

文章编号: 1001-0920(2009)02-0313-04

未知参数多变量线性系统自适应模糊广义预测控制

师五喜

(天津工业大学 计算机技术与自动化学院, 天津 300160)

摘要: 对未知参数多变量线性系统提出了自适应模糊广义预测控制方法. 该方法直接用模糊逻辑系统组成的向量设计广义预测控制器, 并基于广义误差向量估计值对控制器中的未知向量和广义误差估计值中的未知矩阵进行自适应调整. 该方法不但能保证闭环系统所有信号有界, 而且可使广义误差向量收敛到原点的一个邻域内.

关键词: 多变量线性系统; 广义预测控制; 自适应模糊控制; 稳定性分析

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Adaptive fuzzy generalized predictive control for unknown parameters multivariable linear systems

SHI Wuxi

(School of Computer Technology and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China. E-mail: shiwuxi@163.com)

Abstract: An adaptive fuzzy generalized predictive control scheme for multivariable linear systems with unknown parameters is presented. With this scheme, the vector composed of fuzzy logic systems is used to design generalized predictive controller directly, and the unknown vector in controller and the unknown matrix in the estimation of generalized error are adjusted based on the estimation of generalized error vector adaptively. It is proved that the proposed scheme can not only guarantee boundedness of all signals in the closed loop system, but also make the generalized error converge to a neighborhood of the origin.

Key words: Multivariable linear system; Generalized predictive control; Adaptive fuzzy control; Stability analysis

1 引言

由于广义预测控制算法^[1,2]具有模型参数少, 对扰动、随机噪声、时滞变化等有较强的鲁棒性, 使其在工业过程控制中得到了成功的应用^[3]. 通常在实施广义预测控制时, 若被控对象参数未知, 需要事先辨识未知参数, 再求解 Diophantine 方程、计算矩阵的逆, 这使得在线计算量较大.

为减小在线计算量, 避免 Diophantine 方程的求解是目前采取的措施之一. 文献[4]提出对角 CARIMA 模型 MGPC 控制器系数的直接求解方法. 该方法利用多变量对角 CARIMA 模型直接递推得到简洁的 MGPC 控制器, 避免了 Diophantine 方程的求解. 文献[3]在假设被控对象阶跃响应系数测量值已知的情况下, 提出了广义预测控制直接算法. 该算法虽然避免了 Diophantine 方程求解和矩阵求逆, 但在许多工业过程控制中, 要获得阶跃响应系数测量值, 需付出很大的成本, 甚至有的实际系统

不允许事先通过实验进行参数估计. 因此, 该算法不适于对这些实际系统进行控制.

为克服文献[3]中算法之不足, 文献[5]把模糊逻辑系统(FLS)引入广义预测控制, 对参数未知单输入单输出线性系统设计了直接自适应模糊广义预测控制方法. 本文在文献[5]的基础上, 对参数未知多变量系统提出了自适应模糊广义预测控制方法. 该方法直接用模糊逻辑系统组成的向量来设计广义预测控制器, 并基于广义误差向量估计值对控制器中未知向量和广义误差向量估计值中未知矩阵进行自适应调整. 文中证明了该方法不但能保证闭环系统所有信号有界, 而且可使广义误差向量收敛到原点的一个邻域内.

2 多变量线性系统广义预测控制简介

被控对象采用如下的数学模型描述:

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

其中: $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别是 $m \times 1$ 和 $n \times 1$ 维的输入向

收稿日期: 2007-11-21; 修回日期: 2008-01-30.

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金项目(20051206).

作者简介: 师五喜(1964—), 男, 甘肃秦安人, 副教授, 博士, 从事模糊预测控制等研究.

