

DOI: 10.11992/tis.201705031

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20180328.1811.016.html>

一阶惯性大时滞系统 Smith 预估自抗扰控制

王永帅¹, 陈增强^{1,2}, 孙明玮¹, 孙青林¹

(1. 南开大学 计算机与控制工程学院, 天津 300350; 2. 天津市智能机器人重点实验室, 天津 300350)

摘要: 大时滞系统是工业过程控制中的典型难题, 将先进控制方法应用于大时滞系统时需要与传统的 Smith 预估器相结合才能获得理想的控制效果。针对一阶惯性大时滞系统, 研究了 Smith 预估器与线性自抗扰控制技术相结合的设计问题, 分析了系统的稳定条件和参数摄动问题。证明了当被控对象参数与 Smith 预估器参数相同时, 闭环控制系统稳定的结论, 同时推导了参数不同时控制系统稳定的一个充分条件。另外基于数值仿真, 从暂态性能、稳定裕度和抗扰能力三方面分析了系统参数和控制参数摄动的影响作用, 这些结果可用于 Smith 预估器和线性自抗扰控制器参数的整定。

关键词: 大时滞系统; 一阶惯性系统; 线性自抗扰控制; Smith 预估器; 稳定裕度; 劳斯判据; 稳定性分析; 稳定可行域
中图分类号: TP272 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2018)04-0500-09

中文引用格式: 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.

英文引用格式: 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.

Smith prediction and active disturbance rejection control for first-order inertial systems with long time-delay

WANG Yongshuai¹, CHEN Zengqiang^{1,2}, SUN Mingwei¹, SUN Qinglin¹

(1. College of Computer and Control Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Robotics of Tianjin, Tianjin 300350, China)

Abstract: A system with long time-delay is a typical difficulty experienced in industrial process control. When an advanced control method is applied to such a system, an ideal control effect can be obtained only by combining it with a traditional Smith predictor. In this paper, we address first-order inertial systems with long time-delay, investigate the combined design of a Smith predictor with the linear active disturbance rejection control (LADRC) technique, and discuss the system stability conditions and parameter perturbations. We prove that the closed-loop control system is stable when the parameters of the controlled object are identical to the Smith predictor parameters. Moreover, we deduce a sufficient condition for maintaining the stability of the control system when these parameters differ. In addition, using numerical simulation, we analyze the impacts of perturbation of the system and control parameters on the transient performance, stability margin, and disturbance rejection ability. These results can be used to tune the parameters of the Smith predictor and LADRC controller.

Keywords: systems with long time-delay; first-order inertial systems; LADRC; Smith predictor; stability margin; Routh criterion; stability analysis; stable region

收稿日期: 2017-05-27. 网络出版日期: 2018-03-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61573199, 61573197); 天津市自然科学基金项目 (14JCYBJC18700).

通信作者: 陈增强. E-mail: chenzq@nankai.edu.cn.

时滞系统广泛存在于现代过程控制工业中, 例如冶金、化工、炼油等工业。一般认为纯延迟时间 τ 与过程的时间常数 T 之比大于 0.3 则说明该

过程是具有大迟延的工艺过程。滞后时间越大, 系统越难控, 而且对控制品质极为不利, 因此, 大时滞系统受到了理论和应用领域的广泛关注。O.J.M.Smith^[1]于 1957 年提出了著名的针对纯滞后系统的 Smith 预估器^[2-3], 有效解决了控制量不能及时作用于被控对象的问题。但是, Smith 预估器不具备任何抑制扰动的能力, 当存在外界干扰时, 控制性能将会大大下降。由此出现了自适应控制^[4-5]、预测控制算法^[6-7]、鲁棒控制算法^[8]和各种智能算法等^[9-10]。但是只能解决时滞时间较小的控制问题。

20 世纪 80 年代末, 韩京清研究员提出了自抗扰技术, 由于能够实时估计和补偿扰动, 受到了控制领域的广泛关注, 并成功应用于各种不确定系统。针对时滞系统, 韩京清^[11]研究员提出了无视时滞法、一阶惯性环节近似法、输入预测法和输出预测 4 种方法, 但是随着时滞增大控制效果变差。由于自抗扰技术的各种实用优点和需调参数太多等原因, 美国克利夫兰州立大学的高志强教授^[12]提出了线性自抗扰方法, 大大简化了调参工作量, 而且线性自抗扰的分析相对容易, 现在已经有很多文献对此进行了理论分析^[13-16]。

因此, 将具有实时估计补偿扰动能力的线性自抗扰技术与解决纯时滞问题的 Smith 预估器相结合, 来解决大时滞系统的控制问题。已有学者进行了一些相关研究, 文献^[17]在模型大约已知的条件下, 将 ADRC-Smith 与基于时滞的扰动补偿观测器、PI-Smith 在鲁棒性能和抗扰能力方面进行了比较, 并进行频域分析, 说明了 ADRC-Smith 控制性能更好, 并对化学反应器浓度控制进行了仿真测试, 对锅炉的氧浓度控制进行了仿真测试和实际结果的对比; 文献^[18]分析了 ADRC-Smith 的性能, 并通过改进差分算法整定控制参数, 最后与 ADRC、PI-Smith、PI 3 种控制器进行仿真比较。

