

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.04.09

应用于标准光电高温计的多点控温系统设计

李丹, 张学聪, 蔡静

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 为满足精密测温需求, 解决标准光电高温计测温结果易受环境温度影响的问题, 设计多点控温系统, 该系统通过多点布控的方式实现内层壳体整体控温, 应用薄膜加热片作为控温元件, 并采用自主设计的控温电路。开展试验对该系统的控温稳定性、重复性以及标准光电的测温稳定性进行了验证, 结果表明多点控温系统稳定后 2.5 h 波动 0.09 °C, 三天控温重复性 0.1 °C。室温环境下, 应用标准光电高温计测试银固定点黑体辐射源, 使用多点控温系统与不使用多点控温系统时的测温波动分别为 0.1 °C 和 0.7 °C。本文研制的标准光电高温计多点控温系统具有稳定性好、体积小、重量轻、易于控制等优点, 能够有效满足标准光电高温计的精密测温需求, 为促进国产精密测温仪器的性能提升起到推动作用。

关键词: 标准光电高温计; 精密测温; 多点控温系统; 控温电路; 国产

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)04-0063-06

Design of multi-point temperature control system applied to standard photoelectric pyrometer

LI Dan, ZHANG Xuecong, CAI Jing

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to meet the needs of precision temperature measurement and solve the problem that the temperature measurement results of standard photoelectric pyrometers are easily affected by the ambient temperature, a multi-point temperature control system is designed. The system realizes the overall temperature control of the inner shell through multi-point control. The thin-film heating sheet is used as the temperature control element, and the self-designed temperature control circuit is adopted. Tests were carried out to verify the temperature control stability and repeatability of the system and the temperature measurement stability of the standard photoelectric pyrometer. The results showed that the multi-point temperature control system fluctuated 0.09 °C in 2.5 hours after it was stable, and the temperature control repeatability for three days was 0.1 °C. At room temperature, a standard photoelectric pyrometer is used to test the silver fixed-point blackbody radiation source. The temperature fluctuations when using the multi-point temperature control system and not using the multi-point temperature control system are 0.1 °C and 0.7 °C respectively. The multi-point temperature control system of the standard photoelectric pyrometer introduced in this paper has the advantages of good stability, small volume, light weight, easy control and so on. It can effectively meet the precision temperature measurement needs of the standard photoelectric pyrometer and promote the performance improvement of domestic precision temperature measurement instruments.

Key words: standard photoelectric pyrometer; precision temperature measurement; multi-point temperature control system; temperature control circuit; made in China

收稿日期: 2022-05-30; 修回日期: 2022-07-18

引用格式: 李丹, 张学聪, 蔡静. 应用于标准光电高温计的多点控温系统设计[J]. 计测技术, 2022, 42 (4): 63-68.

Citation: LI D, ZHANG X C, CAI J. Design of multi-point temperature control system applied to standard photoelectric pyrometer[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (4): 63-68.



0 引言

标准光电高温计是集成了辐射测温、精密光学、电子控制、通信技术、计量校准等多种技术的高科技产品,其主要应用于辐射温度的量值传递和高精度温度测量领域。标准光电高温计作为辐射温度的传递标准,承担着将高温固定点、标准钨带灯等辐射温度量值传递给工作用黑体辐射源的角色^[1-3]。

由于标准光电高温计的测试结果容易受到外界环境温度变化的影响,因此国外研制的标准光电高温计对探测器或外壳进行了控温。据调研了解,德国IKE的LP5型标准光电高温计采用多点控温方式,控温温度设定为29℃;日本大华千野的标准光电高温计IR-RST 65H采用单点控温方式,控温温度设定为30℃。目前国产光电高温计控温系统研制领域存在不足:一些国产光电高温计无控温系统,导致测温结果易受环境温度影响;一些国产光电高温计虽然安装有控温系统,但是控温系统体积较大,需要占据很大空间。针对上述问题,本文开展了多点控温系统研究,分析标准光电高温计内部易受温度影响的关键器件位置,对多点控温系统的布控结构和控温电路进行优化设计,实现对标准光电高温计的高精度温度控制,并开展实验对多点控温系统的实际性能进行验证。

