



基于局部化技术的多模型自适应控制¹⁾

李晓理

王伟

(清华大学自动化系 北京 100084)

(大连理工大学电子与信息工程学院 大连 116023)

摘要 对一类含跳变参数的单输入单输出离散时间被控对象,建立由多固定模型和自适应模型组成的多模型,并通过引入指标切换函数构成多模型自适应极点配置控制器,在保证闭环系统稳定的前提下,改善系统瞬态响应.同时采用局部化(Localization)技术优化多模型模型集,在不损失计算精度的前提下,大大减少了计算量,提高了计算速度.

关键词 多模型,自适应,局部化.

LOCALIZATION BASED MULTI-MODEL ADAPTIVE CONTROL

LI Xiaoli

(Department of Automation, TsingHua University, Beijing 100084)

WANG Wei

(School of Electronics and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Abstract Multiple fixed models and adaptive models are set up to cover the uncertainty of a SISO discrete time system with unknown and jumping parameters, and a multi-model adaptive pole-assignment controller is proposed by using a switching index function. On the premise that closed-loop stability is guaranteed, this kind of multi-model adaptive control (MMAC) can improve the transient response greatly. At the same time, localization method is introduced to reduce the computation burden of multi-model algorithm without loss of accuracy.

Key words Multi-model, adaptive control, localization.

1 引言

传统的自适应控制、鲁棒自适应控制都基于一个时不变、慢时变或含有有界未建模动态的被控对象.但在实际过程控制中,被控对象往往处于一个复杂的操作环境中,一些偶然事件(如系统故障、传感器或执行器故障、外界扰动)将使被控对象的模型发生很大变

1) 国家杰出青年科学基金资助项目(69825106).

化. 常规自适应控制很难适应这种模型的突变, 造成瞬态响应很差. 基于智能控制思想对被控对象建立多个模型覆盖其模型不确定性, 进而基于指标切换函数设计多模型控制器是近年来解决此类问题的一种有效方法. 文[1]在间接自适应控制中, 利用多自适应模型切换解决了估计模型的稳定性问题; 采用同一思想, 文[2]解决了相对阶未知的被控对象的模型参考自适应控制问题; 文[3,4]对含跳变参数的最小相位被控对象, 采用多模型参考自适应控制器, 改善瞬态响应; 文[5]将线性模型与 RBF 神经网络模型相结合解决了一类非线性被控对象的控制问题.

但以上结果多基于连续时间被控对象, 有些稳定性结果很难推广到离散时间被控对象, 另外多模型控制的一个最大的缺点就是模型多计算量大, 限制了其实际应用范围. 本文采用多模型极点配置控制将文[3,4]的结果推广到离散时间被控对象, 且不需要最小相位的假设. 同时采用局部化技术(Localization)优化模型集, 在保证控制精度的同时, 极大地减少了计算量, 提高了计算速度.

2 被控对象描述

考虑由下列 ARMA 模型描述的单输入单输出离散时间被控对象

$$A(t, z^{-1})y(t) = B(t, z^{-1})u(t), \quad (1)$$

$u(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示被控对象的输入和输出, $A(t, z^{-1})$ 和 $B(t, z^{-1})$ 是时间 t 和后移算子 z^{-1} 的多项式, 满足

$$A(t, z^{-1}) = 1 + a_1(t)z^{-1} + \dots + a_n(t)z^{-n},$$

$$B(t, z^{-1}) = b_1(t)z^{-1} + \dots + b_m(t)z^{-m}.$$

以下分析将假设被控对象满足下面两个假设条件.

A1) $a_i(t), i \in \{1, \dots, n\}$ 和 $b_j(t), j \in \{1, \dots, m\}$ 为时间 t 的常值(时不变系统)或分段常值函数(含跳变参数的时变系统), m, n 已知.

A2) t 变化时, $A(t, z^{-1})$ 和 $B(t, z^{-1})$ 参数未知但满足参数向量

$$\theta(t) = [a_1(t), \dots, a_n(t); b_1(t), \dots, b_m(t)]^T$$

在一紧集 Ω 中变化, 且满足 $A(t, z^{-1}), B(t, z^{-1})$ 互质.

被控对象(1)可以被描述成如下形式 L

$$y(t) = \phi^T(t-1)\theta(t), \quad (2)$$

$$\phi^T(t-1) = [-y(t-1), -y(t-2), \dots, -y(t-n), u(t-1), \dots, u(t-m)].$$

(2)式将用于构成自适应极点配置控制器.

