

引用格式:曹海源,黎伟,初华,等.基于模糊PID算法的红外面源黑体设计[J].电光与控制,2018,25(7):92-95,105. CAO H Y, LI W, CHU H, et al. Design of infrared surface-source blackbody based on fuzzy PID algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(7):92-95, 105.

## 基于模糊PID算法的红外面源黑体设计

曹海源, 黎伟, 初华, 万强, 杨雪, 韦尚方  
(陆军工程大学军械士官学校, 武汉 430075)

**摘要:**针对红外热像系统检测需求,采用紫铜辐射面、热电制冷器、散热片等设计了红外面源黑体的结构,采用铂热电阻和24位AD采样,实现了环境温度及辐射面温度的高精度采集。为克服黑体时间常数大、响应滞后、环境温度持续扰动等问题,设计了模糊PID控制器,根据偏差及其变化率实时整定控制参数,实现超调量小、响应速度快、稳态精度高等目标。实验及测试情况表明,温控精度为 $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,响应时间小于180s,达到了设计要求。

**关键词:**红外检测;面源黑体;模糊PID控制;温度采集

中图分类号:TN216 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.07.019

## Design of Infrared Surface-Source Blackbody Based on Fuzzy PID Algorithm

CAO Hai-yuan, LI Wei, CHU Hua, WAN Qiang, YANG Xue, WEI Shang-fang

(Ordnance Non-commissioned Officers School, The Army Engineering University of PLA, Wuhan 430075, China)

**Abstract:** To address the detection needs of the infrared thermal imaging system, an infrared surface-source blackbody was designed, which was composed of purple-copper radiant surface, thermoelectric cooler and cooling fin, etc. The high-precision acquisition of the environment temperature and the radiant surface temperature was realized by using the platinum thermistor and 24 bit AD sampling. To solve the problems in the blackbody of big time constant, response lag, persistent disturbance of the environment temperature, a fuzzy PID controller was designed. The control parameters of it were set in real time according to the error and the error variation rate. The goals of small overshoot, rapid response speed and high steady-precision were realized. It is proved by experiments and tests that the temperature control precision is  $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the response time is less than 180 s, which meet the design requirements.

**Key words:** infrared detection; surface-source blackbody; fuzzy PID control; temperature acquisition

### 0 引言

面源黑体广泛应用于红外探测器及红外热像仪整机的工艺测试和鉴定试验,其作用是产生设定温度下的红外均匀辐射,配合红外靶标及平行光管,为被测红外系统提供所需的红外测试图像,完成噪声等效温差(NETD)、最小可分辨温差(MRTD)、最小可探测温差(MDTD)、信号传递函数(SiTF)等关键指标的测试和整机性能评估<sup>[1]</sup>。面源黑体的辐射率、辐射均匀性、温控精度、温度稳定性、响应速度等是其重要指标。其中,辐射率、辐射均匀性主要取决于面源黑体的结构、

辐射面材质及黑体漆的喷涂工艺<sup>[2]</sup>,其他指标则取决于黑体的温控系统。早期,国内的面源黑体主要依赖进口,主要有以色列CI公司的SR800系列面源黑体、美国SBIR公司的DDB系列差源黑体等,其温控精度普遍达 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,稳定性优于 $\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ (在温差范围小于 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下)<sup>[3]</sup>。但是进口黑体价格昂贵,而且一般不接受用户定制,其体积、重量不能满足某些特定场合的集成要求。因此,本文设计了红外面源黑体及其温控系统,并已应用于某光电检测设备。温度对象具有时间常数大、滞后现象严重等特点,导致被控温度的变化与控制系统调节器的输出有较大的滞后<sup>[4]</sup>。尽管在设计黑体辐射器时考虑了导热材料的选取以及热能量传递问题,但是热量的传递还是需要一定时间,测温元件也有一定的惯性,这些都会产生滞后现象。另外,黑体温控系统不是一个定温系统,它要实

