文章编号:1671-7848(2007)03-0274-04

一类非线性时滞过程的自适应控制

李雄杰[1,2],周东华[1]
(1. 清华大学 自动化系,北京 100084;2. 浙江工商职业技术学院 机电工程系,浙江 宁波 315012)

摘 要:通过结合非线性过程的一般模型控制(GMC)、强跟踪预测器(STP)和强跟踪滤波器(STF),提出了一类具有输入时滞非线性时变过程的自适应一般模型控制(AGMC)方法。基于强跟踪预测器对未来状态的预测,传统的一般模型控制被扩展到一类具有输入时滞的非线性过程。通过强跟踪滤波器估计非线性过程的时变参数,对 STP 和 GMC 进行在线参数修正。对三容水箱系统 DTS200 进行计算机仿真,仿真结果表明,该自适应控制策略是令人满意的,其状态跟踪能力强,对于模型失配也具有较强的鲁棒性。

关 键 词:自适应控制;时滞;非线性;强跟踪预测器;强跟踪滤波器
中图分类号:TP 273 文献标识码:A

Adaptive Control of a Class of Nonlinear Time-delay Processes

LI Xiong-jie[1,2], *ZHOU Dong-hua*[1]
(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Department of Mechanical & Electrical Engineering, Zhejiang Business Technology Institute, Ningbo 305012, China)

Abstract: Combining the generic model control (GMC), the strong tracking predictor (STP) and the strong tracking filter(STF), an adaptive generic model control (AGMC) approach for a class of nonlinear time-varying processes with input time delay is proposed. Based on the predicted future states from the STP, the conventional generic model control is extended to a class of nonlinear process with input time delay. The time-varying parameters of the nonlinear process are estimated by the STP, which is applied to update the STP and the GMC. The simulations on the three-tank-system DTS200 show that the proposed AGMC scheme has the strong state tracking ability and the robustness against model mismatch.

Key words: adaptive control; time-delay; nonlinear processes; strong tracking predictor; strong tracking filter

1 引 言

近年来,非线性过程的自适应控制引起了广泛关注,广大科技工作者提出了许多控制方法[1,2],如强跟踪滤波器自适应控制,人工神经网络自适应控制等。在过程控制领域,时滞现象几乎无处不在,它使闭环系统的控制性能下降,会引发额外的干扰,甚至破坏闭环控制系统的稳定性。如何将自适应控制拓展到具有时滞的非线性系统,虽然很难,但更具有实际意义。本文以一般模型控制为框架,利用强跟踪预测器对非线性时滞过程未来状态的预测能力,借助于强跟踪滤波器对非线性过程时变参数的估计能力,提出了一类非线性时滞过程的自适应控制策略,仿真研究证实了此方法的有效性。

2 强跟踪预测器与非线性时滞过程的一般模型控制

1)强跟踪预测器 考虑如下具有输入时滞的离散非线性过程:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(k+1) = f(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{u}(k-t)) \\ \boldsymbol{y}(k) = h(\boldsymbol{x}(k)) + \boldsymbol{e}(k) \end{cases} \tag{1}$$

式中,$\tau \in \mathbf{N}$ 为输入时滞;状态向量 $\boldsymbol{x}(k) \in \mathbf{R}^n$;输入 $\boldsymbol{u}(k) \in \mathbf{R}^p$;输出 $\boldsymbol{y}(k) \in \mathbf{R}^m$;并假定非线性函数 f 与 h 为具有足够高阶的关于 $x(k)$ 的连续偏导数;测量噪声 $\boldsymbol{e}(k) \in \mathbf{R}^m$ 为零均值,方差为 $\boldsymbol{R}(k)$ 的独立高斯白噪声。

针对一类离散非线性时滞过程式(1),其 STP 递推算法[3]如下:

$$\hat{\boldsymbol{x}}(k+1) = f(\hat{\boldsymbol{x}}(k|k-1), \boldsymbol{u}(k-\tau)) \tag{2}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}(k+i+1) = f(\hat{\boldsymbol{x}}(k+i), \boldsymbol{u}(k-\tau+i)) \quad i = 1,2,\cdots,\tau \tag{3}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}(k+\tau+1|k) = \hat{\boldsymbol{x}}(k+\tau+1) + \boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}(k)\boldsymbol{\gamma}(k) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\gamma}(k) = \boldsymbol{y}(k) - h(\hat{\boldsymbol{x}}(k|k-1)) \tag{5}$$

