

文章编号: 1001-0920(2005)07-0819-04

一类非线性系统的自适应通用模型控制策略

郭丙君^a, 俞金寿^b

(华东理工大学 a 石化学院, b 信息学院, 上海 201512)

摘要: 通用模型控制(CMC)算法的参考轨迹是一条标准的二阶曲线, 该控制器的参数具有明显的物理意义, 控制器参数整定方便。将通用模型控制算法与非线性观测器结合, 在线估计控制器的参数, 从而构成自适应控制系统。该自适应控制策略的参数也具有明显的物理意义, 控制器和非线性观测器参数整定方便。在压力槽的控制中表明了该控制策略的良好性能。

关键词: 通用模型控制; 非线性观测器; 自适应控制; 压力槽

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Adaptive Common Model Control Scheme for a Kind of Nonlinear Systems

GUO Bing-jun^a, YU Jin-shou^b

(a Petrochemical Institute, b Information Institute, East China University of Science and Technology, Shanghai 201512, China Correspondent: GUO Bing-jun, Email: bingjun@jso1.net)

Abstract: The reference trajectory of common model control (CMC) scheme is a classic second order curve. The parameters of CMC are of very explicit physical meaning and it is very easy to tune for the controller. Combining the CMC algorithm with the nonlinear observer to estimate the parameters of the controller on line, an adaptive nonlinear control scheme is developed. The parameters of the adaptive control scheme are of very explicit physical meaning and it is very easy to tune for the controller and the nonlinear observer. The simulation results for a nonlinear pressure tank show that the adaptive common model controller is very effective for nonlinear systems.

Key words: Common model control; Nonlinear observer; Adaptive control; Pressure tank

1 引言

在非线性控制系统中, 直接利用非线性模型的一般模型控制(GMC)方法的发展已经引起了广泛的关注。GMC 方法是将非线性模型直接嵌入到控制器中, 其参考轨迹为一条伪二阶曲线, 具有参数易于整定的优点^[1-3], 但其物理意义不够明显^[4,5]。文献[6]通过修改 GMC 的参考轨迹为一条典型的二阶曲线, 成为通用模型控制器, 使得控制器参数物理意义十分明显, 参数易于整定, 简单实用。

但是, 化工过程通常是非线性和时变的, 研究通用模型控制器的非线性自适应控制方法很有意义。基于物理模型的非线性自适应控制方法的研究不

多。Henson 等人提出了一种非线性自适应控制方法^[6], 用于间歇式中和系统的 PH 值控制。该方法采用基于微分几何法设计的非线性控制器, 并带有基于递推最小二乘法设计的参数间接辨识器。Clarke-Pringle 等人研究了半间歇聚合反应釜的多变量非线性自适应温度控制方法^[7], 其带有卡尔曼滤波的控制器, 同样是基于微分几何法设计的。

考虑到非线性控制技术中 CMC 使用的方便性^[5]和 Farza 观测器的有效性^[8], 本文将二者结合, 提出了非线性自适应控制方法。该控制算法参数具有明显的物理意义, 参数易于整定, 可用于许多化工过程的控制。

收稿日期: 2004-08-23; 修回日期: 2004-10-20

作者简介: 郭丙君(1962—), 男, 上海金山人, 博士生, 从事自适应控制、先进控制的研究; 俞金寿(1939—), 男, 浙江海宁人, 教授, 博士生导师, 从事化工过程控制、过程建模与控制等研究。

2 非线性自适应控制策略

2.1 通用模型控制(CMC)

考虑用下列微分方程表示的非线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, d)\theta + g(u, x, d), \\ y &= cx. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: x 是 n 维状态矢量, u 是 m 维输入矢量, d 是可测扰动矢量, y 是输出矢量, θ 是 n 维模型矢量; f 和 g 是非线性函数矩阵, c 为系数矩阵 其参考轨迹为

$$\dot{y} + K_1 y = K_2 \int_0^t (y_{sp} - y) dt \quad (2)$$

其中: y_{sp} 为输出设定值, K_1 和 K_2 为 $n \times n$ 维整定参数对角矩阵, 显然有

$$\begin{aligned} f(x, d)\theta + g(u, x, d) + K_1 y - \\ K_2 \int_0^t (y_{sp} - y) dy = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