收稿日期:2017-07-24

修回日期:2017-09-07

基金项目:“十三五”装备预研项目(30102050101)

作者简介:曹海源(1979—),男,湖北蕲春人,硕士,副教授,研究方向为武器系统性能检测与故障诊断。

现辐射面温度与环境温度的温差值恒定,而环境温度是时变的,因此对系统的抗扰动性能也提出了更高的要求。传统的PID控制算法只有在系统模型参数为非时变时才能获得理想的控制效果,而模糊PID控制无需建立被控对象的数学模型,对被控对象的时滞、非线性、时变性具有较好的适应能力,即鲁棒性好<sup>[5]</sup>。因此本文采用模糊PID控制算法来实现温度的控制,提高温控指标及性能。

## 1 面源黑体结构设计

面源黑体由热辐射器及控制电路组成,热辐射器见图1,由热电制冷器、散热器、温度探头、辐射面、风扇、隔热罩、防尘网、底板、外壳等部分组成。辐射面采用紫铜材料加工,具有高热容、高发射率的特点,辐射效率高。辐射面的内侧通过导热硅脂与热电制冷器的制热端面紧贴在一起,便于两者快速热量传递。热电制冷器是一种帕尔帖半导体器件,它的另一端面紧贴铝散热器。在散热器的顶端设计有进风口,风扇的外侧是防尘网和出风口,在风扇作用下,对散热片形成风冷通路,便于其快速降温,保证热电制冷器正常工作。辐射面的外侧通过隔热罩与前面板隔开,阻止辐射面与前面板及外壳间的热传递。这样,辐射面的热能只能通过前面板的方形窗口往外辐射。在升温、降温和温度保持过程中,辐射面、热电制冷器、散热器之间建立动态平衡<sup>[6]</sup>。在辐射面的侧面打细长内孔,便于安装温度传感器探头,以实时监测辐射面的温度。另一个温度传感器探头安装于靶标盘,实时感知靶标盘温度,即环境温度。辐射面窗口尺寸为 $38\text{ mm} \times 38\text{ mm}$ ,满足对不同靶标图案的辐射要求。

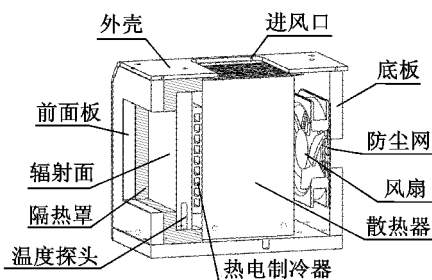


图1 热辐射器结构设计

Fig. 1 Structure of thermal radiator

## 2 温控系统设计方案及指标

### 2.1 温控方案

电路设计方案如图2所示。为了克服环境温度变化的微小影响,实现黑体温度的精确控制,需采用两个温度传感器:一个实时采集辐射面的当前温度;另一个实时监测环境的温度。通常,若黑体在某环境内放置足够长时间,则采用靶标盘的温度来代替环境温度。温度

采集采用24位智能型AD7172芯片,它是一种低功耗的 $\Sigma$ - $\Delta$ 型A/D转换器,可配置为2个差分输入通道,工作温度范围是 $-40 \sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,十分适合双通道高精度温度采集的需要。MCU根据温度采集的数据,以及用户设定的温差值,通过PID控制算法实时计算出热电制冷器的驱动控制量以及风扇转速的控制量,经功率放大后,分别驱动功率器件实现加热和制冷调节,实现闭环控制。辐射面及环境温度实时显示在用户终端,当温差值达到用户设定值后,蜂鸣器发出提示音。

