

# 一类结构适应式自校正控制器\*

任伟建 关学忠 刘铁男  
(大庆石油学院自控系 安达 151400)

**摘要** 针对时变结构系统提出一种结构适应式自校正控制器,它由变阶式递推最小二乘法和变结构控制律组成。当系统结构变化时,切换算法为结构变化后的主算法提供初值,实现两种结构的平滑过渡。该结构适应式控制器能在线自动修正其自身参数和调整自身结构,以适应系统参数乃至结构的变化。其设计方法也适用于一般的变结构系统。仿真研究表明,该控制器对变结构系统是有效的。

**关键词** 自校正,控制器,结构适应,变结构系统

**分类号** TP 237+.2

## Structure-adaptive Self-tuning Controller for Varying Structure Systems

Ren Weijian, Guan Xuezhong, Liu Tienan  
(Daqing Petroleum Institute)

**Abstract** A kind of structure-adaptive self-tuning controller is proposed, which is composed of the varying-order recursive least square method and a varying structure control law. While system structure changes, the switching algorithm provides the initial values for the main algorithm to realize smooth transition between the two structures. The structure-adaptive controller corrects its parameters and adjusts its structure automatically to adapt both the parameter and structure changes on-line. The method is applicable to more general varying structure systems. Simulation results show that this controller is effective.

**Key words** self-tuning, controller, structure-adaptive, varying structure systems

## 1 引言

通常的自校正控制(STC)系统<sup>[1-3]</sup>,都是通过调整控制器的参数来适应系统的非结构性变化。从这个意义上说,STC属于参数适应式控制器。然而,许多生产过程常会发生结构性变化,这时一般的自校正控制器已不能满足需要。为此,本文提出一种结构适应式自校正控制器,它可极小化文献[3]的广义性能指标。

以某啤酒厂麦芽烘干过程为例。在麦芽烘干过程中,冷风或由烘干室送来的回风经换热器加热后,

由风机经烘干箱底部送入物料中,使物料按工艺要求升温或恒温。这一过程需实时调节进风(或回风)挡板的开度,以改变进风量。具体工艺过程可分三种工况:

工况 1: 在烘干初期,由于烘干室温度太大,可不用回风作气源,仅用外界干燥冷风。这时通过调节进风板开度  $u_k$  使物料升温,  $u_k$  是主控制量,而回风挡板完全关闭(即  $v_k = 0$ )。

工况 2: 烘干室空气湿度小于 60% 时,为节省能源,使进风板保持一定开度,取  $u_k = u_c$ ,而通过调节回风板开度  $u_k$  使物料升温或恒温。这时  $v_k$  是主控制量,  $u_k$  是副控制量。

工况 3: 由于回风中含有水蒸汽,必须根据回风

\* 黑龙江省自然科学基金项目(F9812)

湿度的不同,对回风板的最大开度加以限制,其上限定为  $v_h$  可根据湿度不同分档选定。当回风板开度  $v_k$  超过  $v_h$  时,取  $v_k = v_h$ 。为满足工艺升温要求,在  $v_k$  限幅时,通过调节进风板开度来补偿对  $v_k$  的限幅作用。

由于上述过程需要交替更换主副控制量,因而导致模型和控制器的结构发生变化。对此,需采用结构适应式自校正控制器。

## 2 最优控制器

考虑如下模型

$$Ay_k = q^{-d}Bu_k + q^{-d}Ev_k + C\epsilon_k \quad (1)$$

其中,  $A, B, C, E$  为单位延迟算子  $q^{-1}$  的多项式,且由下式确定(这里省略了自变量  $q^{-1}$ )

$$\begin{cases} A = 1 - \sum_{i=1}^{n_a} a_i q^{-i} \\ B = b_0 + \sum_{i=1}^{n_b} b_i q^{-i} \\ E = e_0 + \sum_{i=1}^{n_e} e_i q^{-i} \\ C = 1 + C_1 = 1 + \sum_{i=1}^{n_c} c_i q^{-i} \end{cases} \quad (2)$$

$\epsilon_k$  是零均值方差为  $\sigma^2$  的白噪声,  $y_k, u_k$  和  $v_k$  分别为  $k$  时刻的物料温度、进风板和回风板的开度,  $d$  是时滞。

设  $w_k$  为设定值序列。控制目的是在工况 1 ~ 工况 3 下寻求最优控制律,使文献[3]提出的广义性能指标

$$\begin{cases} J = E\{h^2(k+d)\} \\ h(k+d) = Py_{k+d} + Qu_k + Sv_k - R w_{k+d} \end{cases} \quad (3)$$

