

# 基于跟踪误差调节的模糊直接广义预测控制

李桂秋<sup>1</sup>, 陈志旺<sup>2</sup>

(1. 常州机电职业技术学院, 江苏常州 213164; 2. 燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对广义预测控制(GPC)计算量大的缺陷,提出一种模糊直接广义预测控制(FDGPC)方法。该方法首先利用中值定理将一类非线性系统等价表示为时变线性系统,然后通过模糊逻辑系统直接设计预测控制器,并利用跟踪误差对控制器参数  $\theta_0$  进行自适应调整。理论证明了该方法可使跟踪误差收敛到原点的一个小邻域内。仿真结果验证了此方法的有效性。

**关键词:** 非线性系统; 广义预测控制; 模糊自适应控制; 稳定性分析

**中图分类号:** TG273      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)03-1009-03

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2010.03.055

## Fuzzy direct generalized predictive control based on tracking error adjustment

LI Gui-qi<sup>1</sup>, CHEN Zhi-wang<sup>2</sup>

(1. Changzhou Institute of Mechatronic Technology, Changzhou Jiangsu 213164, China; 2. Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

**Abstract:** This paper presented a kind of fuzzy direct generalized predictive control (FDGPC) to overcome the shortcoming of large computation load of original GPC. In the method, replaced a class of nonlinear system by a time varying linear system based on the mean value theorem. Then used a fuzzy logic system to design predictive controller directly. Finally adjusted the controller parameter  $\theta_0$  adaptively based on tracking error. It is proved that the proposed method can make the tracking error converge to a small neighborhood of the origin. Simulation results demonstrate the effectiveness of the method.

**Key words:** nonlinear system; GPC; fuzzy adaptive control; stability analysis

### 0 引言

自从 Clarke 等人提出广义预测控制(GPC)算法<sup>[1]</sup>以来,由于该算法对扰动、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。目前,线性系统的广义预测控制已经日趋成熟,而对于非线性系统的广义预测控制,还没有较为系统且行之有效的研究方法,采用近似线性化的方法<sup>[2~12]</sup>用得较多。文献[2]利用微分中值定理将一类非线性系统近似转换成时变的线性系统,然后再辨识系统参数;文献[3]将文献[2]中得到的时变参数利用三次样条函数逼近转换成时不变的参数,再进行辨识;文献[4]给出了可使一类非线性系统近似转换成线性系统的两个假设,即系统对输入的偏导连续和系统满足 Lipschitz 条件,然后将近似的线性系统写成状态方程的形式,利用最小二乘法辨识参数,然而它所辨识的仍是时变参数。需要指出的是文献[2,3]中存在 Diophantine 方程的求解、矩阵求逆计算和最小二乘的递推求解,因此需要较长的在线计算时间。而文献[13,14]提出的预测控制直接算法省掉了 Diophantine 方程所要求的递推求解和矩阵的求逆计算,因此减少了在线计算量。文献[9,15,16]构造了一个性能误差  $e_f$ ,利用在  $t \rightarrow \infty$  时  $e_f(t+1) = 0$ ,采用递推最小二乘直接辨识控制器参数;文献[10]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了一种直接自适应模糊广义预测控制方法,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  $e_g$  (类似于文献[9,15,16]中的  $e_f$ ) 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节,文献[11,12]将文献[10]的方法推广到多变量系统;文献[17~19]将这一思想推广到未知非线性离散系统。

### 1 被控对象模型

设被控对象的输入/输出模型描述如下:

$$y(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), \dots, u(k-n)) \quad (1)$$

其中:  $u(k)$ 、 $y(k)$  分别为系统输入和输出,  $n$  和  $m$  分别是输入和输出的阶次,  $f(\cdot)$  是关于  $y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), \dots, u(k-n)$  的未知非线性连续可微函数,且满足下列条件:

$$a) f(0, \dots, 0, 0, 0, \dots, 0) = 0;$$

$$b) f(\cdot) \text{ 对 } y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), \dots, u(k-n)$$

连续可导,且各偏导数有界,设  $0 < \frac{\partial f}{\partial u(k-n)} \leq k_{\max}$ 。其中:  $k_{\max}$  为常数,  $N$  为预测时域。