3 自适应极点配置控制

采用如下有约束投影算法^[6]在紧集 Ω 中估计被控对象(2)模型参数, 有

$$\hat{\theta}(t) = \text{proj} \left\{ \hat{\theta}(t-1) + \frac{a\phi(t-1)}{c + \phi^T(t-1)\phi(t-1)} [y(t) - \phi^T(t-1)\hat{\theta}(t-1)] \right\}, \quad (3)$$

$$\hat{\theta}(t) = [\hat{a}_1(t), \dots, \hat{a}_n(t), \hat{b}_1(t), \dots, \hat{b}_m(t)]^T,$$

$\text{proj}\{\cdot\}$ 是一个投影算子, 将 $\hat{\theta}(t)$ 约束在紧集 Ω 中. 令

$$\begin{aligned}\hat{A}(t, z^{-1}) &= 1 + \hat{a}_1(t)z^{-1} + \cdots + \hat{a}_n(t)z^{-n}, \\ \hat{B}(t, z^{-1}) &= \hat{b}_1(t)z^{-1} + \hat{b}_2(t)z^{-2} + \cdots + \hat{b}_m(t)z^{-m},\end{aligned}$$

则有自适应极点配置控制器满足

$$\hat{H}(t, z^{-1})u(t) = \hat{E}(t, z^{-1})y_r(t) - \hat{G}(t, z^{-1})y(t), \quad (4a)$$

$$\hat{A}(t, z^{-1})\hat{H}(t, z^{-1}) + \hat{B}(t, z^{-1})\hat{G}(t, z^{-1}) = T(z^{-1}), \quad (4b)$$

$$\hat{E}(t, z^{-1}) = \hat{G}(t, z^{-1}), \quad \hat{H}(t, 1) = 0, \quad (4c)$$

$$\text{deg}\hat{H} = m, \quad \text{deg}\hat{G} = n, \quad (4d)$$

$T(z^{-1})$ 为稳定多项式, 即 $T(z^{-1})$ 满足 $T(z^{-1}) \neq 0, |z| \geq 1$; $y_r(t)$ 为输出设定值序列.

4 多模型自适应控制(MMAC)

为改善常规自适应控制瞬态响应, 对被控对象建立多模型, 覆盖其参数不确定性, 并基于指标切换函数选择最优模型, 将基于此模型的控制器切换为当前控制器. 然而, 多模型控制往往由于模型过多造成计算量很大, 模型太少, 又失去多模型的意义, 不能保证控制精度和控制器对参数变化的敏感性. 为此, 本文采用局部化技术^[7]建立最优模型集, 在保证控制精度的同时, 大大减少计算量.

将参数集合 Ω 分割成有限个子集合 $\Omega_i, i \in \{1, 2, \dots, d\}$ 且满足

1) $\Omega_i \subset \Omega, \Omega_i \neq \{\}, i = 1, \dots, d$;

2) $\bigcup_{i=1}^d \Omega_i = \Omega$;

3) 对于每一个 $\Omega_i, i = \{1, \dots, d\}$, 令 θ_i 和 $r_i \geq 0$ 代表圆心和半径, 即满足 $\theta_i \in \Omega_i$, 并且对于所有 $\theta \in \Omega_i$ 有 $\|\theta - \theta_i\| \leq r_i$.

由此如式(2)对被控对象(1)建立多固定模型, 其模型参数为

$$\theta_i = [a_{i,1}, \dots, a_{i,n}, b_{i,1}, \dots, b_{i,m}]^T, i \in \{1, 2, \dots, d\}.$$

为保证自适应控制的稳定性, 如常规自适应控制算法, 建立如(3)的自适应模型 $\hat{\theta}_1(t)$, 为加速参数收敛, 添加另一自适应模型 $\hat{\theta}_2(t)$, 其辨识参数初值将动态调整为最接近被控对象的模型参数(在下面的控制器设计中将看到). 令

$$\theta_{A_i} = \hat{\theta}_i(t-1) = [\hat{a}_{i,1}(t-1), \dots, \hat{a}_{i,n}(t-1), \hat{b}_{i,1}(t-1), \dots, \hat{b}_{i,m}(t-1)]^T, i \in \{1, 2\},$$