达到最小。这里  $E\{\cdot\}$  表示取数学期望运算,  $h(k+d)$  为广义输出,  $P, Q, S$  和  $R$  为算子  $q^{-1}$  的多项式。引入如下等式<sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} PC = AF + q^{-d}G \\ F = 1 + \sum_{i=1}^{d-1} f_i q^{-i} \\ G = \sum_{i=1}^n g_i q^{-i} \\ n = \max\{n_a - 1, n_p + n_c - d\} \end{cases} \quad (4)$$

定理 1 设式(1)中参数已知,且  $C$  的根均在单位圆外,则在工况 1 ~ 工况 3 时,分别有极小化式(3)的最优变结构控制器

$$\begin{aligned} u_k &= -\beta_0^{-1}[Gy_k + Dw_{k+d} + B_2u_k] \\ v_k &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_k &= -\gamma_0^{-1}[Gy_k + Dw_{k+d} + B_1u_k + \Gamma v_k] \\ u_k &= u_c \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} u_k &= u_c - \beta_0^{-1}[Gy_k + Dw_{k+d} + B_1u_k + \Gamma v_k + \gamma_0 v_h] \\ v_k &= v_h \end{aligned} \quad (7)$$

证明 将式(1)中的  $k$  换成  $k+d$ ,两边乘以  $F$ ,应用式(4)得

$$PCy_{k+d} = Gy_k + FBu_k + FEv_k + FC\epsilon_{k+d}$$

注意到  $C$  有逆存在,于是将上式代入式(3)第二式,并令  $D = -CR, B_1 = BF + QC, \Gamma = FE + SC$ ,整理得

$$\begin{aligned} h(k+d) &= C^{-1}[Gy_k + Dw_{k+d} + B_1u_k + \Gamma v_k] + F\epsilon_{k+d} \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} D = d_0 + \sum_{i=1}^y d_i q^{-i} \\ B_1 = \beta_0 + B_2 = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i q^{-i} \\ \Gamma = \gamma_0 + \Gamma_1 = \gamma_0 + \sum_{i=1}^s \gamma_i q^{-i} \end{cases} \quad (9)$$

因式(8)右边两项不相关,将式(8)代入式(3)第一式,即可求得  $h(k+d)$  最优  $d$  步预报为

$$\begin{aligned} \hat{h}(k+d|k) &= C^{-1}(Gy_k + Dw_{k+d} + B_1u_k + \Gamma v_k) \end{aligned} \quad (10)$$

令  $\hat{h}(k+d|k) = 0$ ,可使指标  $J$  达到最小值,且有最优控制律

$$Gy_k + Dw_{k+d} + B_1u_k + \Gamma v_k = 0 \quad (11)$$

在工况 1 时,按要求取  $v_k = 0$ ,由式(11)立即得到式(5);在工况 2 时,由式(11)和(9)可证式(6)成立,并取  $u_k = u_c$ ;对于工况 3,用类似方法可证式(7)成立。(证毕)

经分析,上述三种工况中有两种是独立的,仅工况 3 依赖于工况 2,不是独立的。

式(8)两边乘以  $C$  并应用式(2)的后一式得

$$\begin{aligned} h(k+d) &= Gy_k + Dw_{k+d} + B_1u_k + \Gamma v_k + F\epsilon_{k+d} - C_1[h(k+d) - F\epsilon_{k+d}] \end{aligned} \quad (12)$$

由式(11)和(8)知  $h(k+d) = F\epsilon_{k+d}$ ,因此式(12)右边最后一项为零,  $F\epsilon_{k+d}$  项与前 4 项不相关。于是有预报模型

$$\hat{h}(k+d) =$$

$$Gy_k + Dw_{k+d} + Bv_k + \Gamma v_k + \xi_{k+d} = \begin{cases} \beta_0 u_k + \mathcal{Q}(k)^\top \theta_1 + \xi_{k+d}, & \text{工况 1} \\ \gamma_0 v_k + \mathcal{Q}(k)^\top \theta_2 + \xi_{k+d}, & \text{工况 2} \end{cases} \quad (13a)$$

$$\theta^\top = (g_0, \dots, g_n, d_0, \dots, d_r, \beta_1, \dots, \beta_m) \quad (14)$$

$$\mathcal{Q}(k)^\top = (y_k, \dots, y_{k-n}, w_{k+d}, \dots, w_{k+d-r}, u_{k-1}, \dots, u_{k-m})$$

$$\theta = (\theta^\top, \beta_0, \gamma_1, \dots, \gamma_s) \quad (15)$$

$$\mathcal{Q}(k)^\top = (\mathcal{Q}(k)^\top, u_k, v_{k-1}, \dots, v_{k-s})$$

### 3 结构适应式自校正控制器 (SASTC)

上述实际系统有两种独立工况(工况 1 和工况 2)。两种工况对应的控制器具有不同的结构,其相应的预报模型也不同。为能自动在线跟踪系统结构的变化,采用文献[4]提出的变阶式递推最小二乘法(RLS),并用 SASTC 来适应结构和动态的变化。式(13)表明,由工况 1 转入工况 2 时系统结构发生了变化。当模型(13)参数未知时,可用如下步骤实现 SASTC:

步骤 1: 在工况 1 时,可用 RLS 法估计式(13a)中参数,将估值  $\theta(k)$  代入式(5),有

$$u_k = -\beta_0^{-1} \mathcal{Q}(k-d)^\top \theta_1(k-1) \quad (16)$$

步骤 2: 在  $k$  时刻,系统由工况 1 进入工况 2,系统发生了结构性变化,此时可用文献[4]提出的变阶式 RLS 法跟踪系统结构的变化并估计参数。由式(15)知,在系统结构变化后  $\gamma_i (i = 1, \dots, s)$  的阶数发生变化,从而使参数向量  $\theta$  维数发生变化,为使两种结构平滑切换,可用变阶式 RLS 法中的切换算法<sup>[4]</sup>对  $\gamma_i$  进行估计,然后调用变阶式 RLS 法的主算法<sup>[4]</sup>估计工况 2 中参数向量  $\theta_2$ 。将得到的估值  $\theta_2(k)$  代入式(6),有

$$v_k = -\gamma_0^{-1} \mathcal{Q}(k)^\top \theta_2(k) \quad (17)$$

对于式(15),因为  $\beta_0$  是上一工况已知参数,不必用切换算法估计,但必须和其它参数一起在线辨识。

步骤 3: 对于工况 3,即由式(17)计算的  $v_k$  大于  $v_h$  时,则取  $v_k = v_h$ 。于是由式(6), (17) 和(7),有

$$u_k = u_c - \beta_0^{-1} [\mathcal{Q}(k)^\top \theta_2(k) + \gamma_0 v_k] \quad (18)$$

综上所述, SASTC 由式(16) ~ (18) 组成。由文献[5]和[4]知,RLS 和变阶式 RLS 法的估值序列收敛于参数的真值,于是上述 SASTC 将分别渐近于最优控制器(5) ~ (7)。

需要指出的是,上述 SASTC 虽是针对具有两种不同工况系统的实际而导出的,但此设计方法同

样适用于一般的变结构系统。事实上,作者已按上述方法提出了几种 SASTC 和结构适应式自校正预报器<sup>[4,6]</sup>。

本文提出的 SASTC 与通常 STC<sup>[2]</sup> 相比,其新颖之处在于前者具有新型的变结构控制律,且用新型变阶式 RLS 在线自动调整其自身的结构和估计参数,以适应系统参数乃至结构性变化。

### 4 仿真例子

现用工业电炉温度控制过程来模拟上述变结构系统的控制过程。令一组炉丝的电压为  $u_k$ , 另一组为  $v_k$ , 两组炉丝的空间位置不同。预选依据采集数据(采样周期为 20s),用  $F$ -检验法建立如下电炉控制系统模型

$$y_k = \sum_{i=1}^4 a_i y_{k-i} + \sum_{i=0}^3 b_i u_{k-3-i} + \sum_{i=0}^2 c_i v_{k-3-i} + \sum_{i=1}^2 e_i \theta_{k-i} + \theta_k$$

其中,  $n_a = 4, n_b = 3, n_c = 2, d = 3$ 。工况 1 时,  $u_k$  为主控制量,  $v_k = 0$ 。工况 2 时,  $v_k$  为主控制量,  $u_k = u_c = 40V$ 。在工况 3, 当  $v_k < v_h$  (上限  $v_h = 60V$ ) 时,  $v_k$  为主控制量; 当  $v_k > v_h$  时, 取  $v_k = v_h, u_k$  为主控制量。通过  $u_k$  与  $v_k$  间的主辅控制易位,使系统发生结构性变化。

在式(3)中取  $P = R = 1, Q = S = 0.5$ 。其中设定值  $w_k$  按图 1 曲线 ① 给出,并取  $u_c = 40V, v_h = 60V$ 。由图 1 可见,在  $u_k$  和  $v_k$  控制下,输出温度能很好地跟踪设定升温曲线(见曲线 ②),并且在  $u_k$  与  $v_k$  切换时,即模型和控制器结构改变时,输出  $y_k$  仍能很好地跟踪升温曲线,未产生任何扰动。这表明

