

一类 MIMO 非线性系统的自适应模糊输出反馈控制

佟绍成¹, 柴天佑²

(1. 辽宁工学院数理科学系, 辽宁锦州 121001; 2. 东北大学自动化研究中心, 辽宁沈阳 110004)

摘 要: 针对一类 MIMO 非线性状态不可测系统, 提出了一种稳定的基于观测器的自适应模糊控制方法. 该方法不需要系统状态可测的条件, 而是通过设计模糊观测器来估计系统的状态. 证明了所提出的控制方法可保证闭环系统的稳定性和跟踪误差的收敛性. 仿真结果进一步验证了该控制方法的实用性和有效性.

关键词: MIMO 非线性系统; 观测器; 自适应模糊控制; 稳定性

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2005)06-0987-04

Adaptive Fuzzy Output Feedback Control for A Class of MIMO Nonlinear Systems

TONG Shaor cheng¹, CHAI Tiarryou²

(1. Dept of Mathematics and Physics Science, Liaoning Institute of Technology, Jinzhou, Liaoning 121001, China;

2. Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

Abstract: The stable adaptive fuzzy control method is proposed for a class of MIMO nonlinear systems whose states are unavail- able. This method does not need the assumption that states variables are measurable, and the states variables can be estimated by de- signing fuzzy observer. It is proved that the proposed control method guarantees the closed loop system stability and obtains a good tracking performance as well.

Key words: nonlinear MIMO systems; observer; fuzzy adaptive control; stability

1 引言

MIMO 非线性系统的控制一直是一个难题. 近几年来, 随着模糊自适应控制理论的发展和完善, 使这一研究领域变得活跃起来^[1-7]. 文[1~4]用模糊逻辑系统逼近未知函数, 分别提出了几种直接和间接自适应模糊控制方法. 在文[1~4]的研究基础上, 文[5,6]通过引入“主导输入”的概念, 又提出了直接和间接模糊自适应控制方法. 然而, 以上关于 MIMO 非线性系统的模糊自适应控制方法都利用了系统的状态是完全可测的条件, 所以这些自适应模糊控制方法对于状态不完全可测的 MIMO 非线性系统的控制并不适用, 因此研究基于观测器的自适应模糊输出反馈控制的设计和系统的稳定性分析是非常重要的. 文[7]针对一类状态不完全可测的 MIMO 非线性系统, 利用[1~4]的思想, 首先给出了一种基于观测器的模糊自适应输出控制算法, 并给出了闭环系统的稳定性分析.

本文针对状态不完全可测的一类 MIMO 非线性系统, 在文[1~7]的研究基础上, 提出了一种新的基于观测器的模糊自适应输出反馈控制方法, 并证明了闭环系统的稳定性和收敛性问题. 与文[7]相比较, 本文所给出的自适应模糊输出反馈控制方法具有以下优点: (1) 模糊观测器不是针对观测

误差设计的, 而是针对系统的状态设计的; 因此, 易于计算和稳定性和收敛性的证明. (2) 在模糊观测器设计中, 充分考虑了不确定性和模糊逼近误差对性能的影响, 对保证观测器鲁棒性的控制项进行恰当设计, 从而保证了良好的观测性能.

2 问题的描述

考虑一个 MIMO 非线性系统:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{r_1} &= x_{r_1 2} \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_{r_1(r_1-1)} &= x_{r_1 r_1} \\
 \dot{x}_{r_1 r_1} &= f_1(\mathbf{x}) + g_{11}(\mathbf{x})u_1 + \dots + g_{1m}(\mathbf{x})u_m \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_m &= x_{r_m 2} \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_{r_m(r_m-1)} &= x_{r_m r_m} \\
 \dot{x}_{r_m r_m} &= f_m(\mathbf{x}) + g_{m1}(\mathbf{x})u_1 + \dots + g_{mm}(\mathbf{x})u_m \\
 y_1 &= x_{r_1 1} \\
 &\vdots \\
 y_m &= x_{r_m 1}
 \end{aligned} \tag{1}$$

收稿日期: 2004-01-06; 修回日期: 2004-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60274019); 国家 973 规划(No. 2002CB312200)

式中, $[r_1, \dots, r_m]$ 是系统的相对阶向量, $r_1 + \dots + r_m = n$; $y = [y_1, \dots, y_m]^T \in R^m$ 为系统的输出向量; $x = [x_{r_1}, \dots, x_{r_1+1}, \dots, x_{r_m}, \dots, x_{r_m+1}]^T \in R^n$ 为系统状态向量; $u = [u_1, \dots, u_m]^T \in R^m$ 为系统的输入控制向量; $f_i(x)$ 和 $g_{ij}(x)$ 为未知的非线性连续函数.