1 多点控温系统结构设计

标准光电高温计的关键元件包括滤光片、光电探测器、前置放大电路、视场光阑等。分析其组成元件:滤光片的中心波长易随温度变化而漂移;探测器的探测性能容易受到温度变化影响;前置放大电路测试噪声容易受到温度变化而漂移;视场光阑为金属材料,在测试高温时容易受热膨胀的影响,比如对高温共晶点进行测量时,由于高温共晶点温度较高,会对光电高温计的光阑有加热效果,导致光阑温度升高,光阑膨胀,导致信号增大。通过以上对标准光电高温计中重要组成元件的分析得出:滤光片、探测器等元件易受到温度波动影响而导致性能下降,因此应采用温控模块对仪器内部各重点部位进行控温。但是若分部位单独控温,控温元件体积较大,浪费空间,

且各控温器件的散热会相互影响,难以达到理想的控温效果,因此提出整体控温方案。标准光电高温计采用双壳体结构,将探测器、滤光片等精密元器件置于内层壳体中,并在内层壳体上布置9个独立的控温模块,对于仪器内部性能容易受到温度影响的重要元件(包括滤光片、分光片、视场光阑、光电探测器、前置放大电路)进行控温。光电高温计内部重要元件分布示意图如图1所示。

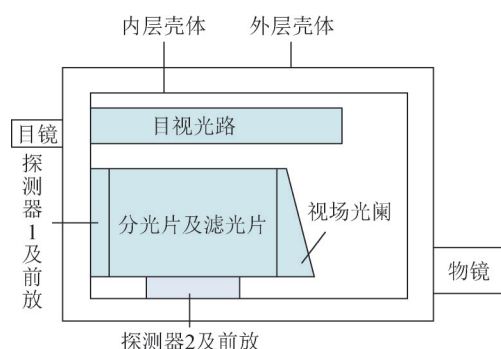


图1 仪器内部重要元件分布示意图

Fig.1 Internal distribution diagram of important instrument components

靠近重要元件部分的上面板分布3块控温模块(图2中控温模块1、控温模块2、控温模块3),底面板对应位置分布3块控温模块(图3中控温模块4、控温模块5、控温模块6),侧面靠近重要元件部分设置2块温控模块(图2中控温模块8、控温模块9),另一侧布置1块温控模块(图2中控温模块7)。9块温控模块对整机进行温度控制,从而减小外界环境温度变化对测温结果的影响。

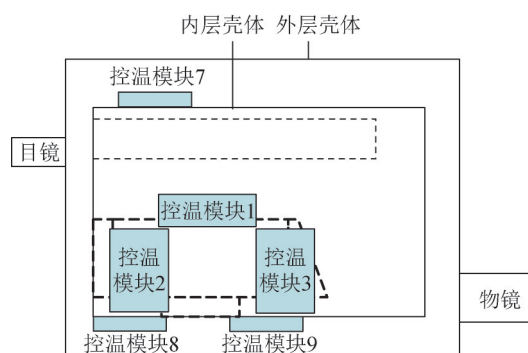


图2 温控模块分布图(顶视图)

Fig.2 Distribution diagram of temperature control module (top view)

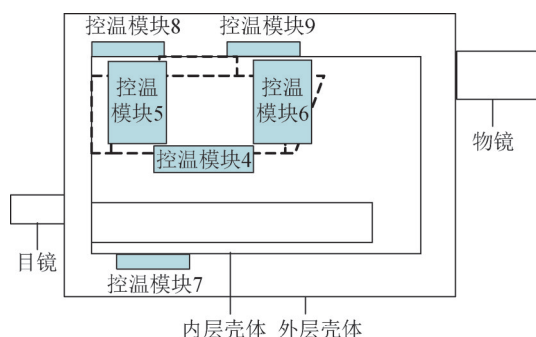


图3 温控模块分布图(底视图)

Fig.3 Distribution diagram of temperature control module (bottom view)

2 控温元件选型分析

对控温部件进行选型分析。考虑到体积小、环保、重量轻、易于控制等需求,加热部件一般采用薄膜加热片或TEC片^[4-12]。首先对薄膜加热片功率进行计算分析,被控温的铝制壳体的功率计算公式为

$$Q = cm\Delta t = \rho V\Delta t \quad (1)$$

式中: c 为铝的比热容, $0.88 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$; ρ 为铝壳的密度, 2.7 g/cm^3 ; V 为铝壳的体积, cm^3 ; Δt 为温度变化, $^\circ\text{C}$ 。

