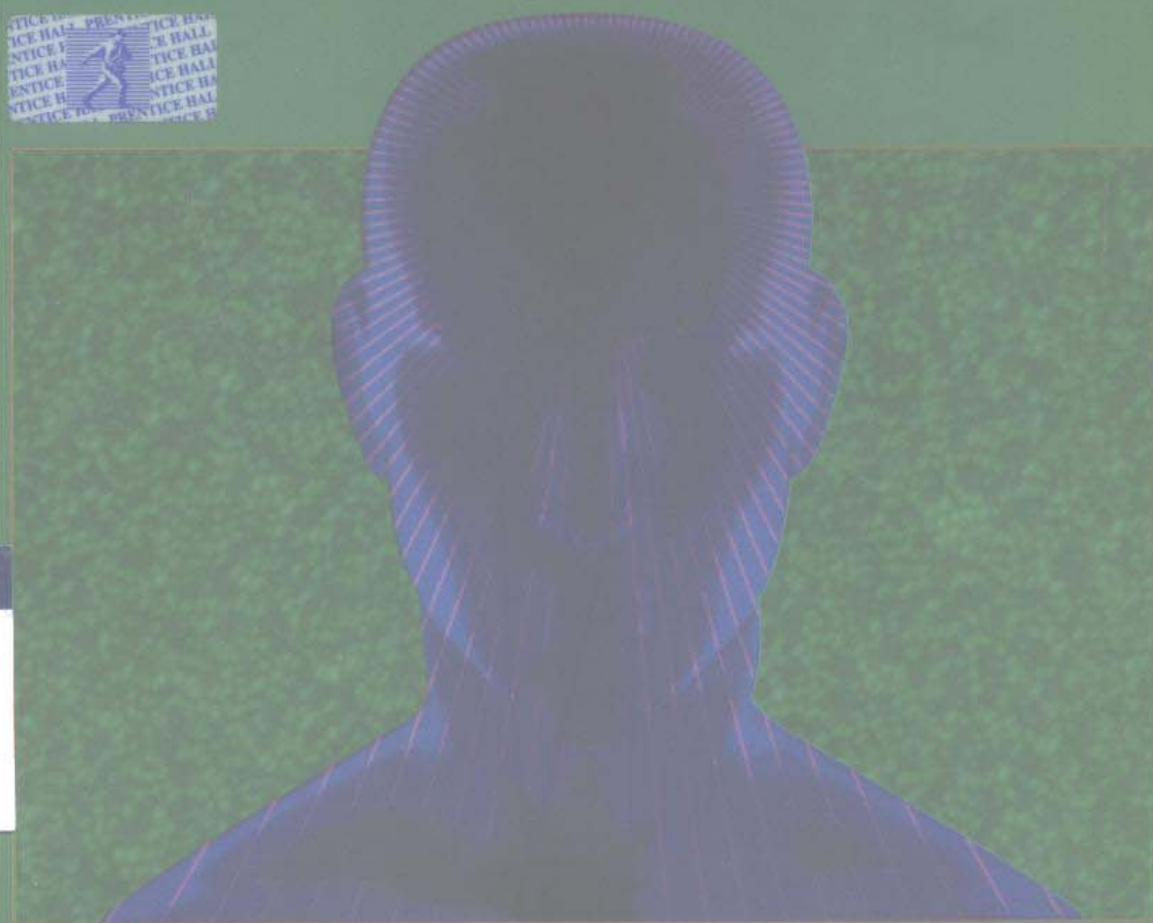


模糊工程

FUZZY ENGINEERING

[美]BART KOSKO 著 黄崇福 译



西安交通大学出版社



PRENTICE HALL

00011760

模 糊 工 程

MOHU GONGCHENG

〔美〕 Bart Kosko 著
黄崇福 译

西安交通大学出版社
Prentice-Hall

内 容 简 介

模糊工程是一门极为重要的新兴学科,具有很大的理论意义和广泛的实际应用价值。本书为美国南加利福尼亚大学 Bart Kosko 所著,北京师范大学黄崇福翻译,是我国出版的系统、深刻地论述这一领域的学术专著。它对推动我国模糊工程学科的研究和应用,培养这方面的人才将起显著的作用。

Bart Kosko: Fuzzy Engineering

Authorized translations from the English language

edition published by Prentice Hall.

Copyright © 1997 by Prentice Hall.

All rights reserved. For sale in Mainland China only.

本书中文简体字版由西安交通大学出版社和美国西蒙与舒斯特国际出版公司合作出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Prentice Hall 防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,翻印必究。

(陕)新登字 007 号

图书在版编目(CIP)数据

模糊工程/(美)科斯科(Kosko,B.)著;黄崇福译.