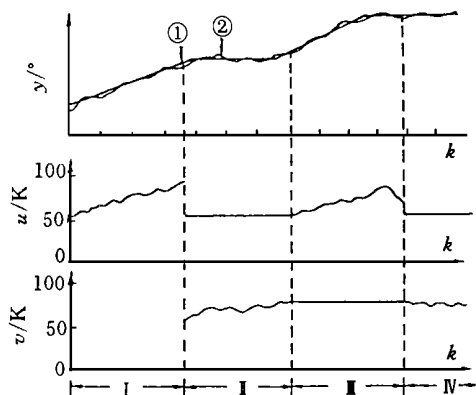


图 1 结构适应式自校正控制器控制曲线

SASTC 能跟踪系统的结构性变化,对变结构系统的控制是行之有效的。

## 参考文献

- 1 K J Astrom, Wittenmark B. On self-tuning regulator. *Automatica*, 1973, 9(2): 185 ~ 199
- 2 D W Clarke, Phil M A D, Gawthrop P J. Self-tuning controller. *Proc IEE*, 1975, 122(9): 929 ~ 934
- 3 邓自立,郭一新. 现代时间序列分析及其应用. 北京: 知识出版社, 1988. 355 ~ 358
- 4 刘铁男,陈广义,任伟建. 时变结构系统的辨识预报和控制. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1993. 50 ~ 89
- 5 陈翰馥. 随机递推估计. 北京: 科学出版社, 1984. 161 ~ 162

(上接第 723 页)

## 参考文献

- 1 Xie L, Souza C E. Robust  $H_\infty$  control for linear systems with norm-bounded time-varying uncertainty. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1992, 37(8): 1188 ~ 1191
- 2 Wang J, Su H, Chu J. Robust  $H_\infty$  controller design for linear uncertain systems with delayed state and control. *J Franklin Inst*, 1998, 335B(3): 517 ~ 524
- 3 Veillette R J, Medanic J V, Perkins W R. Design of reliable control systems. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1992, 37(3): 290 ~ 304

(上接第 726 页)

## 参考文献

- 1 Shimemura E, Fujita M. A design method for linear state feedback systems possessing integrity based on a solution of a Riccati-type equation. *Int J of Control*, 1985, 42(4): 887 ~ 899
- 2 Shieh L S, Dib H M, Ganesan S *et al.* Optimal pole-placement for state-feedback systems possessing integrity. *Int J Syst Sci*, 1988, 19(8): 1419 ~ 1435
- 3 Furuta K, Kim S B. Pole assignment in a specified disc. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1987, 32(5): 423 ~ 427
- 4 Kawasaki N, Shimemura E. Pole placement in a specified region based on a linear quadratic regulator. *Int J Control*, 1988, 48(1): 225 ~ 240
- 5 Haddad W M, Bernstein D S. Controller design with regional pole constraints. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1992, 37(1): 54 ~ 69
- 6 Wang Z D, Tang G Q, Chen X M. Robust controller

- 6 任伟建,王鉴,刘淑平. 一种结构适应式自校正开关控制器. *信息与控制*, 1995, 24(5): 316 ~ 320

## 作者简介

任伟建 女,1963年生.1990年获黑龙江大学控制理论专业硕士学位,现为大庆石油学院自控系副教授.主要从事自适应及系统辨识方面的研究.

关学忠 男,1962年生.1989年于华东化工学院自控系获硕士学位,现为大庆石油学院自控系副教授.主要从事自适应及模糊控制方面的研究.

刘铁男 男,1945年生.1982年于华中理工大学获硕士学位,现任大庆石油学院自控系教授.研究方向为系统辨识,自适应控制和自适应滤波.

- 4 Seo C J, Kim B K. Robust and reliable  $H_\infty$  control for linear systems with parameter uncertainty and actuator failure. *Automatica*, 1996, 32(3): 465 ~ 467

## 作者简介

王景成 男,1972年生.1998年获浙江大学工业自动化博士学位,现为上海交通大学副教授.主要研究方向为鲁棒过程控制,时滞系统控制等.

邵惠鹤 男,1936年生.上海交通大学教授,博士生导师.主要研究方向为过程控制理论及工程应用.

design for uncertain linear systems with circular pole constraints. *Int J of Control*, 1996, 65(6): 1045 ~ 1054

- 7 孙金生,李军,王执钐. 不确定性离散系统的  $D$  稳定鲁棒容错控制. *控制理论与应用*, 1998, 15(4): 636 ~ 641
- 8 Hsieh C, Skelton R E. All covariance controllers for linear discrete-time systems. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1990, 35(8): 908 ~ 915
- 9 韩清龙,俞金寿. 不确定性连续系统具有完整性的反馈设计新方法. *自动化学报*, 1998, 24(6): 768 ~ 775

## 作者简介

张华春 男,1965年生.1989年在西安交通大学获工业自动化专业硕士学位,现在中国科学院自动化研究所攻读博士学位.研究方向为故障检测及容错控制,自适应及模糊控制,机器人控制等.

谭民 男,1962年生.中国科学院自动化研究所研究员,博士生导师.主要研究方向为系统可靠性理论及其应用,故障诊断与容错技术,机器人控制等.