

基于T-S模糊模型的状态反馈预测控制

王书斌¹, 胡品慧¹, 林立²

(1. 中国石油大学 自动化研究所, 北京 102249; 2. 中国石油大学 机电工程学院, 北京 102249)

摘要: 将T-S模糊模型和状态反馈预测控制相结合, 提出了一种基于T-S模糊模型的预测控制算法. 该算法把T-S模糊模型作为预测模型得到状态和输出的预估值, 并利用可测的过程变量对输出预估值进行反馈修正, 然后利用最优控制理论, 由修正后的预估值和给定值计算出控制整个系统的控制律. 本文还对串级CSTR控制系统的不同的初态、设定值及干扰情况下进行了仿真, 仿真结果表明了该方法的有效性和可行性.

关键词: 预测控制; T-S模糊模型; 非线性; 状态反馈

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

State feedback predictive control based on T-S fuzzy model

WANG Shu-bin¹, HU Pin-hui¹, LIN Li²

(1. Research Institute of Automation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: A new predictive control approach based on T-S fuzzy model is developed by combining T-S fuzzy model with state feedback predictive control. The approach utilizes T-S fuzzy model to get the estimated values of state and output, and corrects the estimated output value by using the measurable process variable. Then in terms of optimal control theory, the control law, which is used to control the whole system, is calculated by the corrected estimated value and set-point. The control system of a continuous stirred tank reactor is also simulated with different initial states, setpoint values and disturbances. The simulation results show that the proposed approach is effective and feasible.

Key words: model predictive control; T-S fuzzy model; nonlinear; state feedback

1 引言(Introduction)

预测控制技术如动态矩阵控制(DMC), 广义预测控制(GPC)和状态反馈预测控制(SFPC)^[1]等算法, 都以模型预测、反馈校正和滚动优化的特点越来越受到广大科技工作者的重视. 传统的线性预测控制对于弱的非线性工业过程, 可以依靠它自身的鲁棒性仍能达到令人满意的控制效果, 但对于许多强非线性的工业过程, 却很难达到满意的控制目标, 因此一些学者提出了非线性预测控制. 非线性预测控制在拓宽预测控制适用领域的同时, 存在两大难题: 1) 如何建立非线性预测模型, 使得模型能够以一定的精度, 在一定步长内预测过程的输出; 2) 如何解决非线性优化问题, 使得算法在采样周期内完成控制信号的在线优化求解^[2].

模糊模型本质上是一种非线性模型, 可以任意精度逼近任何非线性系统. 因此, 模糊模型作为非线性预测控制的预测模型, 即模糊预测控制, 近年来已成为预测控制研究的热点. 文献[2]提出了基于遗传算法的模糊预测控制预测模型可以是任何模糊模型,

非线性优化问题通过一种改进的遗传算法在线求解. 文献[3]将T-S模糊模型和广义预测控制结合提出了一种基于T-S模型的模糊广义预测控制. 文献[4]把动态矩阵控制原理应用到模糊系统, 提出了一种基于模糊模型的时滞多变量预测控制方法. 文献[5]对单值后件的模糊模型进行工作点线性化, 将非线性系统转化为线性时变系统, 并利用多步预测控制策略构成了模糊预测控制.

T-S模型是一种典型的动态系统模糊模型, 其构成模型的各条规则采用线性方程式作为结论, 使得模型的全局输出具有良好的数学表达特性, 便于采用线性控制策略对非线性系统进行控制. 状态反馈预测控制是一种多变量预测控制算法, 它在系统结构与性能分析、鲁棒稳定性、极点配置与干扰解耦等方面已经取得了很大的成就^[6~8], 并成功应用于实际生产过程, 取得了显著的经济效益. 将T-S模型对非线性系统的良好描述特性和状态反馈预测控制的优化算法相结合, 则可以实现对非线性系统的优化控制. 本文将T-S模糊模型作为状态反馈预测控制

的递推模型,提出一种智能的具有通用模型的新型控制策略.

