

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

目前,自动控制已经在航空航天、机器人、工业生产、农产品深加工、土木工程、能源生产和利用等领域得到了广泛的应用,并发挥着重要的作用。对具有多输入多输出(Multi-input and Multi-output, MIMO)、非线性、大滞后、参数强耦合特性的现代设备和被控过程的控制要求,不断地将自动控制理论和技术由经典控制向现代控制、向人工智能控制方向推进和发展(任和生 1992;Katsuhiko Ogata 2000 孙增圻 张再兴 邓志东 1997 汪培庄 李洪兴 1996)。

### 1.1.1 经典控制理论

18 世纪,Watt 设计的蒸汽机速度控制离心调节器,开辟了自动控制用于实际的先河。1922 年,Minorsky 研制出船舶操纵自动控制系统,并利用微分方程研究了该系统的稳定性;1932 年,Nyquist 根据稳态正弦输入的开环响应,研究了闭环系统的稳定性。20 世纪 40 年代,频率响应法已经成为工程技术人员设计线性闭环控制系统的重要方法;到 20 世纪 50 年代初,Evans 完善了根轨迹法。至此,以频率响应法和根轨迹法为核心的经典控制理论逐步成熟。

经典控制理论所研究的主要对象是具有单输入单输出(Single Input and Single Output, SISO)的单变量线性系统,数学模型主要采用传递函数;系统的动态性能主要决定于传递函数所对应的零点和极点的分布特性;系统分析和综合主要采用频率法,属于频域分析的范畴,常用的数学工具为微分方程(连续系统)、差分方程(离散系统)、傅里叶变换、拉普拉斯变换和  $z$  变换等。

### 1.1.2 现代控制理论

20 世纪 60 年代,MIMO 控制问题的出现和计算机在控制领域的应用给利用状态变量、基于时域分析的现代控制理论的诞生和发展提供了广阔的空间。现代控制理论不仅适应了现代设备日益增加的复杂性的控制要求,而且满足了军事、空间技术和工业过程领域对精度和成本等方面的严格要求。从 1960~1980 年的 20 年间,面向确定性系统和随机系统的最佳控制、面向复杂系统的自适应和自学习控制、面向庞大工业过程的大系统理论都得到了迅速的发展;1980 年以后,现代控制理论的研究主要集中在鲁棒控制、 $H_{\infty}$  控制及相关问题上。

现代控制所研究的对象主要是 MIMO 的多变量系统,可以是线性的、也可以是非线性的,可以是定常的、也可以是时变的。系统的数学模型主要采用状态方程,系统的动态特性主要决定于状态方程的解,系统的分析和综合主要采用状态空间分析法,属于时域分析的范畴。现代控制理论的数学工具极为广泛,但就其数学基础而言,主要是线性代数、矩阵分析、古典变分、概率论和随机过程理论等。

### 1.1.3 人工智能控制理论

人工智能控制理论最早可追溯到 20 世纪 40 年代。1943 年,McCulloch 和 Pitts 开始研究神经元模型的连接结构问题,1944 年,Hebb 提出了神经元连接强度的修改规则,这些成果为神经网络技术的发展及其在控制领域中的应用奠定了理论基础。1965 年美国加州大学 L. A. Zadeh 教授创立了模糊集合论,成为模糊控制的数学基础。1973 年,L. A. Zadeh 教授提出了利用模糊语言进行系统描述的方法,为模糊控制的实施提供了有效的手段;1974 年英国工程师 E. H. Mamdani 首次实现了蒸汽发动机的模糊控制试验研究,标志着模糊控制的诞生。1975 年美国密执安大学的 Holland 和 Kenneth 提出了遗传算法,并将其用于优化问题的研究。20 世纪 90 年代模糊控制与神经网络结合不仅为模糊控制解决了自学习和 MIMO 等控制问题,而且促进了模糊神经网络的研究和发展,为神经网络的应用提供了广阔的空间。随后模糊控制又与遗传算法结合既解决了模糊控制隶属函数优化和模糊控制模型进化等问题又促进了基于模糊逻辑的自适应遗传算法的研究和发展。模糊控制神经网络和遗传算法三者相互结合,互为补充,都得到了充分的发展,并成为人工智能控制理论和技术的核心构成。

## 1.2 模糊 - 神经网络控制基本概念

### 1.2.1 模糊系统

在客观世界中,系统可分为确定性系统和模糊性系统,前者可用精确数学模型加以描述,而后者则不能。对确定性系统,若其输入具有模糊性,则输出也将明显地具有模糊性。对模糊性系统,即使输入是确定性的,其输出也同样具有模糊性,于是便有图 1.1 所示的系统输入输出类型。

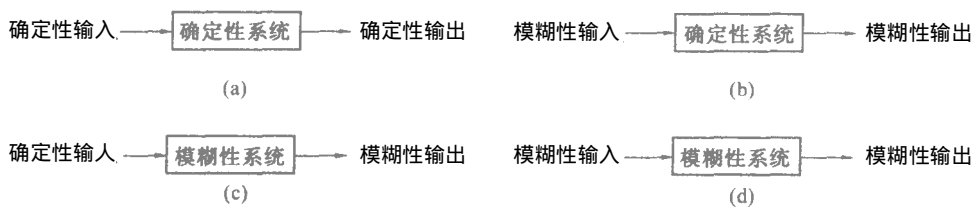


图 1.1 系统及系统的输入输出类型

对于模糊控制器而言,类似地有图 1.2 所示的结构类型。其中图 1.2(b) 的模糊性输出可通过反模糊化转换成图 1.2(a) 的形式。这样就有两种类型的模糊控制器:即具有确定性输入输出的模糊控制器和具有模糊性输入输出的模糊控制器。前者是针对复杂的系统,将其确定性的输入进行模糊化处理,最后得到确定性结果;后者就是针对客观世界中的模糊性输入,采用模糊处理方法,得到模糊性输出结果,其过程没有模糊性和确定性的转换。本书主要针对具有确定性输入输出的模糊控制器进行讨论。

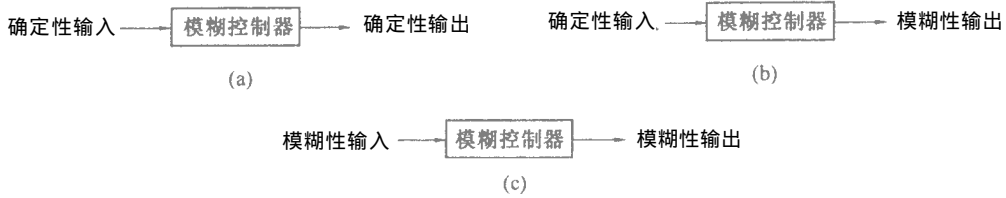


图 1.2 模糊控制器输入输出类型

## 1.2.2 模糊控制

模糊控制不需要被控对象的精确数学模型，而是基于专家的操作经验和知识建立模糊控制模型，通过模糊逻辑推理完成控制决策过程，最后实现对被控对象的调节控制。模糊控制的过程可通过图 1.3 的例子来进行描述。

图 1.3 为某一空调房间，其中，1 为冷气机，2 为温度传感器，3 为温度指示器，4 为空调房间。管理人员通过温度指示器的指针位置，即可判断室内温度的高低，根据最近一段时间内室温的变化，即可判断室内温度未来的变化趋势。然后，根据其掌握的对冷气机调节控制经验，即可做出对冷气机的调节控制策略，增大或减小冷气机的冷量，使室内温度保持在设定值范围内。在上述过程中，管理人员观察温度指示器的过程，即为检测过程；根据经验判断如何调节冷气机的过程，即为模糊推理和模糊决策过程（在该过程中，管理人员并没有对室内温度变化与冷气调节量之间的关系进行精确计算，而是根据经验推断其调节量）；调节冷气机的过程即为实施控制动作的过程。上述过程即为室内温度模糊控制的全部过程。

