

一种引入滤波的 PID 控制算法在温控系统的应用*

姚立平¹, 刘伟章², 吴文明¹, 姜杨阳¹, 雷鹏¹, 谭仲威¹, 王康宁¹, 李桂香¹,徐飞¹, 唐元梁¹, 吴新社¹, 黄德群¹, 陈军¹, 顾珩¹

(1.广东省科学院健康医学研究所, 广东 广州 510500; 2.华南农业大学 数学与信息学院, 广东 广州 510642)

摘要: 为了使得温控系统响应更加稳定, 在 PID 控制算法中引入了三阶离散滤波器对输入信号进行滤波, 去除了抖动噪声, 输出更为平稳的响应结果; 此外, 设计了一种基于 STM32 微控制器为控制核心的温度调控系统, 由铂电阻 Pt1000 和 MAX31865 构成温度采集模块, 由半导体制冷器 TEC 和 H 桥逻辑器构成温度调节模块, 上位机软件与下位机系统使用 USB 串口通信, 将接收的实时的温度数据进行引入滤波的 PID 调节, 将调节输出值发送给下位机软件实现一次闭环的温度调节控制。实验结果表明, 引入滤波器的 PID 控温方法要优于结合 Bang-Bang 的 PID、引入微分先行 PID、步进式 PID、变积分 PID, 提高了抗干扰的能力, 在工程温度控制方面具有一定的实用价值和应用价值。

关键词: 温控系统; PID 控制算法; 三阶离散滤波器; 半导体制冷器 TEC

中图分类号: TP29; TF325.64

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211847

中文引用格式: 姚立平, 刘伟章, 吴文明, 等. 一种引入滤波的 PID 控制算法在温控系统的应用[J]. 电子技术应用, 2022, 48(6): 79-83.

英文引用格式: Yao Liping, Liu Weizhang, Wu Wenming, et al. Application of PID algorithm by using filter in temperature control system[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(6): 79-83.

Application of PID algorithm by using filter in temperature control system

Yao Liping¹, Liu Weizhang², Wu Wenming¹, Jiang Yangyang¹, Lei Peng¹, Tan Zhongwei¹, Wang Kangning¹,Li Guixiang¹, Xu Fei¹, Tang Yuanliang¹, Wu Xinshe¹, Huang Dequn¹, Chen Jun¹, Gu Heng¹

(1. Institute of Medicine and Health, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510500, China;

2. College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to make the response of the temperature control system more stable, the third-order discrete filter is introduced in PID control algorithm to filter the input signal, which eliminates the jitter noise and makes the outputs more steady. Besides, a temperature control system based on STM32 micro-controller is designed. The temperature acquisition module is composed of platinum resistance Pt1000 and MAX31865, and the temperature regulation module includes semiconductor cooler TEC and H-bridge logic. The computer software communicates with the control system through USB serial port. The received real-time temperature data is used in PID control algorithm by introducing filter, and the output value is afterwards sent to the computer software to realize a closed-loop temperature control process. The experimental results show that the PID algorithm with filter outperforms PID combined with Bang Bang, differential first PID, step PID and variable integral PID, which improves the ability of anti-interference and has the practical value and application value in engineering temperature control.

Key words: temperature control system; PID control; third-order discrete filter; semiconductor cooler TEC

0 引言

随着科学技术的进步及工业的发展, 温度测控技术占有很大的促进作用^[1]。由于温控系统具有时变性、非线性及纯滞后性等特点, 因此精确的数学模型无法建立, PID 控制算法因为其控制原理简单、稳定性好、调整方

便、容易实现等优点, 越来越多在工业控制领域应用^[2-3]。

由于采集的实时系统温度携带着干扰噪声, 因此本文引入了三阶离散滤波器对输入信号进行滤波, 提高了 PID 控制方法的抗干扰能力; 同时, 设计了一款以 STM32 为控制核心的闭环温度控制系统。使用四线制的铂电阻

* 基金项目: 广东省科技厅科技计划项目(2019A050510026); 省基-面上项目(2020A1515010954); 省重点领域重大项目(2018B090904004); 广东省科学院科技计划(2021GDASYL-20210103028, 2020GDASYL-20200402002, 2021GDASYL-20210102012, 2018GDASCX-0103); 中国博士后科学基金面上项目(2020M6823631)

