

一种基于输入等价干扰自适应补偿的一般模型控制新方法及其实验研究*

谢晓清 周东华 金以慧
(清华大学自动化系 北京 100084)

摘要 一般模型控制(GMC)是一种可直接利用过程模型的非线性控制方法,但建模误差和不可测扰动对控制性能有较大的影响。基于强跟踪滤波器理论,提出一种输入等价干扰的新概念。利用 GMC 方法设计控制器,并用估计得到的输入等价干扰及时进行自适应前馈补偿,提出一种新的自适应一般模型控制方法。该方法能有效地跟踪非线性过程时变参数和不可测扰动,三容水箱实验装置的实验研究验证了它的有效性。

关键词 一般模型控制,强跟踪滤波器,非线性系统,自适应控制,时变系统
分类号 TP 271.62

Adaptive Generic Model Control Based on Input Equivalent Disturbance and Experimental Study

Xie Xiaqing, Zhou Donghua, Jin Yihui
(Tsinghua University)

Abstract Generic model control (GMC) is a nonlinear control strategy using process model directly. However, the existence of large modeling errors and unmeasurable disturbances will make the performance of GMC deteriorate. A new concept of input equivalent disturbance (IED) is introduced here based on the theory of strong tracking filters (STF). Using GMC to design controller, a new approach—adaptive generic model control (AGMC) is developed based on IED adaptive feed-forward compensation technique. The influence on control performance of the time-varying parameters and unmeasurable disturbances can be effectively compensated. Experimental results on a three-tank system demonstrate the effectiveness of the proposed AGMC approach.

Key words generic model control, strong tracking filter, nonlinear systems, adaptive control, time-varying systems

1 引言

目前,过程工业日益朝大型化、复杂化的方向发展,尤其当过程特性存在严重非线性时,PD 或基于线性模型的控制方法就显示出其局限性。一般模型控制(GMC)方法^[1,2]能对相对阶为 1 的非线性过程直接利用非线性过程模型导出显式控制律,其算法简单实用,参数整定方便。但当存在较大的模型/过程不匹配时,GMC 方法的控制输出会偏离标称轨

迹。Lee 等引入模型修正项,用以补偿建模误差引起的稳态偏差^[3];Signal 等用模型参数自适应修正来在线估计模型参数,提出了一般模型自适应控制^[4],但该方法不能有效地对变化规律未知的时变参数做自适应跟踪,因此不适用于时变非线性系统的自适应控制^[5,6]。

本文对一般模型自适应控制方法做了本质的改进,提出了输入等价干扰(IED)的新概念,把建模误差、非线性时变参数的变化和不可测扰动映射到输

* 国家自然科学基金项目(69774022)和 863 计划项目(863-511-845-001)

1999-05-05 收稿,1999-07-12 修回

入空间,用强跟踪滤波器^[7]对其进行在线估计,并在 GMC 控制算法中加以补偿。实验结果表明,基于输入等价干扰的自适应一般模型控制(A GMC)方法有效地解决了扩展状态不完全能观的问题,并能自适应补偿过程/模型的结构误差,使其朝着实用的方向又迈进了一步。

2 预备知识

2.1 一般模型控制的基本原理^[2]

考虑如下多输入多输出仿射非线性过程

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, d, \theta) + g(x, d, \theta)u(t) \\ y(t) = h(x, \theta) \end{cases} \quad (1)$$

其中,状态变量 $x(t) \in R^n$, 输入 $u(t) \in R^m$, 输出 $y(t) \in R^p$, 干扰 $d \in R^p$, 过程时变参数 $\theta \in R^l$; $f(\cdot)$, $g(\cdot)$, $h(\cdot)$ 分别是自变量 x, d 的非线性函数,并假定它们在 x 空间的某区域 R_0 内关于 x 具有足够高阶连续偏导数,设系统在 x_0 处各输出变量所对应的相对阶均为 1^[9]。

