

文章编号: 1001-0920(2006)11-1280-04

一类不确定时滞系统的模糊滑模控制

米阳¹, 潘伟², 井元伟³

(1. 上海电力学院 数理系, 上海 200090; 2. 沈阳炮兵学院 电子侦察系, 沈阳 110162; 3. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 利用T-S模糊模型逼近一类非线性不确定时滞系统, 将非线性系统模糊化为局部线性系统, 基于李亚普诺夫稳定性定理设计出使模糊系统全局稳定的滑模控制器, 该控制器对满足匹配条件和未满足匹配条件的不确定性系统均适用. 最后以Truck-Trailer模型为例进行仿真研究, 其结果验证了设计方案的可行性和有效性.

关键词: T-S模糊模型; 滑模控制; 时滞系统; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273.4 **文献标识码:** A

Fuzzy Sliding Mode Control for a Class of Uncertain Time-delay Systems

M I Yang¹, PAN Wei², JIN G Yuanwei³

(1. Department of Mathematics and Physics, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Department of Electric Detection, Shenyang College of Artillery, Shenyang 110162, China; 3. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: M I Yang, E-mail: miyangmi@163.com)

Abstract: The T-S fuzzy model is used to approximate a class of nonlinear uncertain time-delay systems, and the nonlinear system is fuzzirized into local linear systems. The sliding mode controller is designed to make the fuzzy system global stable based on the Lyapunov stability theorem, and the controller is suited to the system with matched or unmatched uncertainty. Simulation result of the Truck-Trailer model shows that the designed method possesses the feasibility and validity.

Key words: T-S fuzzy model; Sliding mode control; Time-delay system; Linear matrix inequality

1 引言

非线性控制是当今最活跃的研究领域之一, 但缺少系统和有效的处理方法. 模糊控制具有控制器设计简便、适用于许多非线性系统和鲁棒性强等特点, 20世纪80年代以来, 在控制理论和实践方面取得了很大的进展, 但缺乏严格的稳定性证明. Takagi和Sugeno把T-S模糊模型应用于非线性系统的控制^[1], 为非线性系统的控制提供了新的途径, 并给出严格的稳定性证明. 有关T-S模型的设计方法及稳定性分析, 已有大量报道^[2-6].

变结构控制即滑模控制, 其滑动模态具有不变

性, 因而被广泛应用于不确定系统的控制^[7-10]. 变结构控制的优点是能克服系统的不确定性, 对干扰和未建模动态具有很强的鲁棒性; 缺点是用于补偿干扰和未建模动态的高控制增益, 以及在滑动面附近控制行为的高频转换而产生抖振现象.

中外学者基于以上研究成果, 将变结构控制与模糊控制结合起来, 应用到许多控制系统中^[6,11]. 模糊变结构控制是一种混合控制, 兼有模糊控制和变结构控制的优点, 因而既解决了模糊控制系统的稳定性和鲁棒性问题, 又削弱了变结构控制中的抖振. 本文针对一类非线性时滞不确定系统, 通过构造基

收稿日期: 2005-10-07; 修回日期: 2006-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274099).

作者简介: 米阳(1976—), 女, 河南南阳人, 讲师, 博士, 从事智能控制、变结构控制等研究; 井元伟(1956—), 男, 辽宁西丰人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统、网络控制等研究.

于 T-S 模型的变结构控制, 实现了系统的镇定

2 问题描述

考虑由以下 r 条规则构成的模糊模型描述的时滞非线性系统:

$$R^i: \text{ If } \theta \text{ is } \mu_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } \theta_p \text{ is } \mu_{ip},$$

$$\text{ Then } \dot{x}(t) = (A_{1i} + \Delta A_{1i})x(t) + A_{2i}x(t - \tau(t)) + B_i u(t) + h_i(x, t),$$

$$i = 1, 2, \dots, r \quad (1)$$

其中: R^i 代表第 i 条模糊规则, r 是模糊规则数, $x(t) \in R^n$ 是状态向量, $u(t) \in R^m$ 是控制输入向量, A_{1i} 和 B_i 是具有适当维数的常数矩阵, $\theta(j = 1, 2, \dots, p)$ 是系统的前件变量, ΔA_{1i} 是参数不确定项, h_i 是外部干扰, $\tau(t) \geq \tau_0$ 是时滞函数, 并且假定 $\tau(t) \leq \beta < 1$.

