

**FUZZY
FUZZY
FUZZY
FUZZY**

模糊控制原理与应用

单 冬 编著

**CONTROL
CONTROL
CONTROL**

中 国 铁 道 出 版 社

CONTROL

模糊控制原理与应用

单 冬 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 9 5 年 · 北 京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书较系统地阐述了模糊控制的理论,并较详细地介绍了模糊概念、模糊集合、模糊推理、模糊控制器的结构、设计及应用实例。全书共分7章。其内容包括:模糊数学的基本概念;模糊集合及其运算;模糊数与扩张原理;模糊关系与模糊逻辑;模糊控制及其应用实例;模糊控制器的硬件实现。

本书不要求读者有较深的数学理论知识,尽量使用通俗易懂的语言和简洁的数学表达式,有些难懂的概念尽量借助人们日常生活中所熟悉的事例进行讲解。

本书可作为高等学校自动化专业、计算机专业的教学参考书,也可供科研、生产部门的工程技术人员使用。

模糊控制原理与应用

单 冬 编著

*

中国铁道出版社出版发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 郭 宇 封面设计 翟 达

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本:787×1092毫米 1/32 印张:5.75 字数:127千

1995年2月 第1版 第1次印刷

印数:1—2000册

ISBN7-113-01893-9/TP·197 定价:7.10元

前 言

“模糊”概念是 1965 年由美国的自动控制专家 Zadeh 提出来的。他提出用模糊集描述与人的主观认识有关的一些概念。随之,在模糊集的基础上仿照传统数学的方法引伸定义了模糊集的运算、模糊关系、模糊逻辑……等一系列数学概念,形成了一个庞大的数学分支——模糊数学。

模糊数学提出来的最初阶段,曾有人提出疑问,“难道传统数学就无能为力了吗?”,“‘模糊’真的那么有效吗?”。1974 年,英国工程师 Mamdani 首次把模糊数学应用于锅炉和蒸汽机的控制,获得了圆满的成功,Mamdani 成了应用模糊控制的前驱。进入 80 年代以来,世界各国涌现了越来越多的模糊控制的成功应用范例。模糊控制成为模糊数学在工程应用中最先获得成功的领域,所占比重也最大,为模糊数学在实践应用中的有效性提供了有力的佐证。这一切明确地回答了最初的疑问,使持有这种疑问的人逐渐改变了自己的观点。

模糊数学是一种模拟人的思维的数学,与传统数学有着本质的区别,因而它的有些概念不易为人理解。模糊控制系统也可以认为是控制领域中的专家系统,与经典的 PID 控制、现代控制理论也有着本质的不同,它的一些手法也不易为熟悉经典方法的工程技术人员所接受。虽然他们可能知道“模糊数学”、“模糊控制”这一名词,甚至也可能了解模糊控制的有效性和成功范例,但是由于对“崭新的数学”的天然畏惧,使他们不敢或不愿涉足这一领域。实际上,因为模糊数学是一种反映

人脑思维的数学,所以它的一些观点本质上更直接,更具体,更易于理解,并不神秘,不抽象。又由于它是一种“崭新的数学”,所以学习它的基础知识不需要传统数学很高深的知识。作者认为,掌握模糊控制的工具要比掌握现代控制理论、最优控制理论容易得多。但是现在出版的图书大多以模糊数学为主线,概要地介绍模糊数学的若干应用分支,其中模糊控制的内容不仅少而且不连贯,缺少一本全面论述模糊控制理论与应用的图书,鉴于此,作者编写了本书。

本书力图以模糊控制为全书的主线,重点阐述模糊数学引入控制领域的思想方法和基本手段,对模糊数学只讲述与模糊控制有关的内容,有些属于模糊数学基础知识的内容也放在模糊控制的有关章节中叙述。全书尽量避免繁琐的数学推导,尽量使用通俗易懂的语言和简洁的数学表达式,有些难懂的概念还借助日常生活中所熟悉的事例进行讲解。本书第六章还全面详细介绍了一个模糊控制在铁路列车自动驾驶中的应用实例。相信读者在读完本书之后能对模糊数学基础知识、模糊控制概貌和基本手法有一个清楚的了解,并有能力将其付诸实用。

