

大时滞不确定过程对象参考自适应时滞补偿器 ——基于 Popov 超稳定理论的参数自适应律设计

鲁照权

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 给出了大时滞不确定过程的一种新型描述方式, 提出了采用一族模型拟合大时滞不确定过程的对象参考参数自适应时滞补偿器. 以大时滞不确定被控过程为参考对象, 给出了基于 Popov 超稳定理论综合自适应律的方法. 自适应律使时滞补偿器的参数逐渐逼近被控过程的参数, 从而克服了 Smith 预估补偿器对模型偏差的敏感问题, 大大提高了系统的抗扰动能力. 仿真结果表明, 参数自适应时滞补偿器对大时滞不确定过程及复杂高阶过程均有良好的自适应跟踪及预估补偿能力.

关键词: 新型描述方式; 大时滞; 不确定过程; 参数自适应; 时滞补偿器; Popov 超稳定理论

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Object reference parameter adaptive delay compensator for uncertain system with large delay:

Parameter adaptive rule design based on Popov hyperstability theory

LU Zhao-quan

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009 China)

Abstract: A new description is given for uncertain processes with large delays (UPLD). A kind of object reference adaptive delay compensator is presented. A group of models are used to simulate the UPLD. The UPLD is used as a reference model and a kind of adaptive rule based on Popov hyperstability theory and enables the parameters of the compensator to approximate those of the uncertain process. The Smith compensator's sensitivity to the model difference is completely conquered and the system's ability to counteract disturbance is greatly improved. Simulation results show that the object reference adaptive compensator is able to track and to compensate uncertain processes with large delays or high-order uncertain processes.

Key words: new description; large delays; uncertain process; parameter adaptive; delay compensator; Popov hyperstability theory

1 引言 (Introduction)

美国加利福尼亚大学的 Smith O J M 教授先后发表了两篇文章^[1,2]. 文中列举了钢板冷轧过程、催化裂化反应过程、油料混合过程 3 种典型的带有大纯时滞的工业生产过程, 并提出了过程输出预估及时滞补偿的方法. 该方法被称之为 Smith 预估补偿器. 遗憾的是 Smith 预估器对系统受到的负荷扰动无能为力. 这是因为预估器模型与掌握过程特性的精度有密切的关系. 简言之, Smith 预估补偿器有两个缺点: 1) 对模型的偏差极为敏感, 如对模型参数 (包括滞后时间) 非常敏感, 甚至极小的模型偏差都可能导致闭环系统的不稳定; 2) 抗扰动能力低. 当

运行条件发生变化时将影响控制效果、甚至导致闭环系统的不稳定.

针对以上缺点, 出现了许多试图改进 Smith 预估器的控制方案^[3~7]. 虽然在一定程度上提高了 Smith 预估器的鲁棒性和抗扰能力, 但并没有从根本上解决问题. 本文给出了大时滞不确定过程的一种新型描述方式, 提出了对象参考参数自适应时滞补偿器^[8,9]. 该补偿器以大时滞不确定被控过程的输出为跟踪目标, 用一族模型和一个时滞环节去拟合被控对象. 文中给出了基于 Popov 超稳定理论综合自适应律的方法. 自适应律使补偿器的参数始终跟随被控对象的变化. 仿真结果表明, 在参数不匹配的

情况下,参数自适应时滞补偿器对大时滞不确定过程及复杂高阶过程具有良好的自适应跟踪及预估补偿能力,从而克服了 Smith 预估补偿器的缺点,使其能够可靠地应用于生产实践.

2 问题的新型描述(Problem new description)

设受控过程的数学描述及标称模型分别为式(1)和式(2).为了克服过程的大时滞,并考虑到过程参数的不确定性,采用图1所示的参数自适应时滞补偿器.

$$\begin{cases} p^n y_p(t) + \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \bar{a}_i p^i \right\} y_p(t) = \left\{ \sum_{j=0}^m \bar{b}_j p^j \right\} u(t), \\ y(t) = y_p(t - \hat{\tau}), \end{cases} \quad (1)$$

标称模型为

$$\begin{cases} p^n y_p^*(t) + \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} a_i p^i \right\} y_p^*(t) = \left\{ \sum_{j=0}^m b_j p^j \right\} u(t), \\ y^*(t) = y_p^*(t - \tau_p). \end{cases} \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} \bar{a}_i = a_i + \Delta_{a_i}, \quad i = 0, 1, \dots, n-1, \\ \bar{b}_j = b_j + \Delta_{b_j}, \quad j = 0, 1, \dots, m, \\ \hat{\tau} = \tau_p + \Delta_{\tau}, \end{cases} \quad (3)$$

