

摘 要

现代控制工程中的系统多表现为非线性、时变和不确定性，采用传统的建模方法比较困难，或者根本无法实现，在这种情况下，要实现有效的控制，必须采用模型辨识的方法来获取对象的近似模型，并加以控制，目前用于系统辨识的模型种类很多，模糊模型是其中的一种，它随着模糊控制的发展而被人提出，模糊模型具有万能逼近和强非线性特点，比较适合于描述复杂非线性系统，为了解决模糊模型在输入变量较多时规则数膨胀的问题，文中引入递阶型模糊模型，并引证这种结构的通用逼近特性。遗传算法是模拟自然界生物进化“优胜劣汰”原理的一种参数寻优算法，它具有隐含并行性和全局最优化的能力，并且对寻优对象的要求比较低，在工程应用和科学研究中，得到了广泛的应用，本文将遗传算法引入模糊模型的辨识，取得了很好的效果。全文共六章：

第一章 绪论：简要介绍课题的研究背景、研究意义和论文所做的工作。

第二章 遗传算法：介绍了遗传算法的思想起源、算法流程图，以及算法各个组成部分的细节，最后介绍遗传算法的程序实现，并举以实例说明算法的有效性

第三章 模糊模型及其辨识：介绍了模糊模型的定义、分类、结构、通用逼近特性，最后介绍了递阶型模糊模型的结构和万能逼近特性。

第四章 遗传算法在模糊模型辨识中的应用：详细介绍了遗传算法思想在模糊模型辨识中的实现及算法流程和一些源程序。

第五章 系统仿真：以具体的非线性系统为例，进行仿真试验，对于仿真的每一步都有详细说明，并举多个实例以示对照

第六章 结束语：总结论文的工作，总结论文尚未解决的问题，并作简要分析

关键词：遗传算法 模糊模型 递阶模糊模型 辨识

ABSTRACT

Control systems in modern automatic engineering are nonlinear,time-changed and indefinite.It is difficult to model by traditional method,even sometime impossible.Under these circumstances we should apply model identification to gain the approximate model of object for effective control,there are many models to be chosen,fuzzy model is one of them,it is put forward with the development of fuzzy control.Fuzzy model has characteristics of general approximation and strong nonlinear,it is fit for describing complex,nonlinear systems.To avoid rules expansion when the number of input values are very big.In this paper we apply hierarchical fuzzy model to resolve this problem,we also illustrate it has general approximation to any nonlinear systems.Genetic Algorithm is a algorithm to help find the best parameters of process.It has abilities of global optimizing and implicit parallel,it can be generally used for all applications.In our paper we use fuzzy model as predictive model and apply GA to identify fuzzy model (including hierarchical fuzzy model),we made experiments to nonlinear predictive systems and got very good results.The paper contains chapters as below:

Chapter 1 Preface. Simply illustrating the background of the search topic control and work of this paper done.

Chapter 2 Genetic Algorithm. Introducing ideological origination of GA,algorithm flow chart,component block in detail,reality in programmes and giving examples to verify.

Chapter 3 Fuzzy model and its identification. definition,classification, Summarizing the structure,general approximation and structure,approximation of hierarchical fuzzy model.

Chapter 4 Application of Ga in fuzzy model identification.Explaining detailedly algorithm flow and realizing programmes of Ga in fuzzy model identification.

Chapter 5 System Simulation. We did CAD simulation on our algorithm ideology for nonlinear predictive systems,we gave the detail explanation in each step and some different examples for comparing.

Chapter 6 Conclusion. Summarizing the work we have done in this paper and the questions still not resolved in our paper,we also gave the simple analysis on these questions.

Key Words:Genetic Alogithm Fuzzy Model Hierarchical Fuzzy Model Identification

目 录

第一章 绪论.....	1
§1.1 课题研究的背景.....	1
§1.2 课题研究的意义.....	1
§1.3 本文主要工作.....	2
第二章 遗传算法.....	3
§2.1 概述.....	3
§2.2 遗传算法简介.....	3
§2.3 遗传算法的设计.....	4
2.3.1 设计的基本原则与基本步骤.....	4
§2.4 遗传算法的发展及其程序实现.....	5
2.4.1 GA 的程序设计及其实现.....	5
§2.5 遗传算法寻优的应用实例.....	5
第三章 模糊模型及其辨识.....	7
§3.1 预备知识.....	7
3.1.1 模糊模型.....	7
3.1.2 基于模糊关系方程的模糊模型.....	8
3.1.3 基于模糊神经网络的模糊模型.....	8
3.1.4 基于模糊语言控制规则的模糊模型 (T-S 模型).....	9
§3.2 递阶型模糊模型.....	10
§3.3 模糊模型的辨识.....	11
3.3.1 普通模糊模型辨识.....	11
§3.4 递阶型模糊模型的辨识.....	15
第四章 遗传算法在模糊模型辨识中的应用.....	16
§4.1 预备知识.....	16
4.1.1 模糊逻辑系统.....	16