量和输出向量; $(z^{-1}) = \text{diag}\{1 - z^{-1}\}$ 是 $n \times n$ 的对角差分矩阵; $A(z^{-1}) = I + A_1 z^{-1} + \dots + A_{n_A} z^{-n_A}$, $B(z^{-1}) = B_0 + B_1 z^{-1} + \dots + B_{n_B} z^{-n_B}$ 分别是 $n \times n$ 和 $n \times m$ 的多项式矩阵. 取性能指标函数如下:

$$J = \sum_{j=1}^N y(t+j) - y_r(t+j)^2 + \sum_{j=1}^{N_u} u(t+j-1)^2.$$

其中

$$u(t+j) = 0, j = N_u, \dots, N, \\ X^2 = X^T X, \quad = \text{diag}\{1, \dots, m\},$$

$y_r(t)$ 是 $n \times 1$ 维的有界设定值向量, N 是最大预测时域, N_u 是控制时域, 是控制加权矩阵. 由文献[3]知, 式(1)的向量形式为

$$Y = GU + Fy(t) + H u(t-1), \quad (2)$$

广义预测控制律为

$$u(t) = P^T [Y_r - Fy(t) - H u(t-1)], \quad (3)$$

$$u(t) = u(t-1) + u(t). \quad (4)$$

式中: P^T 是 $(G^T G +)^{-1} G^T$ 前 m 行; $= \text{diag}\{j\}$; Y, G, U, F, H, Y_r 参见文献[3].

可以证明上述广义预测控制律具有如下性质:

引理 1 定义广义误差向量

$$E_g(t+N) = P^T (Y - Y_r) + Q^T U, \quad (5)$$

则 $E_g(t+N) = 0$ 当且仅当 $u(t)$ 由式(3)定义, 其中 Q^T 是 $(G^T G +)^{-1}$ 的前 m 行.

证明略.

3 自适应模糊广义预测控制器设计

当被控对象(1)中的参数未知时, 控制器(3)不能实现, 因此本文直接用文献[6]中与参数成线性关系的模糊逻辑系统 $f(\bar{x} | \bar{w}) = \bar{w}^T(\bar{x})$ 构成的向量, 设计如下的自适应模糊广义预测控制律:

$$U = \begin{bmatrix} T_{11}^{11}(X(t)) \\ \dots \\ T_{1m}^{1m}(X(t)) \\ \dots \\ T_{N_u 1}^{N_u 1}(X(t)) \\ \dots \\ T_{N_u m}^{N_u m}(X(t)) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中

$$X(t) = [y^T(t), \dots, y^T(t - n_A), u^T(t-1), \dots, u^T(t - n_B)]^T \quad u_x \subset R^{m_A + m_B + n}.$$

根据滚动优化的思想, 取式(6)前 m 行, 可得本文所设计的自适应模糊广义预测控制律

$$u(t) = T(X(t)), \quad (7)$$

$$u(t) = u(t-1) + u(t), \quad (8)$$

其中

$$T(X(t)) = \text{diag}[T_{11}(X(t)) \dots T_{1m}(X(t))], \\ = [T_{11} \dots T_{1m}]^T.$$

下面研究如何对控制器(7)中的参数向量 (t) 设计自适应调节律. 当被控对象参数已知时, 由引理1知, $E_g(t+N) = 0$ 的控制律就是广义预测控制律(3). 因此, 如果基于广义误差向量 $E_g(t)$ 对参数向量 (t) 进行自适应调节, 使得能够保证序列 $\{E_g(t)\}$ 的收敛性, 便可达到控制目的. 但现在被控对象参数未知, 由式(5)知, 广义误差向量 $E_g(t)$ 无法算出, 因此基于广义误差向量估计值 $E_g(t)$ 对参数向量 (t) 进行自适应调节, 然后通过保证序列 $\{E_g(t)\}$ 收敛到原点的邻域内来达到控制目的. 定义广义误差向量估计值 $E_g(t)$ 为

$$E_g(t) = T_{pq}(t-N) Z(t-N), \quad (9)$$

其中 $T_{pq}(t) = [P^T(t), Q^T(t)]$. P, Q 分别是 P, Q 的估计值, 且

$$Z(t-N) = \begin{bmatrix} y(t-N+1) - y_r(t-N+1) \\ \dots \\ y(t) - y_r(t) \\ u(t-N) \\ \dots \\ u(t-N+N_u-1) \end{bmatrix}.$$

采用如下的自适应律来调节参数向量 (t) :

$$(t) = \begin{cases} (t), & (t) \leq M; \\ M \frac{(t)}{(t)}, & (t) > M. \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$(t) = (t-N) - \frac{(X(t-N))}{(1 + Z(t-N))^2} E_g(t);$$

M 是设计者取定的正常量; $(i) \quad M, i = -N+1, \dots, 0$; 是自适应学习率.

