

文章编号: 1001-0920(2001)01-0107-04

# 多变量模糊神经网络控制器的研究

李旭明

(厦门广播电视大学, 福建 厦门 361003)

**摘要:** 提出一种 MIMO 系统的模糊神经网络控制器结构, 阐述了基本设计思想和具体算法过程。应用实例仿真结果表明, 它可用于控制强耦合带时延多变量系统, 并使系统具有良好的动态和静态性能。

**关键词:** 神经网络; 模糊控制; MIMO 系统; 解耦

中图分类号: TP 18

文献标识码: A

## Fuzzy Neural Network Control of Multivariable Systems

LIXuming

(Xiamen Radio and TV University, Xiamen 361003, China)

**Abstract:** A new kind of fuzzy neural network controller structure of MIMO systems is presented. The design of fuzzy neural network and the algorithm are given. The simulation results show that the structure can be used to control the strong coupling time-delay multivariable systems. The control systems have perfect performances in dynamic and static properties.

**Key words:** neural network; fuzzy control; MIMO systems; decoupling

## 1 引言

目前, 模糊神经网络控制系统所控制的对象通常是 MISO 系统, 因为操作者大多只能给出一组如下的二维模糊控制规则: IF (偏差为  $e_i$ , 偏差变化率为  $ce_i$ ) THEN (控制量为  $u_i$ )。若直接推广到多变量系统, 会遇到很多困难。首先, 难以建立一组比较完善的多维(4 维)模糊控制规则; 其次, 用于多变量控制的模糊查询表及关系矩阵 R 将占据大量计算机内存空间和计算时间, 甚至难以用计算机实现。

由于 MISO 系统是多变量系统的特殊情况, 并且在工程实践中所遇到的许多控制对象都是多变量系统, 因此对 MIMO 系统模糊控制方法的研究具有重要意义。目前, 多变量模糊控制系统的研究方兴未艾, 已成为模糊控制领域研究的热点课题<sup>[1-3]</sup>。

## 2 多变量模糊神经网络控制系统的结构

设多变量被控对象为  $N$  输入  $N$  输出的  $N$  变量系统。本文提出的多变量模糊神经网络控制器的设计思想是: 对于  $N$  变量系统, 首先构造  $N$  个 MISO 系统并列且相同的子模糊神经网络, 各子网络结构均为文献[4]给出的优化的 BP 网络: 26-6-15, 且相互独立; 然后通过在线测量的系统给定值和输出值, 计算出各子网络的系统偏差  $e_n$  和偏差变化率  $ce_n$ , 按二输入一输出 MISO 系统模糊神经网络控制器的设计方法<sup>[5]</sup>, 分别计算出各子网络输出的模糊量, 参照重心法解模糊的思想, 对各子网络输出的模糊量进行规范化; 最后构造一个单层神经网络(输入层神经元个数为  $15 \times N$ , 输出层神经元个数为  $N$ ), 把各

收稿日期: 1999-11-08; 修回日期: 2000-03-30

作者简介: 李旭明(1969—), 男, 安徽安庆人, 助教, 硕士, 从事神经网络、模糊控制等研究。

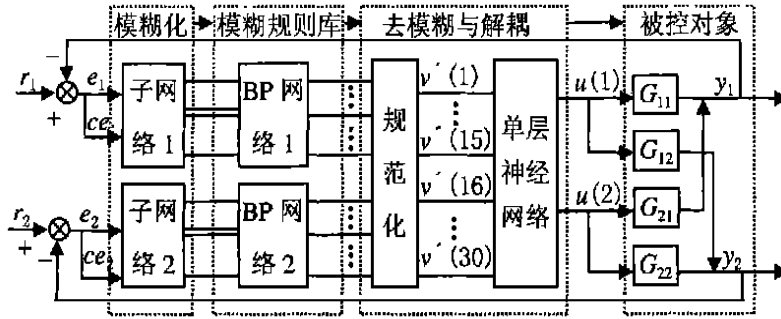


图1 二变量模糊神经网络控制系统

子网络输出信号经规范化后作为单层神经网络的输入信号,单层神经网络通过自主学习调整网络权值,并同时完成系统的解耦工作。

图1给出了一个二输入二输出的模糊神经网络控制系统。由图可知,该多变量模糊神经网络包括两个子网络,一个单层神经网络,输入神经元个数为30,输出神经元个数为2。各子网络相互独立,分别接受一个被控量的给定值和实际值。各子网络在单层神经网络中相互交叉相连,该单层神经网络完成控制规律的综合,形成多变量对象的控制输入。

