

## 采用线性自抗扰技术的高精度温度控制系统研制

姜炎坤<sup>1</sup>, 朴亨<sup>1</sup>, 王鹏<sup>1</sup>, 李恒宽<sup>1</sup>, 李峥<sup>1</sup>, 王彪<sup>2</sup>, 白晖峰<sup>3</sup>, 陈晨<sup>1\*</sup>

1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130026;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 北京智芯微电子科技有限公司, 北京 102200)

**摘要:** 随着光电检测技术的发展, 红外气体检测技术在诸多领域有着广泛的应用。温度对于气体浓度及同位素丰度检测有着重要影响, 采用比例-积分-微分 (PID) 控制算法的传统温度控制系统存在超调、响应时间慢和精度低的缺点。针对上述问题, 首先使用 COMSOL 软件进行有限元分析, 确定加热结构; 然后以 STM32 单片机作为主控器件, 通过 16 位 AD 芯片 LTC1864 进行实时温度数据采集; 最后采用线性自抗扰算法 (LADRC) 算法调节 PWM 波, 实现控制半导体制冷器 (TEC) 对系统温度的高精度实时动态调节。在 19.8 °C 的环境温度下, 进行目标温度为 32 °C 的温控实验。结果表明, 采用 LADRC 算法的温度控制系统在稳定工作时, 温度波动标准差为 0.0357 °C, 相比于采用 PID 算法的温度控制系统, 具有无超调、响应时间快和高精度的优点。

**关键词:** 红外气体检测; 温度控制; 有限元分析; 线性自抗扰算法; 半导体制冷器

**中图分类号:** TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210813

## Research on high precision temperature control system using linear auto disturbance rejection technique

Jiang Yankun<sup>1</sup>, Piao Heng<sup>1</sup>, Wang Peng<sup>1</sup>, Li Hengkuan<sup>1</sup>, Li Zheng<sup>1</sup>, Wang Biao<sup>2</sup>, Bai Hui Feng<sup>3</sup>, Chen Chen<sup>1\*</sup>

1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. Beijing Smart-Chip Microelectronics Technology Company Limited, Beijing 102200, China)

**Abstract:** With the development of photoelectric measurement technology, infrared gas detection technology is widely used in many fields. Temperature has an important influence on the detection of gas concentration and isotopic abundance. The traditional temperature control system using proportional integral differential (PID) control algorithm has the disadvantages of overshoot, slow response time and low precision. Firstly, COMSOL software is used to determine the heating structure by finite element analysis. Secondly, the STM32 single chip microcomputer is used to collect real-time temperature data through 16 bit AD chip LTC1864. Finally, the linear auto disturbance rejection algorithm (LADRC) is used to adjust the PWM wave that achieve the high-precision and real-time dynamic adjustment of the system temperature by controlling the semiconductor cooler (TEC). Under the temperature of 19.8 °C condition, an temperature control experiments with a target temperature of 32 °C

收稿日期: 2021-11-02; 修订日期: 2021-11-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1503802); 吉林省科技发展计划项目 (20200201050JC, 20220203016SF); 吉林省发改委产业技术研究与开发项目 (2022C045-5); 长春市科技发展计划项目 (21ZGG14)

作者简介: 姜炎坤, 男, 硕士生, 主要从事红外光谱检测技术温控系统方面的研究。

通讯作者: 陈晨, 男, 教授, 博士, 主要从事红外光谱检测技术及应用方面的研究。

is carried out. The results show that the standard deviation of temperature fluctuation is 0.0357 °C. Compared with the temperature control system using PID algorithm, it has the advantages of no overshoot, fast response time and high precision.

