

基于阈值反馈控制技术的高能激光恒温源系统设计

李志玲¹ 李志先² 秦俐铭³ 王 高⁴ 梁海坚⁴

LI Zhiling LI Zhixian QIN Liming WANG Gao LIANG Haijian

摘 要

针对微小体积被测物体对快速升温与精确控温的双重需求,文章设计了一种基于激光反馈控制技术的恒温加热系统。系统核心在于激光器控制电路的设计,通过模拟电压控制回路将激光输出功率线性映射为0~10 V控制电压,实现加热功率的连续可调。同时,采用高速红外辐射温度计作为非接触式反馈元件,其探测温度经标准黑体炉标定后与0~10 V模拟输出电压呈线性关系。控制单元将激光器的控制电压与辐射温度计的输出电压直接进行阈值比较与反馈调节,无需额外模数转换或数字算法干预,实现了控制量与反馈量在模拟域的快速闭环。实验采用钨铼丝状热电偶对控温效果进行验证,结果表明,该系统能够在毫秒级时间内将被测物体快速升温至目标温度,并迅速锁定于稳态,呈现出理想的阶跃响应特性,无超调、无振荡。该设计以其简洁的模拟反馈架构、快速的响应能力以及优异的控温精度,在微区加热、材料热处理、半导体工艺及生物医学检测等领域具有重要的应用价值。

关键词

激光加热;模拟反馈控制;红外测温;恒温控制;阶跃响应;微小体积加热

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.06.039

0 引言

随着航空航天、高能束加工、先进材料制备及国防装备等领域的快速发展,对瞬态高温控制技术的需求日益迫切。在金属表面淬火、陶瓷材料烧结、热障涂层测试、高超声速飞行器热防护材料考核等应用场景中,往往需要在毫秒甚至微秒时间尺度内将被测物体加热至数千摄氏度,并精确锁定于目标温度,以实现材料热物理性能、热冲击耐受能力及热响应特性的精确评估。此类瞬态高温过程对加热系统的功率密度、响应速度及控温精度提出了极为苛刻的要求^[1-3]。

高功率激光加热技术以其功率密度高(可达 10^6 W/cm²量级)、热惯性小、非接触式加热及空间选择性好等优势,成为实现瞬态高温控制的理想手段。以6 000 W级高功率激光器为例,其输出能量可在极短时间内集中作用于微小区域,实现快速升温至数千摄氏度的目标。然而,高功率激光加热系统的温度控制面临两大核心挑战:一是高功率密度下温度

变化速率极快,被加热对象的热响应时间往往在毫秒量级,要求反馈控制系统具备极高的响应带宽,能够在极短时间内完成温度采样、误差计算及功率调节;二是激光加热过程呈现强非线性、强时变特性,材料吸收率随温度变化、热辐射损失随温度四次方增加等因素,使得传统控制方案难以在瞬态高温场景下同时实现快速升温与无超调稳态锁定^[4-5]。

现有瞬态高温控制方案多采用数字PID控制或模型预测控制,通过模数转换器采集温度信号,经数字控制器运算后输出控制量调节激光功率。尽管数字控制具有一定的算法灵活性,但其固有的采样周期、量化误差及计算延迟(通常为毫秒至数十毫秒级),在面向微秒至毫秒级瞬态过程时,往往成为控制性能提升的瓶颈。特别是在高功率激光加热系统中,控制延迟可能导致温度超调失控甚至被测物体烧毁,严重制约了系统在极端热环境下的应用可靠性^[6]。

针对上述问题,本文提出一种基于激光反馈控制技术的瞬态高温恒温系统。本系统以6 000 W高功率激光器为加热源,重点在于激光器控制电路的模拟电压控制回路设计——通过模拟域将激光输出功率线性映射为0~10 V控制电压,实现加热功率的连续可调与高动态响应。同时,采用高速红外辐射温度计作为非接触式反馈元件,经标准黑体炉标定后,其探测温度与0~10 V模拟输出电压呈良好线性关系。控制单元将激光器控制电压与辐射温度计输出电压直接进行阈值比较与反馈调节,无需模数转换、无需数字采样、无需算法迭

1. 太原学院智能与信息工程系 山西太原 030032

2. 国家电网长治供电公司 山西长治 046200

3. 晋西工业集团有限责任公司 山西太原 030027

4. 中北大学极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室 山西太原 030051

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金项目(62403440);太原学院引进人才科研启动项目(25TYKY115);太原学院青年项目(25TYQN10)

