

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.012

文章编号:1672-9331(2022)03-0122-07

引用格式:谭勋琼,李斯敏,白创.基于改进的 Smith 预估器的长时滞系统控制[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):122-128.

Citation:TAN Xunqiong,LI Simin,BAI Chuang. Control of long time delay systems based on an improved Smith predictor[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2022,19(3):122-128.

基于改进的 Smith 预估器的长时滞系统控制

谭勋琼,李斯敏,白创

(长沙理工大学 物理与电子科学学院,湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】解决长时滞控制系统中普遍存在的响应延时问题,改善长时滞系统的性能。【方法】基于自动控制原理及反馈控制理论,建立长时滞系统模型;对 Smith 预估器进行细致研究,对其内部滤波器及控制器进行相应的改进。【结果】改进后的 Smith 预估器缩短了长时滞控制系统的响应时间,提高了整个控制系统的鲁棒性和抗干扰性;相比于其他传统控制系统,新的控制系统具有明显的优势。【结论】改进的 Smith 预估器降低了时滞现象对于控制系统的影响,为长时滞系统的控制提供了新的解决思路。

关键词: Smith 预估器;长时滞系统;响应延时;鲁棒性;抗干扰性

中图分类号: TP13

文献标志码: A

0 引言

时间滞后现象广泛存在于长管道进料、皮带传输等实际工业生产的各类动态控制系统中。信息的传输也会产生时滞现象,例如电力系统、通信系统等的信息传输。时滞现象导致控制效果在经过一段时间延迟后才能到达被控对象,这可能引起系统的性能下降甚至不稳定。长时滞现象对系统性能的不利影响更甚^[1]。

闭环系统的时滞时间对系统的影响是一个被研究了几十年的课题,至今仍受到研究者的广泛关注^[2-5]。针对时滞系统的控制问题,近年来,国内外众多学者做了大量的研究。曹学海等^[2]提出了改进的比例-积分-微分(proportional-integral-derivative,PID)控制器方案,该方案只对时滞系统的抗干扰性做出了改善,但未改善系统的鲁棒性;XUE 等^[3]结合传统的 Lyapunov-

Krasovski 函数,设计了一种新的自适应控制器,但其补偿时滞时间的结论过于保守;唐桢等^[4]通过引入 Casimir 函数,提高了时滞系统的响应速度,但该方法没有对系统的鲁棒性和抗干扰性作出改善。

Smith 预估器是一种广泛应用于时滞系统控制的结构,其基本原理是预测时滞系统或被测对象的延时影响并对其进行抵消和补偿。Smith 预估器是由 SMITH^[5]于 1956 年提出来的,适用于被控对象的模型参数可以被精确预测且不随时间变化的场合。在此基础上,SALEHIOMRAN 等^[6]使用 Smith 预估器抑制时滞和噪声,但未对其性能进行改进;刘长良等^[7]对 Smith 预估器的鲁棒性进行了优化,但未改善其抗干扰性。

除此之外,还有其他一些预测器结构可以用于长时滞系统的控制,例如广义预测器^[8-9]、简化广义预测器^[10]以及 Artstein 预测器^[11-12]等,但这些结构的抗干扰性能都较差。

综上所述,之前的众多研究都集中在缩短控

收稿日期:2021-10-14;修回日期:2022-03-19;接受日期:2022-03-25

基金项目:中国-黑山科技合作委员会第 3 届例会交流项目(3-7);长沙理工大学“双一流”科学研究国际合作拓展项目(2019ic18);柔性电子材料基因工程湖南省重点实验室开放基金资助项目(202005)

通信作者:谭勋琼(1967-)(ORCID:0000-0002-5327-0309),男,副教授,主要从事工程控制技术方面的研究。

E-mail:35103590@qq.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

制系统的时滞时间上,而对于减弱滞后影响、同时改善时滞系统性能方面的研究,较少且不完全。

本研究提出了对 Smith 预估器进行改进的方法,该方法通过改进 Smith 预估器结构中的内部滤波器以提高系统的鲁棒性,通过改进滤波器及控制器参数以提高系统的抗干扰性。改进后的 Smith 预估器能在减弱时滞影响的同时,增强系统性能,实现长时滞控制系统的最优控制。

1 长时滞系统及 Smith 预估控制器

1.1 长时滞系统

长时滞系统一般指时滞时间为时间常数两倍以上的系统。例如,淋浴系统作为一种典型的长时滞系统,其温度的变化要在调节旋钮一段时间后才能实现。本研究将以淋浴系统为例进行分析。

