

文章编号: 1001-0920(2001)03-341-03

一种分析和设计 Smith 预估器的新方法及其应用

张国范, 朱晓萍, 包新华

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 针对积分、一阶和二阶稳定与不稳定带长时滞的过程, 给出了 Smith 预估器的分析和设计新方法, 使其设定值的响应从负载干扰响应中分离出来, 并用参数辨识的方法解决了在实际中难以得到过程精确的数学模型和控制器离散化的问题。模拟仿真和离散化系统仿真都达到了满意的效果, 表明该方法是在工程中很有前途的一种应用方法。

关键词: 时滞; 新型 Smith 预估器; 参数辨识; 数字控制器

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

New Method for Analysis and Design of Smith Predictor and Its Application

ZHANG Guo-fan, ZHU Xiao-ping, BAO Xin-hua

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: A modified Smith predictor is proposed for the first-order and/or second-order stable/unstable process with integrator, which is with long dead-time. The setpoint response can be separated from the disturbance response with the new Smith predictor, and the problem that the precise math model for the process is hard to find in the real-time control is solved with the parameter identification method. The analogous and digital simulation proves that this proposal is an useful method in the engineering application.

Key words: delay-time; modified Smith predictor; parameter identify; digital controller

1 引言

对于带长时滞过程而言, Smith 预估器是一种非常有效的通用的补偿器, 其主要优点在于滞后时间能从闭环系统的特征方程中消除。然而, 预估器要求被控对象的数学模型非常准确, 这在实际工程中很难办到, 特别是对积分和非稳定系统, 其控制更为困难。因此, 一些工程师宁可选用单闭环 PD, 也不

愿使用这种预估器。

原始的 Smith 预估器由于参数受限而无法使系统镇定, 因此不少学者都在研究改进这一算法。Paor 和 Malley^[1]指出, 比例(P)、比例积分(PD)、比例积分微分(PID)控制器都可用于带时滞、右半平面有一极点的过程, 从相位裕量可以导出确切的设计。Tan 等^[2]提出一种利用原始 Smith 系统的等价代换方法, 依照一个不匹配的单环系统进行设计, 是一

收稿日期: 2000-09-19; 修回日期: 2000-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(68975003)

作者简介: 张国范(1944—), 女, 黑龙江望奎人, 副教授, 从事计算机控制理论与技术研究; 朱晓萍(1960—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 从事计算机控制理论与技术研究。

种研究 Smith 预估器的基础方法, Astrom 等^[3]提出一种新的 Smith 预估器, 它将设定值响应与负载扰动响应分开, 从而使抗干扰性能更好, 但是要求大量的参数调整. Majhi 和 Atherton^[4]给出的预估器将设定值响应从负载干扰中分离出来, 设定值响应和负载干扰响应性能良好, 方法也相对简单; 但对计算机控制而言效果则不理想, 而且参数不易调整, 特别是当被控对象数学模型不精确时, 控制效果更差. 为此, 本文提出一种带辨识参数的新型 Smith 预估器.

2 新型 Smith 预估器

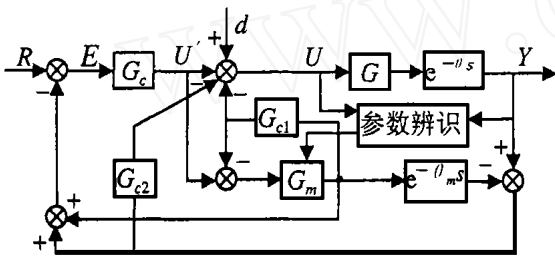


图1 新型 Smith 预估器结构

新型 Smith 预估器结构如图 1 所示. 原 Smith 预估器是由控制器 G_c 、被控对象 $G e^{-\theta s}$ 和 $G_m e^{-\theta_m s}$ 组成的, 其中 G 是确定的线性一阶、二阶... 带时滞的稳定或不稳定过程. 原 Smith 预估器要求 $G_m = G$, $\theta_m = \theta$, 但由于生产过程的不确定因素很多, 因此不易实现. Majhi 和 Atherton^[5] 增加上 G_{c1} 和 G_{c2} , 对其性能有一定的改善, 但将控制器离散化后效果变差. 本文在以上改进的基础上, 提出增加被控过程的参数辨识功能, 使系统的响应性能和鲁棒性能大为增强.

