

基于 ADRC 的黑体辐射源温控系统

云泽荣^{1,4}, 王志刚^{1,2,3}, 王景辉⁴

(1. 天津理工大学, 天津 300384; 2. 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384;
3. 机电工程国家级实验教学示范中心, 天津 300384; 4. 中国计量科学研究院 热工所, 北京 100013)

摘要: 黑体辐射源广泛用于红外成像系统的校正, 在实际应用中要求黑体空腔在整个腔面区域上具有稳定、均匀的温度场, 为了提高控温精度, 本文设计了一种基于自抗扰控制的黑体辐射源温度控制系统。首先, 基于黑体辐射源的数学模型, 在 MATLAB/Simulink 环境下进行 ADRC 控制算法的仿真, 并与传统的 PID 和 Smith 预估计控制算法进行比较。仿真结果表明自抗扰控制算法具有响应快、精度高以及良好的设定值跟踪能力; 其次, 利用 LabVIEW 软件的图形化编程实现了离散 ADRC 的编程; 最后, 在 Compact RIO 实时控制器中实现黑体辐射源的温度控制和实验数据的采集。实验结果表明, 此温控系统提高了黑体控温的精度, 温度稳定性优于 $0.03^{\circ}\text{C}/10\text{min}$, 并且该算法有着更强的自抗扰能力。自抗扰控制算法通过对系统状态与未知扰动进行实时的观测和有效的补偿, 提高了黑体辐射源的控温品质。

关键词: 自抗扰控制器; 黑体辐射源; 温控系统; 红外校准

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2019)03-0232-07

Temperature Control System for Blackbody Radiation Source Based on ADRC

YUN Zerong^{1,4}, WANG Zhigang^{1,2,3}, WANG Jinghui⁴

(1. Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control,
School of Mechanical Engineering, Tianjin 300384, China;

3. National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education, Tianjin 300384, China;

4. Division of Thermophysics and Process Measurements, National Institute of Metrology of China, Beijing 100013, China)

Abstract: A blackbody radiation source is used in infrared image system calibration, which requires a stable and uniform temperature field over the large cavity surface area in practical applications. In order to achieve this and improve the precision of temperature control, a temperature control system is designed and implemented on the basis of active disturbance rejection control (ADRC). First, based on a mathematical model of blackbody radiation source, the ADRC control algorithm is executed in MATLAB/Simulink environment and compared with the traditional PID and Smith predictor control algorithm. The simulation results show that the proposed ADRC algorithm possesses the features of fast response, high precision and positive set point tracking. Then, graphical programming using LabVIEW software is performed for digital discretization of the ADRC algorithm. Finally, temperature control and experimental data acquisition of the blackbody radiation source are implemented using the Compact RIO real-time controller. The experiment results show that the temperature control system has improved the performance of the blackbody radiation source, providing a temperature stability better than $0.03^{\circ}\text{C}/10\text{min}$. In addition, the algorithm has a good rapidity and strong robustness to uncertainties. The temperature control of the blackbody radiation source is improved by real-time observation and effective compensation of the system state and unknown disturbances.

收稿日期: 2018-08-01; 修订日期: 2018-12-19.

作者简介: 云泽荣 (1991-), 男, 苗族, 贵州安龙县人, 硕士研究生, 主要研究方向为能源系统与控制、红外辐射测温技术及其应用。E-mail: Yunzr1218@163.com。

Key words: active disturbance rejection control, blackbody radiation source, temperature control system, infrared calibration

0 引言

随着科学技术的不断进步和发展,红外技术在各行各业已经得到了广泛的应用,不管在工业、农业还是军事方面都涉及到它相关的概念。特别在红外成像、红外探测器及其相关领域,对它的精确度和分辨率提出了很高的要求^[1]。黑体辐射源作为一种温度标准源,在红外探测器研制过程中它常被用来作为工艺测试和鉴定试验^[2-4],特别是供多种非接触式高温仪表如光电高温计、光学高温计、辐射高温计等的分度和校验之用。在红外成像系统领域,最小可分辨温差 MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference) 对灵敏度提出了明确的要求,即黑体辐射源在较大面积区域内需具有良好的温度稳定性、均匀性和大辐射出度。因此,对黑体辐射源的温控系统进行分析研究具有实际的重要意义。

根据黑体辐射源的定义,它的控温精度和温度稳定性成为重要的性能指标,在实际应用和设计研发过程中更应该向这两个指标靠拢。传统的 PID 控制由于它的结构简单、鲁棒性好以及参数易整定等特点,在各种工业控制的应用中仍然占据着 90% 以上^[5-8]。自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[9-11]是韩京清研究员提出的一种通用控制器。它继承 PID 控制的思想精髓,面向工程实际,通过调节参数保证系统稳定,性能常可优于 PID 控制。20 年来,它在实践中不断赢得控制工程师的欢迎,被成功应用于机电系统、飞行控制、化工过程等领域,并受到控制理论界越来越多的关注^[12-14]。