对系统(1)进行李导数运算可写成输出输入的形式:

$$y_i^{(r_i)} = f_i(x) + \sum_{j=1}^m g_{ij}(x) u_j, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

定义 $F(x) = [f_1(x), \dots, f_m(x)]^T$, $G(x) = [G_1(x), \dots, G_m(x)]^T$, $G_i(x) = [g_{i1}(x), \dots, g_{im}(x)]^T$, $A = \text{diag}[A_1, \dots, A_m]$, $B = \text{diag}[B_1, \dots, B_m]$, $C^T = \text{diag}[C_1, \dots, C_m]$

$$\text{其中 } A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{r_i \times r_i}, \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}_{r_i \times 1}$$

$$C_i = [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times r_i}$$

于是式(2)可表示成:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B[F(x) + G(x)u] \\ y &= C^T x \end{aligned} \quad (3)$$

本文的控制目标:设计一个自适应模糊输出反馈控制器使得模糊控制系统稳定,而且使得系统(1)的输出 $y = [y_1, \dots, y_m]^T$ 跟踪给定的有界参考信号 $y_m = [y_{m1}, \dots, y_{mm}]^T$.

3 模糊观测器及其输出反馈控制的设计

假设采用形如文[4, 7]中的模糊逻辑系统:

$$F(x|\Theta_1) = \Phi(x|\Theta_1), G(x|\Theta_2) = \Phi(x|\Theta_2) \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} \Phi(x) &= \text{diag}[\zeta^T(x), \dots, \zeta^T(x)], \Theta_1 = [\theta_1^1, \dots, \theta_1^N]^T \\ \Theta_2 &= [\theta_2^1, \dots, \theta_2^M]^T, \theta_{i1} = [\theta_{i1}^1, \dots, \theta_{i1}^{N_i}]^T, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned}$$

这里 Θ_1 和 Θ_2 是在线调整的参数向量矩阵, $\zeta^T(x) = [\zeta_1(x), \dots, \zeta_N(x)]$ 是模糊基函数.

根据模糊逻辑系统具有逼近非线性连续函数的性质,利用 $F(x|\Theta_1) = \Phi(x|\Theta_1)$, $G(x|\Theta_2) = \Phi(x|\Theta_2)$ 分别逼近函数向量 $F(x)$ 和函数矩阵 $G(x)$. 在此基础上,设计模糊自适应观测器为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B[F(\hat{x}|\Theta_1) + G(\hat{x}|\Theta_2)u - u_a - u_s] + K_0(y - C^T\hat{x}) \\ \hat{y} &= C^T\hat{x} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 K_0 为观测器增益矩阵, K_0 的选择使得 $A - K_0C^T$ 是稳定的矩阵; u_a 和 u_s 是待设计的补偿器.

定义观测误差向量为 $e = x - \hat{x}$, $\tilde{y} = y - \hat{y}$, 则由式(3)和(5)得:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (A - K_0C^T)e + B[(F(x) - F(\hat{x}|\Theta_1)) \\ &\quad + (G(x) - G(\hat{x}|\Theta_2))u + u_a + u_s] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\tilde{y} = C^T e$$

令 x 和 \hat{x} 分别属于下面所定义的紧集 U_x 和 $U_{\hat{x}}$,

$$U_x = \{x \in R^n : \|x\| \leq M_1 < \infty\}$$

$$U_{\hat{x}} = \{\hat{x} \in R^n : \|\hat{x}\| \leq M_2 < \infty\}$$

定义 Θ_1 和 Θ_2 的最优参数估计值为:

$$\Theta_1^* = \arg \min_{\Theta_1 \in \Omega_1} \left[\sup_{x \in U_x, \hat{x} \in U_{\hat{x}}} \|F(x|\Theta_1) - F(x)\| \right]$$

$$\Theta_2^* = \arg \min_{\Theta_2 \in \Omega_2} \left[\sup_{x \in U_x, \hat{x} \in U_{\hat{x}}} \|G(x|\Theta_2) - G(x)\| \right]$$

其中 Ω_1 和 Ω_2 分别为给定的有界的闭子集.

