

文章编号: 1001-0920(2002)01-0123-03

## 二级倒立摆的状态变量合成模糊神经网络控制

杨振强<sup>1</sup>, 朴营国<sup>1</sup>, 程树康<sup>2</sup>

(1. 青岛海信集团 技术中心, 山东 青岛 266071; 2 哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 为解决模糊神经网络在控制多变量系统时的规则组合爆炸问题, 提出用状态变量合成模糊神经网络控制二级倒立摆。该方法既能解决具有快速、强非线性、绝对不稳定系统的控制问题, 又能对状态变量可按性质和类型分类的多变量系统, 大大减少模糊神经网络控制器的规则数, 有利于利用专家的控制经验。实验结果证实了该方法的控制效果好, 鲁棒性强。

**关键词:** 模糊神经网络; 二级倒立摆; 状态变量合成

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

### Control of double inverted pendulum by using state varieties synthesis fuzzy neural network

YAN G Zhen-qiang<sup>1</sup>, PIAO Ying-guo<sup>1</sup>, CHEN G Shu-kang<sup>2</sup>

(1. Technique Center, Qingdao Hisense Lt Co., Qingdao 266071, China; 2 Department of Electric Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A method of controlling a double inverted pendulum is presented in which state varieties synthesis fuzzy neural network controller is used in order to solve the rule number explosion problem in multi-variable. It is helpful to control the systems which have the characteristics of quick speed, serious nonlinear and absolutely unstable systems. It can reduce the rules of fuzzy neural network sharply. Experiment results show the effectivity and robustness of the method.

**Key words:** fuzzy neural network; double inverted pendulum; state variables synthesis

## 1 引 言

二级倒立摆为典型的快速、多变量、强非线性、绝对不稳定系统, 对倒立摆的研究可归结为对多变量绝对不稳定系统的研究。其控制方法和思路对于处理一般的工业过程具有广泛的用途, 对控制方法的研究也具有指导意义。

本文提出用状态变量合成模糊神经网络控制二级倒立摆的方法, 为适应模糊神经网络在控制快速、

强非线性、绝对不稳定系统和解决对多变量系统控制时的规则组合爆炸问题提供了一种方法。对于状态变量可按性质和类型分类的多变量系统, 可以大大减少模糊神经网络控制器的规则数, 有利于利用专家的控制经验。

## 2 二级倒立摆模型

由动力学理论, 二级倒立摆的动力学方程为<sup>[1]</sup>

收稿日期: 2000-06-20; 修回日期: 2000-09-14

作者简介: 杨振强(1963—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士后研究人员, 从事模糊控制、智能控制及工业过程控制等研究; 程树康(1945—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 从事步进电机设计与制造、电动汽车等研制与开发工作。

$$M(\theta, \dot{\theta}) \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + F(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = G(u, \theta, \dot{\theta}) \quad (1)$$

其中

$$M(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} M_0 + M_1 + M_2 & (M_1 l_1 + M_2 L_1) \cos \theta_1 & M_2 l_2 \cos \theta_2 \\ (M_1 l_1 + M_2 L_1) \cos \theta_1 & J_1 + M_1 l_1^2 + M_2 L_1^2 & M_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ M_2 l_2 \cos \theta_2 & M_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) & J_2 + l_2^2 M_2 \end{bmatrix}$$

$$F(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \begin{bmatrix} F_0 & - (M_1 l_1 + M_2 L_1) \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 & - M_2 l_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 \\ 0 & F_1 + F_2 & - M_2 l_2 L_1 \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_1 - F_2 \\ 0 & M_2 l_2 L_1 \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_1 - F_2 & F_2 \end{bmatrix}$$

$$G(u, \theta, \dot{\theta}) = [G_0 u \quad (M_1 l_1 + M_2 L_1) g \sin \theta_1 \quad M_2 l_2 g \sin \theta_2]^T$$

$r, \dot{r}, \ddot{r}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, \theta_1, \dot{\theta}_1, \ddot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2, \ddot{\theta}_2$  分别为小车的位置、速度、加速度, 下摆和上摆与铅垂线的角度、角速度、角加速度,  $g$  为重力加速度, 其它参数详见表 1。

