

文章编号: 1000-8152(2000)01-0128-05

基于模糊神经网络的滑模控制

128-132

达飞鹏 宋文忠

TP271

0231

(东南大学自动化研究所·南京, 210096)

摘要: 研究了一类不确定性非线性系统的滑模变结构控制, 提出了一种基于模糊神经网络(Fuzzy Neural Networks)的滑模变结构设计方法, 设计了控制器的结构, 利用动态反向传播算法实现滑模控制. 这种方法与一般变结构控制相比不但具有强的鲁棒性而且还能有效地消除抖动现象, 同时在设计中不需要知道系统中不确定性和扰动的上界. 另外还运用 Lyapunov 函数从理论上分析了系统的稳定性. 仿真结果说明了本文所提方法的有效性.

关键词: 非线性系统; 模糊神经网络; 滑模控制

文献标识码: A

鲁棒性

Sliding Mode Control Based on the Fuzzy Neural Networks

DA Feipeng and SONG Wenzhong

(Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing, 210096, P. R. China)

Abstract: A new mode sliding method is proposed to diminish chattering and to achieve accurate tracking for a class of nonlinear systems in the presence of disturbances and parameter variations. We present the variable structure control system based on fuzzy neural networks controller in the first time, which uses the dynamical back propagation algorithm to ensure the existing condition of sliding mode control. Compared with the common variable structure control, the new method can eliminate the chattering phenomenon efficiently and has more robustness while the bounds of the uncertainties and disturbances are not known in the controller design. Stability analysis is also given by using Lyapunov function. Simulation results demonstrate the effectiveness of the method.

Key words: nonlinear system; fuzzy neural networks; sliding mode control

1 引言(Introduction)

非线性是普遍存在的, 在实际控制中, 许多控制对象都具有很强的非线性, 并且所建立的模型还往往有一定的不确定性, 而滑模变结构控制为解决这一类问题提供了一种有效的手段. 然而, 滑模控制在本质上的不连续开关特性将会引起系统的颤动^[1,2]. 这种颤动可能把系统中存在的未建模高频成份激励起来, 甚至使系统不稳定. 同时, 颤动也增加了控制器的负担, 易损坏控制器的部件. 所以, 设计能遏制高频颤动的滑模控制器具有理论和实际意义. 文[3]针对一类非线性系统, 引入了边界层的概念, 提出用饱和函数代替符号函数的消除颤动方法, 然而, 该方法在确定控制参数时比较复杂, 而且在消除颤动时不可避免地影响控制精度和系统鲁棒性. 文[4,5]给出了滑模控制和模糊控制组合的设计方法, 提出了能减少颤动的滑模控制方法. 但是由于其模糊规则的提取有很大任意性, 同时模糊控制缺少学习能力, 因此其决策表的形式和形成也较复杂.

本文对把模糊神经网络用于滑模控制作了首次尝试. 模糊神经网络揉合了模糊逻辑的推理能力, 又有神经网络很强的学习能力和非线性表述能力, 而且模糊神经网络的物理意义清晰明了. 根据 Sugeno 推理方法和“联接主义”思想, 我们设计了模糊神经网络, 针对滑模控制的特点将用于控制的模糊神经网络和用于辨识的模糊神经网络有机结合设计了整个控制系统的结构, 并给出了学习算法. 由于模糊神经网络滑模控制器平滑了控制信号, 因此能有效地消除颤动, 且其鲁棒性比一般的滑模变结构控制器的鲁棒性强, 同时在设计中不需要知道系统中不确定性和扰动的上界. 文中对系统的稳定性进行了分析, 通过构造 Lyapunov 函数证明了系统是全局稳定的, 而且跟踪误差收敛到零的一个邻域内. 仿真结果表明了本文所提方法的有效性.

