

研究论文

不对称系统输入反馈预测控制及可控性分析

冯爱祥, 韦明辉, 罗雄麟

(中国石油大学自动化研究所, 北京 102249)

摘 要: 研究了生产过程中一类特殊的非线性系统, 不对称系统的预测控制方法。在正反方向的控制作用下, 这类系统表现出不对称动态特性。此类系统的理论研究特别是控制方法研究十分有限。针对基于正反方向上的线性模型设计的正反模型预测控制方法与传统预测控制方法在结构上的差异进行了分析, 说明了由于这种结构上的差异可能导致的模型失配及控制效果不佳, 然后采用输入反馈方法对不对称系统正反模型预测控制方法进行修正, 将实际施加给对象的控制作用通过反馈形式纳入到下一步正反方向控制律的求解中。并且在无约束的条件下分析了正反模型预测控制方法的可控性。最后通过 pH 值控制的仿真实验验证了此两种不对称系统正反模型预测控制方法的控制效果。

关键词: 非线性不对称系统; 预测控制; 输入反馈; 可控性分析; pH 值控制

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2012.z2.020

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2012) S2-106-06

Model predictive control with input feedback and its controllability for unsymmetrical systems

FENG Aixiang, WEI Minghui, LUO Xionglin

(Research Institute of Automation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Model predictive control for nonlinear unsymmetrical system which exhibits gains and/or dynamics depending on the input or output direction has been studied. Theoretical results for these systems especially for its control aspects are very limited compared with their common occurrence in industry. Due to the differences between the positive/negative model predictive control structure for asymmetric system and the traditional predictive control structure, there may be model mismatch which would lead to bad control effect. In order to handle this problem, input feedback control algorithm is used to revise the positive/negative model predictive controller. The actual control action that applied to the object is joined into the calculation of the next step control law of the positive/negative controllers through the feedback form in order to eliminate the effect. Then the controllability of the positive/negative model predictive control system is analyzed in the unconstrained condition. Ultimately the control performance between the revised positive/negative model predictive control and the traditional positive/negative model predictive control was compared through the simulation of pH control.

Key words: nonlinear unsymmetrical systems; predictive control; input feedback; analysis of controllability; pH control

2012-06-26 收到初稿, 2012-10-10 收到修改稿。

联系人: 罗雄麟。第一作者: 冯爱祥 (1974—), 女, 讲师, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21006127, 20976193)。

Received date: 2012-06-26.

Corresponding author: Prof. LUO Xionglin, luoxl@cup.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (21006127, 20976193).

引言

生产过程中存在着一类强非线性被控过程, 这类系统在大小相同但方向相反的输入作用下, 表现出完全不同的过渡过程及稳态值, 在平衡点附近表现出明显不对称的动态特性^[1-5], 这使得基于一阶泰勒展开的单一线性化模型设计的控制器性能不佳, 控制品质很难得到保证。

目前针对不对称系统的理论研究进展比较缓慢, 现有的介绍不对称过程的文献大都集中在其辨识建模方面^[6-10]。在不对称过程的控制方面, Wang 等^[4]针对不对称动态过程利用正反方向的线性模型分别设计 PID 控制器, 比单一控制器控制效果有明显改善, 但 PID 控制方法无法预知未来步的特性, 因此无法处理 PID 参数与模型参数不匹配的问题, 可能造成控制效果不佳^[11]。Turner 等^[12]采用神经网络方法来设计控制器, 对不对称动态特性有一定的补偿。

本文针对不对称系统, 建立正反方向上的线性模型, 并基于此模型采用状态反馈预测控制算法, 分别设计相应的预测控制器, 对不对称系统进行控制研究。由于针对不对称系统设计的正反模型预测控制方法与传统预测控制在结构上有所不同, 在每一步中都需要对正反控制器输出进行选择, 这样在进行控制作用选择后正反控制器求得的控制律只有其中之一或者两者都未下载给被控对象, 而在下一步控制律的求解中, 正反模型预测控制器是按照各自求得的控制律完全施加给被控对象来进行运算的, 这样可能会导致模型失配造成控制效果不佳。本文拟采用输入反馈方法来修正相应的正反模型预测控制算法, 并在无约束的条件下分析了正反模型预测控制方法的可控性, 给出了闭环系统可控的基本条件。最后通过 pH 值控制仿真实验, 来验证正反模型预测控制方法的控制效果。

