

模糊控制

MOHUKONGZHIIJISHU

技术

刘曙光
魏俊民 编著
竺志超

- 模糊控制数学基础
- 模糊控制原理和设计方法
- 模糊控制器设计实践
- 模糊控制系统的稳定性分析
- 模糊控制的应用实例

区间范围取在

阵的第 i 行元

模糊集 A 的相对程度, 因此, 对第 i 行各元素取

中国纺织出版社

模糊控制技术

刘曙光 魏俊民 竺志超 编著

中国纺织出版社

内 容 提 要

模糊控制是近代控制理论中一种基于语言规则与模糊推理的高级控制策略和新技术,它是智能控制的一个重要分支,发展迅速,应用广泛,实效显著,引人关注。

本书是一本系统介绍模糊控制理论、技术、方法和应用的著作。内容包括模糊控制数学基础、模糊控制原理和 design 方法、模糊控制器设计实践、模糊控制系统的稳定性分析、模糊控制的应用实例,反映了模糊控制技术目前的水平。附录中还给出了与本书配套的模糊控制 CAI 教学软件,便于自学和应用。

本书可作为高等院校自动化类、机电类、电子类、计算机类的大学生教材及研究生教材,也可作为从事模糊控制开发应用的广大研究人员、技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

模糊控制技术 / 刘曙光, 魏俊民, 竺志超编著. — 北京: 中国纺织出版社, 2001. 6

ISBN 7-5064-1464-3 / TP·0021

I. 模… II. ①刘…②魏…③竺… III. 模糊控制—技术 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 26178 号

策划编辑: 张福龙 责任编辑: 王安平
责任校对: 陈 红 责任设计: 何 建 责任印制: 初全贵

中国纺织出版社出版发行
地址: 北京东直门南大街 6 号
邮政编码: 100027 电话: 010-64168226
<http://www.c-textilep.com>
E-mail: faxing@c-textilep.com
中国纺织出版社印刷厂印刷 各地新华书店经销
2001 年 6 月第一版第一次印刷
开本: 850×1168 1/32 印张: 10.625
字数: 238 千字 印数: 1~3000 定价: 22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前言

模糊控制是建立在人类思维具有模糊逻辑特性的基础上的。模糊控制与传统控制有着本质的区别,它不像经典控制那样需要用精确数字所描述的传递函数,也不像现代控制理论那样需要用矩阵表示的状态方程。模糊控制的核心是在于它用具有模糊性的语言条件语句,作为控制规则去执行控制。控制规则往往是由对被控过程十分熟悉的专门人员给出的,所以模糊控制在本质上来说是一种专家控制。这种控制的控制规则充分反映了人的智能活动。

传统控制方法以数学公式描述控制过程,往往可以给出十分严密和明确的数学表达。模糊控制以语句规则描述控制过程,使习惯了用精确数学刻画控制过程的人们感到不易适应和迷惑。实际上,模糊控制是以一种与传统精确数学完全不同的数学——模糊数学为基础理论建立起来的。它有一整套和传统控制方法完全不同的理论和方法。何况,一种技术是否先进,是以其在实际中应用是否取得良好效果而体现的,绝不仅是因对其冗长的论证或美妙的描述就会优秀起来。模糊控制这种技术,尽管其理论系统尚未完善,但其大量应用的超常成效足以表明它是一种前途无量的技术。

当今,模糊控制技术已广泛应用于工业过程控制、家用电器智能化、仪器仪表自动化、计算机及电子技术应用等领域。学习和掌

握模糊控制技术,已成为相关领域广大工程技术人员、新产品研究开发人员及大专院校相关专业师生的迫切需要。为此,我们编著了《模糊控制技术》一书。

本书从工程应用的角度出发,在系统叙述模糊控制基本理论及设计方法的同时,并结合作者多年从事控制系统教学、研究、开发经验,参阅国内外有关文献资料,系统、全面地论述了模糊控制理论及其应用各方面的最新研究成果。为了使读者能尽快学习并深入掌握这门控制技术,我们开发出《模糊控制 CAI》软件,配合本书的出版。全书共分六章,第一章介绍模糊逻辑的形成、模糊控制研究现状、模糊控制进展与展望;第二章介绍模糊控制的数学基础;第三章介绍模糊控制的工作原理和设计方法;第四章介绍模糊控制器设计实践;第五章论述模糊控制系统的稳定性分析方法;第六章论述模糊控制应用实例。

