

研究论文

连续搅拌反应釜系统的非线性鲁棒控制

刘 松¹, 李东海¹, 薛亚丽¹, 陈金莉²

(¹ 清华大学热能工程系热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;

² 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于非线性鲁棒控制理论, 针对一类单输入单输出连续搅拌反应釜 (CSTR) 模型设计了具有高增益观测器的非线性鲁棒控制器 (ONRC), 并提出了一种简单的控制器参数整定方法。与非线性鲁棒控制器 (NRC) 和滑模控制方法 (SMC) 的仿真结果比较表明, ONRC 对系统不确定性和干扰具有更好的抑制作用, 通过 Monte-Carlo 试验检验显示, ONRC 在模型参数摄动时具有更好的性能鲁棒性。

关键词: 非线性; 鲁棒控制; 连续搅拌反应釜; 高增益观测器

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 02-0398-07

Nonlinear robust control for continuous stirred tank reactor system

LIU Song¹, LI Donghai¹, XUE Yali¹, CHEN Jinli²

(¹ Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics
and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: This article considers the design of nonlinear robust controller with high gain observer (ONRC) for single-input/ single-output system of continuous stirred-tank reactor (CSTR) based on a nonlinear robust theory. To facilitate its implementation, a simple parameter tuning method was suggested. Through comparison of simulations with NRC and sliding model controller (SMC), it was found that the proposed schemes ONRC appeared to restrain the system uncertainties and disturbances better. Monte-Carlo experiments also suggested the better robustness of ONRC.

Key words: nonlinear; robust control; CSTR; HGO

引 言

连续搅拌反应釜 (CSTR) 是化工、制药等工业生产过程中必不可少的生产工具, 其操作状况的好坏直接影响生产质量和效率。反应釜控制的任务就是在保证系统稳定的条件下, 通过优化操作条件和方式, 改善产品质量, 提高产品数量^[1]。

在实际过程中, CSTR 经常受到外部和内部因素的影响, 如反应物浓度变化、副反应、温度和汽液相位不均、外扰等, 并且 CSTR 系统本身具有强非线性^[2-3], 因此, 这是一个非线性系统的鲁棒控制问题。近年来, 国内外学者将众多控制方法引入到 CSTR 系统中, 例如以预测模型、滚动优化和反馈校正为主要部分的预测控制, 张智焕等^[4-5]

2007-02-06 收到初稿, 2007-06-11 收到修改稿。

联系人及第一作者: 刘松 (1983—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50376029)。

Received date: 2007-02-06.

Corresponding author: LIU Song. E-mail: s-liu05@mails.tsinghua.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50376029).

通过对非线性动态过程的多模型建模,将加权器应用到预测控制器上,Casavola 等^[6]基于嵌入策略提出新的预测控制算法,Limon 等^[7]将不确定进化集合应用到预测控制的滚动优化模块,3种方法均提高了预测控制对系统模型的鲁棒性,但预测控制在实际中应用于多为线性模型,对非线性模型还有待深入研究。刘丁等^[8-9]将自抗扰控制器应用到 CSTR 系统中,它对不确定因素和外扰具有优异的适应性和鲁棒性,不依赖于被控对象模型,能够对扩张状态进行估测,但经典的自抗扰控制器待整定的参数多,且物理意义不明显。滑模控制以控制的不连续性为特点,利用滑模运动使系统达到预期特性,具有很强的鲁棒性,Chen 等^[10]在滑模控制器的基础上结合微分几何理论,提高了控制器的实用性,但是滑模控制要求不确定性满足广义匹配条件,获得满意的滑模面比较困难,且微分几何理论假设系统的状态均可测,并依赖于系统的精确模型。因此,针对 CSTR 系统设计简单实用的非线性鲁棒控制系统仍是个值得深入研究的问题。

