

# 基于 FAM 的模糊神经控制器的研究

蔡自兴, 文敦伟

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 根据模糊联想记忆(FAM)理论,提出了预解模糊 FAM 原理,给出了预解模糊 FAM 和一般 FAM 的等价性的构造性证明.为了提高 FAM 推理过程的自适应能力,将神经网络应用于预解模糊 FAM 推理,提出了一种新的智能控制器——FAM 神经控制器(FAMNC).以小车倒立摆为控制对象进行了仿真研究,表明了所提方法的可行性.

**关键词:** 模糊逻辑; 神经网络; 智能控制; 倒立摆

**中图分类号:** TP183; TP273. +4 **文献标识码:** A

## Fuzzy neural controller based on FAM

CAI Zi-xing, WEN Dun-wei

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Hunan Changsha 410083, China)

**Abstract:** A new fuzzy logic inference method, pre-defuzzifying FAM, was presented based on fuzzy association memory (FAM), and the equivalence of pre-defuzzifying and general FAM was then proved to be constructive. A new intelligent controller, FAM neural controller (FAMNC), was also proposed by combining neural networks with pre-defuzzifying FAM. The simulation research on inverted pendulum control was performed. The results show that the FAMNC is feasible.

**Key words:** fuzzy logic; neural networks; intelligent control; inverted pendulum

### 1 引言(Introduction)

模糊理论和模糊控制是当前智能控制五大系统<sup>[1]</sup>(符号专家控制、神经控制、学习控制、模糊控制、分级递阶控制)中应用最多,普及面最广,实现也较简便的一种.当前,模糊控制的适应性、鲁棒性及与其他智能控制和传统控制的结合方面,正进行深入研究.在模糊控制的自适应和学习能力研究方面,如隶属函数和控制规则的自修正、学习和辨识模糊控制规则、量化因子和比例子数的自整定等方面,已有相应的模糊控制器提出<sup>[1~8]</sup>.

随着神经网络研究的迅速发展,不少学者对神经网络和模糊控制的结合开展了研究<sup>[3~5]</sup>.这种结合主要表现在利用神经网络进行模糊建模,调整模糊控制器的参数和规则,以及直接用神经网络实现模糊控制等方面.其中, Kosko 利用矢量化对积空间进行聚类,以获得模糊规则,并提出了模糊联想记忆(FAM).本文的研究将以(FAM)为基础.

### 2 基于 FAM 的模糊控制原理(Fuzzy control based on FAM)<sup>[3]</sup>

为了说明基于 FAM 的模糊控制原理,设精确量

$A^0$  经模糊化处理得到模糊向量  $A$ ,  $A$  进入 FAM 后,得到模糊向量  $B$ ,经解模糊处理后得到精确量  $B^0$ ,用于对象的控制量输入.

FAM 中的  $A_i \rightarrow B_i$  代表了一条推理规则,在控制器中用作控制规则,有几种定义方式.这里,取

$$F_i = A_i \rightarrow B_i = A_i \times B_i,$$

其中,符号“ $\times$ ”代表相关最小合成或“直乘”.若  $A_i$  为  $p$  维,  $B_i$  为  $q$  维,则  $F_i$  是一个  $p \times q$  阶模糊矩阵.输入的模糊矢量  $A$  同时作用于所有  $n$  条推理规则,每一个规则  $F_i$  都对  $A$  有一个响应  $B_i$ .由  $A$  和  $F_i$  确定  $B_i$  的过程即为 FAM 推理或联想过程按模糊推理的一般规则定义为

$$B'_i = A \circ F_i = A \circ (A_i \times B_i),$$

其中,符号“ $\circ$ ”为最大最小合成运算.将  $n$  个响应(或子结论)  $B_i (i = 1 \sim n)$  进行归一化加权求和,有

$$B = W_1 B'_1 + W_2 B'_2 + \dots + W_n B'_n.$$

$B$  即为 FAM 最后输出的结论.其中权重系数  $W_i$  反映了第  $i$  条控制规则在整个控制策略中的强度值.

