



非线性自适应控制——克服非线性的影响¹⁾

许向阳 祝和云

(浙江大学工业控制研究所 杭州 310027)

摘要 非线性自适应控制系统中,当工作点发生转移时,被控过程的增益有时会有很大的变化,这对使用广义最小方差控制的自校正控制器来说会产生一定的影响.文中对这种影响机理进行了讨论,并针对单变量系统提出两种合理的解决方法.

关键词 非线性系统控制,自适应控制,广义最小方差控制.

1 引言

由 Clark 和 Gawthrop 提出的基于广义最小方差控制的自校正控制器逐渐应用于各种非线性控制系统^[1-5].这些研究在一定程度上大大促进了非线性领域的自适应控制研究的发展.

广义最小方差控制的性能指标为

$$J = E\{[P(q^{-1})y(t+d) - R(q^{-1})y_r(t+d)]^2 + [Q'(q^{-1})u(t)]^2\}. \quad (1)$$

其中 $P(q^{-1}), R(q^{-1})$ 为 q^{-1} 首1多项式, $Q'(q^{-1})$ 为 q^{-1} 多项式; q^{-1} 为后移因子, y_r 为 y 的设定值.对于线性控制系统,在其本身性能变化不大的情况下, $P(q^{-1}), R(q^{-1})$ 和 $Q'(q^{-1})$ 一般是离线而定的,在运行过程中不需改变其参数.对系统变化较大情况下,有人提出可变性能指标自适应控制器^[6].然而,对非线性系统情况就不同了.

