



模糊控制技术 及应用实例

陈永义 编著

北京师范大学出版社

模糊控制技术的应用实例

陈永义 编著

北京师范大学出版社

(京)新登字160号

责任编辑: 刘 平

封面设计: 刘学开

责任印制: 刘 平

模糊控制技术的应用实例

陈永义

北京师范大学出版社出版发行

全国新华书店经销

北京怀柔县渤海印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 9.875 字数: 200千

1993年5月第1版

1993年5月第1次印刷

印数: 1—5000

ISBN7-303-03165-0/O·175 定价: 5.90元

序

在过去的几年里，模糊控制已经作为一项新的工程技术在日本、德国、美国等国得到广泛的应用。“Fuzzy产品”已经涌入人们的日常生活。我国在模糊集理论的研究上享有很高的国际地位，应用的面也相当广泛。只是在从科技向产品转化这个关键环节上，由于环境和条件的限制，我们的步伐却总是显得缓慢，在这场国际争夺战中面临着落后的危险。针对这种情况，本书作者从两方面作了很好的努力，一是通俗直观地向广大实际工作者介绍了模糊控制的思想、原理和实现方法，一是从众多的应用实例中挑选出二十多个有代表性的项目分门别类地加以介绍。相信本书对模糊技术在我国推广应用及其商品化将会起到良好的推动作用，无论对模糊集理论与应用工作者还是对产品开发人员都是有益的。

汪培庄

一九九二年十二月三十日

前 言

编写此书的想法始于1991年10月日本NEC公司在北京举行的一次单片机应用研讨会。在这次会上我以模糊控制技术的原理及应用为题作了发言，引起与会者的很大兴趣，很多实业界的同志甚至动议成立“模糊技术在家用电器产品中应用促进会”，几位朋友当场建议我编写一本较为详细、系统介绍模糊控制技术及应用实例的书。几个月后，我应邀到西南交通大学以“模糊控制和模糊产品”为题讲学，徐扬教授敦促我把所讲内容整理成册，以满足听课者的要求。这使我下了最后决心。

十多年来，我一直从事模糊集理论与应用方法的研究，特别着力于它的应用方面。我国学者对于“Fuzzy”的研究具有较高的国际地位，但理论研究重于应用开发，特别是在向产品转化的关键环节上显得薄弱。面对近年来掀起的“国际模糊技术热”，心里总有一种紧迫感与使命感。编写本书的目的就是想在理论与产品开发之间修筑桥梁，促进模糊技术在我国推广应用，加速我国模糊产品的研制开发。

本书分上、下两篇。上篇力求根据作者的研究成果和体会，通俗简练地介绍模糊控制的原理、特点和实现方法。在不影响实质内容的前提下，尽量简化了符号，避免了数学推

导和证明。下篇分三章介绍了在家用电器产品、工业过程控制等方面的应用实例二十三个。这些实例是从大量的国内外文献中筛选编译而成的，其中 §5.1、§5.2、§5.5、§5.6、§7.4和附录4为邵焕平编写，§6.1、§6.2、§6.4、§7.2为涂承宇编写，§6.8、§7.3为涂承芳编写，§6.7为黄崇福编写，陈永义对初稿作了统一加工和修改。林楠誊清了全部书稿并绘制了书中的图表。

感谢我的导师汪培庄教授，是他早在十二年前就指导我开始涉足模糊控制。向书中引用的国内外文献的作者们表示谢意，没有他们这些出色的工作，就不会有此书。

陈永义

1992年12月18日于北京

重要勘误

本书第二页第四行中的涂承芳应为涂承媛，特此更正。

目 录

上篇 模糊控制技术简介

第一章 绪论	(2)
§1.1 传统控制方法面临挑战	(2)
§1.2 模糊性——人类认识之谜	(3)
§1.3 模糊控制的历史发展	(5)
§1.4 日本的模糊技术热	(7)
§1.5 我国的模糊技术研究	(8)
第二章 模糊控制的预备知识	(10)
§2.1 集合与关系	(11)
§2.2 模糊集合	(15)
§2.3 模糊数	(19)
§2.4 模糊关系与模糊变换	(21)
§2.5 模糊逻辑与模糊推理	(26)
第三章 模糊控制的基本原理	(33)
§3.1 模糊控制器的基本结构	(33)
§3.2 模糊控制器的算法模型	(40)
§3.3 模糊控制器的简化算法	(40)
§3.4 模糊控制的硬件分析	(45)

§3.5 模糊软件的开发	(54)
第四章 模糊控制的进一步探讨	(56)
§4.1 基本模糊控制模型的扩充	(56)
§4.2 局部线性化模糊控制方法	(63)
§4.3 模糊控制器的特性分析	(69)
1.模糊控制器的 λ -可响应问题	(69)
2.模糊控制规则的交互影响	(70)
3.模糊控制规则的相容性	(74)
4.模糊控制器的动态特性	(81)
§4.4 控制规则的获取	(84)
§4.5 系统辨识	(88)

