

一种自适应模糊控制器

郑怀林 叶 桦 陈维南

(东南大学自动化所·南京 210096)

摘要: 对文 [1] 提出的模糊自适应控制算法提出改进方案. 根据改进方案, 控制算法可以去掉监督项, 同时可加入一辅助控制项以提高动态特性. 经证明, 算法仍然满足全局稳定. 为保证闭环渐近稳定性条件, 文中提出一种模糊控制器结构自组织学习方法. 仿真结果显示, 与文 [1] 算法相比, 本文算法更能保证闭环渐近稳定性, 具有更好的动态性能.

关键词: 模糊控制器; 自适应; 自组织; 稳定性

文献标识码: A

A Kind of Adaptive Fuzzy Controller

ZHENG Huailin, YE Hua and CHEN Weinan

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

Abstract: An improved algorithm is put forward based on the fuzzy adaptive algorithm presented in paper [1]. According to the improved algorithm, without breaking global stability, the supervising part u_s can be deleted, while a differential part u_a can be added to improve the transient response. A type of structure self-organizing algorithm is presented to guarantee close-loop asymptotical stability. Simulation results show that, compared with the algorithm in paper [1], the algorithm in this paper is easier to satisfy the stability condition and has better transient response.

Key words: fuzzy controller; adaptive; self-organizing; stability

1 引言(Introduction)

近年来, 模糊控制在向自适应方向发展方面取得了一定的进展^[1~4]. 其中 Wang 在文 [1] 中提出的模糊自适应控制方案, 以其清晰的设计思路及对在线自适应稳定性分析方面完善的理论体系而备受注目. 但是, 该控制方案仍存在一些问题, 文 [2] 提出去掉监督项 u_s 后, 系统在 $\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha(t) = 0$ 条件下, 可保持闭环渐近稳定性. 可是文 [1, 2] 的自适应方案, 由于不一定存在 θ^* 使 $\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha(t) = 0$, 难以真正保证闭环渐近稳定. 另外, 文 [1] 的自适应方案在模糊控制量 u_c 逼近最优控制律 u^* 之前, 系统动态响应效果不够理想.

为此, 本文提出一种模糊控制器结构自组织学习方法, 对控制器在结构上进行在线自组织修正, 可对规则作增、删处理. 在控制量中加入辅助控制项 u_a , 在 u_c 逼近 u^* 之前改善系统动态特性. 去除 u_s 项, 并在 $\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha(t) = 0$ 的条件下证明了系统的闭环渐近稳定性.

2 问题描述(Problem description)

考虑如下系统

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + bu, \\ y = x, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $f(\cdot)$ 为一未知连续函数, b 为未知正常数, $f(\cdot)$ 和 b 上下界已知, $u \in \mathbb{R}$ 和 $y \in \mathbb{R}$ 分别是系统的输入和输出. 假设状态 $X = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T$ 可量测. 控制任务是要 $y(t)$ 跟踪一有界参考信号 $y_m(t)$, 即要求设计一模糊控制器, 使得闭环系统全局稳定并使跟踪误差 $e = y_m - y$ 在 $t \rightarrow \infty$ 时收敛到零.

如果 $f(x)$ 和 b 已知, 取理想控制律

$$u^* = \frac{1}{b}(-f(X) + \dot{y}_m^{(n)} + k^T e), \quad (2)$$

其中 $e = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T$, 且 $k = (k_n, k_{n-1}, \dots, k_1)^T$ 使 $s^n + k_1 s^{n-1} + \dots + k_n = 0$ 的所有根都位于左半开平面上. 把 (2) 式代入 (1) 式得

$$e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e = 0, \quad (3)$$

上式意味着 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$. 可是由于 f 与 b 未知, 理想

控制律 u^* 难以实现. 为达到控制目标, 文[1]提出控制律由模糊控制项 $u_c(X|\theta)$ 和监督控制项 $u_s(X)$ 构成

$$u = u_c(X|\theta) + u_s(X), \quad (4)$$

且有

$$u_c(X|\theta) = \theta^T \xi(X), \quad (5)$$

其中 $\theta = (\theta_1 \dots \theta_M)^T$ 可看作规则输出, $\xi(X) = (\xi_1(X) \dots \xi_M(X))^T$ 是自回归向量, 可看作规则激活强度向量, M 表示规则数量.

