

文章编号: 1001-0920(2004)11-1294-04

多重滞后系统的预测控制

胡品慧, 闫峰

(石油大学(北京)自动化研究所, 北京 102249)

摘要: 研究了过程控制中常见的多重滞后系统的预测控制问题, 同时考虑状态变量滞后和控制作用滞后, 提出了一种改进的状态反馈预测控制算法, 它假设在滞后时间内状态变量未来预测值保持其当前值不变, 给出了其简化的递推算法, 解决了因多重状态滞后问题的存在, 使状态变量的未来值利用模型直接递推很难得到的问题, 最后通过仿真实例表明了算法的有效性, 该算法计算量小, 易于实际工程应用。

关键词: 预测控制; 多重滞后系统; 状态滞后; 控制滞后

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Predictive control to multi-time delayed systems

HU Pin-hui, YAN Feng

(Research Institute of Automation, University of Petroleum, Beijing 102249, China. Correspondent: HU Pin-hui, E-mail: hupnh@bjpeu.edu.cn)

Abstract: The common control problem of multi-time delayed systems in process control is studied. A modified state feedback predictive control (SFPC) method is presented for systems with both multi-time delayed states and multi-time delayed inputs. As the result of the multi-time delayed states, the predictive values of state variables are very difficult to be obtained recursively. In the delayed time interval, it is supposed that predictive states keep the current values invariant in the prediction horizon, the recursive approach is given simply. It is easy to apply to the industrial process. The simulation examples show efficiency of the method.

Key words: predictive control; multi-time delayed system; state variable delay; input delay

1 引言

在工业过程控制中, 滞后(或时滞)现象普遍存在, 它增加了控制系统的控制难度, 使控制系统的响应性能变差, 甚至造成控制系统的不稳定。被控过程的滞后问题分为两类: 一类是控制纯滞后, 另一类是状态纯滞后。利用输入输出模型描述滞后过程时, 一般只能反映控制纯滞后现象, 而不能反映状态纯滞后现象。状态滞后与控制(输入)滞后增加了系统的控制难度, 一般会使被控过程波动加大, 造成被控变量严重超调, 甚至引起控制系统的不稳定, 使被控变量及其他相关变量超过安全约束限, 从而引发严重

事故而造成经济损失。所以, 结合当前预测控制和滞后系统控制的新成果, 研究滞后系统的预测控制方法, 改善滞后系统的控制性能, 在理论和实际应用中均具有重要的意义。

2 问题提出

近年来, 滞后系统控制方法的研究受到了广泛关注^[1,2], 如 Smith 预估器^[3,4]、PD 控制器、纯滞后补偿器(DTC)、Dahlin 算法以及神经网络 PD^[5]等。Smith 预估器过于依赖精确的数学模型, 当估计模型与实际对象有误差时, 控制品质将显著恶化, 甚至造成系统的不稳定, 而其对于外部扰动也非常敏

收稿日期: 2004-01-14; 修回日期: 2004-04-19

基金项目: 国家 863 计划项目(2001AA 413120); 中国石油集团公司石油科技中青年创新基金资助项目(04E7027)。

作者简介: 胡品慧(1959—), 男, 天津人, 教授, 从事控制理论与应用、预测控制的研究; 闫峰(1979—), 男, 黑龙江安达人, 硕士, 从事时滞系统控制、预测控制的研究。

感,鲁棒性较差,所以一般的 Smith 预估器难以在实际中应用 应用 PD 控制器研究滞后系统的关键是参数的设置,但由于 PD 的参数整定比较困难,对于滞后较大的系统,常规 PD 控制器往往无能为力 纯滞后补偿器的结果一般比较复杂且很难有明确的物理意义,鲁棒性问题在一定程度上也很难保证,因而限制了其实际的应用范围 基于神经网络的模糊控制 PD 控制器,对训练样本的依赖性较高,当被控过程发生变化(如当滞后时间的不确定性、时变性及非线性等因素存在)时,其控制性能显著恶化,很难实际应用 DMC 算法^[6]、内模控制(MC)算法^[7]等均采用模型预估控制方法解决具有纯滞后过程的控制问题,但对于具有大滞后的过程,由于使用输入输出模型,未考虑状态变量滞后问题,从而使控制效果较差,且存在计算量大的问题,实际应用效果亦不令人满意

