

基于 ANN 的模糊控制规则的自动生成*

康赐荣 陈芳 魏腾雄

(华侨大学电子工程系, 泉州 362011)

摘要 模糊控制规则集是模糊控制系统的核心部分,对控制的快速性和精度有很大影响.采用改进的 BP 算法生成模糊控制规则集.倒立摆模糊控制仿真表明,倒立摆稳定快,精度高,从而证明文中所提方法的有效性.

关键词 神经网络,模糊控制规则,BP 算法

分类号 TP 18

模糊控制把人们对过程(对象)的控制经验归纳成模糊控制规则集,属于语言控制,它不需要知道过程(对象)的数学模型,且鲁棒性强.因此,在那些难以获得过程的数学模型,具有非线性、大滞后的过程,采用模糊控制获得很大的成功.模糊控制越来越受到国内、外的重视.人工神经网络(ANN)具有自学习、信息分布存贮等拟人特性.把人工神经网络原理与模糊集合论相结合是当前模糊控制的发展趋势.本文采用 BP 网络实现模糊控制规则集的自动生成.倒立摆模糊控制的结果,表明所用方法的有效性.文中还提出了改进的 BP 算法,它可大大缩短网络训练时间,提高学习效率.

1 模糊控制规则集的生成

模糊控制模仿人们对过程的控制过程,把人们的控制经验归纳成模糊控制规则集.模糊控制规则可表示为 $\text{if}(E=A_i)\text{and}(CE=B_j)\text{then}(U=C_k)$, 其中 E, CE 和 U 为语言变量,可解释为系统误差、误差变化率和控制量.它们在各自论域中,取语言值 $A_i=B_j=C_k=\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, 式中 $NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB$ 分别对应于负大、负中、负小、零、正小、正中、正大模糊子集.

下面为各模糊量隶属函数的取法.(1) 高斯函数为 $G(x, \mu, \sigma) = \exp[-(x-\mu)^2/2\sigma^2]$, μ 为各模糊子集的均值, σ 为标准偏差.(2) 等腰三角形为 $T(x, \mu, \sigma) = 1 - \sigma^{-1}|x - \mu|$, μ 意义同上, 2σ 为等腰三角形的底宽.(3) 其它函数,为梯形等.用人工神经网络(ANN)来生成模糊控制规则集,可采用两种方法.(1) 由二维矩阵形式表示的规则表(图 1)来生成.(2) 由输入、输出数据来生成.不管采用哪种生成方法,结果都是存贮在神经元间连接权值上,这也正是工程实际所要求的.

* 本文 1996-10-25 收到;福建省自然科学基金资助项目

本文所采用BP网络结构如图2所示. 输入层神经元分E,CE两组, 神经元数与输入数

<div><div>U</div><div>CE</div></div> <div><div>E</div><div></div></div>	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	NS
NS	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZE	NS	NM	NB	NB	NB	NB

图1 模糊控制规则表

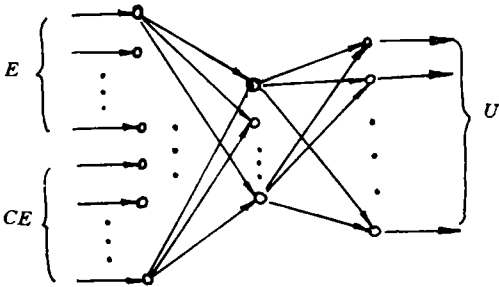


图2 BP网络结构

据数同,输出层神经元数与输出数据数同. 隐层神经元数可在仿真过程中确定,神经元数过少,则会陷入局部极小,本文取 14 个. BP 网络输入数据为各模式所对应的模糊子集的隶属度,期望输出数据为各模式的控制量模糊子集的隶属度. 网络经训练均可达到要求的误差值 $\sum |e| \leq 1.0$. 有关各程序训练情况见表 1. 表 1 中 FCBP14.C 为常规的 BP 算法编的程序,耗时为 33MHz 晶振,486 机的运行时间. 生成的模糊控制规则存在神经元间连接权值上以权文件保存,供模糊控制系统调用.