代,实现了控制量与反馈量在模拟域的直接比较与瞬时闭环。该架构从根本上消除了数字控制引入的采样延迟、量化误差与算法收敛时间,使闭环响应速度仅受限于模拟电路自身的传播延迟(纳秒至微秒级),为实现瞬态高温场景下的理想阶跃升温过程提供了物理基础。

为验证系统控温效果,本文采用钨铼丝状热电偶对升温与稳态过程进行实验测试。结果表明,该系统能够在毫秒级时间内将被测物体快速升温至目标温度并锁定于稳态,呈现理想的阶跃响应特性,无超调、无振荡。该设计以其模拟域直接反馈架构、超高速响应能力及优异的瞬态控温精度,在金属表面瞬态热处理、材料热物性测试、高能束加工温度控制、热防护材料考核等领域具有重要的应用价值。

1 激光恒温源设计理论分析

1.1 阶跃激光与阶跃温度热载荷方式理论对比

从热边界条件角度分析,阶跃温度加热与阶跃激光加热有着本质不同。前者属于第一类边界条件(Dirichlet边界),直接控制表面温度在 $t=0^+$ 时刻瞬间跃升至设定值并维持恒定,表面热流密度则作为响应量自动调整。后者属于第二类边界条件(Neumann边界),控制的是表面吸收的热流密度呈阶跃变化,表面温度并非直接控制量,而是由材料热扩散特性决定的响应量^[7-8]。两者的传热机理如图1所示。

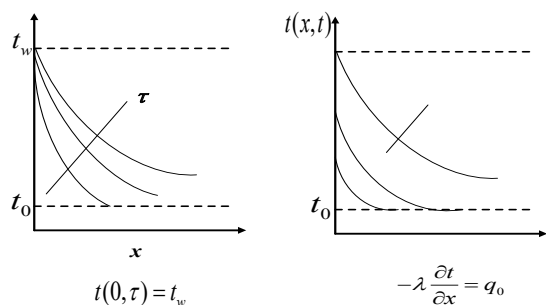


图1 第一类和第二类边界传热趋势

因此,直接采用阶跃激光作为恒温系统的热源存在热边界理论缺陷,不易在短时间内达到理想节约热平衡状态,需要额外的激光功率反馈控制模块才能使被加热对象较快实现阶跃稳态。

1.2 阶跃升温速率影响因素理论分析

对于半无限体,阶跃热流(激光功率)作用下表面温度随时间按 $T_s \propto \sqrt{t}$ 规律上升(一维无相变),无法自发达到恒定。具体到阶跃功率激光加热热电偶的场景,通常认为,热电偶测温结点内部的热阻远小于其表面与外部环境之间的换热热阻,因此结点内部温度分布均匀。据此,可将结点的质量和热容量等效集中到一点,满足集总参数模型的适用条件^[9]。当激光辐照该结点时,其温度变化过程涉及多种传热形式,

包括激光束对结点的辐射加热 W 、结点与周围空气之间的自然对流换热 W_1 、结点向外界环境的辐射散热 W_2 ,以及结点沿偶丝方向的热传导 W_3 ,如图2所示。

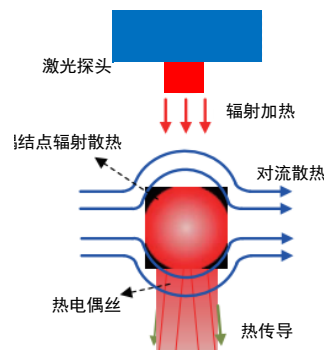


图2 热电偶激光辐射加热下换热过程

热电偶偶结点瞬态换热关系用公式表示为:

$$mC \frac{\partial T}{\partial t} = W - W_1 - W_2 - W_3 \quad (1)$$

$$W = 2\alpha \frac{P}{\pi \omega^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega^2}\right) \quad (2)$$

