

基于 PI 控制律的通用递阶模糊控制器 *

肖 兵 毛宗源

(华南理工大学自动控制工程系·广州, 510640)

摘要: 为解决常规模糊控制器存在的通用性和工程简便性问题, 针对动态特性随操作条件变化对象建立自适应递阶模糊控制器, 实现闭环模糊增益调度, 并引入稳定监督控制使控制系统具有工程稳定性.

关键词: PI 控制; 模糊增益调度; 稳定监督控制

文献标识码: A

General Hierarchical Fuzzy Controller Based on PI Control Law

XIAO Bing and MAO Zongyuan

(Department of Automatic Control Engineering, South China University of Technology · Guangzhou, 510640, P. R. China)

Abstract: To solve the generality and simplicity problems of normal fuzzy controllers, an adaptive hierarchical fuzzy controller is established which focuses on plants whose dynamics change with operating condition. Closed-loop fuzzy gain scheduling is implemented. With the stability supervision control, the control system has engineering stability.

Key words: PI control; fuzzy gain scheduling; stability supervision control

1 引言 (Introduction)

大量实践证明模糊控制器具有良好的非线性控制性能, 但迄今国内外都没有象常规 PID 控制器那样结构简单、使用方便且较通用的模糊控制器出售, 我们参加了国内首个超大规模集成电路模糊推理芯片^[1]的研制, 在此基础上, 欲研制具有一定工程通用性的模糊控制器.

在工程实践中, 常采用增益调度^[2]方法控制动态特性随操作条件变化这类较难控制的非线性对象, 而一般的模糊增益调度控制^[3]虽然克服了传统增益调度的某些缺点, 但仍存在以下不足之处: 1) 控制系统的稳定性没保障; 2) 模糊知识库建立较困难, 用模糊神经网络^[4]优化模糊控制规则的方法对于工程实现而言过于复杂; 3) 所采用的增益调度控制方法本质是开环的.

我们提出“基于 PI 控制律的通用递阶模糊控制器”, 为了使模糊控制器具有一定的通用性, 把模糊推理置于控制器层次结构中的较高层次上, 采用“PI 控制律 + 闭环模糊增益调度控制 (CFGS) + 稳定监督控制 (FSS)”的递阶结构, 并证明该方法适于一类动态特性随操作条件变化的非线性对象.

2 控制器的系统结构 (System structure of the controller)

整个控制系统的结构如图 1.

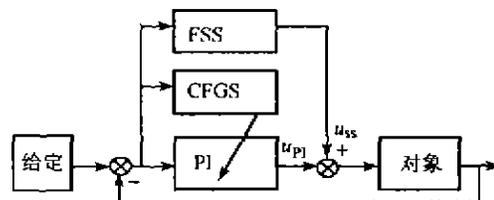


图 1 基于 PI 控制律的通用递阶模糊控制器的系统
Fig. 1 System structure of general hierarchical fuzzy controller based on PI control law

被控对象主要针对动态特性随操作条件变化的非线性对象, 用方程(1)表示:

$$\tau(y) \frac{dy}{dt} + y = K_p(y) u(t - \theta), \quad (1)$$

上式中: $\tau(y) > 0, K_p(y) > 0$ 但不知道具体解释表达式, θ 是延迟时间. 方程(1)可重写为(2):

$$\dot{y} = f_1(y) + f_2(y) u, \quad (2)$$

这里 $f_1(y) = -y/\tau(y), f_2(y) = K_p(y)/\tau(y)$.

控制器设计就是确定 PI 控制器中可变参数的调整规律和模糊监督控制的具体形式.

* 基金项目: 广东省自然科学基金(980614)和国家 863 计划(863-306-ZT01-07-1)资助项目.

收稿日期: 1999-07-23; 收修改稿日期: 2000-09-05.

上式中, N 为模糊规则数, $q_j(y)$ 是模糊基函数. 但是由(15)式得到 $T_i = k_2/k_1$, 说明 T_i 与 $\hat{f}_1(y)$ 无直接关系, 因此不存在与 PB 形式类似的 T_i 闭环自适应规律.

