高等学校控制科学与技术教材

模糊控制及其 MATLAB 仿真

石辛民　郝整清　编著

清 华 大 学 出 版 社
北京交通大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书着重介绍模糊控制的基本概念、基本原理和基本方法。主要内容包括模糊控制的数学和逻辑学基础、模糊控制器的设计、模糊控制系统的仿真以及神经网络在模糊控制中的应用。

本书内容深入浅出、循序渐进、叙述简明、精练实用，可以作为控制科学和技术类专业本科及研究生学习“模糊控制”的教材，也可供与此相关的科研人员和从事控制工程的技术人员阅读和参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。
版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010－62782989　13501256678　13801310933

图书在版编目（CIP）数据

模糊控制及其 MATLAB 仿真/石辛民，郝整清编著. —北京：清华大学出版社；北京交通大学出版社，2008.2
（高等学校控制科学与技术教材）
ISBN 978－7－81123－029－1

Ⅰ.模… Ⅱ.①石… ②郝… Ⅲ.模糊控制-系统仿真-计算机辅助计算-软件包，MATLAB-高等学校-教材 Ⅳ.TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 009922 号

责任编辑：吴嫦娥
出版发行：清 华 大 学 出 版 社　邮编：100084　电话：010－62776969　http：//www.tup.com.cn
　　北京交通大学出版社　邮编：100044　电话：010－51686414　http：//press.bjtu.edu.cn
印 刷 者：北京瑞达方舟印务有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：185×260　印张：16.5　字数：422 千字
版　　次：2008 年 3 月第 1 版　2008 年 3 月第 1 次印刷
书　　号：ISBN 978－7－81123－029－1/TP·401
印　　数：1～4 000 册　定价：27.00 元

本书如有质量问题，请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评，我们表示欢迎和感谢。
投诉电话：010－51686043，51686008；传真：010－62225406；E-mail：press@bjtu.edu.cn。

前　言

自动控制理论经历了经典控制和现代控制两个重大发展阶段，已经相当完善。然而，对于许多复杂庞大的被控对象及其外界环境，有时难以建立有效的数学模型，因而无法采用常规的控制理论做定量分析计算和进行控制，这时就要借助于新兴的智能控制。智能控制是人工智能、控制论和运筹学相互交叉渗透形成的新兴学科，它具有定量和定性相结合的分析方法，融会了人类特有的推理、学习和联想等智能。模糊控制是在智能控制中适用面宽广、比较活跃且容易普及的一个分支。

人类在感知世界、获取知识、思维推理、相互交流及决策和实施控制等诸多的实践环节中，对知识的表述往往带有“模糊性”的特点，这使得所包含的信息容量有时比“清晰性”的更大，内涵更丰富，也更符合客观世界。1965 年美国的控制论专家 L. A. Zadeh 教授创立了模糊集合论，从而为描述、研究和处理模糊性事物提供了一种新的数学工具。模糊控制就是利用模糊集合理论，把人的模糊控制策略转化为计算机所能接受的控制算法，进而实施控制的一种理论和技术。它能够模拟人的思维方式，因而对一些无法构建数学模型的系统可以进行有效的描述和控制，除了用于工业，也适用于社会学、经济学、环境学、生物学及医学等各类复杂系统。

由于模糊控制应用广泛、便于普及，不仅许多高等学校开设了模糊控制课程，而且不少工程技术人员也渴望了解和学习这方面的知识。集作者多年从事“模糊信息处理”、“模糊控制”方面的科研和教学经验，编写了这本模糊控制方面的入门书。本书在选材、安排上均遵从“入门”和“实用”的原则，着重介绍模糊控制的基本概念、基本原理和基本方法。本着“重视实用性和可操作性”的工程教育思想，内容选取和叙述形式不追求“理论的高深和数学推导的严谨”，在学术性和实用性发生冲突时，学术性服从实用性。

本书主要内容包括模糊控制的数学和逻辑学基础、模糊控制器的设计、模糊控制系统的仿真及神经网络在模糊控制中的应用。

在介绍模糊控制的理论时，按照模糊控制的需要介绍必要的基础理论和基本知识，而不是把模糊控制仅仅看作模糊理论的一种应用，片面追求模糊理论的系统性和完整性，致使读者在模糊数学和模糊逻辑的演算上花费很多精力。

在介绍模糊规则的生成方法时，不仅介绍了根据操作经验建立规则的常用方法，而且通过实例介绍了从系统的输入、输出数据中获取模糊规则的方法。

在介绍模糊控制器时，集中介绍了实用范围较广的两种类型模糊控制器：Mamdani 型和 Sugeno 型。前一种模糊控制器的输入量和输出量都是模糊子集，输出量需要经过清晰化才能用于执行机构；而后一种模糊控制器的输入量是模糊子集，输出量为数字量，可以直接用于推动执行机构。

考虑到科技工作者学习模糊控制理论时需要实践及其实际需求，把模糊控制理论和计算机仿真进行了有机融合，较详细地介绍了 MATLAB 仿真技术及其在模糊控制方面的应用。通过仿真练习，弥补了学习理论过程中难以实践的缺陷，加深对模糊控制的理解，也使在解