本文基于 ADRC 的控制算法,通过 NI 公司的 Compact RIO 硬件平台来搭建黑体辐射源的温控系统,并在上位机上应用软件 LabVIEW 对 ADRC 控制算法进行编程,验证自抗扰控制算法的可行性与适用性。

1 黑体辐射源系统描述

黑体辐射源主要由黑体空腔、标准铂电阻温度计、温度调节器、加热器等部分组成。它的标准装置原理图和黑体空腔结构图如图 1 和图 2^[15]。

在图 1 中,通上电源,在温度调节器上设置需要的温度值,经过一系列的数模转换之后加热器就给黑体空腔进行加热,控温与测温铂电阻温度传感器实时监测黑体空腔的温度,并显示在温度调节器上。当黑体空腔快达到设定的温度值,加热功率就逐渐变小,

并保持在设定值上恒温。

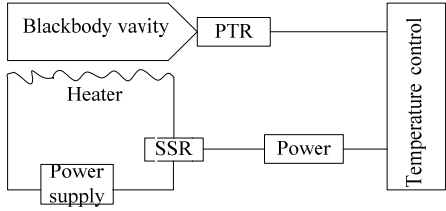


图 1 黑体辐射源标准装置原理图

Fig.1 Blackbody radiation source standard device schematic

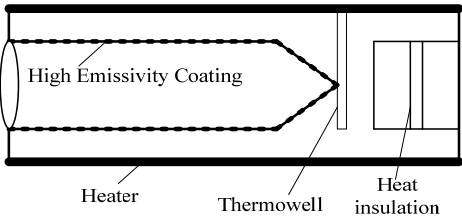


图 2 黑体空腔结构图

Fig.2 Blackbody cavity structure diagram

黑体空腔结构如图 2,黑体空腔通常为圆柱圆锥型、双圆锥型、圆柱型或者球型等。空腔内壁涂覆了一层高发射率涂层,该涂层材料的发射率一般都要求优于 0.95。在腔底处有一个温度计安装孔,用于安装控温铂电阻,在它的并排大约 20 mm 处有另外一个温度计安装孔,用于对控温仪进行校准或使黑体辐射源获得更高温度准确度。黑体空腔后部的壳体上设计了一块隔热板,尽量减少外部环境对空腔升降温的影响,以保证空腔底部与侧壁的温度均匀。

2 温控系统自抗扰设计及其仿真

2.1 自抗扰控制基本原理

韩京清构建的 ADRC 主要由跟踪-微分器 (Tracking Differentiator, TD)、扩张状态观测器 (Extended State Observer, ESO) 以及非线性状态误差反馈控制律 (Nonlinear State Error Feedback, NLSEF) 组成^[16]。

TD 结构如图 3 所示。 v 是设定值, v_1 、 v_2 是两个输出值, v_1 能够快速跟踪设定值, v_2 是它的微分信号。

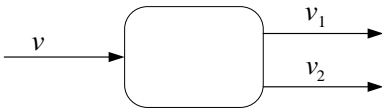


图 3 TD 结构图

Fig.3 Structure diagram of TD

本文用的是最速离散 TD, 它的数学表达式为:

$$\begin{cases} fh = fhan(v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h_0) \\ v_1(k+1) = v_1(k) + h \cdot v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h \cdot fh \end{cases} \quad (1)$$

式中: $fh=fhan(x_1, x_2, r, h)$ 为最速控制综合函数, 具体算法公式为:

$$\begin{cases} d = r \cdot h_0^2 \\ a_0 = h_0 \cdot x_2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d+8|y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2 \\ f_y = (\text{sign}(x+d) - \text{sign}(x-d))/2 \\ a = (a_0 + y)f_y + a_2(1 - f_y) \\ fhan = -r(\frac{a}{d})f_y - r \cdot \text{sign}(a)(1 - f_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中: r 是决定跟踪快慢的参数; h 是滤波因子; h_0 为采样周期。

当输入被干扰信号干扰时, 会使跟踪-微分器在进入稳态时速度曲线的超调, 将会加剧噪声放大效应, 为了解决这一问题, h_0 的取值应当不同于 h , 有效的方法是 h_0 取 h 的若干整数倍。