2.1 模拟仿真

文献[5]改进了原 Smith 预估器, 提出一种新型的 Smith 预估器, 其结构是在图 1 中去除辨识部分. G_{c1} 在内环用来抵消不稳定极点, G_c 和 G_{c2} 分别用来处理伺服跟踪和干扰抑制问题. 若 $G_{c2} = 0$, 则对于不稳定过程的负载扰动响应是不稳定的. 由以下公式可以看出, 新的 Smith 预估器已将设定值响应与负载扰动响应分离开.

系统输出为

$$Y(s) = Y_r(s)R(s) + Y_L(s)D(s) \quad (1)$$

设定值响应为

$$Y_r(s) = \frac{G G_c e^{-\theta s}}{1 + G(G_c + G_{c1})} \quad (2)$$

负载扰动响应为

$$Y_L(s) = \frac{G e^{-\theta s} (1 + G[G_c + G_{c1} - G_c e^{-\theta_m s}])}{(1 + G(G_c + G_{c1})) (1 + G_{c2} G e^{-\theta s})} \quad (3)$$

$Y_r(s)$ 的特征方程中无时滞部分, 根据文献[6]中的最小 ISTE 标准, 可由一个标准的带一个零点的闭环传递函数与 $Y_r(s)$ 中的无时滞部分进行对比, 从而确定 G_c 和 G_{c1} 参数. $Y_L(s)$ 的特征方程为

$$(1 + G[G_c + G_{c1}]) (1 + G_{c2} G e^{-\theta s}) = 0 \quad (4)$$

由于 $(1 + G[G_c + G_{c1}])$ 已在 $Y_r(s)$ 中设计好, 应用 Paor 等^[7] 提出的 Nyquist 稳定标准可确定出 G_{c2} 参数, 以保证第二个因子的稳定性.

如此构造的 Smith 预估器解决了不稳定和积分带长时滞部分的稳定性问题, 对被控对象的数学模型和时滞时间的准确性有很大宽容度. 当参数误差达 $\pm 10\%$, 扰动在 $t = 140, d = -0.1$ 时, 系统输出性能良好. 但将该方法应用于计算机控制, 模拟控制器离散化后数字仿真系统性能变差, 且当过程参数不很准确时性能更差. 为了解决这一问题, 本文进一步提出参数辨识, 从而改善了 Smith 预估器.

2.2 参数辨识

在参数辨识中, 被控对象的脉冲传递函数为

$$\begin{cases} G(z) = Y(z)/U(z) \\ A(z^{-1})Y(z) = z^{-L}B(z^{-1})U(z) \end{cases} \quad (5)$$

其中, U 和 Y 是输入输出信号, L 代表系统滞后的采样周期拍数. 则

$$\begin{cases} A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m} \end{cases} \quad (6)$$

由式(5), (6) 可得差分方程

$$y(k) = \mathcal{Q}(k-1)^T \theta(k-1) \quad (7)$$

式中

$$\begin{cases} \mathcal{Q}(k-1) = [y(k-1), \dots, y(k-n), \\ u(k-L), \dots, u(k-L-m)] \\ \theta(k-1) = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m] \end{cases} \quad (8)$$

采用递推最小二乘法估计 θ 然后代入 Smith 预估器中的 G_m .

3 电阻炉温度微机控制系统的设计

电阻炉数学模型为

$$\frac{k}{T_1 s + 1} e^{-\theta s} = \frac{1}{180s + 1} e^{-20s} \quad (9)$$

以下讨论参数 G_c, G_{c1} 和 G_{c2} 的设计及 \hat{k} 和 \hat{T} 的辨识.

3.1 G_c, G_{c1}, G_{c2} 的设计

选择

$$G_c = \frac{K_p(T_i s + 1)}{T_i s + 1}, \quad G_{c1} = k_f, \quad G_{c2} = k_d \quad (10)$$

取 $K_p = 1, T_i = 0.1, k_f$ 的求解过程如下: 式(2)无滞后部分为

$$Y_r(s) = \frac{GG_c}{1 + G(G_c + G_{c1})} = \frac{kK_p(T_i s + 1)}{T_i T_1 s^2 + T_i(kK_p + kK_f + 1)s + kK_p} \quad (11)$$

