

自适应模糊系统与控制

——设计与稳定性分析

王定明 著

北京理工大学出版社

自适应模糊系统与控制

——设计与稳定性分析

王立新 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析 / 王立新
著. —北京:国防工业出版社, 1995. 9

ISBN 7-118-01417-6

I. 自… II. 王… III. ①自适应控制系统:模糊系统-系统设计②模糊系统:自适应控制系统-稳定性-分析 IV. TP
273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 01264 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 $\frac{3}{4}$ 219 千字

1995 年 10 月第 1 版 1995 年 10 月北京第 1 次印刷

印数:1-3000 册 定价:16.50 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允
曾 铎

秘 书 长 刘琯德

委 员 尤子平 朱森元 朵英贤
(按姓氏笔划为序) 刘 仁 何庆芝 何国伟
何新贵 宋家树 张汝果
范学虹 胡万忱 柯有安
侯 迁 侯正明 莫梧生
崔尔杰

中文版序

模糊系统理论是由我的导师 Zadeh 教授于 1965 年创立的。从理论的诞生至今,不同的学者对此理论有着完全不同的评价。举例来说,为现代控制理论做出本质性贡献的 Bellman(动态规划理论的创始人)和 Kalman(Kalman 滤波理论的创始人)对模糊理论的评价就完全不同。Bellman 认为这是个很好的理论并与 Zadeh 合作发表过模糊理论方面的论文。Kalman 认为模糊理论是与科学原则相违背的。在长期的争论中,虽然反对者一直占据上风,但世界各地的模糊理论工作者却在一直不断地发展着这一新兴的学科。

应用是推动学科进步的最有效的手段。80 年代后期以来,模糊理论在日本、中国及欧洲得到了广泛的应用。采用模糊控制器的各种产品(如照相机、摄像机、洗衣机等)出现在世界各地的市场上。这是一个转折点。作为对模糊理论的认同,世界最大的工程师协会 IEEE 从 1992 年起每年举办一届模糊系统年会,并于 1993 年起创办 IEEE 模糊系统会刊。

与其他比较成熟的学科相比(如现代控制理论),模糊系统理论还有一些重要的理论课题没有解决。其中两个重要的问题是如何获得模糊规则及如何保证模糊系统的稳定性。在这本研究专著中我主要对这两个问题进行了研究。本书提出了四种获取模糊规则的方法以及若干种确保稳定性的自适应模糊控制器。

本书的中文版能够出版首先要感谢本书的译者张映碧女士和校者敬忠良教授。他们利用业余时间为本书的译校作了大量的工作。另外还要特别感谢国防科技图书出版基金的资助和国防工业出版社诸位同仁的支持。

由于出版时间紧,我未能仔细阅读此中文版校样。如果读者想

认真地学习模糊控制,我建议阅读此书的英文原著(由 Prentice-Hall 于 1994 年出版)。

最后,希望本书能作为一个引子推动国内模糊控制理论与应用在一个高水平上发展。

王立新

香港科技大学

1994 年 5 月

英文版序

过去三年里,模糊逻辑在各种消费产品和工业系统中的应用迅速增长。这一点是有目共睹的。在这些应用中比较突出的例子包括电子稳定摄像机,自动聚焦照相机,洗衣机,空调,汽车自动换档装置,地下火车以及水泥烘干炉。

尽管模糊控制成效显著,但是对到底什么是模糊逻辑,应该怎样把它同其他的系统设计方法进行比较,它的作用和局限性何在等等这样一些问题仍然存在某些本质上的误解。引起这些误解的部分原因是模糊逻辑的意义具有双重性。从狭义上讲,模糊逻辑是近似推理逻辑,我们可以把它理解为多值逻辑的一般化或推广。但从更广泛和深入的意义讲,模糊逻辑与模糊集合论是同时并存的,即事物分类时从属于(某一类)到不属于(某一类)的过渡是渐变的而非突变的。从广义上讲——这种讲法在文献中正在逐步占据主导地位——模糊逻辑具有许多分支,从模糊计算和模糊自动机到模糊模式识别、模糊语言和模糊专家系统。事实上,对于任何范畴的变量 X ,只要用模糊集合的概念取代 X 中的(经典)集合概念,则任一类都可以被模糊化而称为模糊 X 。