由于本人水平所限,书中难免有不妥之处,恳请广大读者赐教。

作 者

1994年6月

目 录

第一章 引论	1
第一节 模糊数学的概念	1
第二节 模糊控制的沿革	7
第三节 模糊控制的感性认识	9
第四节 Mamdani 和 Ostergaard 的实例	12
第二章 模糊集	19
第一节 模糊概念的量化	20
第二节 普通集合的定义与运算性质	22
第三节 模糊集合及其运算	27
第三章 模糊数与扩张原理	37
第一节 α 截集与分解定理	37
第二节 模糊数与扩张原理	41
第三节 模糊数的运算	46
第四章 模糊关系与模糊逻辑	54
第一节 模糊关系	54
第二节 模糊关系的合成	58
第三节 普通逻辑简述	64
第四节 模糊逻辑	69
第五节 模糊推理	74
第五章 模糊控制	81
第一节 模糊控制器的结构和运算	81
第二节 模糊控制器的设计	95

第三节	模糊自适应控制.....	117
第四节	预测式模糊控制.....	125
第五节	模糊控制的特征.....	128
第六章	模糊控制的应用实例.....	132
第一节	净水场的自动控制.....	132
第二节	高炉控制.....	140
第三节	地铁列车的自动驾驶.....	146
第七章	模糊控制器的硬件实现.....	162
第一节	数字式模糊 VLSI-1	163
第二节	数字式模糊 VLSI-2	168
	参考文献.....	176

第一章 引 论

1965年,美国加利福尼亚大学的自动控制专家 Zadeh 教授在他的著名论文“Fuzzy Set”中首次提出了模糊(fuzzy)的概念。长期以来,人们已经习惯于用模糊的方法来思考和推理,并逐步发展成为一个以模糊集合、模糊逻辑、模糊测度为核心的崭新的数学分支——模糊数学。二十几年来,模糊数学已经引起了数学界和工程技术界的极大关心和兴趣,并在工业控制、专家系统、模糊计算机、模式识别等工程领域得到了广泛的应用。

第一节 模糊数学的概念

如果说概率论的出现是数学思想方法从必然走向或然的一次重大转折,那么模糊数学的出现则是数学思想方法的又一次重大转折,它把数学从明晰领域扩大到模糊领域。

在近代科学发展的最初阶段,人们习惯使用的方法是否定一切不确定因素和暧昧的因素。特别是传统数学,它的特点之一就是具有高度的严密性和逻辑性。可以说,传统数学就是扬弃了偶然性和模糊性才得以产生发展的。传统数学追求对一切事物都加以精确的描述、明白无误的判断,否则便被认为不科学。用传统数学解决实际问题必须依赖于对问题精确的描述,这大大限制了数学的应用。但是,客观事物的偶然性和模糊性并不因其一度被排除于数学之外而不存在,数

学对客观自然事物的扬弃越大,理论与实际的偏差也越大。自然科学中许许多多传统数学难以处理的问题,使传统数学越来越暴露出其不完备性。

随着科学技术的发展,人们逐渐认识了偶然性和随机性的存在。17世纪,一门崭新的数学分支——概率论出现了,它对传统数学的思想方法产生了极大的冲击。在概率论诞生的初期,仍然有人不承认或然性的存在。古典力学就认为,岩石从山崖上滚落的过程并不是不可测的,只不过计算过于复杂罢了。但是量子力学的出现证明了物质粒子自身运动的不确定性,从而说明了概率论所处理的或然性并不是为计算方便而采取的一种权宜之计,而是客观世界中物质运动的一种本质的属性。

