

专著 出版资助项目
ZIZHU XIANGMU

ZHUANZHU

模糊蕴涵算子及其模糊系统的响应性能

尤飞 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

陕西省教育厅专项科研项目(05JK323)基金
陕西榆林学院学术著作出版基金资助出版

模糊蕴涵算子 及其模糊系统的响应性能

尤 飞 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书共分6章,着重讨论了以下内容:从讨论32个模糊蕴涵算子是否满足16条性质的情况出发,考虑了模糊蕴涵算子与几个蕴涵之间的联系;通过求一些模糊蕴涵算子的伴随对、圈乘算子、力迫蕴涵算子、对偶算子和合成算子等,构造出353个模糊蕴涵算子,全书共给出412个模糊蕴涵算子;引入规则并算子和规则交算子等概念;考虑了由模糊蕴涵算子构造的具有泛逼近性的模糊控制系统的充要条件;依模糊控制器的插值机理对模糊控制器进行了分类;引入选择机制的概念,从理论上给出100多个具有泛逼近性的(自适应)模糊控制器,这些模糊控制器可以用于实际的模糊控制系统之中;最后,提出了一些新的研究课题。

本书可作为高等学校数学专业、计算机专业和自动化控制专业的高年级学生和研究生的教材,也可作为从事模糊控制专业教学、科研的教师和工程设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模糊蕴涵算子及其模糊系统的响应性能/尤飞著. —西安:西北工业大学出版社,2007.5

ISBN 978-7-5612-2211-9

I. 模… II. 尤… III. ①模糊数学②控制论 IV. O159 O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 056901 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电话:(029) 88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:陕西丰源印务有限责任公司

开本:850 mm×1 168 mm 1/32

印张:5.125

字数:121千字

版次:2007年5月第1版 2007年5月第1次印刷

定价:10.00元

前 言

众所周知,模糊控制适用于具有模糊环境且难于建模的控制系统,而模糊控制器的设计则依赖于基于领域专家知识的模糊推理规则库。可以说,自动控制的全部理论是建立在被控对象的数学(通常指微分方程)模型上,然而,在模糊控制系统中,常常无法得到被控对象的数学模型。正是由于对大量不确定性系统的思考,Zadeh 提出模糊集的概念,利用模糊集形成模糊推理,从而近似表达一个系统,这种基于模糊推理形成的系统通常称为模糊系统,而模糊系统常常被充当为一个控制器。

在模糊控制中,专家的知识是由若干条“if ...then”语句来描述的,在每条“if ...then”规则中的前提和结论均是模糊的概念,可以用模糊集来描述。每条规则形成的模糊关系是由某个模糊蕴涵算子来确定的;这些规则的合成方法至少有取“ $\vee$ ”和“ $\wedge$ ”两种情形;而模糊控制器对数据进行处理是基于模糊集合的方法,因此,对于输入数据(常常是确定量)要进行模糊化处理,目前,普遍采用的模糊化方法是“单点”模糊化;对于给定的输入,通过模糊推理(通常采用 CRI 模糊推理方法)得到的是一个模糊集合,但在实际的模糊控制中,必须要有一个确切量作为对实际控制对象的操作量,这就需要做清晰化处理,而清晰化方法又有很多种。

参考文献[44]揭示了模糊系统的概率论意义,指出重心法清晰化方法是合理的且在平均平方意义下是最优的方法,同时还指出,由 Zadeh 提出的构造模糊系统的 CRI 模糊推理方法是合理的且是有效的。这样,考虑由模糊蕴涵算子,且采用“单点”模糊化方法、CRI 模糊推理方法和重心法清晰化方法构造的模糊控制器的

响应能力就显得既自然又很有必要。

作者在北京师范大学攻读博士学位期间,在李洪兴教授的指导下开始参与模糊数学与人工智能方面的研究工作,该项目采用模糊控制的方法于 2002 年成功地实现了世界上首例四级倒立摆的控制。在此基础上,将模糊逻辑和模糊推理取得的一些成果与模糊控制理论很好地结合起来,更深入地研究了构成模糊控制系统的模糊蕴涵算子。本书主要讨论了模糊蕴涵算子的构造和采用模糊蕴涵算子构造的模糊控制系统的响应性能两方面的内容。

