

非仿射非线性系统的自主构架模糊控制器

张涛^{1,2}, 保宏¹, 杜敬利¹, 谢朝杰¹

(1. 西安电子科技大学 电子装备结构教育部重点实验室, 西安 710071;
2. 中国船舶重工集团公司第七〇五研究所, 西安 710075)

摘要: 针对 SISO 非仿射非线性系统, 提出一种新型自主构架模糊控制器. 此控制器由鲁棒控制器与自主构架模糊系统构成. 模糊系统初始只含有一条规则, 根据系统误差和 ε 完备性 2 条准则自主增加规则及隶属函数, 从而完善模糊系统结构, 逼近非线性系统不确定量. 模糊系统利用“伪模糊输出”法对新增规则后件初始化, 考虑到实际计算能力, 采用替换隶属函数机制限制规则数目. 通过理论推导证明了系统的稳定性, 理论和半实物仿真实验验证了所提出方法的有效性.

关键词: 自主构架模糊系统; 非仿射非线性系统; 鲁棒控制器; 半实物

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Self-structuring fuzzy controller for nonaffine nonlinear system

ZHANG Tao^{1,2}, BAO Hong¹, DU Jing-li¹, XIE Chao-jie¹

(1. Ministry of Education Key Lab of Electronic Equipment Structure, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. No.705 Research Institute CSIC, Xi'an 710075, China. Correspondent: ZHANG Tao, E-mail: zht368@yeah.net)

Abstract: A self-structuring fuzzy controller(SFC) is proposed for the non-affine nonlinear SISO system. The controller consists of a robust controller and a self-structuring fuzzy system(SFS). The fuzzy system employed to approximate nonlinear system uncertainty has one rule initially. Two criteria are used for generating rules and membership functions, system error and ε -completeness. The new rules are initialized by using the “pseudo fuzzy output” method. And considering the practical computing ability, an algorithm is proposed to replace the membership function, so that the number of rules never exceeds a predefined upper bound. The closed-loop stability is guaranteed. Theoretical simulation results and semi-physical simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

Key words: self-structuring fuzzy system; nonaffine nonlinear system; robust controller; semi-physical

0 引言

目前, 针对非线性系统控制器的研究^[1-9]主要集中在仿射非线性系统^[3-5], 然而对于更为普遍的非仿射非线性系统的研究^[6-9]相对较少. 模糊控制是解决非线性问题的有效工具^[3-9], 但多数模糊系统的结构都是固定的. 当被控对象的工作环境以及其自身产生大范围变化或对象未知时, 固定式模糊控制器便难以适应.

自主构架模糊控制器^[5,7-9]的特点为: 模糊系统可根据某机制自主增加分布可调整的隶属函数和相应规则, 从而在线完善自身结构. 如 Park 等^[7]提出了一种自主构架模糊系统, 该系统采用固定宽度的三角隶属函数, 其隶属函数和规则基于输入空间的扩展而增

加, 该方法存在着规则分布不合理和规则可无限制地增长等问题. Phan 等^[5]针对仿射非线性系统提出了一种直接型自主构架模糊控制器, 不仅解决了上述 2 个问题, 还克服了 Gao 和 Er^[8]在线计算过于复杂、误差衰减率与规则数目之间的明确关系无法确定等缺陷. 然而, 该方法仅仅针对无外部干扰的仿射非线性系统, 而且在对新增规则后件初始化时, 可能会引起振荡. Chen^[9]提出了自主构架模糊输出反馈控制器, 以自主构架模糊系统来逼近非仿射非线性系统不确定量. 该模糊系统采用“伪模糊输出”方法初始化规则后件, 用以解决上述提出的后件初始化问题. 但该方法仅仅删除了冗余规则, 并没有对冗余隶属度进行处理.

本文针对非仿射非线性系统, 提出一种自主构架

收稿日期: 2013-01-15; 修回日期: 2013-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50775170, 51105290, 51035006, 50805111, 51175398).

