

延迟焦化过程遗传双线性建模 及其滑模控制¹⁾

林家骏 乐慧丰 张克进 俞金寿

(上海华东理工大学自动化所 上海 200237)

摘要 本文中提出利用遗传算法建立延迟焦化的双线性模型的新方法,并用具有不确定参数的双线性模型等价描述了延迟焦化过程中的设备故障.文中还提出了一种基于遗传搜索的双线性滑模控制器的设计方案,用以实现在故障状态下的鲁棒控制.

关键字 延迟焦化, 双线性模型, 遗传算法, 滑模控制

1 前言

近年来对延迟焦化过程的计算机控制系统的预测与优化模型的研究层出不穷.由于延迟焦化是一个复杂的非线性动力学过程.按其机理模型,可分解为十一个动力学子系统.所用的方程繁复,参数众多.其中间产品有:饱和烃、轻芳烃、重芳烃、软胶质、硬胶质、沥青质、汽油等,以及焦炭.但一般认为机理模型与现场操作时的实际环境有较大的差距,且为了便于控制实施常采用简化模型.简化模型的建立往往取决于实际生产设备的有效输入与输出数据.使用不同的方法与不同的模型可得到不同的精度的对原生产设备的描述,从而决定了控制的策略与效率.

线性简化模型精度较差,[7]中报道了使用神经网络对延迟焦化过程进行建模,并加以控制的工程实践.由于神经网络是一种无参数模型,且其权参数的不可解释性,不能进一步结合已有的先进控制手段与方法.建立一种动力学特征明确,精确度高的参数型动力学模型,对优化延迟焦化过程与适当的控制策略的运用都是至关重要的.本文的第2节中提出了用遗传算法建立延迟焦化双线性模型的新方法与相关结论.第3节讨论了用遗传算法设计定值切换的滑模控制器的方法.第4节讨论了与延迟焦化结构故障等价的双线性不确定系统的滑模控制的新方法,并在文中给出了不同滑模控制律的比较实例.

2 基于遗传算法的延迟焦化双线性模型

双线性模型是一种结构简单,但非线性动力学特性表达能力较强的参数型模型,已在大量工业系统的建模中得到运用.至今未见到该模型在延迟焦化建模中应用的报道.

如图1所示,若在焦化装置中的主要产物有气体、汽油、柴油、蜡油和焦炭,一般确定轻油收率(汽油收率+柴油收率)为控制目标.根据机理与现场操作实践,在一段时间内影响控制目标的主要为加热炉辐射段的出口温度 T ,而焦化塔塔顶压力 P 及

¹⁾国家自然科学基金资助项目(69874011)

循环比 R 为常量. 用机理模型产生的数据与现场数据校合, 可得到两组延迟焦化过程的动态数据: 炉温—汽油收率, 炉温—柴油收率.

