

文章编号: 1672-8785(2018)08-0011-06

一种大型黑体辐射源测控系统的设计

东 旸

(上海福源光电技术有限公司, 上海 200083)

摘 要: 为了满足近年来国内飞速发展的红外测控的定标需求, 设计出了一种能满足更宽大视场角以及更高分辨率红外探测系统的测控定标用黑体辐射源的测控系统。采用 7075 冷处理锻压合金制成该大型黑体辐射源的面本体黑体辐射面, 其有效辐射面积达到 1200 mm×1200 mm。对于该尺寸的大型黑体辐射源, 国内并没有现成的测控控制方法与手段来验证其技术指标是否达到设计要求。根据大型黑体的主要技术指标要求, 给出了黑体测控及控制方法, 并通过实际测控取得的数据验证了黑体测控系统的准确性。

关键词: 红外定标; 大型黑体辐射源; 测控系统

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.08.003

Design of Measurement and Control System for a Large Blackbody Radiation Source

DONG Yang

(Shanghai Fuyuan Optoelectronic Technology Co., Ltd., Shanghai 200083, China)

Abstract: To meet the calibration demands of infrared measurement and control developed rapidly in China in recent years, a measurement and control system for a large blackbody radiation source used for calibrating infrared detection systems with larger field-of-view angle and higher resolution is designed. The blackout radiation surface of the large blackbody radiation source is made of 7075 cold-treated forging alloy. Its effective radiation area reaches 1200 mm×1200 mm. For such a large blackbody radiation source, there are no any ready-made control methods and means which can verify whether its technical specifications meet the design requirements. According to the main technical specifications of the large blackbody, the measurement and control method is given. The accuracy of the blackbody measurement and control system is verified by the data obtained in actual measurement and control.

Key words: infrared calibration; large blackbody radiation source; measurement and control system

0 引言

随着近些年红外测控技术及红外热成像技术日新月异的发展^[1], 红外探测器、相机、成

像仪的靶面不断增大, 分辨率不断提高, 这对红外定标仪器的性能指标提出了越来越高的要求。黑体辐射源作为红外定标仪器, 主要由黑

收稿日期: 2018-05-20

作者简介: 东旸(1989-), 男, 上海人, 本科, 主要从事热工仪器设计与测控研究。

E-mail: fuyuan@infrared.com.cn

体辐射源本体、黑体测控系统等部分组成,其中测控系统是关键组成部分之一。

本文根据实际项目介绍设计了一套采用多点测温法的大面源黑体辐射源测控系统。该测控系统能实时监控温度变化,通过计算改变控制系统参数,使黑体的温度变化率达到最优。黑体的温度范围是,低温比室温高 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。有效辐射面积达到 $1200\text{ mm}\times 1200\text{ mm}$ 。辐射靶面为方形。

黑体测控系统将整个黑体靶面本体分成 9 等分加以控制。通过使用带有增量 pid 算法的精密控制器调温。为了能实时监控及更加精确地测出黑体辐射源的温度稳定性,在黑体靶面本体上设计安装了 36 个测温点。当黑体达到指定温度并稳定后,通过采集各测温点的实时温度,计算其整体的均匀性及稳定性波动,及时调整控温仪的温控算法参数,使之达到最优。测控结果表明,该黑体辐射源的温度均匀性、稳定性等技术指标都超过了预期效果。