作者简介: 张涛(1987—), 男, 硕士, 从事模糊控制、半实物仿真的研究; 保宏(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 从事控制与结构协同设计等研究.

模糊控制器, 该控制器采用自主构架模糊系统逼近非线性系统的不确定量, 并与鲁棒控制器相结合. 该控制器具有计算量小, 规则分布合理, 不产生过多规则和冗余隶属度, 对新增模糊规则后件初始化不产生振荡等优点.

1 问题引入

考虑如下 SISO 非仿射非线性系统:

$$x^{(n)} = f(\mathbf{x}, u) + d. \quad (1)$$

其中: 系统输出 $y = x$, $\mathbf{x} = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T \in R^n$ 为系统完全可测的状态变量, $f(\mathbf{x}, u)$ 为未知的光滑非线性函数, u 为控制输入, d 为有界外扰, x_c 为期望信号.

假设 1 $f(\mathbf{x}, u)$ 对于所有的 $(\mathbf{x}, u) \in \Omega \times R$, 都有

$$\frac{\partial(f(\mathbf{x}, u))}{\partial u} > 0,$$

其中 Ω 为系统的可控域.

对式(1)进行反馈线性化, 即

$$x^{(n)} = zu + \Delta(\mathbf{x}, u) + d. \quad (2)$$

其中: z 为设计常量, $\Delta(\mathbf{x}, u) = f(\mathbf{x}, u) - zu$ 为系统不确定量.

如果系统不确定量和外部干扰为已知的, 则理想的反馈控制器输出为

$$U_{id} = \frac{1}{z}[U_{lc} - d - \Delta(\mathbf{x}, u)], \quad (3)$$

其中

$$U_{lc} = x_c^{(n)} + \mathbf{k}^T \mathbf{e},$$

$$\mathbf{e} = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T,$$

$$e = x_c - x,$$

$$\mathbf{k} = [k_n, k_{n-1}, \dots, k_1]^T,$$

使得代数式 $s^n + k_1 s^{n-1} + \dots + k_n$ 满足 Hurwitz 多项式. 但是, 由于不确定量 $\Delta(\mathbf{x}, u)$ 和 d 未知, 实际采用 $U_{id} = \frac{1}{z}U_{lc}$ 作为输出, 致使控制品质受到较大影响.

2 建立自主构架模糊系统

为解决上述问题, 利用模糊无限函数逼近特性^[9], 设计以 T-S 型模糊系统为基础的自主构架模糊系统来消除系统不确定量 $\Delta(\mathbf{x}, u)$.

自主构架模糊系统实现了模糊系统结构与参数的自适应. 本文模糊系统采用三角隶属函数, 该函数由左中右 3 点确定, 中点隶属度值为 1. 模糊系统初始状态为: 每个输入只含有 1 条隶属函数, 系统只含有 1 条规则. 构造自主构架模糊系统主要内容如下:

1) 判断增加隶属函数的 2 个准则.

① 系统误差准则^[5]. 定义 $e^T Pb$ (P, b 见第 3 节) 描述系统误差. 若系统误差大于预先设定的误差阈值, 则需新增一个隶属函数. 为保持隶属函数中点之间的最小距离, 对于即将新增的隶属函数, 其中点与相邻隶属函数中点的距离需不小于一个设定的距离阈值, 不满足则不增加该隶属函数.

② ε 完备性^[5]. 每一个输入变量至少存在一个隶属函数, 其隶属度不小于设定值 ε (ε 常取 0.5).

具体方法如下: 新增隶属函数中点的横坐标为当前输入变量的值, 左右点横坐标分别为左右两边隶属函数中心横坐标. 如果左(右)边没有隶属函数, 则规定新增隶属函数左(右)点到新增隶属函数中点的距离为默认距离. 新增隶属函数相邻的隶属函数也需调整, 形成连续隶属函数分布.

2) 增加相应的规则.

当输入变量 X_j 增加一个隶属函数时, 其隶属函数的数目变为 $N_j + 1$, 该函数需要与其他输入的所有隶属函数相结合, 从而形成 $N_1 \times \dots \times N_{j-1} \times N_{j+1} \times \dots \times N_m$ 条新规则.

