

文章编号: 1002-0411(2001)02-135-04

# 多变量非线性系统参数自调整的模糊加权控制

肖 军<sup>1</sup> 张 石<sup>1</sup> 王 健<sup>2</sup> 徐心和<sup>1</sup>

(1. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110006; 2. 四平师范学院 136000)

**摘 要:** 本文针对多变量非线性系统, 提出了一种参数自调整的模糊加权信息融合方法. 利用模糊组合变量降低模糊控制系统的维数, 根据不同的模糊组合变量对最后决策的作用大小, 赋予不同的权重来实现对多变量非线性系统的控制, 在利用反向传播算法对量化系数和加权系数进行自学习后, 在线进行基于模糊规则的参数自调整, 有效地解决了多变量模糊控制系统中难于设计多维规则库和在线实现自适应模糊控制的问题. 本文还对所提出的方法进行了仿真实验和实际系统的实验, 实验结果证明了该方法的有效性.\*

**关键词:** 非线性; 多变量; 模糊控制

中图分类号: TP13 文献标识码: B

## A PARAMETER SELF-ADJUSTING FUZZY WEIGHTED CONTROL OF MULTIVARIABLE NONLINEAR SYSTEM

XIAO Jun<sup>1</sup> ZHANG Shi<sup>1</sup> WANG Jian<sup>2</sup> XU Xin-he<sup>1</sup>

(1. Northeastern University Shenyang 110006; 2. Siping Normal University 136000)

**Abstract:** A parameter self-adjusting fuzzy weighted controller of multivariable nonlinear system is designed in this paper. First we use fuzzy composed variables to decrease the fuzzy control system dimensions. Then according to the fuzzy composed variable effect on the final decision, we give each fuzzy composed variable a different weight. After self-learning of quantized parameters and weighted parameters with back propagation algorithm, a real-time parameter self-adjusting method based on fuzzy inference system is presented. It gives a solution to the problem for design and on-line realization of high dimension fuzzy adaptive controller. Simulations and real system experiments show its validity.

**Keywords:** nonlinear, multivariable, fuzzy control

### 1 引言(Introduction)

模糊控制在各种家电产品和工业过程中的成功应用引起了学术界广泛的兴趣. 与传统的控制方法相比, 模糊控制方法不但能够利用由传感器得到的数据信息, 而且能够充分利用由专家提供的模糊语言信息. 然而, 对于多变量非线性系统, 由于可能的控制规则集的数目是输入变量数的指数<sup>[3]</sup>, 因此, 对于多变量非线性系统, 难于设计一个完整的模糊控制规则集和实时实现自适应模糊控制. 因此如何有效地降低多变量非线性系统中的模糊控制器的维数, 以利于理论上的设计和工程应用上的实现有着非常重要的意义. 本文提出一种参数自调整的模糊加权控制, 利用文[7]的方法构造模糊组合变量, 然后根据各个模糊组合变量在控制决策中的地位和作

用形成加权控制, 在利用反向传播算法对量化系数和加权系数进行自学习得到合适的参数后, 在线利用模糊逻辑推理系统进行参数自调整, 既有效地降低了模糊控制器的维数, 又提高了系统的自适应能力. 同时以二级倒立摆系统为例进行了仿真实验和实际系统的实验, 实验结果证明了该方法的有效性.

### 2 模糊加权控制系统(Fuzzy weighted control system)

设模糊控制规则库是由具有如下形式的若干模糊“如果-则”规则组成:

$R^{(i)}$ : 如果  $x_1$  为  $F_1^i$ , 且, ..., 且  $x_n$  为  $F_n^i$ , 则  $y$  为  $G^i$

当采用单值模糊发生器、乘积推理规则和中心

\* 收稿日期: 2000-05-24  
基金项目: 国家自然科学基金资助课题(基金编号: 69875003)

平均反模糊化方法时,模糊逻辑系统具有如下的形式

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l (\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i))}{\sum_{l=1}^M (\prod_{i=1}^n \mu_{E_i^l}(x_i))} \quad (2-1)$$

式中,  $M$  为控制规则库中包含的模糊“如果-则”规则的总数,  $n$  为模糊逻辑系统的输入变量的个数,  $x$ ,  $y$  为模糊逻辑系统的输入和输出变量,  $F$ ,  $G$  为输入和输出变量的模糊集合,  $\bar{y}^l$  为  $\mu_{G^l}$  取最大值时所对应的点. 文[5]中证明了由式(2-1)描述的模糊逻辑系统是万能逼近器,理论上可以完成任何非线性控制任务.

