

一类自学习模糊控制器的设计及鲁棒性分析*

张恩勤 施颂椒 徐立鸿
(上海交通大学自动化系 200030) (同济大学电气工程系)

摘要 基于一类参数化的模糊量表示,将模糊量同精确量统一起来。在此基础上提出规则增加、规则删除、规则修正算法,进行了一类自学习模糊控制器的设计。对二阶系统的参数鲁棒性仿真实验表明,与常规模糊控制器相比,这类自学习模糊控制器对控制对象的某些参数变化有较强的适应性。

关键词 模糊控制,鲁棒性,自学习

分类号 TP 273.3

Design of a Class of Self-learning Fuzzy Controller and Its Robustness Analysis

Zhang Enqin, Shi Songjiao Xu Lihong
(Shanghai Jiaotong University) (Tongji University)

Abstract To improve the performance of fuzzy rules, a class of self-learning fuzzy controller is presented. Firstly, the fuzzy variable with Gauss membership function is represented by two parameters. Based on it, the analysis of the relation between fuzzy variable and precise variable is given. Then, with the new representation of fuzzy variable, the fuzzy rules are simply parameterized. According to the simple structure of fuzzy rules, a new algorithm of rules' adjustment is given, including rule-adding, rule-deleting and rule-modification. The self-learning algorithm here is much simpler and more systematic than others that based on linguistic rules. Robustness experiments about two order plants are given, which show that the new self-learning fuzzy controller has better robustness than common fuzzy controller and PD controller.

Key words fuzzy controller, robustness, self-learning

1 引言

模糊控制是基于规则的控制,所以模糊控制规则决定了整个控制器的基本性能。但对于某些对象,其控制规则往往很缺乏或者很粗糙,难以保证其精确性;即使可以找到一组较好的初始控制规则,对于某些系统也需要在控制过程中予以调整。因此,控制规则的调整是模糊控制中的一个关键问题。70年代末,Procyk和Mamdani^[1]提出一种语言自组织模糊控制器(SOC),对规则进行调整。此后,许多学者致力于这方面的研究工作^[2-4],但由于模糊控制器本身结构的复杂性,至今仍未取得满意的结果。

模糊控制规则是模糊控制器的关键与核心,而模糊控制规则的最基本单元是模糊量。Lienkens和

Nie^[2]基于三角隶属度函数,提出用中心值和底宽来代表一个模糊量,并提出了新的规则表示法。由于三角形函数具有一定的局限性,本文基于Gauss型函数提出参数化的模糊量表示法及模糊规则表示法,在此基础上得到一种自学习模糊控制器。仿真实验表明,与常规模糊控制器及PD控制器相比,该控制器具有较强的鲁棒性。

2 模糊量及模糊空间分析

2.1 Gauss型模糊量

Gauss型隶属度函数是一种较为理想的隶属度函数^[5]。它有如下形式

$$\mu_A(u) = \exp(-(u - \bar{u})^2/\sigma^2) = F(u; \bar{u}, \sigma) \quad (1)$$

其中, $F(u; \bar{u}, \sigma)$ 称为Gauss型函数, $\bar{u}$ 和 σ 为其两个重要参数, $\bar{u}$ 表示中心值, σ 表示集中度。于是可简记

* 1998-12-21 收稿,1999-04-05 修回

上述模糊量 A 为 $(\bar{u}, \sigma)$ 。在这种表示法下, 精确量 u 可看作 $\sigma = 0$ 的模糊量, 即精确量 $u: \lim_{\sigma \rightarrow 0} (u, \sigma)$, 从而实现了精确量与模糊量的统一。

2.2 模糊量空间

基于上面的参数化模糊量, 可定义如下模糊量空间:

定义 1 基于 n 维向量的模糊量空间为

$$\bar{U} = \{(u, \sigma) | u \in U, \sigma \in R^{n+}\} \quad (2)$$

基于定义 1 中的模糊量空间, 引入如下的距离关系:

定义 2 广义距离

$$D_M[(u^1, \sigma^1), (u^2, \sigma^2)] = \min \{ \max_{1 \leq i \leq n} \{1 - F(u_i^1; u_i^2, \sigma_i^2)\}, \max_{1 \leq i \leq n} \{1 - F(u_i^2; u_i^1, \sigma_i^1)\} \} \quad (3)$$

由于精确量 u 可看作 $(u, 0)$ 形式的模糊量, 则可推出 U 到 $\bar{U}$ 空间元素间的距离如下:

推论 1 任取 $u \in U, (\bar{u}, \sigma) \in \bar{U}$, 则上述定义的距离可推广为

$$D_M[u, (\bar{u}, \sigma)] = \max_{1 \leq i \leq n} \{1 - F(u; \bar{u}_i, \sigma_i)\} \quad (4)$$

