

串联时滞系统的预估控制及其应用

陈铁军 邱祖廉

(西安交通大学信息控制系)

摘 要

本文从微机氢氮比控制系统的设计出发, 给出一般的串联时滞系统的预估控制方法, 其中包括描述系统动态特性的串联子系统模型, 含系统中间测量的预估算法和逐段控制算法。该法已在某化肥厂成功应用。

一、引 言

煤(焦)头氢氮比系统纯滞后时间长, 干扰因素多, 动态特性复杂。在结构上, 它由三个生产车间(造气车间、净化车间和合成车间)串联而成。实践表明, 监视氢氮比在各车间的运动状况, 有利于克服滞后和产生于各车间的扰动。适当选取检测点和检测变量, 该系统可看成由三个具有较小滞后的子系统相串联而成。实际上, 为了获得良好控制效果, 许多具有串联时滞的系统, 大都既测量系统的输入和输出, 又测量系统的若干中间变量, 使之具有如图1所示的串联结构。

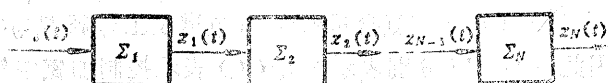


图 1 串联时滞系统框图

文献〔1〕和〔2〕讨论了这类系统的自校正控制问题。〔1〕在设计外环时, 以内闭环的在线辨识模型为依据。这样处理忽视了控制对象的本质结构和有用的先验信息, 过分依赖于系统的在线辨识, 不利于实际应用。〔2〕针对连续时间模型给出一种递推预估法, 但不适用于时间滞后系统, 而且不能根据实际受控对象设计出各动态特性快慢不同的多环控制系统。

本文在微机氢氮比控制系统设计的基础上, 研究具有串联结构的时间滞后系统的控制方法。就象氢氮比系统那样, 对此类系统采用相串联的子系统模型表征其动态行为, 比建立一个从系统输入到其输出的整体模型更利于分析和控制。下面将要给出所讨论的氢氮比系统模型, 类似地给出如图1所示系统的差分方程描述。之所以用差分方程做为系统模型, 是因为这类系统一般比较复杂, 常常要用计算机来实现控制, 分段模型要求

附加分段测量信息；基于分段模型的预估和控制算法中应当有效地利用这些信息。文中给出的部分状态预估算法中，就包含了尽可能多的测量信息，从系统的输入端开始，各测量输出的预估值能够递推求出。控制算法是逐段设计的，在一定的条件下，逐段控制算法的设计可以仅以各子系统模型为根据，使设计工作得到简化。所给出的预估控制方法在一个中型化肥厂的氢氮比系统控制中成功应用，取得明显的经济效益。

二、氢氮比系统模型

某中型煤（焦）头化肥厂合成氨系统的氢氮比系统如图2所示，把三个车间看成三个环节。该系统是一个对不同成份的混合气体加工处理的过程，各车间都发生不同的化学反应，其中气体的运动带来了时间滞后。为了便于建模，各环节分别测取气柜氢含量 $z_1(t)$ ，净化氢含量 $z_2(t)$ ，循环氢含量 $z_3(t)$ ，在合成环节还用工业气相色谱仪测

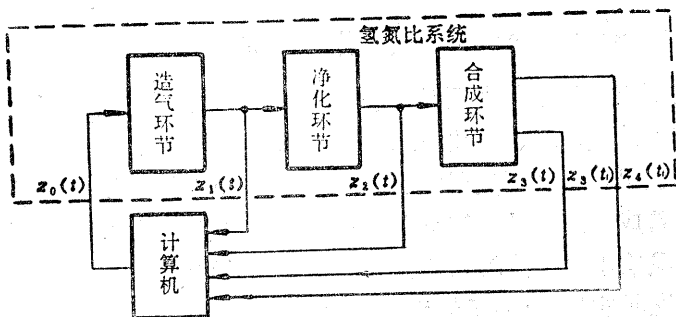


图2 微机氢氮比控制系统框图

量合成塔入口的氢含量 $z_3(t_1)$ 和氮含量 $z_4(t_1)$ ，色谱仪工作周期为6分钟，其它信号的采样周期是1分钟，因此用 t_1 和 t 分别表示。 $z_0(t)$ 表示控制加氮空气阀开度的控制信号，系统的氢氮比输出在合成环节。〔4〕为氢氮比系统建立的（简化）数学模型为，

