

基于BP算法的自适应模糊控制系统研究*

邢 珺 王 磊 戴冠中

(西北工业大学自动控制系·西安, 710072)

摘要:在用模糊算法产生模糊规则的过程中,专家信息对算法是否收敛起到了很重要的作用.本文基于模糊控制器的一种解析结构,提出了用BP算法完善经验规则,加速非线性系统模糊控制过程的方法.

关键词:模糊控制;解析结构;BP算法

1 问题的提出

目前已经发表的关于用BP算法产生模糊规则的文章^[1~5],偏重于在特定的网络模式下,用BP算法直接产生模糊规则,从而把BP算法的作用提到一个很高的层次,有的甚至把模糊逻辑单元基本等同于一个失去实际物理意义的数学表达式,而没有充分利用模糊经验信息在算法是否收敛、控制是否成功的问题中所起到的关键作用.它们的训练算法,针对一定的初始条件和特定的训练步长是收敛的,并产生了较好的控制效果,但一旦初始条件和步长发生变化,结果就很不理想.这是由BP算法本身存在的易收敛于局部极小值的缺陷造成的.由于模糊控制素以鲁棒性强而著称,如果我们在利用模糊信息保证系统大范围控制稳定的前提下,仅用BP算法来小范围完善经验知识,提高控制速度,那么BP算法收敛于局部极小值以及隶属函数的建立包含有太多的主观因素等问题就会迎刃而解.基于这一思想,本文将BP算法应用于典型的非线性控制问题:倒立摆的模糊控制,用于修改模糊经验规则,加速倒立摆的平衡过程.

2 本文采用的模糊控制系统

王立新在文献[6]中提出的一种模糊逻辑单元解析式如下:

$$\mu(x) = \frac{\sum_{l=1}^M m\mu^l \left\{ \prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - mx_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right] \right\}}{\sum_{l=1}^M \left\{ \prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - mx_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right] \right\}} \quad (1)$$

式中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为单元输出量, $\mu(x)$ 为单元输出量, $m\mu^l$ 为第 l 条规则输出模糊集中隶属度为1的中心值,在此 $l = 1, 2, \dots, M$. mx_i^l 和 σ_i^l 为高斯型隶属函数参数. $m\mu^l$, mx_i^l 和 σ_i^l 均为模糊逻辑单元(1)式的可调节参数.

王立新从理论上严格证明了(1)式为一个“全局逼近因子(universal approximator)”因本文将(1)式作为解析式模糊控制器用于控制倒立摆系统具有普遍意义.

本文用于仿真的倒立摆数学模型如下

* 本文于1995年4月3日收到,1996年6月12日收到修改稿.

国家自然科学基金,国防科技预研跨行业基金联合资助项目.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{g \sin x_1 - \frac{m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m}}{l(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m})} + \frac{\cos x_1}{m_c + m} \cdot u, \end{cases} \quad (2)$$

$$= f(x_1, x_2) + g(x_1) \cdot u$$

其中, x_1 为长杆与竖直线的偏角, x_2 为角速度, 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 小车的质量 $m_c = 1 \text{ kg}$, 长杆的质量 $m = 0.1 \text{ kg}$, 长杆长度的一半 $l = 0.5 \text{ m}$.

若模糊控制器的控制经验规则采用在模糊控制中常用的 Mamdani 规则^[7,8], 如图 1 所示. 图 1 蕴含着 49 条控制经验规则. 逻辑变量 E 和 CE 的模糊量 $NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB$ 的均值 m_x 分别取为 $-7, -4, -1, 0, 1, 4, 7$. 所有模糊量的高斯曲线取 $\sigma = 2$, 由此确立了解析式模糊控制器(1)式的初始参数, 即 $m\mu^i, mx^i$ 和 σ_i^i 的初始值.