**Key words:** infrared gas detection; temperature control; finite element analysis; linear auto disturbance rejection algorithm; semiconductor cooler

## 0 引言

目前地震、泥石流等地质灾害频发,对人民群众生命财产造成巨大损失。如果能够实现二氧化碳等气体浓度的精准检测,对于预防地质灾害有着重要的意义。实现气体检测的相关技术有很多,其中最常见的是基于朗伯-比尔原理的红外吸收光谱技术,其优点主要体现在反应快、精度高以及灵敏度高。但是该技术非常依赖高精度的温度控制,温度发生波动直接影响气体浓度测量的准确性,对检测性能有较大影响<sup>[1-2]</sup>。因此,解决气体检测过程中的温度控制问题具有重要的现实意义。

传统 PID 方法存在着控制系统误差选取不合理、对于误差微分求取不准确、积分环节会有负面影响的问题,所以目前在气体检测系统应用中对于温度的控制算法有很多研究。模糊 PID 控制算法在气体检测系统中的温度控制上得以应用,能够达到无超调的效果,但检测系统温控箱内的气体温度从 20 °C 加热到 30 °C 的过程中达到稳态的时间达到了 600 s,调节时间过长。这是因为虽然模糊控制具有一定的智能性,但模糊控制的完成需要确定精确的模糊控制规则,同时还要经历复杂的经验学习过程<sup>[3]</sup>。而采用分数阶 PID 方法对温控箱控温有着较理想的控制效果,调节时间相比于 PID 快了 15%。然而,该方法非常依赖于系统温控箱的精确数学模型,目前,控制效果只能在实验室环境下保证,在外部环境下检测受到干扰后控制质量会显著变差,精度仅为±0.08 °C<sup>[4]</sup>。而采用 BP 神经网络与传统 PID 结合的方法对温控箱进行温度控制,对环境有较强的适应性,受到干扰后 5 min 能够调整到目标温度,但仍有 5.6% 的超调<sup>[5]</sup>。目前,对于气体检测系统的温度精度和稳定性的要求越来越高,因此需要无超调、高精度以及稳定性高的控制算法来满足气体检测系统特殊需求<sup>[6-7]</sup>。

文中先从理论上介绍了 LADRC 的原理,然后通过仿真对比 PID 算法与 LADRC 算法的温度控制性

能,最后通过实验对采用 LADRC 算法的温度控制系统进行验证。

## 1 控制算法

### 1.1 LADRC 控制算法

LADRC 主要由跟踪微分器 (TD)、扩展状态观测器 (ESO) 和线性状态误差反馈控制器 (LSEF) 三部分组成,它们的结合能够有效减小温控系统的超调,并且将温控系统的外部干扰纳入内部总干扰,有较强的干扰抑制能力和适应性<sup>[8]</sup>。图 1 是 LADRC 的基本结构。

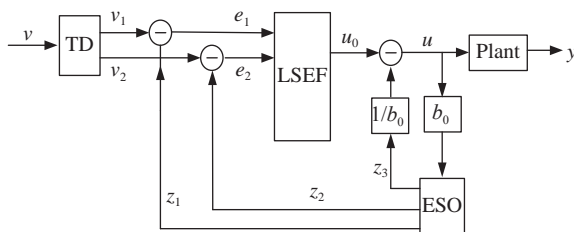


图 1 LADRC 控制器结构图

Fig.1 Photograph of LADRC controller structure

在图 1 中,  $v$  是温控系统的目标温度,  $y$  为温控系统输出的实时温度,  $u_0$  为 LSEF 计算输出的调整量,  $b_0$  是温控系统已知控制量的增益, 而  $u$  为控制器输出的调整量。LADRC 不是直接计算温控系统的温度误差值, 而是通过 TD 预先对目标温度安排过渡过程  $v_1$  以及过渡过程的微分信号  $v_2$ , 这样能够很好地解决系统超调与响应时间的矛盾。ESO 是 LADRC 的核心部分, 具有干扰跟踪和补偿的作用。它不依赖于温控系统的精确数学模型, 用温控系统的输出的实时温度  $y$  和控制器输出的调整量  $u$  来估计温控系统的状态和扰动, 由它们作为 ESO 的输入信号, 得到  $v_1$  的跟踪信号  $z_1$ 、 $v_2$  的跟踪信号  $z_2$  和具有扰动补偿作用的信号  $z_3$ 。误差信号  $e_1$  由 TD 的过渡过程  $v_1$  和 ESO 的跟踪信号  $z_1$  形成,  $e_2$  由 TD 的过渡过程微分信号  $v_2$  和 ESO 的跟踪微分信号  $z_2$  形成。它们作为 LSEF 的输入信号, 通过内部线性组合输出  $u_0$ , 再结合  $z_3$ , 用

