

非线性系统的预报控制及其在 pH 值控制中的应用

邹志云 顾钟文 周春晖
(浙江大学)

摘要

本文结合非线性脉冲响应模型和模型算法控制，提出了一种新的非线性系统预报控制方法。该方法具有良好的稳定性和鲁棒性，用它对具有强非线性的酸碱中和过程 pH 值进行控制，取得了比非线性 PID 调节器更好的控制效果。

关键词——非线性系统，脉冲响应，预报控制。

一、引言

实际系统都具有一定程度的非线性，而目前有效、实用的非线性控制方法却很少，现在工程上多应用 Shinskey 提出的非线性 PID 调节器^[1] (Nonlinear PID Controller, 简记 NL-PID)，但它不能对系统实现最优控制，且参数在线整定复杂。本文利用非线性脉冲响应模型将模型算法控制^[2]推广，提出了一种非线性系统的预报控制 (Nonlinear System Predictive Control, 记为 NL-PC) 方法。

二、NL-PC 算式及特性

NL-PC 的基本原理见图 1。它用系统的非线性脉冲响应模型对输出进行预报，然后进行控制作用计算，使输出预报值尽可能接近参考轨迹，平滑快速地达到设定值。

(1) 系统的非线性脉冲响应模型为

$$x(k) = \sum_{i=1}^l r_i u^i(k), \quad (1)$$

$$y(k) = \sum_{i=1}^N h_i x(k-i). \quad (2)$$

其中 $x(k)$ 为中间变量； $r_i (i = 1, \dots, l)$ 为参数； $\{h_i\} (i = 1, \dots, N)$ 为单位脉冲响

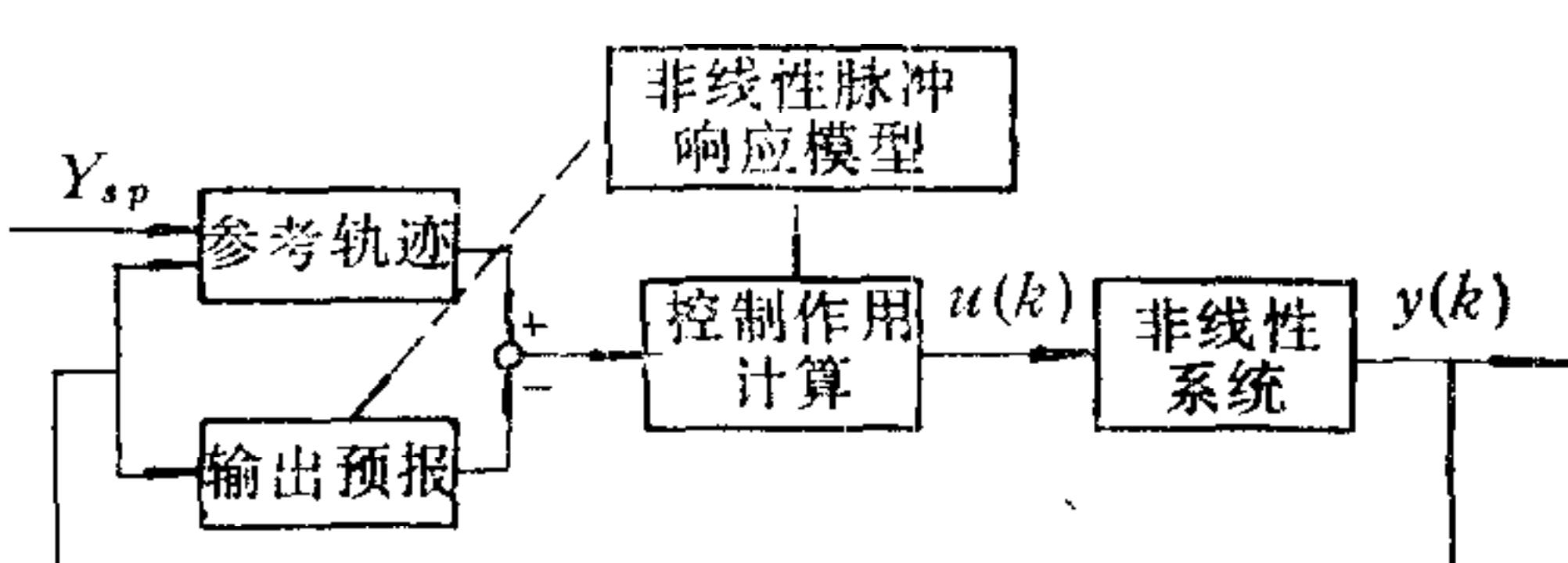


图 1 非线性预报控制原理框图

应序列; N 为截断时刻。

(2) 输出预报: 假设现在为 k 时刻, 要对将来 p 个时刻的输出进行预报。为了避免系统响应过于激烈, 控制作用只允许在 μ 步内变动 ($\mu \leq p$), 即

