

智能控制系统理论及应用

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM THEORY AND APPLICATIONS

王 杰 金耀初 编著

河南科学技术出版社



河南省自然科学基金
河南省教委自然科学基金
资助项目

智能控制系统理论及应用

王 杰 金耀初 编著

河南科学技术出版社

内 容 提 要

本书较为系统地介绍了模糊控制理论与系统、人工神经网络理论、神经控制系统和模糊神经网络控制系统,并且通过几个控制系统的实例介绍了混合智能控制系统的具体设计及实现方法。在主要的几章之后还附有习题,以供读者练习。

本书适宜于从事工业自动化工程的技术人员阅读,也可作为大专院校工业自动化、自动控制、计算机应用等专业的本科生、研究生的教材或参考书。

智能控制系统理论及应用

王 杰 金耀初 编著

责任编辑 韩家显

河南科学技术出版社出版发行

郑州市农业路73号

邮政编码:450002 电话:(0371)5721450

河南郑州市教育印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 13印张 318千字

1997年3月第1版 1997年3月第1次印刷

印数:1—2 000

ISBN 7-5349-1983-5/G·522

定价:19.80元

前 言

智能控制是传统控制发展的高级阶段,它主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制。这类系统普遍具有模型的不确定性、高度的非线性和控制任务的高度复杂性等特点。由于这些特点的存在,使得传统的控制理论和方法在处理这类问题时不得不借助大量的简化、假设以获得系统的较简单的控制模型,这样做的结果是使控制系统的动静态性能指标无法保障。正是智能控制方法对模型的不依赖,才使智能控制理论和技术在许多传统控制方法不易成功的地方大显身手。

由于智能控制尚处于发展时期,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。一般说来,智能控制系统应具备以下一些功能:第一,学习功能,即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到改善。第二,适应功能,这里所说的适应功能比传统的自适应控制具有更广泛的含义,它包括更高层次的适应性。例如当系统的输入不是已经学习过的例子时,由于它具有很好的插补功能,从而可以给出同样合适的输出,甚至当系统某些部分出现故障时系统也能正常工作。第三,组织功能,即对于复杂的任务和分散的传感信息具有自行组织和协调的功能。组织功能还体现在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,主动地采取行为,当出现多目标冲突时,各控制器可在一定的条件限制下自行解决。

智能控制既然是现代高技术的代表之一,也必然地涉及数学

的许多前沿领域。研究智能控制的常用数学工具包括:第一,符号推理与数值计算的结合,如专家控制,其上层是人工智能中的符号推理方法,其下层则是传统意义下的控制系统,采用数值计算方法。第二,离散事件系统和连续时间系统分析方法的结合,如在CIMS中,上层任务的分配调度等需用离散事件理论分析,而机床和机器人等下层系统则需要用连续系统理论分析。第三,神经网络理论和模糊集理论的结合,如在模糊神经网络控制系统以及基于神经网络的模糊控制系统中,控制方法中涉及神经网络理论和模糊集理论的紧密结合。

在智能控制理论这个大家庭中,模糊控制及神经控制理论即代表着智能控制发展的最新最高水平,又具有智能控制系统的最显著的特征,因而可以认为是智能控制理论的代表。以介绍智能控制理论及应用的最新发展为目的,同时又不失理论上的自成体系,本书包括了模糊集基本理论和运算、神经网络基本结构和学习算法、模糊控制系统的理论及实现、神经控制系统和结合模糊神经网络的混合智能控制系统的理论及实现技术。本书的初稿曾作为浙江大学电机系工业自动化专业的硕士研究生的讲义试用,因而包括了一定数量的习题,可供对本方向有兴趣的人士参考阅读。

本书成稿得到了我们的导师——浙江大学蒋静坪教授的悉心指导,河南省教育委员会孔繁仕同志对本书的出版工作给予了多方关照,全书的文字处理和插图的绘制由郑州大学郭瑞琴和吴志德老师完成,在此一并表示感谢。

