

复杂系统的 模糊预测控制 及其应用

● 李少远 李 柠 著

3



科学出版社
www.sciencep.com

复杂系统的模糊预测 控制及其应用

李少远 李 柠 著

科 学 出 版 社
北 京

内 容 简 介

本书从基本原理与方法、多种控制策略及算法分析、实际应用等多方面阐述了近年来复杂系统模糊预测控制方面的研究成果。内容包括:非线性系统 T-S 模糊模型辨识;预测控制器的设计与系统分析;系统模糊关系矩阵的辨识与预测控制;不确定性系统的模糊优化预测控制;基于控制系统模糊性能指标的预测控制器的参数调整;并以电厂主汽温度回路的控制为背景介绍模糊预测控制的应用。本书是国内模糊预测控制领域的第一本专著,取材新颖、广泛,结合实际,反映了这一领域近年来所取得的进展。

本书适宜控制科学与工程、计算机控制、系统工程和信息工程等专业的科技人员阅读,也可供高等院校相应专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统的模糊预测控制及其应用/李少远,李柠著. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-011310-1

I. 复… II. ①李…②李… III. 模糊控制-预测控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 020230 号

策划编辑:钟 谊/文案编辑:彭 斌 姚 晖/责任校对:柏连海

责任印制:安春生/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年8月第 1 版 开本:850×1168 1/32

2003年8月第一次印刷 印张:5 1/2

印数:1—2 000 字数:142 000

定价:15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

当前,国内外控制界都把复杂系统的控制作为控制科学与工程学科发展的前沿研究方向。大型复杂工业过程作为重要的背景领域,以其特有的复杂性推动着这一学科前沿的发展,这些复杂性主要表现在:①系统的非线性;②对象和环境的模糊不确定性;③实际系统存在着各种约束;④对控制系统性能要求的综合性。预测控制是 20 世纪 70 年代直接从工业过程控制中产生的一类控制算法,它的核心是利用过去及现在的系统信息,并预测到系统未来的输出变化,以有限时域滚动优化的方式使受控量和目标值的偏差尽可能地小,实现系统的优化控制。预测控制之所以能在工业过程控制中显示出巨大的生命力,应归功于其基本原理对于复杂系统的不确定环境的适应性。实际的控制系统中往往存在着许多不确定性,包括被控对象参数的不确定性、控制目标和系统约束的不确定性等,这些不确定性属于模糊不确定性。预测控制和模糊控制是各自独立发展起来的两类控制方法,在二者充分发展的基础上,人们提出将预测的思想和模糊的思想结合起来,形成一种新的控制方法——模糊预测控制,其合理性在于:

(1) 预测控制和模糊控制都是对不确定性系统进行控制的有效方法,预测和模糊相结合会进一步提高控制效果。

(2) 模糊控制发展的趋向是由规则向模型转化,而预测控制是典型的基于模型的控制,对象模型可作为沟通二者的桥梁。

(3) 预测控制是一类基于对象数学模型的优化控制方法,而系统的复杂性与分析系统所能达到的精度是相互制约的,因此,研究模糊环境下的预测控制对于拓展预测控制的应用范围具有重要意义。

近几年来模糊预测控制在国际自动控制领域受到关注,不仅

取得了很多理论研究成果,而且在实际中也得到了成功应用。

模糊预测控制的具体形式多种多样,大致可以分为两类:一是在预测控制机理的框架下,针对具有不确定性的非线性系统,将模糊模型作为预测模型,可视为预测与模糊的融合;另一类是模糊决策和预测控制方法的有机结合,充分发挥滚动优化和模糊决策的长处,相互促进。本书从以上两个方面进行了论述,内容包括:第一章对这一领域进行了综述和分析;第二至五章对基于模糊模型的预测控制进行了讨论和分析;第六和七章讨论了不确定性系统的模糊优化与预测控制的多种结合算法;第八章以电厂主汽温度回路的控制为背景介绍模糊预测控制的应用;第九章对模糊预测控制的进一步发展进行探讨和展望。

本书作者要对上海交通大学的席裕庚教授和南开大学的袁著祉教授在模糊预测控制方面所给予的指导表示衷心的感谢,并对课题组成员所进行的有益讨论表示感谢。作者的研究工作先后得到了国家自然科学基金、国家高新技术研究发展计划(863 计划)和上海市“曙光计划”的资助,特此表示感谢。