决实际问题时有所借鉴，为进一步深入学习和应用模糊控制理论打下良好的基础。

神经网络是智能控制的一个重要分支，本书简要介绍了它在模糊控制中的应用，着重举例介绍了 MATLAB 中“自适应神经模糊系统”的使用方法。

本书配有教学课件，可从北京交通大学出版社网站下载，或发邮件至 cbswce@jg.bjtu.edu.cn 或 aushixm@126.com 索取。

吴嫦娥编辑对本书的出版起了极大的推动作用，在此深表谢意！

由于模糊控制领域的理论目前尚不成熟，还存在许多未解难题，虽然作者在“模糊领域”有十余年的科研教学经验，但毕竟水平有限，恳请广大读者不吝赐教！

编　者

（E-mail：aushixm@126.com）

2008 年 3 月

目　　录

第 1 章　引言 …… (1)
1.1　自动控制理论的发展历程 …… (1)
1.2　智能控制概况 …… (2)
1.2.1　智能控制的发展简况 …… (2)
1.2.2　智能控制的几个重要分支 …… (4)
1.3　模糊控制 …… (6)
1.3.1　模糊控制解决的问题 …… (7)
1.3.2　模糊控制的发展简史 …… (7)
1.3.3　模糊控制的特点及展望 …… (9)
思考与练习题 …… (10)
第 2 章　模糊控制的数学基础 …… (11)
2.1　清晰向模糊的转换 …… (11)
2.1.1　经典集合的基本概念 …… (11)
2.1.2　模糊集合 …… (14)
2.2　隶属函数 …… (22)
2.2.1　确定隶属函数的基本方法 …… (23)
2.2.2　常用隶属函数 …… (24)
2.3　F 集合的运算 …… (26)
2.3.1　F 集合的基本运算 …… (26)
2.3.2　模糊集合的基本运算规律 …… (29)
2.3.3　F 集合运算的其他定义 …… (31)
2.4　模糊关系及其运算 …… (32)
2.4.1　经典关系 …… (32)
2.4.2　模糊关系 …… (34)
2.4.3　模糊关系的运算 …… (38)
2.4.4　F 关系的合成 …… (40)
2.5　模糊向清晰的转换 …… (45)
2.5.1　模糊集合的截集 …… (45)
2.5.2　模糊关系矩阵的截矩阵 …… (47)
2.5.3　模糊集合转化为数值的常用方法 …… (47)
思考与练习题 …… (51)
第 3 章　模糊控制的逻辑学基础 …… (53)
3.1　二值逻辑简介 …… (53)
3.1.1　判断 …… (54)

3.1.2 推理 …… (58)
3.2 自然语言的模糊集合表示 …… (59)
3.2.1 一些自然词语的 F 集合表示 …… (59)
3.2.2 模糊算子 …… (60)
3.3 模糊逻辑和近似推理 …… (63)
3.3.1 模糊命题 …… (64)
3.3.2 常用的两种基本模糊条件语句 …… (65)
3.3.3 近似推理及其合成法则 …… (74)
3.4 T－S 型模糊推理 …… (81)
3.4.1 双输入、单输出系统的 T－S 型模糊推理模型 …… (81)
3.4.2 MISO 系统的 T-S 模型 …… (85)
思考与练习题 …… (87)
第 4 章 模糊控制器的设计 …… (89)
4.1 模糊控制系统的基本组成 …… (89)
4.1.1 从传统控制系统到模糊控制系统 …… (89)
4.1.2 模糊控制器的结构 …… (92)
4.2 Mamdani 型模糊控制器的设计 …… (93)
4.2.1 Mamdani 型模糊控制器的基本组成 …… (93)
4.2.2 量化因子和比例因子 …… (94)
4.2.3 模糊化和清晰化 …… (98)
4.2.4 模糊控制规则 …… (102)
4.2.5 模糊自动洗衣机的设计 …… (113)
4.3 T－S 型模糊控制器的设计 …… (117)
4.3.1 T－S 型模糊模型 …… (118)
4.3.2 T－S 型模糊系统设计要点 …… (121)
4.4 F 控制器和 PID 控制器的结合 …… (121)
4.4.1 F－PID 复合控制器 …… (121)
4.4.2 F－PID 复合控制器的其他形式 …… (122)
4.4.3 用模糊控制器调节 PID 控制器的参数 …… (123)
思考与练习题 …… (125)
第 5 章 模糊控制系统的 MATLAB 仿真 …… (127)
5.1 Simulink 仿真入门 …… (127)
5.1.1 MATLAB 中的仿真模块库 …… (128)
5.1.2 仿真模型图的构建 …… (135)
5.1.3 动态系统的 Simulink 仿真 …… (142)
5.2 模糊推理系统的设计与仿真 …… (149)
5.2.1 模糊推理系统的图形用户界面简介 …… (149)
5.2.2 模糊推理系统编辑器 …… (150)
5.2.3 隶属函数编辑器 …… (156)

