



普通高等教育 电气工程 系列规划教材
自动化
普通高等教育 机电类规划教材

Intelligent Control Technology

智能控制技术

第2版

© 浙江大学 韦巍 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程系列规划教材
自动化
普通高等教育机电类规划教材

智能控制技术

第 2 版

韦 巍 编著
王耀南 主审



机械工业出版社

智能控制作为控制理论发展的第三个发展阶段,是人工智能、认知科学、模糊数学、生物控制论、学习理论等在控制论的交叉与结合。本书总结了近几年来智能控制的研究成果,详细阐述了智能控制的基本概念、工作原理和设计方法。本书的主要内容包括:智能控制的基本概念、模糊控制的理论基础、模糊控制系统、人工神经网络模型、神经网络控制论等,最后简单介绍了智能控制的集成技术。本书在深入系统地介绍智能控制设计理论和应用方法的同时,还给出了一些设计实例和 MATLAB 算法例程。

本书选材新颖,系统性强,通俗易懂,突出理论联系实际,并配有一定数量的习题和上机操作题,适合于初学者学习智能控制的基本理论和方法。本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、计算机科学与技术、电子信息工程等专业高年级本科生的教材,也适合于相关专业的工程技术人员阅读和参考。

(本书责任编辑邮箱:jinacmp@163.com)

图书在版编目(CIP)数据

智能控制技术/韦巍编著. -2版. -北京:机械工业出版社,2015.10
普通高等教育电气工程及其自动化系列规划教材 普通高等教育机电类规划教材

ISBN 978-7-111-51626-2

I. ①智… II. ①韦… III. ①智能控制-高等学校-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 221955 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 刘丽敏 版式设计:霍永明

责任校对:佟瑞鑫 封面设计:张静 责任印制:李洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2016 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 10.25 印张 · 250 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-51626-2

定价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第2版前言

本书自从1999年问世以来，至今已经印刷了16次，被很多学校选为智能控制类课程的教材，并得到了教师与学生的认可与好评。读者反映，本书的体系结构简练，知识体系统一，内容循序渐进、深入浅出，并附有例题和习题，很方便对内容的理解及对概念的掌握。同时，许多读者也对本书的改进提出了宝贵的建议。为了适应智能控制技术教学的新需求，作者对本书第1版进行了修订，除了在第2版中保持第1版的优点之外，还着重对一些智能控制关键知识点进行延伸介绍，并增加了一些智能控制的新技术，尤其是对智能控制技术广泛使用的优化计算方法进行了介绍。同时，也对原书中的某些不足和文图错误进行修正。具体包括：

1) 在第三章增加了模糊控制系统的基本类型，介绍了模糊控制系统中常用的 Takagi-Sugeno 型模糊控制器。

2) 模糊控制系统设计举例更加结合自动化专业的典型系统。例如通过对倒立摆的控制，说明了模糊控制理论也能解决自动化领域的一些典型控制难题，使读者对模糊控制系统的应用前景加深了认识。

3) 结合目前广泛使用的 MATLAB 数学工具，给出了 BP 学习算法的 MATLAB 例程。

4) 在动态神经网络模型这一节，增加了近几年来有较好应用前景的回归神经网络模型。

5) 对第六章做了较大的改动，增加了遗传学习算法、蚁群学习算法等例程，删除了仿人控制和混沌控制的内容。

此次修订得到机械工业出版社吉玲编辑的大力支持，在此表示感谢。由于作者的学识水平和教学经验都很有限，书中的缺点和错误在所难免，殷切希望广大读者和专家给予批评和指正。

编者
于浙江大学

第 1 版前言

自从 1971 年傅京逊教授首先提出“智能控制”概念以来，智能控制的研究领域已经发生了相当大的变化。在短短的 20 多年间智能控制已经从原来的二元论（人工智能和控制论）发展为四元论，即人工智能（符号主义和联接主义）、模糊集理论、运筹学和控制论，而且正处于蓬勃发展之中。智能控制作为一门新兴学科，它的发展得益于许多学科，如人工智能、认知科学、现代控制理论、模糊集理论、生物控制论和学习理论等。因此，它是一门综合性很强的多学科交叉的新学科，被称为自动控制理论的第三发展阶段。智能控制研究的领域相当广泛，而且仍然处于不断的完善和发展之中，虽然其理论体系远没有经典控制理论那样成熟，但它表现出来的强大生命力已引起世界各国专家学者的关注。

本书是根据 1997 年 4 月在武汉召开的工业电气自动化专业教学指导委员会会议中制订的《智能控制技术》教材编写大纲编写的。智能控制技术的内容相当丰富，本书编写的宗旨是尽量将一些比较成熟的、实用性较强的内容包含进来。同时，考虑到智能控制的发展，简单地介绍了智能控制的最新进展情况。本书共分六章，总学时为 32 学时。绪论简要地介绍了智能控制的发展、智能控制的几种主要方法以及智能控制系统的结构和特点。本章建议学时数为 2。考虑到本专业学生通常没有预修过“模糊数学”，本书第二章首先介绍模糊控制的理论基础，其重点内容是模糊集数学理论，主要介绍与模糊控制相关的模糊集理论、隶属度函数、模糊语言变量和模糊逻辑推理。本章建议学时数为 8。第三章重点介绍模糊控制系统的设计，包括模糊控制系统的结构设计和设计方法，详细给出了两类模糊控制系统设计的实例，最后对模糊 PID 控制的设计作了简单的讨论。本章建议学时数为 8。第四章首先简要介绍了神经元模型和神经网络模型，重点介绍了神经控制中使用较频繁的两类神经网络模型（前后传播神经网络模型和动态神经网络模型）的结构和学习算法。本章建议学时数为 6。第五章介绍了神经网络控制器的结构、学习机制、非线性离散动态系统的神经网络建模和控制。本章建议学时数为 6。第六章主要介绍了智能控制的最新发展，着重讨论了模糊神经网络控制器的结构设计和学习算法，最后对学习控制、仿人控制和混沌控制作了说明。本章建议学时数为 2。目录中带“*”的章节为选讲内容。

