

智能控制的新进展 (I)*

李少远 席裕庚 陈增强 袁著祉
(上海交通大学自动化研究所 200030) (南开大学计算机与系统科学系)

摘要 对模糊智能控制的主要研究方向进行较详细的分析和论述, 包括模糊模型与基本控制算法, 非线性系统的模糊建模与控制, 模糊预测控制, 模糊控制系统的稳定性分析等。对它们在智能控制中的地位和作用进行讨论, 并对模糊智能控制的发展做了展望。

关键词 模糊推理, 智能控制, 自动控制理论

分类号 TP 18

The New Progresses in Intelligent Control (I)

L i Shaoyuan, X i Yugeng Chen Zengqiang, Yuan Zhuzhi
(Shanghai Jiaotong University) (Nankai University)

Abstract The major subjects of fuzzy intelligence control are introduced in detail, including fuzzy models and basic algorithms, fuzzy modeling and control of nonlinear systems, fuzzy predictive control and stability analysis of fuzzy control systems. The roles of above subjects in the intelligent control structure are discussed. Finally future research directions are suggested.

Key words fuzzy reasoning, intelligent control, automatic control theory

1 引言

自从美国数学家维纳于 40 年代创立控制论以来, 自动控制理论经历了经典控制理论和现代控制理论两个重要发展阶段。在处理复杂系统控制问题时, 传统的控制理论对于复杂性所带来的问题, 总是力图突破旧的模式, 以适应社会对自动化提出的新要求。世界各国控制理论界也都在探索建立新一代的控制理论, 以解决复杂系统的控制问题。近年来, 把传统控制理论与模糊逻辑、神经网络、遗传算法等人工智能技术相结合, 充分利用人类的控制知识对复杂系统进行控制, 逐渐形成了智能控制理论的雏形。

1985 年, IEEE 在纽约召开了第一届智能控制学术会议, 集中讨论智能控制的原理和系统结构等问题, 标志着这一新的体系的形成。虽然智能控制体系的形成只有十几年的历史, 理论还远未成熟, 但已有的应用成果和理论发展都表明智能控制正成为自动控制的前沿学科之一。

2 智能控制概况

近年来, 越来越多的学者已意识到在传统控制中加入逻辑、推理和启发式知识的重要性, 这类系统一般称为智能控制系统。对“智能控制”这一术语还没有确切的定义, IEEE 控制系统协会归纳为^[1,2]: 智能控制系统必须具有模拟人类学习(Learning)和自适应(Adaptation)的能力。智能控制不同于经典控制理论和现代控制理论的处理方法, 控制器不再是单一的数学解析模型, 而是数学解析模型和知识系统相结合的广义模型。概括地说, 智能控制具有以下基本特点:

- 1) 应能对复杂系统(如非线性、快时变、复杂多变量、环境扰动等)进行有效的全局控制, 并具有较强的容错能力;
- 2) 定性决策和定量控制相结合的多模态组合控制;
- 3) 其基本目的是从系统的功能和整体优化的角度来分析和综合系统, 以实现预定的目标, 并应具有自组织能力;
- 4) 同时具有以知识表示的非数学广义模型和

* 教育部博士后科学基金项目

1998- 09- 28 收稿, 1998- 11- 09 修回

以数学模型表示的混合控制过程,人的知识在控制中起着重要的协调作用,系统在信息处理上既有数学运算,又有逻辑和知识推理。

模糊控制是智能控制较早的形式,它吸取了人的思维具有模糊性的特点。从广义上讲,模糊逻辑控制指的是应用模糊集合理论统筹考虑系统的一种控制方式,模糊控制不需要精确的数学模型,是解决不确定性系统控制的一条有效途径。在早期(1990年以前)的文献中,如Lee^[3],Zimmernan^[4]等,认为模糊控制是在其他基于模型的控制方法不能很好地进行控制时的一种有效选择,模糊控制器的隶属度函数、控制规则是根据经验预先总结而确定的,控制过程中没有对规则的修正功能,不具有学习和适应能力。即便如此,模糊控制仍然取得了一些成功的应用,如在窑炉、工业机器人等方面^[3]。但对较复杂的不确定性系统进行控制时,模糊控制往往精度较低,总结控制规则过分依赖现场操作,调试时间长,难以满足要求。