表 1 各参数的意义及数值

参数	参 数 值	意 义
$M_0$	1.600 kg	小车及驱动系统的等效质量
$M_1$	0.185 kg	下摆质量
$M_2$	0.2 kg	上摆质量
$J_1$	0.005 47 kg·m	下摆转动惯量
$J_2$	0.005 49 kg·m	上摆转动惯量
$l_1$	0.283 m	下摆质心至轴心距离
$l_2$	0.245 m	上摆质心至轴心距离
$L_1$	0.483 m	下摆轴心至上摆轴心距离
$F_0$	11.851 9 N·s/m	小车系统的摩擦系数
$F_1$	0.006 415 N·m·s	下摆摩擦阻力系数
$F_2$	0.006 717 N·m·s	上摆摩擦阻力系数
$G_0$	6.688 9 N/V	力与控制电压之比

### 3 二级倒立摆的状态变量合成模糊神经网络控制

二级倒立摆的状态变量有 6 个:  $r, \theta, \theta_2 - \theta_1, \dot{r}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1$ 。将其中表示位置的状态加权合成为一个输入变量, 表示速度的状态加权合成为另一个输入变量, 则可用二变量模糊控制器控制二级倒立摆。这样不仅可以减少控制规则的数量, 而且可以利用人的经验初始化模糊神经网络的权值, 有利于控制器的学习和调整。

控制器框图如图 1 所示。图中模糊神经网络控

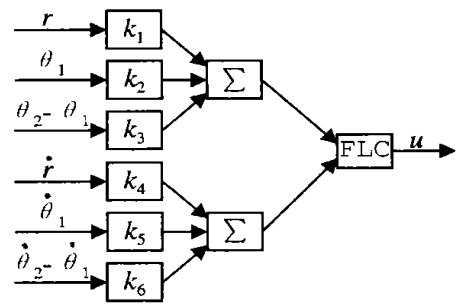


图 1 二级倒立摆状态变量合成模糊神经网络控制器原理

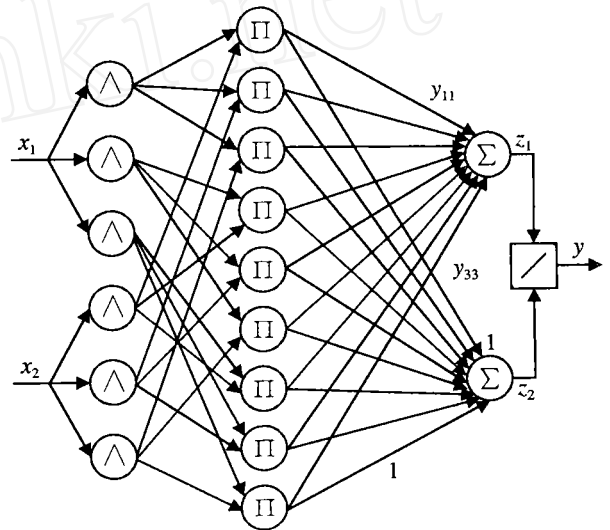


图 2 与式(2)对应的模糊神经网络

制器的结构如图 2 所示, 其中各变量的解释参见文献[2], 其表达式如下<sup>[3]</sup>

$$y = \frac{\prod_{i=1}^M y^{ii} \prod_{i=1}^m \mu_{F_i^i}(x_i)}{\prod_{i=1}^M \prod_{i=1}^m \mu_{F_i^i}(x_i)} \quad (2)$$

其中,  $M$  为模糊规则库中所包含的模糊“如果—则”规则的总数,  $n$  为输入变量的个数,  $\mu_{F_i^i}(x_i)$  为输入变量  $x_i$  在  $F_i^i$  上的隶属函数,  $y^{ii}$  为  $\mu_{G^i}$  取最大值时所对应的点,  $G^i$  为输出空间的模糊集合,  $\mu_{G^i}(y)$  为输出变量  $y$  在  $G^i$  上的隶属函数,  $F_i^i$  为输入空间的模糊集合。式(2)即为用中心法解模糊和乘积推理规则构成的模糊逻辑系统的数学表达式。

模糊神经网络采用高斯隶属函数和乘积推理, 输入空间分为正(P)、零(Z)、负(N)3个。为防止输入空间中有些隶属函数较小, 可采用  $c_1 = \sigma_1, c_3 = \sigma_3$  的方法(下标为 1 的是输入空间为负的隶属函数的中心和方差, 下标为 3 的是输入空间为正的隶属函数的中心和方差)。由于对称, 需要学习的权值为: 后件参数 4 个, 隶属函数参数 4 个, 状态变量的加权值 6 个, 共计 14 个。

