

规则自适应模糊控制器*

睢 刚 陈来九

(东南大学动力系·南京,210018)

摘要: 本文研究了模糊控制器的控制规则自适应问题,提出了一种新的模糊控制规则自生成与自校正方法及相应的算法,仿真研究结果表明本文提出的控制规则自适应算法是有效的。

关键词: 模糊控制; 模糊推理; 自适应

1 引 言

近些年来,模糊控制及其应用的研究已引起控制界的广泛兴趣^[1,2],其核心问题是模糊控制规则的获取.解决这一问题的途径之一,就是赋予模糊控制器以自学习能力,使之能根据控制目标自动获取和自动校正控制规则^[1].

模糊控制器的适应性能可以通过同时或单独修改控制规则和比例因子实现,但通过修改比例因子来改善控制性能的前提是必须已具有了基本正确的控制规则.因此,本文主要研究模糊控制器的控制规则自适应问题.

1979年 Procyk 和 Mamdani 为了解决控制规则的自生成及自校正问题,首次提出了自组织模糊控制器(SOC)^[3].其后,许多文献^[4~6]对这类自组织模糊控制器作了进一步研究.为了提高自组织模糊控制器的自适应性能,本文在上述文献的基础上,提出了一种新的控制规则自适应算法,并进行了仿真研究,结果表明本文提出的规则自适应模糊控制器具有很好的自适应性能.

2 规则自适应模糊控制器

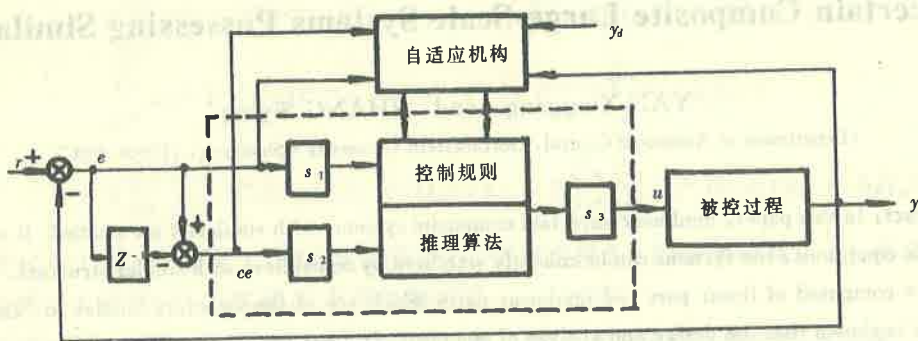


图 1 自适应模糊控制器

规则自适应模糊控制器的结构如图 1 所示, 其中 u 和 y 为控制输入和过程输出, r 和 y_d 为过程输出的设定值和目标输出, S_1, S_2 和 S_3 为比例因子, Z^{-1} 为滞后算子, e 和 ce 为过程输出与设定值的偏差和偏差的变化, 定义为:

$$e(k) = r - y(k), \quad ce(k) = e(k) - e(k-1).$$

* 国家自然科学基金资助项目。

本文于 1995 年 1 月 18 日收到, 1996 年 7 月 16 日收到修改稿.

其中 k 为采样时刻. 基本控制回路采用 PD 型模糊控制器, 其控制规则结构为:

$$\text{if } E(k) \text{ is } A_i \text{ and } CE(k) \text{ is } B_i \text{ then } U(k) \text{ is } D_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

其中 $E(k)$, $CE(k)$ 和 $U(k)$ 分别为与 $e(k)$, $ce(k)$ 和 $u(k)$ 相应的语言变量, A_i , B_i 和 D_i 为模糊集. 模糊控制器的输出按如下所示的推理算法确定^[6]:

$$u(k) = S_3 \sum_{i=1}^n W_i(k) \cdot d_i, \quad (2)$$

$$W_i(k) = A_i(S_1 e(k)) B_i(S_2 ce(k)) / \sum_{i=1}^n A_i(S_1 e(k)) B_i(S_2 ce(k)), \quad (3)$$

其中 d_i 满足 $D_i(d_i) = 1$.

由式(2)和(3)可知, 当模糊集 A_i 和 B_i 给定时, 控制回路的性能由控制规则的结论部分和比例因子决定. 改变 S_1, S_2, S_3 和 d_i 的值均可改变模糊控制器的控制效果. 本文主要讨论在模糊集 A_i, B_i 和比例因子 S_1, S_2, S_3 给定的条件下, 通过调整 d_i 的取值来实现控制规则的自适应问题. 为表述方便, 用下式表示 k 时刻模糊控制器中的任一条控制规则:

$$E(k) \times CE(k) \rightarrow d_i.$$

其中 $\times$ 表示直积.

