

文章编号: 1000-8152(2001)05-0657-05

# 一种新的递阶多变量模糊控制器的设计\*

王海清 宋执环 李平

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 工业控制技术研究所·杭州, 310027)

**摘要:** 针对多变量模糊控制器设计中存在规则库维数过高、隶属函数以及规则库难于获取的问题, 提出一种新的递阶模糊控制器(NHFLC), 使得总的规则数大大减少, 且无需了解各输入变量对系统的影响程度. 基于该控制器结构下的模糊控制策略利用遗传算法来获得. 仿真结果表明 NHFLC 与通常的 MIMO 模糊控制器相比, 具有更好的动态性能和鲁棒稳定性.

**关键词:** 递阶结构; 模糊控制; 遗传算法; 多变量系统

**文献标识码:** A

## The Design of a Novel Hierarchical Multivariable Fuzzy Controller

WANG Haiqing, SONG Zhihuan and LI Ping

(National Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University · Hangzhou, 310027, P. R. China)

**Abstract:** To treat the difficulties in the design of MIMO fuzzy controller, which arise as high dimensional rule-bases and the acquirement of the membership functions and rules, a novel hierarchical fuzzy logical controller (NHFLC) is presented in this paper. Based on the proposed controller, empirical information and expert knowledge about the process are not needed, and the total number of rules is drastically decreased. Genetic algorithm is used to obtain the fuzzy control strategies for the NHFLC. The simulation results show the proposed NHFLC has better dynamic performance and robust stability than the conventional MIMO fuzzy controller.

**Key words:** hierarchical structure; fuzzy control; genetic algorithm; MIMO system

### 1 引言(Introduction)

模糊控制在复杂、时变以及模型不精确控制系统中已被证实是很有效的, 出现过许多成功运用的例子. 但是在利用模糊理论设计多变量控制器时, 存在两个主要问题: 第一, 当输入变量的个数很大时, 模糊规则的可选取空间急剧增大, 可以证明每新增一个状态变量, 模糊规则数将呈指数增加. 由于高维的规则库导致大量的推理时间和数据存储空间, 使得多变量系统的模糊控制在实际中难以应用; 第二, 模糊变量的隶属函数的正确选取对系统的性能及控制作用有着很大的影响, 而通常的设计方法是用实验试凑的方法来获得模糊隶属函数, 另外模糊控制规则的获取依赖于专家经验, 因此当系统较复杂或可供利用的经验较少时, 要设计一个控制效果满意的多变量模糊控制器是很困难的.

本文在普通的模糊控制器和最近出现的递阶模糊控制器<sup>[1, 2]</sup>的基础上, 提出了一种新型的递阶模

糊控制器, 然后采用遗传算法来获得该控制器结构下的模糊控制策略, 避免了上述设计中的两个困难.

### 2 递阶多变量模糊控制器(Hierarchical multivariable fuzzy controller)

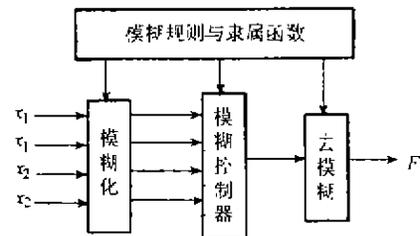


图 1 4输入-1输出 MFLC 结构图

Fig. 1 Diagram of a four-input and one-output MFLC

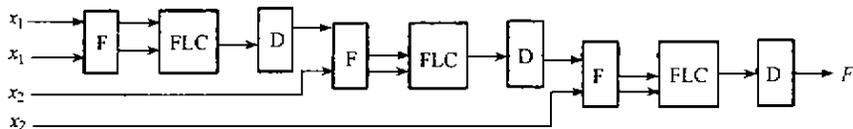
在 SISO 模糊控制器中控制算法包括 2 个规则前提(状态  $x$  及其变化量  $\dot{x}$ ), 以及一个结论(控制变量  $F$ ). 对于多变量的一般处理方法就是将其简单组合起来, 构成多变量模糊控制器(MFLC). 由于 MIMO 系统可以分解成多个 MISO 系统<sup>[2]</sup>, 不失一般

\* 基金项目: 国家自然科学基金(69704006)资助项目.