### 3 预解模糊的 FAM 推理 (Pre-defuzzifying FAM inference)

在 FAM 推理模式中,将各子控制规则的输出归一加权求和后再进行解模糊处理.为了便于用神经网络调整各子规则的强度,希望能将各子模糊控制的输出解模糊后再加权求和,得到最终的结果,即形成本文提出的预解模糊 FAM 推理.为此,本文提出如下定理:

**定理 1** 如果预解模糊 FAM 推理的子模糊控制的输出采用隶属函数加权重心法,即

$$B_i^0 = \frac{\sum_{j=1}^q y_j \mu_{B_i}(y_j)}{\sum_{i=1}^n W_i \sum_{j=1}^q \mu_{B_i}(y_j)}$$

则预解模糊 FAM 推理与常规 FAM 推理是等同的.

**证** 设经模糊推理后的模糊量  $B_i$  的隶属函数为  $\mu_{B_i}(y)$ ,  $i = \{1, 2, \dots, n\}$ , 则有

$$\mu_B(y) = W_1 \mu_{B_1}(y) + W_2 \mu_{B_2}(y) + \dots + W_n \mu_{B_n}(y) = \sum_{i=1}^n W_i \mu_{B_i}(y)$$

对  $B$  进行重心法解模糊,得到

$$B^0 = \frac{\sum_{j=1}^q y_j \mu_B(y_j)}{\sum_{j=1}^q \mu_B(y_j)} = \frac{\sum_{j=1}^q y_j \sum_{i=1}^n W_i \mu_{B_i}(y_j)}{\sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^n W_i \mu_{B_i}(y_j)} =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n W_i (\sum_{j=1}^q y_j \mu_{B_i}(y_j))}{\sum_{i=1}^n W_i \sum_{j=1}^q \mu_{B_i}(y_j)}$$

由前两式,有  $B^0 = \sum_{i=1}^n W_i B_i^0$ .

上式即为预解模糊 FAM 推理的结论.

证毕.

**定理 1** 有助于应用神经网络 FAM 的权值  $W$ , 从而达到调整模糊规则的目的.

### 4 基于预解模糊 FAM 推理的神经控制系统 (Neural control system based on pre-defuzzifying FAM inference)

作者在文[4]曾提出过基于自适应神经元的规则自修正模糊控制器,采用 Widrow-Hoff 学习算法.本节将采用误差反传算法设计一种预解模糊 FAM 神经控制器(FAMNC).系统结构如图 1 所示.图中  $E$  和  $E_c$  分别为对象输出  $y(t)$  与给定值  $r(t)$  的偏差  $e(t)$  及其变化  $e(t)$  量化和模糊化后的模糊集合,规则  $(E_i, E_{c_i}; U_i)$  ( $i = 1 \sim n$ ) 的模糊输出  $U_i$  经过模糊化后得到精确量  $u_i$ ,在仅值  $W_i$  的作用下获得控制器的输出  $u$ .

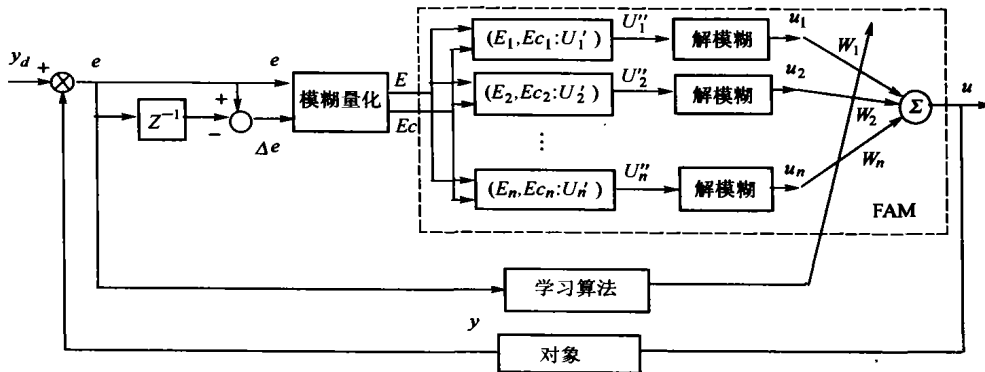


图 1 预解模糊 FAM 控制(FAMNC)结构  
Fig. 1 Structure of predefuzzifying FAM control

应有  $u = \sum_{i=1}^n w_i u_i(t)$ . 定义学习误差函数为

$$J(k) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^p (y_d(k) - y(k))^2 = \sum_{k=0}^p e(k)^2$$

