

自适应预测函数控制¹⁾

潘红华 苏宏业 褚健

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室、先进控制技术研究所·杭州, 310027)

摘要 本文提出了一种基于 CARMA 模型的自适应预测函数控制方法, 通过实时辨识过程模型的参数来不断修正预测函数控制器参数. 通过仿真表明自适应预测函数控制方法对于模型参数时变的过程具有较好的控制效果, 是一种计算简单、鲁棒性较强、控制精度高的控制方法.

关键词 预测控制, 预测函数控制, 自适应, 自适应预测函数控制

1 引言

自七十年代末以来, 预测控制受到了理论界和工业控制界的广泛关注并取得了显著成果. 各种预测控制算法不断完善和发展并在越来越多的领域得到大量成功的应用. 预测控制理论的发展使得许多工业控制问题得到解决, 而新的实际应用中较难解决的难题又反过来促进了预测控制理论的进一步发展. 预测函数控制 (Predictive Functional Control, 简称 PFC) 就是应快速过程控制的需要、基于预测控制原理发展起来的一种新的预测控制技术. 该控制方法的特点是算法简单、计算量小、跟踪快速和精度高等. 预测函数控制方法已经在机器人、化工间歇反应过程、轧钢以及军事等许多领域得到成功应用, 并带来了巨大的经济效益^[1, 2, 3, 4, 8].

虽然预测¹⁾函数控制方法对模型失配及外部有界扰动等具有较强的鲁棒性, 但由于该方法依赖于过程内模来预测过程未来的输出, 因此在存在未建模动态及未知有界扰动的情况下会影响闭环响应速度、控制精度等控制性能. 而自适应控制方法正是一种适用于具有一定不确定性、未建模动态、参数慢时变等的过程、以辨识模型发展起来的控制方法. 本文把自适应控制方法与预测函数控制方法结合起来, 通过实时辨识过程模型参数, 并用得到的参数实时修正预测函数控制器参数, 这样可以进一步提高预测函数控制方法的控制品质, 扩大其适用范围. 通过仿真研究表明, 这种自适应预测函数控制方法对于模型参数慢时变的过程具有较好的控制效果.

2 自适应预测函数控制方法

¹⁾ 国家自然科学基金(69974035)资助项目

2.1 预测函数控制方法

预测函数控制基于预测控制原理发展起来, 具有一般预测控制的三大特点: 模型预测、滚动优化、反馈校正, 而它与其他预测控制算法的最大区别是注重控制量的结构形式, 认为控制量与一组相应于过程特性和跟踪设定值的函数有关. 因此每一时刻计算的控制量等于一组事先选定的函数线性组合而成, 这些函数称为基函数. 用这些基函数的已知过程响应, 通过对目标函数进行优化计算得到各基函数的权系数而求出相应的控制量.

被控对象的数学模型采用下列离散差分方程(CARMA 模型)描述:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1) + \frac{C(z^{-1})\omega(t)}{\Delta} \quad (1)$$

其中 $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 分别表示算子 z^{-1} 的多项式:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_{N_a} z^{-N_a}, B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_{N_b} z^{-N_b},$$

$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \cdots + c_{N_c} z^{-N_c}$; $y(t)$ 和 $u(t)$ 表示被控对象的输出和输入; $\omega(t)$ 表示随机扰动; $\Delta = 1 - z^{-1}$ 为差分算子; 假设输出相对输入时滞为 $r = 1$, 若 $r > 1$ 则可令 $B(z^{-1})$ 的前 $r - 1$ 项系数为零.

基函数的选择与过程的特性和设定值有关, 通常可取为阶跃, 斜坡, 抛物线等函数:

$$u(t+i) = \vec{\varphi}_i \cdot \vec{\mu} \quad (2)$$

其中 $u(t+i)$ 为在 $t+i$ 时刻的控制量; $\vec{\varphi}_i = [\varphi_i(1) \cdots \varphi_i(N)]$ 为第 i 个采样周期时基函数的取值; N 为基函数的个数; $\vec{\mu} = [\mu_1 \cdots \mu_N]^T$ 为权系数, 需优化计算.

为防止出现控制量剧烈变化和超调等现象, 需引入一条在预测时域内的指数曲线作为参考轨迹: $y_{ref}(t+i) = y_r(t+i) - \alpha^i (y_r(t) - y_p(t))$ (3)

其中: $y_{ref}(t+i)$ 为 $t+i$ 时刻的参考轨迹值; $y_r(t+i)$ 为 $t+i$ 时刻的跟踪设定值;

$y_p(t)$ 为 t 时刻的被控对象输出实际测量值; $\alpha = e^{-\frac{T}{T_r/3}}$, $0 < \alpha < 1$, T : 采样周期; T_r : 期望的闭环响应时间.