下篇 模糊控制技术应用实例

第五章 电器产品模糊控制实例	(98)
§5.1 采用模糊推理的全自动洗衣机	(99)
§5.2 采用模糊控制技术的电冰箱	(105)
§5.3 采用模糊控制的空调机	(113)
§5.4 采用模糊控制光圈的摄录一体机	(113)
§5.5 模糊控制自动电烤箱	(120)
§5.6 复印机电子照相过程的模糊控制	(124)
§5.7 应用模糊技术的其它电器产品简介	(131)
1.采用模糊控制的电饭锅	(132)
2.采用模糊控制的吸尘器	(133)
3.模糊控制冷热水混合阀的淋浴器	(134)
第六章 工业过程模糊控制实例	(137)
§6.1 粉末冶金中的模糊控制	(138)

§6.2	冷轧机的模糊控制	(147)
§6.3	水泥回转窑的模糊控制	(155)
§6.4	高炉的模糊控制	(166)
§6.5	聚合反应罐的模糊控制	(174)
§6.6	净化水场的模糊控制	(177)
§6.7	特殊钢燃油退火炉模糊控制	(180)
§6.8	雨水泵站的模糊控制	(191)
§6.9	塑料薄膜生产的模糊控制	(200)
第七章	模糊技术在其它方面的应用	(205)
§7.1	交通路口红绿灯的模糊控制	(206)
§7.2	汽车速度的模糊控制	(216)
§7.3	地铁自动运行的模糊控制	(226)
§7.4	模糊技术在语音识别上的应用	(234)
§7.5	倒立摆模糊控制实验	(239)
参考文献		(244)
附录1:	分析模糊控制器的新途径	(254)
附录2:	扩张原理	(276)
附录3:	真值限定的近似推理方法	(279)
附录4:	日本模糊技术产品简介(1986.10— 1990.10)	(281)

上篇 模糊控制技术简介

本篇是为不熟悉模糊控制原理的读者所写，共分四章。第一章是对模糊控制原理、历史发展和现状的最粗略的描述，目的是唤起读者对模糊技术及应用开发的重视。第二章介绍了了解模糊控制必须的预备知识，避免了数学推导和证明，力求直观现象、深入浅出。第三章介绍了模糊控制的基本原理，详细介绍了模糊控制器的基本结构、算法模型、简化算法及硬件实现等。第四章是有关模糊控制的进一步探讨，包括基本模糊控制模型的扩展（有些扩展模型在下篇的实例中已经应用）、模糊控制器的特性分析和设计一个实际模糊控制器需要的一些技巧。本篇的所有内容都紧扣应用开发，希望能够易于为应用工作者所掌握。

第一章 绪 论

§ 1.1 传统控制方法面临挑战

自动控制技术通常是指利用一些控制装置代替人类自动驾驭机器、设备或过程，如数控车床、无人驾驶飞机和自动化生产线等。经典控制理论和现代控制理论在这些方面取得了巨大的成功。然而还有很多机器、设备和过程的控制至今仍然必须由人来手工实现。有些人们看似十分简单的控制问题，应用传统的控制理论和方法却意外地难于解决。这类例子随处可见。

大家知道，没有学过任何控制理论的小孩，可以不费力气地在一个手指上控制一根竖直的木杆，使它在重力的作用下仍能动态地保持竖立不倒。可是对于自动控制专家来说，这是一个复杂的“倒摆”控制问题。即使是考虑只有一个自由度（只能沿一条直线的方向左右偏斜）的简化情况，建立控制它的数学模型也很困难。这要导致二阶非线性微分方程组。这种微分方程组至今还没有求解的方法，只能当偏角很小时近似线性化才能求数值解。

熟练的汽车司机通过简单的操作（如换档、刹车、旋转方向盘等）可以轻松自如地驾车穿梭闹市，把车驶达任何目的地。设想如果让电子计算机代替司机驾车，则要预先写好详尽的控制程序，规定好换档、刹车的确切时刻，建立方向

盘旋转角度和时间的函数关系，以及各种意外情况的处置办法等等。且不说这种控制的程序及硬件配置如何庞大，即使实现了这种自动控制，汽车行驶得也必然是跌跌撞撞、令人心悬，与熟练司机驾驶的安全平稳无法相比。