2 基于T-S模糊模型的状态反馈预测控制策略(Strategy of feedback predictive control based on T-S fuzzy model)

2.1 T-S模糊模型的描述(Description of T-S model)

对于离散的 n 阶带有 m 个输入通道的非线性系统,其离散T-S模糊状态空间模型可描述如下:

$$R_p^i: \text{if } x_1(k) \text{ is } M_1^i \text{ and } \cdots \text{ and } x_n(k) \text{ is } M_n^i, \\ \text{then } x(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k) + W_i. \quad (1)$$

其中: $i = 1, 2, \cdots, l$, R_p^i 表示用来描述非线性系统的第 i 条模糊推理规则, l 为模糊推理规则的个数, M_j^i , ($j = 1, 2, \cdots, n$) 为模糊集合, $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 是控制向量, $x(k) = [x_1(k), x_2(k), \cdots, x_n(k)]^T$ 是系统的状态变量, $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 为第 i 个子系统的系统矩阵和控制矩阵, W_i 为第 i 个子系统的常数向量, 一般情况下此向量为零向量, 它与模糊建模的方法有关.

设 $\mu_j^i(x_j(k))$ 表示 $x_j(k)$ 属于 M_j^i 的隶属度函数, 若直积运算 $M^i = M_1^i \times \cdots \times M_n^i$ 采用求积法: $\mu^i(x(k)) = \prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j(k))$, $\mu^i(x(k))$ 表示 $x(k)$ 属于 M^i 的隶属度函数, 同时也表示第 i 个规则的使用度. 若模糊化采用单点模糊集合, 清晰化采用加权平均法, 则可得整个系统状态方程为

$$x(k+1) = \sum_{i=1}^l h_i(k) [A_i x(k) + B_i u(k) + W_i]. \quad (2)$$

其中

$$h_i(k) = \mu^i(x(k)) / [\sum_{j=1}^l \mu^j(x(k))],$$

因 $\mu^i(x(k)) \geq 0$, $\sum_{j=1}^l \mu^j(x(k)) > 0$, 故 $0 \leq h_i(k) \leq 1$,

且 $\sum_{i=1}^l h_i(k) = 1$.

不失一般性, 假设系统的输出向量与控制向量的维数相等, 并记 $y(k) = [y_1(k), y_2(k), \cdots, y_m(k)]^T$, 相应的输出矩阵为: $C = [C_1^T, C_2^T, \cdots, C_m^T]^T \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 则系统的输出:

$$y(k) = Cx(k). \quad (3)$$

一般来说系统(2)是非线性的. 该模糊模型的本质在于: 一个整体非线性的动力学模型可以看成是多个局部线性模型的模糊逼近, 如果选择足够多的模糊规则, 模糊建模可达到任意精度.

2.2 基于T-S模型的状态反馈预测控制研究(Study on feedback predictive control based on T-S fuzzy model)

2.2.1 控制算法的研究(The study of control algorithm)

基于T-S模型的状态反馈预测控制系统原理框图如图1所示. 图中 $\hat{y}$ 是通过T-S模糊模型得到的预测值, y 是被控过程的实际输出. 利用状态反馈控制的思想, 将T-S模糊模型作为状态反馈预测控制的递推模型, 推导系统控制律的过程如下:

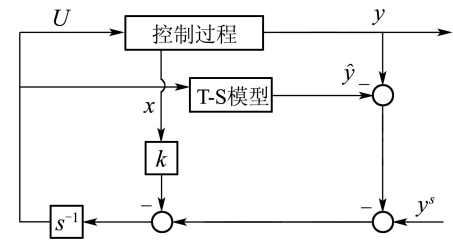


图1 基于T-S模型的状态反馈预测控制原理框图
Fig. 1 Block scheme of state feedback predictive control based on T-S model

