

带滞后补偿的快速适应自校正调节器

吴广玉 崔平远

(哈尔滨工业大学)

摘 要

本文提出了一种 Smith 预估自校正算法。它是把 Smith 预估器引入到自校正调节器中，直接使用系统模型构成自校正调节器。这种自校正调节器具有快速适应性、跟踪精度高、辨识参数少和稳定工作等优点。

一、问题的提出

以往对慢时变的单输入/单输出系统构成自校正调节器 (STR) 时，必须首先将系统模型改用 Åstrom 预报模型，对其参数进行在线辨识，然后才能获得自校正调节器方程。由于在构造预报模型时，使用了 d 步 (系统的纯时滞) 以前系统输出和输入的线性组合来表示系统现时刻的输出，因此引入了计算误差和干扰误差。再加上系统初始状态的影响，这种 STR 跟踪系统伺服输入 (设定值) 的适应能力差，跟踪精度低，辨识参数较多 (尤其是 d 大时) 和有时不能稳定工作等问题。

本文提出的 Smith 预估自校正算法，是直接按系统的模型结构来辨识参数，再用其参数估值构成 Smith 预估器，获得一个不含纯时滞 d 的等效输出 Y 的系统。这种带滞后补偿的快速自校正调节器，在相当程度上解决了上述 Åstrom 预报模型自校正调节器所存在的问题。

二、Smith 预估器

对含有纯时滞的工业过程，它的模型为

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-(d+1)}B(z^{-1})u(k) + \lambda C(z^{-1})\varepsilon(k), \quad (1)$$

其中， $A(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 为首 1、阶次为 n 的单位后移算子多项式， $\lambda > 0$ ， $B(z^{-1})$ 为 $b_0 \neq 0$ 、阶次为 m 的单位后移算子多项式， $y(k)$ 为输出量， $u(k)$ 为输入量， d 为过程的纯时滞， $\varepsilon(k)$ 为零均值平稳白噪声。Smith 早在五十年代就提出了采用补偿的方法来消除纯时滞的影响，并被用于造纸过程^[1]。对过程 (1)，Smith 预报器为

$$A(z^{-1})y_r(k) = z^{-1}(1 - z^{-d})B(z^{-1})u(k). \quad (2)$$

带有 Smith 预估器的自校正调节器构成见图 1。图中 $Y(k)$ 是过程输出 $y(k)$ 与预估器输

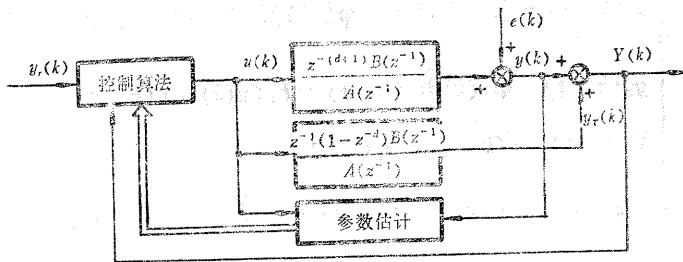


图 1 带有 Smith 预估器的自校正调节器

出 $y_r(k)$ 之和, 即

$$Y(k) = y(k) + y_r(k). \quad (3)$$

以 $Y(k)$ 为输出的等效系统为

$$A(z^{-1})Y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + e(k), \quad (4)$$

其中, $e(k) = \lambda C(z^{-1})\varepsilon(k)$.