由于作者的知识面及水平的限制,本书一定有不少疏漏甚至错误之处,恳请读者不吝赐教。

编著者

1996年12月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 现代控制理论面临的挑战	(1)
§ 1.2 智能控制的提出	(2)
§ 1.3 智能控制的分类	(4)
1.3.1 基于规则的控制	(4)
1.3.2 模糊控制	(5)
1.3.3 神经控制	(6)
§ 1.4 智能控制展望	(9)
第二章 模糊集合论基础	(11)
§ 2.1 经典集及其运算	(11)
2.1.1 集合及其表示方法	(11)
2.1.2 经典集的运算	(12)
2.1.3 关系及其运算	(15)
2.1.4 集合的特征函数	(20)
§ 2.2 模糊集合的概念及运算	(22)
2.2.1 模糊集合的概念及表示方法	(22)
2.2.2 模糊集合的运算	(26)
§ 2.3 模糊集的分解与扩张	(30)
2.3.1 分解定理	(30)
2.3.2 扩张原理	(32)
§ 2.4 隶属函数的确定方法	(34)
§ 2.5 模糊集合的模糊度量	(38)

§ 2.6 模糊关系及其合成·····	(42)
2.6.1 模糊关系及其运算·····	(42)
2.6.2 模糊关系的合成·····	(44)
2.6.3 模糊矩阵·····	(45)
§ 2.7 模糊关系方程·····	(48)
习题·····	(52)
第三章 模糊控制论 ·····	(55)
§ 3.1 模糊控制的基本思想·····	(55)
§ 3.2 模糊控制器的设计方法·····	(57)
3.2.1 确定模糊控制器的输入输出变量·····	(57)
3.2.2 确定输入输出变量的模糊语言描述·····	(57)
3.2.3 模糊规则的建立及模糊推理·····	(63)
3.2.4 解模糊·····	(74)
3.2.5 论域和比例因子的确定·····	(79)
§ 3.3 模糊控制器的参数确定·····	(81)
3.3.1 模糊规则可调整的模糊控制器·····	(81)
3.3.2 比例因子自调整的模糊控制·····	(89)
3.3.3 具有积分作用的模糊控制·····	(92)
3.3.4 机械手伺服系统的智能模糊控制·····	(94)
§ 3.4 规则自组织模糊控制·····	(101)
3.4.1 性能测量·····	(102)
3.4.2 控制量校正·····	(104)
3.4.3 控制规则修正·····	(105)
§ 3.5 自学习模糊控制·····	(108)
3.5.1 模糊推理格式与算法·····	(109)
3.5.2 辨识算法·····	(111)
§ 3.6 复合模糊控制·····	(126)
3.6.1 模型参考自适应控制的模糊设计方法·····	(126)

3.6.2	一类非线性系统的模糊变结构设计	(130)
3.6.3	模糊建模在变结构控制中的应用	(132)
§ 3.7	模糊系统辨识	(134)
3.7.1	模糊模型	(135)
3.7.2	参考模糊集合的确定	(136)
3.7.3	模糊关系的确定	(136)
3.7.4	模糊关系的修正	(137)
§ 3.8	模糊模式识别	(140)
3.8.1	最大隶属度法	(142)
3.8.2	择近原则	(144)
§ 3.9	模糊控制静态和动态特性分析	(147)
3.9.1	静态特性	(147)
3.9.2	稳定性分析	(155)
习题		(168)
第四章	人工神经网络理论	(171)
§ 4.1	人工神经网络理论概述	(171)
4.1.1	人工神经网络概念	(171)
4.1.2	神经网络模型	(175)
§ 4.2	神经网络学习算法	(178)
4.2.1	Hebbian 学习规则	(179)
4.2.2	感知器学习规则	(181)
4.2.3	Delta 学习规则	(183)
4.2.4	Widrow-Hoff 学习规则	(184)
4.2.5	相关学习法	(184)
4.2.6	Winner-Take-All 学习法则	(184)
4.2.7	Outstar 学习规则	(184)
§ 4.3	前向神经网络模型及其算法	(185)
4.3.1	线性分类器	(186)

4.3.2	感知器	(189)
4.3.3	Adaline 和 Madaline	(200)
§ 4.4	Hopfield 神经网络	(205)
4.4.1	离散型 Hopfield 网络(DHNN)	(206)
4.4.2	连续型 Hopfield 神经网络(CHNN)	(208)
§ 4.5	联想记忆神经网络	(211)
4.5.1	线性联想记忆	(211)
4.5.2	回馈型自联想网络	(213)
4.5.3	双向联想记忆(BAM)	(217)
§ 4.6	自组织神经网络	(221)
4.6.1	最小 Hamming 距离分类网络	(221)
4.6.2	Kohonen 网络	(227)
4.6.3	CPN 模型	(232)
4.6.4	自组织特征映射	(234)
4.6.5	自适应共振理论(ART)	(240)
§ 4.7	随机神经网络模型	(253)
4.7.1	模拟退火算法	(253)
4.7.2	Boltzmann 机	(256)
4.7.3	学习算法	(256)
§ 4.8	CMAC 神经网络	(260)
4.8.1	CMAC 模型的结构	(261)
4.8.2	网络的工作原理分析	(264)
4.8.3	CMAC 的学习算法及收敛速度	(275)
习题		(281)
第五章	神经控制论	(286)
§ 5.1	神经控制的概念	(286)
§ 5.2	神经控制的学习模式	(289)
5.2.1	监督式学习	(289)