2 一般滑模控制器的设计(Design of the sliding mode controller)

考虑如下仿射型非线性系统:

$$x^{(n)}(t) = f(X) + g(X)u + d(X, t), \quad (1)$$

其中状态向量 $X^T(t) = (x(t), \dot{x}(t), \dots, x^{(n-1)}(t)) \in \mathbb{R}^n, x(t) \in \mathbb{R}^1, u$ 是控制量, $u \in \mathbb{R}^m, g(X)$ 是已知控制增益, $d(X, t)$ 是未知干扰但有界. 假设

$$f(X) = \hat{f}(x) + \Delta f(X), \quad (2)$$

其中 $\hat{f}(X)$ 是 $f(X)$ 的估计值, $\Delta f(X)$ 为模型的不确定性. 设 $F(X)$ 和 $D(X)$ 分别是 $\Delta f(X)$ 和 $d(X, t)$ 的上界函数, 即

$$|\Delta f(X)| \leq F(X), \quad (3)$$

$$|d(X, t)| \leq D(X). \quad (4)$$

同时假设 $x_r(t)$ 为预先选定的轨迹, $x_r(t) \in \mathbb{R}^1$, 具有直到 n 阶的导数.

我们的控制目标是当系统存在不确定性和扰动 的情况下, 使得系统输出 $x(t)$ 跟踪 $x_r(t)$. 定义跟踪误差 $e_1(t) = x(t) - x_r(t)$, 则误差向量

$$e^T(t) = (e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)) \triangleq (x(t) - x_r(t), \dot{x}(t) - \dot{x}_r(t), \dots, x^{(n-1)}(t) - x_r^{(n-1)}(t)) \in \mathbb{R}^n. \quad (5)$$

其中向量 $X_r^T(t) = (x_r(t), \dot{x}_r(t), \ddot{x}_r(t), \dots, x_r^{(n-1)}(t)) \in \mathbb{R}^n$. 于是方程(1)等价于如下状态方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = e_2(t), \\ \dot{e}_2(t) = e_3(t), \\ \vdots \\ \dot{e}_{n-1}(t) = e_n(t), \\ \dot{e}_n(t) = f(X) + g(X)u + d(X, t) - x_r^{(n)}(t). \end{cases} \quad (6)$$

对此系统, 取切换函数

$$s(e) = \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_i + e_n. \quad (7)$$

其中常数 c_i 满足 Hurwitz 多项式

$$\lambda^{n-1} + c_{n-1}\lambda^{n-2} + \dots + c_2\lambda + c_1. \quad (8)$$

所以切换平面为 $s(e) = 0$, 即

$$\sum_{i=1}^{n-1} c_i e_i + e_n = 0. \quad (9)$$

对(7)式两边取微分, 得到

$$\begin{aligned} \dot{s}(e) &= \sum_{i=1}^{n-1} c_i \dot{e}_{i+1} + \dot{e}_n = \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} + f(X) + g(X)u + d(X, t) - x_r^{(n)}. \end{aligned} \quad (10)$$

令 $\dot{s}(e) = 0$ 得到等价控制:

$$g(X)u_{eq} = -\sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} - \hat{f}(X) - \Delta f(X) - d(X, t) + x_r^{(n)}. \quad (11)$$

基于(11)式, 我们在本文中 选择控制量

$$u = \frac{1}{g(X)} \left(-\sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} - \hat{f}(X) + x_r^{(n)} - (F + D + \eta) \cdot \text{sgn}(s) \right), \quad (12)$$

其中

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1, & s > 0, \\ 0, & s = 0, \\ -1, & s < 0. \end{cases} \quad \eta > 0 \text{ 为常数.}$$

令

$$\tilde{u} = \frac{1}{g(X)} \left(-\sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} - \hat{f} + x_r^{(n)} \right), \quad (13)$$

$$\Delta u = \frac{1}{g(X)} \left(-(F + D + \eta) \cdot \text{sgn}(s) \right), \quad (14)$$

则 $u = \tilde{u} + \Delta u. \quad (15)$

综合上述各式容易得到:

$$s \cdot \dot{s} \leq -\eta |s| < 0. \quad (16)$$

式(16)表明系统的广义滑模条件成立. 所以在控制律(12)作用下, 滑动模态存在且可达. 同时由于多项式 $c_1 + c_2\lambda + \dots + c_{n-1}\lambda^{n-2} + \lambda^{n-1}$ 是 Hurwitz 稳定多项式, 故滑模是渐近稳定的.