		CE							
		NB	NM		NS	O	PS	PM	PB
E	NB	PB					PM	O	
	NM			PM			O	NS	
	NS	PM			PS	O	NS		
	O							NM	
	PS	PS			O	NM			
	PM	O		NM		NB			
	PB								

图 1 Mamdani 控制经验规则表

取仿真步长 $h = 0.01 \text{ s}$, 量化因子 $K_e = 1, K_{ce} = 1, K_u = 15$. 在仿真过程中, 对微分方程组(2)式采用欧拉积分近似解法, 即

$$\begin{cases} x_1(k+1) = h x_2(k) + x_1(k), \\ x_2(k+1) = h \{f[x_1(k), x_2(k)] + g[x_1(k)] \cdot u(k)\} + x_2(k). \end{cases} \quad (3)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, 500$ 为时间指标. 仿真结果如图 2 中(1)所示. 由仿真结果可以看出, 根据 Mamdani 控制规则选择初始参数的解析式模糊控制器(1)式可以控制倒立摆系统, 但是摆的平衡过程比较长, 控制缓慢.

3 倒立摆自适应模糊控制系统的训练算法及仿真结果分析

为了使第 2 部分介绍的模糊控制系统的动态特性得以改善, 有必要根据倒立摆的过程响应调整初始控制规则(图 1). 该部分将采用人工神经网络中的 BP 算法, 根据倒立摆的响应过程调节输入和输出模糊变量隶属函数的中心位置和带宽, 进而完善控制规则.

根据图 1 Mamdani 经验规则设定好模糊控制器(1)式的初始参数, 以 5 秒即 500 步(仿真步长仍取为 0.01 秒)为一阶段, 在教练 E

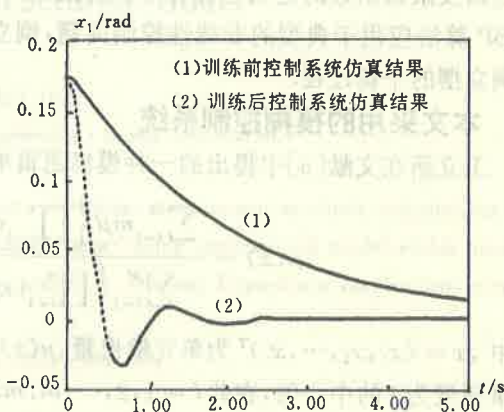


图 2 训练前后倒立摆模糊控制系统对比仿真结果

$$E = \sum_{k=1}^{500} x_1^2(k) = \sum_{k=1}^{500} E(k) \quad (4)$$

的监督下,对模糊逻辑单元(1)式中的参数 $m\mu^l$, mx_i^l 和 σ_i^l 进行训练.在此,如果我们仍对倒立摆的运动微分方程采用欧拉积分近似解法((3)式),那么 $m\mu^l$, mx_i^l 和 σ_i^l 的训练算法如下:

$$m\mu^l(j+1) = m\mu^l(j) - \alpha \sum_{k=1}^{498} \frac{\partial E(k+2)}{\partial u(k)} \times \frac{\partial u(k)}{\partial m\mu^l(j)}, \quad (5)$$

$$mx_i^l(j+1) = mx_i^l(j) - \alpha \sum_{k=1}^{498} \frac{\partial E(k+2)}{\partial u(k)} \times \frac{\partial u(k)}{\partial mx_i^l(j)}, \quad (6)$$

$$\sigma_i^l(j+1) = \sigma_i^l(j) - \alpha \sum_{k=1}^{498} \frac{\partial E(k+2)}{\partial u(k)} \times \frac{\partial u(k)}{\partial \sigma_i^l(j)}. \quad (7)$$

而

$$\frac{\partial E(k+2)}{\partial u(k)} = 2x_1(k+2) \times h^2 \times g[x_1(k)], \quad (8)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial m\mu^l(j)} = \frac{z'(k)}{b(k)}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial mx_i^l(j)} = \frac{m\mu^l(j) - u(k)}{b(k)} \times z'(k) \times \frac{2[x_i(k) - mx_i^l(j)]}{[\sigma_i^l(j)]^2}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial \sigma_i^l(j)} = \frac{m\mu^l(j) - u(k)}{b(k)} \times z'(k) \times \frac{2[x_i(k) - mx_i^l(j)]}{[\sigma_i^l(j)]^3}. \quad (11)$$

