

模糊控制技术及其在冶金工业中的应用

郭代仪 雷闻宇 梁山 编著



重庆大学出版社

模糊控制技术及其 在冶金工业中 的应用

郭代仪 雷闻宇 梁山 编著

重庆大学出版社

内 容 简 介

模糊控制是控制领域所采用的智能控制方法中最具有实际应用的方法。本书系统地介绍模糊控制的理论、方法和工程应用。全书共分7章,首先简单介绍了模糊控制设计中必需的模糊数学方法,然后重点介绍了模糊控制原理、模糊控制器的设计和模糊控制的工程应用。

本书结合编著者的研究工作,反映了模糊控制器设计与应用中的最新研究成果。内容新颖,深入浅出,通俗易懂,注重实用,可操作性强。

本书可作为自动化、计算机、机械专业本科生、研究生的教材,也可以作为从事自动控制领域工程技术人员的参考书。

模糊控制技术及其在冶金工业中的应用

郭代仪 雷闻宇 梁 山 编著

责任编辑 梁 涛

*

重庆大学出版社出版发行

新 华 书 店 经 销

重庆建筑大学印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/大32 印张:4.75 字数:128千

1999年2月第1版 1999年2月第1次印刷

印数:1—2000

ISBN 7-5624-1892-6/TP·194 定价:6.50元

前 言

自从美国自动控制理论专家、模糊集合理论的奠基人 L. A. Zadeh 教授于 1965 年提出用模糊集合描述模糊事物以来,模糊数学在理论上和应用上都得到了飞速的发展。

模糊控制是模糊数学在工业控制中应用的成功范例。自 70 年代起,我国也开始了模糊控制的理论和应用研究,并取得了可喜的成果。近年来,模糊控制在各种工业控制、设备自动化等方面的应用越来越广泛,广大的科技人员投入生产第一线,纷纷加入模糊控制的研究和实际应用的行列,对现有的自动化程度不高的设备、传统设备进行改造。在这种情况下,人们需要一本以模糊控制器的设计为中心内容,面向工程实际应用的书。

《模糊控制技术及其在冶金工业中的应用》一书由郭代仪、雷闻宇、梁山合作编写,它是编者根据多年来所进行的模糊控制研究以及模糊控制系统开发应用中的一些实例,并选取了国内外模糊控制研究的各种成果而写成。全书共分七章,前三章介绍了模糊集理论的基本知识。后四章重点在于介绍模糊控制的工程实际应用,特别是基本模糊控制器的设计和应用。希望本书能给读者提供一个模糊控制设计和应用的方法和实际应用的参考,对加强模糊控制的工程实际应用起到抛砖引玉的作用。

本书编写过程中,参阅和摘引了诸多研究模糊控制的学者和专家的论著和文章的内容,在此谨表谢意。重庆大学自动化系邓仁明教授对全书进行了仔细审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此也一并感谢。由于模糊控制理论的研究内容十分丰富,同时由于编者的水平以及所掌握资料信息有限,书中难免有不少错误和遗漏之处,望广大读者批评指正。

编者

1998 年 9 月

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 精确性、随机性和模糊性.....	1
§ 1.2 模糊数学的兴起	3
§ 1.3 模糊控制理论的诞生和发展	5
第二章 模糊数学基础	8
§ 2.1 普通集合的概念及其描述	9
§ 2.2 普通集合的运算.....	12
§ 2.3 集合的直积、映射和关系	16
§ 2.4 模糊集合的概念与表示法.....	18
§ 2.5 模糊子集的运算.....	21
§ 2.6 隶属函数.....	24
§ 2.6.1 隶属函数的确定方法	25
§ 2.6.2 常见的隶属函数	26
§ 2.7 模糊集合与经典集合的关系.....	28
§ 2.7.1 λ 截集	28
§ 2.7.2 分解定理	30
§ 2.7.3 扩张原理	32
§ 2.7.4 模糊数.....	33
第三章 模糊关系和模糊推理	37
§ 3.1 模糊关系	37
§ 3.2 模糊矩阵.....	41
§ 3.3 模糊变换.....	44
§ 3.4 模糊关系方程.....	45
§ 3.5 模糊推理.....	46
第四章 模糊控制基础	49