表 1 各程序训练情况总汇

程序名	结 构	隶属函数	模式数	误	差	迭代次数	耗 时
				$\sum e $	$\sum e^2$		
FCR14.C	26-14-15	高斯函数	49	1.0	0.066	1436	8'26"
FCRAN.C	26-14-13	等腰三角形	49	0.993	0.124	141	46"
FCR25.C	22-25-11	高斯函数	25	0.999	0.086	230	1'
FCBP14.C	26-14-15	高斯函数	49	1.0	—	>20,000	>4 h

2 倒立摆的模糊控制

倒立摆系统是常用的模糊规则控制的仿真实例. 倒立摆是指一支铰接在一个可移动小车上的摆(图 3). 控制的目的是希望通过不断对小车施以向左或向右作用力,以使摆能够从不同的初始状态回到并保持在竖直的平衡位置. 倒立摆的运动方程为 $\theta'' = [mgsin\theta - cos\theta(-f + m_p l \theta'^2 \cdot sin\theta)] / (\frac{4}{3}ml - m_p l cos^2\theta)$, 式中 θ 为摆角,摆向右偏离垂直线为正; θ' 为摆角的角速度,顺时针方向为正; θ'' 为摆角的角加速度; f 为作用于小车以保持摆杆竖立的力,向左为正; m_p 为摆杆质量; m 为小车和摆杆总质量; $2l$ 为杆长; g 为重力加速度.

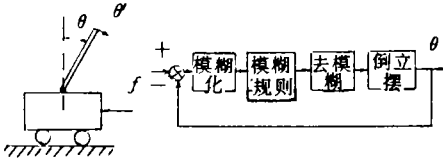


图3 倒立摆及其模糊控制系统

仿真时,各模糊量的论域及参数为: $\theta \in [-0.57, 0.57]$ rad, $\theta' \in [-3.14, 3.14]$ rad \cdot s⁻¹, $f \in [-30, 30]$ N, $m_p = 0.1$ kg, $m = 1.1$ kg, $2l = 1.0$ m, $g = 9.8$ m \cdot s⁻². 以 IPD14.C 和

FCR14.C 程序为例,变量 E 和 CE 的 7 个语言值的隶属函数的均值 μ 分别取 $-6, -4, -1, 0, 1, 4, 6$; U 的 μ 取 $-7, -4, -1, 0, 1, 4, 7$; 所有曲线的标准偏差 σ 均取 2. 输入神经元数 26 个, 分别对应 E, CE 从 -6 到 6 所有整数值; 输出神经元数 15 个, 对应 U 从 -7 到 7 的所有整数值. 仿真采样周期为 0.05 s. 不同初始扰动 θ 和 θ' 下, θ 变化曲线如图 4 所示. 当系统稳定时, 摆杆摆动幅度不超过 0.002 66 rad \cdot s.

倒立摆的模糊控制效果列于表 2, 表中 θ_s 表示稳态摆角, 达到 θ_s 的时间为 t_θ . 可见, 倒立摆稳定快, 摆动幅度小, 效果优于文献[1], [2].

表 2 倒立摆的模糊控制效果

描 述	初始扰动		θ_s/rad	t_θ/s
	θ/rad	$\theta'/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$		
IPD14.C, 结构 26-14-15, 49 模式, 高斯隶属函数	0.57	3.14	≤ 0.00266	2
IPDAN.C, 结构 26-14-13, 49 模式, 等腰三角形隶属函数	0.57	3.14	≤ 0.003	2.5
IPD25.C, 22-25-11, 25 模式, 高斯隶属函数	0.57	3.14	≤ 0.003	1.45

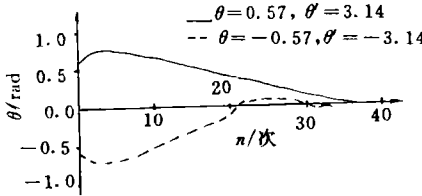


图 4 摆角 θ 的变化曲线

3 BP 的改进算法

BP 算法是最广泛应用的神经网络之一. 它具有自学习功能, 可以高精度映射任意复杂函数, 在智能控制、模式识别等领域获得广泛应用. 它的缺点是对参数敏感, 到训练后期收敛很慢, 会陷入局部极小等. 传统的 BP 网络中神经元的传递函数采用 sigmoid 函数(图 5), 即 $V = (1 + e^{-u})^{-1}$. 对权值的修正采用误差函数的负梯度法, 即最速下降法. 该算法要用到神经元传递函数的导数(图 5). 由图可见, 若输出神经元的期望输为 0 或 1, 则对权值的修正量就很小, 这就导致 BP 算法收敛很慢. 尤其当神经元的实际输出与期望输出反转(即要求为 1, 但实际为 0; 或反之)时, 要经过很多次训练才能改正过来. 改进 BP 算法, 提高收敛速度, 一直是人们研究的重要课题.