我们必须认识到狭义的模糊逻辑对模糊控制并非十分有用。而模糊关系理论,尤其是模糊“如果—则”规则的计算方法或简称模糊规则算法(CFR)才真正对理解模糊控制有着本质性的贡献。一般来讲,一条模糊规则可表示为:如果 X 为 A ,则 Y 为 B ,其中当 X 和 Y 为变量时, A 和 B 是它们的语言取值,例如大和小。这些语言取值可以理解为各自域中模糊集合的标识。

从根本上讲,模糊规则算法是系统分析中处理非精确依赖关系的一种有效的方法。模糊规则算法无论在指导思想还是在

本质上都与控制理论和系统设计所用的传统方法迥然不同。模糊规则计算法的一个重要特征是它与人的直觉知识很接近,这一点在王博士的著作里得到了一再的强调。事实上,大多数人的经验是以模糊规则的形式储存在我们的记忆里的,而且在几乎所有的日常推理中,人们都有意识和无意识地在运用这样的规则。从这个意义上讲,人脑就正是模糊规则计算法的执行模型。

王博士的工作属于模糊规则计算法的前沿性研究,尤其是在系统辨识和自适应系统设计中的应用研究更是如此。模糊规则计算法的一个核心问题是如何从观测中归纳出模糊规则。早在1977年,普罗斯克(Procyk)和马但尼(Mamdani),以及在1985年和1988年高木(Takagi)、关野(Sugeno)和龚(Kong)等人就对这个问题的提出和解决作过一些开创性的贡献。王博士提出的方法在结构上与高木、关野和龚等人的方法有些相似,但与他们的不同之处在于王博士巧妙地利用了神经网络理论发展起来的技术,特别是反向传播算法。另外如科斯科(Kosko)、姜、李和林、高木以及其他学者的工作也对王博士的方法作过重要的贡献。

在王博士的工作中成功之处在于他完善透彻的分析以及成功地提出了一套一般性的方法,他的这套方法不仅适用于稳定的自适应模糊系统的概念形成以及设计,而且还适用于包括解系统的代数方程、模式识别和信号处理等其他问题。毫无疑问,随着时间的流逝和经验的积累,王博士所作的贡献将日趋重要。然而,我们也应该注意到:王博士的方法以及其他同仁的方法主要侧重于在多层反馈结构的范围内讨论如何从输入/输出数据中归纳出模糊规则。

王博士的口头和笔头的表达能力都非常清楚。本书作为一本研究专著无论对模糊规则计算法理论还是应用都有重要的贡献。凡是真正对系统设计和智能控制感兴趣的人都应人手一本。

Lotfi A. Zadeh(罗费·A. 扎德)

加州大学贝克莱分校

1993年4月

前 言

一种完善的工程方法应该能够有效地利用所有可能得到的信息。在许多实际问题中,某些重要信息是由专家提供的。通常,这些专家信息是用比较模糊的术语(如“小”、“大”、“不是非常大”等等)来表达的,因此这类信息是不太精确的。那么,为什么专家信息常常要用模糊语言来表达呢?原因主要有以下几点:表达起来比较方便,不需要十分精确的考证,以及交流起来通俗易懂等等。为了能够系统地利用这类专家信息,一系列所谓的智能方法(如智能控制、智能信息处理等等)便在工程学术界应运而生。然而,由于目前还没有一套一般性的设计方法和分析手段来保证基本的性能指标,因此大部分的智能方法都仍停留在解决某些具体问题的阶段上。通常,这类智能方法以某种特定的方式把专家系统同传统的工程系统结合起来,再通过大量的试验仿真来解决某些具体问题。显然,以这样的方式利用专家信息将会存在某些严重的局限性,因为这种方法效率较低,缺乏广义可行性,同时也没有提供性能保证。