采用如下的自适应律来调节参数矩阵 $_{pq}(t)$:

$$_{pq}(t) = \begin{cases} (t), & - M_{pq}^2; \\ M_{pq} \frac{(t)}{\sqrt{t}}, & - > M_{pq}^2. \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$- = \text{tr}(T(t)(t)), \\ (t) = _{pq}(t-N) - \frac{Z(t-N)}{(1 + Z(t-N))^2} E_g^T(t);$$

M_{pq} 是设计者取定的正常量; $\text{tr}(T_{pq}(j)_{pq}(j)) M_{pq}^2, j = -N+1, \dots, 0$; 是自适应学习率.

注 1 以上自适应律可保证参数向量和参数矩阵的每个元素在一给定的闭球域内.

4 稳定性分析

对以上所设计的自适应模糊广义预测控制器的性能,有如下的定理描述:

定理 1 对于被控对象(1),其自适应模糊广义预测控制器为式(7)和(8),参数向量 $\hat{\theta}(t)$ 和参数矩阵 $\hat{p}_{pq}(t)$ 的自适应律分别为式(10)和(11),则当

$\lambda > 0, \mu > 0$ 且 $\lambda + \mu = 1$ 时有:

1) $\hat{\theta}(t)$ 和 $\hat{p}_{pq}(t)$ 有界,且 $\{u(t)\}$ 和 $\{y(t)\}$ 是有界序列;

2) $E_g(t)$ 收敛到原点的一个邻域内.

证明 1) 由式(10)和(11)知,对任意的 $t > 0$ 均有 $\|\hat{\theta}(t)\| \leq M, \text{tr}(\hat{p}_{pq}(t)) \leq M^2_{pq}$. 又对任一 $t > 0$, 均有 $\|X(t)\| \leq 1$, 由式(7)知, $u(t)$ 有界, 所以 $y(t)$ 有界. 由式(1)知 $y(t+1)$ 有界. 所以 $\{u(t)\}$ 和 $\{y(t)\}$ 是有界序列.

2) 把式(6)代入(2),再代入(5)得

$$E_g(t+N) = X^T(X(t)) - P^T[Y_r - Fy(t) - H u(t-1)]. \quad (12)$$

定义

$$\theta^* = \arg \min \{ \sup_{X(t)} \|X(t)\| - P^T[Y_r - Fy(t) - H u(t-1)] \},$$

式中

$$\|X(t)\| = \{ \|X(t)\|, M \},$$

并记

$$\begin{aligned} &= \theta^* - \theta(t), \\ \theta(t) &= X^T(X(t)) - P^T[Y_r - Fy(t) - H u(t-1)], \end{aligned}$$

则由式(12)得

$$E_g(t) = X^T(X(t-N)) - (t-N) + \theta(t-N). \quad (13)$$

记 $\bar{P}_{pq} = [P^T, Q^T]$, 则由式(5)得

$$E_g(t) = \bar{P}_{pq}^T Z(t-N). \quad (14)$$

记 $\hat{p}_{pq}(t) = \hat{p}_{pq}(t) - \bar{P}_{pq}$, 由式(9), (13)和(14)得

$$E_g(t) = X^T(X(t-N)) - (t-N) + (t-N) + \hat{p}_{pq}^T Z(t-N). \quad (15)$$

记

$$\bar{X}(X(t)) = \frac{X(X(t))}{1 + Z(t)},$$

$$\bar{Z}(X(t)) = \frac{Z(X(t))}{1 + Z(t)},$$

$$\hat{E}_g(t) = \frac{E_g(t)}{1 + Z(t-N)},$$

取

$$V(t) = \frac{1}{2} X^T(t) - (t) + \frac{1}{2} \text{tr}(\hat{p}_{pq}(t) - p_{pq}(t)).$$

如果式(10)第1行和式(11)第1行成立,则

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-N) - \bar{X}(X(t-N)) \hat{E}_g(t), \quad (16)$$

$$\hat{p}_{pq}(t) = \hat{p}_{pq}(t-N) - \bar{Z}(t-N) \hat{E}_g^T(t). \quad (17)$$