定义模糊最小逼近误差为:

$$w = (F(x) - F(\hat{x}|\Theta_1^*)) (G(x) - G(\hat{x}|\Theta_2^*)) u$$

则式(6)可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (A - K_0C^T)e + B[F(\hat{x}|\Theta_1^*) - F(\hat{x}|\Theta_1) + (G(\hat{x}|\Theta_2^*) \\ &\quad - G(\hat{x}|\Theta_2))u] + B[F(x) - F(\hat{x}|\Theta_1^*) \\ &\quad + (G(x) - G(\hat{x}|\Theta_2^*))u] \\ &= (A - K_0C^T)e + B(\Phi(\hat{x})\tilde{\Theta}_1 + \Phi(\hat{x})\tilde{\Theta}_2)u \\ &\quad + B(u_a + u_s) + Bw \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\tilde{\Theta}_1 = \Theta_1^* - \Theta_1$, $\tilde{\Theta}_2 = \Theta_2^* - \Theta_2$.

假设 1 对于给定的正定矩阵 Q_1 和 Q_2 , 下面的矩阵方程存在正定解 P_1 和 P_2 :

$$(A - BK_c^T)^T P_1 + P_1(A - BK_c^T) = -Q_1 \quad (8)$$

$$\begin{cases} (A - K_0C^T)^T P_2 + P_2(A - K_0C^T) = -Q_2 \\ P_2B = C \end{cases} \quad (9)$$

假设 2 设模糊逼近误差有界,即满足 $\|w\| \leq M$.

设 $y_m^{(r)} = [y_{1m}^{(r_1)}, y_{2m}^{(r_2)}, \dots, y_{mm}^{(r_m)}]^T$, $Y_m = [y_{1m}, \dots, y_{1m}^{(r_1-1)}, \dots, y_{mm}, \dots, y_{mm}^{(r_m-1)}]^T$, 并定义 $\hat{e} = Y_m - \hat{x}$;

设计模糊控制器及其补偿器分别为:

$$u = G(\hat{x}|\Theta_2)^{-1} [-F(\hat{x}|\Theta_1) + y_m^{(r)} + K_c^T \hat{e} + u_a + u_s] \quad (10)$$

$$u_a = K_0^T P_1 \hat{e} \quad (11)$$

$$u_s = -k \text{sgn}(e^T P_2 B), k \geq M \quad (12)$$

其中 $\text{sgn}(e^T P_2 B) = [\text{sgn}((e^T P_2 B)_1), \dots, \text{sgn}((e^T P_2 B)_m)]^T$, $(e^T P_2 B)_i$ 表示为 $e^T P_2 B$ 的第 i 列.

把式(10)分别代入式(5), 经过运算得:

$$\dot{\hat{e}} = (A - BK_c) \hat{e} - K_0C^T e \quad (13)$$

定理 1 对于非线性系统(4), 如满足前面的假设 1、2, 取模糊控制器为式(10)~(12), 参数向量的自适应律为:

$$\dot{\Theta}_1 = \gamma_1 \Phi(\hat{x}) B^T P_2 e = \gamma_1 \Phi(\hat{x}) \tilde{y} \quad (14)$$

$$\dot{\Theta}_2 = \gamma_2 \Phi(\hat{x}) B^T P_2 e u = \gamma_2 \Phi(\hat{x}) \tilde{y} u \quad (15)$$

则整个闭环系统稳定且 $\lim_{t \rightarrow \infty} e = \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e} = 0$.

证明 取李亚普诺夫函数为:

$$V = \frac{1}{2} \hat{e}^T P_1 \hat{e} + \frac{1}{2} e^T P_2 e + \frac{1}{2\gamma_1} \Theta_1^T \Theta_1 + \frac{1}{2\gamma_2} \text{tr}(\Theta_2^T \Theta_2) \quad (16)$$