预测控制理论方面虽然已取得了一些成果,如自适应预测控制、模糊预测控制、神经网络预测控制及基于模型目标和模型约束的满意预测控制的研究等,但使用输入输出模型的预测控制方法,因模型自身的局限性,很难反映出状态变量之间的多重滞后问题 所以,对于状态变量多重滞后系统,使用上述预测控制方法时,难以进一步提高其控制性能而实现满意控制

基于状态空间模型的状态反馈预测控制算法^[8,9],不仅可以反映输入与输出之间存在的滞后现象,还可反映状态变量之间存在的滞后现象,因此可以进一步提高控制系统的性能 如果将滞后状态扩展为新的状态变量,通过增加状态变量的维数,化滞后状态模型为无滞后状态模型后,再应用状态反馈预测控制算法 随着滞后时间增大或离散化周期减小,状态变量的维数会剧增,使存储数据的维数增大,计算速度下降,影响实际工程应用与实施 另外,对滞后时间的时变性、非线性及不确定性的影响很难有效地减弱或消除 如果直接利用模型递推,将出现使用预测值来递推新的预测值^[10],从而使算法结构过于复杂,计算量增大,递推结果偏离实际值较远,从而降低了控制效果

为解决上述问题,本文通过研究和改进预测控制算法,使算法简单有效,即降低计算量又不依赖于准确的数学模型,且具有较好的控制效果

3 问题描述

假设多重滞后系统的动态数学模型由如下的离散化状态空间模型表示为:

$$\begin{cases} X(k+1) = \\ A X(k) + \sum_{i=1}^{l_a} A_i X(k-\tau_i) + \\ \sum_{i=1}^{l_b} B U(k-d_i) + FV(k), \\ Y(k) = CX(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $X \in R^n$ 为状态变量; $U \in R^r$ 为操纵变量; $Y \in R^r$, r 为被控变量; $V \in R^q$ 为干扰变量; $A \in R^{n \times n}$, $A_i \in R^{n \times n}$ ($i=1, 2, \dots, l_a$), $B \in R^{n \times r}$, $B_i \in R^{n \times r}$ ($i=1, 2, \dots, l_b$), $C \in R^{r \times n}$, $F \in R^{n \times q}$ 均为常数矩阵; $\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_{l_a}$ ($i=1, 2, \dots, l_a$), τ_i ($\tau_i > 0$) 和 l_a 分别为状态变量滞后的时间和重数; $d_1 < d_2 < \dots < d_{l_b}$ ($i=1, 2, \dots, l_b$), d_i 和 l_b 分别为操纵变量滞后的时间和重数 该模型可以表征出同时具有状态滞后和控制滞后的复杂滞后系统

4 控制算法

选择第 h 个输出 y_h 的预测时域 p_h , 根据式(1)模型预测 y_h 的未来第 p_h 步, 即 $k + p_h$ 时刻的输出

$$\begin{aligned} \hat{y}_h(k+p_h) = & c_h A^{p_h} X(k) + \sum_{i=1}^{l_a} \sum_{j=1}^{p_h} c_h A^{j-1} A_i X(k+p_h - \\ & \tau_i - j) + \sum_{i=1}^{l_b} \sum_{j=1}^{p_h} c_h A^{j-1} B U(k+p_h - \\ & d_i - j) + \sum_{j=1}^{p_h} c_h A^{j-1} FV(k+p_h - j), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 c_h 表示输出矩阵 C 的第 h 行向量, $C = [c_1^T, \dots, c_h^T, \dots, c_r^T]^T$.

根据状态空间模型计算被控过程输出未来值 $y(k+p_h)$, 当预测时域 $p_h = \lambda(\tau_i + 1)$ ($i \in \{1, 2, \dots, l_a\}$, λ 为正整数) 时, 将出现利用模型进行 λ 次递推计算, 使得最后的结果难以统一且计算量增大 在滞后时间区间内, 假设状态变量未来值在预测时域内保持其当前值不变, 避免了使用预测值来预测新的预测值的方法, 得出了一种结构简洁的适用于多重状态滞后、多控制滞后的状态反馈预测控制算法

对此, 根据预测时域 p_h 与滞后时间的比较, 未来状态和可测干扰的预测值按如下假设处理:

$$\begin{aligned} X(k+j) &= X(k), j > 0; \\ V(k+j) &= V(k), j > 0 \end{aligned}$$