首先, 在每个采样时刻, 根据过程实际输出逼近目标输出的模式来估计控制系统的性能并修正控制规则. 假定过程的纯时滞为 m . 如果 k 时刻过程输出比目标输出小 ($y < y_d$), 并且过程输出有比目标输出更小的趋势, 如图 2 所示, 那么可以推断 $k - m$ 时刻过程的控制输入太小, 应增大 $k - m$ 时刻控制器的输出. 设控制器输出的修正量为 Δu , 定义:

$$e^*(k) = y_d(k) - y(k), \quad \Delta e^*(k) = e^*(k) - e^*(k - m).$$

则上述思想可表达成如下规则:

$$\text{if } E^*(k) \text{ is P and } \Delta E^*(k) \text{ is P then } \Delta U \text{ is PB},$$

其中 $E^*(k)$, $\Delta E^*(k)$ 和 ΔU 分别为与 $e^*(k)$, $\Delta e^*(k)$ 和 Δu 相应的语言变量, P 和 PB 为模糊集. 用同样的分析方法可以得到其它几种逼近模式下控制量的校正规则, 如表 1 所示. 图 3 为表 1 中模糊集的隶属函数. 图中 $\pm a$ 和 $\pm b$ 为论域的边界值. 由表 1 的规则及类似式(2), (3)的推理算法可求得控制器输出的修正量 Δu . 根据 Δu 的大小将 k 时刻控制器的规则:

$$E(k) \times CE(k) \rightarrow d_i^{\text{old}},$$

修正为

$$E(k) \times CE(k) \rightarrow d_i^{\text{new1}},$$

其中

$$d_i^{\text{new1}} = d_i^{\text{old}} + \eta_1 W_i(k - m) \Delta u / S_3, \quad (4)$$

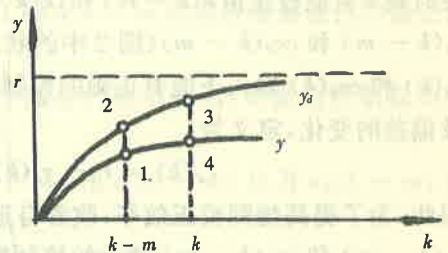


图 2 过程输出逼近目标输出模式之一

表 1 性能测试规则

$E^*(k)$	$\Delta E^*(k)$			
	Δu	P	Z	N
P		PB	PM	PS
Z		PS	ZE	NS
N		NS	NM	NB

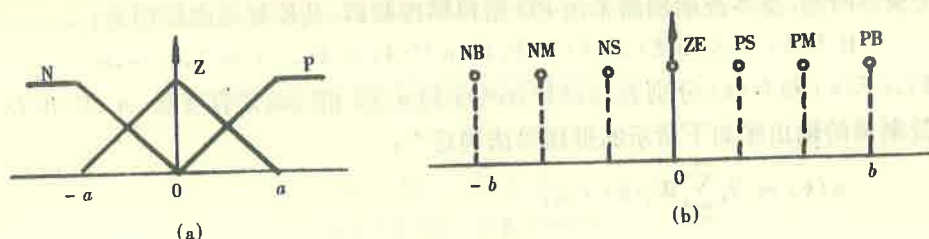


图3 模糊集的隶属函数

$$W_i(k-m) = A_i(S_1 e(k-m)) B_i(S_2 ce(k-m)) / \sum_{i=1}^n A_i(S_1 e(k-m)) \cdot B_i(S_2 \cdot ce(k-m)), \quad (5)$$

式(4)中的 η_i 为正实数, 用于调整规则校正速度. $w_i(k-m)$ 为第 i 条规则被 $e(k-m)$ 和 $ce(k-m)$ 激活的强度.

