

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0006.003

基于 Smith 预估型模糊 PID 温度控制系统的设计*

戴世纪, 王仲根

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:针对室内温控系统中响应时延大、稳定性较差以及超调量大等问题,设计一种基于 Fuzzy-Smith 滞后补偿型 PID 温度系统,将 Smith 补偿型控制器加入回路系统中,提前预判对象的性能,反馈到调节器,以此补偿过程误差,并通过 Matlab 软件设计模型;实验结果可知:传统 PID 算法和 Fuzzy-PID 算法的上升速度较快,但稳态品质较差,调节能力较弱;Smith 算法的超调量相比其他算法小,能够使系统保持较好的鲁棒性,但曲线上升时间和系统调节时间较慢;Fuzzy-Smith 控制的温度上升较快,超调量很小,调节到稳定温度值所花时间较少,明显改善温控系统的性能,能够达到预期的稳态特性;算法能有效地抑制纯滞后的影响,降低系统的超调量,加速响应过程。

关键词:模糊控制;Smith 预估;温度控制;纯滞后

中图分类号:TP273 文献标志码:A 文章编号:1672-058X(2020)06-0013-06

0 引言

PID 算法是工业应用最广泛的算法之一,其中 P 是比例系数, I 是积分系数, D 是微分系数,同时通过反馈回路形成闭环控制系统,最能体现反馈思想的控制系统,具有结构简单、易于实现等优点,但在复杂工况的工业场景中难以取得预期的理想结果。为了在工业中广泛应用,许多科技人员开展大量研究。文献[1]设计一种常用的 Fuzzy-PID 算法控制系统温度,对 PID 整定值进行在线调整,使其具有较好的适应能力。文献[2]建立了模糊神经网络 PID 算法的结构模型,在模糊 PID 算法中引入神经网络模型,解决了系统纯滞后的问题,具有较强的鲁棒

性。文献[3]通过粒子群算法得到 PID 系数,利用闭环负反馈的 PID 结构实现对系统的温度在线调整。文献[4]提出了一种综合滤波算法用来消除噪声对温度信号的干扰,对电压信号进行滤波消噪处理,利用综合滤波算法为基础并辅以模糊自适应 PID 控制温度,此方法可消除多数噪声。文献[5]方法通过蚁群算法获取一组最佳的 PID 系数 K_p 、 K_i 、 K_d ,具有良好寻优的特性,在规定范围内进行高效启发式搜索找到最优解。但上述控制系统操作复杂,成本较高,参数控制困难,难以在保证系统性能的前提下,提高操作可行性。

为提高温控系统性能,解决温控系统中产生超调量较大的扰动,响应时间较长等问题^[7]。设计一种基于 Fuzzy-Smith 滞后补偿型 PID 温控系统,系统

收稿日期:2019-01-06;修回日期:2019-02-19.

* 基金项目:国家自然科学基金项目(61401003).

作者简介:戴世纪(1995—),男,安徽合肥人,硕士研究生,从事智能控制研究.

在一般 PID 算法上改进,将模糊推理环节加入 PID 控制中,并通过 Smith 算法减少系统的波动幅度,改善温控的稳态品质,降低响应时间,提高控制过程的鲁棒性^[8]。

1 温度控制系统结构

1.1 室内温度控制模型

由于室内温度控制系统设计较为复杂,其延迟时间、增益系数和时间常数反映了温度控制的动态特性^[9]。因此,室内温度模型的传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{Ts+1} \quad (1)$$

式(1)中, K 为增益参数, τ 为时滞时间, T 为时间常数。考虑实际情况,实验温度控制初值为 18 °C,根据 Cohen-Coon 整定法可得出 $K=1$, $T=10$, $\tau=5$,因此,函数的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{10s+1}e^{-5s} \quad (2)$$

1.2 模糊控制规则

模糊控制通过事先设定的规则表使控制器由自我学习和组织的功能,以特定的语言变量建立映射关系,完成模糊推理,并将结果输出到控制器,规则表体现了系统的偏差值、偏差变化量与系统输出之间的映射^[10]。控制流程如图 1 所示。