本文首先基于非线性鲁棒控制理论^[11],针对一类 CSTR 系统模型设计了具有高增益观测器^[12](HGO)的非线性鲁棒控制器(ONRC)。ONRC 通过高增益观测器估测输出量的各阶导数,再通过控制器内部的积分环节对系统的总扰动(包含系统非线性部分、不确定性和扰动)进行估计并精确补偿。随后本文针对该方法提出简单的参数整定规则,并将控制器应用到 CSTR 系统中,最后与没有观测器的非线性鲁棒控制器(NRC)和文献^[10]中的滑模控制器进行仿真比较,结果表明,ONRC 有效地提高了 CSTR 控制系统的性能鲁棒性。

1 反应釜系统原理分析

如图1所示,反应物料由进料泵控制,以一定的速率连续流入反应釜中进行反应,而已反应的物料则连续从反应釜中流出。

假设反应釜内为常见的绝热、液相和多元化学反应,且反应物已充分混合



反应釜系统的控制目标为:

(1) 通过调整反应物 B 的摩尔速率使反应物 C 的浓度达到预期的要求;

(2) 克服模型内部参数摄动、反应釜系统结构

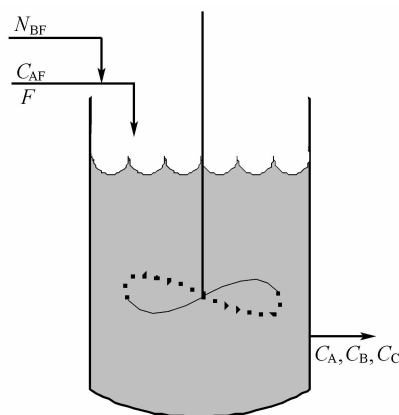


图1 非线性 CSTR 的示意图

Fig.1 Schematic diagram of nonlinear CSTR

摄动和输入干扰,保持系统的性能鲁棒性;

(3) 控制量满足限幅要求 $[-3, 3]$ 。

对 CSTR 系统建模得到原始数学模型^[10]

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}}_1 &= 1 - \bar{x}_1 - Da_1 \bar{x}_1 + Da_2 \bar{x}_2^2 \\ \dot{\bar{x}}_2 &= Da_1 \bar{x}_1 - \bar{x}_2 - Da_2 \bar{x}_2^2 - 2Da_3 \bar{x}_2^2 + \bar{u} \\ \dot{\bar{x}}_3 &= Da_3 \bar{x}_2^2 - \bar{x}_3 \\ \bar{y} &= \bar{x}_3\end{aligned}\quad (1)$$

其中, $\bar{x}_1$ 、 $\bar{x}_2$ 、 $\bar{x}_3$ 、 $\bar{u}$ 为量纲 1 浓度变量,分别定义为 $\bar{x}_1 = C_A/C_{A,F}$, $\bar{x}_2 = C_B/C_{B,F}$, $\bar{x}_3 = C_C/C_{C,F}$ 和 $\bar{u} = N_{B,F}/FC_{A,F}$ 。设定稳态状态值为 $x_{1,d}$, $x_{2,d}$, $x_{3,d}$, 稳定输入为 u_d , 定义差分变量 $x_1 = \bar{x}_1 - x_{1,d}$, $x_2 = \bar{x}_2 - x_{2,d}$, $x_3 = \bar{x}_3 - x_{3,d}$ 和 $u = \bar{u} - u_d$, 则系统对稳定状态的差分方程为

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -(1 + Da_1)x_1 + 2Da_2 x_{2,d}x_2 + Da_2 x_2^2 \\ \dot{x}_2 &= Da_1 x_1 - (1 + 2Da_2 x_{2,d} + 2Da_3 x_{2,d})x_2 - \\ &\quad (Da_2 + Da_3)x_2^2 + u \\ \dot{x}_3 &= Da_3 x_2^2 + 2Da_3 x_{2,d}x_2 - x_3 \\ y &= x_3\end{aligned}\quad (2)$$