三、带 Smith 预估器的 STR 算法

由等效系统 (4) 可得

$$Y(k+1) + a_1 Y(k) + \dots + a_n Y(k-n+1) = b_0 u(k) + \dots + b_m u(k-m) + e(k+1). \quad (5)$$

记

$$\begin{aligned} \theta_Y &= [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m]^T, \\ \varphi_Y(k) &= [-Y(k), \dots, -Y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m)]^T, \end{aligned}$$

则有

$$Y(k+1) = b_0 u(k) + \varphi_Y^T(k) \theta_Y + e(k+1). \quad (6)$$

参数未知时的最小方差控制律为

$$u(k) = [y_r(k+1) - \varphi_Y^T(k) \hat{\theta}_Y] / \hat{b}_0. \quad (7)$$

Smith 预估自校正算法的步骤是, 首先用可变遗忘因子的最小乘法递推估计系统的参数; 然后由估计出的参数实时构成 Smith 预估器, 以获得等效系统的输出 $Y(k)$; 最后通过等效系统计算最小方差控制律 $u(k)$. Smith 预估自校正算法汇总如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{\theta}_Y(k+1) &= \hat{\theta}_Y(k) + K(k+1)\varepsilon(k+1), \\ \varepsilon(k+1) &= y(k+1) - \hat{y}(k+1), \\ \hat{y}(k+1) &= \varphi_Y^T(k) \hat{\theta}_Y(k) + b_0 u(k-d), \\ K(k+1) &= P(k) \varphi_Y(k) / [\lambda(k) + \varphi_Y^T(k) P(k) \varphi_Y(k)], \\ \lambda(k+1) &= 1 - \varepsilon^2(k+1) / [(1 + \varphi_Y^T(k) P(k) \varphi_Y(k)) \Sigma_0], \\ &\text{if } \lambda(k+1) < \lambda_{\min} \quad \text{set } \lambda(k+1) = \lambda_{\min} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} P(k+1) &= [I - K(k+1)\varphi_y^T(k)]P(k)/\lambda(k+1), \\ y_r(k+1) &= \varphi_r^T(k)\hat{\theta}_Y(k+1) + \hat{b}_0[u(k) - u(k-d)], \\ Y(k+1) &= y(k+1) + y_r(k+1), \\ u(k+1) &= [y_r(k+2) - \varphi_y^T(k+1)\hat{\theta}_Y(k+1)]/\hat{b}_0, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_y^T(k) &= \{-y(k), \dots, -y(k-n+1), u(k-d-1), \dots, u(k-d-m)\}, \\ \varphi_r^T(k) &= \{-y_r(k), \dots, -y_r(k-n+1), [u(k-1) - u(k-d-1)], \dots, \\ & \quad [u(k-m) - u(k-d-m)]\}. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

这里 Σ_0 是根据过程所受干扰的方差 σ_0^2 和希望的适应速度 N_0 而事先给定的常值^[2],

满足下述关系式

$$\Sigma_0 = \sigma_0^2 N_0, \quad (10)$$

λ_{\min} 是给定的最小遗忘因子, \hat{b}_0 是事先对参数 b_0 的估值。

四、仿真实例

对本文提出的自校正算法和 Åström 预报模型自校正算法, 在噪声和其它条件完全相同的条件下, 用不同时滞的一阶和二阶模型进行了仿真比较。

1. $d=4$ 的一阶系统

$$y(k) - 0.8y(k-1) = 0.5u(k-5) + \varepsilon(k), \quad (11)$$

$$y(k) - 0.85y(k-1) = 0.5u(k-5) + \varepsilon(k). \quad (12)$$

当系统(11)的输出收敛到设定值 y_{r1} 时, 再改变其参数使成为系统(12), 同时也改变设定值 y_{r2} 。两种自校正算法的控制效果见图2。

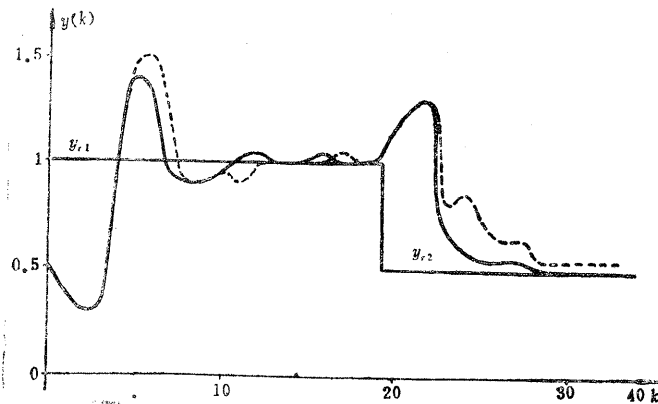


图2 $d=4$ 的一阶系统的两种算法比较。实线是 Smith 预估自校正算法的控制效果, 虚线是预报模型自校正算法的控制效果。 $\Sigma_0 = 0.05$, $\lambda_{\min} = 0.85$ 。图3与此同, 不再标注。