本研究所使用的淋浴过程的开环响应过程模型的表达式如下:

$$P = \frac{5.6}{40.2s + 1} \exp(-93.9s) \tag{1}$$

式中: P 为开环响应过程模型; s 为复变量;时间常数为 40.2 s;时滞时间为 93.9 s。

1.2 Smith 预估器

在文献[13]所述的常规 Smith 预估控制系统的基础上,将外部干扰 d 也考虑进淋浴系统内,得到如图 1 所示的 Smith 预估器控制结构,简称 Smith 预估器。图 1 中, C 为 PI 控制器; F 为内部滤波器; G_p 为内部模型; y_{sp} 为淋浴系统的期望温度; y_p 为预测温度; y 为实际过程输出值; y_1 为考虑时滞时间的预测值; $dy = y - y_1$ 表示等待了足够长的淋浴时间后,所感知到的温度不匹配量; e 为整体误差信号; d 为外部干扰; τ 为长时滞系统内部模型 G_p 的时滞时间; u 为经过控制器的控制量; y_0 为不考虑时滞时间的过程输出值。

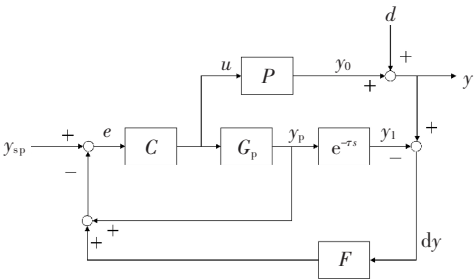


图 1 Smith 预估器控制结构

Fig. 1 Smith predictor control structure

上述 Smith 预估器用 G_p 预测淋浴过程中的温度 y_p ,此处 G_p 对 y_p 的预测相当于预测“一个给定的旋钮设定位置能提供的水温”。然后,将预测温度 y_p 与期望温度 y_{sp} 进行比较,以决定需要进行哪些调整。为了防止内部漂移和消除外部干扰 d ,上述 Smith 预估器还将实际过程输出值 y 与考虑时滞时间的预测值 y_1 进行比较,两者之间的差值 $dy = y - y_1$ 通过内部滤波器 F 进行反馈,并和 y_p 、 y_{sp} 构成整体误差信号 e 。

设计上述 Smith 预估器方案还需要:1) 过程动态的 G_p 模型和过程时滞时间的估计;2) 控制器 C 和内部滤波器 F 的适当设置^[14]。对于 G_p ,可使用前面提出的时间常数为 40.2 s、时滞时间为 93.9 s 的一阶开环响应模型;对于 F ,可使用时间常数为 20.0 s 的一阶滤波器来捕获低频扰动。

在时滞系统中,Smith 预估器能够提供与其他控制器相比更快的响应,且没有超调^[15-16]。但 Smith 预估器也有一些缺陷——对模型失配敏感^[17]以及抗干扰性能不理想。因此在接下来的研究中,要采取措施,降低 Smith 预估器对模型失配的敏感性,提高其抗干扰性。

2 Smith 预估器的改进及其效果

2.1 Smith 预估器鲁棒性的改进

对于时滞时间较长的长时滞系统来说,在理想情况下,系统的预测模型与实际过程模型是完全匹配的。但在实际情况下,预测模型只是实际过程模型的近似。因此,提高 Smith 预估器的鲁棒性非常重要^[18]。

2.1.1 Smith 预估器改进前的鲁棒性

为了更好地比较改进前后系统的鲁棒性,建立了淋浴系统开环响应的扰动模型,其表达式为:

$$P_1 = \frac{5}{38s + 1} \exp(-93.9s) \tag{2}$$

式中: P_1 表示实际过程模型与预测模型不匹配。

使用改进前的 Smith 预估器分别模拟过程模型和扰动模型的输入跟踪响应及抗干扰响应,结果如图 2~3 所示。图中,蓝线代表改进前的 Smith 预估器使用过程模型模拟时的响应,红线代表改进前的 Smith 预估器使用扰动模型模拟时的