收稿日期: 1999-01-21; 收修改稿日期: 2000-10-31

性,本文只考虑多输入-单输出模糊系统.如图1所示为4输入-1输出MFLC结构图.

然而上述结构的MFLC控制器在实际中是不可行的.例如对 $N$ 个输入变量的模糊控制器,每个状态变量有 $Q_i(i=1,2,\dots,N)$ 个模糊变量值,一共组成 $Q_1 \times Q_2 \times \dots \times Q_N$ 条规则.假设各状态变量的模糊值取为同一论域的模糊子集,如取 $Q_1 = Q_2 = \dots$



(F 模糊化 FLC: 模糊控制器 D: 去模糊)

图2 4输入-1输出HFLC结构图

Fig. 2 Diagram of a four-input and one-output HFLC

Raju证明了这种HFLC的规则数达到最小,仅为变量个数的线性函数(而不是MFLC控制器的指数关系),这就解决了前面提到的问题1.然而设计HFLC要求事先知道各输入状态变量对系统的影响程度,这在实际中是难以做到的.另外采取递阶结构虽大大减少了规则数,但同时也增加了模糊控制器的设计难度.因为中间层的输出一般没有实际物理意义,而且各层之间均需增加模糊化/去模糊比例因子,使得问题2更加复杂.

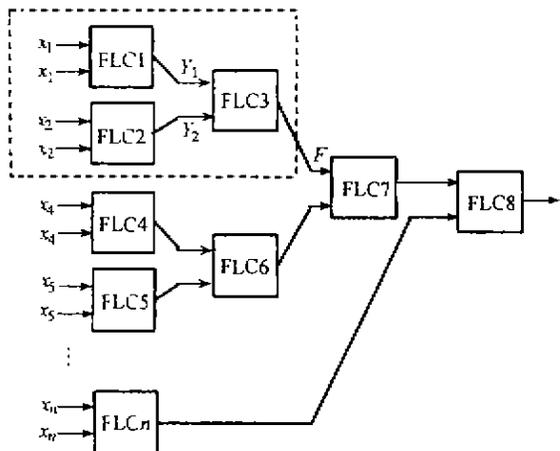


图3 一般情况下的NHFLC结构图

Fig. 3 Diagram of a general NHFLC

本文在此基础上提出一种新的递阶控制器(NHFLC),如图3所示.图中各输入状态变量可按任意顺序两两组合,不需知道其对系统的影响程度.当中间层输入变量数为奇数时则直接与下一层的变量组合,可见NHFLC的规则数至少和HFLC的一样多.而且所有输入量均作用于第一层,中间层无需比例因子<sup>[2, 6]</sup>,其控制策略比HFLC要简单.整个NHFLC的推理过程是这样的:首先利用模糊推理得出第一层各输出,此输出又作为第二层的输入继续

$= Q_N = Q = \{N, P, Z\}$ ,则 $N = 4$ 时总的规则数为 $Q^N = 3^4 = 81$ ,变量数与规则数成指数关系.Raju<sup>[1]</sup>提出一种多层、递阶结构的模糊控制器(HFLC).首先由系统设计者根据输入变量对过程的影响程度将各输入量划分等级,将影响最大的2个变量放在第一级,然后将第一级输出与影响次之的另一个变量放在第二级,依此类推下去.如图2所示:

推理下去,直至最后一层,得到总的输出.

下面以图3的虚线框部分为例说明NHFLC控制器在模糊逻辑上的可行性.图中模糊控制器输入为 $X_1$ 和 $X_2$ , $X_2$ 和 $X_2$ ,中间层输入为 $Y_1$ 和 $Y_2$ ,过程输出为 $F$ .MFLC的关系矩阵 $R$ 为:

$$R = \bigvee_1^Q \{ \mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1} \wedge \mu_{x_2} \wedge \mu_{x_2} \wedge \mu_F \}. \quad (1)$$

式中模糊子集 $X_1, X_2, F$ 分别由它们的隶属函数表示. $\bigvee$ 为“取大”操作, $\wedge$ 为“取小”操作.假设上述模糊关系是线性相关的,则关系矩阵可表为:

$$R = \bigvee_1^Q \{ (\mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1} \wedge \mu_F) \wedge (\mu_{x_2} \wedge \mu_{x_2} \wedge \mu_F) \}. \quad (2)$$