式中,增益阵 $\boldsymbol{K}(k)$ 的计算公式由文献[3]给出。

STP 是一种应用于具有输入时滞非线性过程的状态预测器,具有很强的克服模型误差的鲁棒性。

2)非线性时滞过程的一般模型控制 1988 年

收稿日期:2006-06-10;收修定稿日期:2006-06-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60574084)
作者简介:李雄杰(1956-),男,浙江宁波人,副教授,主要从事自适应控制、容错控制等方面的教学与科研工作;周东华(1963-),男,教授,博士生导师。

以来发展起来的 GMC[4]，具有结构简单、鲁棒性强及参数易整定的特点，GMC 已在过程控制领域取得了许多应用成果。

考虑如下具有输入时滞的 MIMO 非线性过程：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = f(\boldsymbol{x}) + g(\boldsymbol{x})\boldsymbol{u}(t-\tau_1) \\ \boldsymbol{y}(t) = h(\boldsymbol{x}) \end{cases} \tag{6}$$

式中，状态变量 $\boldsymbol{x} \in \mathbf{R}^n$；输入 $\boldsymbol{u} \in \mathbf{R}^m$，$\boldsymbol{y} \in \mathbf{R}^m$；$\tau_1$ 为输入时滞；f，g 和 h 为 $\boldsymbol{x}$ 的非线性函数，并且在某区域 R_0 内具有关于 $\boldsymbol{x}$ 的一阶连续偏导数。

过程式(6)也可以由下式描述：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t+\tau_1) = f(\boldsymbol{x}(t+\tau_1)) + g(\boldsymbol{x}(t+\tau_1)\boldsymbol{u}(t) \\ \boldsymbol{y}(t+\tau_1) = h(\boldsymbol{x}(t+\tau_1)) \end{cases} \tag{7}$$

对传统的 GMC 控制律进行修正，得到离散形式的控制律[5]为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u}(k) = {} & [L_g h(\boldsymbol{x}(k+\tau+1))]^{-1} \cdot [\boldsymbol{K}_1(\boldsymbol{y}^*(k+\tau+1) - \\ & \boldsymbol{y}(k+\tau+1)) + \Delta t \cdot \boldsymbol{K}_0 \sum_{j=1}^{k} (\boldsymbol{y}^*(j+\tau+1) - \\ & \boldsymbol{y}(j+\tau+1)) - L_f h(\boldsymbol{x}(k+\tau+1))] \end{aligned} \tag{8}$$

式中，$\tau = \mathrm{int}(\tau_1/\Delta t) - 1$；$\Delta t$ 为采样间隔；$\boldsymbol{y}^*$ 为期望的稳定状态；$\boldsymbol{K}_0$ 和 $\boldsymbol{K}_1$ 是正定的对角矩阵，为预先设定的控制器参数。

利用 STP 的输出值 $\hat{x}(k+\tau+1|k)$ 和 $h(\hat{x}(k+\tau+1|k)$ 对未知的 $\boldsymbol{x}(k+\tau+1)$ 和 $\boldsymbol{y}(k+\tau+1)$ 进行近似，得到实际可用的控制律：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u}(k) = {} & [L_g h(\hat{x}(k+\tau+1|k))]^{-1} \cdot [\boldsymbol{K}_1(\boldsymbol{y}^*(k+\tau+1) - \\ & h(\hat{x}(k+\tau+1|k))) + \Delta t \cdot \boldsymbol{K}_0 \sum_{j=1}^{k} (\boldsymbol{y}^*(j+\tau+ \\ & 1) - h(\hat{x}(j+\tau+1|k))) - L_f h(\hat{x}(k+\tau+1|k))] \end{aligned} \tag{9}$$