以上文[1]所提自适应控制方案存在一些问题:

1) 在 u_c 逼近 u^* 之前, 系统动态响应效果不够理想;

2) 为保证 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$, 要求最优控制误差 $\omega \equiv u_c(X|\theta^*) - u^*$ 平方可积, 这一条件很难验证 ($\theta^* \equiv \arg \min_{|\theta| \leq M_\theta} \sup_X |u_c(X|\theta) - u^*|$ 为最优参数矢量, M_θ 表示设定 θ 上界);

3) 监督控制量 u_s 取值很大, 给实用带来困难.

针对问题 1) 本文提出在控制量中加入一辅助控制项 u_a , 在 u_c 逼近 u^* 之前, 起辅助控制作用, 其取值如下

$$u_a = \text{sgn}(e^T P_n S b) k_a S, \quad (6)$$

其中

$$S = e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e,$$

k_a 为一正常数. 可以看出, 系统为一阶时 S 相当于 PD 控制量. 当系统阶数高于一阶时, 为对系统进行精确控制, 控制量中需要高阶的系统状态信息, 因此 S 中含有误差高阶导数的做法是合理的. 当 u_c 实现逼近 u^* 之后, 由 (2) (3) 两式可知 $u_a = 0$, 可由 u_c 单独实现良好的控制效果. 对于问题 2) 3), 本文决定将 $\omega(t)$ 平方可积条件简化为 $\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = 0$, 同时决定去除监督控制量 u_s . 下面将证明 (4) 式控制律变为

$$u = u_c(X|\theta) + u_a(X) \quad (7)$$

后, 在 $\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = 0$ 的条件下, 仍可保证系统的稳定性.

3 稳定性分析 (Stability analysis)

取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{b}{2\gamma} \varphi^T \varphi, \quad \gamma > 0, \quad (8)$$

式中 $\varphi = \theta^* - \theta$ 为参数误差矢量, P 为满足下列 Lyapunov 方程的对称正定矩阵

$$\Lambda_c^T P + P \Lambda_c = -Q, \quad Q > 0, \quad (9)$$

式中

$$\Lambda_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & \dots & \dots & -k_1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

可得

$$\dot{V} = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2} e^T P \dot{e} + \frac{b}{\gamma} \varphi^T \dot{\varphi}, \quad (11)$$

把 (7) 式代入 (1) 式, 可推得新的闭环误差方程

$$\dot{e} = \Lambda_c e + b_c (u^* - u_c(X|\theta) - u_a(X)), \quad (12)$$

式中 $b_c = (0 \ 0 \ \dots \ 0 \ b)^T$, 将上式代入 (11) 式, 有

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b_c (u^* - u_c(X|\theta) - \\ & u_a(X)) + \frac{b}{\gamma} \varphi^T \dot{\varphi} = \\ & -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b_c (u^* - u_c(X|\theta^*) + \\ & u_c(X|\theta^*) - u_c(X|\theta) - u_a(X)) + \frac{b}{\gamma} \varphi^T \dot{\varphi}. \end{aligned} \quad (13)$$

将最优控制误差 ω 代入上式得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{2} e^T Q e - e^T P b_c \omega + e^T P b_c \varphi^T \xi(X) - \\ & e^T P b_c u_a(X) + \frac{b}{\gamma} \varphi^T \dot{\varphi} = \\ & -\frac{1}{2} e^T Q e - e^T P b_c \omega + \frac{b}{\gamma} \varphi^T \dot{\varphi} + \\ & \gamma e^T P_n \xi(X) - e^T P b_c u_a(X). \end{aligned} \quad (14)$$

取向量 θ 的自适应律如下:

$$\dot{\theta} = \begin{cases} \gamma e^T P_n \xi(x), & |\theta| < M_\theta \text{ or} \\ & |\theta| < M_\theta \text{ and } e^T P_n \theta^T \xi(X) \leq 0; \\ \gamma e^T P_n \xi(X) - \gamma e^T P_n \frac{\theta \theta^T \xi(X)}{|\theta|^2}, & |\theta| = M_\theta \text{ and } e^T P_n \theta^T \xi(X) > 0. \end{cases} \quad (15)$$

式中 P_n 为 P 最后一列.

代入 (14) 式并由 $\dot{\varphi} = -\dot{\theta}$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{2} e^T Q e - e^T P b_c \omega - e^T P b_c u_a(X) + \\ & I \frac{b}{\gamma} \varphi^T \gamma e^T P_n \frac{\theta \theta^T \xi(X)}{|\theta|^2}, \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $I = 0$ 或 1 , 以下证上式最后一项非正.