1 常规正反模型预测控制分析

为简化问题的表述, 考虑离散时间不对称系统 Σ

$$\begin{cases} x(k+1) = f(x(k), u(k)) \\ y(k) = g(x(k), u(k)) \end{cases} \quad (1)$$

本文重点讨论不对称过程, 所以定义系统 (1) 为 SISO 系统, 即 $y(k) \in R^1$, $u(k) \in R^1$, 下文中所有

讨论的问题皆为 SISO 系统。考虑系统 Σ , 在某平衡点处采用辨识方法^[6], 或者改进的近似线性化方法^[13], 得到不对称系统 Σ 在正反两个方向上的线性表达式

$$\begin{cases} x(k+1) = A^+x(k) + B^+u(k) \\ y(k) = C^+x(k) \end{cases} \quad (2)$$

并定义输入变量的增量为

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (3)$$

模型正反方向的决定函数 σ 按式 (4) 定义

$$\sigma = \begin{cases} +, \Delta u(k) \geq 0 \\ -, \Delta u(k) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

这样就可以根据式 (2) 的状态空间模型对正反模型分别设计相应的状态反馈预测控制器。

采用线性预测控制的方法, 分别针对正、反模型设计相应的预测控制器。基于线性状态空间模型, 采用状态反馈预测控制算法^[14], 其控制结构如图 1 所示。

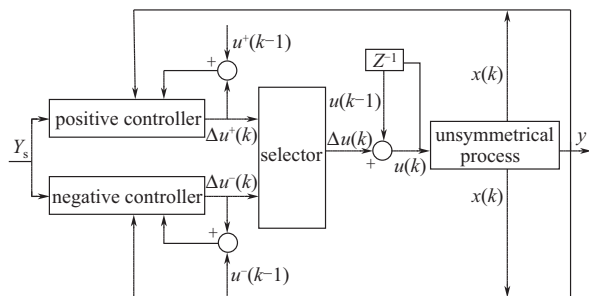


图 1 常规正反模型预测控制结构

Fig. 1 Two kinds of positive/negative model predictive control structures

由图 1 可见, 正反模型预测控制方法与传统预测控制有很大不同。在常规预测控制的运算求解中, 在下一步控制律的求解中, 历史控制作用采用的是预测控制器上一步的输出 $u(k-1)$, 一般默认在每一步中预测控制器输出完全施加给被控对象, 即控制器求得的控制作用 $u(k)$ 与实际施加给被控对象的控制作用 $u_p(k)$ 相等, 这样不会造成预测控制算法中的模型失配。但在以上正反方向预测控制器的控制律求解中, 正反方向控制器历史控制作用采用的是自身上一步的输出 $u^{\sigma}(k-1)$ ($\sigma = +, -$), 而在实际过程中, 由图 1 可见, 正反方向预测控制器求得的控制律 $\Delta u^{\sigma}(k)$ 只有其中之一能下载或者两者都未下载, 这样会造成计算下一步控制律采用的历史控制作用 $u^{\sigma}(k-1)$ ($\sigma = +, -$) 并不一定与实际施加给被控对象的控制作用 $u_p(k-1)$ 相等,

所以按照正反方向控制作用完全施加给被控对象计算下一步的控制律可能造成模型失配, 导致不良的控制效果。

2 具有输入反馈结构的正反模型预测控制方法

本文采用输入反馈的方法对正反模型预测控制算法进行修正, 其控制结构如图 2 所示。

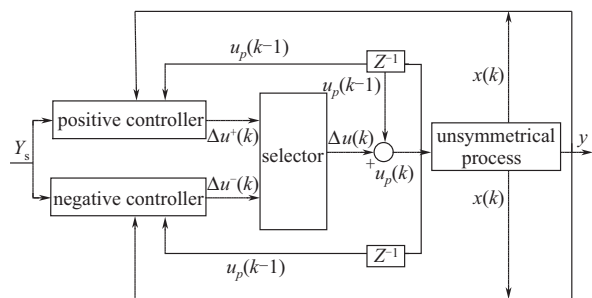


图 2 具有输入反馈结果的正反模型预测控制结构

Fig. 2 Positive/negative model predictive control with input feedback structures

通过将实际施加给对象的控制作用 $u_p(k-1)$ 纳入到下一步正反模型预测控制律的滚动优化求解中, 来替代原先使用的 $u^\sigma(k-1)$ ($\sigma = +, -$), 这样由式 (1) 和式 (2) 得到 k 时刻的预测模型式为

$$\begin{cases} x(k+1) = A^\sigma x(k) + B^\sigma [u_p(k-1) + \Delta u^\sigma(k)] \\ y(k) = C^\sigma x(k) \end{cases} \quad (5)$$