Pt1000 和 MAX31865 的温度采集电路;使用半导体制冷器 TEC 和 H 桥驱动器构成温度升降调节模块,采集的实时温度使用 USB 串口通信传输到上位机 PC 端,上位机软件依据当前的实时温度与设定的温度使用引入滤波的 PID 调节,将 PID 输出值反馈到下位机系统中,同时上位机软件具有实时的温度曲线、调节的功率曲线以及温度梯度曲线显示,下位机具备液晶屏显示、声光指示及按键存储等功能。

1 温控系统的总体结构

本文所设计的温度控制系统总体结构包括硬件和软件部分,如图 1 所示。在硬件组成方面,该套系统选取性能更为强大的 ARM Cortex® -M7 内核的 STM32F103 微处理器为控制核心^[4];由于传统的数字温度传感器如 DS18B20 存在着精度低、响应速度慢、稳定性一般等问题^[5],而铂电阻 Pt1000 具有体积小、测量精度高、稳定性好等优点^[6],因此采用四线制的铂电阻 Pt1000 和 MAX31865 构成的模块采集系统温度。其中采用的 MAX31865 模块含有 15 bit 高分辨率的 Σ - Δ 型 ADC,能够将 Pt1000 采集的模拟信号高精度地转换为数字信号^[7]。选用半导体制冷器 ATE1-TC-127-8AH 作为系统的循环冷热元件,它是一种利用半导体材料构成 P-N 结,形成热电偶对,产生帕尔贴效应的热电制冷技术^[8]。H 桥驱动器改变 TEC 半导体两端的电流方向从而实现系统的制冷或加热效果,同时使用 PWM 调节即通过产生不同时间的高低电平使得半导体制冷器处于开关状态,设置其 PWM 的占空比来控制半导体制冷器的工作时间,因而控制了半导体制冷器的制冷效率。上位机软件通过 USB 通信方式获取实时的温度信息和系统的运行状态,并根据设定的温度和当前的温度进行引入滤波的 PID 控制调节,计算得到的 PID 输出值通过 USB 串口发送到下位机软件,并作为 PWM 的占空比调节系统的功率,使得系统达到指定的温度,实现了一次闭环的温度调节控制;此外,下位机系统具有运行指示灯和声音提示功能,液晶屏显示当

前的运行状态和温度信息;上位机软件具有实时的温度曲线、功率曲线以及误差曲线显示功能。图 2 显示实际测得的系统 40 个升降温循环的实时的温度曲线、功率曲线及误差梯度曲线图。可见该系统能够稳定实现升降温切换,同时能有效地在升温过程中控制温度在 95℃,降温过程控制温度在 65℃,具有系统响应速度快、超调量小、误差小等优点。

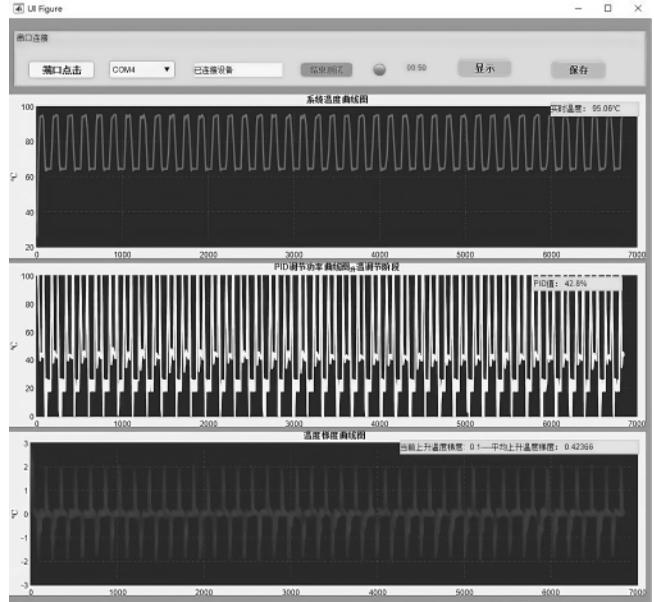


图 2 系统 PC 端升降温循环曲线显示

2 温度控制算法

常规的 PID 控制器由比例单元(P)、积分单元(I)和微分单元(D)组成^[9]。其中,比例运算单元是按比例反映系统的偏差,比例系数越大,调节的速度越快,但过大的比例系数会造成系统的稳定性下降;积分运算单元的引入是为了消除系统的稳态误差,提高无差度,积分时间常数越小,积分作用越强;微分运算单元是反映系统偏差的变化率,能够产生超前的控制作用,因此可改善系统的动态性能。离散的 PID 控制器表达式如式(1)所示^[10]:

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

其中:k 为采样序列号,u(k)为第 k 个的 PID 调节输出值,e(k)为第 k 个的输入温度偏差值,e(k-1)为第 k-1 次采样时刻的输入温度偏差值,K_p 为比例系数,T_i 为积分系数,T_D 为微分系数。

在温度控制系统中,由于常规的 PID 调节控制原理简单,容易实现,稳态无静差,因此广泛用于工业过程控制中,并取得了良好的控制效果,但也存在它的局限性和不足,因此为了提高 PID 的

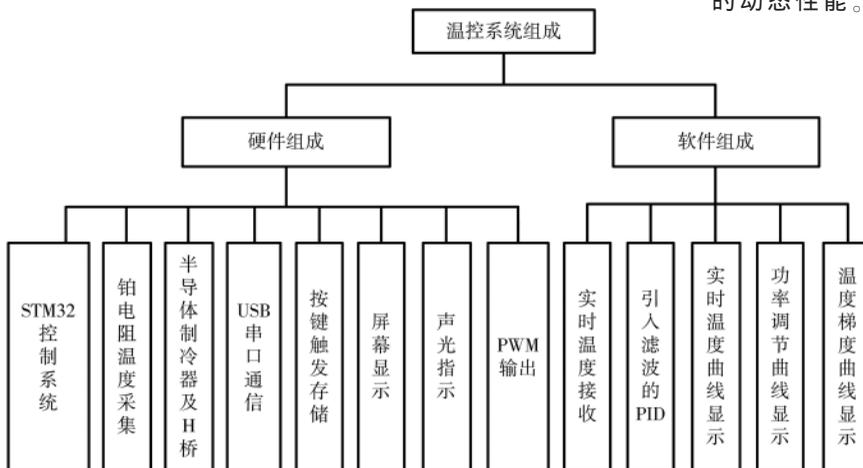


图 1 系统总体结构

适应能力,提出了许多改进的PID控制方法^[11-12]。

为了加快温度调节的时间,引入了Bang-Bang控制方法^[13],即当温度偏差 $e(k)$ 大于阈值 u_0 时,则使用Bang-Bang控制方法,系统满功率运行,加快系统输出量的收敛速度;当温度偏差 $e(k)$ 不大于阈值 u_0 时,则进行PID温度调节。步进式PID控制算法^[14]是采用步进式积分分离PID控制,使得信号一步一步逼近系统的设定信号,使得系统平稳,避免系统产生超调,但存在系统响应速度慢等缺点。在常规的PID方法中引入积分环节的目地主要是为了消除静态误差,提高控制精度,但累积了较大的偏差值会引起系统较大的超调,从而引起系统的不稳定,因此改变积分项的累加速度,即当偏差越大时,积分则越慢,反之则越快,实现积分项的累加速度随着误差值的改变而改变^[15]。在PID控制器中引入的微分调节能够加快系统的调节速度,但同时也引入了高频干扰,引入的微分先行方法可以对高频信号进行滤波,减少系统不稳定^[16]。

由于采集的实时系统温度会携带着干扰噪声,因此本文采用引入滤波的PID控制方法。为了保证滤波后幅值不变,设计的三阶离散滤波器为:

$$F(z-1)=a_1+a_2z^{-1}+a_3z^{-2} \quad (2)$$

其中,系数 a_1, a_2 满足 $2a_1+a_2=1$ 。

设输入温度信号为 $y(t)$,设定的目标温度值为 $y_r(t)$,连续的PID控制方程如下:

$$u(t)=K_p[e(t)+\frac{1}{T_i}\int e(t)dt+T_d\frac{de(t)}{dt}] \quad (3)$$

$$e(t)=y_r(t)-f(z)*y(t) \quad (4)$$

其中, $f(z)$ 为引入的三阶滤波器,*为卷积运算。

3 实验结果分析

3.1 温控系统仿真分析

被控系统的传递函数为 $G(s)=\frac{e^{-80s}}{60s+1}$,采样时间为20s,滤波器参数 $a_1=0.1, a_2=0.2$,输入信号为 $y_d(t)=\text{sgn}(\sin(0.0001\pi t))$,系统不引入滤波的PID控制方法和引入滤波的PID控制方法的响应结果如图3所示。可以