若式(3)可以得到显解, 则其闭环系统是线性的, 且为标准的二阶系统 式中

$$\omega_i = \sqrt{K_{2(i,i)}}, \quad (4)$$

$$\xi_i = \frac{K_{1(i,i)}}{2\sqrt{K_{2(i,i)}}}. \quad (5)$$

可见, 其物理意义十分明显

2.2 参数估计

实际上, 所有的对象模型与实际对象存在一些偏差 模型误差有模型结构误差与模型参数误差两种, 都将影响控制系统的质量, 但当模型参数误差定期校正时, 模型结构误差将降到最小

假设式(1)的模型参数为时变参数, 在线辨识其参数极为重要 模型参数的辨识技术很多, 例如最小二乘法和 Kalman 滤波器, 本文采用非线性观测器^[8].

又设非线性系统(1)中参数的动态特性为一阶方程

$$\dot{\theta} = \Psi(u, x, d) + \epsilon \quad (6)$$

其中: Ψ 为非线性函数; ϵ 为 x, θ, u, d , 噪音等的函数 假设函数 ϵ 未知但有界, 扰动 d 及其对时间的微分也有界

非线性系统(1)和式(6)可简化为

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \mathcal{Q}(x, d)F(x, d)z + B(u, x, d) + \bar{\epsilon}, \\ y &= Cz. \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} z &= \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix}, F(x, d) = \begin{bmatrix} 0 & f(x, d) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ B(u, x, d) &= \begin{bmatrix} g(u, x, d) \\ \Psi(u, x, d) \end{bmatrix}, \bar{\epsilon} = \begin{bmatrix} 0 \\ \epsilon \end{bmatrix}, \\ C &= [I_n, 0], I_n \text{ 为 } n \times n \text{ 维单位矩阵, } f \text{ 和 } \mathcal{Q} \text{ 分别为} \\ & n \times n \text{ 维矢量和标量实数函数, 该函数可微分且相应} \end{aligned}$$

的偏导数连续

下面的非线性观测器可用于跟踪矩阵 z , 即

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}} &= \mathcal{Q}(y, d)F(y, d)\hat{z} + B(u, y, d) - \\ & \mathcal{Q}(y, d)\Lambda^{-1}(y, d)S^{-1}C^T(C\hat{z} - y). \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$1) \hat{z} = \begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}^{2n}, \hat{\theta} \quad \mathbf{R}^n \text{ 为状态和参数的辨识矢量;}$$

$$2) \Lambda(y, s) = \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & f(y, d) \end{bmatrix};$$

$$3) S \text{ 为单值对称正定矢量, 满足 Lyapunov 方程} \\ \Lambda S + E^T S + S E - C^T C = 0, \quad (9)$$

式中

$$E = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda} I_n & -\frac{1}{\lambda^2} I_n \\ -\frac{1}{\lambda^2} I_n & \frac{2}{\lambda^3} I_n \end{bmatrix},$$

$\lambda > 0$, λ 为一设计参数

在上述条件下, 当存在实数 $\alpha, \beta, \alpha_n, \beta_n$ 且 $0 < \alpha < \beta, 0 < \alpha_n < \beta_n$ 时, 有

$$\alpha^2 I_n - f^T(y, d)f(y, d) - \beta^2 I_n, \quad (10)$$

$$\alpha_n - |\mathcal{Q}(x, d)| - \beta_n, \quad (11)$$

则非线性观测器满足收敛条件

从式(9)中可以看出, 观测器的整定缩小到单参数 λ 的整定, 当 $\epsilon = 0$ 时, 观测器偏差按指数形式收敛; 当 $\epsilon \neq 0$ 时, 选择一个足够大的 λ 可使渐进偏差足够小 但太大的 λ 值将使观测器对噪音敏感, 因此 λ 值的大小必须综合考虑收敛速度和观测器性能