由此, 精确量与模糊量之间便有了一定的距离关系, 也就确定了空间 U 与 $\bar{U}$ 之间的关系。

3 控制系统设计

3.1 规则表示

基于以上参数化的模糊量表示法, 对应的控制规则可表述为

$$\begin{aligned} & \text{if } (u_1, \sigma_1), (u_2, \sigma_2), \dots, \text{ and } (u_n, \sigma_n) \\ & \text{then } (v_1, \delta_1), (v_2, \delta_2), \dots, \text{ and } (v_m, \delta_m) \end{aligned} \quad (5)$$

对于输出变量 (v_i, δ_i) , 利用 Linkens^[2] 的方法可去掉 δ_i , 则上述规则可进一步转化为

$$\text{if } (u, \sigma) \text{ then } v \quad (6)$$

显然, u, σ, v 是一条规则下的 3 个基本元素, 规则调整就是这 3 个元素的调节。 u 的调节将使规则自动组织; σ 的调节将使规则在某些特殊点处自动提高灵敏度, 以获得较好的控制效果; v 的调节即为控制量修正, 以减小规则不精确所引起的控制误差。

假设共有 P 条规则, 其中第 k 条规则(以下简称规则 k) 可描述为

$$R^k: (u^k, \sigma^k) \rightarrow v^k \quad (7)$$

3.2 输入端处理

设控制器输入量为 u , 选择何种控制输出, 主要依赖于 u 与各条规则的匹配程度。

定义 3 输入量 u 与规则 k 的匹配度为

$$S[u, (u^k, \sigma^k)] = 1 - D[u, (u^k, \sigma^k)] \quad (8)$$

其中 $D[u, (u^k, \sigma^k)]$ 由式(4) 得出。在此简记

$$S_k = S[u, (u^k, \sigma^k)], \quad S_k \in [0, 1] \quad (9)$$

3.3 输出端处理

采用最大匹配度法, 选择匹配度较大的那条规则作为输出决策。如果满足条件

$$S_J = \max_{1 \leq i \leq n} S_i \quad (10)$$

只有一条规则 J , 则输出 $v = v^J$ 。

如果有多条规则具有最大匹配度, 则选择灵敏度最高的那条规则, 即满足条件

$$\sigma^J = \min_{1 \leq i \leq n} \sigma^i \quad (11)$$

一般满足以上两条件的规则最多只有一条, 这是由规则的组织方式所决定的, 从以下的自学习算法中可以看出这一点。假如有多条规则存在, 则可任选其一。

4 自学习算法

假设共有 P 条规则, 并采用常规反馈式二维模糊控制器, 则式(7) 表示的规则 k 可描述为

$$(e^k, \sigma_1^k, e_c^k, \sigma_2^k) \rightarrow v^k \quad (12)$$

设 e_0, e_{c0} 为当前的控制器输入, 则式(8) 定义的匹配度可描述为

$$S_k = \min \{F[e_0, (e^k, \sigma_1^k)], F[e_{c0}, (e_c^k, \sigma_2^k)]\} \quad (13)$$

定义如下符号与变量:

P : 当前规则数目; S^* : 最小匹配度系数; S^{**} : 可靠匹配度系数 ($S^{**} > S^*$); $\sigma^* = (\sigma_1^*, \sigma_2^*)$: 最小集中度向量; $\sigma^{**} = (\sigma_1^{**}, \sigma_2^{**})$: 可靠集中度向量; ϵ : 最大允许误差; η : 修正因子; $Q(k)$: 规则 k 利用度; $R(k)$: 规则 k 修正次数。

下面从规则增加、规则删除及规则修正 3 方面来实现控制规则的自组织、自学习功能。

4.1 规则增加

设 t 时刻控制器输入为 $e(t)$ 和 $e_c(t)$, 由式(10), (11) 得到最佳匹配规则为第 J 条。如果 $S_J < S^*$, 则表明匹配度不足, 需增加一条规则, 即

$$\begin{cases} P = P + 1 \\ e^P = e(t), & \sigma_1^P = \sigma_1^* \\ e_c^P = e_c(t), & \sigma_2^P = \sigma_2^* \\ v^P = \frac{\sum_{k=1, S_k < S^*/2}^P S_k v^k}{\sum_{i=1, S_i < S^*/2}^P S_i} \\ Q(P) = 1, & R(P) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

4.2 规则删除

在系统运行过程中,需定期进行规则自检,以删除一些可靠度较低的规则。

定义4 规则 k 的可靠度为

$$C(k) = 1 - R(k)/Q(k) \quad (15)$$

选择适当的规则可靠度 C^* 及使用度标准 Q^* ,对 $C(k) < C^*$ 或 $Q(k) < Q^*$ 的规则定期予以删除,以减少系统的存储量并提高运算速度,保证系统处于最佳运行状态。