为方便设计控制器,将式(2)化为标准形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \Delta \mathbf{f}(\mathbf{x}) + [\mathbf{g}(\mathbf{x}) + \Delta \mathbf{g}(\mathbf{x})]u \\ y = h(\mathbf{x}) \end{cases}\quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned}\mathbf{f}(\mathbf{x}) &= \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -(1 + Da_1)x_1 + 2Da_2 x_{2,d}x_2 + Da_2 x_2^2 \\ Da_1 x_1 - (1 + 2Da_2 x_{2,d} + 2Da_3 x_{2,d})x_2 - \\ \quad (Da_2 + Da_3)x_2^2 \\ Da_3 x_2^2 + 2Da_3 x_{2,d}x_2 - x_3 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

$$g(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \Delta f(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ -e_f x_2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\Delta g(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ e_g \\ 0 \end{bmatrix}$$

模型参数的值见表 1。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

Parameter symbol	Value	Parameter symbol	Value
Da_1	3.0	e_g	0.3
Da_2	0.5	e_f	0.05
Da_3	1.0	u_d	1.0
$x_{1,d}$	0.3467	$x_{2,d}$	0.8796
$x_{3,d}$	0.8796		

2 非线性鲁棒控制

2.1 控制器设计

考虑 SISO 仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + \Delta f(\mathbf{x}) + [g(\mathbf{x}) + \Delta g(\mathbf{x})]u \\ y = h(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, n 为系统的维数, $\mathbf{x} \in R^n$ 、 $u \in R$ 、 f 、 $g \in C^p(R^n, R^n)$ 是系统模型的确定性部分, Δf 、 $\Delta g \in C^p(R^n, R^n)$ 为系统模型的不确定性部分, $h \in C^p(R^n, R)$, p 为一个适当的正整数。

假设 (1): 系统在某平衡点 $\mathbf{x}_0$ 的相对阶 r 有界且已知。

假设 (2): 系统中的各个状态 x_i ($i=1, \dots, n$) 可测。

进一步将式 (4) 化为标准型

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \vdots \\ \dot{z}_{r-1} = z_r \\ \dot{z}_r = [b(\mathbf{z}, \xi) + \Delta b(\mathbf{z}, \xi)] + [a(\mathbf{z}, \xi) + \Delta a(\mathbf{z}, \xi)]u \\ \dot{\xi} = c(\mathbf{z}, \xi) \\ y = z_1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_r)^T$, $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_{n-r})^T$, $\Delta a(\mathbf{z}, \xi)$, $a(\mathbf{z}, \xi)$, $\Delta b(\mathbf{z}, \xi)$, $b(\mathbf{z}, \xi)$ 和 $c(\mathbf{z}, \xi)$ 可由 Δf , f , Δg , g , h 和微分同胚变换函数导出^[11]。

假设 (3): 式 (5) 零动态渐近稳定。

选取系统的预期动力学方程形式为

$$y^{(r)} + h_{r-1}y^{(r-1)} + \dots + h_1\dot{y} + h_0y = h_0r \quad (6)$$

为满足系统的稳定性要求, 参数 h_i ($i=0, \dots, r-1$) 的选取应满足 $h(s)$ 的频谱位于左半开平面, 令 $h(s) = h_0 + h_1s + \dots + h_{r-1}s^{r-1} + s^r$ 。

令

$$d(\mathbf{z}, \xi, u) = a(\mathbf{z}, \xi) + \Delta a(\mathbf{z}, \xi) + [b(\mathbf{z}, \xi) + \Delta b(\mathbf{z}, \xi) - 1]u \quad (7)$$

即 $\dot{z}_r = d(\mathbf{z}, \xi, u) + u$

考虑到实际系统中 $a(\mathbf{z}, \xi)$ 和 $b(\mathbf{z}, \xi)$ 常常未知, 并为消除系统的各种不确定性影响, 设计非线性鲁棒控制器^[11] (NRC) 为

$$u = -\sum_{i=0}^{r-1} h_i z_{i+1} - \hat{d} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \hat{d} = \xi + kz_r \\ \dot{\xi} = -k\xi - k^2 z_r - ku \end{cases} \quad (9)$$