响应。从图 2~3 可以看出,改进前的 Smith 预估器对系统模型失配敏感。

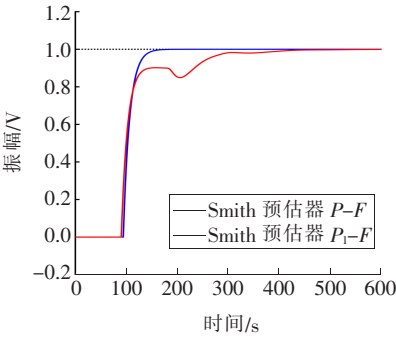


图 2 改进前的输入跟踪响应

Fig. 2 Input tracking response before improvement

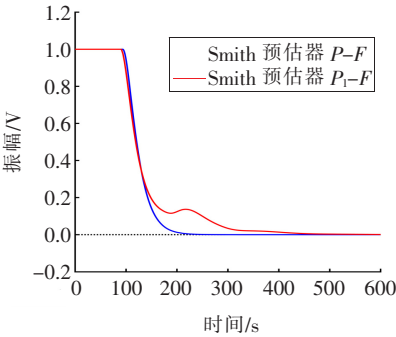


图 3 改进前的抗干扰响应

Fig. 3 Disturbance rejection response before improvement

2.1.2 鲁棒性的改进

为了提高 Smith 预估器对长时滞系统建模误差的鲁棒性,需要检查内部和外部回路的稳定裕度。由于内环有适当的增益和稳定裕度,所以只需关注外环^[19]。理想情况下,当实际过程模型和预测模型完全匹配时,外环的开环传递函数理论上为 0。为了深入了解外环的稳定裕度,使用扰动模型得到外环增益曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,该增益曲线有一个接近于 0.04 rad/s 的驼峰,该驼峰降低了增益裕度。

为了解决这个问题,本研究对 Smith 预估器的内部滤波器 F 进行改进,使增益裕度在 0.04 rad/s 相位交叉附近得到改善,这样可以提高系统的鲁棒性。改进后的内部滤波器 F_1 的表达式为:

F_1 = (1 + 10s) / (1 + 100s) (3)

改进鲁棒性后系统的输入跟踪响应和抗干扰

响应如图 5~6 所示。图中,蓝线代表改进内部滤波器后使用过程模型 P 模拟时的响应,红线代表改进内部滤波器后使用扰动模型 P_1 模拟时的响应。

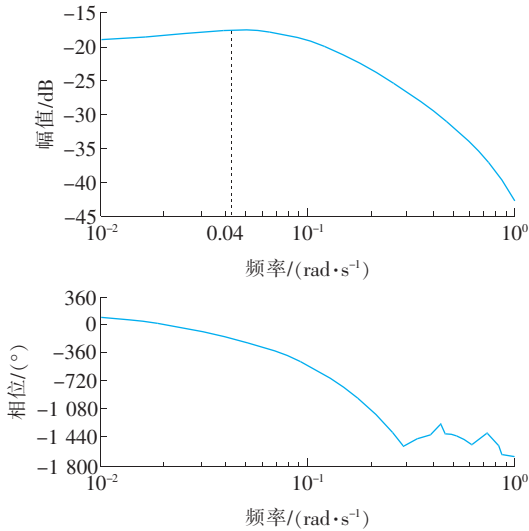


图 4 采用扰动模型 P_1 时的外环增益曲线

Fig. 4 Outer loop gain curve with perturbation model P_1

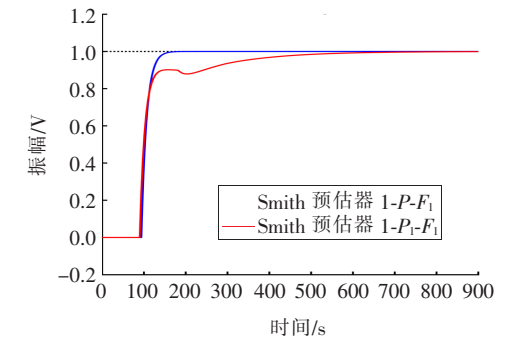


图 5 鲁棒性改进后的输入跟踪响应

Fig. 5 Input tracking response after improved robustness

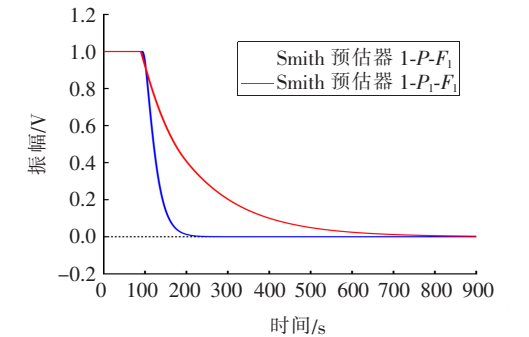


图 6 鲁棒性改进后的抗干扰响应

Fig. 6 Disturbance rejection response after improved robustness

对比图 2 和图 5、图 3 和图 6 可知,改进内部滤波器后的 Smith 预估器提高了淋浴系统对于不确定过程的鲁棒性,这使系统拥有了更好的性能。但系统的抗干扰响应速度变慢,需要进一步提高其抗干扰性。