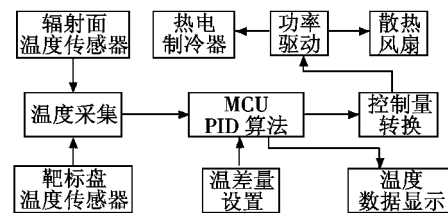


图2 温控电路方案框图

Fig. 2 Scheme of temperature control circuit

### 2.2 设计指标

根据光电检测设备的设计要求,面源黑体温度控制指标如下:1) 温度分辨率: $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;2) 温控精度: $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;3) 差分温度范围: $-10 \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;4) 短时稳定性: $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C} @ 10\text{ min}$ ;5) 响应时间小于 $180\text{ s}$ ;6) 供电电压: $18\text{ V}$ ,电流小于 $2\text{ A}$ ;7) 环境温度: $0 \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

温度采集的精度是实现温度控制各项指标的关键因素之一。在常温范围内,Pt100的阻值随温度变化线性度非常好,采用铂热电阻Pt100作为温度传感器,它具有响应时间短、精度高、稳定性好等优点<sup>[7]</sup>。根据其分度表可知,在 $0 \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,温度变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对应铂热电阻阻值变化约为 $0.391\text{ }\Omega$ 。为了进一步提高其测量准确度,采用四线制接法,尽可能消除了铂热电阻引线电阻的影响<sup>[8]</sup>。

拟采用 $10\text{ mA}$ 电流驱动,对应电压变化为 $3.91\text{ mV}$ ,信号采集芯片采用24位的AD转换器,参考电压 $V_{\text{ref}}$ 采用 $2500\text{ mV}$ ,由 $1\text{ LSB} = V_{\text{ref}}/2^{24}$ ,则电压采集分辨率理论上可达 $0.000149\text{ mV}$ ,对应温度分辨率约为 $3.811 \times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,远小于 $\pm 0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此温度采集精度满足指标设计要求,最终的温控精度指标取决于电路设计及控制算法。温控电路中功耗较大的是热电制冷器,为了保证面源黑体的工作温度范围,选用了一片额定功率 $15\text{ W}$ 的热电制冷器,加上散热风扇及功率驱动管的损耗, $18\text{ V}, 2\text{ A}$ 的电源能满足使用要求。

## 3 模糊PID系统设计及参数整定

### 3.1 模糊PID控制系统设计

设辐射面的温度为 $T_1$ ,环境温度为 $T_e$ ,则 $k$ 时刻两

者的温差值  $T_c(k)$  为

$$T_c(k) = T_i(k) - T_e(k) \quad (1)$$

假如设置的温差值为  $T_{set}$ , 则误差值  $E(k)$  为

$$E(k) = T_c(k) - T_{set} \quad (2)$$

传统的 PID 控制器算法的一般形式为<sup>[9]</sup>

$$U(k) = K_p E(k) + K_i \sum E(k) + K_d E_c(k) \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

式中:  $E(k)$ ,  $E_c(k)$  分别为其输入偏差和偏差变化率;  $K_p, K_i, K_d$  分别为表征其比例、积分、微分作用的参数。

为便于软件设计, 在程序实现时采用 PID 控制算法的增量形式, 即

$$U(k) = U(k-1) + \Delta U(k-1) \quad (4)$$

增量计算方法为

$$\Delta U(k-1) = K_p [E(k) - E(k-1)] + K_i E(k) + K_d [E(k) - 2E(k-1) + E(k-2)] \quad (5)$$

模糊 PID 控制器原理如图 3 所示。

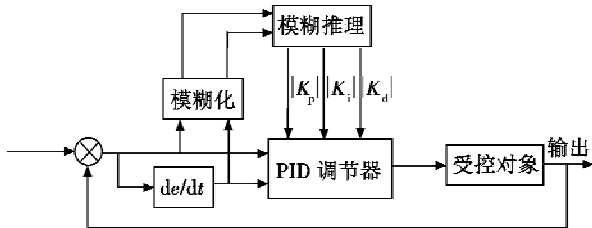


图 3 模糊控制器框图

Fig. 3 Schematic diagram of fuzzy PID controller

PID 参数模糊自整定控制器是在常规 PID 调节器的基础上, 应用模糊集合理论建立参数  $K_p, K_i, K_d$  与偏差绝对值  $|E|$  和偏差变化绝对值  $|E_c|$  间的二元连续函数关系, 即

$$\begin{cases} K_p = f_1(|E|, |E_c|) \\ K_i = f_2(|E|, |E_c|) \\ K_d = f_3(|E|, |E_c|) \end{cases} \quad (6)$$