然而,概率论只揭示、描述了自然世界中客观的不确定性或或然性,并不能处理存在于人的主观世界中的概念的模糊性和暧昧性。现在有些国家的天气预报中使用“明天10mm以上的降水概率为80%”这样的语句。但人们似乎更习惯于“明天下大雨”、“明天阴天”这样一些更接近人类思维的预报方式。“大雨”、“阴天”的概念是人类思维所特有的,并不是像气象学定义大雨为24h内的雨量在10.0~24.9mm之间那样简单地用一个数值量限就可以规定的,也不是概率论所能解决的。类似地,还有“长寿”、“老年”、“附近”、“高压”、“低温”等等许多概念。这些概念反映了人的认识的主观性,具有含义上的不明确性或模糊性,因此称这类概念为模糊概念。

计算机及其应用的发展是模糊数学产生的催化剂,计算机科学是模糊数学诞生的摇篮。当今信息时代对计算机科学发展的重大期待之一,就是计算机能模拟人的思维,以应付处理复杂多变的环境。人的思维是在感知的基础上通过逻辑思

维和形象思维进行的，而人通过感知得到的主观概念以及形象思维本质上具有模糊性和不明确性。基于传统数学的计算机具有惊人的数值运算和逻辑推理的能力，但却难以表达处理模糊概念和进行形象思维。如何找到表达人的主观概念并处理它们之间关系的数学方法，使计算机能方便地处理它们，是计算机“智能”发展的关键。模糊数学就是在这种背景之下产生和发展的，它成为联系人和机器之间的重要媒介。

人的概念、认识是客观世界的反映。人的概念、认识的模糊性也来源于客观存在。国内曾做过一个模糊统计的实验，通过对大学里几百名学生分成三组的问卷调查，得出了“青年人”这一概念的轮廓，大致在十几到三十几岁之间。这三组学生的调查结果相当雷同，反映出了当代大学生对现代中国的历史条件下“青年人”所易联想的年龄特征。这一实验表明，通过对人脑中概念的主观统计可以得到类似概率论里频率稳定性的那种规律，从而证明模糊性的客观存在和对模糊性定量分析的可能性。这个例子也说明，人对客观事物认识的模糊性及其度量决定于他们所处的时代和自然环境。可以断定，同样对“青年人”这一概念，古代人、现代人；热带人、寒带人；年轻人、老年人的认识因他们所处的自然地理环境和历史条件不同而不会完全一样。

语言是概念、认识的重要表现形式，人类对事物的描述、人类的思维过程也是借助语言进行的。思维的序列同时又是语言的序列，可以说没有语言就没有思维。概念、认识与思维的模糊性必然反映到语言及词汇中。

我们通常说自然语言是多义的、暧昧的。例如“年轻”、“老”、“高”、“热”、“温”等等。此处排中律是不成立的。也就是说，在“年轻”与“不年轻”之间，还存在一些年龄不属于这两个

概念,这是模糊概念与传统数学中一些思想方法本质的差别。再如由形容词与名词搭配而成的词,例如“高楼”、“高烧”、“老年人”等。甚至有些不含形容词的普通名词也具有这种属性。字典中对“凳子”的解释是“没有靠背的、供人坐的家具”。但是儿童有时也把凳子当桌子用。我们有时候也会对一些家具不能分辨其究竟是什么。凳子的释义中出现了“靠背”、“坐”、“家具”等几个词,如果这几个词再逐一考虑下去,恐怕所有的词都会具有这种模糊性。

语言的这种模糊性是语言作为人类认识、思维与交流的工具所导致的一个必然结果或本质的属性。大千世界是无限丰富多彩的,而人类用于描述这无限丰富的大千世界所使用的语言和词汇却是有限的、相对贫乏的,因此每一个独立的词汇的含义必定有一定的广度。世界又是一个连续的整体,世界万物之间没有明确的界限,这就使得描述世界万物的词汇含义之间必定有一定的交叉、不可能截然分开。语言又是思维与交流的工具,思维与交流要求人们在有限的时间里处理大量的信息,这要求人们不能花过多的时间精确地区分每一个单词含义的精确范围,而只能让它们有一定的模糊性。

