有效避免了在临界电压附近增益频繁切换所导致的系统振荡,从而提高了测量电压的稳定性与准确性。

表 4 不同 PGA 设置的满量程输入电压

Table 4 The full-scale input voltage for different PGA settings

PGA 设置	满量程输入电压 VIN (参考电压 $V_{REF}=2.5\text{ V}$)
1	±5.000 V
2	±2.500 V
4	±1.250 V
8	±0.625 V
16	±312.500 mV
32	±156.250 mV
64	±78.125 mV

以 6 位半的台式源表(联讯仪器 S3012H)输出电压值作为对比,随机选取 3 段时间记录下来数字电压表连续 10 次测量到的电压值并取平均值,如表 5 所示,数字电压表测量 0.1 mV 以上的电压时误差小、精度较高。

表 5 电压测量精度比较

Table 5 Comparison of voltage measurement accuracy

S3012H/V	测量电压平均值/V			最大 误差/mV
	M1	M2	M3	
4.000 100	4.000 100	4.000 100	4.000 200	0.100
0.100 100	0.100 100	0.100 000	0.099 900	0.200
0.010 010	0.010 020	0.010 010	0.010 000	0.010
0.001 010	0.001 010	0.001 020	0.001 010	0.010
0.000 108	0.000 109	0.000 108	0.000 107	0.001

3 实验分析

本文采用化学气相沉积法 (chemical vapor deposition method, CVD), 在 1 cm × 1 cm 的蓝宝石衬底上制备了 VO₂ 薄膜。为获得两个具有不同阻值的 VO₂ 薄膜, 调控了沉积过程中的衬底温度与氧气流量这两个关键参数, 并对样品进行了不同时间的退火处理。

实验采用如图 11 所示的电路板, 由温度测量、电压检测和恒流源等模块集成的控温四探针系统进行电学表征。为了使用该系统测量了 VO₂ 薄膜的方块电阻随温度的变化关系, 以两种不同峰值温度 (85℃ 与 80℃) 的线性温度程序, 测试了 VO₂ 薄膜的方块电阻随温度的变化关系。每个程序的升温 and 降温周期均设置为 60 min。

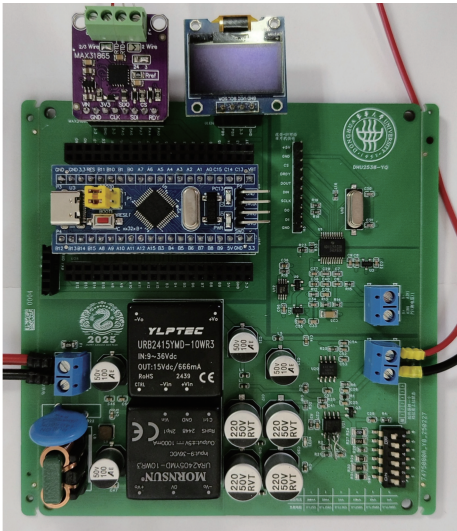


图 11 温度测量、电压检测和恒流源模块

Fig. 11 Temperature measurement, voltage detection, and constant current source modules

如图 12 和 13 所示,测量结果中两种 VO₂ 薄膜的方块

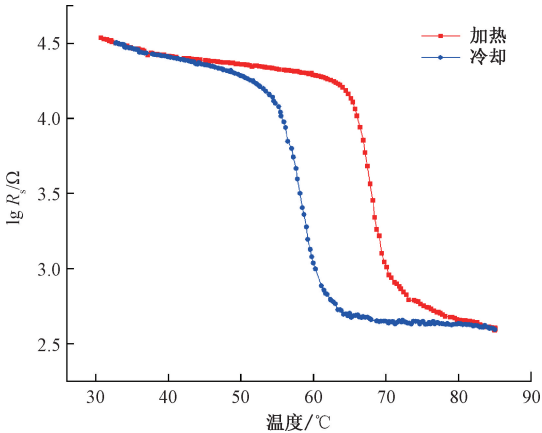


图 12 VO₂ 薄膜在加热与冷却过程中(最高 85℃)表现出 MIT 特性

Fig. 12 VO₂ thin film exhibits MIT characteristics during heating and cooling (up to 85℃)