$a_i (i = 0, 1, \dots, n-1), b_j (j = 0, 1, \dots, m, m \leq n-1)$ 分别为过程参数的标称值; τ_p 为纯时滞的标称值; $\Delta_{a_i}, \Delta_{b_j}, \Delta_{\tau}$ 分别为模型参数及纯时滞的不确定或摄动部分; $y(t)$ 为受控过程的输出; $y_p(t)$ 是不可检测的, 为过程不含时滞部分的输出; $y_p^*(t)$ 为标称模型的输出; $y^*(t)$ 为 $y_p^*(t)$ 经滞后的标称模型输出; $u(t)$ 为控制. 图1中 $\hat{y}(t)$ 为大时滞不确定过程参数自适应模型的输出, $y_M(t)$ 为参数自适应模型不含时滞部分的输出, $\hat{y}_p(t)$ 为 $y_p(t)$ 的预测值由式(4)描述. 参数自适应模型及标称时滞环节由式(5)描述.

$$\hat{y}_p(t) = y(t) - \hat{y}(t) + y_M(t), \quad (4)$$

$$\begin{cases} p^* y_M(t) + \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} a_{M_i} p^i \right\} y_M(t) = \left\{ \sum_{j=0}^m b_{M_j} p^j \right\} u(t), \\ \hat{y}(t) = y_M(t - \tau_M). \end{cases} \quad (5)$$

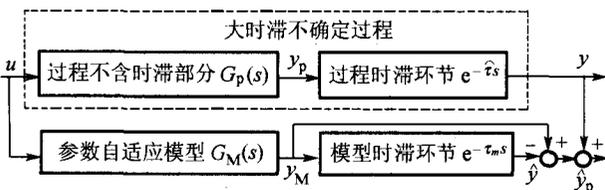


图1 带参数自适应时滞补偿器的大时滞不确定过程
Fig. 1 Uncertain process with adaptive delay compensator

若 $\tau_M = \hat{\tau}$, 则一定存在合适的自适应律使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} a_{M_i}(*, t) = a_i + \Delta_{a_i}, \lim_{t \rightarrow \infty} b_{M_j}(*, t) = b_j + \Delta_{b_j}$. $a_{M_i}(*, t), b_{M_j}(*, t)$ 为模型自适应参数, $*$ 为跟踪误差. 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{y}(t) = y(t), \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{y}_p(t) = y_p(t), \lim_{t \rightarrow \infty} y_M(t) = y_p(t)$. 由于模型滞后时间 τ_M 是常数, 而 $\hat{\tau}$ 是不确定的, 因此 $\tau_M = \hat{\tau}$ 不能成立.

不妨在受控过程的数学描述式(1)中, 令纯时滞为常数, 即标称值 τ_p , 同时令 $\tau_M = \tau_p$. 为了弥补时滞不确定或摄动 Δ_{τ} , 引入参数增量 $\alpha_{a_i}[\Delta_{\tau}]$ 和 $\beta_{b_j}[\Delta_{\tau}]$, 令

$$\tilde{\Delta}_{a_i} = \Delta_{a_i} + \alpha_{a_i}[\Delta_{\tau}], \quad \tilde{\Delta}_{b_j} = \Delta_{b_j} + \beta_{b_j}[\Delta_{\tau}], \quad (6)$$

这样, 受控过程可重新描述为

$$\begin{cases} p^n \tilde{y}_p(t) + \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \tilde{a}_i p^i \right\} \tilde{y}_p(t) = \left\{ \sum_{j=0}^m \tilde{b}_j p^j \right\} u(t), \\ y(t) = \tilde{y}_p(t - \tau_p), \end{cases} \quad (7)$$

式中

$$\begin{cases} \tilde{a}_i = a_i + \tilde{\Delta}_{a_i}, \quad i = 0, 1, \dots, n-1, \\ \tilde{b}_j = b_j + \tilde{\Delta}_{b_j}, \quad j = 0, 1, \dots, m. \end{cases} \quad (8)$$

假设1 a) $|\Delta_{a_i}| \leq h_{a_i}, i = 0, 1, \dots, n-1, h_{a_i} \in [0, +\infty)$;

b) $|\Delta_{b_j}| \leq h_{b_j}, j = 0, 1, \dots, m, h_{b_j} \in [0, +\infty)$;

c) $|\Delta_{\tau}| \leq h_{\tau}, h_{\tau} \in [0, +\infty)$;

d) $|\alpha_{a_i}[\Delta_{\tau}]| \leq h_{a_i}, h_{a_i} \in [0, +\infty)$;

e) $|\beta_{b_j}[\Delta_{\tau}]| \leq h_{b_j}, h_{b_j} \in [0, +\infty)$;

f) $s^n + \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \tilde{a}_i s^i \right\}$ 和 $s^n + \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \tilde{a}_i s^i \right\}$ 均为 Hurwitz 多项式.