**引理 1** 满足条件 a) 和 b) 的非线性系统(1)可等价表示为如下时变线性系统:

$$y(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), \dots, u(k-n)) =$$

收稿日期: 2009-07-15; 修回日期: 2009-08-12

作者简介: 李桂秋(1966-),女,黑龙江佳木斯人,副教授,主要研究方向为计算机应用、计算机教育;陈志旺(1978-),男,河北武清人,讲师,博士,主要研究方向为预测控制、智能信息处理、嵌入式系统应用(czwaaron@ysu.edu.cn)。

$$\sum_{i=1}^m \hat{X}_i(k) y(k-i) + \sum_{i=1}^n \hat{b}_i^l(k) u(k-i) \quad (2)$$

其中:  $\hat{X}_i = \frac{\partial f}{\partial y(k-i)} \Big|_{(y(k-1), \dots, y(k-i+1), \xi_y, 0, \dots, 0)}$   
 $i = 1, \dots, m, \xi_y \in (0, y(k-i))$

$$\hat{b}_i^l(k) = \frac{\partial f}{\partial u(k-i)} \Big|_{(y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-i+1), \xi_u, 0, \dots, 0)}$$

$$i = 1, \dots, n, \xi_u \in (0, u(k-i))$$

证明参见文献[3]。

由引理 1 知被控对象(1)可采用如下时变的模型描述:

$$A(k, z^{-1}) \Delta y(k) = B(k, z^{-1}) \Delta u(k-1) \quad (3)$$

其中  $u(k)$  和  $y(k)$  表示被控对象的输入和输出。

$$A(k, z^{-1}) = 1 + a_1(k)z^{-1} + \dots + a_{n_a}(k)z^{-n_a}$$

$$B(k, z^{-1}) = b_0(k) + b_1(k)z^{-1} + \dots + b_{n_b}(k)z^{-n_b}$$

$n_a = m, n_b = n - 1, \Delta = 1 - z^{-1}$  表示差分算子, 假设被控对象滞后  $d=1$ , 若  $d > 1$  则只需令  $B(k, z^{-1})$  多项式中的前  $d-1$  项系数为零即可。为使被控对象的输出  $y(k+j)$  跟踪参考序列  $y_r(k+j) (j=1, 2, \dots)$ , 取性能指标函数为

$$J = \sum_{j=1}^N (y(k+j) - y_r(k+j))^2 \quad (4)$$

由文献[1]引入 Diophantine 方程, 可得最优预测输出的向量形式为

$$Y = GU + Fy(k) + H\Delta u(k-1) \quad (5)$$

定义  $Y_r = [y_r(k+1), \dots, y_r(k+N)]^T$ , 则性能指标函数(4)可写成

$$J = (Y - Y_r)^T (Y - Y_r) \quad (6)$$

由式(5)和(6), 可得使  $J$  取最小的控制律为  $U = P^{-1} [Y_r - Fy(k) - H\Delta u(k-1)]$ 。令  $P_1^T(k)$  表示  $P^{-1}$  的第一行, 则预测控制律可写成

$$\Delta u(k) = P_1^T(k) [Y_r - Fy(k) - H\Delta u(k-1)] = P(z^{-1}) y_r(k+N) + \alpha(z^{-1}) y(k) + \beta(z^{-1}) \Delta u(k-1) = Z_u(k) \theta_u(k) \quad (7)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (8)$$

## 2 控制器设计

**定理 1** 假定输入论域  $U$  是  $R^n$  上的一个紧集, 对于任意定义在  $U$  上的实连续函数  $g(x)$  和任意的  $\varepsilon > 0$ , 一定存在形如

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M y^l \left[ \prod_{i=1}^n a_i^l \exp\left(-\left(\frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) \right]}{\sum_{l=1}^M \left[ \prod_{i=1}^n a_i^l \exp\left(-\left(\frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) \right]}$$

的模糊系统  $f(x)$  使  $\sup_{x \in U} |f(x) - g(x)| < \varepsilon$  成立。即带有乘积推理机、单值模糊器、中心平均解模糊器和高斯隶属度函数的模糊系统是万能逼近器。