式中: α 为热电偶热端结点的吸收率, P 为激光辐射热功率, r 为激光光束中任意点与圆形光斑中心的距离, ω 为激光光斑半径。

$$W_1 = hA(T - T_{\text{air}}) \quad (3)$$

式中: h 为自然对流换热系数, T 为热端偶结点温度, A 为热端偶结点表面积, T_{air} 为自然环境下的周围气体环境温度^[10]。

$$W_2 = \sigma \varepsilon A (T^4 - T_{\text{env}}^4) \quad (4)$$

式中: σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, ε 为偶极发射率, T_{env} 为周围环境物体温度。

$$W_3 = kA \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

式中: k 为热电偶偶丝的热导率。

由式(1)~(5)可得:对于体积微小的偶结点,激光辐射热功率 P 越高,热端偶结点的温升速率 $\partial T / \partial t$ 越快,被加热对象的阶跃升温响应越理想,越接近阶梯升温状态。所以在设计激光恒温源系统时,激光功率要尽可能高。

根据此前理论分析基础,初步发现若期望激光加热实现近似阶跃温度的效果(如材料热物性测试或精密热毁伤标定),必须引入快速反馈控制:实时监测表面温度,动态调节激光功率以补偿热扩散引起的温升/温降。否则,恒定功率的激光加热将导致表面温度持续漂移,与阶跃温度边界条件产生本质偏差,直接影响毁伤模型的边界匹配性与结果可比性。此外,大功率高能激光能使加热温升速率提升,阶跃稳态效果更佳。因此,快速反馈控制是实现高能激光“拟温度阶跃”加热的必要技术手段。

2 系统总体设计与搭建

根据上述理论分析,在基于反馈控制的高能激光恒温源系统设计中,关键环节在于引入反馈机制,目的是减小被加热目标响应曲线的上升时间(或时间常数),并使其在短时间内达到稳态输出(热交换平衡)。系统的整体设计思路如图3所示。

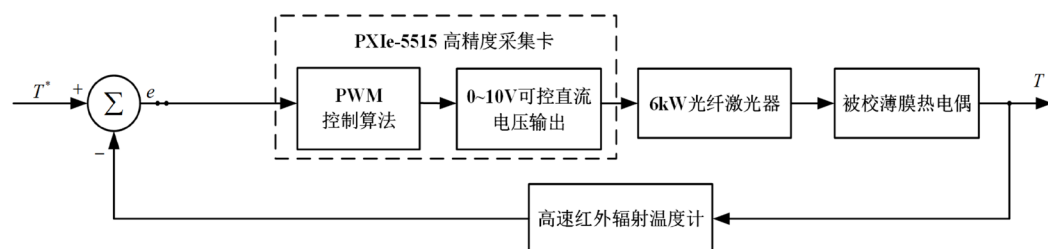


图3 基于阈值反馈控制技术的激光恒温源系统设计

采用 6 000 W 高能光纤输出半导体激光器对热电偶温度传感器施加瞬态的阶跃温度激励时,受诸多环境因素以及热电偶热交换过程的影响,若激光输出功率恒定,热电偶温度传感器的输出则很难在短时间内达到热交换平衡。因为加热功率一般大于偶结点的散热功率,随着加热时间的延长,热电偶结点表面的温度会逐渐增加。此类阶跃激光开环(不含反馈)加热热电偶的实验现场及温升曲线如图4所示。

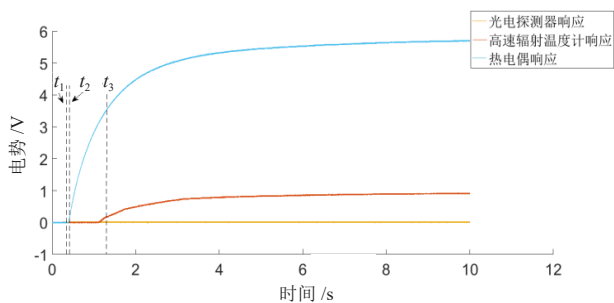


图4 热电偶激光开环阶跃响应

由实验响应曲线可知,热电偶的响应呈现明显的缓慢上升趋势,从 t_1 开始电势逐渐爬升,直至 t_3 时刻仍未达到与辐射温度计相同的稳态水平。这是因为在恒定激光功率加热下,热结点的吸热功率大于其自然散热功率,随着加热时间延长,结点温度持续积累性升高,无法在短时间内建立热平衡。此外,热结点及偶丝内部的热传导延迟、热电偶自身热容以及结点与引线间的热损失等因素进一步拖慢了输出。结合第一章的理论分析,进一步说明:在开环阶跃激光激励下,热电偶难以实现理想的快速阶跃响应,其温升过程是渐进的,实际应用中需结合反馈控制或脉冲加热策略以改善动态特性。