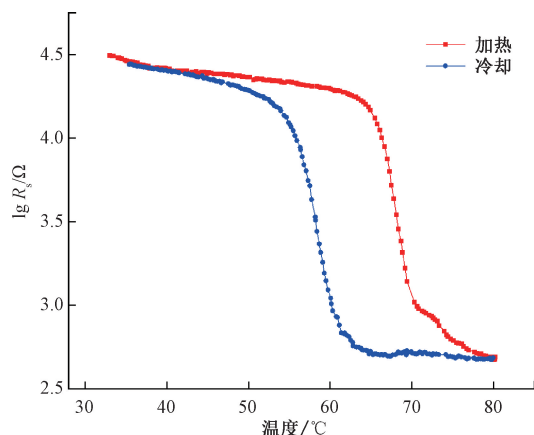


图 13 VO_2 薄膜在加热与冷却过程中(最高 80°C)表现出 MIT 特性

Fig. 13 VO_2 thin film exhibits MIT characteristics during heating and cooling (up to 80°C)

电阻均在约 68°C 处发生了约两个数量级的显著突变,这标志着它们在此温度附近均发生了 MIT 特性。上述结果的顺利获取,充分证明了该控温四探针系统具有良好的测量稳定性与可靠性。

4 结 论

本研究设计一种低成本、高精度且可编程的控温四探针测量系统。该系统在温度控制子系统中引入 BO 算法,有效完成了模糊控制器超参数的自动寻优,实现了控温精度与快速部署的统一。在四探针测量子系统中,所设计的恒流源表现出优良的稳定性,即便在跨越数个数量级的兆欧级样品中仍能保持一致性能,并结合高分辨率数字电压表保证了电压测量的准确性。

整体系统在成本与性能之间取得了良好平衡,克服了传统仪器在温度控制集成、测量范围及动态响应方面的不足。与现有商业设备相比,该系统显著降低了成本,为 VO_2 及其他薄膜材料的电阻测量提供了一种经济、可行且具有推广价值的解决方案。

参考文献

- [1] BISCHL B, BINDER M, LANG M, et al. Hyperparameter optimization: Foundations, algorithms, best practices, and open challenges[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 2023, 13(2): 1484.
- [2] 陈熙源,周云川,钟雨露,等. 基于变分贝叶斯的鲁棒自适应因子图优化组合导航算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 120-129.
CHEN X Y, ZHOU Y CH, ZHONG Y L, et al. Robust adaptive factor graph optimization integrated navigation algorithm based on variational Bayesian[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1):

- 120-129.
- [3] LI F B, YANG L H, YE A O, et al. Grouping neural network-based smith PID temperature controller for multi-channel interaction system [J]. Electronics, 2024, 13(4): 697.
- [4] 张家刘,李正权. 基于改进鲸鱼算法优化模糊控制的开关电源[J]. 电子测量技术, 2024, 47(1): 87-92.
ZHANG J L, LI ZH Q. Optimization of fuzzy control for switching power supply based on improved whale algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(1): 87-92.
- [5] 杨洪涛,金磊,姜西祥,等. 基于 DBO 优化模糊 PID 的高低温试验箱温度控制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(10): 235-243.
YANG H T, JIN L, JIANG X X, et al. Temperature control method for high and low temperature test chamber based on DBO optimized fuzzy PID [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 235-243.
- [6] 刘运忠,姜宏,章翔峰. 基于 PSO 优化的模糊 PID 恒力控制研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(9): 16-22.
LIU Y ZH, JIANG H, ZHANG X F. Research on fuzzy PID constant force control based on PSO optimization [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(9): 16-22.
- [7] WANG X L, JIN Y CH, SCHMITT S, et al. Recent advances in Bayesian optimization [J]. ACM Computing Surveys, 2023, 55 (13s), DOI: 10.1145/3582078.
- [8] 杨思远,刘梦,李铁,等. 一种简单的控制二氧化钒 M 相热滞回线宽度的方法研究[J]. 功能材料与器件学报, 2022, 28(6): 518-523.
YANG S Y, LIU M, LI T, et al. Research on a simple method for controlling the width of the thermal hysteresis loop of vanadium dioxide M phase [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2022, 28(6): 518-523.
- [9] ZHANG S Y, WU B H, WANG CH R, et al. Thermalevidences for multi-domain coexistence of freestanding VO_2 crystalline microbeams with insulator-insulator transitions [J]. Applied Physics Letters, 2025, 126(12): 121904.
- [10] SIRJITA E N, BOULLE A, ORLIANGES J C, et al. Structural and electrical properties of high-performance vanadium dioxide thin layers obtained by reactive magnetron sputtering[J]. Thin Solid Films, 2022, 759: 139461.
- [11] LIU L, XUE D Y, ZHANG SH. General type