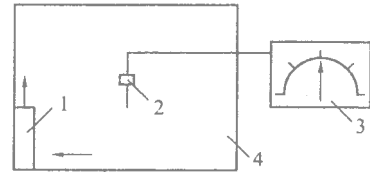


图 1.3 空调房间测温调控系统

根据上述过程便有图 1.4 所示的基本模糊控制系统，其中  $T$  为采样周期； $r$  为设定值； $y$  为被控过程的输出。图 1.5 为模糊控制器的基本结构模型 其中  $e^*$ 、 $ec^*$  和  $\Delta u^*$  分别为偏差、偏差变化和增量变化的精确量； $A^*$ 、 $B^*$  和  $C^*$  分别为  $e^*$ 、 $ec^*$  和  $\Delta u^*$  的模糊量； $q_e$ 、 $q_{ec}$  和  $q_u$  分别为  $e^*$ 、 $ec^*$  和  $\Delta u^*$  的量化因子和比例因子。

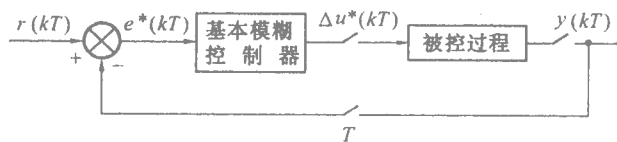
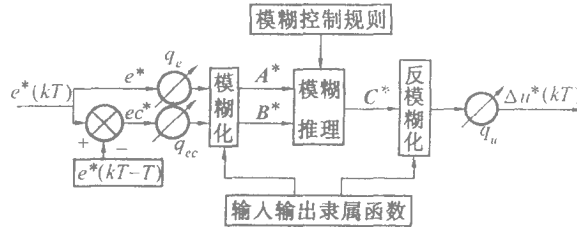


图 1.4 基本模糊控制系统

对图 1.3 所示的房间空调测控系统，管理人员可以总结出以下室内温度控制调节规则：

- 若“室内温度高”则“开大冷气”；
- 若“室内温度低”则“关小冷气”；
- 若“室内温度适中”则“不需要调节冷气量”。

上述调节经验即为上述模糊控制过程的模糊控制规则。模糊控制规则是模糊控制的数学模型，模糊控制规则的优劣直接关系到模糊控制性能的好坏。



通过上述例子，可以看出模糊控制具有以下优点：

- 1) 模糊控制不依赖被控对象的精确数学模型，仅依赖专家知识和操作者的经验；
- 2) 模糊控制具有较强的知识表达能力，可以将专家知识和操作者经验以规则的形式加以描述和提炼；
- 3) 模糊控制具有较强的推理功能，经过模糊逻辑推理可以实现类似于人的决策过程。

### 1.2.3 神经网络

人工神经网络是利用物理器件来模拟生物神经网络的某些结构和功能。图 1.6 为生物神经元模型 其中,1 为细胞核 2 为树突 3 为轴突,4 为轴突末梢。树突完成信息接受,轴突实现信息传递,即将信息由轴突起点传到轴突末梢,再与其它神经元相连,构成信息传递网络。典型的人工神经元模型如图 1.7 所示,不同的神经元即构成了人工神经网络,如图 1.8 所示。

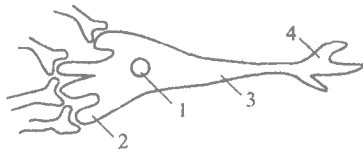
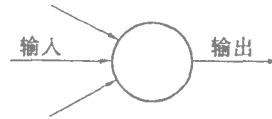


图 1.6 生物神经元模型



人工神经网络是一个并行和分布式的信息处理网络结构 由许多个神经元组成 每个神经元有一个单一的输出,可以连接到很多其它神经元 其输入有多个连接通路 每个连接通路对应一个连接权系数。人工神经网络对生物神经网络的模拟包括两个方面,一是在结构和实现机理上进行模拟,二是从功能上进行模拟 即尽可能使人工神经网络具有生物神经网络的某些功能特性 如学习、识别和控制等。在控制领域主要利用人工神经网络的第二类模拟功能。

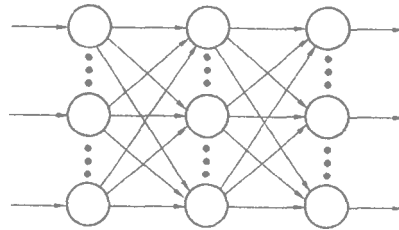


图 1.8 人工神经网络模型

神经网络具有以下特性：

- 1) 神经网络具有非线性逼近能力，由于神经网络具有任意逼近非线性映射的能力，因此神经网络在用于非线性系统的过程控制时 具有更大的发展前途；

2) 神经网络具有并行分布处理能力,神经网络具有高效并行结构,可以对信息进行高速并行处理;

3) 神经网络具有学习和自适应功能,能够根据系统过去的记录,找出输入输出之间的内在联系从而求得问题的答案这一处理过程不依靠对问题的先验知识和规则因此神经网络具有较好的自适应性;

4) 神经网络具有数据融合能力,可以同时定性数据和定量数据进行操作;

5) 神经网络具有多输入和多输出网络结构,可以处理多变量问题;

6) 神经网络的并行结构便于硬件实现。

在上述诸多特性中,对于控制系统,其中最有意义的是神经网络的非线性逼近能力。

## 1.3 模糊控制数学本质研究述评

### 1.3.1 模糊控制系统的非线性逼近能力

模糊控制系统的非线性逼近能力主要表现在它能够以任意精度逼近任一非线性控制曲线,这是模糊控制得以实现的理论基础。但是,这一问题是在模糊控制已经取得极大成功之后才引起人们重视的,这时已是 20 世纪 90 年代。

1992 年,Buckley 首先针对一类三维模糊控制系统,利用 Stone-Weiestrass 定理证明了该类系统的逼近特性,指出该类模糊控制器是通用模糊控制器(Buckley 1992)。随后,Wang 利用 Stone-Weiestrass 定理证明了一类 Mamdani 模糊系统能够以任意精度逼近任意闭子集上的实连续函数该模糊系统采用 Gauss 型隶属函数和“积”运算模糊推理,利用重心法反模糊化输出为单点模糊集(Wang 1992)。同年,Kosko 也证明了一类 Mamdani 模糊系统能够以任意精度逼近紧致集上的任意实连续函数(Kosko 1992)。上述研究成果初步证明了 Mamdani 模糊系统的通用逼近性,但这些成果都是在对 Mamdani 模糊系统进行不同程度限制的基础上完成的,如规则后件为单点模糊集等,同时对模糊系统的非线性逼近能力的充分性研究不够。为此,Zeng 针对具有梯形隶属函数的 Mamdani 模糊系统首先研究了 SISO 和 MIMO 模糊系统在紧致集上一致逼近任意实连续函数的特性(Zeng, Singh 1994, 1995)然后给出其非线性逼近的充分条件(Zeng, Singh 1996)。Ying 相继给出了一般模糊系统作为万能逼近器的充分条件和一些典型模糊系统作为通用逼近器的充分条件(Ying 1994a, 1997)。近几年,国内学者在此方面的研究成果也相继出现。1998 年李峰和钱清泉利用 Stone-Weiestrass 定理证明了基本模糊系统能够以任意精度逼近任意实连续函数(李峰,钱清泉 1998)该模糊系统为通用的 MISO 模糊系统具有三角形隶属函数“max-min”算子组合和重心法反模糊化,且规则后件不再是单点模糊集。2000 年曾珂等证明了特定 Mamdani 模糊系统是通用逼近器(曾珂,徐文立,张乃尧 2000)该系统采用模糊单点作为规则后件可有任意输入变量和任意形状隶属函数的模糊子集利用重心法反模糊化同时作者给出了特定 Mamdani 模糊系统一致逼近紧致集上任意实连续函数的充分条件。2001 年曾珂等进一步证明了典型 MISO Takagi-Sugeno 模糊系统也是通用逼近器(曾珂,张乃尧,徐文立 2001)。模糊系统非线性逼近能力的研究,从数学上为模糊控制的实际应用奠定了理论基础。