用 $\tilde{f}, \tilde{g}, \tilde{h}$ 分别表示所采用的非理想的近似模型,则 GMC 的解可通过求解如下的最优控制问题 OC₁ 得以解决^[2]。

$$\begin{aligned} (OC_1) \quad & \min_u \int_0^t [a(x, u, d)^T W a(x, u, d)] dt \\ \text{s t} \quad & |u| \leq \alpha \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} a(x, u, d) & \triangleq \dot{y}(t) - (\dot{y})^0(t) = \\ & \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} (\tilde{f}(x, d, \theta) + \tilde{g}(x, d, \theta)u(t)) - \\ & K_1(y^* - y) - K_0 \int_0^t (y^* - y) dt \end{aligned} \quad (2)$$

W 为正定加权阵, α 是控制量的受限值, K_1, K_0 是待定的对角矩阵。

2.2 强跟踪滤波器理论

考虑如下离散时间非线性系统

$$\begin{cases} x(k+1) = f_d(u(k), x(k)) + \Gamma(k)v(k) \\ y(k+1) = h_d(x(k+1)) + e(k+1) \end{cases} \quad (3)$$

其中,非线性函数 $f_d: R^m \times R^n \rightarrow R^n$ 和 $h_d: R^n \rightarrow R^p$ 对 x 有连续偏导数;过程噪声 $v(k) \in R^q$ 和测量噪声 $e(k) \in R^p$ 是均值为零,方差为 $R(k)$ 的高斯白噪声; $\Gamma(k)$ 是已知的适当维数的矩阵; $v(k)$ 和 $e(k)$ 是统计独立的。

对于上述系统,有如下强跟踪滤波器(STF)^[7]

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1|k+1) &= \hat{x}(k+1|k) + \\ & K(k+1)Y(k+1) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\hat{x}(k+1|k) = f(u(k), \hat{x}(k|k)) \quad (5)$$

$$Y(k+1) = y(k+1) - h(\hat{x}(k+1|k)) \quad (6)$$

3 基于输入等价干扰的自适应一般模型控制

3.1 输入等价干扰的概念

对非线性过程(1)进行 Euler 离散化(其他离散化方法同样适用),得到以下仿射形式的离散时间非线性时变参数过程。

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + \Delta t f(x(k), \theta(k), d(k)) + \\ \quad \Delta t g(x(k), \theta(k), d(k))u(k) + \Gamma(k)v(k) \\ y(k+1) = h(x(k+1), \theta(k+1), d(k+1)) + \\ \quad e(k+1) \end{cases} \quad (7)$$

假设该系统是局部能观的,且设噪声模型 $\Gamma(k)$ 已知。

对过程(7)建立如下模型

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + \Delta t \tilde{f}(x(k)) + \\ \quad \Delta t \tilde{g}(x(k))(u(k) + \delta(k)) + \Gamma(k)v(k) \\ y(k+1) = \tilde{h}(x(k+1)) + e(k+1) \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\tilde{f}, \tilde{g}, \tilde{h}$ 是非线性系统的标称模型。模型(8)把时变模型参数 $\theta(k)$ 、不可测扰动 $d(k)$ 以及建模误差对过程(7)的影响都看作模型不确定性,归于输入等价干扰 $\delta(k) \in R^m$ 。对于模型(8),定义扩展状态向量 $x_e(k) = [x^T(k) \quad \delta^T(k)]^T$,并加上状态方程 $\delta(k+1) = \delta(k)$,则将以上模型化为如下近似的等价形式

$$\begin{cases} x_e(k+1) = \\ \quad \tilde{f}_e(x_e(k)) + \tilde{g}_e(x_e(k))u(k) + \Gamma_e(k)v(k) \\ y(k+1) = \tilde{h}_e(x_e(k+1)) + e(k+1) \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{f}_e(x_e(k)) &= \\ & \begin{bmatrix} x(k) + \Delta t(\tilde{f}(x(k)) + \tilde{g}(x(k))\delta(k)) \\ \delta(k) \end{bmatrix} \\ \tilde{g}_e(x_e(k)) &= \begin{bmatrix} \Delta t \tilde{g}(x(k)) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma_e(k) = \begin{bmatrix} \Gamma(k) \\ 0 \end{bmatrix} \\ \tilde{h}_e(x_e(k+1)) &= \tilde{h}(x(k+1)) \end{aligned}$$