本书是作者最近几年研究工作的结晶,希望本书的出版能为推动模糊预测控制在我国的研究和应用起到一定的促进作用。

由于作者水平有限,书中纰漏和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2003 年 1 月

目 录

前 言

第一章 绪 言	1
1.1 模糊预测控制产生的背景	1
1.2 模糊预测控制的实现形式	3
1.3 本书的安排	7
第二章 非线性系统的 T-S 模糊模型辨识	9
2.1 T-S 模糊模型的结构形式	9
2.2 基于模糊聚类算法的 T-S 模糊模型辨识	11
2.3 基于满意聚类算法的 T-S 模糊模型辨识	16
2.4 仿真结果	23
2.5 T-S 模糊模型启发式辨识方法	27
第三章 基于 T-S 模糊模型的预测控制	35
3.1 一阶系统的间接模糊预测控制算法	35
3.2 一般非线性系统的间接模糊预测控制算法	42
3.3 模糊预测控制的一般形式	44
3.4 模糊预测控制的实质与多步输出预测	47
3.5 计算机仿真结果	51
第四章 多变量系统的模糊预测控制	57
4.1 基于 T-S 模糊模型的多变量广义预测控制	57
4.2 基于多步线性化的 T-S 模糊多变量预测控制	76
第五章 基于模糊关系模型的预测控制	85
5.1 多步模糊关系预测模型的基本结构	85
5.2 多步模糊关系预测模型辨识的监督学习算法	87

5.3 基于模糊关系模型的间接预测控制算法	100
5.4 基于模糊关系模型的直接预测控制算法	103
5.5 仿真实例	105
第六章 具有模糊软约束系统的预测控制	110
6.1 问题的描述	111
6.2 满意控制中系统约束的模糊化处理	113
6.3 基于模糊优化的预测控制算法	116
6.4 仿真结果	119
第七章 不确定性系统的模糊优化预测控制	122
7.1 预测控制中的模糊决策	122
7.2 基于模糊优化的视觉机器人路径规划	126
7.3 基于模糊性能指标的广义预测控制器参数调整	134
第八章 模糊预测控制在电厂主汽温控制中的应用	142
8.1 火电厂主汽温对象特性分析	142
8.2 主汽温对象模型的模糊辨识	145
8.3 电厂主蒸汽温度的模糊自适应预测控制	151
8.4 仿真结果	154
第九章 结束语	160
参考文献	162
附录	166
附录 A 广义汽温对象有限脉冲响应序列	166
附录 B	168

第一章 绪 言

1.1 模糊预测控制产生的背景

当前,国内外控制界都把复杂系统的控制作为控制科学与工程学科发展的前沿研究方向。大型复杂工业过程作为重要的背景领域,以其特有的复杂性推动着这一学科前沿的发展,这些复杂性主要表现在:

1. 系统的非线性

线性系统的控制理论已发展得很成熟,非线性系统的控制,无论在理论上和技术上都存在着许多困难,而实际系统往往是非线性的被控对象,往往通过转化为线性系统借鉴“分解-合成”的思想来进行设计和分析。

2. 对象和环境的不确定性

工业过程的对象一般很难以精确的数学模型描述,基于精确数学模型的优化控制方法在应用上受到很大限制,尤其对复杂非线性或部分未知的工业系统控制问题,经典的线性控制理论往往受到限制或只能应用于局部线性的情况,不能得到全局工况的优化解。此外,工业环境中存在着各种扰动,给过程动态带来很大影响。控制系统存在的不确定性表现为模糊不确定性。

3. 实际系统存在着各种约束

由于机构、能量、工艺条件以及安全性等方面的考虑,工业过程中的物理量受到形式多样的约束,使得控制器的控制动作受到限制。另外,复杂工业过程的控制对节能降耗亦提出了更高的要

求,相应地,在优化求解时亦应考虑到经济指标的约束。

4. 对控制系统性能要求的综合性

复杂工业过程的规模日益庞大,生产者已不可能对生产全部过程参数提出控制要求,转而根据生产要求提出不同指标,并尽可能综合考虑这些指标的优化,从而构成了在动态不确定性环境下的满意优化问题。