### 1.3.2 模糊控制器的数学本质

到 20 世纪 80 年代末 模糊控制在诸多领域都取得了巨大的成功 但是 模糊控制器的设计仍然停留在根据被控对象黑箱式的输入输出来建立控制模型的状态, 无法进行系统化的设计和分析 同时 很难利用经典控制论和现代控制论中广泛采用的方法来分析模糊控制系统的稳定性和鲁棒性。1994 年, 美国加州大学的 Elkan 博士提出“模糊逻辑是似是而非的成功”(Elkan 1994) 由此引起一场关于“模糊控制本质”的全球大讨论 (Berenji 1994 ;李洪兴 1995; 吴望名 1997) 于是,“模糊控制本质”问题就成为必须且急需回答的问题。从此 人们展开了模糊控制器数学本质及其解析结构的研究, 并取得了可喜的成果。

模糊控制器到底是什么? 该问题早在 1978 年, Kichert 和 Mamdani 就分析了模糊控制器和多值继电器的关系, 指出一类简单的模糊控制器可看做多值继电器 (Kichert, Mamdani 1978), 从而初步为人们利用经典控制论中描述函数的方法分析和设计模糊控制系统提供了理论依据。此后 直到 20 世纪 80 年代末, 人们才真正重视对模糊控制器数学本质的研究。Siler, Ying 和 Buckley 首先探索了具有线性规则的模糊控制器数学本质 (Siler, Ying 1989; Buckley and Ying 1989), 接着他们证明了具有两个线性输入模糊子集、四条规则、Zadeh“AND-OR”算子组合及重心法反模糊化的简单 Mamdani 模糊控制器是非线性 PI 控制器 (Ying, Siler, Buckley 1990), 并将结果推广到其它推理方法各类 Mamdani 模糊控制器 指出基于不同推理方法的简单模糊控制器是不同的具有可变增益的非线性 PI 控制器 (Ying 1993)。

在国内 针对 Elkan 提出的“模糊逻辑是似是而非的成功”李洪兴首先分析了具有三角形隶属函数、真值流推理和重心法反模糊化的模糊控制器的数学本质 (李洪兴 1995) 指出模糊控制器就是插值器, SISO 模糊控制器是分段线性插值器, 双输入单输出 (Double Input and Single Input, DISO) 模糊控制器是乘积型分片线性插值器, 模糊控制规则中的隶属函数即为插值的基函数。接着 李洪兴又证明了具有 Mamdani 型控制规则、采用“max - min”蕴涵关系和合成算法、采用单点模糊化和重心法反模糊化的常用模糊推理算法均可视为某种插值器 (李洪兴 1998), 并指出模糊控制方法相当于数学物理中的有限元法, 是经典控制论或现代控制论中的一种直接方法或数值方法。

上述研究不仅回答了“模糊控制本质”问题 而且推动了模糊控制理论的发展 并为模糊控制器的解析结构和模糊控制器设计分析奠定了理论基础。

### 1.3.3 模糊控制器的解析结构

研究模糊控制器的解析结构就是寻找式 (1.1) 的解析表达式。严格地讲 模糊控制器的解析结构与其数学本质没有区别, 只不过由于模糊控制器的结构模型与 PID 控制器具有很大的相似性 因此 研究模糊控制器的解析结构就是主要分析模糊控制器与 PID 控制器的关系 在此基础上 再研究不同算法下模糊控制器的解析结构特征。

$$\Delta u^* = f(e^*, ec^*) \quad (1.1)$$

1985 年 徐承伟就指出在  $\Delta u^*$  和被控对象之间存在着积分作用 (徐承伟 1985); 1987 年 胡家耀在此基础上提出了 Fuzzy-PI 调节器 (胡家耀 吴植翅 宋寿山 1987) 并用于退火炉燃烧过程控制中 (胡家耀 吴植翅 宋寿山 1989)。Tang 通过对常规模糊控制器机理的分析, 最早指出了一般模糊控制器和 PI 控制器的相似性 (Tang 1987); Ying 最先提出模糊 PID 控制

器的解析结构,证明了各类 Mamdani 模糊控制器是可变增益的非线性 PI 控制器 (Ying, Siler, Buckley 1990; Ying 1993a); Abdelnour 从 PID 控制角度提出了 Fuzzy-PI、Fuzzy-PD 和 Fuzzy-PID 三种形式的模糊控制器 (Abdelnour 1991) 随后各种模糊 PID 控制器都被证明是非线性 PID 控制器 (Chen 1996; Misir, Malki, Chen 1996 刘向杰 柴天佑 张焕水 1998)。Ying, Li 和刘向杰等还采用各种方式得出了模糊控制器的量化因子和比例因子同 PID 控制器的  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  之间的关系 (Ying 1998; Li 1997 刘向杰 柴天佑 张焕水 1998)。李洪兴分析了模糊控制器与 PID 控制器之间的关系 (李洪兴 1999a) 指出 SISO 模糊控制器是分段 P 调节器, DISO 模糊控制器是具有 P 与 D(或 P 与 I)交互影响的分片 PD(或 PI)调节器 三输入单输出模糊控制器是具有 P、I、D 之间交互影响的分片 PID 调节器。

上述研究表明 模糊控制器就是非线性 PI、PD 或 PID 控制器。当模糊控制器采用偏差和偏差变化输入、位式或增量式输出时 为非线性 PI 控制器 当模糊控制器采用偏差和偏差积分输入、位式输出时 为非线性 PD 控制器 当模糊控制器采用偏差、偏差变化和偏差积分输入、位式输出时 为非线性 PID 控制器。普通 PI、PD 或 PID 控制器在三维或四维空间中是一个通过原点的超平面 具有线性调节特性 而模糊控制器在相应的空间中则是一个过原点的分片二次或三次曲面, 具有逼近非线性调节规律, 因此, 其整体控制效果好于 PI、PD 或 PID 控制器。

模糊控制器的解析结构分析结果与所采用的隶属函数形式、模糊化方法、控制规则的特性和反模糊化方法有关 (文 李洪兴 1999a) 的结论是针对具有三角形隶属函数、单点模糊化和重心法反模糊化的模糊控制器的。Ying, Chen 和张乃尧等对于具有两个输入变量、多个对称和非对称的三角形隶属函数、线性控制规则、均匀分布单点输出模糊子集、不同推理方法和重心法反模糊化的 Mamdani 控制器, 证明了它是一个全局二维多值继电器和一个局部非线性 PI 控制器之和 (Ying 1993b; Chen, Wang, Hsieh, et al 1998; 张乃尧 1997 李宁 张乃尧 1998, 2000)。

另外 从相平面分析的角度 (Filev, Yager 1994; Aly, Tayeb 1995; Hwang, Tomizuka 1994; Palm 1994; Pok, Xu 1996; Glower, Munighan 1997) 指出模糊控制器在原理上类似于滑模变结构控制器。研究还表明 当模糊控制规则的数目增加到一定程度时 对控制性能影响将很小 从而产生模糊控制器极限结构理论 (Buckley, Ying 1989; Buckley 1990; Ying 1993c); 对于线性控制规则, 常用模糊控制器的输出将随规则的增多而变成输入的线性函数 (Buckley, Ying 1989)。