§ 4.1	模糊控制的基本思想	50
§ 4.2	模糊控制的系统结构	51
§ 4.3	模糊控制的算法模型	53
第五章	基本模糊控制器的设计	57
§ 5.1	模糊控制器的结构	58
§ 5.2	精确量的模糊化	62
§ 5.2.1	模糊控制器的语言变量	62
§ 5.2.2	语言变量值的选取	63
§ 5.2.3	语言变量论域上的模糊子集	64
§ 5.2.4	模糊化方法	66
§ 5.3	模糊控制规则的设计	68
§ 5.4	模糊量的精确化	75
§ 5.5	论域、量化因子及比例因子的选择	81
§ 5.5.1	论域及基本论域	81
§ 5.5.2	量化因子和比例因子	82
§ 5.5.3	量化因子和比例因子的选择	84
§ 5.6	模糊控制算法的实现	85
§ 5.6.1	查表法	85
§ 5.6.2	软件模糊推理法	89
§ 5.6.3	硬件模糊控制器	89
第六章	模糊控制方法的进展	90
§ 6.1	模糊 PID 控制	90
§ 6.1.1	Fuzzy-PID 复合控制	91
§ 6.1.2	模糊自整定参数 PID 控制	92
§ 6.2	自适应模糊控制	93
§ 6.3	专家模糊控制	98
§ 6.4	基于神经网络的模糊控制	100
§ 6.5	模糊控制开发工具	106
§ 6.5.1	Freeware	107
§ 6.5.2	FIDE	108

§ 6.5.3 FUZZY TECH	110
§ 6.6 模糊控制芯片	111
第七章 模糊控制的应用实例	113
§ 7.1 概述	113
§ 7.2 模糊控制在镁砖隧道窑中的应用	113
§ 7.3 九管还原炉的温度 FUZZY 控制系统	119
§ 7.4 氧枪循环水泵站模糊控制系统	125
§ 7.5 自组织模糊控制器在选矿破碎生产过程中的应用	130
§ 7.6 退火炉燃烧过程的模糊控制	137
参考文献	141

第一章 概 论

模糊控制理论是模糊集理论在工业控制工程中的运用和发展,是模糊理论实际运用中的一个重要分支。讨论模糊控制理论,首先必须了解模糊理论有关基本知识,本章主要介绍模糊理论、模糊控制理论诞生的历史背景和发展情况。

§ 1.1 精确性、随机性和模糊性

随着生产力的发展和人对自然现象和社会现象认识的深化,人们发现仅仅用确定性和精确性来描述人类丰富多采的思维活动及复杂的自然现象和社会现象是远远不够的,因为人的思维活动和自然、社会现象往往带有不同程度的随机性和模糊性,为了更好地认识世界和改造世界,客观上要求人们充分认识事物的精确性、随机性和模糊性。

精确性是经典数学的一大特点,只要一提起数学来,人们就会自然联想到要“精确”, $1+1=2$,是不能含混的。因为经典数学是建立在集合论的基础上,根据集合论的原则,一个元素或属于某集合或不属于某集合,不可能有中间状态。其思想方法和推理形式都属于所谓“二值逻辑”的范畴,一个命题,或为真,或为假,二者必居其一,有“非此即彼”的严格性和精确性。

随机性是概率研究的对象,它是指事件发生具有偶然性和随机性的性质。在进行“实验”的过程中,当研究某个事件发生的概率时,由于影响因素众多,该事件能否发生,这是一个随机现象,但在大量实验的基础上也呈现一定的规律性。一个众所周知的例子就是掷硬币,每次能掷出硬币的哪一面是无法预知的,也就是不确定

性,它是随机的。但随着做实验的次数的增加,就不难发现,掷出某一面的次数所占总数的比例将逐渐稳定,其出现“正”、“反”的概率趋近于二分之一。这说明,虽然单个事件的结果是不确定的,但从大量具有随机性和偶然性的单个事件所组成的总体中可找出其规律性。

概率论所研究和处理的随机性现象,其事件本身有着明确的含意。也就是说,虽然事件的发生与否并不肯定,但事件的结果是明确的。随机数学是描述具有或然性的随机现象,用概率分布函数来表示事件发生的可能性,概率分布函数的取值范围是闭区间 $[0,1]$ 中的任意实数。‘1’表示必然发生,“0”表示事件不会发生;0和1之间的值表示事件发生的可能性的多少。