本书第一章、第三章、第四章、第五章、第六章由刘曙光编写,第二章由竺志超编写。费佩燕、屈萍鸽等同志开发了与本书相配套的《模糊控制 CAI》软件并编写了部分内容。全书由西安工程科技学院刘曙光、浙江工程学院魏俊民教授主编,西安交通大学何钺教授审阅。

本书的编写得到了陕西省科委自然科学基金、陕西省教委科研专项基金、陕西省教委面向 21 世纪教改基金的资助。

书中疏漏不妥之处,恳请读者批评指正。

编著者

2001 年 1 月

目录

第一章 概论	1
第一节 模糊逻辑的形成 /	1
第二节 模糊控制工程的产生和发展 /	4
第三节 模糊控制方法的研究现状 /	8
第四节 模糊控制的进展 /	10
一、理论研究的进展 /	11
二、现代应用的进展 /	12
第五节 模糊控制的展望 /	16
 第二章 模糊控制数学基础	 18
第一节 模糊集合论 /	18
一、模糊集合的定义及表示 /	18
二、模糊集合的运算及其性质 /	22
三、模糊集合隶属函数的建立 /	25
第二节 模糊关系及其合成 /	32
一、模糊关系的定义及表示 /	32
二、模糊关系的运算及性质 /	35
三、模糊关系的合成 /	36
四、模糊向量与笛卡尔积 /	39
第三节 模糊推理 /	39

- 一、模糊语言 / 40
- 二、模糊逻辑 / 47
- 三、模糊推理 / 51

第三章 模糊控制原理和设计方法 59

第一节 模糊控制的工作原理 / 59

- 一、模糊控制系统组成 / 59
- 二、模糊控制的基本原理 / 61

第二节 模糊控制器设计的基本方法 / 62

- 一、模糊控制器的结构设计 / 62
- 二、精确量的模糊化方法 / 64
- 三、模糊控制规则的设计 / 66
- 四、模糊量的判决方法 / 76
- 五、论域、量化因子、比例因子的选择 / 78
- 六、模糊控制查询表及模糊控制算法流程图 / 82

第三节 模糊控制器设计举例 / 85

- 一、单输入单输出模糊控制 / 86
- 二、双输入单输出模糊控制 / 93
- 三、简单模糊控制器的特性研究 / 98

第四章 模糊控制器设计实践 103

第一节 模糊控制系统建模与分析 / 104

- 一、系统建模概述 / 104
- 二、模糊系统辨识建模原理 / 105
- 三、基于模糊关系模型的建模举例 / 111

四、模糊系统辨识建模的改进 /	119
第二节 基于规则修改的模糊控制 /	135
一、带修正因子的模糊控制器 /	135
二、模糊控制规则的自调整 and 自寻优 /	139
三、带有自调整因子的模糊控制器 /	146
四、带自调整函数的模糊控制规则 /	148
第三节 自适应模糊控制 /	154
一、自适应模糊控制器的结构 /	154
二、自适应模糊控制器的原理 /	156
三、模型参考自适应控制系统 /	167
四、自校正模糊控制器 /	183
五、自适应梯阶模糊控制器 /	191
第四节 模糊神经网络控制 /	202
一、模糊系统和神经网络融合的形态 /	202
二、基于标准模型的模糊神经网络 /	205
三、基于 Takagi—Sugeno 模型的模糊神经网络 /	212
第五节 专家模糊控制系统 /	220
一、系统的基本结构 /	221
二、系统性能 /	221
三、人机对话系统 /	224
第五章 模糊控制系统的稳定性分析	226
第一节 模糊控制器的等价模型 /	227
第二节 描述函数分析法 /	228
第三节 相平面分析法 /	239