定义 1 基于模型(9),应用 STF,估计扩展状态 $x_e(k) = [x^T(k) \quad \delta^T(k)]^T$,使得在 STF 意义下的新息 $Y(k)$ 标准方差最小且两两正交。这时得到的 $\delta(k)$ 称为过程(7)的输入等价干扰。

3.2 利用输入等价干扰实现自适应一般模型控制

由 GMC 公式, 用 STF 的状态观测值 $\hat{x}(k|k)$ 来替代(2) 中的状态 $x(k)$, 利用输入等价干扰 $\delta(k)$ 解优化问题 OC_1 , 在无约束情况下令

$$\begin{aligned}
 a(x_e(k|k), u(k)) = & \frac{\partial \hat{h}}{\partial \hat{x}} [f(\hat{x}(k|k)) + \tilde{g}(\hat{x}(k|k))(u(k) + \\
 & \hat{\delta}(k|k))] - K_1(y^*(k) - y(k)) - \\
 & K_0 \int_0^t (y^*(t) - y(t)) dt = 0 \quad (10)
 \end{aligned}$$

可得 AGMC 解的显式表达式为

$$\begin{aligned}
 u(k) = & \left[\frac{\partial \hat{h}}{\partial \hat{x}} \tilde{g}(\hat{x}(k|k)) \right]^{-1} \left(K_1(y^*(k) - \right. \\
 & y(k)) + K_0 \int_0^t (y^*(t) - y(t)) dt - \\
 & \left. \frac{\partial \hat{h}}{\partial \hat{x}} f(\hat{x}(k|k)) - \hat{\delta}(k|k) \right) \quad (11)
 \end{aligned}$$

3.3 基于输入等价干扰的自适应一般模型控制的结构与性质

本文引入输入等价干扰的概念, 把影响非线性控制效果的所有建模误差、时变参数和不可测干扰等不确定因素都映射到输入空间, 使输入等价干扰能方便地用于 GMC 算法的前馈补偿, 迅速有效地消除各种干扰因素的影响, 大大提高 GMC 算法的适应性。系统框图如图 1 所示。

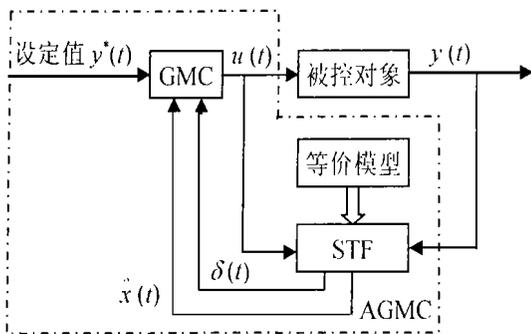


图1 基于输入等价干扰的AGMC框图

基于输入等价干扰的自适应一般模型控制可将普通的 GMC 推广到如下更一般的非线性过程: 具有结构不确定性的过程; 未知的时变参数不可观测的过程; 具有不可测干扰的过程。

4 实验研究

本实验装置为三容水箱 DTS200, 由德国 Amira 自动化公司制造。所有 3 个水箱均安装了差

压变送器来测量液位, 通过控制泵 1 和泵 2 的流量 Q_1 和 Q_2 来控制罐 1 和罐 2 的液位。

为对该水箱系统进行数学建模, 定义以下变量和参数: az_i : 流出系数; h_i : 液位 (m); Q_{ij} : 流量 (m³/s); Q_1, Q_2 : 补给流量 (m³/s); A : 水箱截面积 (m²); S_1 : 泄漏小孔的截面积 (m²); S_n 连接管道的截面积 (m²)。其中, $i = 1, 2, 3, (i, j) \in \{(1, 3), (3, 2), (2, 0)\}$ 。