为了求得 $t+i$ 时刻的过程输出值 $y(t+i)$, 用以下的 Diophantine 方程:

$$E_i(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-i}F_i(z^{-1}) = 1 \quad (4)$$

$$E_i(z^{-1})B(z^{-1}) = G_i(z^{-1}) + z^{-i}H_i(z^{-1}) \quad (5)$$

其中: $E_i(z^{-1}) = e_0 + e_1 z^{-1} + \cdots + e_{i-1} z^{-i+1}$; $F_i(z^{-1}) = f_0^i + f_1^i z^{-1} + \cdots + f_{N_a}^i z^{-N_a}$

$$G_i(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \cdots + g_{i-1} z^{-i+1}; H_i(z^{-1}) = h_0^i + h_1^i z^{-1} + \cdots + h_{N_b-1}^i z^{-N_b+1}$$

将(1)式两边同乘以 $E_i(z^{-1})\Delta$, 并用(4)(5)式及(2)式代入可得:

$$y(t+i) = F_i(z^{-1})y(t) + G_i(z^{-1})[\vec{\varphi}_{i-1} - \vec{\varphi}_{i-2}] \vec{\mu} + H_i(z^{-1})\Delta u(t-1) + E_i(z^{-1})C(z^{-1})\omega(t+i) \quad (6)$$

预测函数控制在选定的预测时域 $(0, T_r]$ 内取若干个离散点称为重合点, 优化目标函数是使得在这些重合点上预测过程输出与参考轨迹值差值的平方和最小, 这样可实现计算量小、快速跟踪的目的. 假设重合点个数为 S , 每个点的取值分别为 p_1, \dots, p_S ,

$$\text{则目标函数为: } J = \min \left\{ \sum_{j=1}^S [y(t+p_j) - y_{\text{ref}}(t+p_j)]^2 + \lambda \cdot u^2(t) \right\}$$

其中 λ 为权系数; 为使优化目标函数有解, 重合点的个数应大于等于基函数的个数.

把(3)(6)式代入目标函数, 优化计算可得到 t 时刻控制量的线性计算方程:

$$\begin{aligned} u(t) = & \vec{\varphi}_0 M \sum_{j=1}^S Q_j F_{p_j}(z^{-1}) y(t) + \vec{\varphi}_0 M \sum_{j=1}^S Q_j H_{p_j}(z^{-1}) \Delta u(t-1) \\ & + \vec{\varphi}_0 M \sum_{j=1}^S Q_j y_r(t+p_j) + \vec{\varphi}_0 M \sum_{j=1}^S Q_j \alpha^{p_j} [y_r(t) - y_p(t)] \\ & - \vec{\varphi}_0 M \sum_{j=1}^S Q_j E_{p_j}(z^{-1}) C(z^{-1}) \omega(t+p_j) \end{aligned} \quad (7)$$

其中:

$$M = - \left[\sum_{j=1}^S [G_{p_j}^T(z) (\vec{\varphi}_{p_j-1} - \vec{\varphi}_{p_j-2})^T G_{p_j}(z^{-1}) (\vec{\varphi}_{p_j-1} - \vec{\varphi}_{p_j-2})] + \lambda \vec{\varphi}_0^T \cdot \vec{\varphi}_0 \right]^{-1}$$

$$Q_j = G_{p_j}^T(z) (\vec{\varphi}_{p_j-1} - \vec{\varphi}_{p_j-2})^T$$

2.2 自适应预测函数控制方法

2.1 节中的(7)式是在被控对象模型参数已知的情况下得到的, 而在实际情况下是不可能得到准确的过程模型的, 因此当被控对象模型参数未知或渐时变时, 必须采用自适应的方法实时不断辨识过程模型参数, 以在线修正预测函数控制律(7)式的参数. 考虑慢时变参数, 采用渐消记忆递推最小二乘估计法^[7].

