

基于规则插入的自适应模糊控制器的设计

陈展荣¹, 钟育彬²

(1. 暨南大学 计算机中心, 广东 广州 510632; 2. 广州师范学院 计算机系, 广东 广州 510405)

摘要: 提出一种为模糊控制器系统开发有效规则的自适应模糊控制器的设计方法, 该方法首先基于两个基本的 If-then 模糊规则, 然后插入多个新 If-then 模糊规则, 其合成的模糊规则的输入-输出映射保持不变, 且其隶属函数的参数在线约束为最小化成本函数, 最后以最典型的非线性和延迟系统模型为例进行仿真实验, 结果证明了该设计方法的有效性。

关键词: 自适应模糊控制器; If-then 模糊规则; 隶属函数

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Design of adaptive inserting rule fuzzy controllers

CHEN Zhan-rong¹, ZHONG Yu-bin²

(1. Computer Center, Jinan University, Guangdong Guangzhou 510632, China;

2. Department of Computer Science, Guangzhou Normal University, Guangdong Guangzhou 510405, China)

Abstract: An approach of designing adaptive fuzzy controllers is presented. The design is at first based on two basic If-then fuzzy rules, then new fuzzy rules are inserted, for which the parameters of the membership functions are trained on-line to minimize cost functions. Simulations are provided to show the effectiveness of the approach.

Key words: adaptive fuzzy controller; fuzzy If-then rule; membership function

1 引言(Introduction)

近年来很多学者在模糊控制模式中引入模糊模型, 采用现代控制理论进行设计, 从而将定量知识与定性知识较好地融合在一起^[1~8], 但其设计过程仍然存在以下尚未解决的问题: 当模糊装置的规则集中包含规则较多, 则人工设计模糊控制器就很复杂, 且其构造不一定好. 因此, 系统地开发一套基于有效规则的模糊装置显得非常重要; 另外, 迄今为止, 仍然没有比较理想的方法把语言信息转换成数值表达式, 因而很难确定满足系统性能要求的模糊控制系统参数的最佳值. 本文提出一种为模糊控制器系统开发有效规则的自适应模糊控制器的设计方法, 该方法较好地解决了上述两个问题.

2 基于两个规则的模糊控制器的设计(Design of fuzzy controller based on two rules)

为简化模糊控制器系统设计的复杂性, 先定义输入量 $x^{[9]}$ 为 $x = e - k_d \Delta y$. 其中 Δy 为输出量的差分, e 为误差, k_d 为调节 Δy 的因子; 再建立两个基本的 If-then 模糊规则

R_{pb} : If x is A_{pb} , then u is B_{pb}

和

R_{nb} : If x is A_{nb} , then u is B_{nb} .

u 为输入量, 于是 x 的模糊集 A_{pb} , A_{nb} 的隶属函数、 u 的模糊集 B_{pb} 和 B_{nb} 的隶属函数如图 1 所示, 模糊集的中心点 p_{nb} 和 p_{pb} 满足: $p_{nb} = -p_{pb}$.

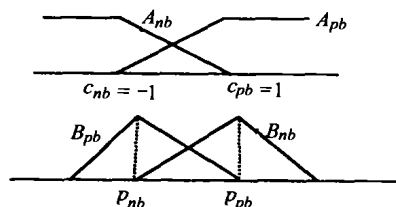


图 1 输入量与输出量的隶属函数

Fig. 1 Membership function of input and output

按 Buckley^[7]的 Mamdani 推理, 用质心法进行模糊判决, 得到系统总的输出为

$$u = \frac{\sum_i p_i f_i(x)}{\sum_i f_i(x)} = \frac{p_{pb} f_{pb}(x) + p_{nb} f_{nb}(x)}{f_{nb}(x) + f_{pb}(x)}. \quad (1)$$

其中 f_{nb} 和 f_{pb} 分别为 A_{pb} 和 A_{nb} 的隶属函数. 而 $f_{nb}(x)$

+ $f_{pb}(x) = 1$, 故式(1)可简化为

$$u = \sum_i p_{li} f_i(x) =$$

$$p_{pb} f_{pb}(x) + p_{nb} f_{nb}(x) = p_{pb} (f_{pb}(x) - f_{nb}(x)).$$

(2)

现设计确定 p_{pb} 的算法 1: 用超调量 ($ovst$)、过渡过程时间 (rs)、稳态误差 (sse) 指标来检验系统的性能是否满足要求, 如指标均为零, 系统性能满足要求, 否则系统性能未能达到要求^[10], 在算法 1 中设定一近似最小化成本函数来调节 p_{pb} ,

$$C_f = 0.5e^2 = 0.5(r - y)^2 (r \text{ 为 } u \text{ 的期望值}).$$

(3)

算法 1

1) 设定初值. $ovst = 0, rs = 0, sse = 0, k = 0, \beta = 0, p_{pb}^\beta(k) = 0$, β 是叠代因子, k 是离散时间因子.