ESO 是 ADRC 的核心部分, 用于解决主动抗扰技术中扰动观测这一核心问题。假设系统中含有非线性动态、模型不确定性及外部扰动, 则均可用扩张状态观测器进行实时观测并加以补偿, 它可将含有未知外扰的非线性不确定对象用非线性状态反馈化为“积分器串联型”^[17], 且对一定范围对象具有很好的适应性和鲁棒性。在系统运行的过程很难避免出现高频颤振现象, 为了预防这种现象的产生, 可使用饱和函数构造一种非线性函数 ESO, 它的表达式为:

$$\text{fal}(e, a, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-a}}, & |e| \leq \delta \\ |e|^a \text{sign}(e), & |e| \geq \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中: a 为非线性度, 非线性形状与它取值的大小有关, 而函数线性段区间的大小由 δ 决定。即改造后的三阶 ESO 离散形式为:

$$\begin{cases} e = z_1(k) - y \\ fe_{01} = e \\ fe_{02} = \text{fal}(e, \alpha_{02}, \delta_0) \\ fe_{03} = \text{fal}(e, \alpha_{03}, \delta_0) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h \cdot z_2(k) - \beta_{01} \cdot fe_{01} \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) + b_0 \cdot u) - \beta_{02} \cdot fe_{02} \\ z_3(k+1) = z_3(k) + h \cdot \beta_{03} \cdot fe_{03} \end{cases} \quad (4)$$

式中: 系统状态的实时估计是 z_1 和 z_2 , 扩张状态系统总和扰动有一个估计值, z_3 在式中就是这个估计值。

ADRC 发扬了 PID 控制的精髓, 在 PID 控制器中可以用 ESO 来取代 PD 环节, 它可以根据系统的未知扰动进行实时估计并加以补偿。从而避免了 PD 环节带来的副作用。使用饱和函数 fal 改造的积分环节作为 NLSEF, 它的表达式为:

$$u_0 = \beta_1 \text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta) + \beta_2 \text{fal}(e_2, \alpha_2, \delta) \quad (5)$$

式中: β_1 、 β_2 分别为误差 e_1 、 e_2 的反馈增益, 控制信号 u_0 主要由参数 β_1 和 β_2 决定, 因此选择合适的 β_1 、 β_2 值可有效地控制 NLSEF 输出 u_0 , 系统控制输入量 u 由扰动估计补偿后得到。

$$u = (u_0 - z_3)/b_0 \quad (6)$$

最终 ADRC 的基本结构图如 4。

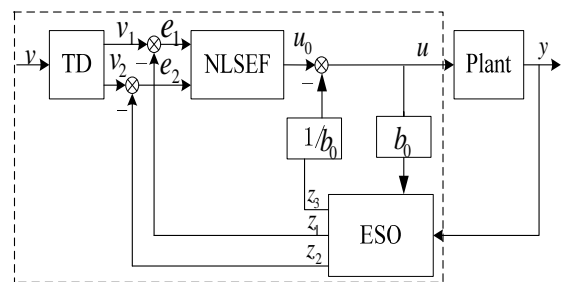


图4 二阶 ADRC 原理结构图

Fig.4 Principle structure diagram of second-order ADRC

在图 4, 二阶 ADRC 系统的设定值为 v , u 、 y 分别是控制对象的输入值和输出值, ESO 的输出 z_1 和 z_2 作为系统的两个状态变量估计值, ESO 的另一个输出 z_3 和 z_2 是总扰动的估计值。ESO 的另一个输出 z_1 和 z_2 是总扰动的估计值。 e_1 是过渡过程 v_1 与输出信号跟踪值 z_1 的误差值, e_2 是微分信号 v_2 与跟踪值 z_2 之间的误差值。

2.2 仿真研究

根据黑体炉的升降温特性曲线, 再结合文献 [18-20] 可知, 它的模型可以简化为一阶惯性加纯滞后环节。本文的仿真部分使用以下的数学模型:

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} = \frac{1.20}{70s+1} e^{-85s} \quad (7)$$

式中: K 为系统的开环增益; T 为惯性时间常数; τ 为纯滞后时间; s 是拉普拉斯变换之后传递函数习惯上专用的一个变量。

为了验证 ADRC 控制算法的可行性, 本文将 ADRC 与传统的 PID 算法和 Smith 预估计 (SP) 控制算法进行比较, 根据控制对象的传递函数, 利用 MATLAB/Simulink 软件对它进行仿真, 它的仿真模型如图 5 所示。

