第 18 卷 第 5 期
Vol. 18 No. 5

控 制 与 决 策
Control and Decision

2003 年 9 月
Sept. 2003

文章编号: 1001-0920(2003)05-0535-05

参数未知线性系统的直接自适应模糊广义预测控制

师五喜[1], 霍 伟[1], 吴宏鑫[2]
(1. 北京航空航天大学 第七研究室, 北京 100083; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100080)

摘 要: 将自适应模糊逻辑系统引入广义预测控制, 对参数未知线性系统提出一种直接自适应模糊广义预测控制方法。该方法直接利用模糊逻辑系统设计广义预测控制器, 并基于广义误差估计值对控制器参数和广义误差估计值中的未知向量进行自适应调整。证明了该方法不仅能保证闭环系统输入输出有界, 而且可使广义误差收敛到原点的一个小领域内。

关键词: 参数未知线性系统; 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

Direct adaptive fuzzy generalized predictive control for linear systems with unknown parameters

SHI Wu-xi[1], *HUO Wei*[1], *WU Hong-xin*[2]
(1. The Seventh Research Division, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China)

Abstract: A direct adaptive fuzzy generalized predictive control method for linear systems with unknowm parameters is presented by introducing adaptive fuzzy logic system into the generalized predictive control strategy. The fuzzy logic system is used to design generalized predictive controller directly, and the controller parameters and the unknown vectors in the estimation of generalized error are adjusted adaptively. It is proved that the proposed method can not only guarantee input-output boundedness of the closed-loop system, but also make the generalized error converges to a small neighborhood of the origin.

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

1 引 言

自 Clarke 等[1,2]提出广义预测控制(GPC)算法以来, 由于该算法的模型参数少, 对扰动、随机噪声、时滞变化等具有较强的鲁棒性, 使其在工业过程控制中得到了成功的应用。通常在实施广义预测控制时, 若被控对象参数已知, 为计算控制律, 需根据预测步数的不同, 先对Diophantine方程迭代求解, 再计算矩阵的逆; 若被控对象参数未知, 当参数是时不变或慢时变时, 可用最小二乘算法辨识未知参数, 再用辨识出来的参数求解 Diophantine 方程、计算矩阵的逆。文献[3]在假设被控对象阶跃响应系数估计值已知的情况下, 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估

收稿日期: 2002-05-13; 修回日期: 2002-07-22。
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60034010)。
作者简介: 师五喜(1964—), 男, 甘肃秦安人, 博士生, 从事预测控制和模糊预测控制研究; 霍伟(1951—), 男, 湖北武昌人, 教授, 博士生导师, 从事非线性动力学系统控制及智能控制研究。

计值, 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, 因此该算法不适于这些实际系统。

为克服文献[3]算法存在的不足, 本文利用模糊逻辑系统(FLS)可以任意精度逼近任一定义在紧集上的连续函数[4]的性质, 将 FLS 引入广义预测控制, 对参数未知线性系统提出一种直接自适应模糊广义预测控制方法。该方法直接利用 FLS 设计广义预测控制器, 并基于广义误差估计值对控制器参数和广义误差估计值中的未知向量进行自适应调整。本文证明了此方法不仅能保证闭环系统输入输出有界, 而且可使广义误差收敛到原点的一个小邻域内。

2　广义预测控制简介

设被控对象可用如下离散差分方程描述

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

其中: $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示被控对象的输入和输出, $\Delta = 1 - z^{-1}$ 表示差分算子, $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_{n_a} z^{-n_a}$, $B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_{n_b} z^{-n_b}$。取性能指标函数

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

其中: N 为最大预测时域, $N_u \leq N$ 为控制时域, λ 为控制加权因子, $\Delta u(t+j) = 0 (j = N_u, \cdots, N)$ 和 $y_r(t+j)(j = 1, 2, \cdots)$ 为参考序列。

由文献[1]可知, 式(1)的向量形式为

$$Y = GU + Fy(t) + H\Delta u(t-1) \qquad (2)$$

广义预测控制律为[1]

$$\Delta u(t) = P_1^{\mathrm{T}}[Y_r - Fy(t) - H\Delta u(t-1)] \qquad (3)$$

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \qquad (4)$$

式中: $P_1^{\mathrm{T}}(G^{\mathrm{T}}G + \lambda I)^{-1}G^{\mathrm{T}}$ 的第 1 行; Y, G, U, F, H 和 Y_r 见文献[1]。可以证明, 上述控制律具有如下重要性质:

引理 1　定义广义误差

$$e_g(t+N) = P_1^{\mathrm{T}}(Y - Y_r) + \lambda Q_1^{\mathrm{T}}U \qquad (5)$$

其中 Q_1^{T} 为$(G^{\mathrm{T}}G + \lambda I)^{-1}$的第 1 行, 则 $e_g(t+N) = 0$, 当且仅当 $\Delta u(t)$ 由式(3)定义。

证明　由式(2)知 $e_g(t+N) = 0$, 当且仅当

$$P_1^{\mathrm{T}}(GU + Fy(t) + H\Delta u(t-1) - Y_r) + \lambda Q_1^{\mathrm{T}}U = 0 \qquad (6)$$

简单计算可得 $P_1^{\mathrm{T}}GU + \lambda Q_1^{\mathrm{T}}U = \Delta u(t)$, 所以式(6)成立, 当且仅当式(3)成立。□

3　直接自适应模糊广义预测控制器设计与稳定性分析

若被控对象(1)的参数已知, 则控制器(3)可以实现, 但当其参数未知时, 控制器(3)便能实现。因此本文直接用 FLS 逼近控制器(3), 所采用的 FLS 规则库形式为[4]

$$R^{(l)}: \text{If } \hat{x}_1 \text{ is } F_1^l, \text{ and}, \cdots, \text{and } \hat{x}_n \text{ is } F_n^l$$
$$\text{Then } \hat{y} \text{ is } G^l$$

其中: $l = 1, 2, \cdots, M$; M 为规则库中的模糊规则数; $[\hat{x}_1, \cdots, \hat{x}_n]^{\mathrm{T}}$ 是将 $X = [x_1, \cdots, x_n]^{\mathrm{T}}$ 模糊化后所得的模糊变量; $\hat{y}$ 为输出语言变量; $F_i^l(i = 1, 2, \cdots, n)$ 和 G^l 均为模糊集合, 其对应的隶属函数分别为 $\mu_{F_i^l}(x_i)$ 和 $\mu_{G^l}(y)$, 均取高斯型, 采用单值模糊产生器、中心平均模糊消除器和乘积推理规则。则模糊逻辑系统的输出可表示为[4]

$$f(X) = \theta^{\mathrm{T}}\xi(X) \qquad (7)$$

其中: $\theta = [\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_M]^{\mathrm{T}}$, $\xi(X) = [\xi_1(X), \xi_2(X), \cdots, \xi_M(X)]^{\mathrm{T}}$, $\theta = \bar{y}^l$, $\bar{y}^l$ 为 μ_{G^l} 取最大值时所对应的点, 而

$$\xi_l(X) = \frac{\prod_{i=1}^{n}\mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^{M}\prod_{i=1}^{n}\mu_{F_i^l}(x_i)}$$

为模糊基函数。

利用形如式(7)的模糊逻辑系统 $\hat{f}(X(t)|\theta_u) = \theta_u^{\mathrm{T}}\xi_u(X(t))$ 逼近式(3), 得如下模糊广义预测控制器

$$\Delta u(t) = \hat{f}(X(t)|\theta_u) \qquad (8)$$

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \qquad (9)$$

式中: $X(t) = [y(t), \cdots, y(t-n_a), \Delta u(t-1), \cdots, \Delta u(t-n_b)]^{\mathrm{T}} \in U_X \subset R^{n_a+n_b+1}$。

下面研究如何对控制器(8)中的参数向量 $\theta_u(t)$ 设计自适应调节律。

由引理 1 结论知, 被控对象参数已知时, 使广义误差 $e_g(t+N) = 0$ 的控制律就是广义预测控制律(3)。这表明使序列$\{e_g(t)\}$收敛到零的控制律可收敛到式(3)。因此, 如果基于广义误差 $e_g(t)$ 对控制器(8)的参数 $\theta_u(t)$ 进行自适应调节, 能保证序列$\{e_g(t)\}$的收敛性, 则证明自适应模糊广义预测控制器收敛到广义预测控制器(3), 从而达到控制目的。但现在被控对象参数完全未知, 广义误差 $e_g(t)$ 无法算出, 因此本文基于广义误差的估计值 $\hat{e}_g(t)$ 对控制器参数 $\theta_u(t)$ 进行自适应调节, 并使得序列$\{e_g(t)\}$收敛到原点的小邻域内来达到控制目的。为此, 首先定义广义误差估计值

$$\hat{e}_g(t) = \theta_{pq}^{T}(t-1)Z(t-N) \tag{10}$$

其中: $\theta_{pq}^{T}(t) = [\hat{P}_1^{T}(t), \hat{Q}_1^{T}(t)]$, $\hat{P}_1$ 和 $\hat{Q}_1$ 分别为 P_1 和 Q_1 的估计值, 而