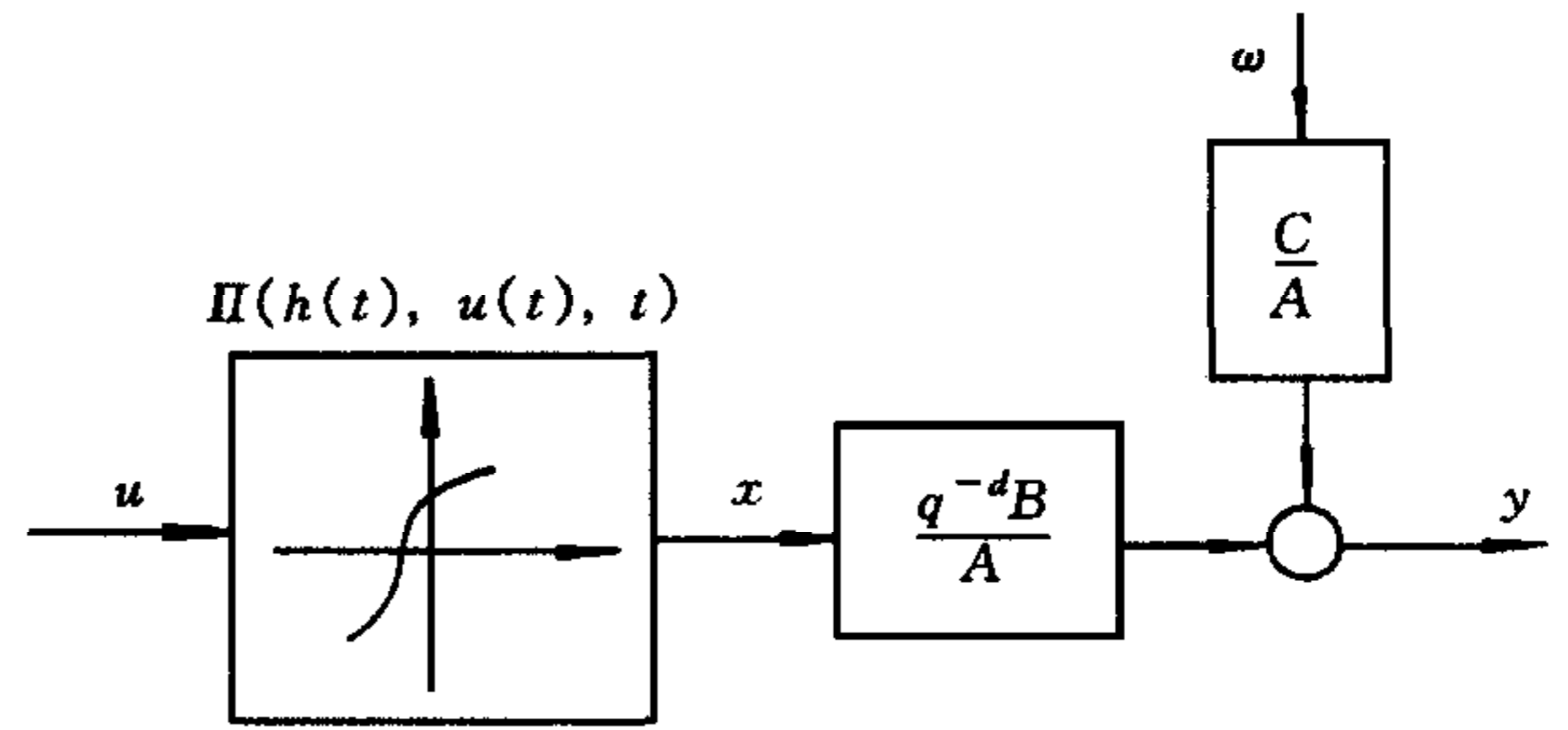


图1 非线性过程

有较大一部分工业非线性系统可用一线性动态模型加一非线性前缀来描述,如图1所示单变量系统模型

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})x(t) + C(q^{-1})\omega(t), \quad (2)$$

$$x(t) = \Pi\{h(t), u(t), t\}. \quad (3)$$

其中 A, B, C 为 q^{-1} 首1多项式,阶数分别为 m, n, l ; q^{-1} 是后移因子; d 是系统时延; $\omega(t)$ 是零均白噪声序列; $\Pi\{\cdot\}$ 为一非线性函数; $\Pi\{h(t), u(t), t\}$ 中 $h(t)$ 是与 $u(t)$ 和 $x(t)$ 都有关的变量.

图1所示非线性系统其实是将动态和静态部分分开描述,动态部分表现为一线性结构(2),而非线性集中体现在静态部分(3).对于一个较稳定的系统, A, B, C 和 $\Pi\{\cdot\}$ 的变化是较小的,

1) 国家级工业控制技术重点实验室资助课题.

然而在不同的工作点上,非线性部分 $\Pi\{\cdot\}$ 的斜率往往变化很大.

再观察(1)式中权函数,

$$\begin{aligned} \text{设} \quad Q'(q^{-1}) &= q_0 Q(q^{-1}) = \\ & q_0(1 + q_1 q^{-1} + \dots + q_{n_q} q^{-n_q}), \end{aligned} \quad (4)$$

不妨取 $q_0 \geq 0$. q_0 的大小表现了对 $u(t)$ 的限幅程度,它需要根据被控系统的静态增益来确定.若 q_0 过大,对 $u(t)$ 的限幅太重,系统往往难以控制到设定点;若 q_0 太小,则相当于无 $Q'(q^{-1})$ 项,广义最小方差的意义不再存在,难以应用到非最小相位系统.

对于图1非线性系统,在因工作点变化而使得被控系统增益有很大变化的情况下,往往就形成不同工作点 q_0 值不合理的情形.在仿真感光乳剂制备 PAg 控制过程中,如图2所示,到达设定点9时,被控 PAg 几乎回不到9,这说明 GMV 控制强度太小, q_0 值在此过大.