因此,针对复杂系统在不确定性环境下的约束优化控制成为控制理论界和工业应用界共同面临的课题。预测控制是 20 世纪 70 年代^[1]直接从工业过程控制中产生的一类控制算法,它的核心是利用过去及现在的系统信息,并注意到系统未来的目标变化,使受控量和目标值的偏差尽可能小,从而提高系统的控制性能。

预测控制发展至今已有上百种具体算法,但其基本原理可归结为预测模型、滚动优化和反馈校正。预测控制本质上是一种基于模型的有限时域的优化算法,但又不同于传统的基于准确数学模型和给定性能指标的最优控制。预测控制之所以能在工业过程控制中显示出巨大的生命力,应归功于其基本原理对于复杂系统的不确定环境的适应性。预测控制的创始人 Richalet 早已指出^[1],模型预测控制蕴含了一种强有力的方法论思想,它非常类似于人类在复杂的动态环境中进行决策的行为,这种方法论思想自然应该具有更广泛的适用性。

系统具有的模糊性是区别于随机性的另外一种不确定性,许多控制系统是在这种模糊不确定性环境中进行建模、控制和优化的。对具有模糊性的被控对象,无法用一个明确的界限对其进行分类,传统的集合论中关于集合的概念无法描述这种不确定性。1965 年 L. A. Zadeh 提出的模糊集合论,寻求一种处理模糊不确定性问题的严谨的数学方法;1974 年 E. H. Madani 首先将模糊推理应用于蒸汽发电机的压力和速度控制中,取得了良好的控制效果,从此,模糊控制作为一种处理在不确定性环境中不易建立数学模型的系统控制方法,无论在理论上还是在应用中都获得了长足

进展。模糊控制的_{最大特征是将专家的控制经验、知识表示成语言控制规则,然后用这些规则进行系统控制,对系统中的许多不确定性表现出良好的鲁棒性。}

预测控制和模糊控制是各自独立发展起来的两类控制方法,在二者充分发展的基础上,人们提出将预测的思想和模糊的思想结合起来,形成一种新的控制方法——模糊预测控制,以下几点可以说明其合理性:

(1) 预测控制和模糊控制都是对不确定性系统进行控制的有效方法,预测和模糊相结合会进一步提高控制效果。

(2) 模糊控制发展的趋向是由规则向模型转化,而预测控制是典型的基于模型的控制,对象模型可作为沟通二者的桥梁。

(3) 预测控制是一类基于对象数学模型的优化控制方法,而系统的复杂性与分析系统所能达到的精度是相互制约的,因此,研究模糊环境下的预测控制对于拓展预测控制的应用范围具有重要意义。

模糊预测控制的具体形式多种多样,大致可以分为两类:一是在预测控制机理的框架下,针对具有不确定性的非线性系统,将模糊模型作为预测模型,可视为预测与模糊的融合;另一类是模糊决策和预测控制方法的有机结合,充分发挥滚动优化和模糊决策的长处,相互促进。

1.2 模糊预测控制的实现形式

1.2.1 基于模糊模型的预测控制

模糊控制的最初形式是由一组相对简单的控制规则组成的推理控制器,控制规则通常来自于现场的操作人员,运用专家经验的形式归纳成控制规则,控制规则要求具有完整性、一致性和交叉性。模糊控制近年来之所以引起人们的极大关注,其主要原因在于规则型模糊控制器的成功应用。但是规则型模糊控制器具有明显的不足:首先,当对对象缺乏了解时,事先得到一组具有完备性

的控制规则是很困难的,这就要求必须对规则进行在线调整;其次,针对同一被控对象,不同操作人员的知识、经验可能是不同的,甚至差异较大;第三,基于人的控制策略,规则型模糊控制器的控制品质不会超过操作人员所能达到的水平,无法实现优化控制;第四,规则型模糊控制器不便于进行系统分析和规范性设计,基本型模糊控制器的稳定性问题至今仍未有解决。

