

30 ℃ ~ 420 ℃黑体温度控制及自整定研究

胡铁力 王红红 李四维 曹锋 胡心漪 范 杨毓鑫 郭健 尤越 杨科 李辉 俞洋

Research on temperature control and self-tuning for 30420 blackbody

HU Tieli, WANG Honghong, LI Siwei, CAO Feng, HU Xinyi, FAN Zhe, YANG Yuxin, GUO Jian, YOU Yue, YANG Ke, LI Hui, YU Yang

引用本文:

胡铁力, 王红红, 李四维, 等. 30 ℃ ~ 420 ℃黑体温度控制及自整定研究[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 392–397. DOI: 10.5768/JAO202344.0203005

HU Tieli, WANG Honghong, LI Siwei, et al. Research on temperature control and self-tuning for 30 ℃ ~ 420 ℃ blackbody[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 392–397. DOI: 10.5768/JAO202344.0203005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0203005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星载激光雷达F-P标准具高效温控算法的设计与实现

Design and implementation of efficient temperature control algorithm for Fabry–Perot etalon of spaceborne lidar

应用光学. 2018, 39(1): 130–134 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0107003>

基于加速度反馈的上反稳瞄系统最优控制研究

Optimal control of upper anti-stabilization aiming system based on acceleration feedback

应用光学. 2021, 42(6): 997–1005 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601008>

滤光辐射计测量黑体的温度

Temperature measurement of blackbody using filter radiometer

应用光学. 2018, 39(6): 862–866 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0603002>

一种目标遮挡情况下的自动跟踪控制方法

Auto-tracking control method against target occlusion

应用光学. 2017, 38(5): 713–718 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0501006>

滑模动态面控制在快速反射镜系统中的应用

Application of sliding mode dynamic surface control in fast steering mirror

应用光学. 2018, 39(5): 714–721 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0505003>

高精度光电跟踪系统中伺服稳定控制算法研究

Servo stabilization control algorithm in high-precision photoelectric tracking system

应用光学. 2021, 42(4): 597–607 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0392-06

30℃~420℃黑体温度控制及自整定研究

胡铁力¹, 王红红¹, 李四维¹, 曹 锋¹, 胡心漪², 范 喆¹, 杨毓鑫¹,
郭 健¹, 尤 越¹, 杨 科¹, 李 辉¹, 俞 洋¹

(1. 西安应用光学研究所 国防科技工业光学一级计量站, 陕西 西安 710065;

2. 西安导引科技有限责任公司 工艺部, 陕西 西安 710065)

摘 要: 作为红外标准光源, 要求 30℃~420℃黑体能快速升温到设定温度点, 并保持温度稳定。针对其升降温功率差别大、滞后大等特点, 用开关控制冲击响应自整定方法, 得到黑体温升超调量、最大升降温速率等参数, 采用复合智能温控策略, 实现了 30℃~420℃黑体温升前期快, 接近设置温度时改以渐进方式达到并稳定在设定温度点。实验结果表明, 实现了 30℃~420℃黑体无超调地到达设定温度点, 且稳定性为 ± 0.03 ℃/min, 该指标达到了国际同类产品水平。

关键词: 温度控制; 黑体; PID 控制; 大滞后系统; 开关控制; 自整定; 阶跃响应

中图分类号: TN215

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0203005

Research on temperature control and self-tuning for 30℃~420℃ blackbody

HU Tiel¹, WANG Honghong¹, LI Siwei¹, CAO Feng¹, HU Xinyi², FAN Zhe¹, YANG Yuxin¹,
GUO Jian¹, YOU Yue¹, YANG Ke¹, LI Hui¹, YU Yang¹

(1. The First Scale Optical Metrology Station of the Science, Technology and Industry for National Defense, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Technology Department, Xi'an Guiding Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: As the standard infrared light source, it is required that 30℃~420℃ blackbody can quickly heat up to the setting temperature, and keep the temperature stable. For the characteristics of large difference and large lag of heating and cooling power, the self-tuning method of impulse response based on the bang-bang control was used to obtain the parameters of blackbody temperature rise overshoot and maximum heating and cooling rate. Using the compound intelligent temperature control strategy, the temperature of 30℃~420℃ blackbody could rise speedily in the first stage. When approaching the setting temperature, the blackbody gradually reached and stabilized at the setting temperature. The experimental results show that 30℃~420℃ blackbody rises to the target temperature without overshoot, and the temperature stability is ± 0.03 ℃/min, which reached the international level of similar products.