在上述基础上, 本文研究了在被控对象准确已知和大约已知两种情况下, LADRC-Smith 控制方法的稳定条件和 Smith 预估器参数选择问题, 通过 MATLAB 仿真进行了验证, 并仿真分析了参数摄动对系统各个性能指标的影响。

1 线性自抗扰的基本原理

线性自抗扰以线性扩张状态观测器 (linear extended state observer, LESO) 为核心, 包含了状态和扰动估计、误差反馈和扰动补偿几部分, 结构如图 1 所示。

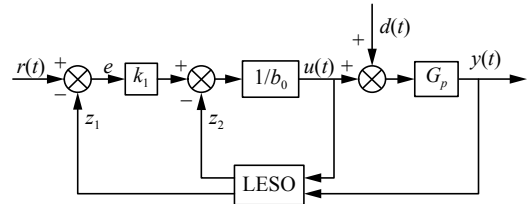


图 1 一阶系统线性自抗扰控制结构

Fig. 1 Diagram of LADRC for first-order systems

下面以一阶系统为例, 假定不含时滞的一阶被控对象用微分方程表示为

$$\dot{y} = f(y, d) + bu \tag{1}$$

式中: y 和 u 分别为系统的输出量和控制量, d 为未知的外部扰动, b 为不确定的模型参数, $f(\cdot)$ 为总扰动, 包含了对象不确定性造成的内部扰动和外部扰动 d 。

式 (1) 所描述系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu + Ef \\ y = CX \end{cases} \tag{2}$$

根据式 (2) 设计的线性扩张状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{Z} = AZ + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = CZ \end{cases} \tag{3}$$

式中: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$, $E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

$Z = [z_1 \ z_2]^T$ 为 LESO 的状态估计输出; $L = [\beta_1 \ \beta_2]^T$ 为 LESO 的增益。

控制量 u 为

$$u = \frac{k_1(r - z_1) - z_2}{b_0} \tag{4}$$

式中: r 为给定的参考输入值, k_1 为比例控制器增益, b_0 为 b 的估计值。对于一阶 LADRC, 系统的观测器和控制器带宽分别选择为^[12]

$$L = [\beta_1 \ \beta_2]^T = [2w_o \ w_o^2]^T, \quad k_1 = w_c \tag{5}$$

2 大时滞系统的 LADRC-Smith 设计

通常, 一阶大时滞被控对象的数学模型为

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}, \quad K, T, \tau > 0 \tag{6}$$

式中: T 为时间常数, τ 为时滞时间。在控制量 u 的作用下, 式 (6) 可用微分形式表示为

$$\dot{y} = f(y, d) + bu(t - \tau) \tag{7}$$

可以看出, 由于时滞的存在, 进入 LESO 的输出量 $y(t - \tau)$ 和控制量 $u(t)$ 在时间轴上不重合。为了得到有效的估计状态输出, 必须对状态观测器的两个输入信号进行同步性处理。因此, 引入 Smith 预估器, 消除时滞对被控输出的影响, 使得进入 LESO 的两个信号为 $y(t)$ 和 $u(t)$, 在时间轴上实现一致。Smith 预估器表达式为

$$G_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} (1 - e^{-\tau_m s}) \tag{8}$$

$$D(s) = b_0[s^2 + (2w_o + k_1)s] + [(2k_1w_o + w_o^2)s + k_1w_o^2] \cdot \left[\frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} + (1 - e^{-\tau_m s}) \frac{K_m}{T_m s + 1} \right] \quad (16)$$

对被控系统特性进行仿真发现, 针对大惯性环节, 当时间常数 T 摄动较小时 (即 $\beta \approx 1$), $\frac{K}{Ts + 1}$ 和 $\frac{K}{T_m s + 1}$ 输出非常接近; 当 τ 较小时, 可以进行 Taylor 展开, 但对于大时滞对象, Taylor 展开不适用, 而 Pade 近似更精确。所以, 为了能够定性分析, 作如下近似:

$$e^{-\tau s} = \frac{2 - \tau s}{2 + \tau s} e^{-(\gamma-1)\tau s} = 1 - (\gamma-1)\tau s, T \approx T_m = \beta T$$

则 $G_p + G_m$ 可以写作:

$$G_p + G_m \approx \frac{K}{\beta T s + 1} \cdot \frac{2 - \tau s}{2 + \tau s} + \frac{\alpha K}{\beta T s + 1} \left[1 - \frac{2 - \tau s}{2 + \tau s} (1 - (\gamma-1)\tau s) \right] \quad (17)$$

从而, 式 (16) 可以转化为

$$D(s) = a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s^1 + a_0 \quad (18)$$

式中

$$\begin{aligned} a_4 &= \beta b_0 T \tau \\ a_3 &= b_0 [\beta T \tau (2w_o + w_c) + (2\beta T + \tau)] - K(2w_c w_o + w_o^2) \alpha (\gamma - 1) \tau^2 \\ a_2 &= b_0 [(2w_o + w_c)(2\beta T + \tau) + 2] + K[(2w_c w_o + w_o^2)(2\alpha \gamma - 1) \tau - w_c w_o^2 \alpha (\gamma - 1) \tau^2] \\ a_1 &= 2b_0(2w_o + w_c) + K[w_c w_o^2 (2\alpha \gamma - 1) \tau + 2(2w_c w_o + w_o^2)] \\ a_0 &= 2Kw_c w_o^2 \end{aligned}$$