由这 r 条规则构成的 T-S 模糊模型, 通过反模糊化方法可得到系统的全局模型

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) [(A_{1i} + \Delta A_{1i})x(t) + A_{2i}x(t - \tau(t)) + B_i u(t) + h_i(x, t)] \quad (2)$$

其中

$$h_i(\theta) = \frac{w_i(\theta)}{\sum_{j=1}^r w_j(\theta)}, \quad h_i(\theta) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^r h_i(\theta) = 1$$

为了证明的需要, 首先给出以下假设条件:

假设 1 $B_1 = B_2 = \dots = B_r = B$, 并且 $B_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 列满秩

假设 2 矩阵 CB 是非奇异矩阵

假设 3 参数不确定项 ΔA_{1i} 和外部干扰项 $h_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 满足匹配条件

$$\Delta A_{1i}(x) = B \overline{\Delta A_{1i}}(x), \quad h_i(x, t) = B \overline{h_i}(x, t) \quad (3)$$

并且 $\overline{\Delta A_{1i}}(x)$ 和 $\overline{h_i}(x, t)$ 满足范数有界条件 $\|\overline{\Delta A_{1i}}(x)\| \leq \Psi_{\Delta_{1i}}, \|\overline{h_i}(x, t)\| \leq \Psi_{h_i}(t), i = 1, 2, \dots, r$ 其中 $\Psi_{\Delta_{1i}}$ 是已知常数, Ψ_{h_i} 是已知函数

假设 4 $\Psi_{\Delta} = \max\{\Psi_{\Delta_{1i}}, i = 1, 2, \dots, r\}, \Psi_{\Delta h} = \max\{\Psi_{\Delta_{1i}}, i = 1, 2, \dots, r\}$.

3 匹配不确定时滞非线性系统模糊滑模控制器设计

考虑如下满足匹配条件的全局系统模型:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta) [A_{1i}x + A_{2i}x(t - \tau(t)) + B \overline{\Delta A_{1i}}(x) + B u(t) + B \overline{h_i}] \quad (4)$$

由于证明的需要, 首先给出以下两个引理:

引理 1^[12] 对于任意具有适当维数的实矩阵 Σ_1 和 Σ_2 , 满足不等式

$$\Sigma_1^T \Sigma_2 + \Sigma_2^T \Sigma_1 - \alpha \Sigma_1^T \Sigma_1 + \alpha^{-1} \Sigma_2^T \Sigma_2, \alpha > 0 \quad (5)$$

引理 2^[12] 对于任意具有适当维数的实矩阵 Σ_1, Σ_2 和 Σ_3 , 如果存在实矩阵函数, 满足条件 $H^T(t)H(t) - \Psi_l, \Psi > 0$, 则对于任意的 $\epsilon > 0$, 如下不等式成立:

$$\Sigma_1 \Sigma_2 H^T(t) \Sigma_3 + \Sigma_3^T H^T(t) \Sigma_2^T \Sigma_1^T - \Psi \epsilon \Sigma_1 \Sigma_2 \Sigma_3^T \Sigma_1^T + \epsilon^{-1} \Sigma_3^T \Sigma_3 \quad (6)$$

为了控制具有满足匹配条件的不确定项的系统(4), 现给出如下定理:

定理 1 假设存在正定矩阵 X, Q 和矩阵 Y_i , 使得如下矩阵不等式成立:

$$X A_{1i}^T + A_{1i} X - B_i Y_i - Y_i^T B_i^T + A_{2i} X Q^{-1} X A_{2i}^T + \frac{1}{1 - \beta} Q < 0 \quad (7)$$

定义切换函数和切换面

$$\begin{cases} s = (B^T P B)^{-1} B^T P x, \\ S = \{x \in R^n | B^T P x = 0\}. \end{cases} \quad (8)$$

令 $P = X^{-1}$, 设计变结构控制器

$$u = - \sum_{i=1}^r h_i(\theta) (B^T P B)^{-1} B^T P A_{1i} x(t) - \sum_{i=1}^r h_i(\theta) (B^T P B)^{-1} B^T P A_{2i} x(t - \tau(t)) - \beta_1 s - \beta_2 \text{sgn } s - [\Psi_{\Delta} x(t) + \Psi_h(t)] \text{sgn } s \quad (9)$$