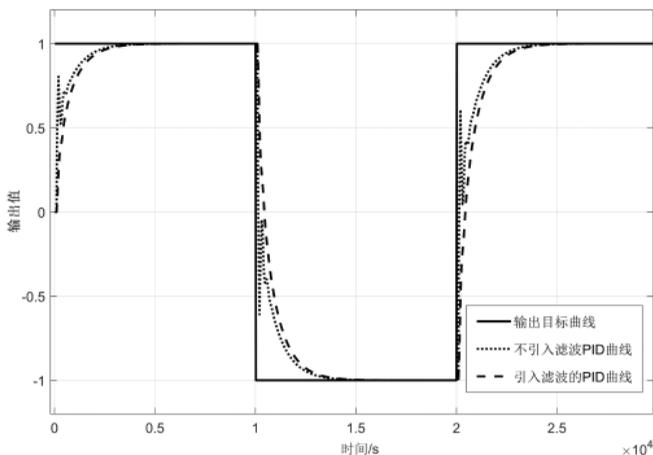
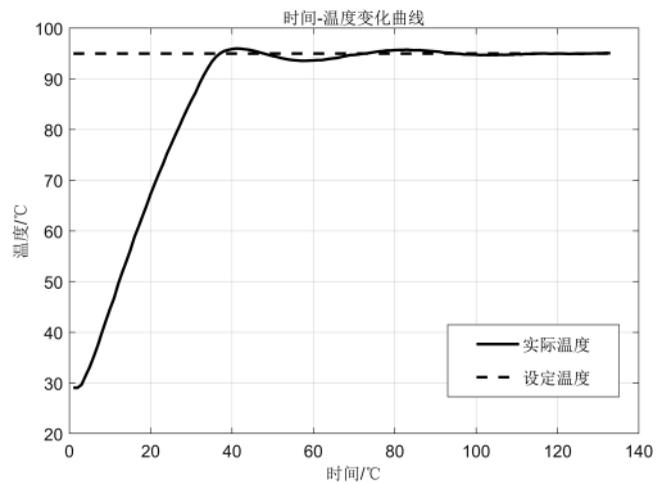


图3 系统的仿真响应虚线图

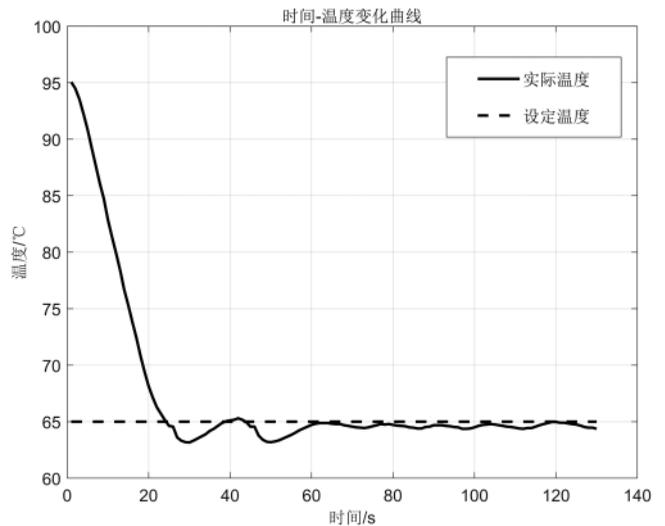
看出,未引入滤波的PID温度调控算法其跟踪信号产生抖动,而引入了滤波的PID控制方法,其输出的响应结果更加平稳,消除了控制过程的抖动变化,提高了系统的温度调节性能。

3.2 设计的温控系统分析

改变半导体制冷片两端的电流,使得系统处于加热升温或着制冷降温模式,图4表示引入滤波的PID控制算法后系统的时间-温度曲线图;图4(a)显示的是系统从常温30℃开始加热升温,设定的升温稳定温度为95℃的时间-温度曲线图,图4(b)显示的是系统从高温95℃下制冷降温到设定的稳定温度65℃的时间-温度曲线图。