目前,模糊控制的发展出现了由规则转向模型的趋势。自适应控制、最优控制等都需要对象的准确模型,而对非线性、时变、不确定性系统,准确数学模型的建立是很困难的。鉴于规则型模糊控制器的不足,人们试图找到模糊控制的新形式。一种方法就是类似于间接自适应控制的做法,先建立过程本身的模型,然后把该模型引入某种基于模型的控制策略中。模糊模型是一种与模糊概念和模糊推理有直接关系的系统描述方法,它是一种本质非线性模型,适于表达复杂系统的动态特性,而且模糊参数有较为明显的物理意义,因此模糊模型在复杂系统的控制中有着重要的地位。

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。早在1973年,Zadeh就提出“不相容原理”,即当一个系统复杂性增加时,人们能对它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,系统的复杂性与人类要求的精确性之间形成了尖锐矛盾。Sugeno等在文献[2]中认为这正是Zadeh提出模糊集合论的初衷。因此,许多研究者在研究非线性系统建模和控制问题时用到了模糊推理。

在模糊模型辨识中,研究者都注意到非线性系统的模糊建模,其中研究最多的是Sugeno模型。Sugeno本人及合作者自1985年在Fuzzy Identification of System and its Applications to Modeling and Control^[3]一文中提出Sugeno模糊模型后,系统地提出了其辨识方法,Sugeno模型的辨识分前提结构和参数的辨识、结论结构

和参数的辨识。Sugeno 模型具有以下优点:

- (1) 可以用较少的模糊规则表示高度非线性的复杂系统。
- (2) 易于推广到多输入-多输出模糊系统,方便地调整参数。
- (3) 利用系统的输入输出数据定量提取系统的定性知识。
- (4) 局部线性模型易于设计控制器和系统分析。

基于 T-S 模糊模型的控制可以采用并行结构,如图 1.1 所示。由于 T-S 模糊模型构成的各条规则采用线性方程式作为结论,使得模型的全局输出具有良好的数学表达特性,便于采用线性控制策略设计非线性控制。将 T-S 模糊模型对非线性系统的良好描述特性和预测控制的优化算法相结合,可以实现对非线性系统的优化控制,是目前模糊预测控制的主要形式。

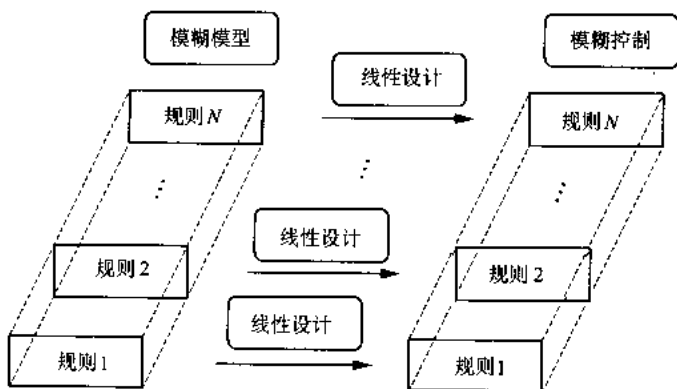


图 1.1 T-S 模糊控制系统的设计

模糊关系模型是在模糊关系的基础上用关系矩阵表示的语言模型,其辨识问题归结为确定模糊关系矩阵中的各元素的值,这需要同时确定输入输出之间的关系和模糊子集的隶属度。关系型模糊模型的辨识要比 T-S 模糊模型的辨识复杂,但其最大的优点是仍保持了模糊推理的直观性,其中的物理关系易于设计者理解。将关系模型嵌入到预测控制算法中是目前模糊预测控制的另外一种重要形式。

1.2.2 预测控制与模糊决策的结合

非线性系统的模糊预测控制实质上是模糊决策和预测控制方法的有机结合。预测控制本质上是在有限时间内的优化控制算法,并通过滚动优化机制克服系统不确定性因素的影响。系统预测和模糊推理都是人们在处理复杂工业过程控制问题时的自然想法,在现有的模糊预测控制文献中,大多是先通过模糊推理建立全局系统的模型,然后利用这一模型对系统的输出进行预测,利用预测控制算法得到控制量;已经证明模糊模型都有对非线性函数的万能逼近性质,因而模糊预测对于非线性系统的控制有一定的作用,这是处理非线性系统优化控制的一种有效策略。然而,这一做法与预测控制的初衷是不一致的,因为预测控制以滚动优化机制来降低对控制模型的要求,而用模糊推理建立非线性系统的全局模型是很复杂的事情,再结合预测控制算法反而增加了复杂性。另外,在现有模糊预测控制研究中,也没有考虑多目标和多约束的实际控制问题。