本书是在浙江大学“自动控制理论及应用”“工业自动化”“电力传动及其自动化”三个硕士点的研究生课程“智能控制理论及应用”讲义的基础上改编而成的。为了适合本专业高年级本科生的教学需要，本书在选材上更加着重于基础性和实用性。本书承蒙湖南大学电气工程系王耀南教授的仔细审阅，并得到了上海大学陈伯时教授、浙江大学蒋静坪教授和陈希矛教授的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。在本书的编写过程中也参阅和引用了国内外专家学者的最新研究成果，在此谨致谢意。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 jinacmp@163.com 索取。

由于作者的学识水平和教学经验都有限，书中的缺点和错误在所难免，殷切期望广大读者和专家给予批评和指正。

编者

目 录

第 2 版前言	
第 1 版前言	
第一章 绪论	1
第一节 智能控制的发展过程	1
一、智能控制问题的提出	1
二、智能控制的发展	2
第二节 智能控制的主要方法	4
一、专家系统和专家控制	4
二、模糊控制	5
三、神经网络控制	5
四、学习控制	6
第三节 智能控制系统的构成原理	7
一、智能控制系统的结构	7
二、智能控制系统的特点	8
三、智能控制系统研究的数学工具	9
习题和思考题	10
第二章 模糊控制的理论基础	11
第一节 引言	11
一、模糊控制的发展	11
二、模糊控制的特点	12
三、模糊控制的定义	12
第二节 模糊集合论基础	13
一、模糊集合的概念	13
二、模糊集合的运算	16
三、模糊集合运算的基本性质	17
四、隶属度函数的建立	18
五、模糊关系	23
第三节 模糊逻辑、模糊逻辑推理和合成	29
一、二值逻辑	30
二、模糊逻辑及其基本运算	31
三、模糊语言逻辑	32
四、模糊逻辑推理	36
五、模糊关系方程的解	43
本章小结	46
习题和思考题	46
第三章 模糊控制系统	48
第一节 模糊控制系统的组成	48
一、模糊化过程	49
二、知识库	49
三、推理决策逻辑	53
四、精确化计算	54
第二节 模糊控制器的设计	55
一、模糊控制器的结构设计	55
二、模糊控制器的基本类型	57
三、模糊控制器的设计原则	59
四、模糊控制器的常规设计方法	59
第三节 模糊控制器的设计举例	64
一、流量控制的模糊控制器设计	64
二、倒立摆的模糊控制器设计	67
第四节 模糊 PID 控制器的设计	69
一、模糊控制器和常规 PID 的混合结构	70
二、常规 PID 参数的模糊自整定技术	72
本章小结	73
习题和思考题	74
上机实验题	74
第四章 人工神经网络模型	75
第一节 引言	75
一、神经元模型	76
二、神经网络的模型分类	77
三、神经网络的学习算法	78
四、神经网络的泛化能力	81
第二节 前向神经网络模型	82
一、单一人工神经元	82
二、单层神经网络结构	83
三、多层神经网络结构	83
四、多层传播网络的 BP 学习算法	84
五、BP 学习算法的 MATLAB 例程	89
第三节 动态神经网络模型	92
一、带时滞的多层感知器网络	93
二、Hopfield 神经网络	94
三、回归神经网络	100
本章小结	102
习题和思考题	103
第五章 神经网络控制论	104

第一节 引言	104	四、单一神经元控制法	130
一、神经网络控制的优越性	104	本章小结	132
二、神经网络控制器的分类	105	习题和思考题	132
三*、神经网络的逼近能力	108	第六章* 智能控制的集成技术	134
第二节 非线性动态系统的神经网络		第一节 模糊神经网络控制	134
辨识	109	一、模糊神经网络的结构	135
一、神经网络的辨识基础	109	二、模糊神经网络的学习算法	137
二、神经网络辨识模型的结构	111	第二节 基于神经网络的自适应控制	143
三*、非线性动态系统神经网络的		一、自适应控制技术	143
辨识	115	二、神经网络的模型参考自适应控制	143
第三节 神经网络控制的学习机制	121	第三节 智能控制的优化算法	147
一、监督式学习	122	一、遗传学习算法	147
二、增强式学习	124	二、蚁群学习算法	149
第四节 神经网络控制器的设计	125	三、迭代学习算法	150
一、神经网络直接逆模型控制法	125	本章小结	152
二、直接网络控制法	127	参考文献	153
三、多神经网络自学习控制法	129		