将(1)式化为最小二乘结构: $y(t) = \psi^T(t)\theta + \omega(t)$

其中: $\psi^T(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-N_a), u(t), \dots, u(t-N_b), \omega(t), \dots, \omega(t-N_c)]$

$$\theta = [a_1, \dots, a_{N_a}, b_0, \dots, b_{N_b}, 1, c_1, \dots, c_{N_c}]^T$$

由于 $\omega(t)$ 不可测, 用其估计 $\hat{\omega}(t)$ 代替, 即: $\hat{\omega}(t) = y(t) - \hat{y}(t) = y(t) - \hat{\psi}^T(t)\hat{\theta}$

其中: $\hat{\psi}^T(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-N_a), u(t), \dots, u(t-N_b), \hat{\omega}(t), \dots, \hat{\omega}(t-N_c)]$

$$\hat{\theta} = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{N_a}, \hat{b}_0, \dots, \hat{b}_{N_b}, 1, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_{N_c}]^T$$

我们可以得到渐消记忆递推最小二乘算法, 即:

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + K(t+1) \left[y(t+1) - \hat{\psi}^T(t+1)\hat{\theta}(t) \right] \quad (8)$$

$$K(t+1) = \frac{P(t)\hat{\psi}(t+1)}{\rho + \hat{\psi}^T(t+1)P(t)\hat{\psi}(t+1)} \tag{9}$$

$$P(t+1) = \frac{1}{\rho} \left[I - K(t+1)\hat{\psi}^T(t+1) \right] P(t) \tag{10}$$

其中： ρ 为遗忘因子，一般取 $0.95 \leq \rho \leq 0.99$ ；

$$P(t) = [\phi_t^T W_t \phi_t]^{-1}; \quad \phi = [\hat{\psi}(1) \quad \dots \quad \hat{\psi}(t)]^T; \quad W_t = \begin{bmatrix} \rho^{t-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \rho & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3 仿真

我们采用文献[6]上的例子通过与其它控制方法的比较来检验本文的方法。被控对象的模型随时间不断变化，分别取 5 个不同的传递函数组成：1~ 79 时 $\frac{1}{1+10s+40s^2}$ ；80~159 时 $\frac{e^{-2.7s}}{1+10s+40s^2}$ ；160~239 时， $\frac{e^{-2.7s}}{1+10s}$ ；240~319 时 $\frac{1}{1+10s}$ ；320~400 时 $\frac{1}{10s(1+25s)}$ 。采样周期为 1 秒，仿真时间 400 秒，每 80 秒被控对象的模型发生变化。跟踪设定值分别为幅值 0、0.2 和 0.5 的周期方波，控制量输入的幅值具有约束 ± 1 。由于跟踪设定值为阶跃信号，因此仿真时取基函数阶数为 1，重合点为 10 秒，期望响应时间 12 秒。在开始 10 个采样周期内，控制量取 0.1，以利于辨识参数。 $A(z^{-1})$ 和 $B(Z^{-1})$ 的阶次分别取 2 和 6，假设无外部干扰。

我们用传统 PID 方法与本文方法进行比较。用固定 PID 控制方法是调整好第一个传递函数时的参数，以后模型发生变化时由于 PID 参数不能适应于不同的模型，因此控制效果较差，见图 1。而采用自适应预测控制方法的控制效果见图 2，该方法对不同的过程传递函数模型都取得了较理想的控制结果。