根据劳斯判据, 定性得到了一个近似的稳定充分条件:

- 1) $a_0 \sim a_4 > 0 \Rightarrow \gamma < 1$ and $2\alpha\gamma > 1$
- 2) $a_2 a_3 - a_1 a_4 > 0 \Rightarrow \alpha\lambda(1 - \gamma) - \gamma > 0$
- 3) $a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_0 a_3^2 > 0 \Rightarrow \alpha\lambda(1 - \gamma) - \gamma > 0$

证毕。

3.2 仿真验证

被控对象为^[18]: $G_p = \frac{0.85}{1200s + 1} e^{-1.800s}$ 。

3.2.1 Smith 预估器参数与被控对象相同

由图 5 可以看出, 当 Smith 预估器的参数与被控对象完全相同时, 只要 3 个被调参数为正, 系统输出最终是稳定的, 但是动态过程跟参数选择十分密切, 参数调节与性能关系将在下面讨论。

3.2.2 Smith 预估器参数与被控对象不同

当 Smith 预估器参数与被控对象参数不不同时, 按照命题 2 的近似充分条件选择 Smith 预估器参数, 控制参数随意给定, 然后进行仿真验证, 如图 6 所示。

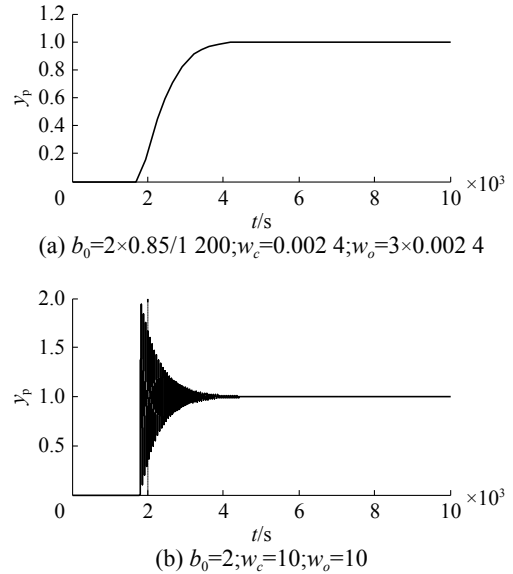


图 5 被控对象准确已知时的阶跃响应
Fig. 5 Step response when plant is accurately known

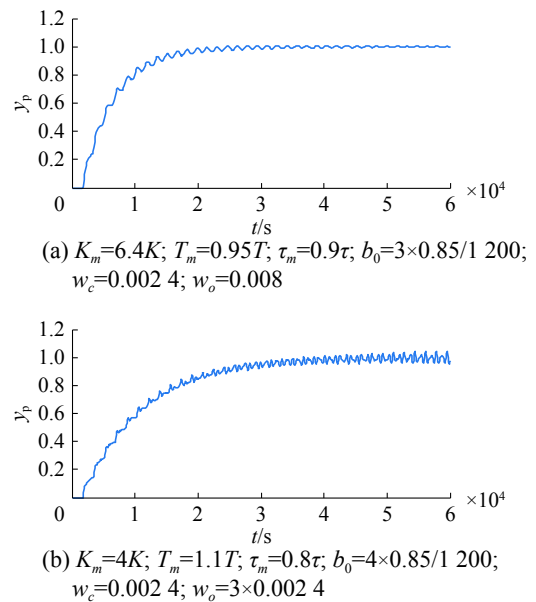


图 6 被控对象大约已知时的阶跃响应
Fig. 6 Step response when plant is approximately known

可以看出, 当 Smith 预估器参数与被控对象不不同时, 根据命题 2 选择参数, 由于是近似条件, 系统最终可能不稳定, 与控制参数选择也相关, 所以, 命题 2 有一定的局限性, 但也有一定的参考意义, 控制参数与性能的关系将在下面分析。

4 参数分析与设计原则

同样, 选择一阶系统: $G_p = \frac{0.85}{1200s + 1} e^{-1.800s}$, 从系统参数和控制参数两个角度分析参数变化对系统的影响。

系统的动态性能指标中比较重要的是最大超调量 M_p 和调整时间 $t_r(2\%)$; 系统的稳态性能指标主要有幅值裕度 GM、相角裕度 PM 和时滞裕度 DM; 系统的抗扰性能方面比较重要的指标是扰

动偏离量(定义为 M_d)和扰动恢复时间(定义为 t_d);下面将从系统参数、控制参数进行比较分析。

4.1 系统参数

Smith 预估器参数为

$$K_m = 0.85, T_m = 1\ 200, \tau_m = 1\ 800;$$

控制参数为 $b_0 = 2 \times 0.85 / 1\ 200, w_c = 0.002\ 4, w_o = 3 \times 0.002\ 4$ 。利用奈氏曲线(如图 7)得到系统稳定的 K 、 T 、 τ 摄动边界值^[17]如表 1 所示:

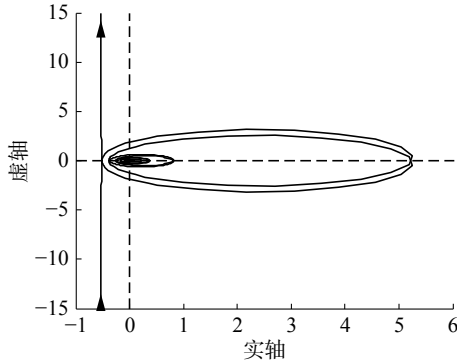


图 7 LADRC-Smith 奈氏曲线图

Fig. 7 Nyquist diagram of LADRC-Smith

表 1 被控对象参数摄动的稳定边界值

Table 1 Stable boundary when parameters perturbation

摄动参数	K	T	τ
最大倍数	1.950	很大	0.740
最小倍数	很小	0.405	1.235

4.1.1 K 变化对系统的影响

如表 2 和图 8 可以看出:

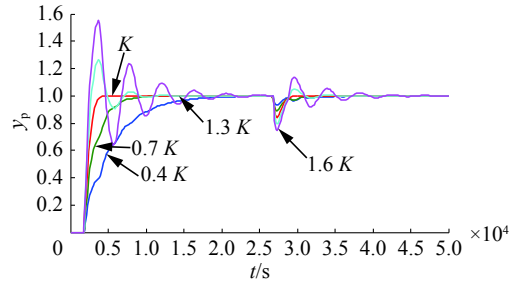
- 1) 与 $K' > K$ 相比, $K' < K$ 时, 系统响应慢, 调节时间短, 无超调;
- 2) 随着 K' 的增大, 穿越频率增大, 系统响应变快;
- 3) 随着 K' 的增大, 增益裕度、时滞裕度和相位裕度都减小;
- 4) 随着 K' 的增大, 扰动偏离更大, 相对于 $K' < K$, 扰动恢复时间偏长。

所以, 相对于 $K' > K$, K 值变小对系统更有利, 即进行 Smith 设计时, K 值可以适当偏大。

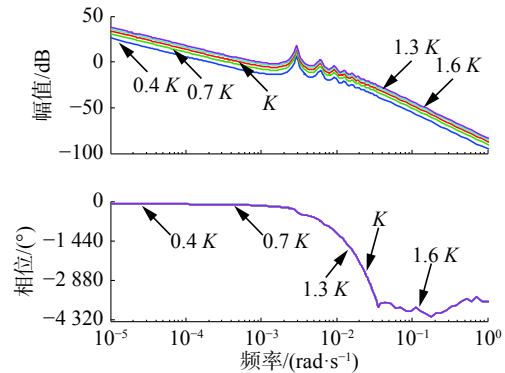
表 2 K 变化的性能指标

Table 2 Performance index when K changes

K'	0.4 K	0.7 K	K	1.3 K	1.6 K
GM/dB	13.8	8.89	5.8	3.52	1.71
PM/(°)	77.9	68.5	58.5	47.3	33.9
$w_c(\times 10^{-4})$	1.99	3.53	5.18	7.01	9.22
DM/s	6 940	3 380	1 970	1 180	641
$M_p/\%$	0	0	0.18	26.78	55.68
t_r/s	16 932	8 108.5	3 753.5	8 531.5	18 963
$M_d/\%$	6.51	3.32	15.93	20.71	25.91
t_d/s	6 809	5 138	3 804	5 524	11 768



(a) Bode 图



(b) 阶跃响应(带扰动)

图 8 K 变化的阶跃响应(带扰动)和 Bode 图

Fig. 8 Step response with disturbance and Bode diagram for K

4.1.2 T 变化对系统的影响

如表 3 和图 9 可以看出:

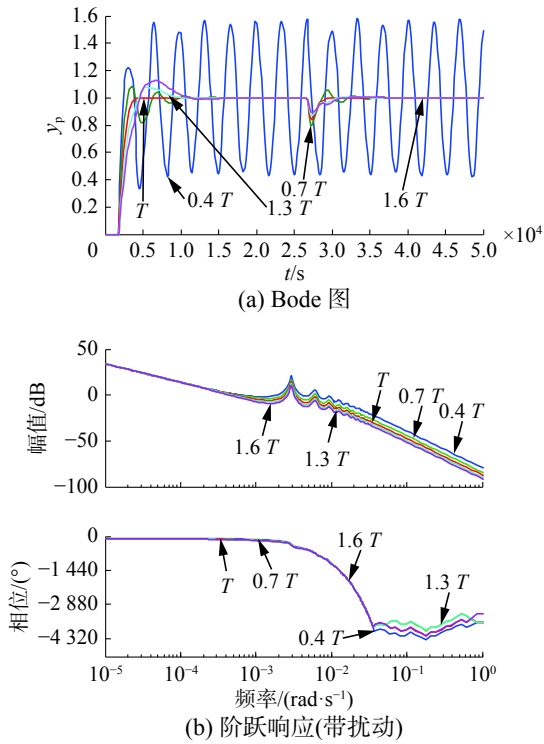
- 1) 相对于 $T' < T, T' > T$ 系统超调更小, 调节时间更短, 不会出现振荡;
- 2) 随着 T' 的增大, 穿越频率减小, 系统响应变慢;
- 3) 随着 T' 的增大, 增益裕度增大, 相位裕度略有减小, 时滞裕度略有增加;
- 4) 随着 T' 的增大, 扰动偏离减小, 相对于 $T' < T$, 扰动恢复时间偏小。