令  $\mu_i^l(x_i) = a_i^l \exp\left(-\left(\frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right)$ ,  $\xi_l(X) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_i^l(x_i)}{\sum_{l=1}^M \prod_{i=1}^n \mu_i^l(x_i)}$ ,  $\theta = [\theta^1 \theta^2 \dots \theta^M]^T$  ( $\theta^l = y^l$ ),  $\xi(X) = [\xi_1(X) \xi_2(X) \dots \xi_M(X)]$ , 则作为万能逼近器的模糊逻辑系统为

$$f(x) = \xi(X) \theta \quad (9)$$

由于被控对象参数未知, 控制律  $\Delta u(k)$  不能根据式(7)获得, 直接利用形如式(9)的模糊逻辑系统逼近式(7), 得如下模糊广义预测控制器:

$$\Delta u(k) = f(Z_u(k) | \theta_u) = \xi(Z_u(k)) \theta_u(k) \quad (10)$$

为保证被控对象输出跟踪给定, 设跟踪误差为

$$e(k) = y(k) - y_r(k) \quad (11)$$

基于误差  $e(k)$  对控制律  $\Delta u(k)$  中的参数  $\theta_u(k)$  进行自适应调节, 取自适应律  $\theta_u(k)$  辨识算法为

$$\theta_u(k) = \begin{cases} \hat{\varphi}(k) & |\hat{\varphi}(k)| \leq M_u \\ P \{ \hat{\varphi}(k) \} & |\hat{\varphi}(k)| > M_u \end{cases} \quad (12)$$

$$\hat{\varphi}(k) = \theta_u(k-N) - \gamma \frac{\xi^T(Z_u(k-N))}{1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))} e(k)$$

其中  $\gamma$  是自适应学习率, 由设计者取定。投影算子  $P\{*\}$  按文献[20]中定义:  $P\{\hat{\varphi}(k)\} = M_u \frac{\hat{\varphi}(k)}{|\hat{\varphi}(k)|}$ 。其中  $M_u$  由设计者取定。得到  $\theta_u(k)$  的值即可得到控制增量  $\Delta u(k)$ , 然后可求控制律  $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ 。

综上可得模糊直接 GPC 控制策略如下:

- 选择初始化参数  $N$  和  $\theta_u(k-N)$ ;
- 由式(11)计算  $e(k)$ ;
- 由式(12)计算  $\theta_u(k)$ ;
- 由式(10)计算  $\Delta u(k)$ , 然后由式(8)算出控制律  $u(k)$ ;
- $k = k + 1$ , 返回 b)。

## 3 稳定及收敛性分析

**定理 2** 设  $k$  时刻存在最优控制增量。  $\Delta u^*(k-N) = \xi(Z_u(k-N)) \theta_u^*$  若系统(1)满足第 1 章中条件 a)b), 预测控制器为式(10), 参数向量  $\theta_u(k)$  的自适应调节律为式(12), 则当  $0 < \gamma \leq 2/k_{\max}$  时,  $\lim_{k \rightarrow \infty} |e(k)| = 0$ 。

证 根据中值定理可得:

$$y(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), u(k-2), \dots, (u(k-N-1) + \Delta u^*(k-N)), \dots, u(k-n)) = f(y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-N-1) + \xi(Z_u(k-N)) \theta_u(k), \dots, u(k-n)) y_r(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), u(k-2), \dots, (u(k-N-1) + \Delta u^*(k-N)), \dots, u(k-n)) = f(y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-N-1) + \xi(Z_u(k-N)) \theta_u^*, \dots, u(k-n))$$

$$\text{则: } e(k) = y(k) - y_r(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), u(k-2), \dots, (u(k-N-1) + \xi(Z_u(k-N)) \theta_u(k)), \dots, u(k-n)) - f(y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-N-1) + \xi(Z_u(k-N)) \theta_u^*, \dots, u(k-n)) = \eta \xi(Z_u(k-N)) \phi(k-N) \quad (13)$$

其中:  $\phi(k) = \theta_u(k) - \theta_u^*$ ,  $\eta = \partial f / \partial u(k-N) |_{\xi_u, \xi_u}$  介于  $u(k-N-1) + \Delta u^*(k-N)$  与  $u(k-N)$  之间。由原系统中条件 b) 可知:  $0 < \eta \leq k_{\max}$ 。

取  $V(k) = \phi^T(k) \phi(k) = \|\phi(k)\|^2$ , 以下分情况讨论。

1) 当式(12)第一行成立时

$$V(k) - V(k-N) = \|\phi(k)\|^2 - \|\phi(k-N)\|^2 = \|\phi(k-N) - \frac{\gamma \xi^T(Z_u(k-N)) e(k)}{1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))}\|^2 - \|\phi(k-N)\|^2 = \frac{\gamma^2 \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N)) e^2(k)}{[1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]} - 2 \frac{\gamma e(k) \xi(Z_u(k-N)) \phi(k-N)}{[1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]}$$