由整个系统的状态方程(2)知

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \sum_{i=1}^l h_i(k) [A_i x(k) + B_i u(k) + W_i] = \\ &= \sum_{i=1}^l h_i(k) A_i x(k) + \sum_{i=1}^l h_i(k) B_i u(k) + \\ &= \sum_{i=1}^l h_i(k) W_i x(k+2) = \\ &= \sum_{i=1}^l h_i(k+1) [A_i x(k+1) + B_i u(k+1) + W_i] = \\ &= \sum_{i=1}^l h_i(k+1) A_i \sum_{i=1}^l h_i(k) A_i x(k) + \\ &= \sum_{i=1}^l h_i(k+1) A_i \sum_{i=1}^l h_i(k) B_i u(k) + \\ &= \sum_{i=1}^l h_i(k+1) B_i u(k+1) + \\ &= \sum_{i=1}^l h_i(k+1) A_i \sum_{i=1}^l h_i(k) W_i + \sum_{i=1}^l h_i(k+1) W_i. \end{aligned}$$

为了简单, 记

$$H_{jA} = \sum_{i=1}^l h_j(k+j) A_i,$$

$$H_{jB} = \sum_{i=1}^l h_j(k+j) B_i,$$

$$Q_j = \sum_{i=1}^l h_j(k+j) W_i,$$

则

$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= H_{0A}x(k) + H_{0B}u(k) + Q_0, \\
 x(k+2) &= \\
 &H_{1A}H_{0A}x(k) + H_{1A}H_{0B}u(k) + \\
 &H_{1B}u(k+1) + H_{1A}Q_0 + Q_1, \\
 &\vdots \\
 x(k+p) &= \\
 &H_{(p-1)A}H_{(p-2)A} \cdots H_{0A}x(k) + \\
 &H_{(p-1)A}H_{(p-2)A} \cdots H_{1A}H_{0B}u(k) + \\
 &H_{(p-1)A}H_{(p-2)A} \cdots H_{2A}H_{1B}u(k+1) + \cdots + \\
 &H_{(p-1)A}H_{(p-2)B}u(k+p-2) + \\
 &H_{(p-1)B}u(k+p-1) + H_{(p-1)A}H_{(p-2)A} \cdots H_{1A}Q_0 + \\
 &H_{(p-1)A}H_{(p-2)A} \cdots H_{2A}Q_1 + \cdots + \\
 &H_{(p-1)A}Q_{(p-2)} + Q_{(p-1)}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

从上面的推导知 H_{jA}, H_{jB} 与采样时刻的状态 $x(k+j)$ 有关, 这样使它和状态反馈预测控制不容易结合, 同时这样计算量会很大, 故令 $h_i(k+q) = h_i(k)$, ($q = 1, 2, \cdots, p, i = 1, 2, \cdots, l$), 则

$$H_{(p-1)A} = \cdots = H_{0A} = \sum_{i=1}^l h_i(k) A_i \overrightarrow{\text{记}} A(k), \quad (5)$$

$$H_{(p-1)B} = \cdots = H_{0B} = \sum_{i=1}^l h_i(k) B_i \overrightarrow{\text{记}} B(k), \quad (6)$$

$$Q_0 = Q_1 = \cdots = Q_p = \sum_{i=1}^l h_i(k) W_i \overrightarrow{\text{记}} Q(k). \quad (7)$$

则相应的式(4)变为

$$\begin{aligned}
 x(k+p) &= A^p(k)x(k) + \sum_{i=1}^p A^{(i-1)}(k)Q(k) + \\
 &\sum_{i=1}^p A^{(i-1)}(k)B(k)u(k+p-i). \quad (8)
 \end{aligned}$$

对多入多出(MIMO)系统, 每个输出可以有一个相应的预估时域 $P = [p_1, p_2, \cdots, p_m]$, 即预测时域 P 是一个向量: p_j . 根据式(8)第 j 个输出在未来 p_j 采样时刻的预估值是

$$\begin{aligned}
 \hat{y}_j(k+p_j) &= C_j x(k+p_j) = \\
 &C_j A^{p_j}(k)x(k) + \sum_{i=1}^{p_j} C_j A^{(i-1)}(k)Q(k) + \\
 &\sum_{i=1}^{p_j} C_j A^{(i-1)}(k)B(k)u(k+p_j-i), \quad (9)
 \end{aligned}$$