西安:西安交通大学出版社,1999.6

书名原文:Fuzzy Engineering

ISBN 7-5605-1026-4

I.模… II.①科… ②黄… III.模糊-工程-研究 IV.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 24437 号

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668316)

西安向阳印刷厂印装

各地新华书店经销

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:28 字数:663 千字

1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月第 1 次印刷

印数:0 001~5 000 定价:38.00 元

陕版出图字:25-1997-037 号

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)2668357,2667874

出版说明

1. 本书译文尽量忠实于原书,包括格式,字体等,大体都按原书处理。个别地方由译者或编者加了脚注。

2. 原书的出版规格与我国现行规格不尽一致。除少数情况改从我国规格(如微分号 d 等改用正体字母)外,作为一本翻译书,在许多地方我们仍采用原书的规格。我们相信,这不会影响中国读者对原书的理解。

3. 特别要说明的是:原书有许多处采用非 SI 单位。按照我国《计量法》的规定,出版物应使用法定计量单位。但我们认为,在译本中把它们一一换算成 SI 单位会出现不少问题。如把一些图表中的英制单位由原来简便的整数变换成冗长难记的多位小数,将使本来的精确值变成近似值。因此,本书中涉及某些计量单位未作换算,在这里列出主要的换算关系:

$$1 \text{ mile (英里)} \approx 1.609 \text{ km}$$

$$1 \text{ ft (英尺)} \approx 0.305 \text{ m}$$

$$1 \text{ }^{\circ}\text{F (华氏度)} = \frac{9}{5} (^{\circ}\text{C}) + 32$$

译 者 的 话

“模糊工程”一词虽早在 80 年代中期就已是学者讨论的话题之一。《光明日报》曾刊登过这方面的文章。不过作为系统的论述,当数美国南加利福尼亚大学 Bart Kosko 所著“Fuzzy Engineering”一书。

严格来讲,模糊工程是指为解决工程实际问题而进行的模糊集理论和方法的研究。“Fuzzy Engineering”一书将工程实际问题归结为函数逼近问题,将模糊工程定义为是用模糊系统去逼近函数。这种提法虽有偏颇,但也不无道理。因为从某种意义上说,模糊工程所要解决的核心问题就是工程系统的函数逼近问题。为了推动中国学者在此方面的研究,译者将其译成了中文,但愿能受到欢迎。

由于译者水平有限,加之时间十分仓促,译文中缺点和错误必定不少,恳望读者批评指正。

本书在翻译过程中得到了周国贤、刘新立、李学军同志的帮助,特在此向他们表示衷心的感谢。

黄崇福

北京师范大学资源科学研究所

1998 年 2 月

前言

模糊工程:作为函数逼近的模糊逻辑

模糊系统近似于函数。如果有足够多的模糊规则,它们将是最一般的近似体。在这种意义上讲,模糊系统可以模拟任意连续的函数或系统。就像来自控制理论和信号处理的系统被模拟一样,那些来自于物理学和社会学的模型也可以被模拟。

模糊逼近的质量依赖于模糊规则的质量。在实际中,专家们是推测出模糊规则来。或者,也可以用人工神经网络的技术从数据中学习规则,并随着数据的更新调整规则。其结果总是逼近某种未知的非线性函数,这种非线性函数可以随时间而变化。较好的头脑和较好的神经网络总是给出较好的函数逼近。这不是模糊系统的标准观点,而是我们在这本书中将要采纳的称之为“模糊工程”的观点:用模糊系统进行函数逼近。

标准观点是,模糊系统理论或“模糊逻辑”是一种语言的理论,它模拟我们怎样凭经验和常识的模糊规则进行推理。模糊集和系统被当成了达到这种语言目的的工具。在许多情况下,毫无疑问这是对的。当一个问题中的输入和输出的数目足够小,并且,对于一个人要找到某个解决问题的途径来说时间尺度还要足够慢,就像我们给一架照相机对焦距或倒退一辆小轿车或烤一块牛排那样,此时,这种标准观点是对的。这种观点反映了初期的模糊工程师们所提出的各种问题,也展示了他们常用于其工作中的各种手段和用来为其进行辩护的语言。

但是,“模糊”这个名字和隐藏在其后的语言观点,两者都经常给外界传达出错误的信息,对外行和本领域的批评家来说也是这样。标准的模糊系统理论观点给人们的印象是,模糊逻辑是语言学或数理逻辑或人工智能的一个朦朦胧胧的分枝,或者,从这种观点人们并不会觉得模糊逻辑是科学或整体数学的一个分枝。在最糟的情况下,语言学的观点使人想到,模糊逻辑只不过是软件编制和双关语的巧妙混合体。模糊理论的非系统分枝也混合着这样的感觉:有时候看起来像是为了模糊化而模糊化。例如,仅仅是将一个连续的 0 到 1 的指标加入一个模型。就称它为模糊。在 80 年代以前,许多模糊刊物中的文章就是这种形式,今天,仍有少量的这类文章。新的名称“模糊函数逼近”和“模糊工程”可能有助于阻止批评家们用他们的绘笔来绘制模糊系统。

工程师们看来已对模糊系统的语言学观点有了不信任感。具有讽刺意义的是,模糊系统的语言学观点产生于 60 年代系统工程新的研究高潮之中,这种高潮是随着卡尔曼(Kalman)滤波的出现而开始的。某些控制论工程师对这一领域和它的语言学伪装公开地怀有敌意。模糊工程师们过去在处理同样的控制问题时,他们并不说是用一种新语言,而是说是用不在数学中的语言。在模糊语言后面,是具有模糊集特色的新的代数体系,它是从多值集理论和逻辑中数学化抽象出来的。工程师们发现,这个领域已远离他们曾经接受过的正规化训练,而这种训练是在封闭式数学模型中所进行的。在他们看来,模糊系统更像是词语的指导路线,而不是精