$I = 0$ 显然成立.

$I = 1$, 由(10)式知

$$e^T P_n \theta^T \xi(X) > 0,$$

$$\varphi^T \theta = (\theta^* - \theta)^T \theta =$$

$$\frac{1}{2}(|\theta^*|^2 - |\theta|^2 - |\theta - \theta^*|^2) \leq 0.$$

$$(|\theta| = M_\theta \geq |\theta^*|)$$

所以最后一项非正, 可得

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e - e^T P b_c \omega - e^T P b_c u_a(X), \quad (17)$$

把(6)式代入, 并由 $e^T P b_c = e^T P_n b$ 得

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e - e^T P b_c \omega, \quad (18)$$

若 $\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = 0$ 则 $\forall \varepsilon > 0, \exists t_0$, 当 $t > t_0$ 时满足

$$|\omega(t)| < \left(\frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} \varepsilon^2\right) (\max |e^T P b_c|), \quad (19)$$

若 $|\omega(t)| \geq \varepsilon$, 则将上式代入(18)式得

$$\begin{aligned} \dot{V} &< -\frac{1}{2} e^T Q e + \frac{1}{2} |e^T P b_c| \frac{\lambda_{Q_{\min}} \varepsilon^2}{\max |e^T P b_c|} \leq \\ &-\frac{1}{2} e^T Q e + \frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} \varepsilon^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

会使 $\omega(t)$ 衰减. 因此, $\exists t_1 > 0, \forall t > t_1$, 将有 $|\omega(t)| \leq \varepsilon$, 由于 ε 的任意性 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega(t)| = 0$.

4 结构自适应方案(Structure adaption algorithm)

从以上分析可以看出, $\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega(t)| = 0$ 的关键是 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega(t)| = 0$. 由 $\omega(t)$ 的定义可以知道, 要实现 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega(t)| = 0$, 需存在一 θ^* 满足 u_c 对 u^* 的充分逼近. 但是, 当自回归向量 $\xi(X)$ 固定时, 由于 $\xi(X)$ 初值选取不当或系统本身动态发生大的变化, 将造成现有控制器结构下无 θ^* 满足 u_c 对 u^* 的充分逼近. 从而难以满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega(t)| = 0$. 为此, 本文提出一种控制器结构自组织学习方法对模糊控制器结构进行自适应调节, 实现模糊规则的在线增删及对增加规则的相应隶属度函数的确立. 这里由两个概念的定义引出模糊控制器结构自适应方案.

定义 1 自适应周期 τ 是指在现有规则间隔范围内, 对规则输出进行调节的时间范围.

由于系统可能存在严重非线性, 经过一段时间 τ 对规则输出部分的自适应调节后, 如控制精度仍达不到要求, 说明现有规则数量难以满足控制精度要求, 需要增加规则. 基于自适应周期 τ 定义上的规则调整方案如下:

1) 如果 $\max \|X(t) - C_i\| > \delta$, 那么产生一个新规则

$$C_{M+1} = X(t), \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \theta_{M+1} = \max \{ &-M_\theta, \min \{ M_\theta, \theta_I + \\ &\frac{\|C_{M+1} - C_I\|}{\|C_{M+1} - C_I\| + \|C_{M+1} - C_J\|} (\theta_J - \theta_I) \} \} \end{aligned} \quad (22)$$

其中 C_i 表示规则中心值, δ 是一与规则间隔有关的正常数, I, J 表示距离 $X(t)$ 最近的两个规则序号, $\|\cdot\|$ 表示 Euclidean 距离.

2) 如果 $\max \|X(t) - C_i\| \leq \delta$, 那么在 τ 时间内进行自适应学习, 如 τ 之后仍不能达到控制精度, 则 $\delta = \frac{1}{2} \delta$, 原有规则不变, 并按(1)增加新的规则.

定义 2 删除周期 T , 指对始终未被激活的某一规则, 即 $\mu_i(t) \leq \varepsilon_0 (0 < t < T)$, 予以删除的时间范围. ε_0 为一较小正数.