应用状态反馈预测控制算法, 选取控制时域 $L = 1$, 即只在 k 时刻改变控制作用的大小, 在其以后控制作用维持不变, 即 $U(k+j) = U(k), j > 0$, 得到最优控制率如下:

$$\Delta U(k) = [S^T(P)QS(P)]^{-1}S^T(P)Q\{Y^S(k) - Y(k) - K\Delta X(P) - H_X(z^{-1})X(k) - F_U(z^{-1})\Delta U(k-1) - F_V(z^{-1})\Delta V(k-j)\} \quad (3)$$

其中: $Q > 0$ 为偏差加权阵; $Y^S(k)$ 为输出给定值; $Y(k)$ 为当前输出实测值; $X(k)$ 为当前状态实测值; $\Delta V(k-j) = V(k) - V(k-j)$, $V(k)$ 为当前干扰实测值 另外有

$$S(P) = \begin{bmatrix} S_1(p_1) \\ \vdots \\ S_h(p_h) \\ \vdots \\ S_r(p_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \quad p_1 \quad d_i \\ \vdots \\ c_1 A^{j-1} B_i \\ \vdots \\ s_h \quad p_h \quad d_i \\ \vdots \\ c_h A^{j-1} B_i \\ \vdots \\ s_r \quad p_r \quad d_i \\ \vdots \\ c_r A^{j-1} B_i \end{bmatrix},$$

$$F_V(z^{-1}) = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ c_1 A^{j-1} F \\ \vdots \\ p_h \\ \vdots \\ c_h A^{j-1} F \\ \vdots \\ p_r \\ \vdots \\ c_r A^{j-1} F \end{bmatrix},$$

$$K\Delta X(P) = \begin{bmatrix} c_1 A^{p_1} [X(k) - X(k-p_1)] \\ \vdots \\ c_h A^{p_h} [X(k) - X(k-p_h)] \\ \vdots \\ c_r A^{p_r} [X(k) - X(k-p_r)] \end{bmatrix},$$

$$H_{Xh}(z^{-1})X(k) = \sum_{i=1}^{w_h} \sum_{j=1}^{p_h} c_h A^{j-1} A_i X(k) + \sum_{i=1}^{l_a} \sum_{m=1}^{p_h} c_h A^{p_h - \tau_i + m - 1} A_i X(k-m) + \sum_{i=w_h+1}^{l_a} \sum_{m=1}^{p_h} c_h A^{p_h - \tau_i + m - 1} A_i X(k-m) - \sum_{i=1}^{l_a} \sum_{m=\tau_i+1}^{p_h} c_h A^{m - \tau_i - 1} A_i X(k-m),$$

$$F_U(z^{-1})\Delta U(k-1) =$$

$$\sum_{i=1}^{g_h} \sum_{m=1}^{d_i} S_{hi}(p_h - d_i + m)\Delta U(k-m) + \sum_{i=g_h+1}^{l_b} \sum_{m=1+d_i}^{p_h} S_{hi}(p_h - d_i + m)\Delta U(k-m) + \sum_{i=1}^{l_b} \sum_{m=d_i+1}^{p_h+d_i} [S_{hi}(p_h) - S_{hi}(m-d_i)]\Delta U(k-m).$$

5 仿真实例

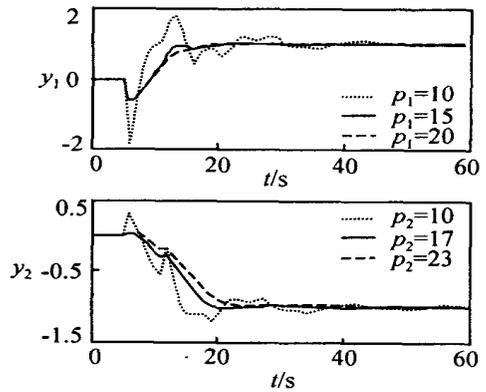
考虑双入双出开环稳定的非最小相位系统

$$X(k+1) = AX(k) + A_1 X(k-6) + A_2 X(k-10) + B_1 U(k-5) + FV(k),$$

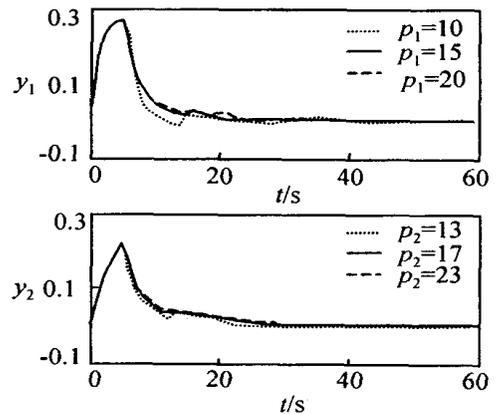
$$Y(k) = CX(k),$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 818 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 449 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 875 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$