(a) 升温过程的时间-温度曲线



(b) 降温过程的时间-温度曲线

图4 系统时间-温度曲线图

由图4(a)和图4(b)可知,引入滤波的PID控制方法能够使得系统较为稳定地升温或者降温到设定的目标温度,具有系统响应速度快、超调量小、控制精度较高等特点。图5显示了系统多次升温到指定温度95℃和系统多次降温到指定的温度65℃的时间-温度曲线图,可

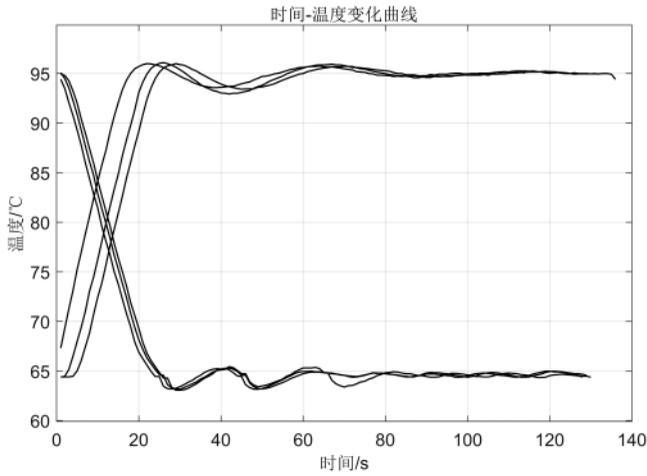


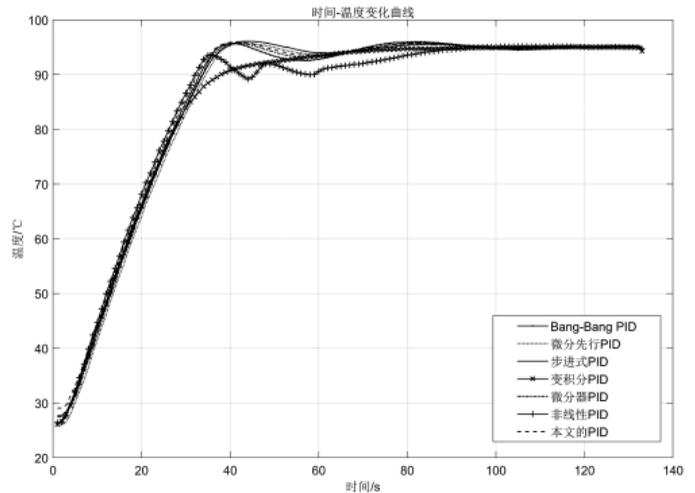
图 5 系统多个升/降温时间-温度曲线图

以看到引入滤波的 PID 控制算法能够使得系统多次稳定地达到设定的温度,并保持在设定的温度附近,系统的误差较小,控制精度较高,提高了系统的温度调控性能。

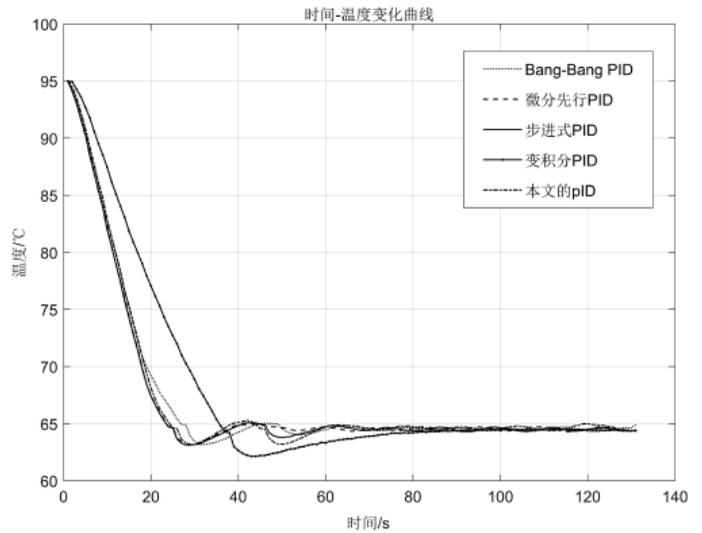
系统多个升降温循环的温度调节曲线、功率调节曲线及误差变化曲线如图 6 所示。可以看出,引入滤波的 PID 控制方法能够依据当前的温度和设定的温度进行调节输出 PID 功率值,进而调节系统的 PWM 的占空比,使得系统能够可靠稳定地调节到指定的温度下;同时,在温度调节稳定时,误差曲线基本保持不变,使得误差控制在小范围之内,进一步提高了系统的温度调控性能。