其中, $k = \sigma [b(\mathbf{z}, \xi)] \mu$ (σ 为符号函数, μ 为一适当的正数), 它决定了系统的稳定性。

引理 1 存在一个大于零的常数 μ^* , 使得对任意 $\mu > \mu^*$, 闭环系统 [式 (5)、式 (8)] 是渐近稳定的^[11]。

实际过程中 CSTR 系统的状态变量通常不能在线测量, 即假设 (2) 通常不成立, 因此需要对不可测状态进行估测。针对这一实际背景, 本文采用 HGO^[12] 对输出状态的各阶导数进行观测。观测器数学表达式为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_1 &= \hat{z}_2 + l_1(z_1 - \hat{z}_1) \\ &\vdots \\ \dot{\hat{z}}_{r-1} &= \hat{z}_r + l_{r-1}(z_{r-1} - \hat{z}_{r-1}) \\ \dot{\hat{z}}_r &= l_r(z_1 - \hat{z}_1) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, z_1 是实际测量的输出状态, $\hat{z}_1, \hat{z}_2, \dots, \hat{z}_r$ 为观测器观测状态。为方便参数的选取, 令 $s^r + l_1s^{r-1} + \dots + l_{r-1}s + l_r = (s + w_0)^r$, 其中 w_0 为可调参数; 为保证观测精度, 一般选 w_0 为 1000。加入观测器后, NRC 转换为 ONRC

$$\begin{cases} u = -\sum_{i=0}^{r-1} h_i \hat{z}_{i+1} - k\hat{z}_r - \xi \\ \dot{\xi} = -k\xi - k^2 \hat{z}_r - ku \end{cases} \quad (11)$$

2.2 参数的整定

需要整定的参数包括预期动力学参数 h_i 和控制器参数 k 。为简化参数整定, 将预期动力学方程 (6) 进行拉氏变换并化简为式 (12)

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{h_0}{s^r + h_{r-1}s^{(r-1)} + h_{r-2}s^{(r-2)} + \dots + h_1s + h_0} = \frac{w^r}{(s + w)^r} \quad (12)$$

其中, $h_i = \frac{r!}{i!(r-i+1)!} \omega^{r-i}$ 。这样预期动态特性方程中的待整定参数仅为 ω , 其物理含义与系统的预期固有频率有直接关系, ω 的取值直接影响系统动态特性中的调节时间 T_s 。表 2 中列出了二阶系统 $\omega^2/(s+\omega)^2$ 中 ω 与 T_s 的部分对应值, ω 取值越大, T_s 越小, 可根据系统性能要求选取合适的值。

表 2 不同 ω 对应的调节时间

Table 2 Regulation-time for different ω		
ω	T_s	ITAE
0.01	461	2.97
$0.01 \times 10^{0.5}$	137	0.3
0.1	44.1	0.03
$0.1 \times 10^{0.5}$	14.6	2.99×10^{-3}
1	4.65	3×10^{-4}
$10^{0.5}$	1.35	3×10^{-5}
10	0.46	2.99×10^{-6}
$10 \times 10^{0.5}$	0.15	3×10^{-7}
100	0.04	3×10^{-8}

由文献 [11] 的证明分析可知 k 值越大系统的性能鲁棒性越强, 同时由仿真试验得到 k 与控制输入的幅值有直接关联。在满足系统对输入控制量最大允许幅值的条件下, 选择适当的 k 值以满足系统对鲁棒性的要求。

3 反应釜控制系统的设计

对反应釜系统分析^[10]可知, 相对阶 $r=2$, 满足 ONRC 和 NRC 设计的假设 (1)。对原模型进行微分同胚转换, 选择转换坐标矩阵为

$$T = [z_1, z_2, \xi]^T = [x_3, Da_3x_2^2 + 2Da_3x_{2,d}x_2 - x_3, x_1]^T \tag{13}$$

则式 (3) 转换为如下仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = [b(z, \xi) + \Delta b(z, \xi)] + [a(z, \xi) + \Delta a(z, \xi)]u \end{cases} \tag{14}$$