2.2 Smith 预估器抗干扰性的改进

由图 1 中 d 到 y 的闭环传递函数可知,内部滤波器 F 的最优选择为 $F_2 = \exp(\tau s)$ 。不论 P 和 G_p 是否匹配,这种选择都能实现完美的干扰抑制。但是,这种选择在实际情况下无法实现,因此,本研究使用了相位超前近似模型^[20],其表达式为:

$$\exp(\tau s) \approx \frac{1+B}{1+B \times \exp(\tau s)} \quad (4)$$

式中: B 为一个与内部模型 G_p 具有相近时间常数的低通滤波器。 B 的表达式为:

$$B = \frac{0.05}{40s+1} \quad (5)$$

将内部滤波器 F 进一步改进为 F_3 :

$$F_3 = \frac{40s+1.05}{40s+1+0.05 \times \exp(-93.9s)} \quad (6)$$

为了得到更佳的系统性能,重新设计一个 PI 控制器 C_1 ,以减少带宽。新的 PI 控制器的表达式为:

$$C_1 = 0.144 \times (1 + \frac{1}{40.1s}) \quad (7)$$

用此方案得到的输入跟踪响应和抗干扰响应分别如图 7~8 所示。图中,红线代表改进抗干扰性前 Smith 预估器的响应,绿线代表改进抗干扰性后 Smith 预估器的响应。由图 7~8 可知,最后的设计加快了淋浴系统的抗干扰速度,提高了系统性能。

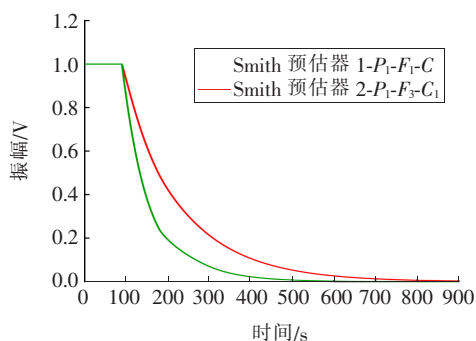


图 8 改进抗干扰性后的抗干扰响应

Fig. 8 Disturbance rejection response after improving disturbance rejection

3 讨论

长时滞对于控制系统的影响很大,而长时滞系统在日常生活中并不少见。因此,本研究针对类似于淋浴系统的长时滞系统的时滞问题,对传统的 Smith 预估器进行改进,以期改善长时滞系统的性能,优化工业控制系统的运行。

本研究通过对 Smith 预估器的内部结构进行改进,对比改进前和改进后淋浴系统的性能,经过仿真比较分析得出:

1) 对于内部模型失配,改进后的 Smith 预估器应用于淋浴系统与改进前的相比拥有更强的鲁棒性。

2) 对于外部干扰,改进后的 Smith 预估器应用于淋浴系统与改进前相比拥有更强的抗干扰性。

本研究的主要目的是减弱长时滞对控制系统各项动态性能的影响。研究结果表明:改进后的 Smith 预估器应用于类似于淋浴系统的长时滞系统能够达到较好的效果,在减弱时滞影响的同时,还提高了系统性能,与其他文献中传统的 Smith 预估器相比,控制性能略胜一筹,基本达到了预期研究目标。

由于本研究仅针对单输入单输出的闭环控制系统,对开环控制系统以及多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)系统没有进一步的研究数据支撑,因而具有一定的局限性。因此,本研究的结果仅适用于单输入单输出的闭环控制系统。在未来的研究中,可以继续改进现有