2) ① 运行系统且更新 $p_{pb}^\beta(k) = p_{pb}^\beta(k-1) - \epsilon_s \delta p_{pb}^\beta(k-1)$, ϵ_s 为小正数步长, $\delta p_{pb}^\beta = \partial C_f / \partial p_{pb}$.

② 如 $p_{pb}^\beta(k)$ 大于系统输出的期望值或实际最大值, 则使: $p_{pb}^\beta(k) = u_{\max}$.

③ 当系统达到稳定值时, 停止更新 p_{pb}^β 的值.

④ 使 $\beta = \beta + 1, p_{pb}^\beta(0) = p_{pb}^{\beta-1}(k)$, 更新 $p_{pb} = p_{pb}^\beta(0)$, 重新运行系统, 直到趋于稳定.

3) 评估系统性能, 得性能指标的瞬时值 $ovst_tmp, rs_tmp, sse_tmp$.

4) If $ovst_tmp = 0$, If $rs_tmp = 0$, 停止叠代 $p_{pb} = p_{pb}^\beta(k)$, $ovst = ovst_tmp, rs = rs_tmp, sse = sse_tmp$, Else 返回 2) 使 $rs = rs_tmp, sse = sse_tmp$, Else, If $\beta > 1$, 停止叠代 $p_{pb} = p_{pb}^\beta(0)$, $sse = sse_tmp$, Else, $p_{pb} = p_{pb} - \gamma$, 且返回 3) 使 $sse = sse_tmp$ (γ 为一正自适应比例因子).

通过算法 1, p_{pb} 可调节为无超调的理想值. 若所有的性能指标为零, 系统性能就达到了要求. 否则就插入新规则, 进一步调整系统参数以满足其性能要求.

3 对非零稳态误差的修正 (Correction for nonzero steady state error)

如稳态误差 $sse \neq 0$, 则意味着系统运行不好, 为消除稳态误差, 可把新规则 R_{xx} : If x is A_{xx} , then u is B_{xx} 插入到控制器的模糊装置中, 选定合适的初始条件, 设计出可把新语言规则转换成数值规则的可调参数的学习算法. 假定 $\sum_i f_i(x) = 1, \forall x$, 其中 f_i 是系统输入量 x 的模糊集的隶属函数.

3.1 初始条件的选定 (Selection of initial conditions)

先构造 If-then 模糊规则成为冗余的条件, 以此

设计一个带新 If-then 模糊规则插入的等效模糊控制器 MFC, 该模糊控制器的输入-输出映射与原来的模糊控制器 FC 相同.

把 FC 的论域 x 划成 n 个模糊集 $F_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 其隶属函数 $f_i(x)$ 、输出量 y 的隶属函数如图 2 所示.

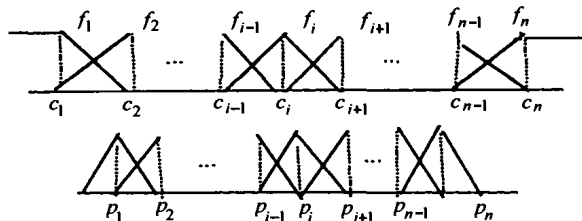


图 2 FC 的隶属函数

Fig. 2 Membership function of the FC

按 Mamdani 推理^[7], 用质心非模糊化方法推出 FC 输出为

$$y = p_i \frac{x - c_{i-1}}{c_i - c_{i-1}} + p_{i-1} \left(1 - \frac{x - c_{i-1}}{c_i - c_{i-1}}\right) = p_{i-1} + \frac{p_i - p_{i-1}}{c_i - c_{i-1}} (x - c_{i-1}), \quad x \in [c_{i-1}, c_i], \quad (4)$$

$$y = p_{i+1} \frac{x - c_i}{c_{i+1} - c_i} + p_i \left(1 - \frac{x - c_i}{c_{i+1} - c_i}\right) = p_i + \frac{p_{i+1} - p_i}{c_{i+1} - c_i} (x - c_i), \quad x \in [c_i, c_{i+1}]. \quad (5)$$

由式(4)、式(5)中两直线的斜率相等, 可得到

$$\frac{p_{i+1} - p_i}{p_i - p_{i-1}} = \frac{c_{i+1} - c_i}{c_i - c_{i-1}}. \quad (6)$$

用修正的 f_{i-1} 和 f_{i+1} 替换 f_i , 得 MFC 的隶属函数如图 3 所示.