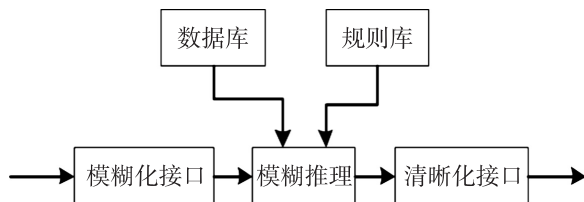


图 1 模糊控制流程图

Fig. 1 Fuzzy control flow chart

一般情况下,温度模糊控制系统选择预定温度和实际温度的偏差 e 及偏差变化率 ec 作为模糊控制器的输入,系统的决策部分选用的是 Mamdani 算法。规则库是由若干条控制规则组成,按照 IF...is...and...is...THEN...is...的形式表达。根据实践经

验,具体的系统规则如表 1 所示。

表 1 K_d 模糊控制规则表

Table 1 K_d fuzzy control rule table

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NM	PM	PS	Z	PS	NB	NS	Z
NS	PB	PM	PS	PS	PS	PM	PB
Z	PB	PM	PS	PS	PS	PM	PB
PS	PM	PB	PS	Z	PS	PM	PB
PM	Z	NS	NM	NB	Z	PS	PM
PB	NB	NB	NB	Z	PS	PM	PB

2 模糊 PID 及 Smith 预估器

2.1 模糊 PID

模糊控制是基于模糊逻辑的描述一个过程的控制算法,缺点是难以消除稳态误差,稳态精度较低^[11]。因此,在传统 PID 算法中引入模糊推理算法,加快响应速度,提高系统的稳定性,是一种常见的控制方法。具体传统 PID 控制流程如图 2 所示。

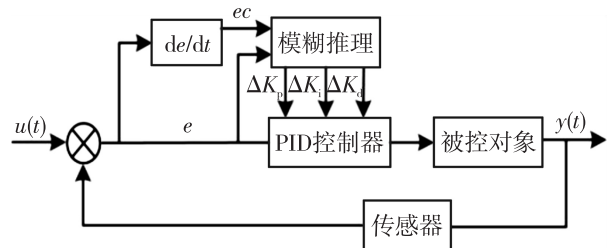


图 2 常规 PID 控制流程图

Fig. 2 General PID control flow chart

系统是两输入三输出的模糊控制结构,得到模糊推理的输出量是调整值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,通过将推理输出值代入以下公式,得出最佳 PID 调整值。如式(3)所示:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + G_p \times \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + G_i \times \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + G_d \times \Delta K_d \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, K_p 为实际 PID 控制的参数, K_{p0} 为 PID 的参数整定值, G_p 为比例因子。计算机控制中常用的 PID 控制的表达式如式(4)所示:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dx + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

式(4)中, K_p 为比例参数, K_i 为积分参数, K_d 为微分参数。 K_p 能够提高系统的响应速度^[12]。 K_i 可以消除系统的稳态误差。 K_d 用来增强系统的动态特性,对系统偏差进行预报。

2.2 Smith 预估器控制

Smith 算法是一种对滞后环节预判的时延补偿算法。其主要思想是被控对象包含着纯滞后环节,使系统调节能力下降,一般 PID 算法不能取得良好的效果。在此情况下,加入含有滞后部分 $G(s)(1-e^{-\tau s})$ 的 Smith 补偿型算法,以降低被控系统的震荡幅度,克服了一般 PID 算法的缺陷,加快响应速度。其控制流程如图 3 所示。