目前,众多学者对传统模糊控制进行了许多改进,已发展成为多种形式的模糊控制,出现了模糊模型及辨识^[5,6]、模糊自适应控制^[7],并在稳定性分析^[8-10]、鲁棒性设计^[11]等方面取得了进展。Buckley^[9]称基于模型和分析方法的模糊控制为现代模糊控制,它为模糊控制带来了新的活力,从而成为智能控制的重要分支之一。

3 模糊逻辑控制

3.1 模糊模型与基本控制算法

传统控制理论通常是基于控制系统的线性数学模型来设计控制器,而大多数工业被控对象是具有时变、非线性等特性的复杂系统,对这样的系统进行控制,不能仅仅基于在平衡点附近的局部线性模型,而需要加入一些与工业状况有关的人类的控制经验。这种经验通常是定性的或定量的,模糊推理控制正是这种控制经验的表示方法, Lee^[3]称这种模糊控制为直接模糊控制。这种方法的优点是不需要被控过程的数学模型,因而可省去传统控制方法的建模过程,但却过多地依赖控制经验。此外,由于没有被控对象的模型,在投入运行之前就很难进行稳定性、鲁棒性等闭环分析,这也妨碍了传统控制理论在模糊控制中的应用。

随着研究的深入,越来越多的研究者在模糊控制模式中引入了模糊模型的概念,出现了模糊模型,

于是控制器就可根据这个模型采用现代控制理论方法进行设计,从而将定量知识和定性知识较好地融合在一起,如图1所示。

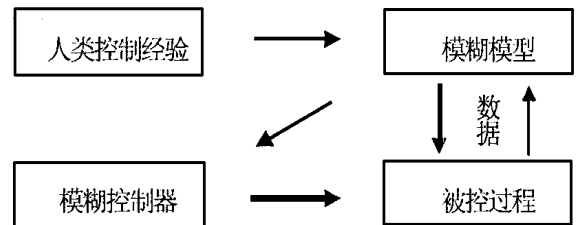


图1 模糊模型

模糊模型就是用 if-then 形式的规则表示控制系统的输入输出关系。现有文献的模糊模型主要有 Mamdani 模型和 Sugeno 模型。在 Mamdani 模型中,系统映射可以写成

$$\begin{aligned}
 R_i: & \text{if } y(k) \text{ is } A_{i1} \text{ and } \dots \\
 & \text{and } y(k-n+1) \text{ is } A_{in} \\
 & \text{and } u(k) \text{ is } B_{i1} \text{ and } \dots \\
 & \text{and } u(k-m+1) \text{ is } B_{im} \\
 & \text{then } y(k+1) \text{ is } C_i
 \end{aligned} \quad (1)$$

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

$$y(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{C}_i \mu_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i} \quad (2)$$

其中, μ_i 为前提条件的模糊蕴含, \bar{C}_i 为第 i 条规则输出模糊集合的中心点。Zeng^[12], Castro^[13] 已分别证明,这种带模糊判决和取小蕴含运算 Mamdani 型的模糊模型是对连续函数的一种完备映射。

Takagi 和 Sugeno^[14] 提出一种 T-S 模糊模型,称为 Sugeno 模型, Sugeno^[15-17] 并提出了完整的辨识模型的方法。Sugeno 模型的前提部分与 Mamdani 模型有相同的结构,而结论部分则代替原来的模糊集合,用一个前提部分变量的多项式表示,是前提变量的线性函数。对于系统(1)有如下结构

$$\begin{aligned}
 R_i: & \text{if } y(k) \text{ is } A_{i1} \text{ and } \dots \\
 & \text{and } y(k-n+1) \text{ is } A_{in} \\
 & \text{and } u(k) \text{ is } B_{i1} \text{ and } \dots \\
 & \text{and } u(k-m+1) \text{ is } B_{im} \\
 & \text{then } y_i(k+1) = g_i(\bullet) = \\
 & p_0^i + p_1^i y(k) + \dots + \\
 & p_{n+m}^i u(k-m+1)
 \end{aligned} \quad (3)$$

也可表示为状态方程的形式

$$\begin{cases}
 x(k+1) = A x(k) + B u(k) \\
 y(k) = C x(k)
 \end{cases} \quad (4)$$