### 3 多变量模糊神经网络的计算方法

#### 3.1 计算过程

本文的多变量模糊神经网络的计算过程分为3步。现以图1所示的控制系统为例,说明这种算法的具体过程。

第1步:计算各子网络输出层神经元的输出信号。设子网络1输出信号为  $V_1(k)$ ,子网络2输出信号为  $V_2(k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, 15$ 。由图1可见,各子网络分别接受一个被控变量的给定值和实际值,这样就可分别计算出各子网络的系统偏差  $e$  和偏差变化率  $ce$ ;然后将各子网络的  $e$  和  $ce$  模糊化,作为各子网络的输入信号,通过已训练好的BP网络前向计算,即可计算出各子网络的输出信号。以上过程具体实现方法与文献[5]模糊神经控制器设计方法基本相同,只是省去了解模糊环节。网络总的输出信号为

$$V(K) = [V_1, V_2], \quad K = 1, 2, \dots, 30$$

第2步:规范化处理。由于各子网络均省去了解模糊环节,因此子网络的输出信号为模糊量,但最后的控制量必须是精确量。实际上,最后一个单层神经网络包含着解模糊功能,只是采取的方法与前述解模糊方法不同。因此,在进行单层神经网络计算之前,按照重心法的思想,对各子网络总的输出信号

$V(K)$  按式(1)进行规范化处理。即

$$V(K) = \frac{V(K)}{\sum_{K=1}^{30} V(K)}, \quad K = 1, 2, \dots, 30 \quad (1)$$

第3步:单层神经网络计算。该步是最关键的一步,前两步都是为它做准备。它完成控制规律的综合,解模糊形成多变量对象的控制输入,并通过在线学习调整网络权值,完成解耦控制工作。单层神经网络计算包括前向计算和反向计算。

#### 1) 前向计算

$$u(i) = \frac{1}{1 + e^{-o_i + \theta_i}}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

$$o_i = \sum_{m=1}^{30} v_m u_{im}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

式中,  $\theta_i$  为第  $i$  个输出神经元的阈值,  $u_{im}$  是连接第  $i$  个输出神经元的第  $m$  个权重,  $v_m$  是单层神经网络的输入神经元信号。

由于式(2)采用S型函数,因此  $u(i)$  的变化范围为(0, 1)。可通过适当的线性变换由  $u(i)$  得到实际控制输出  $u(i)$ , 比如

$$u(i) = u(i) \times [u(i, \max) - u(i, \min)] + u(i, \min), \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

式中  $u(i, \max)$  和  $u(i, \min)$  分别为执行机构所能动作的最大、最小值。

#### 2) 反向计算

设  $k$  时刻单层网络的输入为  $h_m(k)$ ,  $m = 1, 2, \dots, 30$ ; 相应的权重系数为  $u_m(k)$ ,  $m = 1, 2, \dots, 30$ ; 网络输出的控制作用为  $u_i(k)$ ,  $i = 1, 2$ ; 系统中能测得的是对象的输出误差  $e_l(k) = r_l(k) - y_l(k)$ ,  $l = 1, 2$ 。如果能通过  $e_l(k)$  推算得到网络的输出误差,则训练便可进行下去。文献[6]针对多层网络,通过在线计算多变量对象输出对输入的偏导数而实现以上过程,本文把这种方法用于单层网络的训练,则单层网络权值可调整为

$$u_{im}(k+1) = u_{im}(k) + \beta \delta_i(k) h_m(k) \quad (5)$$

式中

$$\delta_i(k) = - \sum_{l=1}^2 e_l(k) \frac{\Delta y_l(k)}{\Delta u_i(k)} u_{li}(k) [1 - u_{li}(k)] \quad (6)$$

阈值也可相应调整为

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \beta \delta_i(k) \quad (7)$$

