

模糊逻辑 模糊控制 模糊技术

3

13-17

模糊逻辑和模糊控制*

沈理

(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)

TP13

A 摘要 模糊理论创立将近 30 年,而出现实际应用的转机却是八十年代末和九十年代初的事。本文介绍模糊逻辑最活跃的应用领域——模糊控制。

1 模糊技术由来

1965 年,美国加州大学伯克莱分校 L. Zadeh 教授发表了著名的论文“Fuzzy Sets”(模糊集),开创了模糊理论。经历近三十年的曲折,这一领域已取得长足的进步,Zadeh 也被国际上誉为“模糊之父”。最近十年来,模糊理论又在实际应用中获得重大突破,作为一种高新技术正在迅速发展,预计二十一世纪它将成为信息科学中的核心技术之一。

Zadeh 教授当初曾提出过一个著名的不相容原理:“随着系统复杂性增加,人们对系统进行精确而有效地描述的能力会降低,直至一个阈值,精确和有效成为互斥”。其实质在于,真实世界中的问题,概念往往没有明确的界限,而传统数学的分类,总试图定义成清晰的界限,这是一种矛盾,一定条件下会变成对立的東西。从而引出一个极其简单而又重要的思想:任何事情都离不开隶属程度这样一个概念。这就是模糊理论的基本出发点。

因此可以这样认为,随着系统越来越复杂,当其复杂性达到与人类思维系统可比拟时,传统的数学分析方法就不适应了,模糊数学或模糊逻辑更接近于人类思维和自然语言,因此模糊理论为复杂系统分析,进而为人工智能研究提供了一种有用的方法和工具。

模糊技术发展过程中有一些重要的里程碑,现仅列出其中若干项如下:

- 1965 年模糊集 美国 Zadeh
- 1973 年语言方法(模糊逻辑) 美国 Zadeh
- 1974 年蒸汽涡轮机控制实验 英国 Mamdani
- 1985 年第一个模糊推理芯片问世 美国 Togai
- 1987 年仙台地铁机车全自动驾驶 日本日立公司

1990 年家用电器“模糊热” 日本

2 什么是模糊逻辑

Zadeh 把普通的集合论推广到模糊集合论是基于真实世界中的概念往往是没有清晰界限这一事实的。

普通的集合:集合中的成员是具有精确特性的对象。例如:“8 到 12 的实数集合”是一个清晰的集合 C, $C = \{ \text{实数 } r \mid 8 \leq r \leq 12 \}$ 。用特征函数 $M_C(r)$ 表示成员, r 隶属于集合 C 的程度(图 1):

$$M_C = \begin{cases} 1, & 8 \leq r \leq 12 \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$$

这个特征函数是唯一的,且只有两个答案:“是”和“否”,对应于传统的二值逻辑。

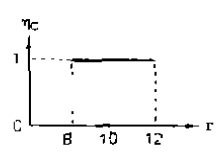


图 1

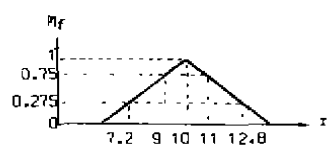


图 2

模糊集合:集合中成员的特性是模糊的。例如:“接近于 10 的实数集合”是一个模糊集合 F:

$$F = \{ \text{接近于 } 10 \text{ 的实数 } r \}$$

这时,特征函数 $M_F(r)$ 不是唯一的。譬如用一个等腰三角形来表示(图 2)。那么成员 10 隶属于该模糊集的程度可定义为 1,9 和 11 的隶属度是 0.75,7.2 和 12.8 的隶属度是 0.275 等。因此,特征函数在 0 和 1 区间取值,这种函数称隶属函数,所对应的逻辑是多值逻辑,更确切地说是一种连续值逻辑或称模糊逻辑。

这里说到隶属度 $[0, 1]$, 往往就使人们联系到概

* 1863 国家高技术研究发展计划资助项目,项目台同号,863-306-01-04-2。沈理 研究员,研究兴趣为模糊逻辑、模糊控制、模糊神经网络、容错计算、故障诊断、计算机体系结构。

率理论中的概率值[0,1]。尽管它们取值一样,又都是研究事物的不确定性问题,然而它们的含义是不同的。

概率性:事件本身是清晰的,只是事件出现频数具有不确定性。例如,在一个群体中“老年人得心脏病”的机会一般可用统计方法得到。

模糊性:事件本身是含糊不清的,而事件出现是确定的(当然也可以是不确定的)。例如,年龄分组,“青年”,“老年”等,这是一些模糊的概念,且是确实存在的,它们不一定通过统计来规定。在一定的社会背景下,完全可以人为确定其年龄段来定义“幼年”、“青年”、“中年”、“老年”等概念。