以上控制律将传统的 GMC 扩展到具有输入时滞的非线性过程。

3　强跟踪滤波器与时变参数估计

1）强跟踪滤波器　考虑一类如下形式的离散非线性过程：

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(k+1) = f(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{u}(k)) + \boldsymbol{v}(k) \\ \boldsymbol{y}(k+1) = h(\boldsymbol{x}(k+1)) + \boldsymbol{e}(k+1) \end{cases} \tag{10}$$

式中，系统状态 $\boldsymbol{x}(k) \in \mathbf{R}^n$；输入 $\boldsymbol{u}(k) \in \mathbf{R}^p$；输出 $\boldsymbol{y}(k) \in \mathbf{R}^m$；非线性函数 f, h 对 $\boldsymbol{x}(k)$ 有连续的偏导；过程噪声 $\boldsymbol{v}(k) \in \mathbf{R}^n$ 是零均值，方差为 $\boldsymbol{Q}(k)$ 的高斯白噪声；测量噪声 $\boldsymbol{e}(k) \in \mathbf{R}^m$ 是零均值，方差为 $\boldsymbol{R}(k)$ 的高斯白噪声；$\boldsymbol{v}(k)$ 和 $\boldsymbol{e}(k)$ 统计独立。

基于扩展卡尔曼滤波器，通过引入一个次优渐消因子 $\lambda(k+1)$，一种强跟踪滤波器（STF）递推算法[6]如下：

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + \boldsymbol{K}(k+1)\boldsymbol{\gamma}(k+1) \tag{11}$$

$$\boldsymbol{\gamma}(k+1) = \boldsymbol{y}(k+1) - h(\hat{x}(k+1|k)) \tag{12}$$

式中，增益阵 $\boldsymbol{K}(k+1)$ 的计算公式参见文献[6]。

STF 对模型不确定性具有较强的鲁棒性；对过程的缓变或突变状态均有很强的跟踪能力，能有效地实现非线性时变过程的状态与参数联合估计。

2）非线性过程的时变参数估计　考虑如下具有输入时滞的非线性时变过程：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta}) + g(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta}) \cdot \boldsymbol{u}(t-\tau_1) \\ \boldsymbol{y}(t) = h(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta}) \end{cases} \tag{13}$$

式中，$\boldsymbol{\theta} \in \mathbf{R}^l$ 为时变参数；其他变量的定义与过程式(6)中的定义相同。

设采样间隔为 Δt，利用 Euler 离散化方法，过程式(13)可转化为如下离散形式：

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{x}(k) + \Delta t \cdot [f(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{\theta}(k)) + \\ \qquad g(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{\theta}(k)) \cdot \boldsymbol{u}(k-\tau)] \\ \boldsymbol{y}(k+1) = h(\boldsymbol{x}(k+1), \boldsymbol{\theta}(k+1)) \end{cases} \tag{14}$$

式中，$\tau = \mathrm{int}(\tau_1/\Delta t) - 1$。

并假定该过程是局部能观的。

为了同时估计过程时变参数 $\boldsymbol{\theta}(k)$ 及状态变量 $\boldsymbol{x}(k)$，定义扩展向量 $\boldsymbol{x}_e(k) = [\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{\theta}(k)]^{\mathrm{T}}$，且在过程中添加一个状态方程 $\boldsymbol{\theta}(k+1) = \boldsymbol{\theta}(k)$，使得过程式(14)变为如下的等价形式：

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_e(k+1) = f_e(\boldsymbol{x}_e(k)) + g_e(\boldsymbol{x}_e(k)) \cdot \boldsymbol{u}(k-\tau) \\ \boldsymbol{y}(k+1) = h_e(\boldsymbol{x}_e(k+1)) \end{cases} \tag{15}$$

式中，$f_e(\boldsymbol{x}_e(k)) = [\boldsymbol{x}(k) + \Delta t \cdot f(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{\theta}(k)), \boldsymbol{\theta}(k)]^{\mathrm{T}}$；$g_e(\boldsymbol{x}_e(k)) = [\Delta t \cdot g(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{\theta}(k)), 0]^{\mathrm{T}}$；$h_e(\boldsymbol{x}_e(k+1)) = h(\boldsymbol{x}(k+1), \boldsymbol{\theta}(k+1))$。