其中

$$\begin{cases} a(z, \xi) = 2Da_3(x_{2,d} + x_2) \\ b(z, \xi) = 2Da_3(x_{2,d} + x_2)f_2 - f_3 \\ \Delta a(z, \xi) = 2e_g Da_3(x_{2,d} + x_2) \\ \Delta b(z, \xi) = -2e_f Da_3x_2(x_{2,d} + x_2) \end{cases}$$

令 $z=0$, 得系统的零动态方程

$$\dot{\xi} = c(0, \xi) = -(1 + Da_1)\xi \tag{15}$$

可见, 式 (15) 的解依指数收敛, 即系统零动态稳定, 满足假设 (3)。在假设 (2) 成立时, 可按式

(8) 和式 (9) 设计 NRC

$$\begin{cases} u = -h_0z_1 - (h_1 + k)z_2 - \xi \\ \dot{\xi} = -k\xi - k^2z_2 - ku \end{cases} \tag{16}$$

即

$$\begin{cases} u = -h_0x_3 - (h_1 + k)(Da_3x_2^2 + 2Da_3x_{2,d}x_2 - x_3) - \xi \\ \dot{\xi} = -k\xi - k^2(Da_3x_2^2 + 2Da_3x_{2,d}x_2 - x_3) - ku \end{cases}$$

按照式 (11) 设计 ONRC

$$\begin{cases} u = -h_0\hat{z}_1 - (h_1 + k)\hat{z}_2 - \xi \\ \dot{\xi} = -k\xi - k^2\hat{z}_2 - ku \\ \dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 + l_1(x_3 - \hat{z}_1) \\ \dot{\hat{z}}_2 = l_2(x_3 - \hat{z}_1) \end{cases} \tag{17}$$

根据表 2, 选取 $T_s=1$ s, 对应 $\omega=5$ 。表 3 和表 4 给出将 ONRC 和 NRC 应用到 CSTR 系统时部分 k 值与控制输入幅值的对应关系, 在满足限幅要求的基础上选定 k 值分别为 15 (ONRC), 40 (NRC)。

表 3 不同 k 值对应 u 的幅值

Table 3 Amplitude of u for different k (ONRC)	
k	$\max(u)$
0.1	0.65
$0.1 \times 10^{0.5}$	0.448
1	0.36
$10^{0.5}$	1.08
10	2.33
$10 \times 10^{0.5}$	3.71
100	5.43
$100 \times 10^{0.5}$	17.31
500	33

表 4 不同 k 值对应 u 的幅值

Table 4 Amplitude of u for different k (NRC)	
k	$\max(u)$
0.1	1.39
$0.1 \times 10^{0.5}$	1.06
1	0.98
$10^{0.5}$	0.56
10	1.60
$10 \times 10^{0.5}$	2.61
100	3.30
$100 \times 10^{0.5}$	3.45
1000	179

4 仿真研究及结果分析

本节考虑了系统不确定性和外界干扰的影响, 分别对 ONRC、NRC 和 SMC^[10] 反应釜控制系统进行仿真试验, 最后通过系统参数摄动的 Monte-Carlo 试验, 对系统的鲁棒性进行检验。

4.1 系统不确定性试验

首先系统不确定性试验 (1) 采用 $\Delta f(x)$ 和 $\Delta g(x)$, 图 2 所示为 3 种控制器应用到 CSTR 系统上的暂态过程。可以看出 3 种控制系统的输出量几乎没有静态误差, 控制量满足系统要求, 表现出对这类系统不确定性的优良适应性。

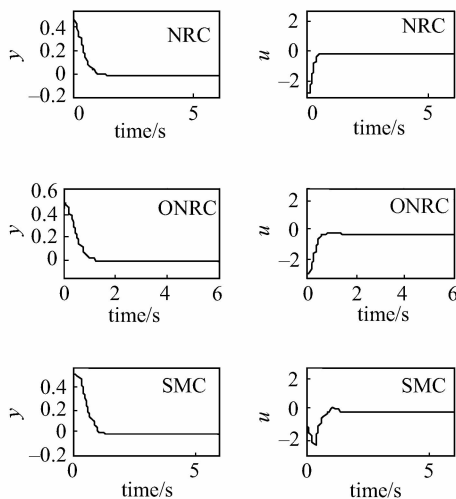


图 2 系统不确定试验 (1) 的动态响应

Fig. 2 Dynamic response of simulation experiment (1)