设预测时域为 P , 控制时域为 M , 采用单值预估控制算法^[15], 即 $M = 1$, 当 $i \geq M$ 时, $\Delta u(k+i) = 0$ 。

将式 (5) 系统状态的预测表示为矩阵和向量形式

$$\begin{bmatrix} x(k+1|k) \\ x(k+2|k) \\ \vdots \\ x(k+P|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^\sigma \\ A^{\sigma^2} \\ \vdots \\ A^{\sigma^P} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} B^\sigma \\ A^\sigma B^\sigma + B^\sigma \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{P-1} A^{\sigma^i} B^\sigma \end{bmatrix} \times [u_p(k-1) + \Delta u^\sigma(k)] \quad (6)$$

可以推出输出 P 个采样时刻内预测值为

$$\begin{aligned} Y^\sigma(k) &= S_y^\sigma x(k) + S_u^\sigma [u_p(k-1) + \Delta u^\sigma(k)] = \\ &= Y_0^\sigma(k) + S_u^\sigma \Delta u^\sigma(k) \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} Y_0^\sigma(k) &= S_y^\sigma x(k) + S_u^\sigma u_p(k-1) + E(k), \\ Y^\sigma(k) &= \begin{bmatrix} y^\sigma(k+1) \\ y^\sigma(k+2) \\ \vdots \\ y^\sigma(k+P) \end{bmatrix}, \quad S_x^\sigma = \begin{bmatrix} C^\sigma A^\sigma \\ C^\sigma A^{\sigma^2} \\ \vdots \\ C^\sigma A^{\sigma^P} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$S_u^\sigma = \begin{bmatrix} C^\sigma B^\sigma \\ C^\sigma (A^\sigma B^\sigma + B^\sigma) \\ \vdots \\ C^\sigma \sum_{i=1}^P A^{\sigma^{i-1}} B^\sigma \end{bmatrix}$$

$E(k)$ 为当前时刻预测值与实际输出值之差。

现有文献中控制系统优化性能指标一般形式为

$$V^\sigma(k) = \|Y_z^\sigma(k) - Y_s(k)\|_Q^2 + \|\Delta u^\sigma(k)\|_R^2 \quad (8)$$

其中

$$Y_s(k) = \begin{bmatrix} y_s(k+1) \\ y_s(k+2) \\ \vdots \\ y_s(k+P) \end{bmatrix}$$

为输出设定值, Q 、 R 分别为输出预测偏差和控制作用增量的加权系数。

将最优化问题式 (8) 进行处理

$$\begin{aligned} V^\sigma(k) &= \|Y_z^\sigma(k) - Y_s(k)\|_Q^2 + \|\Delta u^\sigma(k)\|_R^2 = \\ &= \text{const} + \Delta u^\sigma(k)^T H^\sigma \Delta u^\sigma(k) + 2F^{\sigma T} \Delta u^\sigma(k) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $H^\sigma = S_u^{\sigma T} Q S_u^\sigma + R$, $F^\sigma = S_u^{\sigma T} Q Y_z^\sigma(k)$, $Y_z^\sigma(k) = Y_0^\sigma(k) - Y_s(k)$ 。const 为常数, 对优化求解没有影响, 所以性能指标函数可记为

$$J^\sigma(k) = \Delta u^\sigma(k)^T H^\sigma \Delta u^\sigma(k) + 2F^{\sigma T} \Delta u^\sigma(k) \quad (10)$$

系统的输入、输出约束条件为

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \quad y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \quad (11)$$