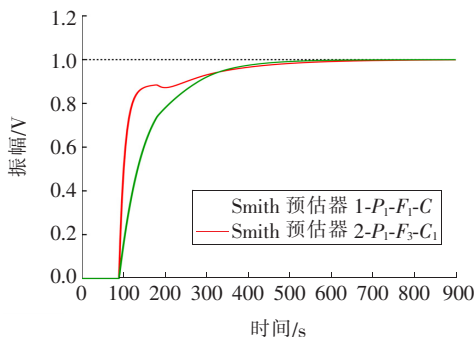


图 7 改进抗干扰性后的输入跟踪响应

Fig. 7 Input tracking response after improving disturbance rejection

的 Smith 预估器控制结构,使其适用于开环控制系统及 MIMO 系统。

4 结论

为了解决普遍存在的时滞问题,综合国内外的研究发现,Smith 预估器是一种可以对闭环长时滞系统进行有效控制的结构。本研究通过对 Smith 预估器控制结构的改进,提高了 Smith 预估器的鲁棒性和抗干扰性,时滞现象得到了改善,并实现了最优控制,这为工业控制过程中的时滞现象提供了解决思路。

与前人的研究工作相比,本研究优化了 Smith 预估器的性能,使得对单输入单输出控制系统时滞现象的改善变得更加方便、快捷。在今后的研究中,可针对 Smith 预估器对多输入多输出控制系统时滞现象的改善做进一步讨论,使 Smith 预估器具有更广泛的应用场景。

〔参考文献〕

[1] BETTAYEB M, MANSOURI R, AL-SAGGAF U, et al. Smith predictor based fractional-order-filter PID controllers design for long time delay systems[J]. Asian Journal of Control, 2017, 19(2): 587-598. DOI: 10.1002/asjc.1385.

[2] 曹学海,于敏,邱国鹏. Smith 预估器的改进及在温度控制系统中的应用[J]. 山西能源学院学报, 2020, 33(1): 97-99. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8881.2020.01.033.

CAO Xuehai, YU Min, QIU Guopeng. Improvement of Smith estimator and its application in the temperature control system[J]. Journal of Shanxi Institute of Energy, 2020, 33(1): 97-99. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8881.2020.01.033.

[3] XUE L R, ZHANG T L, ZHANG W H, et al. Global adaptive stabilization and tracking control for high-order stochastic nonlinear systems with time-varying delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(9): 2928-2943. DOI: 10.1109/TAC.2018.2797169.

[4] 唐桢,王冰,刘维扬,等. 输入时滞的海上风电机组分布式控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2581-

2590. DOI:10.7641/CTA.2020.00101.

TANG Zhen, WANG Bing, LIU Weiyang, et al. Distributed control of offshore wind turbine group with input delay [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(12): 2581-2590. DOI: 10.7641/CTA.2020.00101.

[5] SMITH O J M. Closer control of loops with dead time[J]. Chemical Engineering Progress, 1957, 53(5): 217-219.

[6] SALEHIOMRAN A, MODIRNIA R, BOULET B, et al. Optical parametric oscillator longitudinal modes suppression based on Smith predictor control scheme [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(5): 2064-2072. DOI: 10.1109/ipcon.2012.6358673.

[7] 刘长良,马增辉. Smith 预估模型参数仿真分析及多目标优化[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(8): 1706-1712. DOI:10.16182/j.cnki.joss.2014.08.036.

LIU Changliang, MA Zenghui. Simulation analysis and multi-objective optimization of Smith-predictor parameters tuning[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(8): 1706-1712. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2014.08.036.

[8] GARCÍA P, ALBERTOS P. Robust tuning of a generalized predictor-based controller for integrating and unstable systems with long time-delay[J]. Journal of Process Control, 2013, 23(8): 1205-1216. DOI: 10.1016/j.jprocont.2013.07.008.

[9] SANZ R, GARCÍA P, ALBERTOS P. A generalized Smith predictor for unstable time-delay SISO systems[J]. ISA Transactions, 2018, 72: 197-204. DOI: 10.1016/j.isatra.2017.09.020.

[10] LIU T, GARCÍA P, CHEN Y L, et al. New predictor and 2DOF control scheme for industrial processes with long time delay[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 4247-4256. DOI: 10.1109/TIE.2017.2760839.

[11] LÉCHAPPÉ V, MOULAY E, PLESTAN F, et al. New predictive scheme for the control of LTI systems with input delay and unknown disturbances [J]. Automatica, 2015, 52: 179-184. DOI: 10.1016/J.AUTOMATICA.2014.11.003.