对于 MIMO 模糊控制器, Ying 研究了双输入双输出 (Double Input Double Output, DIDO) 模糊控制器的解析结构 (Ying 1994b) 该模糊控制器具有三角形输入模糊集、梯形输出模糊集、线性模糊控制规则、“AND-OR”模糊逻辑、Mamdani 型推理和重心法反模糊化方法, 证明了 DIDO 模糊控制器是全局四维多值继电器和局部非线性 PI 控制器之和 且该非线性 PI 控制器具有随过程输出而连续变化的可变增益, 全局多值继电器在控制中起主要作用, 而局部 PI 控制器将局部调整多值继电器的控制动作; 另外, Ying 还指出当控制规则数趋向无穷大时, 全局四维继电器将变成两个全局线性 PI 控制器 而局部 PI 控制器将消失。对于其它 MIMO 模糊控制器 可分解为多个 DISO 模糊控制器 然后分析其解析结构 (Ying 1996)。

模糊控制器的数学本质和解析结构是设计和分析模糊控制器的理论依据, 通过对模糊控制器解析结构的认识, 为设计模糊控制器奠定了理论基础。

## 1.4 模糊逻辑推理方法研究述评

模糊逻辑推理是模糊控制的基础。Zadeh 和 Mamdani 先后于 1973 年和 1974 年提出了两种模糊推理方法 (Zadeh 1973; Mamdani, Assilian 1974), 统称为模糊关系合成 Compositional Rule of Inference, CRI) 法。CRI 法通过对定义在直积空间  $X_1 \times X_2 \times \cdots \times X_n$  上的各个模糊子集作“max-min”运算而实现模糊关系合成, 它是模糊控制的基本推理方法, 是其它推理方法的基础。CRI 法推理计算复杂, 需要计算所有规则的总模糊蕴涵关系  $R$  因此 实际应用中常采用查询事先计算好的模糊输入输出响应表的方法实现模糊控制。在 CRI 法中 常采用就近取整模糊化方法, 使得 CRI 法存在稳态误差。

针对 CRI 法推理计算的复杂性, 人们相继提出了不同简化方法。首先, Tsukamoto 于 1979 年提出强度转移模糊推理方法 (Tsukamoto 1979) 该方法推理简单 但它要求输入模糊量具有单调性。1984 年 陈永义和陈图云根据“max-min”算子结合律 简化了 CRI 法 提出特征展开推理 (Characteristics Expanding Inference, CEI) 方法 (陈永义 陈图云 1984)。CEI 法首先计算实测量对规则前件的特征系数 认为模糊推理是特征系数的传递 使人们清晰地看到实测量信息在模糊推理中传递的过程。1989 年, 汪培庄和张洪敏在 CEI 法的基础上提出了真值流推理 (Truth-valued-flow Inference, TVFI) 法 (汪培庄 张洪敏 1989) 真值流推理将模糊控制规则看成传递信息的渠道, 认为推理是真值沿规则渠道的传递。该方法采用单值隶属度模糊化方法 推理计算进一步简化。在一次推理过程中 由于某时刻的实时推理并不是与所有的模糊控制规则和模糊子集都有关系, 这无论在二值逻辑推理还是近似推理中都是存在的事实。为此 欧进萍和张吉礼 (2000a) 提出了作用模糊子集推理 (Functioning-fuzzy-subset Inference, FFSI) 法, FFSI 法首先确定实测量的作用模糊子集和作用模糊控制规则, 认为推理是真值沿作用模糊控制规则渠道的传递。对于 MIMO 系统, Lee 提出了将 MIMO 系统化为 MIS-O 系统的推理方法 (Lee 1990)。在实时控制中, 作为模糊控制器核心的模糊推理方法, 不仅要求其能够实现正确的推理, 而且更重要的是具有较高的推理速度。

针对实际控制工程特点, Cao 和张师超等提出了不同的改进 CRI 法的模糊推理方法 (Cao, Kandel, Li 1990; 张师超, 汤服成 1998)。首先, Cao 等针对实际控制系统输入输出量为精确量的情况, 提出了精确量模糊推理方法 (Cao, Kandel, Li 1990)。精确量推理法将规则后件表示成基于后件变量各模糊子集的模糊向量, 计算前件与后件蕴涵关系矩阵  $M$  然后根据实测精确量对前件的真值 求出输出精确量。研究表明 精确量法较 CRI 法的推理效果好, 但推理过程需要计算关系矩阵  $M$  类似于 CRI 法的  $R$ )。其次 张师超和汤服成针对 CRI 法中每条规则都存在一蕴涵关系矩阵问题, 提出了基于实例的模糊推理方法 (张师超, 汤服成 1998)。该方法为了体现控制过程中的实际语义 将规则“if  $x$  is  $P$  then  $y$  is  $Q$ ”近似地用线性形式  $Q = a + b \cdot P$  来表示 根据该规则的  $n$  个实例  $(P_1, P_2, \cdots, P_n)$  和  $(Q_1, Q_2, \cdots, Q_n)$ , 利用最小二乘法求出  $a$  和  $b$ , 从而得到规则的因果关式。尽管作者认为该方法比 CRI 法更能体现实际问题, 但不难看出该方法将依赖于规则的实例, 而实例往往不够充足。

根据模糊逻辑语义蕴涵理论, 王国俊分析了 CRI 法的不足 (王国俊 1999) 首先 CRI 法在模糊推理上仅使用一次与推理有关的蕴涵算法, 王国俊称此为单蕴涵算法; 其次, CRI 法

不是还原算法 即在已知  $A \rightarrow B$  的前提下 若给定  $A = A^*$  所求得的  $B$  未必等于  $B^*$ 。针对这些问题,王国俊提出了模糊推理的全蕴涵算法,简称三 I (Implication 或 Inference) 算法 并证明了该方法具有还原性。

针对 CRI 法的非还原性、“max-min 运算中对各真值贡献大小处理不公等问题,韩生廉等提出了贡献度最大值为中心的模糊推理方法(韩生廉 胡国四 王建桥 1998)。该方法称实测量对前件的隶属度为适合度,称各前件真值与后件作用所得的模糊量值的最大隶属度为规则的贡献度 通过将贡献度正规化和计算贡献度间距 最后 经计算得到推理结果 该方法过渡时间短,超调小 所用规则少。

综上所述 关于模糊控制基本推理方法的研究 人们最初是侧重于实际应用和算法的简化,随后逐渐转向从逻辑语义和算法本身特性角度对 CRI 法进行完善和改进,最后转向模糊推理本质、算子语义本质和模糊控制器解析结构本质等基础理论研究 从而为模糊控制和模糊推理提供理论基础。

## 1.5 模糊 - 神经网络控制研究与应用述评

模糊控制的发展和应用可以用几句话概括:模糊控制于 20 世纪 60 年代萌芽于美国,70 年代诞生并成长于欧洲,80 年代当西方人不太“欢迎”模糊理论时,它却在日本迅速地发展壮大并广泛应用于家用电器的自动控制,90 年代才引起全球的普遍承认,与神经网络结合后 成为智能控制的一个重要分支。在 30 年的发展过程中,模糊控制的研究也由图 1.4 和图 1.5 所示的最基本模糊控制系统的研究逐步发展为自适应、自组织模糊控制的研究。Chou 和 Lu 把自适应、自组织模糊控制分为直接型和间接型(Chou, Lu 1994) 直接型自适应模糊控制器如图 1.9 所示 其中 调整模块可以是参考模型、参数调节器和辅助控制器等 经过各基本模块的斜线表示可对各模块进行调节。间接型自适应模糊控制器是基于模型辨识所建立的规则模型或关系矩阵模型来实现自适应控制。