第四节 Lyapunov 判据分析法 / 240

第五节 Popov 判据分析法 / 242

第六节 语言型稳定性分析法 / 244

第六章 模糊控制的应用实例 256

第一节 全自动洗衣机的模糊控制 / 256

一、全自动洗衣机单片机控制系统逻辑结构 / 256

二、模糊全自动洗衣机的模糊推理 / 259

三、洗衣机物理量检测 / 263

四、控制软件 / 266

第二节 单晶炉单晶等径生长的模糊控制 / 267

一、控制策略 / 267

二、控制系统构成 / 268

三、模糊控制规则 / 270

四、控制结果 / 272

第三节 工业机器人的模糊控制 / 273

一、概述 / 273

二、机器人的模糊控制 / 273

三、模糊指令的解释 / 275

四、机器人的模糊控制 / 278

五、机器人的控制过程 / 283

第四节 浆纱机经纱退绕张力自调匀整的模糊控制 / 284

一、参数自调整 Fuzzy—PI 模糊控制器设计 / 285

二、浆纱机经纱退绕张力匀整自调系统 / 288

三、控制实验 / 288

第五节 交流伺服调速的模糊控制 / 290

一、模糊控制在交流伺服电动机中的应用 / 290

二、交流伺服系统工作原理 / 291

三、系统内环控制器设计 / 294

四、模糊控制交流伺服系统的设计 / 296

五、软件编程与系统仿真 / 301

第六节 电弧冶炼炉的模糊控制 / 304

一、概述 / 304

二、模糊聚类分析 / 305

三、模糊控制规则 / 308

四、控制系统组成 / 310

第七节 退火炉燃烧过程的模糊控制 / 312

一、概述 / 312

二、模糊控制系统的组成 / 313

三、模糊控制器和模糊自寻优控制器 / 313

四、应用效果与结论 / 319

附录 《模糊控制 CAI》软件 321

一、计算机辅助教学简介 / 321

二、软件功能 / 322

三、应用环境 / 323

四、软件内容 / 324

参考文献 325

第一章 概论

第一节 模糊逻辑的形成

在一般人的印象中,经典数学应该是精确的,严格地说不应该是模糊的。但模糊现象又的确客观存在于人类思维、社会现象和自然现象中,为了描述这类现象而产生了模糊数学。在此,“模糊”这个词并不是一个贬义词,而是客观事物的准确反映。而且,随着科学技术的发展和互相渗透,过去有些与数学无关或关系不大的学科,如生物学、心理学、医学、语言学等,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,不能或不便应用经典数学描述。所以只能改变数学本身,使其适应于更广泛的学科。

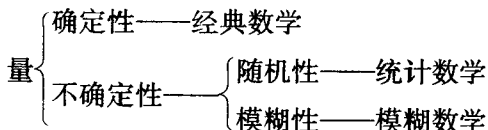
模糊数学诞生于 1965 年,它的创始人是美国加利福尼亚大学的自动控制专家扎德(L. A. Zadeh),在他的第一篇论文《模糊集合》(Fuzzy Sets)中,首先引入了隶属函数(Membership function)的概念。隶属函数的取值范围是闭区间 $[0,1]$ 中的任何实数,从而打破了经典数学“非 0 则错”、“非 0 则 1”的局限性,用 $[0,1]$ 间的数来描述中间过渡状态。隶属函数等于 0 或 1 只是一种极端情况,或者说,确定性只是模糊性的特殊情况。扎德建立了模糊集合论的基础,首次运用数学方法来描述模糊现象,这无疑是一件具有开创意义的工作。

具体地说,模糊逻辑是建立在模糊集合基础上的。传统集合对集合中的对象关系进行严格划分,一个对象要么是完全属于这

个集合,要么就完全不属于这个集合,不存在介于两者之间的情况。模糊集合则是具有灵活的隶属关系,它允许在一个集合中部分隶属。对象在集合中的隶属度可以取 0~1 之间的任何值,而不象在传统集合中非得是严格的 0 或 1。这样,模糊集合就可以从“不隶属”到“隶属”逐渐地过渡。这样,像“快”、“慢”、“冷”、“热”这些本来在常规集合中无法解决的含糊概念就可以在模糊集合中得到表达,这就为计算机处理这类带有含糊性的信息提供了一种方法。温度 25℃ 是暖还是热? 用传统的集合概念回答,这要么是暖要么是热;但用模糊术语回答则是“两者都有一些,既算暖又算热”。表面看这种含糊是无意义的,但实际上却可通过对这些渐变安排特定的数字,再进行模糊逻辑推理来消除模糊性。例如对温度 25℃ 作这样的分类,它隶属于暖的程度是 0.6,隶属于热的程度是 0.4,然后再用这些数值去求对问题的精确解。

控制论的创始人维纳在谈到人胜过任何最完善的机器时说:“人具有运用模糊概念的能力”。人脑的重要特点之一,就是能对模糊事物进行识别和判决。如何使计算机能够模拟人脑思维的模糊性特点,使这部分自然语言作为算法语言直接进入计算机程序,让计算机完成更复杂的任务,这正是模糊数学产生的直接背景。

模糊数学产生后,客观事物的确定性和不确定性在量方面的表现,可做如下划分:



这里必须指出,随机性和模糊性尽管都是对事物不确定性的描述,但两者是有区别的。概率论研究和处理随机现象,所研究的

事件本身有着明确的含义,只是由于条件不充分,使得在条件与事件之间出现决定性的因果关系,这种在事件的出现与否上表现出的不确定性称为随机性。在 $[0,1]$ 上取值的概率分布函数描述了这种随机性。