本文所做的改进有二: 一是取 $V'(u) = k$ 常数; 二是对 BP 算法的主要参数, 如学习率 ϵ 、动量因子 α , 以及 k 进行自适应调整. (1) 以常数 k 代替输出层神经元 $d_i^{(3)}$ 中的 $O_i(1 - O_i)$, 即 $d_i = k(t_i - O_i)$, 式中 d_i 为输出层的第 i 个神经元的权值修正式中的误差修正系数; t_i 为输出层第 i 个神经元的期望输出; O_i 为其实际输出. 这就保证了对权值有较大的修正量, 可避免陷入局部极小, 使输出层的实际输出较快地趋近期望输出. 上式

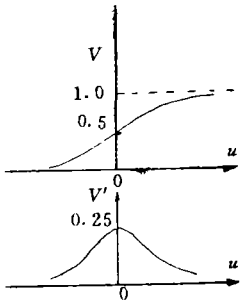


图 5 sigmoid 函数及其导数

中 k 按下式确定, 即 $k \leq 2b/(N + \frac{P}{a})^{1/2}$, 式中 N 为输出神经元数; P 为学习模式数; a 为 N 和 p 对 k 的影响系数(一般取 2); b 与问题的复杂性有关的系数(自联想取 1, 异联想取 0.5). (2) 参数按误差自适应调整, 若 $e(k+1) < e(k)$ 则参数值增大; 反之, 则减小. 即 $0.05 \leq [k \leftarrow k(1 \pm$

$k_e)] \leq 0.25, 0.1 \leq [\epsilon \leftarrow \epsilon(1 \pm k_e)] \leq 0.95, 0.1 \leq [\alpha \leftarrow \alpha(1 \pm k_a)] \leq 0.95$. ϵ, α 的初始值应适当选取, 取大了, 误差不减小. 一般可按下式选取: $\epsilon = \frac{\epsilon_{\min} + \epsilon_{\max}}{2} \approx 0.5, \alpha = \frac{\alpha_{\min} + \alpha_{\max}}{2} \approx 0.5$.

由表 1 可见, 本文改进的 BP 算法, 效果非常显著. 且本改进 BP 算法具有普遍性, 如用 2-2-1 结构的 BP 网络只训练 18 次, 就以 $\Sigma|e| \leq 0.01$ 的精度获得 XOR 的解.

4 讨论

若模糊控制需要给 E, CE 不同权重, 即 $U = \alpha E + (1 - \alpha) \cdot CE, \alpha \in [0, 1]$ 可在模糊化之前进行, 已生成的模糊控制规则集不用修改. 模糊子集的隶属函数采用高斯函数, 或等腰三角形函数对控制效果区别不大. 但采用后者, 网络的训练时间大为缩短. 倒立摆模糊控制仿真表明, 采用本文的神经网络结构及生成的模糊控制规则集, 倒立摆稳定快, 摆动幅度小.

本文所提出的改进 BP 算法, 可大大缩短网络的训练时间, 效果显著.

参 考 文 献

- 1 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
- 2 黄戴禄, 杨宗凯. 神经网络理论及应用——1994 最新进展. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994, 580~583
- 3 庄镇泉, 王煦法, 王东生. 神经网络与神经计算机. 北京: 科学出版社, 1992. 26~30

Automated Rule of Fuzzy Control Based on

Artificial Neural Network

Kang Cirong Chen Fang Wei Tengxiong

(Dept. of Electron. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract Rule set of fuzzy control is the core of fuzzy control system. It exercises a great influence upon the speed and accuracy of control. In this paper, rule set of fuzzy control is generated by adopting improved BP algorithm. The simulation of inverted pendulum fuzzy control shows a control of quick stability and higher accuracy, which is the evidence for the validity of the authors' method.

Keywords neural network, rules of fuzzy control, BP algorithm