3) 替换隶属函数机制限制规则数目^[5].

考虑到实际计算能力, 需设定规则数目上限, 因而本文采用替换隶属函数机制来限制规则数目的增长.

替换隶属函数机制如下: 当根据上述任一准则判断需增加隶属函数时, 还需继续判断是否达到规则上限. 如果已到达规则上限, 则将需增的隶属函数替换掉旧隶属函数(中点距离当前需增隶属函数中点最近的隶属函数), 同时用新增隶属函数更新相应规则.

4) 规则后件初始化.

本文采用“伪模糊输出”的方法^[9]来初始化后件, 可避免出现暂时振荡. 方法如下: 在 t_g 时刻, 模糊系统有 n 条规则, 其中的 h 条规则为新增规则. 假定 h 条规则在 t_g 时刻没有生成, 模糊输出 y_p 称为伪模糊输出, 则初始值 a_{new} 为

$$a_{new} = \frac{y_p - \sum_{k=1}^{n-h} a_k \xi_k}{\sum_{k=n-h+1}^n \xi_k}. \quad (4)$$

5) 规则后件的自适应律.

给定自适应律如下:

$$\dot{a}_k = \begin{cases} re^T Pb \xi_k, & u_L < a_k < u_U, \\ \text{or } a_k = u_U \text{ and } re^T Pb \xi_j > 0, \\ \text{or } a_k = u_L \text{ and } re^T Pb \xi_j < 0; \\ 0, & \text{other.} \end{cases} \quad (5)$$

其中: r 为自适应学习率, u_U 、 u_L 分别为控制器输出的上下界.

3 自主构架模糊控制器设计

利用上述模糊系统逼近 $\Delta(\mathbf{x}, u)$, 与鲁棒控制器相结合, 构成整体控制系统, 设计整体控制器的输出为

$$u = \frac{1}{z}(U_{rac} - U_{fc}). \quad (6)$$

其中: U_{rac} 为鲁棒控制器的输出, U_{fc} 为自主构架模糊系统的输出, z 为设计常量. 本文需特别说明的内容主要包含以下几个方面:

自主构架模糊系统的最优输出^[7]为

$$U_{fc}^*(\mathbf{x}) = \Delta(\mathbf{x}, u^*) = U_{fc}(\mathbf{x}, a^*) + w(\mathbf{x}) = a^*\xi + w(\mathbf{x}). \quad (7)$$

其中: w 为有界逼近误差; a^* 为最优参数, 且有

$$a^* = \arg \min_a [\sup_{\mathbf{x}} |U_{fc}(\mathbf{x}, a) - U_{fc}(\mathbf{x})|].$$

将式(6)代入(1)可得误差方程为

$$\dot{\mathbf{e}} = A\mathbf{e} - b[\Delta(\mathbf{x}, u) - U_{fc} + (U_{rac} - U_{lc}) + d]. \quad (8)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & \cdots & -k_1 \end{bmatrix},$$

$$b = [0, 0, \dots, 1]^T.$$

存在对称正定矩阵 P 满足如下 Riccati 方程:

$$A^T P + PA + Pb\left(\frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{\delta}\right)b^T P = -Q. \quad (9)$$

其中: Q 为任意给定的正定对称矩阵; ρ 为衰减系数, 满足 $(1/\rho^2 - 1/\delta) \leq 0$.

文献[9]已经证明可用静态模糊系统结构逼近不确定量, 设计了如图1所示的自主构架模糊控制器.

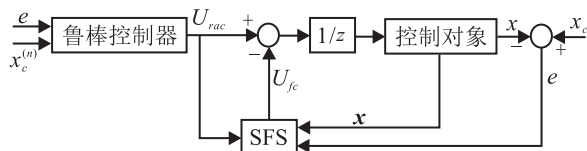


图 1 自主构架模糊控制器

模糊系统的输入变量 U_{rac} 为

$$U_{rac} = U_{lc} + \frac{1}{2\delta}b^T P e. \quad (10)$$

其中: 等式右侧的前1项可使系统稳定, 后一鲁棒项可克服逼近误差和外扰; \mathbf{x} 为模糊系统的输入变量.