许多文献就是按照与上述相类似的思想来校正模糊控制规则的^[3-6]. 不难发现, 上述方法在时刻 k 只能校正由 $e(k-m)$ 和 $ce(k-m)$ (图2中的状态1) 激活的控制规则, 但不能校正由 $e_d(k-m)$ 和 $ce_d(k-m)$ (图2中的状态2) 激活的控制规则. 而我们希望的是模糊控制器在 $e_d(k)$ 和 $ce_d(k)$ 输入下能有正确的控制输出. 这里 $e_d(k)$ 和 $ce_d(k)$ 为目标输出与设定值的偏差及偏差的变化, 定义为

$$e_d(k) = r - y_d(k), \quad ce_d(k) = e_d(k) - e_d(k-1).$$

因此, 为了提高规则校正效率, 改善自适应控制性能, 在上述规则校正的基础上进一步校正由 $e_d(k-m)$ 和 $ce_d(k-m)$ 激活的控制规则.

假定在输入为 $e(k-m)$ 和 $ce(k-m)$ 时根据 d_i^{new1} 计算而得的控制器的修正输出为 $u_d^{\text{new}}(k-m)$, 并且在该控制量作用下系统可从图2所示的状态1运动到状态3. 设系统从状态2运动到状态3所需的控制量为 $u_d^{\text{new}}(k-m)$. 如果 $y_d(k-m) > y(k-m)$ 并且 $ce_d(k-m) < ce(k-m)$, 那么可以推断控制量 $u_d^{\text{new}}(k-m)$ 应小于 $u^{\text{new}}(k-m)$. 定义

$$\Delta ce(k-m) = ce_d(k-m) - ce(k-m),$$

则有

$$u_d^{\text{new}}(k-m) = u^{\text{new}}(k-m) + \Delta u_d, \quad (6)$$

其中控制量的修正量 Δu_d 由下述规则确定:

if $E^*(k-m)$ is P and $\Delta CE(k-m)$ is N then ΔU_d is NB.

这里 $E^*(k-m)$, $\Delta CE(k-m)$ 和 ΔU_d 分别为与 $e^*(k-m)$, $\Delta ce(k-m)$ 和 Δu_d 相应的语言变量. 用同样的分析方法可以获得其它过程输出逼近目标输出模式下 Δu_d 的确定规则, 如表2所示. 表2中的模糊集隶属函数形式与图3相同. 这样, 根据表2的规则及类似式(2), (3)的推理算法可求得 Δu_d .

设由 $e_d(k-m)$ 和 $ce_d(k-m)$ 根据 d_i^{new1} 求得的控制器输出为 $u_d^{\text{old}}(k-m)$, 则根据 $u_d^{\text{old}}(k-m)$ 与 $u_d^{\text{new}}(k-m)$ 的差值将控制规则

$$E(k) \times CE(k) \rightarrow d_i^{\text{new1}},$$

修正为

表2 性能测试规则

$E^*(k-m)$	$\Delta CE(k-m)$		
	P	Z	N
P	NS	NM	NB
Z	PS	ZE	NS
N	PB	PM	PS

$$E(k) \times CE(k) \rightarrow d_i^{\text{new}2}.$$

其中

$$d_i^{\text{new}2} = d_i^{\text{new}1} + \eta_2 w_i(k-m)(u_d^{\text{new}}(k-m) - u_d^{\text{old}}(k-m))/S_3, \quad (7)$$

$$w_i(k-m) = A_i(S_1 e_d(k-m)) B_i(S_2 ce_d(k-m)) / \sum_{i=1}^n A_i(S_1 e_d(k-m)) \cdot B_i(S_2 ce_d(k-m)), \quad (8)$$

式(7)中的 η_2 为正实数, 用于调整规则校正速度. $w_i(k-m)$ 为第 i 条规则被 $e_d(k-m)$ 和 $ce_d(k-m)$ 激活的强度.

综上所述, 本文提出的自适应模糊控制器的规则自适应机构由两组关于控制规则自生成与自校正的元规则组成. 使用表 1 和表 2 两组规则, 系统可在时刻 k 同时自动调整由图 2 中状态 1 和状态 2 激活的控制规则, 下面给出控制规则自适应算法的具体步骤:

1) 初始化模糊控制器, 确定参考模型. 模糊控制器的初始化包括确定比例因子和式(1)中的模糊集 A_i 和 B_i ; 给 d_i 赋初值. $d_i = 0$ 等效于模糊控制器无初始规则.

2) 由 k 时刻的偏差信息 $e^*(k)$ 和 $\Delta e^*(k)$ 根据表 1 确定 $k-m$ 时刻控制器输出的修正量 Δu .

3) 按式(4)和(5)校正由 $e(k-m)$ 和 $ce(k-m)$ 激活的控制规则, 得新的控制规则的 $d_i^{\text{new}1}$.