4.3 规则修正

一条如式(12)的规则,共有5个基本元素,基中起主要调节作用的是 σ_1^k, σ_2^k 及 $v^k, \sigma_1^k, \sigma_2^k$ 影响输入的匹配关系; v^k 影响控制器的输出; e^k, e_c^k 影响规则的位置,但其调节作用可通过 σ_1^k, σ_2^k 的调节及规则增加、规则删除来实现,在此不予讨论。假设 t 时刻 $\|e(t)\| > \epsilon$,表示此时刻控制决策不当,则应对规则予以修正。

1) 如果 $S_{J(t-1)} < S^*$,且 $\sigma_1^{(t-1)} > \sigma_1^*$ 或 $\sigma_2^{(t-1)} > \sigma_2^*$,表示偏差很可能是由于 $\sigma_1^{(t-1)}$ 或 $\sigma_2^{(t-1)}$ 过大而引起的,不妨设为 $\sigma_1^{(t-1)}$,并对其进行调整,使其满足

$$F[e(t-1), e^{J(t-1)}, \sigma_1^{(t-1)}] < S^* \quad (16)$$

$$\text{则 } \sigma_1^{(t-1)} = \frac{\|e(t-1) - e^{J(t-1)}\|}{\sqrt{-\ln(S^* - \Delta)}} \quad (17)$$

其中 Δ 为一任意小的正数,可根据实际情况选取。经过调整,即可保证 $e(t-1), e_c(t-1)$ 不再与规则 k

相匹配,从而避免了不恰当的匹配关系。

2) 其他情况可视为控制量 v^k 不太合理。对于修正因子 η 采用变尺度学习方法,选用可信度 $C(k)$ 来消除修正因子 η 的作用,以达到变尺度的效果。

综合以上两种学习方法,可得修正算法为

$$v^{J(t-1)} \leftarrow v^{J(t-1)} + e(t-1) \frac{\eta}{1 + 2C(k)} \quad (18)$$

由以上各步可得控制算法如下:

Step 1: 计算 $e(t)$ 和 $e_c(t)$;

Step 2: 如果 $\|e(t)\| > \epsilon$,则进行规则修正;

Step 3: 求 $S_J = \max_{1 \leq i \leq n} S_i$,若 $S_J > S^*$,则 $w_{in} = J$;

否则,规则增加, $w_{in} = P$;

Step 4: $v = v^{w_{in}}$;

Step 5: 若 $t \neq aT, a \in Z$,则转Step 1;否则,规则删除, $t = 0$,转Step 1。

5 仿真举例

选取二阶模型

$$G(s) = \frac{k + \Delta k}{(T_{1s} + 1)(T_{2s} + 1)}$$

确定较重要的参数如下: $\epsilon = 0.001, S^* = 0.70, S^{**} = 0.90, \sigma^* = (\sigma_1^*, \sigma_2^*) = (0.2, 0.4), \sigma^{**} = (\sigma_1^{**}, \sigma_2^{**}) = (0.05, 0.1), \eta = 1.0$ 。

