



# 指令跟踪自适应广义预测控制及其应用<sup>1)</sup>

周德云 陈新海

(西北工业大学电子工程系 西安 710072)

## 摘 要

现有的广义预测控制系统其闭环性能受可调参数影响较大, 它的目标函数无法直接规定闭环性能。该文提出一种具有独立跟踪和调节目标的新型自适应广义预测控制算法, 并将其应用于快速时变的导弹控制系统设计中。这种算法利用参考模型规定对指令信号的跟踪性能, 减少了可调参数对闭环性能的影响。仿真结果证实了该算法的有效性。

**关键词:** 自适应控制, 预测控制, 参考模型, 时变系统。

## 1 引言

广义预测控制集中了各种远程预测控制算法的优点, 具有较多的可调参数, 有利于改善系统的控制品质。但是, 另一方面人们逐渐发现广义预测控制的弱点: 闭环系统响应特性受可调参数影响较大, 它的目标函数无法直接规定闭环性能<sup>[1]</sup>。本文提出一种具有独立跟踪和调节目标的广义预测控制算法, 利用参考模型实现对指令信号的跟踪性能, 利用跟踪误差的多步预测滚动优化方法解决对扰动的抑制问题, 从而减少了可调参数对闭环系统响应特性的影响。本文将这一新的自适应预测控制算法应用于快速时变的导弹控制系统设计中, 数字仿真结果表明: 这种自适应预测控制算法具有很好的指令跟踪性能、强的鲁棒性和抗干扰能力。

## 2 指令跟踪广义预测控制算法

设被控对象由下列滤波 GCARMA 模型给出<sup>[2]</sup>

$$A(z^{-1})D(z^{-1})y_f(t) = B(z^{-1})D(z^{-1})u_f(t-1) + C(z^{-1})\omega(t) \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b} \end{aligned}$$

1) 本文受国家教委博士点基金资助。  
本文于1990年8月16日收到

$$\begin{aligned} C(z^{-1}) &= 1 + c_1 z^{-1} + \cdots + c_{n_c} z^{-n_c} \\ D(z^{-1}) &= 1 + d_1 z^{-1} + \cdots + d_{n_d} z^{-n_d} \end{aligned}$$

其中滤波输出  $y_f(t)$  和滤波输入  $u_f(t)$  分别由被控对象的输出  $y(t)$  和输入  $u(t)$  经过同一滤波器  $W(z^{-1}) = A_f(z^{-1})/C_f(z^{-1})$  滤波得到;  $D(z^{-1})$  为负载扰动的内模多项式,  $C(z^{-1})$ 、 $C_f(z^{-1})$ 、 $A_f(z^{-1})$  为稳定的设计多项式。

为了使跟踪和调节问题独立,目标函数取为跟踪误差的多步目标函数

$$J = E \left\{ \sum_{k=1}^N \varepsilon_{f_y}^2(t+k) + \lambda \sum_{k=1}^{N_u} \varepsilon_{f_u}^2(t+k-1) \mid F_t \right\} \quad (2)$$

式中滤波输出和滤波输入的跟踪误差

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{f_y}(t) &= y_f(t) - y_f^*(t) \\ \varepsilon_{f_u}(t) &= u_f(t) - u_f^*(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这里  $v_f(t) = D(z^{-1})u_f(t)$ ,  $v_f^*(t) = D(z^{-1})u_f^*(t)$ , 其中参考模型的滤波输出  $y_f^*(t)$  和滤波输入  $u_f^*(t)$  分别由参考模型的输出  $y^*(t)$  和输入  $u^*(t)$  经过同一滤波器  $W(z^{-1})$  滤波得到。参考输出和输入由以下模型给出

$$\left. \begin{aligned} P(z^{-1})y^*(t) &= R(z^{-1})r(t) \\ Q(z^{-1})u^*(t) &= S(z^{-1})r(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

这里  $r(t)$  是指令信号;多项式  $P(z^{-1})$ 、 $Q(z^{-1})$ 、 $R(z^{-1})$ 、 $S(z^{-1})$  可按跟踪性能要求选为

$$\left. \begin{aligned} P(z^{-1}) &= A_r(z^{-1}), \quad R(z^{-1}) = z^{-1}B_r(z^{-1}) \\ Q(z^{-1}) &= A_r(z^{-1})B(z^{-1}), \quad S(z^{-1}) = A(z^{-1})B_r(z^{-1}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