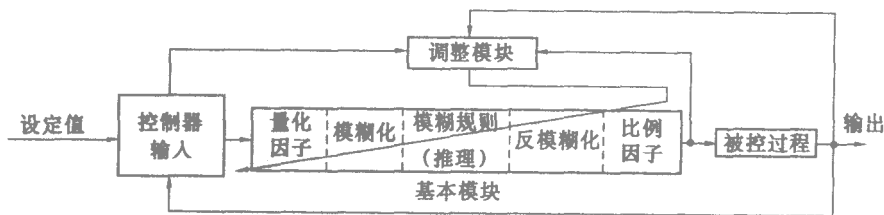


图 1.9 直接型自适应模糊控制器

目前 自适应模糊控制的发展概括起来主要有以下类型 (Chou, Lu 1994 金晓明 荣冈 王骥程 1996 张恩勤 施颂椒 高卫华等 2001)。

- 1) 基于模糊控制规则调整的自适应模糊控制器;
- 2) 基于比例因子调整的自适应模糊控制器;
- 3) 基于论域调整的自适应模糊控制器;
- 4) 基于隶属函数调整的自适应模糊控制器;
- 5) 基于模糊模型的自适应模糊控制器;

- 6) 基于 PID 模型的自适应模糊控制器；
- 7) 基于神经网络的自适应模糊控制器；
- 8) 基于遗传算法的自适应模糊控制器；
- 9) 基于小波变换的自适应模糊控制器；
- 10) 大滞后过程自适应模糊控制器。

其中, 1) ~ 4) 为基于基本参数调整的自适应模糊控制器, 5) 和 6) 为基于模型的自适应模糊控制器, 7) ~ 9) 为基于智能算法的自适应模糊控制器。下面将从 4 个方面来系统地介绍自适应模糊控制的研究与应用进展。

### 1.5.1 基于基本参数调整的自适应模糊控制器

#### 1. 基于模糊控制规则调整的自适应模糊控制器

Procky 和 Mamdani 采用修改模糊控制规则的方法, 提出了自组织模糊控制方法 (Procky and Mamdani 1979) 如图 1.10 所示。

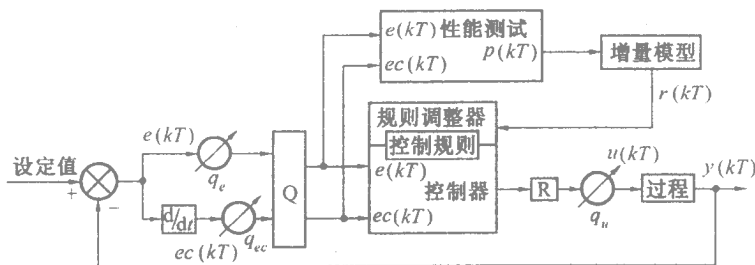


图 1.10 规则自组织模糊控制器

自组织模糊控制器在基本模糊控制器的基础上, 增加性能测试、模型增量和规则调整器 3 个模块。首先确定被控过程的增量模型, 根据输入确定输出的改变量; 然后在系统原有规则基础上, 考虑输入校正量, 构造规则修正控制器, 最后对原有规则进行修正, 从而得到新规则。Procky 和 Mamdani 利用该方法, 成功地对高阶、大滞后、非线性、多变量、有随机干扰的被控过程完成了控制仿真, 得到了很好的控制效果。但图 1.10 所示的控制器实现难度在于须求解系统状态模型的 Jacobian 阵, 从规则调整算法的难易看, 龙升照和汪培庄提出的模糊控制规则修正因子自调整方法更容易实现 (龙升照, 汪培庄 1982)。

文 (龙升照, 汪培庄 1982) 将模糊控制规则表示成一解析表达式, 如式 (1.2) 所示, 其中,  $E$ 、 $EC$  和  $U$  分别为偏差、偏差变化和 control 量的模糊量值;  $\alpha$  为修正因子,  $\alpha = 0 \sim 1$ 。  $\alpha$  的大小反映了偏差和偏差变化的权重系数, 反映了控制过程中人的思维特点;  $\alpha$  取值不同, 则可以得到不同的规则表, 以实现规则的自调整。该方法克服了单凭经验来选择规则的困难。

$$U = \alpha \cdot E + (1 - \alpha) \cdot EC \quad (1.2)$$

控制系统在不同的状态下, 对偏差和偏差变化的权重要求不同。当偏差较大时, 系统主要是消除偏差, 此时偏差应有较大的权重; 当偏差较小时, 系统主要是减少超调, 使系统尽快稳定, 此时应加大偏差变化的权重。根据这一要求, 文 (龙升照, 汪培庄 1982) 强调仅由  $\alpha$  来调整规则, 且  $\alpha$  一旦确定, 则偏差和偏差变化的权重就固定了, 显然无法满足上述控制要求。为此, 李东辉提出了多修正因子的模糊控制规则自调整方法 (李东辉 1986) 如式 (1.3)

所示 并以修正因子为寻优参数,以 ITAE 指标为目标函数 提出了模糊控制系统修正因子自寻优控制方法 如图 1.11 所示。

$$u = \begin{cases} [\alpha_0 \cdot E + (1 - \alpha_0) \cdot EC] & E = 0 \\ [\alpha_1 \cdot E + (1 - \alpha_1) \cdot EC] & E = \pm 1 \\ [\alpha_2 \cdot E + (1 - \alpha_2) \cdot EC] & E = \pm 2 \\ [\alpha_3 \cdot E + (1 - \alpha_3) \cdot EC] & E = \pm 3 \end{cases} \quad (1.3)$$

根据文(李东辉 1986)对线性和非线性系统模糊控制仿真结果,对线性系统,寻优后的规则较初始规则变化较大,在大偏差下,偏差的权重约为偏差变化的 3 倍以上;在小偏差下,偏差变化的权重约为偏差的 2 倍以上。对非线性系统,寻优后的规则较初始规则变化也较大,在大偏差下,偏差和偏差变化的权重相差不大,但在小偏差下,偏差变化的权重仍为偏差的 2 倍以上。文(李东辉 1986)的研究结果为设置模糊控制规则中偏差和偏差变化的模糊量值提供了一个量的概念。

在文(龙升照 汪培庄 1982;李东辉 1986)中,规则的调整依靠一个或多个参数,且参数调整过程互相依赖,即二者之和为 1。针对这一问题 姚敏和朱延庆根据 PID 控制各参数间的独立性 提出了式(1.4)所示的模糊控制规则解析表达式(姚敏 朱延庆 1989) 其中  $\alpha_1, \alpha_2$  相互独立。为确定  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  文(姚敏 朱延庆 1989)以偏差平方积分函数为目标函数,采用启发式搜索策略对  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  进行在线寻优,实现了模糊控制规则的自动调整。该方法综合了模糊控制和 PID 控制的长处,既具有简捷、有效的非线性控制效果,又具有广泛的适用性。

$$u = \alpha_1 \cdot e + \alpha_2 \cdot \Delta e \quad \alpha_1, \alpha_2 \in [0, 1] \quad (1.4)$$

在规则自适应模糊控制器的设计上 日本学者 Maeda 和 Murakami 于 1992 年提出了一种集参数调整和规则调整于一体的自调整模糊控制器算法(Maeda, Murakami 1992)。该控制器由模糊逻辑控制器、数据存贮单元、性能评价模块、规则修正器和参数调整器组成 如图 1.12 所示。模糊控制规则的前件由偏差、偏差的一阶和二阶差分组成,后件由控制增量构成。对规则的自调整 作者建立了以偏差和偏差变化为前件、以规则的调整量为后件的控制规则修正规则表 并给出了规则修正方法。对量化因子和比例因子的自调整 作者建立了以系统的超调、上升时间和幅值为前件、以控制器参数(3 个量化因子和 1 个比例因子)的调节量为后件的参数调整规则表,并给出参数调整方法。在仿真过程中,先对系统参数进行调整,然后再修正规则。仿真结果表明,该控制器的控制效果优于简单模糊控制器。另外, Tönshoff 和 Walter 的研究也具有类似的调整结构(Tönshoff, Walter 1994)。