第一章 绪 论

第一节 智能控制的发展过程

一、智能控制问题的提出

自从1932年奈奎斯特(H. Nyquist)发表反馈放大器的稳定性论文以来,控制理论学科的发展已走过80多年的历程,其中20世纪40年代中到50年代末是经典控制理论的成熟和发展阶段,20世纪60年代到70年代是现代控制理论的形成和发展阶段。经典控制理论主要研究的对象是单变量常系数线性系统,它只适用于单输入-单输出控制系统。经典控制理论的数学模型一般采用传递函数表示,分析和设计方法主要是基于根轨迹法和频率法,其主要贡献在于将PID调节器成功地广泛应用于常系数单输入-单输出线性控制系统中。到了50年代末,经典控制理论已经成熟。进入60年代以后,由于数字计算机技术的发展为解决复杂多维系统的控制提供了技术支撑,因此在此期间,以庞特里亚金的极大值原理、贝尔曼(Bellman)的动态规划、卡尔曼(Kalman)的线性滤波和估计理论为基石的现代控制理论得到了迅速发展,并形成了以最优控制(二次型最优控制、 H^∞ 控制等)、系统辨识和最优估计、自适应控制等为代表的现代控制理论分析和设计方法。系统分析的对象已转向多输入-多输出线性控制系统。现代控制理论的数学模型主要是状态空间描述法。随着要研究的对象和系统越来越复杂,如智能机器人系统、复杂生物化学过程控制等,仅仅借助于数学模型描述和分析的传统控制理论已难以解决复杂系统的控制问题,尤其是在具有如下特点的一类现代控制工程中:

(1) **不确定性系统** 传统的控制理论都是基于数学模型的控制,这里的模型包括控制对象和干扰模型。传统控制通常认为模型是已知的或经过辨识可以得到的,对于不确定性系统,传统控制虽然也有诸如自适应控制和鲁棒控制等,但一般仅限于系统参数在一定范围内缓慢变化的情况,其优化控制的范围是很有限的。

(2) **高度非线性系统** 传统的控制理论主要是面向线性系统,其对于具有高度非线性的控制对象,虽然也有一些非线性控制方法可供使用,但总的来说,非线性控制理论还很不成熟,有些方法又过于复杂,无法得以广泛的应用。

(3) **复杂任务的控制要求** 在传统的控制系统中,输入信息比较单一,其控制的任务一般是要求输出量为定值(调节系统),或者要求输出量跟随期望的运动轨迹(跟踪系统)。而现代复杂系统要以各种形式(视觉、听觉等)将周围环境信息作为系统的输入信息,对这些信息的处理和融合,依靠传统控制理论的方法已难以奏效,尤其是对于复杂的控制任务,诸如复杂工业过程控制系统、计算机集成制造系统(CIMS)、航天航空控制系统、社会经济管理系统、环保及能源系统等,传统的控制理论都无能为力。

综上所述,复杂的控制系统普遍表现出系统的数学模型难以通过传统的数学工具来描

述。因此,采用数学工具或计算机仿真技术的传统控制理论已经无法解决此类系统的控制问题。然而,人们在生产实践中看到,许多复杂生产过程难以实现的目标控制,可以通过熟练的操作工、技术人员或专家的操作获得满意的控制效果。那么,如何有效地将熟练的操作工、技术人员或专家的经验知识和控制理论结合起来去解决复杂系统的控制问题就是智能控制原理研究的目标所在。智能控制的概念主要是针对控制对象及其环境、目标和任务的不确定性和复杂性而提出来的。一方面,这是由于实现了大规模复杂系统的控制需要,另一方面,也是由于现代计算机技术、人工智能和微电子学等学科的高速发展,使控制的技术工具发生了革命性的变化。可以说,一个智能化的工业时代已经到来。这一时代的明显标志就是智能自动化,而作为智能自动化基础的“智能控制”的应运而生则是其历史的必然。

智能控制的研究工作最初是以机器人控制为背景而提出来的。近几年来,随着研究工作的相对深入,智能控制应用重点已从机器人控制问题向复杂工业过程控制、智能电网、智能交通、智慧城市等领域发展。同时,随着人工智能技术、计算机网络技术和云计算等技术的发展,智能控制理论的应用也会越来越广泛。

二、智能控制的发展

智能控制是新兴的理论和新技术,是一门边缘交叉学科。它为解决那些用传统方法难以解决的复杂系统提供了有效的控制理论和方法。智能控制的发展得益于许多学科,其中包括人工智能、现代自适应控制、最优控制、神经网络、模糊逻辑、学习理论、生物控制和激励学习等。以上每一个学科均从不同侧面部分地反映了智能控制的理论和方法。同时,智能控制又是一门尚不成熟的学科。智能控制的技术是随着数字计算机、人工智能等技术研究的发展而发展起来的。智能控制的概念最早是由美国普渡大学的美籍华人傅京逊教授提出的,他在1965年发表的论文中首先提出把人工智能的启发式推理规则用于学习系统,为控制技术迈向智能化揭开了崭新的一页。接着,J. M. Mendel于1966年提出了“人工智能控制”的新概念。1967年,Leondes和Mendel首次使用了“智能控制(Intelligent Control)”一词,并把记忆、目标分解等技术应用于学习控制系统。1971年,著名学者K. S. Fu(傅京逊)又从发展学习控制的角度首次提出了“智能控制”这一新兴学科,并在参考文献[5]中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 由于人具有识别、决策和控制等能力,因此对于不同的控制任务、不同的对象及环境情况,人作为控制器的控制系统,具有自学习、自适应和自组织的功能,能自动采取不同的控制策略以适应不同的情况。