- industrial temperature system control based on fuzzy fractional-order PID controller [J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2023, 9:2585-2597.
- [12] JIA Y R, ZHANG R L, LYU X, et al. Research on temperature control of fuel-cell cooling system based on variable domain fuzzy PID[J]. *Processes*, 2022, 10(3): 534.
- [13] 芮焘,段国勇,王彦海,等. 残差全连接神经网络在输电塔基边坡风险评价中的应用[J]. *国外电子测量技术*, 2024,43(11):160-169.
- RUI T, DUAN G Y, WANG Y H, et al. Application of residual fully connected neural network in risk assessment of transmission tower foundation slope[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2024, 43(11):160-169.
- [14] WATANABE S. Tree-structured parzen estimator: Understanding its algorithm components and their roles for better empirical performance [J]. *ArXiv preprint arXiv:2304.11127*, 2023.
- [15] 陈泉霖,陈奕宇,霍静,等. 高维贝叶斯优化研究综述[J]. *软件学报*, 2025,36(6):2576-2603.
- CHEN Q L, CHEN Y Y, HUO J, et al. Review on high-dimensional Bayesian optimization[J]. *Journal of Software*, 2025, 36(6): 2576-2603.
- [16] LAI Y CH. Application and effectiveness evaluation of Bayesian optimization algorithm in hyperparameter tuning of machine learning models [C]. 2024 International Conference on Power, Electrical Engineering, Electronics and Control (PEEEEC). IEEE, 2024:351-355.
- [17] SNOEK J, LAROCHELLE H, ADAMS R P. Practical bayesian optimization of machine learning algorithms [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2012,2:2951-2959.
- [18] HURAND S, THIBAUT C, RENAULT P O, et al. Easy and computer-time-saving implementation of the vander Pauw method including anisotropy and probe positioning correction factors using approximate closed-form analytical functions [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(5):053907.
- [19] 陈启标,高云鹏,杨唐胜,等. 浮选液位测量用高精度差分恒流源设计与优化[J]. *仪器仪表学报*, 2024,45(8): 154-164.
- CHEN Q B, GAO Y P, YANG T SH, et al. Design and optimization of high-precision differential constant current source for flotation liquid level measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(8):154-164.
- [20] ZHAO Y T, TIAN Z G, FENG X Y, et al. High-precision semiconductor laser current drive and temperature control system design[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9989.
- [21] NASSAR O, MEISSNER M V, WADHWA S, et al. Load sensitive stable current source for complex precision pulsed electroplating[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 104704.
- [22] 徐志安,李鹏,冯姣,等. 高精度旋转遮挡式太阳辐射监测仪设计[J]. *电子测量技术*, 2024,47(20):150-158.
- XU ZH AN, LI P, FENG J, et al. Design of a high-precision rotating occluding-type solar radiation monitoring instrument [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(20): 150-158.

作者简介

袁强,硕士研究生,主要研究方向为集成电路。

E-mail:2239028063@qq.com

伍滨和(通信作者),博士,研究员,主要研究方向为微纳光电材料与器件。

E-mail:bhwu@dhu.edu.cn