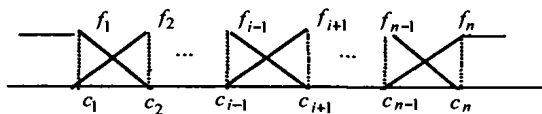


图 3 MFC 的隶属函数

Fig. 3 Membership function of the MFC

现验证式(6)是模糊集 F_i 为冗余模糊集的条件. 当 $x \in [c_{i-1}, c_i]$, 可导出 MFC 的输出为

$$y = p_{i+1} \frac{x - c_{i-1}}{c_{i+1} - c_{i-1}} + p_{i-1} \left(1 - \frac{x - c_{i-1}}{c_{i+1} - c_{i-1}}\right) = p_{i-1} + \frac{p_{i+1} - p_{i-1}}{c_{i+1} - c_{i-1}} (x - c_{i-1}). \quad (7)$$

利用式(6), 可得

$$\frac{p_i - p_{i-1}}{c_i - c_{i-1}} = \frac{p_{i+1} - p_{i-1}}{c_{i+1} - c_{i-1}}. \quad (8)$$

因此, 当 $x \in [c_{i-1}, c_i]$, MFC 与 FC 有相同的输出. $x \in [c_i, c_{i+1}]$ 也有同样的结论. 故模糊集 F_i 为冗余

模糊集.

作为图2隶属函数的特殊情况, c_i 和 p_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 有相同间距, 即 $c_i - c_{i-1} = \alpha_c$ 和 $p_i - p_{i-1} = \alpha_p$, $i = 2, 3, \dots, n$, 由此可得

$$\frac{c_{i+1} - c_i}{c_i - c_{i-1}} = \frac{p_{i+1} - p_i}{p_i - p_{i-1}} = 1,$$

即 F_i 为冗余模糊集, 所以 If x is F_i , then y is B_i 为冗余模糊规则. 下面构造 FC 的等效模糊控制器 MFC: 插入 If-then 模糊规则 R_{ze} , 初始条件满足式(8), 其输入、输出的隶属函数的构造如图4所示, 易知

$$\frac{c_{pb} - c_{ze}}{c_{ze} - c_{nb}} = \frac{p_{pb} - p_{ze}}{p_{ze} - p_{nb}} = 1. \quad (9)$$

R_{ze} 为冗余模糊规则, 且 MFC 与 FC 有相同的输入-输出映射, 其输入及输出的隶属函数的构造见图4.

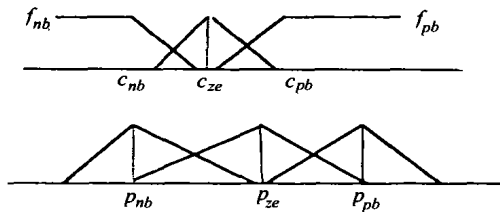


图4 基于规则 R_{ze} 插入的隶属函数的构造
Fig. 4 Structure of the membership functions with the rule R_{ze}

3.2 调整参数的学习算法 (Learning algorithm for adjusting parameters)

本文采用一种启发式学习算法来调整 p_{ze} , 消除系统的稳态误差. 该算法基于(3)的最小化成本函数.

算法2

1) 设定 p_{ze} 的初始值.

$p_{ze}(0) = (p_{pb} + p_{nb})/2$, 且 $\delta p_{ze} = \partial C_f / \partial p_{ze}$.

2) 启动系统, 在线调节 p_{ze} , $p_{ze}(k) = p_{ze}(k-1) - \epsilon \delta p_{ze}(k-1)$, ϵ 为小正数步长.

3) 系统趋于稳定时, 停止运行.

4) 调节参数 $p_{ze} = p_{ze}(k)$, 重新启动系统直到再次趋于稳定, 评估系统性能, 给性能指标 $ovst$, rs , sse 赋值.

5) 如 $ovst > 0$, 则 $p_{pb} = p_{pb} - \alpha_1$, $p_{nb} = -p_{nb}$, α_1 为小自适应因子; 返回第4)步, 否则停止运算.

4 过渡过程时间的改进 (Improvement on the rise time)

如 $rs = 1$, 则表明系统瞬间工作状态不好, 此时插入一新规则到模糊控制器中, 使系统的输出响应足够快以满足设计要求, 其规则为

R_j : If x 为 A_j , then u 为 B_j .

参数 p_j 和 c_j (见图5) 的初始条件的选定方法与第3部分相同. 基于这些初始条件, 下面给出了学习算法3, 用式(3)来调节参数 p_j 和 p_{pb} .