在强调语言模糊性的同时,不能忘记这种模糊性是单词自身仍具有一定的确定含义为前提的。也就是说,单词虽然是模糊的,但它仍然应当有一个使用该单词的人所公认的一个大概的中心值。正如对“青年人”的认识一样,只有十几到三十几岁的人才有可能被认为是年轻人。如果语言不具有这种人人公认的含义,就不可能使用它作为人类之间交流的工具。从集合论的观点来看,人的模糊概念实际上是一个内含明确外延含糊的集合。上海辞书出版社1978年版《辞海》理科分册中“阴”的词条解释如下:生活上以天空云层密布,阳光罕见或天

色阴暗者为“阴”。即使不查《辞海》，老少妇孺也都知道“阴”是怎样一回事，可见其概念的内含是极为明确的。继续录《辞海》中“阴”的解释如下：我国气象部门规定，凡中、低云的云量占天空面积 $8/10$ 及以上者，称为“阴”。乍一看，这样一来似乎“阴”的概念的外延也被规定了。但仔细想一下，云量 79% 与 81% 有什么本质的差别呢。显然，这种人为规定仅仅是气象学的方便，并未因此而改变了人对“阴”的认识。

模糊数学就是处理这种内含明确外延模糊的集合的数学工具。Zadeh 提出用隶属函数的方法描述这种集合，并称之为模糊集。图 1—1(a) 是表述“青年人”这一模糊概念(模糊集)的隶属函数曲线，图 1—1(b) 则是“年龄在 20~30 岁之间的人”这一集合(普通集合)的隶属函数曲线。可见，模糊集合在 20 岁和 30 岁左右具有圆滑的隶属函数曲线，表现对“年轻人”这一概念的圆滑过渡。

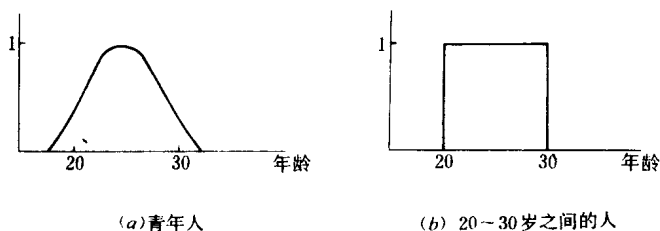


图 1—1 表述“青年人”这一模糊概念的隶属函数曲线

模糊数学在理论研究方面已经达到了相当的广度和深度，应用研究也渗透到科学技术的各个领域。模糊数学的飞速发展有其历史必然性，原因可以归结为模糊数学创始人 Zadeh 提出的“互克性原理”。Zadeh 指出：当系统的复杂性日益增长时，我们对系统特性作出精密而有意义的描述的能力

将相应降低,直至达到这样一个界限,即精密性和有意义(或适当性)变成两个几乎相互排斥的特性。传统方法追求对系统精确的数值分析和描述,力图用统一的数学表达式,特别是微分方程式配合大量的参数对系统结构及特性进行描述,并通过解方程求解系统。这种方法在军事科学、空间飞行等方面获得了相当的成功,并将继续发展。然而,随着系统规模和复杂性的日益加大,特别是包括人作为某一环节的人-机系统以及完全由人组成的社会系统、经济系统,传统方法就明显暴露出其有效性的不足。如果硬要用某一数学模型对复杂系统进行描述并求解,则由于计算量的限制,势必对系统做出大量的假设,或者进行简化,而这些假设和简化往往不现实、不合理,从而使数学模型脱离现实,精确度大大下降而无法使用。这就是说,事物的复杂性与描述上的精确性是不相容的。复杂性与精确性之间有着尖锐的矛盾,系统越复杂,就越难以用传统数学对它们加以精确的描述和有效的处理;事物的复杂性越高,传统数学描述和处理它的能力就越低。