其中

$$z'(k) = \prod_{i=1}^2 \exp\left\{-\left[\frac{x_i(k) - mx_i^l(j)}{\sigma_i^l(j)}\right]\right\}, \quad (12)$$

$$b(k) = \sum_{i=1}^{49} z'(k), \quad (13)$$

$$a(k) = \sum_{i=1}^{49} m\mu^l(j) \times z'(k), \quad (14)$$

$$u(k) = a(k)/b(k). \quad (15)$$

这里, $i = 1, 2, \dots, l = 1, 2, \dots, 49, j = 1, 2, \dots$.

为加快训练速度,先将训练步长 α 取为 30,若下一步训练之后的 E 反而增大,说明 α 取值过大,可将 α 减半重新计算该步.随训练次数 j 的不断增大,参数 $m\mu^l$, mx_i^l 和 σ_i^l 得不断调整,控制规则趋于完善.一般当 $j = 5$ 时,训练后的模糊控制器加速倒立摆控制过程的效应已经非常显著了.如图 2 中 ② 所示,加入 BP 训练算法之后,摆的平衡速度明显加快,唯一付出的代价是一定的超调量,这倒立摆系统中仅表现为长杆在平衡点附近作小范围内的晃动.

为研究经过 BP 算法训练之后的倒立摆模糊控制系统的鲁棒性,我们有意改变摆长和初始条件,得到在不同摆长 ($l = 1.0\text{m}, 0.5\text{m}, 0.25\text{m}$) 及不同初始条件 ($x_1(0) = 10 =$

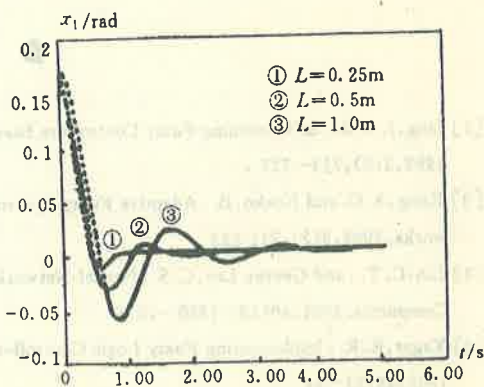


图 3 对于不同摆长训练后控制系统的响应

$10^\circ \cdot \pi/180^\circ \text{rad}$, $x_2(0) = 4 \text{rad/s}$ 和 $x_1(0) = -20^\circ \cdot \pi/180^\circ \text{rad}$, $x_2(0) = 0$ 之下的训练后控制系统的响应分别为图 3, 图 4 和图 5 所示。