由规则合成推理可得控制器输出的隶属函数:

$$\mu_F = (\mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1} \wedge \mu_{x_2} \wedge \mu_{x_2}) \circ R = [(\mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1}) \circ R] \wedge [(\mu_{x_2} \wedge \mu_{x_2}) \circ R]. \quad (3)$$

由于某一论域中的模糊子集与另一个不关联的论域中的规则进行合成运算的结果为空集,例如, $(\mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1})$ 与 $(\mu_{x_2} \wedge \mu_{x_2} \wedge \mu_F)$ 合成结果为空集.即:

$$\begin{aligned} & (\mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1}) \circ R = \\ & [(\mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1}) \circ \bigvee_1^Q \{ \mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1} \wedge \mu_F \}] \vee \\ & [(\mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1}) \circ \bigvee_1^Q \{ \mu_{x_2} \wedge \mu_{x_2} \wedge \mu_F \}] \vee \\ & [(\mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1}) \circ \bigvee_1^Q \{ \mu_{x_1} \wedge \mu_{x_1} \wedge \mu_F \}]. \quad (4) \end{aligned}$$

同理成立

$$\begin{aligned} & (\mu_{x_2} \wedge \mu_{x_2}) \circ R = \\ & [(\mu_{x_2} \wedge \mu_{x_2}) \circ \bigvee_1^Q \{ \mu_{x_2} \wedge \mu_{x_2} \wedge \mu_F \}]. \quad (5) \end{aligned}$$

故式(3)又可写为:

$$\begin{aligned} \mu_F & [(\mu_{x_1} \wedge \mu_{\dot{x}_1}) \circ \bigvee_1^Q \{ \mu_{x_1} \wedge \mu_{\dot{x}_1} \wedge \mu_{F'} \}] \wedge \\ & [(\mu_{x_2} \wedge \mu_{\dot{x}_2}) \circ \bigvee_1^Q \{ \mu_{x_2} \wedge \mu_{\dot{x}_2} \wedge \mu_{F'} \}] = \\ & [(\mu_{x_1} \wedge \mu_{\dot{x}_1}) \circ R_{x_1 f}] \wedge [(\mu_{x_2} \wedge \mu_{\dot{x}_2}) \circ R_{x_2 f}]. \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $R_{x_1 f}$  为第 1 层输入量 ( $X_1$  和  $\dot{X}_1$ ) 与输出  $F$  的关系矩阵;  $R_{x_2 f}$  为第 1 层输入量 ( $X_2$  和  $\dot{X}_2$ ) 与输出  $F$  的关系矩阵。

由关系矩阵合成运算的性质有:

$$R_{x_1 f} = R_{x_1 y_1} \circ R_{y_1 f}, \quad R_{x_2 f} = R_{x_2 y_2} \circ R_{y_2 f}. \quad (7)$$

式中  $R_{x_1 y_1}$  为第 1 层输入量 ( $X_1$  和  $\dot{X}_1$ ) 与第 2 层(中间层)  $Y_1$  的关系矩阵;  $R_{y_1 f}$  为中间层  $Y_1$  与输出  $F$  的关系矩阵;  $R_{x_2 y_2}$ 、 $R_{y_2 f}$  也为其相应的定义。

将式(7)代入式(6)得到:

$$\mu_F = [\mu_{Y_1} \circ R_{y_1 f}] \wedge [\mu_{Y_2} \circ R_{y_2 f}]. \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} \mu_{Y_1} & = (\mu_{x_1} \wedge \mu_{\dot{x}_1}) \circ R_{x_1 y_1}, \\ \mu_{Y_2} & = (\mu_{x_2} \wedge \mu_{\dot{x}_2}) \circ R_{x_2 y_2}. \end{aligned} \quad (9)$$

可见式(9)就相应为图 3 中的 FLC1 和 FLC2。式(8)表明输出  $F$  的隶属函数可由中间层的输入 ( $Y_1$ ,  $Y_2$ ) 合成而得,即可表示为“如果  $Y_1$  且  $Y_2$ , 则  $F$ ”的关系:

$$\begin{aligned} \mu_F & = (\mu_{Y_1} \wedge \mu_{Y_2}) \circ (R_{y_1 f} \vee R_{y_2 f}) = \\ & (\mu_{Y_1} \wedge \mu_{Y_2}) \circ R_{y f}. \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $R_{y f} = R_{y_1 f} \vee R_{y_2 f}$  为中间变量 ( $Y_1$ ,  $Y_2$ ) 和输出  $F$  的关系矩阵。