确的计算算法,再说,几乎没有哪个工程师读过拓扑学或符号逻辑中那些生偏分枝的课程。

批评家们有进一步的理由不相信模糊逻辑:这种理由就是,数学是冷酷无情的。当模糊工程师们模拟诸如“冷空气”、或“高人”、或“小变化”这样的概念时,二值逻辑的法则被打破了。对于这种破坏,模糊工程师们也有担心。物理学家们理所当然地服从于二值逻辑的法则,没有人会怀疑这一点。因此,当模糊工程师们让数学服从词语时,很难被人所接受。事实上,如果你想做的话,你可以设法使一个三角脉冲同你采用的数学结构相协调,不过,你必须放弃亚里士多德的两者择一论或所谓的排中律,亦即是放弃整个的二值数学,或者说,只把二值数学作为极限情况来看待。我们最好还是认真看待批评家们的这些意见。放弃二值数学所获得的回报不一定是值得的。

模糊工程的产生

当新的“智能”装置和模糊控制系统于 80 年代在日本和韩国大量出现时,形势发生了变化。此时,甚至于用词语构成的模糊系统放入家用电器中也获得了成功。当批评家们在了解模糊规则和模糊芯片是怎样提高洗衣机、摄像机和变速器的机器智商时,他们所看到的是烟雾而不是火。几乎没有一个数学家能明白多值集合自身怎么会产生出智能机器来。他们看到的是某种新的集合数学,并将规则看成是在扮演语句的角色。他们没有看到模糊规则所起的作用是一个输入—输出映射或是一个函数。而且,模糊工程师们通常也看不到这一点。

其结果是,许多阅读现代杂志或参加过有关学术会议的人,他们对模糊逻辑有所了解或有所闻,但因为受过分吹嘘的广告化宣传的影响,他们对真实情况并不了解。一台模糊洗衣机可能会节约能源,保护衣物,避免撕扯。日本仙台市的地铁模糊控制系统可能会比由人来进行控制或传统的控制器运行得更好。但是,这些成功并不足以说服人们放弃亚里士多德的非此即彼论。

作为函数逼近的模糊逻辑之工程论观点,所依赖的并非词语。它并不是建立在最新的认识论或语言学范例之上,它同可能性、必然性的模态论也没有什么联系。这种工程观点的立论依据是数学的函数逼近论和统计学习论。这种数学的大部分是人们已熟知了的。这种说法,会令许多人失望。事实表明,在模糊系统中,尽管某些设计者或评论家们可以用丰富多彩的语言来对其加以描述,也并没有什么不可思议的地方。模糊系统只不过是一种转化人类言语并对其加以量化的自然途径。通过它,言语可以变成函数,这有助于解决我们所承担的艰巨任务。

在模糊工程的数学模型中,词语仍然被采用。不过,使用的通常不再是过去的那些词语。在实际中,我们首先要对函数逼近进行初始化,随后对其进行调整,在这一过程中,词语有较大的价值。人类使用的词语是如此丰富的资源,使人难以割舍。人工神经网络回避了词语,转而集中考虑行为问题。网络技术使我们更接近人脑。词语仅仅是一种工具或一架梯子,可以用它来帮助我们完成函数逼近的任务。

从这个角度来看,模糊语言是用来达到计算目的一种手段,而并不是别的。进行计算就是将输入转化成输出,或将原因转化成结果,或将问题转化成答案。系统所要做的就是这些,并且我们是将其作为函数来进行模拟。是为了系统的计算而计设出模糊系统。要紧的是它们怎样较好地完成任务亦即这样做是否值得。任何与自然语言的匹配均只是手段而不是目的。目

的是模拟系统,这样,我们就能控制它们,或塑造它们,最起码是预测它们。从这个意义上讲,模糊工程是函数逼近的一个分枝。

模糊认知论和概念不一致性

模糊函数逼近的基本单元是如果一则规则:“如果洗涤水是脏的则增加洗涤剂”或“如果价格高则需要就低”。一个模糊系统是一个如果一则规则的集合,这些规则将输入映射到输出。每一个规则映射输入的一部分到输出的一部分。它将像“脏的洗涤水”这样的输入模糊集映射到像“较多的洗涤剂”这样的输出模糊集。脏洗涤水是模糊的,这是因为所有的洗涤水是脏还是不脏均只是某种程度而言。一个单独的规则“脏洗涤水意味着较多洗涤剂”可以扮演一个极小化的模糊系统的角色。它自身便定义了一个常数函数或线性段。叠合的规则定义出多项式或更复杂一些的函数。

规则也显示自然语言怎样才能导出一个模糊系统,这样也就说明了词语是怎样映射到数学的。模糊系统的发展是从词语到句子到段落。词意代表集合。名词“洗涤水”代表着一个集合或水的一个子集。洗涤水这个集合可能有模糊或灰色边界,但并非必需。形容词“脏”和“很脏”代表洗涤水集合的模糊子集。因此,名词短语“脏洗涤水”代表一个模糊集,“较多洗涤剂”这个名词短语同样也代表一个模糊集。我们可以用曲线来模拟这些模糊集,而不是用矩形,这些曲线可以是三角形梯形或钟形曲线。像“脏洗涤水意味着较多洗涤剂”这样的一个完整句子,就代表着一个模糊规则或如果部分的模糊集“脏洗涤水”和则部分的模糊集“较多洗涤剂”之间的模糊联系。下面,我们注意到,这样的一条规则定义了一个模糊补块或输入—输出状态空间的一个子集,并且一条规则还担当着函数逼近最小单位体的角色。段落或这种句子的列表定义了一个模糊系统或模糊规则补块集,这些补块覆盖了某个函数或某个函数族。增加或减少规则,就可以对模糊系统进行宏观调控。神经网络系统只在刚开始进行训练时进行宏观调控。接下来的微观调整是慢慢地改变像“脏洗涤水”或“较多洗涤剂”这样的模糊集的形状,这将改变它们的“含意。”