3 模糊神经网络滑模控制器的设计 (Design of fuzzy neural networks sliding mode controller)

在本文中, 我们采用的模糊神经网络结构是输入变量为 2, 输出变量为 1, 共四层的结构. 具体结构及算法见文[6]. 以 FNN 作为控制器的整个滑模控制系统的结构如图 1 所示.

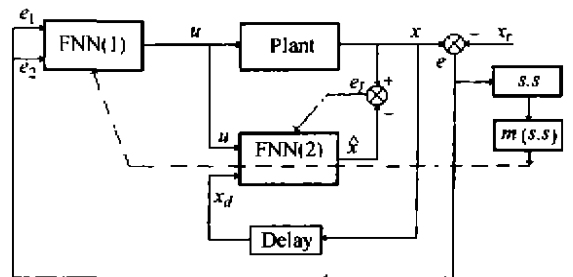


图 1 FNN 作为滑模控制器的系统框图

Fig. 1 Block diagram of the FNNSMC

图 1 中, FNN(1) 为控制器, 被控对象输出为 $x(t)$, 期望输出为 $x_r(t)$. 误差向量 e 由(5)给出. FNN(1) 有两个输入, 一个是 e_1 , 表示被控对象输出与期望输出之偏差; 另一个是 $e_2, e_2 = \dot{e}_1 = \dot{x} - \dot{x}_r$. FNN(1) 的输出记为 u . FNN(2) 用作辨识对象, 它有两个输入, 一个是被控对象的输入 u , 另一个是被控对象的输出 $x(t)$ 经过一个延迟环节后得到的输出,

即是 $x(t)$ 的一步延迟值, 记为 $x_d(t)$. 在控制过程中, FNN(2) 的输出 $\hat{x}(t)$ 与对象的输出 $x(t)$ 比较, 得到偏差 e_t , 用 e_t 反向传播来调节 FNN(2) 的参数, 使得 $e_t \rightarrow 0$. 辨识的具体过程和算法见文[6].

$m(s)$ 是符号修正函数, 用来根据 s 和 \dot{s} 乘积的符号, 判断滑模控制的基本条件是否满足. 当滑模条件未能满足时, 将 $m(s)$ 的输出通过 FNN(2) 反向传播至被控制对象的输入端 u , 得到对应于 $m(s)$ 的 u 的调节量 Δu , 然后再以 Δu 作为偏差来修正 FNN(1) 的各参数, 从而调节对象的输出以确保滑模控制的实现. 下面给出分析和算法步骤.

根据偏差向量 e , 由式(7)得到 s . 由 s 可以判断出 s 的符号. s 和 \dot{s} 作为输入进入符号修正函数 $m(s)$. $m(s)$ 通过下面的算法保证滑模变结构控制的基本条件的满足, 即 $s \cdot \dot{s} < 0$.