图5所示为该系统的结构。以 6 kW 光纤激光器的电源作为控制对象,其输出激光功率可通过 0~10 V 的直流电压

信号线性调节。控制目标是使热电偶受热面的实际温度与设定值之间的偏差维持在允许范围内。高速红外辐射温度计作为反馈通道中的测量元件,实时检测热电偶的表面温度,并将该温度信号回传至系统输入端,与设定温度进行比较。控制器采用 PXIe-5515 型高精度数据采集卡,依据预设程序运行:首先采集反馈回路中红外辐射温度计输出的温度数据,

然后与设定值求差,将偏差送入 PWM 控制算法计算得到控制量,最后根据该控制量输出对应的 0~10 V 直流电压信号至光纤激光器,从而调节激光器的输出能量,实现恒温闭环控制。



图5 高能激光恒温源系统搭建图

3 核心模块设计与实现

高速红外辐射温度计作为整个反馈系统的温度探测装置,需要将其输出的电压信号(与探测温度呈线性关系)作为反馈信号输入到控制器(PXIe-5515 高精度数据采集卡)中。因此,必须了解该仪器的输入(温度)、输出(电压)关系,确保当温度连续变化时,其电压输出的变化是连续的,而且两者必须有良好的线性关系。综上,需要进行高速红外辐射温度计的输入温度—输出反馈电压校准实验,以明确其输入、输出的线性程度,连续性及拟合校准式。

实验选用美国电子光学工业公司生产的 LS3000-100 型黑体辐射源作为标准温度源,选用 DAQ6510 型多回路数显表作为电压采集设备。将辐射温度计的光学探头放置在距黑体源视窗 30 mm 处,设定黑体源温度从 1 000~1 800 $^{\circ}\text{C}$,每间隔 50 $^{\circ}\text{C}$ 记录一次辐射温度计的温度显示值和电压输出值。

实验现场如图 6 所示。

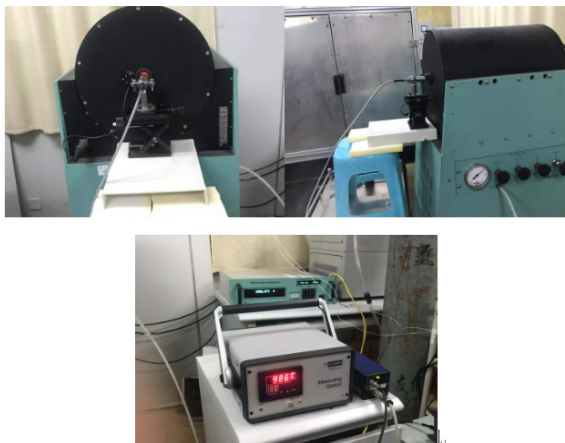


图 6 高速红外辐射温度计黑体源校准实验现场

如图 7 所示的校准曲线表明，在标准黑体源温度由低到高逐次设定的整个过程中，高速红外辐射温度计输出的模拟电压信号与黑体温度设定值之间呈现出良好的线性关系。具体而言，随着黑体温度的等间隔升高，辐射温度计的输出电压近似等比例增加，二者之间的线性相关系数接近 1，说明该辐射温度计在实验所覆盖的温度范围内具有优异的线性响应特性。这一特性对于后续基于电压反馈进行温度反算至关重要，因为线性关系可大幅简化标定与计算过程，并降低非线性误差对控制精度的影响。同时，辐射温度计自身显示的温度曲线与黑体源的实际设定值曲线几乎完全重合，表明其内部集成的温度补偿算法有效校正了传感器可能存在的非线性偏差及环境干扰，使得仪器的温度示值具有较高的准确性和可靠性。