问题1 对于由式(1)(2)描述的时滞补偿系统, 定义广义误差为

$$\begin{cases} \hat{e}_y(t) = \hat{y}_p(t) - y_M(t), \\ \tilde{e}_y(t) = \tilde{y}_p(t) - \hat{y}_p(t), \\ \epsilon_y(t) = y(t) - \hat{y}(t) \end{cases} \quad (9)$$

设计自适应律使得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e}_y(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{e}_y(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon_y(t) = 0, \quad (10)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} a_{M_i}(\hat{e}_y, t) = a_i + \tilde{\Delta}_{a_i}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} b_{M_j}(\hat{e}_y, t) = b_j + \tilde{\Delta}_{b_j}, \quad (11)$$

从而图1可等效为图2. 其中 $e^{-\tau_p s}$ 为标称时滞环节, $e^{-\Delta_{\tau} s}$ 为时滞环节的摄动部分.

$$v(t) = D(p)\hat{e}_{yf}(t) = \left[\sum_{i=0}^{n-1} dp^i \right] \hat{e}_{yf}(t). \quad (25)$$

反馈通道为

$$\begin{aligned} \omega(t) = -\omega_1(t) = & \\ - \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} [a_{M_i}(v,t) - \tilde{a}_i] p^i \right\} y_M(t) + & \\ \left\{ \sum_{j=0}^n [b_{M_j}(v,t) \tilde{b}_j] p^j \right\} u_f(t). & \end{aligned} \quad (26)$$

为了保证系统渐近稳定,由 Popov 超稳定理论^[11]知,由式(24),(25)所构成的前向通道传递函数 $G_v(s) = (d_{n-1}s^{n-1} + \dots + d_0)/(s^n + \tilde{a}_{n-1}s^{n-1} + \dots + \tilde{a}_0)$ 必须严格正实.根据式(24)~(26)可绘出图4所示的等效非线性反馈系统.

使非线性反馈环节满足 Popov 积分不等式的 $\phi_1(v,t,\tau), \phi_2(v,t), \psi_{1j}(v,t,\tau)$ 和 $\psi_2(v,t)$ 的解,由定理1给出.

定理1 对由式(13)~(26)描述的对象参考参数自适应系统非线性反馈环节满足 Popov 积分不等式^[11]

$$\begin{cases} \eta(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} \omega^T(t)y(t)dt \geq -r_0^2, \\ \forall t_1 \geq t_0, r_0^2 \geq 0 \end{cases} \quad (27)$$

的充分条件是可调参数自适应律为

$$\phi_1(v,t,\tau) = -k_{a_i}(t-\tau)v(\tau)p^i y_M(\tau), \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \tau \leq t, i = 0, 1, \dots, n-1, \\ \phi_2(v,t) = -k_{1_i}(t)v(\tau)p^i y_M(\tau), \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} k_{1_i}(t) \geq 0, i = 0, 1, \dots, n-1, \\ \psi_{1_j}(v,t,\tau) = k_{b_j}(t-\tau)v(\tau)p^j u_f(\tau), \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \tau \leq t, j = 0, 1, \dots, m, \\ \psi_2(v,t) = k_{2_j}(t)v(t)p^j u_f(t), \\ k_{2_j}(t) \geq 0, j = 0, 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (31)$$

式中 $k_{a_i}(t-\tau)$ 和 $k_{b_j}(t-\tau)$ 为正定标量积分核,其 Laplace 变换是在 $s=0$ 处有一个极点的正实传递函数.证明参见文献[9].

结论1 对于由式(13)~(26)描述,如图4所示的对象参考参数自适应时滞补偿器渐近超稳定的充分条件为:

1) 由式(24)(25)所构成的前向通道传递函数 $G_v(s) = (d_{n-1}s^{n-1} + \dots + d_0)/(s^n + \tilde{a}_{n-1}s^{n-1} + \dots + \tilde{a}_0)$ 严格证实;

2) 可调参数自适应律由定理1中式(28)~(31)确定.