候选李雅谱诺夫方程为

$$V = \frac{1}{2}e^T P e + \frac{1}{2r}\tilde{a}^T \tilde{a}, \quad (11)$$

其中 $\tilde{a} = a^* - a$.

由文献[6]可知, 存在常量 $c_1 > 0$, 使得

$$|\Delta(\mathbf{x}, u) - a^*\xi| \leq c_1,$$

且有

$$\begin{aligned} \Delta(\mathbf{x}, u) - U_{fc} &= \\ \Delta(\mathbf{x}, u) - U_{fc}^*(\mathbf{x}) + U_{fc}^*(\mathbf{x}) - a^T \xi &= \\ \tilde{a}^T \xi + w(\mathbf{x}), \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $|w(\mathbf{x})| = |\Delta(\mathbf{x}, u) - a^*\xi| \leq c_1$, 因此 w 有界. 将式(11)两边求导, 并代入式(7), (8), (9), (10), (12), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{1}{2}e^T Q e - \frac{1}{2}\left[\frac{1}{\rho}b^T P e + \rho(w+d)\right]^2 + \\ &\quad \frac{1}{2}\rho^2(w+d)^2 - G. \end{aligned} \quad (13)$$

由式(5)的自适应律易得

$$G = \tilde{a}^T (e^T P b \xi - \dot{\tilde{a}}/r) \geq 0,$$

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2}e^T Q e + \frac{1}{2}\rho^2(w+d)^2. \quad (14)$$

假设 $2^{[10]}$ 存在一个有限常值 γ , 使得

$$\int_0^T (w+d)^2 dt \leq \gamma, \quad \forall T \in [0, \infty), \quad (15)$$

由式(15)可知, $w+d \in L_2[0, T], \forall T \in [0, \infty)$, 对式(14)两边积分, 可得

$$\begin{aligned} V(T) - V(0) &\leq \\ -\frac{1}{2}\int_0^T e^T Q e dt + \frac{\rho^2}{2}\int_0^T (w+d)^2 dt, \end{aligned} \quad (16)$$

由于 $V(T) \geq 0$, 由式(11)和(16)可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\int_0^T e^T Q e dt &\leq \\ \frac{1}{2}e(0)^T P e(0) + \frac{1}{2}\tilde{a}^T(0)\tilde{a}(0) + \frac{\rho^2}{2}\int_0^T (w+d)^2 dt, \end{aligned} \quad (17)$$

由此可知, 闭环系统满足 L_2 稳定性判定准则, 文献[9]证明误差收敛域如下:

$$\|e\| \leq \sqrt{\frac{2V(0) + \rho^2\gamma}{\lambda_{\min}(P)}}, \quad (18)$$

其中 ρ 越小收敛范围越小.

4 仿真实验

非仿射非线性系统^[9]如下:

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 =$$

$$0.2(1 + e^{x_1 x_2})[2 + \sin(x_2)](u + e^u - 1) + d. \quad (19)$$

其中: 步长为 0.01 s, $x_c = \sin(0.5t)$, $\mathbf{x}(0) = [0, 0]^T$, $d = 1 \times \text{sgn}(t - 10)$; 模糊系统 3 个输入的初始隶属函数左中右点的值均为 $[-1, 0, 1]$; 初始规则后件为 1.

控制器参数: 规则上限为 100, $\delta = \rho = 1, \gamma =$

30, $Q = 20I$, $K = [2, 1]^T$, $z = 1$, 误差阈值为 1, 距离阈值为 0.4, 默认距离为 1, 控制器输出的上下限为 $[-10, 10]$. x_1, x_2 的跟踪曲线如图 2(a)和图 2(b)所示, 模糊系统的规则最后到达 60 条, 如图 2(c) 所示.