(2) 人机结合作为控制器的控制系统 在这样的系统中,机器完成那些连续进行的并需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 最典型的例子是自主机器人,这时的自主式控制器需要完成问题求解和规划、环境建模、传感信息分析和低层的反馈控制等任务。它实际上是一个多层的智能控制系统。

Saridis对智能控制的发展也做出了重要贡献。他在1977年出版了《随机系统的自组织控制》^[6]一书,其后又发表了一篇综述文章“走向智能控制的实现”^[7]。在这两篇著作中,他从控制理论发展的观点,论述了从通常的反馈控制到最优控制、随机控制,再到自适应控

制、自学习控制、自组织控制，并最终向智能控制发展的过程。

在智能控制的发展中，另一位学者 K. J. Astrom 也作出了重要贡献。他在“专家控制”^[8]这一著名文章中，将人工智能中的专家系统技术引入控制系统，组成了另一种类型的智能控制系统。借助于专家系统技术，将常规的 PID 控制、最小方差控制、自适应控制等不同方法有机地结合在一起，能根据不同情况分别采取不同的控制策略，也可以结合许多逻辑控制的功能，如起停控制、自动切换、越限报警以及故障诊断等。这种专家控制的方法已有许多成功应用的实例。

至此，智能控制新学科形成的条件逐渐成熟。1985年8月，IEEE在美国纽约召开了“第一届智能控制学术讨论会”。来自美国各地的60位从事自动控制、人工智能和运筹学研究的专家学者参加了这次学术讨论会。会上集中讨论了智能控制原理和智能控制系统的结构。这次会议之后不久，在IEEE控制系统学会内成立了IEEE智能控制专业委员会。1987年1月，在美国费城由IEEE控制系统学会和计算机学会联合召开了“智能控制国际会议”。这是有关智能控制的第一次国际会议，来自美国、欧洲、日本、中国以及其他发展中国家的150位代表出席了这次学术盛会。提交大会报告和分组宣读的60多篇论文以及专题讨论显示出智能控制的长足进展；同时也说明了由于许多新技术问题的出现以及相关技术的发展，需要重新考虑控制领域和相近学科。这次会议是一个里程碑，它表明智能控制作为一门独立学科，正式在国际上形成起来。在我国智能控制也受到了广泛的重视，中国自动化学会于1993年、1997年、2000年、2002年、2004年分别在北京、西安、合肥、上海、杭州组织召开了五届“全球华人智能控制与智能自动化大会(CWCI-CIA)”，已成立的学术团体有中国人工智能学会、中国人工智能学会智能机器人专业委员会和中国自动化学会智能自动化专业委员会等。智能控制作为一门独立的新学科也在我国建立起来了，并且已经被广泛应用于工业、农业、服务业，以及军事、航空等众多领域。

近年来，模糊控制作为一种新颖的智能控制方式越来越受到人们的重视。如果说，传统的控制是从被控对象的数学结构上去考虑进行控制的，那么，模糊控制则是从人类智能活动的角度和基础上去考虑，实施控制的。1965年，美国加州大学自动控制系专家扎德(L. A. Zadeh)在《信息与控制》杂志上先后发表了“模糊集”^[13](Fuzzy Sets)和“模糊集与系统”(Fuzzy Sets & System)两篇论文，奠定了模糊集理论和应用研究的基础。1968年扎德首次公开发表其“模糊算法”。1973年发表了语言与模糊逻辑相结合的系统建立方法。1974年伦敦大学E. H. Mamdani博士首次尝试利用模糊逻辑，成功地开发了世界上第一台模糊控制的蒸汽引擎。可以认为1965~1974年是模糊控制发展的第一阶段，即模糊数学发展和成形阶段；1974~1979年为第二阶段，这是产生简单控制器的阶段；1979年至今是发展高性能模糊控制的第三阶段。1979年T. J. Procky和E. H. Mamdani共同提出了自学习概念，使系统性能大为改善。1983年日本富士电机开创了日本的第一项应用——水净化处理。之后，富士电机致力于模糊逻辑元件的开发和研究，并于1987年在仙台地铁线采用了模糊逻辑控制技术。1989年又把模糊控制消费品推向高潮，从而使得日本逐渐成为这项技术的主导国家。今天，模糊逻辑控制技术已经应用到相当广泛的领域之中。模糊控制正是试图模仿人所具有的模糊决策和推理功能来解决复杂问题的控制难点。

神经网络控制是智能控制的重要分支，是基于结构模拟人脑生理结构而形成的智能控制

和辨识方法。随着人工神经网络应用研究的不断深入,新的神经网络控制模型在不断推出。自从1943年 McCulloch 和 Pitts 提出形式神经元数学模型以来,神经网络的研究就开始了它的艰难历程。20世纪50年代至80年代是神经网络研究的萧条期,此时,专家系统和人工智能技术发展相当迅速,但仍有不少学者致力于神经网络模型的研究。如 Albus 在1975年提出的 CMAC 神经网络模型,利用人脑记忆模型建立了一种分布式的联想查表系统, Grossberg 在1976年提出的自共振理论解决了无导师指导下的模式分类。到了20世纪80年代,人工神经网络进入了发展期。1982年, Hopfield 提出了 HNN 模型,解决了回归网络的学习问题。1986年 PDP 小组的研究人员提出的多层前向传播神经网络 BP 学习算法,实现了有导师指导下的网络学习,从而为神经网络应用开辟了广阔的前景。神经网络在许多方面试图模拟人脑的功能,并不依赖于精确的数学模型,因而显示出强大的自学习和自适应功能。