记 $\bar{Z}(t) = \frac{Z(t)}{1 + Z(t)}$, 则由式(16)和(17)得

$$\begin{aligned} V(t) - V(t-N) &= \\ &- \hat{E}_g^T(t) \hat{E}_g(t) + 2 \hat{E}_g^T(t) \bar{X}(t-N) - \\ &\hat{E}_g^T(t) M(t-N) \hat{E}_g(t), \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} M(t-N) &= \\ I - \bar{X}^T(X(t-N)) \bar{X}(X(t-N)) - \\ &\bar{Z}(t-N) - 2I. \end{aligned}$$

I 是单位阵. 一般地

$$- \hat{E}_g^T(t) \hat{E}_g(t) + 2 \hat{E}_g^T(t) \bar{X}(t-N) - \bar{X}(t-N) < 0,$$

则式(18)可写为

$$\begin{aligned} V(t) - V(t-N) &< \\ &- \hat{E}_g^T(t) M(t-N) \hat{E}_g(t) + \bar{X}(t-N) < 0. \end{aligned} \quad (19)$$

如果式(10)第2行和式(11)第2行成立,则

由于 $\theta^* \leq M, \text{tr}(\hat{p}_{pq} - p_{pq}) \leq M^2_{pq}$, 由文献[7]中投影算法的性质知

$$\begin{aligned} X^T(t) - (t) &< \\ X^T(t-N) - (t-N) &< \\ 2 \hat{E}_g^T(t) \bar{X}(X(t-N)) - (t-N) + \\ 2 \hat{E}_g^T(t) \bar{X}(X(t-N)) \bar{X}(X(t-N)) \hat{E}_g(t), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{tr}(\hat{p}_{pq}(t) - p_{pq}(t)) &< \\ \text{tr}(\hat{p}_{pq}(t-N) - p_{pq}(t-N)) &< \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2 \hat{E}_g^T(t) \bar{p}_{pq}(t-N) \bar{Z}(t-N) + \\ 2 \bar{Z}(t-N) - 2 \hat{E}_g^T(t) \hat{E}_g(t). \end{aligned} \quad (21)$$

按照(21)的方法可知式(19)成立.

同理,当式(10)第1行和式(11)第2行及式(10)第2行和式(11)第1行成立时,(19)亦成立.

综上所述,对于自适应律式(10)和(11),式(19)均成立.

因 $\lambda + \mu = 1$, 所以 $M(t-N)$ 是元素全为正的对称阵, 记 $\sup_{t>0} \bar{X}(t-N) = \bar{X}$, 则由式(19)得

$$V(t) < V(t - N) - [\mu \hat{E}_g(t)^2 - 2], \quad (22)$$

其中 $\mu = \inf_{t>0} \{ \min(M(t - N)) \}$, $\min(M(t - N))$ 是

$M(t - N)$ 的最小特征根. 可以证明: $\hat{E}_g(t)$ 将收敛到原点的邻域内.

因 (t) , $p_q(t)$ 有界, 所以 $V(t)$ 有界, 因此 $\lim_{t \rightarrow \infty} [\mu \hat{E}_g(t)^2 - 2] < 0$, 故

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\mu \hat{E}_g(t)^2 - 2] = 0.$$

由上式知, 当 t 时, $\hat{E}_g(t) / \sqrt{\mu}$, 因此

$\hat{E}_g(t)$ 收敛到原点的邻域内. 又 $Z(t - N)$

有界, 所以 $\hat{E}_g(t)$ 收敛到原点的邻域内.

5 仿真例子

考虑如下被控对象:

$$\begin{bmatrix} 1 + 0.987z^{-1} & -0.6z^{-1} \\ 0.45z^{-1} & 1 - 0.12z^{-1} \end{bmatrix} (z^{-1})y(t) = \begin{bmatrix} 3.2 - 0.7451z^{-1} & 0.8 - 0.2469z^{-1} \\ 2.192 & 0.5 + 0.0117z^{-1} \end{bmatrix} u(t - 1).$$

先设计模糊逻辑系统, 为此应使 $y_1(t), y_2(t), y_1(t - 1), y_2(t - 1)$ 和 $u_1(t - 1), u_2(t - 1)$ 的取值在一定范围内, 进行如下的一一映射^[8]:

$$\bar{y}_1(t) = \frac{y_1(t)}{|y_1(t)| + 1},$$

这样对于任意的 $y_1(t), \bar{y}_1(t) \in (-1, 1)$. 对 $y_2(t)$ 等可做同样的映射.