在系统不确定性试验 (2) 中, 假设 $\Delta f(x) = [d_1 - e_f x_2 + d_2 \ 0]^T$, 许多控制方法对这种扰动都存在控制失效的现象^[13]。设不确定参数的值为 $d_1=1$, $d_2=0.2$ 。仿真结果如图 3 所示, SMC 控制输出有 0.002 的静态误差, NRC 和 ONRC 则保持零静差。

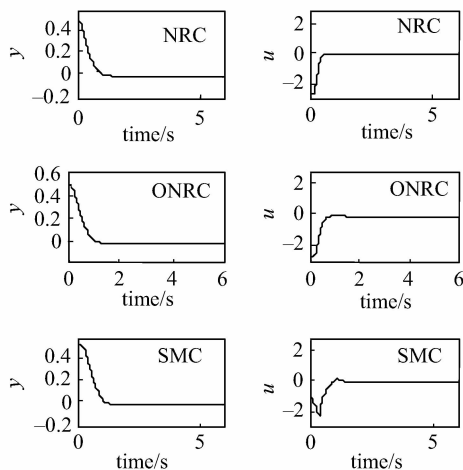


图 3 系统不确定试验 (2) 的动态响应

Fig. 3 Dynamic response of simulation experiment (2)

4.2 输入干扰试验

假设输入控制量 u 受到外界干扰, 扰动量分别

为时间长度为 0.2 s、幅度为 4 的方波和均值为 0、方差为 0.5 的白噪声。为方便看出两种控制方法的差别, 白噪声试验只显示局部响应曲线。图 4 和图 5 分别为两种干扰的响应曲线。从仿真结果可以看出, ONRC 和 NRC 对输入干扰的抑制作用要优于 SMC。

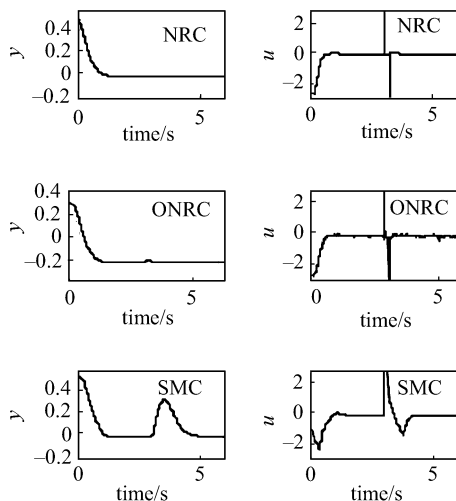


图 4 方波扰动下的动态响应

Fig. 4 Dynamic response under square wave

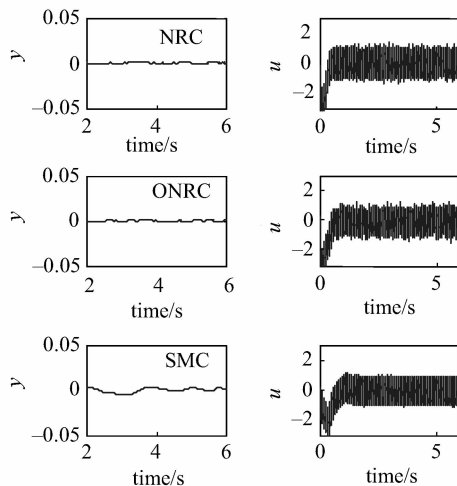


图 5 白噪声扰动下的动态响应

Fig. 5 Dynamic response under white noise

4.3 性能鲁棒性试验

为检验系统的性能鲁棒性, 设模型中参数 Da_1 , Da_2 , Da_3 和 $x_{2,d}$ 的扰动范围为 $-80\% \sim 200\%$, 试验次数为 2000。