4) 根据 $d_i^{\text{new}1}$ 按式(2)和(3)计算输入分别为 $e(k-m)$ 和 $ce(k-m)$ 以及 $e_d(k-m)$ 和 $ce_d(k-m)$ 时控制器的输出 $u^{\text{new}}(k-m)$ 和 $u_d^{\text{old}}(k-m)$.

5) 根据 $k-m$ 时刻的信息 $e^*(k-m)$ 和 $\Delta ce(k-m)$, 由表 2 确定 Δu_d .

6) 按式(6)计算输入为 $e_d(k-m)$ 和 $ce_d(k-m)$ 时, 控制器应该输出的控制量 $u_d^{\text{new}}(k-m)$.

7) 按式(7)和(8)根据 $u_d^{\text{old}}(k-m)$ 和 $u_d^{\text{new}}(k-m)$ 校正由 $e_d(k-m)$ 和 $ce_d(k-m)$ 激活的控制规则, 得 $d_i^{\text{new}2}$.

8) 在 $k+1$ 时刻重复上述 2) 至 7) 的过程.

3 仿真研究

设被控过程为 $G(s) = \frac{0.1}{(20s+1)(35s+1)}$, 过程输出的设定值 $r = 1.0$, 取偏差 e 和偏差变化 ce 的论域均为 $(-2, 2)$, 它们对应的参考模糊集如图 4 所示. 仿真中比例因子均置为 1. 过程的目标输出由下述的一阶模型产生:

$$y_d(k) = c y_d(k-1) + (1-c)r,$$

其中 c 为 $[0, 1]$ 中的常数.

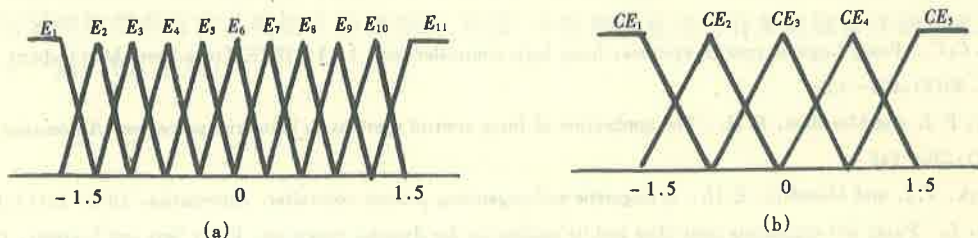


图 4 参考模糊集

对于 PD 型模糊控制器,在某一设定值下获得的控制规则一般不完全适用于另一设定值。因此,对于跟踪控制问题,需要研究在设定值阶跃扰动下规则自适应算法的自适应控制性能。仿真中 d_i 的初始值置为 0,等效于控制器无适用的控制规则。图 5 为控制命令是单位阶跃信号时自适应跟随响应的过程输出曲线。图中 T 为采样周期。可以看出,当 $\eta_1 = 0.75, \eta_2 = 0.1$ 时,过程的输出能很快达到并稳定在设定值上,而当 $\eta_1 = 0.75, \eta_2 = 0$ 时,系统的响应时间要长得多。可见,同时利用表 1 和表 2 学习规则可大大提高规则的生成和校正效率,提高自适应过程的系统响应速度,使模糊控制器具有较好的自适应性能。

为了研究自适应控制的鲁棒性,现假定过程模型变为 $G(s) = \frac{0.5}{(30s+1)(45s+1)}$,而自适应模糊控制器的参数不变。图 6 为 d_i 初始值为 0,控制命令是单位阶跃信号时的过程输出仿真曲线。可见,当过程的增益和惯性增加很大时,系统仍保持稳定,并具有很好的控制效果。

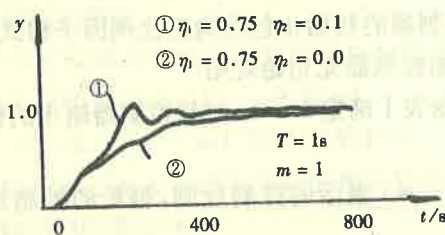


图 5 自适应过程输出响应曲线

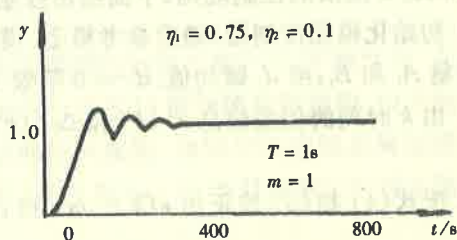


图 6 鲁棒性仿真曲线

图 7 为设定值扰动下的重复学习仿真曲线。仿真中,将在上次仿真过程中得到的控制规则作为本次仿真的初始控制规则。其中第一次仿真时 d_i 的初始值均为 0。可见,规则自适应算法有效地改善了控制系统的性能。因此,对于调节问题,也可以应用规则自适应算法对控制规则进行在线修正,使模糊控制器的控制规则得到不断的扩充和完善。