模糊性就是不分明、不确定的意思。由于随机事件出现的条件不充分,所以事件是否会发生不是必然的,而只能以0至1之间的概率来估计,但事件本身的含义是明确的。例如,无数次抛一枚硬币,其出现正、反面的可能性为二分之一,即概率为二分之一。但每一次掷硬币的结果是确定的,或为正面,或为反面,不可能介于二者之间或二者之外。所以其结果是确定的。

模糊数学是研究和处理模糊现象的,它所要处理的概念本身是模糊的。例如,“高个子”这个概念,到底多高才算是高个子?这将随着不同的条件、不同的场合、不同的时间、不同观点的人而改变。

在人的思维和语言中,表现出许多模糊的概念,比如,由一些副词和形容词组成的陈述语句或描述一些经验性的因果关系的条件语句等,往往是表达一些模糊的、不确定的含义。人脑的控制作用同样有模糊性,比如,当人去拿一本书时,需要用多大的力气,决不需要做一番精确的计算,仅经过各感觉器官的综合判定,就会以恰如其分的力量将书拿起。如果叫计算机操纵的机器人来完成这个任务,就会复杂得多,它需要执行许多精确的命令来判定这本书的总重量后,才能举起这本书。

§ 1.2 模糊数学的兴起

在一般人的概念中,数学应该是精确的,而不应该是模糊的。但模糊现象又是客观存在的,人们生活中遇到的许多事情,包括人脑的思维、社会现象和自然现象都具有模糊性的特点。所谓模糊性,主要是指客观事物彼此间的差异在中间过渡区域的“不分明性”,很难用精确的数学语言划分出一条截然分明的界限。随着科学技术的不断发展和相互渗透,在有些现象中,由于影响因素过多、参数与条件过于多样和复杂,描述它的数学模型将要包括众多已知和未知的变量和随机变量,其得出的数学模型将是复杂的,甚至是不精确的和无法建立的。随着社会进步和科学技术的发展,人们逐渐发现,现在的精确数学在解决一些问题时,往往显得十分繁琐甚至束手无策。那些过去与数学关系不大的学科,如生物学、心理学、医学、人文科学、语言学和社会科学等,都迫切要求数学化和定量化,而这些学科又包含了大量的模糊概念,需要用模糊的方法加以描述。

在一切科学中,人类本身的智能研究是最为重要的。人的智能本身就具有精确和模糊两种特性。对于各种计算,人的思维是具有精确性的;而对于各种事物的识别、归纳、推理、学习、经验就具有模糊性。控制论的创始人维纳(Wiener)在谈到人为什么能胜过任何最完善的机器时,明确指出“人具有运用模糊概念的能力”。在人们的实际生活中,运用精确概念的机会往往局限于数值计算,而运用模糊概念的机会却占据了他生活的大部分。

既然实际中的许多问题难以用传统的精确数学加以解决,人们不得不在原有经典数学的基础上,改造现有数学,使其适应于更广泛的学科,这就是模糊数学产生的历史背景:

美国加州大学的扎德(L. A. Zadeh)教授于1965年发表了著名的论文《Fuzzy Set》开创了模糊数学的历史。在《Fuzzy Set》这篇

论文中,提出了隶属函数(membership function)的概念,用它来描述差异的中间过渡性,给出了模糊概念的定量表示法。经典数学中的集合,完全是通过其特征函数来进行运算的,每个集合都有一个特征函数,特征函数只允许取 $\{0,1\}$ 两个值。故与二值逻辑相对应,按布尔代数法则来运算。而模糊数学是将二值逻辑 $\{0,1\}$ 推广到取值范围是闭区间 $[0,1]$ 中的任何实数的连续值逻辑,也就是将特征函数作了适当推广,称为隶属函数。隶属函数的引入打破了经典数学“非此即彼”,“非0即1”的局限性,而用 $0,1$ 间的数来描述差异的中间过渡性,使模糊概念有了定量表示法。隶属函数等于 0 或 1 只是一种极端情况,或者说,确定性是模糊性的特殊情况。