(a) 单位阶跃响应曲线



(b) 抑制单位阶跃干扰能力

图1 预测时域仿真曲线

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 182 & 0 \\ 0 & 0 & 301 \\ 0 & 0 & 187 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 & 150 & 4 \\ 0 & 056 & 2 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据上述设计方法,并考虑到非最小相位系统导致的开环响应应具有反向响应特性,确定出预测时域的可选范围为 $P = [10 \ 13]^T$, 给定值为 $Y^s = [1 \ -1]^T$. 最后选择 3 组预测时域得到仿真曲线如图 1 所示

6 结 论

本文对工业生产过程中常见的多重滞后复杂过程控制系统的预测控制进行了研究,利用状态反馈预测控制,引入对未来状态和未来可测干扰变化轨迹的假设,给出了适用于具有多重状态滞后、多重控制滞后的状态反馈预测控制算法,避免了使用预测值再次递推新的预测. 该算法结构简单,减少了保存历史数据的维数,从而节省计算机内存,减小了在线计算量,计算速度成倍提高,非常有利于实际工程应用与实施

参考文献(References):

- [1] Mihai Huzmezan, William A Gough, Guy A Dumont, et al Time delay integrating systems: A challenge for process control industries [J]. *A Practical Solution, Control Engineering Practice*, 2002, 10 (11): 1153-1161.
- [2] Kharitonov V L, Zhabko A P, Lyapunov-Krasovskii approach to the robust stability analysis of time-delay systems [J]. *Automatica*, 2003, 39(1): 15-20
- [3] Darko Vrecko, Damir Vrancic, Dani Huricic, et al A new modified Smith predictor: The concept, design and tuning [J]. *ISA Trans*, 2001, 40(2): 111-121.

- [4] Ibrahim Kaya Improving performance using cascade control and a Smith predictor [J]. *ISA Trans*, 2001, 40 (2): 223-234
- [5] Shu Huailin, Pi Youguo PD neural networks for time-delay systems [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24(8): 859-862
- [6] 李阳春, 张卫东, 许晓鸣, 等. 时滞不确定系统 DMC 约束控制的鲁棒性条件 [J]. *控制理论与应用*, 2001, 18 (1): 109-112
(LI Y C, ZHANG W D, XU X M, et al Robust stability conditions for DMC algorithm of constrained delay uncertain systems [J]. *Control Theory and Applications*, 2001, 18(1): 109-112)
- [7] Wen Tana, Horacio J Marquez, Tongwen Chen MC design for unstable processes with time delays [J]. *J of Process Control*, 2003, 13(3): 203-213
- [8] 胡品慧, 袁璞 状态反馈预测控制干扰解耦的研究 [J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 194-198
(Hu P H, Yuan P. Study on disturbance decoupling of state feedback model predictive control [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 194-198)
- [9] 胡品慧, 杜殿林, 左信, 等 状态反馈预测控制在催化裂化柴油产品质量先进控制中的应用 [J]. *石油炼制与化工*, 2003, 34(5): 57-59
(Hu P H, Du D L, Zuo X, et al Advanced process control and plant implementation for FCC LCO quality based on state feedback model predictive control [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2003, 34 (5): 57-59)
- [10] 孙玉华, 石卫红, 刘万丰, 等 具有纯滞后系统的预测控制算法 [J]. *大庆石油学院学报*, 1997, 21(4): 40-44
(Sun Y H, Shi W H, Liu W F, et al Predictive control algorithm of time delay systems [J]. *J of Daqing Petroleum Institute*, 1997, 21(4): 40-44)

(上接第 1293 页)

- [6] Wang L, Zheng D Z An effective hybrid optimization strategy for job-shop scheduling problems [J]. *Computers and Operations Research*, 2001, 28(6): 585-596
- [7] Guo G Q, Yu S Y. Evolutionary parallel local search for function optimization [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 2003, 33 (6): 864-876
- [8] He J, Kang L S On the convergence rate of genetic al-

- gorithm s [J]. *Theoretical Computer Science*, 1999, 229 (1): 23-39
- [9] Xu Y G, Li G R, Wu Z P. A novel hybrid genetic algorithm using local optimizer based on heuristic pattern move [J]. *Applied Artificial Intelligence*, 2001, 15 (7): 601-631.