所以, 相对于 $T' < T, T$ 值偏大对系统性能更有利, 即进行 Smith 设计时, T_m 值可以适当偏小。

表 3 T 变化的性能指标

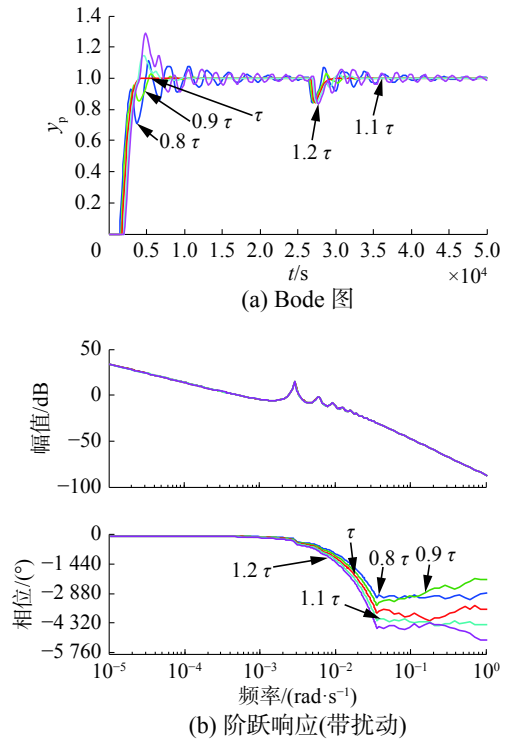
Table 3 Performance index when T changes

T'	0.4 T	0.7 T	T	1.3 T	1.6 T
GM/dB	-0.146	3.44	5.8	7.5	8.82
PM/(°)	71.5	63.9	58.5	54.2	50.8
$w_c(\times 10^{-4})$	6.4	5.72	5.18	4.75	4.41
DM/s	1 950	1 950	1 970	1 990	2 010
$M_p/\%$	60	18.91	0.18	7.81	12.76
t_r/s	∞	9 314.5	3 753.5	8 562.5	10 036
$M_d/\%$	62	20.6	15.93	13.02	11.04
t_d/s	∞	6 673	3 804	4 939	5 272



(a) Bode 图

(b) 阶跃响应(带扰动)



(a) Bode 图

(b) 阶跃响应(带扰动)

图 9 T 变化的阶跃响应(带扰动)和 Bode 图

图 10 τ 变化的阶跃响应(带扰动)和 Bode 图

Fig. 9 Step response with disturbance and Bode diagram for T

Fig. 10 Step response with disturbance and Bode diagram for τ

4.1.3 τ 变化对系统的影响

如表 4 和图 10 可以看出:

- 1) τ 的过多变化, 会使系统性能变差, 出现振荡, 与 $\tau' > \tau$ 相比, $\tau' < \tau$ 时, 系统超调稍大, 调节时间稍短;
- 2) 随着 τ 的变化, 穿越频率不变;
- 3) 随着 τ 的增大, 幅值裕度先增后减, 时滞裕度和相位裕度都减小;
- 4) 与 $\tau' > \tau$ 相比, $\tau' < \tau$ 的扰动偏离更小, 扰动恢复时间偏短。

所以, 相对于 $\tau' > \tau$, τ 值变小对系统更有利, 即进行 Smith 设计时, τ_m 值可以适当偏大。

表 4 τ 变化的性能指标

Table 4 Performance index when τ changes

τ'	0.8τ	0.9τ	τ	1.1τ	1.2τ
GM/dB	3.28	5.44	5.8	5.53	5.02
PM/(°)	69.2	63.8	58.5	53.1	47.8
$w_c(\times 10^{-4})$	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18
DM/s	2 330	2 150	1 970	1 790	1 610
$M_p/\%$	29.53	15.04	0.18	14.73	29.13
t_r/s	19 982	7 388.5	3 753.5	7 388.5	26 320
$M_d/\%$	15.94	15.93	15.93	15.93	16.68
t_d/s	14 362	5 595	3 804	5 679	21 525

综上, 进行 Smith 设计时, K_m 、 τ_m 略大于 K 、 τ , T_m 略小于 T 时, 更有利于系统的稳定。

下面进行验证, 对如上同一被控对象, 选择同一控制参数设计 3 个 Smith 预估器 G_{m1} 、 G_m 和 G_{m2} :

$$G_{m1} : K_{m1} = 1.1K, T_{m1} = 0.9T, \tau_{m1} = 1.1\tau$$

$$G_m : K_m = K, T_m = T, \tau_m = \tau$$

$$G_{m2} : K_{m2} = 0.9K, T_{m2} = 1.1T, \tau_{m2} = 0.9\tau$$

进行时域和频域分析, 如图 11 所示。

如表 5 和图 11 可以看出, Smith 预估器 G_{m1} 动态性能和稳态性能优于 G_{m2} , 所以, 对一阶大时滞系统进行 Smith 设计, 当被控对象模型大约已知时, 选择相对较大的 K_m 、 τ_m 值和较小的 T_m 值, 控制性能会更好。