本文以二级倒立摆系统作为研究对象,倒立摆装置是一个典型的快速、非线性、多变量和绝对不稳定系统,人们常常用它来检验控制方法对不稳定、非线性和快速变化系统的控制处理能力.二级倒立摆系统的数学模型为

$$M(\theta_1, \theta_2) \begin{pmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + F(\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2) \begin{pmatrix} r \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} = G(u, \theta_1, \theta_2) \quad (2-2)$$

表达式  $M(\theta_1, \theta_2)$ 、 $F(\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2)$ 、 $G(u, \theta_1, \theta_2)$  的具体内容以及其中各参数的物理意义可见文[6]. 在上述的倒立摆系统中,有六个输入变量,分别为  $r$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\dot{r}$ ,  $\dot{\theta}_1$ ,  $\dot{\theta}_2$ , 若采用单级模糊控制方法,则可能的控制规则数将是输入变量数的指数. 为此,文[4]中提出一种基于经验的解耦方法来设计模糊控制器,通过构造中间变量,形成分级结构来降低模糊控制器的维数,并给出了仿真结果.但在其仿真结果中上摆摆幅超过了下摆摆幅,这应该是一种发散现象,在实际中是不可能实现的.本文根据二级倒立摆系统快速、不稳定的特点,在文[7]中提出的基于模糊组合变量的控制方法的基础上,进一步改进控制算法,提出参数自调整的模糊加权控制方法来稳定倒立摆系统.

首先由系统的输入变量利用模糊逻辑系统构造模糊组合变量,即根据下摆的角度  $\theta_1$  和角速度  $\dot{\theta}_1$  按照表1所示的语言规则定义下摆的模糊误差  $E_{\theta_1}$ .

类似地可以定义上摆的模糊误差  $E_{\theta_2}$  和小车的模糊误差  $E_r$ . 然后根据倒立摆系统的运动特点和控制要求,采用加权控制方法,综合考虑摆体和小车的模糊误差信息从而得到最后的控制量  $u$ :

$$u = K_1 E_r + K_2 E_{\theta_1} + K_3 E_{\theta_2} \quad (2-3)$$

其中  $K_1 < K_2 < K_3$ . 为得到合适的量化系数和加权系数,在教练

$$E = \sum_{k=1}^m E(k) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (\theta_1^2(k) + \theta_2^2(k)) \quad (2-4)$$

的监督下,采用反向传播算法对量化系数和加权系数进行训练,训练算法详见文[7].

表1 定义下摆  $E_{\theta_1}$  误差的语言规则

Table 1 Pendulum error rulebase

摆体误差	摆体角速度							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
摆体角度	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE
	NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
	NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	ZE	PS	PM	PM	PB	PB	PB

### 3 权值自调整的模糊控制器(A weight self-adjusting fuzzy controller)

在利用反向传播算法进行自学习后,就得到了每一个输入变量的量化系数和模糊组合变量的加权系数.在文[7]中,各个模糊组合变量的权重在整个控制过程中是固定的,但在倒立摆系统的实际控制过程中,各个模糊组合变量的权重应该是变化的.例如,当摆误差比较大时,控制的主要目标是平衡摆体,摆体模糊误差的权重要相应地增大,当摆体接近平衡时,控制的主要目标是控制小车回到轨道的中点,这时摆体模糊误差的权重应该减小,而小车模糊误差的权重相应地增大.因此,我们提出一种权值自调整的控制方法在线调整权值.权值的调整由基于语言规则的模糊推理系统在线实现,模糊控制规则如表2所示.

表2 权值调整规则表

Table 2 Weight self-adjusting rulebase

模糊量测误差	small	middle	big
权值	small	middle	big

这样,在控制过程中,我们可以根据摆体和小车的模糊误差在线调整权值的大小,以满足实际控制的需要.