2.2.1 温度控制阶跃响应测试

为了测试 ADRC 与 PID 和 Smith 预估计算法的跟踪能力, 给系统一个阶跃信号输入, 其仿真结果如图 6 所示。

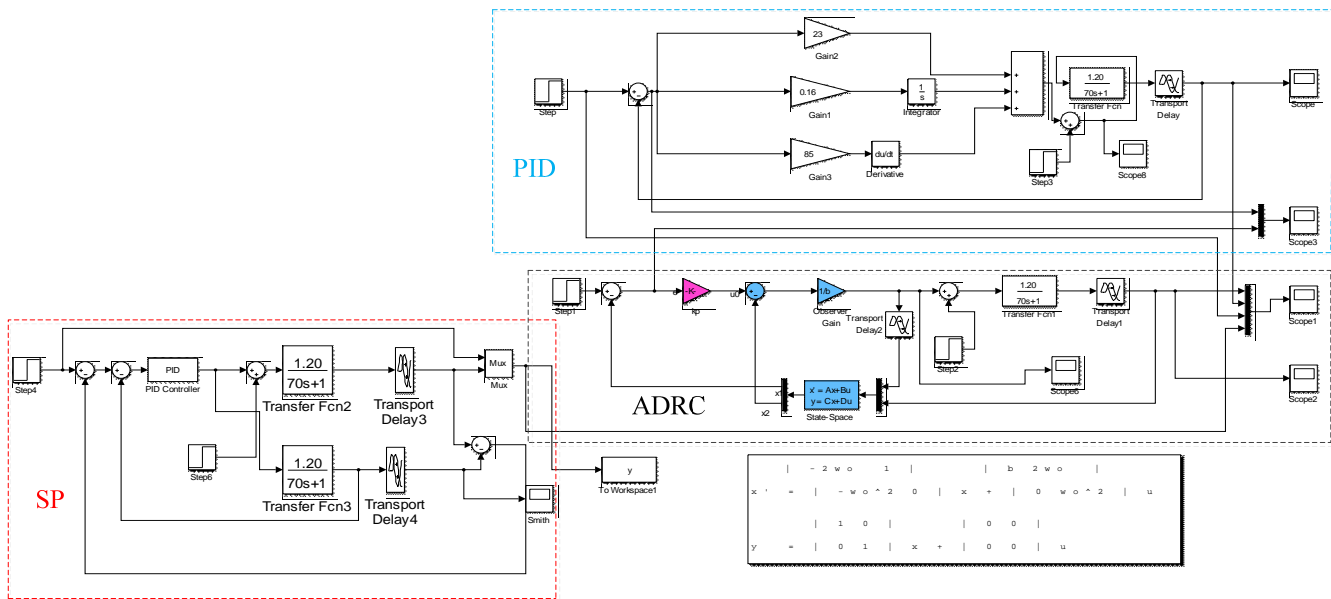


图 5 三种控制算法仿真模型图

Fig.5 Three control algorithms simulation model diagram

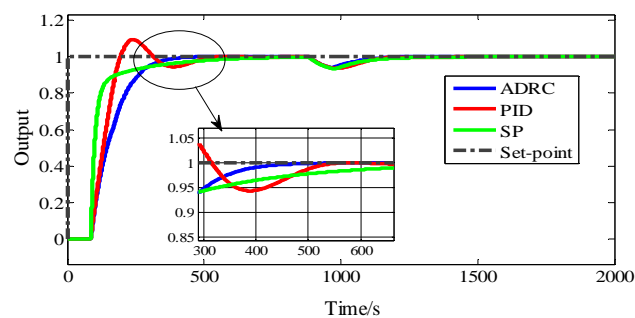


图 6 阶跃响应仿真图

Fig.6 Step response simulation

在图 6 中系统运行到 800 s 时加入一个扰动, 经过 85 s 的滞后延迟, 这 3 种控制算法都受到了它的影响, 经过 80 s 之后, ADRC 算法开始校正输出跟踪误差并稳定下来, SP 算法和传统 PID 控制算法分别用了 89 s 和 95 s。控制算法的动态性能指标主要包括上升时间 t_r 、峰值时间 t_p 、稳定时间 t_s 、超调 σ 等, 它们的性能指标见表 1。

表 1 动态性能指标比较

Table 1 Comparison of dynamic performance indicators

Dynamic property	Control algorithm		
	ADRC	SP	PID
t_r/s	490	650	198
t_p/s	-	-	248
t_s/s	500	660	750
σ	-	0.004%	1.08%

2.2.2 升温测试

在升温的过程中, 为了测试温变的稳定性, 在 40℃ 稳定之后, 重设置温度值为 80℃。在这一过程中,

ADRC 的参数值分别设置为 $w_c=0.015$ 、 $w_o=10$ 、 $b=0.017$ 。根据图 5 的仿真模型, 它的升温仿真结果如图 7, 40℃ 稳定时的结果如图 8 所示。