由此可见,如何发展一套一般性的方法,它既能系统地利用专家信息,同时又能对所构造系统的性能进行理论分析(比如智能控制系统的稳定性分析)就成为一个非常重要的研究课题。然而,这并不是一件容易的事。除了专家信息外,另一类重要信息来源就是各种传感器采集的(或物理定律中获得的)数据信息。数据信息和专家语言信息有许多本质区别。例如,数据信息遵从物理定律和数学定理,而对语言信息来讲这样的定律或定理并不成立。换言之,支配语言信息的定律在本质上不同于支配数据信息的定律。两者分别处于两个不同的世界——物理世界和人文世界,但是随着人一机接口的不断增加,越来越多的工程系统逐渐成为两个世界的

混合物。要想对这一混合世界中的系统进行分析,我们必须找到一种统一的模式,它能同时表征两个世界中的关键因素。自适应模糊系统提供了这样一种统一模式。

自适应模糊系统是具有学习算法的模糊逻辑系统,而模糊逻辑系统是由一系列模糊“如果—则”规则组成的,学习算法则是依靠数据型输入—输出对来调整模糊逻辑系统的参数。从概念上讲,模糊逻辑系统是将语言信息和数据信息统一起来了。工作原理如下:由于模糊逻辑系统是用若干模糊“如果—则”规则构成的,因此,(采用模糊“如果—则”规则形式的)语言信息可以直接地在系统中得到利用;而(采用输入—输出数据对形式的)数据信息则通过调整模糊逻辑系统的参数,使输入—输出数据对最佳拟合。本书中,我们提出了多种不同类型的自适应模糊逻辑系统,同时也把这些系统用于解决各种工程技术问题。本书自始至终所强调的重点内容是:(1)如何用不同类型的自适应模糊逻辑系统来统一语言和数据两类信息;(2)举实例说明利用这些自适应模糊系统方法将使性能得到明显的改善。

这一部研究专著的大部分工作是我在南加州大学作博士生期间完成的。为此,我首先要感谢我的博士导师 Jerry M. Mendel 教授。在我的博士生学习期间,如果没有他长期以来的支持和鼓励,这本书将不会问世。归根到底,我要感谢 Mendel 教授给了我到美国学习的机会。

在此,我还要特别地感谢我现在的博士后导师 Lotfi A. Zadeh 教授,他给了我许多宝贵的支持和鼓励。本书的最后版本是我在加州大学贝克莱分校完成的。我十分感谢 Zadeh 教授在审阅本书手稿的过程中所提供的许多有益的意见和建议。

另外,Shankee Sastry 教授,Charles Desoer 教授,Pravin Varaiya 教授和王为真博士曾给本书提供了许多宝贵意见,我也借此机会向他们表示感谢。同时,我还要感谢贝克莱分校“模糊讨论小组”的几位同仁——Dr. Jyh — Shing R. Jang, Dr. Churen — Tsai Sun, Dr. Raymond L. Chen 和 Dr. Pratap Khedkar——我们曾在一起讨论过模

糊理论中的各种问题。在此我还要特别感谢“模糊讨论小组”的前会员 Dr. Chun — Chien Lee, 因为正是他的两篇出色的指导性论文^[Lee, 33, 34]把我引入了模糊领域。

作者对洛克威尔(Rockwell)国际科学中心的支持表示十分感谢。

最后,我要对我的妻子映碧表示深深的感谢。我的研究能进展顺利多少受益于她长期以来的支持和鼓励。为了支持我的工作,她作出了很大的牺牲。因此,我把这本书作为最好的礼物送给她,以示谢意。

王立新

加州大学贝克莱分校

1992 年 10 月

内 容 简 介

本书系统而全面地介绍了自适应模糊系统理论的最新成果,并着重解决了该系统理论中的两个难题:一是如何有效地确定模糊规则中的隶属函数,二是如何保证模糊控制系统的稳定性。对于第一个问题,本书提出了四种不同的方法,并且对它们的优缺点进行了比较。对于第二个问题,本书提出了一套新的监督控制理论。这套理论的优点是不用改变现有模糊控制器而同时又能保证整个系统的全局稳定性。