5.2.4 模糊规则编辑器 …… (161)
5.2.5 模糊规则观测窗 …… (172)
5.2.6 FIS 输出量曲面观测窗 …… (179)
5.2.7 用 GUI 设计 Mamdani 型模糊系统举例 …… (182)
5.2.8 用 GUI 设计 Sugeno 型模糊系统举例 …… (189)
5.3 模糊控制系统的设计与仿真 …… (196)
5.3.1 FIS 与 Simulink 的连接 …… (196)
5.3.2 构建模糊控制系统的仿真模型图 …… (200)
5.3.3 通过仿真对系统进行分析 …… (208)
思考与练习题 …… (218)
第 6 章 神经网络在模糊控制中的应用 …… (219)
6.1 神经网络的基本原理 …… (219)
6.1.1 神经网络发展历史 …… (219)
6.1.2 神经元的生理结构 …… (221)
6.1.3 神经元的数学模型 …… (222)
6.1.4 人工神经网络模型 …… (224)
6.1.5 神经网络模型的学习方法 …… (225)
6.1.6 BP 型神经网络原理简介 …… (227)
6.2 神经模糊控制 …… (228)
6.3 用自适应神经模糊系统建立 FIS …… (229)
6.3.1 ANFIS 图形用户界面简介 …… (229)
6.3.2 用 Anfis 建立 FIS 的步骤 …… (233)
6.3.3 用 Anfis 建立 FIS 举例 …… (245)
思考与练习题 …… (255)
参考文献 …… (256)

第1章　引　　言

本章介绍自动控制学科发展的历史概况，叙述从开环控制到智能控制的发展进程，并简单介绍智能控制的几个主要分支——专家控制、模糊控制和神经网络控制。

1.1　自动控制理论的发展历程

自动控制就是在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置（控制器），使机器、设备或生产过程（被控对象）的某个工作状态或参数（被控量），能够自动地按照设定的规律或指标运行的设备或系统。

自从美国数学家维纳在20世纪40年代创立控制论以来，自动控制从最早的开环控制起步，然后是反馈控制、最优控制、随机控制，再到自适应控制、自学习控制、自组织控制，一直发展到自动控制的最新阶段——智能控制。整个自动控制理论的发展进程，是由简单到复杂、由量变到质变的辩证发展过程，如图1－1所示。

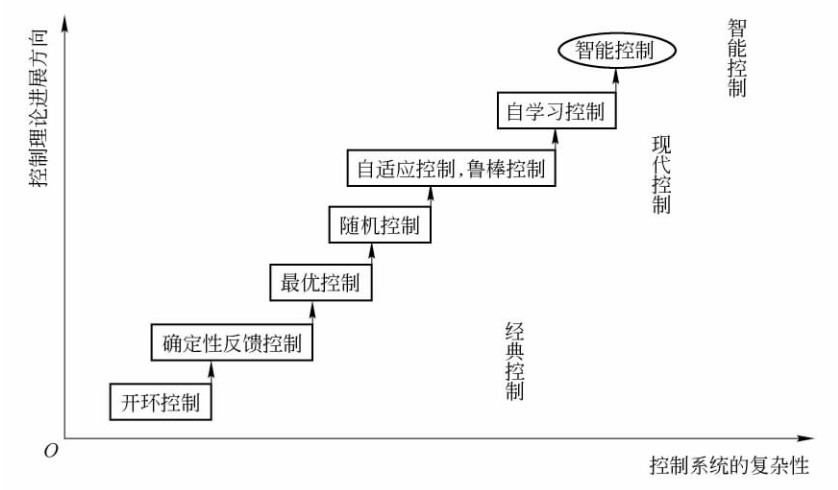


图1－1　控制科学的发展过程

传统控制理论经历过经典控制理论和现代控制理论两个具有里程碑意义的重要阶段，它们的共同点都是基于被控对象的清晰数学模型，即控制对象和干扰都得用严格的数学方程和函数表示，控制任务和目标一般都比较直接明确，控制对象的不确定性和外界干扰只允许在很小的限度内发生。

一个系统的数学模型就是对系统运动规律的数学描述，微分方程、传递函数和状态方程是描述控制系统的三种最基本的数学模型，其中微分方程是联系其他两者的纽带。经典控制理论主要研究单变量、常系数、线性系统数学模型，经常使用传递函数为基础的频域分析法；现代控制理论主要研究多输入-多输出线性系统数学模型，经常使用微分方程或状态方

程为基础的时域分析法。传统控制方法多是解决线性、时不变性等相对简单的被控系统的控制问题，这类系统完全可以用线性、常系数、集总参量的微分方程予以描述。

但是，许多实际的工业对象和控制目标常常并非都是如此理想，特别是遇到系统的规模庞大、结构复杂、变量众多，加之参数随机多变、参数间又存在强耦合或系统存在大滞后等错综复杂情况时，传统控制理论的纯粹数学解析结构则很难表达和处理。由于研究对象和实际系统具有非线性、时变性、不确定性、不完全性或大滞后等特性，无法建立起表述它们运动规律和特性的数学模型，于是便失去了进行传统数学分析的基础，也就无法设计出合理的理想经典控制器。况且，在建立数学模型时一般都得经过理想化假设和处理，即把非线性化为线性，分布参数化为集中参数，时变的化为定常的，等等。因此，数学模型和这些实际系统的巨大差距，使之很难对其实现有效的传统自动控制，于是便出现了某些仿人智能的工程控制与信息处理系统，产生和发展了智能控制。