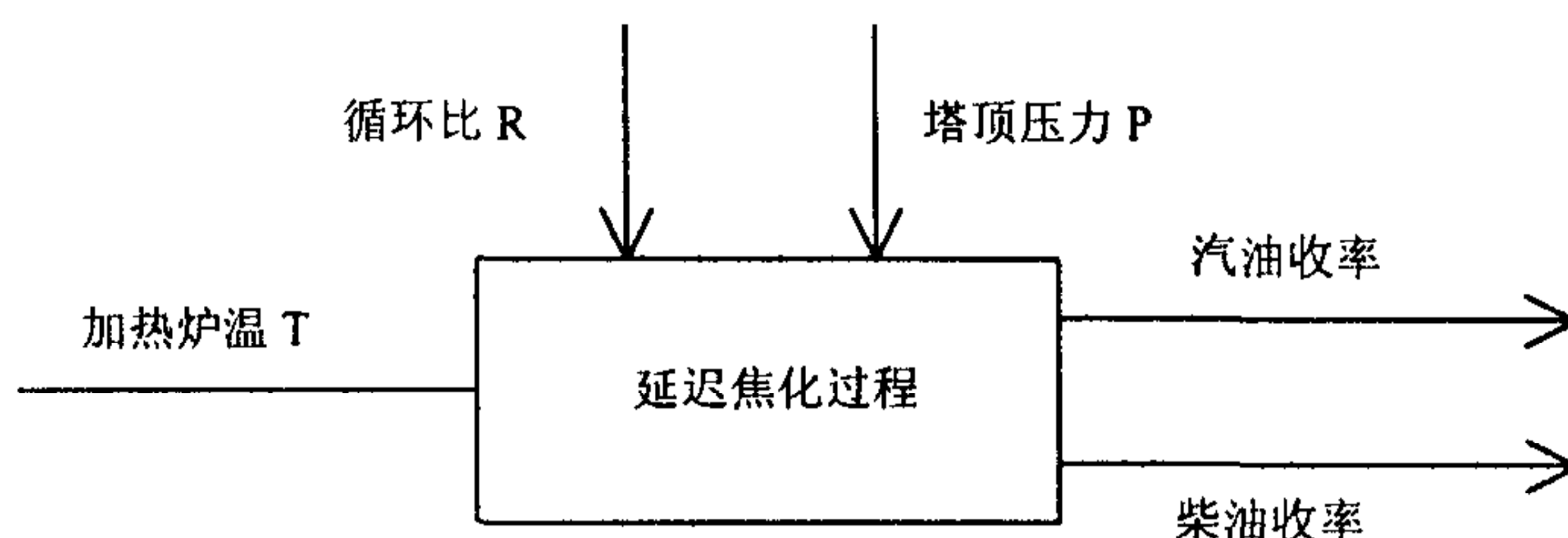


图 1 延迟焦化过程输入—输出框图

2.1 基于遗传算法的双线性模型

用炉温—汽油收率, 炉温—柴油收率两组动态作为建模的原始数据, 并确定双线性模型的基本结构

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Nxu \\ y = cx \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x \in R^2$, $y \in R^1$, $A \in R^{2 \times 2}$, $B \in R^{2 \times 1}$, $N \in R^{2 \times 2}$, $u \in R^1$, $c \in R^{1 \times 2}$.

遗传算法^[1,2]是一种具有稳定并行计算能力的鲁棒寻优算法, 利用遗传算法的并行计算能力, 来确定式 (1) 中的 10 个参数. 设实际测定值序列为 \hat{y} , 用于建模的双线性模型输出值序列为 y , 建立等价优化问题

$$\min \sum_{i=1}^{500} (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (2)$$

遗传基因为复合基因, 选择浮点数编码规则, 如图 2 所示.

A_{11}	A_{12}	A_{21}	A_{22}	B_1	B_2	N_{11}	N_{12}	N_{21}	N_{22}
----------	----------	----------	----------	-------	-------	----------	----------	----------	----------

图 2 复合基因串

使用遗传算法, 选择使式 (2) 最小的复合基因串. 在遗传算法中使用有界杂交, 即 A 、 B 、 N 之间不存在杂交运算. 杂交手段可有多种, 并有适当机率的变异操作.

参数初始值的选择:

由于方程式 (1) 是动力学系统, 故 y 取值应由式 (1) 决定, 而不是一般的代数系统. 可记为 $y(A, B, N, x, \dot{x}, u)$, 其中 u 是已知的, x, \dot{x} 是中间变量, A, B, N 是待优化的参数变量. 为确保遗传算法的寻优成功, 应遵循以下原则: (a) 选择高精度微分方程数值解方法; (b) 选择保证系统稳定的初始值; (c) N 的非平凡约束. 其中, (a) 是容易满足的; (b) 可选择双线性系统, 线性部分参数 A , 使其为正定阵, N 取较小值即可; (c) 的约束是必要的, 若 N 为 0, 则 (1) 蜕化为线性系统.

2.2 遗传建模实例

建模原始数据由机理模型产生, 并经过的现场数据校合, 每组数据长度为 500. 复合基因种群数为 200, 演化代的最大上限为 2000. 按上节所述选择适当的初始条件, 微分方程数值解法与非平凡解约束, 可得如下双线性模型

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -1.3500 & 0.3932 \\ 0.2308 & -0.3807 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} -0.7475 \\ -0.2099 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0.2065 & -0.0133 \\ 0.1830 & -0.0816 \end{bmatrix} xu \quad (3)$$

经计算, 用遗传算法建立的双线性模型产生的动态输出数据与用于建模的原始数据之间的方差为 0.024. 是一个精度较高的双线性模型.