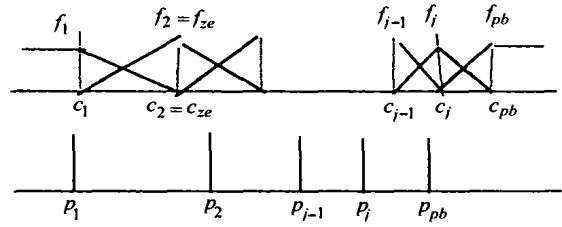


图5 基于 R_j 规则插入的隶属度函数的构造
Fig. 5 Structure of the membership functions with the rule R_j

算法3 设 $j = 3$.

1) 在 R_{pb} 和 R_{j-1} 之间插入规则 R_j . 设 $\beta = 0$, $k = 0$, $p_j^\beta(k) = (p_{j-1} + p_{pb})/2$, $p_{pb}^\beta(k) = p_{pb}$.

2) 设 $\beta = \beta + 1$, $p_j^\beta(0) = p_j^{\beta-1}(k)$, $p_{pb}^\beta(0) = p_{pb}^{\beta-1}(k)$.

3) 启动系统, 在线调节 p_j 和 p_{pb} .

a) $p_j^\beta(k) = p_j^\beta(k-1) - \epsilon_1 \delta p_j^\beta(k-1)$, $p_{pb}^\beta(k) = p_{pb}^\beta(k-1) - \epsilon_2 \delta p_{pb}^\beta(k-1)$, $\delta p_j = \alpha C_f / \alpha p_j$, $\delta p_{pb} = \alpha C_f / \alpha p_{pb}$. 这里的 C_f 为式(3)中成本函数.

b) 如 $p_{pb}^\beta(k) \geq u_{\max}$, 使 $p_{pb}^\beta(k) = u_{\max}$; 如 $p_j^\beta(k) \geq p_{pb}^\beta(k)$, 使 $p_j^\beta(k) = p_{pb}^\beta(k)$.

c) 当系统趋于稳定时, 停止调节 $p_j^\beta(k)$ 和 $p_{pb}^\beta(k)$, 否则, 调节参数 $p_{pb}^\beta(k)$ 和 $p_j^\beta(k)$, 重新启动系统, 直到系统再次趋于稳定.

4) 评估系统性能指标, 给 $ovst$, rs 赋值.

5) If $ovst > 0$, 使 $p_j = p_j^\beta(0)$, $p_{pb} = p_{pb}^\beta(0)$, 返回步骤2) 使 $j = j + 1$, Else, If $p_j^\beta(k) = p_{pb}^\beta(k)$ 且 $rs > 0$, 返回步骤2) 使 $c_{pb} = c_j$, Else, If $rs > 0$, 设 $k = 0$, 返回步骤3), Else, If $p_j^\beta(k) = p_{pb}^\beta(k)$, 停止运算, 使 $c_{pb} = c_j$ 且 $p_{pb} = p_j$, Else 停止运算, 使 $p_j = p_j^\beta(k)$ 且 $p_{pb} = p_{pb}^\beta(k)$.

下面本文为模糊控制器的系统设计提供一套完整的算法. 用算法4进行概括.

算法4

1) 用算法 ALGO 1 设计一个仅基于两个 If-then 模糊规则的简易模糊控制器.

2) 如性能指标之一, sse 或 rs 有非零值, 则设计一等效模糊控制器, 插入一冗余 If-then 模糊规则 R_{ze} .

3) 如 sse 有非零值, 则用算法2来调节在规则 R_{ze} 中模糊集的参数, 以消除稳态误差.

4) 如 rs 的值为非零值, 则用算法3来插入 If-then 模糊规则 R_j s, 且调整在规则 R_j s 中模糊集的参

数,使模糊控制器满足在过渡过程时间内的设计要求.

5 仿真结果(Simulation results)

例1 考虑非线性模糊控制系统

$$y(k) = 0.6y(k-1) + 0.3[y(k-1)]^3 + 0.2u(k).$$

性能要求设定为

① $|u| \leq 6$, 无超调量, 稳态误差为零; ② 当系统的输出量达到参考输入的90%时, 过程时间 $k \leq 5$.