### 4 仿真实验(Simulation experiments)

为了与文[7]中的算法进行比较, 本文在与文[7]相同的初始条件下进行了仿真实验, 实验结果如

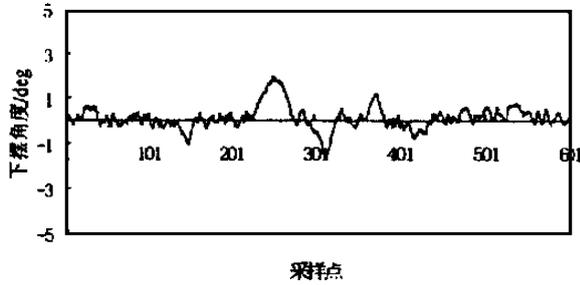


图1 下摆的角度曲线

Fig. 1 the bottom pendulum angle curve

图1 和图2 所示.

可以看出, 在参数自调整的模糊加权控制方法中, 上、下摆的摆角波动进一步减小了.

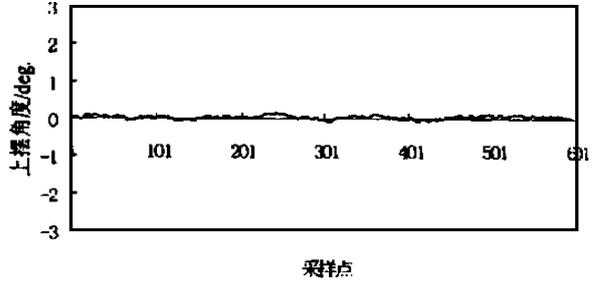


图2 上摆的角度曲线

Fig. 2 the top pendulum angle curve

### 5 实际系统的实验(The real system experiments)

在对仿真结果进行分析的基础上, 将提出的方法应用到实际系统中. 考虑到实际倒立摆系统的快速、自然不稳定特性, 首先将模糊组合变量的形成过程进行离线运算, 生成统一的模糊组合变量的查询表. 在实际控制中根据检测到的输入变量值, 通过选择不同的量化系数, 由模糊组合变量查询表求得摆

体和小车的模糊误差, 并由此计算出最后的控制量以满足系统的快速性要求.

首先将模糊加权控制方法应用到实际系统中, 得到的实验结果如图3 和图4 所示.

从曲线上可以看出, 基于组合变量的模糊加权控制方法可以得到较好的控制效果. 然后我们将权值自调整的控制方法应用到倒立摆系统中, 得到的实验结果如图5 和图6 所示.