比较模型式(15)和式(10)可知，STF 能对模型式(15)估计时变参数和状态。这样就可以利用估计出的参数在线修正 STP 和 GMC 方法中的模型。

4　非线性时滞过程的自适应一般模型控制

基于 STP/STF 的 AGMC 能够有效处理具有大迟延的非线性时变过程，其结构如图 1 所示。

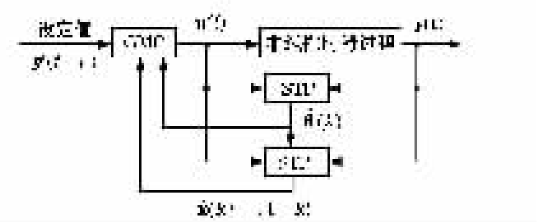


图 1　AGMC 的结构图

Fig.1　Block diagram of AGMC

AGMC 的详细算法如下：

①设采样间隔时间 Δt，利用 Euler 离散化将非线性过程式(13)转化为离散模型式(14)。

②定义扩展状态，将模型式(14)化为等价形式式(15)。

③令 $k=1$，$\boldsymbol{u}(k)=\boldsymbol{u}_0$，$\boldsymbol{x}(k)=\boldsymbol{x}_0$，并为 STP 和 STF 选择合适的初始参数。

④利用 STF，通过模型式(15)可以得到参数估计值$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$。

⑤假设 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+\tau+1)=\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+\tau)=\cdots=\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1)=\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$,使用 STP,通过模型式(14)可得状态预测值 $\hat{\boldsymbol{x}}(k+\tau+1|k)$，参数$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$用其估计值代替。

⑥通过下式计算 AGMC 的显式控制律：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{u}(k)=&[L_g h(\hat{\boldsymbol{x}}(k+\tau+1\mid k),\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+\tau+1))]^{-1}\cdot\\&\{\boldsymbol{K}_1[\boldsymbol{y}^*(k+\tau+1)-h(\hat{\boldsymbol{x}}(k+\tau+1\mid k),\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+\tau+1))]+\\&\Delta t\cdot\boldsymbol{K}_0\sum_{j=1}^{k}[\boldsymbol{y}^*(j+\tau+1)-h(\hat{\boldsymbol{x}}(j+\tau+1\mid k),\hat{\boldsymbol{\theta}}(j+\tau+1))]-L_f h(\hat{\boldsymbol{x}}(k+\tau+1\mid k),\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+\tau+1))\}\end{aligned}\tag{16}$$

⑦ 令 $k+1=k$，转到④。

5 三容水箱仿真研究

仿真模型是由德国 Amira 自动化公司提供的三容水箱实验装置 DTS200，结构图如图 2 所示。

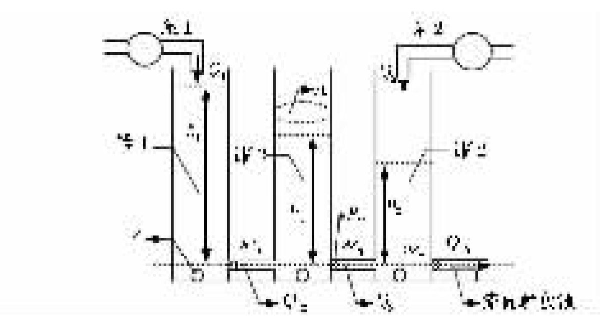


图 2 三容水箱 DTS200 的结构图

Fig.2 Structure of three-tank-system DTS200

它包括 3 个圆柱形的有机玻璃水箱，罐 1 与罐 3 以及罐 2 与罐 3 之间有连接管，中间装有球阀，最右边的罐 2 的水通过管道流向底部的贮水池，而泵 1 和泵 2 又从该贮水池把水打入罐 1 和罐 2。