于改变 TEC 的输入电流,从而实现气体检测系统的温度控制。

为了能够实现对于温控系统的干扰跟踪和补偿控制,需设计 TD、ESO、LSEF 的控制算法。TD 控制算法如公式 (1) 所示:

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

式中:  $e(k)$  为第  $k$  个采样时刻的偏差量;  $T$  为温控系统采样周期;  $r$  为决定跟踪速度的因子;  $h$  为滤波因子;  $fhan(e(k), v_2(k), r, h)$  为离散时间优化控制综合函数,具体算法如下:

$$\begin{cases} \delta = rh \\ \delta_0 = \delta h \\ y(k) = v_1(k) + h v_2(k) \\ a_0 = \sqrt{\delta^2 + 8r|y(k)|} \\ a = \begin{cases} v_2 + 0.5(a_0 - \delta)\text{sign}(y), |y| > \delta_0 \\ v_2 + \frac{y}{h}, |y| \leq \delta_0 \end{cases} \\ fhan = \begin{cases} -ra/\delta, |a| \leq \delta \\ -r\text{sign}(a), |a| > \delta \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\delta$  为区间长度;  $\text{sign}(x)$  为符号函数;  $\delta_0, a, a_0$  为调整参数。

扩展状态观测器 ESO 选择  $k$  时刻温控系统计算的调整量  $u(k)$  和温控系统输出的温度  $y(k)$  作为它的输入,算法实现如下:

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + T[z_2(k) - \beta_1 e(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + T[z_3(k) - \beta_2 fal(e(k), 0.5, \delta + b_0 u(k))] \\ z_3(k+1) = z_3(k) - T\beta_3 fal(e(k), 0.25, \delta) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\beta_1, \beta_2$  和  $\beta_3$  为调整参数; 目标温度跟踪信号  $z_1$ 、目标温度微分信号跟踪信号  $z_2$  分别对系统输出的实时温度及其微分信号起跟踪的作用;  $z_3$  可以估计温控系统的扰动量给出,并能反馈给系统计算的温度调整量  $u$ ;  $fal$  函数是幂函数,作用是防止出现高频振荡,具体算法为:

$$fal(e, a, \delta) = \begin{cases} e\delta^{a-1}, |e| \leq \delta \\ |e|^a \text{sign}(e), |e| > \delta \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $a$  为幂参数,  $0 < a \leq 1$ 。LADRC 线性状态误差反馈控制器的算法如公式 (5) 所示:

$$\begin{cases} e_1(k) = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2(k) = v_2(k) - z_2(k) \\ u_0(k) = \beta_{01} e_1(k) + \beta_{02} e_2(k) \\ u(k) = u_0(k) - \frac{z_3(k)}{b_0} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $e_1$  为 TD 安排的过渡过程  $v_1$  与其跟踪信号  $z_1$  的误差;  $e_2$  为过渡过程微分信号  $v_2$  与其跟踪信号  $z_2$  的误差,由它们作为线性反馈环节输入信号;  $\beta_{01}$  和  $\beta_{02}$  为 LSEF 的增益参数;  $u_0$  为 LSEF 输出的调整量。

### 1.2 参数整定

参数调整的是否合适直接能够影响温控系统的控制性能,整个 LADRC 控制器共包含 8 个参数,  $r, h, \beta_1, \beta_2, \beta_3, b_0, \beta_{01}$  和  $\beta_{02}$ 。其中  $b_0$  是与温控系统相关的常量参数,  $h$  为滤波因子较为固定。  $r$  参数足够大就可以一直保证 TD 部分有着较稳定的性能,因此较容易整定。综上所述, LADRC 控制器的参数整定工作应主要集中于 ESO 部分的参数  $\beta_1, \beta_2$  和  $\beta_3$ , 和 LSEF 部分的参数  $\beta_{01}$  和  $\beta_{02}$ 。高志强教授提出了基于系统带宽参数化算法的 ESO 参数简化整定策略<sup>[9]</sup>。基于该简化策略,对于离散型三阶线性扩张状态观测器而言,三个参数  $\beta_1, \beta_2$  和  $\beta_3$  可被简化如下:

$$\begin{cases} \beta_1 = 3\omega \\ \beta_2 = 3\omega^2 \\ \beta_3 = \omega^3 \end{cases} \quad (6)$$

