

文章编号:1000-582X(2002)01-0065-05

基于全参数在线辨识的鲁棒自校正控制

杨治平, 冯素梅

(重庆师范学院 影像工程系, 重庆 400047)

摘要:受控系统中,模型结构参数(模型时延及模型阶次)和模型参数是自适应类控制的基础,采样这些参数,并即时送给控制器,是实现自适应控制的前提,也是优化该类算法的重要依据。笔者给出了对上述自适应控制的有关参数的在线辨识方法,并基于此,改进了经典的自适应类控制算法。算法中引入了对结构参数(模型阶次)的智能辨识方法和鲁棒极点配置原理,从而构成了鲁棒自校正控制,使算法得以进一步优化。整个控制方案给出了自适应类控制的新模式。

关键词:模型结构参数;模型参数;在线辨识;鲁棒极点配置;自校正控制

中图分类号:TP 271.2

文献标识码:A

在过程控制中,越来越多的采用自适应类控制,而且该类算法还在不断的优化和探新。目前的自校正控制器,大多数只辨识模型参数,而模型结构参数则作为验前知识以固定的形式给出^[1],这一类的控制算法,不能实施在线的模型结构参数和模型参数的全参数辨识,同时这些参数也不能送给自校正控制器予以及时校正,这往往引起较严重的模型误差,影响了控制的质量。理想的自校正控制,需实时辨识过程的模型结构参数和模型参数,并不断地修改控制律以完成实时控制,在这方面^[2-4]文进行了有益的探索,但真正做到全参数在线辨识,并形成更有效的自适应类控制,目前尚未见到。作者是在前述工作的基础上,进一步深入探索和研究^[5,6],给出了在线模型结构参数和模型参数的辨识方法,并在此基础上,形成了新型的自校正控制。控制算法中,为提高过程响应的实时性,采用了双估计器的自校正控制算法;在提高控制质量方面,利用了鲁棒性原理,进行极点配置。整个控制算法,既体现了过程响应的实时性,也表现出控制的鲁棒性。仿真结果表明了所给算法的优越性。

1 模型参数及模型结构参数(时延)的鲁棒辨识

所述系统模型可由下式表出,即

$$y(k) + \sum_{i=0}^n a_i y_i(k-i-1) = \sum_{j=0}^m b_j u(k-j-\tau) + D(q^{-1})f(k) \quad (1)$$

其中 τ 为模型的时延, $D(q^{-1})f(k)$ 为随机有色噪声, a_i, b_j 为后向移位算子 q^{-1} 的多项式的系数(模型参数), $y(k), u(k)$ 为过程的输出、输入信号序列。本文中述及的模型参数 a_i, b_j 及时延 τ 的辨识,采用具有鲁棒性较好,可有效抑制系统扰动的辨识算法。

根据吸收原理,若存在吸收多项式 $T(q^{-1})$ (对周期扰动, $T(q^{-1}) = 1 - q^{-l}$, 其中 $l = 1, 2, \dots$) 使得对于干扰序列 $f(k)$ 存在 $T(q^{-1})f(k) = 0$, 则由(1)式给出的系统模型中, $T(q^{-1})D(q^{-1})f(k) = 0$ 也成立。现引入滤波输出和输入式分别如下:

$$\begin{cases} \tilde{y}(k) = T(q^{-1})y(k) \\ \tilde{u}(k) = T(q^{-1})u(k) \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)两边同乘以 $T(q^{-1})$ 得:

$$T(q^{-1})y(k) = (1 - A(q^{-1}))T(q^{-1})y(k) + B(q^{-1})u(k - \tau) + D(q^{-1})T(q^{-1})f(k) \quad (3)$$

这样修正的系统方程如下:

$$\tilde{y}(k) = (1 - A(q^{-1}))\tilde{y}(k) + B(q^{-1})\tilde{u}(k - \tau) \quad (4)$$

对上述系统而构成的参数辨识方程为:

$$\tilde{y}(k) = (1 - \hat{A}(q^{-1}))\tilde{y}(k) + \hat{B}(q^{-1})\tilde{u}(k - \tau) \quad (5)$$