或者

$$\left. \begin{aligned} P(z^{-1}) &= A_r(z^{-1}), \quad R(z^{-1}) = z^{-1}B_r(z^{-1})B(z^{-1}) \\ Q(z^{-1}) &= A_r(z^{-1}), \quad S(z^{-1}) = B_r(z^{-1})A(z^{-1}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中  $A_r(z^{-1})$  为首一多项式,对应于希望的跟踪特性,  $B_r(z^{-1})$  为另一设计多项式,以保证闭环系统具有单位稳态增益。

为了使上述控制问题简化为标准形式的广义预测控制问题,将(1)式两边同减  $A(z^{-1})D(z^{-1})y_f^*(t)$ , 并考虑(5)式和(6)式得到

$$A(z^{-1})D(z^{-1})\varepsilon_{f_y}(t) = B(z^{-1})\varepsilon_{f_u}(t-1) + C(z^{-1})\omega(t) \quad (7)$$

这样,控制问题可以描述为:在模型(7)式约束下,求出使目标函数(2)式达到极小的广义预测控制规律。

引入 Diophantine 方程

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})D(z^{-1})E_k(z^{-1}) + z^{-k}F_k(z^{-1}) \quad (8)$$

$$B(z^{-1})E_k(z^{-1}) = C(z^{-1})G_k(z^{-1}) + z^{-k}\Gamma_k(z^{-1}) \quad (9)$$

采用类似于文献[2]的方法,滚动优化目标函数(2)式可得指令跟踪广义预测控制

$$u_f(t) = u_f^*(t) + \varepsilon_{f_u}(t)/D(z^{-1}) \quad (10)$$

式中

$$C(z^{-1})\varepsilon_{f_u}(t) = -\mathbf{H}^T \mathbf{\Gamma}(z^{-1})\varepsilon_{f_u}(t-1) - \mathbf{H}^T \mathbf{F}(z^{-1})\varepsilon_{f_y}(t) \quad (11)$$

这里多项式向量  $\mathbf{\Gamma}(z^{-1}) = [\Gamma_1(z^{-1}), \cdots, \Gamma_N(z^{-1})]^T$ ,  $\mathbf{F}(z^{-1}) = [F_1(z^{-1}), \cdots, F_N(z^{-1})]^T$ , 向量  $\mathbf{H}$  是矩阵  $(\mathbf{Q}^T \mathbf{Q} + \lambda I)^{-1} \mathbf{Q}^T$  的第一行,其中矩阵  $\mathbf{Q}$  是由多项式  $G_k(z^{-1})$

的系数组成的准下三角矩阵<sup>[2]</sup>。

下面分析闭环系统特性。由(11)式可得下列形式的指令跟踪广义预测控制规律

$$\bar{S}(z^{-1})\varepsilon_{f_u}(t) + \bar{T}(z^{-1})\varepsilon_{f_y}(t) = 0 \quad (12)$$

式中

$$\bar{S}(z^{-1}) = C(z^{-1}) + z^{-1}H^T\Gamma(z^{-1})$$

$$\bar{T}(z^{-1}) = H^TF(z^{-1})$$

将控制规律(12)式代入模型(7)式获得闭环系统

$$A^*(z^{-1})\varepsilon_{f_y}(t) = C(z^{-1})\bar{S}(z^{-1})\omega(t) \quad (13)$$

$$A^*(z^{-1})\varepsilon_{f_u}(t) = -C(z^{-1})\bar{T}(z^{-1})\omega(t) \quad (14)$$

式中闭环系统特征方程

$$A^*(z^{-1}) = A(z^{-1})D(z^{-1})\bar{S}(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})\bar{T}(z^{-1}) = C(z^{-1})A_1^*(z^{-1}) \quad (15)$$

其中

$$A_1^*(z^{-1}) = A(z^{-1})D(z^{-1})[1 - z^{N-1}H^TG(z^{-1})] + z^{N-1}B(z^{-1})M(z^{-1}) \quad (16)$$