首先对参数 $k (= 1)$ 进行鲁棒性仿真,图1,图2分别表示 $T_1 = 25, T_2 = 5$,在 $t = 110s$ 时参数 k 有

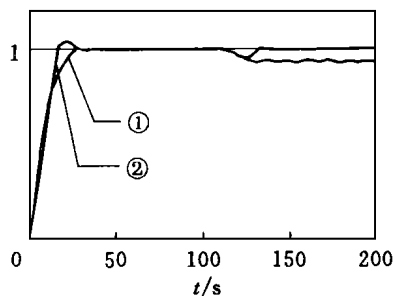


图1 $\Delta k = -0.1$ 时两种控制方案比较

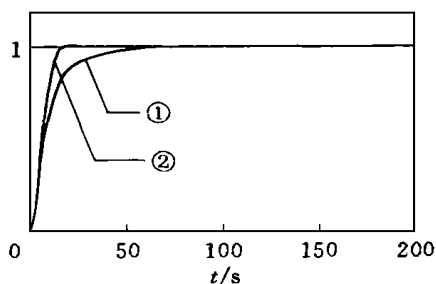


图3 $T_1 = 15, T_2 = 5$ 时的控制结果

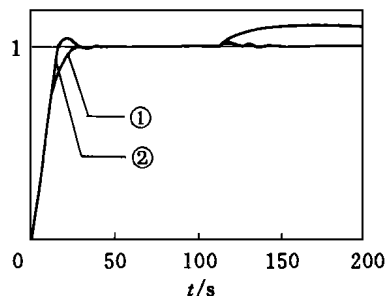


图2 $\Delta k = +0.1$ 时两种控制方案比较

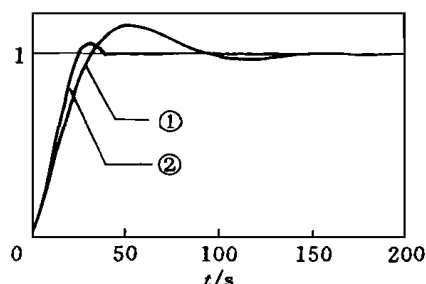


图4 $T_1 = 50, T_2 = 5$ 时的控制结果

扰动 $\Delta k = \pm 0.1$ 两种控制方案结果比较(图中①为常规模糊控制,②为自学习模糊控制);其次对时间参数进行鲁棒性仿真,图 3 表示 $T_1 = 15, T_2 = 5$ 时的控制结果,图 4 表示其它情况不变,参数 $T_1 = 50$ 时的控制结果(图中①为 PD 控制器,②为自学习模糊控制器)。

仿真结果表明,当系统的某些参数发生变化时,常规模糊控制器容易出现控制偏差,而本文的自学习算法则可克服这一缺点;同 PD 控制器相比,当时间常数有大的变动时,本文算法仍可取得较好的控制效果。因此,本文自学习模糊控制器具有较强的鲁棒性,可适用于一些慢时变系统。

6 结 论

克服只用语言信息的弊端,使模糊控制明确化、数量化,是模糊控制发展的重要方向。针对模糊控制的规则调整问题,本文提出一类自学习模糊控制器。在新型的规则组织方式下,模糊信息与精确信息达到了统一形式 (u, o) , 有利于规则的自调整。仿真实验表明,该方法具有较强的鲁棒性,是一种可行的设计方案。

(上接第 281 页)

5 结 语

在网络控制系统中,由信息传输所造成的时间延迟是不可避免的。针对这种现象,本文提出一种建模方法,得到了网络控制系统的数学模型。为使系统在保持概率稳定的同时还具有较快的收敛速度,本文提出了一种均方指数稳定控制律设计方法,仿真结果表明了该方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 Luen Woei Liu, A sok Ray. A stochastic regulator for integrated communication and control systems: Part I — Formulation of control law. J of Dynamic Systems Measurement and Control, 1991, 113(4): 604-611
- 2 Luen Woei Liu, A sok Ray. A stochastic regulator for integrated communication and control systems: Part II — Numerical analysis and simulation. J of Dynamic Systems Measurement and Control, 1991, 113(4): 612-617
- 3 Nilsson J, B Bernhardsson, B Wittenmark. Stochastic

参 考 文 献

- 1 Procyk T J, E H M amdani A. linguistic self-organizing process controller. Automatica, 1979, 15(1): 15-30
- 2 Linkens D A, Nie J. Constructing rule-based for multivariable fuzzy control by self-learning. Part I: System structure and self-learning. Int J Systems Sci, 1993, 24(1): 111-127
- 3 Zhang B S, Edmunds J M. Self-organizing fuzzy logic controller. IEE Proc, 1992, 139(5): 460-464
- 4 Shao Shihuang. Fuzzy self-organizing controller and its applications for dynamic process. Fuzzy Sets and Systems, 1988, 26(2): 151-164
- 5 王立新. 自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析. 北京: 国防工业出版社, 1995

作 者 简 介

张恩勤 男, 1971 年生。1997 年于东南大学自动化所获硕士学位, 现于上海交通大学自动化系攻读博士学位。主要研究兴趣为模糊系统。

施颂椒 男, 1933 年生。上海交通大学教授, 博士生导师。主要研究领域为鲁棒控制与自适应控制。

徐立鸿 男, 1960 年生。同济大学教授, 博士生导师。主要研究领域为预测控制与自适应模糊控制。

analysis and control of real-time systems with random time delays. Automatica, 1998, 34(1): 57-64

- 4 Yoram Halevi, A Ray. Integrated communication and control systems: Part I—Analysis. J of Dynamic Systems Measurement and Control, 1988, 110(4): 367-373
- 5 A Ray, Yoram Halevi. Integrated communication and control systems: Part II—Design considerations. J of Dynamic Systems Measurement and Control, 1988, 110(4): 374-381
- 6 W L De Koning. Infinite horizon optimal control of linear discrete time systems with stochastic parameters. Automatica, 1982, 18(4): 443-453

作 者 简 介

于之训 男, 1972 年生。1995 年毕业于同济大学电气工程系, 同年免试攻读硕士研究生, 1996 年转为博士研究生。研究领域为基于通讯网络的控制系统的研究。

陈辉堂 男, 1933 年生。同济大学电气工程系教授, 博士生导师。研究方向为机器人控制与智能控制。

王月娟 女, 1935 年生。同济大学电气工程系教授, 博士生导师。研究方向为机器人控制与智能控制。