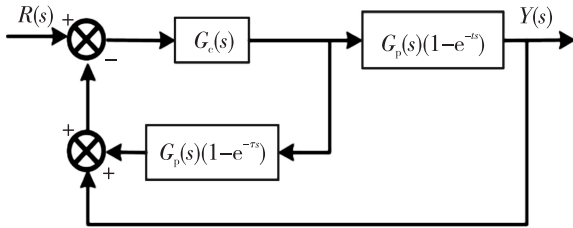


图 3 Smith 预估器控制

Fig. 3 Smith preestimator control

由图 3 的流程图可知,含有滞后补偿的反馈回路与 Smith 算法结合的闭环函数表达式如式(5)所示:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}} \quad (5)$$

式(5)中 $G_c(s)$ 为系统函数表达式, $G_p(s)e^{-\tau s}$ 含有纯滞后被控系统的函数式。在式中系统存在着延时特性 $e^{-\tau s}$,为了克服系统的延时特性,在控制系统的回路中加入补偿环节 $G_p(s)e^{-\tau s}$,使系统过程提前了 τ 时刻,消除了系统的纯滞后环节 $e^{-\tau s}$ 部分,即经过了预估补偿。因此,通过与时延补偿环节结合后,闭环回路的函数表达式转化为式(6)所示:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_p(s)} \quad (6)$$

将模糊控制引入 Smith 预估控制中,并在反馈回路上加入 Smith 预估器用于提前预测调整系统的超调量,构成 Smith-Fuzzy 控制系统。其流程如图 4 所示。

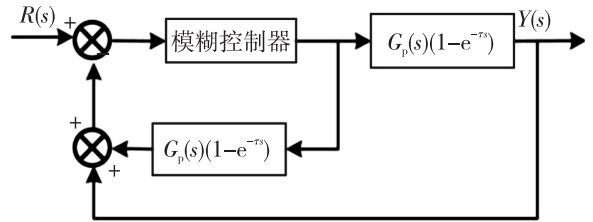


图 4 Smith-Fuzzy 预估控制系统

Fig. 4 Smith-fuzzy predictive control system

3 系统仿真及结果分析

3.1 仿真过程

基于 Matlab 建立温控仿真系统,设置目标温度为 20 ℃,系统时间为 200 s。其中,模糊控制的输入系数 $K_e=0.01$, $K_{ec}=4$,模糊控制的输出系数分别为 $G_p=0.01$, $G_i=0.0015$, $G_d=0.0035$,PID 控制器的整定初始参数为 $K_{p0}=0.82$, $K_{i0}=0.13$, $K_{d0}=1$ 。其中常规 PID 控制仿真如图 5 所示。

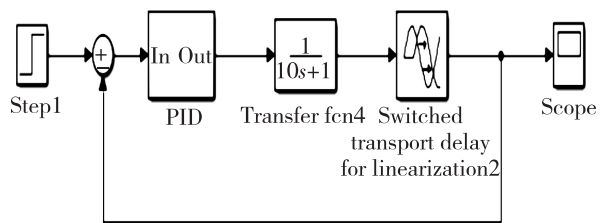


图 5 常规 PID 控制仿真图

Fig. 5 General PID control simulation diagram

为了比较 Fuzzy-Smith 算法优化后的效果,将其与 Fuzzy-PID 算法、一般 PID 算法和 Smith 型 PID 控制进行比较,4 种控制方案如图 6 所示。

3.2 结果分析

实验结果如图 7 所示,一般 PID 算法温度最大值为 25.7 ℃,震荡幅度为 28.5%,响应时间约 115 s 后达到稳定;Fuzzy-PID 算法的最高温度为 23.6 ℃,震荡幅度为 18%,响应时间约 105 s 后温度达到稳