尽管如此,工业生产中一些大延迟、非线性或一些难于获得满意模型的系统,通过人工操作仍然可以获得满意的运转效果。虽然未能找到对这些系统精确的数学描述,但作为操作者的人,由于在长期的操作实践中获得了对系统的认识,在头脑中形成了他自己对该系统的认识模型,并积累了操作经验。这种模型和经验反映人的认识和思维,并对应于相应的语言描述。模糊数学的出现,使得用数学方法概括这种对系统的语言描述成为可能。多年来,用模糊数学方法处理复杂系统的大量成功实例引起了工程技术人员越来越大的关心和兴趣,他们的努力使模糊数学在模糊控制、模糊逻辑、模糊模型、模糊信息处理、模糊决策、模糊算法、模糊模式识别等许多工业、社

会系统应用领域得到广泛的应用,使模糊数学从数学的殿堂走向广阔的应用天地。

第二节 模糊控制的沿革

模糊数学在众多的领域得到了广泛的应用,其中在控制领域(即模糊控制)的成功应用最为引人注目。产业系统的任何一点技术进步都有可能取得巨大的经济效益,从而引起人们的关注和首肯,使该项技术得以推广。模糊控制作为模糊数学在产业界实际应用所获得的巨大成功,已经引起了数学界及工程技术人员的广泛重视和极大的兴趣。模糊控制作为一种看得见、摸得着的具体实例促使更多的人乐于尝试使用模糊的方法解决那些用传统方法难以解决的难题,也改变了理论界一些人对模糊自身及其应用的有效性的怀疑。模糊控制已成为模糊数学应用中最先获得成功、应用实例最多的领域。今天,精明的日本电器商人甚至认为在商品标签上标注上“装有模糊控制逻辑”字样不失为推销高档电器的一个诀窍。

模糊控制的方法迅速地得到推广应用与模糊理论最初产生于工程界不无关系。模糊数学的创始人 Zadeh 本人便是一名自动控制理论的专家。Zadeh 提出的一些模糊理论的思想与工程控制领域的一些思想方法一拍即合。工业控制领域应用的广阔天地也给模糊理论在控制中的应用提供了大量的机会,才使模糊控制发展到今天如火如荼的程度。

但是,模糊数学并不是在 1965 年 Zadeh 教授刚一提出模糊集合论的思想时就立即应用于控制系统的。众所周知,解析数学与控制工程有着密切的联系,但却很少有人说集合论对产品开发有什么直接的作用,Zadeh 也没有立即想到把模糊

理论应用于控制领域。把模糊数学的思想首先应用于自动控制领域的尝试是1974年英国的工程师 Mamdani 进行的。在这之前 Mamdani 一直在进行自适应控制和自学习控制的研究,并为许多难题无法用传统方法顺利解决而苦恼。促使 Mamdani 将模糊数学的思想用于控制的是 Zadeh 1973 年发表的一篇《关于用自然语言进行系统分析》的论文。在这篇论文中, Zadeh 提出了一个用自然语言描述系统的方法,同时详细论述了模糊算法。这篇论文论述得非常详细、通俗易懂,给 Mamdani 很大启发。按照 Zadeh 的思路, Mamdani 把模糊数学的思想应用于一台蒸汽机的运转控制过程。他的实验不仅仅限于计算机模拟,而是在实验室中专门制作了一台小型模型蒸汽机,属于实证性的实验。Mamdani 实验的成功开创了模糊控制的先例,促使模糊控制的研究蓬勃展开。继 Mamdani 之后,英国的 King 将模糊控制应用于反应炉的自动控温系统,美国的 Pappis 研究了用模糊控制指挥十字路口交通运输的系统。