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_1(t+1) &= \theta_{11} \Delta z_1(t) + \theta_{12} \Delta z_0(t-d_1) + \theta_{13} + \theta_{14} e_1(t) \\ z_2(t) &= \theta_{21} z_1(t-d_2) + \theta_{22} e_2(t) \\ z_3(t) &= \theta_{31} z_3(t-d_4) + \theta_{32} z_2(t-d_3) + \theta_{33} e_3(t) \\ y(t_1) &= z_3(t_1)/z_4(t_1) \\ v(t_1) &= z_3(t_1) + z_4(t_1) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$y(t_1)$ 是系统的输出氢氮比， $v(t_1)$ 表示合成氢和氮的总百分比。 $d_i, i=1, 2, 3$ 分别为三个环节的输入滞后，在三机生产时它们分别取值5.12和10。 d_4 是合成循环回路中气体的循环滞后，对于所述系统 $d_4=1$ 。 $\Delta z_i(t)$ 是 $z_i(t)$ 相对其平衡点 \bar{z}_i 的偏差。 θ_{ij} 是模型参数，难于精确计算，用参数估计技术来估计，一组离线估计值为 $\theta_{11}=0.85, \theta_{12}=-0.01, \theta_{13}=0.00013, \theta_{21}=1.81, \theta_{31}=0.998, \theta_{32}=0.21$ 。 $e_i(t)$ 表示建模、测量等误差总和，由于模型（1）源于系统运动机理〔4〕，各测量信号都采取了良好的滤波措施〔6〕，所以误差 $e_i(t)$ 对系统的影响很小，可忽略之。

由于循环气中除氢气和氮气外，其它成份的气体占的比重很小，而且变化也很缓

慢, 所以, 模型 (1) 中的 $v(t_1)$ 可以认为在一定时间内不发生变化, 这样就能由氢氮比 $y(t_1)$ 求出循环氢的平衡点, 如果使循环氢 $z_3(t)$ 平衡于此点, 则系统的氢氮比一定满足要求^[3]. 这样一来, 只要对 (1) 中的 $z_i(t)$, $i=1, 2, 3$, 进行预估和控制, 使 $z_3(t)$ 趋近于其平衡点 $z_3^*(t)$ 即可.

三、预估和控制算法

前述氢氮比系统显然具有图 1 所示系统的结构. 在实际系统中常常可能遇到这样有串联 (时滞) 结构的系统, 因此研究对此类系统的预估和控制方法, 是有一定实际意义的.

考虑如图 1 所示系统, 为了说明预估和控制的基本思想, 不失一般性, 设 $N=2$, 对于 $N>2$ 的情形, 可类似推导. 设该系统的动态特性能用如下差分方程描述:

$$A_i(q^{-1})z_i(t) = B_i(q^{-1})z_{i-1}(t-d_i) \quad i=1, 2 \quad (2)$$

$A_i(\cdot)$ 和 $B_i(\cdot)$ 都是关于一步滞后算子 q^{-1} 的实系数多项式, 阶次分别为 n_i 和 m_i . 而且, $A_i(0) = 1$, $B_i(0) \neq 0$, $i=1, 2$. d_i 是第 i 个环节的纯滞后, 假设 $d_i \geq 1$. $z_i(t)$, $i=0, 1$, q 是测量变量, 其中, $z_0(t)$ 和 $z_2(t)$ 分别是系统的输入和输出, $z_1(t)$ 是中间测量, 这里统一称它们为系统的部分状态.

预估是克服系统纯时间滞后的一种有效方法. 这里把用尽可能多地包含靠近系统输出 $z_2(t)$ 的部分状态测量值的数学表达式

$$z_2(t+d_1+d_2) = \alpha(q^{-1}) \cdot z_2(t) + \beta(q^{-1})z_1(t) + \gamma(q^{-1})z_0(t) \quad (3)$$

称为 $z_2(t)$ 的 d_1+d_2 步超前部分状态预估. 可以证明 (证明类似于 [3] 的附录 A), 如果令多项式 $G_2(q^{-1})$ 和 $R_2(q^{-1})$ 满足

$$1 = A_2G_2 + q^{-d_1-d_2}R_2 \quad (4)$$

$$\partial[G_2] = d_1 + d_2 - 1, \quad \partial[R_2] = n_2 - 1$$

$\partial[\cdot]$ 表示多项式 $[\cdot]$ 的阶次. 令多项式 $F_1(q^{-1})$ 和 $M_1(q^{-1})$ 满足

$$G_2B_2 = F_1 + q^{-d_1}M_1 \quad (5)$$

$$\partial[F_1] = d_1 - 1, \quad \partial[M_1] = d_2 + m_2 - 1$$

令多项式 $G_1(q^{-1})$ 和 $R_1(q^{-1})$ 满足

$$F_1 = A_1G_1 + q^{-d_1}R_1 \quad (6)$$

$$\partial[G_1] = d_1 - 1, \quad \partial[R_1] = n_1 - 1$$

以及

$$\partial(q^{-1}) = R_2(q^{-1}), \quad \beta(q^{-1}) = [R_1(q^{-1}) + M_1(q^{-1})], \quad (7)$$

$$\gamma(q^{-1}) = G_1(q^{-1})B_1(q^{-1})$$

则可得 $z_2(t)$ 的 d_1+d_2 步超前部分状态预估算法 (3).