最后要提一下有关的术语,“逻辑”原本用于思维学,从狭义上说“逻辑”是一种推理的形式化理论,例如“数理逻辑”。但如今计算机学科中,“逻辑”已具有更广泛的含义,例如“数字逻辑”等。同样,对于“模糊逻辑”,从狭义上说,它是基于模糊集进行近似推理的形式化理论;而从广义上讲,它是基于模糊集的一种决策支持理论,包括推理、控制、模式识别、综合评判、规划等人类思维决策过程。

3 模糊逻辑控制技术

复杂的工业控制过程往往是很难进行自动控制的,原因在于它们的非线性,时变特性,以及可利用测量手段的局限性,然而熟练的操作工却能将生产过程控制得很好。利用计算机,构造过程的数学模型,可以实现自动控制。但是常常由于数学模型不精确,或者需要大量计算时间,过程运行仅在一定条件范围

内有效,超越条件或受到偶然的扰动,控制就很难保证稳定,因此对于复杂过程的控制,另一种途径是研究操作工所用的控制策略,即利用直觉上可理解的操作术语和规则来构造任意复杂的线性或非线性过程模型。模糊逻辑是非常适合于实现这类控制途径的一种方法,也是近十年来模糊逻辑应用最成功的一个领域,即模糊逻辑控制 FLC(Fuzzy Logic Control)。

一般基于微机的控制也可用术语和规则来描述过程控制功能,但它与模糊逻辑控制的重要差别在于,前者计算的只是“真”和“假”两个值,而模糊逻辑控制中,模糊术语是表达集合的隶属程度,而模糊规则结论的真值或可能性是一个连续的范围。

下面用一个简单的示例来进一步说明。假设控制功能用函数 $Y=F(X)$ 表示。变量 X 是控制器的输入(来自过程的传感器输出),变量 Y 是控制器的输出(过程的执行机构输入),可有三种方法表示这种函数关系。

第一种方法是数学函数,例如图 3 中的曲线,但实际控制问题一般没有那么简单,需要利用复杂的数学计算。

第二种方法是近似法。将输入/输出关系用一系列点表示(图 4),即用表格存储或用程序中 IF 语句表示。这种方法虽然简单,但为了“近似”好,往往需要规模很大的表格。如果是多输入,考虑各种输入组合(查表),也难于编写规则。

第三种方法是模糊逻辑。如图 5 所示,函数近似不是用点,而是圆圈(区域),圆圈可以重叠。这样,给定 X 下,输出 Y 取决于与 X 有关的若干个圆圈,按其隶属程度求得最后的值。这种“内含插值”的概念可以大大简化复杂的数学关系的描述。

那么模糊逻辑是如何用来进行控制的呢?让我们来看一个蒸汽涡轮机的例子。涡轮机的汽阀动作取决于两个控制变量:温度和压力。首先每个控制变量要分解成一些控制区(集合),输出变量(动作)也要定义一些模糊区(集合)。如图 6 所示,温度的模糊集分为 Cold(冷),Cool(凉),Tepid(不冷不热),Warm(暖),Hot(热);压力分为 Weak(弱),Low(低),OK(压力适中),High(高),Strong(强);汽阀动作为 NL(负大),NM(负中),NS(负小),ZR(零),PS(正小),PM(正中),PL(正大)。然后构造一个概念上的控制模型,即根据控制变量的每种组合,编写描述控制动作的规则。例如如下一些规则:

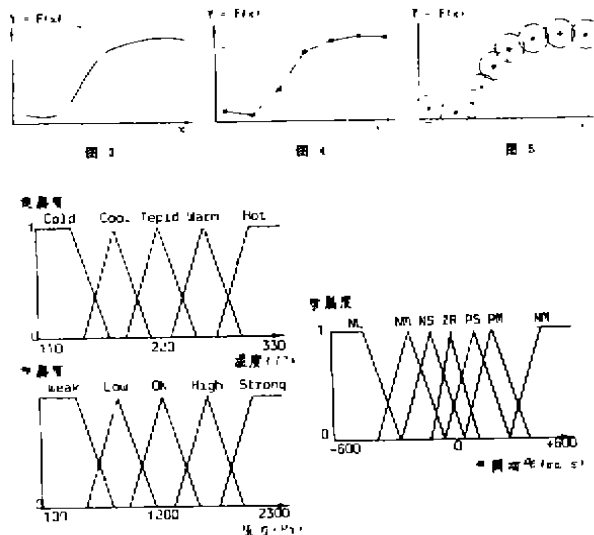


图 6

1. If(温度是 Cool)And(压力是 Weak)Then(汽阀动作作为 PL)
2. If(温度是 Cool)And(压力是 Low)Then(汽阀动作作为 PM)
3. If(温度是 Cool)And(压力是 OK)Then(汽阀动作作为 ZR)
4. If(温度是 Cool)And(压力是 High)Then(汽阀动作作为 NM)

