

文章编号: 1001-0920(2007)01-0030-05

一种多电机同步传动模糊神经网络控制器的设计

张承慧, 石庆升, 程 金

(山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061)

摘 要: 设计了具有知识表达和自学习能力的模糊神经网络同步控制器, 建立了模糊控制规则, 进而提出了多电机同步控制的模糊神经网络学习算法. 对四轴同步控制系统进行仿真实验, 结果表明模糊神经网络同步控制器能有效实现多电机同步控制, 收敛速度较快, 鲁棒性较好.

关键词: 同步控制; 相邻耦合误差; 模糊神经网络; 同步误差

中图分类号: TP232 **文献标识码:** A

Design of fuzzy neural network controller for synchronization drive in multi-motor systems

ZHANG Cheng-hui, SHI Qing-sheng, CHENG Jin

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji 'nan 250061, China. Correspondent: ZHANG Cheng-hui, E-mail: zchui@sdu.edu.cn)

Abstract: The inherent knowledge-expressing and self-learning abilities of fuzzy-neural network are used to construct a synchronization controller. Then the fuzzy rules are set and the fuzzy neural network learning algorithm is proposed. Simulation results of the synchronized system with four axes show that the synchronization controller based on the fuzzy neural network can effectively achieve the synchronization control of multi-motors with a quick convergence rate and good robustness.

Key words: Synchronization control; Adjacent coupling error; Fuzzy neural network; Synchronization error

1 引 言

在造纸、印染、纺织等高精度、高转速传动系统中, 多电机同步控制历来是最核心的问题. 同步控制算法的好坏直接影响着系统的可靠性和产品的质量^[1,2]. 常规的控制方案(如 PID 控制), 在实际运行过程中很难满足高性能调速系统的要求, 不能取得满意的控制效果. Turf 等^[3,4]提出的耦合补偿控制策略, 虽然在一定程度上改善了同步性能, 但对于多电机($n > 2$)耦合补偿控制难以奏效, 主要存在两方面问题: 一是难以确定合理的耦合补偿参数; 二是不能从根本上消除同步误差, 稳态性能不很理想. Shih 等^[5]提出的相邻耦合控制策略, 理论上可得到较为理想的同步控制性能, 但在实际工程中, 由于驱动轴的动态特性参数难以辨识以及系统的非线性等因素, 使得该策略的应用受到了很大限制.

模糊神经网络具有良好的自学习和非线性逼近能力, 可以有效地克服复杂系统中的参数时变、非线性等问题^[6]. 为了充分利用模糊神经网络的自学习和非线性逼近能力, 本文基于相邻耦合误差控制策略, 设计了模糊神经网络同步控制器, 给出了相应的学习算法. 仿真和实验结果表明, 模糊神经网络控制器能有效地实现相邻耦合误差同步控制策略, 得到理想的同步控制性能.

2 多电机的同步控制结构

现代高速造纸机是典型的多电机同步控制系统, 普遍采用变频交流调速方案. 设计每轴的控制结构如图 1 所示, 控制器以变频器的给定频率为控制量, 通过变频器控制各台交流电机的转速.

在图 1 中, y_{r_i} 为第 i 轴的速度参考指令, y_i 为第

收稿日期: 2005-10-06; 修回日期: 2005-12-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50477042); 高等学校博士点基金项目(20040422052); 山东省自然科学基金项目(Z2004G04).

作者简介: 张承慧(1963—), 男, 山东陵县人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、电力电子技术等研究; 石庆升(1981—), 男, 山东沂水人, 博士生, 从事最优控制、神经网络等研究.

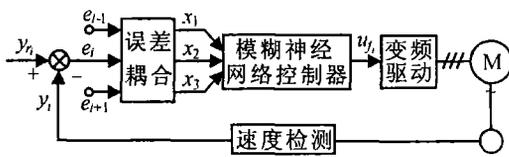


图 1 每轴的同步控制结构

i 轴的运行速度, f_i 为第 i 轴变频器的给定频率, u_{fi} 为第 i 轴模糊神经网络控制器的控制输出, e_{i-1}, e_i 和 e_{i+1} 分别为 $i-1$ 轴、 i 轴和 $i+1$ 轴的速度跟踪误差。