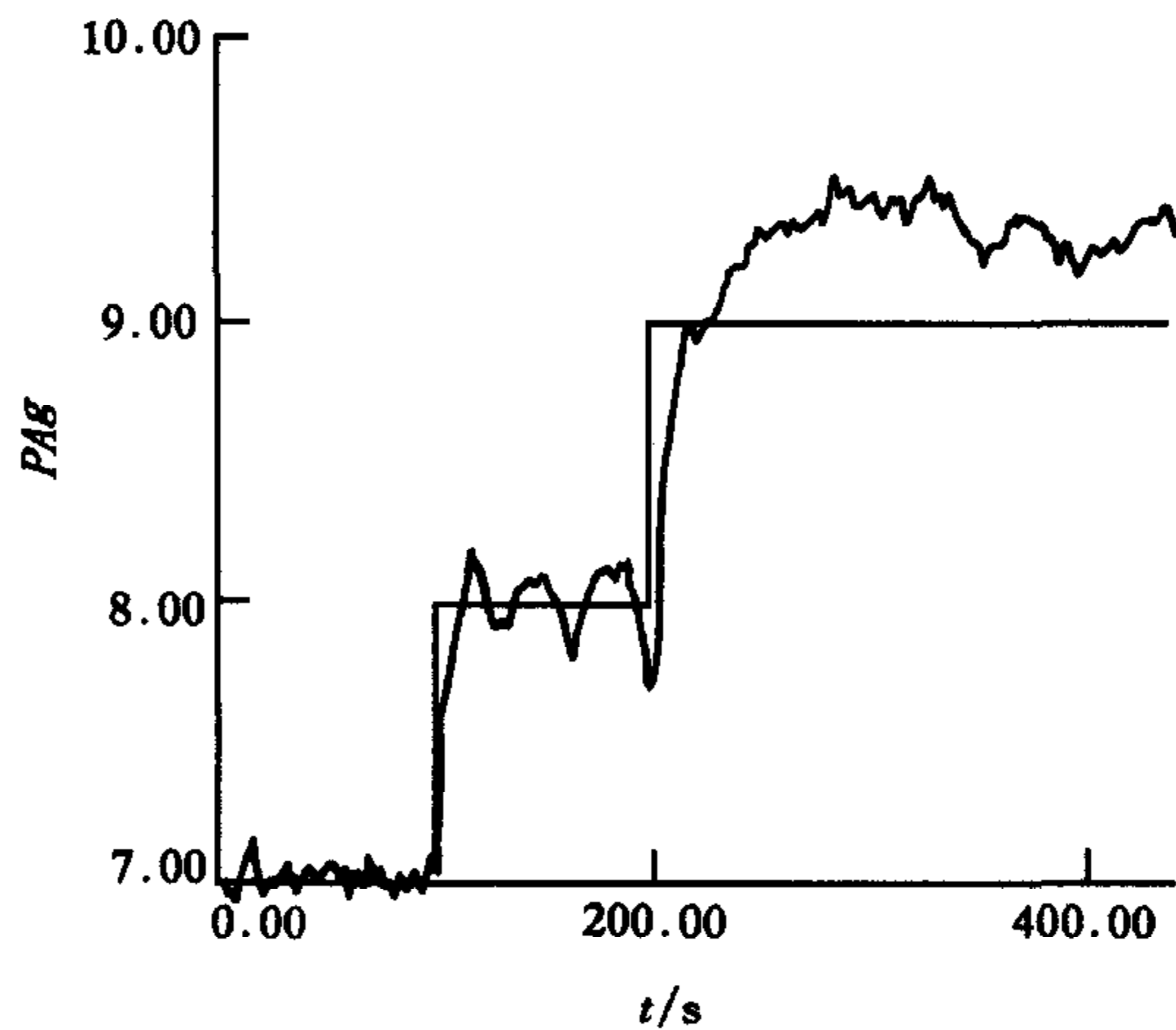


图2 常规 GMV-STC 控制曲线

2 克服非线性对 GMV-STC 的影响

2.1 性能指标在线修改(方法1)

性能指标(1)中,按(4)式 q_0 取为

$$q_0 = |\epsilon \cdot dx/du|, \quad (5)$$

其中系数 ϵ 离线确定.当被控过程由于工作点转移而引起增益变号时,通过(1)式求控制律将按照新的工作点上的被控过程方程求解. q_0 的符号在(1)式中不起作用,因此与增益变号无关,即过程增益的变号对 GMV-STC 控制器性能没有影响.

值得讨论的是,当被控过程增益为零时,由(5)式得 $q_0 = 0$,系统转为最小方差控制.此时,对控制器的控制策略应视不同非线性过程作一定的调整.对类似饱和的非线性过程,即输出 x 有界的过程,当工作点跑到饱和区后,可使 q_0 维持为在非饱和区的值,控制器状态变为暂时不工作,直到工作点回到非饱和区;对于类似死区非线性,或高次多项式等形式的非线性过程,若其线性部分为非最小相位系统,要求 $q_0 \neq 0$,则可限定 q_0 的取值,如限定 $q_0 \geq e_0 > 0$, e_0 人为取定.其它一些特殊的非线性过程这里不作讨论,可根据实际情况具体考虑.下面就 q_0 按(5)式取值

推导 GMV-STC 控制器算式.