式中  $\beta$  和  $\beta$  分别为权值和阈值的学习速率因子。

### 3.2 多变量模糊神经网络初始值的确定

网络初始值直接关系到学习收敛速度和收敛方向,但初值的确定原则目前尚未有系统的理论指导。一般说,这些初值应根据被控对象的特点和人的经验而定。可在调试过程中用试探法来确定某些参数,也可用一些优化算法进行寻优。针对图 1 的控制系统和所选取的被控对象的特点,本文用试探法确定出各变量偏差  $(e_1, e_2)$  论域范围为  $(-0.5, +0.5)$ , 偏差变化率  $(ce_1, ce_2)$  论域范围为  $(-0.25, +0.25)$ 。

图 1 中单层神经网络初始权重和阈值的选取非常重要。它们的初始化可由计算机随机产生,也可根据先验知识人为地加以选择。本文的做法是:首先初步确定初始的权重范围  $(-10, 10)$ , 由计算机随机产生;然后带入系统进行训练,选取其中控制效果最

好的一次网络权值将其保存,作为控制系统初始化的权重。这样便大大加快了网络训练速度,保证了控制系统的稳定性。

### 3.3 控制算法设计

根据以上讨论,按本文方法设计多变量自适应模糊控制器的步骤如下:

- 1) 训练好 BP 网络;
- 2) 确定各变量偏差  $(e_1, e_2)$  和偏差变化率  $(ce_1, ce_2)$  论域,并在其上定义相应的模糊子集,确定执行机构的动作范围,确定单层神经网络权值和阈值的初值,设定相应的参数学习率因子,取  $k = 4$ ;
- 3) 求各变量值  $e_1, e_2, ce_1, ce_2$ , 并将它们模糊化;
- 4) 由 BP 网络求出各子网络输出层的输出信号;
- 5) 规范化处理;
- 6) 按单层神经网络前向计算方法求出网络的控制输出;
- 7) 按单层神经网络反向计算方法在线调整单层网络的权值和阈值;
- 8)  $k = k + 1$ , 返回 4)。