铝壳的表面积为 0.30 m^2 , 铝壳厚度为 1 cm , 计算得到铝壳体积为 0.0030 m^3 , 根据式(1)计算得到温度从 22°C 升至 30°C 时, 铝壳吸收的热量 Q 为 85536 J 。若升温时间为 1 h , 则总功率 $P = 19.8 \text{ W}$, 平均每片加热片的功率为 2.2 W 。若采用薄膜加热片作为加热部件, 考虑到留有功率余量, 选用电阻为 10Ω , 5 V 供电的薄膜加热片, 每片功率为 2.5 W 。考虑到设备小型化要求并且便于组装, 选用薄膜加热片的尺寸为 $22 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$ 。

若采用TEC作为加热部件, 根据文献^[13]中的方法计算得出每片TEC流入热沉的功率为 10 W , 因此采用薄膜加热片的功率远小于采用TEC片的功率, 并且由于TEC工作时需要组装散热片, 明显增加了控温系统的体积, 故最终选择薄膜加热片作为控温系统的加热部件。

3 温度控制电路设计

温度控制电路包括热敏电阻分压电路、可调预设电压电路、比较控制电路、加热开关、加热

元件。控温电路设计框图如图4所示。热敏电阻同分压电阻组成分压电路, 由可调预设电压电路设置参考电压, 根据热敏电阻阻值随温度变化而变化的特点, 通过比较热敏电阻分压和参考电压大小, 由比较控制电路判断控制加热开关通断, 以实现温度的精确控制。

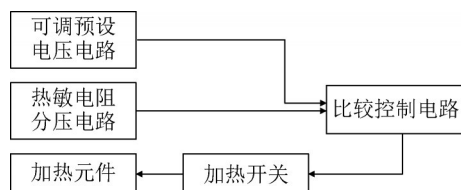


图4 控温电路设计框图

Fig.4 Block diagram of temperature control circuit design

控温电路图如图5所示, NTC负温度系数热敏电阻和固定阻值电阻 R_1 串联分压。负温度系数热敏电阻两端电压与电位器两端电压 V_{R_3} 进行比较, 若 $V_{\text{热敏电阻}} < V_{R_3}$, 说明温度高, 则输出为负, 三极管截止, 加热片不加热; 若 $V_{\text{热敏电阻}} > V_{R_3}$, 说明温度低, 则输出为正, 三极管导通, 加热片加热。其中加热片元件是发热源, 应与热敏电阻尽量靠近。电阻 R_4 (1 M) 和电容 C_1 ($22 \mu\text{F}$) 组成纯积分电路, 降低高频增益, 避免电路在加热和冷却状态之间来回震荡。两个发光二极管 D_1 和 D_2 指示运放输出电平, D_1 发光表示达到设定温度, D_2 发光表示加热功率大, 正在加温中。

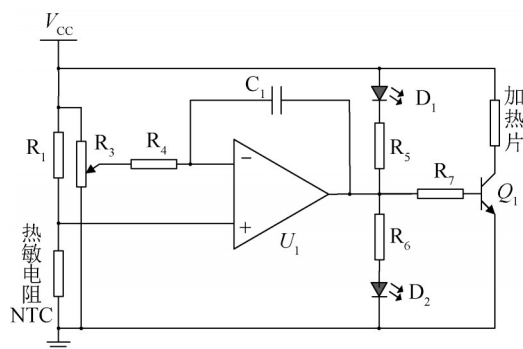


图5 控温电路图

Fig.5 Temperature control circuit diagram

NTC热敏电阻阻值与温度的关系为

$$R_t = R \times e^{[B \times (1/T_1 - 1/T_2)]} \quad (2)$$

式中: T_1 为设定温度值 (热力学温度), K ; T_2 表示常温温度 25°C 时的热力学温度值, K ; R_t 为热敏电阻在 T_1 温度下的阻值, Ω ; R 为热敏电阻在 T_2 温度

下的标称阻值, Ω ; B 为热敏电阻的材料常数(热敏指数), K 。

在本设计中, $B=3950 K$, $R=10 k\Omega$, 电源电压 $V_{cc}=5 V$, 计算得到 $T_1=30 ^\circ C$ 时, $R_t=8 k\Omega$ 。

计算NTC两端电压

$$V = \frac{V_{cc}}{R + R_t} \times R_t \quad (3)$$

根据式(3)计算得出, 设置温度为 $30 ^\circ C$ 时, 应调节电位器阻值, 使得其两端电压为 $2.22 V$ 。

控温模块实物如图6所示, 加热片置于控温电路板和铜块之间, 组装时涂抹导热硅脂使铜块与标准光电高温计壳体紧密接触。铜块正面热敏电阻作为传感器件用于控温, 背面热敏电阻用于采集标准光电高温计整机壳体温度。