FLS $f(X(t) / \bar{y}_i)$ 中, $X(t) = [y_1(t), \bar{y}_1(t - 1), \bar{u}_1(t - 1), \bar{y}_2(t), \bar{y}_2(t - 1), \bar{u}_2(t - 1)]^T$, 每个输入的隶属函数均取为

$$\mu_1 = \exp\left(-\left(\frac{x+1}{0.7}\right)^2\right),$$

$$\mu_2 = \exp\left(-\left(\frac{x}{0.7}\right)^2\right),$$

$$\mu_3 = \exp\left(-\left(\frac{x-1}{0.7}\right)^2\right).$$

参考序列 $y_{r1}(t), y_{r2}(t)$ 均取 $\cos(t/100)$, 被控对象的初始位置 $[y(-1), y(0)] = [0, 0]$. 在控制算法中, $N = 1, N_u = 1, \alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.5$, 自适应率 $\beta = 0.6, \gamma = 0.1$, 参数向量初值 $\theta(0)$ 各元素在区间 $[-0.1, 0.1]$ 内随机选取, $\tau_{pq}(0) = \begin{bmatrix} 5 & 4 & 1 & 1 & 0.2 & 0.2 \\ 4 & 3 & 1 & 1 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}, M = 8.8, M_{pq} = 10$.

图 1 是系统输出 $y_1(t)$ 跟踪参考序列 $y_{r1}(t)$ 的情况, 图 2 是系统输出 $y_2(t)$ 跟踪参考序列 $y_{r2}(t)$ 的

情况. 从图中可以看出, 本文方法取得了满意的跟踪效果.

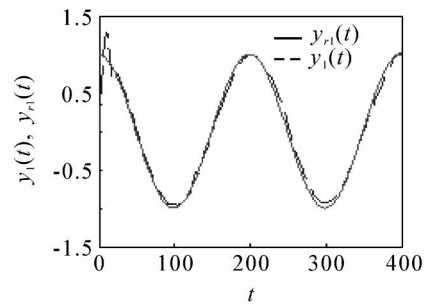


图 1 输出 $y_1(t)$ 和参考序列 $y_{r1}(t)$

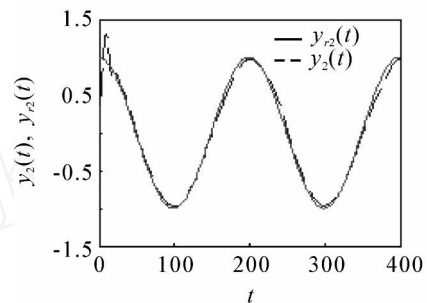


图 2 输出 $y_2(t)$ 和参考序列 $y_{r2}(t)$

6 结 论

本文对多变量线性系统提出了自适应模糊广义预测控制方法. 该方法不需要事先知道系统参数, 同时避免了实时控制算法中 Diophantine 矩阵多项式方程的求解和矩阵求逆.

参考文献(References)

- [1] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control, Part I and Part II[J]. Automatica, 1987, 23(2): 137-160.
- [2] Clarke D W, Mohtadi C. Properties of generalized predictive control[J]. Automatica, 1989, 25(6): 859-875.
- [3] 王伟. 广义预测控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
(Wang W. Generalized predictive control theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 1998.)
- [4] 李奇安, 褚健. 对角 CARIMA 模型多变量广义预测控制器系数直接算法[J]. 自动化学报, 2007, 33(1): 59-65.
(Li Q A, Chu J. Direct algorithm for multivariable generalized predictive controllers coefficients of diagonal CARIMA model[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(1): 59-65.)