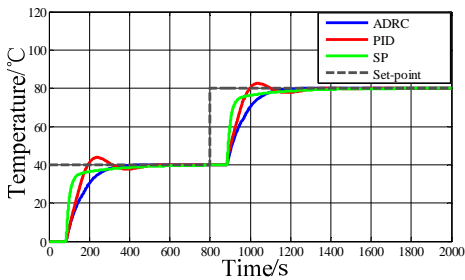


图 7 升温仿真结果图

Fig.7 Simulation diagram of warming up

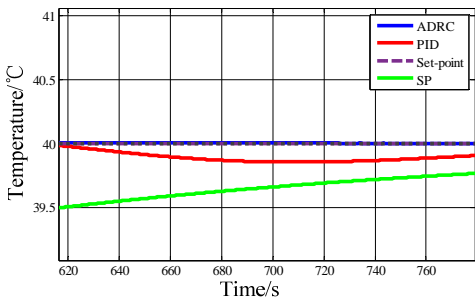


图 8 40℃ 稳定时的仿真图

Fig.8 Stable simulation diagram of 40℃

从图 7、图 8 的升温过程曲线可知, 在接近设定值或者升温曲线平稳之后, 常规 PID 和 SP 控制曲线有明显的波动, 而 ADRC 算法响应快无超调地升温到设定值, 稳定时间优于 PID 和 SP 控制算法。从 40℃ 上升至 80℃ 时, ADRC 也是无超调, 快速达到设定值, 并且上升时间和稳定时间都比其他两种控制算法短,

总体控制效果优于前面两种算法。

2.2.3 抗干扰能力测试

各种红外辐射测温设备必须有较强的抗干扰能力，黑体辐射源最普遍的用途之一作为校准标准源，这就要求必须有较强的抗干扰能力。为了测试它的抗干扰能力，随机给系统一个白噪声的干扰信号，白噪声平均功率密度的高度为±0.1，采样时间为 0.1，指定随机数生成器的起始序列为 23341。ADRC 与常规 PID 和 Smith 预估计仿真结果如下图 9。

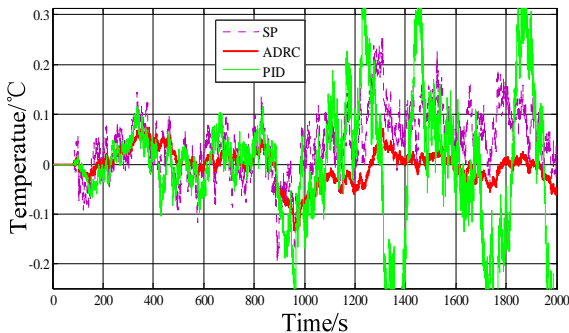


图 9 抗扰仿真效果图

Fig.9 Anti-interference simulation diagram

从图 9 可知，ADRC 控制算法的幅度在 0.07~−0.13 之间变化，这个范围就在“带限白噪声”功率值上下浮动，PID 和 Smith 预估计浮动范围远远大于±0.1 且很不稳定。总体 ADRC 干扰能力优于常规 PID 和 Smith 预估计算法。

3 实验原理及其结果

本文利用 Compact RIO 的高速数据处理能力和 LabVIEW 的图形化开发环境，基于 ADRC 控制方法实现对黑体空腔加热并对其温度进行采集、存储和处理，组成了一套可行的黑体辐射源温控系统。

3.1 实验原理

图 10 所示为黑体空腔实验原理结构图。本温控系统主要由 NI Compact RIO-9024 控制器、黑体空腔、上位机以及 C 系列 I/O 模块等构成。Compact RIO-9024 控制器共有 4 个 C 模块插孔，本文只用到 NI-9217 和 9472，另外 2 个插孔预留。NI-9217，4 通道热电偶 PT100 模块采集温度，用于采集黑体空腔的实时温度；NI-9472，8 通道 24 V 源极输出，在本文里选它作为一种 PWM 输出，通过调节占空比控制黑体空腔加热膜进行加热。上位机与 Compact RIO 实时控制器以以太网的方式通过 RJ45 网线连接，把 ADRC 控制程序部署到控制器中运行，通过 9472 模块的脉冲信号调节电流大小对加热膜进行加热，同时 9217 模块采集到的黑体空腔温度实时上传到上位机并显示出来，以便于更好地整定控制器的参数。