逐级极点配置控制算法从系统的输入环节逐级向其输出环节设计. 对于第一级, 假设其给定 $z_1^*(t+d_1)$ 已知, 取

$$K_1(q^{-1})z_0(t) = -S_1(q^{-1}) \cdot Z_1(t) + H_1(q^{-1})Z_1^*(t+d_1) \quad (8)$$

及该环节的希望闭环极点多项式为 $T_1(q^{-1})$, 如果 $A_1(q^{-1})$ 和 $B_1(q^{-1})$ 互质, 则 (8) 中的 K_1 和 S_1 唯一取决于

$$T_1 = K_1 A_1 + q^{-d_1} S_1 B_1, \quad \partial[K_1] = d_1 + m_1 - 1, \quad \partial[S_1] = n_1 - 1 \quad (9)$$

那么第一级具有闭环特性

$$T_1(q^{-1})z_1(t) = q^{-d_1} B_1(q^{-1}) H_1(q^{-1}) z_1^*(t + d_1) \quad (10)$$

实际上, 第一级的给定值 $z_1^*(t + d_1)$ 要由下一级设计来确定. 考虑到第一级闭环特性 (10), 第二级系统可表成

$$T_1(q^{-1})A_2(q^{-1})z_2(t) = q^{-d_1-d_2} B_2(q^{-1})B_1(q^{-1})H_1(q^{-1})z_1^*(t + d_1) \quad (11)$$

与前边的步骤类似, 取

$$K_2(q^{-1})z_1^*(t + d_1) = -S_2(q^{-1})z_2(t) + H_2(q^{-1})z_2^*(t + d_1 + d_2) \quad (12)$$

$$T_2 = K_2 A_2 T_1 + q^{-d_1-d_2} S_2 B_2 B_1 H_1 \quad (13)$$

$$\partial[K_2] = d_1 + d_2 + m_1 + m_2 + \partial[H_1] - 1, \quad \partial[S_2] = n_2 + \partial[T_1] - 1$$

则有总的闭环特性

$$T_2(q^{-1})z_2(t) = B_1(q^{-1})B_2(q^{-1})H_1(q^{-1})H_2(q^{-1})z_2^*(t) \quad (14)$$

$H_1(q^{-1})$ 和 $H_2(q^{-1})$ 应选得使闭环特性 (10) 和 (14) 无静差.

如果 $B_1(q^{-1})$ 是稳定多项式, 并允许取 $T_1 = B_1 T_1'$, $T_2 = B_1 T_1' T_2'$, 则取 $H_1 = T_1'$,

(13) 式可简化为

$$T_2' = K_2 A_2 + q^{-d_1-d_2} S_2 B_2 \quad (15)$$

经零极点抵消后的闭环特性为

$$T_1'(q^{-1})[z_1(t) - z_1^*(t)] = 0 \quad (16)$$

$$T_2'(q^{-1})z_2(t) = B_2(q^{-1})H_2(q^{-1})z_2^*(t) \quad (17)$$

由 (15) 式可见, 系统的设计就象按子系统进行的那样, 使设计工作得到简化.

$z_2(t)$ 是系统的受控输出, 其给定值 $z_2^*(t + d_1 + d_2)$ 已知. z_1^* 由 (12) 式确定,

具体地

$$K_2(0)z_1^*(t + d_1) = -K_2'(q^{-1})z_1^*(t + d_1 - 1) - K_2''(q^{-1})z_1^*(t) - S_2(q^{-1})z_2(t) + H_2(q^{-1})z_2^*(t + d_1 + d_2) \quad (18)$$

式中, $K_2'(\cdot)$ 和 $K_2''(\cdot)$ 满足 $K_2(q^{-1}) - K_2(0) = K_2'(q^{-1}) \cdot q^{-1} + K_2''(q^{-1}) \cdot q^{-d_1}$, $\partial[K_2'] = d_1 - z$. 由于 z_1^* 是控制器设定的, 实际中并不一定能在每一个周期都等于该值, 因此在实现时, (18) 式等号右边第一项里的 $z_1^*(t + d_1 - 1)$ 应用 (3) 式中的