4.1.2 模糊推理系统的建立、修改与存储管理	16
§4.2 MATLAB 里一个模糊推理系统的实现过程	18
4.2.1 位串编码	19
4.2.2 适应值的计算	22
4.2.3 选择策略	22
4.2.4 遗传算子	24
4.2.5 算法停止条件	27
§4.3 普通模糊模型辨识的算法思想及程序实现	28
§4.4 遗传算法辨识递阶模糊模型的算法思想及实现	30
第五章 基于 GA 的模糊模型仿真实例	34
§5.1 非递阶模糊模型的辨识	34
§5.2 递阶模型的辨识	53
5.2.1 实例仿真	53
5.2.2 递阶模型参数位置的研究	57
第六章 结束语	60
致 谢	61
参考文献	62
附 录	64

第一章 绪论

§1.1 课题研究的背景

本文是在智能技术与系统国家重点实验室开放研究课题—非线性系统的递阶模糊预测控制的研究中完成的，课题研究的目的是克服目前预测控制中对象非线性模型难于得到的问题，采用模糊模型作为预测模型，可以充分利用已有的被控对象的定性信息，加快预测模型的修正。同时用模糊规则描述非线性的预测控制律，可以充分利用操作人员的经验，可以预见，模糊预测控制规则的条数将会比一般两个输入变量的模糊控制规则的条数多，因此在论文的最后，作者采用递阶型模糊模型以减小规则数，进而减小模型复杂度。Wang 已证明这种递阶结构的通用逼近能力。经过优化后的递阶模糊模型，在线计算量小，便于实时应用。

§1.2 课题研究的意义

课题研究的意义是多方面的，首先采用模糊模型作为预测模型，解决了非线性模型难于得到的困难。用遗传算法辨识模糊模型，具有很好的普遍性和通用性，只需所选的输入输出变量可以通过仪表测量，同时变化范围有限即可。这种方法为模糊模型辨识提供了一条新的思路，为模糊模型在非线性控制系统中的应用奠定了基础。为了减少模糊模型的结构复杂度，作者又对递阶型模糊模型进行了研究，取得了很好的效果，这对以后这方面的研究有借鉴意义。具体一点，可从四个方面来讲：

1. 近年来对非线性预测控制系统的研究日益得到重视，对于系统建模的问题也成为讨论的热点^[1]。常规的一些建模方法诸如传递函数、状态方程、线性规划等均只能适合于对象特性明显、物理意义清晰的系统，而对复杂、时变、大时延、病态的系统，则往往显得力不从心，模糊模型是以模糊推理与模糊集合为基础的对象描述形式，将模糊控制的概念外延到系统建模中来，能够很好地克服上述通用建模方法的缺点，可以得到被控对象定性定量相结合的模型^[2]，模糊辨识时通过输入输出测量数据，对模糊模型中的结构和参数进行辨识。模糊模型及其辨识已经被证明在非线性动力系统建模、基于规则的学习控制、模式识别中起到了很大的作用^[3~10]。因此，关于模糊模型及其辨识方法的研究具有实际的应用意义。
2. 在目前研究得最多的三类模糊模型中，无论哪一种模型，在输入输出变量较多时，均会出现结构复杂的问题，且大多表现为描述系统的规则条数随着输入输出变量的增加而急剧膨胀，这对系统辨识的快速性有影响，为了防止规则数的膨胀，作者引入递阶型模糊模型，其好处在于，在保证一定的误差精度时，使模型的结构大为精减。另外的一个问题是辨识方法，文中所采用的遗传算法具有同时并行搜索的特点，即递阶模型的各层参数同时搜索、同时优化，比之其它的分层优化算法（例如 BP 算法）更能客观地描述对象。隐含并行性也是遗传算法区别于其它寻优算法的显著特点之一。
3. 作者用于研究所开发的基于 Matlab 语言的算法程序，既可独立运行，又可按不同的功能进行组合，实际上相当于已经开发出遗传算法用于模糊模型辨识的实用软件包。这也是课题所要求的预期目标之一。
4. 作者用于仿真的各个实例及其所得数据，对其他从事此领域研究的同行具有借鉴意