模糊数学一经问世就表现出强大的生命力和渗透力,其应用日益广泛。因为它既认识到事物的“非此即彼”的明晰性状态,又认识到事物的“亦此亦彼”过渡性状态。以天气预报为例,“多云”、“偏南风”、“中到大雨”等气象术语都具有模糊概念。在国内外,将模糊理论用于天气预报已有许多成功的例子。再如医疗诊断方面,“食欲不振”、“疲乏无力”等症状都是模糊概念,采用模糊理论,根据某位医学专家多年的临床经验,研制成计算机诊病的专家系统,可以收到良好的效果。

众所周知,经典控制论解决线性定常系统的控制问题是十分有效的。现代控制理论在航空、航天等领域得到了成功的运用。但是,在工业生产中,却有很多对象和过程难以运用经典控制论或现代控制理论实现自动控制。如对大滞后、非线性,以及难于获得数学模型或模型粗糙的工业系统等等,还仍然以人工操作和人工控制为主。近年来的实践表明,在难以运用经典控制论或现代控制理论实现自动控制的某些系统,采用模糊控制理论来实现自动控制,往往效果很好,并且所需设备简便,经济效益显著。例如,在高炉冶炼、有色冶金还原炉以及某些石油化工过程的自动控制系统中,应用模糊控制都取得了良好效果。

§ 1.3 模糊控制理论的诞生和发展

自本世纪 60 年代以来,现代控制理论已经在工业、军事以及航空航天等领域取得了成功的应用。但现有的自动控制理论(经典控制理论和现代控制理论)有一个共同的特点,即控制器的综合设计都要建立在被控对象精确的数学模型(微分方程、传递函数或状态方程)的基础上,有了数学模型和被控对象对控制系统性能指标的要求,才能设计出各种类型的控制器。建立被控对象的数学模型主要有两种方法:一是从已知的物理化学定律进行数学推导得出;二是进行实验,根据被控对象的输入输出数据,再经模型辨识等方法计算得出。但是这两种方法都存在两个主要问题:

在计算数学模型时,为了简化计算,往往都要经过很多理想化的假设,如非线性假设为线性,分布参数设为集中参数、时变设为定常等;

在工程实际中,很多系统的影响因素往往是相互耦合的、交叉的,很难甚至不可能建立其精确数学模型。

因此,对复杂的被控对象和过程(具有非线性、时变性、多参数间的强烈耦合、较大的随机干扰、过程机理的错综复杂以及现场测量条件的不足等),不可能建立被控对象的精确数学模型,而通常只能得到参数相互间关系的模糊估计,采用常规的控制方法,其控制结果通常与理论值之间存在较大的偏差。但是,一个非常熟练的操作人员,却能凭借自己丰富的实践经验,通过对现场的各种现象的判断而取得较满意的控制效果。这就使人联想到,能否把操作人员丰富的实践经验加以总结,将凭经验所采取的措施转变成相应的控制规则,并且研制一个控制器来代替这些规则,从而对复杂的工业过程实现控制?实践证明,以模糊控制理论为基础实现的模糊控制器能够完成这个任务。

人的控制经验是用人的语言来进行总结和描述的。而语言是

思维的外壳,它具有很大的模糊性。例如,当我们要保持一个水塔中的水位时,可以通过调节水泵阀门开度将水位稳定在固定点。按照人的经验可有下列控制规则:

若水位高于固定点,则排水,若差值越大,则排水阀门开大,排水越快,若差值越小,则排水阀门开小,排水越慢;

若水位低于固定点,则给水,若差值越大,则给水阀门开大,给水越快,若差值越小,则给水阀门开小,给水越慢。

在上述描述“操作经验的语言中”,“高于”、“低于”、“开大”、“开小”等这些词都带有一定的模糊性,因此必须用模糊数学中的模糊集合来刻画这些模糊语言。

1965年,美国控制论专家 L. A. Zadeh 首次提出了一种完全不同于传统数学与控制理论的模糊集合理论。其核心是对复杂的系统或过程建立一种语言分析的数学模式,使人们日常生活中的自然语言能直接转化为计算机所能接受的算法语言。模糊理论的诞生,为处理客观世界中已存在的模糊性问题,提供了有力的工具。同时,也适应了自然科学发展的迫切需要。模糊控制理论正是在这种背景下应运而生的。