取
$$\epsilon = \sqrt{kK_p/T_i T_1} \quad (12)$$

规范化得

$$Y_r(s) = \frac{c_1 s + 1}{s^2 + d_1 s + 1} \quad (13)$$

其中
$$c_1 = \epsilon T_i \quad (14)$$

$$d_1 = (kK_p + kK_f + 1)(T_i \epsilon)^{-1} \quad (15)$$

由式(12)求得 $\epsilon = 0.236, c_1 = 0.024$; 由文献[5]中 ISTE 标准曲线获得 $d_1 = 1.3$; 由式(15)计算出 $k_f = 53.2$; 由文献[7]可得相位裕量标准公式

$$K_d = \sqrt{T_1/\theta^2} \quad (16)$$

求得 $k_d = 3.6$

3.2 参数 k 和 T_1 的辨识

为了解决数学模型不准确问题, 采用了参数辨识. 图 1 中被控对象的输入输出表示为

$$Y(s) = \frac{k e^{-\theta}}{T_1 s + 1} U(s) \quad (17)$$

对其离散化, 得

$$y(k) = \frac{T_1}{T_1 + 1} y(k-1) + \frac{k}{T_1 + 1} u(k-L) \quad (18)$$

令
$$a_1 = \frac{T_1}{T_1 + 1}, \quad a_2 = \frac{k}{T_1 + 1} \quad (19)$$

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 u(k-L) \quad (20)$$

$$\theta^T(k) = [a_1, a_2] \quad (21)$$

利用递推最小二乘法对 a_1 和 a_2 进行在线估计, 利用辨识的参数 a_1 和 a_2 , 通过式(19) 求出 k 和 T_1 . k 和 T_1 代表最小二乘法辨识出的被控对象的放大系数和时间常数, 参与到 Smith 预估器的 G_m 中.

3.3 数字仿真结果

在电阻炉温度微机控制系统中, 当 $t = 140, d = 0.1$ 时, 系统仿真结果如图 2 所示. 其中, 曲线

是用原参数, 不带辨识的模拟仿真, 超调量较大; 曲线 是带辨识的数字仿真; 曲线 是在曲线的基础上, 根据 PI 控制器系数调整原理将 G_c 的积分系数减小, 因此超调量很小, 但过渡过程稍长些.

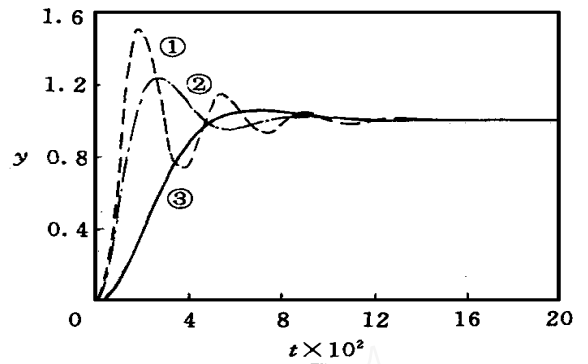


图 2 电阻炉温度微机控制系统仿真结果

4 结 语

本文在新型 Smith 预估器的基础上增加了辨识功能, 并应用于计算机控制系统. 文中介绍了改进的新型 Smith 预估器的结构及其模拟仿真和参数辨识, 然后介绍了这种新型预估器在电阻炉温度微机控制系统的分析和设计. 仿真结果表明, 该预估器具有工程应用价值.

参考文献:

- [1] A M D Paor, M O Malley. Controllers of Ziegler-Nichols type for unstable process with time delay[J]. Int J Control, 1989, 49(4): 1273-1284
- [2] K K Tan, Q G Wang, T H Lee *et al*. New approach the analysis and design of Smith predictor controller[J]. AICHE J, 1996, 42(6): 1793-1797.
- [3] K J Astrom, C C Hang, B C Lim. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1994, 39(2): 343-345
- [4] S Majhi, D P Atherton. A new Smith predictor and controller for unstable and integrating processes with time delay[A]. Proc of the 37th IEEE Conf on Decision and Congress Tampa[C]. Florida, 1998 1341-1345
- [5] S Majhi, D P Atherton. Modified Smith predictor and controller for processes with time delay[J]. IEE Proc Control Theory Appl, 1999, 146(5): 359-366
- [6] D P Atherton, S Majhi. Tuning of optimum PID controllers[A]. Proc of Control 98 [C]. Coimbra, 1998, 549-554
- [7] A M D Paor, M O Malley. Controllers of Ziegler-Nichols type for unstable processes[J]. Int J Control, 1989, 49(4): 1273-1284