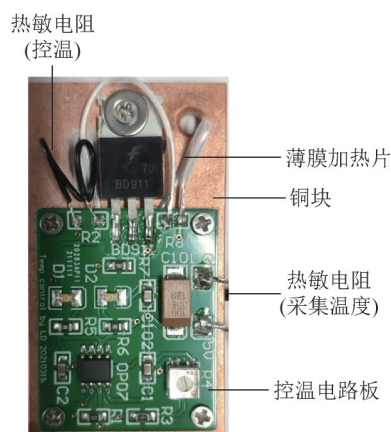


图6 控温模块实物图

Fig.6 Physical drawing of temperature control module

4 试验验证

4.1 多点控温系统控温稳定性及重复性试验

将研制的多点控温系统安装于本单位自主研发的UP系列标准光电高温计。长期观测多点控温系统的控温稳定性, 并且选取三天测试控温重复性。

开启标准光电高温计多点温控系统, 采集控温模块与壳体之间热敏电阻的电压值(结果如图7至图9所示), 并计算得到温度值。标准光电高温计壳体经过升温稳定后 $2.5 h$ 的温度波动为 $0.09 ^\circ C$, 三天的控温测试虽然起始温度不同, 但是升温至 $30 ^\circ C$ 稳定后, 温度差为 $0.1 ^\circ C$, 温度一致性、重复性好。

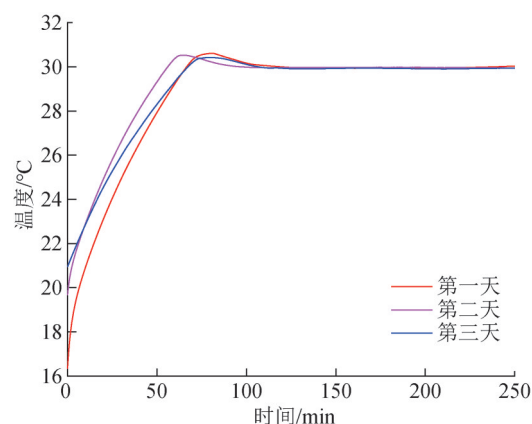
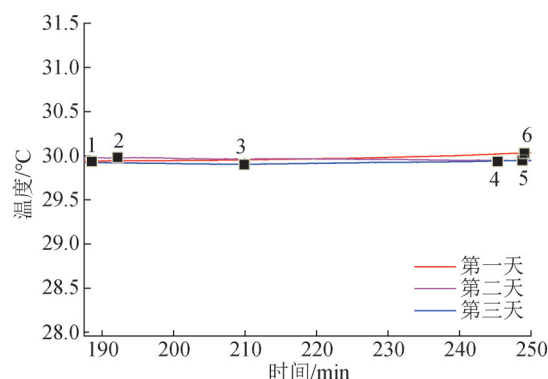


图7 多点控温系统温度长期稳定性测试

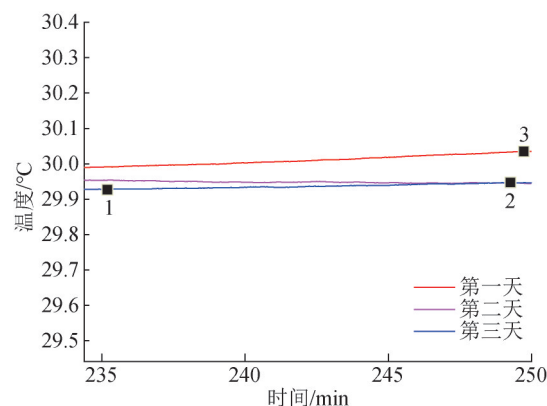
Fig.7 Long-term temperature stability test of multipoint temperature control system



注: 1为(188.7 min, 29.94 $^\circ C$); 2为(192.2 min, 29.98 $^\circ C$);
3为(209.9 min, 29.90 $^\circ C$); 4为(245.3 min, 29.94 $^\circ C$);
5为(248.8 min, 29.95 $^\circ C$); 6为(249.1 min, 30.03 $^\circ C$)

图8 多点控温系统温度长期稳定性测试(局部放大图)

Fig.8 Long-term temperature stability test of multipoint temperature control system (partial enlarged drawing)