5.2.2 增强式学习	(306)
§ 5.3 直接逆控制与自适应控制	(309)
5.3.1 直接逆控制	(309)
5.3.2 自适应控制	(313)
§ 5.4 神经网络增强式学习控制	(318)
5.4.1 行为选择神经网络(ASN)	(318)
5.4.2 行为评价神经网络(AEN)	(320)
§ 5.5 非线性控制的神经网络方法	(323)
5.5.1 非线性系统反馈线性化	(324)
5.5.2 基于神经网络的自适应非线性反馈	(326)
§ 5.6 基于神经网络的复合控制方法	(330)
5.6.1 基于神经网络的模型参考自适应控制	(330)
5.6.2 基于神经网络的最优控制	(342)
§ 5.7 系统辨识的神经网络方法	(347)
5.7.1 Hopfield 神经网络模型	(347)
5.7.2 基于参考模型的参数估计	(348)
§ 5.8 神经网络在规划中的应用	(352)
5.8.1 改进的 HCNN	(352)
5.8.2 求解非线性规划问题的方法	(355)
5.8.3 求解多项式形式的非线性方程组	(358)
习题	(359)
第六章 混合智能控制系统	(362)
§ 6.1 混合智能控制系统的一般结构	(362)
§ 6.2 神经网络模糊系统	(363)
6.2.1 神经网络与模糊系统的生理背景	(363)
6.2.2 模糊系统和生物神经网络模型的联系	(364)
6.2.3 基于神经网络的模糊控制	(367)
§ 6.3 模糊神经网络	(371)

6.3.1	网络结构	(371)
6.3.2	学习规则	(371)
6.3.3	模糊神经网络的应用	(373)
§ 6.4	基于神经网络的专家系统	(375)
6.4.1	专家系统的基本原理	(375)
6.4.2	基于神经网络的专家系统	(383)
	习题	(387)
第七章	智能控制的应用	(391)
§ 7.1	水泥回转窑的模糊辨识和控制	(391)
7.1.1	引言	(391)
7.1.2	模糊控制方案的建立	(391)
7.1.3	控制系统的实现	(395)
7.1.4	控制效果	(396)
§ 7.2	自动倒车系统的神经网络控制及模糊控制 ...	(397)
7.2.1	采用模糊控制方法	(397)
7.2.2	采用神经网络控制	(400)
7.2.3	模糊控制与神经网络控制的比较	(401)
	参考文献	(404)

第一章 绪 论

§ 1.1 现代控制理论面临的挑战

自美国著名学者维纳于 1948 年创立控制论以来,自动控制理论经历了从古典控制理论到现代控制理论的巨大发展。自动控制技术已经渗透到人类生产和社会生活的诸多领域,如人造卫星的发射和准确定位、生产过程的自动化、自然灾害的预测和防治以及人口的控制和优化等都不开自动控制技术。

古典控制理论主要解决单输入单输出系统的控制问题,通常采用传递函数、频率特性、根轨迹为基础的频域分析方法,所研究的系统主要是线性定常系统。对于非线性系统,则采用相平面分析方法,分析时变量一般不超过两个。

20 世纪 60 年代,计算机技术得到了飞速发展,古典控制理论中的传递函数描述方法被状态空间描述法代替。庞特里亚金发表的极大值原理、贝尔曼提出的动态规划和卡尔曼与布西提出的线性滤波器和估计器理论成为现代控制理论的三大基石。在此后的几年中,现代控制理论产生了许多新分支,如最优控制(包括二次型最优控制、 H^∞ 控制等)、系统辨识和状态估计、自适应控制(包括模型参考自适应控制、自校正控制和变结构控制等)、学习控制和非线性反馈控制等。现代控制理论的大多数方法均以数学为工具,对被控对象的模型有较高的要求。