义，倘若能对别的学者有所帮助，这将是对作者的莫大宽慰。

§1.3 本文主要工作

本文所做的工作主要从以下几个方面来阐述：

- (1) 分析遗传算法的原理，编写实用的遗传算法程序
对国内外目前比较流行的遗传策略进行总结，给出遗传算法的基本搜索原理和算法框图，并用 Matlab 语言和 C 语言编写出辨识模糊模型的程序。
- (2) 分析 T-S 型模糊模型的结构，并用遗传算法进行辨识、优化
由于 T-S 型模糊模型用得比较多，因此文中重点分析了 T-S 型模糊模型与递阶型 T-S 模糊模型的结构和一些常用模糊推理系统，并用遗传算法对 T-S 型模糊模型进行辨识和优化，辨识包括结构辨识和参数辨识。
- (3) 分析递阶型 T-S 模糊模型的结构和运用遗传算法进行辨识优化
与上面类似，主要分析递阶型模糊模型的结构，模型的通用逼近功能，并用遗传算法进行辨识优化。
- (4) 遗传算法在模糊模型辨识中的应用
针对模糊模型辨识和递阶模糊模型辨识的特殊应用，结合 Matlab 数学工具箱的强大功能，详细阐述了算法编制的思想，画出算法流程图，对重要、关键的程序给出源程序，以便读者更好地理解。
- (5) 运用具体的非线性系统进行仿真示例，说明算法的可行性与实用性；
通过几个具体的强非线性系统，进行仿真，来证明算法的正确性，并辅以图文说明，使读者对遗传算法在模糊模型辨识中的应用有更深刻的了解。

第二章 遗传算法

§2.1 概述

遗传算法的创始人是美国著名学者，密西根大学教授 John.H.Holland。Holland 在 20 世纪 50 年代末期开始研究自然界的自适应现象，并希望能够将自然界的进化方法用于实现求解复杂问题的自动程序设计。Holland 认为，可以用一组二进制串来模拟一组计算机程序，并且定义了一个衡量每个“程序”的正确性的度量：“适应值”。Holland 模拟自然界选择机制对这组“程序”进行“进化”，直到最终得到一个正确的程序。1967 年，Bagley 发表了关于遗传算法应用的论文，在其论文中首次使用“遗传算法 (Genetic Algorithm)”来命名 Holland 所提出的“进化”方法。1975 年，Holland 总结了自己的研究成果，发表了在遗传算法领域具有里程碑意义的著作《自然及人工系统中的适应性》(Adaptation in Natural and Artificial Systems)。在这本书中，Holland 为所有的适应系统建立了一种通用理论框架，并展示了如何将自然界的进化过程应用到人工系统中去。Holland 认为，所有的适应问题都可以表示为“遗传问题”，并用“进化方法”来解决。

遗传算法在自然与社会现象模拟、工程计算等方面得到了广泛的应用。在各个不同的应用领域，为了取得更好的结果，人们对 GA 进行了大量的改进。为了不至于混淆，一般把 Holland 所提出的算法称为标准遗传算法(Canonical Genetic Algorithm)，简称 GA、CGA、或 SGA；将其它的“GA 类算法”称为 Gas (Genetic Algorithms)。可以把 GA 看做是 Gas 的一个特例。经过多年的发展，Gas 在理论上和实际应用中都取得了很大的进展。

§2.2 遗传算法简介

遗传算法可以形式化描述为： $GA = (P(0), N, l, s, g, p, f, t)$

其中：

$P(0) = (a_1(0), a_2(0), \dots, a_N(0)) \in I^N$, 表示初始种群；

$I = B^l$, 表示长度为 l 的位串全体，称为位串空间，位串常见的有十进制编码与二进制编码；

N : 表示每一代群体的个体总数，即种群规模，其值一般在每一代中保持不变；

L : 表示个体位串的长度；

$s: I^N \rightarrow I^N$ 表示选择策略，常见的有赌盘选择 (Roulette)、锦标赛选择

(Tournament)、正态几何分布选择 (Normalized geometric distribution Selection) 等

g : 表示遗传算子，通常包括：复制算子 $O_r: I \rightarrow I$ ，杂交算子 $O_c: I \times I \rightarrow I \times I$ 和

变异算子 $O_m: I \rightarrow I$ ；

p : 表示遗传算子的操作概率，包括复制概率 p_r 、杂交概率 p_c 和变异概率 p_m ；

$f: I \rightarrow R^+$ 表示适应值函数;

$t: I^N \rightarrow \{0,1\}$ 是终止准则, 通常是设定最大运行代数MaxGen或最大适应值MaxFitness来作为停止条件;

§2.3 遗传算法的设计

2.3.1 设计的基本原则与基本步骤

2.3.1.1 基本原则

在设计遗传算法时, 通常要考虑到以下的一些原则:

1. 适用性原则: 一个算法的适用性, 是指该算法所能适用的问题种类, 它取决于算法所需的限制与假定。如优化问题的约束不同, 则相应的处理方式也不同。
2. 可靠性原则: 一个算法的可靠性, 是指算法对所设计的问题, 以适当的精度求解大多数问题的能力, 即对大多数问题能提供可靠的解。因为遗传算法的结果带有一定的随机性和不确定性, 所以在设计算法时, 应尽量经过较大样本的试验, 以确认算法是否具有较高的可靠度。
3. 收敛性原则: 遗传算法的收敛性通常指能否以概率1收敛到全局最有解。在收敛的前提下, 我们当然希望算法具有较高的收敛速度。因为, 遗传算法都是在有限代数终止的, 所以, 评价算法收敛速度的办法之一即是比较在某有限时间段内算法求解所能达到的精度。
4. 稳定性原则: 遗传算法的稳定性是指算法对其控制参数及问题数据的敏感度。如果算法对其控制参数或问题的数据十分敏感, 则根据它们取值的不同, 将可能产生不同的结果, 甚至过早地收敛到某一局部最有解。这当然不是我们所希望的, 所以在设计算法时, 应尽量使得对一组固定的控制参数, 算法能在较广泛的问题数据范围内解题; 而且对一组给定的问题数据, 算法应对其控制参数的微小扰动不甚敏感。
5. 生物类比原则: 因为遗传算法的设计思想是基于生物演化过程的, 那些在生物界被认为是行之有效的方法及操作可以通过类比的方法引入到算法之中, 有时会带来较好的结果。

2.3.1.2 基本步骤

在设计遗传算法时, 通常按以下的基本步骤进行:

1. 确定编码方案: 遗传算法求解问题不是直接作用在问题的解空间上, 而是利用解的某种编码表示。选择何种编码表示有时将对算法的性能、效率等产生很大的影响。
2. 确定适应函数: 适应值是对解的质量的一种度量, 它通常依赖于解的行为与环境(即种群)的关系。一般以目标函数或费用函数的形式表示。解的适应值是进化过程中进行选择的唯一依据。
3. 选择策略的确定: 优胜劣汰的选择机制使得适应值大的解有较高的存活概率, 这是遗传算法与一般搜索算法的主要区别之一。不同的选择策略对算法的性能也有

较大的影响。

4. 控制参数的选取：控制参数主要包括种群的规模、算法执行的最大代数、执行不同遗传操作的概率以及其它一些辅助性的控制参数。
5. 遗传算子的设计：遗传算法中的遗传算子，主要包括繁殖 (reproduction)、杂交 (crossover)、变异 (mutation) 以及其它高级操作，如引入贪婪算子、惩罚算子等，加快算法的收敛。
6. 确定算法的终止准则：由于进化计算没有利用目标函数的梯度等信息，所以在进化过程中，无法确定个体在解空间的位置。从而无法用传统的方法来判定算法的收敛与否以终止算法。常用的办法是预先规定一个最大的进化代数或算法在连续多少代以后解的适应值没有明显的改进时，即终止。
7. 编程上机运行：完成上述工作以后，即可以按照遗传算法的算法结构编程去进行问题求解。由于遗传算法的随机性及不确定性等特点，通常要多运行几次才能得到可靠的解。

应该注意上述各基本步骤是密切相关的，编码方案与遗传算子的设计等是同步考虑的，有时甚至需要上机运行与算法设计交替进行。

§2.4 遗传算法的发展及其程序实现

遗传算法早期的研究工作始于二十世纪 60 年代，由美国 Michigan 大学的 John Holland 最先研究并用于系统适应性中的人工问题，第一次作为一种寻优算法使用，但遗传算法作为名词第一次被提出来的却是 Begley，他在自己的第一篇关于 GA 应用的论文里，首次提到遗传算法，从那时至今，世界各地的学者对遗传算法进行了多方面的研究，提出了很多改进的实用遗传算法，通过他们的努力，遗传算法的应用范围逐步有科学研究扩大到工程应用与研究，几乎所有问题的求最优解问题均可用 GA 来完成。本文作者就是运用 GA 来对模糊模型和递阶模糊模型的参数进行优化。

2.4.1 GA 的程序设计及其实现

根据前面分析的 GA 算法思想与流程图，可以编写出实用的 GA 实现程序，作者花了近三个月的时间，分别用 C 语言与 MATLAB 语言编写了一套完整的遗传算法实现程序，针对不同的问题可采用两个程序中的任何一个，具体见第四章。比如一般可写出表达式的函数参数寻优，可以采用 C 语言编写的基于二进制编码的 GA 程序，而智能控制器，诸如模糊控制、递阶控制、神经网络控制等，用 C 语言编写这些控制器本身比较繁琐，而数学运算工具 MATLAB 语言又有现成开发好、效率高的工具箱，作者利用 MATLAB 基本编程语言先实现 GA 的基本算法，然后在个体评估函数（又称适应值计算函数）里面直接调用这些智能控制工具箱，来完成针对这些问题的 GA 实现程序，本文中讨论的运用 GA 对模糊规则寻优就是采用后一个程序。