上述规则的调整 基本都以偏差和偏差变化为依据进行的 当系统进入稳定状态后 偏差和偏差变化很小 赖以调整规则的性能指标也随之变小 可能使系统出现极限环 为提高系统在小偏差下的自调整分辨率 Huang 和 Nelson 于 1999 年提出了相平面参考轨迹控制规则自调整方法(Huang, Nelson 1999), 即根据系统相平面实际响应轨迹到理想轨迹上参考点的距离来调整模糊控制规则 使模糊控制器按理想轨迹工作 以提高控制性能。

由此可见 关于模糊控制规则调整型自适应模糊控制器的研究 人们已采用不同的方法

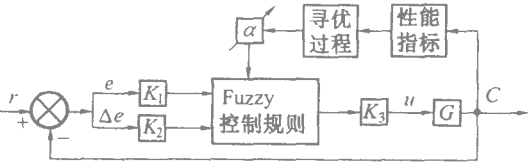


图 1.11 规则修正因子自寻优模糊控制器

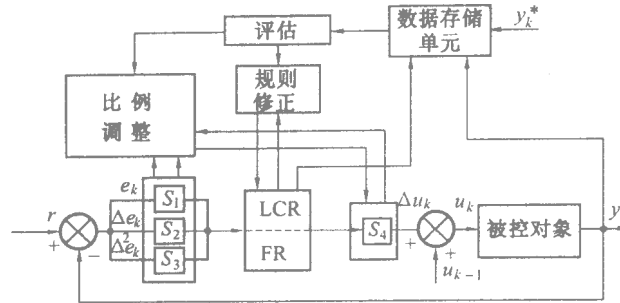


图 1.12 参数和规则调整一体化自调整模糊控制器

做了大量而系统的工作，并在相关研究和应用中得到进一步完善和应用（张德颂，张庆华 1987；Shao 1988；Wu, Wang, Heng 1992；Burkhardt, Bonissone 1992；He, Tan, Hang 1992）可以说这方面的研究已非常成熟。

## 2. 基于比例因子调整的自适应模糊控制器

这里的比例因子调整实际包括量化因子和比例因子。模糊控制器的量化因子和比例因子与 PID 控制器的三参数间存在着某种相似性（Li 1997；刘向杰 柴天佑 张焕水 1998；Ying 1998），量化因子表征了偏差和偏差变化的权重大小，输出比例因子即模糊控制系统的增益，由此人们提出了各种量化因子和比例因子自调整模糊控制方法。

Braae 和 Rutherford 于 1979 年最先开展了这方面的研究工作（Braae and Rutherford 1979），他们借助以偏差和偏差变化为坐标轴所构成的语言空间来分析量化因子和比例因子的选择问题，通过系统控制响应语言轨迹来判断各输入输出比例因子调整的好坏。此后这方面的研究到 20 世纪 80 年代末才大量出现。1987 年，鲍新福等在分析模糊控制器输入输出比例因子对控制效果影响的基础上提出了自调整比例因子模糊控制器（鲍新福，都志杰，王芳君 1987）如图 1.13 所示，通过对偏差和偏差变化的检测，来确定量化因子和比例因子的调整量，实现对输入输出比例因子的自调整。

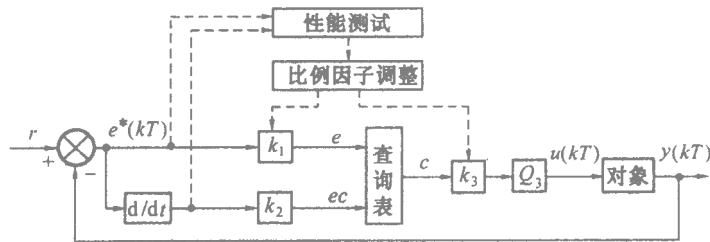


图 1.13 自调整比例因子模糊控制器

为调整量化因子，Bare 等人定义了式 (1.5) 所示的调整因子 其中  $e_{n+1}$  和  $e_n$  分别为  $n+1$  和  $n$  时刻的偏差；通过启发式规则调整来实现对量化因子的调整（Bare, Mulholland, Sofer 1990）。为调整输出比例因子，首先，Peng 等人将输出比例因子定义为偏差的函数（Peng 1990），以实现比例因子的调整；其次 Buckley 和 Ying 在专家模糊控制器中引入模糊目标的思想来调整输出比例因子（Buckley, Ying 1991）即以上升时间、超调和设定时间为具体指标构成模糊目标，利用规则型调整策略通过调整输出比例因子来实现模糊目标。基于模糊目标的调整思想也被 Maeda 和 Daug 等人采用（Maeda, Murakami 1992；Daug, Rathakrishnan, Yen

1992) 他们把以超调上升时间和振幅的目标值为基础定义模糊目标 利用其实际值与目标值之偏差来构成规则型调整策略, 实现量化因子和输出比例因子的自调整。

$$\rho = \frac{e_{n+1}}{e_n} \quad (1.5)$$

作为应用, 毛宗源和狄铮实现了工业锅炉燃烧过程的自调整比例因子模糊控制 (毛宗源 狄铮 1991) 整个控制系统由 5 个模糊控制器构成, 采用相同的自调整比例因子控制规则, 调节各自的量化因子和比例因子。实际运行表明, 在该系统的控制下, 锅炉负荷波动小、燃烧效率高、无黑烟出现、耗油量低。另外, Chou 和 Lu 利用比例因子自调整模糊控制方法实现了伺服系统和倒立摆的模糊控制 (Chou, Lu 1994)。

### 3. 基于论域调整的自适应模糊控制器

在模糊控制中, 常采用等间距论域划分方法。当偏差较大时, 系统的控制响应充分分布在整個论域上 如图 1.14 中“大偏差”虚线所示 系统稳定后 偏差缩小 对应于原模糊划分, 系统响应仅在“ZE”, 附近变化, 其它模糊子集对该时刻偏差范围的描述和辨析显然不起作用 如图 1.14 中“小偏差”虚线所示。理想的状况应该是当偏差缩小时, 模糊划分对该微小的偏差范围也应能够充分地描述和辨析, 如图 1.15 所示, 从而提高控制系统在小偏差下的分辨能力, 这就要求对变量的论域进行实时调整。

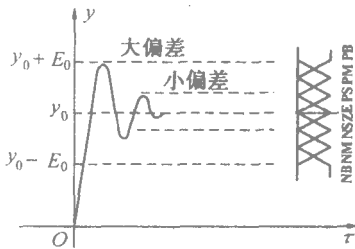


图 1.14 等间距模糊划分

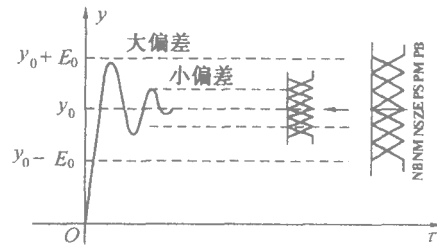


图 1.15 论域调整

1993年, 冯宏娟和王守觉分析了等间距量化方法对控制器动态特性和稳态误差的影响 提出了变间距模糊集控制方法 (冯宏娟 王守觉 1993a), 即用非线性模糊量化方法量化实测量; 为减小模糊推理论域初始值的影响, 作者提出变间距自寻优模糊集算法, 根据模糊控制性能指标, 分段调整量化因子, 对模糊集间距进行寻优, 实现论域自调整模糊控制。仿真和连续逻辑 CLC 电路硬件实验结果表明 (冯宏娟 王守觉 1993b) 变间距自寻优模糊集控制器大大改善了系统的响应性能, 提高了稳态精度。该方法在自寻优模糊集的同时, 也实现了隶属函数的自调整。