现在剩下的问题是如何从输入模糊集和规则得到输出模糊集,再转换成清晰的输出去控制汽阀。注意,模糊逻辑控制实际上是一个并行处理(推理)机,所有规则中只要其条件项有一定“程度”的真值,就会被同时激励,并对输出模糊集有所贡献。

例如,给定时间 t_0 , 涡轮机温度为 $T(t_0)$, 压力为 $P(t_0)$, $T(t_0)$ 落入模糊区 Cool, $P(t_0)$ 对应 low 和 OK 两个区。这一组合引起规则 2 和 3 被激励,然后用一定的合成方法形成单一的系统输出。譬如:

- 对于用 And 连接的每个前提表达式,取最小的真值作为规则前提的真值。
- 用这最小前提真值截取输出模糊集。
- 然后将每条规则所截取的输出模糊集进行 OR 操作,即取最大值。
- 最后将合成的模糊区域按一定的方法,例如求面积重心,把模糊量转换成清晰量作为控制动作输出。

这时,涡轮机经过调整,新的温度和压力重新取样,并重复以上过程。图 7 表示模糊控制的这种推理过程。

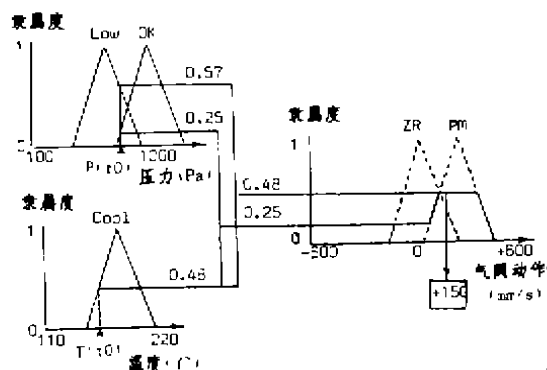


图 7

4 模糊系统模型和 FLC 设计方法

模糊逻辑控制简单、易实现,成本低。但并非对任何控制问题都是最好的方法。因

此,首先要弄清楚什么问题适合于利用模糊逻辑。一般说,模糊逻辑适合于表示具有连续物理现象的过程,其过程涉及的现象不易离散化,而过程本身又难于构造数学模型或者计算太复杂,计算不能足够快以满足实时工作的要求。此外,由于一条模糊规则往往可以代替许多普通的规则,因此允许设计更紧凑和便宜的结构。它还适合于具有高噪音水平环境下工作或者允许采用廉价的传感器和低精度的微处理器等。最后,也应具有这样的专家或熟练操作工,他们能说明变量的模糊集和控制规则。

必须指出,利用模糊逻辑并非简单地用模糊模型去代替传统的模型,而是从“嵌入”这一意义上利用“模糊性”这一概念的。就像利用复数来研究实数问题,先将实数问题转换到复数平面来处理,得到更一般的解后再还原到原来的问题。对于模糊逻辑控制,首先将非统计的不确定性的实际问题“模糊化”,在一个放大的问题上进行某种分析,然后将分析结果“反模糊化”,而返回到原有的问题。

这样,我们就可以构造一个典型的模糊逻辑控制系统模型(图 8)。与传统的模型比较,系统中增加了“模糊化”(Fuzzification)和“反模糊化”(Defuzzification)两个模块,而数学模型代之以知识库,主要包括模糊集(隶属函数)和模糊规则。

模糊系统与传统系统不同,因此需要有一套好的设计方法。一般来说,设计一个模糊系统会遵循同样的设计过程(图 9)。

这里所设计的模糊系统很可能是整个大系统中的一个环节。因此首先进行原理性设计,从整个大系统中找出适合于构成模糊系统的环节。然后,对这个模糊系统的设计一般是一个从建模到模拟的循环迭代过程,其中主要有以下四个设计步骤。