其中 β_1 和 β_2 为正数 则在控制器(9)的作用下, 系统(4)渐近稳定

证明 分为两步: 第 1 步证明系统(4)在控制器(9)的作用下, 在有限时间内到达切换面 S , 并且一直保持在切换面上; 第 2 步证明在控制器(9)的作用下, 系统在切换面上是渐近稳定的

首先证明第 1 步. 对切换函数 s 求导并将式(4)和(9)代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= (B^T P B)^{-1} B^T P \dot{x} = \\ & \sum_{i=1}^r h_i(\theta) (B^T P B)^{-1} B^T P A_{1i} x + \\ & \sum_{i=1}^r h_i(\theta) (B^T P B)^{-1} B^T P A_{2i} x(t - \tau) + \\ & u(t) + \sum_{i=1}^r h_i(\theta) [\overline{\Delta A_{1i}}(x) + \overline{h_i}] \end{aligned} \quad (10)$$

方程(9)代入(10), 得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= -\beta_1 s - \beta_2 \text{sgn } s - [\Psi_{\Delta} x(t) + \\ & \Psi_h(t)] \text{sgn } s + \sum_{i=1}^r h_i(\theta) [\overline{\Delta A_{1i}}(x) + \\ & \overline{h_i}(x, t)] \end{aligned} \quad (11)$$

下面证明到达条件满足, 即验证不等式 $s^T \dot{s} < 0$

成立有

$$\begin{aligned}
& s^T \dot{s} = \\
& -\beta_1 s^T s - \beta_2 s^T \operatorname{sgn} s - [\Psi_{\Delta} x(t) + \\
& \Psi_h(t)] s^T \operatorname{sgn} s + s^T \sum_{i=1}^r h_i(\Theta) [\overline{\Delta A_{1iX}}(t) + \overline{h_i}] = \\
& -\beta_1 s - \beta_2 \sum_{j=1}^m |s_j| - [\Psi_{\Delta} x(t) + \\
& \Psi_h(t)] \sum_{j=1}^m |s_j| + s^T \sum_{i=1}^r h_i(\Theta) [\overline{\Delta A_{1iX}}(t) \overline{h_i}] \\
& -\beta_1 s - \beta_2 \sum_{j=1}^m |s_j| \quad (12)
\end{aligned}$$

因此可得

$$s^T \dot{s} < 0 \quad (13)$$

由式(12)和(13)可知系统的轨线满足到达条件,即系统运动轨迹在有限时间内到达滑模面,并且保持在切换面上

然后证明第2步.选择李雅普诺夫函数

$$\begin{aligned}
v(x(t)) &= x^T(t) P x(t) + \\
& \frac{1}{1-\beta} \int_{t-\tau}^t x^T(\sigma) S x(\sigma) d\sigma \quad (14)
\end{aligned}$$

其中: $P = X^{-1} > 0, S = P Q P$. 令 $K_i = Y_i X^{-1}$, 由引理1和式(4)对 v 求导,得

$$\begin{aligned}
\dot{v}(x(t)) &= \\
& x^T P \dot{x} + x^T P x + \frac{1}{1-\beta} x^T S x - \\
& \frac{1-\tau}{1-\beta} x^T(t-\tau) S x(t-\tau) = \dots \\
& \sum_{i=1}^r h_i(\Theta) x^T P (A_{1iX} + X A_{1i}^T + A_{2iX} Q^{-1} X A_{2i}^T - \\
& B Y_i - Y_i^T B^T + \frac{1}{1-\beta} Q) P x. \quad (15)
\end{aligned}$$

因为定理1中不等式(7)成立,所以 $\dot{v} < 0$ 易知系统运动轨线保持在切换面 S 上,并且渐近稳定

定理1中的不等式(7)可转化为如下线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix}
A_{1iX} + X A_{1i}^T - B Y_i - & & \\
Y_i^T B^T + \frac{1}{1-\beta} Q & & A_{2iX} \\
X A_{2i}^T & & -Q
\end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

矩阵不等式(16)可通过Matlab中的LM I工具箱方便地求解

4 非匹配不确定时滞非线性系统模糊滑模控制器设计

考虑不确定项 ΔA_{1i} 不满足匹配条件,但具有有界范数的情况.假设 $\Delta A_{1i} = H F_i E$, 其中 $F_i^T F_i = I, H$ 和 E 是具有适当维数的已知矩阵,干扰项 $h_i(x, t)$ 与上节的定义相同.现给出如下定理:

定理2 假设存在正定矩阵 X, Q 和 Y_i , 使得如下矩阵不等式成立:

$$\begin{aligned}
& X A_{1i}^T + A_{1iX} - B Y_i Y_i^T + A_{2iX} Q^{-1} X A_{2i}^T + \\
& \rho_1 H H^T + \frac{1}{\rho_1} X E^T E X + \frac{1}{1-\beta} Q < 0 \quad (17)
\end{aligned}$$

切换函数和切换面的设计与上节相同.设计变结构控制器

$$\begin{aligned}
u &= \\
& - \sum_{i=1}^r h_i(\Theta) (B^T P B)^{-1} B^T P A_{1iX}(t) - \\
& \sum_{i=1}^r h_i(\Theta) (B^T P B)^{-1} B^T P A_{2iX}(t - \tau(t)) - \\
& \beta_1 s - \beta_2 \operatorname{sgn} s - [(B^T P B)^{-1} B^T P \times \\
& H \quad E \quad x(t) + \Psi_h(t)] \operatorname{sgn} s, \quad (18)
\end{aligned}$$

其中 β_1 和 β_2 为正数.则在控制器(18)的作用下,系统(4)是渐近稳定的

证明可参照定理1的证明过程

5 仿真算例

为了验证所设计控制器的有效性,引入包含时滞的 Truck-Trailer 模型

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1(t) &= -a \frac{\sqrt{l}}{L t_0} x_1(t) - (1-a) \frac{\sqrt{l}}{L t_0} x_1(t - \tau) \\
& + \frac{\sqrt{l}}{l t_0} u(t) + 0.1 \sin t, \\
\dot{x}_2(t) &= \frac{\sqrt{l}}{L t_0} x_1(t) + (1-a) \frac{\sqrt{l}}{L t_0} x_1(t - \tau), \\
\dot{x}_3(t) &= \frac{\sqrt{l}}{t_0} \sin(x_2(t) + a \frac{\sqrt{l}}{2L} x_1(t) + \\
& (1-a) \frac{\sqrt{l}}{2L} x_1(t - \tau)).
\end{aligned}$$

模型参数为

$$\begin{aligned}
l &= 2.8, L = 5.5, \bar{l} = 2.0, t_0 = 0.5, \\
v &= -1.0, d = 10 t_0 / \pi, a = 0.7.
\end{aligned}$$

利用以下模糊模型来设计模糊控制器:

$$\begin{aligned}
R_1: \text{ If } \Theta = x_2 + a \frac{\sqrt{l}}{2L} x_1(t) + (1-a) \times \\
\frac{\sqrt{l}}{2L} x_1(t - \tau) \text{ is about } 0,
\end{aligned}$$

Then

$$\dot{x}(t) = A_{11X}(t) + \Delta A_{11X}(t) + A_{12X}(t - \tau) + B_1 u(t) + B_1 h_1(t);$$

$$\begin{aligned}
R_2: \text{ If } \Theta = x_2 + a \frac{\sqrt{l}}{2L} x_1(t) + (1-a) \times \\
\frac{\sqrt{l}}{2L} x_1(t - \tau) \text{ is about } \pi \text{ or } -\pi,
\end{aligned}$$

Then

$$\dot{x}(t) = A_{21X}(t) + \Delta A_{21X}(t) + A_{22X}(t - \tau) + B_2 u(t) + B_2 h_2(t).$$