这种控制系统的结构如图 2 所示。Sugeno 模糊模型可以看成是系统在不同工况时的局部模型, 基于 Sugeno 模型, 可以充分利用现代控制理论知识对各个局部模型分别设计控制器。由于它们在前提条件中对应不同的隶属度 μ_i , 因此系统总的输出仍可按(4) 式进行模糊判决, 其中 \bar{C}_i 为第 i 个 Sugeno 模型的输出。

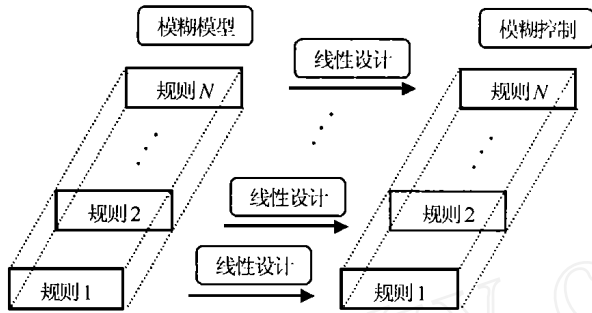


图 2 Sugeno 模糊控制器的设计

模糊模型除具有连续函数的映射能力外, 还具有以下优点:

- 1) 集成专家控制经验, 以 if-then 规则的形式表示, 具有知识表达的特点;
- 2) 局部线性化模型可采用现代控制理论(极点配置、状态反馈、预测控制等) 方法进行系统设计和分析;
- 3) Mamdani 和 Sugeno 模型都可根据系统的输入输出数据进行辨识, 具有定量和定性知识集成的特点。

3.2 非线性系统的模糊建模与控制

在现代控制理论中, 复杂非线性系统的辨识和控制仍是一大难题, 模糊逻辑推理、神经网络及二者的结合为非线性系统的建模与控制提供了强有力的工具。特别是模糊模型易于表达结构性知识, 成为模糊控制系统研究的关键问题。Zadeh 提出“不相容原理”^[15], 即当一个系统复杂性增加时, 人们对其精确化的能力将降低, 当达到一定的阈值时, 复杂性和精确性将相互排斥。也就是说, 在多变量、非线性、时变的复杂大系统中, 系统的复杂性与人们要求的精确性之间形成了尖锐矛盾。因此, 许多学者在研究非线性系统建模和控制问题时用到了模糊神经网络技术。

对非线性系统的模糊控制, Wang^[18, 19] 提出了模糊自适应控制和分析的方法。对于非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + bu \\ y = x \end{cases} \quad (5)$$

其中, $f(\bullet)$ 是未知的非线性连续函数, b 是未知的正常数, $u, y \in R$ 分别是系统的输入和输出。假设 $x = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T \in R^n$ 是可测量的, 控制目标是使输出 y 跟踪参考给定 y_r , 要求闭环系统全局稳定。文献[19] 给出最优控制律为

$$u^* = \frac{1}{b} [-f(x) + \dot{y}_r^{(n)} + k^T e] \quad (6)$$

其中, $e = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})$ 是误差向量, $k = (k_1, k_2, \dots, k_n)$ 是稳定多项式 $h(s) = s^n + k_1 s^{(n-1)} + \dots + k_n$ 的系数。由于 $f(\bullet)$ 和 b 未知, 则自适应控制律为

$$\dot{\Theta} = \gamma e^T p_n \xi(x) \quad (7)$$

其中, $e^{(n)} = -k^T e + b[u^* - u_c(x(\Theta))]$, γ 是正常数, $\xi(x)$ 是模糊基函数, p_n 是 Lyapunov 方程

$$\Lambda^T P + P \Lambda_c = -Q \quad (8)$$

中系统正实矩阵 P 的最后一列。

Wang 的方法可称为直接型模糊自适应控制。Su^[20] 研究了另一种基于模糊逻辑的自适应控制, 利用模糊系统的非线性映射能力建立非线性系统的模糊模型, 将模糊辨识和控制器设计分开, 可称为间接型模糊自适应控制。