大量的生产实践表明，有许多难以建立数学模型的复杂系统和繁难工艺过程，可以由熟练技术工人、工程师或专家的手工操作，依靠人类的智慧，能够获得满意的控制效果。例如，欲将一辆汽车倒入指定的车位，确实无法建立起这一过程的数学模型。然而熟练的司机却可以非常轻松地把它倒入预定的位置。类似的问题使人们自然想到，能否在传统控制中加入人类的认知、手工控制事物的经验、能力和逻辑推理等智能成分，充分利用人的操作技巧、控制经验和直觉推理，把人的因素作为一个有机部分融入控制系统呢？能否根据系统的实际输入、输出类似于熟练技工那样进行实时控制，甚至使机器也具有人类的学习和自适应能力，进而用机器代替人类进行复杂对象和系统的实时控制呢？

1.2 智能控制概况

20 世纪 60 年代以来，由于空间技术、计算机技术及人工智能技术的发展，控制界学者在研究自组织、自学习控制的基础上，为了提高控制系统的自学习能力，开始注意将人工智能技术与方法应用于工程控制中，逐渐形成了智能控制。

1.2.1 智能控制的发展简况

所谓智能控制，就是通过定性和定量相结合的方法，针对被控对象和控制任务的复杂性、不确定性和多变特性，有效自主地实现繁杂信息的处理、优化和判断，以致决策，最终达到控制被控系统的目的。

1. 智能控制的诞生

1966 年，J. M. Mendal 首先提出将人工智能技术应用于飞船控制系统的设计；其后，1971 年，美籍华人科学家傅京逊首次提出智能控制这一概念，并归纳了三种类型的智能控制系统。

① 人作为控制器的控制系统：这种控制系统具有自学习、自适应和自组织的功能。

② 人-机结合作为控制器的控制系统：机器完成需要连续进行的、快速计算的常规控制任务，人则完成任务分配、决策、监控等任务。

③ 无人参与的自主控制系统：用多层智能控制系统，完成问题求解和规划、环境建模、

传感器信息分析和低层的反馈控制任务，如自主机器人。

1985年8月，美国电机及电子工程师学会（Institute of Electrical and Electrical Engineers，IEEE）在纽约召开了第一届智能控制学术讨论会，随后成立了智能控制专业委员会；1987年1月，在美国举行第一次国际智能控制大会，标志着智能控制领域的形成。

智能控制即含有人类智能的控制系统，它具有学习、抽象、推理、决策等功能，并能根据环境（包括被控对象或被控过程）信息的变化做出适应性反应，从而使机器能够完成以前只能由人可以完成的控制任务。

2. 智能控制的三元论

智能控制是一门交叉学科，傅京逊教授于1971年首先提出智能控制（Intelligent Control，IC）是人工智能与自动控制的交叉，即智能控制的二元论。在此基础上，美国学者G. N. Saridis于1977年引入运筹学，提出了三元论的智能控制概念，认为智能控制是人工智能（Artificial Intelligence，AI）、自动控制（Automatic Control，AC）和运筹学（Operational Research，OR）等形成的交叉学科，即 $IC = AI \cap AC \cap OR$，它们的含义如下：

AI——人工智能，是一个用来模拟人类思维的知识处理系统，具有记忆、学习、信息处理、形式语言、启发推理等功能，可以应用于判断、推理、预测、识别、决策、学习等各类问题；