2.3 自适应控制系统设计

非线性自适应控制策略是将非线性控制算法(3)与非线性参数观测器(11)综合实现的, 如图1所示 该自适应控制设计简便, 且控制器参数选择也很方便 在CMC控制算法中, 式(3)的 K_1 和 K_2 可按计算直接整定 一种常用的参数整定方法, 是根据标准的二阶系统的性能指标来选择 当系统具有输入饱和特性时, 可应用文献[4]方法来整定 非线性观测器整定参数只有一个, 即参数 λ 可通过试凑法整定

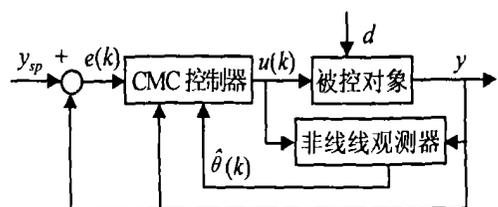


图1 自适应控制系统

应该指出, 该非线性自适应控制算法只适用于辨识的控制参数的数目小于或等于被控参数的数目, 对于每一个被控变量调整一个参数去提高控制系统性能通常是可行的, 但这不是一个严重的限制

3 仿真实例

某压力槽的进出口均装有调节阀, 槽压力和空气出口流量均需进行测量, 槽的压力和空气出口流量是被控变量, 压力槽进出口调节阀的阀位为控制变量, 这是一个两输入两输出系统, 且为强耦合系统 实际上, 此对象的耦合增益分析值(RGA)均接近 0.5, 意味着多闭环 PD 控制方案很难达到控制目的^[9].

压力槽的模型为

$$\dot{P}_v = \frac{K_{vi} l_i}{V} \sqrt{\frac{RT}{M}} \sqrt{P_v(P_i - P_v)} - \frac{K_{vo} l_o}{V} \sqrt{\frac{RT}{M}} \sqrt{P_o(P_v - P_o)}, \quad (12)$$

$$\dot{V}_o = K_{vo} l_o \sqrt{\frac{RT}{M}} \sqrt{\frac{P_v - P_o}{P_o}}. \quad (13)$$

式中: V, M, R, T 分别为空气体积、摩尔重量、理想气体常数和温度; K_{vi} 和 K_{vo} 分别为进出口阀的流量系数; P_v, P_i, P_o 分别为槽及进出口空气压力; l_i 和 l_o 分别为进出口阀门开度

被控参数为压力槽压力和出口体积流量, 控制参数为进出口阀门开度, 两者是非线性关系

压力槽的 CMC 控制算法为

$$L = G^{-1} \left[\int_0^t (y_{sp} - y_p) dt - K_1 y_p \right]. \quad (14)$$

其中: L 和 y_p 分别为控制器和压力槽的输出, K_1 和 K_2 为参数整定矩阵, 即

$$L = \begin{bmatrix} l_i \\ l_o \end{bmatrix}, \quad y_p = \begin{bmatrix} P_v \\ V_o \end{bmatrix},$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 \\ 0 & k_{12} \end{bmatrix}, \quad K_2 = \begin{bmatrix} k_{21} & 0 \\ 0 & k_{22} \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{K_{vi}}{V} \sqrt{\frac{RT}{M}} \sqrt{P_v(P_i - P_v)} & - \frac{K_{vo}}{V} \sqrt{\frac{RT}{M}} \sqrt{P_o(P_v - P_o)} \\ 0 & K_{vo} \sqrt{\frac{RT}{M}} \sqrt{\frac{P_v - P_o}{P_o}} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

由于阀的粘性等非线性特性, 导致了进出口阀的流量系数 K_{vi} 和 K_{vo} 随着进出口阀位置的变化而变化, 要获得良好的控制性能, 有效地估计进出口阀的流量系数 K_{vi} 和 K_{vo} 是必要的 由于该系统的被控变量可测量, 应用式(8)可得到进出口阀的流量系数 K_{vi} 和 K_{vo} 的估计, 即