4 模糊稳定监督控制(Fuzzy stability supervision control)

3.1节中曾假设 $\dot{r}(t) = 0$, 以推导闭环模糊增益调度控制, 另外, 即使闭环增益调度能保证系统的渐近稳定性, 但许多实际工程系统不允许出现激烈变化的动态过程. 稳定监督控制是指控制器监视系统动态过程, 若变化超出允许范围, 则在原有控制作用上叠加新的校正控制作用, 稳定监督控制 u_{ss} 的表示如下:

$$\begin{cases} |s(e)| \leq b(t) \text{ 稳定域, } u_{ss} = 0, b(t) \text{ 是预先定义的时变函数, 一般取为常数,} \\ |s(e)| > b(t) \text{ 非稳定域, } u_{ss} \neq 0, \\ u_{ss} \text{ 使偏差 } e \text{ 回到稳定域.} \end{cases}$$

参考文献[5]定义 V_e 为李雅普诺夫函数, $V_e = e^T P e$, P 是(9)式中的正定对称阵. 根据(8)式得:

$$\dot{V}_e = -\epsilon^T \epsilon + 2\epsilon^T P \beta [(f_1 - \hat{f}_1) + (f_2 - \hat{f}_2)u_{PI} + f_2 u_{ss}]. \quad (19)$$

由(2)式并假设 $\dot{r}(t) = 0$, 则有 $u_{PI} = (e_2 - f_1 - f_2 u_{ss})/f_2$, 把它代入(19)式得:

$$\dot{V}_e = -\epsilon^T \epsilon + 2\epsilon^T P \beta [e_2(f_2 - \hat{f}_2) - (\hat{f}_1 f_2 - f_1 \hat{f}_2)]/f_2 + 2\epsilon^T P \beta \hat{f}_2 u_{ss}. \quad (20)$$

定义 $G(f_1, f_2) = [e_2(f_2 - \hat{f}_2) - (\hat{f}_1 f_2 - f_1 \hat{f}_2)]/f_2$, $s(e) = \epsilon^T P \beta$, 得到:

$$\dot{V}_e = -\epsilon^T \epsilon + 2s(e)G(f_1, f_2) + 2s(e)\hat{f}_2 u_{ss}. \quad (21)$$

$$s(e) = P_{12} \int_0^t e dt + P_{22} e. \quad (22)$$

上式的参数 P_{12} , P_{22} 由预先已确定的参数 T_i , k_1 决定, 一般有 $P_{12} > 0$, $P_{22} > 0$, 所以 $s(e)$ 是综合反映系统过去和现在稳定情况的指标, V_e 是反映系统将来稳定情况的指标. 根据(21)式, 只要 u_{ss} 与 $s(e)$ 符号相反, u_{ss} 就会尽可能使 $\dot{V}_e \leq 0$, 即动态过程收敛, 所以 u_{ss} 的模糊控制规律可定义为:

$$\begin{cases} \text{If } s(e) \text{ is Positive Large Then } u_{ss} \text{ is Negative Large,} \\ \text{If } s(e) \text{ is Negative Large Then } u_{ss} \text{ is Positive Large.} \end{cases} \quad (23)$$

因为只要求 u_{ss} 与 $s(e)$ 符号相反, 所以模糊变量隶属函数选取较自由, 无需在线调整. 总之, u_{ss} 实现简单, 既有明确的工程意义, 也有明确的数学含义, 有效克服了增益调度控制的缺陷, 使控制器适于

控制对象参数变化较快的非线性对象.

5 仿真结果与分析(Simulation results and analysis)

被控对象模型由(1)式表示, 除延时 θ 的取值较大外, 对象参数与文[4]的相同, 具体如表1:

表1 被控对象模型参数

Table 1 Plant model specifications

	区域1	区域2	区域3
调度变量 y	$y < 2$	$2 \leq y \leq 7$	$y > 7$
局部线性增益 K_p	1	$\sqrt{4.8y - 8.6}$	5
时间常数 τ	10	$\sqrt{133.6 - 16.8y}$	4
滞后时间 θ	> 0.7	> 0.7	0.7

图2是一般开环模糊增益调度控制的结果, 此时 $\theta = 0.7$, 若 θ 再增大, 则某些工作区域输出振荡发散. 图3, 图4是闭环模糊增益控制, 但没有施加稳定监督控制的响应过程. 图3中 $\theta = 0.7$ 控制效果理想, 图4中 $\theta = 1.7$ 在某些区域输出发散. 图5是采用闭环模糊增益调度, $\theta = 1.7$, 但施加了模糊稳定监督控制的响应曲线, 可见模糊稳定监督控制使原来振荡的过程变为收敛, 从而扩大控制器无需调整的工作范围.