则性能指标的约束条件可表示为

$$D_1 \Delta u^\sigma(k) \leq d_1^\sigma, \quad D_2^\sigma \Delta u^\sigma(k) \leq d_2^\sigma \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} D_1 &= \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} S_u^\sigma \\ -S_u^\sigma \end{bmatrix}, \\ d_1 &= [u_{\max} - u_p(k-1)], \quad d_2 = [Y_{\max}^\sigma - Y_0^\sigma(k) \\ & \quad Y_0^\sigma(k) - Y_{\min}^\sigma] \end{aligned} \quad (13)$$

于是预测控制算法控制律求解可以表示为如下标准二次规划问题

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u^\sigma(k)} J^\sigma(k) &= \frac{1}{2} \Delta u^\sigma(k)^T 2H^\sigma \Delta u^\sigma(k) + 2F^{\sigma T} \Delta u^\sigma(k) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2^\sigma \end{bmatrix} \Delta u^\sigma(k) \leq \begin{bmatrix} d_1^\sigma \\ d_2^\sigma \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

求解此问题可获得正反控制器的控制律 $\Delta u^\sigma(k)$ ($\sigma = +, -$), 下一时刻重新滚动计算优化问题, 反复进行。

求得正反方向控制律后, 根据求得控制律的正负并按照文献 [11] 方法对正反方向控制器输出进行选取。这样在每一步正反方向控制器求取控制律时, 通过采用上一步实际求得的控制作用 $u_p(k-1)$

替代原 MPC 算法中的 $u^{\sigma}(k-1)$ ($\sigma=+, -$), 并将其通过反馈形式纳入到下一步控制律的求解中, 如图 2 所示, 解决了图 1 中所示的模型失配问题。

3 正反模型预测控制的可控性分析

正反模型状态反馈预测控制系统闭环系统可以表示为如下形式^[14]

$$\begin{cases} \chi(k+1) = A_c^{\sigma} \chi(k) + B_c^{\sigma} u(k) \\ y(k) = C_c^{\sigma} \chi(k) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} A_c^{\sigma} &= A^{\sigma} - B^{\sigma} S^{\sigma-1}(P) W^{\sigma} \\ B_c^{\sigma} &= B^{\sigma} S^{\sigma-1}(P) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $W^{\sigma} = C^{\sigma} A^{\sigma P}$, $S^{\sigma}(P) = \sum_{i=1}^P C^{\sigma} A^{\sigma i-1} B^{\sigma}$ 。

由式(15)、式(16)得增益 $K^{\sigma} = C_c^{\sigma} (I - A_c^{\sigma})^{-1} B_c^{\sigma}$ ($\sigma=+, -$)。假设 $K^+ > K^-$, 则正反模型状态反馈预测控制系统满足如下可控性定理。

定理 1 假设正反模型预测控制系统正反方向的闭环系统都是稳定的, 即 $|\text{eig}(A_c^{\sigma})| < 1$, ($\sigma=+, -$) 满足以下不等式

$$C_c^- (I - A_c^-)^{-1} B_c^- < C_c^+ (I - A_c^+)^{-1} B_c^+ \quad (17)$$

及

$$C_c^- B_c^+ + C_c^- (I - A_c^-)^{-1} (A_c^- B_c^+ - B_c^-) < 0 \quad (18)$$

则闭环系统是可控的。

为证明定理 1, 给出如下两条性质。

性质 1 若 $|\text{eig}(A)| < 1$, 则有 $\lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^T A^k =$

$(I - A)^{-1}$, 且 $\sum_{k=0}^T A^k = (I - A)^{-1} - \sum_{k=T+1}^{\infty} A^k$ 。

性质 2 存在 $\epsilon > 0$, 使得

$$\exists T, \left\| \sum_{k=T+1}^{\infty} A^k \right\| < \epsilon$$

证明: 为不失普遍性, 设初始条件 $\chi(0) = 0$, $y(0) = 0$ 。

假设式(17)满足, 设存在输入序列 $u(k)$, $k \in \{0, 1, 2, \dots, M\}$, 使

$$\begin{aligned} u(M) - u(0) &= 0 \\ y(M) - y(0) &> 0 \end{aligned} \quad (19)$$