根据相邻耦合误差同步控制策略, 每轴的控制需要耦合相邻两轴的状态, 即有下式成立:

$$\begin{cases} u_1(t) = \dot{y}_1(t) + [1(t) - n(t)] + e_1^*(t), \\ u_2(t) = \dot{y}_2(t) + [2(t) - 1(t)] + e_2^*(t), \\ \dots \\ u_n(t) = \dot{y}_n(t) + [n(t) - n-1(t)] + e_n^*(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $u_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为第 i 轴的控制函数, $i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为第 i 轴的同步误差, 和 为正的耦合系数, 用以平衡系统的跟踪性能和同步性能。

模糊神经网络控制器的各输入为

$$\begin{aligned} x_1 &= \dot{y}_i(t), & (2) \\ x_2 &= \dot{e}_i^*(t) = \dot{e}_i(t) + [i(t) - i-1(t)], & (3) \\ x_3 &= e_i^*(t) = \\ & e_i(t) + \int_0^t [i(\cdot) - i-1(\cdot)] d\cdot. & (4) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{cases} e_i(t) = y_{ri} - y_i, & (5) \\ \begin{cases} 1(t) = e_1(t) - e_2(t), 2(t) = e_2(t) - e_3(t), \\ \dots, n(t) = e_n(t) - e_1(t). \end{cases} & (6) \end{cases}$$

3 多电机模糊神经网络同步控制器的结构及学习算法

模糊神经网络是人工神经网络与模糊逻辑推理相结合而形成的一种新型智能计算方法, 它将人工神经网络的自学习和适应性与模糊逻辑的不确定推理有机地结合起来。理论研究表明, 具有线性规则的三维模糊控制器, 可等同于一个全局多层次线性关系式和一个 PID 控制器^[7]。当受控对象是非线性过程时, 模糊控制器与非模糊 PID 控制器的性能几乎相同; 当受控对象具有延迟等非线性时, 模糊控制器的性能优于非模糊 PID 控制器的性能。应用具有模糊结构的等价神经网络可实现对多电机跟踪误差和同步误差的耦合控制, 并能取得期望的性能指标。

3.1 模糊神经网络控制器的结构

模糊神经网络同步控制器为具有 6 个隐含层的前向网络, 其结构如图 2 所示。

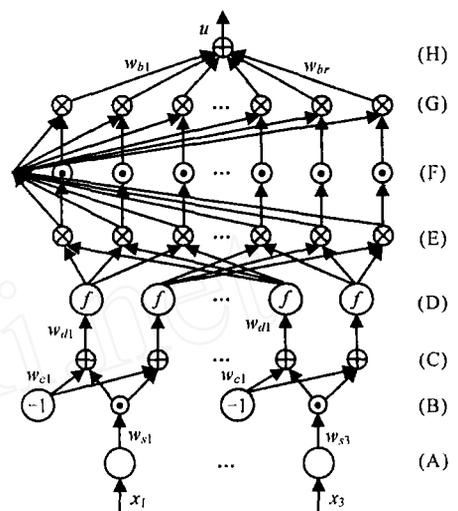


图 2 模糊神经网络同步控制器结构

图中 (A) 和 (E) 层为完成控制规则的前提部分, (F) 层表示规则, (G) 和 (H) 层表示规则的结论部分 (控制动作)。网络的输入为 (x_1, x_2, x_3) , 输出为 u 。各层之间的输入 - 输出关系如下:

- (A) 层: $I_j^a = x_j, O_j^a = I_j^a, j = 1, 2, 3;$
- (B) 层: $I_j^b = w_{sj} O_j^a, O_j^b = I_j^b, j = 1, 2, 3;$
- (C) 层: $I_j^c = O_j^b - w_{qj}, O_j^c = I_j^c, j = 1, 2, 3,$
 $x_1: i = 1, 2, \dots, 7, x_2: i = 1, 2, 3,$
 $x_3: i = 1, 2, \dots, 7;$
- (D) 层: $I_{ji}^d = O_j^c w_{dji}, O_{ji}^d = e^{-(I_{ji}^d)^2},$
 $j = 1, 2, 3, x_1: i = 1, 2, \dots, 7,$
 $x_2: i = 1, 2, 3, x_3: i = 1, 2, \dots, 7;$
- (E) 层: $I_{ji}^e = O_{ji}^d O_{2j}^d O_{3k}^d, O_m^e = (I^e)_{i \times j \times k},$
 $i = 1, 2, \dots, 7, j = 1, 2, 3,$
 $k = 1, 2, \dots, 7, m = 1, 2, \dots, 147;$
- (F) 层: 第 0 号节点 $I_0^f = \prod_{k=1}^r O_k^e, O_0^f = 1/I_0^f,$
 $r = 147,$ 其余节点 $I_k^f = O_k^e, O_k^f = I_k^f;$
- (G) 层: $I_k^g = O_0^f O_k^f, O_k^g = I_k^g, k = 1, 2, \dots, 147;$
- (H) 层: $I_k^h = O_k^g w_b^k, O^k = \prod_{k=1}^r I_k^g, r = 147.$