§2.5 遗传算法寻优的应用实例

求函数 $f(x) = x + 10\sin(5x) + 7\cos(4x)$ 在区间 $[0, 9]$ 之间的最大值，用遗传算法的不同初始化值计算结果如下：

图 2.2 的算法参数：采用二进制编码，种群规模 $N=30$ ，运行最大代数 $\text{Maxgen}=80$ ，
搜寻结果： $x=7.8327$ ， $f(x)=24.7508$ ，对应图中的圆圈点；

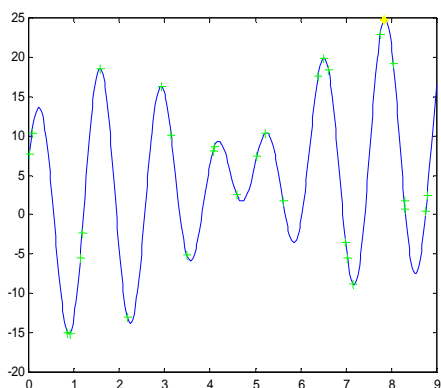


图2.2

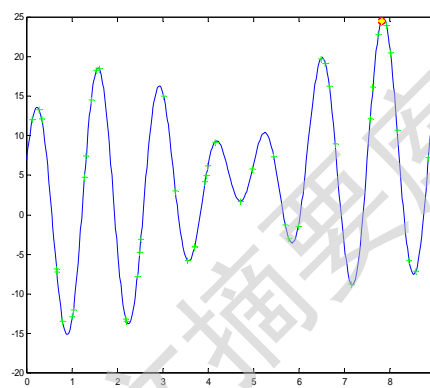


图2.3

图2.3中的算法参数：二进制编码，种群规模 $N=50$ ，运行最大代数： $\text{Maxgen}=100$ ，
搜寻结果： $x=7.860$ ， $f(x)=24.8534$ ，对应图中的圆圈点。

以上的实例似乎说明，种群规模越大，搜索代数越多，搜索所得到的结果就越好，但事实上并非如此，有些情况下由于变异率较低，过多的搜索代数得到的结果未必好于较小的搜索代数，这主要取决于参数初始值和遗传算子概率的选择。

第三章 模糊模型及其辨识

§3.1 预备知识

现实世界中存在着大量复杂、多变量系统，这类系统具有非线性、分布性、多变量和强耦合等特性，并集中地表现为参数的不确定性和结构的不确定，Zadeh 教授提出的模糊集及模糊系统理论为解决这类复杂多变量系统开辟了一条途径，从而形成了一种新的理论体系：多变量复杂动态模糊系统与控制理论，它包括对系统行为的描述即系统建模和辨识以及对其进行的分析和控制。

3.1.1 模糊模型

模糊模型是模糊集与模糊逻辑在系统建模中的一种应用，它为一些复杂、不确定性的系统提供了一种有效的建模方法。对于复杂、病态、非线性动态系统，基于模糊集合的模糊模型，利用模糊推理规则描述动态系统的特性，是一种有效的方法，自文献【11】建立的 Takagi-Sugeno 模型（T-S 模型）以来，许多关于建模和控制的模糊模型得到发展。从模糊结构上来说，模糊模型可分为三类：一类为基于模糊关系方程的模糊模型，具有代表性的是由 W. Pedrycz 在 1984 年提出的 P-模型^[12]；另一类为基于模糊神经网络的模糊模型，有人将其归为一类，但作者觉得很勉强；还有一类为基于规则描述的模糊模型，具有代表性的是由 Takagi 和 Sugeno 提出的，简称为 T-S 模型。下面先给出模糊模型的概念。

定义 1 一个模糊模型可以表示为

$$M(A, Y, U, F)$$

式中， A 表示模糊算法； Y 表示过程的有限离散输出空间； U 表示过程的有限离散输入空间； F 表示过程的有限离散输出空间中的所有基本模糊子集的集合。模糊模型是指描述系统特性的一组模糊条件语句，即

$$\text{if } u(t-k) = A \text{ and (or) } y(t-l) = B, \text{ then } y(t) = C$$

式中 A 为 U 中的模糊集合； B 和 C 为 Y 中的模糊集合。

上面式中每一条模糊条件语句为一条规则，一组模糊条件语句称为算法。有关模糊控制的基本概念比如隶属函数、语言变量等在这里就不再重复，下面仅根据此定义式来定义一些本文中常用到的一些基本概念。