为了证明式(19), 假设 $\Delta u(1) = -1$, $\Delta u(T+1) = 1$, $\Delta u(k) = 0$, $k \in \{2, 3, \dots, T, T+2, \dots, J\}$, 有

$$y(T) = - \sum_{i=2}^T C_c^- A_c^{-i-2} B_c^- \quad (20)$$

利用性质 1, 式(20)可以表示为

$$y(T) = K^- + S_1 \quad (21)$$

其中, $S_1 = C_c^- \left(\sum_{i=T+1}^{\infty} A_c^{-i-2} \right) B_c^-$ 。

所以

$$y(T+J) = y(T) + S_3 + K^- - S_2 \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} S_2 &= -C_c^+ \left(\sum_{j=T+1}^{\infty} A_c^{+j-2} \right) B_c^+ \\ S_3 &= C_c^+ \left(\sum_{j=1}^J A_c^{+j-1} \right) A_c^{-T-1} B_c^+ \end{aligned}$$

可得

$$y(T) = K^+ - K^- + S_1(T) - S_2(J) + S_3(T, J) \quad (23)$$

因为 $K^+ > K^-$, 所以存在 ϵ 使 $0 < \epsilon < K^+ - K^-$, 选择 T, J 满足性质 2

$$T: |S_1(T)| < \frac{1}{3}\epsilon, J: |S_2(J)| < \frac{1}{3}\epsilon$$

如果 $|S_3(T, J)| < \frac{1}{3}\epsilon$ 无法满足, 则增加 T, J 直到满足。

因此 $y(M) > K^+ - K^- + \epsilon > 0$, 且 $u(M) = 0$ 。

假设式(18)满足, 设存在输入序列 $u(k)$, $k \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$, 使

$$\begin{aligned} u(N) - u(0) &= 0 \\ y(N) - y(0) &> 0 \end{aligned} \quad (24)$$

为了证明式(24), 假设式(18)条件满足, 假设 $\Delta u(1) = 1$, $\Delta u(2) = -1$, $\Delta u(k) = 0$, $k \in \{3, 4, \dots, N\}$, 则有

$$y(N) = C_c^- B_c^+ + \sum_{i=3}^N (C_c^- A_c^{-i-2} B_c^+ - C_c^- A_c^{-i-3} B_c^+) \quad (25)$$

由性质 1, 可得

$$y(N) = C_c^- B_c^+ + C_c^- (I - A_c^-)^{-1} (A_c^- B_c^+ - B_c^-) + S_4 \quad (26)$$

其中

$$S_4 = C_c^- \left(\sum_{i=N+1}^{\infty} A_c^{-i-3} \right) (A_c^- B_c^+ - B_c^-)$$

所以, $y(N) < 0$ 。因此闭环系统存在输入序列, 使输出在增加和减小的值相等, 而不改变最终的输入值。

证毕。

由以上证明可以对非对称系统的正反模型预测控制方法在设计控制器前进行简要的分析。

4 仿真实例及分析

酸碱中和的 pH 值控制具有强非线性和在某些平衡点附近的强不对称性。假设强酸强碱溶液在如图 3 所示的连续搅拌式反应器 (CSTR) 中进行中

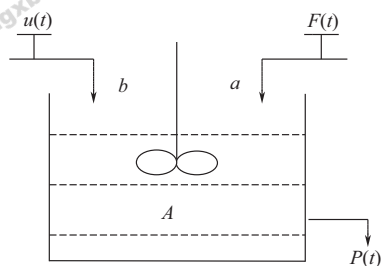


图 3 酸碱中和过程的 CSTR 反应器

Fig. 3 CSTR of pH neutralization

和反应。

假设液位控制稳定，通过机理分析建立 CSTR 中酸碱中和过程的数学模型

$$\begin{cases} V \frac{dy(t)}{dt} = u(t)(b - y(t)) - F(t)(a + y(t)) \\ \text{pH}(t) = \lg \frac{y(t) + \sqrt{y(t)^2 + 4K_w}}{2K_w} \end{cases} \quad (27)$$

式中 $u(t)$ 为碱溶液的流量， $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ； $F(t)$ 为酸溶液的流量， $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ； V 为反应器的容积， L ； $y(t)$ 为 $[\text{OH}^-]$ 和 $[\text{H}^+]$ 之差， $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ； a 为酸的浓度， $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ； b 为碱的浓度， $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ； $K_w = 10^{-14}$ 为水平衡常数。在文献 [16-17] 中采用多模型预测控制和自适应预测控制方法对 pH 装置进行控制，控制效果比单一线性模型预测控制有极大改善，但都没有涉及此非线性过程的不对称特性。