模型预测控制的本质是利用系统的预测信息,在有限时域内对某一性能指标进行优化。为了克服系统的不确定性,在预测控制中采用滚动优化策略。系统的预测输出 $\hat{y}(k+i)$, $i=1,2,\dots,N$ 是由系统当前时刻 k 的信息和未来的控制信号 $u(k+i)$, $i=1,2,\dots,N-1$ 得到的,其中 N 为系统的预测时域。为了优化问题的简化,一般取控制时域 $M < N$,即 $u(k+i) = u(k+M-1)$, $M, \dots, N-1$,优化目标为

$$J = \sum_{i=1}^N \alpha_i (\hat{e}(k+i))^2 + \sum_{i=1}^M \gamma_i (\Delta u(k+i-1))^2$$

式中, $\hat{e}(k+i)$ 为系统的预测误差; $\Delta u(k+i-1)$ 为系统控制增量; α_i 和 γ_i 分别为对预测误差和控制增量的加权系数。在上式所示的二次型性能指标的优化问题中,系统的控制性能依赖于加权系数的调整,而这种调整缺乏有效的方法。

在复杂工业过程控制中,控制目标和系统约束分别为 $G_1, G_2, \dots, G_p; C_1, C_2, \dots, C_q$ 。控制的目标是在满足控制约束的前提下,使得控制目标尽量满足,而当控制目标受到系统约束时,控制目标不能得到满足,这时需要兼顾控制目标和系统约束,保持系统的稳定和性能优化,称为有约束多目标多自由度优化控制(constrained multi-objective multi-degree of freedom optimization, CMMO)^[4]。由于系统的高度复杂性,系统约束和控制目标往往是用模糊语言变量来表述的,因而上述问题可以扩展为多目标的模糊决策问题^[5]。

通常情况下,复杂工业过程中所遇到的约束——由系统本身物理特性(机械、热力、电气等等)所决定的约束和由产品经济效益特性(产品质量、利润率等等)所决定的约束——都在控制系统上归结为对于控制量的约束、对于控制量变化率的约束和对于输出量的约束。在传统的有约束规划中,约束条件本身意味着就是不能逾越、不能改变的。预测控制是易于处理系统约束的优化算法,为兼顾控制目标和系统约束,达到满意的控制效果,需要在一定的情况下调整“软约束”。也就是说,每一个约束变量都具有在一定范围内可调整的性质,并且有一个函数反映用户对于约束变量取值的倾向。我们可以用模糊变量来描述这一特性。对于模糊变量 $\tilde{b}$ 可以定义隶属度函数 $\mu(\tilde{b}) (0 \leq \mu \leq 1)$ 来反映该变量隶属于某一集合(这里就是使用户满意的条件的集合)的程度。 $\mu = 1$ 表示对应的模糊变量属于这一集合(用户完全满意), $\mu = 0$ 则反之。其实,在这里我们可以直接把 μ 作为满意度来理解。

1.3 本书的安排

本书将从基本原理与方法、多种控制策略及算法分析、实际应用等多方面阐述近年来复杂系统的建模与控制,特别是预测控制方面的研究成果。全书共分九章:第一章为绪言,对复杂系统的建模与控制进行综述和分析;第二章介绍非线性系统 T-S 模糊模型

辨识;第三、四章分别介绍针对非线性系统的 T-S 模糊模型的预测控制和系统分析等内容,主要从优化设计的角度将线性系统的预测控制推广到非线性系统;第五章则从模糊关系的本质入手,阐述系统输入-输出模糊关系矩阵的辨识与基于这一关系模型的预测控制;第六章从实际系统中存在的模糊目标和模糊约束出发,介绍对象和环境在模糊不确定条件下的优化决策和控制的策略和方法;第七章基于控制系统的模糊性能指标讨论了预测控制器的参数调整;第八章以电厂主汽温度回路的控制为背景介绍模糊预测控制的应用;最后,第九章对模糊预测控制的进一步发展进行探讨和展望。