预估值 $z_1(t+d_1-1)$ 代替，第二项里的 $z_1^*(t)$ 应用实测值 $z_1(t)$ 代替。

四、实际应用

上节给出的控制算法已经应用于氢氮比系统控制,图2是微机氢氮比控制系统框图,其中的控制中心是一台 Apple II 微机系统。对三个环节选取闭环极点多项式 $T'_3 = 1 - 0.9q^{-1}$, $T'_2 = 1$, $T'_1 = 1 - 0.8q^{-1}$ 。按照前述方法,可以求得逐级极点配置控制算法^[3]。控制算法的实现是很容易的,但是模型(1)中的参数是有缓慢变化的,控制系统中设计了递推参数估计算法以适应系统环境的变化。实际系统中常常出现一些意外的或者人为的干扰因素,这不利于参数的在线估计和控制算法的正确实现,因此为系统设计了抗扰专家系统。为了方便现场使用,还为控制系统配置了丰富的实时管理功能^[5]。

所设计的微机氢氮比控制系统在生产现场经历了试运行阶段,其间对该系统进行了大量试验和观察。图3是正常生产情况下,微机控制时各变量的变化情况,各氢表的测

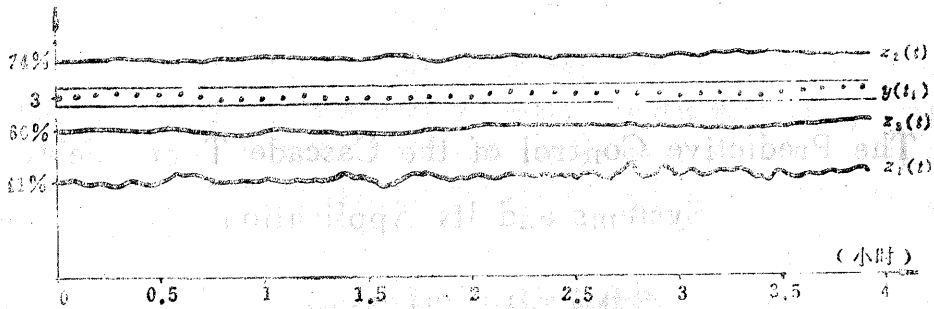


图3 微机控制时各变量变化曲线

量信号 $z_i(t)$, $i=1, 2, 3$, 被控制得运动平稳,该系统在试运行期间与原系统控制情况进行了对比试验。图4是对比试验中原系统控制时各变量的变化情况。

该系统已通过省级鉴定,获76万元的年经济效益。

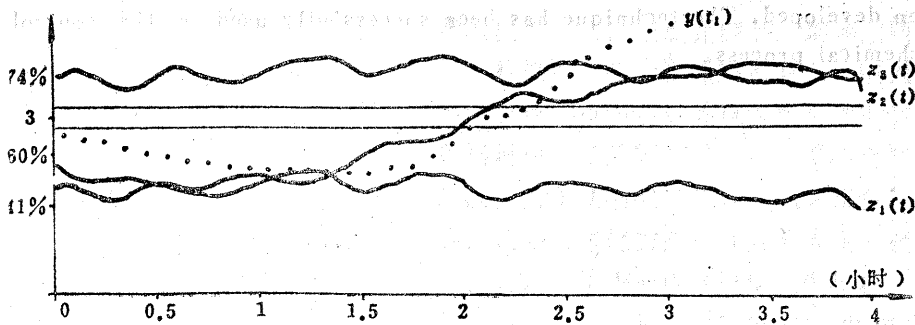


图4 原系统控制时各变量变化曲线

参 考 文 献

- [1] Anbumani, K., I. G. Sarma, and L. M. Patnaik, Self-tuning Cascade Control of Non-linear Systems, IFAC Symposium on Theory and Applications of Digital Control, New Delhi, India, (1982), 53-56.
- [2] Gawthrop, P. J., Multi-Loop Self-tuning Control, Cascade Systems, Proceedings of the 9th Triennial World Congress of IFAC, (1984), 127-132.
- [3] 邱祖廉、陈铁军, 高精度氢氮比控制系统, 西安交通大学学报, 22:1, (1988), 37-46.
- [4] 陈铁军、邱祖廉, 氢氮比系统动态数学模型, 化工自动化及仪表, 15:1, (1988), 15-22.

The Predictive Control of the Cascade Time-delay Systems and Its Application

Chen Tiejun, Qiu Zhulian

(Department of Information and Control, Xian Jiaotong University)

Abstract

A Predictor including the medium stage measures and a subsystem-based predictive controller for a class of cascade systems with time-delays have been developed. The technique has been successfully used in the control of a chemical process.