采用文献 [12] 中的方法来建立正反方向的线性状态空间模型

$$\begin{cases} y(k+1) = A^s y(k) + B^s u(k) \\ \text{pH}(k+1) = C^s y(k+1) \end{cases} \quad (28)$$

σ 为模型决定函数

$$\sigma = \begin{cases} +, & \Delta u(k) \geq 0 \\ -, & \Delta u(k) < 0 \end{cases} \quad (29)$$

其中

$$A^s = 1 - \frac{T_s}{V} u_0 - \frac{T_s}{V} F_0 + \Psi^s$$

$$B^s = \frac{T_s}{V} (b - y_0) + \Phi^s$$

$$C^s = \frac{1}{\ln 10 \sqrt{y_0^2 + 4K_w}} + \Gamma^s$$

其中， T_s 为采样时间， u_0 、 y_0 、 F_0 为在平衡状态时碱溶液的流量、状态变量和酸溶液的流量。 Ψ 、 Φ 、 Γ 为正反模型系数中的校正式，此处是通过泰勒展开在正反方向上的高阶项来修正正反方向上的线性模型。这样就通过式 (28) 将式 (27) 表示成了正反状态空间模型形式。以碱流量为输入变量，

pH 值为输出变量，在 $\text{pH}=9$ 的稳态条件下对碱流量增加和减小的方向分别施加 4% 的阶跃变化，分别得到非线性模型、基于一阶泰勒展开的近似线性化模型和正反方向线性模型的输出 pH 值的阶跃响应如图 4 所示。由图 4 可见，此系统不对称特性明显，采用式 (28) 的正反模型能较好地近似原非线性系统。

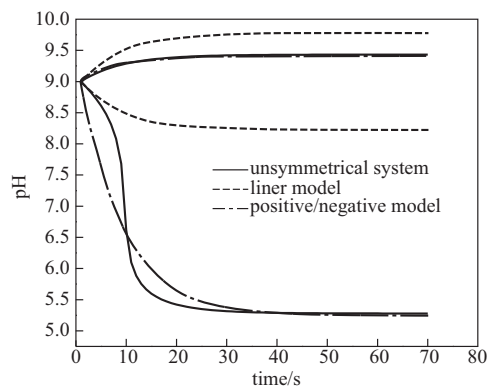


图 4 碱流量增加和减小 4% 时的阶跃响应曲线

Fig. 4 Step response curve for alkali

flow increase/decrease 4%

以 pH 值为 9 为设定值，根据式 (28) 的正反方向的线性模型，设计状态反馈预测控制器，选取预测时域 P 为 10 时，闭环系统正反方向的系统矩阵 A_C^+ 、 A_C^- 分别为 0.75、0.86，满足稳定性条件 $|\text{eig}(A_C^s)| < 1$ ，并按照定理 1 简要分析系统，可得其满足定理 1 的可控性条件。分别采用具有和不具有输入反馈结构的正反模型预测控制方法对不对称系统的设定值从 9.27 变为 9 时进行控制仿真研究。

由仿真结果图 5 可以看出，对于基于正反模型分别设计预测控制器，若采用传统的预测控制方法，由于正反方向预测控制器的历史控制作用 $u^s(k-1)$ 无法全部实际施加给被控对象，而在每一步控制律的求解中，历史控制作用采用的是控制器自身的输出 $u^s(k-1)$ ，这样就造成了较大模型失配，导致控制效果不佳，由图 5 中实线可以看出此种控制方法稳态时有余差。

采用改进后的正反模型预测控制方法，将实际施加给被控对象的历史控制作用 $u_p(k-1)$ 纳入到下一步控制律的求解中，这样消除了由此带来的模型失配问题，由图 5 中虚线仿真结果可以看出控制效果较好且无余差。