1) 若出现 $s \cdot \dot{s} \geq 0$, 令符号修正函数 $m(s) = -s - \delta \cdot \text{sfc}(\dot{s})$, 其中 δ 为大于 0 的任意小的数.

$$\text{sfc}(r) = \begin{cases} \text{sgn}(r), & r \neq 0. \\ \text{sgn}(s), & r = 0. \end{cases}$$

下面分两种情况讨论:

a) 若 $s \cdot \dot{s} > 0$, 此时 $m(s) = -s - \delta \text{sgn}(\dot{s})$, 将 $m(s)$ 通过 FNN(2) 反向传播来调整 FNN(1) 的参数, 从而改变被控制对象的输入, 减小对象输出与期望输出的偏差, 得到新的 s 和 \dot{s} . 然后再根据得到的新的符号修正函数 $m(s)$, 重复上述过程, 直至滑模条件的满足.

b) 若 $s \cdot \dot{s} = 0$, 此时有两种可能: 如果 $s = 0$, 那么控制达到要求; 如果 $\dot{s} = 0$, $m(s) = -s - \delta \cdot \text{sgn}(s)$, 有 $|m(s)| = |-s - \delta \text{sgn}(s)| \leq |s| + \delta$. 重复 a) 中介绍的调整过程, 则 $\exists \varphi > \delta > 0$, 使得 $|m(s)| < \varphi$ 成立, 即 $|s| + \delta < \varphi$, $|s| < \varphi$ 成立, 其中 φ 表示滑模边界层的厚度, 因为 δ 为任意小的数, 所以 φ 可以取很小的值.

2) 若 $s \dot{s} < 0$, 则滑模基本条件得到满足, 此时令 $m(s) = -\delta \cdot \text{sgn}(s)$, 这样在经过反向传播调整参数后, 使得 $|s| < \varphi$ 成立, 即 s 收敛到边界层内.

从上面的分析可以看出, 这是一个动态调整过程. 系统在上面几种情况下不断调节, 最终满足 $|s| < \varphi$, 即跟踪误差收敛到零的一个领域内.

下面给出 $m(s)$ 通过 FNN(2) 的反向传播训练 FNN(1) 参数的算法. 这个算法分为两步: I) $m(s)$ 通过 FNN(2) 反向传播得到被控对象输入 u 的改变量 Δu ; II) 由 Δu 来调节 FNN(1) 中的参数.

I) 定义二次性能指标函数 $E_1 = \frac{1}{2} m(s)^2$. 则要使 E_1 最小, 被控对象的输入的改变量应为

$$u(t+1) = u(t) - \alpha \frac{\partial E_1}{\partial u} + \beta \Delta u(t). \quad (17)$$

式(17)可写为

$$\begin{aligned} \Delta \bar{u}(t+1) &= u(t+1) - u(t) = \\ &= -\alpha \cdot \frac{\partial E_1}{\partial u} + \beta \cdot \Delta u. \end{aligned} \quad (18)$$

而

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_1}{\partial u} &= \frac{\partial (\frac{1}{2} m(s)^2)}{\partial u} = \\ &= m(s) \frac{\partial m(s)}{\partial u} = -m(s) \frac{\partial s}{\partial u}. \end{aligned} \quad (19)$$

由反向传播算法,

$$\frac{\partial E_1}{\partial u} = \frac{\partial E_1}{\partial x} \cdot \sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^7 \left\{ \frac{\partial \hat{x}}{\partial O_{ij}^{(3)}} \cdot \frac{\partial O_{ij}^{(3)}}{\partial O_{li}^{(2)}} \cdot \frac{\partial O_{li}^{(2)}}{\partial u} \right\}. \quad (20)$$

其中,

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_1}{\partial x} &= -m(s) \frac{\partial s}{\partial x} = \\ &= -m(s) \frac{\partial |c_1 e_1 + \sum_{l=2}^{n-1} c_l e_l + e_n|}{\partial x} = \\ &= -m(s) \frac{\partial |c_1(x - x_r)|}{\partial x} = -c_1 \cdot m(s), \quad (21) \\ \frac{\partial \hat{x}}{\partial O_{ij}^{(3)}} &= \frac{w_y \cdot \sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^7 O_{ij}^{(3)} - \sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^7 (O_{ij}^{(3)} w_y)}{(\sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^7 O_{ij}^{(3)})^2}, \quad (22) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial O_{ij}^{(3)}}{\partial O_{li}^{(2)}} = O_{2j}^{(2)}, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial O_{li}^{(2)}}{\partial u} &= \frac{\partial f}{\partial u} = \\ &= e^{-(u-a_i)^2/b_i^2} \cdot \left[-\frac{2 \cdot (u-a_i)}{b_i^2} \right] = \\ &= O_{li}^{(2)} \cdot \left[-\frac{2 \cdot (u-a_i)}{b_i^2} \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