3.3 模糊预测控制

预测控制是为适应复杂工业过程控制而提出的算法, 它突破了传统控制对模型的束缚, 具有易于建模、鲁棒性好的特点^[21], 对于解决大滞后对象控制问题是一条有效的途径。模糊建模比较简单, 是非线性系统建模的一个重要工具, 也是复杂工业过程控制中广泛使用的方法。把预测控制和模糊推理控制相结合, 更符合人类的控制思想, 因而是很有吸引力的研究方向之一。

张化光等^[22] 提出了模糊广义预测控制算法, 利用 Sugeno 模糊模型, 将多个模糊模型转换成线性时变差分模型, 再利用 GPC 算法求控制律, 较普通 GPC 算法具有辨识精度高, 适用大范围工况控制要求, 抗干扰能力强的优点。

睢刚等^[23] 将模糊控制和预测控制相结合, 将控制量论域分成若干子域, 并将分界点作为参考控制量, 利用被控过程模型预测在参考控制量作用下过程的未来输出, 根据预测输出结果评价各参考控制量的控制效果, 并依据对控制效果的性能测量模糊规则修改当前的控制量。由于在预测控制中采用了滚动优化策略, 不需要建立完备的控制规则库, 算法简单, 计算量小, 易于工程应用。

3.4 模糊控制系统的稳定性分析

在经典控制理论和现代控制理论中,系统稳定性分析有许多成熟有效的方法。在传统控制理论中,系统的性质全部浓缩在系统模型中,对系统模型进行分析便可对稳定性做出判决,而建立这样的模型在传统控制中是困难的,成为控制问题的“瓶颈”。利用人类的控制经验建立模糊控制规则,不完全依赖于数学模型,这与传统控制相比有了进步,但却对闭环系统稳定性分析提出了新的问题。Cao^[24]认为,建模与分析的矛盾在模糊控制中表现得更为突出,经典控制的稳定性概念及其分析方法对模糊控制并不适用,这是因为模糊控制实际上是分段的多级控制,每一级的时间间隔与时间常数最大的暂态分量消失时间相比是足够短的,因此不能以每一个控制间隔的暂态分量是否消失作为衡量动态品质好坏的标准。或者说,用衡量系统特征根的大小、考察特征根分布的方法来评价模糊控制的动态过程是不恰当的。

最近几年,许多研究者在这方面做了不少工作,特别是 Sugeno 模糊模型是局部线性化模型,可以借鉴现代控制理论进行分析。Tanaka 和 Sugeno^[25]研究了 Sugeno 型模糊控制器的稳定性,给出了稳定性存在性定理。对于模糊系统

$$\begin{aligned} R^i: & \text{ if } x(k) \text{ is } A_i^1 \text{ and } \dots \\ & \text{ and } x(k-n+1) \text{ is } A_n^i \\ \text{ then } & x^i(k+1) = \\ & a_{i1}x(k) + \dots + a_{in}x(k-n+1) \\ & i = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (9)$$

结论部分可写成

$$X(k+1) = A X(k) \quad (10)$$

充分性定理 如果存在一个公共正定矩阵 P , 对每个子系统使得

$$A_i^T P A_i - P < 0, \quad i = \{1, 2, \dots, l\} \quad (11)$$

则系统(9)全局渐近稳定。

上述定理是一个存在性定理,但如何构造 P 阵,使得闭环系统稳定仍无系统的方法。Cao^[26]则在此基础上进行简化,对于系统(5),结论部分可写成状态空间方程

$$\begin{cases} x(k+1) = A x(k) + B u(k) \\ y_i(k) = C_i x(k) + d_i \\ i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (12)$$

基于上述状态空间方程,状态反馈控制律具有如下形式

$$u(k) = -k_j x(k) + g[r(k) - D] \quad (13)$$

其中, k_j 是反馈增益阵, g 是前馈增益, $r(t)$ 是参考输入, D 是扰动, j 是前提模糊集合个数。

定义

$$\begin{cases} \bar{A}_{ij} = A_i - B_i k_j \\ \bar{r}(k) = r(k) - D \end{cases} \quad (14)$$