定;Smith 算法的温度没有明显的振荡产生,响应时间约为 70 s 后温度达到稳定;Fuzzy-Smith 控制温度

的最高温度 20.8 °C,振荡幅度仅为 4% 左右,调节时间约为 60 s 后温度达到稳定值。

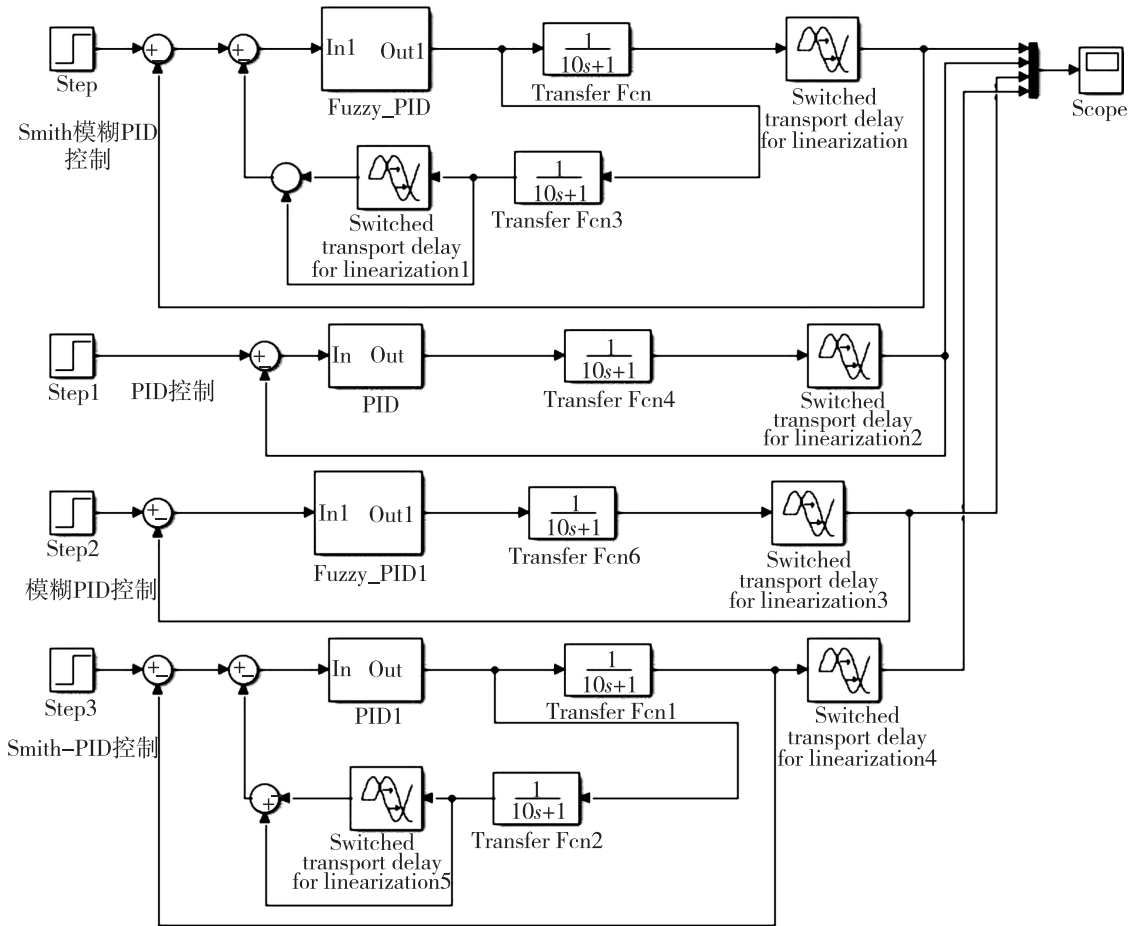


图 6 4 种温控方案的结构图

Fig. 6 Structure diagram of four temperature control schemes

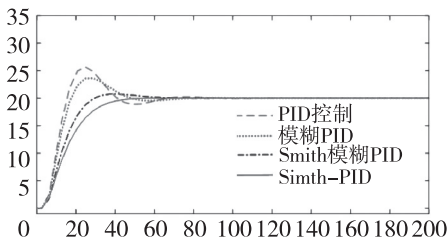


图 7 4 种控制方法系统响应调节

Fig. 7 Four control methods response adjustment

通过对结果分析可知,传统的 PID 算法和模糊 PID 算法的上升速度较快,但超调量较大,系统稳态误差较大,适应力较弱,调节能力较差;Smith 算法的超调量相比其他算法小,能够使系统保持较好的鲁棒性,但曲线上升时间和系统调节时间较慢。Fuzzy-Smith 算法的温度上升较快,振荡幅度相比其