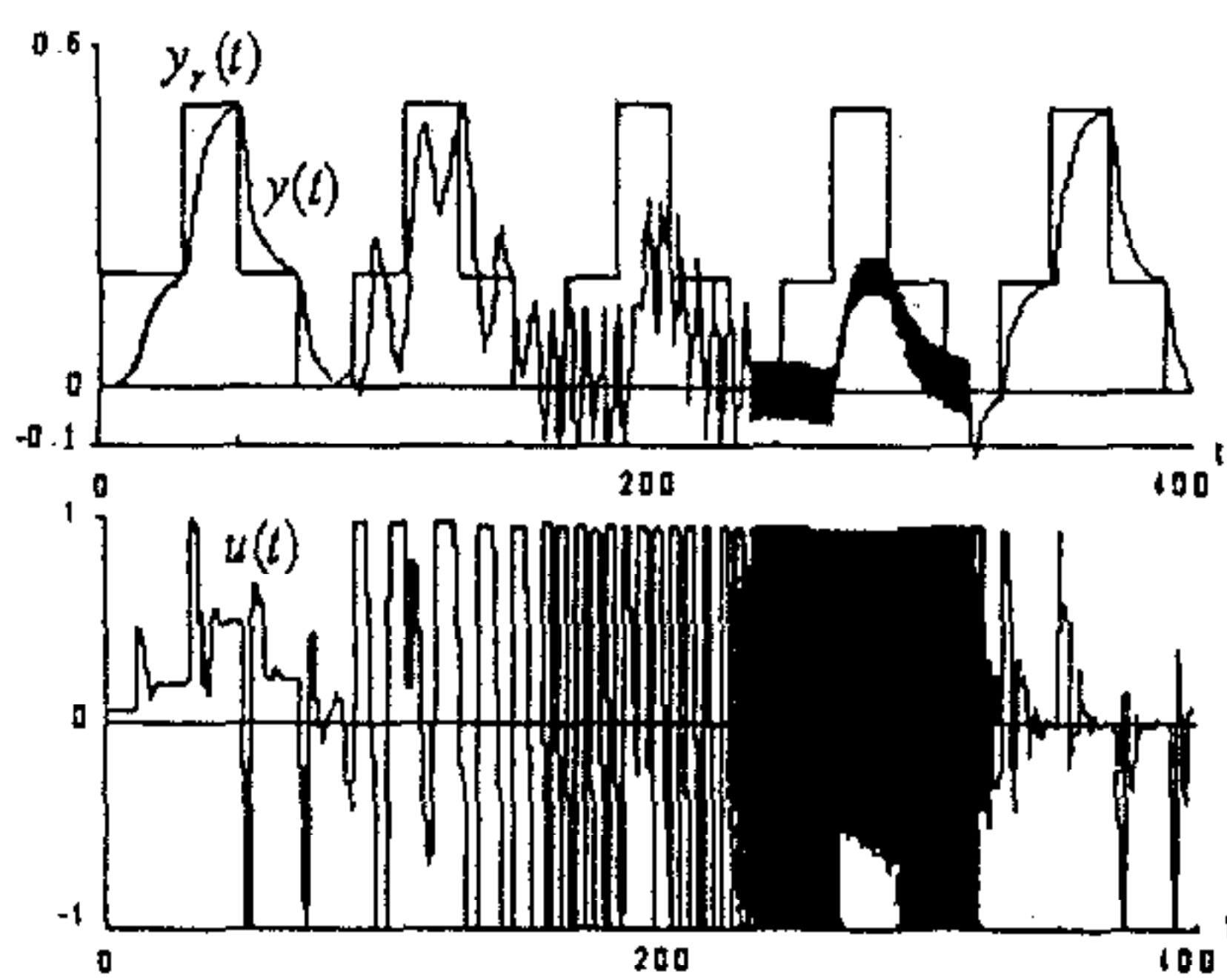


图 1 固定 PID 控制的效果

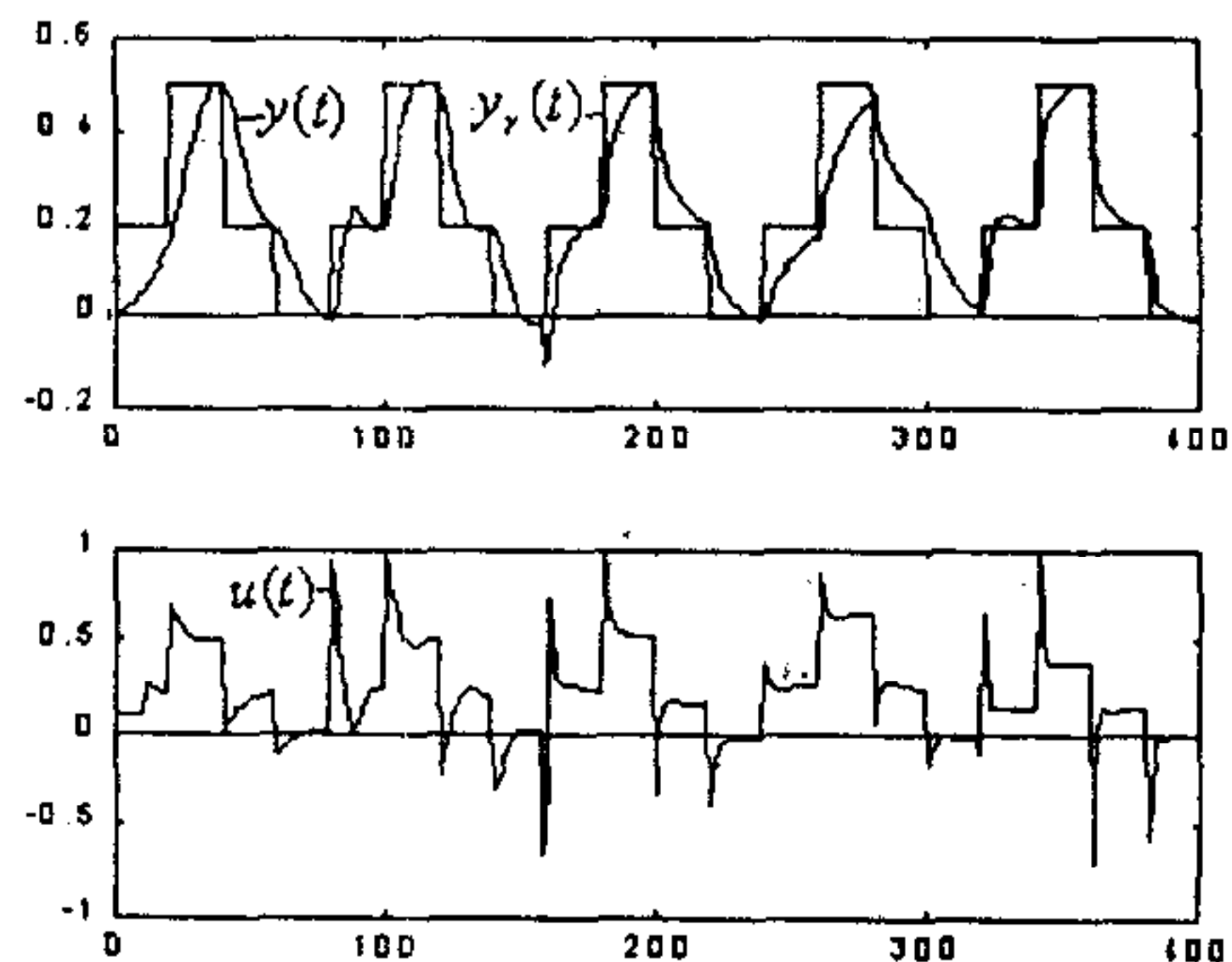


图 2 自适应预测函数控制方法的控制效果

4 结论

本文基于 CARMA 模型提出了一种自适应预测函数控制方法, 或者也可称为自适应广义预测函数控制方法. 该方法把预测函数控制方法与自适应控制结合起来, 在不断辨识模型参数的基础上在线修正预测函数控制器参数, 这样可以进一步扩大预测函数控制方法的适应范围, 改善控制品质. 通过仿真比较表明, 该方法对于慢时变过程具有较好的适应性和控制效果.

参 考 文 献

1. ABUEL ATA-DOSS S., ESTIVAL J.L.. Predictive functional control technique(PFC), *Workshop on computer integrated design of controlled industrial systems*, Paris, April 26-27, 1990
2. Compas J.M., Decarreau P., Lanquetin G., Estival J.L., Fulget N., Martin R. and Richalet J.. Industrial applications of predictive functional control to rolling mill, fast robot, river dam. *3rd IEEE Conference on Control Application*, Glasgow, August, 1994