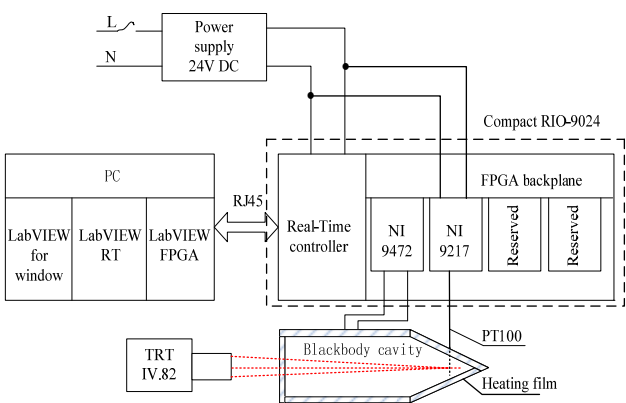


图 10 温控系统组成及工作原理

Fig.10 The composition of temperature control system and its working principle

3.2 实验结果及分析

根据图 10 所示搭建实验平台。在上位机中基于 Lab VIEW 软件对 ADRC 控制算法进行编程。图 11、图 12、图 13 分别是 TD、NLSEF 和 ESO 程序。

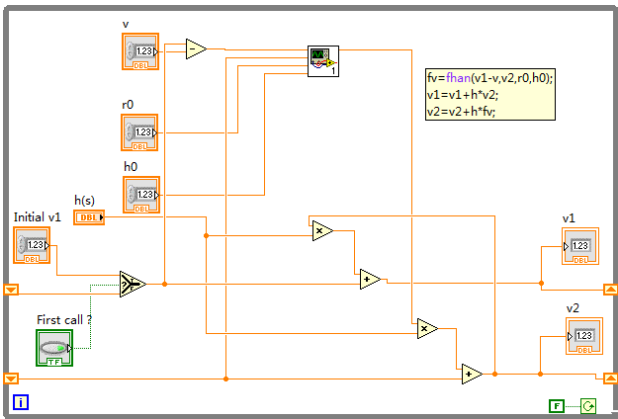


图 11 TD 的 VI 程序图

Fig.11 The VI program diagram of TD

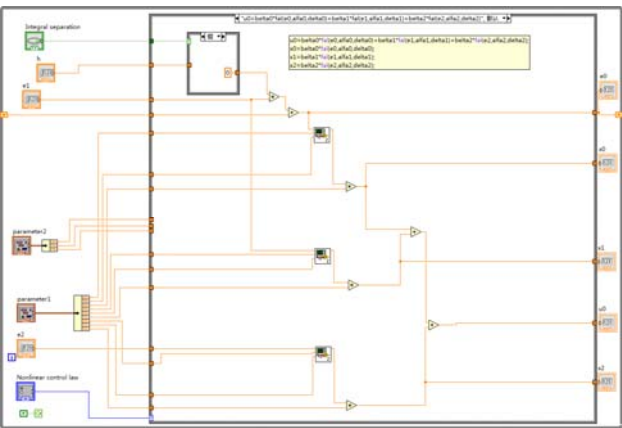


图 12 NLSEF 的 VI 程序图

Fig.12 The VI program diagram of NISEF

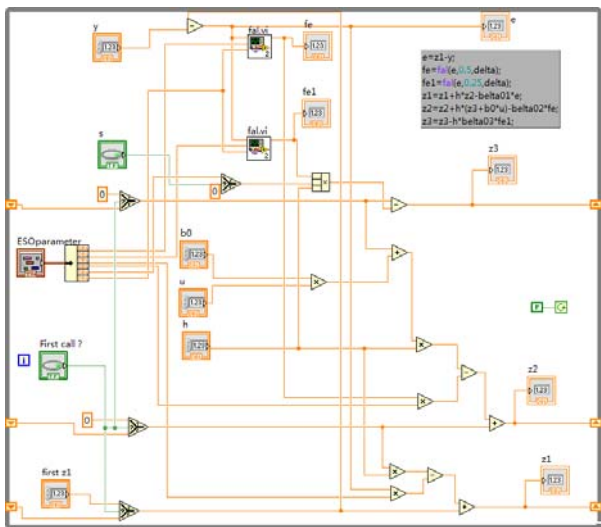


图 13 ESO 的 VI 程序图

Fig.13 The VI program diagram of ESO

根据搭建的实验平台，编好程序之后，在 LabVIEW 的人机界面设置 ADRC 的各个参数。控制采样时间间隔 $h=10\text{ ms}$ ，TD 参数 $h_0=0.1$ ， $r_0=1.2$ ；NLSEF 参数 $\alpha_1=0.85$ ， $\beta_1=30$ ， $\alpha_2=1.5$ ， $\beta_2=0.01$ ， $\delta=0.2$ ；ESO 参数 $\beta_{01}=1.2$ ， $\alpha_{02}=0.6$ ， $\beta_{02}=2.2$ ， $\alpha_{03}=0.25$ ， $\beta_{03}=0.01$ ， $\delta_0=0.02$ ， $b_0=1$ 。参数 α_1 、 α_2 、 δ 、 α_{02} 、 α_{03} 和 δ_0 可以事先确定，而需要整定的参数为 β_1 、 β_2 、 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 和 b_0 。所有参数设置好之后，将程序部署至 Compact RIO 实时控制器中，在人机界面设置 35°C ，黑体空腔从室温加热至 35°C 的结果如图 14。