一个概念的含意正是一个模糊集所要表示的。所有对象都以某种程度属于模糊集和它的补集。因此,含意是模糊的。甚至于只微微地改变一下模糊集的形状,你就改变了术语的含意。一个人可能将“冷空气”画成中心置于华氏 70° 的一个三角曲线。他可能发觉, 70° 的空气才是百分之百地“冷”,而 72° 或 68° 时仅可以 80% 地说是“冷”。然而,含意也是相对的,人脑和感知神经网络对温度的感觉事实上并不是恒定的,因此可以调整模糊集。某个人还可能觉得“冷空气”应该是中心置于 65° 或 60° 的稍瘦或稍胖一些的三角形曲线。某人感到 100% 冷的空气,对另一个人来讲可能只 80% 地感到冷。模糊规则“如果空气冷则发动机速度置于慢”中,有关术语的含意可以不用,但词语形式却是一样。模糊集发生变化,相应的规则补块结构就发生变化,由规则定义的函数也就不一样。

模糊系统的认识论是非一致概念的认识论。我们所有的人都用同样的词语,但含意不尽相同。当用数学语言来描述由圆圈组成的集合或其它研究对象组成的集合时,这种集合可能并不模糊,也不具有相对性。但是,在人脑的印象和神经网络感触中,这种集合是模糊的。在数学之外,所有模式均具有某种程度的模糊性或相对性。由“脏洗涤水”和“冷空气”这样的可有所变化的集合,可以看出我们的概念不尽一致。较具体的词语其模糊性和相对性都较小,较抽

象的词语其模糊性和相对性则较大。例如,当我们从可以感觉到的“蓝色”、“大”,“冷”转到较抽象的“类似”、“机灵”,“害怕”时,模糊性和相对性都变大了。而像“理由”、“进步”,“战争”这种描述复杂物理或社会过程的词语,其模糊性和相对性就更大了。在表述世界上的“事实”时,一张报纸用清楚无误的打印稿印刷出来的词语所表达的实际上大多是模糊的。令人惊奇的是,尽管两个人用同样的词语表达的含意有差别,但我们竟然能够彼此交流。模糊系统保持了公共的规则结构,同时,每一个使用都调整有关的模糊集并找到在概念不一致中使用者自身的适当位置。将不一致性放在一个搜索空间中,可以生成友好界面。在模糊状态空间中,每一个人都可以找到自己合适的位置。

可加性模糊系统和标准可加性模型

模糊系统 $F:R^n \rightarrow R^p$ 自身是一棵矮而阔的规则树。它是一个前馈式近似。在这个模糊系统中,有 m 条形如“如果 X 是模糊集 A 则 Y 是模糊集 B ”的规则。在这一水平上,系统越来越少地依赖于词语。每一个输入 n 单独地激活并联在一起的所有规则。这样,当系统计算出输出 $F(n)$ 时,它就担当了联想处理器的角色。激活规则是输入 x 与 m 个规则中如果部分模糊集进行的典型模式匹配。接下来,系统用求和的方式综合起那些被激活的规则的部分的模糊集来,并将这个和转化成一个标量或矢量输出。我们也可以视一个匹配——求和模糊近似为一个广义的人工智能专家系统或一个类神经元模糊联想记忆。

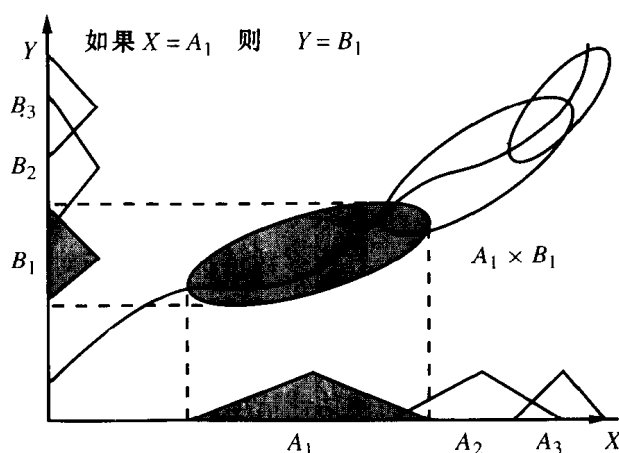
通过允许规则反馈到另一个和它们自身,模糊系统可以拓展它的规则树成为一个规则有向图。这样,反馈式模糊系统就模拟了形如 $\frac{dx}{dt} = F(x)$ 的一个动力学系统,或者是某种形式更为复杂的动力学系统。输入弯向从固定点和极限环延伸到混沌的平衡吸引子。稳定系统偶尔可能会容许一个简单的李雅普诺夫函数,它可以保证所有相近的输入都收敛于一个固定点。别的反馈式模糊系统定义了认知图并担当适应性知识网络的角色。反馈式模糊系统模拟函数或随时间变化的系统。对于完成同样的任务来说,反馈成系统可能比前馈式系统使用更少的规则。不过,系统的反馈和非线性使得它们较难被分析或控制。

