

【工程与技术研究】

Smith 预估-线性自抗扰组合温度控制系统设计

周宣征, 张公永

(滨州学院 电气工程学院, 山东 滨州 256603)

摘 要:针对传统大滞后温度控制系统存在闭环稳定性差、超调量过大、调节时间过长、抗干扰能力差、结构与调参复杂等问题,提出了 Smith 预估-线性自抗扰组合温度控制系统。引入 Smith 预估器,可以将被控对象($G_O(s)e^{-\tau}$)纯滞后环节 $e^{-\tau}$ 抵消,即将被控对象等效为 $G_O(s)$,保证闭环系统稳定性。采用线性自抗扰控制技术(LADRC),可将系统“未知扰动”通过线性扩张状态观测器进行估计,通过反馈消除干扰,提高控制精度,降低超调量,缩短调节时间。通过建立 Smith 预估模型和 LADRC 模型,分析预估器抵消纯滞后环节原理。仿真结果表明,Smith-LADRC 系统保证了闭环系统稳定性,与 Smith-PID 相比,调节时间减少了 65.486 s,超调量减少了 19.44%;加入外部扰动后,Smith-LADRC 比 Smith-PID 超调量减小 1.24%,调节时间减小 50.406 s,整个系统抗干扰能力、鲁棒性、稳定性更强,响应速度更快。

关键词:线性自抗扰控制;Smith 预估;Smith-LADRC

中图分类号: TP 273 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.cnki.1673-2618.2022.06.012

温度是四大热工参数之一,温度控制系统广泛应用于工农业生产过程中,其控制精度、稳定性、超调量等性能直接影响产品质量的好坏。常规比例积分微分(Proportional Integral Differential, PID)在遇到非线性、大滞后、大惯性、大干扰、动态特性复杂情况时,容易出现闭环稳定性差、超调量过大、抗干扰性差等问题,目前大量学者正在研究更有效的控制方案克服常规 PID 算法缺陷。文献[1-8]提出采用模糊 PID 解决常规 PID 缺陷,但是系统抑制干扰能力较弱,且无法保证大滞后系统稳定性^[9]。文献[9-13]提出采用史密斯(Smith)预估器对大滞后被控对象进行补偿,解决闭环系统不稳定的问题,但是系统抑制干扰能力差。为了消除干扰,文献[14-15]引入前馈控制,但是当存在大滞后时,系统仍不稳定。文献[16]采用前馈-Smith 模糊控制组合很好地解决了大滞后问题,但是前馈控制不能抑制无法测量的干扰,文献[17]采用 Smith 预估器模型的时滞系统自适应控制方案,较好地解决了系统存在滞后和大干扰问题,但算法复杂。从前人研究中很难找到一种既能消除滞后对系统的影响,又能抑制干扰、算法简单的控制方案。

自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)技术把作用于对象的不确定因素都归结为“未知扰动”,其核心部分为扩张状态观测器(Expansion State Observer, ESO),利用 ESO 对扰动进行估计,具有控制精度高、响应速度快、抗扰能力强等特点^[18-20]。但 ADRC 参数多、算法复杂,参数调节困难。文献[21]提出的线性自抗扰控制(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)技术,算法简单,调节参数方便,并且保留了 ADRC 优良抗干扰特性。

为消除大滞后对控制系统稳定性的影响并抑制干扰,弥补传统温度控制系统稳定性差、动态特性差或

收稿日期:2022-04-22

第一作者简介:周宣征(1982—),男,山东无棣人,讲师,硕士,主要从事智能控制技术研究。

E-mail: tjlgaoyun@163.com

者结构、算法复杂的不足, 提出 Smith-LADRC 系统。该系统能够很好地解决大滞后、大干扰对温度控制系统的影 响, 且响应速度快、稳定性强、结构简单、调参方便, 并通过建立温度控制系统传递函数进行仿真验证。

1 模型与理论

1.1 反馈控制系统模型

单回路反馈控制系统如图 1 所示, 系统输出为

$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}}R(s) + \frac{1}{1+G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}}F(s)。$$

系统输出由两部分组成: 第一部分是由给定信号引起的输出; 第二部分是由扰动引起的输出, 此部分会造成系统输出严重偏离。由系统闭环传递函数特征方程 $D(s) = 1 + G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}$ 知, 由于温度控制系统被控对象一般都存在大滞后环节, 系统闭环传递函数也包含大滞后环节, 严重影响闭环系统稳定性。