如果存在

$$\bar{A}_{ij} \quad c_{ij} \quad (15)$$

其中 c_{ij} 是设计参数,则闭环系统渐近稳定。

4 结 语

本文在智能控制的框架下,对模糊模型与基本控制算法、非线性系统的模糊建模与控制、模糊预测控制、模糊控制系统的稳定性分析等方面进行了较详细的阐述和分析,并指出了各方面存在的问题和今后的研究方向,为研究模糊智能控制提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Antsaklis P J. Intelligence and learning. IEEE Control Syst Mag, 1995, 15(3): 5_7
- 2 Antsaklis P J. Defining intelligence control—Report of task force on intelligent control. IEEE Control Syst Mag, 1994, 14(3): 4_5, 58_66
- 3 Lee C C. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller- Part I & II. IEEE Trans on SMC, 1990, 20(2): 404_435
- 4 Zimmernan H J. Fuzzy set theory and its applications. Norwell: Kluwer- Nijhoff Publishing, 1988
- 5 Lee Y C. A combined approach to fuzzy model identification. IEEE Trans on SMC, 1994, 24(5): 736_744
- 6 Tan S H, Yu Y. Adaptive fuzzy modeling of nonlinear dynamical systems. Automatica, 1996, 32(4): 637_643
- 7 Lee C H, S D Wang. A self-organizing adaptive fuzzy controller. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 80: 295_313
- 8 Buckley J J. Sugeno type controllers are universal controllers. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 53: 299_303
- 9 Buckley J J. Controllable processes and the fuzzy controller. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 53: 27_31
- 10 Buckley J J. Universal fuzzy controllers. Automatica, 1992, 28(6): 1245_1248
- 11 Ollero A, Aracil J, Garcia A. Robust design of rule-base fuzzy controllers. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 70: 249_273
- 12 Zeng X J, M G Singh. Approximation properties of fuzzy system generated by the min inference. IEEE

- Trans on SMC- Part B, 1996, 26(1): 187_ 193
- 13 Castro J L, M Delgado. Fuzzy systems with defuzzification are universal approximates. IEEE Trans on SMC- Part B, 1996, 26(1): 149_ 156
- 14 Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Trans on SMC, 1985, 15(1): 116_ 132
- 15 Sugeno M, K Tanaka. A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1993, 1(1): 7_ 31
- 16 Sugeno M, K Tanaka. Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system. Fuzzy Sets and Systems, 1991, 42: 315_ 334
- 17 Sugeno M, G T Kang. Structure identification of fuzzy model. Fuzzy Sets and Systems, 1988, 28: 15_ 33
- 18 Wang L X. Design and analysis of fuzzy identifiers of nonlinear dynamic systems. IEEE Trans on AC, 1995, 40(1): 11_ 23
- 19 Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 146_ 155
- 20 Su C Y. Adaptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1994, 2(4): 285_ 294
- 21 Clarke D W, C Mohtadi, P S Tuffs. Generalized predictive control_ Part 1 & 2. Automatica, 1987, 23(1): 137_ 160
- 22 张化光, 吕剑虹, 陈来九. 模糊广义预测控制及其应用. 自动化学报, 1993, 19(1): 9—17
- 23 睢刚, 陈来九. 模糊预测控制及其在过热汽温控制中的应用. 中国电机工程学报, 1996, 16(1): 17—21
- 24 Cao S G. Identification of dynamic fuzzy models. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 74: 307_ 320
- 25 Tanaka K, M Sugeno. Stability analysis and design of fuzzy control systems. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45: 135_ 156
- 26 Cao S G, N W Rees, G Feng. Stability analysis of fuzzy control systems. IEEE Trans on SMC_ Part B, 1996, 26(1): 201_ 204

作者简介

李少远 男, 1965 年生. 1997 年在南开大学计算机与系统科学系获博士学位, 现为上海交通大学自动化所博士后研究人员. 研究领域为预测控制, 模糊控制, 自适应控制理论与应用。

席裕庚 男, 1946 年生. 1968 年毕业于哈尔滨军事工程学院, 1984 年在德国慕尼黑工业大学获博士学位, 现为上海交通大学自动控制系教授, 博士生导师. 主要从事复杂系统控制理论及智能机器人等的研究。

陈增强 男, 1964 年生. 1997 年在南开大学计算机与系统科学系获博士学位, 现为该系教授. 研究领域为预测控制, 自适应控制理论与应用。

袁著祉 男, 1937 年生. 1962 年毕业于南开大学数学系, 现为该校计算机与系统科学系教授, 博士生导师. 研究领域为预测控制, 自适应控制理论及计算机控制系统。