图 1 大型黑体辐射源的整机外形图

1 系统组成及测控指标

1.1 系统基本组成

大型黑体辐射源的靶面本体由金属屏蔽层、黑体辐射面本体、加热器、测控温传感器等组成,其结构示意图如图 2 所示。

黑体辐射源的测控系统由温度检测、数据采集、A/D 转换、低通滤波、信号处理、存

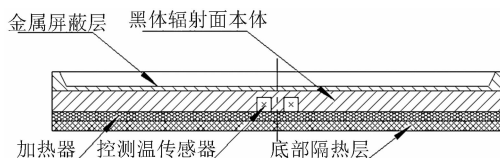


图 2 大型黑体辐射源的靶面本体结构示意图

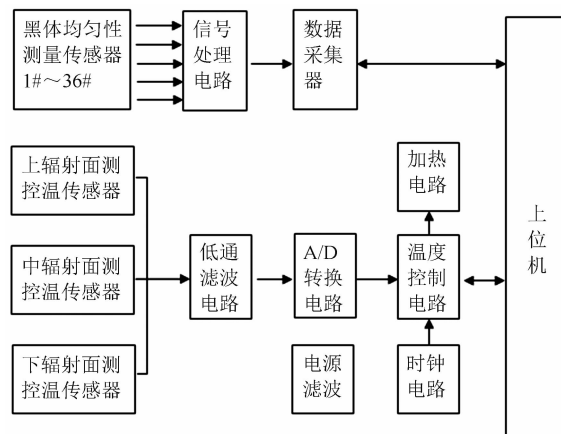


图 3 测控系统硬件框图

储、通讯电路等部分组成,其硬件框图如图 3 所示。

1.2 主要测控指标

黑体辐射源作为校准辐射温度计和红外热像仪的标准辐射源,其温度稳定性和均匀性尤为重要^[1],是黑体辐射源测控的主要指标。黑体辐射源的主要技术指标见表 1,其中黑体的温度稳定性要求为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ (实验室),黑体的温度均匀性为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 黑体辐射源的主要技术指标

性能参数	技术指标
温度范围	室温 $+5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$
有效辐射面	$1200\times 1200\text{ mm}^2$
温度分辨率	$0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
温度稳定性	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ (实验室)
温度均匀性	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
有效发射率	0.92

2 测控系统的主要硬件设计

2.1 硬件的基本组成

测控系统硬件由精密传感器、传感器机械位置、传感器信号处理电路、滤波电路、时钟

电路等组成。

2.2 黑体传感器的选择

有效辐射面是黑体产生红外辐射的重要部件之一, 其辐射面的温度分布均匀程度、绝对温度的测量精度都会直接影响面源黑体的性能。本黑体控温测温传感器选用铂电阻进行测量。铂电阻具有热响应率良好、使用寿命长、线性度好、安装方便等优点。

选用由航天科技集团公司生产、经国家低温计量测控中心标定过的 PT1000 作为测控传感器。相对于 PT100 铂电阻, PT1000 具有更高的温度分辨率、更高的精度以及更小的不确定度, 并且拥有 0.1 K 的分度精度。PT1000 采用四线制测量, 以保证黑体辐射面绝对温度的准确度。

2.3 传感器机械位置分布设计

为了精确测量辐射面的温度, 准确快速反映有效辐射面的温度均匀性, 在整个底面的不同位置、在辐射面尽可能薄的地方, 均匀布置了 36 支 PT1000 铂电阻, 以满足温度均匀性的设计要求。铂电阻的具体分布如图 4 所示。



图 4 黑体温度均匀性传感器的分布图

2.4 传感器信号处理电路的设计

铂电阻传感器在测量时, 需要在两端给予微弱电流以供电, 测量其电压变化。本文采用的激励源为恒流源, 在其后匹配放大滤波电路, 如图 5 所示。其中, 电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 均为低阻、低温漂、标识阻值比 $\pm 0.5\%$ 以内的线绕箔精密电阻。

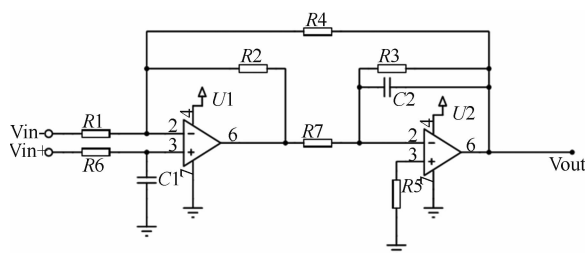


图 5 铂电阻前置放大滤波测量电路

本系统所有传感器的测温控温传感器都通过同一放大、滤波等模块电路完成信号的调理工作, 使之准确。

3 测控系统的主要软件设计

3.1 黑体测控软件的流程图

黑体辐射源软件主要完成对黑体稳定性及均匀性数据的读取, 并发送给上位机。通过上位机软件将数据整理和计算成温度值并存储。寻找出各块温度区域中的高低值, 比较单块温区的温度差异性, 最后通过上位机模拟算法修改控温仪参数, 寻找最优的均匀性及稳定性, 如图 6 所示。