采用删除周期的目的在于使模型规则集向当前时域范围内的模型动态过度, 实现模型结构的优化. T 越小, 相应的规则数越少, 在线学习速度越快, 但可适用的动态范围越窄; T 越大, 相应的规则数越多, 可适用于大的动态范围, 但相应在线规则判断时间越长, 不利于在线学习. 因此, T 的大小选取应权衡考虑. 为防止系统动态在某一状态停留时间过长, 造成过多规则被删除, 需增设一规则数下限.

需要指出的是, 由于规则数是随着时间而变化的, 相应自回归矢量的维数也是变化的. 一旦一个规则被增加或删除, θ 可重新被看作一初始参数矢量, 然后保持自回归矢量不变, 应用自适应律调节 θ . 尽管 θ 被看作一初始参数矢量, 事实上它的元素是处于更好的情况下. 因为其中的一些元素已被训练, 同时新的元素是通过插值算法产生的, 而不是一随机量. 因此规则数的变化并不影响系统渐近稳定性.

5 仿真(Simulation)

考虑如下非线性系统

$$\dot{x} = \frac{1 - \frac{2}{3} e^{-x(t)}}{1 + \frac{2}{3} e^{-x(t)}} + u(t), \quad (23)$$

被控对象为一阶, 辅助控制量相当于 PD 控制, 控制目标为使状态 x 回到原点. 取 $\gamma = 1, M_\theta = 2, M = 6$. 定义 6 个模糊集合 {NL, NM, NS, PS, PM, PL}, 分两种情况进行仿真实验.

第一种情况下取相应隶属函数为

$$\mu_{NL} = 1 / (1 + \exp(\xi(x + 2))),$$

$$\begin{aligned}\mu_{NM} &= \exp(-(x + 1.5)^2), \\ \mu_{NS} &= \exp(-(x + 0.5)^2), \\ \mu_{PS} &= \exp(-(x - 0.5)^2), \\ \mu_{PM} &= \exp(-(x - 1.5)^2), \\ \mu_{PL} &= 1/(1 + \exp(-5(x - 2))).\end{aligned}$$

据对 $f(\cdot)$ 和 b 上下界的先验知识 取 θ 初值为 $(1.5, 1, 0.5, -0.5, -1, -1.5)^T$. 图 1 为采用本文方案的仿真情况 取参数 $k_a = 1.2, \tau = 5s, T = 10s$, 最低规则数设为 6. 由于初始隶属度函数选取合适, 无新的规则产生 最后规则数仍为 6. 图 2 为采用文[1]方案仿真结果. 可以看出在相同模糊前提参数的情况下 本文方案通过加入辅助控制项 动态响应无论是超调量 还是调节时间都比文[1]效果好.

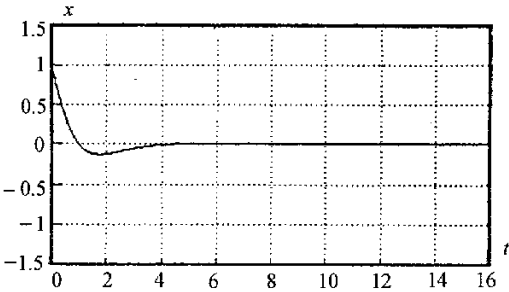


图 1 本文算法在第一种条件下的仿真结果
Fig.1 simulation result with the algorithm in this paper under the first condition

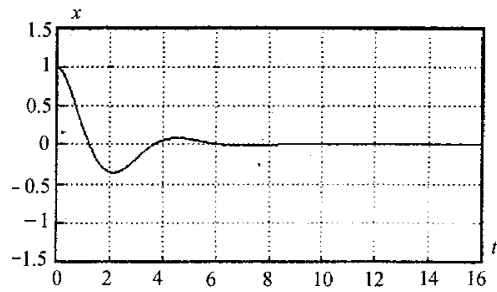


图 2 文[1]算法在第一种条件下的仿真结果
Fig.2 Simulation result with the algorithm in paper[1] under the first condition

第二种情况下取隶属度函数为

$$\begin{aligned}\mu_{NL} &= 1/(1 + \exp(5(x + 10))), \\ \mu_{NM} &= \exp(-(x + 9.9)^2), \\ \mu_{NS} &= \exp(-(x + 0.1)^2), \\ \mu_{PS} &= \exp(-(x - 0.1)^2), \\ \mu_{PM} &= \exp(-(x - 9.9)^2), \\ \mu_{PL} &= 1/(1 + \exp(-5(x - 10))).\end{aligned}$$

图 3 为采用文[1]方案仿真结果, 由于无结构自组织功能, 不适当的隶属度函数选取导致无 θ^* 满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha(t) = 0$, 从而闭环系统不稳定. 图 4 为采用

结构自组织方案, 但未加入 u_a 的仿真情况, 可以发现采用结构自组织方案后虽然能保证系统的闭环误差收敛性, 但动态响应效果不够理想. 图 5 为同时加入结构自组织方案和 u_a 的仿真情况, 显然其控制效果优于图 4. 图 4 及图 5 的仿真参数选取同图 1.