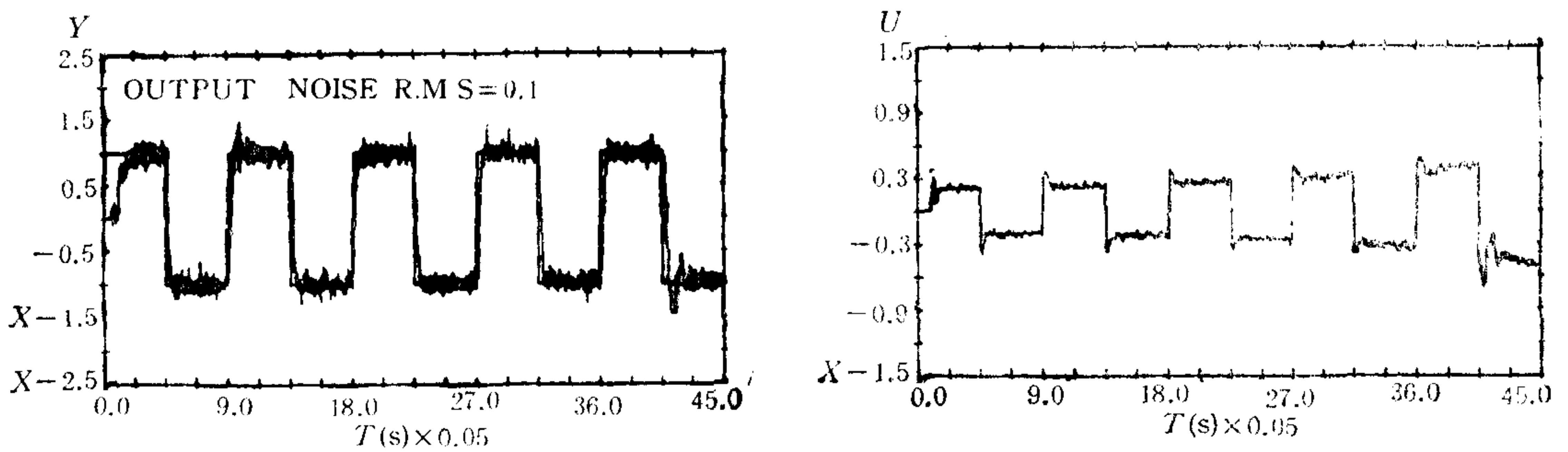
这里定义多项式向量  $G(z^{-1}) = [z^{-N+1}G_1(z^{-1}), \dots, z^0G_N(z^{-1})]^T$ ,  $Z(z^{-1}) = [z^{-N+1}, \dots, z^0]^T$ , 多项式  $M(z^{-1}) = H^TZ(z^{-1})$ 。由(13)式可得闭环系统输出表达式为

$$y(t) = y^*(t) + \frac{\bar{S}(z^{-1})C_f(z^{-1})}{A_1^*(z^{-1})A_f(z^{-1})}\omega(t) \quad (17)$$

由此可见: 这种新的广义预测控制规律, 使得闭环系统输出响应由伺服跟踪和调节误差互相独立两项组成, 跟踪和调节特性可以各自进行综合, 两者是解耦的。对指令信号的伺服跟踪性能由参考模型(4)~(6)式确定, 不受可调参数  $N, N_u$  和  $\lambda$  的影响, 选取适当的参考模型可以获得对指令信号的希望跟踪响应; 对扰动的调节性能受可调参数  $N, N_u$  和  $\lambda$  的影响, 适当选取观测多项式  $C(z^{-1})$  和滤波多项式  $C_f(z^{-1})$ 、 $A_f(z^{-1})$  可减少可调参数和被控对象对调节性能的影响, 获得对扰动有满意的调节响应。关于闭环系统的稳定性分析有类似于文献[3]的结论。

### 3 仿真与应用研究

在文献[4]中, 作者进行了大量的仿真研究, 说明了该算法的有效性。本文着重探讨工



(a) 系统输出

(b) 系统输入

图1 地空导弹自动驾驶仪仿真曲线(以(5)式为参考模型)

程应用研究。导弹从低空到高空飞向目标的攻击过程中,表现为一个参数变化较快的时变系统,以某型战术导弹自动驾驶仪的阻尼回路作为被控对象,控制目的是使对象输出(导弹过载)迅速而准确地跟踪地面站发出的控制指令信号、图 1 和图 2 分别给出了以(5)式和(6)式为参考模型的指令跟踪自适应广义预测控制的仿真结果,可见所设计的导弹控制系统具有良好的指令跟踪性能和强的抗干扰能力。