将式(13)代入上式得

$$\begin{aligned}
V(k) - V(k-N) &= \frac{\gamma^2 \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N)) e^2(k)}{[1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]^2} - \\
&2 \frac{\gamma e^2(k)}{\eta [1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]} \leq \\
&\frac{\gamma^2 e^2(k)}{[1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]} - \\
&2 \frac{\gamma e^2(k)}{\eta [1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]} = \\
&\frac{\gamma^2 e^2(k)}{[1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]} \left[ \frac{-2}{\gamma \eta} + 1 \right]
\end{aligned}$$

2)当式(12)第二行成立时,根据投影算法可得

$$\begin{aligned}
&\| \theta_u(k) - \theta_u^* \|^2 < \\
&\| \theta_u(k-N) - \frac{\gamma \xi(Z_u(k-N)) \theta_u(k) e(k)}{1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))} - \theta_u^* \|^2
\end{aligned}$$

因此:

$$\begin{aligned}
&V(k) - V(k-N) < \\
&\| \theta_u(k-N) - \frac{\gamma \xi(Z_u(k-N)) e(k)}{1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))} - \theta_u^* \|^2 - \\
&\| \theta_u(k-N) - \theta_u^* \|^2 = \| \phi(k) \|^2 - \| \phi(k-N) \|^2
\end{aligned}$$

同情况(1),可得

$$\frac{\gamma^2 e^2(k)}{[1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]} \left[ \frac{-2}{\gamma \eta} + 1 \right]$$

综合式(1)(2)所述,可知

$$\frac{\gamma^2 e^2(k)}{[1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]} \left[ \frac{-2}{\gamma \eta} + 1 \right]$$

设:

$$\begin{aligned}
S &= \frac{\gamma^2 e^2(k)}{[1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]} \\
\omega &= \left[ \frac{-2}{\gamma \eta} + 1 \right]
\end{aligned}$$

则

$$V(k) - V(k-N) < S\omega$$

当从1取到l时:

$$\begin{aligned}
V(1) - V(1-N) &< S\omega \\
V(2) - V(2-N) &< S\omega \\
&\vdots \\
V(l) - V(l-N) &< S\omega
\end{aligned}$$

以上各式相加,消去V(1),V(2),...,V(l-N)项可得

$$0 < \sum_{k=1}^l V(k) < \omega \sum_{k=1}^l S + \sum_{k=1}^N V(k-N)$$

对上式取极限后,可得

$$\omega \lim_{l \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^l S > - \sum_{k=1}^N V(k-N)$$

因为  $0 < \eta \leq k_{\max}, 0 < \gamma \leq \frac{2}{k_{\max}}$  所以  $\omega = \left[ \frac{-2}{\gamma \eta} + 1 \right] \leq 0$ , 因此

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^l S < (1 - \frac{2}{\gamma \eta})^{-1} \sum_{k=1}^N V(k-N)$$

其中:V(-N+1),...,V(0)由初始值确定,是有界量,因此

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^l S < (1 - \frac{2}{\gamma \eta})^{-1} \sum_{k=1}^N V(k-N) < \infty$$

根据级数收敛时其通项趋于零的性质可得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\gamma^2 e^2(k)}{[1 + \xi(Z_u(k-N)) \xi^T(Z_u(k-N))]} = 0 \tag{14}$$

由假设条件 b) f(·) 各偏导数有界可知系统的输入 u(k)、输出 y(k) 有界,并 y\_r(k) 有界,因此 1 + ξ(Z\_u(k-N)) ξ^T(Z\_u(k-N)) 是有界量,则由式(14)可得  $\lim_{k \rightarrow \infty} |e(k)| = 0$ 。

4 仿真

考虑如非线性系统<sup>[10]</sup>:  $y(k) = 2.5y(k-1)y(k-2)/[1 + y^2(k-1) + y^2(k-2)] + 1.2u(k-1) + 1.4u(k-2) + 0.7\sin(0.5(y(k-1) + y(k-2)))\cos(0.5(y(k-1) + y(k-2)))$  参考序列  $y_r(k)$  取为正弦波  $2 + \sin(k\pi T/20)$ ;  $T = 0.01, N = 2, W_1 = 50$ ; 自适应率  $\gamma = 0.001$ , 参数向量初值  $\theta_u(-1)$  和  $\theta_u(0)$  的每个分量均取零;  $M_u = 3.6$ 。仿真结果如图1~3所示。