3 双线性滑模控制器的遗传设计

对方程式 (3) 所描述的双线性系统的控制问题, 其本质为一非线性系统的控制器设计问题, 由于非线性系统形式上的多样性, 一般没有规律化的设计方法. 常采用局部化线性化方法, 对原系统在工作点附近进行线性化处理, 然后直接继承线性系统控制器的设计方法进行控制器设计, 方法较为简单、成熟, 但适用的动态范围较窄; 而基于微分几何理论的精确线性化方法, 由于其变换步骤较为复杂, 变换的条件限制较大, 不易于使用.

滑模控制是一种变结构的控制策略与方法, 与常规控制器的最大差别是结构的非固定, 控制作用 (信号) 非连续. 控制信号随系统状态变量或状态变量的组合函数沿规定的切换面作小幅度、高频率运行, 最终到达切换面, 而趋于稳定. 滑模控制器具有很好的鲁棒性, 滑模变结构控制器的应用由于开关型电子器件性能高可靠性、高速性, 使滑模控制器在众多的工业控制领域得到日益广泛的应用.

对于定常线性系统的滑模控制器设计理论已较为成熟^{[3][4]}, 对于非线性系统的滑模控制器设计, 尚无完备的理论与方法. 在滑模控制器设计中, 切换面参数的确定与滑模控制率的确定是两个关键问题. 对线性系统, 可采用参数控制的方法, 及其它递推设计的方法. 对非线性系统, 上述方法并不一定奏效. 本文提出了应用遗传算法来确定适当的切换参数与控制参数, 及其相关的控制策略. 能使用双线性系统表达的延迟焦化器在有限时间内满足确定的工艺控制要求.

切换面

$$S(\mathbf{x}) = D\mathbf{x} = D_1x_1 + D_2x_2 = 0 \quad (4)$$

其中, $D \in R^{1 \times 2}$, $\mathbf{x} \in R^{2 \times 1}$. 仿[3,5]线性系统滑模控制器的设计方法, 可采用定值控制的策略. 设控制变量为 u , 有

$$u = \begin{cases} K_1 & S(\mathbf{x}) > 0 \\ -K_2 & S(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

目前尚无规律性的方法解析地确定 D_1, D_2, K_1, K_2 , 一般采用试凑的方法.

仿照第二节中的方法, 建立基因串

$$g_i = [K_1 \quad K_2 \quad D_1 \quad D_2]$$

采用浮点数编码, 基因串之间的操作可有多种杂交、变异和相关的自适应调整. 不同参数之间的基因之间无互操作. 将式(5)代入式(3), 不失一般性设原点为系统的稳定点, 仿真系统的输出为 y' , 稳态输出为 y'_0 . 确定适应值函数为

$$fitness = m - \sqrt{\sum_{j=1}^{500} (y'(j) - y'_0(j))^2} \quad (6)$$

其中, m 为足够大的正值. 应用遗传算法求得,

$$S(\mathbf{x}) = 1.91x_1 + 4.48x_2$$

$$u = \begin{cases} 0.99 & S(\mathbf{x}) > 0 \\ -0.02 & S(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