而  $\beta_{01}, \beta_{02}$  与传统 PID 中的比例系数和微分系数相似,调整时可以参考 PID 的整定方法,在调整时  $\beta_1$  适当增大能够减小温控系统的超调,提高系统的调节速度,而选取合适的  $\beta_2$  可以抑制超调现象。

## 2 仿真与分析

首先采用 COMSOL 软件进行仿真分析,确定温控箱加热结构,同时在 SIMULINK 中选择 LADRC 算法和 PID 算法进行仿真对比,验证了 LADRC 算法具有无超调、调整时间快的优点。

### 2.1 加热方案仿真分析

COMSOL 基于有限体积法,将计算域离散化为一组控制体积,在这些控制体积上求解质量、动量、能量、组分等。将偏微分方程组离散为代数方程组,用数值方法求解代数方程组以获取流场解<sup>[10-11]</sup>。

通用守恒方程如公式 (7):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varphi dV + \oint_A \rho \varphi dA = \oint_A \Gamma_\varphi \nabla \varphi dA + \int_V S_\varphi dV \quad (7)$$

式中:  $V$  为体积;  $A$  为面积;  $\Gamma_\varphi$  为广义扩散系数;  $\nabla$  为那勃勒算子。

温控箱可选的温控方案目前有 TEC 放置在温控箱前后、左右以及温控箱的四面, 如图 2 所示。

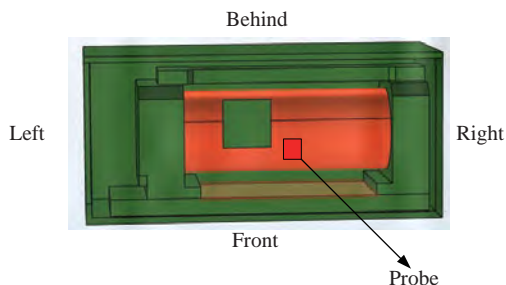


图 2 温控方案及探针示意图

Fig.2 Photograph of temperature control scheme and probe

在气室中选取图 2 所示红点作为探针, 探针为气室内一点, 选取目的是比较不同温控方案的温控精度。在 COMSOL 中分别对以上三种不同温控方案进行仿真, 设定目标温度 293 K, 结果如图 3~图 5 所示。