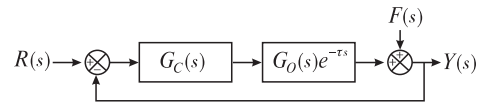


图 1 简单控制系统

1.2 Smith 预估建模与理论

图 2 为 Smith 预估模型图, $G_o(s)$ 是被控对象中无滞后环节 $e^{-\tau s}$ 的传递函数, $G_s(s)$ 是 Smith 预估器的传递函数。不考虑扰动环节影响, 调节量 $U(s)$ 与反馈到输入端的信号 $Z(s)$ 之间传递函数为 $\frac{Z(s)}{U(s)} = G_o(s)e^{-\tau s} + G_s(s)$ 。

为消除式中纯滞后时间 τ , 则要求上式转变为 $\frac{Z(s)}{U(s)} = G_o(s)e^{-\tau s} + G_s(s) = G_o(s)$ 。由此可得 Smith 预估器的传递函数为

$$G_s(s) = G_o(s)(1 - e^{-\tau s}), \tag{1}$$

因此, 加入 Smith 预估器后的系统输出为

$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}}R(s) + \frac{G_f(s)e^{-\tau s}}{1+G_s(s)G_o(s)}F(s)。$$

系统闭环传递函数为 $D(s) = 1 + G_c(s)G_o(s)$, 加入 Smith 预估器后, 系统闭环传递函数大滞后环节被消除, 闭环系统稳定性得到改善。由式(2)知, 加入 Smith 预估器后, 扰动引起系统输出仍然存在。为此, 设计了自抗扰控制消除扰动。

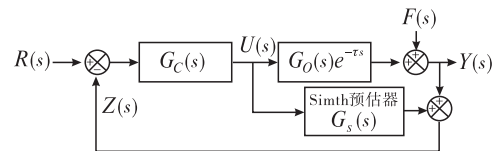


图 2 Smith 预估模型图

2 Smith-自抗扰控制模型

2.1 LADRC 模型分析

ADRC 是一种非线性控制方法, 由跟踪微分器(Tracking Differentiator, TD)、ESO 和非线性状态误差反馈规律(Nonlinear State Error Feedback, NLSEF)组成, 具有控制精度高、抗干扰能力强等特点, 但是 ADRC 包含大量非线性元素。文献[21]提出的 LADRC 保留了 ADRC 的原控制方法优良特性, 但算法更简单, 其结构如图 3 所示。

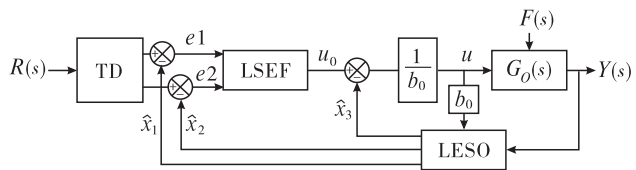


图 3 LADRC 结构图

以二阶被控对象为例, 不考虑滞后环节时被控对象状态空间表达式为

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u, \dot{x}_3 = f = h, y = x_1 \quad (3)$$

式中, x_1, x_2, x_3 为系统状态变量, f 为系统总扰动。由式(3)建立 LESO(Linear Expansion State Observer)为

$$\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - l_1(\hat{x}_1 - y), \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 - l_2(\hat{x}_1 - y) + b_0 u, \dot{\hat{x}}_3 = -l_3(\hat{x}_1 - y) \quad (4)$$

式中, l_1, l_2, l_3 为 LESO 的增益, 状态观测器能实现对式(3)跟踪, 即 $\hat{x}_1 \rightarrow y, \hat{x}_2 \rightarrow \dot{y}, \hat{x}_3 \rightarrow f$ 。系统控制作用为 u , 取其为

$$u = \frac{u_0 - \hat{x}_3}{b_0} \quad (5)$$

则结构图中 LSEF 内设计为比例微分(Proportional Differential, PD) 控制器, 即

$$u_0 = k_p(r - \hat{x}_1) - k_d \dot{\hat{x}}_2 \quad (6)$$

由式(3)与式(6)得闭环系统传递函数为

$$G(s) = \frac{k_p}{s^2 + k_d s + k_p} \quad (7)$$

则 $D(s) = s^2 + k_d s + k_p$ 。根据文献[21], 式(7)中 $k_d = \omega_c^2, k_p = 2\omega_c, \omega_c$ 为控制器带宽。

由式(4)~(6)求得, LESO 特征方程为 $\lambda(s) = s^3 + l_1 s^2 + l_2 s + l_3$, 取理想特征方程为 $\lambda(s) = (s + \omega_0)^3$, 则 $l_1 = 3\omega_0, l_2 = 3\omega_0^2, l_3 = \omega_0^3, \omega_0$ 为 LESO 带宽。由上述分析可以看出, ADRC 系统可以通过状态观测器将系统扰动实现观测并反馈到输入端实现扰动抑制。