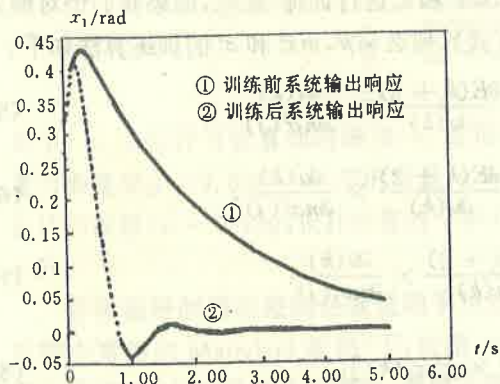


图 4 在 $x_1(0) = 10^\circ$, $x_2(0) = 4 \text{rad/s}$ 时系统输出

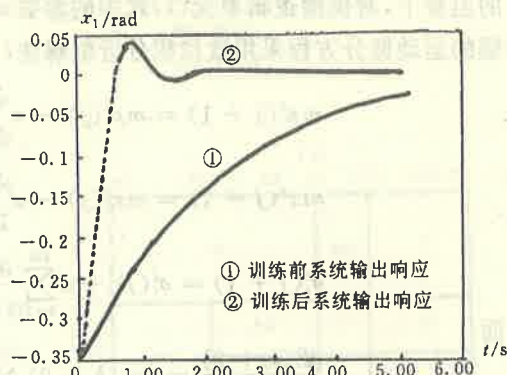


图 5 在 $x_1(0) = -20^\circ$, $x_2(0) = 0$ 时系统输出

我们发现,虽然系统训练是在特定的初始条件 ($x_1(0) = \pm 10^\circ \cdot \pi/180^\circ \text{rad}$, $x_2(0) = 0$, $x_2(0) = 0$) 及摆长 ($l = 0.5 \text{m}$) 的情况下进行的,但对于变化了的初始条件及摆长,较之于相应初始模糊控制结果,仍有较快的稳定速度.这在一定程度上说明了本文介绍的基于 BP 算法的自适应模糊控制系统的鲁棒性.

4 结 论

本文首先基于 Mamdan 控制经验规则,采用一种解析式模糊控制器对倒立摆的系统控制进行了仿真研究.在该研究的基础上,又采用神经网络的 BP 算法对模糊控制器的参数进行了训练,使控制系统的动态特性得到明显改善.

本文强调了模糊经验规则与 BP 算法的相辅相成,充分利用了模糊控制系统能够直接、有效地利用人类语言信息的优势和 BP 算法的学习功能,脱离了其它文章中惯用的复杂的模糊神经网络表示法,而用一组简单、直观的公式完成了控制器参数的任务,加快了控制器的控制速度,推出一种有一定的实用性、鲁棒性较强的自适应模糊控制系统.

参 考 文 献

- [1] Jang, J. S. R. . Self-Learning Fuzzy Controllers Based on Temporal Back Propagation. IEEE Trans. Neural Networks. 1992, 3(5): 714-723
- [2] Kong, S. G. and Kosko, B. . Adaptive Fuzzy Systems for Backing up a Truck-and-Trailer. IEEE Trans. Neural Networks. 1992, 3(2): 211-223
- [3] Lin, C. T. . and George Lee, C. S. . Neural-Network-Based Fuzzy Logic Control and Decision Systems. IEEE Trans. Computers. 1991, 40(12): 1320-1336
- [4] Yager, R. R. . Implementing Fuzzy Logic Controllers Using a Neural Network Framework. Fuzzy Sets and Systems. 1992, 48: 53-64
- [5] Jang, J. S. R. . Fuzzy Controller Design without Domain Experts. Proc. of 1st IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, 1992, 289-296
- [6] Wang, L. X. . Adaptive Fuzzy Systems and Control; Design and Stability Analysis. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1994

- [7] Mamdani, E. H. and Assilian, S., A Fuzzy Logic Controller for a Dynamic Plant. Int. J. Man Machine Stud. 1975, 7: 1-13
- [8] 应行仁, 曾南. 采用 BP 神经网络记忆模糊规则的控制. 自动化学报, 1991, 17(1): 63-67

The Research on the Adaptive Fuzzy Control System with BP Algorithm

XING Jun, WANG Lei and DAI Guanzhong

(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University • Xi'an, 710072, PRC)

Abstract: Expert information has an important effect on the convergence of BP algorithm through which we want to generate fuzzy rules. Based on an analytical structure of fuzzy controller, this paper presents a method of using BP algorithm to rectify fuzzy rules and accelerate non-linear system fuzzy control process.

Key words: fuzzy control; analytical structure; BP algorithm

本文作者简介

邢 琨 1970 年生, 1991 年毕业于西北工业大学自动控制系自动化仪表专业, 1994 年获该专业硕士学位, 现为西北工业大学自动控制系统控制理论与应用专业的博士研究生, 主要研究方向为模糊控制、神经网络、遗传算法。

王 磊 1961 年生, 1982 年毕业于西北工业大学自动控制系, 1985 年获西北工业大学自动控制系数据处理专业硕士学位, 1988 年赴德国慕尼黑工业大学进修, 1993 年获德国埃森大学模糊控制专业的博士学位, 现为西北工业大学自动控制系统教授, 博士生导师。著有《模糊控制系统的理论与实践(德文)》、《模糊控制技术及其应用》两本专著, 主要研究方向为模糊测量技术、温度控制。

戴冠中 见本刊 1996 年第 1 期第 114 页。