将式(21)~(24)代入式(20)得到

$$\begin{aligned} \Delta \bar{u}(t+1) &= \\ &= \alpha \cdot c_1 \cdot m(s) \cdot \\ &= \sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^7 \left\{ \frac{w_y \cdot \sum_{i=1}^7 \sum_{r=1}^7 O_{ij}^{(3)} - \sum_{i=1}^7 \sum_{r=1}^7 (O_{ij}^{(3)} w_y)}{(\sum_{i=1}^7 \sum_{r=1}^7 O_{ij}^{(3)})^2} \right\}. \end{aligned}$$

$$O_y^{(3)} \cdot 2 \cdot (u - a_r) / b_i^2 + \beta \cdot \Delta \bar{u}(t). \quad (25)$$

II) 由I)得到的 $\Delta \bar{u}$ 表示了对应于 $m(s)$ 的在被控对象输入端 u 的调整量. 因此可将 $\Delta \bar{u}$ 作为FNN(1)的输出偏差来调节FNN(1)的各参数^[6].

这样经过I), II)两步就完成了整个系统的调整. 重复上述过程, 通过不断调整, 达到系统的滑模条件成立. 且能使跟踪误差收敛到零的一个领域内.

4 控制系统的稳定性分析 (Stability analysis of the system)

定理 1 对非线性系统(1), 采用文中提出的控制方案, 则对于任意的初始条件, 跟踪给定的有界轨迹 X_r 时, 跟踪误差收敛到零的一个领域内.

证 令

$$s_1 = s - \varphi \cdot \text{sat}(s/\varphi), \quad (26)$$

其中, $\varphi > 0$ 表示边界层的厚度.

$$\text{sat}(r) = \begin{cases} r, & |r| \leq 1, \\ \text{sgn}(r), & |r| > 1. \end{cases}$$

定义 Lyapunov 准函数

$$V(t) = \frac{1}{2} s_1^2. \quad (27)$$

则

$$\dot{V} = s_1 \cdot \dot{s}_1.$$

当 $|s| \leq \varphi$ 时, $s_1 = 0$. 此时 $V = 0, \dot{V} = 0$.

当 $|s| > \varphi$ 时, $s_1 = s - \varphi \text{sgn}(s/\varphi)$, 则 $\dot{s}_1 = \dot{s}$ 且 s_1 与 s 同号. 由本文介绍的算法可知, $s\dot{s} < 0$, 因为

$$\dot{V} = s_1 \dot{s}_1 < 0. \quad (28)$$

因为对一切 $t \geq 0, \dot{V} \leq 0$ 总成立, 所以 V 是单调不增

函数, 因为 $V \geq 0$, 所以 $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t)$ 存在, 即 $V(\infty)$ 存在. 由式(27)知 s_1 有界, 从而 s 有界, 进而得到 $e_i (i = 1, \dots, n)$ 有界. 由式(10)知 \dot{s}_1 有界. 因为闭区间上的连续函数为一致连续函数, 所以在有界闭区间上 s_1 和 \dot{s}_1 均一致连续, 又由于它们都有界, 因此 $\dot{V} = s_1(t)\dot{s}_1(t)$ 是一致连续的. 因为 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \dot{V} dt = V(\infty) - V(0)$, 而 $V(t)$ 有界, 所以 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \dot{V} dt$ 存在. 根据 Barbalat 引理得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V} = 0$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} s_1 \dot{s}_1 = 0$, 从而可以得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} s_1 = 0$. 因为若 $\lim_{t \rightarrow \infty} s_1 = 0$, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{s} = 0$. 由算法知当 $t \rightarrow \infty$ 时, $|s| < \varphi$, 所以 $\lim_{t \rightarrow \infty} s_1(t) = 0$, 因此 s 渐近收敛到边界层 $|s| \leq \varphi$ 内. 这样由 s 的定义不难推出跟踪误差收敛到零的一个邻域内.