由 Diophantine 方程

$$P(q^{-1})C(q^{-1}) = F(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}G(q^{-1}), \quad (6)$$

其中 F 为 q^{-1} 首 1 多项式, 阶数 $d-1$; G 为 q^{-1} 多项式. 性能指标(1)可化为

$$J = E\{[F\omega(t+d)]^2\} + E\left\{\left[\frac{BF}{C}x(t) + \frac{G}{C}y(t) - Ry_r(t+d)\right]^2\right\} + E\{[Q'u(t)]^2\}. \quad (7)$$

由 $\frac{\partial J}{\partial u(t)} = 0$ 得控制律

$$\left[\frac{BF}{C}x(t) + \frac{G}{C}y(t) - Ry_r(t+d)\right] \left[b_0 \frac{\partial x}{\partial u} \Big|_{u(t)}\right] + q_0^2 [Qu(t)] = 0. \quad (8)$$

设 $\phi(t) = P(q^{-1})y(t)$, $\phi(t) = \phi^*(t) + F(q^{-1})\omega(t)$, $C(q^{-1})\phi^*(t) = F(q^{-1})B(q^{-1})x(t-d) + G(q^{-1})y(t-d)$, 则

$$\phi(t) = FBx(t-d) + Gy(t-d) + q(1-C)\phi^*(t-1) + F\omega(t). \quad (9)$$

(8) 式中 q_0 按 $t-1$ 时刻取值 (亦可据实际情况取在其它点)

$$q_0 = \left| \varepsilon \cdot \frac{dx}{du} \Big|_{u(t-1)} \right|. \quad (10)$$

2.2 改进性能指标(方法2)

根据第1节分析, 将性能指标改成如下形式

$$J = E\{[P(q^{-1})y(t+d) - R(q^{-1})y_r(t+d)]^2 + [Q(q^{-1})x(t)]^2\}, \quad (11)$$

见文献[7]. 考虑非线性环节 $\Pi\{\cdot\}$, 由于对 x 的限幅也即对 u 的限幅, 因此适当修改 $Q(q^{-1})$ 项, (11) 式与(1)式所起的作用是相同的, 适用于非最小相位系统. 同时(11)式避开了非线性环节 $\Pi\{\cdot\}$, 从而消除了非线性对广义最小方差控制器的影响.

用(6)式, 由 $\frac{\partial J}{\partial u(t)} = 0$ 得控制律

$$x(t) = \frac{C(q^{-1})R(q^{-1})y_r(t+d) - G(q^{-1})y(t)}{B(q^{-1})F(q^{-1}) + (q_0/b_0)Q(q^{-1})C(q^{-1})}, \quad (12)$$

$$u(t) = \Pi^{-1} \cdot x(t). \quad (13)$$

Π^{-1} 为 Π 的左逆算子. 对多数非线性环节(3), 如分段线性、死区非线性、预负载非线性、滞环非线性等, 存在如下定理^[5].

定理. (左逆算子存在性定理) 如果算子 Π 分段连续, 单调递增, 无上、下界, 且有有限个第一类间断点, 则算子 Π 存在唯一左逆算子 Π^{-1} .

3 仿真

针对前面所提感光乳化剂制备中 PAg 的控制进行仿真. 其模型转换成(2), (3)式形式后, 得

$$A(q^{-1}) = (1 - q^{-1})(1 - \frac{T}{T_s + T}q^{-1}), \quad B(q^{-1}) = 1, \quad C(q^{-1}) = 1,$$

$$\Pi\{u(t)\} = \frac{\frac{T_s^2}{T_s + T} \lg e [n_2 u(t) - n_1 Q_1(t)]}{V_0 + T_s \sum_{\tau=1}^{t-1} u(\tau) + T_s u(t-1) + T_s \sum_{\tau=1}^t Q_1(\tau)} \cdot \frac{1}{10^{-y(t-1)} + 10^{y(t-1) - PK_c}}.$$