1995年 贾磊等根据切换 PI 模糊控制器的思想, 提出了论域缩小逼近法模糊控制器 (贾磊 朱摩西 慕星光等 1995), 即首先确定模糊控制表的中心区域 (取总论域的 1/4 ~ 1/5) 并将系统控制在该区域内; 其次, 细化中心区域, 再在细化后的论域中确定一更小的中心区域, 如此下去, 即实现论域缩小逼近过程, 细化过程通过调整比例因子实现。作者采用该算法实现了纸张水分控制, 结果表明, 采用论域缩小逼近法消除了模糊控制器原有的余差且无振荡现象。

为实现高精度模糊控制, 李洪兴提出了论域伸缩的思想, 并利用论域伸缩因子实现论域的调整 (李洪兴 1995) 随后 李洪兴又提出变论域自适应模糊控制器 (李洪兴 1999b) 指出

论域变化的前提是模糊控制规则的单调性，这样才能保证论域变化时控制规则的无矛盾性。根据论域伸缩思想，张吉礼和欧进萍等分析了输入量论域调整对输出量论域变化的要求，提出了输出量论域调整函数，设计了论域自调整模糊控制器（张吉礼 1998 张吉礼 欧进萍 于达仁 2001）如图 1.16 所示，并实现了低温热水散热器热工性能实验台室内温度的模糊控制（张吉礼 孙德兴 欧进萍 2000），试验表明，论域自调整模糊控制方法能够消除简单模糊控制器所存在的稳态误差。

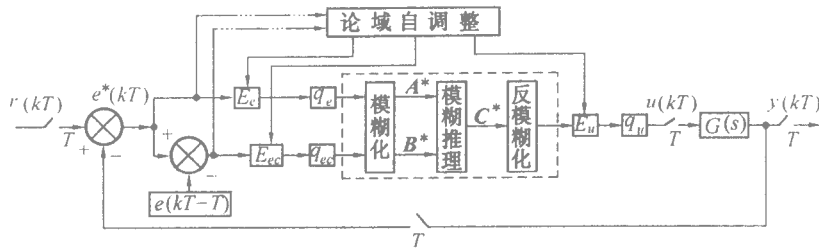


图 1.16 论域自调整模糊控制器

由图 1.15 还可看出，论域调整即伴随着隶属函数的调整，文（李洪兴 1999b）在实现论域调整的同时也实现了对隶属函数的调整，只不过其隶属函数的调整为等间距调整。不等间距隶属函数调整如图 1.17 所示，李宁和张乃尧通过调整隶属函数形状参数，实现了隶属函数非线性自适应调整（李宁，张乃尧 2000）。另外，Fei 和 Isik 通过调整隶属函数实现模糊控制器的自适应调节（Fei and Isik 1992）。隶属函数形状参数的调整要比论域收缩复杂得多，且小论域下隶属函数形状对控制效果的影响已微乎其微。

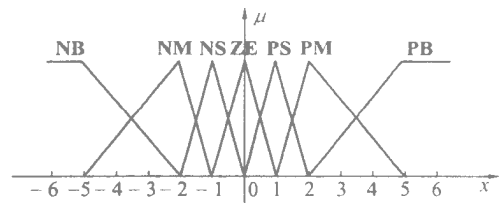


图 1.17 不等间距隶属函数

## 1.5.2 基于模型参考的自适应模糊控制器

### 1. 基于模糊模型的自适应模糊控制器

20世纪 80 年代以来，随着模糊辨识的兴起，逐步产生了两种模糊辨识模型，一是 Pedrycz 提出的基于参考模糊集的被控系统模糊关系模型，简称 P 模型（Pedrycz 1984）；二是 Takagi-Sugeno 提出的模糊语言多项式模型 简称 T-S 模型（Takagi, Sugeno 1985）。P 模型和 T-S 模型为基于模糊模型的自适应模糊控制技术的发展提供了有效的工具。

1993 年 陈建勤和陈来九在 Pedrycz 工作的基础上，首先提出了带有遗忘因子的模糊模型在线辨识方法 然后根据模糊模型获得了模糊控制规则 最后得到了基于 P 模型的自适应模糊控制系统 陈建勤 陈来九 1993) 如图 1.18 所示 数字仿真结果表明 该自适应模糊控制系统的控制效果明显优于常规 PI 控制 且具有良好的学习能力。另外，Moore 和 Graham 等人也分别在基于模糊模型的自适应控制方面做了一定的研究工作（Graham, Newell 1989; Moore,

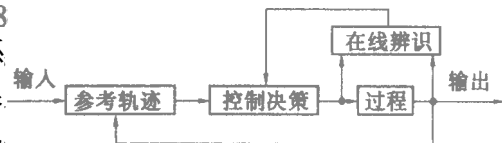


图 1.18 基于 P 模型的自适应模糊控制系统

Harris 1992).

在 T-S 模型中 由于规则的后件均为前件的线性多项式函数 因此 若通过模糊辨识获得 T-S 模型后, 则可以很方便地将模糊模型转换成等价的线性形式。根据这一特点, 张化光等提出了基于 T-S 模型的模糊自校正广义预测控制方法(张化光, 吕剑虹, 陈来九 1993) 仿真结果表明, 该方法用于火电机组负荷系统控制时, 具有良好的控制效果。

### 2. 基于 PID 模型的自适应模糊控制器

模糊控制与 PID 控制的结合主要有两种方式, 一是以模糊控制为基础, 在  $\Delta u^*(t)$  和被控过程之间引入 PID 控制环节(胡家耀 吴植翅 宋寿山 1987; Wu, Mizumoto 1996) 这时 主要利用 PID 控制的积分作用来提高模糊控制器在小偏差下的控制性能; 二是以 PID 控制为基础, 引入模糊监测器(Fuzzy Supervisor) 利用该监测器实现 PID 控制参数的自调整(Chen 1996; Misir, Malki, Chen 1996; Lemke, Dezhao 1985; Tzafestas, Papanikolopoulos 1988; Tzafestas, Papanikolopoulos 1990)。后者就是基于 PID 模型的自适应模糊控制器。

1985 年, Lemke 和 Dezhao 提出了模糊 PID 监测器(Lemke, Dezhao 1985) 如图 1.19 所示, 基于专家知识的模糊监测器用于调整 PID 控制器的比例、积分和微分参数  $P$ 、 $I$  和  $D$ 。监测器设有性能评价指标  $PI$  并由上升时间  $T_r$ 、超调  $h$  和 ITAE 分项指标通过模糊决策来判断  $PI$  的好坏 其隶属函数如图 1.20 所示。模糊监测器通过对被控过程性能监测, 决策 PID 控制器的参数修正量, 实现 PID 参数的自适应调整。随后, Tzafestas 和 Papanikolopoulos 在文(Lemke, Dezhao 1985) 的基础上, 提出了模糊 PID 增量式控制器(Tzafestas, Papanikolopoulos 1988; Tzafestas, Papanikolopoulos 1990), Chen 和 Misir 也提出了基于 PID 控制的自适应模糊控制方法(Chen 1996; Misir, Malki, Chen 1996)。