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_v & \hat{V}_o & \hat{K}_{vi} & \hat{K}_{vo} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{l_i}{V} \sqrt{\frac{RT}{M}} \sqrt{P_v(P_i - P_o)} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \frac{l_o}{V} \sqrt{\frac{RT}{M}} \sqrt{P_o(P_v - P_o)} \begin{bmatrix} \hat{P}_v \\ \hat{V}_o \\ \hat{K}_{vi} \\ \hat{K}_{vo} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 2\lambda & 0 \\ 0 & 2\lambda \\ \frac{V}{l_i} \sqrt{\frac{M}{RT}} \frac{\lambda^2}{\sqrt{P_v(P_i - P_o)}} & \sqrt{\frac{M}{RT}} \frac{P_o \lambda^2}{\sqrt{P_v(P_i - P_o)}} \\ 0 & \frac{\lambda^2}{l_o} \sqrt{\frac{M}{RT}} \sqrt{\frac{P_o}{P_v - P_o}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{P}_v - P_v \\ \hat{V}_o - V_o \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中 $\hat{P}_v, \hat{V}_o, \hat{K}_{vi}$ 和 \hat{K}_{vo} 分别是 P_v, V, K_{vi} 和 K_{vo} 的估计值 显然, 这里满足压力槽的非线性观测器的收敛条件

按式(4), (5) 确定被控变量的目标曲线, 整定 CMC 控制器, 可得两个参数整定矩阵和观测器的一个整定参数 λ , 如表 1 所示 部分压力容器模型的固定参数也在表 1 中给出, 控制系统的采样时间为 1 s

表 1 对象数据与整定参数

$R = 8\,314.4 \text{ J/kmol} \cdot \text{K}$	$P_o = 101 \text{ kPa}$
$T = 25$	$P_i = 377 \text{ kPa}$
$M = 29 \text{ kg/kmol}$	$V = 0.0215 \text{ m}^3$
$k_{11} = 20 \text{ s}^{-1}$	$k_{21} = 1 \text{ s}^{-2}$
$k_{12} = 0.4 \text{ s}^{-1}$	$k_{22} = 0.04 \text{ s}^{-2}$
$k_{vi} = 1.91 \times 10^{-6}$	$k_{vo} = 3.82 \times 10^{-6}$

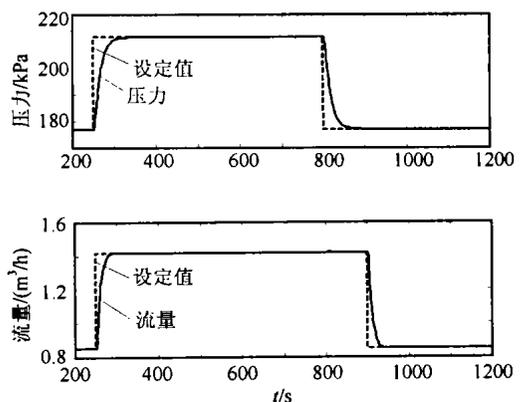


图 2 压力流量输出响应

实验中,在 $t = 250$ s 时,压力容器压力设定值从 176.9 kPa 阶跃至 201.4 kPa,然后在 $t = 800$ s 时变回原值。同时,空气出口流量设定值在 $t = 250$ s 时从 $0.85 \text{ m}^3/\text{hr}$ 阶跃至 $1.42 \text{ m}^3/\text{hr}$,在 $t = 800$ s 时变回原值,以测试系统性能。图 2 为压力槽的控制结果,图 3 为进出口阀流量系数 K_{vi} 和 K_{vo} 的估计。非线性观测器能够很好地估计进出口阀流量系数 K_{vi} 和 K_{vo} ,控制结果表明,所设计的自适应控制器/观测器对非线性的、耦合的、时变的多变量对象具有较好的控制性能。