近20年来,智能控制作为一门新兴的理论技术得到了迅速发展,其专家控制、学习控制、混沌控制、遗传优化控制、多智能体理论等大量新颖的智能控制方法都取得了长足的进步。可以预见,随着系统理论、人工智能和计算机技术的发展,智能控制必将出现更大的发展,并在实际中获得广泛的应用。

第二节 智能控制的主要方法

智能控制已不是一个学科所能覆盖的,应结合多学科的知识来解决复杂系统的控制问题,这一点已得到专家们的共识。基于这种认识,人们将各种学科大胆地应用于控制中,引出了许多新理论和新方法。下面就几个最主要的智能控制方法作简单的介绍。

一、专家系统和专家控制

专家系统是美国斯坦福大学 E. A. Feigenban 于1965年开创的人工智能研究的新领域。20世纪80年代专家系统的概念和方法被引入控制领域,形成了专家控制。它是智能控制的一个重要部分。专家控制是将专家系统的理论和技术与控制理论和方法有机地结合起来,在未知环境下模仿专家的智能,实现对系统的有效控制。从本质上来看,专家系统是通过获取表示知识和结果的规则库来实现的。规则的最简单形式是 IF-THEN 结构。一般的专家控制系统由三部分组成。其一是控制机制,它决定控制过程的策略,即控制哪一个规则被激活、什么时候被激活等。其二是推理机制,它实现知识之间的逻辑推理以及与知识库的匹配。其三是知识库,包括事实、判断、规则、经验以及数学模型。专家系统的迅速发展为人工智能学科的研究注入了强有力的生机,为人工智能走向实用奠定了基础。然而,专家系统还有许多问题有待进一步研究探讨,主要有:①专家经验知识的获取问题,如何获取专家知识是主要“瓶颈”之一;②动态知识的获取问题,专家控制系统与一般的专家系统不同,是一个动态系统,如何在控制过程中自动更新和扩充知识,并满足实时控制的快速准确性需求是非常关键的;③专家控制系统的稳定性分析是另一个研究难题,它涉及的对象具有不确定性或非线性,它实现的控制基于知识模型,采用启发式逻辑和模糊逻辑,专家控制系统本质是非线性的,目前的稳定性分析方法很难直接用于专家控制系统。因此,单一依靠专家系统的控制已无法满足实时性、灵活性、自适应性等的要求。专家系统的混合控制技术正引起各国专

家的关注,如神经网络专家系统、专家模糊控制等。

二、模糊控制

由于模糊控制主要是模仿人的控制经验而不是依赖控制对象模型,因此模糊控制器实现了人的某些智能。它也是智能控制的一个重要分支。

模糊控制主要研究那些在现实生活中广泛存在的、定性的、模糊的、非精确的信息系统的控制问题。这方面的工作首先是从扎德建立的模糊集理论开始的。模糊集理论是介于逻辑计算和数值计算之间的数学工具,它形式上利用规则进行逻辑推理,但其逻辑值取值可以在0与1之间连续变化,采取数值方法而非符号方法进行处理。模糊控制是基于模糊集理论的新颖控制方法,它有三个基本组成部分:模糊化、模糊决策、精确化计算。模糊控制的工作过程简单地可描述为:首先将信息模糊化,然后经模糊推理规则得到模糊控制输出,再将模糊指令进行精确化计算最终输出控制值。

由于模糊控制不需要精确的数学模型,因此它是解决不确定性系统控制的一种有效途径。模糊控制对信息进行简单的模糊处理会导致被控系统控制精度的降低和动态品质变差,为了提高系统的精度就必然要增加量化等级,从而导致规则的迅速增多,因此影响规则库的最佳生成,且增加系统复杂性和推理时间。所以混合模糊控制的思想已引起大家重视。例如,模糊PID调节器、模糊专家系统、自适应自学习模糊控制、模糊神经网络控制等。

模糊控制虽然在很多方面取得了较大进展,但在理论方面还有众多问题需要研究。主要表现为如下:

- 1) 适合于解决工程上普遍适用的稳定性分析方法、稳定性评价方法和可控性评价方法。
- 2) 模糊控制规则设计方法的研究,包括模糊集合隶属函数的设定方法、量化等级、规则的最小实现、规则和隶属度函数的自动生成等问题。
- 3) 模糊控制器参数的最优调整理论的确立及修正推理规则的学习方式。
- 4) 模糊动态系统的辨识方法。
- 5) 模糊预测系统的设计方法和提高计算速度的算法。