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

采用如下自适应律调节参数向量 $\theta_u(t)$

$$\theta_u(t) = \begin{cases} \varphi(t), & |\varphi(t)| \le M_\theta \\ \theta_u(t-1), & |\varphi(t)| > M_\theta \end{cases} \tag{11}$$

其中

$$\varphi(t) = \theta_u(t-1) - \alpha_1 \frac{\xi_u(X(t-N))}{(1+|Z(t-N)|)^2}\hat{e}_g(t)$$

M_θ 为设计者取定的正常量, $\theta_u(0)$ 由设计者给定且满足 $|\theta_u(0)| \le M_\theta$, α_1 为自适应学习率。

又由式(5) 知 $e_g(t) = [P_1^{T}, Q_1^{T}]z(t-N)$, 因此可采用投影算法[5] 调节参数向量 $\theta_{pq}(t)$。而本文设计模糊广义预测控制器的目的是使 $e_g(t)$ 收敛于原点的小邻域, 理想情况下, 使 $e_g(t)$ 收敛于原点。因此采用如下自适应律来调节参数向量 $\theta_{pq}(t)$

$$\theta_{pq}(t) = \theta_{pq}(t-1) - \alpha_2 \frac{Z(t-N)}{(1+|Z(t-N)|)^2}\hat{e}_g(t) \tag{12}$$

其中: $\theta_{pq}(0)$ 由设计者给定, α_2 为自适应学习率。

对于序列 $\{e_g(t)\}$ 的收敛性以及本文控制方法的性能, 有下面的定理:

定理 1　若被控对象(1) 满足:

条件 1: 有界输入对应的输出一定有界;

条件 2: 自适应模糊广义预测控制律为式(8);

条件 3: 参数向量 $\theta_u(t)$ 和 $\theta_{pq}(t)$ 的自适应调节律分别为式(11) 和(12)。

则当 $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0$, 且 $\alpha_1 + \alpha_2 \le 1$ 时, 有:

1) $\{u(t)\}$ 和 $\{y(t)\}$ 是有界序列;

2) $e_g(t)$ 收敛到原点的一个小邻域内。

证明　1) 由式(11) 知, 对所有的 $t > 0$, $|\theta_u(t)| \le M_\theta$。根据自适应律(12) 的设计过程和式(10) 得 $\hat{e}_g(t) = \Phi_{pq}^{T}(t-1)Z(t-N)$, 其中 $\Phi_{pq}^{T}(t) = \theta_{pq}^{T}(t) - [P_1^{T}, Q_1^{T}]$。由式(12) 可计算出 $|\Phi_{pq}(t)|^2 - |\Phi_{pq}(t-1)|^2 \le 0$, 由此可得, 对所有的 $t > 0$, $|\theta_{pq}(t)|$ 有界。

对所有的 $t > 0$, 均有 $|\xi_u(X(t))| < 1$, 由式(8) 知 $\Delta u(t)$ 有界, 故 $u(t)$ 有界。由定理 1 条件 1 知 $y(t)$ 有界。所以 $\{u(t)\}$ 和 $\{y(t)\}$ 是有界序列。

2) 记

$$U = \begin{bmatrix} \hat{f}(X(t)|\theta_u) \\ \hat{f}(X(t)|\theta_{u1}) \\ \vdots \\ \hat{f}(X(t)|\theta_{uN_u-1}) \end{bmatrix} \tag{13}$$

将式(13) 代入(2), 再代入(5) 得

$$e_g(t+N) = \hat{f}(X(t)|\theta_u) - P_1^{T}[Y_r - Fy(t) - H\Delta u(t-1)] \tag{14}$$