$$u(k + \mu - 1) = u(k + \mu) = \dots = u(k + p - 1). \quad (3)$$

由式(1)、(2)结合式(3)可推得 p 步输出预报为

$$Y_M(K) = H_1 X_1(K) + H_2 X_2(K), \quad (4)$$

其中

$$Y_M(K) = [y_M(k + 1/k), y_M(k + 2/k), \dots, y_M(k + p/k)]^T;$$

$$X_1(K) = [x(k), x(k + 1), \dots, x(k + \mu - 1)]^T;$$

$$X_2(K) = [x(k - 1), x(k - 2), \dots, x(k - N + 1)]^T;$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} h_1 & & & 0 \\ h_2 & h_1 & \dots & \dots \\ \vdots & & \ddots & \ddots \\ h_\mu & h_{\mu-1} & \dots & h_1 \\ \vdots & & & \\ h_p & h_{p-1} & \dots & \sum_{i=1}^{p-\mu+1} h_i \end{bmatrix}, \quad H_2 = \begin{bmatrix} h_2 & h_3 & \dots & h_N \\ h_3 & h_4 & \dots & h_N \\ \vdots & & \ddots & \ddots \\ h_{\mu+1} & \dots & h_N \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ h_{p+1} & \dots & h_N \end{bmatrix},$$

$y_M(k + i/k)$ 表示 k 时刻对 $k + i$ 时刻的模型输出预报值。

为了消除模型误差和系统不可测干扰等非理想因素对输出预报精度的影响, 用现时刻预报误差 $y(k) - y_M(k/k)$ 对模型预报值进行修正, 即有

$$Y_c(K) = Y_M(K) + D(K). \quad (5)$$

其中

$$D(K) = [y(k) - y_M(k/k), y(k) - y(k/k), \dots, y(k) - y_M(k/k)]^T;$$

$$Y_c(K) = [y_c(k + 1/k), y_c(k + 2/k), \dots, y_c(k + p/k)]^T;$$

$y_c(k + i/k)$ ($i = 1, 2, \dots, p$) 为经过修正后的输出预报值, 称为闭环输出预报值^[3]。

(3) 参考轨迹: 采用一阶模型计算

$$y_r(k + i/k) = \alpha y_r(k + i - 1/k) + (1 - \alpha) y_{sp}, \quad i = 1, \dots, p, \quad (6)$$

其中 $y_r(k + i/k)$ 表示在 k 时刻计算的 $k + i$ 时刻输出参考轨迹值, 并令 $y_r(k/k) = y(k)$; y_{sp} 为输出设定值; α 为可选择参数, $0 < \alpha < 1$ 。

(4) 控制作用计算: 最优控制指标取为

$$J = \min \{ \|Y_c(K) - Y_r(K)\|_W^2 + \|X_1(K)\|_Q^2 \}, \quad (7)$$

其中 $Y_r(K) = [y_r(k + 1/k), y_r(k + 2/k), \dots, y_r(k + p/k)]^T$,

$W = \text{diag}(w_1, \dots, w_p)$, $Q = \text{diag}(q_1, \dots, q_\mu)$, 分别为不同时刻输出变量及中间变量的加权系数阵。

控制作用计算分二步进行:

1) 对式(7)求导, 得

$$X_1^*(k) = [H_1^T W H_1 + Q]^{-1} H_1 W [Y_r(K) - H_2 X_2(K) - D(K)], \quad (8)$$

由此求得最优序列 $x^*(k), x^*(k + 1), \dots, x^*(k + \mu - 1)$ 。

2) 由式(1), 根据 $x^*(k + i - 1)$, ($i = 1, \dots, \mu$), 求出对应的最优控制作用 $u^*(k + i - 1)$, ($i = 1, \dots, \mu$)。实际控制时, 一般仅施加 $u^*(k)$, 然后开始新的循

环。而且为消除稳态余差,可在 $u^*(k)$ 上加一积分项,即 $u(k) = u^*(k) + K_I \sum_{i=0}^k [y_{sp} - y(i)]$, K_I 为积分系数。