图 3 画出了滑模定值控制与传统 PID 控制 延迟焦化的动态响应曲线，可以看出运用滑模控制后，系统很快进入稳态。具有快速、稳健的动态特性。

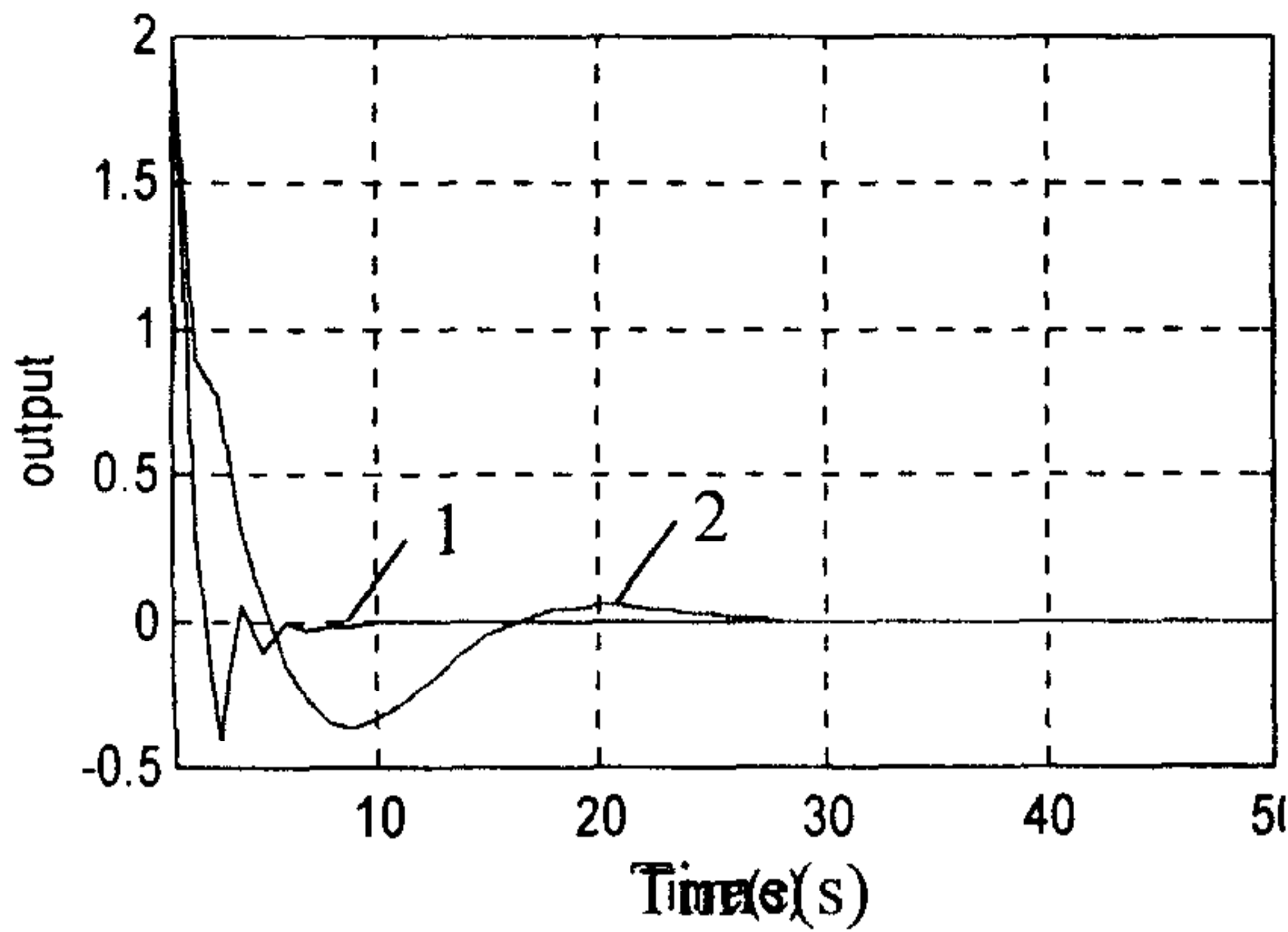


图 3 具有确定系统参数情况下两种控制方案效果比较图：1—滑模定值控制；2—PID 控制

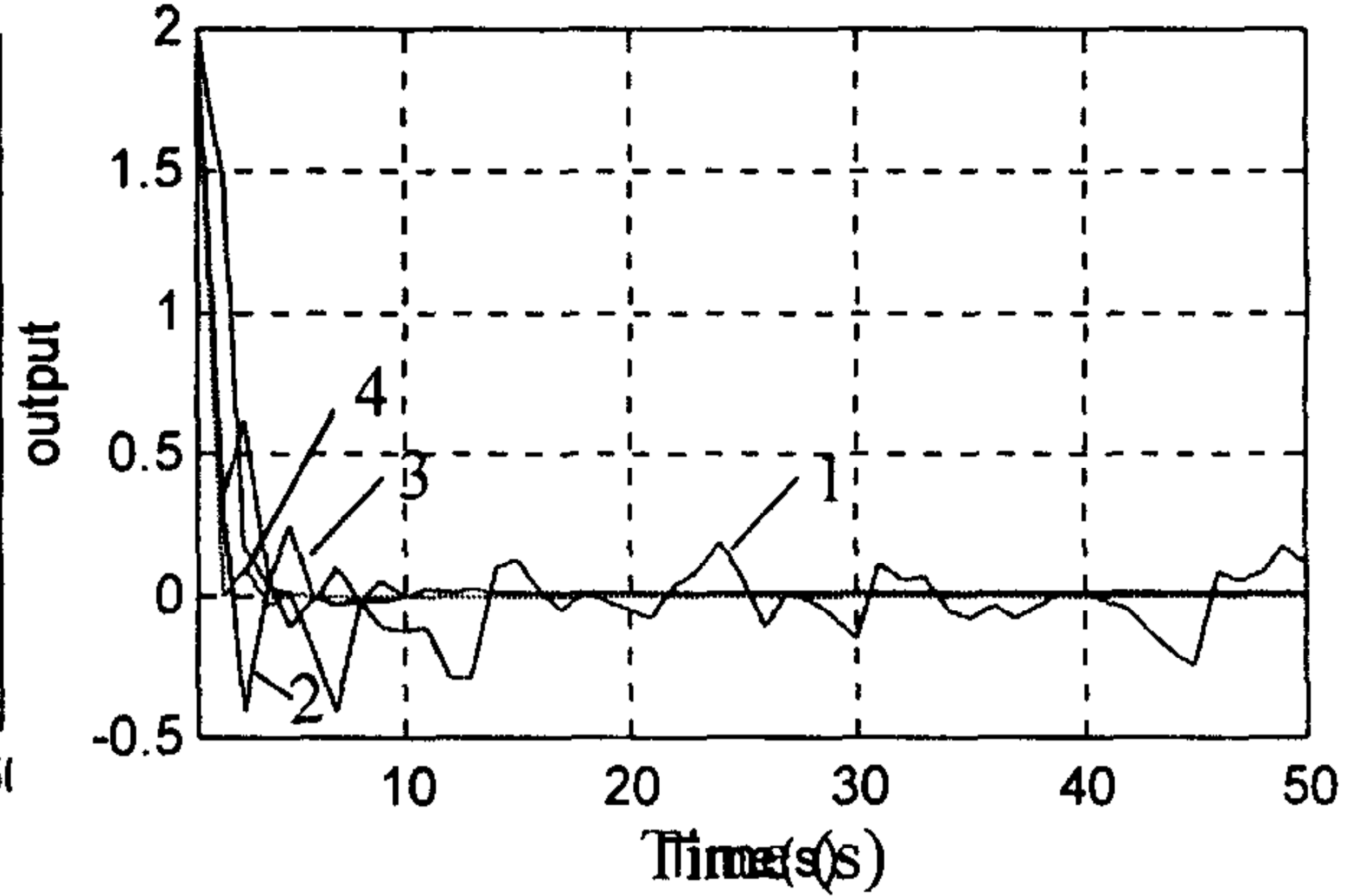


图 4 具有不确定系统参数情况下几种控制方案效果比较图：1—PID 控制；2—滑模定值控制；3—误差比例控制；4—切换比例控制

4 具有故障的延迟焦化器滑模控制

延迟焦化炉的故障可以等价地表达为在双线性系统中线性参数部分的不确定量，为 $\Delta A \lambda(t)$ 。具有故障的延迟焦化炉其双线性动力学系统模型可以用下式表达：

$$\begin{cases} \dot{x} = (A + \lambda(t)\Delta A)x + Bu + Nxu \\ y = cx \end{cases} \quad (8)$$

其中， x_1 为汽油收率， x_2 为柴油收率， y 为控制指标轻油收率， u 为加热炉膛温度， $\lambda(t)\Delta A$ 用于描述系统的故障， $\lambda(t)$ 在 $[-0.1, 0.1]$ 之间随机变化。

$$A = \begin{bmatrix} -1.35 & 0.39 \\ 0.23 & -0.38 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -0.75 \\ -0.21 \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} 0.21 & -0.013 \\ 0.18 & -0.082 \end{bmatrix}, \quad \Delta A = \begin{bmatrix} -1.36 & 4.47 \\ 6.56 & -9.04 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 1]$$