式(10)即相应为图 3 中的 FLC3。比较式(3)和式(8~10)知,对任意的 MFLC 均存在一个与之等效的 NHFLC。且从上面的分析可知 NHFLC 结构降低了设计模糊控制策略的复杂性。本例中规则数由  $Q^4 = 3^4$  减少为  $3Q^{N/2} = 3^3$ , 设计时各控制器的模糊集  $Q$  中的变量数可以不相同,具体的规则数会有所变化。

### 3 利用遗传算法设计模糊控制器 (Design fuzzy controller using genetic algorithm)

遗传算法(GA)是由密歇根大学的 Holland<sup>[3]</sup>教授 1975 年首先提出的,是一种模拟进化的算法。这种算法具有速度快,可以跳出局部最优等优点。NHFLC 控制器的各参数(包括模糊变量的隶属函数

和模糊规则)不再具有物理意义,本节利用遗传算法来获得 NHFLC 的模糊控制策略。步骤如下<sup>[4, 5]</sup>:

1) 模糊参数的编码。首先需要将待优化的各参数转换成 2 进制码(染色体)以便利用遗传算法进行优化。编码公式采用:

$$\begin{aligned} \lambda_j & = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \cdot \\ & \sum_{i=1}^{l_j} a_i 2^{i-1} / (2^{l_j} - 1). \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $\lambda_j$  为染色体中第  $j$  个参数所代表的值,  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  为参数  $\lambda_j$  的变化范围;  $l_j$  为  $\lambda_j$  的长度,  $a_i$  为  $\lambda_j$  的第  $i$  位 2 进制数值。

2) 基因操作。将编码得到的染色体进行基因操作,即对染色体进行交叉、变异和复制,以获得更好的染色体。这一过程的优化效率由交叉率  $\alpha$ 、变异率  $\beta$  和复制方式决定<sup>[5]</sup>。本文中  $\alpha$  和  $\beta$  在整个寻优过程中不是固定的,而是自适应地随着参数进化过程动态改变。初始时  $\alpha = 0.8$ ,  $\beta = 0.05$ , 之后每 5 代分别减小 0.06 和 0.05, 采取稳态复制方式 (steady state reproduction), 初始时取下代中适应度最高的 8 个代替上代中最差的 8 个,以后每 10 代减 1。

3) 群体大小  $M$  和评价函数  $J$ 。Holland 的模式定理<sup>[3]</sup>指出基因模式与个体数呈立方关系,且个体数过小会导致“早熟”(premature)而陷入局部最优。为了评价每一个染色体的适应度,须建立一个评价函数。评价函数的具体形式由控制目标而定,且直接影响到算法的收敛性。

4) 解码。当评价函数  $J$  满足预定条件时,寻优过程结束。此时需将最后获得的染色体取出并回代入式(11)中“解码”,以得到整个模糊控制策略。若  $J$  不满足条件,则重复步骤 2)~3)。

### 4 仿真研究 (Simulation study)

下面分别利用 NHFLC 和 MFLC 控制单摆系统,以说明 NHFLC 的设计过程并进行比较。单摆系统由沿一定长度轨道左右运行的小车和沿同一平面自由运动的单摆构成,如图 4 所示。

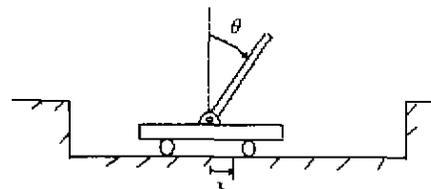


图 4 单级倒立摆系统

Fig 4 The pendulum system

控制目标是通过给小车施加一个力使小车运动到轨道中点的同时,单摆与小车保持垂直。单摆系统的动态特性由式(12)描述:

$$\theta = \frac{g \sin \theta + \cos \theta [-F - m_p \dot{\theta}^2 + \mu_c \operatorname{sgn}(\dot{x})] - \frac{\mu_p \dot{\theta}}{m_p}}{l \left[ \frac{4}{3} + \frac{m_p \cos^2 \theta}{m_c + m_p} \right]}, \quad (12a)$$

$$\dot{x} = \frac{F + m_p l [\dot{\theta}^2 \sin \theta - \ddot{\theta} \cos \theta] - \mu_c \operatorname{sgn}(\dot{x})}{l m_c + m_p}. \quad (12b)$$