3. Didier Cuadrado S.. Computer aided design of weapon system guidance and control with predictive functional control technique. *AGARD Conference: Software for Guidance of Control*, Greece, May, 1991
4. Richalet J.. Predictive functional control: Application to fast and accurate robots *Proc. Of 10th IFAC World Congress*, Munich, 1987
5. 席裕庚. 预测控制. 北京: 国防工业出版社, 1992.
6. 王伟. 广义预测控制理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1998
7. 韩曾晋. 自适应控制. 北京: 清华大学出版社, 1995
8. 潘红华, 金建祥, 苏宏业, 褚健, 陈子康. 聚氯乙烯聚合反应过程的串级预测函数控制. *化工自动化及仪表*, 1998, 增刊. 26~29

潘红华 男, 1966 年生. 1987 年毕业于海军广州舰艇学院, 1992 年获海军大连舰艇学院军事学硕士学位, 现为浙江大学工业控制技术研究所以博士研究生. 研究方向为预测控制、火控系统.

苏宏业 男, 1969 年生. 1990 年毕业于南京化工大学, 1995 年获浙江大学工业自动化专业博士学位, 现为浙江大学工业控制技术研究所以副教授. 研究方向为鲁棒控制、非线性控制、时滞系统控制和 PID 自整定理论.

褚健 男, 1963 年生. 1982 年毕业于浙江大学化工系, 1989 年获日本京都大学工学博士学位. 1993 年被聘为浙江大学教授, 博导, 1999 年被聘为首批“长江学者计划”特聘教授. 研究方向为时滞系统控制、非线性控制、鲁棒控制.