则由多固定模型和自适应模型构成了被控对象(1)的多模型集, 模型输出为

$$y_i(t) = \phi^T(t-1)\theta_i, \quad i \in \{1, \dots, d, A_1, A_2\}.$$

为建立多模型自适应控制器, 需给出如下两个定义

定义 1. 输出误差

$$e_i(t) = \left| \frac{y_i(t) - y(t)}{[c + \phi^T(t-1)\phi(t-1)]^{1/2}} \right|, \quad i \in \{1, 2, \dots, d, A_1, A_2\}. \quad (5)$$

定义 2. 切换指标函数

$$J_i(t_2, t_1) = \alpha e_i(t_2) + \sum_{k=t_1}^{t_2-1} \beta^{t_2-k} e_i(k), \quad i \in \{1, 2, \dots, d, A_1, A_2\}, \quad (6)$$

其中 α, β 为正数, 且满足 $\beta < 1$.

由定义 2 及局部化技术构成离散时间系统多模型自适应控制器.

4.1 时不变系统 MMAC

1) $t=t_0$, 令

$$I(t_0) = I_0 = \{1, 2, \dots, d\}, \quad (7)$$

2) $t > t_0$, 计算

$$\hat{I}(t) = \{j \mid \text{满足 } |y_j(t) - y(t)| \leq r_j \|\phi(t-1)\|, j \in I(t-1)\}, \quad (8)$$

$$I(t) = \hat{I}(t) \cap I(t-1), \quad (9)$$

$$i(t) = \arg \min_{l \in \{I(t), A_1, A_2\}} J_l(t, t_0), \quad (10)$$

3) 令

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}_{i(t)}, \quad (11)$$

如式(4)构成自适应极点配置控制器. 同时令

$$\hat{\theta}_2(t) = \hat{\theta}_{i(t)}, \quad (12)$$

作为第二个自适应模型下一次参数辨识的初值.

在下面的稳定性证明中, 可知此控制器可以保证时不变系统闭环稳定. 4.1 经过改进可用于含跳变参数被控对象.

4.2 含跳变参数系统 MMAC

1) $t=t_0$ 时刻, 令

$$I(t) = I_0 = \{1, 2, \dots, d\}, \quad (13)$$

2) $t > t_0$, 计算

$$\hat{I}(t) = \{j \mid \text{满足 } |y_j(t) - y(t)| \leq r_j \|\phi(t-1)\|, j \in I(t-1)\}, \quad (14)$$

$$I(t) = \begin{cases} \hat{I}(t) \cap I(t-1) & \text{if } \hat{I}(t) \cap I(t-1) \neq \{\} \\ I_0 & \text{else} \end{cases}, \quad (15)$$

$$i(t) = \arg \min_{l \in \{I(t), A_1, A_2\}} J_l(t, t_k), t_k \text{ 为满足 } t_k \leq t, I(t_k) = I_0 \text{ 的最大正数}. \quad (16)$$

3) 同时不变系统 MMAC 步骤 3).

5 稳定性分析

引理 1. 对时不变系统辨识算法(3)有如下性质^[6]:

$$1) \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{|e(t)|}{[c + \phi(t-1)^T \phi(t-1)]^{1/2}} = 0, \quad |e(t)| = |y(t) - \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t-1)|;$$

$$2) \lim_{t \rightarrow \infty} \|\hat{\theta}(t) - \hat{\theta}(t-k)\| = 0, \forall k \text{ 为一有限数};$$

$$3) \|\hat{\theta}(t) - \theta_0\| \leq \|\hat{\theta}(t-1) - \theta_0\| \leq \|\hat{\theta}(0) - \theta_0\|, t \geq 1.$$

定理 1. 时不变系统 MMAC 作用于参数未知的时不变被控对象(1)时, 多模型切换将在进行有限次切换后停止在自适应模型上, 同时被控对象输入输出满足:

1) $u(t), y(t)$ 有界;

$$2) \lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_r(t)] = 0.$$

证明. 由定义 1, 2 及引理 1 之 1) 可知

$$\lim_{t \rightarrow \infty} J_{A_1}(t) = 0;$$

由(10)~(12)可知多模型切换最终将稳定在自适应模型上,所以最终当前控制器将为一个常规自适应控制器.由文[6]知自适应极点配置算法(4)作用于时不变被控对象,有

$$u(t), y(t) \text{ 有界,}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_r(t)] = 0. \quad \text{证毕}$$