对该水箱系统进行数学建模，定义图中变量和参数：az_i 为流量系数(0.5),$i=1,2,3$;h_i 为液位(cm)；Q_1，Q_2 为补给流量($\mathrm{cm^3/s}$)；A 为罐的截面积(154 $\mathrm{cm^2}$)；S_1 为泄漏小孔的截面积($\mathrm{cm^2}$)；S_n 为连接管道的截面积(0.5 $\mathrm{cm^2}$)；τ_1 为输入滞后时间(s)。

对罐 1、罐 2 和罐 3 分别建立各自的平衡方程：

$$\begin{cases}A\cdot \mathrm{d}h_1/\mathrm{d}t=Q_1-Q_{13}\\A\cdot \mathrm{d}h_3/\mathrm{d}t=Q_{13}-Q_{32}\\A\cdot \mathrm{d}h_2/\mathrm{d}t=Q_2+Q_{32}-Q_{20}\end{cases}\tag{17}$$

式中，罐间流量 Q_{13}，Q_{32}，Q_{20}用广义的 Torricelli 规则来确定：$Q_{20}=az_2S_n(2gh_2)^{1/2}$;$Q_{13}=az_1S_n\cdot\mathrm{sgn}(h_1-h_3)(2g|h_1-h_3|)^{1/2}$;$Q_{32}=az_3S_n\mathrm{sgn}(h_3-h_2)(2g|h_3-h_2|)^{1/2}$;g 为重力加速度(981 $\mathrm{cm/s^2}$)；sgn (z)为参数 z 的符号。

三容水箱的数学模型为

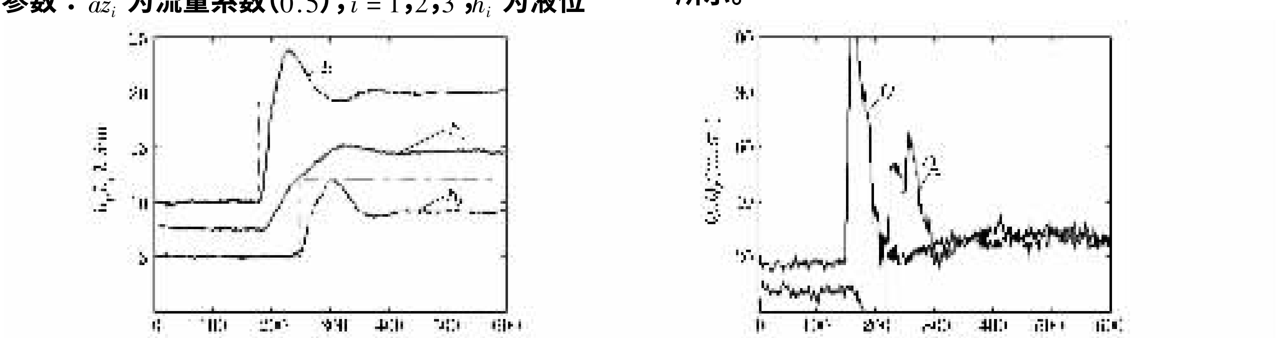
$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t-\tau_1)\\\boldsymbol{y}=(x_1,x_2)^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{18}$$

式中，$\boldsymbol{x}=\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{pmatrix}\overset{\Delta}{=\!=}\begin{pmatrix}h_1\\h_2\\h_3\end{pmatrix}$;$\boldsymbol{u}\overset{\Delta}{=\!=}\begin{pmatrix}Q_1\\Q_2\end{pmatrix}$；

$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})=\dfrac{1}{A}\begin{pmatrix}-Q_{13}\\Q_{32}-Q_{20}\\Q_{13}-Q_{32}\end{pmatrix}$;$\boldsymbol{B}=\dfrac{1}{\boldsymbol{A}}\begin{pmatrix}1&0\\0&1\\0&0\end{pmatrix}$。