5 仿真 (Simulation)

考虑如下非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -(1 + 0.5)x_1^2 - (1.5 + 0.2)x_2 + (\cos x_1)u + d(X, t). \end{cases}$$

假设 $d(X, t) = x_1 + 1, \hat{f}(X) = -x_1^2 - 1.5x_2, \Delta f(X) = -0.5x_1^2 - 0.2x_2, F(X) = 0.5x_1^2 + 0.2|x_2|, D(X) = |x_1| + 2$. 仿真中我们取 $\delta = 0.001, \varphi = 0.01, \alpha = 0.2, \beta = 0.25, x_1(0) = 0, x_2(0) = -0.35$. 采样周期 $t = 0.02$ 秒. 仿真图的横坐标表示时间(秒), 纵坐标表示幅度大小. 跟踪信号取阶跃信号 $x_r = 1(t)$, 仿真结果见图 2.

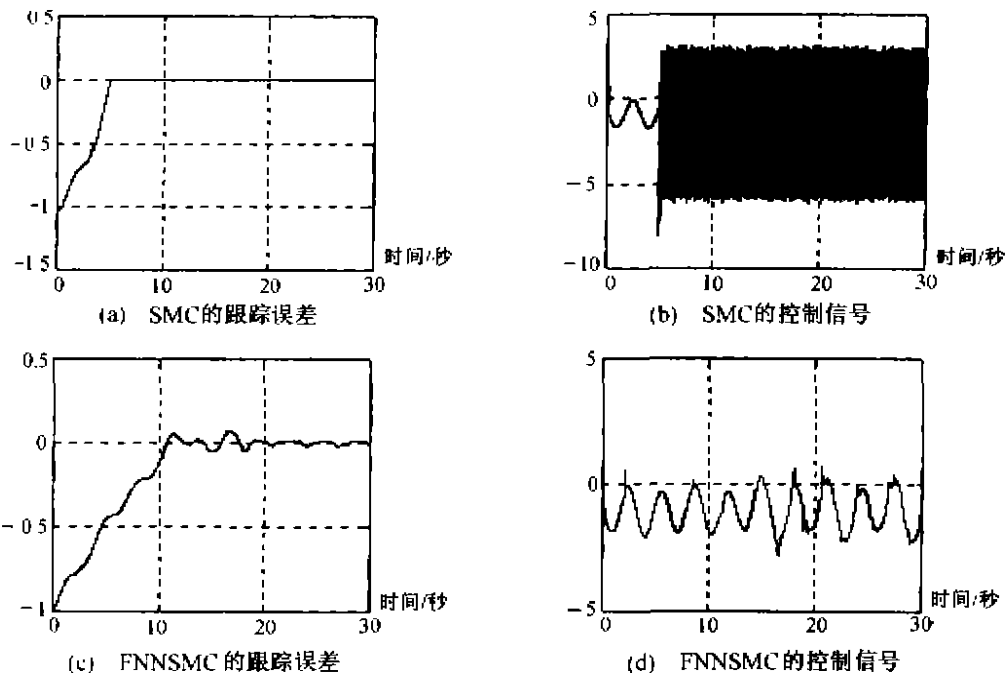


图 2 SMC与FNNSMC仿真结果比较

Fig. 2 Comparison of the SMC and the FNNSMC

6 结束语(Conclusion)

本文根据滑模控制原理,提出了一种新的基于 FNN 的滑模控制方法.从仿真结果可以看出,采用本文提出的 FNN 控制不仅能抑制高频颤动,对模型的不确定性和外部扰动亦具有较强的鲁棒性,而且跟踪精度也是令人满意的.尤其要指出的是,本文的方法比一般的变结构控制鲁棒性强,而且在设计中不需要知道系统中不确定性和扰动的上界.但是从仿真中也可以看到模糊神经网络滑模控制器的上升时间大于常规滑模控制器,且其跟踪误差稍大.因此如何减少上升时间,进一步消除静差将是我们的下一步的工作.