通过以上 pH 值控制仿真结果及分析表明修正后具有输入反馈结构的正反模型预测控制算法比未

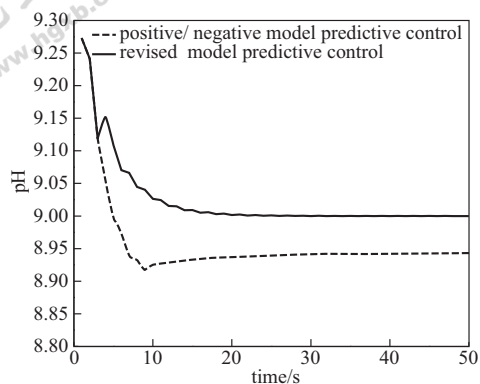


图 5 pH 设定值从 9.27 变为 9 时的控制效果曲线

Fig. 5 Control effect curve with
pH setpoint from 9.27 to 9

修正的正反模型预测控制方法能得到更好的控制效果。

5 结 论

基于不对称系统的正反方向的线性模型, 分别设计状态反馈预测控制器, 并通过输入反馈方法解决了控制结构不连续造成的模型失配问题。pH 值控制的仿真结果证明了该控制算法的有效性。

本文针对不对称系统正反模型预测控制方法的可控性进行了简要的分析证明, 而证明过程中的设定条件有很大的局限性, 对其在有约束条件下的稳定性、可控性及可行性的分析是今后研究的重点。

References

- [1] Gardner J W, Bartlett, Pratt P N. Modelling of gas-sensitive conducting polymer devices [J]. *IEEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems*, 1995, **142** (5): 321-333
- [2] Rosenqvist F, Tan A H, Godfrey K R. Direction-dependent system modeling approaches exemplified through an electronic nose system [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, **14** (3): 526-531
- [3] Ping Yang (平洋), Luo Xionglin (罗雄麟). human-simulated intelligent multi-model control of electric heater [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry* (化工自动化及仪表), 2010, **37** (8): 30-33
- [4] Wang Q G, Hang C C, Zou W. Automatic tuning of non-linear PID controllers for unsymmetrical processes [J].

Computers and Chemical Engineering, 1998, **22** (4): 687-694

- [5] He Renchu (何仁初), Luo Xionglin (罗雄麟), Tong Shiwen (佟世文), et al. Developments and applications of simulation platform for ethylene rectifier [J]. *Computers and Applied Chemistry* (计算机与应用化学), 2005, **22** (10): 909-914
- [6] Tan A H. Identification of direction-dependent processes using maximum length ternary signals [J]. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 2003, **150** (2): 170-178
- [7] Godfrey K R, Briggs P. Identification of processes with direction-dependent dynamic responses [J]. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 1972, **119** (12): 1733-1739
- [8] Hagglund T, Tengval A. An automatic tuning procedure for unsymmetrical processes//*IEE Proceedings of European Control Conference* [C]. 1998: 2450-2455
- [9] Tan A H. Direction-dependent systems—a survey [J]. *Automatica*, 2009, **45**: 2729-2743
- [10] Rosenqvist F, Karlström A. Controllability of direction-dependent processes//*Proceedings of the IEE Conference on Decision and Control* [C]. 2003: 3384-3389
- [11] Wei Minghui (韦明辉), Luo Xionglin (罗雄麟), Feng Aixiang (冯爱祥). Predictive controller for unsymmetrical systems based on control performance comparison [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2012, **63** (10): 3183-3189
- [12] Turner P, Montague G, Morris J. Nonlinear and direction-dependent dynamic process modelling using neural networks [J]. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 1996, **143** (1): 44-48
- [13] Xu Feng (许锋), Luo Xionglin (罗雄麟). Multi-model predictive control of nonlinear system based on self-tuning model [J]. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition* (中国石油大学学报: 自然科学版), 2006, **30** (2): 133-137
- [14] Yuan Pu (袁璞), Zuo Xin (左信), Zheng Haitao (郑海涛). State feedback predictive control [J]. *Acta Automatic Sinica* (自动化学报), 1993, **19** (5): 569-577
- [15] Yuan Pu (袁璞). Predictive control of single prediction [J]. *Journal of the University of Petroleum* (石油大学学报), 1992, **16** (5): 100-109
- [16] Zhang Zhihuan (张智焕), Wang Shuqing (王树青). Predictive control of pH nonlinear process based on multiple model [J]. *Journal of Zhejiang University* (浙江大学学报), 2002, **36** (1): 29-31
- [17] Yang Jianfeng (杨剑锋), Zhao Jun (赵均), Qian Jixin (钱积新), et al. Adaptive nonlinear model predictive control for a class of multivariable chemical processes [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2008, **59** (4): 934-940