



# 典型大时变时滞工业过程的 鲁棒数字 PII 调节控制<sup>1)</sup>

刘翔 王文海 熊斌 孙优贤

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室 杭州 310027)

(浙江大学控制系 杭州 310027)

(E-mail: xliu@iipc.zju.edu.cn)

**摘要** 通过分析典型大时变时滞工业过程的特性,提出了一种新的数字 PII 鲁棒调节控制器的设计方法.应用这种数字鲁棒控制器,闭环系统可具有大时变时滞鲁棒镇定性,且完全抑制定值负载干扰.数字仿真验证了该方法的有效性.

**关键词** 鲁棒性,时滞,干扰抑制

**中图分类号** TP13

## ROBUST DIGITAL PII ADJUSTING CONTROL FOR A GENERAL INDUSTRIAL PROCESS WITH LARGE TIME-VARYING TIME DELAY

LIU Xiang WANG Wen-Hai XIONG Bin SUN You-Xian

(National Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Department of Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(E-mail: xliu@iipc.zju.edu.cn)

**Abstract** A new design method of digital PII robust adjusting controller for a general process control system with large time-varying time delay is developed by studying its properties. By means of this digital robust controller the closed-loop system will enjoy both robust stability for the large time-varying time delay and complete set-point load disturbance rejection. Digital simulations show that the results are effective.

**Key words** Robustness, time delay, disturbance rejection

## 1 引言

大时滞系统的控制问题是控制理论研究的一个热点问题,也是过程控制工业中一个较

1) 国家自然科学基金(69934030)资助

收稿日期 2000-04-04 收修改稿日期 2000-06-18

典型的控制问题.著名的 Smith 预估器<sup>[1]</sup>就是解决这一问题的一个常用的方法,但是在时滞是时变的工况下,Smith 预估器并不能很好地处理时变时滞,因此,其工业应用范围受到限制.近年来,许多知名的控制专家针对这一问题,研究出改进型的 Smith 预估器,力图得到具有一定鲁棒稳定性的控制方法<sup>[2,3]</sup>;也有的学者直接研究合理的整定 PID 控制器的参数,以得到控制典型时变时滞工业系统的控制方法<sup>[4]</sup>.由于从根本上分析,Smith 预估器是一种针对系统时滞的内模控制器,因此,其闭环系统的时滞鲁棒稳定性受到约束,也就是说,对于大时变时滞系统的鲁棒镇定问题,并不适于应用 Smith 预估器控制.

工业过程控制系统中常见的时滞系统有其特有的特征,主要是大时滞、时变、以及负载干扰等复杂特性,研究对这类系统适用于计算机控制的数字鲁棒控制算法,是本文要解决的主要问题,即对于大时变时滞及负载干扰的不同性质,试图给出一种 PII 数字调节器的设计方法,以实现闭环系统在已知的大时变时滞范围内,及确定性定值负载干扰的影响下的无静差鲁棒调节控制.

## 2 定义、定理及系统描述

**定义 1.**  $t$ -变换:设  $x(k)$  是实数或复数因果序列,且对于从  $k=0$  到  $k=+\infty$  的所有整数均有定义,则  $x(k)$  的  $t$ -变换定义为

$$\hat{x} = \sum_{k=0}^{+\infty} x(k)t^k \quad (1)$$

它是复变量  $t$  的复变函数.与一般的  $z$ -变换相比较, $t$ -变换中的复因子  $t$  等价于  $z$ -变换中的复因子  $z^{-1}$ .因此,按此定义,一个稳定的实有理系统的所有特征根均在单位圆外.

**定理 1.** 实系数多项式  $\hat{f} = \hat{b}t^d + M\hat{a}(1-t)$ ,  $\hat{b} = b_0 + b_1t + \dots + b_mt^m$ ,  $\hat{a} = a_0 + a_1t + \dots + a_nt^n$ ,有限正整数  $d \geq 0$ ,其中多项式  $\hat{a}$  的所有特征根均在单位圆外,则总存在一个足够大的正实数  $M_0 > 0$ ,使得当正实数  $M \geq M_0$  时,多项式  $\hat{f}$  的所有特征根均在单位圆外的充要条件是: $\hat{a}(1)\hat{b}(1) > 0$ .