1974年,英国伦敦的 Queen Mary 学院(E. H. Mamdani)首先把模糊理论用于锅炉和蒸汽机的自动控制,并取得了比传统的 DDC 控制更好的效果。他这一开拓性的工作标志着模糊控制的诞生。随后在英国、丹麦、荷兰等国先后对热交换过程、炼钢炉、水泥窑以及压力容器等进行了不同程度的模糊控制,也都取得了良好的效果。

1975年,英国的 Stevenage 的 Warren Spring 实验室的 King 等人将模糊控制用于反应炉的诊断控温系统。这个系统是一个大延时的惯性系统,闭环时系统不稳定。在控制中,采用模糊模型的预估方案,从而成功地解决了不稳定问题。

1976年,Mamdani 对同一台蒸汽机开发出了自组织模糊控制器,这种控制器可以在运行过程中学习规则。稍后,Mamdani 和 T. Procyk 研究出扩展的自组织模糊扩展系统和多输入多输出的

自适应模糊控制器。

1977年,英国的 Pappis 等人应用模糊控制方法对十字路口交通管理进行控制,结果使车辆平均等待时间比原来减少了 7%。

自 1979 年以来,我国的学者和专家也开展了这方面的研究工作。首先是李宝绶、刘志俊等人开始了模糊控制器的研究工作。他们用连续仿真的方法研究了模糊控制器的性能,并与常规的 PI 控制器的性能进行了比较。陈国权对模糊控制器的算法进行了研究;郑维敏等用模糊集合理论讨论和分析了模糊控制器的鲁棒性;宋大鹤和汪培庄等先后对模糊控制器的电路实现、软件设计进行了研究;王以治、舒永昌等对模糊语言和模糊文法进行了研究;邓聚龙等研究了模糊控制的稳定性问题以及模糊积分系统的数字仿真与计算机辅助设计,解决多目标最优模糊控制等问题。近年来,国内外学者在研究自校正、自学习的模糊控制器、分层分级的模糊控制方面,以及专家系统与模糊控制的结合、神经网络与模糊控制的结合等问题上都取得了一定的进展。

但是,模糊控制理论无论在理论上和实际应用上都是一门年轻的学科,正处于不断完善和发展的阶段。随着科学技术的发展,模糊控制的应用会越来越多,越来越广泛。

第二章 模糊数学基础

模糊概念来源于模糊现象,而模糊现象在自然界中是客观存在的。人们在了解、掌握和处理自然现象时,在人脑中的反映是模糊的。

人们习惯于追求精确性或清晰性,总希望把事物以数字的形式清楚地表达出来,但是,事物的复杂性使人们不可能精确地了解它。事物越复杂,人们对事物的了解就越不完善,对事物的认识、判断就越模糊。L. A. Zadeh 认为:“一种现象,在能用定量方法表达它之前,不能认为已被彻底地理解,它是现代科学的基本信条之一。”但是,面对模糊现象,人们用精确数学去描述事物和解决问题就会遇到实质性的困难。

精确性和模糊性之间的对立是当今科学发展所面临的一个十分突出的矛盾。L. A. Zadeh 所提出的著名的大系统不相容原理十分清楚地指出了复杂性与精确性的对立关系。“随着系统复杂性增加时,对其作出精确而有意义的描述能力相应地降低,当达到一定的阈值时,复杂性和精确性将相互排斥。”这是由于科学的不断深化,并且又发生了多方面的横向交叉,使得研究的对象越来越复杂而引起的一种矛盾。汪培庄教授在《模糊集合论及其应用》一书中讲得更为透彻具体:“这就是说,复杂程度越高,有意义的精确化能力便越低。复杂性意味着因素众多,当人们不可能对全部因素都进行考察,而只能在一个压缩了的低维因素空间上来观察问题的时候,即使本来是明确的概念也可以变得模糊,这可能是模糊性出现的一个原因;复杂性意味着深度的延长,一个过程要用数百、数千个微分方程来描述,模糊性的影响进行积累,也可能使模糊性变得不可忽略。”

专门研究和处理模糊性现象的模糊数学,已成为传统的经典

数学的重要补充。过分地精确反而模糊,适当地模糊反而能够使之精确。在许多控制过程中,通过模糊数学方法的处理,常常可以达到精确的目的。这就是模糊性和精确性的对立统一。