从整体上看,本书可以分为两部分内容:一部分是通过多种方法构造出 412 个模糊蕴涵算子;另一部分分析了分别由这 412 个模糊蕴涵算子构造的模糊控制器的响应能力。特别需要关注那些响应函数是(自适应)分段插值函数的模糊控制器,它们均是泛逼近器,可以供模糊控制器的设计者在实际的模糊控制系统中选用。

本书共分 6 章,较详细地讨论了模糊蕴涵算子的构造,由模糊蕴涵算子构造的模糊控制器具有泛逼近性的充要条件以及模糊控制系统的响应性能分析。主要的结果概括如下三点。

(1) 在第 3 章中主要讨论了模糊蕴涵算子的构造。引入了规则并算子和规则交算子的概念;选择了 32 个模糊蕴涵算子验证了它们满足 16 条常见性质的情况,并通过求一些模糊蕴涵算子的伴随对、圈乘算子、力迫蕴涵算子、不可分辨蕴涵算子、传播算子、对偶算子和合成算子等,构造出 353 个模糊蕴涵算子,连同从文献中搜集的 59 个模糊蕴涵算子,本书共给出了 412 个模糊蕴涵算子。此外,还给出了两种构造模糊蕴涵算子的方法,纠正了一些文献中认为伴随对是三角模这一错误说法。

(2) 在第 4 章中考虑了由模糊蕴涵算子构造的模糊控制器具有泛逼近性的充要条件。首先,讨论了模糊控制器的插值机理,把模糊控制器分成 4 类,其中,有一类模糊控制器是不定型的,又将其分为不定型 I 的和不定型 II 的,对于这类模糊控制器还须作进

一步的研究;其次,引入记号 $FC(fuzz, \theta, CR, FR, defuzz)$, 用来记由模糊蕴涵算子构造的模糊控制器;再次,给出了模糊控制器具有泛逼近性的两个充分条件和两个必要条件。

(3)第5章分析了模糊控制系统的响应性能。引入选择机制等概念,证明了具有选择机制的模糊控制器具有自适应性;给出127个具有泛逼近性的模糊控制器,其中有17个模糊控制器是自适应模糊控制器,在等效的意义下,它们可以分为44种且均是泛逼近器,可以供设计者在设计模糊控制系统时选用。

模糊系统的设计方法有好多种,有许多理论还很不完善,因此书中并未一一列出。本书主要侧重于研究由模糊蕴涵算子构造的模糊系统,对模糊逻辑或模糊蕴涵算子研究有兴趣的读者可以只阅读第1~4章;对模糊系统的设计算法有兴趣的读者可以只阅读第5~6章,作者更希望本书能对这一学科有兴趣的读者有益。

由于模糊系统理论涉及的知识面极为宽广,而作者的知识有限,因此错误和不足之处仍难避免。在此,作者恳切期望得到各方面专家和读者的批评指正。作者的电子邮箱地址是 youfei@ylc.net.cn。

作者在编写本书的过程中,得到了北京师范大学数学科学学院李洪兴教授的鼓励和支持,得到了陕西省教育厅科学研究计划项目、榆林学院高学历人才科研启动项目和榆林学院学术著作出版基金资助,也得到了西北工业大学出版社的帮助。借本书出版之际,作者向他们表示真诚的感谢。

作 者

2006年4月于榆林

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 模糊控制的发展与现状	1
1.2 问题的提出和章节安排	6
第 2 章 模糊蕴涵算子与模糊控制系统的联系	9
2.1 模糊控制器的组成部件	9
2.2 由模糊蕴涵算子构造的模糊控制系统	12
第 3 章 模糊蕴涵算子的性质及其构造	14
3.1 引言	14
3.2 模糊蕴涵算子及其常见性质	15
3.3 模糊蕴涵算子与几个重要的蕴涵的联系	17
3.4 模糊蕴涵算子的构造	20
3.5 小结	42
第 4 章 具有泛逼近性的模糊控制器的充要条件	45
4.1 引言	45
4.2 模糊控制器的插值机理与分类	46
4.3 具有泛逼近性的模糊控制器的充要条件	51
4.4 小结	56