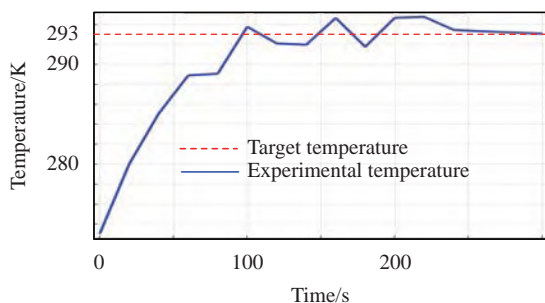


图 3 左右温控方案曲线

Fig.3 Left and right temperature control scheme curve

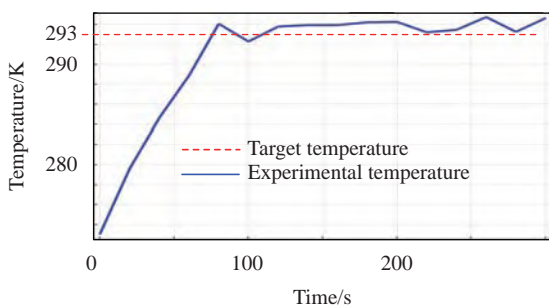


图 4 四面温控方案曲线

Fig.4 Four sides temperature control scheme curve

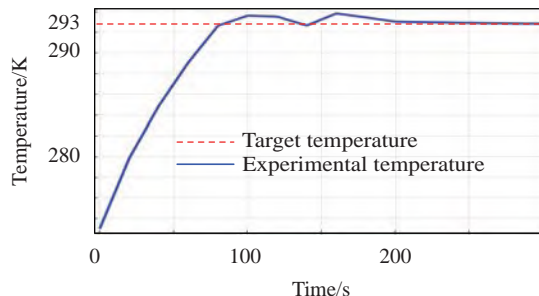


图 5 前后温控方案曲线

Fig.5 Front and behind temperature control scheme curves

如图 3 所示, 采用左右结构的温控方案, 温度波动较大达到了 2.7 °C, 同时调节到稳定的时间为 270 s; 如图 4 所示, 采用四面结构的温控方案, 温度波动为 2.3 °C 但调节时间为 300 s。而图 5 所示前后结构的温控方案, 温度波动仅为 0.8 °C, 同时在 210 s 就达到了稳定。所以前后方案对于多通池温控效果最好, 图 6 为最终系统温控箱的结构示意图。

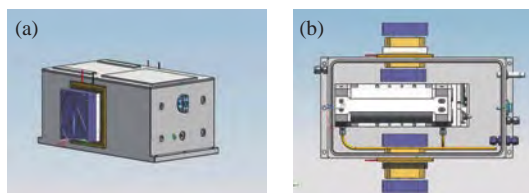


图 6 系统结构图

Fig.6 Diagram of system structure

如图 6 所示, 在温控箱前后放置 TEC, 同时在 TEC 上添加风扇更有利于热量传递, 该结构可以有效保证温控箱进行高精度和快速响应的温度控制, 从而满足红外气体检测的使用需求。

### 2.2 LADRC 控制算法仿真

为了验证 LADRC 的控制性能, 利用 SIMULINK 采用传统 PID 算法与其进行仿真比较。在 SIMULINK 中设定从起始温度 19.8 °C 加热到目标温度 32 °C, 分别采用 PID 和 LADRC 算法进行仿真实验, 实验结果如图 7 所示。

红色曲线代表 PID 算法温控结果, 深蓝色曲线代表 LADRC 算法温控结果。在温度控制过程中 PID 算法表现出明显超调, 需经过 250 s 的调整时间后达到稳态。而 LADRC 算法只需 160 s 调整后达到稳定状态, 并且没有出现超调。LADRC 具有无超调、调整时间快的优点, 其动态性能明显优于 PID 控制。在

此过程中 LADRC 扩张状态观测器 ESO 中目标温度微分信号及其跟踪信号的结果如图 8 所示。

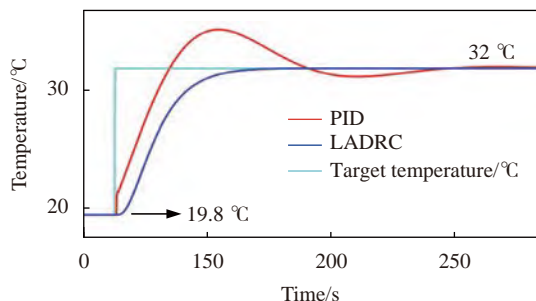


图 7 LADRC 和 PID 控制性能比较

Fig.7 Control performance comparison between LADRC and PID

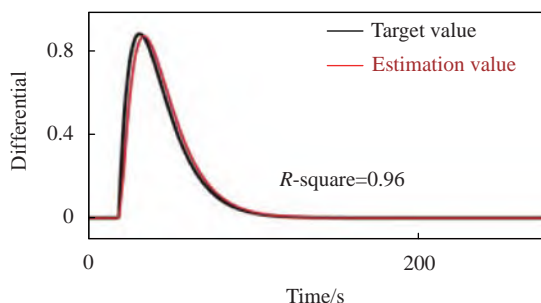


图 8 微分信号跟踪曲线

Fig.8 Differential signal tracking curves

图 8 中黑色曲线为设定过渡过程的微分信号,红色曲线为 ESO 对其跟踪的效果。ESO 为实际估计部分,直接能够体现控制器的性能,  $R$  方值为 0.96,表明实际曲线与目标值曲线相关程度非常好,两线重合度较高,说明 LADRC 控制器控制效果较好<sup>[12-13]</sup>。