4.3.1 四参数同时扰动的试验结果与分析 取输出响应的调节时间 (regulation-time) 和 ITAE 性能指标作为观测量。从试验结果图 6~图 8 可以看出, 3 种控制方法都能够在给定的参数扰动范围内

保持系统稳定，然而 ONRC 性能指标波动范围更小，显示了它针对系统参数摄动具有更好的性能鲁棒性。

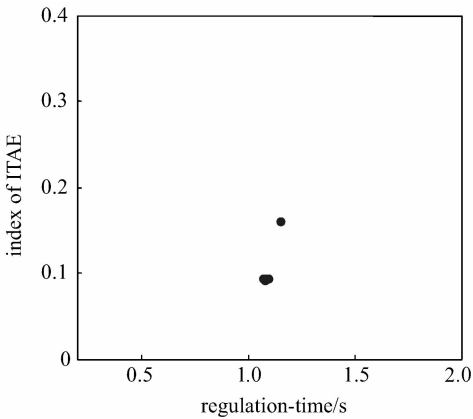


图 6 ONRC 的鲁棒试验结果

Fig. 6 Simulation results of robustness performance of ONRC

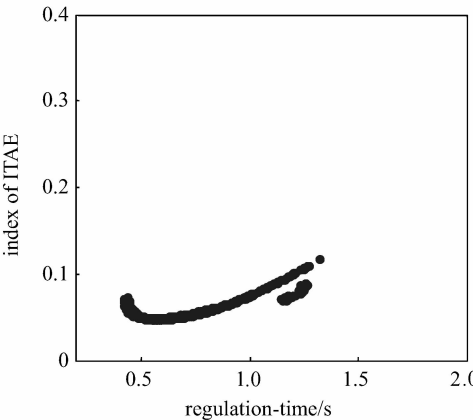


图 7 NRC 的鲁棒试验结果

Fig. 7 Simulation results of robustness performance of NRC

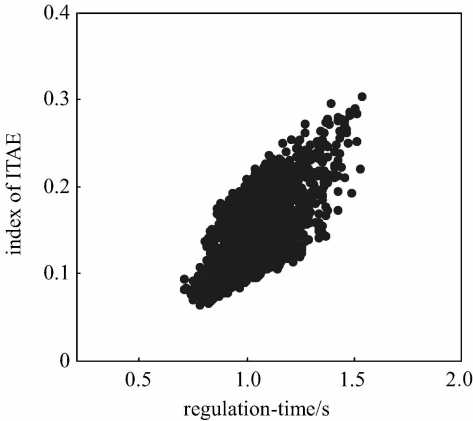


图 8 SMC 的鲁棒试验结果

Fig. 8 Simulation results of robustness performance of SMC

4.3.2 单参数摄动的试验结果与分析 表 5、表 6 给出了四参数单独摄动时对 3 个控制系统 ITAE 性能指标和调节时间的影响。由仿真结果可知，ONRC 对系统参数摄动的性能鲁棒性优于 NRC，NRC 优于 SMC。

微分几何理论需要系统的精确模型，所以对系统参数摄动表现出较高的敏感度，NRC 中输出状态的微分项是由坐标变换得到的，参数 Da_3 和 $x_{2,d}$ 变动时微分项也相应变动，故对 Da_3 和 $x_{2,d}$ 的摄动表现出较高的敏感度，而 ONRC 中微分项是由观测器直接获得的，所以对参数摄动的敏感度最小。

表 5 不同参数扰动下的 ITAE 指标扰动范围
Table 5 ITAE for different parameter perturbations

ITAE	Perturbing parameter			
	Da_1	Da_2	Da_3	$x_{2,d}$
NRC	0.08	0.08	0.05—0.1	0.05—0.11
ONRC	0.09	0.09	0.09	0.09
SMC	0.13—0.28	0.13—0.15	0.09—0.15	0.93—0.15

表 6 不同参数扰动下的调节时间扰动范围
Table 6 Regulation-time for different parameter perturbations