为了进一步探究引入滤波的 PID 控制方法在温控系统的良好的适应性性能,本文还分析了结合 Bang-Bang 的 PID 温控算法、引入微分先行的 PID 温控算法、步进式 PID 温控算法及变积分 PID 温控算法的性能,各自的升温时间-温度曲线图和降温时间-温度曲线图分别如图 7(a)和如图 7(b)所示。

由图 7(a)和图 7(b)可以看出,各个改进的 PID 控制算法都能使得系统从常温 30 °C 加热升温到设定的高温 95 °C,或者从高温 95 °C 制冷降温到低温 65 °C。但可以明显地看出,相对于其他的温度控制方法,引入



(a) 升温过程比较曲线



(b) 降温过程比较曲线

图 7 系统时间-温度比较曲线图

滤波的 PID 控制方法在温度调控方面系统响应速度快,且较为稳定可靠地到达指定的温度附近且保持不变,提高了温控系统的性能,进一步说明了基于滤波器的 PID 控制方法在温控系统的有效性。

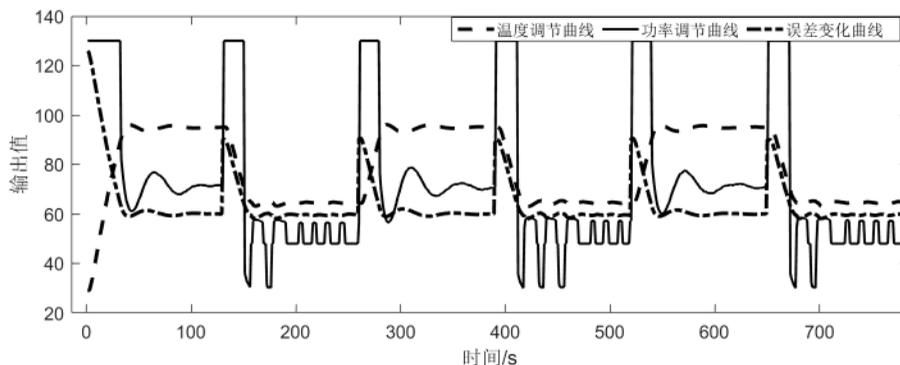


图 6 系统温度调节、功率调节及误差变化曲线

令设定温度和调节稳定温度之间的温度差为 $e(t)$, 本文也使用了温度误差平方 $e^2(t)$ 的积分平均 ISE 指标^[17] 来进一步量化评估该算法的性能。表达式如下:

$$ISE = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T e^2(t) dt} \quad (5)$$

结合 Bang-Bang 的 PID 控制算法、引入微分先行的 PID、步进式 PID、积分式 PID 及本文引入滤波的 PID 等各控制算法在升温过程、降温过程及总过程 ISE 指标值如表 1 所示。可以看出, 在上升过程, 引入滤波的 PID 控制方法仅有 20.169, 而结合 Bang-Bang 的 PID、引入微分先行的 PID、步进式 PID 和积分式 PID 都分别达 20.633、21.546、20.796 和 20.897; 另外, 在降温过程, 引入滤波的 PID 控制方法系统的误差评估为 7.559, 而结合 Bang-Bang 的 PID、引入微分先行的 PID、步进式 PID 和积分式 PID 分别为 7.478、7.304、7.294、9.108, 引入滤波的系统平均误差评估为 13.864, 而结合 Bang-Bang 的 PID 为 14.055, 引入微分先行 PID 为 14.425, 步进式 PID 为 14.045, 而积分式 PID 为 15.002。因此, 总体上, 引入滤波的 PID 控制方法控制系统的误差要优于其他的 PID 控制方法, 特别是升温过程中特别明显, 改善了温控系统的整体控制精度, 具有一定的工程温度调控应用。

表 1 多种 PID 温度控制算法的误差对比

算法	上升过程的误差	下降过程的误差	平均误差
Bang-Bang PID	20.633	7.478	14.055
微分先行 PID	21.546	7.304	14.425
步进式 PID	20.796	7.294	14.045
积分式 PID	20.897	9.108	15.002
本文的 PID	20.169	7.559	13.864