参考文献(References)

[1] 冯纯伯.非线性控制系统分析与设计[M].南京:东南大学出版社

社,1990

[2] 高为炳.变结构控制理论基础[M].北京:中国科学技术出版社,1990

[3] Slotine J J E. Sliding controller design for nonlinear systems[J]. Int. J. Control, 1984, 40(2):421-434

[4] 金耀初,蒋静坪.一类非线性系统的模糊变结构控制及应用.控制与决策,1992,7(1):36-40

[5] Hwang G C, Chang S. A stability approach to fuzzy control design for nonlinear system [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 48:279-287

[6] 达飞鹏,徐嗣鑫.基于模糊神经网络的系统辨识[J].控制与决策,1997,12(4):377-380

本文作者简介

达飞鹏 1968年生.1998年5月毕业于东南大学自动化研究所并获博士学位.现从事企业博士后工作.研究方向为模糊控制,神经网络及快速制造系统.

宋文忠 1936年生.1960年毕业于南京工学院.现任东南大学自动化研究所教授,博士生导师.从事生产过程自动化及计算机集成制造系统的研究

(上接第 127 页)

$$\min\left(\sum_{i=1}^N \alpha_i + \sum_{i=1}^N \beta_i\right) \quad (13)$$

s. t. 式(8)或(9), (11), (12)

这是一个具有线性矩阵不等式约束的凸优化问题,因此,可以应用 MATLAB 软件中有关 LMI 中的 mincx 命令求解之.利用这个问题的解可以构造一个具有较小反馈增益参数的分散稳定化控制律.

以上的优化问题提供了一个分散稳定化控制律的系统化设计方法.

参考文献(References)

[1] Jamshidi M. Large-Scale Systems, Modeling and Control [M]. New York: Elsevier Science Publishing Co., Inc, 1983

[2] Lee T N and Radovic U L. General decentralized stabilization of large-scale linear continuous and discrete time-delay systems [J]. Int. J. Control, 1987, 46(6):2127-2140

[3] Lee T N and Radovic U L. Decentralized stabilization of linear continu-

ous and discrete-time systems with delay in interconnections [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1988, 33(8):757-761

[4] Wang W J, Wang R J and Chen C S. Stabilization, estimation and robustness for discrete large scale systems with delays [J]. Control-Theory and Advanced Technology, 1995, 10(4):1717-1736

[5] Wang W J and Mau L G. Stabilization and estimation for perturbed discrete time-delay large-scale systems [J]. IEEE Trans Automatic Control, 1997, 42(9):1277-1282

[6] Yu L, Holmberg U and Bonvin D. Decentralized robust stabilization of a class of interconnected uncertain delay systems [J]. Control-Theory and Advanced Technology, 1995, 10(4):1475-1483

[7] 俞立,陈国定.一类关联时滞系统的分散稳定化控制器设计[J].控制与决策,1997,12(5):559-564

本文作者简介

俞立 1961年生.1982年获南开大学控制理论专业学士学位,后在浙江大学工业自动化专业获硕士和博士学位,1993年至1995年获瑞士联邦政府奖学金留学瑞士联邦洛桑理工学院.现为浙江大学信息工程学院教授.主要研究领域包括不确定系统的鲁棒控制, H_∞ 控制,大系统的分散控制和时滞系统的控制等.发表论文 70 余篇.