ITAE	Perturbing parameter			
	Da_1	Da_2	Da_3	$x_{2,d}$
NRC	1.02	1.02	0.58—1.21	0.55—1.24
ONRC	1.08	1.08	1.07—1.09	1.08
SMC	1.04—1.31	1.10—1.34	0.85—1.24	0.98—1.21

5 结 论

本文基于非线性鲁棒控制理论，针对 CSTR 系统各状态变量不可测的实际情形，设计了 ONRC，同时提出一种较为简单的参数整定方法。仿真结果表明，在满足系统动态性能的基础上，与 NRC 和滑模控制器相比，ONRC 对 CSTR 系统具有更好的性能鲁棒性。

符 号 说 明

- C_i ——反应釜内反应物 i ($i = A, B, C$) 的浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
- $C_{i,F}$ ——反应物 i ($i = A, B, C$) 的流入浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
- Da_i ——反应釜系统参数 ($i = 1, 2, 3$)
- d_1, d_2 ——未测扰动

e_f ——未建模副反应

e_g ——测量反应物 B 摩尔流入速率时的量纲
1 误差

F ——定体积流入速率

$N_{B,F}$ ——B 的摩尔流入速率

$x_{1,d}$, $x_{2,d}$, $x_{3,d}$ ——模型各状态量的稳定值

References

- [1] Xu Li (许力), Jiang Jingping (蒋静坪). The CMAC neural network based learning control of the CSTR system. *Control and Decision* (控制与决策), 1992, **7** (2): 131-136
- [2] Zhang Zhihuan (张智焕), Wang Shuqing (王树青), Rong Gang (荣冈). The predictive function control based on feedback linearization and application in CSTR. *Control Theory and Applications* (控制与理论应用), 2001, **18**: 159-161
- [3] Wu Jianfeng (吴建峰), He Xiaorong (何小荣), Chen Bingzhen (陈丙珍). New kind of recurrent neural networks used in dynamic chemical process. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2002, **53** (2): 156-160
- [4] Zhang Zhihuan (张智焕), Wang Shuqing (王树青). Research on multiple model control of nonlinear system and simulation. *Journal of System Simulation* (系统仿真学报), 2003, **15** (7): 919-921
- [5] Zhang Zhihuan (张智焕), Wang Shuqing (王树青). Multiple internal model control design for nonlinear system. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science* (浙江大学学报: 工学版), 2003, **37** (1): 56-59
- [6] Casavola A, Famularo D, Franze G. Norm-bounded robust MPC strategies for constrained control of nonlinear systems. *IEE Proc. Control Theory Appl.*, 2005, **152** (3): 285-295
- [7] Marruedo D L, Bravo J M, Alamo T, Camacho E F. Robust MPC of constrained discrete-time nonlinear systems based on uncertain evolution sets: application to a CSTR model//Proceeding IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design. Glasgow Scotland UK; IEEE Control System Society, 2002: 657-662
- [8] Li Haisheng (李海生), Zhu Xuefeng (朱学峰), Dong Yu (董宇). The application of auto disturbance rejection controller for nonlinear chemical process. *J. Cent. South. Univ. Technol.* (中南工业大学学报), 2003, **34** (4): 355-359
- [9] Liu Ding (刘丁), Liu Xiaoli (刘晓丽), Yang Yanxi (杨延西). Research of ADRC and its application based on AGA. *Journal of System Simulation* (系统仿真学报), 2006, **18** (7): 1909-1911
- [10] Chen Chyi-Tsong, Dai Chyi-Shen. Robust controller design for a class of nonlinear uncertain chemical process. *Journal of Process Control*, 2001, **11**: 469-482
- [11] Tornambe A. A decentralized controller for the robust stabilization of a class of MIMO dynamical systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1994, **116**: 293-304
- [12] Hassan K Khalil. Adaptive output feedback control of nonlinear systems represented by input-output models. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1996, **41** (2): 177-188
- [13] Kravaris C, Palanki S. Robust nonlinear state feedback under structured uncertainties. *AIChE J.*, 1988, **34**: 1119-1127