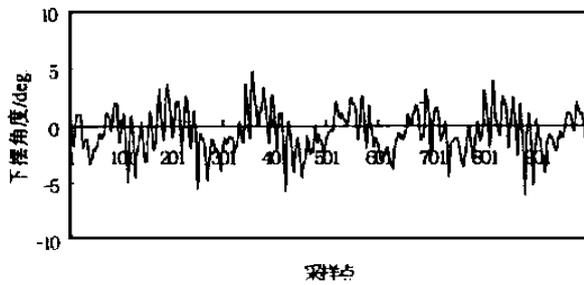


图3 下摆的角度曲线

Fig. 3 the bottom pendulum angle curve

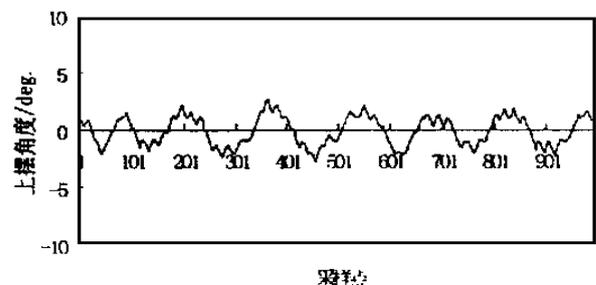


图4 上摆的角度曲线

Fig. 4 the top pendulum angle curve

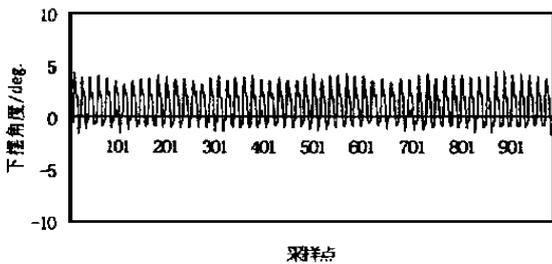


图5 下摆的角度曲线

Fig. 5 the bottom pendulum angle curve

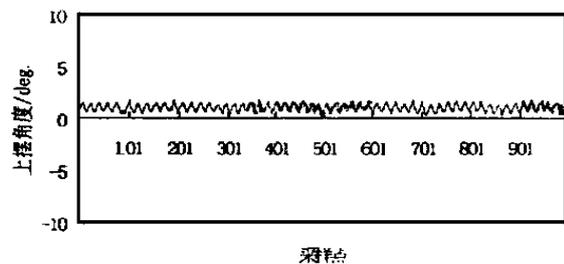


图6 上摆的角度曲线

Fig. 6 the top pendulum angle curve

从曲线上可以看出,本文提出的权值自调整方法的控制效果更加平稳.为考察该算法的鲁棒性,我们在上摆处放置一束花以增加系统的不确定性,在不改变任何参数的条件下,仍然可以很好地保持车摆系统的平衡,说明了本文提出的算法具有较强的鲁棒性.

## 6 结论(Conclusion)

本文针对多变量非线性系统,提出了一种参数自调整的模糊加权控制方法.在基于模糊组合变量的加权控制的基础上,在线进行参数自调整,改善了模糊控制方法的动态特性,有效地解决了多变量模糊控制系统中难于设计和在线实现自适应控制的问题,提高了系统的鲁棒性.并对所提出的方法进行了仿真实验和实际系统的实验,实验结果证明了该方法的有效性.

## 参 考 文 献(References)

- 1 Shozo Mori. Control of Unstable Mechanical System. *Int. J. Control*, 1976, **23**(5): 673~ 692

(上接第 119 页)

(3) 本文提出的新遗传算法的效果最好,经历不多的代,即能收敛于全局最优解,收敛精度最高,乃至达到理论上的全局最优解.

## 参 考 文 献

- 1 Eien A E, *et al.* Global Convergence of Genetic Algorithms: An Infinite Markov Chain Analysis, Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, 1991, 4~ 12
- 2 Rudolph G. Convergence Analysis of Canonical Genetic Algorithms, *IEEE Trans on Neural Networks*, 1994, **5**(1): 96~ 101

- 2 G V S Raju, Jun Zhou. Adaptive Hierarchical Fuzzy Controller. *IEEE Trans. on systems, man & cybernetics*, 1993, **23**(4): 973~ 980
- 3 Furuta K, Hiroyuki K, Kosuge K. Digital Control of Double Inverted Pendulum on an Inclined Rail. *Int. J. Contr.*, 1980, **32**: 907~ 924
- 4 Hongmin Zhang, Xiwen Ma, Wei Xu and Peizhuang Wang. Design Fuzzy Controllers for Complex Systems with an Application 3-stage Inverted Pendulum. *Info. Sci.*, 1993, **72**: 271~ 284
- 5 王立新. 自适应模糊系统与控制. 北京: 国防工业出版社, 1995
- 6 Xiao Jun, Zhang Shi, Xu Xinhe. A Weighted Fuzzy Control of Double Inverted Pendulum. *The Third Asian Control Conference*, Shanghai: Daheng Electronic Press, 2000, 1160~ 1163
- 7 肖 军, 张 石, 徐心和. 基于模糊组合变量的自适应加权控制. *控制与决策*, 待发

## 作者简介

肖 军(1967- ), 教师, 在职博士生. 研究领域为模糊控制, 神经元网络和非线性系统.

张 石(1963- ), 博士, 副教授. 研究领域为智能控制, 计算机应用等.

徐心和(1940- ), 教授, 博士生导师. 研究领域为智能控制, 机器人学, 离散系统等.

- 3 恽为民等. 遗传算法的全局收敛性和计算效率分析. *控制理论与应用*, 1996, **13**(4): 455~ 460

- 4 Mitsuo G, *et al.* Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 1997

- 5 项国波. ITAE 最佳控制. 机械工业出版社, 北京, 1986 年 2 月

## 作者简介

涂承媛(1963- ), 女, 副教授, 在职博士生. 研究领域为智能控制论, 生物医学工程及其智能化信号处理.

涂承宇(1960- ), 男, 副教授, 工学硕士学位. 研究领域为智能控制, 现代最优化方法, 系统仿真.