模糊控制的应用真正达到实用化程度的,公认的产品是丹麦工科大学 Ostergaard 开发的石灰窑自动控制系统,他采用的模糊控制方法今天已成为一种典型的方法。Ostergaard 研究的成功标志着模糊控制从1980年开始从实验阶段步入了实用的阶段。石灰窑的模糊控制系统自身后来又又被欧洲、美国的一些同类系统所引用,均取得了良好的控制效果。此外,俄罗斯、日本、英国、加拿大、美国、西德等国也在开展诸如工业过程控制、机器人、航天等领域的模糊控制实用研究。然而,模糊控制应用成功最多的国家是日本,1989年日本出版的一本名为《应用模糊系统入门》一书中就详细记述了高炉控制、冷延控制、汽车速度控制、水泵管理、列车自动运行等好几个应用实例。模糊控制理论及应用研究的论文在日本一年一度召

开的国际模糊系统学会日本支部年会上所占的比重也越来越大。日本目前处于模糊控制应用的领先地位。

我国模糊数学的研究起步很早,在理论研究方面已跨入了世界先进行列。在模糊控制方面除了大量的理论分析研究之外,也进行过一些应用性的探讨。例如,模糊控制在开关式液压位置伺服系统中的应用、气象预报模糊控制模型、预测矿坑涌水量的模糊控制法、酚醛树脂聚合反应过程的模糊控制、编组站车辆溜放速度控制算法等。虽然这些研究多数还限于建模和仿真阶段,但随着我国计算机技术的普及和提高,模糊控制必将得到进一步的发展。

第三节 模糊控制的感性认识

模糊控制与经典控制理论有本质的不同,经典控制立足于对被控对象精确的数学描述,而模糊控制的核心在于只用已知的对系统的粗略的知识描述系统,并在此基础上引入模糊控制算法。这种方法有三个特点:一是不用数学方程,而用语言为代表的模糊变量描述系统;一是用条件命题语句记述模糊变量间的关系;一是用模糊推理方法实现系统的运算。下面两个例子也许有助于对模糊控制系统及其必要性的感性了解。

第一个例子是把汽车倒退开进车库,停在另外两辆汽车中间的汽车入库问题。这个问题如果用传统的微分方程的方法来解决,则应当这样考虑:设车的位置为 ω ,车的方向为 θ ,则车的状态为向量 $x = (\omega, \theta)$,操作量为 $u = (u_1, u_2)$, u_1 为前轮的角度、 u_2 为车速。 u_1, u_2 均有一定的大小限制。车的运动方程为:

$$\dot{x}=f(x,u)$$

两辆车之间应该留出容下一辆车的空间。最终可能的全部停车状态构成一个集合 Γ 。设车的初始状态为 x^0 ，则汽车入库的问题可归结为求出使 x 从 x^0 移动至 Γ 中某一点的操作量 u 。限制条件是 x 和两辆车之间的几何位置关系。但很遗憾，解这个方程几乎不可能，方程的参数无法确定，车轮有游隙、轮胎、路面状态将引起摩擦系数的改变……。但是在汽车驾驶学校，即使不用微分方程，教员也能通过简单的口头传授将把汽车开入车库的技能教会学员。例如，他可以说：“先把方向盘向左打，前进、停车，然后再调整方向盘、后退，如不成功就再来一次”。这句话本质上就是一个模糊控制算法。无论什么人，无论什么车都可以依照这句话的指示操作，直至把车开进车库。这就是说，模糊控制具有很强的鲁棒性，人们不需要精确地解微分方程，就可以完成一系列复杂有效的操作。

再以两辆汽车前后追踪高速行驶为例，当前后两辆车相距过近时，后面的一辆车就应当减速以免发生碰撞。如果用模糊控制规则和模糊推理来表述这一过程，当如下式所示：

规则：如果两车相距过近就减速

状况：两车现相距 20m

操作：刹车、大幅度减速

上式相当类似于形式逻辑的三段论式推理，“规则”相当于大前提，“状况”相当于小前提，“操作”即是推理结果。从这里看，模糊推理可以看成是形式逻辑中推理的扩充，这种推理方式是模糊控制的典型方式，在控制系统中，推理规则又称做控制规则。实际上，在一个控制系统中，控制规则可以有多个，模糊推理算法不是这些规则的顺次执行，而是同时依据每一条规则进行推理，把每条规则各自的推理结果最终加以综合，