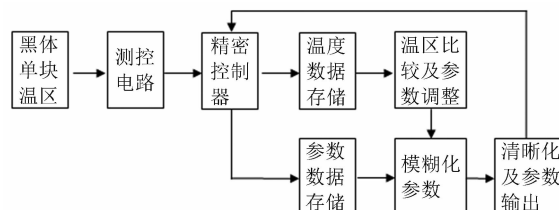


图 6 黑体测控软件系统的流程图

黑体上位机软件使用 matlab 语言编写, 采用 fuzzy pid 控制系统。设计流程是, 确定模拟语言变量输入输出, 确定各量比因子, 再选取输入输出变量隶属度函数、制订模糊规则, 选择模糊推理、清晰化方法^[3]。图 7 为模糊 PID 控制器的仿真模型图。

3.2 PID 算法设计

本文采用增量式 PID 算法, 主要控制量是系统的增量^[4], 其由位置式 PID 算法公式推导出:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_d \times [e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

式中, K_p 、 K_I 、 K_d 为 PID 算法中的比例、积

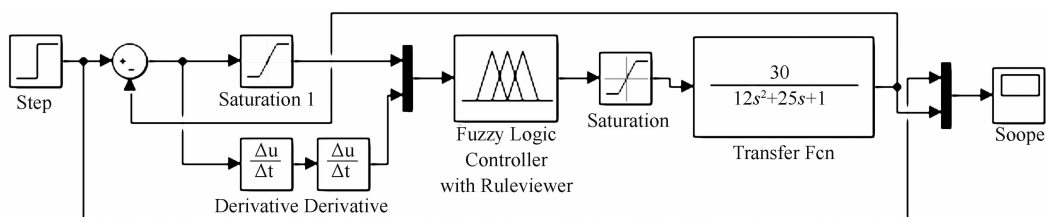


图 7 模糊 PID 控制器的仿真模型图

分、微分系数, $u(k)$ 为采样输出。

增量型 PID 控制算法输出^[4] 只有增量 $\Delta u(k)$, 为 k 时刻和 $k-1$ 时刻的差值:

$$u(k) - u(k-1) = \Delta u(k) \quad (2)$$

确定采样时间 T 及参数即能计算出控制量。

3.3 模糊控制器的结构

模糊控制器采用二维结构, 目标函数为大型黑体辐射源的温度, 输入为实际输出与理论输出之差 E 和偏差变化率 EC 。输出量为 PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 。

3.4 输入、输出模糊集的定义

模糊控制器将输入和输出均分为 7 个模糊子集, 均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。将 E 、 EC 的模糊论域取为 $[-6, 6]$, 分点差值设定为 2, 则对应子集为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ 。将 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊论域取为 $[-9, 9]$, 分点差值设定为 3, 则对应子集为 $\{-9, -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 9\}$ 。根据黑体辐射源的温控特点, 输入输出变量隶属函数采用高斯曲线函数, 如图 8 及图 9 所示。