应用类似线性情况的分析方法^[3]分析,可知 NL-PC 具有很好的稳定性和鲁棒性。

三、pH 值控制实验及结果

将 NL-PC 在具有强非线性特性的酸碱中和过程的 pH 值控制(图 2)中进行了应用

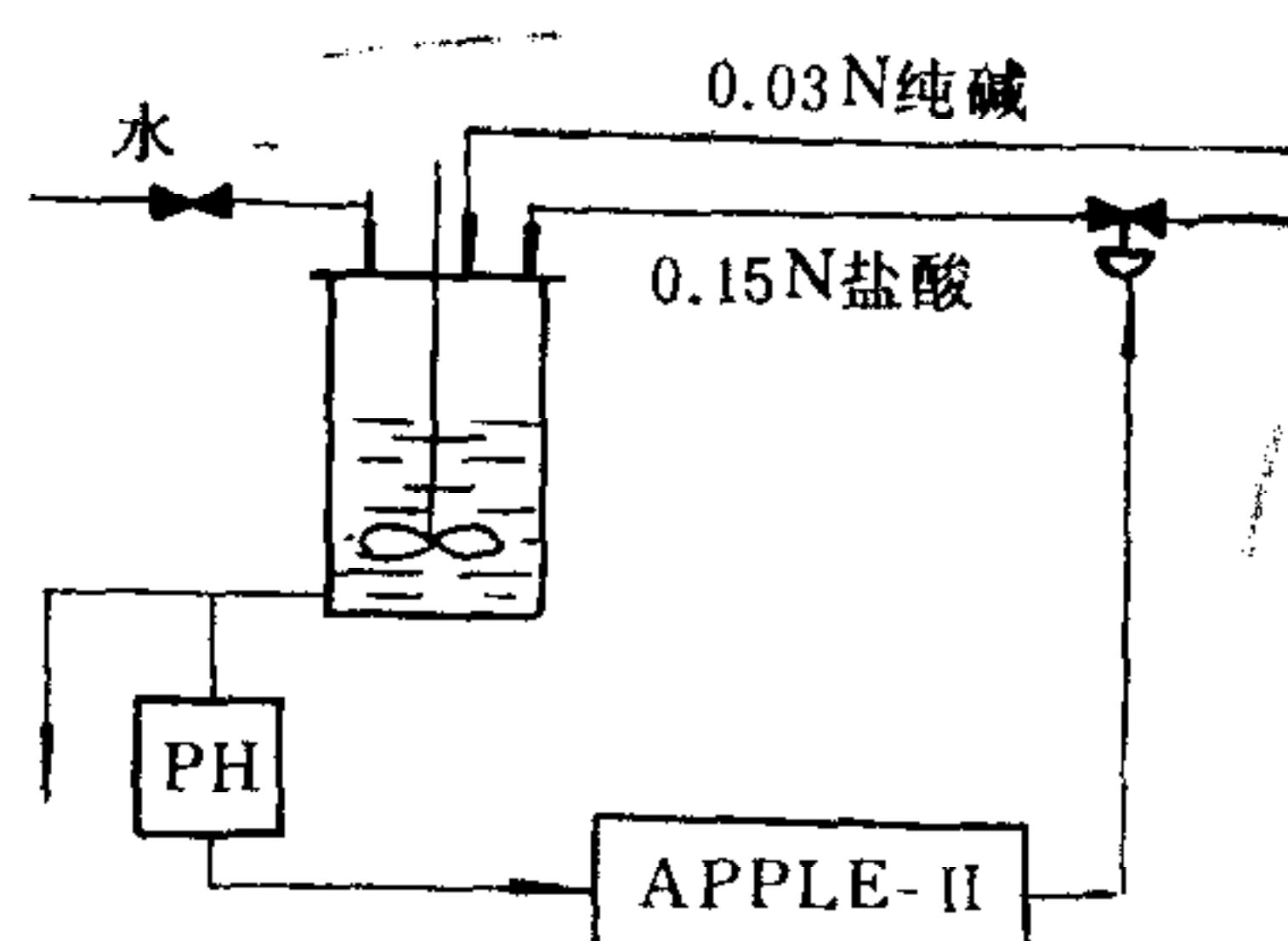


图 2 pH 实验装置简图

实验。同时也用 NL-PID^[1] 对 pH 值进行了控制。

设定值跟踪及抗干扰的情况分别示于图 3、图 4。由图可见, NL-PC 比 NL-PID 超调量小, 跟踪时间短; NL-PC 动态响应好, NL-PID 大幅度振荡。