## 4 仿真实例

为了比较,取文献[2]中所用的系统仿真对象,设一个带时延的强耦合二变量非线性对象为

$$y_1(k+1) = \frac{1}{1+y_1^2(k)} [0.8y_1(k) +$$

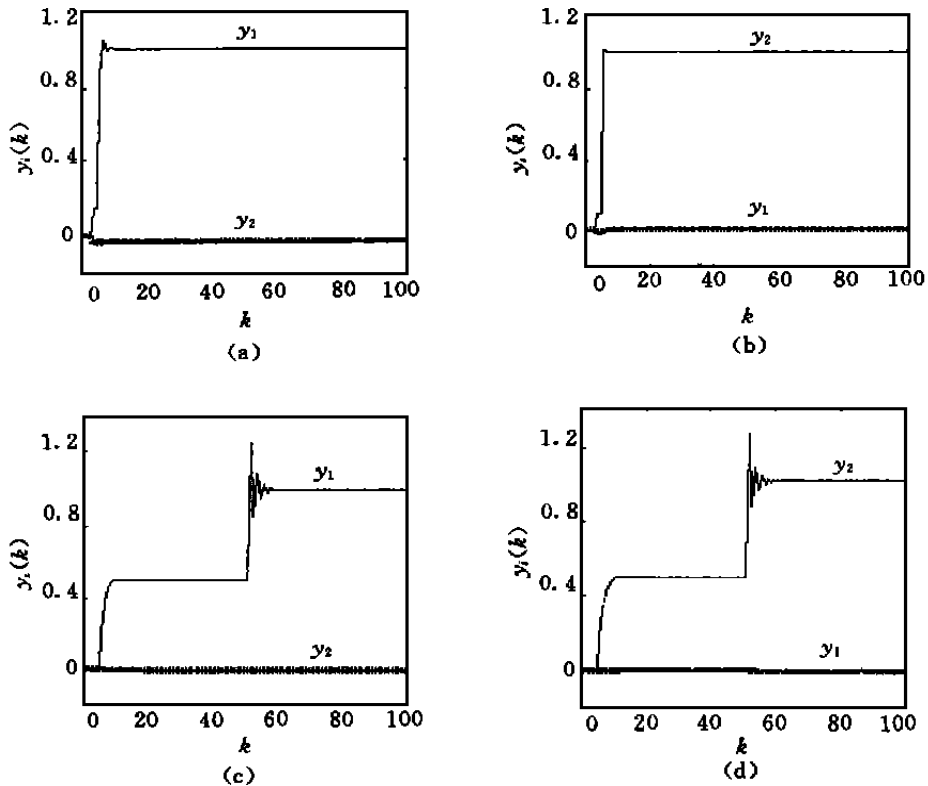


图 2 模糊神经网络控制二变量对象的响应曲线

$$y_2(k+1) = \frac{1}{1+y_2^2(k)} [0.9y_2(k) + 0.3v_1(k-3) + v_2(k-2)]$$

式中  $y_i(z)$  和  $v_i(z)$  ( $i=1, 2$ ) 分别为对象输入量和输出量的  $z$  变换, 给定输入激励为

$$R_{10} = \begin{bmatrix} r_1(k) \\ r_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad R_{01} = \begin{bmatrix} r_1(k) \\ r_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

由于  $R_{10}$  和  $R_{01}$  是两种典型的阶跃输入, 如果系统对  $R_{10}$  和  $R_{01}$  都有良好的响应, 则必满足其它类型输入的响应要求。将  $R_{10}$  和  $R_{01}$  分别送入系统, 学习速率  $\beta$  和  $\beta$  分别取 0.5 和 0.1, 网络中其它初值按 3.2 节确定。网络学习 100 步后, 系统对  $R_{10}$  和  $R_{01}$  的响应如图 2(a), (b) 所示。当  $r_1(k) = 0.5, r_2(k) = 0$  时, 网络训练 50 步后,  $r_1(k)$  跳变为 1,  $r_2(k) = 0$ , 系统响应如图 2(c) 所示。当  $r_1(k) = 0, r_2(k) = 0.5$  时, 网络训练 50 步后,  $r_2(k)$  跳变为 1,  $r_1(k) = 0$ , 系统响应如图 2(d) 所示。

由以上结果可见, 系统的各子网络在单层网络进行控制规则的综合, 通过单层网络权重在线学习修改网络的权重, 自动完成解耦控制, 并且具有良好的动态和静态性能。

## 5 结 论

(上接第 106 页)

## 5 结 论

仿真和实验结果表明, 尽管被跟踪信号不是阶跃函数, 但在一定条件下驱动函数微分方程仍可简化为代数方程。在最优解中增加误差积分修正项, 可有效抑制阶跃型外部干扰的影响。该方法简化了控制器的设计过程, 并使系统在阶跃型外部干扰作用下, 仍能以较高精度跟踪阶跃信号、斜坡信号和正弦信号。这种方法在位置伺服控制系统设计中具有一定的实用价值。

本文提出一种自动完成 M M O 系统解耦控制的多变量系统模糊神经网络控制器, 该控制器具有一定的通用性。这种多变量模糊神经网络控制系统在未知对象参数的情况下, 通过训练和学习可实现系统的解耦控制, 使系统变量之间的相互耦合作用基本消除。给出的仿真实例证明了该方法的有效性。与文献 [2] 结果相比, 本文方法网络收敛速度加快, 超调小, 系统稳定时间快, 实时性能好, 在过程控制中具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 张化光, 杨英旭, 柴天佑. 多变量模糊控制的现状与发展 (I) [J]. 控制与决策, 1995, 10(3): 194-201.
- [2] 舒怀林. PD 神经网络对强耦合带时延多变量系统的解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 1998, 15(6): 920-924.
- [3] 张毅, 李人厚. 基于基因算法的多变量模糊控制器的设计 [J]. 控制理论与应用, 1996, 13(4): 411-415.
- [4] 李旭明, 康赐荣. 基于遗传算法最优模糊控制器设计 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 1999, 20(1): 95-99.
- [5] 李旭明. 神经网络模糊控制器单片机实现 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2000, 39(1): 52-57.
- [6] Psaltis D, Athanasiou Sideris, Alan A Yamamura. A multilayered neural network controller [J]. IEEE Contr Syst Mag, 1988, 8(2): 17-21.

## 参考文献:

- [1] 刘培玉. 应用最优控制 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1990.
- [2] 胡佑德, 曾乐生, 等. 伺服系统原理与设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [3] 张嗣瀛. 现代控制理论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [4] 钟秋海, 付梦印. 现代控制理论与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [5] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计——MATLAB 语言及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [6] 吕小勇. 位置伺服系统最优控制的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 1998.