模糊数学是研究和处理模糊现象的,所研究的事物概念本身是模糊的,即一个对象是否符合这个概念难以确定,这种由于概念的外延模糊而造成不确定性称为模糊性(Fuzziness)。在 $[0,1]$ 上取值的隶属函数就描述了这种模糊性。

模糊数学一经出现就表现出其强大的生命力和渗透力。20世纪70年代以后,在广泛的领域内得到了很快的发展。

以天气预报为例,如“多云”、“偏南风”、“中到大雨”等气象术语都是模糊概念,应用模糊数学进行天气预报已有若干成功的先例。再如医疗诊断,一些症状如“食欲不振”、“头痛”、“疲乏无力”等也都是模糊概念。某种疾病实际上是众多症状的模糊集合,根据某位医学专家多年的临床经验,编制程序后用计算机进行诊断时,应用模糊数学可以取得良好的效果。

模式识别、人工智能和专家系统是近年发展起来的前沿学科,这些学科的共同特点之一是让计算机尽可能地模拟人的思想方法。如前所述,人的思维和推理过程常常是带有模糊性的。所以,模糊数学也已广泛应用于这些领域。

在社会学 and 经济学中也存在着大量的模糊概念,而且大都是复杂的多因素影响和互相作用的大系统。如果用经典数学对其进行描述、估计或预测是十分困难的,而应用模糊数学对其进行研究,可得到较好的效果。由此诞生了一门新的学科——模糊经济学。

模糊数学在工业生产和管理方面也得到了广泛的运用,如生产过程控制、单机自动控制及交通管制等,现已形成了自动控制和模糊数学的一门交叉学科——模糊控制工程。

第二节 模糊控制工程的产生和发展

在控制系统传统设计中,都需要了解被控制对象的数学模型。但是,对于一些生产过程,要获得既有足够的精确性,又便于系统分析的数学模型是相当困难的。这就使现代控制理论的应用受到了限制。然而,一个熟练的操作人员却能够对系统中的各种参量,如温度、压力,以致颜色、气味等,作出响应和判断,最终获得良好的人工控制效果。这种控制方式并不依赖于数学模型,仅依赖于人的经验积累、感觉和逻辑判断。由此得到启发,将头脑中的经验加以总结,把凭经验所采取的相应措施总结成一条条控制规则,进而构筑一个控制器去代替人对复杂的生产过程进行控制,这种控制就是模糊控制。扎德提出的模糊思想及向控制领域的渗透,在理论上和实践上为控制理论开辟了新的发展方向,提供了新的系统设计方法,即模糊控制方法。

1974年英国伦敦大学的教授 E.H.Mamdani 首先成功地把模糊理论用于锅炉和蒸汽机的控制,这一开拓性的工作标志着模糊控制工程的诞生。1975年英国的 P.J.King 和 E.H.Mamdani 将模糊控制系统应用于工业反应过程的温度控制中。1976年荷兰学者 W.J.M.Kickert 和 H.R.Van Nauta 将模糊控制器应用于热水装置中。1977年丹麦学者 J.J.Ostergarad 利用模糊控制器对双输入—双输出的热变换过程进行控制,英国学者 R.M.Tong 于

1976 年用模糊控制对压力容器内部的压力和液面进行控制,以及他随后发表的多篇文章,对模糊控制的应用和发展起到了积极的推动作用。他们的研究成果解决了过程控制中非线性、强耦合、时变和滞时特性等难题,达到了最佳 PI 控制效果。1977 年英国的 C.P.Pappis 和 E.H.Mamdani 对十字路口的交通枢纽指挥采用了模糊控制,实验结果使车辆平均等待时间减少 7%。1979 年英国 I.J.Procyk 和 E.H.Mamdani 研究了一种自组织的模糊控制器,它在控制过程中不断修改和调整控制规则,使控制系统的性能不断完善。自组织模糊控制器问世,标志着模糊控制器“智能化”程度进一步向高级阶段发展,毫无疑问地证实了它归属于“智能控制器”范畴。1980 年丹麦 F.LSMIDTH 公司研制的模糊逻辑计算机协调控制系统最早被应用于水泥窑生产过程控制,并且与 1982 年研制成功的 NO 分析器配套使用,使依靠熟练操作人员的参与起重要作用的水泥生产过程自动化,在采用模糊控制后获得了满意的控制性能和强鲁棒性,这是采用经典控制和现代控制理论所难以达到的。1982 年日本大阪水泥窑生产自动化也成功地应用了模糊控制。1983 年日本学者 M.Sugeno 和 K.Murakani 将一种基于语言真值推理的模糊逻辑控制器,应用于汽车速度控制,并取得成功。此后,模糊控制在化工、机械、冶金、工业窑炉、水处理、食品生产等多个领域中得到应用。模糊控制充分显示了在大规模系统、多目标系统、非线性系统以及无适当传感器可检测的系统中的良好应用效果。