2. $d=2$ 的二阶系统

$$y(k) - 0.8y(k-1) + 0.5y(k-2) = 0.5u(k-3) - 0.02u(k-4) + \varepsilon(k), \quad (13)$$

$$y(k) - 0.85y(k-1) + 0.4y(k-2) = 0.5u(k-3) - 0.03u(k-4) + \varepsilon(k). \quad (14)$$

当二阶系统(13)输出稳定后,改变设定值和系统参数如(14)式,其结果如图3所示。

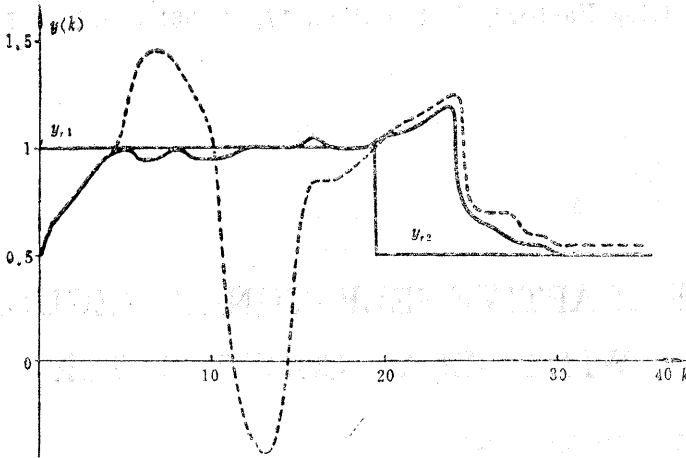


图3 $d=2$ 的二阶系统的两种算法比较

五、结 论

通过理论推导和仿真结果表明,对于具有较大纯时滞的慢时变工业过程,本文提出的Smith预估自校正算法,与以往的Astrom预报模型自校正算法,在消除初始状态影响,跟随系统设定值变化等方面,具有快速的适应能力,并且随着纯时滞的增长其优点越明显。

带Smith预估的自校正算法,能使系统输出的静态精度提高。

Astrom预报模型自校正算法中的模型阶数为 p, q ,应满足 $p \geq n, q \geq m+d$,而Smith预估自校正算法是直接使用系统阶次 n, m 。因此本自校正算法所需估计参数少,而且随 d 的增加其优点越明显。

这里是用实时估计的系统参数构成Smith预估器,故不会象定常参数Smith预估器那样,系统参数稍有变化就可能导致不稳定。这是Smith预估器与自校正调节器相结合的又一优点。

参 考 文 献

- [1] 星野仁美等, 三菱製紙(株)八戸工場抄紙機プロセスの計算機制御, 三菱電機報, 51,9, (1977), 601—605.
- [2] Fortescue, T. R., Kershenbaum, L. S. and Tdstie, B. E., Implementation of Self-tuning Regulators with Variable Forgetting Factors, Automatica, 17, (1981), 831—835.

**A FAST ADAPTIVE SELF-TUNING REGULATOR
WITH DELAY COMPENSATOR**

Wu Guangyu, Cui Pingyuan

(Harbin Institute of Technology)

Abstract

A Smith's prediction Self-tuning algorithm is presented in this paper. Smith's predictor is applied to STR, and a new STR is constructed using system model directly. This STR has the following advantages: fast adaptation, high tracking accuracy, fewer identified parameters and good stability.