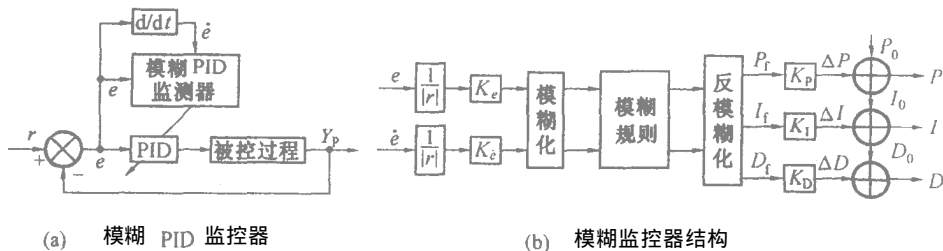


图 1.19 模糊 PID 监测器

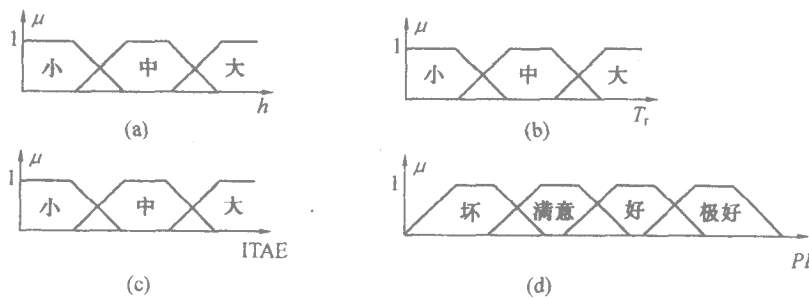


图 1.20 控制性能指标隶属函数

### 1.5.3 基于智能算法的自适应模糊控制器

尽管模糊控制具有较强的不确定性知识表达和逻辑推理能力,但它缺乏自学习、并行计算、全局寻优和复杂数据处理能力,随着神经网络、遗传算法和小波变换技术的发展和运用,模糊控制与之结合已成为解决复杂系统控制问题的最有效途径之一。

#### 1. 基于神经网络的自适应模糊控制器

由于神经网络具有非线性逼近能力,具有自学习、自适应和并行分布处理能力,但其对不确定性知识的表达能力较差,因此,神经网络与模糊控制结合是优势互补,各取所长。近十年来,这方面出现了大量的研究成果(Hunt, Sbarbaro, Zbikowski 1992; 周其节,徐建闽 1992; Buckley, Hayashi 1994; 张良杰,李衍达 1995; 金晓明,荣冈,王骥程 1996; 刘普寅,张汉江,吴孟达等 1998; 张恩勤,施颂椒,高卫华等 2001),这里仅就神经网络与模糊控制的结合方式加以讨论。

神经网络与模糊控制的结合主要有 3 种方式(Hunt, Sbarbaro, Zbikowski 1992; 周其节,徐建闽 1992; Buckley, Hayashi 1994; 张良杰,李衍达 1995; 刘普寅,张汉江,吴孟达等 1998; 张恩勤,施颂椒,高卫华等 2001):

- 1) 在神经网络结构中引入模糊逻辑,使之具有直接处理模糊信息的能力,即模糊神经网络;
- 2) 直接利用神经网络的学习和映射能力,实现模糊控制中的模糊化、模糊推理和反模糊化过程,即利用神经网络实现模糊控制;
- 3) 神经网络和模糊控制各自独立,发挥各自特长,实现不同的功能,即模糊-神经网络控制。

模糊神经网络的神经元为模糊神经元,邹开其和李正吾在逻辑神经元的基础上,提出了三种模糊神经元(邹开其,李正吾 1998),分别如图 1.21 所示,其中  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$  为输入,  $\theta$  为阈值。王振峰等提出了基于模糊神经元的单体模糊神经网络结构(王振峰,靳东明,李志坚 1997),实现了单体模糊神经网络智能控制。另外,吴孟达和杨群生等分别对“max-min”神经网络和“最大-乘积”模糊联想记忆网络的学习算法进行了研究(吴孟达,成礼智,张汉江 1998; 杨群生,余英林 2000),为其在模糊控制中的应用打下了基础。

利用神经网络来实现模糊化、模糊推理和反模糊化过程,能够有效地解决模糊控制规则对专家经验的依赖和隶属函数非自适应等问题。Keller 等于 1992 年就利用神经网络实现了模糊逻辑推理过程(Keller, Yager, Tahani 1992)。王隆杰和毛宗源(1994)在典型模糊控制器的基础上增加了神经网络自调整机构,如图 1.22 所示。图中网络 I 实现由偏差的模糊集和偏差变化的模糊集到控制量的模糊集的推理,网络 II 实现由偏差的绝对值模糊集到  $k_1$  和

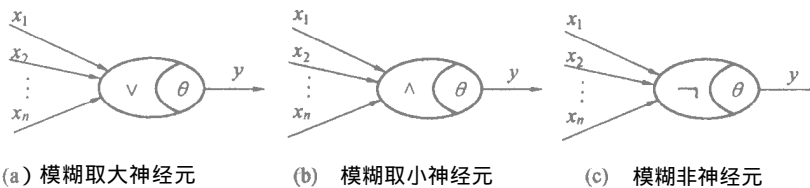


图 1.21 模糊神经元

$k_2$  的改变量的模糊集的推理。神经网络采用 BP 网络，网络的输入和输出均为模糊量。训练后的神经网络能够完成模糊关系的合成，即模糊推理。1995 年王耀南提出了模糊神经网络自适应控制方法 (Wang 1995) 如图 1.23 所示 其中 FGNC 为神经网络模糊控制器 实现模糊化、模糊推理和反模糊化过程，完成对被控对象的控制 MNN 为神经网络辨识器 其后 又提出了变斜率梯度的学习算法，并实现了窑炉温度自适应控制 (王耀南 1996) 针对静态 BP 网络的不足 姚尹武、葛红和毛宗源相继提出了具有动态结构的 BP 网络自适应模糊控制系统 即变结构模糊神经网络控制 (姚尹武、熊金涛、毛宗源 1996; 葛红、毛宗源 1999); 2001 年，李迪等利用神经网络在线实现了模糊控制过程隶属函数的自适应调整和模糊控制规则的自组织 并用于弧焊过程控制中 (Li, Srikanthan, Katsunori 2001)。

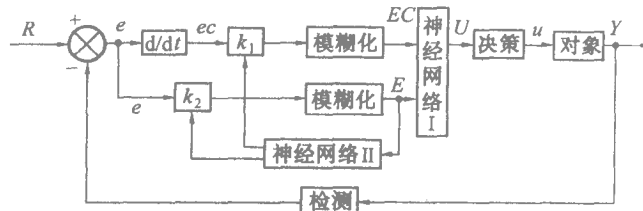


图 1.22 模糊神经网络控制结构

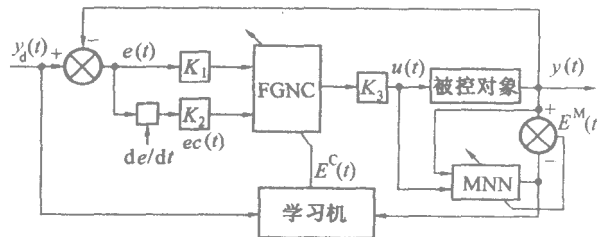


图 1.23 模糊神经网络自适应控制系统

在模糊控制中 被控对象的动态特性常常难以事先知道 这时 即可利用神经网络来在线辨识其动态特性 图 1.23 中 MNN 就是一例。通过神经网络辨识器 MNN 即可实现对被控对象动态特性的辨识 为 FGNC 提供学习参考。对于大滞后系统的控制，也常利用神经网络来预测被控对象的未来输出特性 然后再实现相关控制 (Huang, Nelson 1994a; 张吉礼 1998; Zhang Jili, Ou Jinping, Yu Daren 2000)。在这里神经网络主要利用其非线性逼近能力和自学习能力 实现对被控对象动态特性的辨识和预测 而模糊控制则发挥其专家知识表示和推理优势 完成推理控制 二者优势互补。

## 2. 基于遗传算法的自适应模糊控制器

基于误差反向传递的神经网络学习算法 常存在局部最小问题 而遗传算法则具有并行搜索和全局最优等特性 因此 利用遗传算法来解决自适应模糊控制中有关难题已成为一个有效的途径。遗传算法与模糊控制的结合有两种方式，一是基于模糊控制的自适应遗传算法的研究 二是利用遗传算法设计模糊控制系统的研究 这里主要讨论后者。利用遗传算法设计模糊控制器主要有以下几个方面 (江毅 1998)。