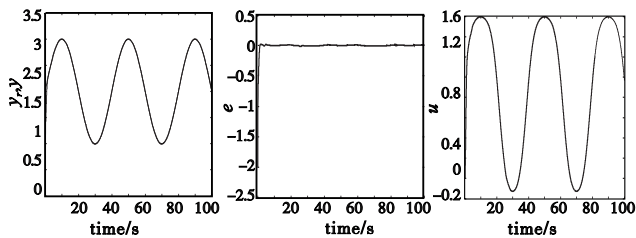


图1 跟踪曲线 图2 e(k)曲线 图3 u(k)曲线

从仿真结果可以看出,尽管被控对象非线性很强,但跟踪效果良好,跟踪误差收敛,与定理1结论一致。图1和2与文献[18]对应仿真图相比,输出误差更小;图3与文献[10]对应仿真图相比,控制器输出的波动更小。

### 5 结束语

本文针对参数未知系统,提出一种基于跟踪误差调节的模糊直接广义预测控制方法。该方法与传统的 GPC 算法相比,避免了 Diophantine 方程的求解和矩阵求逆,只需根据跟踪误差辨识自适应律  $\theta_u$ , 因此步骤较简单;与文献[18]相比,本文的误差求取无须基于未知常数  $g_0$ , 因此更利于实际应用。此外本文所提出的方法稳定收敛,且不基于被控对象数学模型。

### 参考文献:

[1] CLARKE D W, MOHTAD C, TUFFS P S. Generalized predictive control-part I[J]. Automatica, 1987, 23(2):137-148.

[2] 郭健,朱瑞军,胡维礼,等.一类非线性系统的自适应广义预测控制[J].控制与决策,2001,16(3):358-361.

[3] 郭健,陈庆伟,朱瑞军,等.一类非线性系统的自适应预测控制[J].控制理论与应用,2002,19(1):68-70.

[4] TAN K K, LEE T H, LEU F M. Adaptive predictive control of a class of SISO nonlinear systems[J]. Dynamic and Control,2001, 11(2):151-174.

[5] LEE Y I, KOUVARITAKIS B, CANNON M. Constrained receding horizon predictive control for nonlinear systems [J]. Automatica, 2002,38(11):2093-2102.

[6] CHEN W H. Predictive control of general nonlinear systems using approximation [J]. IEE Proc Control Theory and Applications, 2004,151(2):137-144.

[7] LUO Q B, LI Q M, FENG R P. Adaptive predictive control of nonlinear system based on multi-layer recursive method [C]//Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2006:748-751.

[8] 胡致强.基于动态线性逼近的非线性系统预测控制[J].电机与控制学报,2001,5(3):185-189. (下转第1014页)

而且绝大多数情况下只能得到正常的训练样本,有标定的异常数据很难获得。这样在实用时就会产生误报,在实用中也有一定的困难。本实验采用 UNM 提供的 Login、Ps、wu-ftpd 进程数据集<sup>[10]</sup>对考试系统中基于粗糙集理论的动态防御技术部分进行实验。实验时先对数据进行切割处理得到序列段,将其中 10% 的序列段作为正常训练集,剩余 90% 作为正常测试集,采用不同的窗口大小,不同步幅大小多次构建模型,比较窗口大小与检测效率关系。实验采用的部分数据集如表 1 所示,实验中程序的部分异常度比较如表 2 所示。从表 2 中可以看出异常序列的异常度都明显高于正常序列的异常度。根据异常度的差异,选择适当的阈值可以准确区分异常状态。实验结果表明,在窗口长度取 21 时预测相对最稳定,基于粗糙集理论的检测方法能更快速区分正常和异常行为,考试系统的安全相应地得到了改善。

表 1 实验用的数据集

	正常序列	异常序列
login	两条 login	两条木马程序 (recovered Trojan login data, homegrown Trojan)
	正常序列	login data)
ps	两条 ps	两条木马程序 (recovered Trojan login data, homegrown Trojan)
	正常序列	login data)
named	一条 named	一条 buffer overflow
	正常序列	攻击序列
wu-ftpd	两条 ftpd2.4	一条远程单字
	正常进程	节溢出攻击序列