第 5 章 模糊控制器的响应能力分析	58
5.1 引言	58
5.2 具有泛逼近性的(自适应)模糊控制器	59
5.3 不具有泛逼近性的模糊控制器	72
5.4 小结	101
第 6 章 结论与展望	103
6.1 结论	103
6.2 展望	107
附录 412 个模糊蕴涵算子	111
参考文献	144

第1章 绪论

本章概括地介绍模糊控制的诞生、特点以及模糊控制在理论和应用两方面的发展与现状;最后,叙述本书所考虑的问题的背景以及章节安排.

1.1 模糊控制的发展与现状

1.1.1 模糊控制的诞生

这里举一个水箱中的水温控制过程的例子^[79].不妨设检测仪表显示的水温是 80°C ,那么操作员就会将 80°C 这个精确值转化为头脑中的概念量,比方说“温度偏高”,他就会与头脑中已有的控制经验相匹配,得到“温度偏高应该加入较多冷水”的推断,进而将“加入较多冷水”这个模糊概念给出定量解释,然后按此定量值来控制执行装置,从而完成整个控制过程的一个循环.在这个例子中,“偏高”、“较多”等都是些模糊的概念,而利用这些概念,操作员却能实现稳定的控制.这里,操作员并不是按照某种控制算法进行精确的计算,而是采用了一种模糊的控制方法,其中包含了操作员的控制经验和知识.但是,若采用经典控制论(频域方法)或现代控制论(时域方法)来设计这个控制系统时,必须建立对水箱中的水温控制过程的数学模型.这时对“偏高”、“较多”等一些模糊概念(或自然语言)的处理却遇到了困难.

为描述、研究和处理模糊性现象,1965年,美国的控制论专家Zadeh教授首先提出了表达事物模糊性的重要概念——隶属函

数^[51],从而突破了 Cantor 经典集合论的局限性. 隶属函数的提出奠定了模糊理论的数学基础. 自模糊数学问世以来,其发展并非一帆风顺,它首先受到经典数学家的强烈抵制,他们对模糊数学嗤之以鼻. 1974 年, Zadeh 利用模糊蕴涵算子将各条推理规则结合起来,提出了著名的 CRI (Compositional Rule of Inference) 模糊推理方法^[53]. 1974 年,英国的 Mamdani 首次采用 CRI 模糊推理方法成功地实现了世界上第一个对蒸汽机的模糊控制,说明模糊理论已经成功地应用于控制中,这标志着模糊控制的诞生.

1.1.2 模糊控制的特点

在实际工程中,传统的控制理论提出了许多对策. 其中比较典型的对策有鲁棒控制、自适应控制、高增益反馈控制等. 但是,这些控制方式的共同特点是必须建立被控对象的数学模型,而对于许多复杂的不明确的或者具有模糊问题的系统却难以建立控制要求的数学模型;另外,有些自动控制系统由于模型本身不够准确,其控制效果还不如手工操作好. 模糊控制可以解决一些用传统方法难以奏效的控制问题. 与传统的控制技术相比较,模糊控制具有以下特点:

(1) 无须被控对象的精确数学模型. 一般只需直接用控制经验或操作数据对被控过程参数现状及其趋势观察判断的定性感觉来构成控制算法. 模糊控制器的基本出发点是将现场操作人员或者专家的经验知识及操作数据加以总结归纳,形成一定的规则参与控制过程. 比如,电液伺服系统,用经典控制论就难以建立精确的数学模型,更宜采用模糊控制.

(2) 系统鲁棒性强,对过程参数的变化很不敏感. 尤其适于时变的非线性系统. 另外,对于滞后的系统,能对纯滞后给予补充.

(3) 模糊控制可以保证系统在小超调或无超调的前提下迅速达到稳定状态,充分显示了非线性控制的优点.