注: 1为(235.2 min, 29.93 $^\circ C$); 2为(249.3 min, 29.95 $^\circ C$);
3为(249.7 min, 30.03 $^\circ C$)

图9 多点控温系统控温温度重复性测试(局部放大图)

Fig.9 Temperature repeatability test of multipoint temperature control system (partial enlarged drawing)

4.2 多点控温系统对改善标准光电高温计测温稳定性的作用测试

固定点黑体辐射源是用来分度标准光电高温计的标准装置，其精度、复现性、稳定性均具有较高水平^[14-16]，Chino公司的IR-R0系列Ag固定点黑体辐射源，温度理论值为961.78℃。应用Ag固定点黑体辐射源对多点控温系统开关前后标准光电高温计测温稳定性进行测试，测试系统示意图如图10所示。

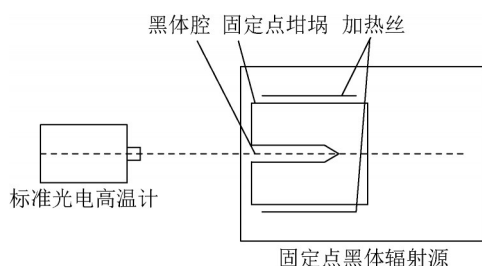


图10 测试系统示意图

Fig.10 Schematic diagram of test system

分别在使用多点温控系统和不使用多点温控系统两种模式下测试Ag固定点凝固温坪时的标准光电高温计输出温度值，测试结果如图11所示。开启多点温控系统，等待一段时间，待环境温度达到稳定后，测试温度值也基本稳定，稳定度在0.1℃以内；关闭多点温控系统，等待一段时间，待标准光电高温计内壳温度与环境温度达到平衡后，进行测试。此时标准光电高温计内温度随外界环境变化，测试的输出温度值呈下降趋势，稳定度在0.7℃左右。使用多点温控系统时的测温结果明显优于不使用多点温控系统时的测温结果。

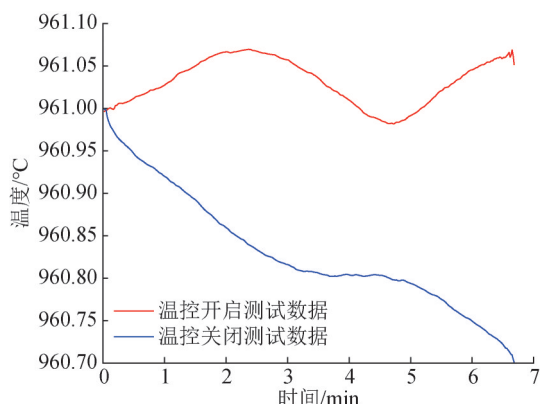


图11 标准光电高温计测温结果

Fig.11 Temperature measurement results of standard photoelectric pyrometer

5 结论

针对标准光电高温计测温结果易受环境温度影响的问题，研制了一套应用于标准光电高温计的多点温控系统。详细介绍了其结构组成、加热元件的选型计算以及控温模块的设计。开展试验对该系统的性能进行了验证，结果表明多点控温系统升温稳定后2.5 h的温度波动为0.09℃，三天的测试结果重复性为0.1℃。应用标准光电高温计测试Ag固定点黑体辐射源，使用多点温控系统时，标准光电高温计的测温稳定性相较不使用多点温控系统条件下有明显改善。该多点控温系统可有效保证标准光电高温计整机工作温度环境的稳定性，实现高精度温度测量，为推动国产化精密测温装置技术发展提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 张艳莉. RT9031 光电高温计的改进及其性能研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
ZHANG Y L. Improvement and performance study of RT9031 photoelectric pyrometer[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [2] 盛山菊. 光电高温计的性能参数测试与评价[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
SHENG S J. Measurement and evaluation of performance parameters of photoelectric pyrometer[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [3] 刘巨芬. 光电高温计的研究及性能测试[D]. 太原: 中北大学, 2021.
LIU J F. Research and performance test of photoelectric pyrometer [D]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
- [4] 李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC的高精度半导体激光器温控设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1745-1749.
LI J L, SHI Y B, ZHAO P F, et al. Temperature control design of high precision semiconductor laser based on TEC[J]. Infrared and laser engineering, 2014, 43(6): 1745-1749. (in Chinese)
- [5] 黄岳巍, 崔瑞祯, 巩马理, 等. 基于TEC的大功率LD恒温控制系统研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 143-147.
HUANG Y W, CUI R Z, GONG M L, et al. Research on