2.2 Smith-LADRC 系统

为了克服干扰并补偿大滞后环节, 将 LADRC 与 Smith 预估模型相结合, 形成 Smith-LADRC 系统, 其结构如图 4 所示。

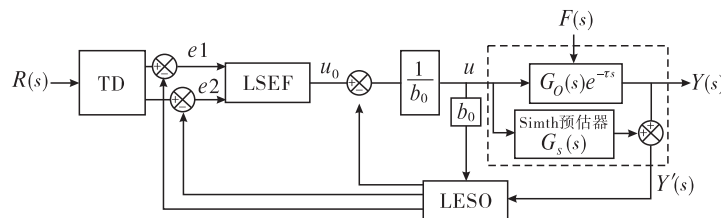


图 4 Smith-LADRC 结构图

图 4 中的虚线部分加入设计好的 Smith 预估器后, 由 1.2 节分析可知, 此部分可以等效为不含滞后环节的 $G_0(s)$, 图 4 可等效为图 3。由式(3)~(7)知, 以 $Y'(s)$ 为输出, 系统闭环传递函数可等效为式(7), 系统输出 $Y(s)$ 仅时间滞后 $Y'(s)$, 其他性能指标相同。这样在 Smith-LADRC 系统里面可以通过 Smith 预估器消除被控对象滞后环节, 等效为 LADRC 结构, 因此 Smith-LADRC 系统既能够实现滞后补偿, 又能够实现扰动抑制。

3 仿真实验

一般温度控制系统数学模型可以用一阶系统或二阶系统来描述, 本文采用二阶系统带纯滞后环节来表示, 考虑大滞后条件, 取滞后时间 $\tau \geq 25$ s, 传递函数表示为

$$G(s) = \frac{1}{2500s^2 + 125s + 1} e^{-\tau s} \quad (8)$$

其中, 时间常数 $T=50$, 设置目标温度为 25°C , 0 s 时仿真系统采用 25 rad/s 的阶跃信号作为输入来模拟设定温度。

(1) Smith-PID 与 PID 稳定性对比仿真。式(8)中 $\tau=50$ s, 则 $\frac{\tau}{T} = 1 > 0.3$, 被控对象为大滞后系统,

根据式(1), 加入 Smith 预估器后

$$G_s(s) = G_o(s)(1 - e^{-\tau s}) = \frac{1}{2500s^2 + 125s + 1}(1 - e^{-50s})。$$

设定目标温度为 25 °C, 利用 Matlab 进行仿真实验, 加入 Smith 预估器前后仿真结果如图 5 所示。由图 5(a)知, PID 受大滞后环节影响, 系统输出曲线不收敛, 系统不稳定。由图 5(b)知, 加入 Smith 预估器后, 系统输出曲线逐渐收敛到设定值 25 °C, 系统稳定。

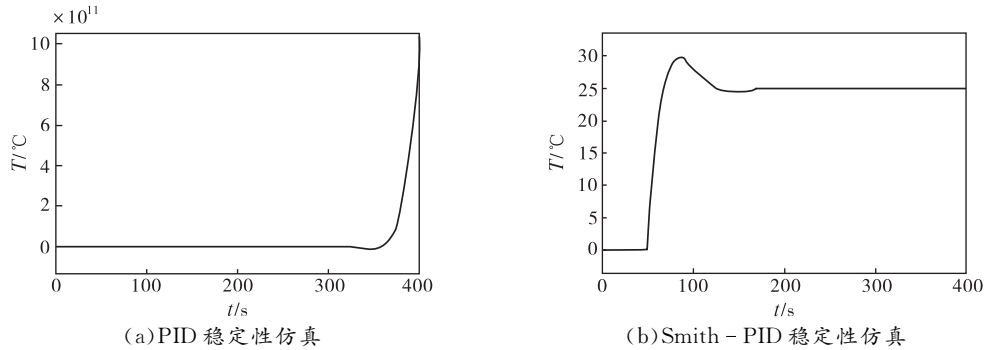


图 5 PID 与 Smith-PID 稳定性对比

(2) Smith-LADRC 与 Smith-PID 响应速度分析。在 0 s 时, 给系统输入 25 rad/s 阶跃信号作为仿真输入, 取 $\tau = 50$ s, Smith-LADRC 与 Smith-PID 阶跃响应曲线如图 6 所示。