用相同的预估步数, 由历史输入和状态对当前第 j 个输出的预估值:

$$\hat{y}_j(k) = C_j \prod_{i=1}^{p_j} A(k-i)x(k-p_j) + C_j B(k-1)u(k-1) +$$

$$\begin{aligned}
 &\sum_{i=2}^{p_j} C_j \left(\prod_{r=1}^{i-1} A(k-r) \right) B(k-i)u(k-i) + \\
 &\sum_{i=2}^{p_j} C_j \left(\prod_{r=1}^{i-1} A(k-r) \right) Q(k-i) + C_j Q(k-1), \quad (10)
 \end{aligned}$$

其中 $j = 1, 2, \cdots, m$, 对于状态反馈单值预测控制算法^[1], 控制时域 $L = 1$, 即 $u(k+i) = u(k), i > 0$, 故由式(9)知:

$$\hat{y}_j(k+p_j) = C_j A^{p_j} x(k) + S_j(p_j, k)u(k) + \hat{Q}_j(p_j, k), \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} S_j(p_j, k) = \sum_{i=1}^{p_j} C_j A^{(i-1)}(k)B(k), \\ \hat{Q}_j(p_j, k) = \sum_{i=1}^{p_j} C_j A^{(i-1)}(k)Q(k), \end{cases} \quad (12)$$

对预估输出进行反馈修正:

$$y_{cj}(k+p_j) = \hat{y}_j(k+p_j) + y_j(k) - \hat{y}_j(k). \quad (13)$$

设第 j 个输出的给定值为 $Y_j^s(k+p_j)$, 则其预估误差为: $e_j = Y_j^s(k+p_j) - y_{cj}(k+p_j)$, 即:

$$e_j = Y_j^s(k+p_j) - \hat{y}_j(k+p_j) - y_j(k) + \hat{y}_j(k),$$

由式(11)可得:

$$\begin{aligned}
 e_j &= Y_j^s(k+p_j) - C_j A^{p_j} x(k) - S_j(p_j, k)u(k) - \\
 &\hat{Q}(P, k) - y_j(k) + \hat{y}_j(k). \quad (14)
 \end{aligned}$$

令 $E = [e_1, e_2, \cdots, e_m]^T$, 则由式(14)知:

$$\begin{aligned}
 E &= Y^s(k+p_j) - K(P, k)x(k) - S(P, k)u(k) - \\
 &\hat{Q}(P, k) - y(k) + \hat{y}(k), \quad (15)
 \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{cases} y(k) = [y_1(k), y_2(k), \cdots, y_m(k)], \\ \hat{y}(k) = [\hat{y}_1(k), \hat{y}_2(k), \cdots, \hat{y}_m(k)], \\ Y^s(k) = \begin{bmatrix} Y_1^s(k+p_1) \\ Y_2^s(k+p_2) \\ \vdots \\ Y_m^s(k+p_m) \end{bmatrix}, K(P, k) = \begin{bmatrix} C_1 A^{p_1}(k) \\ C_2 A^{p_2}(k) \\ \vdots \\ C_m A^{p_m}(k) \end{bmatrix}, \\ S(P, k) = \begin{bmatrix} S_1(p_1, k) \\ S_2(p_2, k) \\ \vdots \\ S_m(p_m, k) \end{bmatrix}, \hat{Q}(P, k) = \begin{bmatrix} \hat{Q}_1(p_1, k) \\ \hat{Q}_2(p_2, k) \\ \vdots \\ \hat{Q}_m(p_m, k) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (16)$$

采用下述二次型指标函数:

$$J = E^T Q E, \quad (17)$$

其中 Q 为正定对称加权阵. 将式(15)代入(17), 令 $\frac{\partial J}{\partial u} = 0$, 可得使目标函数 J 最小的最优控制:

$$u(k) = S^{-1}(P, k)[Y^s(k) - K(P, k)x(k) - \hat{Q}(P, k) - y(k) + \hat{y}(k)]. \quad (18)$$