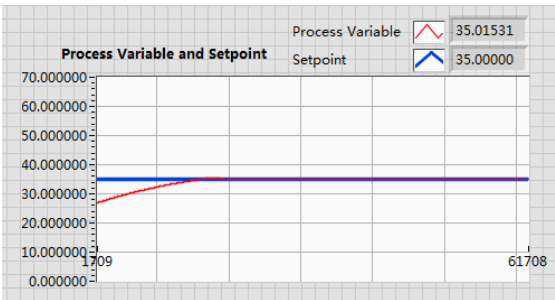


图 14 35°C 温度控制曲线

Fig.14 Temperature control curve of 35°C

控温稳定性实验是通过插在黑体腔底面测温孔中的 PT100 温度传感器测得，程序运行过程中，根据 PT100 温度传感器采集的温度，黑体空腔 30min 控温稳定性部分数据采集如图 15 所示，控温稳定性优于 $0.03^\circ\text{C}/10\text{ min}$ 。

黑体辐射源另外一个重要的指标是靶面温场是否均匀，靶面温场的均匀性与控制算法有很大的关系，为了验证 ADRC 控制算法的可行性，本实验用辐射温度计 TRT4.82（如图 16）测得该黑体空腔的温场均匀性示于表 2。

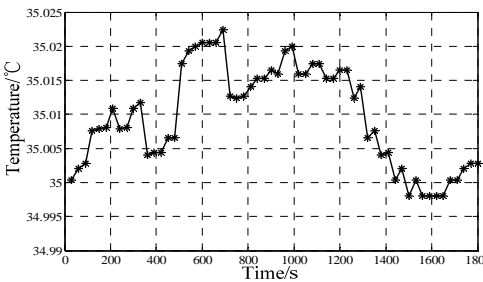


图 15 35°C 控温稳定性

Fig.15 The temperature stability of 35°C

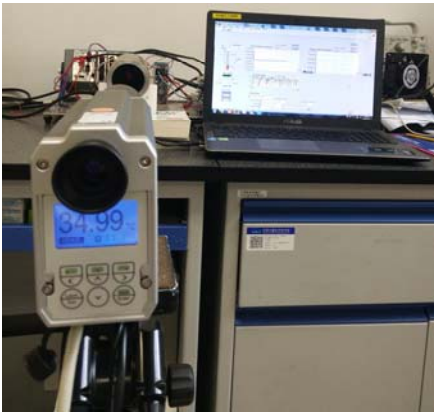


图 16 TRT4.82 测试结果

Fig.16 The test results of TRT4.84

表 2 黑体空腔 35°C 温场均匀性的测量结果

Table 2 Measurement results of temperature field uniformity of black body cavity at 35°C

Metrical location					
	center	up	down	left	right
Metrical results/ $^\circ\text{C}$	35.01	34.99	34.98	35.00	34.99

由表 2 可知，在设定温度点 35°C 并稳定之后，上、下、左、右各个点与中心点温差的绝对值分别是 0.02、0.03、0.01、0.02，这 4 组数中最大值即是该黑体空腔亮度温度的均匀性，即亮度温度均匀性为 0.03°C 。

4 结论

从黑体辐射源的温度稳定性和均匀性出发，本文将 ADRC 控制算法应用在 NI Compact RIO-9024 控制器上，组成了一套黑体空腔的温控系统。首先，在仿真部分，将该算法与常规的 PID、常规的 Smith 预估计进行仿真比较，仿真结果表明：ADRC 控制算法具有响应快、精度高以及良好的设定值跟踪能力，改善了黑体空腔的控温品质。其次，在实验部分，在上位机上通过 LabVIEW 软件编写 ADRC 控制程序，配合 NI Compact RIO-9024 控制器、NI C 系列 I/O 采集模块等搭建一个实验系统，实现了对黑体空腔温度的控制。最后，该实验验证了仿真部分 ADRC 控制算法的

可行性,根据PT100温度传感器采集到的温度,黑体空腔在10 min内控温稳定性优于 0.03°C ,达到了预期的效果,该温控系统在低温黑体辐射源将得到有效的应用。