3.5 模糊规则

在实际应用中, 增量 PID 算法的控制参数

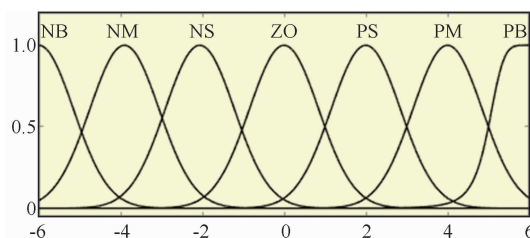


图 8 输入变量隶属函数

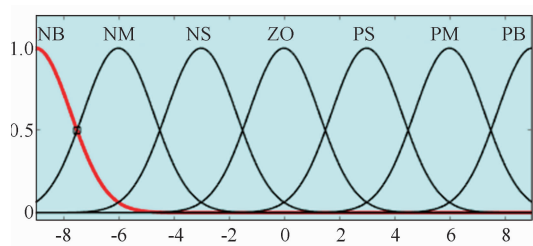


图 9 输出变量隶属函数

p 、 i 、 d 与偏差 e 、偏差变化率 ec , 存在非线性关系, 无法用表达式给出, 但可由模糊语言表述。表 2 为本文的模糊推理规则表。

表内的 3 个模糊集元素由左到右分别表示 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊集元素。

3.6 模糊推理及反模糊化

本文采用玛达尼(Mamdani)推理算法。采用加权平均法进行反模糊化。PID 精确值算

表 2 模糊控制规则表

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

法为

$$k_{p1} = k_{p0} + k_{p1} * k_p \quad (3)$$

$$k_{i1} = k_{i0} + k_{i1} * k_i \quad (4)$$

$$k_{d1} = k_{d0} + k_{d1} * k_d \quad (5)$$

式中, k_{p1} 、 k_{i1} 、 k_{d1} 是模糊控制器的输出;
 k_p 、 k_i 、 k_d 是 PID 参数的初始值。

4 温度稳定性及均匀性测控

4.1 黑体辐射源的测控环境条件

大型黑体辐射源设计完成后, 必须对黑体的各项技术指标进行测控验收。该项实验必须在环境稳定的实验室中进行。实验室的环境温度为 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$; 相对湿度稳定于 $50\% \sim 85\%$ 。并且屏蔽了实验室中任何能影响黑体辐射面温度测控的对流、辐射等因素。

4.2 黑体温度的稳定性测控和计算方法

选取温度点, 根据黑体的温度范围, 选择最低温、最高温及典型温度值 (50°C)。

将黑体温度设定在测控温度点, 并观察 5 min 内控温波动是否在 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 之内。

通过数据采集器采集测温传感器的电阻值。每隔 1 min 采集 1 次, 本黑体共采集 60 次数据, 并反演成温度, 存储于上位机。

根据被测的稳定性数据, 由式(6)计算出被测黑体辐射源的温度稳定性:

$$\Delta t_w = \pm \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2} \quad (6)$$

式中, Δt_w 为黑体温度稳定性, 单位为 $^\circ\text{C}$; $t_{\max}$ 为所采集黑体温度的最高值, 单位为 $^\circ\text{C}$; $t_{\min}$ 为所采集黑体温度的最低值, 单位为 $^\circ\text{C}$ 。

4.3 黑体温度均匀性的测控和计算方法

将黑体设置在指定温度点, 并保证黑体温度满足黑体的稳定性要求。

通过数据采集器采集和测量均匀性传感器的电阻值, 并反演成温度, 记录于上位机内。采集间隔为 15 s 一次。

根据测量均匀性值数据, 由式(7)计算出黑体的单块均匀性数据:

$$\Delta t_d = \pm |t_{\text{avg}} - t_{\text{dev}}| \quad (7)$$

式中, Δt_d 为黑体的单块温度均匀性, 单位为 $^\circ\text{C}$; t_{avg} 为所采集黑体的单块面温度平均值, 单位为 $^\circ\text{C}$; t_{dev} 为所采集黑体的单块面温度最大离散值, 单位为 $^\circ\text{C}$ 。

接着, 我们将所求得的 9 块面温度均匀性数据代入式(8), 计算出黑体的整体均匀性数据:

$$\Delta t_z = \pm \frac{\sum_{i=0}^n \Delta t_{di}}{n} \quad (8)$$

式中, Δt_z 为黑体的整体均匀性, 单位为 $^\circ\text{C}$; Δt_d 为所采集黑体的单块温度均匀性, 单位为 $^\circ\text{C}$ 。