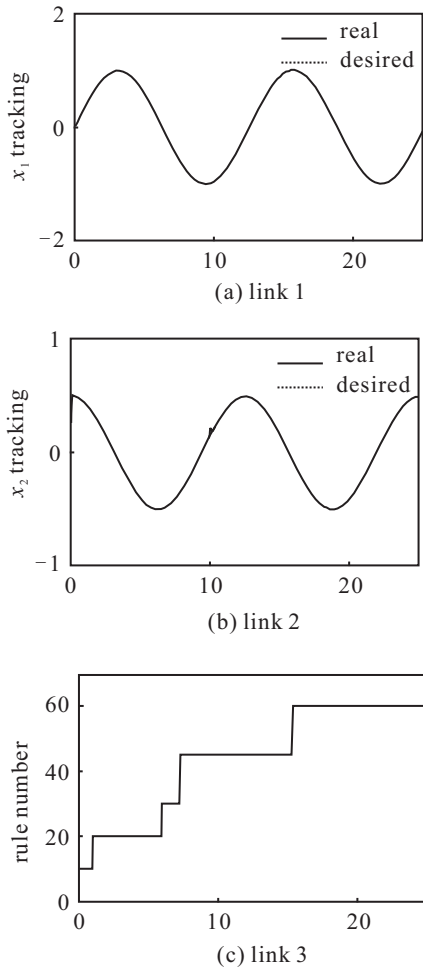


图 2 非仿射非线性系统状态跟踪

由图 2(a) 和图 2(b) 可知, 状态 x_1, x_2 在受扰动情况下均可较好地跟踪期望曲线, 仅在干扰突变时, x_2 出现波动, 并快速地恢复. 由此可知, 该系统具有良好的鲁棒性.

非线性系统的不确定量为

$$\Delta(\mathbf{x}, u) =$$

$$0.2 \times (1 + e^{x_1 x_2}) [2 + \sin(x_2)] (u + e^u - 1) - zu.$$

逼近量与系统不确定量的比较如图 3 所示.

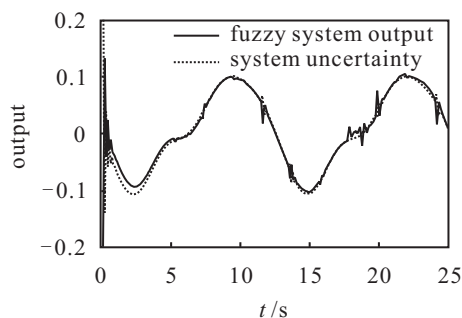


图 3 逼近量与系统不确定量的比较

图 3 显示了自主构架模糊系统逼近非线性系统 $\Delta(\mathbf{x}, u)$ 的效果, 可见此模糊系统逼近系统不确定量的方法具有可行性.

5 半实物仿真实验

本文以加拿大 Quanser 公司的半实物仿真平台中的 SVR02-ET 为对象来验证算法的可行性. 由于 CMEX 文件具有最快的执行速度, 更重要的是其可对硬件端口进行操作, 本文采用 Matlab 的 CMEX S 函数来实现自主构架模糊系统.

采用自主构架模糊控制器实现其位置和速度状态的跟踪控制分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示. 图 4 中, 位置状态期望信号为 $\sin t + 2$, 规则上限为 3, $\delta = \rho = 1, \gamma = 30, Q = 20I, K = [2, 1]^T, P = [35, 5; 5, 15], z = 1$, 误差阈值为 5.5, 距离阈值为 0.5, 默认距离为 1, 控制器输出上下限为 $[-10, 10]$.