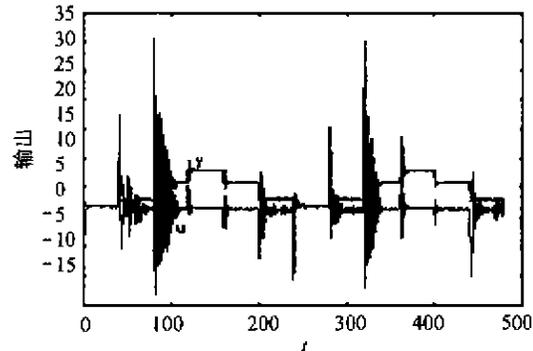


图2 一般开环模糊增益调度控制仿真结果
Fig. 2 Simulation results for general fuzzy gain scheduling control

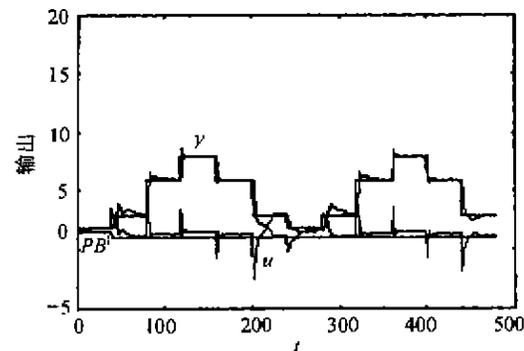


图3 闭环模糊增益调度控制仿真结果(a)
Fig. 3 Simulation results for closed-loop fuzzy gain scheduling control (a)

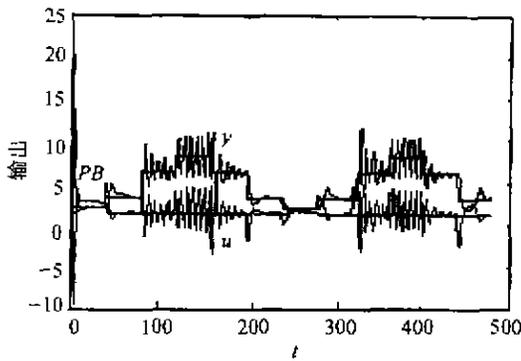


图4 闭环模糊增益调度控制仿真结果(b)

Fig. 4 Simulation results for closed-loop fuzzy gain scheduling control (b)

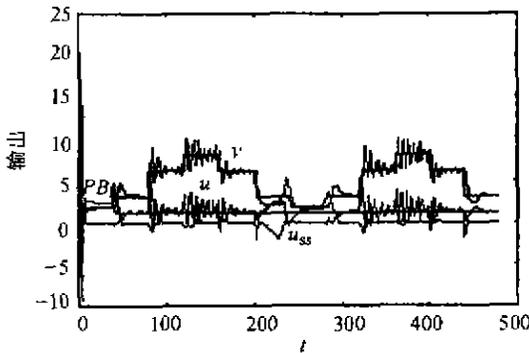


图5 通用递阶模糊控制仿真结果

Fig. 5 Simulation results for general hierarchical fuzzy controller

仿真结果说明,所建议的通用递阶模糊控制器适于广泛的一类非线性过程对象,无需人工反复凑试控制器参数,具有良好的工程通用性.而且整套算法实现简单,我们已把它移植到我们自行研制的模糊控制仪表GFC^[6]中.

6 结论(Conclusions)

控制器的基本控制律是PI控制,从而保证了系统具有良好的抗干扰能力和鲁棒性,闭环模糊增益调度改善了系统的动态性能,模糊稳定监督控制扩大了系统的稳定工作范围.

对象的纯滞后和对象参数的快速变化对系统动态特性影响较大,今后要进一步研究有关问题,以得到严谨又富有工程指导意义的结果.

参考文献(References)

- [1] Li Shen. Fuzzy logic control ASIC chip [J]. J. Computer Science and Technology, 1997, 12(3):263-270
- [2] Astrom K J and Wittenmark B. Adaptive Control [M]. San Diego, CA: Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [3] Zhen Yuzhao and Tomizuka M. Fuzzy gain scheduling of PID controllers [J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(5):1392-1398
- [4] Tan S and Hang C C. Gain scheduling: from conventional to neuro-fuzzy [J]. Automatica, 1997, 33(3):411-419
- [5] Wang L X. Modeling and control of hierarchical systems with fuzzy system [J]. Automatica, 1997, 33(6):1041-1053
- [6] Xiao B and Lui C Q. The self-adaptive PID controller based on dedicated fuzzy inference chip [J]. Process Automation Instrument, 1999, 20(12):14-16

本文作者简介

肖兵 1964年生,1990年获华南理工大学自动化专业硕士学位,现为华南理工大学自动控制工程系讲师.研究兴趣:智能控制、智能仪表.

毛宗源 见本刊2001年第2期第165页.