表 2 程序的异常度比较

	窗口大小	7	11	15	21	25
login	normal	0.31	1.18	0.31	1.57	0.83
	homegrown	1.39	4.82	3.75	7.50	3.54
	recovered	9.27	11.23	5.48	9.27	7.82
ps	normal	0.41	0.45	0.63	1.90	1.2
	homegrown	1.93	2.38	2.49	5.78	4.85
	recovered	3.66	6.10	4.56	6.50	5.29
named	normal	1.34	0.84	1.59	0.92	1.21
	abnormal	83.24	80.5	80.07	81.6	80.09
	normal	1.53	2.26	3.67	2.40	2.97
ftpd	normal	1.53	2.26	3.67	2.40	2.97
	abnormal	38.33	34.56	34.54	36.03	35.51

## 5 结束语

本文在将传统静态安全防御技术与动态防御技术相结合的基础上,引入粗糙集理论来更快更有效地识别考试系统的正常和异常行为,保护考试系统的安全,使系统能更好地防御外来的异常情况。该系统在实时检测中对系统性能的影响很小,是一种高效低负荷的实时检测方法。不过怎样提高检测的准确性和及时性,出现了报警怎样对其进行分析,用户如何处理报警,如何更好地实现安全系统的动态平衡等都是以后需要解决的问题。

### 参考文献:

[1] 张萍,王建忠,余,等. 免疫网络安全考试系统[J]. 计算机应用研究,2007,24(8):162-164.

[2] PAWLAK Z. Rough sets-theoretical aspect of reasoning about data [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,1991.

[3] 张文修,吴伟志,等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[4] FORREST S, HOFMEYER S A, SOMAYAJI A. Computer immunology[J]. Communications of the ACM, 1997,40(10):88-96.

[5] HOFMEYER S A, FORREST S. Immunity by design: an artificial immune system[C]//Proc of GECCO'99. 1999.

[6] HOFMEYER S A, FORREST S. Architecture for an artificial immune system[J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(4):443-473.

[7] FORREST S, HOFMEYER S A. Immunology as processing[C]//SEGAL L A, COHEN I R. Proc of Design Principles for Immune Systems & Other Distributed Autonomous Systems. Oxford: Oxford University Press, 2000.

[8] HOFMEYER. An immunological model of distributed detection and its application to computer security [D]. Mexico: University of New Mexico,1999.

[9] LEE W, STOLFO S, CHAN P. Learning patterns from unix process executiontraces for intrusion detection[C]//Proc of AAAI'97 Workshop on AI Methods in Fraud and Risk Management. 1997: 50-56.

[10] [EB/OL]. http://www.cs.num.edu/~immsec/.

(上接第 1011 页)

[9] 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.

[10] 胡耀华, 贾欣乐. 广义预测控制的直接算法[J]. 控制与决策, 2000,15(2):221-223.

[11] RAMOND G, DUMUR D, BOUCHER P. Direct adaptive constrained receding horizon predictive control with conditional to motor drives with variable inertia[C]//Proc of the 38th IEEE Conference on Decision and Control. 1999:755-760.

[12] RAMOND G, DUMUR D, BOUCHER P. Application of direct adaptive generalized predictive control to an automatic gear box with a continuous variable transmission[C]//Proc of IEEE International Conference on Control Applications. 2000:303-308.

[13] PIMENTA K B, ROSARIO J M, DUMUR D. Application of direct adaptive generalized predictive control (GPCAD) to a robotic joint

[J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2003,2:1011-1016.

[14] 师五喜, 霍伟, 吴宏鑫. 一类未知非线性离散系统的直接自适应模糊预测控制[J]. 自动化学报, 2004,30(5):664-670.

[15] 师五喜. 未知参数多变量线性系统自适应模糊广义预测控制[J]. 控制与决策, 2009,34(2):23-26.

[16] 师五喜. 自适应模糊广义预测控制研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003:53.

[17] 陈志旺, 王洪瑞. 非线性模糊自适应直接广义预测控制[J]. 电机与控制学报, 2007,11(1): 55-59.

[18] 师五喜. 基于跟踪误差调节的非线性自适应模糊预测控制[J]. 控制与决策, 2006,21(3):297-304.

[19] 王洪瑞, 陈志旺, 李建雄. 非线性系统参数自适应直接广义预测控制[J]. 自动化学报, 2007,33(10):1110-1114.

[20] GOODWIN G C, SIN K S. Adaptive filtering, predictive and control [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1984:91-94.