式(5)还可写成下列的向量形式:

$$\tilde{y}(k) = \tilde{x}(k)\hat{\theta}(k) \quad (6)$$

其中

· 收稿日期:2001-06-28

作者简介:杨治平(1957-),男,辽宁辽阳市人,副教授,硕士。主要研究方向:自适应类控制,模糊控制。

$$\begin{aligned} \tilde{y}(k) &= [-\tilde{y}(k-1), -\tilde{y}(k-2), \dots, -\tilde{y}(k-n_a), \\ &\quad \tilde{u}(k-\hat{\tau}), \tilde{u}(k-\hat{\tau}-1), \dots, \tilde{u}(k-\hat{\tau}-n_b), 0, 1] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\hat{\theta}(k) = (\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{n_a}, \hat{b}_0, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{n_b}, \hat{\tau}) \quad (8)$$

参数估计的递推算法^[3]为:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + \Gamma(k)[\tilde{y}(k) - \\ &\quad \hat{\theta}(k-1)^T \tilde{X}(k)] \tilde{X}(k) \\ \Gamma(k) &= \frac{\Gamma_0(k-1)}{\tilde{X}(k)^T \Gamma_0(k-1) \tilde{X}(k)} \\ \Gamma_0(k) &= \Gamma_0(k-1) + \\ &\quad \frac{\Gamma_0(k-1) \tilde{X}(k) \tilde{X}(k)^T \Gamma_0(k-1)}{\tilde{X}(k)^T \Gamma_0(k-1) \tilde{X}(k)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\Omega(u, y) = \begin{bmatrix} u(k-1) & u(k-l): y(k-1) & y(k-l) \\ u(k) & u(k-l-1): y(k) & y(k-l-1) \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ u(k-p+1) & u(k-l+p): y(k-p+1) & y(k-l+p) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 $\Omega(u, y)$ 为 $(p+1) \times 2l$, 观测次数为 $l+p+1$ 。为预测阶数, p 为采样次数。

积矩阵的定义为: $T_l(u, y) = \Omega^T(u, y)\Omega(u, y)$, 其中 $T_l(u, y)$ 为 $2l \times 2l$ 。可以证明, 当无噪声干扰 (即 $f(k) = 0$) 时, 在输入信号为持续激励条件下, 矩阵 $T_l(u, y)$ 的秩为 $\min\{(n_a + l), 2l\}$ (n_a 为模型阶次) 因此, 当 $l < n_a$ 时, $T_l(u, y)$ 为非奇异矩阵, 而当 $l > n_a$ 时, 秩为 $(n_a + l) < 2l$ 时, 变为奇异阵。因此, 系统模型的阶次可通过逐次增加 l 值, 直到积矩阵 $T_l(u, y)$ 变为奇异阵。即 $\det T_l(u, y) = 0$ 的办法来判定。但是在一般情况下, 均存在噪声扰动, 故即使 $l > n_a$, 也不会出现 $\det T_l(u, y) = 0$ 的情况, 而只能使 $\det T_l(u, y)$ 下降到某个较小的界限值, 该值的大小与噪声 $\epsilon(k)$ 的方差 δ_ϵ^2 有关。为了判定系统的阶次, 可考察 $\det T_l(u, y)$ 与 $\det T_{l+1}(u, y)$ 的比值 D_l , 这里 $D_l = \det T_l(u, y) / \det T_{l+1}(u, y)$ 。

逐步增加 l , 当 $l = n_a$ 时, 由于 $l+1$ 时刻的 $\det T_{l+1}(u, y)$ 与 l 时刻的 $\det T_l(u, y)$ 相比较, 下降到很小的值, 因此 $\det T_l(u, y)$ 与 $\det T_{l+1}(u, y)$ 的比值 D_l , 将出现跳跃上升, 这样便可由 D_l 的变化来确定模型的阶次。如当 $l = 2$ ($n_a = 2$) 时, D_l 值将会呈现出跳跃变化现象, 根据系统响应特性的质量, 以及大量仿真