其中网络参数 w_s, w_c, w_d 可根据 x_i 的论域确定。

3.2 多电机同步控制器的模糊规则

模糊规则是模糊神经网络控制器设计的首要部分。一般情况下, 模糊神经网络的模糊控制规则形式可表示为

$$\begin{aligned} R^i: & \text{ If } x_i \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i \text{ and } x_3 \text{ is } A_3^i, \\ & \text{ Then } u \text{ is } B^i, i = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

其中: R^i 表示第 i 条规则, x_j 为系统输入。

设定 x_1, x_2, x_3 和 u 模糊集分别为

$$x_1 = [-5, +5],$$

$$A_1^i = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\};$$

$$x_2 = [-2.5, +2.5],$$

$$A_2^i = \{N, Z, P\};$$

$$x_3 = [-5, +5],$$

$$A_3^i = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\};$$

$$u = [-6, +6],$$

$$B^i = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}.$$

使用 $7 \times 3 \times 7 = 147$ 条模糊控制规则作为网络的初始学习规则. 控制规则如表 1 ~ 表 3 所示.

表 1 $x_2 = N$ 的控制规则

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-4.0	-4.0	-4.0
NM	-6.0	-6.0	-4.0	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0
NS	-6.0	-4.0	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0
ZO	-4.0	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0	0.0
PS	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0	0.0	2.0	2.0
PM	-2.0	-2.0	-2.0	0.0	2.0	2.0	4.0
PB	-2.0	-2.0	0.0	2.0	2.0	4.0	4.0

表 2 $x_2 = Z$ 的控制规则

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	-6.0	-6.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-2.0
NM	-6.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0
NS	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0	0.0	2.0	2.0
ZO	-4.0	-2.0	-2.0	0.0	2.0	2.0	4.0
PS	-2.0	-2.0	0.0	2.0	2.0	4.0	4.0
PM	-2.0	0.0	2.0	4.0	4.0	4.0	6.0
PB	0.0	2.0	4.0	4.0	6.0	6.0	6.0

表 3 $x_2 = P$ 的控制规则

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	-6.0	-4.0	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0
NM	-4.0	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0	0.0
NS	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0	0.0	2.0
ZO	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0	0.0	2.0	2.0
PS	-2.0	-2.0	0.0	2.0	2.0	4.0	4.0
PM	0.0	2.0	2.0	4.0	4.0	6.0	6.0
PB	2.0	4.0	4.0	6.0	6.0	6.0	6.0

分析式(1)~(3)可以发现, x_1, x_2, x_3 中包含第 i 轴的跟踪误差(比例和微分量)以及同步误差(比例和积分量),从而使系统能够兼顾跟踪性能和同步性能.

模糊神经网络的控制规则可依据系统的动态特性而建立. 相同的动态特性会产生相同的控制行为. 首先根据系统振荡、过阻尼、欠阻尼等简单的动态特性,为模糊控制规则的设计提供必要的信息;然后根据实时控制特性,由神经网络优化控制器参数. 这种设计的出发点是认为控制器的输出取决于系统

的动态特性,而不是系统的解析模型.

3.3 多电机模糊神经网络同步控制器的学习算法

根据相邻耦合误差同步控制算法,每轴的控制应使本轴的跟踪误差和与其他两轴的同步误差稳定收敛. 为此,定义误差函数

$$E(t) = \frac{1}{2} \{ e_i^2(t) + [i_i(t) - i_{i-1}(t)]^2 \}. \quad (7)$$

为了便于工程应用,采用 BP 算法调整隶属度函数的中心值和宽度,从而调整模糊控制规则. 根据 BP 算法,网络权值的学习规则为

$$w(k+1) =$$

$$w(k) + (-\frac{\partial E}{\partial w}) + a[w(k) - w(k-1)]. \quad (8)$$

其中: $\eta > 0$ 为学习速率, a 为平滑因子.