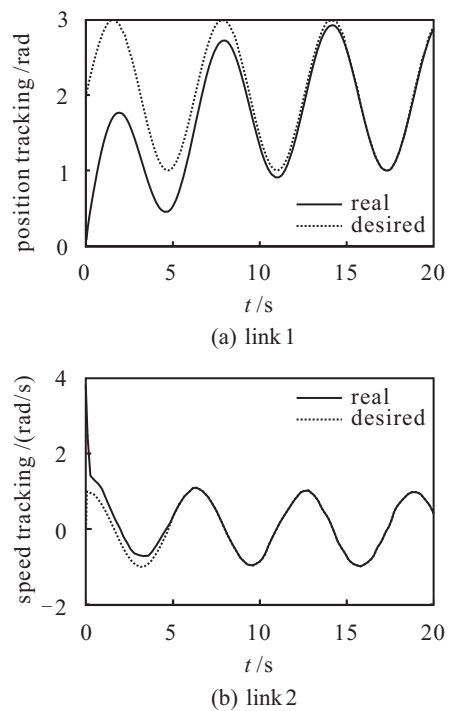


图 4 位置状态跟踪

由位置状态跟踪图 4(a) 可知, 在初始时刻, 位置跟踪误差较大, 随着时间继续, 自主构架模糊系统趋于完善, 跟踪曲线呈现出逼近期望曲线的趋势.

由速度状态跟踪图 4(b) 可知, 速度跟踪曲线跟踪效果良好, 而位置跟踪速度较慢, 需进一步改进参数, 提高速度. 本文的实验验证了所提出算法的可行性, 自主构架模糊控制器可用于实际系统中.

6 结 论

本文针对普遍存在的非仿射非线性系统, 提出了一种新型自主构架模糊控制器. 其核心部分的自主构

架模糊系统可不断地进行在线自我完善, 消除系统不确定量. 本文证明了闭环系统的稳定性, 给出了状态跟踪控制仿真. 仿真结果显示控制效果良好, 模糊系统可有效逼近系统不确定量. 半实物平台实验进一步验证了算法的可行性.

在此基础上, 可进一步加入线性观测器, 利用估计状态和误差设计模糊控制器. 本文只证明了控制器具有 L_2 稳定性, 证明其全局稳定, 提高自主构架模糊系统实际应用能力都是下一步研究的方向.

参考文献(References)

- [1] 苏玉鑫. 非线性机器人系统控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
(Su Y X. Control theory for nonlinear robotic manipulators[M]. Beijing: Science Press, 2008.)
- [2] 扎德. 模糊集与模糊信息粒理论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2000.
(Zadeh L A. Fuzzy sets and fuzzy information-granulation theory[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2000.)
- [3] Wang W Y, Leu Y G, Lee T T. Output-feedback control of nonlinear systems using direct adaptive fuzzy-neural controller[J]. Fuzzy Set and Systems, 2003, 140(2): 341-358.
- [4] Tong S C, Li H X, Wang W. Observer-based adaptive fuzzy control for SISO nonlinear systems[J]. Fuzzy Set and Systems, 2004, 148(3): 355-376.
- [5] Phi Anh Phan, Timothy J Gale. Direct adaptive fuzzy control with a self-structuring algorithm[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159(8): 871-899.
- [6] 文杰, 姜长生, 钱承山, 等. 非仿射非线性系统的自适应模糊输出反馈控制[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7): 1694-1698.
(Wen J, Jiang C S, Qian C S, et al. Adaptive output-feedback fuzzy controller for nonaffine nonlinear systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(7): 1694-1698.)
- [7] Park Jang-hyun, Park Gwi-tae, Kim Seong-hwan, et al. Direct adaptive self-structuring fuzzy controller for non-affine nonlinear system[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 135(3): 429-445.
- [8] Gao Y, Er M J. Online adaptive fuzzy neural identification and control of a class of MIMO nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2003, 11(4): 462-477.
- [9] Chen Pincheng. Fuzzy and neural network control schemes with automatic structuring process for nonlinear dynamic systems[D]. Hsinchu: National Chiao Tung University, 2008.
- [10] Wang W Y, Chan M L, Hsu C C, et al. H_∞ tracking-base sliding mode control for uncertain nonlinear systems via an adaptive fuzzy-neural approach[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics—Part B, 2002, 32(4): 483-492.

(责任编辑: 闫 妍)