定义 $\theta_u^* = \arg\min_{\theta_u\in\Omega}\{\sup_{X(t)\in U_X}|\hat{f}(X(t)|\theta_u) - P_1^{T}[Y_r - Fy(t) - H\Delta u(t-1)]|\}$, 其中 Ω 是可调参数集, 并记 $\Phi_u = \theta_u - \theta_u^*$, $\omega(t) = \hat{f}(X(t)|\theta_u^*) - P_1^{T}[Y_r - Fy(t) - H\Delta u(t-1)]$, 则由式(14), 得

$$e_g(t) = \Phi_u^{T}(t-1)\xi_u(X(t-N)) + d(t-N) \tag{15}$$

其中 $d(t-N) = \omega(t-N) + [\Phi_u^{T}(t-N) - \Phi_u^{T}(t-1)]\xi_u(X(t-N))$。

将式(13) 代入(2), 然后由式(10) 得

$$e_g(t) = \hat{e}_g(t) + \epsilon(t) \tag{16}$$

其中

$$\epsilon(t) = [(P_1^{T}, Q_1^{T}) - \theta_{pq}^{T}(t-1)]Z(t-N) \tag{17}$$

由式(15) ～(17) 得

$$\hat{e}_g(t) = \Phi_u^{T}(t-1)\xi_u(X(t-N)) + \Phi_{pq}^{T}(t-1)Z(t-N) + d(t-N) \tag{18}$$

记

$$\eta^{T}(X(t-N+1)) = [\eta_u^{T}(X(t-N+1)), \eta_{pq}^{T}(t-N+1)] = \left[\frac{\xi_u^{T}(X(t-N+1))}{1+|Z(t-N+1)|}, \frac{Z^{T}(t-N+1)}{1+|Z(t-N+1)|}\right]$$

$$\bar{\hat{e}}_g(t+1) = \frac{\hat{e}_g(t+1)}{1+|Z(t-N+1)|}$$

取 Lyapunov 函数

$$V(t) = \bar{\hat{e}}_g^{T}(t)\bar{\hat{e}}_g(t) + \frac{1}{\alpha_1}\Phi_u^{T}(t)\Phi_u(t) + \frac{1}{\alpha_2}\Phi_{pq}^{T}(t)\Phi_{pq}(t)$$

下面分情况进行讨论:

1) 如果式(11) 第 1 行和式(12) 成立, 记

$$\Phi^{T}(t) = [\Phi_u^{T}(t), \Phi_{pq}^{T}(t)]$$

$$\bar{d}(t-N+1) = \frac{d(t-N+1)}{1+|Z(t-N+1)|}$$

$$\Pi\eta(t-N+1)=$$
$$\alpha_1|\eta_u(X(t-N+1))|^2+\alpha_2|\eta_{pq}(t-N+1)|^2$$

则

$$\Delta V(t)=(-1+\Pi\eta(t-N+1))\left[\Phi^{\mathrm{T}}(t)\eta(X(t-N+1))+\frac{\Pi\eta(t-N+1)\bar{d}(t-N+1)}{-1+\Pi\eta(t-N+1)}\right]^2-|\hat{e}_g(t)|^2+\frac{\bar{d}^2(t-N+1)}{1-\Pi\eta(t-N+1)} \quad (19)$$

而 $|\eta_u(X(t-N+1))|<1$, $|\eta_{pq}(t-N+1)|<1$, 所以 $-1+\Pi\eta(t-N+1)<0$。因此由式(19) 得

$$\Delta V(t)<-|\hat{e}_g(t)|^2+D_1(t-N+1)$$

其中

$$D_1(t-N+1)=\frac{\bar{d}^2(t-N+1)}{1-\Pi\eta(t-N+1)}$$

2) 如果式(11) 第 2 行和式(12) 成立, 记

$$\bar{d}_u(t-N+1)=$$
$$\Phi_u^{\mathrm{T}}(t)\eta_u(X(t-N+1))+\bar{d}(t-N+1)$$

按 1) 的证明思路得

$$\Delta V(t)<-|\hat{e}_g(t)|^2+D_2(t-N+1) \quad (20)$$

其中

$$D_2(t-N+1)=\frac{\bar{d}_u^2(t-N+1)}{1-\alpha_2\eta_{pq}^2(t-N+1)}$$

由定理 1 中的 1) 知, $|\Phi_u(t)|$ 有界。因此 $D_1(t-N+1)$ 和 $D_2(t-N+1)$ 均有界, 令 $|D_i(t-N+1)|\leq M_i(i=1,2)$, $M_d=\max\limits_{1\leq i\leq 2}\{M_i\}$, 则对于上述 1) 和 2) 两种情况, 当 $|\hat{e}_g(t)|>\sqrt{M_d}$ 时, 有 $\Delta V<0$。