### 3 实验验证

气体检测温度控制系统由液晶显示屏、单片机、数模转换模块 (A/D)、TEC 驱动电路、温度传感器等组成,如图 9 所示。

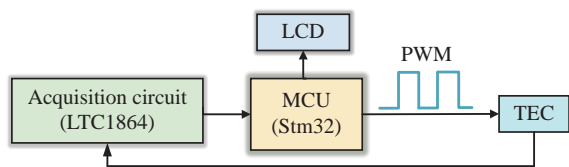


图 9 硬件系统组成图

Fig.9 Photograph of hardware system composition

温度采集电路利用 A/D 模块实时采集气室的温度,然后通过 SPI 通信协议传输至单片机,在单片机

中通过 LADRC 算法将采集的温度值与设定值进行比较后得到最佳控制量,调整对应的 PWM 占空比驱动 TEC,从而实现对气室的实时目标温度控制。

#### 3.1 温控算法超调对比

在实验室环境条件下对两种算法进行温控超调对比实验,温控曲线如图 10 所示,黑色曲线代表温控过程中 PID 的温控结果,红色曲线代表 LADRC 的温控结果。

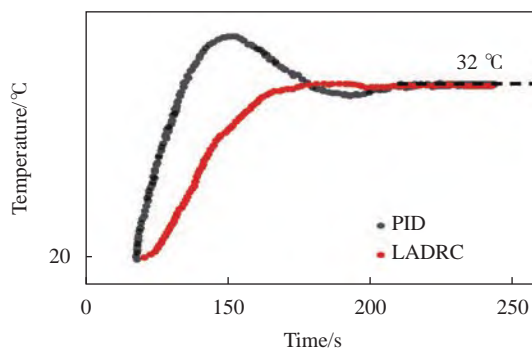


图 10 LADRC 和 PID 超调量对比

Fig.10 Overshoot comparison between LADRC and PID

实验室温度为 19.8℃,在该温度下设定温控箱温控目标温度 32℃,PID 算法温控曲线呈先上升后下降的趋势,均超过目标温度 32℃,最后达到稳定,有明显超调。LADRC 算法温控曲线上升平缓,无超调,快速调节到目标温度 32℃并达到稳定状态。

#### 3.2 温控算法稳定性对比

以 32℃ 为目标温度进行长时间测量,测量时间为 400 s,采集样本点 2 000 个,结果如图 11 所示。其中蓝色曲线代表 PID 的温度控制稳定性,红色曲线代表 LADRC 的温度控制稳定性。

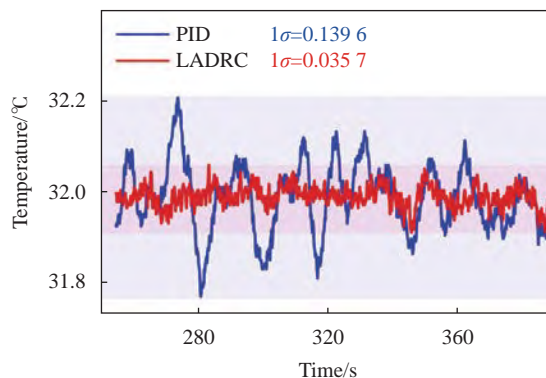


图 11 LADRC 和 PID 稳定性对比

Fig.11 Stability comparison between LADRC and PID



PID 算法下的温度标准差为 0.1396 °C, 而 LADRC 算法下的温度标准差仅为 0.0357 °C, 表明 LADRC 算法比 PID 算法有着更高的控制精密密度。通过上述实验证明 LADRC 算法具有高精度、无超调的优点, 其控制性能明显优于 PID 算法。