他控制方法较小,几乎可以不记,而调节到稳定温度值所花时间较少,可以明显改善温控系统的性能,增强调节能力和抗干扰能力,曲线上升时间快,时间延迟短、具有比较理想的稳态品质。具体参数性能由表 2 可以看出。

3.3 系统抗干扰能力分析

为了比较系统在不同情况下的抗干扰能力,在 $T=85 \sim 90$ s 处预先在 PID 控制系统中加入一个幅值为 4 的阶跃干扰信号,仿真结果如图 8 所示。图 8 可以看出:4 种控制系统受到干扰后都产生了 1 次明显振荡,其中模糊 PID 控制系统受干扰后产生较大的曲线波动,受到干扰影响较强,最大波峰变化量为 8.5%,而模糊 Smith-PID 控制受到阶跃干扰信

号较小,最大波峰变化量仅为 6.5%,保持了较好的稳定性和控制精度,具有良好的抗干扰性能。

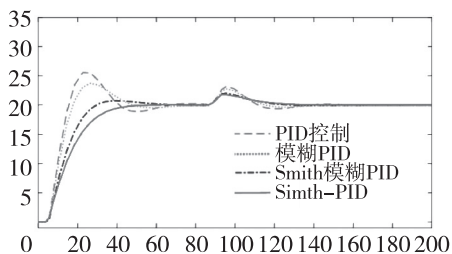


图 8 加入干扰后系统调节情况

Fig. 8 System adjustment after interference is added

表 2 4 种算法调节结果

Table 2 Four algorithms adjustment results

控制方式	上升时间 /s	超调量 /%	调节时间 /s	稳态误差 /°C	干扰变化 /%
PID	23	28.5	115	0	10
模糊 PID	28	18	105	0	8.5
Smith 控制	45	0	70	0	7
Fuzzy-Smith	35	4	60	0	6.5

4 结 论

建立了室内温控系统的数学模型,针对室内温度控制系统具有调节弱、纯滞后和非线性的特点,提出一种基于 Fuzzy-Smith 补偿型的 PID 控制算法。实验结果表明, Fuzzy-Smith 型算法充分发挥了 Smith 算法的滞后补偿作用,与其他方法相比, Fuzzy-Smith 控制系统能够抑制系统的超调量,加快调节响应速率,通过对控制系统时滞性进行补偿提高控制对象的稳态特性,同时还具有模糊推理方法的优势,达到预期的系统特性。

参考文献 (References):

[1] 王德志. 基于模糊 PID 的注塑机料筒熔料温度自动控制[J]. 合成树脂及塑料, 2019, 36(4):70—72
WANG D Z. Automatic Control of Melt Temperature in Injection Molding Machine Based on Fuzzy PID [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(4):70—72 (in Chinese)

[2] 赵世海, 韩雪. 基于模糊神经网络 PID 的焙烘机温度

控制[J]. 天津工业大学学报, 2019, 38(4):83—88
ZHAO S H, HAN X. Temperature Control of Curing Machine Based on Fuzzy Neural Network PID[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2019, 38(4):83—88 (in Chinese)

[3] 齐志超, 陈伟, 穆春元, 等. 基于粒子群自整定 PID 算法的激光器温度控制系统[J]. 激光技术, 2019, 43(5):650—654
QI Y C, CHEN W, MU C Y, et al. Laser Temperature Control System Based on Particle Swarm Self-tuning PID Algorithm[J]. Laser Technol, 2019, 43(5):650—654 (in Chinese)

[4] 李幸, 周凤星, 严保康. 基于综合滤波算法与模糊 PID 控制的温度控制系统[J]. 仪表技术与传感器, 2019(3):77—81
LI X, ZHOU F X, YAN B K. Temperature Control System Based on Integrated Filtering Algorithm and Fuzzy PID [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(3):77—81 (in Chinese)