Key words: temperature control; blackbody; PID control; large delay system; bang-bang control; self-tuning; step response

引言

30℃~420℃黑体为电加热型中温黑体, 是用途广泛的标准红外光源^[1-3], 用于标定红外探测器、红外仪器设备, 其温度稳定性是其重要的技术指标。温度稳定的 30℃~420℃黑体, 经温度校准后, 才能向红外仪器提供准确的红外辐射标定、

校准^[4-6]。

黑体温度控制属于自恒过程, 当加热与散热功率相等时, 黑体保持温度稳定。为增强 30℃~420℃黑体的稳定性, 黑体腔外层使用了保温水泥、玻璃纤维棉等多种保温材料; 为保证电绝缘, 30℃~420℃黑体的电加热丝采用陶瓷套管、绝缘布等

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-07-18

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目 (JSJL2019208D001)

作者简介: 胡铁力 (1965—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事红外计量测试技术研究。E-mail: hu_tieli@163.com

绝缘材料包裹, 导致 30 ℃~420 ℃ 黑体温控过程模型难以建立^[7-9], 也就无法使用经典 Smith 控制、Dahlin 控制。由于升温用电热丝阵列, 而降温手段仅为热辐射、强制风冷散热, 30 ℃~420 ℃ 黑体全速加热升温速率往往是降温速率的 10 倍~50 倍, 升温、降温能力严重不对称, 且热惯性大, 滞后显著(温度滞后时间约 20 s 左右)。若简单采用常规 PID 控制, 极易造成严重的温度超调, 且回调速率缓慢、稳定性差^[10-11]。因此, 实现黑体快速升温到设定温度点并保持稳定, 一直是电热型中温黑体温控技术的难点^[12]。为此在温控仪中设计了基于开关控制的自整定环节模块, 通过自整定流程辨识电加热型黑体的升温过程特性, 并据此制定 30 ℃~420 ℃ 黑体多种模式复合智能控温策略, 以实现对黑体温度的最佳控制。

1 30 ℃~420 ℃ 黑体

30 ℃~420 ℃ 黑体由黑体、温控仪组成, 如图 1 所示。黑体由高发射率腔体、加热丝阵列、保温层、内壳轴流风机、测温传感器等组成, 其中黑体高发射率的腔体是黑体的关键部分, 由电热丝阵列加热。黑体的温度就是指腔体温度。轴流风机在黑体外壳、内壳之间形成强制风冷通道, 防止黑体前面板、外壳过热。

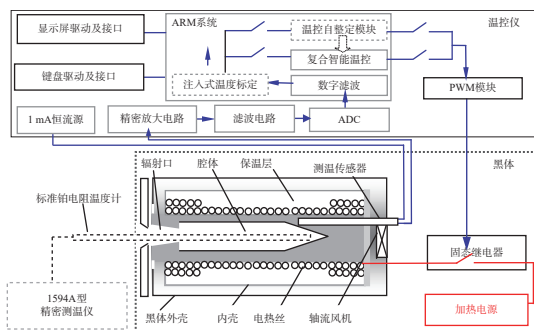


图 1 30 ℃~420 ℃ 黑体工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of 30 ℃~420 ℃ black-body

用 1 mA 恒流源驱动的 Pt100 传感器实时测量黑体温度, 测温信号经精密放大、低通滤波及数字滤波处理后, 计算出实时温度, 复合智能温控单元根据实时温控偏差输出 PWM 控制信号, 控制固态继电器通断占空比, 即调节加热功率, 实现对 30 ℃~420 ℃ 黑体温度的实时控制。