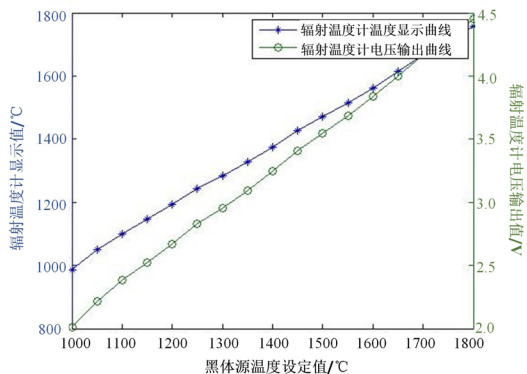


图 7 高速红外辐射温度计摄入温度 / 输出电压校准曲线

图 8 为高速红外辐射温度计线性拟合曲线，辐射温度计的温度输入和电压输出有非常好的线性关系，可拟合为：

$$Y = 0.003\ 163\ 2x - 1.105\ 7 \quad (6)$$

残差模为 0.008 867 4，由此可见，样本数据的拟合结果误差很小，线性度很高。该设备可以作为反馈控制系统的温度探测装置。

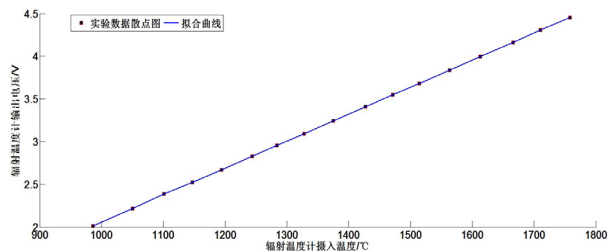


图 8 高速红外辐射温度计线性拟合曲线

4 高能激光恒温源系统功能验证实验

实验中设置激光器的输出功率为 2 315 W，辐射温度计反馈环节的介入阈值电压（与平衡温度成正比）分别为 2.2 V、2.5 V、2.8 V、3.5 V。采样频率为 1 000 Hz，则钨铼热电偶的阶跃动态响应曲线分别如图 9~12 所示。

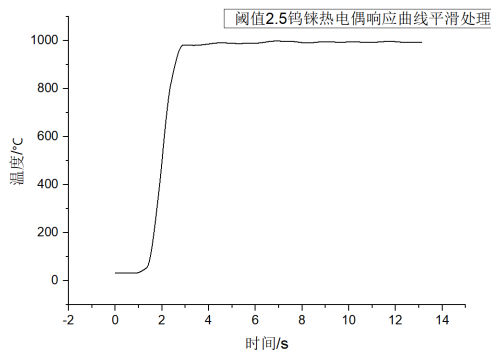


图 9 钨铼热电偶阶跃响应（阈值 2.2 V）

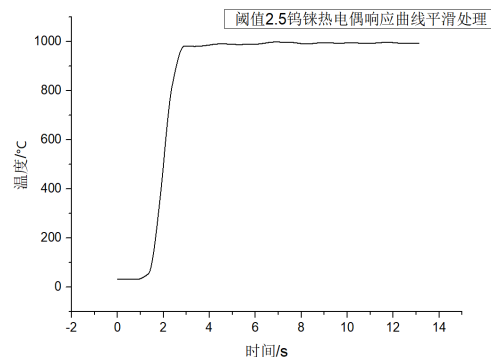


图 10 钨铼热电偶阶跃响应（阈值 2.5 V）

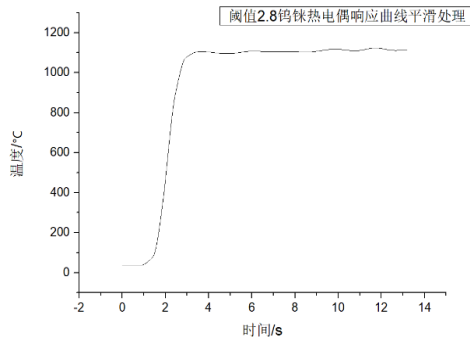


图 11 钨铼热电偶阶跃响应（阈值 2.8 V）

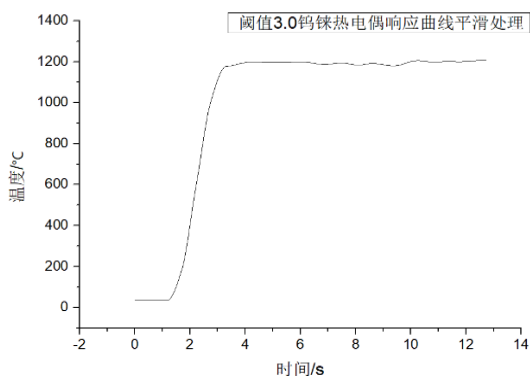


图 12 钨铼热电偶阶跃响应 (阈值 3.0 V)