图6显示的是基于两基本 If-then 模糊规则的系

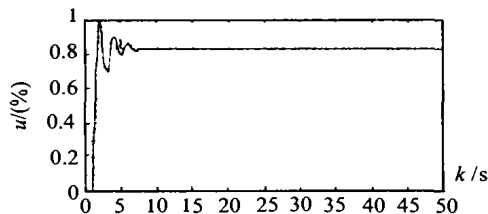


图6 非线性系统的初始性能

Fig. 6 Nonlinear system basic performance

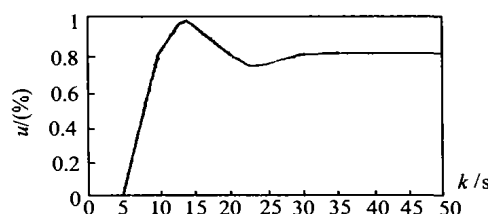


图8 延迟系统的初始性能

Fig. 8 Delayed system basic performance

统仿真结果,其存在非零稳态误差.图7仿真结果证明:插入模糊规则 R_{xx} 后,系统的稳态误差已消除,性能要求被满足.

例2 考虑延迟模糊控制系统

$$y(k) = 0.95y(k-1) + 0.1u(k-4).$$

性能要求除过程时间 $k \leq 15$ 外,其他与例1相同.

仿真结果证明:插入规则后,系统消除了稳态误差,其瞬间周期性能也得到改进(如图8和9所示).

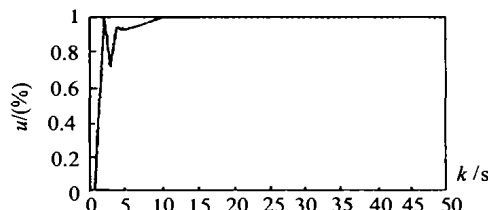


图7 非线性系统的最终性能

Fig. 7 Nonlinear system final performance

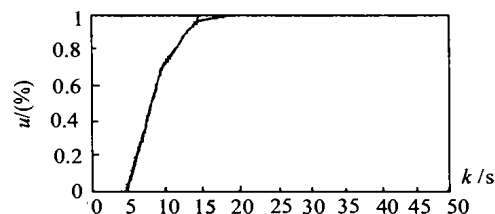


图9 延迟系统的最终性能

Fig. 9 Delayed system final performance

IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 146 - 155.

- [5] SU C Y. Adaptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1994, 2(4): 285 - 294.
- [6] TAN S H, YU Y. Adaptive fuzzy modeling of nonlinear dynamical system [J]. *Automatica*, 1996, 32(4): 637 - 643.
- [7] LEE C H, WANG S D. A self-organizing adaptive fuzzy controller [J]. *Fuzzy Sets and System*, 1996, 80(3): 295 - 313.
- [8] YAGER R R, FILEV D P. *Essentials of Fuzzy Modeling and Control* [M]. New York: Wiley, 1994.
- [9] LI Hongxin. The essence of fuzzy control and a kind of fine fuzzy controller [J]. *Control Theory & Applications*, 1997, 14(6): 868 - 872 (in Chinese).
- [10] SUN Zengqi. *Intelligent Control Theory and Technology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997 (in Chinese).

6 结论(Conclusion)

本文提出了针对模糊控制器的系统学习设计方法,简化了模糊控制器构造的复杂性.该模糊控制器基于两个基本 If-then 模糊规则,插入多个新 If-then 模糊规则到模糊控制器结构的规则基中,插入新规则的等效模糊控制器与原来的模糊控制器有相同的输入-输出映射,且新模糊规则的隶属函数的参数在线约束为最小化成本函数.该方法能自动调节系统的性能以满足设计要求,最后的仿真结果验证了该方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] LEE C C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller-Part I & II [J]. *IEEE Trans Systems, Man, and Cybernetics*, 1990, 20(2): 404 - 435.
- [2] DUBOIS D, PRADE H. *Fuzzy Sets and Systems-Theory and Applications* [M]. New York: Academic, 1980.
- [3] CHIU S, CHAND S, MOORE D, et al. Fuzzy logic for control of roll and moment for a flexible wing aircraft [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1991, 11(4): 42 - 48.
- [4] WANG L X. Stable adaptive fuzzy control nonlinear system [J].

作者简介:

陈展荣 (1965—),男,1993年于四川重庆大学获得工学硕士学位,现为广州暨南大学计算中心讲师.曾在国内外发表论文3篇,主要研究方向为模糊系统与人工智能,模糊控制,模糊信息处理以及知识表示的数学理论. Email: zhanrong@163.net;

钟育彬 (1964—),男,1985年、1991年于北京师范大学分别获得理学学士、硕士学位,现为广州师范学院计算机科学系主任,副教授.出版著作1部,在国内外发表论文近30篇.主要研究方向为模糊系统与人工智能,模糊控制,系统工程,超代数结构以及知识表示的数学理论.