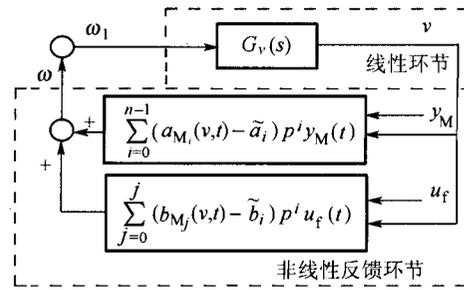


图4 等效非线性反馈系统
Fig. 4 Equivalent nonlinear feedback system

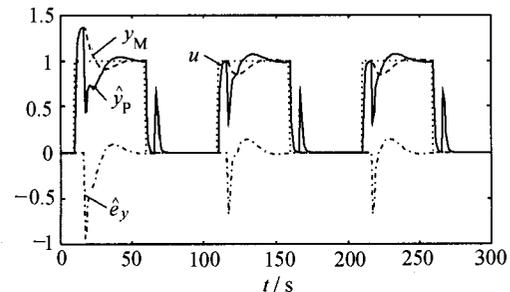
4 实例仿真(Simulation example)

例1 设一大时滞不确定过程为 $G(s) = G_P(s)e^{-\hat{\tau}s}, G_P = 1/(s+1)$, 其标称模型为 $G^*(s) = G_P^*(s)e^{-6s}, G_P^*(s) = 1.5/(s+1.1)$. 取 $a_{M_0}(0) = 1.1, b_{M_0}(0) = 1.5, k_{a_0} = -0.001, k_{b_0} = 0.1, k_{1_0} = k_{2_0} = 0$, 则由式(20)(21)得

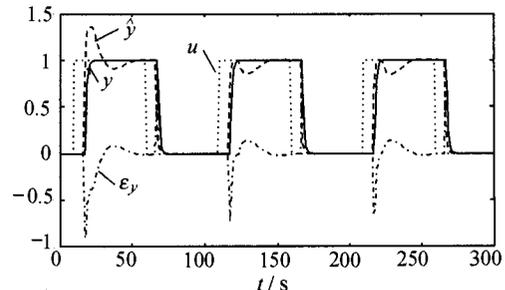
$$a_{M_0}(\hat{e}_y, t) = -0.001 \int \hat{e}_y(t)y_M(t)dt - 1.1,$$

$$b_{M_0}(\hat{e}_y, t) = 0.1 \int \hat{e}_y u(t)dt + 1.5.$$

图5是存在参数偏差情况下的系统响应曲线.可以看出在各种情况下, $\hat{y}(t)$ 对 $y(t), y_M(t)$ 对 $\hat{y}_P(t)$ 均有良好的跟踪能力.并且预测值 $\hat{y}_P(t)$ 与 $u(t)$ 之间完全同步,比实际的输出 $y(t)$ 超前了6秒.



(a) $G(s)=e^{-7.5s}/(s+1)$, 输入信号 $u(t)$ 为方波时 $y_M(t)$ 跟踪预测输出 $\hat{y}_P(t)$ 的情况



(b) $G(s)=e^{-7.5s}/(s+1)$, 输入信号 $u(t)$ 为方波时 $\hat{y}_M(t)$ 跟踪预测输出 $y(t)$ 的情况

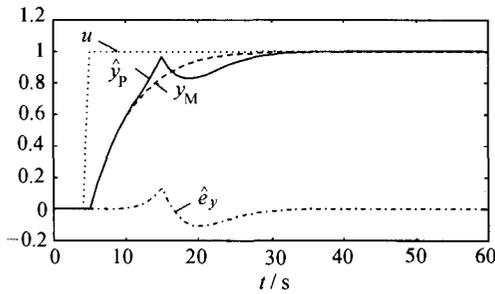
图5 受控过程为 $G(s) = e^{-7.5s}/(s+1)$ 时的仿真结果
Fig. 5 Simulation result of controlled process, $G(s) = e^{-7.5s}/(s+1)$, and $u(t)$ is square wave

例2 设一高阶过程为 $G(s) = 1/(2s + 1)^8$, 其近似拟合模型为 $\hat{G}(s) = G_M(s)e^{-\tau_M s}$, $G_M(s) = b_{M_0}/(s, a_{M_0})$. 取 $\tau_M = 10$ s, $a_{M_0}(0) = 0.1$, $b_{M_0} = 1.12$, $k_{a_0} = -0.001$, $k_{b_0} = 0.4$, $k_{1_0} = k_{2_0} = 0$, 则由式(20)(21)得