2.2.2 系统的结构分析(Analysis of the system's structure)

控制律(18)中需要给出的参数只有预测时域 P , 故参数的整定方便易行. 预测时域 P 确定后, 根据当前时刻的状态 $x(k)$ 就可算出控制器(18)中参数 $S(P, k)$, $K(P, k)$ 和 $\hat{Q}(P, k)$, 进而算出当前时刻的控制律 $u(k)$. 随着时间的推移, 当下一时刻变成当前时刻时, 控制器参数也会随着当前状态的变化而相应的发生变化, 自动适应非线性系统的动态特性, 因此该算法还具有自适应控制的特点.

应用该算法的具体步骤如下: a) 建立如式(1)的离散T-S模糊模型; b) 给出输出给定值 $Y^s(k)$ 和预测时域 P ; c) 根据预测时域、当前时刻的状态及式(2)(5)(6)(12)(16)计算出 $A(k)$, $B(k)$, $S(P, k)$, $K(P, k)$; d) 从被控过程读取历史输入及当前和历史的输出, 根据式(10)(12)计算出 $\hat{y}(k)$, $\hat{Q}(P, k)$; e) 根据(18)式计算当前的控制律 $u(k)$; f) 将控制律 $u(k)$ 施加于被控过程; g) 重复c), d), e), f)步骤.

3 应用实例(Application and implementation example)

以Henson和Seborg^[9]的串级CSTR(continuous stirred tank reactor)为例子进行仿真. 假设这一系统是完全混合并且物理参数是常值, 这一过程有一个混合了反应物和溶剂的进料流、一个输出流和一个冷却水流. q_c 为冷却水流量, q 为进料流量, C_1, C_2 为出口浓度, T_1, T_2 为出口温度. 假设流量在整个过程中维持恒定. 系统模型如下所示:

$$\begin{cases} \dot{C}_1 = \frac{q}{V_1}(C_f - C_1) - k_0 C_1 e^{-\frac{E}{RT_1}}, \\ \dot{T}_1 = \frac{q}{V_1}(T_f - T_1) - \frac{\Delta H k_0 C_1}{\rho c_p} e^{-\frac{E}{RT_1}} + \frac{\rho_c c_{pc}}{\rho c_p V_1} q_c (1 - e^{-\frac{U A_1}{q c \rho c_{pc}}})(T_{cf} - T_1), \\ \dot{C}_2 = \frac{q}{V_2}(C_1 - C_2) - k_0 C_2 e^{-\frac{E}{RT_2}}, \\ \dot{T}_2 = \frac{q}{V_2}(T_1 - T_2) - \frac{\Delta H k_0 C_2}{\rho c_p} e^{-\frac{E}{RT_2}} + \frac{\rho_c c_{pc}}{\rho c_p V_2} q_c (1 - e^{-\frac{U A_2}{q c \rho c_{pc}}}) + [T_1 - T_2 + e^{-\frac{U A_1}{q c \rho c_{pc}}}(T_{cf} - T_1)]. \end{cases} \quad (19)$$

其中: 反应器体积 $V_1 = V_2 = 100$ l, 进料浓度 $C_f =$

1 mol/l, 进料流 $q = 100$ l/min, 进料温度 $T_f = 350$ K, 冷却水温度 $T_{cf} = 350$ K, 反应速率常数 $k_0 = 7.2 \times 10^{10} \text{ min}^{-1}$, $E/R = 10000$ K, E 为活化能, R 为理想气体常数, 反应热 $\Delta H = -4.78 \times 10^4$ J/mol, $U A_1 = U A_2 = 1.67 \times 10^6$ J/min, U, A 为热交换系数和面积, 密度 $\rho = \rho_c = 1000$ g/l, 比热 $c_p = c_{pc} = 0.239$ J/gK.