虽然模糊控制具有这些优良的“品质”,但由于受到计算机存储量的限制,只能取有限的控制等级;同时由于被控过程的非线性、高阶次时变性以及随机干扰等因素的影响,造成模糊控制规则或者粗糙或者不够完善,都会不同程度地影响控制效果。

1.1.3 基于应用的模糊控制理论研究

20 世纪 80 年代后期,日本将模糊技术用于家用电器的制造,市场上陆续推出了诸如模糊洗衣机、模糊电冰箱、模糊空调器、模糊电饭锅等家用电器。目前,将模糊集合理论成功应用于实现模糊控制比较典型的例子还有倒立摆的控制、热交换过程的控制、暖水工厂的控制、污水处理过程的控制、交通路口控制、水泥窑的控制、电梯控制以及电流和核反应堆的控制等。1985 年,AT & T 贝尔实验室的 Togai 和 Watanabe 设计了第一个模糊逻辑芯片,该模糊推理芯片可以并行地处理 16 条规则,在 16 MHz 时钟下的执行速度可达 250 kFLOPS(FLOPS 是每秒所执行的浮点运算次数,即 floating-point operations per second 的缩写)。现在,他们正在开发基于该芯片的模糊逻辑加速器(FLA);1989 年,美国北卡罗来纳微电子中心的 Watanabe 设计制造了世界上最快的模糊逻辑芯片,该芯片包含有 688 000 个晶体管,运行速度达到 580 kFLOPS。1987 年,日本熊本大学的 Yamaskawa 设计了国际上第一个模糊计算机的雏形,该机由一个模糊存储器、一个推理机、一个 MAX 块、一个清晰化块以及一个控制单元组成,它能以高达 10 MFLOPS 的速度处理模糊信息。1988 年,北京师范大学研制成功国际上第二台快速模糊控制器,与 Yamaskawa 设计的模糊控制器相比,体积仅是它的 1/10,而推理速度却提高了 50%。从 2001 年至今,李洪兴教授采用变论域自适应模糊控制的思想已经陆续成功地实现了一级、二级、三级、四级、平面二级、平面三级倒立摆的控制。更多的例子请参阅参考文献[11,35,47,60,80,98]。

模糊控制也并非是在任何系统均有效的,假如某系统可由一组线性微分方程很好地加以描述,那么也就没必要使用模糊控制了.此外,也有很多因素致使模糊控制器存在一些缺陷,主要有:①精度不够高;②自适应能力有限,这是因为它对某些参数变化不敏感,只具有鲁棒性;③很容易产生振荡现象;等等.针对这些问题,人们设计出各种各样高性能的模糊控制器,并且大多也获得了成功应用,概括起来有以下几种形式:①控制规则可调整的模糊控制器;②具有积分作用的模糊控制器;③参数自调整的模糊控制器;④复合型模糊控制器;⑤自学习模糊控制器;⑥基于神经网络的模糊控制器.其中,自学习模糊控制器最引人注目和最有生命力.

近年来模糊控制在理论上也有了较大的新发展,其主要的理论基础有:①基于变论域思想的自适应模糊控制;②基于模糊推理的模糊控制;③基于 T-S 模型的模糊控制;④基于模糊数的模糊自适应控制;等等.

为了完善模糊理论的理论体系,必须加强以基本概念为核心的模糊理论和模糊方法论的研究.但作为模糊控制理论基础的模糊推理的理论基础却很薄弱,比如,在考虑由模糊蕴涵算子构造的模糊控制系统时,设计者必须要考虑所采用的模糊推理算法,学者们就提出了不少的算法.如 Zadeh 提出的 CRI 算法、陕西师范大学的王国俊教授提出的全蕴涵三 I 算法^[86]、清华大学的宋士吉博士提出的反向三 I 算法^[74]和反向三 I 约束算法^[75].参考文献[44]在理论上探讨并用大量实例考察对比了 CRI 算法和全蕴涵三 I 算法构造模糊系统的算法,结果表明,对于同一种模糊蕴涵算子而言,从逻辑上看来很合理的全蕴涵三 I 算法在构造模糊系统时其效果反而不如使用 CRI 算法来得好.仅此一例已表明还有更多有意义的工作需要去做.这方面的成果还有李洪兴教授提出的变论域自适应模糊控制的思想、模糊控制系统的建模、模糊控制器与