式中:  $x \in [-2.5\text{m}, 2.5\text{m}]$  为小车位移,  $\dot{x}$  为小车速度,  $\theta$  为摆与铅垂线间夹角,  $\dot{\theta}$  为摆的角速度,  $m_c = 1.0\text{kg}$  为小车质量,  $m_p = 0.1\text{kg}$  为单摆质量,  $l$  为摆长,  $\mu_c = 0.0005$  为小车与轨道的摩擦系数,  $\mu_p = 0.000002$  为摆与小车的摩擦系数和  $F \in [-10\text{N}, 10\text{N}]$  为驱动力。

NHFLC 结构如图 3, 其中令  $x_1 = x, x_2 = \theta$ . 第一层每个变量取 3 个模糊子集:  $Q_1 = Q_2 = \{N, Z, P\}$ , 第二层  $Y_1, Y_2$  取 2 个子集:  $Q_3 = \{N, P\}$ , 则模糊规则数一共  $3^2 + 3^2 + 2^2 = 22$  条, 比 MFCL 的  $3^4 = 81$  条减少许多. 隶属函数取钟形形式:

$$\mu(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x_i - c_i}{a_i} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

式中  $x_i$  为输入变量,  $c_i, a_i$  为隶属函数参数. NHFLC

$$J = \begin{cases} 0, & |x| \geq 2.5 \text{ 或 } |\theta| \geq \pi/2, \\ \frac{N}{\sum_{j=1}^n \{ |x_j| + w_1 |\Delta x_j| \} + 30 \{ |\theta| + w_2 |\Delta \theta| \} } \times j, & |x| < 2.5 \text{ 且 } |\theta| < \pi/2. \end{cases} \quad (15)$$

式中  $N$  为评价过程的仿真时间,  $j$  为采样时刻;  $w_1, w_2$  为权重, 本例取  $w_1 = w_2 = 1$ .

表 1 隶属函数参数表

Table 1 Parameters of the membership functions

隶属函数	模糊变量						
	$x$	$\dot{x}$	$\theta$	$\dot{\theta}$	$Y_1$	$Y_2$	$F$
$a_p$	1.677419	2.006452	0.964516	0.854839	1.338710	1.338710	
$c_p$	1.322581	1.838710	1.774194	1.516129	1.335484	1.748387	3.294118
$a_z$	1.564516	0.935484	0.645161	1.322581			

表 2 由 GA 获得的 3 个控制规则库

Table 2 Control rule-bases obtained using genetic algorithm

$x$	$\dot{x}$			$\theta$	$\dot{\theta}$			$Y_1$	$Y_2$	
	N	P	Z		N	P	Z		N	P
N	P	N	N	N	N	P	N	N	P	N
P	P	P	N	P	P	P	N	N	P	N
Z	P	P	N	Z	P	N	P	P	P	N

由于 NHFLC 的结构特点使得寻优参数减少, 从而染色体编码较短, 算法收敛很快. 算到第 27 代以后性能指标就已接近最优的  $J = 165.250479$ . 表 1 为寻优结束后获得的各模糊变量的参数. 表 2 为 3 个控制器的控制策略. 需要说明的是, NHFLC 的参数

中各控制器均采用如下的模糊逻辑系统<sup>[6]</sup>:

$$f(x) = \sum_{l=1}^M y^l \left\{ \prod_{i=1}^n \exp \left[ - \left( \frac{x_i - c_i^l}{a_i^l} \right)^2 \right] \right\} / \sum_{i=1}^M \left\{ \prod_{i=1}^n \exp \left[ - \left( \frac{x_i - c_i^i}{a_i^i} \right)^2 \right] \right\}. \quad (14)$$

式中  $M$  为规则数,  $n$  为输入变量数,  $c_i, a_i$  为第  $i$  个模糊变量的隶属函数参数,  $y^l$  为第  $l$  条规则对应的输出隶属度为 1 处的值.  $f$  为模糊推理输出. 王立新<sup>[6]</sup>证明了上式能够以任意精度逼近  $\mathbb{R}^n$  上的连续函数. 利用遗传算法选择参数  $y^l, c_i$  和  $a_i$ , 即调节 NHFLC 的隶属函数和规则库来获得满意的控制效果.