表 2 按经验初始的模糊神经网络参数

$\Sigma_{kec}$	后件参数 /N			$\Sigma_{ke}$ 隶属函数参数 /rad			$\Sigma_{kec}$ 隶属函数参数 /(rad/s)			
	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	
N	20.0	9.00	7.00	$\sigma_i$	1.6	1.2	1.6	2.2	1.5	2.2
Z	15.0	0.00	-15.0	$c_i$	-1.6	0.0	1.6	-2.2	0.0	2.2
P	-7.00	-9.00	-20.0							

表 3 按经验初始的控制作用合成参数

$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
0.5	11.0	50.0	4.0	10.0	13.0

表 4 学习后模糊神经网络参数

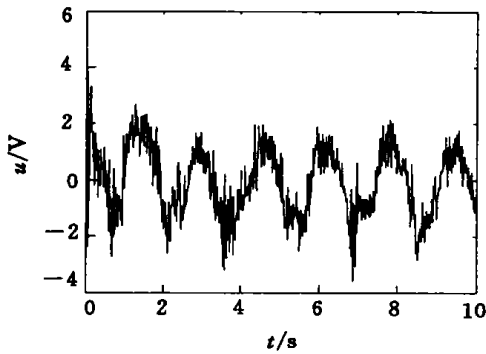
$\Sigma_{kec}$	后件参数 /N			$\Sigma_{ke}$ 隶属函数参数 /rad			$\Sigma_{kec}$ 隶属函数参数 /(rad/s)			
	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	
N	19.1	5.38	8.00	$\sigma_i$	1.488	1.496	1.488	2.560	3.339	2.560
Z	16.8	0.00	-16.8	$c_i$	-1.488	0.000	1.488	-2.560	0.000	2.560
P	-8.00	-5.38	-19.1							

表 5 控制作用合成参数

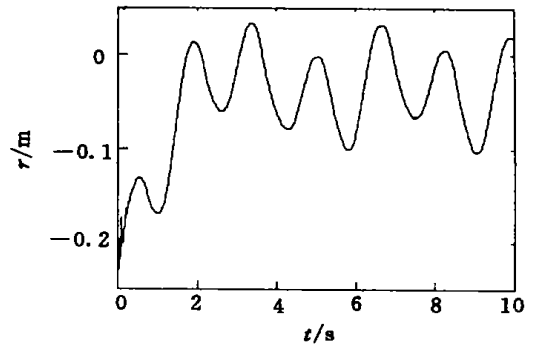
$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
0.688	13.998	59.578	2.031	12.911	11.754

表 2 和表 3 是按经验初始的模糊神经网络控制器的参数。学习算法采用加速的进化规划算法<sup>[3]</sup>, 学

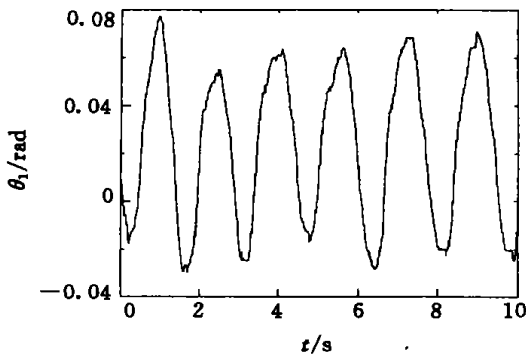
习开始时采用 20 个按经验初始的相同个体。经 70 代的学习结果如表 4 和表 5 所示。



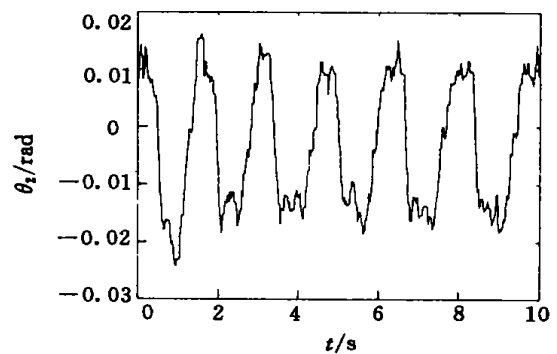
(a) 控制输出



(b) 小车位置



(c) 下摆角度



(d) 上摆角度

图 3 状态变量合成控制二级倒立摆的实时控制曲线

(下转第 128 页)