由定理 1 知,MMAC 作用于时不变被控对象,保留了常规自适应控制稳态时控制效果,可以保证被控对象输入、输出有界,输出最终渐近跟踪输出设定值.但常规自适应控制当辨识器初值距离真值较远时,瞬态响应很差.MMAC 由于多固定模型及在线变换初值自适应模型的存在,式(5),(6),(10)~(12)保证了辨识参数很快向真值收敛(引理 1 之 2),3)),迅速改善瞬态响应.当被控对象发生参数跳变后,常规自适应辨识器辨识初值将距离真值很远,由于被控对象在两次参数跳变之间为一个时不变系统,由定理 1 知当两次相邻跳变间隔足够长时,MMAC 将保证闭环系统输入输出有界,且改善瞬态响应.

推论 1.含跳变参数系统 MMAC 作用于被控对象(1),当被控对象参数发生跳变且相邻两次跳变间隔足够长时,被控对象输出将在发生很小震荡后,迅速渐近跟踪输出设定值,同时保证输入输出有界.

6 仿真结果

考虑如下含跳变参数时变线性系统

$$(1 + a_1(t)z^{-1} + a_2(t)z^{-2})y(t) = z^{-1}(b_1(t) + b_2(t)z^{-1})u(t), \quad (17)$$

其中

$$a_1(t) = \begin{cases} -1, & 0 \leq t \leq 49, \\ -2, & 50 \leq t \leq 99, \\ -4, & 100 \leq t \leq 149, \\ -6.7, & 150 \leq t \leq 200, \end{cases} \quad a_2(t) = 0.5,$$

$$b_1(t) = 2.5, b_2(t) = \begin{cases} 2, & 0 \leq t \leq 49, \\ 2.3, & 50 \leq t \leq 99, \\ 2.6, & 100 \leq t \leq 149, \\ 3, & 150 \leq t \leq 200. \end{cases}$$

采用不同控制器,使被控对象(17)输出跟踪设定值 $y_r = 1$,采样时间取 $T = 1$.使用 Pentium MMX 233MHz, 32M 内存计算机, MATLAB 仿真软件,仿真结果如图 1~3 所示,图 1 为常规自适应控制结果,可以看出当参数发生跳变时,输出瞬态响应很差,输出幅值将近 200,其仿真时间为 0.87s;图 2 为未使用局部化技术的 MMAC,被控对象输出,其中 $\alpha = 1, \beta = 0.5$,共使用了 186 个固定模型,2 个自适应模型,仿真时间为 10.82s;图 3 为采用基于局部化技术的 MMAC,被控对象输出,其中 $\alpha = 1, \beta = 0.96$,对被控对象建立了 186 个固定模型,2 个自适应模型,仿真时间为 2.42s.对比图(1~3)可以看出采用局部化技术的 MMAC 要远远好于常规自适应控制,且对比未采用局部化技术的 MMAC 在保证精度的同时将计算时间缩短了将近 4.5 倍.同时可以看出当 $t \geq 100$ 时,被控对象(17)

已经为一非最小相位系统,仍能获得较好的控制效果.