本书着眼于可加性模糊系统逼近连续函数。当规则激活时,这些系统将如果一则规则的则部分进行相加。系统可以是前馈式或反馈式的逼近。我们将适应性模糊系统应用于广泛的工程和机器智能的问题中:曲线拟合、混沌模拟、控制、信号处理、通讯、硬件设计、模式识别、知识工程、虚拟现实。有些模糊系统不是可加性的。在论述可加系统的第2章中,我们给出了为什么不管非可加性系统的技术原因。至今为止,对于使用任意形状模糊集的规来说,只有可加系统已被证明是通用逼近器。可加系统的计算简单性是本书集中讨论这种系统的更进一步原因。

更主要的原因是,本书力图在现代工程中,将可加性模糊系统推进到我们所能推进的程度为止。这一任务正好落在提出可加性模糊系统这一新结构的创始人肩上。为了突出或解释自己的系统,人们可以批评别的系统,但到头来,他必须承担说明它工作得怎样的担子。如果你不能证明新的方法比老方法好,所谓的通用逼近理论只不过是空洞的。本书中处处都有这类需要解决的问题。

可加性模糊系统操纵着一些蛋形物的几何体。这种几何体在本书中处处可见。每一条规

则定义了输入—输出状态空间中一块模糊补块。在许多情况下,这种补块是蛋形或椭圆形的,但并非必须这样。补块几何化了词语或知识。精确的规则定义小补块。含糊或有干扰的规则定义大的补块。一条规则叙述了模糊模式:“如果输入 X 是模糊模式 A 则输出 Y 是模糊模式 B 。”笛卡儿乘积 $A \times B$ 定义了输入—输出状态空间 $X \times Y$ 的模糊规则补块或模糊子集。一个可加性模糊系统用这样的一些规则补块覆盖了函数的图形,这种系统还相加或平均那些交叠的补块:



随着补块数量的增加和尺寸的收缩,函数逼近趋向于越来越好。盖位函数图形的补块是本书的象征。每章都以某种方式对其进行处理。

可加性系统的类型相当多。在实际中,大多数模糊工程师们使用的是我们称其为标准可加性模型或 SAM 的某种形式。一个 SAM 定义一个函数 $F: R^n \rightarrow R^p$ 。预先来说,由定理可以导出,可加性结构是非常简单的:

$$F(x) = \frac{\sum_{j=1}^m w_j a_j(x) V_j C_j}{\sum_{j=1}^m w_j a_j(x) V_j}。$$

SAM 存储着 m 条形如 $A_j \times B_j$ 的补块规则,或者是形如“如果输入变量 X 等模糊集 A_j 则输出变量 Y 等模糊集 B_j ”的词语,每一条标量规则具有权重 $w_j > 0$ 。依据输入 x 属于如果部分模糊集 $A_j \subset R^n$ 的程度, x 变为在 $[0, 1]$ 内取值的矢量 $a_j(x)$ 。SAM 不需要使用则部分模糊集 $B_j \subset R^p$ 的模糊性或多值性。它仅需使用集合 B_j 的体积或面积 V_j 和它的形心或质量中心 C_j 。在实际中,我们用一个非模糊的有相同体积和形心的矩形或箱来替代 B_j 。如果所有则部分的集合 B_j 它们的体积或面积相同,我们甚至用不到它们的体积。此时, SAM 退化成了在大部分日本家用电器中使用的 COG(center-of-gravity)模糊系统。高斯 COG 系统本身又是与径向基函数神经网络一致。

SAM 公式离开了较早时候那些模糊模型的语言学前后关系,这一方程在模糊工程中处于核心地位。它将一个输入 n 转化成一个输出 $F(x)$ 而不需要使用模糊概念或打破二值逻辑的

非此即彼律。为了计算 $F(x)$, 只需进行几次加法和乘法运算, 再进行一次除法运算。只有当我们既用到集合 A_j 又用到它的补集 A_j^c 时, 如果部分中的模糊集 A_j 才打破非此即彼律。此时, 因为 $A_j \cap A_j^c \neq \emptyset$ 且 $A_j \cup A_j^c \neq X$ 成立, 它们就会与古代和现代逻辑及集合论中的二值假设相矛盾。但是, 大多数模糊系统仅用 A_j 来工作而没有它的补集参与。工程师们使用“脏洗涤水”而不明确地使用“不脏的洗涤水”。依赖上面给出的 SAM 方程可以准确地计算补块覆盖体。从这个意义上来说, SAM 公式回避了较早时的语言学提法和模糊集理论的逻辑争论。本书中稍后一些的章节拓展了简单 SAM 系统, 使用了诸如模糊性测度和子集性测度这样的概念, 不过, 这些概念都很新且仍在探索之中。大部分章节都保持了 SAM 系统的简单性, 并尽力将其用于解复杂问题。

SAM 系统的复杂性取决于如果部分的模糊集 A_j 和问题的维数。像梯形和钟形曲线这样的简单集合就可产生出有效的逼近 $F \approx f$ 和简单的有监督学习法则, 这些法则用于调整模糊集, 从而也就调整了模糊规则。复杂集 A_j 能将被逼近的 f 的结构编码变成为它们自己的结构, 用少至两条的规则精确地表达 $F = f$ 。在大多数情况下, 我们对被逼近的 f 是未知的。我们面临盲目逼近, 仅有的是专家对规则的猜测或来自于 f 的未经处理并伴有噪声的输入—输出数据。在实际中, 我们为模糊集假定出简单的形状并尽我们所能去调整它们, 进而用规则将它们联系起来。这减少了集合的复杂性而使估计精度付出了很高的代价。这也改变不了所有模糊系统面对盲目逼近时更为严重的维数复杂性问题: 规则爆炸。