其中

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= \begin{bmatrix} -a \frac{\bar{v}t}{L t_0} & 0 & 0 \\ a \frac{\bar{v}t}{L t_0} & 0 & 0 \\ a \frac{\bar{v}^2 t^2}{2L t_0} & \frac{\bar{v}t}{t_0} & 0 \end{bmatrix}, \\
 A_{12} &= \begin{bmatrix} -(1-a) \frac{\bar{v}t}{L t_0} & 0 & 0 \\ (1-a) \frac{\bar{v}t}{L t_0} & 0 & 0 \\ (1-a) \frac{\bar{v}^2 t^2}{2L t_0} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 A_{21} &= \begin{bmatrix} -a \frac{\bar{v}t}{L t_0} & 0 & 0 \\ a \frac{\bar{v}t}{L t_0} & 0 & 0 \\ a \frac{d\bar{v}^2 t^2}{2L t_0} & \frac{d\bar{v}t}{t_0} & 0 \end{bmatrix}, \\
 A_{22} &= \begin{bmatrix} -(1-a) \frac{\bar{v}t}{L t_0} & 0 & 0 \\ (1-a) \frac{\bar{v}t}{L t_0} & 0 & 0 \\ (1-a) \frac{d\bar{v}^2 t^2}{2L t_0} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 B_1 &= \begin{bmatrix} \bar{v}t/Lt_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} \bar{v}t/Lt_0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

当不确定项满足匹配条件时, 参数为

$$\Delta A_{11} = B \underline{\Delta A}_{11}, \underline{\Delta A}_{11} = [1 \ 0 \ 0],$$

$$\Delta A_{21} = B \underline{\Delta A}_{21}, \underline{\Delta A}_{21} = [1 \ 0 \ 0]$$

当不确定项不满足匹配条件, 但具有有界范数条件时, 参数为

$$\Delta A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 15 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} F(t) [0 \ 1 \ -0.15 \ 0.15],$$

$$\Delta A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 15 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} F(t) [0.15 \ -0.15 \ 0]$$

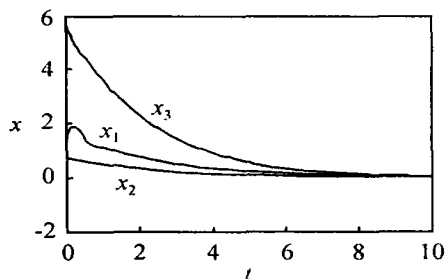


图 1 具有匹配不确定项的系统运动轨迹

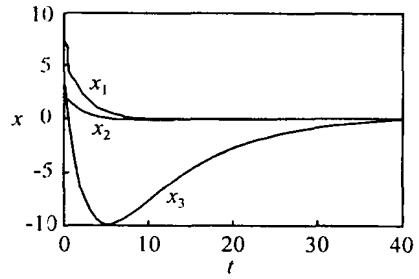


图 2 具有非匹配不确定项的系统运动轨迹

仿真结果如图 1 和图 2 所示

从仿真结果可以看出, 在本文设计的控制器的作用下, 系统无论具有匹配不确定项还是具有非匹配不确定项, 闭环系统的运动轨迹 x_1, x_2, x_3 都是渐近稳定的

6 结 语

本文利用 T-S 模糊模型来逼近一类不确定时滞系统, 并基于李雅普诺夫稳定性定理设计了滑模控制器。该控制器适用于满足匹配条件和不满足匹配条件的不确定性系统 仿真结果验证了该方法的可行性 本文的研究工作可进一步推广到系统的跟踪控制以及相应的离散系统

参考文献 (References)

- [1] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1985, 15 (1): 116-132
- [2] Tanaka T, Sugeno M. Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 45(2): 135-156
- [3] Tanaka K, Sano M. Fuzzy Stability Criterion of a Class of Nonlinear Systems[J]. *Information Science*, 1993, 70 (1): 3-26
- [4] Cao Y Y, Frank P M. Stability Analysis and Synthesis of Nonlinear Time-delay Systems via Linear Takagi-Sugeno Fuzzy Models[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 124(2): 213-229
- [5] Tseng C S, Chen B S, Uang H J. Fuzzy Tracking Control Design for Nonlinear Dynamic Systems via T-S Fuzzy Model[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(3): 381-392
- [6] Tao C W, Chan M L, Lee T T. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Linear Systems with Mismatched Time-varying Uncertainties [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, 2003, 33 (2): 283-294

(下转第 1288 页)

车辆1: 仓库—西北工业大学—火车站—西安交通大学—仓库;

车辆2: 仓库—西稍门—西门—钟楼—仓库;

车辆3: 仓库—小寨—大雁塔—仓库

5 结 语

本文在文献[1]的基础上改进了交通路网中的车辆调度模型,使车辆调度问题与实际交通状况紧密结合,模型具有一定的现实意义;设计了混合粒子群算法解决车辆调度问题,此算法比单纯的粒子群算法计算简便,应用到西安市路网车辆调度中,取得了较理想的效果。但现实生活中的交通状况是很复杂的,比如考虑交叉口延误时间、突发事件等多种因素下的车辆调度问题将是今后研究的一个方向。