状态变量、系统输出和操纵变量定义如下: $x = [C_1, T_1, C_2, T_2]^T$, $y = T_2$, $u = q_c$, 利用MATLAB分别在 $u = 35$, $u = 100$, $u = 120$ 求得平衡点, 然后在各个平衡点进行线性化和离散化得到各个子系统, 再选择隶属函数建立如(1)所示的离散T-S模糊模型.

为了验证算法的有效性, 将上述算法应用于到真实模型(19), 分别对存在干扰、不同初始状态及不同给定值情况进行了仿真.

1) 初态取 $x_0 = [0.085, 442, 0.005, 450]^T$, 取设定值 $Y^s = 500$, 在50 min时刻进料流量 q 变化+50%, 进料温度 T_f 变化+15%, 在100 min时进料浓度、进料温度再恢复到原来的值. 这种干扰情况下的仿真结果如图3所示.

2) 预测时域取26, 取设定值 $Y^s = 490$, 初态分别取

$$\begin{aligned} x_0 &= [0.085, 442, 0.005, 450]^T, \\ &[0.085, 442, 0.005, 460]^T, \\ &[0.085, 442, 0.005, 470]^T, \\ &[0.085, 442, 0.005, 480]^T \end{aligned}$$

时的控制律及系统输出如图4所示.

3) 预测时域取26,

初态取

$$x_0 = [0.085, 442, 0.005, 450]^T,$$

设定值

$$Y^s = \begin{cases} 470, 0 \leq t \leq 20, \\ 510, 20 \leq t \leq 40, \\ 490, t > 40 \end{cases}$$

时的控制律及系统输出如图5所示.

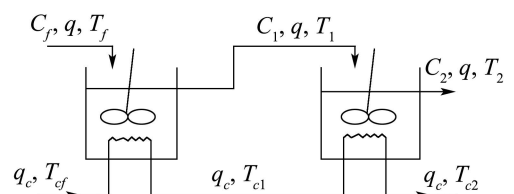


图2 串级CSTR系统

Fig. 2 Continuous stirred tank reactor system

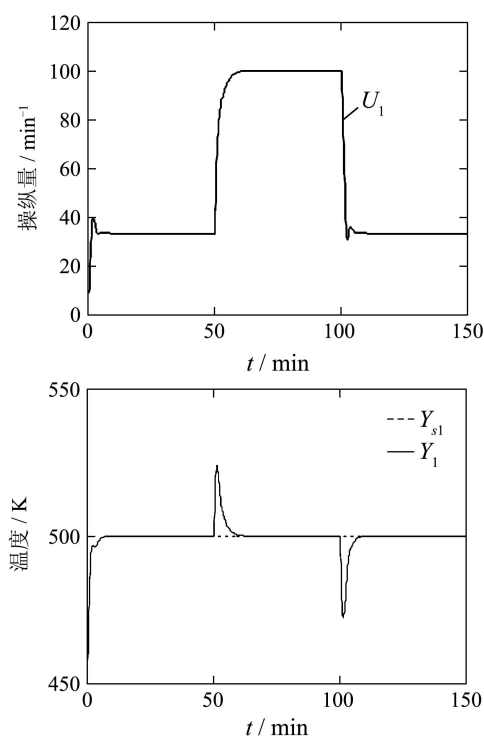


图3 进料流量变化+50%、进料温度变化+15%时的控制律与输出

Fig. 3 Control laws and outputs for 50% disturbance in the feed flow rate and 15% disturbance in the feed temperature