记 $\delta=\sqrt{M_d}$, $E(t)=[\hat{e}_g(t),\Phi_u^{\mathrm{T}}(t),\Phi_{pq}^{\mathrm{T}}(t)]^{\mathrm{T}}$, 设 $|\Phi_u(t)|\leq W_{\Phi_u}$, $|\Phi_{pq}(t)|\leq W_{\Phi_{pq}}$, 记 $I_\Phi(t)=\{(\Phi_u(t),\Phi_{pq}(t))\,|\,|\Phi_u(t)|\leq W_{\Phi_u},|\Phi_{pq}(t)|\leq W_{\Phi_{pq}}\}$, 定义闭集

$$\begin{cases}B=\\ \{E(t)\,|\,|\hat{e}_g(t)|\leq\delta,(\Phi_u(t),\Phi_{pq}(t))\in I_\Phi(t)\}\\ S(p)=\\ \{E(t)\,|\,V(t)\leq p,(\Phi_u(t),\Phi_{pq}(t))\in I_\Phi(t)\}\end{cases} \quad (21)$$

式中 p 为常数。取包含闭集 B 的形如式(21) 的最小闭集

$$S(\underline{p})=$$
$$\{E(t)\,|\,V(t)\leq\underline{p},(\Phi_u(t),\Phi_{pq}(t))\in I_\Phi(t)\}$$

其中 $\underline{p}=\delta^2+\frac{1}{\alpha_1}W_{\Phi_u}^2+\frac{1}{\alpha_2}W_{\Phi_{pq}}^2$。任取 $\bar{p}>\underline{p}$, 令

$$V(t_0)=p_0((\Phi_u(t_0),\Phi_{pq}(t_0))\in I_\Phi(t_0))$$
$$d_0=$$
$$\min\{|\hat{e}_g(t)|^2-M_d\,|\,E(t)\in S(p_0)-S(\bar{p})\}$$

则由文献[6] 知, $E(t)$ 对集合 $S(\bar{p})$ 一致最终有界。当 $t\geq t_0+T(E(t_0),S(\bar{p}))$ 时

$$E(t)\in S(\bar{p}) \quad (22)$$

其中

$$T(E(t_0),S(\bar{p}))=$$
$$\begin{cases}0, & E(t_0)\in S(\bar{p})\\ \dfrac{p_0-\bar{p}}{d_0}, & E(t_0)\notin S(\bar{p}),\text{但}\\ & (\Phi_u(t),\Phi_{pq}(t))\in I_\Phi(t)\end{cases}$$

由式(22) 知, 当 $t\geq t_0+T(E(t_0),S(\bar{p}))$ 时, $\hat{e}_g(t)$ 收敛到原点的小邻域内。因此 $\hat{e}_g(t)$ 收敛到原点的小邻域内。从而由式(16) 知, $e_g(t)$ 将收敛到原点的小邻域内。□

至此, 得到如下直接自适应模糊广义预测控制算法:

首先选择设计参数 N, N_u, λ, α_1, α_2 和 FLS 的隶属函数, 然后按以下步骤计算:

Step1: 由式(10) 计算 $\hat{e}_g(t)$;

Step2: 由式(11) 和(12) 计算 $\theta_u(t)$ 和 $\theta_{pq}(t)$;

Step3: 由式(8) 计算 $\Delta u(t)$;

Step4: 如果广义误差估计值满足事先设定的误差范围, 计算停止; 否则 $t=t+1$, 返回 Step1。

4 仿 真

考虑如下涡轮机模型离散化后的方程[7]

$$(1+0.987z^{-1})\Delta y(t)=$$
$$(0.1171+0.0949z^{-1})\Delta u(t-1)$$

参考序列 $y_r(t)$ 取幅值为 1, 周期为 400 的方波, 被控对象的初始位置 $[y(-1),y(-2)]=[0,0]$。控制算法中 $N=2$, $N_u=1$, $\lambda=1$, $\alpha_1=0.6$, $\alpha_2=0.1$, 参数向量初值 $\theta_u(0)$ 的每个分量均在区间 $[-0.5,0.5]$ 内随机选取, $\theta_{pq}(0)=[2,2,3]^{\mathrm{T}}$, $M_\theta=2.3$。