30 ℃~420 ℃ 黑体温控自整定流程中, 温控自整定模块获得温控仪全程控制权, 辨识黑体温升

过程特性, 计算出复合智能温控单元的控温参数。

30 ℃~420 ℃ 黑体出厂时需要标定温度, 使用过程中由于测温传感器量值偏移、元器件老化均需要进行温度标定, 因此温控仪中增添了注入式温度标定模块, 可将多点真实温度值通过键盘输入到 ARM 系统中, 通过建立一个测温信号为自变量, 最终温度值输出为函数的大冗余量高次方程组, 利用最小二乘法拟合出 30 ℃~420 ℃ 黑体高次测温函数。

图 1 中的标准铂电阻温度计、精密测温仪不属于 30 ℃~420 ℃ 黑体。在对黑体进行注入式温度标定时, 提供黑体真实温度值, 也能测量 30 ℃~420 ℃ 黑体温度稳定性等。

2 基于开关控制的黑体温控自整定

由于经典开环阶跃响应、Z-N 参数整定等自整定方法难以有效辨识电热型黑体温度超调等特性。因此, 设计了基于开关控制的电热型黑体温控参数自整定方法^[13-15]。

黑体温升特性辨识主要包括: 最大温度超调量 A 、最大升温速率、黑体降温速率等特性参数。采用开关控制方式, 进行黑体温度控制自整定, 自整定软件具体步骤如下:

- 1) 设定黑体升温目标温度 θ_{set} 。
- 2) 黑体起步温度 $\theta_0 \leq \text{当前温度 } \theta(k) \leq \theta_{\text{set}}$ 阶段, 温控仪输出量 $u(k)$ 最大, 即输出占空比(控制量) $u(k) = 100\%$ 。
- 3) 实时温度 $\theta \geq \theta_{\text{set}}$ 状态时, 黑体加热控制量(占空比)立即全关, 为 0;
- 4) 如图 2 所示, 黑体温度到达目标温度 θ_{set} 后, 在自整定程序关断加热, 即加热功率为 0 的情

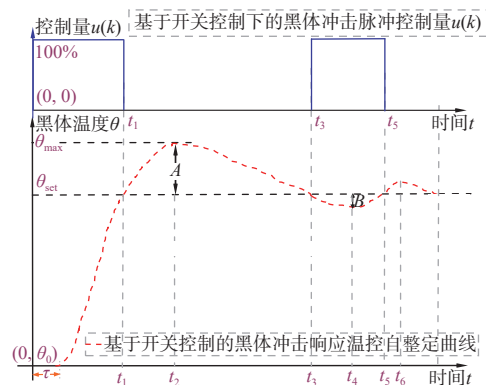


图 2 黑体温控自整定曲线

Fig. 2 Curve of self-tuning for temperature control of black-body

况下, 温度最高冲到 $\theta_{\max}$, 然后自然下降。进入 $\theta \leq \theta_{\text{set}}$, 再次开启全速加热, 直至 $\theta \geq \theta_{\text{set}}$ 。黑体温度在开关控制模式下, 进入周期性振荡, 当黑体温度再次从峰值回到设定温度时, 停止整定。

5) 计算滞后时间 τ 、超调量 $A = \theta_{\max} - \theta_{\text{set}}$ 、回调量 B ;

6) 计算温控仪输出控制量占空比为 100% 时的最大升温速率 v_{up} ;

7) 计算温控仪输出控制量占空比为 0 时的自然降温速率 v_{off} 。

3 制定多模组合的黑体温度控制策略

从图 2 的黑体温控自整定曲线看出, 为实现 $30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黑体快速升温并稳定在设定温度点, 应避免温控出现温度超调, 因为一旦超调, 因降温功率小黑体温度回调速率非常缓慢。因此, 黑体的温度控制采取组合式的多种模式控制策略^[16-17]。控温偏差接近超调量 A 之前, 温控采用开关控制; 控温偏差接近超调量 A 后, 热惯性让黑体继续升温, 同时采用比例加智能积分温控, 实现黑体温度渐进式平稳接近设定温度, 并保持稳定, 如图 3 所示。