**证明.** 首先,由根轨迹的一般知识知当正实数  $M$  取值充分大时,位于复平面上  $(1,0)$  点的开环极点  $t_0 = 1$  将摄动到实轴上  $z_0 = 1 + \epsilon$  处,即总存在一个充分大的正实数  $M_0 > 0$ ,使得多项式  $\hat{f}$  有一个根位于实轴上  $z_0 = 1 + \epsilon$  处,且有  $M_0 \rightarrow +\infty$  时,  $\epsilon \rightarrow 0$ .

由  $\hat{f}(z_0) = [\hat{b}(1) + \hat{b}_\epsilon(\epsilon)](1 + \epsilon)^d - M_0(\hat{a}(1) + \hat{a}_\epsilon(\epsilon))\epsilon = 0$  及  $\epsilon \rightarrow 0$  时,  $\hat{b}_\epsilon(\epsilon) \rightarrow 0$ ,  $\hat{a}_\epsilon(\epsilon) \rightarrow 0$ ,  $(1 + \epsilon)^d \rightarrow 1$ ,得到

$$\epsilon \rightarrow \frac{\hat{b}(1)}{M_0\hat{a}(1)} \quad (2)$$

由于多项式  $\hat{a}$  的所有根位于复平面单位圆外,所以  $\hat{a}(1) \neq 0$ ;又  $M_0 > 0$ ,因此,当且仅当  $\hat{a}(1)\hat{b}(1) > 0$  时,  $\epsilon > 0$ ,即特征根  $z_0$  位于单位圆外.其次,将证明多项式  $\hat{f}$  的其它根也位于单位圆外.

反设多项式  $\hat{f}$  有一个根  $t_1$  位于单位圆内及  $|t_1| \leq 1 (t_1 \neq 1)$ .由于  $\hat{f}(t_1) = 0$ ,

所以  $|\hat{b}(t_1)t_1^d| = |\hat{b}(t_1)||t_1^d| = M|(1 - t_1)\hat{a}(t_1)|;$

又  $|\hat{b}(t_1)t_1^d| \leq |\hat{b}(t_1)|,$

所以  $M|(1 - t_1)\hat{a}(t_1)| \leq |\hat{b}(t_1)|.$

注意到  $1-t_1 \neq 0, \hat{a}(t_1) \neq 0$ , 所以

$$M \leq \frac{|\hat{b}(t_1)|}{|(1-t_1)\hat{a}(t_1)|} \tag{3}$$

因此,若选择一个充分大的正实数  $M_0 > \frac{|\hat{b}(t_1)|}{|1-t_1||\hat{a}(t_1)|}$ , 则当  $M \geq M_0$  时, 得到与(3)式矛盾的结果. 综上所述, 定理得证. 证毕.

由定理 1 的证明过程不难导出, 当正实数  $M$  足够大时, 多项式  $\hat{f}$  的所有特征根中, 最接近单位圆的根是  $1+\epsilon$ . 此时,  $M$  与  $\epsilon$  及正整数  $d$  之间存在以下关系

$$M = \frac{\hat{b}(1)(1+\epsilon)^d}{\epsilon\hat{a}(1)} \tag{4}$$

显然, 若在指定的摄动小参数  $\epsilon$  下, 对于一个正整数  $d_0$  确定了一个相应的正实数  $M_0$ , 使得多项式  $\hat{f}$  的所有特征根均在单位圆外, 则对于所有的正整数  $d \leq d_0$ ,  $\hat{f}$  的所有特征根也在单位圆外.

系统描述: 一个典型的大时滞工业过程是由以下传递函数的集合中的元素描述的

$$\left\{ G(s) \mid G(s) \in H, H: \frac{ke^{-\tau s}}{Ts+1}, \frac{ke^{-\tau s}}{Ts}, \frac{ke^{-\tau s}}{s(Ts+1)}, \frac{ke^{-\tau s}}{(T_1s+1)(T_2s+1)}, \frac{ke^{-\tau s}}{s(T_1s+1)(T_2s+1)} \right\} \tag{5}$$

这里  $\tau, T, T_1, T_2$  均是正实数,  $k$  是非零实系数. 考虑零阶保持器, 对于任意的采样周期  $T_0 > 0$ , 集合(5)中的所有元素的特征根的集合是

$$\{t \mid t \in I, I: 1, e^{T_0/T}, e^{T_0/T_1}, e^{T_0/T_2}\} \tag{6}$$

显然, 集合(6)中, 除了元素 1 以外, 所有元素均在单位圆外.