求 V 对时间的导数, 并由式(7)和(13)得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} \hat{e}^T [(A - BK_c)^T P_1 + P_1(A - BK_c)] \hat{e} - \hat{e}^T P_1 K_0 C^T e \\ &\quad + e^T P_2 B u_a + \frac{1}{2} e^T [(A - K_0C^T)^T P_2 + P_2(A - K_0C^T)] e \\ &\quad + e^T P_2 B \Phi(\hat{x}) \Theta_1 + e^T P_2 B \Phi(\hat{x}) \Theta_2 u + e^T P_2 B u_s \\ &\quad + e^T P_2 B w + \frac{1}{\gamma_1} \Theta_1^T \dot{\Theta}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \text{tr}(\Theta_2^T \dot{\Theta}_2) \end{aligned} \quad (17)$$

把参数向量的自适应律式(14)和(15)代入, 并注意到,

$e^T P_2 B u_a = e^T P_2 B K_0^T P_1 \hat{e} = \hat{e}^T P_1 K_0 C^T e$, 所以上式变成

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T [(A - BK_c)^T P_1 + P_1(A - BK_c)] \hat{\mathbf{e}} + \frac{1}{2} \mathbf{e}^T [(A - K_0 C^T)^T P_2 + P_2(A - K_0 C^T)] \hat{\mathbf{e}} + \mathbf{e}^T P_2 B \mathbf{w} + \mathbf{e}^T P_2 B u_s \quad (18)$$

把 $u_s = -k \operatorname{sgn}(\mathbf{e}^T P_2 B)$ 和式(17)和(18)代入上式得:

$$V = -\frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}}^T Q_1 \hat{\mathbf{e}} - \frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}}^T Q_2 \mathbf{e} + \mathbf{e}^T P_2 B \mathbf{w} - k \mathbf{e}^T P_2 B \operatorname{sgn}(\mathbf{e}^T P_2 B) \leq -\frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}}^T Q_1 \hat{\mathbf{e}} - \frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}}^T Q_2 \mathbf{e} + [\|\mathbf{w}\| - k] \sum_{i=1}^m |(\mathbf{e}^T P_2 B)_i| \leq -\frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}}^T Q_1 \hat{\mathbf{e}} - \frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}}^T Q_2 \mathbf{e} + [M - k] \sum_{i=1}^m |(\mathbf{e}^T P_2 B)_i|$$

因此

$$V \leq -\frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}}^T Q_1 \hat{\mathbf{e}} - \frac{1}{2} \mathbf{e}^T Q_2 \mathbf{e} \quad (19)$$

令 $Q = \operatorname{diag}\{Q_1, Q_2\}$, $E^T = [\hat{\mathbf{e}}^T, \mathbf{e}^T]$, 则上式可变为

$$V \leq -\frac{1}{2} E^T Q E < 0 \quad (20)$$

因此得到: $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{e}} = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e} = 0$; 由此推出 $\lim_{t \rightarrow \infty} Y_m = \hat{\mathbf{x}}$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} Y_m = \hat{\mathbf{x}}$, 进一步有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}_i = 0$.

4 仿真

把本文所提出的自适应模糊输出反馈控制方法用于如图 2 所表示的机械手控制问题. 机械手的动态模型为

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \tau \quad (21)$$

其中

$$M(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) l_1^2 & m_2 l_1 l_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2) \\ m_2 l_1 l_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2) & m_2 l_2^2 \end{bmatrix},$$

$$C(q, \dot{q}) = m_2 l_1 l_2 (c_1 s_2 - s_1 c_2) \begin{bmatrix} 0 & -\dot{q}_2 \\ -\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} -(m_1 + m_2) l_1 g s_1 \\ -m_2 l_2 g s_2 \end{bmatrix}$$

$q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 分别为机械手关节的角位置, 角速度和角加速度, l_1, l_2 是连杆长度, g 是重力加速度, m_1, m_2 是杆的质量, $\tau = [\tau_1, \tau_2]^T$ 为驱动力矩, 设 $s_1 = \sin q_1, s_2 = \sin q_2, c_1 = \cos q_1, c_2 = \cos q_2$.