经典数学是建立在集合论的基础上,即是普通集合论,而模糊数学是建立在模糊集合论的基础上,即是模糊集合论。本章介绍普通集合论的一些基本知识,然后引入模糊集合的基本内容。

§ 2.1 普通集合的概念及其描述

19 世纪末,德国数学家乔·康托(George Cantor)创立的集合论已经成为现代数学的基础,每个数学分支都可看作研究某类对象的集合,因此,集合的理论统一了许多似乎没有联系的概念。

一、基本概念

集合一般指具有某种属性的、确定的、彼此间可以区别的事物的全体。将组成集合的事物称为集合的元素或元,通常用大写字母 $A, B, C, \dots, X, Y, Z$ 等表示集合,而用小写字母: $a, b, c, \dots, x, y, z$ 表示集合内的元素。元素与集合之间的关系是属于或不属于的关系,若元素 x 属于集合 X 时,用 $x \in X$ 表示;反之,用 $x \notin X$ 表示,或用 $x \in X$ 表示。

论域:在考虑一个具体问题时,总是要把这个问题局限在一定的场合或某个特定的范围内,这就是所谓的论域,即被考虑对象的所有元素的全体称为论域,又称为全域、全集,有时也称为空间,一般用大写字母 U 表示。给定一个论域 U , U 中某一部分元素的全体,叫 U 的一个集合。因此一个论域 U 可能有很多个集合。

集合论中常用的一些概念说明如下:

全集:在论域 U 中的所有元素所组成的集合称为 U 上的全集,通常记作 U 或 I 。例如,论域 U 为有理数,那么由所有分数构成的集合则是 U 上的全集。

空集:不含论域 U 中任何一个元素的集合称为 U 上的空集,用 $\emptyset$ 表示。例如,论域 U 为实数,那么集合 $A = \{x | x^2 + 1 = 0, x \in U\}$ 则是 U 上的一个空集,因为方程 $x^2 + 1 = 0$ 在实数范围内无解。

包含($\supseteq$):设 A 和 B 是论域 U 的两个集合,如果对于任意 $x \in U$,若 $x \in A$,又可推得 $x \in B$,便称 B 包含 A ,以 $B \supseteq A$ 表示,此时 A 称为 B 的子集合(简称子集)。假如 $B \supseteq A$,又至少有一个 $x \in B$,且 $x \notin A$,则称 A 是 B 的真子集,以 $B \supset A$ 来表示。

补集:设 A 为论域 U 的集合,取出所有不在 A 集合内的元素构成的集合叫集合 A 的补集,以 $\bar{A}$ 表示。例如,论域 $U = (a, b, c, d, e)$, $A = (a, b, c)$,则 $\bar{A} = (d, e)$ 。

符号“ $\forall x$ ”:在集合表达式中,常以符号“ $\forall x$ ”表示“对于任意一个 x ”。例如,“对于任意 $x \in U$,若 $x \in A$,又可推得 $x \in B$,便称 B 包含 A ,以 $B \supseteq A$ 表示。”这句话可简化为: $\forall x \in A \Rightarrow x \in B$,则称 B 包含 A ,记为 $B \supseteq A$ 。

集合的 Zadeh 表示法:通过各元素的特征函数与集合 $\{0, 1\}$ 中的元素一一对应,就能清晰地刻画出一个集合。例如一个小组共有 7 个人,可记为 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$,在这个论域中,男性与女性的集合可分别表示为:

$$\text{男} = \frac{0}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3} + \frac{0}{x_4} + \frac{0}{x_5} + \frac{1}{x_6} + \frac{1}{x_7}$$

$$\text{女} = \frac{1}{x_1} + \frac{0}{x_2} + \frac{0}{x_3} + \frac{1}{x_4} + \frac{1}{x_5} + \frac{0}{x_6} + \frac{0}{x_7}$$

上式中的“+”并不是加号,而是表示列举;作为每项中的分式也不表示相除,其含义是分母表示元素名称,分子表示该元素的特征函数值。这种表示法是 L. A. Zadeh 首先采用的,通称为 Zadeh 记号。

二、集合的描述

通常描述一个集合有五种方法:

1. 描述法

当集合 A 是由具有某种性质的元素或由满足某种条件的元