离散化时, 大时滞  $e^{-\tau s}$  离散化为  $t^d, d = \text{int}\left(\frac{\tau}{T_0}\right)$ , 因此, 正实数  $\tau$  与正整数  $d$  存在不等式关系

$$dT_0 \leq \tau < (d+1)T_0 \tag{7}$$

因此, 即使大时滞不发生时变摄动,  $\tau$  与  $d$  仍有可能因离散化而产生匹配误差.

### 3 鲁棒数字 PII 控制器设计

图 1 给出了鲁棒数字 PII 控制器系统的结构图, 其中  $T_0$  是采样周期,  $G_h(s)$  是零阶保持器,  $f(s)$  是定值扰动信号的  $s$ -变换,  $f(s) = \frac{f_0}{s}$ ,  $\hat{r}$  是设定值输入的  $t$ -变换,  $\hat{r} = \frac{r_0}{1-t}$ . 数字 PI I 控制器的设计形式是

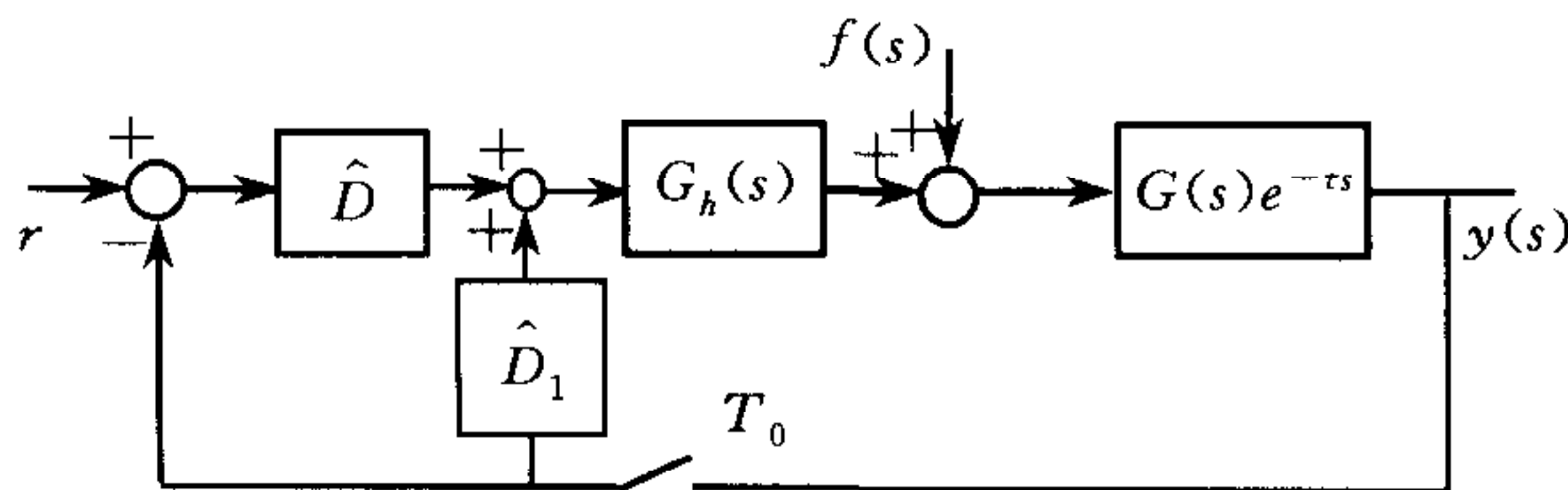


图 1 数字 PII 控制器系统的结构图

$$\hat{D} = \frac{\hat{k}}{1-t} = \frac{k_p(c_0+c_1t)+k_1}{1-t} \tag{8}$$

$$\hat{D}_1 = \frac{k_1}{1-t} \tag{9}$$

$k_p, k_1, c_0, c_1$  为待整定的 PII 控制器参数.

由图 1, 系统输出的  $t$ -变换为

$$\hat{y} = \frac{\hat{D}(G\hat{G}_h)t^d}{1 + (\hat{D} - \hat{D}_1)(G\hat{G}_h)t^d} \hat{r} + \frac{(G\hat{f})t^d}{1 + (\hat{D} - \hat{D}_1)(G\hat{G}_h)t^d} \quad (10)$$

$d$  是时滞  $\tau$  的离散形式. 设  $(G\hat{G}_h) = \frac{\hat{b}}{\hat{a}}$ ,  $(G\hat{f}) = \frac{\hat{b}_f}{\hat{a}_f}$ , 容易导出, 两个  $t$ -变换存在关系

$$\begin{cases} \hat{a} = \hat{a}_f \\ \hat{b} = (1 - t)\hat{b}_f/f_0 \end{cases} \quad (11)$$