由式(8)知,只要求出偏导数 $\partial E / \partial w$, 便可得出权值调整式的值. 权值的学习运算从输出层向前层方向进行.

(H) 层权值 w_b 的调整: (H) 层的输出为

$$u = \sum_{k=1}^r O_k^g w_{bk}. \quad (9)$$

由式(2), (3), (5), (6) 和(8) 可得

$$\frac{\partial E}{\partial w_{bk}} = \frac{\partial E}{\partial y_i} \frac{\partial y_i}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial w_{bk}} =$$

$$- (x_1 + x_2) \frac{\partial y_i}{\partial u} O_k^g. \quad (10)$$

其中 $\partial y_i / \partial u$ 在被控对象未知时可近似为

$$\frac{\partial y_i}{\partial u} = \frac{y_i[u(k+1)] - y_i[u(k)]}{u(k+1) - u(k)} =$$

$$\frac{y_i[u(k) + u(k)] - y_i[u(k)]}{u(k)}. \quad (11)$$

定义(H)层反传误差信号

$$h_k^h = -\frac{\partial E}{\partial I_k^h} = -\frac{\partial E}{\partial O^h} \frac{\partial O^h}{\partial I_k^h} =$$

$$-\frac{\partial E}{\partial y_i} \frac{\partial y_i}{\partial O^h} f(I_k^h) =$$

$$- (x_1 + x_2) \frac{\partial y_i}{\partial O^h} f(I_k^h), \quad (12)$$

其中 $f(I_k^h) = 1$.

由式(10)和(12)得

$$-\frac{\partial E}{\partial w_{bk}} = -\frac{\partial E}{\partial I_k^h} \frac{\partial I_k^h}{\partial w_{bk}} = h_k^h O_k^g. \quad (13)$$

因此(H)层权值 w_b 的调整公式为

$$w_{bk}(k+1) =$$

$$w_{bk}(k) + h_k^h O_k^g +$$

$$a[w_{bk}(k) - w_{bk}(k-1)]. \quad (14)$$

(G)层没有权值调整,只需计算反传误差信号

$$g_k^g = -\frac{\partial E}{\partial I_k^g} = -\frac{\partial E}{\partial O_k^g} \frac{\partial O_k^g}{\partial I_k^g} =$$

$$-\frac{\partial E}{\partial I_k^h} w_{ik}^h \frac{\partial O_i^g}{\partial I_k^g}$$

设 I_k^L 为网络中其他中间层的反传误差信号,可用上述方法求出

$$I_k^L = f(I_k^L) \sum_i I_i^{L+1} w_{ki}^{L,L+1}, \quad (15)$$

$$I_k^L = f(I_k^L) \sum_i I_i^{L+1} w_{ki}^{L,L+1} \left[\sum_{j=1}^{L+1} w_{ji}^{L,L+1} O_j^L \right]. \quad (16)$$

式(15)为(B),(C),(E)和(G)层反传误差系数的计算式,式(16)为(D)和(F)层的计算式。

对于(D)层, $f(I_k^L) = -2I_k^L O_k^L$; 对于(F)层第0号节点, $f(I_k^L) = -(O_k^L)^2$; 对于(F)层其余线性节点, $f(I_k^L) = 1$ 。

从上面推导的结果,可得网络权值 w_c 和 w_d 连接权值调整公式

$$\begin{cases} w_{d_i}(k+1) = w_{d_i}(k) + \frac{p}{i} O_i^C + a w_{c_i}, \\ w_{c_i}(k+1) = w_{c_i}(k) + \frac{c}{i} O_i^B + a w_{c_i}. \end{cases} \quad (17)$$

上述模糊神经网络的同步控制学习算法可归纳如下:

- 1) 定义误差函数;
- 2) 根据网络权值的学习规则,求得误差函数对权值的偏导数 $\partial E/\partial w$;
- 3) 利用步骤 2) 中的 $\partial E/\partial w$,从输出层向前层方向进行,依次求得各层的权值调整公式;
- 4) 按各调整公式进行权值的调整。