表 1 模糊控制规则表 ( $K_p/K_i/K_d$ )

Table 1 Fuzzy control rule ( $K_p/K_i/K_d$ )

	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	NB/O/PS	NB/NM/PS	NM/NB/O	NM/NB/O	NS/NS/O	NS/O/PB	O/O/PB
NM	NB/O/NS	NB/NM/NS	NM/NM/NS	NM/NM/NS	NS/NS/O	O/O/PS	PS/O/PM
NS	NB/O/NM	NM/NS/NB	NM/NS/NM	NS/NS/NS	O/O/NS	PS/PS/PS	PM/O/PM
O	NM/O/NB	NS/NS/NM	NS/NS/NM	O/O/NS	PS/PS/O	PM/PS/PS	PM/O/PM
PS	NS/O/NB	NS/NS/NM	O/O/NS	PS/PS/NS	PS/PS/O	PM/PS/PS	PM/O/PS
PM	NS/O/NM	O/O/NS	PS/PS/NS	PM/PS/NS	PM/PM/O	PM/PM/PS	PB/O/PS
PB	O/O/NS	PS/O/O	PS/PS/O	PM/PB/O	PM/PB/O	PB/PM/PB	PB/O/PB

程序运行时, 根据模糊控制规则表实时查询  $K_p$  和  $K_i, K_d$  的值, 进而计算控制量的值, 根据控制量, 一方面计算出热电制冷器驱动电流的大小和方向, 另一方面, 计算出风扇的 PWM 驱动占空比, 控制其转速。

在系统运行中通过不断检测  $E$ , 计算  $E_c$ , 根据模糊控制原理来对 3 个参数进行在线调整, 以满足不同  $E$  和  $E_c$  对控制参数的不同要求, 求出控制量, 对受控对象进行相应的控制, 获得良好的动态、稳态性能。

### 3.2 PID 参数的模糊自整定

由模糊控制理论可知, 要提高模糊控制的精度和跟踪性能, 必须对语言变量取更多的语言值。对输入语言变量  $E, E_c$  及输出语言变量  $K_p, K_i, K_d$ , 均设定语言集为 {NB(负大), NM(负中), NS(负小), O(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)}, 将论域分为 7 个部分进行描述。

对温度控制系统, 从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等方面来考虑, PID 参数整定原则是: 当温差值的偏差的绝对值大于  $5^\circ\text{C}$  时, 为了加快系统的响应速度, 采用较大的  $K_p$ 。同时, 为防止系统响应出现超调量过大, 尽量减小  $K_i$ , 对积分作用加以抑制, 通常可取  $K_i = 0$ ; 初始偏差变化率  $E_c$  会因为瞬间变大而发生微分过饱和, 所以应选取较小的  $K_d$ ; 当温度偏差的绝对值处于  $1 \sim 5^\circ\text{C}$  时, 为使系统具有较快的响应速度, 同时保证较小的超调, 应减小  $K_p$ , 稍增大  $K_i$  和  $K_d$ 。值得注意的是, 此阶段  $K_d$  的取值对温度变化速度的影响仍然较大, 取值不能太大; 当温度偏差与设定偏差接近 (绝对值小于  $1^\circ\text{C}$ ) 时, 为了使温控达到较高的精度和良好的稳定性, 要增大  $K_p$  和  $K_i$ , 同时, 要适当减小  $K_d$  的值, 避免系统在设定值附近出现较多的振荡, 又保证其具备一定的抗干扰性能。