(1) 定义模型的功能和操作特性

主要是建立系统结构和定义操作特性。采用系统工程师和知识工程师常用的分析技术,弄清楚系统中的输入和输出信息(数据)以及数据转换,从而准确

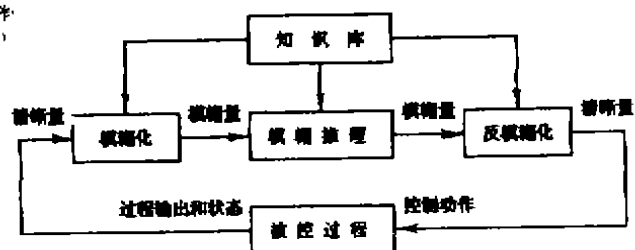


图 8

确定整个系统中的模糊(子)系统的位置。

(2)定义控制层面

对模糊模型中每个控制变量和结果变量进行模糊区划分,给每个区一个唯一的名字(标号)。然后从语义上对每个标号定义相应的模糊集(隶属函数)。根据经验,一般一个变量的标号数取奇数,例如从3到9或更多。邻近标号应相互重叠,这反映平滑和稳定控制的基本要求。隶属函数的密度,在系统最优控制点处应高一些,随着离最优距离加大,密度也随之降低。隶属函数的形状取决于变量的性质和具体实现,常用的形状有三角形,梯形和钟形(正态分布曲线)。

(3)定义控制层面行为

主要是编写联系输入/输出变量的控制规则。采用 IF(输入模糊命题) THEN(输出模糊命题)形式的规则。命题形式一般为“X is not A”或者“X is A”,其中X是变量名,A是标号名。IF部分可由若干命题通过“AND”连接组成。模糊规则数取决于输入变量数和标号数,例如双输入变量,每个变量7个标号,则最多可能有49条规则。必须指出,由于规则是陈述性的而不是过程性的,因此原则上规则的执行次序无关紧要。一组规则在存储器中形成一个相联存储器,规则的执行具有数据驱动、并行处理的特点。

(4)定义问题解的反模糊化方法

为了最终输出控制动作,模糊推理结果的模糊量必须转换为清晰量。最常用的两种方法是求重心法和最大法。前者对所有有激励输出的规则进行合成作为结果,适合于平滑控制,这是过程控制常用的方法;后者取激励强度最大的规则作为结果,常用于最坏情况分析或风险分析那样的决策控制。

一旦模糊模型构造完成,就进入模拟或样机试验阶段,比较模拟或试验结果与设计的要求,可能对上述设计进行修正。先进的模糊系统设计过程一般可利用模糊系统开发工具在计算机上进行。

5 模糊技术展望

模糊理论源于美国,但长期以来受学派之争的束缚,实际应用进展缓慢。到八十年代后期,在日本以家用电器广泛使用模糊控制作为突破口,使模糊逻辑的实际应用获得迅速发展。九十年代初,美国已醒悟到“美国人的理论却让日本人赚钱”的教训,工业界也已行动起来,美国 IEEE 分别自 92 年和 93 年开始,专门针对“模糊系统”主题,定期举行国际会议和出版学术期刊。中国从事模糊数学的研究比较早,并处于国际前列,但由于众所周知的原因,应用仍有一定差距。模糊技术有许多诱人的优越性,应用前景看好,但毕竟还是新兴技术,尚不成熟,有许多问题需要我们去研究和解决。

(1)系统化的设计方法

前面讲的模糊系统模型和设计方法主要是原理性的,很大程度上需要凭经验或者采用“试探法”反复迭代逐步求精。因此设计的正确性很难保证或者设计效率不高,特别是对于大型复杂系统的设计。因此需要研究系统的或形式化的方法。传统的控制基于数学模型,这样关键在于构造数学模型,有了模型就可确定相应的系统化的设计方法。然而模糊系统本质上说不是基于数学模型,而是基于专家知识或操作经验。因此主要应从知识工程的角度去研究。当然对于控制对象是物理系统(如过程控制)的情况下,从被控系统传感器得到的输入/输出数据是一个很好的设计依据。一种很有效的方法是利用人工神经网络自学习的功能,自动生成变量模糊集(隶属函数)和模糊控制规则。这是值得重视的一个方向。