PID 调节器的关系;王国俊教授提出的 R_0 -代数理论、广义重言式理论、积分语义学、支持度理论;应明生教授在近似推理;张文修教授在不确定性理论;向殿政男关于多值逻辑的理论以及水本雅晴关于模糊推理的工作等;也有不少学者,正在对模糊推理的多值理论、统一性理论、推理算法、多变量分析、模糊量化理论、区间值模糊推理、模糊方程、模糊系统评价方法,特别是模糊推理与神经网络等相结合的理论问题进行研究,详细内容可查阅书后的参考文献。

1.1.4 与交叉学科形成的研究分支

模糊控制理论或者说是模糊理论已经不单单是一个数学意义上的理论,它已经与其他的学科融合在一起,形成了许许多多的研究分支.这里提到的也仅仅是这些研究分支中的一小部分,目前,中国、日本、美国为代表的各国科技人员正在以下各个方面开展深入的研究^[103].

(1) 模糊计算机方面的研究.这方面的研究包括模糊计算机结构、模糊逻辑器件、模糊逻辑存储器、模糊编程语言以及模糊计算机操作系统软件等.

(2) 模糊控制器的构造.设计出可以在实际的模糊控制系统中使用的模糊控制器是一个重要的研究课题.本书针对这一课题做了一些工作.

(3) 机器智能化的研究.目的是实现对模糊信息的理解,对具有渐变特征模糊系统的控制以及对模式识别和决策智能化的研究.主要包括智能控制、传感器、信息意义理解、评价系统、具有柔性思维和动作性能的机器人、具有语言理解能力的智能通信、具有实时理解能力的图像识别等.

(4) 人一机工程的研究.目的是实现高速模糊检索并能对预测的输入条件作适当判断的专家系统,以及人与人之间的界面如

何能尽量接近人一机之间的界面,这方面主要包括模糊数据库、模糊专家系统、智能接口和对人的自然语言的研究。

(5) 人类系统和社会系统的研究. 目的在于利用模糊理论解决充满不确定性的人的复杂行为、心理分析、社会经济的变化趋势、各种社会现象的模型、预测以及决策支持等. 这方面内容包括危机的预测和完全评价、对有人为失误系统的评价方法、建立不良结构系统的模型、在系统故障检测与诊断中的应用、人的行为与心理分析等。

(6) 自然系统的研究. 目的在于利用模糊理论来解决复杂自然现象的模糊和解释,对自然环境大气圈、地球生物圈、水圈、地圈的研究。

此外,还有解析模糊控制理论、模糊语词计算、模糊神经网络控制、模糊专家系统控制、模糊鲁棒控制等。

总而言之,经典控制和模糊控制可以适用于不同的控制环境,都有各自的优点和缺点. 经典控制是建立在经典的 Cantor 集合理论上的,而模糊控制是建立在模糊集理论上的, Cantor 集是模糊集的特殊情形,自然建立在 Cantor 集合理论上的问题均可以用模糊集去描述,但是已不再是简单的推广. 经典控制已经有上千年的历史了,已经产生了许多许多的成果,而模糊控制也就 30 多年的历史,不难想象模糊控制无论是在理论上还是在应用上都会有较大幅度的发展,必将和许许多多的学科交叉发展,大大地推动科学技术前进的步伐。

1.2 问题的提出和章节安排

在实际的模糊控制系统中对实物进行控制的核心部件是模糊控制器. 通常设计者希望所设计的模糊控制器具有泛逼近性,即对任意给定的连续函数可以逼近到任意指定的精度. 这对于模糊控

制器的设计者来说,那是非常困难的.换句话说,如果没有理论的指导,设计者在设计模糊控制器时就带有很大的盲目性,致使他所设计的模糊控制器未必具有泛逼近性.