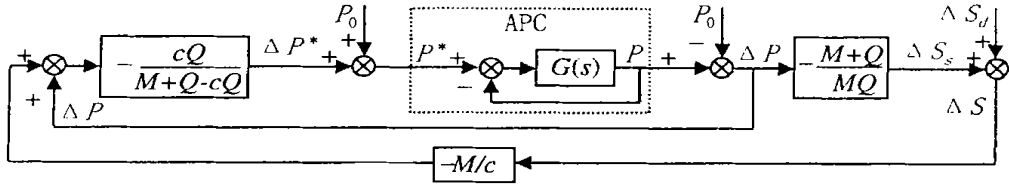


图3 压力闭环下厚度计型变刚度系统

$$-\Delta h_c = \Delta P^* + M \Delta S_p^* / c \quad (19)$$

整理式(15), (16) 有

$$\Delta P^* = \Delta h_c c Q / (M + Q - cQ) \quad (20)$$

$$P^* = P_0 + \Delta P + \Delta P^* \quad (21)$$

式(17), (20) 和(21) 即为采用压力闭环时厚度计型变刚度系统的基本算法。其对应的控制系统原理如图3所示。

## 6 压力闭环下动态设定型和厚度计型变刚度控制模型之间关系

采用压力闭环时, 变刚度模型控制算法的一般形式为

$$P^* = f(\Delta S, \Delta P, S_0, P_0) \quad (22)$$

对于压力闭环下动态设定型变刚度模型控制算法, 将式(13) ~ (15) 代入(16) 得

$$P^* = P_0 + \Delta P (M + Q) / (M + Q - cQ) + \Delta S M Q / (M + Q - cQ) \quad (23)$$

对于压力闭环下厚度计型变刚度模型控制算法, 将式(17) 和(20) 代入(21) 得

$$P^* = P_0 + \Delta P (M + Q) / (M + Q - cQ) + \Delta S M Q / (M + Q - cQ) \quad (24)$$

可见, 式(23) 与式(24) 完全相同。所以, 从变刚度模

型控制算法上可以证明, 压力闭环下的厚度计型变刚度模型和动态设定型变刚度模型是统一的。

## 7 结 语

在压力闭环下如何实现轧机变刚度控制, 是一个重要的问题。本文指出了压力闭环下变刚度控制的必要性, 从轧机变刚度定义出发, 提出了压力闭环下变刚度控制的基本方程, 给出了压力闭环下BIS-RA、厚度计型和动态设定型变刚度控制模型, 并对其相互关系进行了分析讨论。这对于变刚度方法的进一步研究与实际应用都非常有益。

### 参考文献(References):

- [1] 日本钢铁协会 板带轧制理论与实践[M] 王国栋等译 北京: 中国铁道出版社, 1990
- [2] 张进之 压力AGC系统参数方程及变刚度轧机分析[J] 冶金自动化(Metall Ind Autom), 1984, 8(1): 24-31
- [3] 王君, 牛文勇, 王国栋 厚度计型和动态设定型变刚度系统的统一性证明[J] 控制与决策(Control and Decision), 2001, 16(4): 461-464
- [4] 汪祥能, 丁修堃 现代带钢连轧机控制[M] 沈阳: 东北大学出版社, 1996

(上接第125页)

## 4 实验结果

实验结果如图3所示。从实验结果可以看出: 二级倒立摆运行平稳, 这表明状态变量合成模糊神经网络对于具有同种类型和性质状态变量的多变量系统的控制是有效的。

## 5 结 论

本文提出了状态变量合成模糊神经网络控制方法, 对于状态变量可按性质和类型分类的多变量系统, 可以大大减少模糊神经网络控制器的规则数, 有

利于利用专家的控制经验。用加速的进化规划方法优化网络参数, 并用二级倒立摆实验加以证实。实验结果表明, 本文方法的控制效果好且鲁棒性强。

### 参考文献(References):

- [1] Furuta K, Hiroyuki K, Kosuge K Digital control of a double inverted pendulum on an inclined rail[J] Int J of Control, 1980, 32: 907-924
- [2] 杨振强 模糊神经网络控制器的设计与应用[D] 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999 58-62
- [3] 王立新 自适应模糊系统与控制[M] 北京: 国防工业出版社, 1995 18-34