定义 2 规则的完备性：已建立模糊规则库的模糊模型，应满足对任意输入，确保至少有一条可适用的规则。

定义 3 规则的作用系数：反映某条规则在模糊推理机中作用的大小，经常用 $[0, 1]$ 之间的数来衡量，如某条规则的作用系数为 0.55，则该条规则的最终输出应该是其实际推理输出与规则作用系数的乘积，即实际推理输出乘以 0.55。

定义 4 规则的前提与结论：一条模糊规则的前提也称规则前件，是指模糊规则中位于 then 之前的部分；相应地模糊规则的结论也称规则后件，则是指一条模糊规则中位于 then 以后的部分，它们均以语句的形式存在。

定义 5 规则前件的逻辑关系：指规则前提中各个变量语句之间的逻辑关系，常用有与、或、

非等, 在论文中, 作者考虑了两种关系, 即与、或, 对于与, 其形式为 if...and...and...then, 而对于或, 则为 if...or...or...then 的形式, 逻辑关系的不同, 将导致模糊推理的方式不同。与的关系在规则中一般写成且, 而或就写为或。

下面具体来讨论几种常见模糊模型的构成, 重点讲述 T-S 型模糊模型:

3.1.2 基于模糊关系方程的模糊模型

模糊关系模型的模糊规则库是由若干条 “if-then” 规则构成。模糊推理机依据模糊逻辑, 利用 “if-then” 规则实现从输入论域 $X \in R^n$ 上的模糊集合到输出论域 $Y \in R$ 上的模糊集合的对应关系。

$$R^{(l)}: \text{如果 } x_1 \text{ 为 } F_1^l, \text{ 且 } \dots, \text{ 且 } F_n^l, \text{ 则 } y \text{ 为 } G^l \quad (3.7)$$

这里 F_i^l 和 G^l 均为模糊集合。 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in X$, $y \in Y$, x 和 y 分别为输入和输出语言变量, $l = 1, 2, \dots, M$. 模糊关系方程为:

$$Y = X \circ R \quad (3.8)$$

R 为模糊关系矩阵, 从本质上讲还是模糊关系模型, 模糊辨识就是求取这一模糊关系 R , 即在一定精度范围内实现输入空间—输出空间映射的一种函数逼近^[13~16], 类似于静态网络。

3.1.3 基于模糊神经网络的模糊模型

这种模糊模型严格来讲, 不能算是一种模糊模型, 它只是将神经网络引入模糊模型的辨识, 并没有提出模糊模型新的结构, 这里列出是因为国内有些学者将其归为一类。Horikawa, Furubasbi 和 Uchikawa 在 Sugeno 等人工作的基础上提出了基于反向传播算法的模糊神经网络辨识方法, 提出了三种有效的模糊神经网络模型^[17], 其形式如下:

$$\text{I. } R^i: \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ and } \dots \text{ and } x_k \text{ is } A_{ik} \text{ then}$$

$$y = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k), i = 1, 2, \dots, n$$

其中, R^i 是第 i 条规则, x_1, x_2, \dots, x_k 是输入变量, $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ik}$ 是各变量的模糊子集, $f_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k) (i = 1, 2, \dots, n)$ 是一个常数。

$$\text{II. } R^i: \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ and } \dots \text{ and } x_k \text{ is } A_{ik} \text{ then}$$

$$y = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k), i = 1, 2, \dots, n$$

其中, $R^i, x_1, x_2, \dots, x_k, A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ik}$ 与第一种模糊模型中各变量含义相同。

$f_i(x_1, x_2, \dots, x_k)$ 是 x_1, x_2, \dots, x_k 的函数，可以是线性的，非线性的函数。一般为线性函数。

III. R^i : if x_1 is A_{i1} and x_2 is A_{i2} and ... and x_k is A_{ik} then

$$y = B_m \text{ is } C^i$$

其中, B_m 是结论模糊变量, $C^i \in [0,1]$ 是 R^i 的语言真值, m 是结论变量所划分的模糊子空间的个数。

从事这方面研究的文献有【18, 19, 20, 21】。

3.1.4 基于模糊语言控制规则的模糊模型 (T-S 模型)

T-S 模糊模型^[11]可由一组模糊规则表示:

$L^{(l)}$: 如果 x_1 为 F_1^l , 且..., 且 x_n 为 F_n^l , 则

$$Y^l = c_0^l + c_1^l x_1 + \dots + c_n^l x_n \quad (3.9)$$

式中 F_i^l 为模糊集合, c_i 为真值参数, y^l 为系统根据规则 $L^{(l)}$ 所得到的输出,

$$l = 1, 2, \dots, M, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n。$$

可以看出, 这种模糊模型其输出结果为输入变量的线性组合, 给定输入向量 $x = (x_1, \dots, x_n)^T$, 则输出 $y(x)$ 等于各 y^l 的加权平均 (见式 3.5、3.6)

$$y(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \omega^l y^l}{\sum_{l=1}^M \omega^l}$$