无需举出更多的例子就可以看出：经典控制论和现代控制论在很多实际问题的控制上，正面临着人的直觉控制和智能控制的严重挑战。特别是在大滞后、非线性或难于建立数学模型的系统控制上。实现通常的自动控制，首先要有控制的数学模型。可是玩弄倒摆的儿童和驾车的司机并没有意识到什么数学模型和程序，他们是凭学习所得的规则、经验来实现令人满意（未必最优）的控制的。能否构造出一种理论和方法，通过电子计算机实现这类风格迥异的控制？

美国控制论专家L.A.查德（Zadeh）教授于1965年提出的模糊集（Fuzzy sets）理论和随后兴起的模糊控制（Fuzzy control）方法，为实现这类智能控制奠定了基础。近年来电子技术和电子计算机技术（特别是单片机技术）的发展，使模糊控制已成为九十年代的热点技术之一而为人瞩目。

§ 1.2 模糊性——人类认识之谜

模糊控制的基础是模糊集合论。提起集合，大家都很熟悉，可能会说“一堆苹果”、“一群学生”等都是集合。然而数学家却不同意这种看法。集合在数学上有其严格的定义，在论域 U （讨论问题的范围）上给定一个集合 A ，就是对论域作了一个硬划分，使论域上的任一元素，或者属于集

合 A ，或者不属于集合 A ，二者必居其一，且只居其一。数学家宣称：不满足上述要求的，就不是集合。以实数论域上的数集为例，“100以内的正整数”构成一个集合，但“接近25的数”、“不太大的数”就都不是集合。

经典集合对论域作的是硬划分，集合具有明确的边界。很早以前人们就觉得这种集合概念太严格。古希腊有个关于“一堆种子”的诡辩：“一粒种子不能称其为一堆，二粒、三粒…也如此。但从另一方面来看，每个人都会同意一亿粒种子是一堆。那么，是一堆和不是一堆的恰当分界在哪里？我们能说325647粒不是一堆，而325648粒是一堆吗？”从这个诡辩可以看出：通常人们承认“一堆种子”是集合，但它却不符合经典集合的定义，因为它没有明确的划分边界。可以说这是对没有明确边界集合的早期肯定，也是对集合的数学定义的早期诘难。

人们说科学家的用词不亚于诗人。查德教授经过深思熟虑之后，终于在1965年把这种不为数学界承认的没有明确边界的集合起名为Fuzzy集，译成中文为“模糊集”。在中文里“模糊”是一个不太令人喜欢的字眼，似乎带有贬义。因此当初（当然不是在1965年而是在1976年后）一些学者对Fuzzy的中文翻译大伤脑筋。“之晰”、“不分明”、“勿晰”、“弗晰”等译名均曾出现于国内的早期文献，甚至有人建议把它译成一个词组“赋晰”，以示不是搞什么模糊的东西。当然，词义的褒贬性可以发生变化，“傻瓜”本是一个贬义词，但当它与某种献身精神联系起来时就含有一种褒义。当“傻瓜照相机”等大受使用者欢迎时，“傻瓜”简直就成了褒义词。

现实生活中大量存在着模糊性，模糊集原来是人们司空见惯、见而不怪的东西。高个子、健康人、阴雨天、强地震、高材生等等都是带有模糊性的概念。人们发现，在自然语言理解、语音识别、图像识别等方面，计算机之所以远不如人脑，就是因为人类已习惯于在带有模糊性的环境中生活，善于处理模糊信息，在基于二值逻辑的电子计算机却不善于此。因此，正视现实中的模糊性，深入研究处理模糊信息的方法，是提高电子计算机的活性、增加机器的智能的根本途径之一。

§ 1.3 模糊控制的历史发展

1965年，美国加利福尼亚大学的L.A.查德教授发表了题为“模糊集”（Fuzzy Sets）^{〔11〕}和“模糊集与系统”（Fuzzy Sets and Systems）^{〔12〕}两篇开创性的论文，奠定了模糊集理论和应用研究的基础。一些学者很快就把模糊集的思想引入系统控制，提出了模糊控制的概念，对模糊控制器展开了理论研究、实验室仿真及工业项目的实际应用。1973年查德教授给出用模糊语言进行系统描述的方法，1974年英国的E.H.马达尼（Mamdani）首次应用这种方法实现了蒸汽发动机的模糊控制实验^{〔13〕}，取得了满意的效果。此后，在英国、荷兰、丹麦、日本等国开始对不同的复杂控制过程进行模糊控制的实验，其中包括炼钢炉、锅炉、水泥窑、蒸汽机、汽轮发电机、热交换器以及十字路口的交通管理（红绿灯控制）等。七十年代的工作主要是进行计算机仿真分析与理论研究，把模糊控制器的性能与经典控制方