4 仿真实验及分析

4.1 实验参数设置

下面以采用 YS 系列三相异步电机的四轴同步控制系统为例,在有干扰和无干扰两种情况下进行仿真实验。

各电机的实验结构如图 1 所示,每台电机的转速通过速度检测后,与给定转速进行比较,得到该轴的跟踪误差。该轴跟踪误差与相邻跟踪误差经过误差耦合后,进入模糊神经网络控制器。控制器输出控制量,通过变频器去控制各电机的转速,最终达到各电机的同步控制。在 - 定子静止坐标系下,电机模型的主要参数设置如表 4 所示。其中: P_e 为电机功率, R_s 和 R_r 分别为定子和转子电阻, L_{ls} , L_{lr} 和 L_m 分别为定子绕组漏感、转子绕组漏感、定子和转子绕组互感, J 为转动惯量, p 为极对数。

表 4 4 台电机的参数设置

序号	P_e/kW	$R_s/$	$R_r/$	L_{ls}/H	L_{lr}/H	L_m/H	J	p
电机 1	2.2	0.435	0.816	2.0e-3	2.0e-3	69.31e-3	0.089	2
电机 2	2.2	0.435	0.816	2.0e-3	2.0e-3	69.31e-3	0.089	2
电机 3	2.5	0.225	0.536	2.5e-3	1.0e-3	69.35e-3	0.092	2
电机 4	2.5	0.225	0.536	2.5e-3	1.0e-3	69.35e-3	0.092	2

4 台电机同步运行参考速度设为 $y_r = 1\ 000$ rad/s。耦合误差参数取 $\alpha = 5$, $\beta = 4$ 。模糊神经网络的参数初值设置如下:

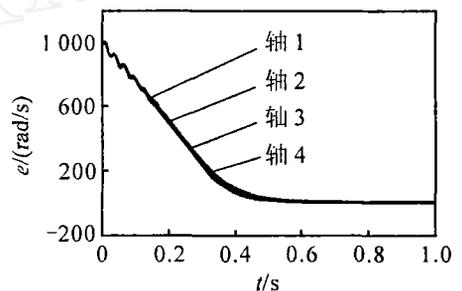
$$w_c(0) = \{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\},$$

$$w_d(0) = \{1\}, w_{s1}(0) = 2,$$

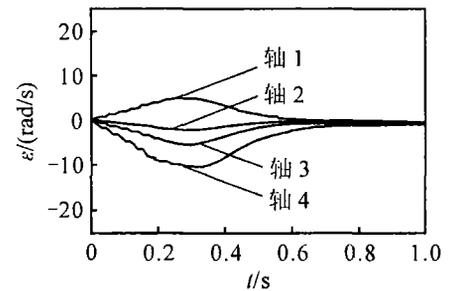
$$w_{s2}(0) = 4, w_{s3}(0) = 2.$$

4.2 实验结果

实验 1 同一速度参考指令下 4 台电机的跟踪误差和同步误差阶跃响应。实验结果如图 3 所示。



(a) 各电机的跟踪误差



(b) 各电机的同步误差

图 3 无干扰时各电机的跟踪误差和同步误差

从图中看出,在启动过程中,系统的同步误差最大为 -22.5 rad/s,同步控制精度为 2.25% ,稳态时的最大同步误差为 0.15 rad/s,同步控制精度为 0.015% ,能够达到高速同步控制系统的性能指标要求。

实验 2 负载突变时(2 ~ 3 s)系统的跟踪误差和同步误差响应。实验结果如图 4 所示。

从图中看出,控制器对外部扰动具有较快的收敛速度,且在扰动的情况下保持同步误差近乎为零,最大同步误差为 0.26 rad/s,同步控制精度为 0.026% ,能较好地达到高速同步控制系统的性能指标要求。

