



# 双线性系统的自适应控制及其在谷氨酸 pH 值控制中的应用<sup>1)</sup>

孙 西

(成都科技大学计算机及自控系 610065)

金以慧 方崇智

(清华大学自动化系 北京 100084)

## 摘 要

对一类双线性系统,建立了自适应控制算法,给出了算法的稳定性证明. 该算法也适用于非最小相位的双线性系统. 在谷氨酸 pH 值控制中的实际应用表明,它具有良好的动态、静态性能和抗干扰能力,比 PID 控制具有更高的控制质量.

**关键词:** 自适应控制,双线性系统, pH 值控制.

## 1 问题的提出

我国是世界上最大的谷氨酸生产国和消费国. 目前国内谷氨酸的生产多处于低指标、能耗大、检测与控制都比较落后的状态. 很多工厂仍采用人工检测与手动控制,使谷氨酸的提取收率远远低于国际先进水平,若采用新工艺及先进控制方法提高谷氨酸的收率,可获得相当的经济效益. 国内外提取工艺方面的发展趋势是采用计算机控制,使生产过程自动稳定运行,从而提高产品的质量和收率.

在谷氨酸结晶生产过程中, pH 值是一个重要的被控量. 由于晶种的添加,发酵液的残糖浓度和 pH 值的波动,控制量浓度的波动等都会对 pH 值产生影响,使得对象的 pH 值具有比较严重的非线性和不确定性.

本文给出了一类双线性系统的自适应控制算法. 该算法被用于谷氨酸结晶过程的 pH 值控制,能适应过程的非线性、不确定性和各种干扰等影响,具有良好的控制效果.

## 2 自适应控制算法

考虑如下双线性系统:

1) 国家教委博士点基金和成都科技大学青年科学研究基金资助项目,本文曾在第五届过程控制会上宣读.  
本文于 1993 年 3 月 9 日收到

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + q^{-d}D(q^{-1})y(t)u(t) + f, \quad (1)$$

其中

$$A(q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i q^{-i}, \quad B(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_b} b_i q^{-i},$$

$$D(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_d} d_i q^{-i}.$$

$y(t), u(t)$  和  $f$  分别是系统的输出、输入和静态干扰,  $d$  是系统时延。

**假设.** (i)  $n_a, n_b$  和  $n_d$  的上界已知,  $d$  已知; (ii)  $D(q^{-1})$  是稳定的多项式。

引入 Diophantine 方程

$$P(q^{-1}) = F(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}G(q^{-1}). \quad (2)$$

其中  $P(q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_p} p_i q^{-i}$  且  $P(q^{-1})$  稳定,  $G(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_g} g_i q^{-i}$ ,

$$F(q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{d-1} f_i q^{-i}.$$

由式(1),(2)可得

$$P(q^{-1})y(t+d) = G(q^{-1})y(t) + F(q^{-1})B(q^{-1})u(t) + F(q^{-1})D(q^{-1})y(t)u(t) + F(1)f. \quad (3)$$

自适应控制算法为

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-d) + \frac{\bar{a}(t)P(t-2d)\phi(t-d)e(t)}{1 + \bar{a}(t)\phi^T(t-d)P(t-2d)\phi(t-d)}. \quad (4)$$

$$e(t) = P(q^{-1})y(t) - \phi^T(t-d)\hat{\theta}(t-d), \quad (5)$$

$$P(t) = P(t-d) - \frac{\bar{a}(t)P(t-d)\phi(t)\phi^T(t)P(t-d)}{1 + \bar{a}(t)\phi^T(t)P(t-d)\phi(t)}, \quad (6)$$

其中  $P(-d) = \dots = P(-1) = I$ ,  $0 < \bar{a}(t) < \infty$ ,

$$\phi^T(t)\hat{\theta}(t) = R(q^{-1})y^*(t+d) - \lambda(t)\delta(t)u(t), \quad (7)$$