其中 y 表示 PA_g 的值; T_s 为采样周期; V_0 为母液体积; Q_1, n_1 分别为 $AgNO_3$ 溶液的流量和浓度; u, n_2 分别为 KB_r 溶液的流量和浓度; $PK_c = 12.1$; $\xi(t)$ 为白噪声序列. 取 $T_s = 1s, y(0) = 7.0, V_0 = 500ml, Q_1(t) = 10ml/min, n_1 = n_2 = 0.001mol/ml, d = 2, T = 3s$; 性能指标 $P(q^{-1}) = 1 - 0.8q^{-1}, R(q^{-1}) = 1 - 0.8q^{-1}, Q'(q^{-1}) = q_0(1 - q^{-1})$.

方法1. ϵ 取 0.75, 控制过程过渡曲线见图3.

方法2. 取 $Q(q^{-1}) = 0.75(1 - q^{-1})$, 控制过程过渡曲线见图4.

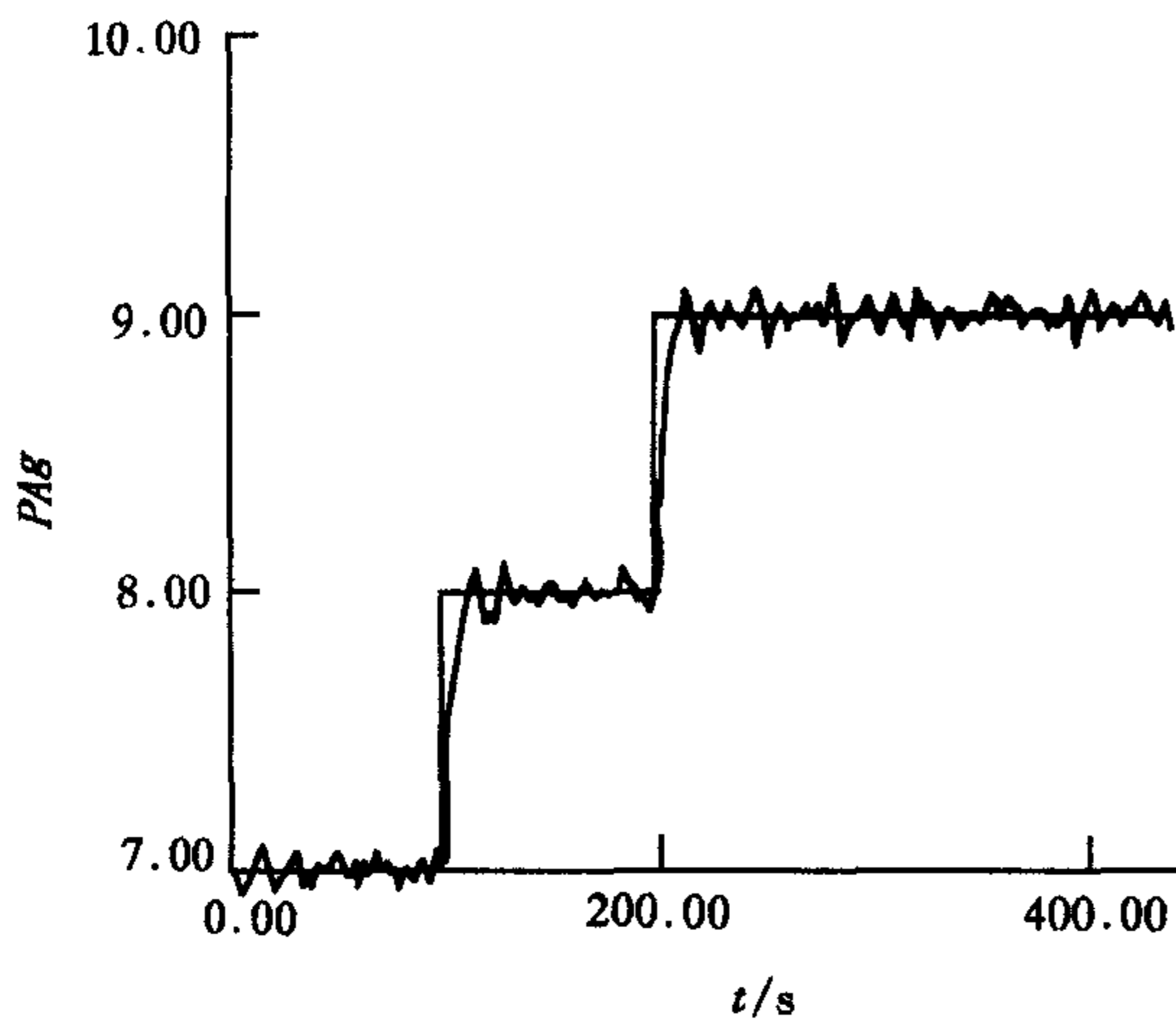


图3 改进方法1的控制曲线

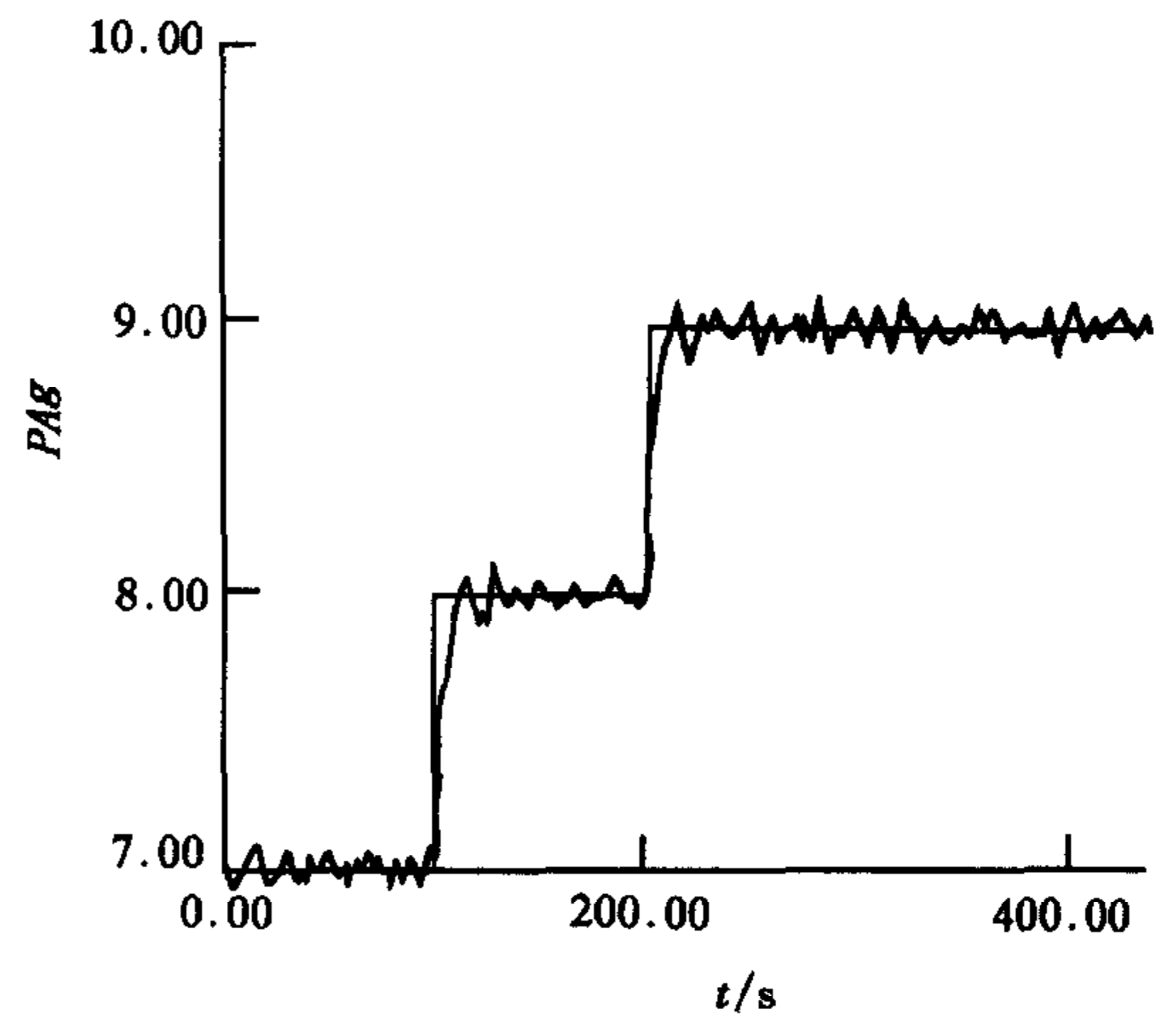


图4 改进方法2的控制曲线

4 结束语

本文出于非线性系统不同工作点上增益变化很大的情况, 设计了两种广义最小方差自校正控制器, 适用于可用线性加非线性前缀描述的多数非线性系统. 对实际过程模型感光乳化剂制备的 PA_g 控制仿真, 表现出这两种方法的优良特性.

参 考 文 献

- 1 Anbumain K, Patnaik L M, Serma L G. Self-tuning minimum-variance control of nonlinear systems of the hammerstain model. *IEEE Trans. Autom. Control.*, 1981, **AC-26**(4):959-961