将(11)式代入(10)式化简, 得到

$$\hat{y} = \frac{\hat{b}\hat{k}t^d}{(1 - t)\hat{a} + \hat{b}(\hat{k} - k_1)t^d} \hat{r} + \frac{f_0\hat{b}t^d}{(1 - t)\hat{a} + \hat{b}(\hat{k} - k_1)t^d} \frac{1}{1 - t} = \frac{\hat{b}(\hat{k} + f_0/r_0)t^d}{(1 - t)\hat{a} + \hat{b}(\hat{k} - k_1)t^d} \hat{r} \quad (12)$$

因此, 为保证系统输出的稳态精度, 需选择

$$k_1 = -\frac{f_0}{r_0} \quad (13)$$

当  $\hat{a}$  的所有特征根均在单位圆外时, 选择适当的控制器参数  $\hat{k}(1)$ , 使得

$$\hat{a}(1)\hat{b}(1)(\hat{k}(1) + f_0/r_0) > 0 \quad (14)$$

且  $k_p$  满足

$$k_p = v \operatorname{sgn} \left\{ \hat{a}(1)\hat{b}(1) \left( \sum_{i=0}^1 c_i \right) \right\}, \quad 0 < v \leq v_0 \quad (15)$$

$$v_0 = \varepsilon \frac{|\hat{a}(1)|}{\left| \hat{b}(1) \sum_{i=0}^1 c_i \right| (1 + \varepsilon)^{d_0}} \quad (16)$$

$\varepsilon$  是指定的摄动小正参数,  $\varepsilon > 0$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$ ,  $d_0$  是大时变时滞离散化值的上界, 则由定理 1 知, 对于所有的  $d \leq d_0$ , 闭环系统(12)的所有特征根均在单位圆外, 系统实现大时变时滞的鲁棒稳定. 控制器参数  $c_0, c_1$  的选择可接近  $\hat{a}$  中最靠近单位圆的极点, 以实现超前校正, 改善系统的动态性能.

至此, 根据典型大时变时滞工业过程的特性, 及经带零阶保持器的 A/D 离散化后的特点, 给出了针对大时变时滞的鲁棒 PII 控制器的基本设计方法, 其主要控制思想是用“小”比例+积分控制实现典型大时变时滞工业过程的大时变时滞的鲁棒调节控制, 再根据“小”比例对系统负载干扰抑制性较弱的缺点, 提出并证明加入修正积分控制器完全抑制定值负载干扰的控制策略, 积分控制器的幅值可根据定值负载干扰的幅值变化在线调整. 整个鲁棒控制器的设计形式是数字化的, 可以直接嵌入各种计算机控制器的控制算法模块中. 以下用实例说明并验证控制算法的设计过程及控制效果.

## 4 实例仿真

某造纸过程黑液蒸发工段的输出黑液浓度与输入蒸气压力之间的数学模型是

$$G(s) = \frac{62.5e^{-5s}}{1 + 10s}.$$

大时变时滞的摄动区间是  $[2, 20]$ , 负载干扰信号为  $f(s) = 0.01/s$ , 采样周期取为  $T_0 = 3$ , 考虑零阶保持器, 对于单位阶跃输入信号, 按本文介绍的方法设计控制器如下

$$\hat{D} = \frac{7.7 \times 10^{-3} \times (1 - 0.92t) - 0.01}{1 - t}, \quad \hat{D}_1 = -0.01/(1 - t).$$

时滞  $\tau$  为 18 和 12 时, 控制系统的单位阶跃响应曲线如图 2 中曲线所示. 仿真结果表明, PII 控制器实现了大时变时滞的鲁棒调节控制. 为说明对确定性负载干扰的抑止, 图 3 给出了系统在时间  $x=180$  时加入负载干扰信号  $f(s)$ , 并在  $x=195$  时, 应用 PII 控制器的控制结果 ( $x < 180$  时, 系统由鲁棒 PI 控制器控制). 需要说明的是, 当负载干扰的幅值是时变的时, 可在线调整控制器参数  $k_1$ , 保证系统输出稳态无静差.