定义向量

$$\begin{aligned}
 h &= \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix}, \quad A(h) = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} -Q_{13} \\ Q_{32} - Q_{20} \\ Q_{13} - Q_{32} \end{bmatrix} \\
 Q &= \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

定义矩阵

$$B = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中

$$\begin{aligned}
 Q_{13} &= az_1 S_n \operatorname{sgn}(h_1 - h_3) (2g |h_1 - h_3|)^{1/2} \\
 Q_{32} &= az_3 S_n \operatorname{sgn}(h_3 - h_2) (2g |h_3 - h_2|)^{1/2} \\
 Q_{20} &= az_2 S_n (2gh_2)^{1/2}
 \end{aligned}$$

则建立非线性过程模型为:

$$\text{状态方程} \quad dh/dt = A(h) + BQ$$

$$\text{输出方程} \quad y = [h_1 \ h_2]^T$$

由此便完全描述了该过程。装置的参数由表 1 给出。

表1 三容水箱的部分参数

$A = 0.0154 \text{ m}^2$	$S_n = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
$Q_{\max} = Q_{2\max} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$	$H_{\max} = 62 (\pm 1 \text{ cm})$
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$	$az_1 = 0.450289$
$az_2 = 0.611429$	$az_3 = 0.461526$

在 AGMC 控制算法中, 取采样间隔为 $\Delta t = 0.054 \text{ s}$, $K_1 = 0.05I_2$, $K_0 = 0.002I_2$; 在强跟踪滤波器中, 取过程噪声方差阵 $Q(k) = 2 \times 10^{-2} I_3$, 测量噪声方差阵 $R(k) = 1 \times 10^{-2} I_3$, 弱化因子 $\beta = 10$, $\alpha = I_5$, 其中 I_i 是阶次为 i 的单位阵^[7]。

实验 1 三容水箱的负荷扰动

图 2 给出了不可测的负荷扰动发生时 AGMC 和常规 GMC 的实验结果。实验时间均为 500s, 罐 1、罐 2 和罐 3 的初值分别为 $h_1 = 300 \text{ cm}$, $h_2 = 15 \text{ cm}$, $h_3 = 22.8 \text{ m}$, 并已达到稳态。

在时刻 50s, 把罐 1 和罐 2 的设定值分别提高至 35cm 和 20cm; 在时刻 250s, 罐 1、罐 2、罐 3 的输出流

量有负荷扰动;在时刻 375s, 停止 3 个罐的负荷扰动。当 3 个罐有突变的负荷扰动时, 在 AGMC 方法中, 由 STF 观测所得的输入等价干扰很快就有显著的变化, 并由此引起控制信号 Q_1, Q_2 的变化, 液位 h_1, h_2 只有一个很小的扰动变化, 但很快回到设定值。在常规 GMC 方法中, 同样的负荷扰动造成了显著的模型/过程不匹配, 导致罐 1、罐 2 的液位 h_1, h_2 发生明显的变化。同样, 在时刻 375s 负荷恢复正常后, AGMC 的控制性能也优于常规 GMC。