由上述算法可辨识出系统的模型参数 $\hat{\theta}$ 及模型结构参数 $\hat{\tau}$ (时延), 同时抑制了扰动的影响。

2 模型结构参数(系统阶次)的智能辨识

算法中采用积矩阵法, 直接利用单变量系统输入、输出数据构成积矩阵, 然后再由积矩阵的奇异性来判定系统阶次。对(1)式的系统, 假定输入信号序列 $u(k)$ 是持续激励。设参数矩阵由输入、输出采样数据组成:

数据的统计特性, 一般取最大值的 30% 左右, 为跳跃变化点较为合适, 此时模型的阶次确定为 2。其确定模型的阶次算法的实现如下:

1) 读入 u, y 值; 2) 形成 $\Omega(u, y)$ 矩阵; 3) 计算积矩阵 $T_l(u, y)$; 4) 计算积矩阵 $T_{l+1}(u, y)$ 。5) 计算 $D_l = \frac{\det T_l(u, y)}{\det T_{l+1}(u, y)}$; 6) 计算 $D_{l+1} = \frac{\det T_{l+1}(u, y)}{\det T_{l+2}(u, y)}$; 7) 判定 $\frac{D_{l+1}}{D_l} > 0.3$ 是否成立, 如成立, 输出 l 值, 送参数估计器; 8) 如 $\frac{D_{l+1}}{D_l} > 0.3$ 不成立, 则返回到第 2) 步重新计算(逻辑判断、计算 l 值)。

根据前述的算法, 通过数字仿真, 以系统过渡过程响应稳定为目标, 笔者的设计系统, 当值跳变为 31.733% 时, 对应的值, 即为系统阶次。上述的设计思想, 在文献[6]中也可以见到。仿真结果可参见图 2。

3 全参数辨识自校正控制算法

3.1 控制算法的优化

传统的求解控制器参数方法是: 通过预期的闭环极点, 求解 Diophantine 方程获得。这其中需求解 Sylvest 矩阵的逆矩阵, 计算量很大。采用双估计器的方法, 不求逆矩阵, 使得计算量大为减少, 同时避免了求解 Sylvest 逆矩阵的奇异问题。其原理是: 一级估计器采用

(9) 式给出的最小二乘估计器,不断地采集系统运行中有关变化的数据,实时地估计出控制对象的参数 - 辨识功能;二级估计器(辅助估计器)是用一级估计器所估计到的参数,按照期望的闭环极点位置规定的预期闭环系统特性,再次应用最小二乘估计器,来计算调节器参数并形成控制作用,以保证工艺要求 - 控制功能。

第二级估计器,是将第一级估计器的估计参数 $\hat{a}_i, \hat{b}_j (i = 1, \dots, n_a, j = 0, \dots, n_b \text{ 取 } b = l - 1)$, 作为已知参数,将被计算的控制器参数,作为第二级估计器的被估参数来计算 $f_i, g_j (i = 1, \dots, n_r, j = 0, \dots, n_r)$, 并形成自校正控制律 f_i, g_j 是下列的 Diophantine 方程:

$$\hat{A}(q^{-1})\hat{F}_0(q^{-1}) + \hat{B}(q^{-1})\hat{G}_0(q^{-1}) = T_0(q^{-1})\hat{C}(q^{-1}) \quad (11)$$

的解,其中

$$T_0(q^{-1}) = (1 - \alpha_1 q^{-1})(1 - \alpha_2 q^{-1}) \dots (1 - \alpha_n q^{-1}) \quad (12)$$

为期望的闭环极点多项式, $\alpha_i (i = 1, \dots, n_b)$ 为预置闭环特征方程的系数。为此,定义两个新的变量:

$$M_m(q^{-1}) = C(q^{-1})T_0(q^{-1}) \quad (13)$$

$$\hat{M}(q^{-1}) = \hat{A}(q^{-1})\hat{F}(q^{-1}) + q^{-d}\hat{B}(q^{-1})\hat{C}(q^{-1}) \quad (14)$$