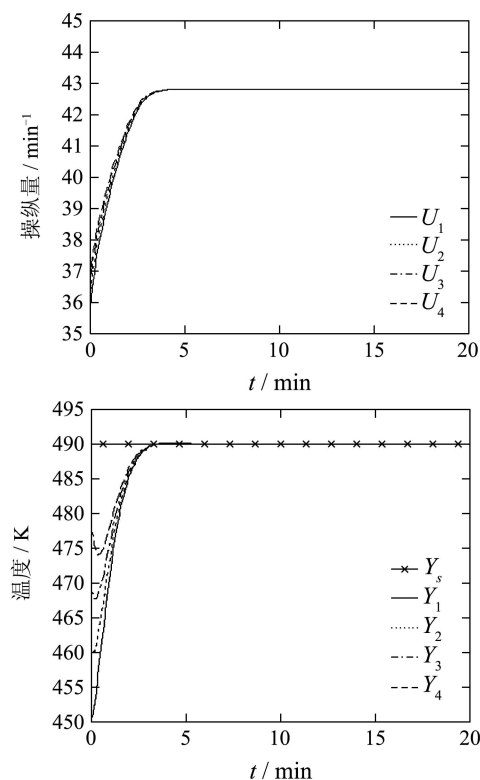


图4 不同初态的控制律与输出

Fig. 4 Control laws and the outputs of different initial states

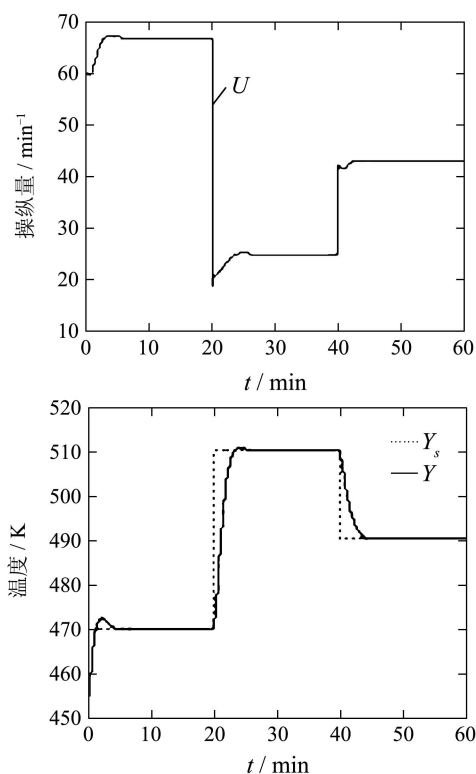


图5 不同设定值的控制律与输出

Fig. 5 Control laws and the outputs of different setpoint values

4 结论(Conclusion)

提出了一种基于T-S模糊模型的状态反馈预测控制算法. T-S模糊模型用于描述对象的非线性动态特性, 可以达到很高的精度, 将状态反馈预测控制与T-S模糊模型结合, 可以把预测控制的模型预测、反馈校正和滚动优化等优点成功的应用于非线性系统, 为非线性系统提供了一种新的控制方法. 该算法需要设计的参数只有预测时域, 故便于参数的调整; 另外控制器中的参数、会随着当前工作点的不同而自动调整, 从而实现对非线性系统的控制. 串级CSTR的仿真结果表明了该方法的有效性和可行性.

参考文献(References):

- [1] 胡品慧, 袁璞. 状态反馈预估控制系统研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(2): 98-100.
(HU Pinhui, YUAN Pu. Study on the state feedback predictive control system[J]. *J of the University of Petroleum*, 2000, 24(2): 98-100.)
- [2] SARIMVEIS H, BAFAS G. Fuzzy model predictive control of non-linear processes using genetic algorithms[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 139(1): 59-80.
- [3] 刘忠信, 陈增强, 袁著祉. 基于T-S模型的模糊广义预测控制[J]. 南开大学学报(自然科学), 2000, 33(4): 114-119.
(LIU Zhongxin, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. T-S model based fuzzy generalized predictive control[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2000, 33(4): 114-119.)