为了保证 $y(t)$, $y(t-1)$ 和 $\Delta u(t-1)$ 的取值在一定范围内, 进行如下一一映射[8]

$$\bar{y}(t)=\frac{2.1y(t)}{|y(t)|+1}$$

这样, 对于任意 $y(t)$, $\bar{y}(t)\in(-2.1,2.1)$。对 $y(t-1)$ 和 $\Delta u(t-1)$ 可做同样的映射。模糊逻辑系统 $\hat{f}(X(t)|\theta_u)$ 中, $X(t)=[\bar{y}(t),\bar{y}(t-1),\Delta\bar{u}(t-1)]^{\mathrm{T}}$, 每个输入的隶属函数均取为

$$\mu_1 = \exp\left(-\left(\frac{x+2.1}{0.9}\right)^2\right)$$
$$\mu_2 = \exp(-(x/0.9)^2)$$
$$\mu_3 = \exp\left(-\left(\frac{x+2.1}{0.9}\right)^2\right)$$

这样, 模糊逻辑系统 $f(X(t)|\theta_i)$ 由 27 条规则构成。系统输出的跟踪情况如图 1 所示。

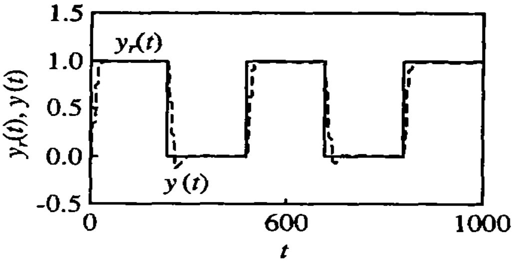

图 1　参考序列 $y_r(t)$ 和输出 $y(t)$

当 $t=250$ 时, 假设系统参数发生了变化, 变为

$$(1+0.8048z^{-1})\Delta y(t) = (0.2982+0.27z^{-1})\Delta u(t-1)$$

当 $t=500$ 时, 假设系统参数又发生了变化, 变为

$$(1+0.4048z^{-1})\Delta y(t) = (0.4982+0.4z^{-1})\Delta u(t-1)$$

此情况下系统输出的跟踪情况如图 2 所示。

从仿真结果可以看出, 本文方法不仅在系统参数未知的情况下能很好地跟踪参考序列, 而且在参数发生变化后, 也具有良好的跟踪性能。

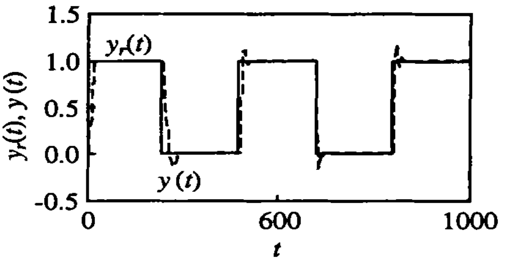

图 2　参考变化后参考序列 $y_r(t)$ 和输出 $y(t)$

5　结　　语

本文针对参数未知线性系统, 提出了直接自适应模糊广义预测控制方法。该方法的主要优点是不必预知系统参数, 因而为更好地解决含参数不确定性对象的广义预测控制问题提供了一种新方法, 同时避免了实时控制中 Diophantine 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 [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. 46-64.

[4] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1993, 1(2): 146-155.

[5] Goodwin G C, Sin K S. *Adaptive Filtering, Predictive and Control*[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1984. 50-57.

[6] Spong M W, Thorp J S, Kleinwaks J M. Robust microprocessor control of robot manipulators[J]. *Automatica*, 1987, 23(3): 373-379.

[7] Gomma H W, Owens D H. Time varying weighting generalized predictive control with prediction to performance, stability and robustness [A]. *Proc IEEE Conf on Decision and Control*[C]. Phoenix, Arizona, 1999. 3706-3711.

[8] Liu G P, Kadirkamanathan V, Billings S. Predictive control for nonlinear systems using neural networks [J]. *Int J Control*, 1998, 71(6): 1119-1132.

(上接第 534 页)

[2] 胡跃明, 刘永清. 非匹配条件下滑动模的鲁棒性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1995, 23(6): 36-41.
(Hu Y M, Liu Y Q. On the robustness of sliding mode under unmatched conditions[J]. *J of South China University of Technology (Natural Science)*, 1995, 23(6): 36-41.)

[3] Man Zhihong, Yu Xinghuo. Terminal sliding mode control of MIMO linear systems[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems — I: Fundamental Theory and Applications*, 1997, 44(11): 1065-1070.

[4] Yu Tang. Terminal sliding mode control for rigid robots[J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 51-56.

[5] Christopher Edwards, Sarah K Spurgeon. *Sliding Mode Control Theory and Applications*[M]. London: Taylor & Francis Ltd, 1998. 50-59.