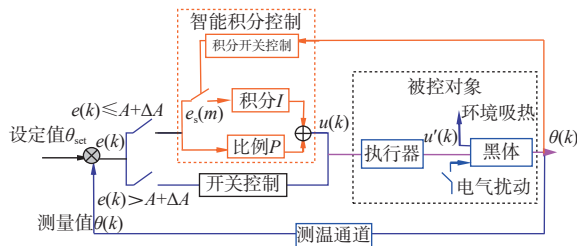


图 3 多模组合智能温控

Fig. 3 Multi-mode combined with intelligent control for blackbody temperature

3.1 温升第 1 阶段控温策略——开关控制

第 1 阶段的升温过程中, 温度控制偏差 $e(k) = \theta_{\text{set}} - \theta(k)$ 逐渐减小, 在 $e(k)$ 等于 $A + \Delta A$ 之前, 即温度控制偏差 $e(k) > A + \Delta A$ 阶段, 采用开关控制的策略控制黑体温度上升, 如图 3 所示。

在此温升阶段, 温控仪输出 100% 占空比, 以最大功率加热黑体。 $\Delta A \approx (20\% \sim 30\%)A$ 。超调量 A 由整定得到。此阶段温控目标: 实现黑体快速达到设定温度 θ_{set} 。

为防止出现过大超调, 从 $\theta_{\text{set}} - \theta(k) = A + \Delta A$ 开始, 立即结束开关控制, 黑体温控进入比例加智能积分温控方式。

3.2 温升第 2 阶段控温策略: 比例加智能积分控制在 $0 \leq e(k) \leq A + \Delta A$ 阶段, 温控仪进入比例智能积分控制模式。

图 3 中积分开关闭合一次, 则温控仪进行一次温控偏差 $e_s(k)$ 累加, 即偏差积分。当智能温控阶段第 k 个温控周期检测到黑体第 m 次升温停滞时, 控制输出量 $u(k)$ 为

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_I \cdot \sum_{j=1}^m e_s(j) \quad (1)$$

式中: K_I 为积分控制因子; $\sum_{j=1}^m e_s(j)$ 为 m 次升温停滞的温控偏差累加。

判断黑体温升处于停滞(甚至降温)状态的充分条件是:

存在 K_0 , 使得当 $K_0 \leq k \leq K_0 + N$ 时, $e(k) - e(k-1) < \delta$ 成立^[18], 即满足黑体温升停滞条件。其中, δ 是大于 0 的常数, 取为黑体温度分辨率的 2 倍。则执行智能积分控制如下:

$$\sum_{j=1}^m e_s(j) = \sum_{j=1}^{m-1} e_s(j) + e_s(m) \quad (2)$$

式中: $e_s(m)$ 为第 m 次升温停滞的温控偏差。采用常量加智能积分的温控策略, 渐次增大电加热功率, 实现黑体小步调升温, 稳步靠近目标温度 θ_{set} 。

假如黑体温度超调, 即 $e(k) < 0$, 满足停滞条件, 黑体温度会稳步下降到设定温度点 θ_{set} 。

4 控制参数确定

黑体的降温途径包括: 热辐射、强制风冷散热^[19]。自整定时, 用开关控制方式 100% 占空比加热时, 黑体升温速率 v_{on} 、电加热功率 P_{on} 方程:

$$P_{\text{on}} - (P_{\text{wind}} + P_{\text{emit}}) = m \times C \times v_{\text{on}} \quad (3)$$

式中: P_{wind} 为黑体强制风冷散热功率; P_{emit} 为黑体热辐射散热功率; m 为黑体腔体质量; C 为黑体腔体质量; v_{on} 加热输出占空比 100% 时, 黑体温度最大的升温速率。