采用三角形隶属度曲线分别对  $E, E_c, K_p, K_i$  和  $K_d$  的模糊子集进行描述, 采用 Mamdani 推理法, 得出  $K_p, K_i$  和  $K_d$  的所有模糊规则, 如表 1 所示。

解模糊时, 采用重心法, 即

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \lambda(u_i)}{\sum_{i=1}^n \lambda(u_i)} \quad (7)$$

## 4 实验结果及分析

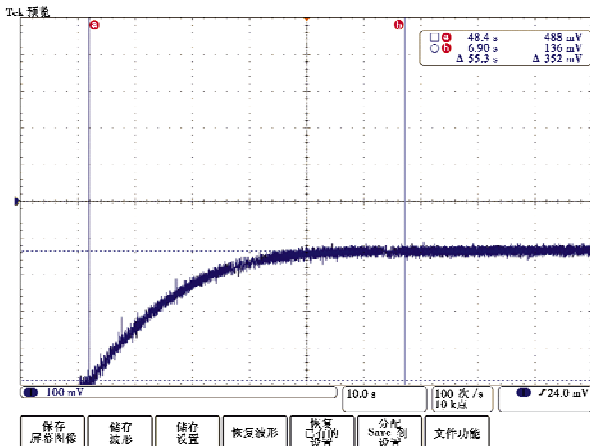
常规的 PID 参数采用临界比例方法进行整定, 经计算和实验得到  $K_p = 143, K_i = 5, K_d = 12$ , 将它作为模

糊整定的初始值,代入式(4)和式(5)求出控制量  $U$  的初值及  $\Delta U$ 。环境温度和辐射面温度之差与用户设定值的差值  $E$  的基本论域是  $(-15, 15)$ , 差值的变化率的基本论域是  $(-8, 8)$ ,  $K_p, K_i$  和  $K_d$  的基本论域分别是  $(100, 230), (0, 18), (2, 25)$ 。模糊计算过程中, 注意要将输入量乘上相应的量化因子, 量化因子的选择与系统的动态性能关系很大。比例因子影响控制器的输出, 过大会导致系统超调量变大, 过小会导致系统动态响应时间增长。经试验得出, 本系统中,  $E, E_c$  的量化因子分别为 0.8, 1.3,  $K_p, K_i$  和  $K_d$  的量化因子分别为 2.2, 1.5 和 3.1。

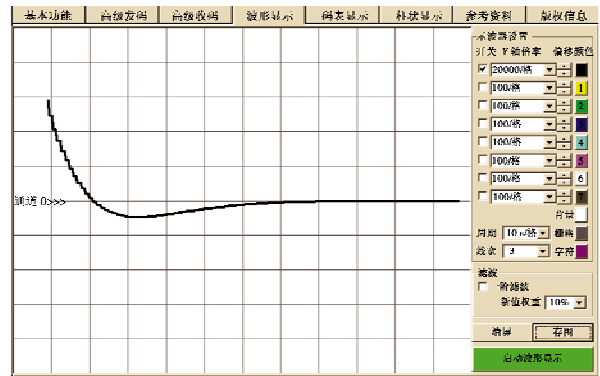
完成参数整定后, 将面源黑体放置在测试环境中 24 h 以上, 测试时室温环境为 25 °C, 并无明显气流扰动。PID 模糊控制算法在单片机内采用软件实现, 模糊 PID 输出控制量  $U$  通过 DAC7631 转换成模拟输出, DAC7631 是美国 TI 公司的 16 位电压输出型数模转换器, 具有双极性电压输出功能。采用 Tektronix DPO 4054 示波器监测 DAC7631 的输出波形, 分析模糊 PID 输出控制量的特性。在温控过程中, 通过对 24 位 AD 芯片的采集数值进行处理计算, 得到环境温度值与辐射面温度值的实际差值, 将此差值减去设定的温差值, 得到控制系统的误差值, 通过单片机的 RS232 串口发送给 PC 端显示分析。