通常设计者在选用模糊蕴涵算子构造模糊控制系统时,还要考虑到:①模糊化方法;②若干条推理规则的合成方法;③模糊推理算法;④清晰化方法;等等.当然,设计者希望能有现成的方案可供选用,而不纠缠于大量的运算和推导.那我们就从理论上具体地寻找出一些设计方案来,以供设计者参考或直接选用.

参考文献[44]曾论证过,重心法清晰化方法沟通了模糊系统与概率论之间的联系,是合理的且在平均平方意义下是最优的方法;由 Zadeh 提出的构造模糊系统的 CRI 方法是合理的且是有效的.那我们就考虑由模糊蕴涵算子且采用 CRI 方法和重心法清晰化方法构造的模糊控制器的响应能力,而模糊控制器的响应能力是由其响应函数的拟合性质决定的.

不难理解,如果一个模糊控制器的响应函数是插值函数,那么该模糊控制器就具有泛逼近性,可以用于实际的模糊控制系统之中.于是,本书首先就从考虑如何构造出更多的模糊蕴涵算子入手,然后考虑由这些模糊蕴涵算子构造的模糊控制器的响应性能.特别是那些响应函数是插值函数的模糊控制器,可供模糊控制器的设计者选用.全书共分为6章,具体的内容安排如下.

第1章作为绪言,简单地介绍一下模糊控制的诞生、特点以及模糊控制在理论和应用两方面的发展与现状.

第2章简单地叙述一下模糊蕴涵算子与模糊控制系统之间的联系.

第3章考虑了模糊蕴涵算子的性质及其构造.从讨论32个模糊蕴涵算子是否满足16条性质的情况出发,考虑了模糊蕴涵算子与几个蕴涵之间的联系,并通过求一些模糊蕴涵算子的伴随对、圈乘算子、力迫蕴涵算子、对偶算子和合成算子等,构造出353个模

糊蕴涵算子,共给出 412 个模糊蕴涵算子.引入了规则并算子和规则交算子等概念.

第 4 章考虑了由模糊蕴涵算子构造出具有泛逼近性的模糊控制器的充分条件和必要条件.首先,讨论了模糊控制器的插值机理,并依此对模糊控制器进行了分类;其次,给出了模糊控制器具有泛逼近性的两个充分条件和两个必要条件.

第 5 章分析了由模糊蕴涵算子构造的模糊控制系统的响应性.引入选择机制的概念,从理论上给出 100 多个具有泛逼近性的模糊控制器,在等效的意义下,它们可以分为 44 种,可以用于实际的模糊控制系统之中.另外,出现了模糊控制器的响应性不确定的情况,这是一个新问题,需要对此做进一步的研究.

第 6 章对全书的一些主要结论做了一个总结.最后,提出了一些新的研究课题.

第2章 模糊蕴涵算子与模糊控制系统的联系

模糊控制系统是指那些与模糊概念和模糊逻辑有直接关系的系统,其核心部件是模糊控制器.不过,模糊控制系统与模糊控制器之间是有区别的.模糊控制系统有开环和闭环之分,而本书所指的模糊控制器是一类闭环模糊控制系统.模糊蕴涵算子可以用来构造模糊控制系统,所以,本章了解模糊控制系统的组成部件和模糊蕴涵算子与模糊控制系统之间的联系.

2.1 模糊控制器的组成部件

本书讨论的重点是希望找到由模糊蕴涵算子构造的且具有函数的泛逼近性的模糊控制器,因为具有函数的泛逼近性的模糊控制器可以用于实际的模糊控制系统之中,所以,本节介绍模糊控制器的一般结构.它主要由模糊规则库、模糊产生器、模糊消除器、模糊推理器4个部件组成,其基本框图见图2.1^[98],这里 $x \in X, y \in Y$,其中 X 和 Y 分别是输入论域和输出论域.

不失一般性,这里仅以单输入单输出(SISO)的系统为例加以介绍.

1. 模糊规则库

模糊控制的核心是控制规则,控制规则是基于领域专家的知识 and 经验总结出来的,它通常是由若干“if ... then”语句来描述的.在“if ... then”规则中的前提和结论均是模糊的概念,所以通常称为模糊规则库.