求  $J(k)$  对权  $w_i$  的梯度得:

$$\frac{\partial J(k)}{\partial w_i} = \frac{\partial J(k)}{\partial y(k)} \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial w_i} = - \sum_{k=0}^p e(k) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \cdot u_i(k)$$

因此,  $w_i$  的调整式为:

$$w_i(m+1) = w_i(m) + \eta \sum_{k=0}^p e(k) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \cdot u_i(k)$$

为获得  $\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}$  的值,根据前面的讨论,有各种

实现方法,这里采用最简便的估计法,取

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} = \frac{y(u(k)) - y(u(k-1))}{u(k) - u(k-1) + \epsilon}$$

这里,  $\eta$  为学习率,  $\epsilon$  取适当小的正数,  $p$  为样本次数,  $k$  和  $m$  分别为系统时间步和权值学习的时间步.

### 5 仿真研究(Simulation)

采用本文提出的 FAMNC 控制器对倒立摆进行仿真研究. 倒立摆的控制是智能控制中的一个典型问题, 控制目的是通过给小车底座施加一个力  $F$  (控制), 使倒立摆在  $\theta$  扰动下尽可能长时间保持直立状态. 倒立摆的运动方程可以由非线性微分方程描述:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{3}{4l} [g \sin \theta - a \cos \theta - \frac{\mu_p \dot{\theta}}{m_p l}], \\ \dot{x} = a_F + a_1 - a_2 - \mu_c \operatorname{sgn}(\dot{x})/m, \end{cases}$$

其中, 模糊控制器的输入为  $\theta$  和  $\dot{\theta}$ , 输出控制为  $F$ ,

$$\begin{aligned} a_1 &= (m_p/m) l \dot{\theta}^2 \sin(\theta), \\ a_2 &= (m_p/m) l \ddot{\theta} \cos(\theta), \\ a &= \dot{x}, \quad a_F = (1/m) F, \end{aligned}$$

这里  $m = m_c + m_p$ . 式中参数的典型数据为:  $g$  为重力加速度,  $m_c = 1.0$  kg (小车质量),  $m_p = 0.1$  kg (杆的质量),  $l = 0.5$  m 为杆的半长. 本仿真不考虑摩擦影响, 侧重  $\theta, \dot{\theta}$  的状态, 故略去含  $\mu_c, \mu_p$  的项.

采用的模糊规则如表 1 所示, 共有 15 条规则, 取  $\theta$  为倒立摆与垂直方向的夹角 ( $\theta \sim [-90^\circ, 90^\circ]$ ),  $\dot{\theta}$  为偏离角的变化速度, 模糊变量  $\theta$  和  $\dot{\theta}$  的语言集为 [NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB] 分别对应 [负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大],  $\theta, \dot{\theta}$  和  $F$  的隶属函数如图 2 所示. 在仿真中取相应的论域为  $\theta = [-20^\circ, 20^\circ]$ ,  $\dot{\theta} = [-50^\circ, 50^\circ]/s$ ,  $F \in [-20, 20]$  N.