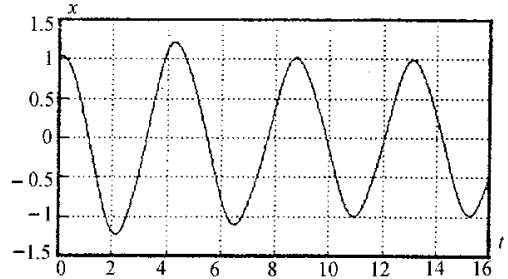


图 3 文[1]算法在第二种条件下的仿真结果
Fig.3 Simulation result with the algorithm in paper[1] under the second condition

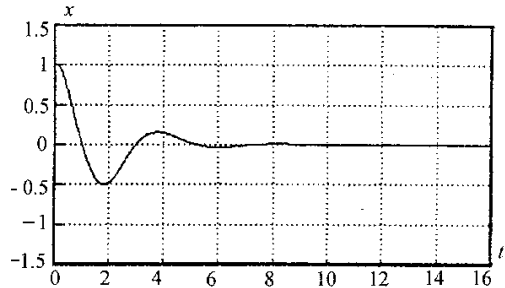


图 4 本文算法在第二种条件下无 u_a 的仿真结果
Fig.4 Simulation result using the algorithm in this paper without u_a under the second condition

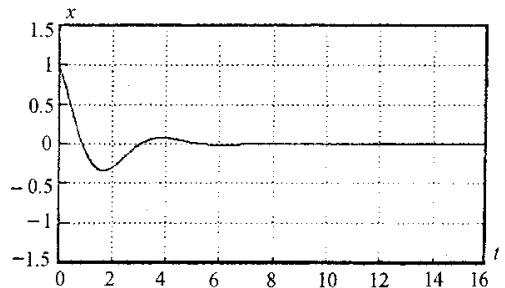


图 5 本文算法在第二种条件下有 u_a 的仿真结果
Fig.5 Simulation result using the algorithm in this paper with u_a under the second condition

6 结论(Conclusion)

本文通过对文[1]所提模糊自适应控制方案在控制量及控制器结构方面所作的改进, 有效地提高了系统的动态性能, 进一步保证了系统闭环渐近稳定条件, 提高了控制方案的实用性. 仿真实验证明本文方案总体控制效果优于文[1].

参考文献(References)

- [1] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear system[J].

(下转第 541 页)

(上接第 536 页)

IEEE Trans. Fuzzy Systems , 1993 , 1(2) : 146 - 155

- [2] 金晖 , 张乃尧 , 汤跃忠 . 对稳定的模糊自适应控制方法的研究 [A] . 1995 年中国智能自动化学术会议论文集 [C] , 天津 , 1995
- [3] Nie J and Linkens D. Fast self-learning multivariable fuzzy controllers constructed from a modified CPN network [J] . Int. J. Control , 1994 , 60(2) : 369 - 393
- [4] Kim S W and Kim E T. A new adaptive fuzzy controller using the parallel structure of fuzzy controller and its application [J] . Fuzzy Sets and Systems , 1996 , 81(3) : 205 - 226

本文作者简介

郑怀林 1970 年生 . 1998 年于东南大学自动化所获得控制理论与控制工程专业博士学位 . 现工作于深圳市中兴通讯股份有限公司南京研究所 . 研究方向为模糊控制 , 神经网络理论及其在工业过程控制中的应用 .

叶 桦 1961 年生 . 1989 年于东南大学自动化所获控制理论与应用专业博士学位 , 现为东南大学自动化所教授 . 研究方向为模式识别与智能系统 .

陈维南 1937 年生 . 现为东南大学自动化所教授 , 博士生导师 , 江苏省自动化学会理事长 . 研究方向为智能控制 , 模式识别及计算机图象处理 .