图 4a 和图 4b 是设定  $E$  为 -2 °C 时监测到的输出控制量与误差量曲线, 横轴表示时间, 每小格是 10 s。

由图 4a 可以看出, 控制量由 -448 mV 逐渐趋于稳定值 -136 mV, 调节时间约 55 s, 整个过程没有出现超调和振荡; 由图 4b 的 AD 采样值经计算可以得出, 动态误差值由 2.29 °C 逐渐变小, 过零点后出现超调, 最大超调量约为 0.30 °C, 经过 60 s 左右误差值趋近于 0, 根据实际接收的 AD 值换算, 最后误差值的变化范围在 -0.01 ~ 0.01 °C 之间。



a PID 输出控制量曲线

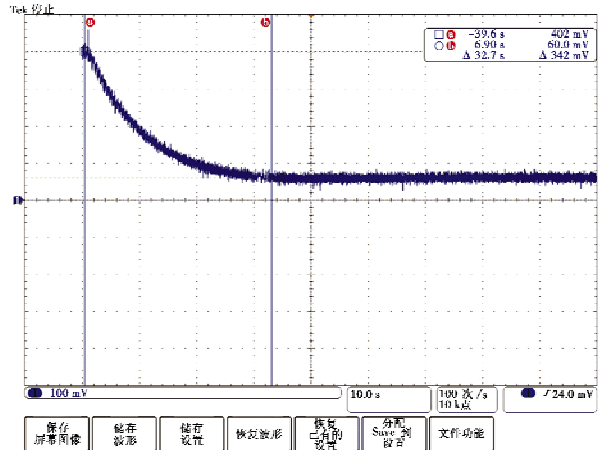


b 温控误差值曲线

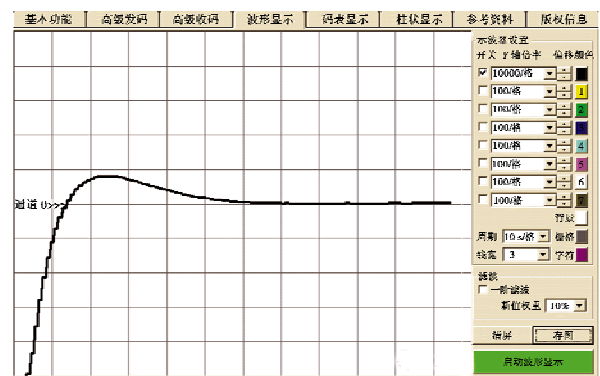
图 4 设定温差值为 -2 °C 的变化曲线

Fig. 4 Curves of output when the set temperature difference is -2 °C

图 5 是设定  $E$  为 2 °C 时监测到的输出控制量与误差量曲线。



a PID 输出控制量曲线



b 温控误差值曲线

图 5 设定温差值为 2 °C 的变化曲线

Fig. 5 Curves of output when the set temperature difference is 2 °C

由图 5a 可看出, 控制量由 402 mV 逐渐趋于稳定值 60 mV, 稳定时间约 35 s, 整个过程没有出现超调和振荡; 由图 5b 可计算得出, 动态误差值由 -1.91 °C 逐渐增大, 过零点后出现超调, 最大超调量约为 0.31 °C,

(下转第 105 页)

误差的增大,识别系统估计的 PRI 子周期误差也增大,从而导致匹配识别的 Euclidean 距离增大,威胁雷达信号的识别度降低。

## 5 结束语

针对雷达数量大幅增加、信号调制样式多样、信号密度越来越高的复杂电磁环境,本文提出了一种 TOA 折叠聚类的威胁雷达信号识别方法。与传统的信号分选方法相比,本文的 TOA 折叠分选具有简单、快速、对复杂环境和复杂信号体制适应能力强等特点。本文采用 DBSCAN 聚类来提取目标雷达信号的数据,能够有效地删除大量无关的脉冲和噪声,为模板匹配识别提供可靠数据;但 DBSCAN 聚类对输入参数过于敏感,所以下一步工作要对此进行改进。通过理论描述和仿真分析验证了本文提出的威胁雷达信号识别方法的可行性,对威胁雷达信号识别研究有一定的参考价值。

### 参考文献

[1] 雍元红. 雷达信号分选算法研究[D]. 成都:电子科技大学,

2008.