在 GMC 算法中,选定 $\boldsymbol{K}_1=0.05\boldsymbol{I}_2$,$\boldsymbol{K}_0=0.002\boldsymbol{I}_2$,采样间隔 $\Delta t=1$ s。而在 STP 中,选择过程噪声方差阵 $\boldsymbol{Q}=1\times10^{-4}\boldsymbol{I}_3$ 测量噪声方差阵设为一标称矩阵为$\boldsymbol{R}(k)=\boldsymbol{R}^0(k)=1\times10^{-2}\boldsymbol{I}_2$。在 STF 中,选择$\boldsymbol{Q}(k)=1\times10^{-2}\boldsymbol{I}_3$，$\boldsymbol{R}(k)=\boldsymbol{R}^0(k)$。仿真过程为 600 s。3 个罐的初始液位值分别是 $h_1=10$ cm，$h_2=5$ cm，$h_3=8$ cm。在 180 s 时刻，将罐 1 的液位设定值由 10 cm 提高到 20 cm，在 250 s 时刻，把罐 2 的液位设定值由 5 cm 提高到 12 cm。而在 250 s 时刻，流量系数 az_2 由 0.6 跳变为 0.8。

无 STF 参数估计的 GMC 方法的仿真结果如图 3 所示。



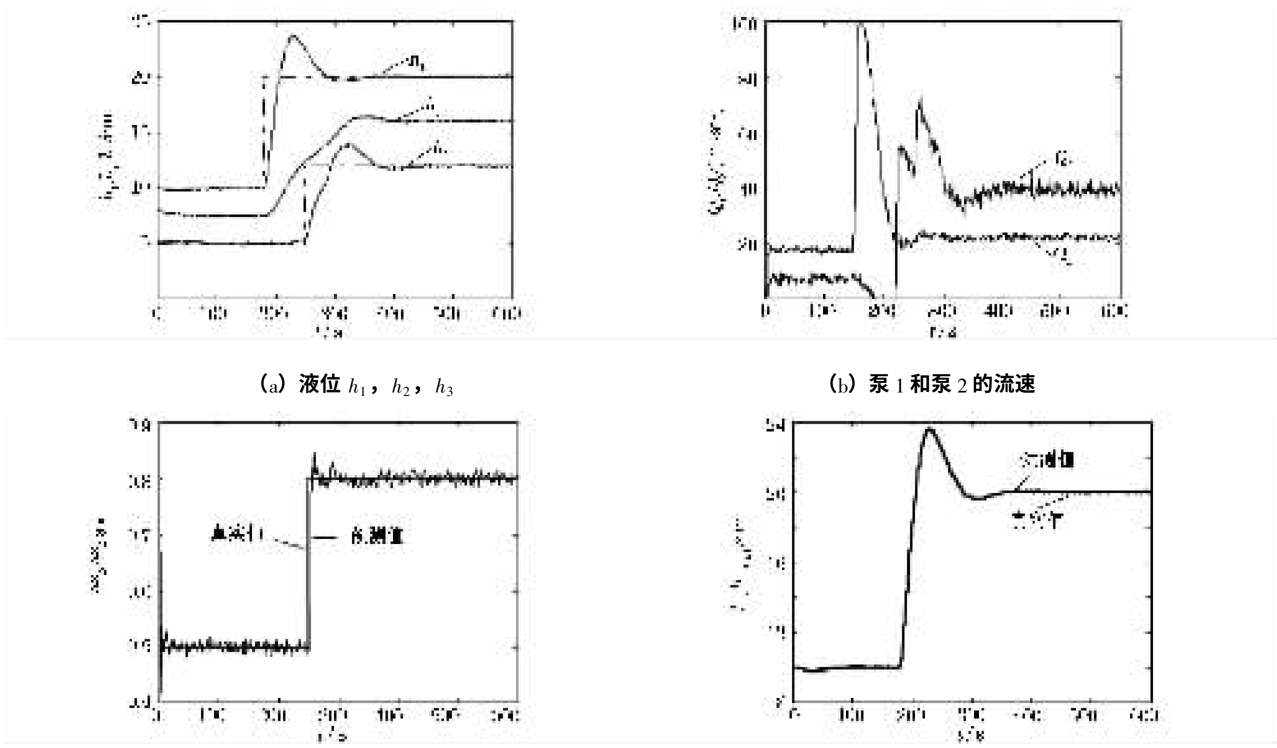
(a) 液位 h_1，h_2，h_3 (b) 泵 1 和泵 2 的流速

图 3 三容水箱系统 GMC 的仿真结果

Fig.3 Simulation results of the GMC for three-tank-system DTS200

由图 3 可知，在 $t=250$ s 之后，液位 h_2 就一直偏离设定值。这是因为当参数 az_2 发生了较大的变化时，而 GMC 没有自适应处理的能力，算法中 GMC 和 STP 的模型参数与真实的过程参数有较大的不匹配，这就导致了输出值与设定值的偏离。

AGMC 的仿真结果如图 4 所示。



(a) 液位 h_1，h_2，h_3　　(b) 泵 1 和泵 2 的流速

(c) 流量系数 az_2 估计值　　(d) 液位 h_1 的真实值及其预测值

图 4　三容水箱系统 AGMC 的仿真结果

Fig.4　Simulation results of the AGMC for three-tank-system DTS200

图4(a)中，实线表示液位的测量值，而点划线表示液位的设定值，此图表明 AGMC 的控制性能相当好。图4(b)给出了输入量(两个泵的流速)的变化，泵 1 和泵 2 流量的突增时刻比液位提高设定时刻提前了 29 s，这正是 STP 的 τ 步预测结果，从而抵消了输入时滞，这表明 STP 适合于大输入时滞的非线性过程控制。图4(c)表明 STF 能够准确和快速地跟踪流量系数 az_2 的变化。在图4(d)中，无论状态变量 h_1 是迅速变化还是缓慢变化，STP 都能够准确地预测过程的未来状态值，对 h_2，h_3 的状态预测也同样准确。

6　结　语

本文将传统的 GMC 扩展到一类具有输入时滞的非线性时变过程，提出了 AGMC 策略。AGMC 以 STP/STF 为基础，由于 STP/STF 都是根据正交性原理，引入一个次优渐消因子来自动调整测预器或滤波器的增益阵，使得 STP/STF 对于非线性过程的状态突变具有很强的跟踪能力，并具有较强的鲁棒性。基于 STP/STF 的优良性能，使得 AGMC 能够处理同时具有大输入时滞和时变参数的非线性过程。