停止电加热, 黑体降温时, 根据加热功率为零等条件, 列出方程:

$$0 - (P_{\text{wind}} + P_{\text{emit}}) = -m \times C \times v_{\text{off}} \quad (4)$$

式中: v_{off} 为加热功率为零时, 黑体温度自然下降的速率。

在死区之外未到饱和的动态范围内, 温控仪控制输出的加热功率 P_{on} 与温度偏差 $e(k)$ 存在以下关系:

$$P_{\text{on}} = K_p \cdot \eta \cdot e(k) \quad (5)$$

式中: K_p 为比例控制系数; η 为温度控制量与加热电功率转换系数。

假定 $e(k)$ 不变, 即黑体温度保持停滞, 则此时要求电加热功率等于热辐射、强制风冷散热功率之和, 由此得到黑体保持温度停滞所需的纯比例温控系数 K_p :

$$K_p = \frac{v_{\text{off}}}{v_{\text{on}} + v_{\text{off}}} K_{\text{on}} \quad (6)$$

式中: K_{on} 为纯比例控制输出控制量(占空比)100%, 黑体以最大速率升温。

根据温控整定经验, 一般取积分系数 $K_I = 0.2 k_p$ 。

5 30 ℃~420 ℃黑体温控自整定试验

30 ℃~420 ℃黑体温控及自整定试验布局如图1所示, 采用标准铂电阻温度计、精密测温仪组合测量 30 ℃~420 ℃黑体温度稳定性。

1) 30 ℃~420 ℃黑体自整定试验

启动 30 ℃~420 ℃黑体温控仪中自整定模块, 设置黑体目标温度 $\theta_{\text{set}} = 120$ ℃, 起步温度即环境温度 $\theta_0 = 20$ ℃, 以开关控制方式进行黑体温控过程特性自整定试验。

试验得到如图2所示的 30 ℃~420 ℃黑体响应曲线, 温升过程特性参数包括: 黑体滞后时间 τ 约为 14 s; 在达到目标温度 θ_{set} 之前, 黑体温升速率 $v_{\text{on}} = 0.25$ ℃/s; 黑体温度超调量 $A = 19.6$ ℃; 关断加热情况下的自然降温速率 $v_{\text{off}} = 0.010$ ℃。

根据温控仪的滞后时间 τ 、温度控制稳定性需要, 确定温度控制周期 $T = 3$ s, 并由此计算得到维持黑体温度在接近 $\theta_{\text{set}} = 120$ ℃阶段停滞的纯比例系数 $K_p = 0.03$, 智能积分控制的积分系数 $K_I = 0.006$, 即积分时间系数 $T_I = 15$ s。

2) 复合智能积分温度控制试验

根据得到的黑体温度超调量 A 、维持黑体温度停滞的纯比例系数 K_p 、智能积分控制的积分时间常数 T_I , 设置智能积分温控试验的目标温度 $\theta_{\text{set}} = 120$ ℃, 起步温度即环境温度 $\theta_0 = 20$ ℃, 将黑体温控分为 2 个阶段:

阶段 1: $\theta_0 \leq \theta(k) \leq \theta_{\text{set}} - (A + \Delta A)$

其中取 $A + \Delta A = 24.5$ ℃, 则 $\theta_{\text{set}} - (A + \Delta A) = 95.5$ ℃。阶段 1 中, 温控采取全开控制, 输出占空比 100%, 黑体温度全速上升, 温升曲线如图4中实线所示。

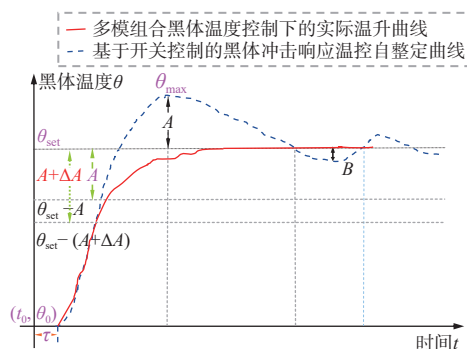


图4 黑体智能积分温控试验曲线

Fig. 4 Curves of intelligent integral temperature control test for blackbody

阶段 2: $\theta_{\text{set}} - (A + \Delta A) \leq \theta(k) \leq 120$ ℃

阶段 2 中, 随着温度上升, 黑体温度多次出现停滞, 智能积分及时增加温控输出, 黑体稳步靠近目标温度 120 ℃, 并稳定下来。采用图1所示的标准铂电阻温度计、精密测温仪测量黑体温度稳定性, 3 min 期间 ± 0.01 ℃。