综上分析,模糊控制既具有广泛的应用前景,又具有许多待开发和研究的理论问题。因此,可以说模糊控制是智能控制不可缺少的一个组成部分。

三、神经网络控制

神经元控制是模拟人脑神经中枢系统智能活动的一种控制方式。由于它具有适应能力和学习能力,因此适合用作智能控制的研究工具。从本质上看,神经网络是一种不依赖模型的自适应函数估计器,而通常的函数估计器则依赖于数学模型。当给定的样本不是原来训练样本时,神经网络也能给出合适的输出,即它具有泛化能力。

神经网络通过神经元以及相互连接的权值,初步实现了生物神经系统的部分功能。神经网络具有非线性映射能力、并行计算能力、自学习能力以及强鲁棒性等优点,已广泛地应用于控制领域,尤其是非线性系统领域。一般说来,按神经网络在系统中的作用不同划分,有两种功能模式:神经网络建模和神经网络控制。神经网络具有可以逼近非线性函数的能力,因此它可以用来建立非线性系统的动态模型。神经网络建模主要是利用对象

的先验知识（即输入输出数据），经过误差校正反馈，修整网络权值，最终得到一个具有输入输出对应关系的函数模型。虽然神经网络对非线性系统建模起到重要的作用，但是还存在很多需进一步研究的问题，如对不同的非线性对象神经网络模型的选取及其结构的确定问题、被辨识系统的充分激励问题、带噪声系统的辨识问题、辨识算法的快速性和收敛性问题等。神经网络控制就是利用神经网络这一工具而构成的控制系统。

神经网络在控制系统中所起的作用可大致分为四大类：第一类是在基于模型的各种控制结构中充当对象的模型；第二类是充当控制器；第三类是在控制系统中起优化计算的作用；第四类是与其他智能控制，如专家系统、模糊控制相结合，为其提供非参数化对象模型、推理模型等。神经网络控制系统用于控制非线性对象时，由于神经网络的自学习、自适应性使其与线性系统的自适应控制系统有许多相同之处，因此有一些结论可以平移。但是，由于从线性系统到非线性系统有着本质的差异，要解决非线性系统自适应控制的问题，如稳定性问题、结构问题、鲁棒性问题等都要比线性系统难得多，因此在神经网络的控制中，存在的潜在研究问题也相当多。无疑，神经网络控制是一个挑战性很强的领域。由于它可能是处理非线性不确定系统的有效途径，因此，近年来受到了国内外学者们的高度重视。

四、学习控制

学习控制是智能控制的一部分。学习是人类的主要智能之一，学习控制正是模拟人类自身各种优良控制调节机制的一种尝试。Tsyppkin曾对学习下过一个定义，即作为一种过程，它通过重复各种输入信号，并从外部校正该系统，从而使系统对特定输入具有特定响应。学习控制系统是一个能在其运行过程中逐步获得被控过程及环境的非预知信息，积累控制经验，并在一定评价标准下进行估值、分类、决策和不断改善系统品质的自动控制系统。

学习控制根据系统工作对象的不同可分为两大类：一类是对具有可重复性的被控对象利用控制系统的先前经验，寻求一个理想的控制输入，而这个寻求的过程就是对被控对象反复训练的过程，这种学习控制又称为迭代学习控制；另一类是自学习控制系统，它不要求被控过程必须是重复性的，能通过在线实时学习，自动获取知识，并将所学的知识用来不断地改善具有未知特征过程的控制性能。尽管学习控制已研究了多年，但与实际要求还相距较远。学习控制的主要缺点是在线学习能力差、学习速度较慢，跟不上实时控制要求。

智能优化是学习控制的重要组成部分。各个智能优化算法尽管它们的原理不同，但是它们都是根据所需要优化问题的目标函数来寻找最优解。传统优化算法是根据目标函数的数学等特征来寻找最优解的，而智能优化算法是根据自然生活现象来模拟目标函数以寻找最接近最优解的优化解。智能优化算法的迭代过程必须包括以下三个步骤：第一步，在目标函数的可行范围以事先定好的寻找优化解的策略来寻找一组初始解；第二步，继续在目标函数的可行范围内按照原来的策略继续寻找优化解；第三步，判断结束条件是否满足，当满足的时候在所有解中选出最优解，如果不满足，则返回第二步继续执行直至结束条件满足。

目前智能优化方法包括遗传学习算法、蚁群算法、粒子群算法、模拟退火算法、免疫学习算法等。

第三节 智能控制系统的构成原理

一、智能控制系统的结构

由于智能控制尚处于发展阶段,关于什么是智能控制系统目前还没有非常明确一致的定义。但可以这样说,智能控制系统是实现某种控制任务的一种智能系统。所谓智能系统是指具备一定智能行为的系统,具体地说,若对于一个问题的激励输入,系统具备一定的智能行为,它能够产生合适的求解问题的响应,这样的系统便称为智能系统。对于智能系统,激励输入是任务要求和反馈的传感信息等,产生的响应则是合适的决策和控制作用。

从系统的角度看,智能行为是一种从输入到输出的映射关系。这种映射关系并不能用常规的数学方法来精确地加以描述,因此它可以看成一种不依赖于模型的自适应估计。例如一个钢琴家弹奏一支优美的乐曲,这是一种很高级的智能行为,其输入是乐谱,输出是手指的动作和力度。显然输入输出之间存在某种映射关系,这种映射关系可以定性地进行说明,但却难以用数学的方法来精确地加以描述,也不可能由别人来精确加以复现。