参考文献(References)：

[1] 周东华.非线性系统自适应控制导论[M].北京:清华大学出版社,2002.(Zhou Donghua. Introduction to adaptive control of nonlinear systems[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2002.)

[2] Xie X Q,Zhou D H,Jin Y H. Strong tracking filter based adaptive generic model control[J]. Journal of Process Control,1999,9(4):337-350.

[3] Wang D,Zhou D H,Jin Y H. A strong tracking predictor for nonlinear processes with input time delay[J]. Computers and Chemical Engineering,2004,18(12):2523-2540.

[4] Lee P L,Sullivan G R. Generic model control(GMC)[J]. Computers and Chemical Engineering,1998,12(6):573-580.

[5] Wang D,Zhou D H,Jin Y H,*et al*. Adaptive generic model control for nonlinear time-varying processes with input time delay[J]. Journal of Process Control,2004,14(5):517-531.

[6] Zhou D H,Frank P M. Strong tracting filtering of nonlinear time-varying stochastic systems with colored noise:application to parameter estimation and empirical robustness analysis[J]. International Journal of Control,1996,65(2):295-307.

[7] 王东,臧曙,周东华,等.基于 STP 的非线性系统的控制策略[J].控制工程,2005,12(3):215-217.(Wang Dong,Zang Shu,Zhou Donghua,*et al*. A control method for nonlinear time-delay systems based on a strong tracking predictor[J]. Control Engineering of China,2005,12(3):215-217.)

[8] 黄轶,刘俊清,林春丽,等.一类非线性系统综合自适应模糊滑模控制[J].控制工程,2005,12(S_2):19-22.(Huang Yi,Liu Junqing,Lin Chunli,*et al*. Compositive adaptive fuzzy sliding mode control for a class of nonlinear systems[J]. Control Engineering of China,2005,12(S_2):19-22.)