- high power LD constant temperature control system based on TEC[J]. Infrared and laser engineering, 2006, 35(2): 143-147. (in Chinese)
- [6] 徐广平, 冯国旭, 耿林. 基于单片机控制的高精度TEC温控[J]. 激光与红外, 2009, 39(3): 254-257.
XU G P, FENG G X, GENG L. High precision TEC temperature control based on single chip microcomputer[J]. Laser and infrared, 2009, 39(3): 254-257. (in Chinese)
- [7] 李文武, 陈佳楠. 基于微热板的加热控温集成电路设计[J]. 机械与电子, 2021, 39(4): 23-27.
LI W W, CHEN J N. Design of heating and temperature control integrated circuit based on Microwave board[J]. Mechanical and electronic, 2021, 39(4): 23-27. (in Chinese)
- [8] 范寒柏, 谢汉华. 基于可控硅移相控制的高精度半导体制冷温控系统[J]. 仪表技术与传感器, 2012(5): 103-105.
FAN H B, XIE H H. High precision semiconductor refrigeration and temperature control system based on thyristor phase shift control[J]. Instrument technology and sensor, 2012(5): 103-105. (in Chinese)
- [9] 廖胜凯, 刘银年, 陈小文, 等. 基于PID算法的可配置多通道温度控制系统[J]. 仪表技术与传感器, 2009(6): 95-97.
LIAO S K, LIU Y N, CHEN X W, et al. Configurable multi-channel temperature control system based on PID algorithm[J]. Instrument technology and sensor, 2009(6): 95-97. (in Chinese)
- [10] 廖海洋, 吕建波, 温志渝, 等. 微型生化分析仪温控模块的设计与实现[C]//全国第十六届十三省(市)光学学术会议论文集, 2007: 206-218.
LIAO H Y, LV J B, WEN Z Y, et al. Design and implementation of temperature control module of micro biochemical analyzer[C]//Proceedings of the 16 th National 13 th Provincial (municipal) Optical Academic Conference, 2007: 206-218. (in Chinese)
- [11] 郭震, 宋一丁, 闫志辉, 等. 全光纤电流互感器中的TEC温控模块电路设计[J]. 自动化仪表, 2019, 40(12): 41-45.
GUO Z, SONF Y D, YAN Z H, et al. Circuit design of TEC temperature control module in all fiber current transformer[J]. Automatic instrument, 2019, 40(12): 41-45. (in Chinese)
- [12] 行联合, 曹仙春, 杨平, 等. 半导体热电温控模块的设计应用[J]. 机电工程技术, 2007, 36(8): 84-87.
HANG L H, CAO X C, YANG P, et al. Design and application of semiconductor thermoelectric temperature control module[J]. Electromechanical engineering technology, 2007, 36(8): 84-87. (in Chinese)
- [13] 李丹, 蔡静. 基于半导体制冷片的高精度控温电路系统设计[J]. 计测技术, 2017, 37(2): 19-21.
LI D, CAI J. The research and application of control circuit system based on TEC[J]. Metrology and measurement technology, 2017, 37(2): 19-21. (in Chinese)
- [14] 刘裕盛, 蔡静. 改进型封装固定点黑体在辐射测温中的应用[J]. 计量学报, 2021, 42(9): 1149-1154.
LIU Y S, CAI J. Application of improved packaging fixed point blackbody in radiation temperature measurement[J]. Acta metrologica sinica, 2021, 42(9): 1149-1154. (in Chinese)
- [15] 胡朝云, 郝小鹏, 宋健, 等. 红外高光谱大气探测仪星载固定点黑体辐射源的研制[J]. 计量学报, 2019, 40(2): 232-239.
HU Z Y, HAO X P, SONG J, et al. Development of spaceborne fixed point blackbody radiation source for infrared hyperspectral atmospheric detector[J]. Acta metrologica sinica, 2019, 40(2): 232-239. (in Chinese)
- [16] 高一凡, 蔡静, 张岚. 光电高温计自动测试系统设计[J]. 计测技术, 2022, 42(1): 72-78.
GAO Y F, CAI J, ZHANG L. Design of automatic test system for photoelectric pyrometer[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(1): 72-78. (in Chinese)

(本文编辑:刘圣晨)

第一作者:李丹(1990—),女,工程师,硕士,主要研究方向为辐射测温。