法相比较，多数是在较大型计算机上（如PDP-11等）用高级语言（如BASIC, FORTRAN等）实现的。

进入八十年代，模糊控制开始由实验室转入工业实践，同时开始了模糊控制器硬件的研究。1980年，丹麦的斯密斯公司推出水泥窑模糊控制系统^[14]，这是世界上第一套工业实用的模糊控制系统。1983年，日本的第一套工业实用系统秋田市净化水场模糊控制药剂投放量装置投入运行。实践证明，模糊控制与通常的自动控制技术相比，具有以下几方面的特点：

1. 模糊控制可以模拟人的直觉或经验规则进行自动控制，而不需建立通常意义下的数学模型。

2. 对于一些复杂的系统（如长时滞、非线性、多因子交互影响和时变系统等），很难或根本无法建立系统控制的数学模型，但应用模糊控制技术可以很好的实现对系统的闭环自动控制。

3. 模糊控制器具有较好的鲁棒性，对参数变化的适应性强、有较强的抗干扰能力。

上述特点使模糊控制的工业应用受到实业界的重视，新的实用的工业系统不断被开发出来。与此同时，模糊控制的硬件研制也在加紧进行。

1984年国际模糊系统学会（IFSA）正式成立。1987年第二届IFSA国际会议在日本东京召开。在这次会上展出了十余件模糊控制的软硬件实物，特别是日本熊本大学山川烈（T. Yamakawa）教授研制的高速模糊控制器（奥姆隆公司制作）在会上引起强烈反响。从这一年开始，在日本和其它发达国家兴起一股模糊技术热，一大批应用模糊控制技术的

产品陆续投入市场，取得可观的经济效益。直到九十年代初这股热潮有增无减。

§ 1.4 日本的模糊技术热

六十年代诞生于美国的模糊集理论，在时隔二十年后，漂洋过海与日本的高新技术相结合，已经实实在在地转化为强大的生产力。对于这种奇怪的现象，模糊理论的创始人查德似乎早有预见。他在1984年和1987年两次应邀来华参加学术会议时都谈到，模糊理论更具有东方逻辑的特点，更容易为东方人接受。事实上，由于模糊技术的成功应用，在日本“模糊”一词已成为“非常自动化”和“智能控制”的代名词。模糊控制使自动化迈上了一个新台阶，是高一级别的自动化。据日本的新闻媒介统计，“模糊”一词是1990年日本国民“挂在嘴边”的四个词之一。仅1989、1990两年在日本就召开了有关模糊技术及应用的会议三十余个，申报了有关模糊技术的专利两千余项。截止1991年七月，已有七十六个大公司对于模糊技术的开发进行投资，除成立了各地、各级研究会、实验室外，日本的通产省和科学技术厅等于1989年联合成立了“国际模糊工程研究所”（简称为 LIFE），集资进行模糊技术开发，并开展国际学术交流与合作。

在高度工业化的日本，模糊控制的思想被心领神会、灵活运用。特别是采用了模糊技术的一代新家用电器产品的上市和为消费者接受，使模糊技术的工业应用取得了辉煌的成功。这些家用电器产品包括：采用模糊控制的全自动洗衣机、电冰箱、空调器、电烤箱、电饭锅、摄录一体机、电风

扇、吸尘器、自动电话、复印机、衣类干燥机、自动热水器、电子炉灶等等。以洗衣机为例，采用了模糊控制的洗衣机才真正是名符其实的全自动。衣服放入以后，一个按钮按下，洗衣妇就可脱身而去。洗衣机可以自动对衣服的材质（软或硬）、污染程度（脏或不脏）、污染性质（油或泥）进行模糊识别，然后根据固化在单片机内的洗衣规则（多重模糊条件语句，形如“若衣服质地很硬，且很脏，且为油污，则应设定某种漂洗时间和漂洗速度，投放某种洗涤剂”等）进行模糊推理，选取合理的洗涤方式，完成洗涤、甩干等全过程。这种洗衣机很适合快节奏生活的日本国情，因此很受欢迎。由于电子技术的发展，特别是单片机成本的下降，从经济上看生产这种新型的洗衣机只需增加很少的成本，但却可获得较高附加值的利润。对于其它模糊电器产品也与此相似。有关技术的细节将在本书的第二部分介绍。

在日本，模糊产品已经带来了巨额利润。据IEEE 1992年7月的资料介绍，单是销售模糊控制芯片一项，日本在1991年就获利1.5亿美元，预计1992年可达3.5亿美元。为了表彰查德教授创立模糊集理论的功绩，日本授予他十五万美元的本田奖。

§ 1.5 我国的模糊技术研究

由于历史的原因，模糊集理论直到七十年代后期才传到我国。我国学者起步虽晚，但急起直追，很多高等学校和研究机关都投入力量研究。1981年我国创办了世界上第二本这方面的专门学报，1982年成立了全国模糊数学与模糊系统学