表 5 不同 Smith 预估器的性能指标

Table 5 Performance index for different Smith predictors

Smith	G_{m1}	G_m	G_{m2}
GM/dB	7.09	5.8	3.98
PM/(°)	64.7	58.5	47.9
DM/s	2 670	1 970	1 270
穿越频率 ($\times 10^{-4}$)	4.23	5.18	6.58

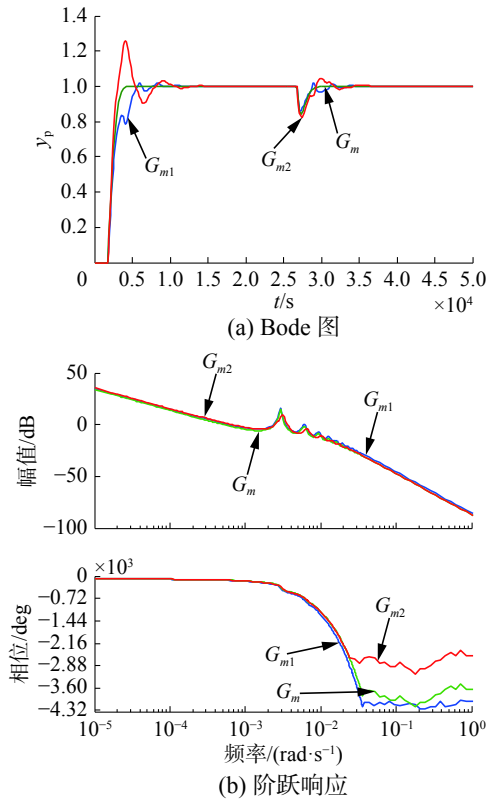


图 11 不同预估器的阶跃响应和 Bode 图

Fig. 11 Step response and Bode diagram for different predictors

4.2 控制参数

4.2.1 b_0 变化对系统的影响

控制 w_o 、 w_c 不变, 改变 b_0 值, 绘制系统的阶跃响应图和 Bode 图如图 12、性能指标见表 6。

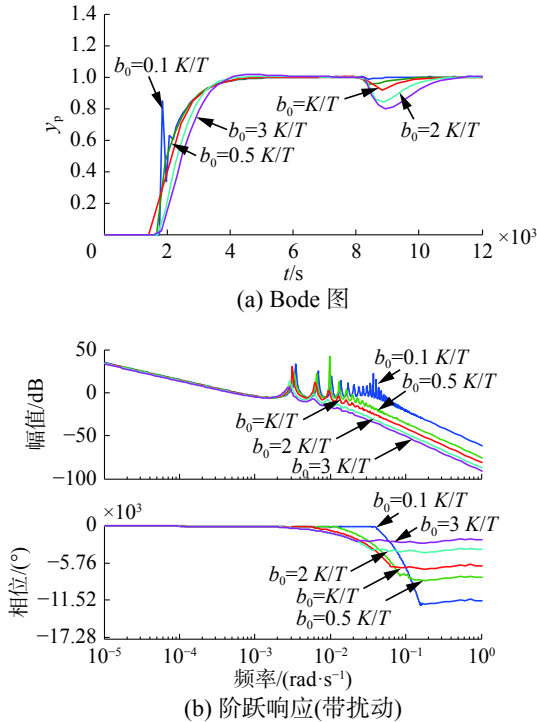


图 12 b_0 变化的阶跃响应(带扰动)和 Bode 图

Fig. 12 Step response with disturbance and Bode diagram for b_0

表 6 b_0 变化的性能指标

$b_0(K/T)$	0.1	0.5	1	2	3
GM/dB	5.98	5.85	5.77	5.8	5.95
PM/(°)	59.9	59.4	59	58.5	58.3
DM/s	1 810	1 830	1 880	1 970	2 080
穿越频率($\times 10^{-4}$)	5.78	5.65	5.49	5.18	4.89

可以看出: 随着 b_0 增加

- 1) 系统响应变慢, 振荡消失, 出现了超调;
- 2) 当扰动出现时, 扰动偏离量和扰动恢复时间增加, 抗扰性能变弱;
- 3) 增益裕度先减小后增加, 相角裕度减小, 时滞裕度增加, 穿越频率减小。

所以, 选取 b_0 初始值为 K/T , 随后逐渐增加, 时滞时间越大, b_0 值越大, 同时兼顾动态特性、抗扰性能和稳定裕度三方面, 选择合适的 b_0 值。