维数灾难和学习: 修补拐点

随着维数增加, 模糊系统面临规则数目的指数增长。这种“维数灾难是由于模数函数逼近的补块覆盖而引起的。前面的示意图显示一个标量模糊系统 $F: R \rightarrow R$ 需要大约 k 个规则补块去覆盖输入—输出平面的某个有限部分。一个大的规则补块可能就盖住了要逼近的 f 的图形, 并可能作为一个平坦线恒参系统给出 F 。模糊系统 $F: R^n \rightarrow R$ 需要大约 k^n 个规则补块。一般化的矢量系统 $F: R^n \rightarrow R^p$ 需要大约 k^{n+p-1} 条规则。在实际中, 因为 $n > p$ 成立, 指数规则爆炸多是由于输入所引起。

过去的大多数模糊应用是低维数。它们所使用的仅仅是 2 到 3 个输入和 1 个输出, 而所使用的 k 是 5 或 7。因此, 它们使用的规则不多于 150 条。真要处理较复杂的金融或医药或机器制造系统, 简单模糊系统可能运转不灵。这样, 模糊系统专家们不仅需要大量的规则, 而且需要大量好的规则。

学习可能有助于解决在有限条规则下就能解决问题这样的难题。学习能移动规则补块从而调整了模糊系统。学习可能来自于一个数学算法, 或一个搜索软件, 或一个专家的猜测, 或训练和误差。学习是获得新的更好的规则的一个手段。学习改变了如果部分集的形状或位置, 或者改变则部分集的形状或位置, 或两者都有所改变。新集给出新规则, 新规则给出新系统, 这样就给出了新的函数逼近。模糊系统 F 的移动就像一个点在连续函数空间中的移动一样, 这种移动是试图使 F 移动到点 f 。学习的目的是最优或精确地表达 $F = f$ 。

随着 F 移向 f , 学习就移动了规则补块。通常, 为了盖住 f 的图形, 所需要的规则之数目比呈指数的规则数 k^{n+p-1} 小许多。放置规则的最好地方依误差函数的极点或拐点而定。误差拐点的数目也可能会超过规则数目 m 。在最大的误差曲线拐点上, 应该正是你每次增加一

条规则所放置之处。下一次增加的规则,应该放在残差曲线的最大拐点之处。依此类推寻找下一个规则的放置处。这样做并没有避免维数灾难,但可以把面前的工作做得最好。误差拐点经常与 f 的拐点有关。对于在输入—输出状态空间局部区域的单独规则来说,正是这样。除高维问题以外,大的单独规则是普遍规律。因此,最好的规则补块在函数的拐点或极点处。它们修补拐点。

在实际中,我既不知道被逼近函数 f 的形状,也不知道模糊系统 F 和 f 之间的误差面。所以,我们就请教专家或使用人工神经网络或其它的学习方法,以便找到模糊规则,并尽可能地将它们移到未知的拐点处。专家们也经常调整自己的观点。额外的规则可能满布于拐点之间。以改善插值,或可能远离拐点以改善外推。最好的学习方法是快速收敛于最优化规则补块。到目前为止,几乎所有的适应性系统都是进行盲目学习而不能将固定或变化的规则补块移动到他们最佳的位置。这样,为了小小的一点逼近精度,经常在指数规则复杂性上又增加了许多学习方法所具有的指数复杂性。修补拐点是使用有限个规则的最好途径。它也就将许多模糊函数逼近还原为找到导函数零值点这种古老的任務。

学习方法自身不必依赖于某个人工神经网络。学习方法能将样本数据映射为模糊参数所用的新值。这些方法倾向于要么是无监督的数据聚类,要么是有监督的梯度下降。无监督的学习较快但精度低。有监督的学习要求对被逼近的 f 有较多的了解,以便计算误差信号,并且,它还经常要求大数量级的周而复始的训练。两种学习方法都能调整模糊系统或人工神经网络中的数值。的确,人工神经网络和模糊系统之间的界线本身就是模糊的。

模糊系统和人工神经网络两者都是黑箱逼近体,也都具有伴随非模型化状态而出现的所有优点和缺点。它们适用于任何输入—输出过程,而且可能还不必证明过程是否稳定或强度如何。前馈式易于控制,但功能较反馈式差。如果不用大量的输出一输出案例去检测,我们并不能确切地知道模糊系统或人工神经网络到底学成了什么函数或模式。模糊黑箱允许使用者打开它去看一看其内的模糊规则,还允许使用者调整这些规则或清除不需要的规则。人工神经网络仅在其内部提供了“连接的糊状物。”人工神经网络也因它们的突触网状物的分布或结构而遭受痛苦。许多网络每一次学习新东西时就会忘记它们曾经学习过的东西。新模式排挤并歪曲某些旧模式。在这一点上,人工神经网络用人脑是一致的。模糊系统和人工神经网络均不能回忆起他们忘了些什么,从而我们也就无从知道它们学习到了什么或什么没有学到。总而言之,非模式化系统将只会产生于计算机仿真。