其中 $\hat{M}(q^{-1})$ 可表示成向量矩阵的形式:

$$\hat{M}(k) = \hat{\Phi}(k)\hat{\delta}(k) \quad (15)$$

$$\text{这里 } \hat{\Phi}(k) = [\hat{A}(k-1), \dots, \hat{A}(k-n_a), \hat{B}(k-d), \dots, \hat{B}(k-d-n_b+1)] \quad (16)$$

$$\hat{\delta}(k) = [\hat{f}(k-1), \dots, \hat{f}(k-\hat{n}_f), \hat{g}(k), \dots, \hat{g}(k-n_g+1)] \quad (17)$$

采用前述给出的最小二乘参数估计器计算调节器参数,得到下列递推公式:

$$K_{k+1} = P_k \hat{\Phi}(k+1) [\hat{\Phi}(k+1) P_k \hat{\Phi}(k+1) + X(k)]^{-1} \quad (18)$$

$$P_{k+1} = 1/\lambda [I - K_{k+1} \hat{\Phi}(k+1)] P_k \quad (19)$$

$$\hat{\delta}(k+1) = \hat{\delta}(k) + K_{k+1} [M_m(k+1) - \hat{M}(k+1)] \quad (20)$$

令 $C(q^{-1}) = 1$, 虽然实际系统中 $C(q^{-1})$ 一般并不为 1, 但经过调节作用, 闭环系统的特性最终能收敛到理想的预置闭环极点。由二级估计器算出 $\hat{\delta}$ 参数, 即 f_i, g_j 参数。由仿真分析可知^[1], 双估计器自校正控制的受控变量, 其过渡过程明显地快于求解 Sylvest 矩阵

的逆矩阵形成的自校正控制, 稳定特性也较理想。

3.2 鲁棒极点配置

为使系统最大限度地克服扰动的影响, 保持系统响应特性的不变性, 参照文献[7]的鲁棒性原理, 进行闭环极点的配置, 以使过程响应处于最佳状态。对此引入内模机制的系统如图 1 所示

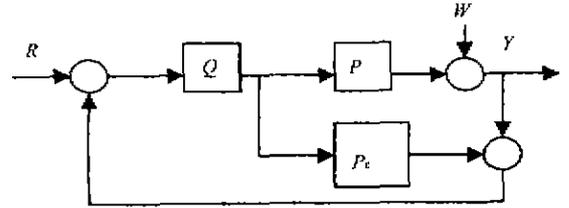


图 1 引入内模机制的控制结构

该过程 P_0 是内部模型, P 是对象的函数方程, Q 是控制器方程, 即

$$P = \left\{ p : \left| \frac{p - p_0}{p_0} \right| \leq \alpha(\omega), \omega \in [0, \pi] \right\} \quad (22)$$

定义幅值振荡响应函数为:

$$\alpha_c(\omega) = \left| \frac{1 + QP_0}{QP_0} \right| \quad (23)$$

若 P 和 P_0 是稳定的(由鲁棒参数辨识可得), 则鲁棒稳定性的充分必要条件是:

$$\alpha(\omega) < \alpha_c(\omega), \omega \in [0, \pi] \quad (24)$$

上式中的 $\alpha(\omega)$ 是任意给定的有界的不确定因子。鲁棒稳定性或鲁棒性是指控制器输出的控制律, 对所有的 P 都是稳定的。文献[7]的思想是基于内模控制原理, 由标准内模 P_0 导出内模原理控制器 Q 。上述鲁棒设计思想在很多方面得到延伸。本文的设计中, 也借鉴了其设计思想。作者在第一节已论述了对参数的鲁棒辨识, 是通过吸收多项式来抑制参数的波动, 得到 \tilde{y}, \tilde{u} 两滤波参数, 而自校正控制律中, 有 $u(k) = f[e(k)]$, 其中 $e(k) = R(k) - \tilde{y}(k)$, 由于 $e(k)$ 是作为控制的目标及准则函数的依据, 而 $\tilde{y}(k)$ 已是滤波后的信号, $e(k) = R(k) - \tilde{y}(k)$ 始终保持在一个有界的、很小的范围内, 所以, 本文的自校正控制中至始至终含有鲁棒控制基础, 这是鲁棒稳定性的一个方面。另一方面还可以从极点配置中, 按鲁棒性进行设计, [7]文是通过极点配置机制构建鲁棒控制器 Q , 以满足 (24) 式成立, 实际上是保持系统响应的稳定性和过程控制指标在要求的范围内。为满足内模鲁棒控制条件, 本文的设计过程是: 对控制指标 $\alpha_c(\omega) =$