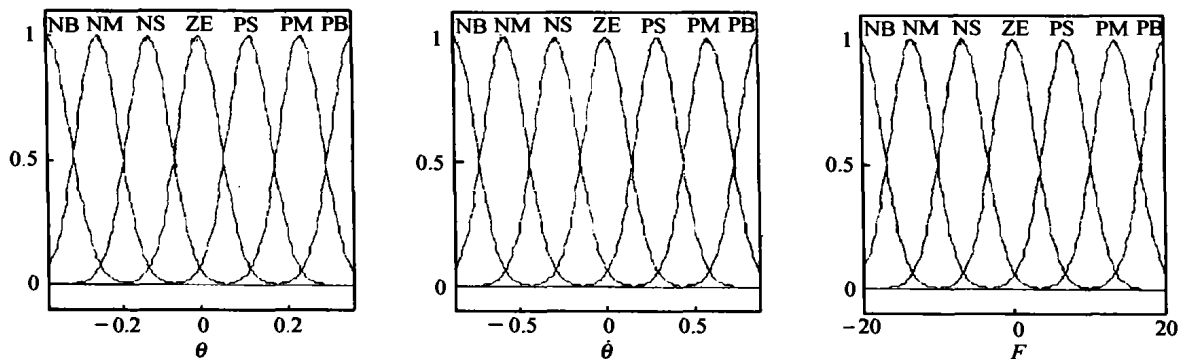


图 2  $\theta, \dot{\theta}, F$  的隶属函数  
Fig. 2 Membership functions of  $\theta, \dot{\theta}$  and  $F$

表 1 倒立摆控制规则  
Table 1 Fuzzy rules for Controlling inverted pendulum

$\dot{\theta}$	$\theta$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB							
NM							
NS				NS	PS		
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS			NS	PS			
PM							
PB							
NB					NB		
NM					NM		
PM					PM		
PB					PB		

仿真中相关的参数为:  $t_s = 0.01$  s, 初始条件  $\theta = -15^\circ, \dot{\theta} = 0, F = 0$ . 训练数据为在线获取的 4 组数据, 每组有 300 个样本, 最大训练次数设为 1000 次. 在 Matlab 环境中编程实现学习与控制过程. 仿真结果如图 3 所示:

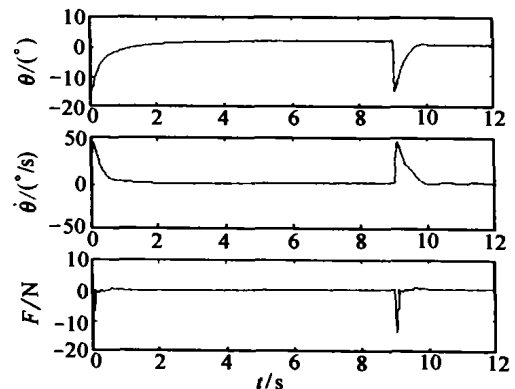


图 3 FAMNC 控制器对倒立摆仿真结果  
Fig. 3 Simulation results of FAMNC for inverted pendulum

每个图中前部为只有预解模糊 FAM 参与控制

的结果,后部分为权值经过学习后在同样的初始条件下控制结果.仿真结果表明了解模糊原理以及解模糊 FAMNC 控制器的有效性.

## 6 结论(Conclusion)

本文以模糊联想记忆(FAM)和神经网络为基础,提出一种新的智能控制器(FAMNC),并进行仿真研究.首先在模糊联想记忆(FAM)基础上,提出了解模糊 FAM 原理,证明了解模糊 FAM 和一般 FAM 的等价性.然后利用前向神经网络调整模糊规则的权值,实现模糊推理自适应,从而形成 FAM 神经控制器(FAMNC).以小車倒立摆为控制对象进行了仿真研究,表明了本方法的可行性.

## 参考文献(References):

- [1] CAI Zi-xing. *Intelligent Control: Principle, Techniques and Applications* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co, 1996.
- [2] 孙增圻. 智能控制理论与应用技术[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.  
(CUN Zeng-qi. *Theory and Techniques of Intelligent Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.)

(上接第 598 页)

## 6 结束语(Conclusion)

本文给出了不确定系统鲁棒 LQ 设计的稳定裕度条件,提出了不确定系统鲁棒  $\alpha_0$  裕度稳定鲁棒界,并分别给出了结构和非结构不确定系统的鲁棒稳定裕度性分析方法.对结构不确定系统,本文还给出了一种通过参数和性能指标加权阵选择来提高鲁棒 LQ 设计鲁棒界的优化求解方法.本文所提出的问题和方法,对鲁棒控制理论中时频域结合的应用研究进行了有益的探讨.制浆造纸过程鲁棒 LQ 控制系统应用实例证明了结论的正确和有效性.