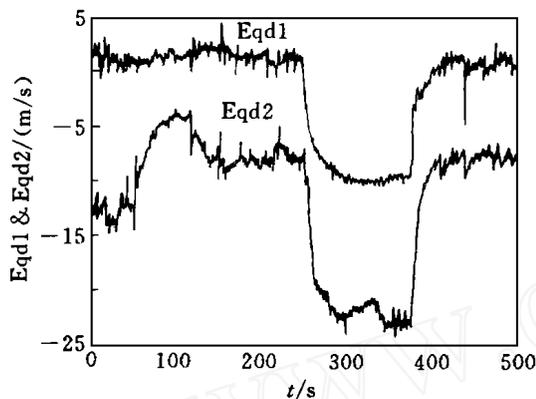


图 2 同时存在负荷扰动时 AGMC 的实验结果

实验 2 执行器增益变化

图 3 给出了执行器增益变化时的 AGMC 和常规 GMC 的实验结果。罐 1、罐 2 和罐 3 的初值分别为 $h_1 = 30\text{cm}$, $h_2 = 15\text{cm}$, $h_3 = 22.8\text{cm}$, 并已达到稳态。在时刻 50s, 把罐 1 和罐 2 的设定值分别提高至 35cm 和 20cm。当罐 1 和罐 2 的液位达到稳定后, 在时刻 250s, 泵 1、泵 2 的执行器增益发生变化, 即由原来的 100% 突减为 50%。可以清楚地看到, 基于同样的机理, 在执行器发生增益衰减时, AGMC 的控制性能也远远优于常规的 GMC。

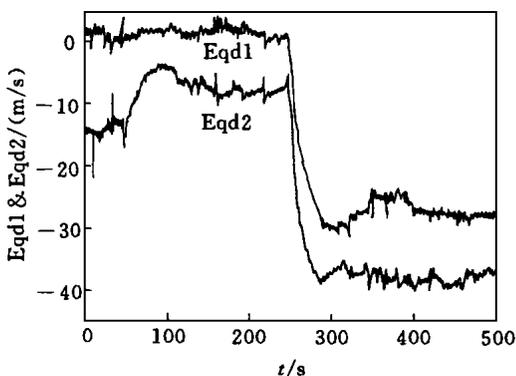


图 3 同时发生增益变化扰动时 AGMC 的实验结果

一般模型控制是一种基于过程模型的非线性控制算法, 对模型参数有一定的依赖性, 尤其是当模型参数发生突变时, 控制性能会大大下降。实验结果表明, 本文提出的基于输入等价干扰的自适应一般模型控制方法 (AGMC), 能有效地克服模型参数的时变或不可测干扰对控制性能的影响, 进一步提高了 GMC 算法的鲁棒性和适应性。对于复杂化工过程的高品质控制, 本文方法具有良好的应用前景。

参考文献

- 1 Lee P L, Sullivan G R. Generic model control (GMC). *Comput Chem Eng*, 1988, 12(6): 573_580
- 2 周东华, 金以慧, 王庆林. 一般模型控制 (GMC): 一种简单实用的非线性过程控制新方法. *信息与控制*, 1998, 27(3): 215—222
- 3 Lee P L, Sullivan G R, Zhou W. Process/model mismatch compensation for model-based controllers. *Chem Eng Comm*, 1989, 80(1): 35_51
- 4 Signal P D, Lee P L. Generic model adaptive control. *Chem End Comm*, 1992, 115(1): 35-52
- 5 Zhou W, Lee P L. An adaptive strategy for constrained generic model control. *Chem End Comm*, 1990, 97(1): 109_134
- 6 Rani K Y, Gangiah K. Adaptive generic model control: Dual composition control of distillation. *AIChE J*, 1991, 37(11): 1634_1644
- 7 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器. *自动化学报*, 1991, 17(6): 689—695
- 8 Zhou D H, Frank P M. Strong tracking filtering of nonlinear time-varying stochastic systems with colored noise: Application to parameter estimation and empirical robustness analysis. *Int J Control*, 1996, 65(2): 295_307
- 9 夏小华, 高为炳. 非线性系统控制及解耦. 北京: 科学出版社, 1993
- 10 陈彭年, 韩正之, 张钟俊. 仿射非线性系统的动态输出反馈镇定. *自动化学报*, 1997, 23(3): 338—344
- 11 周东华, 孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术. 北京: 清华大学出版社, 1994

作者简介

谢晓清 女, 1969 年生。清华大学自动化系博士生。研究方向为非线性过程控制。

周东华 男, 1963 年生。1990 年在上海交通大学获博士学位, 现为清华大学自动化系教授, 博士生导师。研究方向为故障诊断, 容错控制等。

金以慧 见 1998 年第 13 卷第 3 期第 244 页。

5 结 论