其中

$$\delta(t) = \begin{cases} 1, & \text{当 } \hat{\alpha}_0(t) + \hat{\beta}_0(t)y(t) \geq 0, \\ -1, & \text{当 } \hat{\alpha}_0(t) + \hat{\beta}_0(t)y(t) < 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\phi^T(t) = [u(t), \dots, u(t-n_1), y(t)u(t), \dots, y(t-n_2)u(t-n_2), y(t), \dots, y(t-n_3), 1],$$

$$\theta^T = [\alpha_0, \dots, \alpha_{n_1}, \beta_0, \dots, \beta_{n_2}, \gamma_0, \dots, \gamma_{n_2}, F(1)f],$$

$R(q^{-1})$  是  $q^{-1}$  的多项式,  $\lambda(t)$  是时变正加权系数,  $y^*(t)$  是系统设定值。上述自适应控制算法中, 辨识部分可参见文献[1]。

**定理 1.** 对双线性系统(1), 若假设成立且  $\sup_{t \geq 0} |y(t+1) - y(t)| < \infty$ , 用自适应算法(4)–(8), 有

i)  $\{y(t)\}, \{u(t)\}$  是有界序列。

ii)  $\lim_{t \rightarrow \infty} [P(q^{-1})y(t+d) - R(q^{-1})y^*(t+d) + \lambda(t)\delta(t)u(t)]^2 = 0$ 。

证明. 记  $\tilde{\theta}(t) = \hat{\theta}(t) - \theta$ , 由式(3),(7),(9)可得

$$\psi(t+d) = \phi^T(t)(\theta - \hat{\theta}(t)) = -\phi^T(t)\tilde{\theta}(t),$$

令  $V(t) = \tilde{\theta}^T(t)P^{-1}(t-d)\tilde{\theta}(t)$ , 则用文献[1]中的方法和文献[2]中的引理, 可以证明定理中的各结论, 此处从略.

### 3 谷氨酸结晶过程中 pH 值的控制

基于对谷氨酸结晶工艺过程的分析, 其 pH 值可用双线性模型来近似描述, 并用本文算法对其 pH 值进行控制, 实验是在“小试”设备上完成的, 图 1 是该系统的示意图.