4.2.2 w_c 变化对系统的影响

控制 w_o 、 b_0 不变, 改变 w_c 值, 绘制系统的阶跃响应图和 Bode 图如图 13、性能指标见表 7。

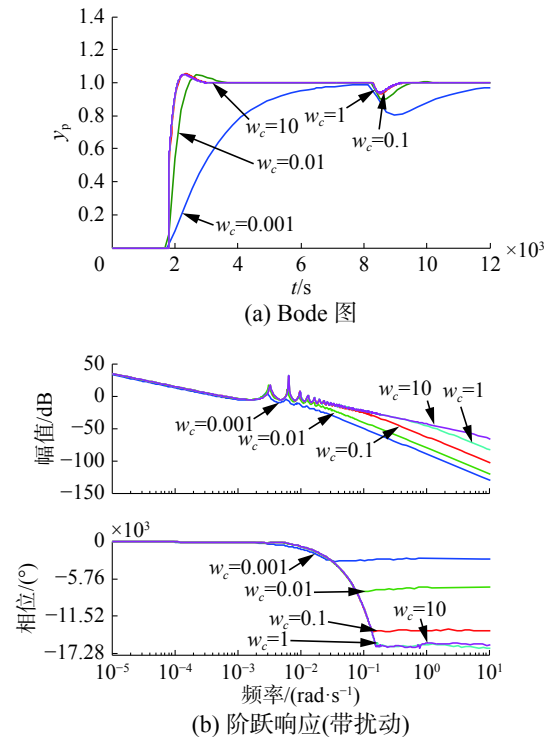


图 13 w_c 变化的阶跃响应(带扰动)和 Bode 图

Fig. 13 Step response with disturbance and Bode diagram for w_c

表 7 w_c 变化的性能指标

w_c	0.001	0.01	0.1	1	10
GM/dB	6.7	5.48	5.69	5.73	5.73
PM/(°)	61.5	58.7	59.3	59.4	59.4
DM/s	2 370	1 830	1 810	1 810	1 810
穿越频率($\times 10^{-4}$)	4.53	5.61	5.72	5.73	5.74

可以看出: 随着控制器带宽增加, 1) 系统响应变快, 出现了超调; 2) 抗扰性能增强, 扰动偏离量和扰动恢复时间减小; 3) 增益裕度和相角裕度先减小后增加, 时滞裕度减小, 穿越频率增加。

4.2.3 w_o 变化对系统的影响

控制 w_c 、 b_0 不变, 改变 w_o 值, 绘制系统的阶跃响应图和 Bode 图如图 14、性能指标见表 8。

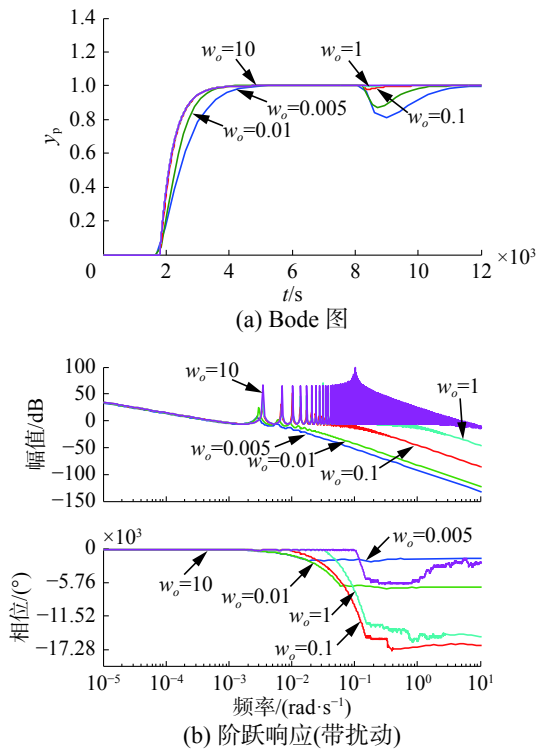


图 14 w_o 变化的阶跃响应(带扰动)和 Bode 图

Fig. 14 Step response with disturbance and Bode diagram for w_o

表 8 w_o 变化的性能指标

Table 8 Performance index when w_o changes

w_o	0.005	0.01	0.1	1	10
GM/dB	6.05	5.7	5.93	6.01	6.02
PM/(°)	58.8	58.6	59.8	60	60
DM/s	2 110	1 900	1 800	1 800	1 800
穿越频率 ($\times 10^{-4}$)	4.87	5.37	5.78	5.81	5.82

可以看出: 随着观测器带宽增加

- 1) 系统响应变快, 调节时间变短;
- 2) 抗扰性能增强, 扰动偏离量和扰动恢复时间减小;
- 3) 增益裕度和相角裕度先减小后增加, 时滞裕度减小, 穿越频率增加。

综上, 可以得到如下控制参数调节规则:

- 1) 当系统响应慢、需要较强抗扰能力时, 减小 b_0 , 增大 w_c 、 w_o ;

- 2) 当系统开始振荡时, 增大 b_0 ;

- 3) 当系统有超调、需要较大时滞裕度时, 增大 b_0 , 减小 w_c 、 w_o ;

- 4) 需要较大相角裕度时, 减小 b_0 , 从小到大调节 w_c 、 w_o ;

- 5) 需要较大增益裕度时, 从小到大调节 b_0 、 w_c 、 w_o 。

5 结束语

本文针对大时滞系统, 研究了基于 Smith 预估器的线性自抗扰控制的稳定条件, 通过 MATLAB 仿真进行验证, 并分析了系统参数和控制参数对系统的影响, 得出以下结论:

- 1) 当被控对象准确已知, Smith 预估器参数与被控对象相同时, 系统是稳定的。当被控对象大约已知时, 根据稳定的近似充分条件选择 Smith 预估器参数进行设计, 根据性能需要适当调节参数, 系统更易稳定。

- 2) 当被控对象扰动, 系统参数 K 、 τ 变小, T 变大时, 对系统危害更小, 所以, 当被控对象估计不准确时, 相应的 Smith 预估器参数 K_m 、 τ_m 设计偏大, T_m 偏小, 系统总体性能更好。

- 3) 本文分析建立在被控对象大约已知的基础上, 限制了实际应用, 而且 Smith 预估器参数与被控对象不同时的近似充分条件并不能保证系统一定稳定, 有一定局限性。所以对模型未知情况下的系统控制和稳定性证明需要进一步探索。

参考文献:

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

[2] 贾飏. Smith 预估器在纯滞后矿仓料位控制中的应用[J]. 自动化仪表, 2004, 25(5): 39-41.