AC——自动控制，描述系统的动力学特性，实现无人操作而能完成预设目标的一种理论体系，一般具有动态反馈功能；

OR——运筹学，是一种定量优化方法，如线性规划、网络规划、调度、管理、优化决策和多目标优化方法等。

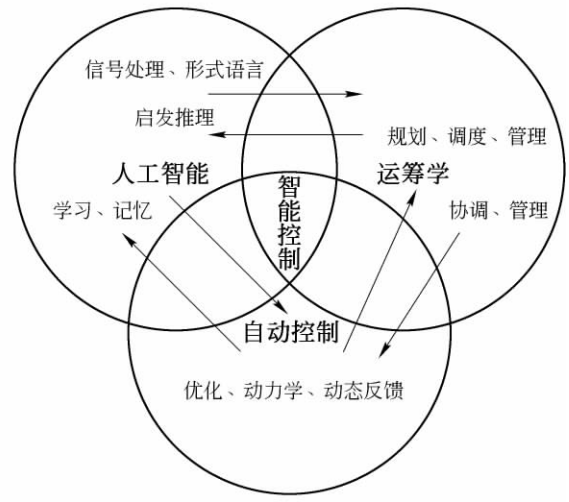


图1-2 智能控制的三元论示意图

基于三元论的智能控制概念如图1-2所示。

现在，为多数人所接受的三元论智能控制概念，除了“智能”与“控制”外，还强调了更高层次控制中的调度、规划和管理作用，为分层、递阶智能控制提供了理论依据。

3. 智能控制的特点

在分析方法上具有定量与定性相结合的智能控制，应该具有以下一些功能。

1）学习功能

智能控制器能通过从外界环境所获得的信息进行学习，不断积累知识，使系统的控制性能得到改善。

2）适应功能

智能控制器具有从输入到输出的映射关系，可实现不依赖于模型的自适应控制，当系统某一部分出现故障时，仍能进行控制。

3）自组织功能

智能控制器对复杂的分布式信息具有自组织和协调的功能，当出现多目标冲突时，它可以在任务要求的范围内自行决策，主动采取行动。

4）优化功能

智能控制能够通过不断优化控制参数和寻找控制器的最佳结构形式，获得整体最优的控制性能。

当前控制界都把复杂系统的控制作为控制科学与工程学科发展的前沿方向，大型复杂工业过程作为重要的背景领域，以其特有的复杂性推动着这一学科的发展。在过去二十几年中，把传统控制理论与模糊逻辑推理、神经网络和遗传算法等人工智能技术相结合，逐渐形成了人工智能控制理论的雏形。从标志智能控制体系形成的 1985 年第一届智能控制学术会议至今，二十多年的发展历史表明，智能控制在一些大型复杂的，尤其是非线性、时变性、不确定性、不完全性之类难以建立清晰数学模型的控制系统中，发挥了重要作用，正在成为自动控制的前沿学科之一。

1.2.2 智能控制的几个重要分支

在过去几十年中，利用智能控制理论和技术的研究成果，已经可以构造出适用于不同领域的智能控制系统。智能控制是以知识为基础的，研究知识表示、获取和利用为中心的知识工程是其重要基础。其中几个应用广泛的重要分支是专家系统、模糊控制和神经网络控制等，它们在一些非线性或难以建立系统数学模型的工程控制中，发挥着重要作用。

1. 专家系统（Expert System）

专家系统或专家控制是智能控制的重要分支之一。实际上，它是一类包含知识和推理的智能计算机程序，它把某领域专家级的知识、判断、规则、感知、经验、识别、思考和信息，用计算机语言予以表述，即把人类语言符号直接转换成计算机语言符号，使机器代替专家解决某些专门问题。

专家系统分直接和间接两种。在直接专家控制系统中，专家系统直接给出控制信号，影响控制过程；在间接专家控制系统中，专家系统位于外环或监控级中，只是通过层间界面指导内环或执行级的工作，专家系统是通过调整控制器的结构或参数，间接地影响控制过程。

专家系统的发展可分为三个阶段。

1）初创期（1965—1971）

第一代专家系统 DENLDRA 和 MACSMA 的出现，标志着专家系统的诞生。其中 DENLDRA 为推断化学分子结构的专家系统，是由专家系统的奠基人、斯坦福（Stanford）大学计算机系的 Feigenbaum 教授领导的研究小组研制成功的。MACSMA 是用于数学运算的数学专家系统，由麻省理工学院完成。

2）成熟期（1972—1977）

在此期间，斯坦福大学研究开发了最著名的专家系统 MYCIN——血液感染病诊断专家系统，这个成果标志着专家系统从理论开始走向应用。另一个著名的专家系统 HEARSAY——语音识别专家系统的出现，则标志着专家系统的理论走向成熟。

3）发展期（1978—现在）

在此期间，专家系统走向广泛的应用领域，专家系统数量猛增，仅1987年研制成功的专家系统就有1 000余种。

专家系统可以解决的问题一般包括解释、预测、设计、规划、监视、修理、指导和控制等。目前，专家系统已经广泛地应用于医疗诊断、语音识别、图像处理、金融决策、地质勘探、石油化工、教学、军事、计算机设计等各种领域。

2. 模糊控制（Fuzzy Control）

随着控制对象的复杂性、非线性、滞后性和耦合性的增加，人们获得精确知识量的能力相对减少，运用传统精确控制的可能性也在减小。正像“L. A. Zadeh不相容原理”所说的那样：“当一个系统复杂性增大时，人们能使其清晰化的能力将会降低，达到一定阈值时，复杂性和清晰性将是相互排斥的”，这时便产生了模糊控制。

人类思维的主要根据是概念模式和思维图像，而不是数量，但是计算机工作的依据则正好相反。作为人类思维外壳的自然语言，当然就带有模糊性，这是计算机所不能理解的。模糊控制是以模糊集合理论和模糊逻辑推理为基础，把专家用自然语言表述的知识和控制经验，通过模糊理论转换成数学函数，再用计算机进行处理。模糊理论形式上是利用规则进行逻辑推理，但其逻辑值可取0与1间连续变化的任何值，因此可以采取数值计算方法予以处理。这样，很容易把模糊理论表述的人类智能和数学表述的物理系统相结合加以利用，从而使人的智能成为控制系统的一部分。

模糊控制把控制对象作为“黑箱”，先把人对“黑箱”的操作经验用语言表述成“模糊规则”，让机器根据这些规则模仿人进行操作来实现自动控制。为此，模糊理论给出了一套系统而有效的方法，可以将人类用自然语言表述的知识或规则转换成数字或数学函数，让机器也能识别、处理和利用。模糊控制是一种基于自然语言控制规则、模糊逻辑推理的计算机控制技术，它不依赖于控制系统的数学模型，而是依赖于由操作经验、表述知识转换成的“模糊规则”，因此实现了人的某些智能，属于一种智能控制。

虽然模糊控制和专家系统一样都需要利用专家知识，但专家系统是把人类语言符号直接转换成计算机语言，而模糊控制则是把人类语言首先先转换成数字或数学函数，再与物理系统结合在一起，加以利用。