按照智能控制系统的定义,其典型的原理结构可由六部分组成,包括执行器、传感器、感知信息处理、规划与控制、认知和通信接口。“执行器”是系统的输出,对外界对象发生作用。一个智能系统可以有許多甚至成千上万个执行器,为了完成给定的目标和任务,对它们必须进行协调。执行器有电机、定位器、阀门、电磁线圈、变送器等。“传感器”产生智能系统的输入,它可以是关节位置传感器、力传感器、视觉传感器、距离传感器、触觉传感器等。传感器用来监测外部环境和系统本身的状态。传感器向“感知信息处理”单元提供输入。感知信息处理单元将传感器得到的原始信息加以处理,并与内部环境模型产生的期望值进行比较。感知信息处理单元在时间和空间上综合观测值与期望值之间的异同,以检测发生的事件,识别环境的特征、对象和关系。“认知”主要用来接收和储存信息、知识和数据,对它们进行分析、推理,并作出行动的决策,送至规划和控制部分。“通信接口”除建立人机之间的联系外,还建立系统各模块之间的联系。“规划与控制”是整个系统的核心,它根据给定的任务要求、反馈的信息以及经验知识,进行自动搜索、推理决策、动作规划,最终产生具体的控制作用。“广义对象”包括通常意义下的控制对象和外部环境。例如在智能机器人系统中,机器人的手臂、被操作物体以及所处环境,统称为广义对象。智能控制系统典型的原理结构如图 1-1 所示。

从智能控制系统的功能模块结构观点出发, Saridis 提出了分层递阶结构的智能控制系统,其结构如图 1-2 所示。其中,执行级一般需要比较准确的模型,以实现具有一定精度要求的控制任务;协调级用来协调执行级的动作,它不需要精确的模型,但需要具备学习功能以便在再现的控制环境中改善性能,并能接收上一级的模糊指令和符号语言;组织级将操作员的自然语言翻译成机器语言,进行组织决策和规划任务,并直接干预低层的操作。对于执行级,识别的功能在于获得不确定的参数值或监督系统参数的变化;对于协调级,识别的功能在于根据执行级送来的测量数据和组织级送来的指令产生合适的协调作用;对于组织级,识别的功能在于翻译定性的命令和其他输入。这种分层递阶的智能控制系统具有两个明显的特点:

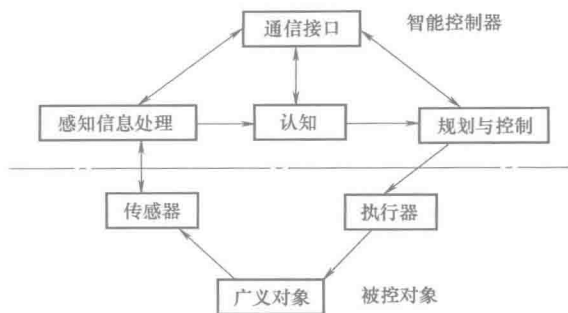


图 1-1 智能控制系统典型的原理结构

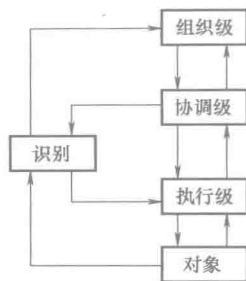


图 1-2 智能控制系统的分层递阶结构

- 1) 对控制而言，自上而下的精度越来越高。
 - 2) 对识别而言，自下而上信息反馈越来越粗略，相应的智能程度也越来越高。
- 这种分层递阶的智能控制系统已经成功地应用于机器人、智能交通、智能电网等领域。

二、智能控制系统的特点

智能控制系统具备以下特点：

- 1) 智能控制系统一般具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型表示的混合控制过程。它适用于含有复杂性、不完全性、模糊性、不确定性和不存在已知算法的生产过程。
- 2) 智能控制器具有分层信息处理和决策机构。它实际上是对人的神经结构和专家决策机构的一种模仿。
- 3) 智能控制器具有非线性和变结构的特点。
- 4) 智能控制器具有多目标优化能力。
- 5) 智能控制器能够在复杂环境下学习。

从功能和行为上分析，智能控制系统应该具备以下一个或多个功能：

- 1) 自适应 (Self-adaptation) 功能：与传统的自适应控制相比，这里所说的自适应功能具有更广泛的含义，它包括更高层次的适应性。所谓的智能行为实质上是一种从输入到输出的映射关系，它可以看成是不依赖于模型的自适应估计，因此具有很好的适应性能。即使是在系统的某一部分出现故障时，系统也能正常工作。体现了它的很强的适应性。
- 2) 自学习 (Self-recognition) 功能：一个系统，如能对一个过程或其环境的未知特征所固有的信息进行学习，并将得到的经验用于进一步估计、分类、决策或控制，从而使系统的性能得以改善，那么便称该系统具有自学习功能。
- 3) 自组织 (Self-organization) 功能：对于复杂的任务和多传感信息具有自行组织和协调的功能。该组织行为还表现为系统具有相应的主动性和灵活性，即智能控制器可以在任务要求的范围内自行决策，自主采取行动；而当出现多目标冲突时，各控制器可在一定限制条件下自行解决这些冲突。
- 4) 自诊断 (Self-diagnosis) 功能：对于智能控制系统表现为系统自身的故障检测能力。
- 5) 自修复 (Self-repairing) 功能：是指当智能控制系统检测到自身部件的故障行为时，系统将自动启动相关程序替换故障模块，甚至可以通过自身对程序和模块的修复，实现控制系统在无人干预下恢复正常的功能。