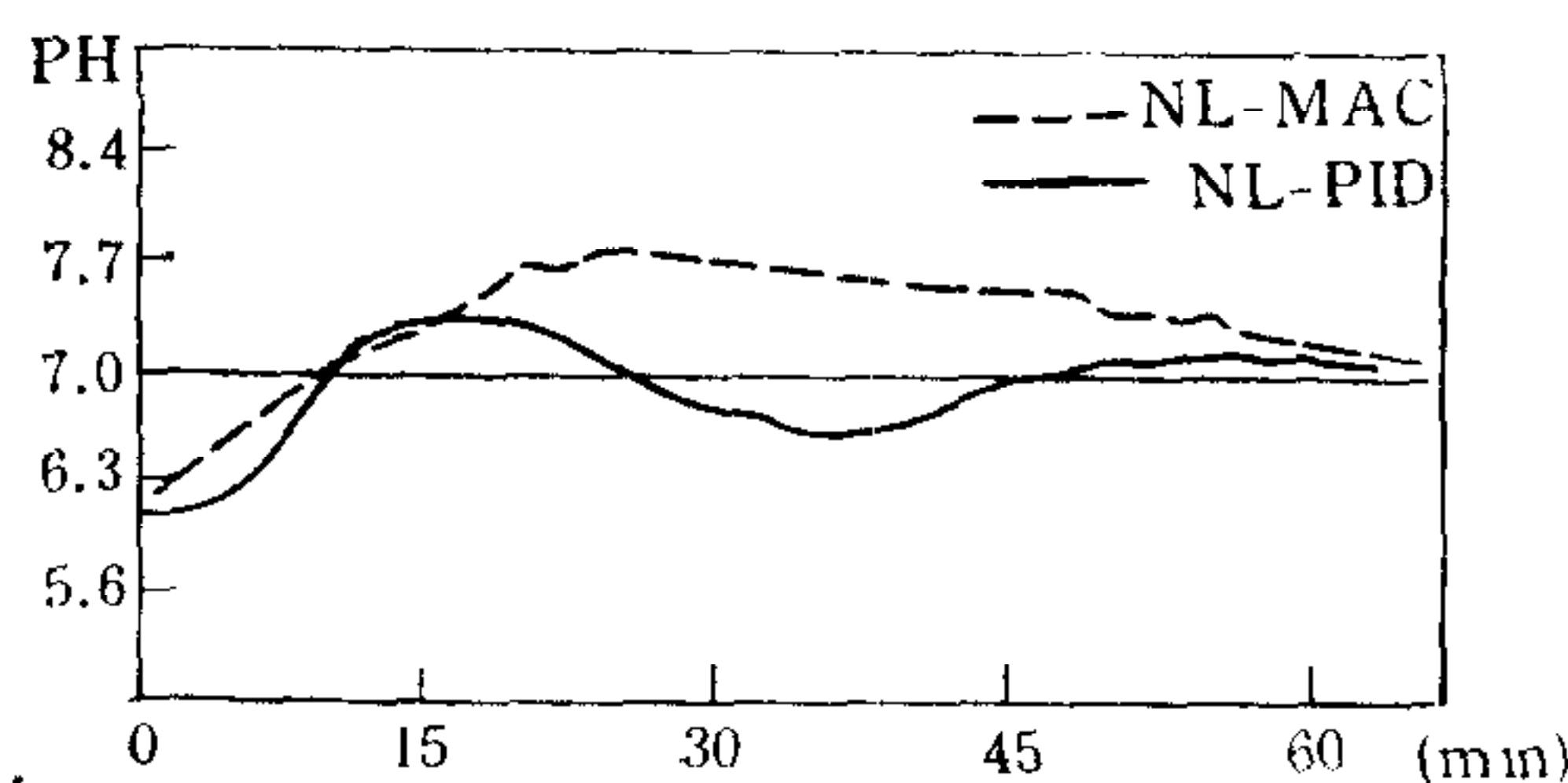


图 3 pH 值设定值跟踪响应

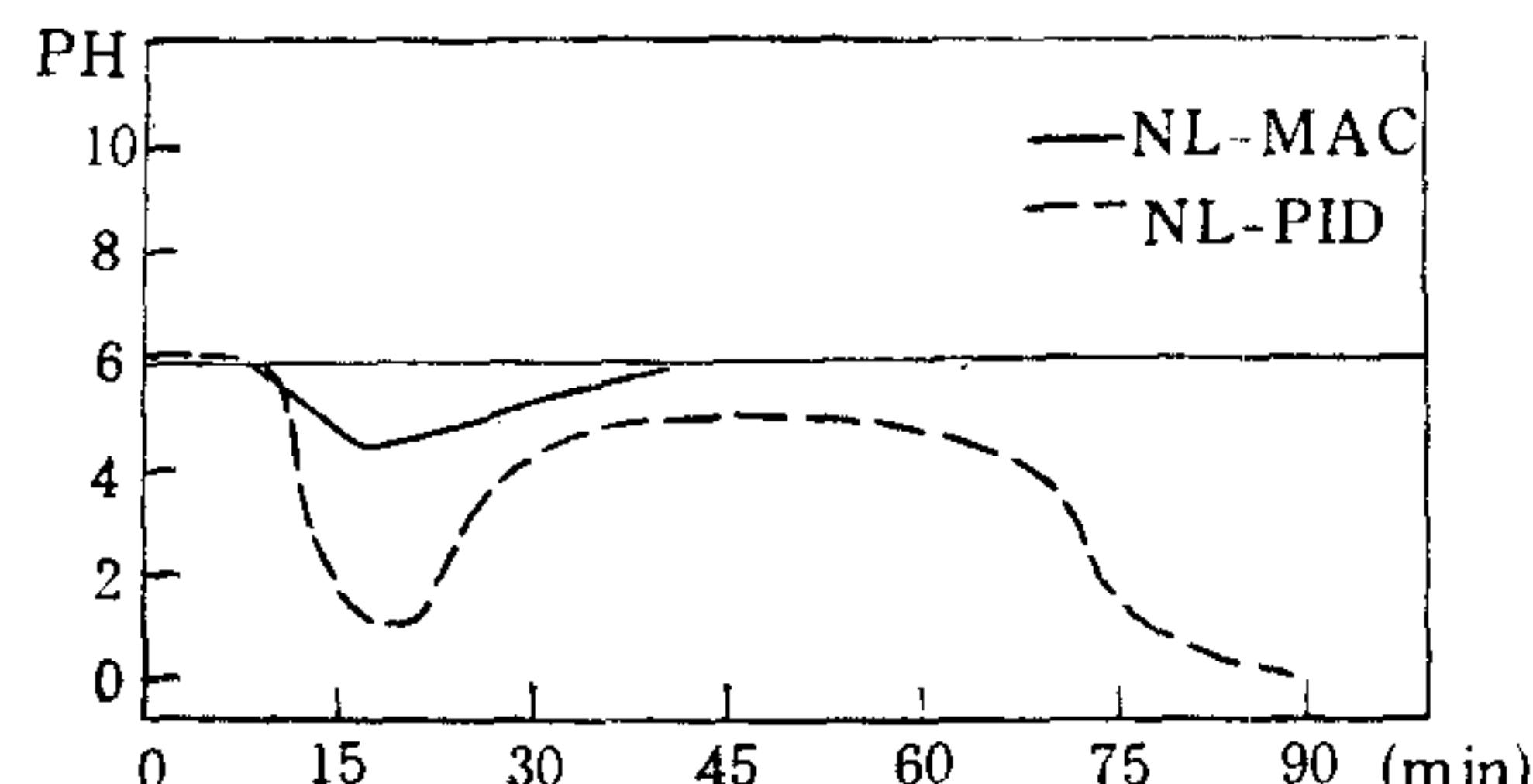


图 4 碱流量阶跃干扰下的 pH 值动态响应

在持续控制实验中, NL-PC 与 NL-PID 相比, pH 均值更接近设定值, 积分误差 IAE 较小, 中和剂(在此为酸)耗量少, 这表明如将 NL-PC 用于生产控制, 将会给工厂带来更多的利润。

四、结 论

NL-PC 是非线性系统的一种非常有效的控制方法。它不仅具有良好的控制响应,而且稳定性好,鲁棒性强,对模型要求不高;再加上它计算简单,占用内存少,用一般微机就可实现,因此具有很强的实用性。它能用于一大类具有强非线性和大纯滞后系统的控制。

参 考 文 献

- [1] Shinskey, F. G., *Process-Control Systems*, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1979, Chapter 5.
- [2] Mehra, R. K., et al., Model Algorithmic Control (MAC); Review and Recent Developments, Proceedings of the 2nd Chemical Process Control World Congress, 1982, 287—309.
- [3] Rouhani, R. and Mehra, R. K., Model Algorithmic Control (MAC); Basic Theoretical Properties, *Automatica*, 18(1982), 4, 401—414.

NONLINEAR SYSTEM PREDICTIVE CONTROL AND ITS APPLICATION TO A pH PROCESS

ZOU ZHIYUN GU ZHONGWEN ZHOU CHUNHUI
(Zhejiang University)

Key words—Nonlinear system; impulse response; predictive control.