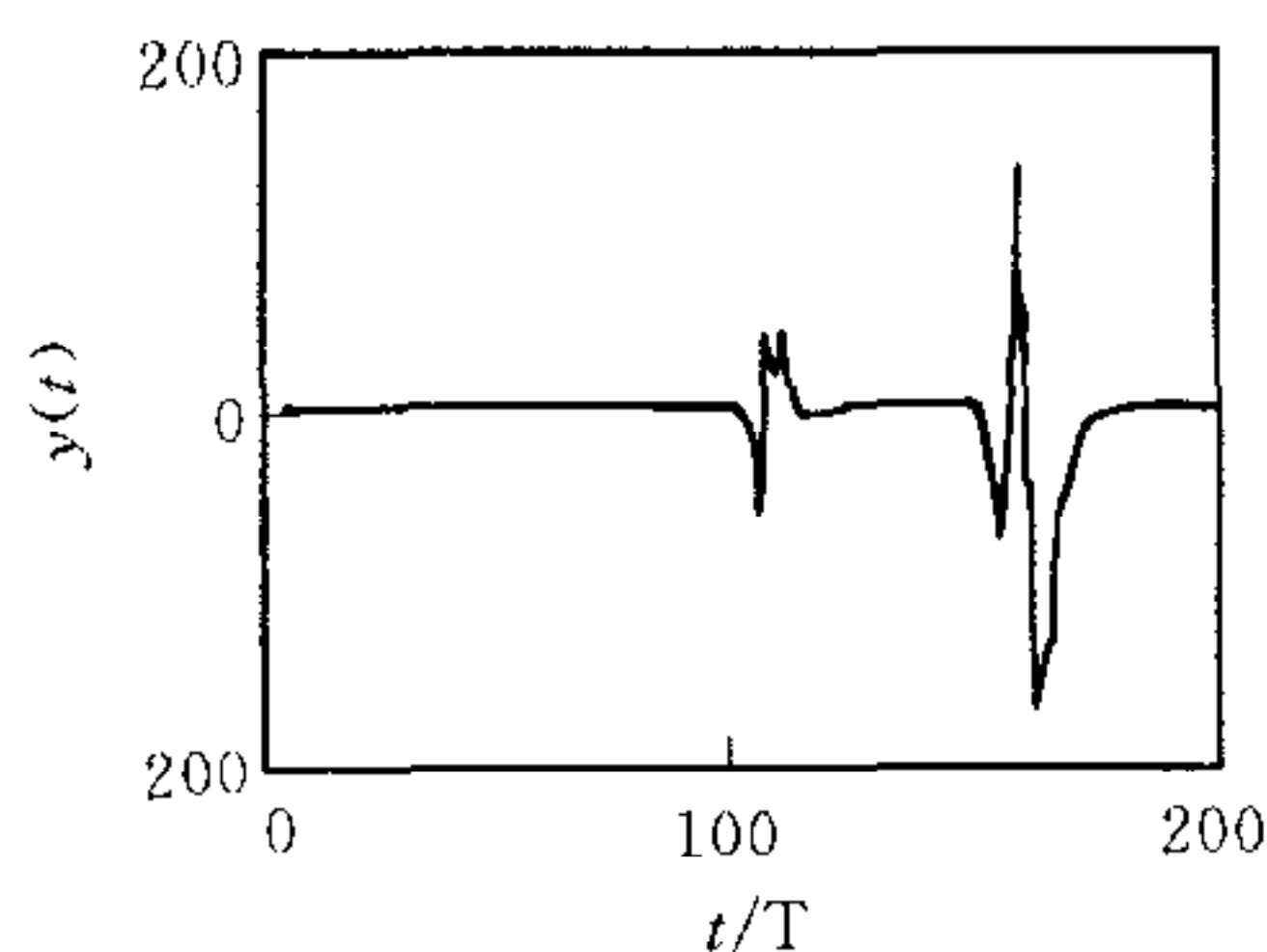


图 1 常规自适应控制

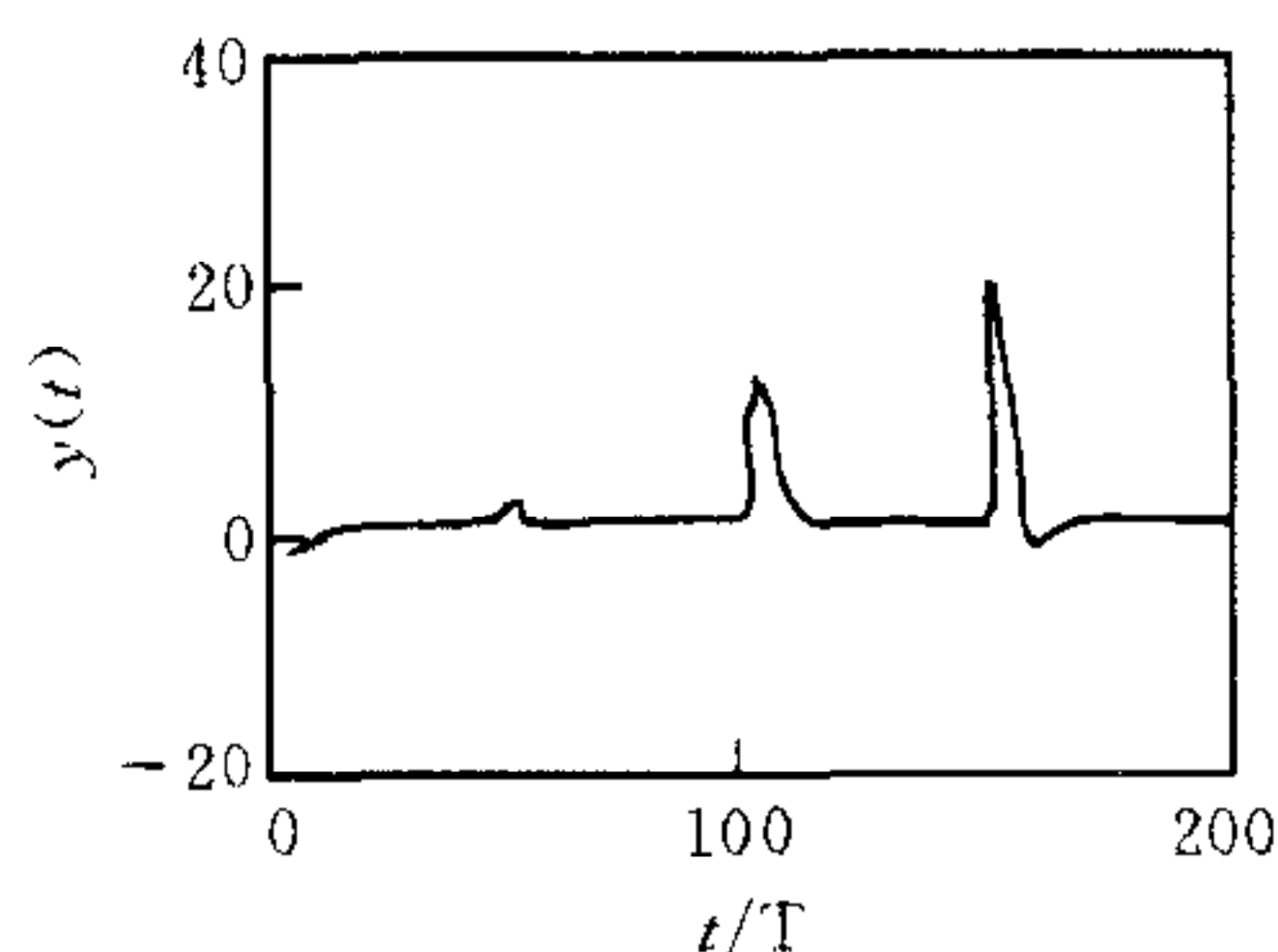


图 2 未采用局部化技术的 MMAC

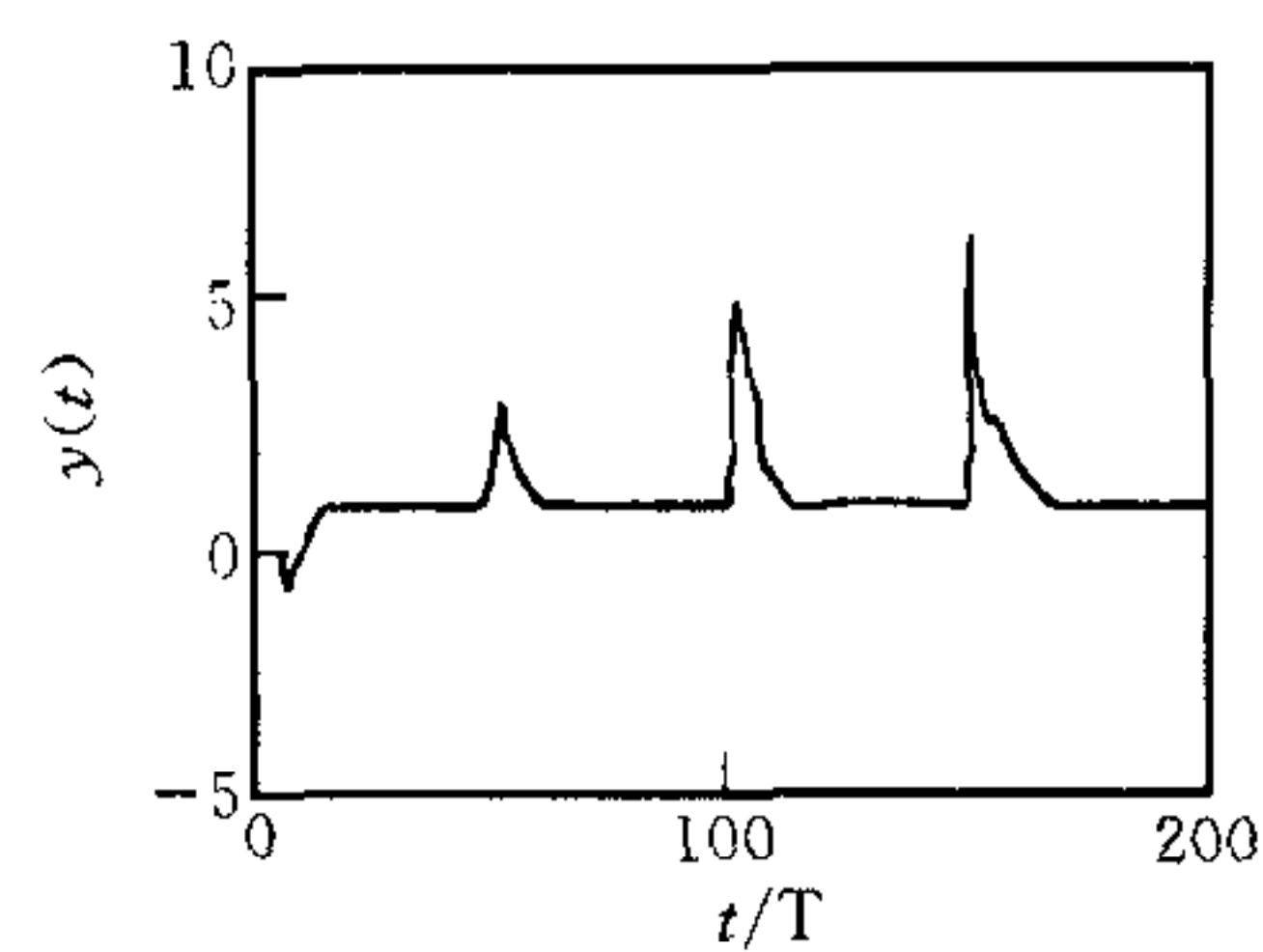


图 3 基于局部化技术的 MMAC

7 结论

本文采用多模型极点配置控制,将文[3,4]的 MMAC 推广到离散时间被控对象,且不再需要最小相位的假设,极大地改善了含有跳变参数的线性离散时间系统的瞬态响应.同时将局部化技术引进多模型自适应控制,减少了计算量,提高了多模型自适应控制的计算速度.若采用带有死区的辨识算法,本文的结果可以推广到含有界扰动、未建模动态的被控对象,当模型阶次未知时,也可对不同模型阶次建立多模型,进而实现多模型自适应控制.

致谢 本文作者对澳大利亚 Newcastle 大学 G. C. Goodwin 教授在文献资料方面提供的帮助表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Middleton R H, Goodwin G C, Hilland D J, Mayne D Q. Design issues in adaptive control. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1988, AC-40(1): 50~58