[12] SANTOS T L M. Modified Artstein predictor for LTI systems with dead time and unknown disturbances[J]. Journal of Control, Automation and Elec-

- trical Systems, 2016, 27 (3): 263-273. DOI: 10.1007/s40313-016-0240-8.
- [13] 魏秋月, 王文庆. 大滞后系统模糊自适应 PI-Smith 控制[J]. 自动化与仪表, 2011, 26(4): 27-30. DOI: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2011.04.008.
- WEI Qiuyue, WANG Wenqing. Fuzzy self-adaptive PI-Smith control for long time-delay system[J]. Automation & Instrumentation, 2011, 26(4): 27-30. DOI:10.19557/j.cnki.1001-9944.2011.04.008.
- [14] 朱超威, 李生权, 李娟, 等. 永磁同步风力发电机的时滞补偿自抗扰控制设计[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2019, 22(3): 39-43. DOI: 10.19411/j.1007-824x.2019.03.010.
- ZHU Chaowei, LI Shengquan, LI Juan, et al. Design of active disturbance rejection control for a permanent with time-delay compensation for a wind energy conversion system based on magnet synchronous generator[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2019, 22(3): 39-43. DOI: 10.19411/j.1007-824x.2019.03.010.
- [15] 江建锋, 潘维加. 300 MW 单元机组机炉协调控制系统的仿真研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2005, 2(1): 49-55.
- JIANG Jianfeng, PAN Weijia. Simulative study of the coordinated control system for 300 MW unit generator[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2005, 2(1): 49-55.
- [16] 王永帅, 陈增强, 孙明玮, 等. 一阶惯性大时滞系统 Smith 预估自抗扰控制[J]. 智能系统学报, 2018, 13(4): 500-508. DOI: 10.11992/tis.201705031.
- WANG Yongshuai, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Smith prediction and active disturbance rejection control for first-order inertial systems with long time-delay[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 13(4): 500-508. DOI: 10.11992/tis.201705031.
- [17] DENG J Q, HAO C, HAO C. The Smith-PID control of three-tank-system based on fuzzy theory[J]. Journal of Computers, 2011, 6(3): 514-523. DOI: 10.4304/jcp.6.3.514-523.
- [18] MIN H F, XU S Y, ZHANG B Y, et al. Output-feedback control for stochastic nonlinear systems subject to input saturation and time-varying delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(1): 359-364. DOI: 10.1109/TAC.2018.2828084.
- [19] HUANG H P, CHEN C L, CHAO Y C, et al. A modified Smith predictor with an approximate inverse of dead time[J]. AIChE Journal, 1990, 36(7): 1025-1031. DOI: 10.1002/aic.690360708.
- [20] SORRIBES A G, GIL P G. A novel observer-predictor control for uncertain systems with unknown time-varying input and output delays[J]. International Journal of Control, 2019, 94(6): 1-11. DOI: 10.1080/00207179.2019.1662488.

Control of long time delay systems based on an improved Smith predictor

TAN Xunqiong, LI Simin, BAI Chuang

(School of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] The purpose of this paper is to solve the common problem of response delay in long time delay control systems and improve the performance of long time delay systems. [Methods] Based on automatic control theory and feedback control theory, the model of long time delay system is established. Smith predictor is studied in detail, and its internal filter and controller are improved accordingly. [Findings] The improved Smith predictor can not only shorten the response time of the system with long time delay, but also improve the robustness and disturbance rejection of the whole control system. Compared with other traditional control systems, the new control system has obvious advantages. [Conclusions] The improved Smith predictor reduces the influence of time delay on the control system and provides a new solution for the control of long time delay systems.

Key words: Smith predictor; long time delay system; response delay; robustness; disturbance rejection

Manuscript received: 2021-10-14; **revised:** 2022-03-19; **accepted:** 2022-03-25

Foundation item: Project(3-7) supported by China-Montenegro 3rd Science & Technology Exchange and Cooperation Project; Project(2019ic18) supported by Double First-Class Scientific Research International Cooperation Expansion Program of Changsha University of Science & Technology; Project(202005) supported by Open Research Fund of Hunan Provincial Key Laboratory of Flexible Electronic Materials Genome Engineering

Corresponding author: TAN Xunqiong(1967—)(ORCID:0000-0002-5327-0309), male, associate professor, research interest: engineering control technology. E-mail: 35103590@qq.com

(责任编辑:赵冰;校对:石月珍;英文编辑:辛动军)