- [2] QUAN G R, SUN Y S, CHEN B. Folding deinterleaving algorithm for multiple mixed pulse trains with pulse repetition intervals [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, 2006:13-16.
- [3] 赵闯,赵拥军,李冬海. TOA 折叠平面特征点无监督聚类[J]. 现代雷达,2010,32(1):39-41.
- [4] STAELIN D H. Fast folding algorithm for detection of periodic pulse trains[J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(4):724-725.
- [5] 冯振华. 基于 DBSCAN 聚类算法的研究与应用[D]. 无锡:江南大学,2016.
- [6] 白雪. 一种基于网格的密度聚类算法研究及应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [7] PERKINS J, COAT I. Pulse train deinterleaving via the Hough transform[C]//Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1994: 197-200.
- [8] 王琨鹏,颜春林,杨辉. 基于模板匹配的雷达辐射源信号识别研究[J]. 舰船电子对抗,2014,10(5):31-41.

(上接第95页)

经过 65 s 左右误差值趋近于 0,通过计算,实际误差值的变化范围在  $-0.01 \sim 0.01$  °C 之间。

由以上实验可以看出,模糊参数自整定 PID 控制调节时间短、超调量小、稳态精度高。通过在  $\pm 12$  °C 差分温度范围开展进一步测试来看,温控精度、响应时间及短时的温度稳定性等指标均满足设计要求。

## 5 结论

针对红外探测器及红外热像仪整机的测试需求,研制了一种红外面源黑体,分别设计了热辐射器结构和温度控制电路系统。由于检测需要,面源黑体对温度控制精度、抗干扰性能及响应时间等指标要求较高,通过采用 24 位 AD 采集电路保证了系统输入信号的高精度,采用模糊 PID 控制器及算法提高温控系统的静态性能和动态性能,通过参数自整定,实现了超调量小、稳态精度高、响应速度快等目标。测试结果表明,各项指标达到了设计要求。该红外面源黑体性能稳定可靠,与进口设备相比,体积小、重量轻,可用于红外热像系统 NETD, MRTD 等多项关键指标的测试,并已经应用于某光电检测设备。

### 参考文献

- [1] 曹海源,孙斌,韦尚方等. 便携式红外系统检测仪[J]. 电光与控制,2015,22(5):80-81.
- [2] 刘博雅. 面源黑体辐射特性分析与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2011.
- [3] 王亚辉,王强,张伯川,等. 红外窗口材料的热辐射特性测量方法[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(7):1269-1274.
- [4] 林辉,常继彬. 基于 PID 控制的温度大滞后系统算法研究[J]. 甘肃科学学报,2011,23(1):118-121.
- [5] 孙丽飞,田小建,艾宝丽. 大功率半导体激光器的精密模糊 PID 温控系统[J]. 量子电子学报,2005,22(3):382-386.
- [6] 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,2011,7(1):23-25.
- [7] 石明江,张禾,何道清. 基于 LabVIEW 的高精度铂电阻测温系统设计[J]. 计算机测量与控制,2012,20(4):924-925.
- [8] 胡鹏程,时玮泽,梅健挺. 高精度铂电阻测温系统[J]. 光学精密工程,2014,22(4):988-995.
- [9] 刘彬,谭建平,黄长征. 一种改进 PID 控制算法的研究与应用[J]. 微计算机信息,2007,23(16):15-17.