4 结论

本文使用了高性能、处理速度快的 ARM Cortex®-M7 内核的 STM32F103 微处理器为温控系统的控制核心, 使用了测量精度高、稳定性好的铂电阻 Pt1000 来采集系统的温度, 使用了半导体制冷器和 H 桥驱动电路来实现系统的升降温以及使用 PWM 来调节系统的功率; 此外, 还设计了一套 PC 端的上位机软件, 专门负责引入滤波的 PID 控制算法处理分析以及实时的温度曲线、功率曲线、误差变化曲线实时显示; 同时对系统运行状态控制功能, 上位机软件和下位机控制系统通过 USB 串口进行通信。由于采集的实时系统温度携带着干扰噪声, 为了提高 PID 控制方法的抗干扰能力, 本文引入了三阶离散滤波器对输入信号进行了滤波。通过对温控系统仿真分析和使用多种 PID 控制方法在温控系统的性能比较分析, 结果表明引入滤波的 PID 算法的温控效果要优于其他的 PID 温度控制方法, 如结合 Bang-Bang PID、引入微分先行 PID、步进式 PID 及积分式 PID 等; 能够有效地去除调节过程地抖动信号, 具有系统响应速

度快、超调量小、控制精度高等优点, 在工程温度控制方面具有一定的实用价值和应用价值。

参考文献

- [1] 陈明方, 臧家秀, 张永霞. 一种多区域空冷式高低温精确温控系统的研究[J]. 电子科技, 2020, 33(6): 46-51.
- [2] 杨成晨, 张九根. 基于灰色预测模糊 PID 算法的空调房间温度控制[J]. 电子技术应用, 2012, 38(4): 56-59.
- [3] HUANG Q, SHE Q, LIN X. Adaptive fuzzy PID temperature control system based on OPC and modbus/TCP protocol[C]// 2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics(CAR 2010). IEEE, 2010, 2: 238-241.
- [4] 陈玉敏, 谢玮, 孟宪民. 基于 STM32 的温度控制实验设计[J]. 现代电子技术, 2016, 39(12): 37-40.
- [5] 顾剑, 李彬. 基于 DS18B20 的多点测温监测系统的设计[J]. 电子科技, 2018, 31(3): 61-64.
- [6] BELLITTI P, BODINI A, BORGHETTI M, et al. A compact low-power wireless system for in vivo evaluation of heat and moisture exchanger performance[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 30(2): 025701.
- [7] 胡俊, 李珺颖. 一种 CAN 总线药温采集装置设计[J]. 机电产品开发与创新, 2017, 30(3): 84-86.
- [8] 戴崎哲, 戴曙光. 基于单片机的温度控制箱研究与设计[J]. 电子科技, 2017, 30(8): 165-168.
- [9] 唐玉红. PID 控制方法研究[J]. 电子世界, 2019(7): 65-66.
- [10] 吴志强, 于莲芝, 孔梦君. 基于数字 PID 切换控制的 Buck 变换器研究[J]. 电子技术应用, 2019, 45(1): 109-113.
- [11] 张小明, 于纪言, 王坤坤. 自抗扰 PID 四旋翼飞行器控制方法研究[J]. 电子技术应用, 2019, 45(3): 84-87.
- [12] 汪灵, 叶会英, 赵闻. 半导体激光器温度控制系统设计与算法仿真[J]. 仪表技术与传感器, 2013(5): 95-98.
- [13] 朱双双, 邹鹏, 路美娜, 等. 基于 Bang-Bang 和 PID 复合控制的红外探测器温控系统设计[J]. 红外技术, 2017, 39(11): 990-995.
- [14] 董艺, 司文凯. 基于步进式 PID 控制的直流电机启动控制系统研究[J]. 通化师范学院学报, 2019, 40(2): 12-15.
- [15] 董海运, 肖航. 积分分离与变速积分 PID 算法的比较研究[J]. 仪器仪表用户, 2009, 16(2): 79-80.
- [16] 李林升, 丁鹏, 钟成. 不完全微分与微分先行的农业机器人巡航 PID 控制算法[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 45-49.
- [17] 严晓照, 张兴国. 增量式 PID 控制在温控系统中的应用[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2006, 5(4): 48-51.

(收稿日期: 2021-06-08)

作者简介:

姚立平(1994-), 男, 硕士, 主要研究方向: 智能控制、生理信号处理等。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所