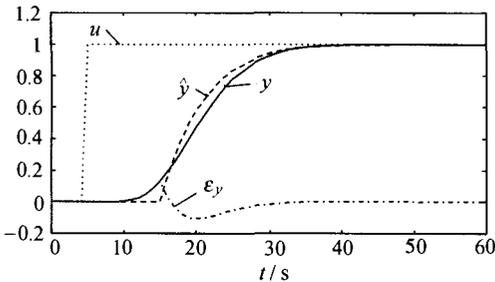
$$a_{M_0}(\hat{e}_y, t) = -0.001 \int e_y(t) y_M(t) dt - 0.1,$$

$$b_{M_0}(\hat{e}_y, t) = 0.4 \int e_y(t) u(t) dt + 1.12.$$

图6是在不同输入情况下的系统响应曲线. 可以看出, $\hat{y}(t)$ 对 $y(t)$, $y_M(t)$ 对 $\hat{y}_p(t)$ 均有良好的跟踪能力. 并且预测值 $\hat{y}_p(t)$ 略滞后于 $u(t)$, 比实际的输出 $y(t)$ 超前了近10s.



(a) $G(s) = 1/(2s + 1)^8$, 输入 $u(t)$ 为阶跃信号时, $y_M(t)$ 跟踪预测输出 $\hat{y}_p(t)$ 的情况



(b) $G(s) = 1/(2s + 1)^8$, 输入 $u(t)$ 为阶跃信号时, $\hat{y}(t)$ 跟踪预测输出 $y(t)$ 的情况

图6 受控过程为 $G(s) = 1/(2s + 1)^8$ 时的仿真结果
Fig. 6 Simulation result of controlled process, $G(s) = 1/(2s + 1)^8$, and $u(t)$ is step wave

5 结论(Conclusion)

提出的用一族模型 $\tilde{G}_p(s)$ 拟合受控过程不确定及摄动部分 $G_p(s)e^{-\Delta s}$ 的思想, 其目的是使系统稳态时的模型与实际过程相匹配; 预测输出与受控过程不确定及时滞摄动部分的输出一致; 以及模型的输出与实际过程的输出一致. 这样无论实际受控过程的参数与模型有多大偏差或摄动, 只要不影响系统的稳定性, 对象参考参数自适应时滞补偿器的模型总能和实际过程趋于一致, 并提前(标称时滞 τ_p) 获得大时滞不确定过程实际输出 $y(t)$ 的预测值

$\hat{y}_p(t)$, 以便在构成闭环控制系统时替代实际输出作为反馈信号. 参数自适应时滞补偿器克服了 Smith 预估补偿器的缺点, 解决了一大类大时滞不确定过程及复杂高阶过程的时滞补偿与输出预测问题, 并能可靠地应用于生产实践.

给出的基于 Popov 超稳定理论综合自适应律的设计方法易于使用, 可方便地应用于实践. 只要前向通道的传递函数严格正实, 可调参数自适应律即可由定理1定出.

仿真结果表明, 参数自适应时滞补偿器对大时滞不确定过程及复杂高阶过程均有良好的自适应跟踪及预估补偿能力.

参考文献(References):

- [1] SMITH O J M. Closed control of loops with dead time [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1957, 53(5): 217 - 219.
- [2] SMITH O J M. A controller to overcome dead time [J]. *ISA Journal*, 1959, 6(2): 29 - 33.
- [3] 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.
- [4] SANTACESARIA C, SCATTOLINI R. Easy tuning of Smith predictor in presence of delay uncertainty [J]. *Automatica*, 1993, 29(6): 1595 - 1597.
- [5] LEE T H, WANG Q G, TAN K K. Robust Smith-predictor controller for uncertain delay systems [J]. *AIChE Journal*, 1996, 42(4): 1033 - 1040.
- [6] ZHANG W D, SUN Y X, XU X M. Two degree of freedom Smith predictor for processes with time delay [J]. *Automatica*, 1998, 34(10): 1279 - 1282.
- [7] TIAN Y C, GAO F. Double-controller scheme for control of processes with dominant delay [J]. *IEE Proc Control Theory and Applications*, 1998, 145(5): 479 - 484.
- [8] 鲁照权, 韩江洪. 一种新型增益自适应 Smith 预估器[J]. *仪器仪表学报*, 2002, 23(2): 195 - 196, 199.
(LU Zhaoquan, HAN Jianghong. A new kind of gain adaptive Smith compensator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(2): 195 - 196, 199.
- [9] 鲁照权. 大时滞不确定过程稳定性及自适应时滞补偿 H_∞ 鲁棒控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
(LU Zhaoquan. *Research on robust stability, adaptive dead-time compensator and H_∞ robust control for uncertain processes with large dead-time* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2002.)

作者简介:

鲁照权 (1962—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为自适应控制、鲁棒控制、大时滞过程及控制等, E-mail: Luzhquan@mail.hf.ah.cn.