那么上式(21)能被改写成如下状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(\mathbf{x}) + g_{11}(\mathbf{x}) u_1 + g_{12}(\mathbf{x}) u_2 + d_1 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(\mathbf{x}) + g_{21}(\mathbf{x}) u_1 + g_{22}(\mathbf{x}) u_2 + d_2 \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_3 \end{cases} \quad (22)$$

其中

$$f_1(\mathbf{x}) = \frac{(s_1 c_2 - c_1 s_2)}{l_1 l_2 [(m_1 + m_2) - m_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)^2]} \times [m_2 l_1 l_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2) \dot{x}_2^2 - m_2 l_2^2 \dot{x}_4^2] + \frac{1}{l_1 l_2 [(m_1 + m_2) - m_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)^2]} \times [(m_1 + m_2) l_2 g s_1 - m_2 l_2 g s_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)]$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \frac{(s_1 c_2 - c_1 s_2)}{l_1 l_2 [(m_1 + m_2) - m_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)^2]} \times [-(m_1 + m_2) l_1^2 \dot{x}_2^2 + m_2 l_1 l_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2) \dot{x}_4^2] + \frac{1}{l_1 l_2 [(m_1 + m_2) - m_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)^2]} \times [-(m_1 + m_2) l_1 g s_1 (s_1 s_2 + c_1 c_2) + (m_1 + m_2) l_1 g s_2]$$

$$g_{11}(\mathbf{x}) = \frac{m_2 l_2^2}{m_2 l_1^2 l_2^2 [(m_1 + m_2) - m_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)^2]}$$

$$g_{12}(\mathbf{x}) = \frac{-m_2 l_1 l_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)}{m_2 l_1^2 l_2^2 [(m_1 + m_2) - m_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)^2]}$$

$$g_{21}(\mathbf{x}) = \frac{-m_2 l_1 l_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)}{m_2 l_1^2 l_2^2 [(m_1 + m_2) - m_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)^2]}$$

$$g_{22}(\mathbf{x}) = \frac{(m_1 + m_2) l_1^2}{m_2 l_1^2 l_2^2 [(m_1 + m_2) - m_2 (s_1 s_2 + c_1 c_2)^2]}$$

在区间 $[-2, 2]$ 上对变量 x_1, x_2, x_3 和 x_4 定义模糊集, 其模糊隶属函数为

$$\mu_{F_1^+}(x_i) = 1 / (1 + \exp(5(x_i + 2))), \mu_{F_2^+}(x_i) = \exp(-(x_i + 1.5)^2)$$

$$\mu_{F_3^+}(x_i) = \exp(-(x_i + 0.5)^2), \mu_{F_4^+}(x_i) = \exp(-(x_i - 0.5)^2)$$

$$\mu_{F_1^-}(x_i) = \exp(-(x_i + 1.5)^2), \mu_{F_2^-}(x_i) = 1 / (1 + \exp(5(x_i - 2)))$$

定义模糊推理规则如下:

$$R^{(i)}: \text{如果 } x_1 \text{ 是 } F_1^+ \text{ 且 } x_4 \text{ 是 } F_4^+, \text{ 则 } y \text{ 是 } G_i (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$D = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^4 \mu_{F_i^+}(x_i), \zeta_i(X) = \left[\left(\prod_{i=1}^4 \mu_{F_i^+} \right) / D, \dots, \left(\prod_{i=1}^4 \mu_{F_i^-} \right) / D \right]^T$$

按照文献[4]的方法构造模糊逻辑系统, 并逼近系统中的未知函数.

选择参数 $m_1 = m_2 = 1, l_1 = l_2 = 1, \gamma_1 = \gamma_2 = 5.5 \times 10^{-3}, k = 0.3$.

初始条件: $x(0) = [0.1 \ 0 \ 0.1 \ 0]^T, \hat{\mathbf{x}}(0) = [0.5 \ 0.5 \ 0 \ 0]^T, \underline{\theta}_1(0) = \underline{\theta}_2(0) = (-8, -6, -1, 3, 8, 1), \underline{\theta}_{11}(0) = \underline{\theta}_{12}(0) = \underline{\theta}_{21}(0) = \underline{\theta}_{22}(0) = (1, 2, 2, 0, -1, 1)$.

控制矩阵和观测增益矩阵分别取为:

$$K_c = \begin{bmatrix} 0 & 20 \\ 0 & 20 \\ 5 & 0 \\ 5 & 0 \end{bmatrix}, K_0 = \begin{bmatrix} 80 & 800 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 80 & 800 \end{bmatrix}.$$

给定参考模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1r} \\ \dot{x}_{2r} \\ \dot{x}_{3r} \\ \dot{x}_{4r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -6 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -6 & -5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1r} \\ x_{2r} \\ x_{3r} \\ x_{4r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 8 \sin t \\ 0 \\ 8 \cos t \end{bmatrix}$$

采用 MATLAB 对其进行仿真, 其仿真结果如图 2~5 所示. 图 2, 3 分别是角位置 q_1, q_2 和参考输入的跟踪曲线, 图 4, 5 分别是角速度 \dot{q}_1 和 \dot{q}_2 参考输入的跟踪曲线.