JIA Biao. Application of smith predictor in ore silo material level control with dead time characteristic[J]. Process automation instrumentation, 2004, 25(5): 39-41.

[3] 刘启辉, 文云, 张云龙. 基于一阶时滞系统的 Smith 预估器控制研究[J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(9): 11-13, 17.

LIU Qihui, WEN Yun, ZHANG Yunlong. Research of smith predictor controller based on first-order dynamics plus dead time[J]. Techniques of automation and applications, 2014, 33(9): 11-13, 17.

[4] 任雪梅. 非线性时滞系统的稳定自适应控制[J]. 智能系统学报, 2007, 2(5): 84-90.

REN Xuemei. Stable adaptive neural network control of nonlinear time delay systems[J]. CAAI transactions on in-

- telligent systems, 2007, 2(5): 84–90.
- [5] 罗小元, 朱志浩, 关新平. 不确定非线性时滞系统的自适应滑模控制[J]. 智能系统学报, 2010, 5(4): 332–335.
LUO Xiaoyuan, ZHU Zhihao, GUAN Xinping. Adaptive sliding mode control for uncertain nonlinear time-delay systems[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2010, 5(4): 332–335.
- [6] 蒋朝辉, 李学明, 桂卫华. 大时滞系统全参数自适应预测控制策略[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(1): 195–201.
JIANG Zhaohui, LI Xueming, GUI Weihua. All parameters adaptive predictive control strategy for long time-delay system[J]. Journal of central south university: science and technology, 2012, 43(1): 195–201.
- [7] MANFRED M, SKOGESTAD S, RIVERA D F. Implications of internal model control for PID controllers[C]//Proceedings of 1984 American Control Conference. San Diego, USA, 1984: 661–666.
- [8] 邓九英, 王钦若, 叶宝玉. 一种纯时滞系统的鲁棒控制优化设计方法[J]. 信息与控制, 2011, 40(1): 1–7.
DENG Jiuying, WANG Qinruo, YE Baoyu. Robust control optimization design method of a system with pure-delay[J]. Information and control, 2011, 40(1): 1–7.
- [9] 达飞鹏, 宋文忠. 大时滞系统的智能控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 186–188.
DA Feipeng, SONG Wenzhong. Intelligent controller design for systems of long time delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 186–188.
- [10] ZHOU Ling, CHEN Jie, XU Lixin. An intelligent control scheme of time delay system[C]//Proceedings of 2008 IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application. Wuhan, China, 2008: 446–448.
- [11] 韩京清, 张文革. 大时滞系统的自抗扰控制[J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 67–71.
HAN Jingqing, ZHANG Wen'ge. ADRC control for large time-delay systems[J]. Control and decision, 1999, 14(4): 67–71.
- [12] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of 2003 American Control Conference. Denver, USA, 2003: 4989–4996.
- [13] TIAN Gang, GAO Zhiqiang. Frequency response analysis of active disturbance rejection based control system [C]//Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Control Applications. Singapore, 2007: 1595–1599.
- [14] 陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 574–580.
CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, YANG Ruiguang. On the stability of linear active disturbance rejection control [J]. Acta automatica sinica, 2013, 39(5): 574–580.
- [15] ZHANG Dongyang, YAO Xiaolan, WU Qinghe. Frequency-domain characteristics analysis of linear active disturbance rejection control for second-order systems [C]//Proceedings of the 34th Chinese Control Conference. Hangzhou, China, 2015: 53–58.
- [16] HUANG Congzhi, GAO Zhiqiang. On transfer function representation and frequency response of linear active disturbance rejection control[C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an, China, 2013: 72–77.
- [17] ZHENG Qinling, GAO Zhiqiang. Predictive active disturbance rejection control for processes with time delay[J]. ISA transactions, 2014, 53(4): 873–881.
- [18] 唐德翠, 高志强, 张绪红. 浊度大时滞过程的预测自抗扰控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(1): 101–108.
TANG Decui, GAO Zhiqiang, ZHANG Xuhong. Design of predictive active disturbance rejection controller for turbidity[J]. Control theory and applications, 2017, 34(1): 101–108.
- [19] 杨瑞光. 线性自抗扰控制的若干问题研究[D]. 天津: 南开大学, 2011: 65–67.
YANG Ruiguang. On linear active disturbance rejection control[D]. Tianjin: Nankai University, 2011: 65–67.

作者简介:



王永帅, 女, 1993 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为自抗扰控制、预测控制。



陈增强, 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制、预测控制、自抗扰控制。主持完成国家“863”基金和国家自然科学基金 6 项, 获得省部级科技进步奖 4 次, 发表学术论文 200 余篇。



孙明玮, 男, 1972 年生, 教授, 主要研究方向为飞行器制导与控制、自抗扰控制。主持国防科技攻关基金和国家自然科学基金 4 项, 获得国防科技进步奖 3 次, 发表学术论文 50 余篇。