参考文献(References)

- [1] 张潜,高立群,胡祥培,等. 物流配送路径多目标优化的聚类-改进遗传算法[J]. *控制与决策*, 2003, 18(4): 418-422
(Zhang Q, Gao L Q, Hu X P, et al. Research on Multi-objective Vehicle Routing Problem of Optimization Based on Clustering Analysis and Improved Genetic Algorithm [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 418-422.)
- [2] Laporte G. The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms [J]. *European of Operational Research*, 1992, 59(3): 345-358
- [3] 蔡延光,钱积新,孙优贤. 带有时间窗的多重运输调度问题的自适应 Tabu Search 算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2000, 20(12): 42-50
(Cai Y G, Qian J X, Sun Y X. Self-adaptive Tabu Search for Multiple Demands Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Windows [J]. *J of Systems Engineering Theory and Practice*, 2000, 20(12): 42-50.)
- [4] 蔡延光,钱积新,孙优贤. 多重运输调度问题的模拟退火算法[J]. *系统工程理论与实践*, 1998, 18(10): 11-15
(Cai Y G, Qian J X, Sun Y X. Simulated Annealing for Multiple Demands Vehicle Routing Problems [J]. *J of Systems Engineering Theory and Practice*, 1998, 18(10): 11-15.)
- [5] 郎茂祥. 装卸混合车辆路径问题的模拟退火算法研究[J]. *系统工程学报*, 2005, 20(5): 481-491
(Lang M X. Study on Simulated Annealing Algorithm for Vehicle Routing Problem with Backhauls [J]. *J of Systems Engineering*, 2005, 20(5): 485-491.)
- [6] Papageorgiou M, Bosseille J M, Hajsalem H. Modeling and Real-time Control of Traffic Flow on the Southern Part of Boulevard Périphérique in Paris [J]. *Transportation Research A*, 1990, 24(5): 345-359
- [7] 王岁花,冯乃勤,李爱国. 一类新颖的粒子群优化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(13): 109-134
(Wang S H, Feng N Q, Li A G. A Novel Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(13): 109-134.)
- [8] Venter G, Sobieszczanski-Sobieski J. Particle Swarm Optimization [J]. *AIAA J*, 2003, 41(8): 1583-1589
- [9] 陈华根,吴健生,王家林,等. 模拟退火算法机理研究[J]. *同济大学学报*, 2004, 32(6): 802-805
(Chen H G, Wu J S, Wang J L, et al. Mechanism Study of Simulated Annealing Algorithm [J]. *J of Tongji University*, 2004, 32(6): 802-805.)
- [10] 侯志荣,吕振肃. 基于MATLAB的粒子群优化算法及其应用[J]. *计算机仿真*, 2003, 20(10): 68-70
(Hou Z R, Lu Z S. Particle Swarm Optimization with Application Based on MATLAB [J]. *Computer Simulation*, 2003, 20(10): 68-70.)
- [7] Choi H H. Variable Structure Control of Dynamical Systems with Mismatched Norm-bounded Uncertainties: An LMIA Approach [J]. *Int J of Control*, 2001, 74(13): 1324-1334
- [8] Shyu K K, Tsai Y W, Lai C K. A Dynamic Output Feedback Controllers for Mismatched Uncertain Variable Structure System [J]. *Automatica*, 2001, 37(5): 775-779
- [9] Gouaisbaut F, Dambine M, Richard J P. Robust Control of Delay Systems: A Sliding Mode Control Design via LM I [J]. *System and Control Letters*, 2002, 46(4): 219-230
- [10] Li X Q, Decarlo R A. Robust Sliding Mode Control of Uncertain Time Delay Systems [J]. *Int J of Control*, 2003, 76(13): 1296-1305
- [11] Zheng F, Wang Q G, Lee T H. Output Tracking Control of MIMO Fuzzy Nonlinear Systems Using Variable Structure Control Approach [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, 10(6): 686-697
- [12] Mahmoud M S, Mohamed Z. Stabilizing Controllers Using Observers for Uncertain Systems with Delays [J]. *Int J of Systems Science*, 2001, 32(6): 767-773

(上接第1283页)