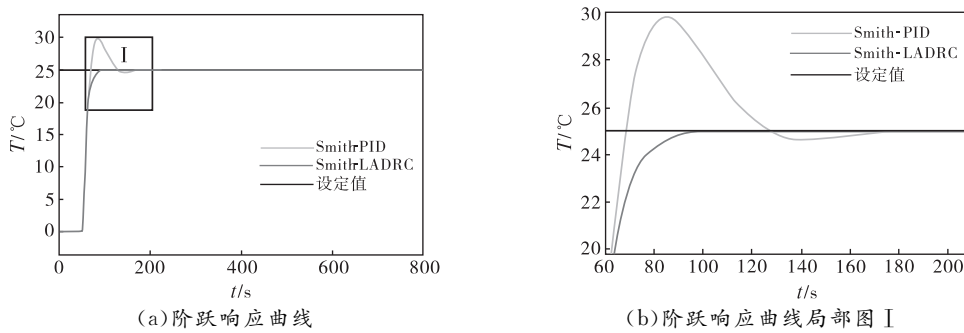


图 6 阶跃输入仿真结果

Smith-PID 最大输出值为 29.86 °C, 超调量为 19.44%, Smith-LADRC 最大输出为 25 °C, 超调量为 0。Smith-LADRC 与 Smith-PID 相比, 调节时间减少了 65.486 s, 超调量减少了 19.44%, 降为 0。

(3) Smith-LADRC 与 Smith-PID 抗扰性能分析。当系统稳定后, 在 300 s 时, 分别在两种控制方式下加入给定值 100% 阶跃信号(25 rad/s)作为扰动信号, 系统仿真结果见图 7。

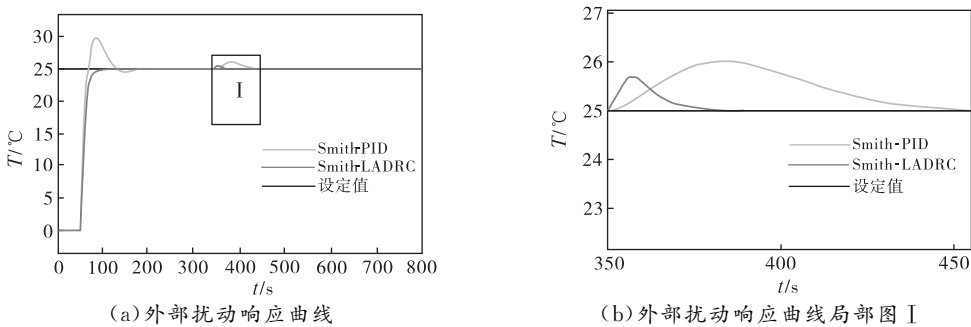


图 7 外部扰动响应曲线

由图 7 知, 加入扰动信号后, Smith-PID 最大输出值为 26.01 °C, Smith-LADRC 最大输出值为

25.70 ℃,两种方式下超调量分别为 4.04%、2.80%。两种方式下,加入扰动后调节时间分别为 $t_{s1} = 111.976$ s, $t_{s2} = 61.570$ s。因此,Smith-LADRC 与 Smith-PID 相比,超调量减小 1.24%,调节时间减小 50.406 s。

(4)Smith-LADRC 不同滞后时间下系统响应。Smith-LADRC 下,取滞后时间分别为 25 s,50 s,100 s,150 s,200 s,输入 25 rad/s 阶跃信号,系统输出响应曲线如图 8 所示,其性能分析如表 1 所示。系统超调量、稳态误差都为 0,调节时间与滞后时间之差稳定在 41~42 s,虽然滞后时间增大,Smith-LADRC 仍具有较好稳定性与鲁棒性。

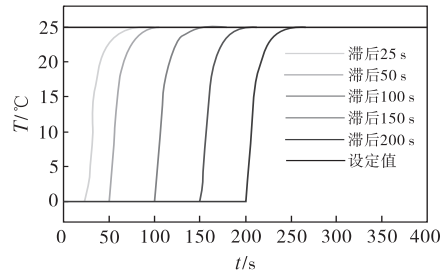


图 8 滞后时间不同阶跃响应曲线

表 1 滞后时间不同阶跃响应曲线性能分析

τ/s	t_s/s	$(t_s - \tau)/s$	稳态误差	τ/s	t_s/s	$(t_s - \tau)/s$	稳态误差
25	66.584	41.584	0	150	191.288	41.288	0
50	91.195	41.195	0	200	241.289	41.289	0
100	141.008	41.008	0				

4 结束语

Smith-LADRC 系统不仅解决了大滞后环节对闭环稳定性的影响,而且提高了系统的抗干扰能力。使系统的超调量减小,调节时间更短,稳定性、鲁棒性更好。所以该控制方式,可以广泛应用到大滞后与强干扰系统。

参 考 文 献:

[1] 骆东松,孙冠琼.基于模糊控制的真空退火炉温度控制系统[J].控制工程,2019,26(4):625-630.
 [2] 张宝峰,张耀,朱均超,等.基于模糊 PID 的高精度温度控制系统[J].传感技术学报,2019,32(9):1425-1429.
 [3] 王超,孙文旭,马晓静,等.基于模糊控制的 HVPE 生长设备温度控制系统[J].工程设计学报,2020,27(6):765-770.
 [4] 邓圭玲,冯志逸,周灿.基于模糊 PID 的点胶阀温度控制系统设计[J].传感器与微系统,2021,40(6):98-100.
 [5] 张安迪,张艳荣,李涛.论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用[J].光学学报,2021,41(12):153-161.
 [6] 雷翔霄,唐春霞.基于自适应模糊 PID 算法的镀液温度控制[J].电镀与精饰,2021,43(8):35-38.
 [7] 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.
 [8] 杨胜利.基于模糊 PID 参数自整定的电加热炉温度控制系统设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
 [9] 贺自名,牛江川,张静.基于 Smith 变论域模糊自适应 PID 蒸发源温度控制[J].控制工程,2021,28(7):1308-1314.
 [10] 平玉环,管志敏,李宗耀.基于 Smith 预估的模糊自适应主汽温控制系统[J].中国电力,2018,51(11):9-14.
 [11] 张君,邓菲,翟永杰.改进 Smith 的串级主汽温控制仿真研究[J].计算机仿真,2016,33(5):148-151.

- [12] 赵巍,李房云. 基于预估模糊 PID 的冰蓄冷空调控制系统[J]. 现代电子技术,2019,42(20):26-28.
- [13] CHIANG W,LUO W,WANG F, et al. Temperature control scheme using hot-gas by pass for a machine tool oil cooler[J]. Journal of mechanical science and technology,2018,32(3):1391-1396.
- [14] 杨军,李军,宋壮,等. 风洞温度控制系统的前馈模糊 PID 控制研究[J]. 控制工程,2018,25(10):1843-1848.
- [15] LI L,LI Y,HE Y L. Flexible and efficient feed forward control of concentrating solar collectors [J]. Applied thermal engineering,2020,171:1150-1153.
- [16] 张皓,高瑜翔. 前馈反馈 Smith 预估模糊 PID 组合温度控制算法[J]. 中国测试,2020,46:132-138.
- [17] 郑仰东. 采用 Smith 预估器模型的时滞系统自适应控制[J]. 控制理论与应用,2021,38(3):416-424.
- [18] 杨林,曾江,马文杰,等. 基于改进二阶线性自抗扰技术的微网逆变器电压控制[J]. 电力系统自动化,2019,43(4):146-153.
- [19] 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.
- [20] CHEN W H,YANG J,GUO L, et al. Disturbance observer-based control and related methods-an overview[J]. IEEE Transactions on industrial electronics,2013,60(9):3906-3914.
- [21] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based on control tuning [C]// Proceedings of the American Control Conference. Denver, Colorado:IEEE,2013.

Design of Smith Predictor-linear Auto-disturbance Rejection Temperature Control System

ZHOU Xuan-zheng,ZHANG Gong-yong

(Electrical Engineering College, Binzhou University, Binzhou 256603, China)

Abstract: In order to solve the problems of traditional temperature control system with large time delay, such as poor closed-loop stability, large overshoot, long regulation time, poor anti-interference ability, complex structure and parameter adjustment, a combination temperature control scheme of Smith predictor-linear auto-disturbance rejection is proposed. By introducing Smith predictor, the pure delay link e^{-s} of the controlled object ($G_O(s)e^{-s}$) can be cancelled out. That is, the controlled object is equivalent to $G_O(s)$, thus ensures the stability of the closed-loop system. Using the linear auto-disturbance rejection control (LADRC) technique, the “Unknown disturbances” of the system can be estimated through the linear expansion State Observer, and the disturbances can be eliminated through feedback, thus improve the control accuracy, reduce the overshoot, and shorten the adjustment time. The principle of predictor canceling pure delay is analyzed by establishing Smith prediction model and LADRC model. Finally, through simulation, Smith-LADRC control mode ensures the stability of the closed-loop system, the regulation time is reduced by 65.486s, and the overshoot is reduced by 19.44% to 0. After adding the external disturbance, Smith-LADRC reduces the overshoot by 1.24% and the regulation time by 50.406s compared with Smith-PID. The whole system has stronger anti-interference ability, robustness, stability and faster response speed.

Keywords: LADRC; Smith predictor; Smith-LADRC

(责任编辑:王新亮)