由式(13)知每个隶属函数有两个参数  $a_i^l, c_i^l$ , 考虑到“正”和“负”对称, 且“零”的中点  $c$  取为坐标原点, 故第一级中每条规则前提有 3 个参数待定, 相应第二级有 2 个参数待定. 同时考虑到小车的运动是关于轨道中点对称, 规则数还可减半, 故总的待定参数为 31 个, 染色体长度为 120 bits. 取个体数  $M = 30$ . 文[7]中给出一种综合反映系统性能的评价函数, 结合本例取  $J$  为:

$$J = \begin{cases} 0, & |x| \geq 2.5 \text{ 或 } |\theta| \geq \pi/2, \\ \frac{N}{\sum_{j=1}^n \{ |x_j| + w_1 |\Delta x_j| \} + 30 \{ |\theta| + w_2 |\Delta \theta| \} } \times j, & |x| < 2.5 \text{ 且 } |\theta| < \pi/2. \end{cases} \quad (15)$$

式中  $N$  为评价过程的仿真时间,  $j$  为采样时刻;  $w_1, w_2$  为权重, 本例取  $w_1 = w_2 = 1$ .

表 1 隶属函数参数表

Table 1 Parameters of the membership functions

隶属函数	模糊变量						
	$x$	$\dot{x}$	$\theta$	$\dot{\theta}$	$Y_1$	$Y_2$	$F$
$a_p$	1.677419	2.006452	0.964516	0.854839	1.338710	1.338710	
$c_p$	1.322581	1.838710	1.774194	1.516129	1.335484	1.748387	3.294118
$a_z$	1.564516	0.935484	0.645161	1.322581			

表 2 由 GA 获得的 3 个控制规则库

Table 2 Control rule-bases obtained using genetic algorithm

$x$	$\dot{x}$			$\theta$	$\dot{\theta}$			$Y_1$	$Y_2$	
	N	P	Z		N	P	Z		N	P
N	P	N	N	N	N	P	N	N	P	N
P	P	P	N	P	P	P	N	N	P	N
Z	P	P	N	Z	P	N	P	P	P	N

获取过程实际上已转化成一个函数逼近问题, 其最优化指标即为式(15). 故由 GA 得到的模糊变量(P, N, 或 Z)的隶属函数分布只有数值上的意义, 而不再有通常模糊控制所特有的“物理意义”. 并且表 1 和表 2 中所反映出的模糊控制策略也不一定与专家经

验相符(如果可供利用的话).文[6]中提出的4种获取模糊控制策略的方法也都不同程度存在此问题.但这并不影响 NHFLC 具有优良的控制性能,因为这在利用 GA 进行优化的过程中就已经得到了保证.将 GA 获得的 NHFLC 中的各控制器参数与模糊逻辑

推理系统式(14)结合即可用于单摆系统的控制.与通常方法设计的 MFLC(利用 Matlab 工具箱)比较如图 5 所示.可见 NHFLC 使得单摆很快达到平衡位置,与 MFLC 控制器比较不仅减少了超调,且缩短了过渡时间.