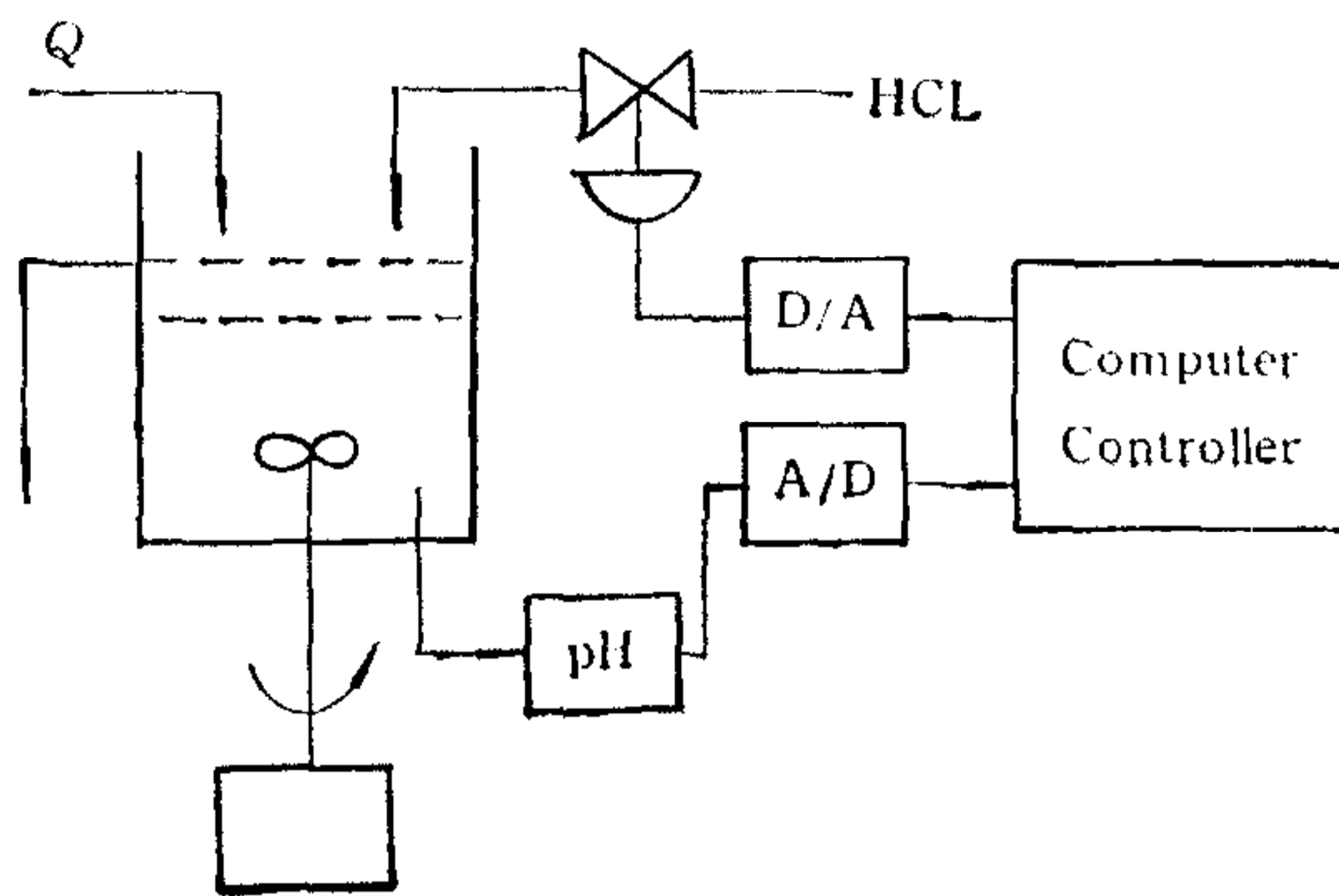


图 1 控制系统示意图

实验中的输入料液是谷氨酸发酵液, 它的 pH 值大约在 6.5—7.5 之间, 发酵罐的体积是 7 升, 正常进料流量约为 16ml/min, 用浓盐酸来控制 pH 值, 控制精度要求为 0.1.

用本文控制算法的正常运行曲线见图 2, 图 3 为用非线性 PID 控制的响应曲线.

当输入料液的流量变化, 用本文算法进行控制其结果见图 4,  $Q$  的变化如下:

$$Q = \begin{cases} 21\text{ml/min}, & \text{当 } 2 \leq t \leq 4 \text{ 时}, \\ 16\text{ml/min}, & \text{其余情况}. \end{cases}$$

从“小试”实验结果可知, 本文算法的控制精度为 0.03, 而非线性 PID 控制约为 0.09.