3. 神经网络控制（Neural Networks Control）

人们在对人的智能进行模拟时，是从心理和生理两个方面进行研究的，分别对应于认知事物和处理信息两个方面。人工神经网络是对人脑生理结构及其功能模拟研究的成果，是基于模仿人类大脑的结构和功能而构成的一种信息处理系统，具有很多与人类智能相似的特点。这是一门高度综合的交叉学科，已经应用并渗透到工程的各个领域，在诸如模式识别、知识处理、传感技术、控制工程、电力工程、化工工程、环境工程、生物工程及机器人等方面都有成功的事例。它的研究已经有了几十年的历史，大体分成三个阶段。

1）形成期（1981年以前）

从20世纪20年代起，人们就开始对人脑的生理结构及工作原理进行探索。1943年心理学家W. S. McCulloch和数学家W. Pitts提出了神经元数学模型，简称M－P模型。1949

年心理学家 D. O. Hebb 提出神经元间触突联系可变的假说，进而得出 Hebb 学习律，成为人工神经网络学习算法的起点。

1950—1968 年形成了人工神经网络研究的第一次高潮。这期间的代表人物有 Marvin Minsky、Frank Rosenblatt、Bernard Widrow 等，他们的重要成果是单级感知器及其电子线路模拟。但是，1969—1981 年神经网络的研究处于低潮，这是因为 1969 年出版了《Perceptron（感知器）》一书，它反映了 M. L. Minsky 和 S. Papert 的研究成果，他们从理论上证明当时的单级感知器无法解决许多非常简单的问题，引起人们对前期研究工作的反思，不少人退出了这一研究领域。不过在反思和探索中建立了一系列的基本网络模型，如 Arbib 的竞争模型、Kohonen 的自组织映射模型、Grossberg 的自共振模型、Fukushima 的新认知机、Rumellhart 等人的并行分布处理模型，以及 1982 年 J. Hopfield 将 Lyapunov 函数引入人工神经网络……这些工作都对后来的研究起到了积极的推动作用。

2）发展期（1982—1990）

这一时期是从 1982 年 J. Hopfield 提出循环网络并建立了人工神经网络稳定性判据开始的，1984 年 Hopfield 又设计了 Hopfield 网络，并用电路实现了它。1985 年 Hinton、Sejnowsky、Rumelhart 等人提出了 Boltzmann 机，建立了多层网的学习算法。1986 年美国并行分布处理（PDP）研究小组的 Rumelhart 等人重新提出多层前馈网络的反向学习算法——BP 算法，这对人工神经网络的研究和应用起到了重要的推动作用，为神经网络的应用开辟了广阔的发展前景。1987 年，在美国加州举行了第一届神经网络国际会议，并成立了国际神经网络学会，掀起了用神经网络来模拟人类智能的热潮。

3）再认识与应用研究期（20 世纪 90 年代以来）

20 世纪 90 年代以来，人们对以前的神经网络理论进行了重新认识和改进，并着手于它的实际应用研究，许多学者致力于根据实际系统的需要，改进原有模型和基本算法。虽然这段时期神经网络的研究取得了很大进展，尤其是在应用方面，但是它还不能和传统的计算方法并驾齐驱，它的不精确推理使之计算精度远不能满足用户的需求。目前还无法对人工神经网络的工作机理进行严格的解释，这都需要对它进行进一步的深入研究。

目前人们集中于下述三方面的研究：开发已有模型的应用，并根据实际运行改造它及相应算法；探索新的理论突破，建立新的专用和通用模型；进一步对生物神经网络系统进行研究，丰富对人脑的认识。

神经网络擅长于从输入-输出数据中学习有用的知识，总结出规律性东西。神经网络控制是把模仿人脑生理结构和工作机理的数学模型——人工神经网络跟自动控制相结合的产物，它具有人脑可以并行处理信息、模式识别、记忆和自学习的能力，因而对于多维、非线性、强耦合和不确定的复杂系统能够很好地实现自动控制。

1.3 模糊控制

模糊控制是基于丰富操作经验总结出的、用自然语言表述控制策略，或通过大量实际操作数据归纳总结出的控制规则，用计算机予以实现的自动控制。它与传统控制的最大不同，在于不需要知道控制对象的数学模型，而需要积累对设备进行控制的操作经验或数据。

1.3.1 模糊控制解决的问题

用传统控制方法对一个系统进行控制时，首先要建立控制系统的数学模型，即描述系统内部物理量（或变量）之间关系的数学表达式，必须得知道系统模型的结构、阶次、参数等。通常建立系统数学模型的方法有分析法和实验法两种：分析法是对系统各部分的运动机理进行分析，根据它们活动的物理或化学规律列出运动方程；实验法是人为地向系统施加某种测试信号，记录其输出响应，用适当的数学模型去逼近输入-输出间的关系。传统的控制理论都是以被控对象和控制系统的数学模型为基础，进行数学分析和研究的理论。

然而在工程实践中人们发现，有些复杂的控制系统，虽然不能建立起数学模型，无法用传统控制方法进行控制，可是凭着丰富的实际操作经验，技术工人却能够通过“艺术性”的操作获得满意的控制效果。例如，对于容器液位控制问题，如图1-3所示。如果影响液位的因素变化无常，液位的变化无规律可循，根本无法写出表示液位变化的数学函数$h(t)$，这就很难对它进行传统的自动控制。