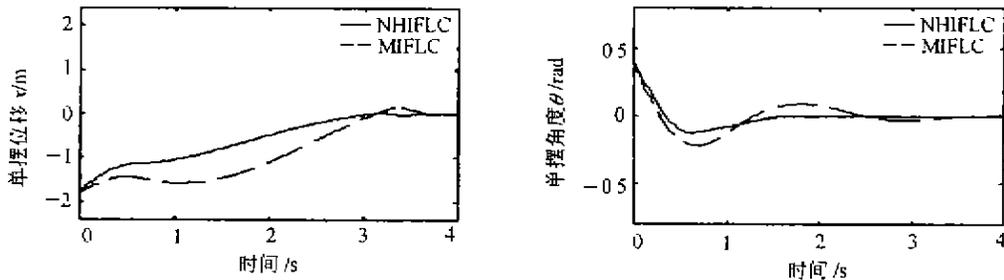


图 5 NHFLC 与 MFLC 性能比较

Fig. 5 Performance comparison between NHFLC and MFLC

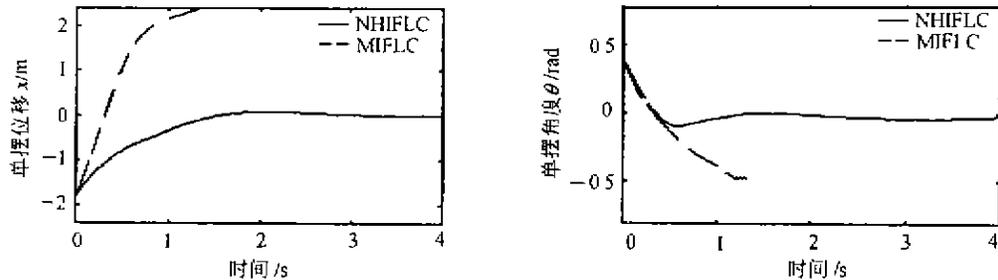


图 6 参数变化后 NHFLC 与 MFLC 性能比较

Fig. 6 Performance comparison between NHFLC and MFLC with system parameters changed

为考察 NHFLC 的鲁棒性,改变下列参数: $l' = 0.35\text{m}$ ,  $m'_c = 0.8\text{kg}$ .从图 6 可见系统最终仍可达到平衡状态,而 MFLC 控制情况下,由于控制器不能够提供足够的力使得小车回转,小车在 1.32 秒时撞到了左边的墙壁.由于遗传算法本身的特点以及采用了动态调整遗传参数的优化设计,使得 NHFLC 具有较好的鲁棒稳定性.

## 5 结论(Conclusion)

本文提出一种新型的多变量模糊控制器的设计方法,用于解决通常多变量模糊控制器设计中存在的两个主要困难.但采用此方法设计的模糊控制策略一般无对应的物理意义,需借助优化算法或函数逼近方法来获得.仿真结果表明这种设计方法不仅提高了控制效果,且减小了设计过程对设计者经验的依赖,便于实现控制器的自动设计.为模糊控制理论在多变量系统中的应用提供了一个新的途径.

## 参考文献(References)

- [1] Raju G. Hierarchical fuzzy control [J]. *Int. J. Control*, 1991, 54(5): 1201 - 1216
- [2] Li Shiyong. *Fuzzy Control, Neural Control, and Intelligent Control Theory* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996

- [3] Man K F, Tang K S and Kwong S. Genetic algorithms: Concepts and applications [J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 1996, 43(5): 517 - 534
- [4] Park B, Kandel A and Lenghol G. Genetic based new fuzzy reasoning models with application to fuzzy control [J]. *IEEE Trans. Syst., Man, and Cybern.*, 1994, 24(1): 39 - 47
- [5] Linkens D A and Nyongesa H O. Genetic algorithms for fuzzy control part 1: Offline system development and application [J]. *IEE Proc Control Theory Appl.*, 1995, 142(3): 161 - 175
- [6] Wang Lixing. *Adaptive Fuzzy System and Control: Design and Stability Analysis* [M]. Beijing: National Defense and Industry Press, 1995
- [7] Wang Haiqing. *Study on P-To-P and constant turning force control in numerical control system* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1998

## 本文作者简介

王海清 1974 年生.1996 年和 1998 年在哈尔滨工业大学获学士和硕士学位.2001 年在浙江大学获博士学位,现为该校工业控制技术研究所讲师.主要研究方向为智能控制,过程监测与产品质量控制等.

宋执环 1962 年生.1996 年在浙江大学获博士学位.现为浙江大学工业控制研究所副所长,副教授.主要研究兴趣为小波分析在系统辨识和控制中的应用,智能控制,预测控制,流程工业 CIMS.

李平 1954 年生.1988 年在浙江大学获博士学位.现为浙江大学工业控制研究所所长,教授、博士生导师.主要研究兴趣为工业过程模型化,智能控制,流程工业 CIMS.