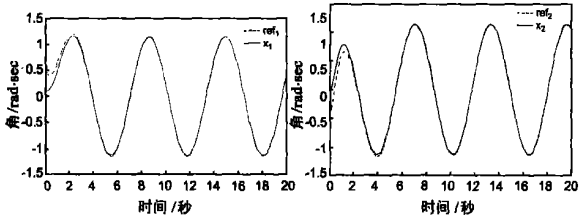


图 2 角位置 q_1 和参考输入 x_{1r} 的跟踪曲线

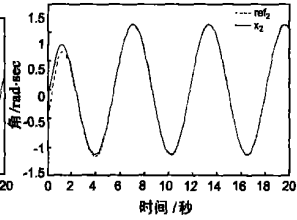


图 3 角位置 q_2 和参考输入 x_{2r} 的跟踪曲线

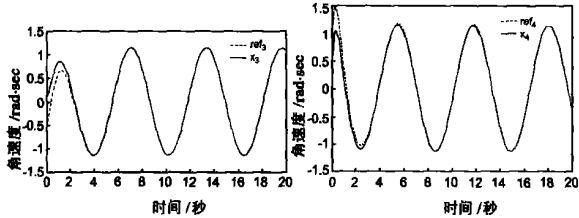


图 4 角速度 \dot{q}_1 和参考输入 x_{1v} 的跟踪曲线

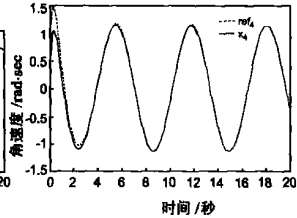


图 5 角速度 \dot{q}_2 和参考输入 x_{2v} 的跟踪曲线

5 结论

本文提出了一种基于观测器的自适应模糊输出反馈控制方法。该控制方法不需要系统的状态变量可测的条件,而是通过设计观测器获得它的估计值,证明了所提出的控制方案可保证闭环系统的稳定性和跟踪误差的收敛性。

参考文献:

- [1] Ordóñez, R, et al. Stable multi output adaptive fuzzy/ neural control[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1999, 7(4): 32- 43.
- [2] Tong S C, et al. Fuzzy adaptive control of multivariable nonlinear systems[J]. Fuzzy sets and System, 2000, 111(2): 153- 167.
- [3] Zhang H G, et al. Adaptive fuzzy control of MIMO nonlinear systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 111(2): 191- 204.

- [4] Chang Y C, et al. Robust tracking control for nonlinear MIMO systems via fuzzy approaches[J]. Automatica, 2000, 36(6): 1535- 1545.
- [5] 刘国荣,等.一类非线性MIMO系统的直接自适应模糊鲁棒控制[J].控制理论与应用,2003,20(5): 697- 698.
Liu Guorong, et al. Direct adaptive fuzzy robust control for a class of nonlinear MIMO systems[J]. Control Theory and Application, 2003, 20(5): 697- 698.
- [6] 刘国荣,等.一类非线性MIMO系统的间接自适应模糊鲁棒控制[J].控制与决策,2002,增刊: 666- 680.
Liu Guorong, et al. Indirect adaptive fuzzy robust control for a class of nonlinear MIMO systems[J]. Control and Decision, 2002, 17 Suppl: 697- 698.
- [7] Li H X, et al. A hybrid adaptive fuzzy control for a class of nonlinear MIMO systems[J]. IEEE Transaction on Fuzzy systems, 2003, 1(11): 24- 35.

作者简介:



佟绍成 男,1960年生于辽宁锦州,教授,1997年在东北大学获博士学位,研究方向为模糊自适应控制,智能控制和非线性鲁棒控制,主持和完成省部级以上科研课题4项;获省部级科学进步奖2项;在国际期刊上发表学术论文20多篇。Email: jztsc@sohu.com



柴天佑 男,1947年生于甘肃兰州,1985年在东北大学获博士学位,中国工程院院士,东北大学国家冶金自动化工程技术研究中心主任,教授、博士生导师,研究方向为:自适应控制,智能控制和工业综合自动化。