式中加权系数包括了规则作用于输入所能取得的所有真值, ω^l 的计算公式如下:

$$\omega^l = \prod_{i=1}^n u_{F_i^l}(x_i)$$

T-S 模糊模型用一线性方程每一区域的局部, 规则通过隶属函数联结起局部线性方程, 可以利用参数估计和确定系统阶数的方式来确定系统参数和规则数, 有系统稳定性分析的保证, 便于用传统控制策略设计相关的控制器。

文献【11】首先提出的模糊模型和辨识方法, 虽然辨识的精度高, 但运算量太大, 因此, Sugeno 和 Kang 在原来算法的基础上, 增加对结论部分的结构辨识, 并在前提参数辨识中采用复合型方法, 是辨识速度有了很大提高, 且保证一定的精度^[22]。

文献【23】提出 T-S 模型的连续辨识方法, 对辨识过程进行了分级, 适合于控制快速的复杂系统, 通过连续调整, 可得到较精确的系统模型应用于时变系统。

§3.2 递阶型模糊模型

递阶型模糊模型就是将 n 个输入变量的模糊模型，分成 r 个低阶子系统，每个子系统均为 T-S 型模糊模型，其中，上一级子系统的输出作为下一级子系统的输入，与下一级的其它输入变量一起通过本级的模糊模型求出输出后，送到再下一级的模糊子系统，最常见的情况是 $r = n - 1$ ，这时每一个子系统均有两个输入变量和一个输出变量，文献【24】还证明了这种结构的规则数最少，其结构图如图 3.1:

在递阶型结构下，模糊模型的模糊规则可以表示成:

第一层 $R^{(1)}$: if x_1 is A_{11} and x_2 is A_{12} then $y_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + c_{10}$;

第二层 $R^{(2)}$: if y_1 is B_1 and x_3 is A_{13} then $y_2 = c_{21}y_1 + c_{22}x_3 + c_{20}$;

... ..

第 i 层 $R^{(i)}$: if y_{i-1} is B_{i-1} and x_{i+1} is $A_{(i+1)3}$ then $y_i = c_{i1}y_{i-1} + c_{i2}x_{i+1} + c_{i0}$;

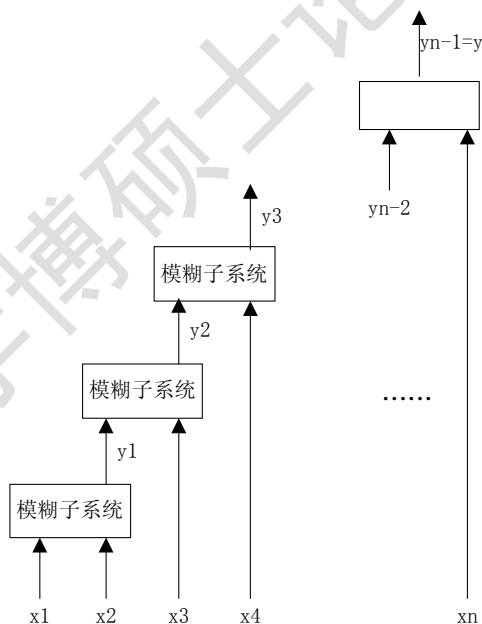


图 3.1 递阶模糊模型的结构图

可见，若对每个输入变量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 和中间变量 y_1, y_2, \dots, y_{n-2} 进行 m 个划分，则

总的规则条数为 $m^2(n-1)$ ，而在不采用递阶型结构的情况下，总的规则条数为 m^n ，显然前者要小得多，可以看出前者仅是输入变量个数 n 的线性函数，而后者却是 n 的指数函数。规则数是大大减少了，但这种递阶结构的模糊模型的逼近性能怎么样？也就是说，在

运用这种结构的模糊模型去辨识系统时，其能够达到的精度有多高？下面列出的逼近定理为我们提供了理论依据。

递阶型模糊模型的万能逼近定理

定理：递阶型模糊系统（如图 3.1）

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_{n-1}(f_{n-2}(f_{n-3} \dots f_2(f_1(x_1, x_2), x_3) \dots, x_{n-2}), x_{n-1}), x_n)$$