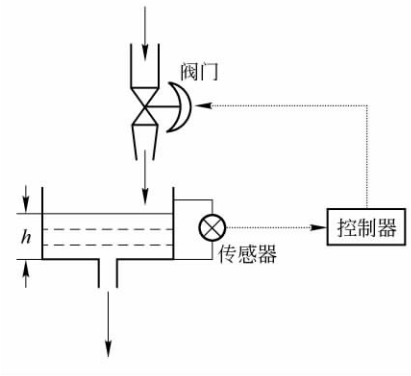


图1-3 液位控制系统示意图

然而熟练的技术工人，却能总结自己多年的操作经验，根据液位的高低状态，巧妙地操作进液阀门使容器的液位保持恒定。他们总结出调节进液阀门开度的操作规则，无非是用语言表述的几条简单规则：

① 如果液位正好，则进液阀门开度不变；

② 如果液位偏低，则增大进液阀门开度；

③ 如果液位偏高，则减小进液阀门开度；

④ 如果液位正好而流速快，则逐渐减小进液阀门开度；

⑤ 如果液位正好而流速慢，则逐渐增大进液阀门开度。

那么，能否让计算机根据这些语言表述的“模糊”规则，模仿人类实现自动控制呢？

类似的控制对象还有很多，它们都相当于一个“黑箱”，由于不知道其中的结构、机理，无法用数学语言描述其运动规律，也就无法建立数学模型，自然无法用传统方法对它实现自动控制。例如，各类窑炉的燃烧过程、有机物的发酵过程、具有非线性强耦合大滞后的复杂系统等，都因为诸如控制对象过于庞大复杂、机理欠明、检测不全、存在大滞后等各种原因，而无法建立起清晰的数学模型。然而，人们却可以根据多年的工作实践，把控制它们的操作经验总结成类似上述的语言操作规则，按照这些带有模糊性的、用自然语言表述的规则，实现对它们的有效控制。模糊控制基本上解决了用计算机模仿人类对这类系统进行的自动控制问题。

1.3.2 模糊控制的发展简史

模糊控制把人类自然语言表述的控制策略，通过模糊集合和模糊逻辑推理转化成数字或数学函数，再用计算机去实现预定的控制。由于模糊控制是以人的操作经验为基础，而不是

依赖于控制系统的数学模型，实际上是把人的智能融入了控制系统，自然实现了人的某些智能，所以它属于一种智能控制。

模糊控制的发展历程大致可分为以下三个阶段。

1. 形成期（1974 年以前）

1965 年，美国加州大学自动控制系 L. A. Zedeh 教授把经典集合与 J. Lukasiewicz 的多值逻辑融为一体，用数字或函数表述和运算含有像“冷”、“热”之类纯属主观意义的模糊概念，创立了模糊集合理论，这就开创了模糊控制数学基础的研究。其后，出现了许多研究模糊集合理论和模糊逻辑推理的成果：1968 年提出了模糊算法概念，1970 年提出模糊决策，1971 年提出模糊排序，1973 年，L. A. Zedeh 引入语言变量这一概念，提出用模糊If - Then 规则来量化人类模糊语言的知识规则，建议把模糊逻辑应用于控制领域，从而奠定了模糊控制的理论基础。

2. 发展期（1974—1979 年）

1974 年，伦敦大学教授 E. H. Mamdani 博士利用模糊逻辑开发了世界上第一台模糊控制的蒸汽机，从而开创了模糊控制的历史。1975 年英国的 P. J. King 把模糊集合理论应用于反应炉的温度自动控制系统；1976 年荷兰的 D. V. Nautal Lemke 等人把模糊理论用于多变量非线性控制热水厂热交换过程；1977 年 Mamdani 和 Pappis 把模糊理论应用于马路十字路口的交通管理……

3. 高性能模糊控制阶段（1979 年—现在）

1979 年起 L. P. Holnblad 和 Ostergard 先后在瑞典石灰重烧窑、丹麦水泥窑等工业设备上应用了模糊控制。1983 年日本富士电机开创了模糊控制在日本的第一项应用——水净化处理。1987 年日本富士电机致力于模糊逻辑元件的开发与研究，并在仙台地铁线上采用了模糊控制技术；1989 年日本将模糊控制应用于电冰箱、洗衣机、微波炉等消费产品上，把模糊控制的应用推向了高潮。

很快模糊控制得到了广泛的应用。例如，在炼钢、化工、家用电器、人文社科、经济系统以及医学心理等领域，要得到正确而且精密的数学模型是相当困难的，但是却具有大量用语言表述的控制规则和只能用语言表述的性能指标，操作人员似乎成了整个系统的组成部分。对于这类问题，靠传统控制方法实现自动控制是非常困难的，但是用模糊控制的方法却可以很容易地进行处理和解决，模糊控制的广泛应用，促进了这项技术的发展。