可以看出，该系统的参数变化范围较大，用一般的控制率不能将该系统在适当的时间内控制到设定值。本节中比较了不同的滑模控制率对故障延迟焦化系统的控制效果，认为经过遗传寻优参数选择的滑模比例切换控制器是一类具有较强鲁棒性的控制器。供比较的滑模控制器有：（1）滑模比例切换控制器（式 9-a）；（2）误差比例滑模控制（式 9-b）；（3）定值滑模控制（式 9-c）。

$$S(x) = Dx = D_1x_1 + D_2x_2$$

$$\begin{cases} \varphi_1 = \begin{cases} \alpha_1 & S(x) \cdot x_1 > 0 \\ \beta_1 & S(x) \cdot x_1 < 0 \end{cases} \\ \varphi_2 = \begin{cases} \alpha_2 & S(x) \cdot x_2 > 0 \\ \beta_2 & S(x) \cdot x_2 < 0 \end{cases} \\ u = \varphi_1x_1 + \varphi_2x_2 \end{cases} \quad (9-a)$$

$$u = \begin{cases} B_1e + K_1 & eS(x) > 0 \\ B_2e + K_2 & eS(x) < 0 \end{cases} \quad (9-b)$$

$$u = \begin{cases} K_1 & S(\mathbf{x}) > 0 \\ -K_2 & S(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (9-c)$$

其中, $D_1, D_2, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, B_1, B_2, K_1, K_2$ 为待定参数.

图 4 显示了各种控制律的控制效果, 从图中可以看出, 曲线 1 代表 PID 控制, 效果较差; 曲线 2、3 分别代表定值滑模控制和误差比例滑模控制, 效果较好; 曲线 4 代表比例切换滑模控制, 效果最佳. 对于在线性系统中应用等效滑模控制, 也可按第 3 节中的方法进行相应的方法进行参数寻优设计, 但效果不佳, 其原因为等效控制有可能不存在. 对式 (4) 的滑模等效控制律为

$$u_{eq} = -(DB + DN\mathbf{x})^{-1} D(A + \Delta A\lambda(t)) \quad (10)$$

从式 (10) 可知, \mathbf{x} 为一动态变化量, 不能确保 $(DB + DN\mathbf{x})^{-1}$ 非奇异, 也即不能确保 u_{eq} 的存在.

5 结论

用由遗传优化操作完成延迟焦化器的双线性建模及其滑模控制器的设计是一种新的尝试, 避免了用盲目试凑的方法来确定滑模的切换面参数与其它控制器参数. 文中提出了优化准则与系统的动态过程无关, 若设计适当的适应值函数可得到与动态途径相关的控制律, 将另著文讨论. 文中提出的方法还可以推广在多输入多输出的双线性系统的滑模控制器的设计工作中.

参 考 文 献

- 1 Holland J H. Genetic algorithms and the optimal allocations of trials. *SIAM of Computing*, 1973, 2: 88 ~ 105
- 2 Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989
- 3 Utlkin, V.I. Sliding mode and Their application in Variable structure system. Moscow, MIR Publishers, 1987
- 4 Utlkin V.I. Variable Structure systems with sliding models. *IEEE Tran. On Automatic Control*, Vol. AC-22, No.2, 1977:212~222
- 5 Sarptunk, SZ. Et.al. On the Seability of Discrete-Time sliding mode control systems. *IEEE Tran. on automatic control*, Vol. AC-32 No.10, 1987: 930 ~ 932
- 6 高为炳. 变结构控制理论基础. 北京, 中国科学技术出版社, 1990
- 7 张克进, 俞金寿. 延迟焦化装置液体产品收率模型的开发. 自动化理论. 技术与应用论文集, 西苑出版社, 1999:303 ~ 306

林家骏 男, 博士, 华东理工大学教授, 常年从事智能控制策略, 优化算法及其在非线形控制系统中的应用研究.

乐慧丰 男, 博士研究生, 主要研究方向是过程工业中数据挖掘与数据融和的应用.

张克进 男, 博士研究生, 上海炼油厂高级工程师, 主要研究方向是过程模型化及控制.

俞金寿 男, 华东理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向是过程模型化及优化控制、先进控制、控制理论及应用.