此外,系统化的设计方法也必然导致设

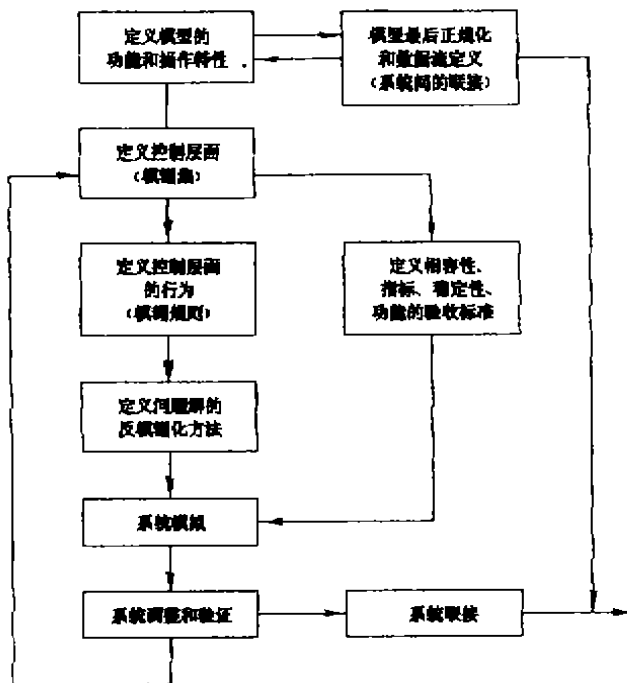


图 9

计自动化,也就是计算机辅助设计。需要研制各种开发模糊逻辑控制系统用的 CAD 或 CASE 工具,它们应包括支持硬件实现和软件实现的开发工具。

(2)自适应模糊系统

一个物理系统运行时,工作环境、条件、原材料、燃料等会变化,系统自身的零部件会老化,还有,模糊控制系统最新设计往往不可能十分完善。为了达到或保持最优控制,一般需要采用自适应控制技术。这要求系统能够学习和解释环境变化(自学习或自训练),以及修改和扩充系统的控制功能(自调整或自组织)。自适应模糊系统的一般结构如图 10 所示。

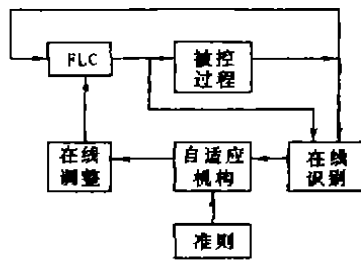


图 10

自适应机构在线连续监视被控过程的运行情况,按照一定准则(性能标准)向模糊逻辑控制器 FLC 反馈信号,进行调整。这种自适应方法类似于神经网络的学习功能,可以在有监督或无监督的条件下进行学习。然而对于模糊系统,通过内部组织结构和先验知识库,更有可能实现无监督的学习,使系统保持平衡和稳定。FLC 具体可调整的对象是模糊集定义,控制规则和反模糊化方法。值得指出,对于自适应系统来讲,目前信息科学中的三种新技术:模糊逻辑、神经网络和遗传算法正在开始逐渐融合。而自适应模糊系统看来最适合于作为这三种技术集成的基础。

(3)模糊模型和人工智能

模糊逻辑或模糊模型自 1965 年提出到今天实际应用上的较大成功会经过一段延迟。这是任何新技术都会经历的类似的演变过程。图 11 表示模糊逻辑的演变过程。图中

纵坐标是人们(用户)的期望,横坐标是时间。一项新技术刚刚出现,人们往往比较乐观和热情,很快会形成期望高峰。接着由于技术尚不成熟,过度的期望反而使信心下降,很快又跌落到失望的低谷。以后,有人根据这种新思想找到真正能为用户带来利益的好的应用,这时出现转机,期望重新开始回升,并向现实的期望逼近。对于模糊逻辑讲,这个转机就是八十年代末和九十年代初。

当前模糊逻辑的应用主要在控制、模式识别和决策支持等方面。由于模糊逻辑适合于描述与人类思维活动有关的系统,可以预期将在人工智能领域获得很好的应用。

参考文献

[1] L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis Complex Systems and Decision Processes", IEEE Trans. on Syst. Man Cybern., Vol. 3, No. 1, 1973, pp28-44
 [2] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller—Part I, Part II", IEEE Trans. on Syst. Man Cybern., Vol. 20, No. 2, 1990, pp404-435
 [3] E. Cox, "Fuzzy Fundamental", IEEE Spectrum, Oct. 1992, pp58-61
 [4] E. Cox, "Adaptive Fuzzy Systems", IEEE Spectrum, Feb. 1993, pp27-31
 [5] J. Bezdek, "Fuzzy Models—What Are They, and Why?", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 1, No. 1, 1993, pp1-6

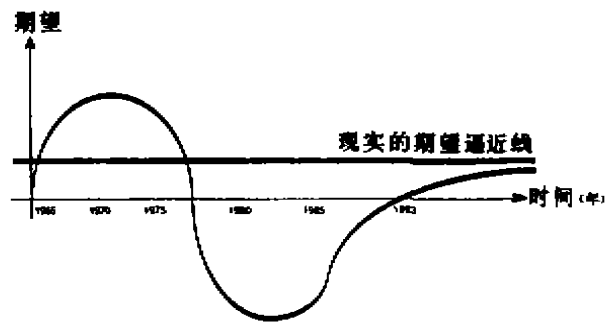


图 11