随着计算机及其相关技术的发展和模糊控制的广泛应用，出现了许多模糊硬件系统，进一步推动了模糊控制理论的发展和应用。模糊控制也由最初的经典模糊控制发展到自适应模糊控制、专家模糊控制和基于神经网络的自学习模糊控制。1992 年在美国召开了第一届 IEEE 模糊系统国际会议（IEEE International Conference on Fuzzy System）。1993 年美国 IEEE 神经网络协会创办了国际性模糊专业杂志《Fuzzy System（模糊系统）》，从此模糊控制被人们公认为是智能控制的一个重要分支。

附：历史上有关模糊控制的一些重要论文见表 1 - 1。

表 1-1 模糊控制发展中的一些重要论文举例

年份	作 者	论 文 名 称
1972	Zadeh L. A	A rationale for fuzzy control（模糊控制原理）
1975	Mamdani E. H，et al	An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller（蒸汽机的模糊逻辑控制）
1977	Ostergard J. J	Fuzzy logic control of a heat exchange process（热交换器的模糊控制）
1977	Willaey D，et al	Optimal control of fuzzy systems（模糊系统的优化控制）
1980	Fukami S，et al	Some consideration of fuzzy conditional inference（模糊条件推理）
1983	Takagi T，et al	Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions（模糊控制规则的获取）
1984	Sugeno M，et al	Fuzzy parking control of model car（模型汽车停放的模糊控制）
1985	Togai M，et al	Expert system on a chip：An engine for real-time approximate reasoning（模糊芯片）
1986	Yasunobu S，et al	Predictive fuzzy control and its application for automatic container crane operation system（预测模糊控制及其应用）
1993	Jose R，et al	Fuzzy logic control（模糊逻辑控制）

1.3.3 模糊控制的特点及展望

模糊控制理论，特别是应用方面在20世纪80年代末90年代初取得了突飞猛进的发展，能被人们广泛接受，是因为它有以下一些优点。

1）模糊控制器的设计不依赖于被控对象的精确数学模型

模糊控制是以人对被控对象的操作经验为依据而设计控制器的，故无须知道被控对象的内部结构及其数学模型，这对于传统控制无法实现自动化的复杂系统进行自动控制非常有利。

2）模糊控制易于被操作人员接受

作为模糊控制核心的控制规则是用自然语言表述的。例如，像“锅炉温度太高，则减少加煤量”这样的控制规则，很容易被操作人员接受，便于进行人机对话。

3）便于用计算机软件实现

模糊控制规则通过模糊集合论和模糊推理理论，可以转换成数学函数，这样很容易和其他物理规律结合起来，通过计算机软件实现控制策略。

4）鲁棒性和适应性好

通过专家经验设计的模糊规则，可以对复杂被控对象进行有效的控制，经过实际调试后其鲁棒性和适应性都容易达到要求。

模糊控制是一种反映人类智慧的智能控制方法，由于它的适应面广和易于普及，使它成为智能控制领域最活跃、最重要和最实用的分支之一。尤其是它作为传统控制的补充和改进方法，常与传统控制相结合被应用于各种复杂系统的自动化中。目前已经在工业控制及其他领域，诸如炼钢、化工、人文系统、经济系统及医学心理系统中，特别是家用电器自动化领域和其他很多行业中解决了传统控制方法无法或者难以解决的实际问题，取得了令人瞩目的

成效，引起越来越多的控制理论研究人员和相关领域的广大工程技术人员的极大兴趣。

但是，我们也应该看到，就目前的状况来看，模糊控制尚缺乏重大的理论性突破，无论在理论上，还是在应用上都有待于进一步的深入研究和探讨，特别是在下述几个方面：

① 需要对模糊系统的建模、模糊规则的确立和模糊推理方法等进行深入研究，特别是对于非线性复杂系统的模糊控制；

② 模糊控制系统的创建和分析方法仍停留在初级阶段，稳定性理论还不成熟，这些都需要进一步探讨；

③ 需要进一步开发和推广简单、实用的模糊集成芯片和通用模糊系统硬件；

④ 需要对模糊控制系统的设计方法加强研究，把现代控制理论、神经网络与模糊控制进行更好的结合、相互渗透，在多方面进行深入研究，以便构成更多、更好的模糊集成控制系统。

模糊控制理论的提出，是控制思想领域的一次深刻变革，它标志着人工智能发展到了一个新阶段。特别是对那些时变的、非线性的复杂系统，在无法获得被控对象清晰数学模型的时候，利用具有智能性的模糊控制器，可以给出较为有效的自动控制方法。因此，模糊控制既有广泛的实用价值，又有很大的发展潜力。

思考与练习题

1. 在控制学科发展过程中，经历过哪些发展阶段？它们各有什么特点？
2. 经典控制理论和现代控制理论的主要差异是什么？
3. 你怎样理解三元论智能控制的含义？智能控制有什么特点？
4. 专家系统和模糊系统都在利用人类经验、专家知识，其处理方法的差异何在？
5. 你怎么看待“模糊控制属于智能控制”这个论断？
6. 模糊控制和经典控制的最大区别是什么？
7. 经典控制和模糊控制各以什么为设计的基础？
8. 专家系统和模糊控制都需要专家知识，它们的差异在哪里？
9. 举例说明模糊控制最善于解决哪一类控制问题，为什么？
10. 举例说明模糊控制的特点，你如何看待它的发展前景？