具有以任意精度逼近输入输出有限非线性系统的功能。

其中， $f_1(x_1, x_2) = y_1$ 表示第一阶模糊子系统的推理结构；

$f_2(f_1(x_1, x_2), x_3) = f_2(y_1, x_3)$ 表示第二阶模糊子系统的推理结构；依此类推。

定理的具体证明较复杂，这里仅作参考，读者可参考文献【24】

§3.3 模糊模型的辨识

我们这里只从模型结构上来讨论模糊模型的辨识，从模型结构上来看，模糊模型可分为普通模糊模型和递阶模糊模型，本来讨论的重点是递阶模糊模型辨识，但其一些概念和思想均是建立在普通模糊模型辨识的基础上，因此论文花了大量的篇幅来介绍普通模糊模型的辨识原理，然后在此基础上介绍递阶型模糊模型的辨识。

3.3.1 普通模糊模型辨识

普通模糊模型的辨识主要包括模型的结构辨识和参数辨识^{【22】}，其结构如图 3.2：

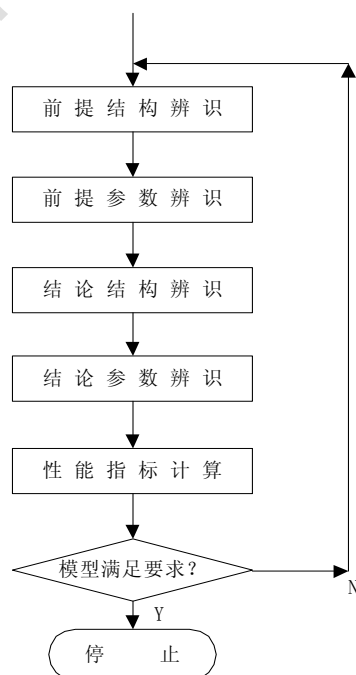


图 3.2 T-S 普通模糊模型辨识流程图

1. 前提参数辨识

前提参数的辨识是指对给定的一组输入输出数据，求取使性能指标达到最小值的前提参数。对于模糊集合选用[小]、[中]、[大]三个子集，它们的隶属函数（假设为高斯型）如图 3.3 所示：

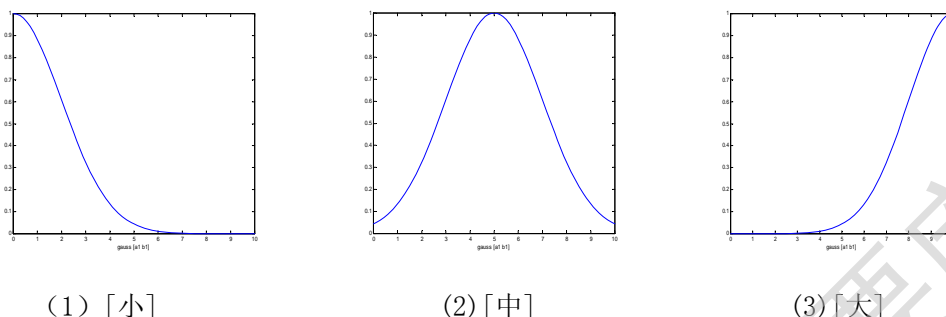


图 3.3 前提参数的模糊子集及前提参数

前提参数的辨识可以采用多种方法进行参数寻优。本文作者采用的是遗传算法。性能指标函数可选取为误差平方的均方值，即

$$PER = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2 \right]^{1/2}$$

其中 $\hat{y}(k)$ 为由辨识的模糊模型计算出的第 k 个采样时刻的输出值， N 为总的采样次数。

$y(k)$ 为系统的实际输出值（即采样值）。在辨识过程中，要注意以下两点：

- (1) 每个前提参数要满足相应前提变量的定义域要求；
- (2) 对于每个前提变量范围的划分，要满足在定义域内的任何前提变量都能有对应的模糊子空间，以保证辨识输出结果的确定性。

2. 前提结构辨识

前提结构的辨识是要确定前提中的具体输入变量，并对输入空间进行最优划分。设前提中的输入变量为 x_1, x_2, \dots, x_m ，每一条规则表示的仅是一种局部输入输出关系，例如某条规则表示在 $x_1 = [小]$ 和 $x_2 = [大]$ 模糊子空间确定的关系为 $y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + b$ 。采用 PER 性能指标，对前提结构的辨识算法如下：

- (1) 辨识普通的线性模型，计算它的性能指标 PER (1)
- (2) 把 x_1 划分为[小]和[大]两个模糊子空间，前提结构表示成两条规则

$$R^1 : \text{if } x_1 \text{ is small then } \dots;$$

$$R^2 : \text{if } x_1 \text{ is big then } \dots;$$

再辨识前提参数和结论参数，计算出相应的 PER。然后，对 x_2, x_3, \dots, x_m 变量也做上述类似处理，求得相应的 PER。在这 m 个模型结构中，选出最小性能指标 PER(2) 和对应的结构 STR(2)。

- (3) 假若 STR(2) 的对应变量是 x_i ，如图 3.4 中的(a)。在这一步中，前提中的模糊

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库