- 2 Minchio Kung, Baxter F Womack. Discrete time adaptive control of linear dynamic systems with a two-segment piecewise-linear asymmetric nonlinearity. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1984, **AC-29**(2):170-172
- 3 Minchio Kung, Baxter F Womack. Discrete time adaptive control of linear dynamic systems with preload nonlinearity. *Automatica*, 1984, **20**(4):477-479
- 4 孙西, 金以慧, 方崇智. 滞环非线性系统的加权自适应控制. *自动化学报*, 1991, **17**(6):649-657
- 5 丁锋, 谢新民, 方崇智. 一类非线性系统的加权自适应控制. *自动化学报*, 1993, **19**(5):535-542
- 6 刘思行, 张炎华, 周兆英. 具有可变性能指标的自校正自适应控制理论的研究. *自动化学报*, 1994, **20**(1):91-96
- 7 许向阳, 祝和云. 非线性系统的一种加权自适应控制方法. *自动化学报*, 1997, **23**(6):845-849

NONLINEAR ADAPTIVE CONTROL——ELIMINATE THE EFFECT OF NONLINEARITY

XU XIANGYANG ZHU HEYUN

(Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, HangZhou 310027)

Abstract As the operate-point changes in the nonlinear system, the gain changes much. This makes up big effect on general minimum variance self-tuning control system(GMV-SCS). In this paper, the mechanism is discussed, and two strategies are proposed for SISO systems.

Key words Nonlinear system control, adaptive control, general minimum variance control.

编委会关于征集和发表“长论文”的说明

《自动化学报》编辑委员会决定从现在开始接收12000字左右的长论文,性质类同于 IEEE 的“Regular Paper”,以发表创新突出、内容系统、论述完整、分量较重的优秀成果.此举旨在推出系统性、分量重的研究成果,以与国际著名期刊的作法接轨.编委会认为,改变自动化领域研究成果“零敲碎打”地发表方式,不仅更好地涉及与国际学术界的惯例接轨的问题,而且也涉及研究学风的问题.编委会鼓励系统的、优秀的研究成果以完整方式发表,特别鼓励年轻学者在攻读学位期间,将其经过长期努力完成的、具有体系性的研究成果完整地在本刊发表.由于这类论文与本刊通常所接收的论文有很大差异,因此决定采用如下的完全性审稿程序:

- (1) 投稿人需在投给本刊的稿件上注明“长论文”字样,以启动这类论文的审稿程序;
- (2) 稿件经编委会初审通过后,编辑部从编委会推荐的四至五个审稿人中挑选四人作为审稿人;
- (3) 稿件至少需要三个或三个以上审稿人同意发表,并由本刊编委会终审作出最后的发表与否的决定;
- (4) 对不予接受的这类稿件不采用复审方法,由编辑部退稿处理.作者可按自己的意愿,将稿件作压缩修改后作为一般论文重新投稿;
- (5) 对被接收的论文由编辑部向作者寄发“长论文”录用通知书.
- (6) 在作者同意下,长论文将优先推荐翻译为英文在《自动化学报》英文版上发表.

感谢您的支持与合作!

《自动化学报》编辑委员会

1998年3月