对于工程师们来说,本书给出了大量实例和仿真,并且详细地比较了自适应模糊系统方法与现有方法的各种优缺点。对于研究人员来说,本书提供了这个领域的最新成果以及有待于进一步解决的问题。

ISBN 7-118-01417-6/TP·199

定价:16.50元

目 录

第一章 绪言	1
1.1 将数据信息和语言信息统一于工程系统的一种 方法——自适应模糊系统法	1
1.2 模糊逻辑系统的分类	3
1.2.1 纯模糊逻辑系统	3
1.2.2 高木—关野模糊系统	4
1.2.3 具有模糊产生器和模糊消除器的模糊逻辑系统	6
1.3 本书概要	7

第一部分 自适应模糊系统的分析与设计

第二章 模糊逻辑系统的描述与分析	11
2.1 模糊集合与模糊逻辑的基本概念	11
2.1.1 模糊集合与集合运算符	11
2.1.2 扩张原理	13
2.1.3 模糊关系及其合成运算	14
2.1.4 语言变量与修饰词	14
2.1.5 广义取式推理(GMP)和广义拒式推理(GMT)	15
2.1.6 模糊蕴涵	17
2.2 模糊规则库	18
2.3 模糊推理机	21
2.3.1 模糊“如果—则”规则的表示	21
2.3.2 表达式的性质	23
2.3.3 模糊推理机的满射	26
2.4 模糊产生器	26

2.5	模糊消除器	26
2.6	几种常用的模糊逻辑系统	27
2.6.1	怎样合理选择模糊逻辑系统	27
2.6.2	几种常见模糊逻辑系统数学表达式的推导	29
2.7	充当万能逼近器的模糊逻辑系统	32
2.8	本章小结	33
第三章	模糊逻辑系统的反向传播学习算法	35
3.1	引言	35
3.2	模糊逻辑系统的反向传播学习算法	36
3.3	反向传播学习算法在非线形动态系统辨识中的 应用	38
3.3.1	问题的提出	38
3.3.2	模糊辨识器优于神经网络辨识器的两个本质性优点	38
3.3.3	模糊辨识器的设计	39
3.3.4	仿真	44
3.4	本章小结	55
第四章	模糊逻辑系统的正交最小二乘学习算法	57
4.1	引言	57
4.2	模糊逻辑系统与模糊基函数展开式	58
4.3	正交最小二乘学习算法	60
4.4	模糊基函数展开式在非线形球—棒系统控制中 的应用	63
4.5	模糊基函数展开式在麦克—格拉斯混沌时间 序列建模中的应用	70
4.6	本章小结	74
第五章	模糊逻辑系统的表格查寻学习算法	75
5.1	引言	75
5.2	从数据信息中产生模糊规则	75

5.3	表格查寻学习算法在后倒卡车控制中的应用	80
5.4	表格查寻学习算法在时间序列预测中的应用	92
5.5	本章小结	96
第六章	模糊逻辑系统的最近邻聚类学习算法	98
6.1	引言	98
6.2	最优模糊逻辑系统	99
6.3	自适应最优模糊逻辑系统	100
6.4	最近邻聚类学习算法在非线性动态系统自适应 控制中的应用	102
6.5	本章小结	107
第七章	自适应模糊系统与人工神经网络的比较	109
7.1	引言	109
7.2	多层感知器与自适应模糊系统的比较	110
7.3	径向基函数网络与自适应模糊系统的比较	113
7.4	概率广义回归网络与自适应模糊系统的比较	115
7.5	本章小结	117

第二部分 自适应模糊控制与滤波

第八章	非线性系统的间接型稳定自适应模糊控制	120
8.1	引言	120
8.1.1	采用模糊控制的原因	120
8.1.2	采用自适应模糊控制的原因	122
8.1.3	直接型和间接型自适应模糊控制	123
8.1.4	第一类和第二类自适应模糊控制	124
8.2	间接型自适应模糊控制器的一种新型李雅普洛夫 综合设计方法	125
8.2.1	控制任务	125
8.2.2	等效控制器	127