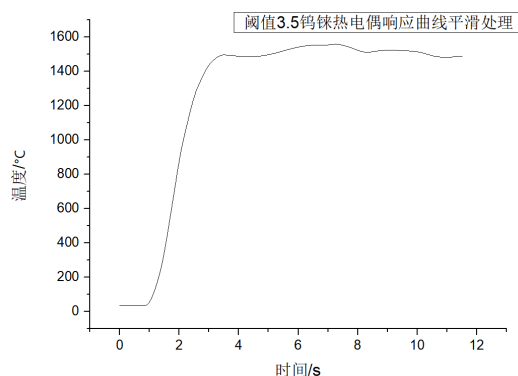


图 13 钨铼热电偶阶跃响应 (阈值 3.5 V)

对比图 5 所示的开环不加反馈热电偶阶跃响应曲线, 结合以上 5 次对比实验可知, 所设计的基于阈值反馈控制技术的高能激光恒温源系统可以使微小被加热物在更短时间内达到较为理想的阶跃稳态。并且随着阈值电压(温度)的逐次调高, 热电偶的平衡温度也如预期般增大, 最终可以较为快速地稳定在 1 500 °C 高温处, 如图 13 所示。但从实验曲线也发现处于较高阈值温度时, 控制系统的性能将变差。需要进一步开发具有自适应能力, 并能够实现平滑控制的新算法。

5 结论

本研究设计并搭建了基于阈值反馈控制技术的高能激光恒温源系统。采用 6 000 W 光纤激光器作为加热源, 结合高速红外辐射温度计与 PWM 控制, 实现了对微小体积被测物体的快速升温与精确恒温控制。实验表明, 开环激光加热下热电偶升温缓慢、难以快速平衡; 引入反馈控制后, 系统能够在毫秒级时间内将目标加热至稳态, 且最高稳定温度可达 1 500 °C, 呈现出理想的阶跃响应特性。该结果为高功率激光恒温源在微区加热、材料热物性测试及热防护考核等领域提供了可行技术方案。后续将重点优化高温段控制算法, 进一步提升全温区的控温稳定性。不足之处在于处于较高阈值温度时, 控制系统的性能将变差。需要进一步开发具有自适应能力, 并能够实现平滑控制的新算法。

参考文献:

- [1] 张国庆, 滕超逸. 航空航天先进结构材料技术现状及发展趋势[J]. 航空材料学报, 2024, 44(2): 1-12.
- [2] 张镇华, 曹子文, 魏大盛, 等. 激光冲击表面微坑织构化对类金刚石碳涂层微动磨损行为的影响[J]. 中国激光, 2025, 52(4): 159-169.
- [3] 刘娟妮. 浅谈新型金属材料成型加工技术[J]. 建材与装饰, 2018(8): 200.
- [4] Zhu Lihang, Li Shuang, Liu Wenxin, et al. Real time detection of 3-nitrotyrosine using smartphone-based electrochemiluminescence[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2021, 187: 113284.
- [5] Devi N B, Satyasri B, Ramya R, et al. Nano-structured molybdenum trioxide nano-hybrid based conductive platform for breast cancer detection[J]. Journal of Environmental Nanotechnology, 2024, 13(2): 418-426.
- [6] 石宇, 夏新林, 陈学, 等. 基于高温瞬态热响应的石英窗口导热系数反演[J]. 航空动力学报, 2022, 37(4): 755-764.
- [7] 彭树霞, 许跟起. 带有时滞控制的一维热传导方程的参数化控制器设计与稳定性研究[J]. 系统科学与数学, 2019, 39(1): 1-14.
- [8] 陶维安, 穆春来. 一类具有非齐次 Neumann 边界条件的半线性热方程解的爆破现象(英文)[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2012, 49(4): 765-770.
- [9] 李志玲. 基于调制激光的热电传感器动态标定与测试技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [10] 魏绍亮, 邱孟庆, 程奉玉. 发射率对红外温度传感器测量精度的算法补偿研究[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(9): 39-41.

【作者简介】

李志玲(1995—), 男, 山西晋城人, 博士, 讲师, 研究方向: 极限环境下高温与热流密度光电测试技术。

(收稿日期: 2026-04-27 修回日期: 2026-06-05)