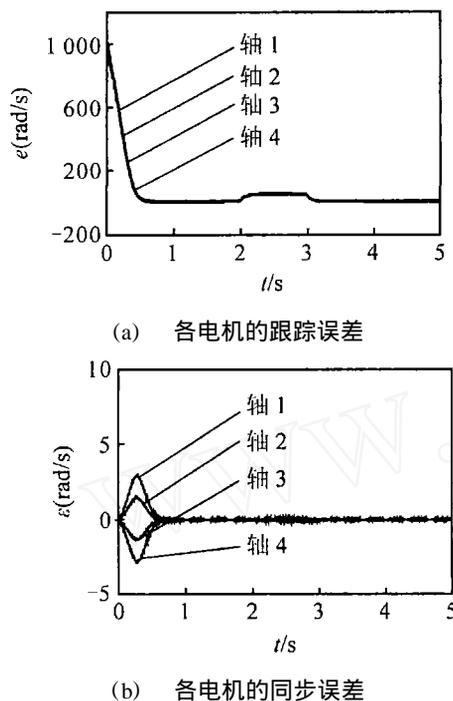


图4 有干扰时各电机的跟踪误差和同步误差

仿真结果表明,在无外部扰动和有外部扰动两种情况下,控制系统都能以较快的速度收敛且稳定运行,具有较好的动态性能和同步性能.它充分证明了模糊神经网络多电机同步控制策略的有效性.

将新型多电机同步传动模糊神经网络控制算法用于贝加莱公司的四轴同步电机运动控制系统,所得的实验结果与图3和图4的仿真结果一致.这进一步证明了同步控制器具有十分理想的动态性能和同步性能.

5 结 论

本文对造纸、印染等工业中的多电机同步控制问题进行研究.在实际工程应用中,由于非线性及参数辨识困难等因素,导致电机驱动轴数学模型难以建立,从而限制了现有相邻耦合误差控制策略的实际应用效果.本文利用模糊神经网络内在的知识表达和自学习能力,构建了每一传动轴的同步控制器,给出了控制器的结构、模糊控制规则和学习算法,并

对四轴同步系统进行了仿真实验.仿真和实验结果表明,基于模糊神经网络实现的同步控制器,能有效实现多台电机的相邻耦合误差同步控制策略,系统具有较高的同步控制精度和较快的收敛速度,且鲁棒性较好.

参考文献(References)

- [1] 刘福才,张学莲.多级电机传动系统同步控制理论与应用研究[J].控制工程,2002,9(4):87-89.
(Liu F C, Zhang X L. Synchronous control theory and practical study of multi-motor synchronous driving system[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(4): 87-89.)
- [2] 成玲,何勇.印染机械多电机同步控制系统[J].纺织学报,2005,26(1):97-99.
(Cheng L, He Y. Synchronous speed control system with PLC[J]. J of Textile Research, 2005, 26(1): 97-99.)
- [3] Turl G, Summer M. A multi-induction-motor drive strategy operating in the sensorless mode[C]. 36th IAS Annual Meeting. Chicago, 2001, 1:1232-1239.
- [4] Chen C S, Shieh Y S. Cross-coupled control design of bi-axis feed drive servomechanism based on multitasking real time kernel[C]. Proc of the 2004 IEEE Int Conf on Control Applications. Taipei, 2004:57-62.
- [5] Shih Y T, Chen C S, Lee A C. A novel cross-coupling control design for bi-axis motion[J]. Int J of Machine Tool and Manufacture, 2002, 42(1):1539-1548.
- [6] 王士同.模糊系统、模糊神经网络及应用程序设计[M].上海:上海科学技术文献出版社,1998.
(Wang S T. Fuzzy system, fuzzy-neural network and application programming design [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 1998.)
- [7] 刘向杰,柴天佑,张焕水.三维模糊控制器的结构研究[J].自动化学报,1998,24(2):230-235.
(Liu X J, Chai T Y, Zhang H S. Structure analysis of three dimensional fuzzy controller[J]. Acta Automatica Sinica, 1998, 24(2): 230-235.)

下 期 要 目

- | | |
|----------------------------------|---------|
| 网络系统的服务质量保障与控制综述 | 梁 泉,等 |
| 动态环境中的进化算法 | 王洪峰,等 |
| 一类非线性多时滞系统的干扰解耦控制 | 宫清先,等 |
| 在线稀疏最小二乘支持向量机回归的研究 | 王定成,姜 斌 |
| 重复购买产品的竞争与市场扩散行为分析 | 马开平,严洪森 |
| SMDP 基于 Actor 网络的统一 NDP 方法 | 唐 昊,等 |
| 基于分布参数控制理论的可变质产品最优经营策略 | 李 桃,等 |