复合智能积分温控参数推广用于 30 ℃~420 ℃黑体整个温度段。将目标温度设置在 420 ℃, 黑体在 395.5 ℃之前是开关控制方式。从 395.5 ℃开始, 采用智能积分控制, 黑体渐进式接近目标温度并稳定下来, 黑体稳定性达到了 ± 0.03 ℃/min。

3) 试验结果分析

启动电加热后出现升温滞后约 15 s 原因: 因电加热丝阵列为热源中心, 其热量沿着绝缘套、绝缘层、腔体传递热量, 并形成温度梯度。并且嵌入腔体的铂电阻测温传感器也存在热传导梯度、响应时间问题, 因此 30 ℃~420 ℃存在升温滞后现象。

停止电加热后黑体温度继续升高形成超调量 $A \approx 20$ ℃原因: 将黑体腔体加热到 θ_{set} , 电加热丝阵列、绝缘套、绝缘层温度更高。因此, 在电加热丝阵列断电后, 绝缘套、绝缘布继续向腔体及测温传感器传热。其次, 保温层内也聚集了大量的热, 会沿着加热丝、绝缘套、绝缘布、腔体及测温传感器顺序持续热传导。所以, 在断电后, 以上高温热源会继续向测温传感器传热, 导致 30 ℃~420 ℃黑体温度继续升高, 超调量 $A \approx 20$ ℃。

$\theta(k) \geq [\theta_{\text{set}} - (A + \Delta A)]$ 阶段, 进入比例加智能积分控温阶段, 实际温度升得越高, 黑体以热辐射、强制风冷向环境散失热量越大, 则黑体继续温升需更大电功率, 智能积分控制有条件地适度增大电加热功率, 实现黑体微小步调升温, 稳步靠近目标温度 θ_{set} , 不仅克服了常规积分控制的积分饱和

弊端,又能有效克服为黑体温度超调。

6 结论

实验证明,开关控制、比例加智能积分复合形式的控温策略能够满足 30℃~420℃ 黑体的升温快、在设置点温度稳定的控温要求。该方法也完全适用于其他温度范围的电加热型黑体温控。

参考文献:

- [1] 韩顺利,李立功,韩清瑶,等.中温面源黑体设计及性能参数测试[J].*红外*,2017,38,(10):20-24.
HAN Shunli, LI Ligong, HAN Qingyao. Design and performance parameter test of intermediate temperature expended area blackbody[J]. *Infrared*, 2017, 38,(10): 20-24.
- [2] 盛健,崔志尚.一种便携式中温固定点黑体炉[J].*自动化仪表*,2001,22,(8):23-24.
SHENG Jian, CUI Zhishang. A portable blackbody furnace with fixed middle temperature points[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2001, 22,(8): 23-24.
- [3] 胡铁力,李旭东,付建明,等.红外热像仪参数的双黑体测量装置[J].*应用光学*,2006,27(3):246-249.
HU Tiel, LI Xudong, FU Jianming, et al. Double-blackbody unit for measuring parameters of infrared cameras[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(3): 246-249.
- [4] 杨照金,史继芳,胡铁力.夜视测试与计量技术概论[M].北京:国防工业出版社,2019:283-298.
YANG Zhaojin, SHI Jifang, HU Tiel. Introduction to night vision testing and measurement technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 283-298.
- [5] 国防科技工业局.50℃~400℃面源黑体:JJG(军工)147-2017[S].北京:标准出版社,2017.
National defense science. Technology and industry bureau. 50℃~400℃ extended area blackbody. JJG(Jungong) 147-2017[S]. 2017.
- [6] 胡铁力,薛战理,李宏光,等.50℃~500℃面源黑体校准技术研究[C].2011年中国计量测试学会光辐射计量学术研讨会论文集,西安:中国计量测试学会,2011.
HU Tiel, XUE Zhanli, LI Hongguang, et al. Research on the calibration technology of 50℃~500℃ Extent source blackbody[C]. Symposium on 2011 optical radiation metrology of China Metrology and testing Society. Xi'an: China Metrology and testing Society, 2011.
- [7] 周玮,高魁明.中高温黑体炉的研制及其精度评价[J].*东北大学学报(自然科学版)*,1997,18(3):307-310.
ZHOU Wei, GAO Kuiming. The development of black-body furnace and the evaluation of its accuracy[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 1997, 18(3): 307-310.
- [8] PALCHETTI L, BIANCHINI G, CASTAGNOLI F, et al. Design and characterisation of black body sources for infrared wide-band Fourier transform spectroscopy[J]. *Infrared Technology*, 2008, 51: 207-215.
- [9] 国防科学技术工业委员会.323~1273K黑体辐射源检定规程:GJB 1826-93[S].北京:国防科学技术工业委员会,1993.
Commission of science, technology and industry for national defense. Verification regulation of the blackbody radiators operated at the 323~1273K: GJB 1826-93 [S]. Beijing: Commission of science, technology and industry for national defense, 1993.
- [10] 杨照金,范纪红,王雷.现代光学计量与测试[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010:163-177.
YANG Zhaojin, FAN Jihong, WANG Lei. Modern optical metrology and testing [M]. Beijing: Beihang university press, 2010: 163-177.
- [11] 王春雷.工业用中高温黑体辐射源的研制[J].*哈尔滨理工大学学报*,1999,4(3):23-25.
WANG Chunlei. Design of the industrial blackbody radiation source in middle- high temperature[J]. *Journal Harbin University of Science and Technology*, 1999, 4(3): 23-25.
- [12] 闫晓宇,岳文龙,王学新,等.中温黑体辐射源分析与设计[J].*应用光学*,2006,27(增刊):33-36.
YAN Xiaoyu, YUE Wenlong, WANG Xuexin, et al. Analysis and design of medium-temperature blackbody radiation source[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(Sup.): 33-36.
- [13] 孔令辉.中温固定点黑体辐射源研制及性能评价[D].成都:成都理工大学,2013.
KONG Linghui. The research of the middle-temperature fixed-point blackbody [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [14] VANCE H V. 自整定控制的基本原理[J].*软件*,2007(12):24-27.
VANCE H V. Basic principle of auto tuning control[J]. *Software*, 2007(12): 24-27.
- [15] 陈大祥.试论调节器参数的整定方法[J].*上海交通大学*

- 学报, 1982(2): 104-113.
- CHEN Daxiang. On the adjusting method of the controller' parameters[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1982(2): 104-113.
- [16] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- TAO Yonghua, YIN Yixin, GE Lusheng. New PID control and its applications [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [17] 王玲玲. 基于Fuzzy-PID的黑体源温控系统的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2019.
- WANG Lingling. Research on the temperature control of blackbody radiation source based on Fuzzy-PID [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2019.
- [18] 胡树棠, 刘海龙. 仿人智能比例控制的研究[J]. 河海大学机械学院学报, 1998, 12(2): 13-16.
- HU Shutang, LIU Hailong. Research on proportional control of anthropomorphic intelligence[J]. Journal of Mechanical College of Hohai University, 1998, 12(2): 13-16.
- [19] 杨建斌, 张文瑞, 柏树, 等. 面源红外定标黑体控温热分析[J]. 真空与低温, 2011, 17(1): 23-27.
- YANG Jianbin, ZHANG Wenrui, BAI Shu. Temperature analysis for infrared radiation calibration plane blackbody[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2011, 17(1): 23-27.