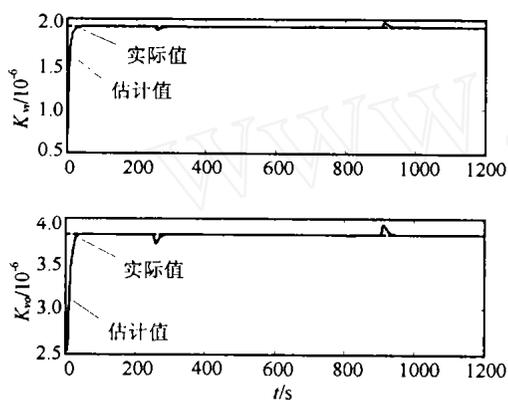


图3 进出口阀流量系数 K_{vi} 和 K_{vo} 的估计

4 结 语

本文提出的非线性自适应控制方法是将非线性多变量模型直接嵌入到控制器中,该控制器的参考轨迹是一条标准的二阶曲线,并将CMC算法与非线性观测器结合,构成自适应控制系统。在没有控制约束以及模型精确的情况下,可以使得闭环系统是一个标准的二阶系统,控制器参数具有明显的物理意义,且参数整定方便,是一种有效的非线性控制策略。

参考文献(References)

- [1] Lee P L, Sullivan G R. Generic Model Control[J]. *Computers Chemical Engineering*, 1988, 12: 573-584
- [2] Yamuna K, Gangiah K. Adaptive Generic Model Control: Dual Composition Control of Distillation[J]. *AIChE J*, 1991, 37(11): 1634-1642
- [3] Delisa M P, Chae H J, Weigand W A, et al. Generic Model Control of Induced Protein Expression in High Cell Density Cultivation of Escherichia Coli Using Online GFP-fusion Monitoring [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2001, 24: 83-91.
- [4] Guo B J, Hua X M, Arthur Jutan. Generic Model Controller Tuning for Chemical Processes with Input Saturation[J]. *Canadian J of Chemical Engineering*, 2002, 80(2): 275-280
- [5] Guo B J, Yu J S. A Common Model Controller [A]. *Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Hangzhou, 2004, 1: 805-808
- [6] Henson M A, Seborg D E. Adaptive Nonlinear Control of a pH Neutralization Process [J]. *IEEE Trans on Control Systems Tech*, 1994, 2(3): 169-175.
- [7] Clarke-Pringle T, MacGregor J F. Nonlinear Adaptive Temperature Control of Multiproduct, Semi-batch Polymerization Reactors [J]. *Computers Chemical Engineering*, 1997, 21(12): 1395-1404
- [8] Farza M, Hammour H, Jallut C, et al. State Observation of a Nonlinear System: Application to (bio) Chemical Processes[J]. *AIChE J*, 1999, 45(1): 93-106
- [9] Zhu Z X, Jutan A. Model Identification and Optimal Stochastic Control of a Multivariable Pressure Tank System [J]. *Trans of Institution of Chemical Engineers*, 1994, 72(A): 64-77.

(上接第 818 页)

参考文献(References)

- [1] Arras K O, Tomatis N, Jensen B, et al. Multisensor on-the-fly Localization: Precision and Reliability for Applications [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2001, 34(2-3): 131-143
- [2] Jensfelt P, Christensen H I. Pose Tracking Using Laser Scanning and Minimalistic Environmental Models [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2001, 17(2): 138-147.
- [3] Tomatis N, Nourbakhsh I, Siegwart R. Hybrid Simultaneous Localization and Map Building: A Natural Integration of Topological and Metric [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, 44(1): 3-14
- [4] Zhuang Y, Wang W, Liu L, et al. Mobile Robot Indoor Map Building and Pose Tracking Using Laser Scanning [A]. *Proc of Int Conf on Intelligent Mechatronics and Automation* [C]. Chengdu, 2004: 656-661.
- [5] Tomatis N, Nourbakhsh I, Siegwart R. A Hybrid Approach for Robust and Precise Mobile Robot Navigation with Compact Environment Modeling [A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Seoul, 2001: 1111-1116