然而,随着现代控制工程的发展,控制理论面临着前所未有的

挑战。现代控制工程中的一大类系统,往往具有以下特点:一是被控系统的高度复杂性和严重不确定性。一方面,被控系统很难用微分方程来描述系统的全部信息,许多对控制有重要作用的信息只能用非数学模型来描述和利用。另一方面,现实世界中很多系统高度复杂,在控制时必须分解成多个子系统。系统分解后,各子系统更难用准确的数学模型来描述,因而很难用纯数学的方法来解决控制问题。同时,许多被控系统存在严重的不确定性,包括参数不确定和结构不确定、外界扰动和信息描绘的不确定等。以机器人控制为例,尽管预先给出了许多人为的假设,推导得到的六自由度机器人的动力学模型仍非常复杂,具有强非线性、强耦合和快时变特性,而且许多对控制有重大影响的非线性因素如非线性摩擦、粘滞、间隙及形变等因素未能得到反映,因为它们很难用统一的解析式来表述。二是被控系统往往具有大的分布式传感特征,并产生大量的系统和环境信号,对具有多传感器的系统的信息集成,采用传统的方法建模比较困难,而这些传感器的集成信息对控制起着至关重要的作用。三是控制目标的不明确性和决策空间的多维性和不确定性。在设计控制系统时,往往无法事先确定控制目标,因为控制目标必须随时间和环境的变化而改变。以自主式移动机器人为例,由于机器人所处的环境是未知的,因此,无法事先规定好行走路线,只能边识别边规划,在考虑众多的因素下达到预定的目标。因此,控制系统还必须具有在不确定环境下的决策能力。综上所述,现代控制系统的设计必须走出传统控制论的束缚,以确保控制系统在不同情况下仍具有良好的控制性能。

§ 1.2 智能控制的提出

人们在不断的实践活动中发现,客观世界的各种现象和知识

可以划分成两类:精确知识和非精确知识。前者可以用数学模型来描述,后者诸如经验规则、启发式知识、符号逻辑等,不能用数学模型来描述。人们认识到,任何一个有效的控制系统,都不能单纯由纯数学的控制理论来解决,必须结合人的直觉推理和认知能力,使控制系统具有一定的“智能性”。于是人们将人工智能与控制理论相结合,提出了一种全新的控制方法——智能控制。1965年,傅京孙首先提出把人工智能的直觉推理规划方法用于学习控制系统。次年,Mendel进一步在空间飞行器学习和控制系统中应用人工智能技术,并提出了人工智能控制的概念。1967年,Leonides等人正式使用“智能控制”一词,并把记忆、目标分解一些简单的人工智能技术用于学习控制系统,提高了系统处理不确定性问题的能力。70年代初开始,傅京孙、Saridis等人提出智能控制就是人工智能技术与控制理论的交叉,并创立了人——机交互式分解递阶智能控制的系统结构。与此同时,从模仿人的控制决策方法入手,提出了基于规则的智能控制。1974年,Mamdani将模集理论和模糊逻辑用于工业过程控制,提出了一种新的智能控制方法——模糊控制。1984年,Moore等人将专家系统技术用于控制,得到了过程控制实时专家系统。1986年,Astrom正式提出专家控制。进入80年代,人工智能的另一分支——神经网络理论取得了突破性进展,并迅速在系统控制中取得了广泛应用,形成了智能控制的最新分支——神经控制。可喜的是,人工神经网络技术的发展,突破了所谓逻辑主义和连接主义的界线,使两者逐渐融合,并在控制系统中形成了最新的发展方向:神经模糊控制。

人们不禁要问,什么是智能控制?其确切定义是什么?傅京孙首先给出了智能控制的一般定义,即智能控制是人工智能与控制理论的二元结合。随后,Saridis等又将智能控制定义为自动控制、运筹学和人工智能的三元结合。后来,又有学者将认识心理学、复杂系统等二元加入智能控制的定义,提出了所谓智能控制的多元

论。然而,所有这些定义都未能确切地给出智能控制的定义。为此,我们在总结和吸收前人工作的基础上,试图给出智能控制较为确切的定义。

定义 1.1:智能控制

对被控系统的内部结构和外部环境变化有较强的适应性,具有一定的认知、思维和学习能力的控制称为智能控制。

根据上述定义,智能控制应具有如下基本特性:

(1)控制系统具有一定的先验知识,包括控制经验、被控对象的结构和环境信息等。

(2)控制系统应具备一定的思维能力,这里的思维包含直觉推理、逻辑思维和决策等。

(3)控制系统具有较强的学习能力,包括系统内部结构和参数、控制经验和其它知识的获取。

(4)控制系统有较强的鲁棒稳定性,其控制能力不会因为控制器本身的微小变化和被控对象的变化而减弱。

§ 1.3 智能控制的分类

智能控制是目前正在发展的一个领域,新的智能控制方法层出不穷,其分类也因为出发点不同而有所不同。为简明起见,我们将智能控制分成三大类,即基于规则的控制(Rule-based-control)、模糊控制(Fuzzy control)和神经控制(Neurocontrol)。

1.3.1 基于规则的控制

基于规则的控制简称规则控制。它将人的直觉推理用于系统控制。规则控制的设计分为两个步骤,首先选择控制策略,确定控制器结构。比如是采用自适应控制、预测控制、PID 控制还是其它控制方式。其次根据规则来调整控制器参数,如 PID 控制的三个

控制系数等。不管是控制策略的选择还是控制参数的调整,都是根据控制器已有的规则进行的。然而,仅依靠已有的规则进行控制是不够的。一般说来,控制器还应有规则修改、调整和规则生成能力。

专家控制(Expert Control)是规则控制中比较成熟的一个分支。它将专家系统技术与控制系统相结合,是基于人类控制专家的专业知识和熟练工人的实践经验而设计的控制系统。它具有专家系统的一般特征而又不同于一般的专家系统,具有高可靠性、运行的连续性、较强的实时性和优良的抗干扰性等特点。

专家控制由以下几部分组成:

(1)数据库:主要存贮事实、证据、假设和控制目标等。例如对过程控制系统而言,事实包括传感器的测量误差、操作限、报警限、操作时序约束和被控对象的组成等静态数据。

(2)规则库:包含一系列产生式规则,这种规则的一般结构为:如果〈条件〉,那么〈结论〉。

(3)推理机制:即从数据库的内容中,确定下一条产生式规则。

(4)规划环节:即根据控制结果,对已有的知识和规则进行调整和修改等。

(5)人机接口:它实现操作人员与专家系统之间的对话,包括知识更新、规则修改和询问解释等。

1.3.2 模糊控制

广义地说,模糊控制也是一种规则控制。之所以把模糊控制作为一类独立的智能控制来讨论,是因为它已形成了一套独特的控制方法,而且模糊控制与一般的规则控制相比,在工业控制中具有特别重要的地位。

众所周知,人在进行各种操作的过程中,人脑中存在许多定性的概念。这种定性的概念没有准确的界限,因此我们称之为模糊概念。例如,飞行员在驾驶飞机时,如果飞机偏离了目标(偏离大小),驾驶员发现这一误差便操作驾驶杆(反向输出增大或减小),使飞

机回到目标值。在驾驶员的头脑中,偏离程度的“大”或“小”,输出的“大”或“小”都具有一定的模糊性,究竟“大”、“小”到何种程度并不需要精确的测定。然而,他们正是凭这种模糊的概念来控制飞机的飞行,并实现规定的飞行路线。模糊控制一般由以下四部分组成:

(1)模糊控制器:包括各种信号的模糊化、模糊推理合成和解模糊等。

(2)输入/输出接口装置:包括 A/D、D/A 转换和电平转换等。

(3)广义对象:它可以是模型、不精确的对象,也不排斥已有较精确数学模型的被控对象。

(4)传感器:它将非电信号如温度、压力、流量、浓度和湿度等转换为电信号(模拟的或数字的)。

1.3.3 神经控制

人工神经网络是一种人们试图用来模拟人脑和神经系统功能,由大量简单的非线性单元广泛联结而成的复杂的动力学系统。人工神经网络的应用涉及众多领域,并在控制系统中取得了令人瞩目的成就。在控制系统中,神经网络既能完成一些专门的工作,如模式识别和特征抽取等,又能完成专家系统的一些功能,还能直接用于产生控制信号,控制电机或其它执行器。这里,我们主要讨论后面这种情况。当然,神经网络用于系统辨识或状态估计也是我们讨论的内容。神经控制最早是由 Werbos 正式提出的,遗憾的是未给出确切的定义。当时,神经控制理论还刚刚形成,尚未建立完整而系统化的理论体系,因而也很难给出一个令人满意的定义。神经控制理论之所以引起人们的极大兴趣,主要是由于以下两个原因:

(1)研究神经控制将使人们最终彻底理解人的大脑及其控制机理。毫无疑问,人脑和人类神经系统是迄今为止最为完善、具有最高智能化的控制系统。研究人工神经网络理论,最终目的就是弄