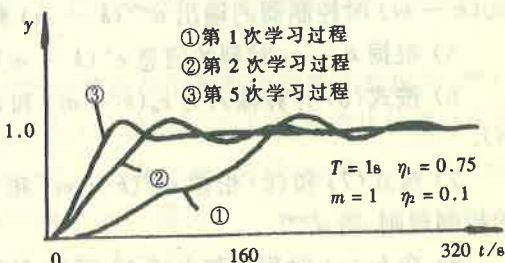


图 7 重复学习仿真曲线

4 结 论

对自校正模糊控制器的研究已越来越受到重视^[7]。本文研究了在给定比例因子条件下模糊控制规则的自适应问题,并提出了一种新的控制规则自适应算法。仿真研究结果表明,本文的方法是有效的,并且比文献[2, 3, 4, 5]等所提出的方法具有更好的自适应性能。

参 考 文 献

- 1 Lee, C. C.. Fuzzy Logic in control systems; fuzzy logic controller-part I, I. IEEE Trans Syst. Man Cybern., 1990, SMC-20(2):404-435
- 2 King, P. J. and Mamdani, E. H.. The application of fuzzy control systems to industrial processes. Automatica, 1977, 13(2):235-242
- 3 Procyk, T. J. and Mamdani, E. H.. A linguistic self-organizing process controller. Automatica, 1979, 15(1):15-30
- 4 Shao, S.. Fuzzy self-organizing controller and its application for dynamic processes. Fuzzy Sets and Systems, 1988, 26(2): 151-164
- 5 张宏娟,王守觉.直接修改控制规则的自调整模糊控制器.电子学报,1992,20(2): 10-15

- 6 Maeda, M. and Assilian, S.. A self-tuning fuzzy controller. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 51(1):29-40
- 7 Chou, C.H. and Lu, H.C.. A heuristic self-tuning fuzzy controller. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 61(2):249-264

A Rule Adaptive Fuzzy Controller

JU Gang and CHEN Laijiu

(Department of Power Engineering Southeast University • Nanjing, 210018, PRC)

Abstract: The paper studies the control rules adaptivity for a fuzzy controller. A method for generating and tuning the control rules is proposed and the relative algorithm is given. The simulation results show that the proposed control rule adaptive algorithm is effective.

Key words: fuzzy control; fuzzy reasoning; adaptivity

本文作者简介

陆 刚 1966年生. 1991年和1995年于东南大学动力系分别获硕士学位和博士学位, 现为东南大学动力系讲师. 从事火电厂热工过程控制的教学和科研工作. 目前主要研究模糊控制及分散控制系统.

陈来九 1929年生. 1952年毕业于厦门大学机械工程系. 长期从事热工过程自动控制方面的教学和科研工作, 现为东南大学动力系教授, 博士生导师.

第三届“何潘清漪优秀论文奖”在西安颁发

第二届全球华人智能控制与智能自动化大会6月23日至27日在古都西安著名学府西安交通大学科学馆国际会议中心举行. 6月27日晚大会在西安金花饭店举行盛大宴会. 会上由会议主席兼何潘清漪优秀论文奖评选委员会主席谈自忠教授宣布第三届“何潘清漪优秀论文奖”的论文及作者, 他们是:

1. 矢量文法与PN机

作者为中国科学院自动化研究所和山东矿业学院计算机系的蒋昌俊, 论文载于《中国科学》(A辑)25卷第12期第1315~1322页, 1995年12月.

2. 避免FMS死锁的控制策略

作者为西安电子科技大学应用数学系邢科文、许祥秦和西安交通大学系统工程研究所胡保生. 论文载于《控制理论与应用》13卷第3期第312~318页, 1996年.

谈自忠教授宣布两论文系并列获奖, 平分奖金1000美元. 每位作者得奖牌一座. 宣布后即由何毓琦教授亲自向获奖论文作者授奖. 据悉, 本次参与竞选的有关离散事件动态系统论文共约十一篇. (万百五)