### 3.3 控制算法响应时间对比

对温控箱进行环境外部扰动干扰实验, 结果如图 12 所示, 黑色曲线代表 LADRC 算法的温度控制结果, 红色曲线代表 PID 算法的温度控制结果。

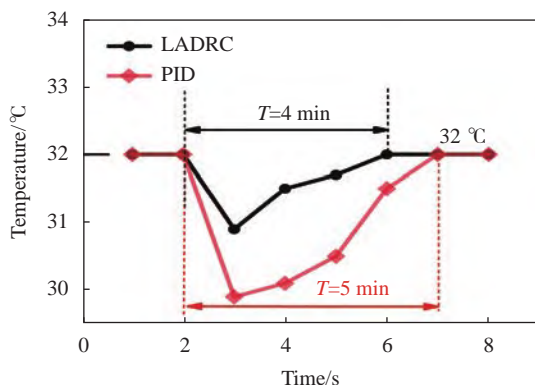


图 12 LADRC 和 PID 响应时间比较

Fig.12 Response time comparison between LADRC and PID

在受到环境外部扰动后, PID 算法下的温度受到了较大干扰, 有明显的下降趋势, 从初始的 32 °C 最低温度降到了 29.8 °C, 且调整 5 min 后才回到目标预设温度, 而 LADRC 算法下的温度从 32 °C 最低降到 31 °C, 调整时间仅为 4 min, 相比较之下, LADRC 比 PID 有更强的抗干扰性能和更快的响应时间。

## 4 结 论

针对传统采用 PID 算法的温度控制系统存在超调、响应时间慢、精度低的问题, 采用线性自抗扰算法, 控制温度标准差达到 0.0357 °C, 响应时间相比 PID 算法快了 1 min, 实现了精度高、无超调、抗干扰的目的。下一步拟计划采用系统模型补偿方法降低 ESO 的观测负担, 这样能够解决传统 ESO 在复杂环境下由于扰动量大而造成精度降低的问题, 使气体检测系统能够在更复杂的环境下稳定工作, 为气体浓度及同位素丰度检测提供了广阔的应用前景。

### 参考文献:

[1] Ren Q, Wang Y, Chen C. A prototype of high-precision carbon

isotopic ratio sensing system for CO<sub>2</sub> dissolved in water [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(12): 9813-9821.

[2] Ren Q, Chen C, Wang Y. A prototype of ppbv-level mid-infrared CO<sub>2</sub> sensor for potential application in deep-sea natural-gas-hydrate exploration [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 7200-7208.

[3] Bao M. Laser temperature control system based on fuzzy theory and neural network [J]. *Laser Journal*, 2017, 38(10): 123-126. (in Chinese)

[4] Dharmendra Tiwari, Nikhil Pachauri, Asha Rani, et al. Fractional order PID (FOPID) controller based temperature control of bioreactor[C]//2016 International Conference on Electrical, Electronic and Optimization Technology, ICEEOT 2016: 2968-2973.

[5] Jia J W, Li W, Chai H, et al. Gas detection technology algorithm based on TDLAS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0517007. (in Chinese)

[6] Chen C, Ren Q, Piao H. A trace carbon monoxide sensor based on differential absorption spectroscopy using mid-infrared quantum cascade laser [J]. *Micromachines*, 2018, 9(12): 670.

[7] Hou Y, Huang K J. Development on temperature and pressure control system for multi-pass gas cell utilized in infrared gas detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20190525. (in Chinese)

[8] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900-906.

[9] Gao Z. Active disturbance rejection control: A paradigm shift in feedback control system design[C]//2006 American Control Conference, IEEE, 2006: 7.

[10] Wen Kang, Li Hezhang, Ma Zhuang, et al. Effects of spot size on the temperature response of an aluminum alloy irradiated by a continuous laser [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1023-1031. (in Chinese)

[11] Yu X D, Zhang P F, Tang Jianxun, et al. Finite element analysis and experiments of temperature fields of mechanically dithered ring laser gyroscopes [J]. *Optics Precision Engineering*, 2010, 18(4): 913-920. (in Chinese)

[12] Yi X, Wang Z G, Xia Tao, et al. Research on temperature field in the vapor cell of nuclear magnetic resonance gyroscope [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 671-677. (in Chinese)

[13] Ma H L, Sun M G, Cao Z S, et al. Cryogenic cell for low-temperature spectral experiments of atmospheric molecules [J]. *Optics Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2617-2621. (in Chinese)