三、智能控制系统研究的数学工具

传统的控制理论主要采用微分方程、状态方程及复变函数等作为研究的数学工具，这些工具本质都是数值计算的方法；人工智能主要采用符号处理、一阶谓词逻辑等作为研究的数学工具。显然，两者有着根本的区别。而智能控制研究的数学工具则是上述两方面的交叉和结合，它主要有以下几种形式：

(1) 符号推理与数值计算的结合 例如专家控制，它的上层是专家系统，采用人工智能中的符号推理方法；下层是传统意义下的控制系统，采用数值计算方法。

(2) 离散事件系统与连续时间系统分析的结合 例如在 CIMS 中，上层任务的分配和调度、零件的加工和传输等均可用离散事件系统理论来进行分析和设计；下层的控制（如机床和机器人的控制）则采用常规的连续时间系统分析方法。

(3) 模糊集合理论 模糊集合理论形式上是利用规则进行逻辑推理，但其逻辑取值可在 0 与 1 之间连续变化，其处理的方法是基于数值而不是基于符号。

(4) 神经网络理论 神经网络通过许多简单关系来实现复杂的函数。神经网络本质上是一个非线性动力学系统，但它并不依赖于模型，因此可以看成是一种介于逻辑推理和数值计算之间的工具和方法。

(5) 优化理论 学习控制系统时常通过对系统性能的评判来修改系统的结构和参数。利用优化理论来解决智能控制系统中的结构和参数设计是常用分析方法，也是智能控制系统设计的精髓。

智能控制是一门交叉学科，傅京逊教授称它是人工智能与自动控制的交叉。以后 Saridis 又加入了运筹学，即认为智能控制是人工智能、自动控制和运筹学三者的交叉。图 1-3 形象地说明了这种交叉。

当然对于其他类型的智能控制系统，如基于专家系统的控制、神经元控制、模糊控制等，它们仍然是多学科的交叉，只是它们所涵盖的学科不尽相同罢了。智能控制系统的研究领域相当广泛，每个领域都有各自特有的感兴趣的研究课题。这些研究领域包括智能机器人控制、智能过程控制、智能调度与决策、专家控制系统、语言控制、康复智能控制器、智能仪器、智能电网和智能交通等。值得指出，这些智能控制的子领域并非完全独立，它们的智能特性也不是互不相关的。

智能控制作为一门新兴学科，还没有形成一个统一的完整的理论体系。智能控制研究所面临的最迫切的问题是：对于一个给定的系统如何进行系统的分析和设计。专家预测，把复杂环境建模的严格数学方法研究同人工智能中的新兴学科分支“计算智能”的理论方法研究紧密地结合起来，有望导致新的智能控制体系结构的产生和发展。而且这种研究将在“自上而下”和“自下而上”两个方向工作的交汇处取得突破性的进展，使智能控制系统的

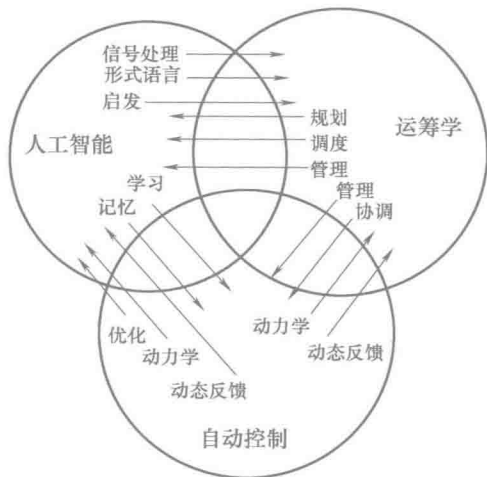


图 1-3 智能控制的交叉

研究出现崭新的局面，而不是停留在监控级用一个简单的基于规则的控制将基础级的常规控制系统松散地耦合起来的水平。这里“自上而下”的含义是指由高层控制的思想、观念和理论入手向下层发展，在简化条件下建造仿真或实验系统来研究智能控制的基本概念和验证控制算法。“自下而上”的含义是指从建立“感知-行为”的直接映射入手向上层发展，同样是在简化条件下去研究各种新的分布式智能控制体系结构及其相应的控制算法。所以，智能控制理论要发展到如经典控制理论和现代控制理论那么完整，还需要相当多的艰苦工作。

综上所述，智能控制理论研究的领域相当广泛，且存在的问题也相当多。可以说智能控制的基础理论体系目前还处于比较模糊的阶段。限于作者的水平，不可能将众多智能控制研究的内容作全面的介绍，本书的目的是将智能控制研究中的一部分比较成熟的又有一定数学基础支持的有关内容（模糊控制理论、神经网络控制理论）介绍给大家，并在书的最后对目前智能控制研究的动向作一个简单介绍。

习题和思考题

- 1-1 智能控制技术是如何发展起来的？它与经典控制有什么差异性？
- 1-2 智能控制系统由哪几部分组成？每个部分的作用是什么？
- 1-3 智能控制系统的特点是什么？
- 1-4 智能控制与常规控制相比较有什么不同？在什么场合下应该选用智能控制策略？