(下转第 320 页)

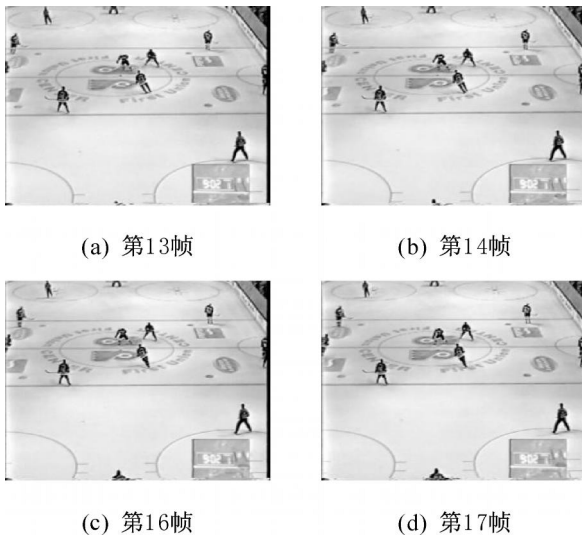


图2 原始帧

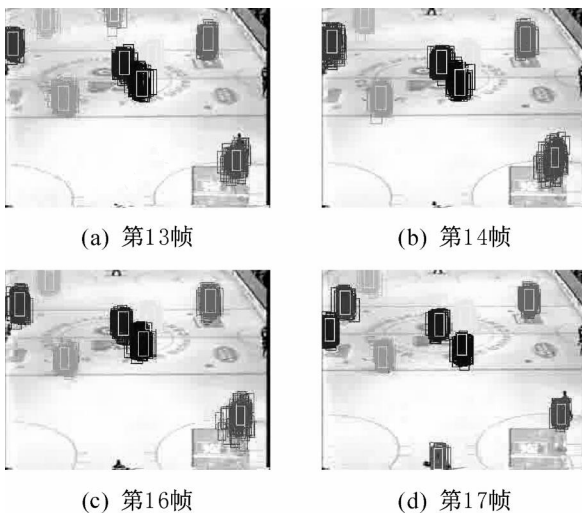


图3 跟踪结果

得较近的3个目标,新算法也能成功地检测到并加以跟踪.

5 结论

本文论述了基于粒子滤波的多目标跟踪方法.在多目标跟踪中,一个重要的环节是数据关联,对此进行了详细论述,并给出了一个基于粒子滤波的多目标跟踪算法.该算法以BPF为基础,并加以改进.实验结果表明了这种方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Bar-Shalom Y, Fortmann T E. Tracking and data association[M]. New York: Academic Press, 1988.
- [2] Reid D B. An algorithm for tracking multiple targets[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1979, 24(6): 843-854.
- [3] North B, Blake A, Isard M, et al. Learning and classification of complex dynamics[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000: 22(9): 1016-1034.
- [4] Pérez P, Hue C, Vermaak J, et al. Color-based probabilistic tracking[C]. Proc of the European Conf on Computer Vision. Copenhagen, 2002, 1: 661-675.
- [5] Vermaak J, Doucet A, Pérez P. Maintaining multi-modality through mixture tracking[C]. Int Conf on Computer Vision. Beijing, 2003, : 1110-1116.
- [6] Okuma K, Taleghani A, de Freitas J F G, et al. A Boosted particle filter: Multitarget detection and tracking[C]. European Conf on Computer Vision. Prague, 2004, : 28-39.
- [7] Viola P, Jones M J. Robust real-time face detection[J]. Int J on Computer Vision, 2004, 57(2): 137-154.

(上接第316页)

- [5] 师五喜, 霍伟, 吴宏鑫. 参数未知线性系统的直接自适应模糊广义预测控制[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 535-539.
(Shi W X, Huo W, Wu H X. Direct adaptive fuzzy generalized predictive control for linear systems with unknown parameters[J]. Control and Decision, 2003, 18(5): 535-539.)

- [6] Wang L X. Adaptive fuzzy systems and control: Design and stability analysis[M]. NJ: Prentice-Hall, 1994.
- [7] Goodwin G C, Sin K S. Adaptive filtering, predictive and control[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1984.
- [8] Liu G P, Kadiramanathan V, Billings S. Predictive control for nonlinear systems using neural networks[J]. Int J Control, 1998, 71(6): 1119-1132.