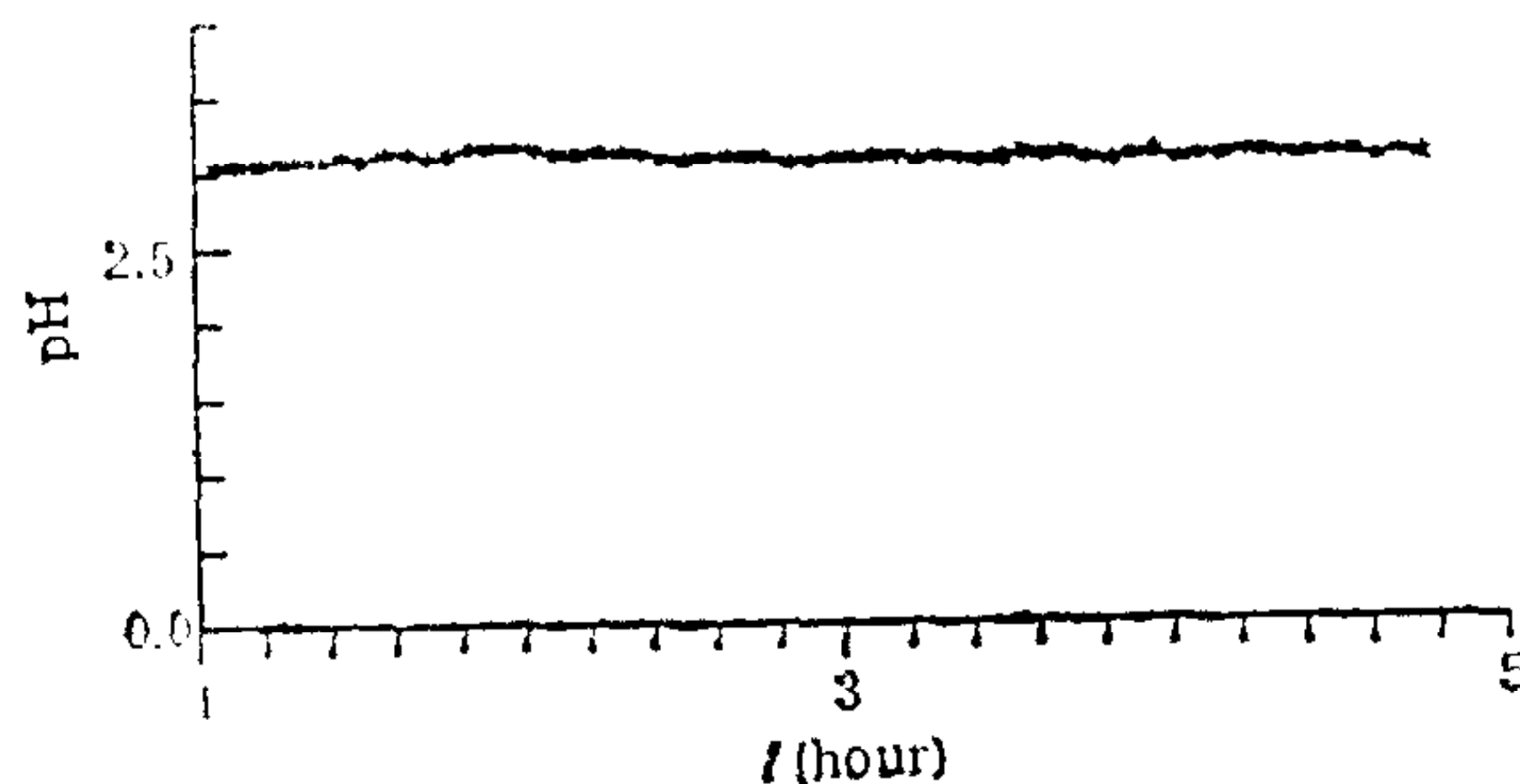


图 2 用本文算法的运行曲线



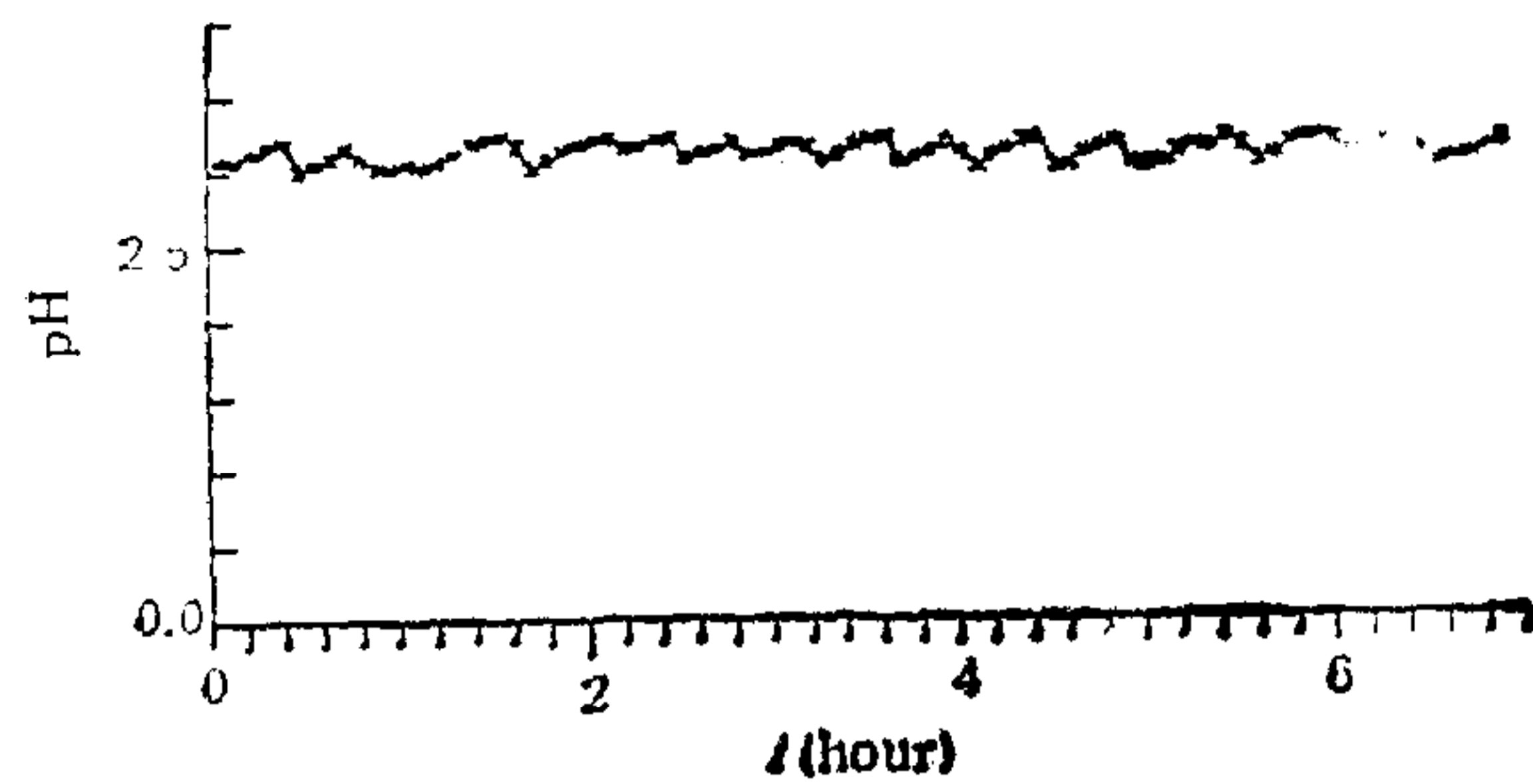


图 3 用非线性 PID 的控制结果

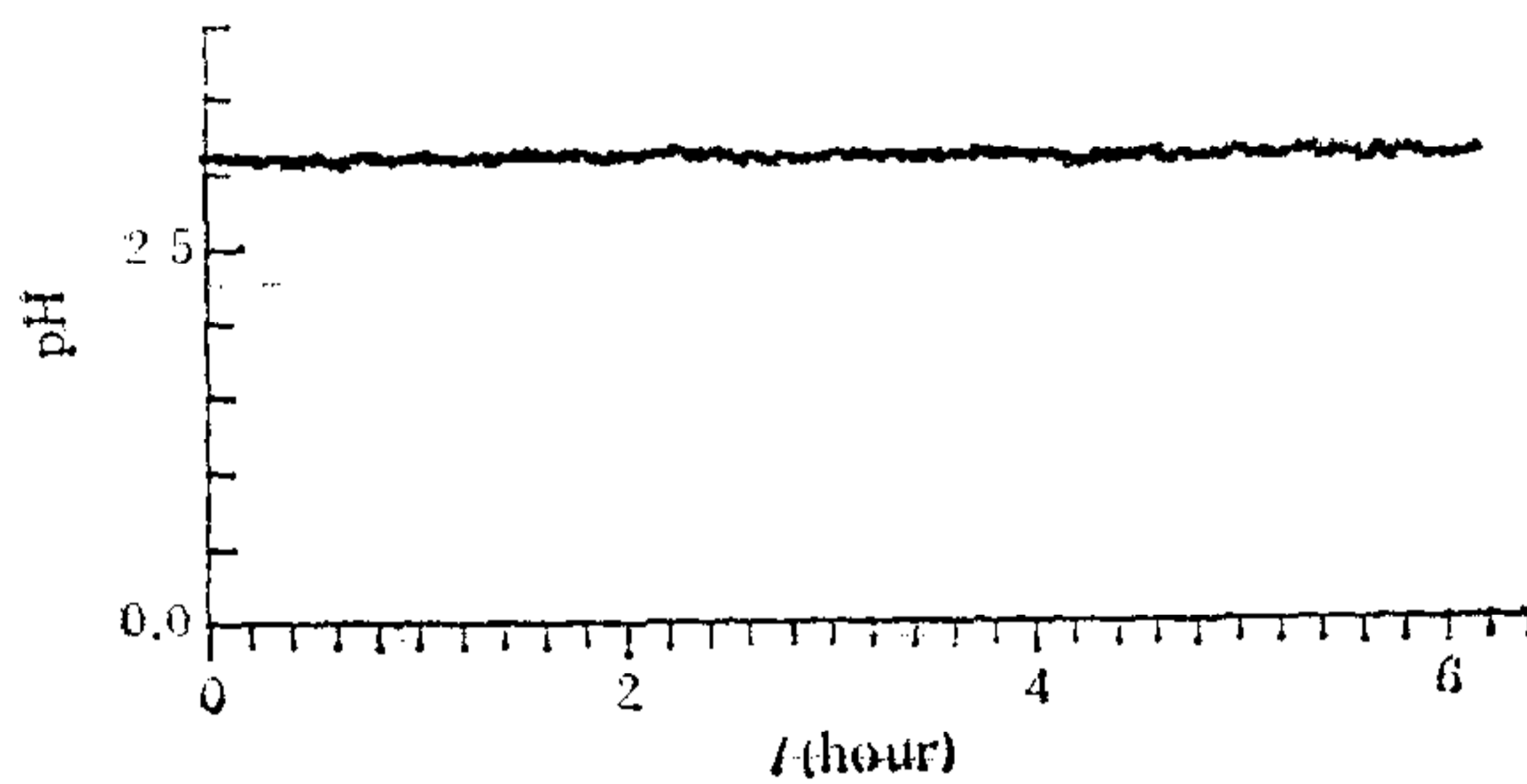


图 4 输入料液波动时本文算法的控制结果

本文的双线性自适应控制算法能得到良好的动态和稳态性能,控制质量明显优于 PID 控制,且能适应进料的 pH 值波动和进料量、控制量浓度的变化,达到控制精度要求,是一种适合于工程应用的有效算法。

对实验结果的分析表明,用双线性自适应控制后,可提高谷氨酸收率约为 8%,经济效益明显。

### 参 考 文 献

- [1] Goodwin G C and Sin K S. Adaptive filtering prediction and control. Prentice-hall, Inc. NJ: Englewood Cliffs, 1984.
- [2] 孙西,金以慧,方崇智,张纪峰. 双线性系统的自校正控制. 自动化学报,1993,19(3): 279—289.
- [3] Svoronos S, Stephanopoulos G and Aris R. On bilinear estimation and control, *Int. J. Control*, 1981, 34: 651—654.
- [4] 金以慧,孙西,方崇智. 一类双线性系统的最小方差控制及其应用. 清华大学学报,1992, 32(1): 9—15.
- [5] Sun Xi, Zhang Jifeng, Adaptive stabilization of Bilinear systems, 31th IEEE Conference on Decision and Control, Arizona, U. S. A., 1992.

## ADAPTIVE CONTROL OF BILINEAR SYSTEMS AND IT'S APPLICATION IN GLUTAMIC ACID pH CONTROL

SUN XI

*(Dept. of Computer and Automatic Control, Chengdu University of Science and Technology 610065)*

JIN YIHUI      FANG CHONGZHI

*(Dept. of Automation, Tsinghua University Beijing 100084)*

### ABSTRACT

In this paper, an adaptive control algorithm for minimum or nonminimum bilinear systems is established, the stability of the algorithm is proved. The application in the pH control of a pilot glutamic acid crystallization process shows this algorithm is of good dynamic and static performance and good robustness against load disturbances. Its performance much better is than that in nonlinear PID control.

**Key words:** Adaptive control, bilinear systems, control of pH process.