在本书中,模糊系统采用在人工神经网络中所使用的同样的学习法则去进行学。虽然有适应性模糊系统,但我们经常称它们为“神经模糊”或“模糊神经”系统。此处的“神经”仅仅是意指“适应”或“学习”。本书不讨论采用模糊数学去模拟一个神经元或将神经元和模糊系统合并成主从或从主混合系统。这种系统不属于本书研究的范围,也不是黑箱逼近的主流研究。本书将 SAM 系统和它的变型应用于工程问题的广泛领域,并且,调整这些系统采用的是非监督或有监督的学习法则。在许多情况下,如果用同样的学习法则和同样的训练数据去调整人工神经网络,这些人工神经网络和相应的模糊系统可能会有同样的效果。同样的结果可能对其它经典的黑箱逼近,如多项式或隐蔽的非线性回归,也成立。本书的目的是仔细研究称之为适应性模糊系统的这样一种新的函数逼近的力量和极限。

关于本书

本书既是一本统一标准的教材,某种程度上又是一本编辑的书。它针对的是工科大学中的读者。每一章都包含详尽的习题,虽然后面各章中的习题较前面各章的习题要少一些。每一章都围绕一个较大的专题,从理论伸展到应用,而且,还涉及相应的拓扑系统,从前馈系统到反馈系统。我和我的研究生撰著了本书的一些章,请同事撰著了三分之一的章,其余的为我本人所写。我们花了两年多的时间来写此书,参加此书的研究生和同事须接受我的编辑检查。在这两年多的时间里,我曾增加和删去了许多章,以便更好地适合并延展模糊工程的研究领域。其结果是,该书既有合著优势,又有单一作者著书的风格。

本书从介绍开始,从前馈式模糊系统发展到反馈式模糊系统。最初的两章反映了这个全局性结构,在阅读随后的应用章节之前,读者应掌握这两章和它们的许多习题。第1章扩充了本人于1993年7月在“Scientific American”上发展的“模糊逻辑”一文。该章的最后一节列出了模糊集和系统的核心数学。该章的习题覆盖了多值逻辑和模糊集中较老的一些题目,这有助于加强学生处理较新的模糊系统时的技能。

第2章是本书的主要章而且篇幅最长。它以一系列的定理和较少的结果给出了模糊工程的理论。第3~15章应用并发展了第2章中的理论。习题基本上是包含了较多的定理和推广。认真的学生应该做这些习题以补上有关章中概念方面的空缺。第3章也集中于模糊函数逼近但却是对可分解在坐标轴上的椭圆规则这一特殊情况而言。

第4章和5章应用模糊系统于控制和混沌模拟。第4章描述了一个庞大的研究项目:用模糊系统去控制智能汽车队列,包括仿真和实际上路实验。第5章介绍模糊规则块怎样对状态空间进行循环划分以模拟混沌吸引子。本章还介绍了指数规则爆炸是怎样吞没前馈式模糊系统的,并指出对反馈式模糊系统的需要,反馈式可能用固定数目的规则就能模拟同样的吸引子。

第6章和第7章将模糊系统应用于信号和图像处理。第6章将一个重要的新概念“ α 稳定”引入了脉冲噪声的模拟。 α 稳定统计有较高斯钟形曲线较厚尾的钟形曲线。高斯钟形曲线在现代科学和工程中被普遍采用。厚尾经常给出噪声的较好模拟,不过不易进行分析,因为所有方差和高阶矩均是无穷大。该章介绍一个模糊系统是怎样在有大量脉冲噪声的情况下预测时间序列数据的,并说明怎样从信号中滤除噪声。系统使用椭圆规则,但并不必分解它们。这样,系统就不必再使用基于规则度量结构上的联合集函数。第7章使用一个模糊系统去找图像子带编码中一棵拼贴起来树的高能量子树。模糊规则分离频带,使之充当一组小波滤波器或小波包。

第8章和第9章将模糊系统应用于现代通讯。第8章重新改写了标准可加性模型以便配合模算术进行工作。通过观察随机数发生器的输出,模糊系统学习“随机规则”。规则成为一个无线系统的一部分,据此,这样的系统可以对具有跳变展开谱频率的信号进行展开和归并处理。第9章介绍模糊系统的加权和是如何来检测出在高斯和脉冲 α 稳定噪声中的信号的。

第10章和第11章介绍怎样将可加性模糊系统植入硬件中。在第10章中介绍了第一台数字式模糊处理器的设计者是怎样设计SAM芯片和适应性SAM芯片的,后者使用了第2章中介绍的监督式学习法测用以调整模糊系统。第11章介绍如何设计具有可加性模糊系统基

本结构的光学系统。

最后 4 章,论述模糊立方体或高维的单位超立方体,这种立方体可收集某个离散化对象空间的所有模糊子集。第 12 章给出了模糊立方体和立方体到真实空间映射的理论。本章将香农信息论嵌入了一个更一般化的模糊信息论中,并给出了模糊信息流随时间展开的波动方程。第 13 章将子集度或模糊立方体部分集容量的关键模糊思想应用于学习和函数逼近。它使用了高斯可加性模糊系统,这种系统的结构与流行的人工神经网络中的径向基函数网络结构一样。