第二章 非线性系统的 T-S 模糊模型辨识

Takagi 和 Sugeno 于 1985 年在文献[3]中提出了一种 T-S 模糊模型,它是一种本质非线性模型,适用于表达复杂系统的动态特性。自从 20 世纪 60 年代以来,研究者已经提出了许多动态系统的辨识方法,但是总的来说,系统辨识无论在理论上还是实际应用中,还远没有达到完善的程度,对于非线性时变动态系统的辨识,是实际应用中经常遇到的困难,目前常见的有两种方法:一是用多个线性模型在平衡点附近近似描述非线性系统,这对于有严重非线性的系统如何做到平稳切换,减小系统误差仍然缺乏有效的方法;二是根据被控对象已知的信息,选择与之相近的非线性数学模型,显然有其局限性,因此模糊模型辨识方法,被认为是解决此类问题的一种可行方法。

另外,T-S 模糊模型的结论部分采用线性方程式描述,因此便于采用传统的控制策略设计相关的控制器和对控制系统进行分析。

2.1 T-S 模糊模型的结构形式

不失一般性,MIMO 系统可以看成是多个 MISO 系统,具有 p 个输入、单个输出的 MISO 系统离散时间模型可以由 n 条模糊规则组成的集合来表示,其中第 i 条模糊规则的形式为^[6]

R^i : if $y(k-1)$ is A_1^i , $y(k-2)$ is $A_2^i, \dots, y(k-n_y)$ is $A_{n_y}^i$,

$u_1(k-\tau_1)$ is A'_{n_y+1} , $\dots, u_1(k-\tau_1-n_1)$ is $A'_{n_y+n_1+1}, \dots,$

$u_p(k-\tau_p)$ is $A'_{n_y+n_1+\dots+n_{p-1}+p}$, $\dots, u_p(k-\tau_p-n_p)$ is $A'_{n_y+n_1+\dots+n_p+p}$

then $y^i(k) = p_0^i + p_1^i y(k-1) + p_2^i y(k-2) + \dots + p_{n_y}^i y(k-n_y)$

$$\begin{aligned}
& + p_{n_y+n_1+1}^i u_1(k-\tau_1-n_1) + \cdots \\
& + p_{n_y+n_1+\cdots+n_{p-1}+p}^i u_p(k-\tau_p) + \cdots \\
& + p_{n_y+n_1+\cdots+n_p+1}^i u_p(k-\tau_p-n_p) \quad (2.1)
\end{aligned}$$

这里, R^i 表示第 i 条模糊规则; A_j^i 是一个模糊子集, 其隶属度函数中的参数称为前提参数; y^i 是第 i 条规则的输出; p_j^i 是一个结论参数; $u_1(\cdot), u_2(\cdot), \cdots, u_p(\cdot)$ 是输入变量; $y(\cdot)$ 是输出变量; $\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_p$ 是纯时间滞后; $n_y, n_1, \cdots, n_p$ 是有关变量的阶次。有关纯滞后时间和阶次可以采用类似常规的辨识方法来确定。

为方便起见, 令

$$\begin{cases} x_1(k) = y(k-1) \\ x_2(k) = y(k-2) \\ \vdots \\ x_{n_y}(k) = y(k-n_y) \\ x_{n_y+1}(k) = u_1(k-\tau_1) \\ \vdots \\ x_m(k) = u_p(k-\tau_p-n_p) \end{cases} \quad (2.2)$$

式中, $m = n_y + \sum_{i=1}^p (n_i + 1)$ 。

这样, 式(2.2)可以写成如下的形式:

$$\begin{aligned}
R^i: & \text{ if } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \cdots, x_m \text{ is } A_m^i \\
& \text{ then } y^i = p_0^i + p_1^i x_1 + p_2^i x_2 + \cdots + p_m^i x_m \quad (2.3)
\end{aligned}$$

假设给定一个广义输入向量 $(x_{10}, x_{20}, \cdots, x_{m0})$, 那么由诸规则的输出 $y^i (i=1, 2, \cdots, n)$ 的加权平均即可求得系统总的输出