[5] 刘智城, 杨向宇. 基于蚁群算法分数阶 PID 控制器在温度控制系统的应用[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5):218—220
LIU Z C, YANG X Y. Application of Fraction PID Controller Based on Ant Swarm Algorithm in Temperature Control System[J]. Machine Building Automation, 2018, 47(5):218—220 (in Chinese)

[6] 李捷菲. 基于 BP 神经网络的 PID 控制系统研究与设计[D]. 长春:吉林大学, 2019
LI J F. Research and Design of PID Control System Based on BP Neural Network[D]. Changchun: Jilin University, 2019 (in Chinese)

[7] 刘畅, 田大庆, 周敏. 拥有预估补偿技术的模糊 PID 硅炉窑温度控制方法[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2018, 37(3):89—95
LIU C, TIAN D Q, ZHOU M. A Forecast Compensation Fuzzy PID Control Method of Furnaces Temperature[J]. Journal of Xihua University, 2018, 37(3):89—95 (in Chinese)

[8] 刘亭莉, 黄廷磊. 基于模糊 Smith 方法的温控系统仿真研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(2):170—174
LIU T L, HUANG T L. Simulation of Temperature Control System Based on Fuzzy Smith Control [J]. Computer

- Integrated Manufacturing Systems, 2010, 27 (2): 170—174 (in Chinese)
- [9] 夏华伟, 熊智新, 胡慕伊. Fuzzy-Smith 控制器对漂白温度控制的研究 [J]. 中华纸业, 2013, 34 (22): 36—38
- XIA H W, XIONG Z X, HU M Y. A Research on Fuzzy-Smith Controller in Bleaching Temperature Control System [J]. China Pulp & Paper Industry, 2013, 34 (22): 36—38 (in Chinese)
- [10] HUANG H C, ZHANG S Q, YANG Z. Modified Smith Fuzzy PID Temperature Control in An Oil-replenishing Device for Deep-sea Hydraulic System [J]. Ocean Engineering, 2018, 149: 14—22
- [11] ZHANG M, PABLO B, ROMEO O, et al. PID Passivity-Based Control of Port-Hamiltonian Systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63 (4): 1032—1044
- [12] SHEN J, XIN B, CUI H Q. Control of Single-Axis Rotation INS by Tracking Differentiator Based Fuzzy PID [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53 (3): 2976—2986

Design of Fuzzy-PID Temperature Control System Based on Smith Predictive Model

DAI Shi-ji, WANG Zhong-gen

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232001, China)

Abstract: In order to solve the problems of the indoor temperature control system, such as response time lag, long adjustment time and large overshoot, a fuzzy PID temperature control system based on Smith estimation model is designed. To compensate the dynamic characteristics of the process, the Smith estimation controller is added to the feedback control system, and the simulation model is established by Matlab software. The experimental results show that the traditional PID algorithm and Fuzzy-PID algorithm have fast rising speed, but poor steady state quality and weak adjustment ability. Compared with other algorithms, the overshoot of Smith algorithm is small and it can make the system maintain good robustness, but the curve rise time and system adjustment time are slow. The temperature controlled by fuzzy-Smith rises rapidly, the overshoot is small, and it takes less time to adjust to the stable temperature value, which can significantly improve the performance of the temperature control system and achieve the expected steady-state characteristics. This algorithm can effectively suppress the effect of pure hysteresis, reduce the overshoot of the system and accelerate the response process.

Key words: fuzzy control; Smith prediction; temperature control; pure hysteresis

责任编辑: 田 静

引用本文/Cite this paper:

戴世纪, 王仲根. 基于 Smith 预估型模糊 PID 温度控制系统的设计 [J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2020, 37(6): 13—18

DAI S J, WANG Z G. Design of Fuzzy-PID Temperature Control System Based on Smith Predictive Model [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(6): 13—18