最后两章用模糊立方的方式论述反馈式。自适应共振理论的创始人在第 14 章中基于模糊的子集性测度给出了模糊自适应共振理论。第 15 章讨论将第 2 章中介绍的模糊认知图用作虚拟现实系统的框架并作为帮助激励动力系统的工具。该章将有关理论应用于海豚和鲨鱼的混乱海底世界,该章还介绍了怎样使用无监督学习去给虚拟世界动力学编码并将它们映射成类似动画的图画。附录介绍怎样使用软件进行模糊函数逼近,该软件随本书一并发行。

Bart Kosko

南加利福尼亚大学

电机工程系

信号和图像处理研究所所长

目 录

译者的话

前言

第一部分 引言

第 1 章 模糊逻辑和模糊工程	(3)
概述	(3)
1.1 由于不分明性所导致的模糊性:凡事均有一个程度	(3)
1.2 不分明逻辑史	(5)
1.3 模糊集和系统	(8)
1.4 商品化产品中的模糊系统	(11)
1.5 适应性模糊系统和更优规则的研究	(13)
1.6 模糊逻辑、集合理论和系统的综述	(14)
参考文献	(19)
习题	(20)

第二部分 模糊函数逼近

第 2 章 可加性模糊系统	(31)
概述	(31)
2.1 用模糊覆盖进行函数逼近	(31)
2.2 维数灾难:规则爆炸与规则的优化	(34)
2.3 可加性模糊系统:标准可加性模型	(36)
2.4 标准可加性模型中的集合函数	(41)
2.5 “重心”方法作为一个常数容量 SAM 系统	(45)
2.6 一般化的 SAM 和 TSK 模型:非线性系统的凸和	(49)
2.7 作为集合映射与校正器的推广 SAM:集合 SAM	(53)
2.8 组合模糊系统:专家反应的凸和	(56)
2.9 模糊系统作为条件期望:概率联络	(60)
2.10 用可加性模糊系统逼近函数	(67)
2.11 用 SAM 进行函数表达	(71)
2.12 SAM 中的学习:无监督聚类和有监督的梯度下降	(73)

2.13 优化可加性系统:用补块覆盖凸起·····	(78)
2.14 反馈式 SAM 与模糊认知图 ·····	(84)
参考文献 ·····	(93)
习题 ·····	(95)
第 3 章 椭圆模糊系统 ·····	(104)
概述·····	(104)
3.1 椭圆规则学习 ·····	(104)
3.2 可加性模糊系统 ·····	(105)
3.3 椭圆模糊规则 ·····	(107)
3.3.1 作为模糊规则块的椭圆 ·····	(107)
3.3.2 加权椭圆规则 ·····	(109)
3.4 无监督的协方差椭圆估计 ·····	(113)
3.4.1 无监督竞争学习 ·····	(113)
3.4.2 模糊规则学习 ·····	(113)
3.4.3 直方图密度估计 ·····	(116)
3.5 模糊规则块的有监督学习 ·····	(118)
3.5.1 梯度下降算法 ·····	(118)
3.5.2 有监督函数逼近 ·····	(120)
3.6 混合系统:无监督然后有监督椭圆学习·····	(122)
3.7 最优函数逼近 ·····	(124)
3.8 结论 ·····	(126)
参考文献·····	(127)
附录 3A:无监督竞争性学习·····	(128)
习题·····	(130)
软件习题·····	(131)

第三部分 模糊控制和混沌

第 4 章 智能汽车队列的模糊控制 ·····	(135)
概述·····	(135)
4.1 智能汽车队列 ·····	(135)
4.2 模糊油门控制器 ·····	(137)
4.2.1 队列的维持 ·····	(137)
4.2.2 对队列的操作 ·····	(141)
4.3 刹车控制器 ·····	(142)
4.4 FTC 仿真结果 ·····	(145)
4.4.1 汽车模型 ·····	(145)
4.4.2 刹车模型 ·····	(146)

4.4.3 模糊控制器仿真结果	(147)
4.5 混合椭圆函数的学习	(149)
4.6 控制面的学习	(150)
4.7 车距控制实验	(152)
4.7.1 纵向汽车模型	(152)
4.7.2 仿真结果	(153)
4.7.3 实验结果	(154)
4.7.4 与油门和刹车配合工作的车距控制器	(157)
4.8 结论	(160)
参考文献	(160)
习题	(161)
第5章 模糊混沌和循环划分	(164)
概述	(164)
5.1 作为规则覆盖的模糊系统:逼近混沌	(164)
5.2 模糊系统设计	(165)
5.2.1 模糊系统结构	(165)
5.2.2 适应性模糊规则结构	(166)
5.2.2.1 划分标准	(166)
5.2.2.2 乘积空间的循环划分	(167)
5.2.2.3 定义模糊规则块	(168)
5.2.2.4 适用于新的样本数据	(169)
5.2.2.5 模糊系统的微调	(169)
5.2.3 固定参数	(171)
5.2.4 算法的性质	(171)
5.2.4.1 基于局部信息的划分标准	(171)
5.2.4.2 寻优的方向	(172)
5.3 逼近函数	(173)
5.3.1 2维曲线的逼近	(173)
5.3.2 3维平面逼近	(176)
5.4 逼近动力系统和混沌	(184)
5.4.1 作为函数联合的动力系统	(184)
5.4.2 混沌的特殊性质	(186)
5.4.3 Van der Pol 振荡器	(186)
5.4.4 Lorenz 和 Rossler 吸引子	(188)
5.5 结论	(190)
参考文献	(190)
习题	(191)