- 2 Morse A S, Mayse D Q, Goodwin G C. Application of hysteresis switching in parameter adaptive control. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1992, AC-40(9): 1273~1274
- 3 Narendra K S, Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1997, AC-42(2): 141~157
- 4 Narendra K S, Balakrishnan J. Improving transient response of adaptive control systems using multiple models and switching. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1994, AC-40(9): 1561~1586
- 5 Li Xiaoli, Wang Wei. Minimum variance based multi-model adaptive control. In: Proc. 14th world congress of IFAC, Beijing, 1999, Vol I: 325~329
- 6 Goodwin G C, Sin K S. *Filtering Prediction and Control*. USA: Prentice-Hall Inc, 1984
- 7 Zhivoglyadov P, Middleton R H, Fu M. Localization based switching adaptive control for time-varying discrete-time system. In: Proc. 36th IEEE Conf. Decision and Control, San Diego, 1997, 4151~4156

李晓理 1971年生,1994年毕业于大连理工大学,1997年3月于大连理工大学获硕士学位.现为清华大学自动化系博士后.主要研究方向为多模型自适应控制、广义预测控制等.

王伟 1955年生,1988年获东北大学工学博士学位,1990年至1992年在挪威科技大学从事博士后研究,现为大连理工大学教授,博士生导师.主要研究方向为自适应控制,广义预测控制,计算机控制及其应用.