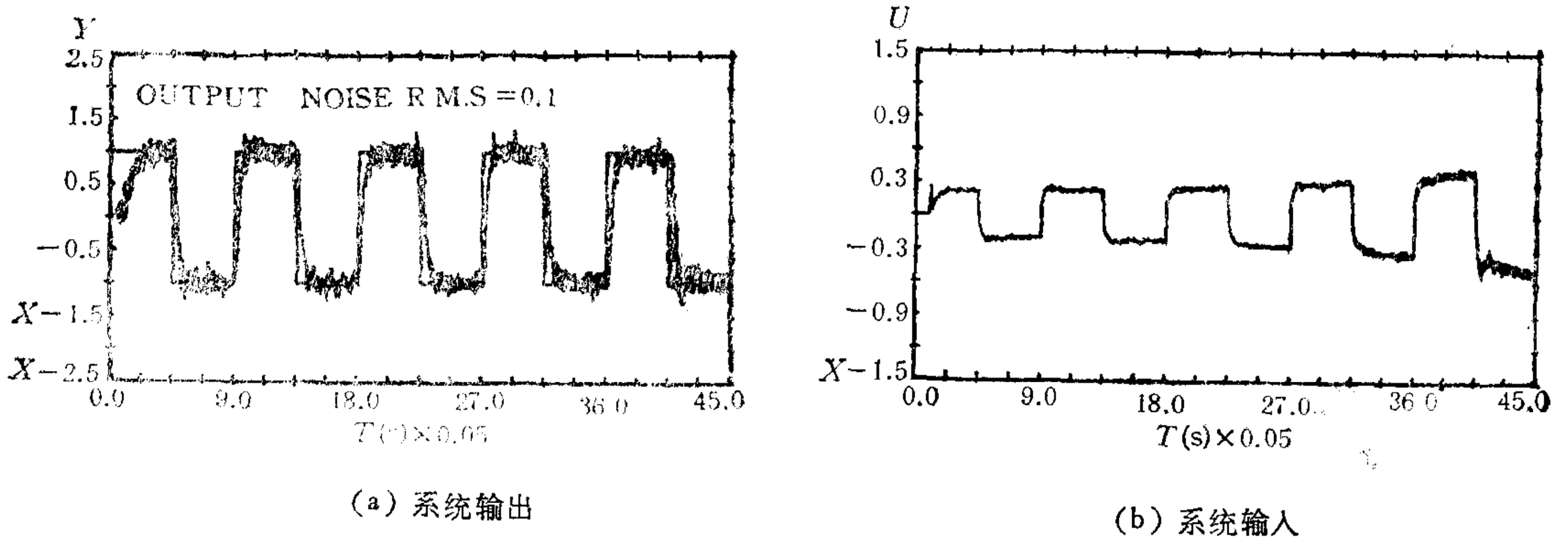


图 2 地空导弹自动驾驶仪仿真曲线(以(6)式为参考模型)

### 参 考 文 献

- [1] Clarke D W and Mohtadi C. Properties of Generalized Predictive Control. *Automatica*, 1989, 25 (6): 859—875.
- [2] 周德云,陈新海,佟明安. 广义预测鲁棒自适应控制. *控制与决策*,1991,6(4): 265—270.
- [3] 周德云,佟明安,陈新海. 多变量广义预测控制系统的稳定性和鲁棒性. *西北工业大学学报*, 1993, 11(4): 481—490.
- [4] 周德云. 鲁棒自适应广义预测控制理论及其应用. 西北工业大学博士论文, 1991年.

# COMMAND-FOLLOWING ADAPTIVE GENERALIZED PREDICTIVE CONTROLLER AND IT'S APPLICATION

ZHOU DEYUN CHEN XINHAI

*(Department of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)*

## ABSTRACT

One drawback in the standard formulation of generalized predictive control (GPC) is that stability and performance of the closed-loop system are strongly depending on the tuning parameters in the cost-function. It is presented in this paper that a new adaptive generalized predictive controller which enables the tracking and regulation performance to be treated separately. Its application in the design of the time-varying control system of a missile is given. The new controller proposed here enables the designer to utilize the tracking dynamics obtained from a reference model. This gives the designer more freedom in the choice of tuning parameters to achieve user-specifications on both tracking and regulation performance. Simulation illustrates the effectiveness and good performance of the controller.

**Key words:** Adaptive control, predictive control, Multiple model reference, time-varying system.