参考文献:

- [1] 杜玉良. 大面积辐射源的理论设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
DU Yuliang. Theoretical design of large-area radiation source[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.
- [2] 王景辉, 原遵东, 柏成玉, 等. 前置反射罩氨热管黑体辐射源[J]. 光电子·激光, 2015, 26(5): 852-856.
WANG Jinghui, YUAN Zundong, BAI Chenyu, et al. An ammonia heat-pipe blackbody source with front reflector[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(5): 852-856.
- [3] 吴恩启, 徐紫红, GUO Xinxin. 光热辐射技术测量钴涂层热学参数及厚度[J]. 光电子·激光, 2015, 26(8): 1543-1548.
WU Enqi, XU Zihong, GUO Xinxin. Thermal parameters and thickness measurement of cobalt coating using photothermal radiometry[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(8): 1543-1548.
- [4] GU D Z, Walker D K. Microwave radiometry of blackbody radiation[C]//*Processing of Conference on precision Electromagnetic Measurements*, 2016: 1-2.
- [5] Sondhi S, Hote Y V. Fractional order PID controller for load frequency control[J]. *Energy Conversion & Management*, 2014, 85(9): 313-353.
- [6] Bedrich K G, Luo W, Pravettoni M, et al. Quantitative Electroluminescence Imaging Analysis for Performance Estimation of PID-Influenced PV Modules[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018, 8: 1281-1288.
- [7] ZHANG F, LI Z. Design of fractional PID control system for BLDC motor based on FPGA[C]//2018 *Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2018: 2293-2296.
- [8] HE J, ZHANG X. Comparison of the back-stepping and PID control of the three-phase inverter with fully consideration of implementation cost and performance[C]//*Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2018, 4(2): 82-89.
- [9] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
HAN Jingqing. Active disturbance rejection controller and its application[J]. *Control and Decision*, 1988, 13(1): 19-23.
- [10] 韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [11] HAN J. From PID to active disturbance rejection control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900-906.
- [12] 李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 281-295.
LI Jie, QI Xiaohui, WAN Hui, et al. Active disturbance rejection control: theoretical results summary and future researches[J]. *Control theory and application*, 2017, 34(3): 281-195.
- [13] Caifen Fu, WEN Tan. Control of unstable processes with time delays via ADRC[J]. *ISA Transactions*, 2017.
- [14] 金辉宇, 张瑞青, 王雷, 等. 线性自抗扰控制参数整定鲁棒性的根轨迹分析[J]. 控制理论与应用, 2018, 35: 1-6.
JIN Huiyu, ZHANG Ruiqing, WANG Lei, et al. Root locus analysis on parameter tuning robustness of linear active disturbance rejection control [J]. *Control theory and application*, 2018, 35: 1-6.
- [15] 王铁军, 原遵东, 段宇宁, 等. BF-50B 黑体辐射源标准装置的研制[J]. 现代科学仪器, 2003(4): 23-25.
WANG Tiejun, YUAN Zundong, DUAN Yuning, et al. BF-50B Blackbody Radiator[J]. *Modern Scientific Instrument*, 2003(4): 23-25.
- [16] 星河, 张少辉, 李自强, 等. 一种用于矩阵变换器的简化非线性自抗扰控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 48-54.
XING He, ZHANG Shaohui, LI Ziqiang, et al. A simplified nonlinear auto disturbance rejection control strategy for matrix converter[J]. *Power System Protection and control*, 2018, 46(10): 48-54.
- [17] 刘德君, 郭庆鼎, 翁秀华. 基于自抗扰控制器的交流直线永磁同步伺服电机速度控制系统[J]. 电气传动, 2005(9): 36-38.
LIU Dejun, GUO Qingding, WENG Xiuhua. Speed control system of AC Linear Permanent Magnet Synchronous Servo Motor Based on Auto-disturbance Rejection Controller[J]. *Electric Drive*, 2005(9): 36-38.
- [18] 白美卿, 高富强. 关于炉温动态特性的分析[J]. 冶金自动化, 1994(4): 8-10, 17.
BAI Meiqin, GUO Fuqiang. The distinguishing features of dynamic temperature characteristics of the heated furnace[J]. *Metallurgical automation*, 1994(4): 8-10, 17.
- [19] WANG Z, LI X, LU X. Temperature control based on a single neuron PID algorithm for a blackbody radiation source[C]//2017 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2017: 220-225.
- [20] 唐璐. 黑体炉炉温模糊自适应 PID 控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
TANG Lu. Research on fuzzy adaptive PID control of blackbody furnace temperature[D]. Changsha: Central South University, 2008.