4.4 黑体实验方法

(1) 将黑体安装在满足 4.1 条件的环境中。

(2) 采用直接法测量, 在黑体辐射表面各测温点均匀安装布置热电偶测温传感器。

(3) 控制黑体温度, 使其达到稳定。

(4) 使用经过准确度定标过的 KEITHLEY 2701 多路数据采集器, 采集传感器热电偶测温电压值。

(5) 将电压值存储至电脑并换算成温度, 最后计算出辐射源的温度稳定性及均匀性。

4.5 黑体实验结果

辐射源温度的稳定度及均匀度采用多次实验温度值的标准方差来评估^[6]。按 4.2、4.3 节的方法, 分别对各测温点进行控制。实验表明, 在 50°C 及 120°C 温度点时, 黑体的平均稳定性在 $\pm 0.5^\circ\text{C/h}$ 以内, 黑体整个面的均匀性平均偏离量优于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。图 10 为黑体的平均温度稳定性, 图 11 为黑体的平均温度面均匀性偏离。取标准差计算, 50°C 时稳定性为 0.28°C/h , 面均匀性为 0.36°C/h ; 120°C 时稳定性为 0.42°C/h , 面均匀性为 0.45°C 。

4.6 黑体实验对比

在同一环境条件下, 黑体使用增量 fuzzy pid 参数控制与现有传统自整定 PID 控制做实验分析; 对黑体升温超调、震荡控制比较, 见表 3。采用增量 fuzzy pid 参数控制能更快达到稳定温度点, 并且超调次数更少。

表 3 黑体升温速率及超调、震荡对比

实验次数	增量 fuzzy pid		自整定 PID	
	时间	超调次数	时间	超调次数
1	15 min	3	18 min	5
2	14 min	2	17 min	5
3	15 min	3	17 min	4
4	15 min	3	17 min	5
5	15 min	3	18 min	5