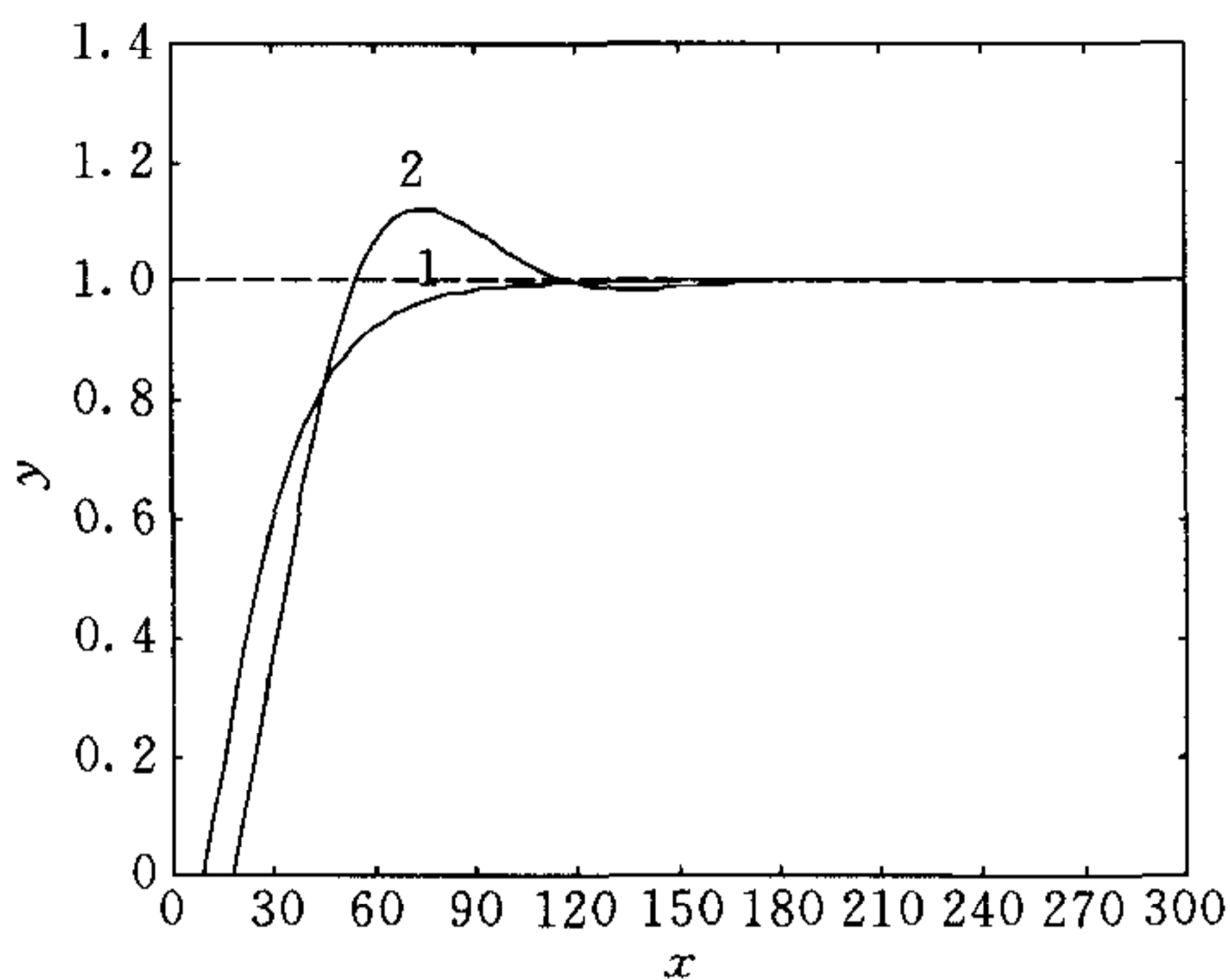


图 2 闭环系统单位阶跃响应曲线

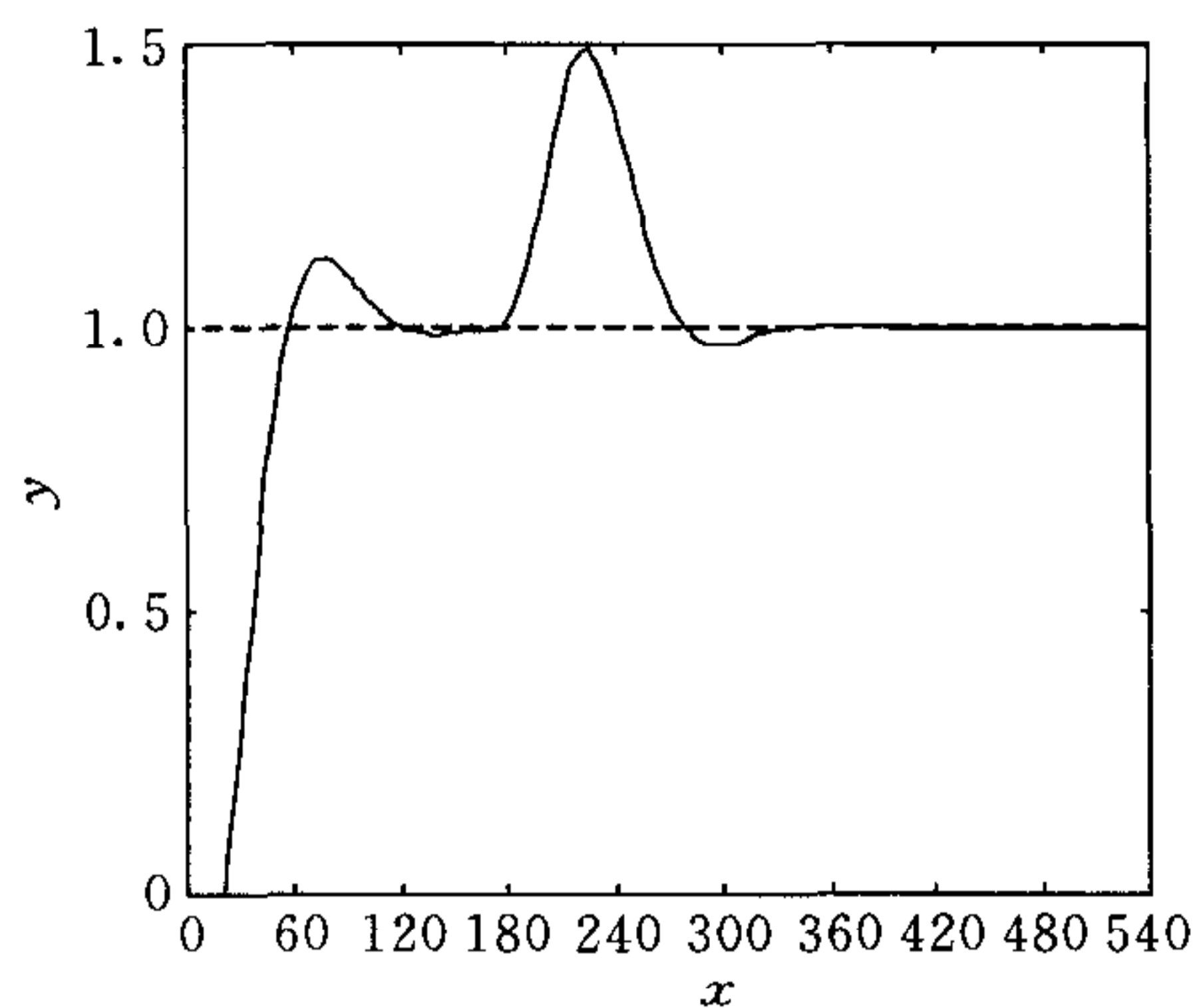


图 3 鲁棒 PII 调节器对确定性干扰的完全抑制

## 5 结论

工业过程控制中, 时变时滞系统是较常见的一类控制系统, 本文提出了一种数字 PII 调节器的设计方法, 既可以保证系统具有大时变时滞鲁棒稳定性及稳态精度, 又可以克服负载干扰的影响, 而且, 算法设计过程简洁, 适用于一般过程控制系统.

## 参 考 文 献

- 1 Smith O J. A controller to overcome dead time. *ISA J.*, 1959, **6**(2):28~33
- 2 Astrom K J, Hang C C, Lim B C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1994, **39**(2):343~345
- 3 Matausek M R, Micic A D. A modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1996, **41**(8):1199~1203
- 4 Fung H, Wang Q-G, Lee T-H. PI tuning in terms of gain and phase margins. *Automatica*, 1998, **34**(9):1145~1149

**刘 翔** 1987 年于清华大学自动化系本科毕业, 1999 年在浙江大学信息工程学院控制系获博士学位, 现为浙江大学控制系副教授. 感兴趣的研究领域是鲁棒及智能计算机控制、智能生产调度等.

**王文海** 浙江大学信息工程学院控制系副研究员. 感兴趣的研究领域是分布式计算机控制系统、生产过程自动化等.

**熊 斌** 浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 1999 届博士毕业生. 主要从事 CAD/CAM、先进控制技术 & 计算机网络通信技术方面的研究.