## 参考文献(References):

- [1] SAFONOV M G, ATHANS M. Gain and phase margins for multi-loop LQG regulators [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1977, 22(2): 173 - 179.
- [2] DOUGLAS J, ATHANS M. Robust linear quadratic designs with real parameter uncertainty [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(1): 107 - 111.
- [3] LEHTOMAKI N A, SANDELL Jr N R, ATHANS M. Robustness results in linear Gaussian based multivariable control designs [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1981, 26(1): 75 - 92.
- [4] ANDERSON B O O, MOORE J B. *Optimal Control* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.

- [3] KOSKO B. *Neural Networks and Fuzzy Systems* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1992.
- [4] 文敦伟,蔡自兴.基于自适应神经网络的规则自修正模糊控制器[J].中国有色金属学报,1995,5(4):414 - 418.  
(WEN Dun-Wei, CAI Zi-Xing. A fuzzy controller with rule self-tuning based on adaptive neural network [J]. *The Chinese J of Non-ferrous Metals*, 1995, 5(4): 414 - 418.)
- [5] WANG Jing, CAI Zi-xing, JIA Li-min. Direct fuzzy neural control with application to automatic train operation [J]. *Control Theory & Applications*, 1998, 15(3): 391 - 399.
- [6] WANG P P, TYAN C Y. Fuzzy dynamic system and fuzzy linguistic controller classification [J]. *Automatica*, 1994, 30(11): 1769 - 1774.
- [7] ZHANG B S, EDMUNDS J M. Self-organizing fuzzy logic controller [J]. *IEE Proc-D*, 1992, 139(5): 460 - 464.
- [8] CHEN J Q, LU L J. Analysis and synthesis of fuzzy closed-loop control systems [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1995, 25(5): 881 - 888.

## 作者简介:

蔡自兴 (1938 —),男,教授,博士生导师,联合国专家,纽约科学院院士.主要研究领域为人工智能,智能控制,智能机器人;  
文敦伟 (1965 —),男,博士,副教授.主要研究领域为分布式人工智能,智能控制,智能软件. E-mail: dwwen@mail.csu.edu.cn.

- [5] CHUNG D, KANG T, LEE J G. Stability robustness of LQ optimal regulators for the performance index with cross-product terms [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(8): 1698 - 1702.
- [6] PETERSEN I R. A Riccati equation approach to the design of stabilizing controllers and observers for a class of uncertain linear systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1995, 30(9): 904 - 907.
- [7] 薛安克,吕应权,孙优贤.性能指标含交叉项的不确定线性系统鲁棒保稳定控制[J].控制理论与应用,2000,17(5):742 - 746.  
(XUE Anke, LÜ Yingquan, SUN Youxian. Robust guaranteed stability control of uncertain linear systems for the performance index with cross-product term [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(5): 742 - 746.)

## 作者简介:

薛安克 (1957 —),男,博士,教授,博士生导师,1982年获山东大学数学系控制理论专业理学学士学位,1986年获东北重型机械学院工业自动化专业工学硕士学位,1997年获浙江大学工业自动化专业工学博士学位,2000年浙江大学计算机科学与技术博士后流动站出站,发表论文 80 多篇.目前主要研究领域为鲁棒和最优化控制,智能控制,信息融合,先进控制等理论和技术及其在工业生产过程中的应用. E-mail: akxue@hzice.edu.cn;

蒋楠 (1976 —),男,硕士研究生.1998年获浙江大学工业自动化专业工学学士学位.研究方向为鲁棒控制和  $H_\infty$  控制理论及应用;

王建中 (1963 —),男,副教授.1985年获西安电子科技大学计算机软件专业学士学位,1993年获浙江大学计算机应用专业工学硕士学位.主要研究方向为计算机信息处理,信息融合,先进制造技术.