- [4] 胡国龙, 孔亚广, 孙优贤. 基于模糊规则的动态矩阵预测控制及其应用[J]. 中国造纸学报, 2002, 17(1): 103 – 106.
(HU Guolong, KONG Yaguang, SUN Youxian. Fuzzy rules-based dynamic matrix predictive control and its application[J]. *Trans of China Pulp and Paper*, 2002, 17(1): 103 – 106.)
- [5] ABONYI J, NAGY L, SZEIFERT F. Fuzzy model-based predictive control by instantaneous linearization[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 120(1): 109 – 122.
- [6] 胡品慧, 袁璞. 状态反馈预测控制的结构性能及应用实例[J]. 信息与控制, 2002, 31(1): 9 – 13.
(HU Pinhui, YUAN Pu. Structure and performance of state feedback model predictive control system and its application[J]. *Information and Control*, 2002, 31(1): 9 – 13.)
- [7] 胡品慧, 袁璞. 状态反馈预测控制系统的设计及应用[J]. 基础自动化, 2000, 7(5): 9 – 12.
(HU Pinhui, YUAN Pu. State feedback model predictive control systems: design and application[J]. *Basic Automation*, 2000, 7(5): 9 – 12.)
- [8] 胡品慧, 袁璞. 关于状态反馈预测控制系统的极点配置[J]. 控制与决策, 2001, 17(6): 910 – 913.
(HU Pinhui, YUAN Pu. On pole placement of state feedback model predictive control systems[J]. *Control and Decision*, 2001, 17(6): 910 – 913.)
- [9] HENSON M A, SEBORG D E. Input output linearization of general nonlinear processes[J]. *AIChE J*, 1990, 36(11): 1753 – 1758.

作者简介:

王书斌 (1977—), 男, 博士, 中国石油大学(北京)自动化研究所, 目前研究方向为模糊、预测控制及应用, E-mail:wsbwyy@126.com;

胡品慧 (1959—), 男, 教授, 博士, 中国石油大学(北京), 研究领域为控制理论与应用、预测控制、先进过程控制, E-mail:hupnh@cup.edu.cn;

林立 (1954—), 男, 教授, 博士生导师, 中国石油大学(北京), 主要从事石油机械机电一体化技术的研究工作。

(上接第814页)

- [5] ALSPACH D L, SORENSON H W. Nonlinear bayesian estimation using Gaussian sum approximation[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Control Systems*, 1972, 17(4): 439 – 448.
- [6] CARPENTER J, CLIFFORD P, FEARNEHEAD P. Improved particle filter for nonlinear problems[J]. *IEE Proc-Radar, Sonar and Navigation*, 1999, 146(1): 2 – 7.
- [7] SANJEEV ARULAMPALAM M. A tutorial on particle filters for on-line nonlinear/non-gaussian bayesian tracking[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2002, 50(2): 174 – 188.

作者简介:

张高煜 (1972—), 男, 工学博士, 目前研究方向为数据融合与智能控制, E-mail: farwind1972@yahoo.com.cn;

江水 (1970—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为分布式计算/数据库, E-mail: jiangshui@ecict.com.cn;

梁继民 (1971—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为信息融合、图像处理和生物特征识别, E-mail: jimleung@mail.xidian.edu.cn;

赵恒 (1975—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为数据挖掘和图像处理, E-mail: hengzhao@mail.xidian.edu.cn.

(上接第818页)

- [7] 陈惠开, 吴新余, 吴叔美. 现代网络分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1992.
(CHEN Huikai, WU Xinyu, WU Shumei. *Modern Network Analyzing*[M]. Beijing: Peoples Posts and Telecommunication Publishing House, 1992.)
- [8] IMAIDA T, YOKOKOHJI Y. Ground-space bilateral teleoperation experiment using ETS-VII robot arm with direct kinesthetic coupling[C] // *IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2001: 1031 – 1038.
- [9] 邓启文, 韦庆, 李泽湘. 大时延力反馈双边控制系统[J]. 机器人, 2005, 27(5): 410 – 413.
(DENG Qiwen, WEI Qing, LI Zexiang. Force-reflection bilateral

control system with large time-delay[J]. *Robot*, 2005, 27(5): 410 – 413.)

作者简介:

邓启文 (1977—), 男, 博士研究生, 研究领域为机器人技术、大时延遥操作技术, E-mail: dengqiwen@nudt.edu.cn;

韦庆 (1969—), 男, 教授, 研究领域为机器人力控制、智能机器人、大时延遥操作技术;

李泽湘 (1961—), 男, 教授, 研究领域为机器人技术、运动控制、机床数控系统。