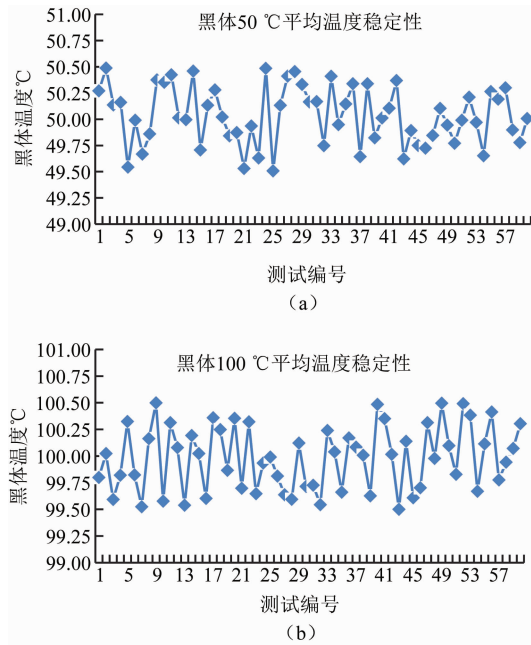


图 10 黑体平均温度的稳定性图

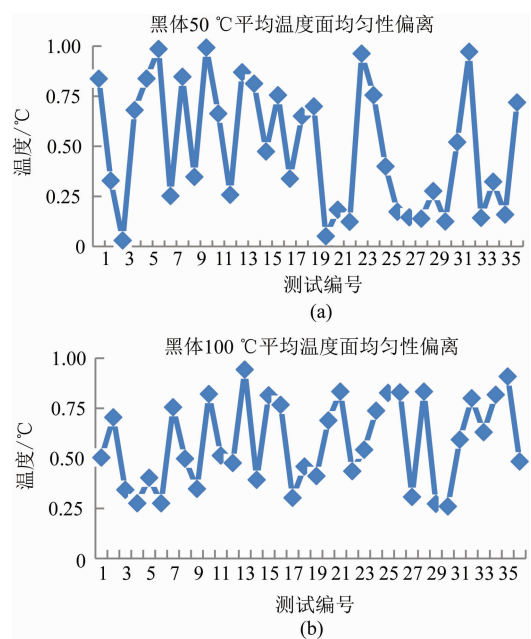


图 11 黑体平均温度的面均匀性偏离图

表 4 中，黑体的温度典型值使用增量 fuzzy pid 参数测量时，其均匀性指标比一般通过传统自整定 PID 参数法测量具有更小的温度均匀性幅度。

表 4 大型黑体辐射测控参数方法比较

实验次数	增量 fuzzy pid	自整定 PID
1	$\pm 0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.70\text{ }^{\circ}\text{C}$
2	$\pm 0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.65\text{ }^{\circ}\text{C}$
3	$\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$
4	$\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$
5	$\pm 0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.7 黑体测量的复验

大型黑体辐射源复验时，同样在温度稳定的实验室环境中进行，同前文 4.1 的条件相同。使用经过标定的红外测温仪及热像仪进行复验。使用方法是，将黑体设置在指定温度，将测温仪放置在黑体前方的平行导轨上，保持与黑体的辐射面平行；移动导轨，逐行、逐列扫描辐射面温度；重复扫描 5 次，记录标准差数据，见表 5。

黑体复验的结果与测控结果基本一致，均优于设计指标。

表 5 大型黑体辐射源的复验及重复性实验

实验次数	红外测温仪	热像仪
1	50.01	50.03
2	50.00	50.06
3	49.98	50.05
4	49.99	50.02
5	50.02	50.05
6	50.03	50.07
7	50.01	50.03
8	50.00	49.98
9	50.00	49.99
10	49.99	50.02

4.8 黑体测量的不确定性

当黑体在某个温度点稳定工作时, 其温度值主要通过控温 PT1000 精密铂电阻的阻值反映。故其误差为 PT1000 精密铂电阻的误差以及测量仪器带来的测量误差之和。测量仪器选用的分辨率为 $0.0001\ \Omega$, 由航天科技集团生产的铂电阻的不确定度为 $0.1\ \text{K}$ 。被测铂电阻在这该温度范围内的线性很好, 为 $4\ \Omega/^{\circ}\text{C}$ 。因此, 精度为 $0.0001\ \Omega$ 的测温仪器带来的测温误差为 0.000025°C 。黑体测温测量的不确定度为 $\Delta T_1 = \sqrt{0.1^2 + 0.000025^2} \approx 0.1\ ^{\circ}\text{C}$ 。

5 结束语

对于大型黑体辐射源验收, 如何准确测控其性能指标并判断其是否满足要求至关重要。介绍了 $1200\ \text{mm} \times 1200\ \text{mm}$ 大型黑体辐射源测控系统的设计。最终测试表明, 该系统完全达到预定指标。该大型黑体辐射源所测实际温度的稳定度在 $\pm 1\ ^{\circ}\text{C}/\text{h}$ (实验室) 以内, 均匀性在 $\pm 2\ ^{\circ}\text{C}$ 以内。相比于采用传统控温法, 采用模糊算法控温法能使系统更快稳定在工作温度点, 并有更好的温度均匀性, 节约了红外定标

时间以及效能。本大型黑体辐射源的测控系统已成功应用于民用领域, 对未来军用、民用辐射源测控系统的设计有一定的参考。

参考文献

- [1] 莫朝霞, 陈沅江. 我国红外热像检测技术的研究及发展展望 [J]. 激光与红外, 2014, 44(12): 1300–1305.
- [2] 白冰, 高福生. 低温黑体辐射源的温度稳定性和均匀性测控 [J]. 计量与检测, 2017, 24(3): 36–37.
- [3] 郑向军, 徐锋, 应一镇, 等. 基于模糊策略的 PID 控制器在恒温控制中的应用 [J]. 控制理论及其应用, 2015, 26(5): 13–16.
- [4] 黄耀波. 注塑过程保压段 PWA 建模与控制策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [5] 李静昭, 段照斌. 基于增量式 PID 控制的全静压测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(5): 44–48.
- [6] 李云红, 孙晓刚, 廉继红. 红外热像系统性能测试研究 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 459–462.