我国模糊控制理论及其应用研究工作是从 1979 年开始的。1979~1980 年我国的李宝绶、刘志俊等人设计了一类缺乏数学模型的控制器,对模糊控制器的特性进行了仿真,与 PI 控制器进行

了比较,结果表明,模糊控制器对单位阶跃响应具有速度较快、精度较高以及对参数变化不敏感等优点。此后,汪培庄、楼世博、龙照升、陈国权、宋大鹤等人在模糊控制理论和控制算法方面做了大量的研究工作,在模糊理论上取得了可喜的成果,为模糊控制技术在工业控制领域的应用打下了理论基础。近年来,在工业中应用模糊控制已取得了许多成果。电致伸缩自动加工装置是精加工和超精加工领域里一种先进的加工装置,由于加工系统本身存在有滞环效应,属于非线性系统。过去一直试图用传统控制理论设计一种调节器去解决加工精度问题,结果自然是束手无策。现在采用一种模糊 PD 调节器,此问题迎刃而解。在机器人电液位置伺服系统中,由于液压驱动的关节式机器人工作速度较高,并且随着运动位置的不同,各动力器件所受到的负载和惯量的变化范围较大,非线性严重。在这样的条件下,要在较大的工作范围内达到较高的位置控制精度和良好的动态性能是比较困难的。针对这一问题,一种机器人模糊控制器取得了较好的控制效果。在纺织厂,浆纱机经纱退绕张力控制也是模糊控制问题。浆纱机纱线张力的影响因素很多,如卷绕力矩变化、浆液及烘房温度不当、引纱辊及压浆辊速度变化、导纱辊与张力辊等安装或转动不良、经轴制动不好,甚至像制动带与制动轮之间的衬垫因长期使用而磨损,都会影响纱线张力变化,这些原因使我们无法建立起有效的数学模型。可以看出,退绕张力控制问题具有非线性和时变性的特征。此外,从对气动回路中使用的电气比例阀的研究上来看,比例阀具有滞环性质,是一种非线性元件,无疑这也会使经轴退绕环节产生非线性。不但影响退绕张力的各因素本身具有模糊性,而且各因素和退绕张力之间的关系也具有模糊性,其数学模型难以建立,就

是建立起来也是无意义的。所以,浆纱机经纱退绕张力控制问题是一个模糊控制问题。模糊控制除上述应用外,还应用于发动机管理系统、核电站控制系统、水泥强度报警系统、卷烟厂香精微流量控制系统,以及新一代的地铁服务、智能电梯、家电控制等。可以预言,模糊技术将很快渗透到人们生活的各个方面。

传统的自动控制,包括经典理论和现代控制理论中有一个共同的特点,即控制器的综合设计都要建立在被控对象准确的数学模型的基础上,但是在实际工业生产中,很多系统的影响因素很多,十分复杂,建立精确的数学模型特别困难,甚至是不可能的。这种情况下,模糊控制的诞生就显得意义重大。因为模糊控制不用建立数学模型,根据实际系统的输入输出结果数据,参考现场操作人员的运行经验,就可对系统进行实时控制。模糊控制实际上是一种非线性控制,从属于智能控制的范畴。模糊控制获得巨大成功的主要原因在于它具有如下一些突出特点:

- 模糊控制是一种基于规则的控制,它直接采用语言型控制规则,其依据是现场操作人员的控制经验或相关专家的知识,在设计中不需要建立被控对象的精确数学模型,因而使得控制机理和策略易于接受与理解,设计简单,便于应用。

- 由工业过程的定性认识出发,比较容易建立语言控制规则,因而模糊控制对那些数学模型难以获取,动态特性不易掌握或变化非常显著的对象非常适用。

- 基于模型的控制算法及系统设计方法,由于出发点和性能指标的不同,容易导致较大差异;但一个系统语言控制规则却具有相对的独立性,利用这些控制规律间的模糊连接,容易找到折中的选择,使控制效果优于常规控制器。