$$\left| \frac{A_m}{q^{-d} B^0 N(1 + H)} \right|, \text{ 为保证 } \alpha_c(\omega) \text{ 足够小, 要求上式}$$

A_m 选择要恰当,以满足稳定要求。 A_m 实际上就是工艺要求的理想极点配置多项式,本文的自校正控制器设计参照了这种思想。为保证系统响应特性达到工艺要求,通过仿真过程来选择极点,最终确定极点多项式及极点位置。选择常规极点配置多项式:

$$\hat{A}F + q^{-d}\hat{B}\hat{G} = A_m(q^{-1}) \quad (25)$$

由吸收原理可知, $A_m(q^{-1})$ 结构[8]为:

$$A_m(q^{-1}) = (1 + t_{n_1}q^{-1})^n \quad 0.1 < nt \leq 0.9, n = 1, 2, \dots \quad (26)$$

(26) 中 $A_m(q^{-1})$ 也即为 $T_0(q^{-1})$, 为满足理想的系统响应特性,可先选 $n = 1, nt = 0$, 如不满足要求,可再选 $n = 2$ 令 $A_m(q^{-1}) = (1 + 0.9q^{-1})(1 + t_{n_2}q^{-1})$, 多次尝试选择 t_{n_2} 的值,直到满足要求为止。通过大量的仿真实践,以系统的响应满足工艺要求为目标(见图 2),选择的两个极点分别是 $t_{n_1} = 0.4125, t_{n_2} = 0.273$, 即 $A_m(q^{-1}) = (1 + 0.4125q^{-1})(1 + 0.273q^{-1})$ 。这样选择的极点,得到图 2 的仿真结果。

3.3 全参数辨识自校正控制律

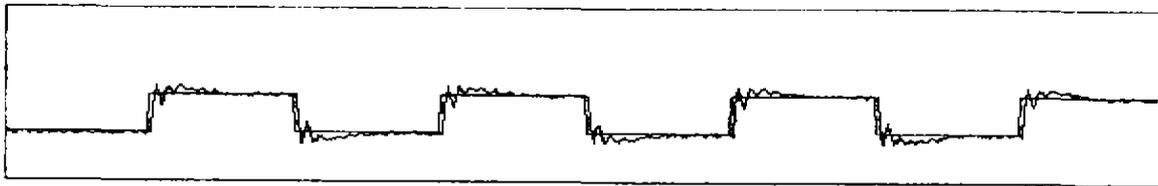


图 2 全参数在线辨识自校正控制响应特性

从仿真结果可以看出,所设计的控制器是成功的。这种控制器的特点在于:它可在线实时获得系统参数(a_i, b_j)及结构参数(时延 τ , 模型阶数 l),提供了自校正控制的坚实基础。它的功能即可完成自校正控制,克服过程模型不确定的不良影响,使系统具有较好的鲁棒性,还充分克服了由纯时延和模型阶数不确定造成的恶化系统动态品质的影响。这种控制算法,在吸收扰动方面及闭环极点配置上都采用鲁棒性设计。同时采用双估计器的数据处理的优势算法。上述算法,给出了自校正控制设计的新模式。

参考文献:

- [1] 杨治平,刘廷权. 有效克服系统时延的 PID 自校正预测控制新算法[J]. 数据采集与处理, 1998(3): 282-285.
- [2] TSYPKIN YA. Z, MASON JD, WARWICK K. Identification of

$$\text{自校正控制律: } u(k) = \frac{\hat{G}(q^{-1})}{\hat{F}(q^{-1})} e(k) \quad (27)$$

$$\text{其中 } e(k) = R(k) - \hat{y}(k) \quad (28)$$

控制算法如下:

- 1) 读取采样数据: $y(k), u(k)$; 2) 形成滤波向量 $\bar{y}(k), \bar{u}(k)$; 3) 按(7)、(8)、(9)式计算系统参数 \hat{a}_i, \hat{b}_j 及 $\hat{\tau}$; 4) 按(10)式及第二节的智能化的计算结构参数的算法,计算结构参数 $\hat{l} (l = n_a)$, 并送给自校正控制器; 5) 由 3.2 节的鲁棒极点配置算法,选择极点配置多项式 $A_m(q^{-1})$; 6) 按(18)(19)(20)式计算控制器参数 \hat{F}_1, \hat{G}_1 ; 7) 按(27)(28)式形成控制律。

4 仿真分析与结论

本文采用煤气焦炉控制系统采样数据作为仿真数据,对 y, u 输出各取 400 组数据^[1],通过噪声项系数的大小,施加不同的干扰量,在多种扰动情况下,根据鲁棒极点配置,由前述控制算法,得到下列仿真结果(见图 2)。

linear system in the presence of piecewise polynomial disturbances [J]. IEE Proc - control, 1996, (4): 443-451.

- [3] GOODWIN G C, SIN K S. Adaptive filtering prediction and Control[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1984.
- [4] YANG Z J, LET A. On-line identification of continuous time-delay system[J]. INT, J Control. 1998, (1): 23-35.
- [5] 徐南荣. 系统辨识[M]. 北京: 电子工业出版社, 1992.
- [6] 韩曾晋. 自适应控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [7] ANIRUDDHA DA, JAMES OCH. Adaptive Internal Model Control: Design and stability analysis[J]. Automatica. 1996, (2): 261-266.
- [8] TSYPKIN YA Z, HOLMBERG U. Robust stochastic control using the internal model and internal model control[J]. INT, J Control. 1995, (7): 809-822.

Robust Adaptive Control Based on On-line Identification to Multi-parameters

YANG Zhi-ping, FENG Su-mei

(Department of Photo and Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract: In system controlled, Sampling these parameters and with parameters for controller in time, it is an object to adaptive control. The article presents a scheme that the structure parameters on it's model and model parameters is robust identified by on-line, while to optimal of algorithm on adaptive control is fulfilled. In control scheme, method of intelligent identifying to the structure parameters(levels of model) and algorithm of robust pole-placement are introduced also. It is advancer for already mentioned scheme. Whole scheme presents new model on adaptive control.

Key words: structure parameters of system model; model parameters of system; on-line identification; robust pole-placement; self-tuning control

(责任编辑 吕赛英)

~~~~~  
(上接第 56 页)

## Reliability Evaluation of Middle Voltage Distribution Networks

*XIE Kai-gui<sup>1</sup>, YIN Chun-yuan<sup>2</sup>, ZHOU Jia-qi<sup>1</sup>*

(1. Electric Power System Research Institute of Electrical Engineering College,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Three Gorges Hydro Power Plant of CTGPC, Yichang 443133)

**Abstract:** A reliability evaluation algorithm for middle voltage radial distribution network is presented. The algorithm applied ahead-searching-method to determining the area of breaker influencing, applied bidirectional-searching-method to determining faulting area, and applied behind-searching-method to determining connection switch. Then the type of nodes is determined. The reliability index of nodes, feeders and system can be easily computed by the type of nodes. So the computing efficiency is improved. At the same time, the curtailing load algorithms for low-voltage of buses and over-capacity of lines are presented and the foundation for the reliability assessment is established considering the power flow restriction. From the RBTS68-bus and other middle radial distribution networks, the effectiveness and availability of the method are verified.

**Key words:** middle voltage distribution networks; reliability evaluation; searching algorithm; load curtailing

(责任编辑 陈移峰)