

TP13
7440

961312

工程智能控制

陈燕庆等编著

西北工业大学出版社

工程智能控制

陈燕庆 宋 东 编著
吴成富 齐先华

西北工业大学出版社

1991年8月 西安

内 容 简 介

本书从工程技术角度出发,结合作者近年来的研究成果,论述了智能控制系统的构成原理及应用。书中除详细介绍了目前应用较广的模糊控制、专家控制、仿人智能控制以及分级递阶智能控制外,对近年来再次兴起的神经网络理论及其在智能控制中的应用也作了论述;最后还对用于智能控制的计算机系统作了介绍。

本书涉及了目前智能控制发展的主要方面和最新研究成果,论述深入浅出,可作为高等院校自动控制及计算机等专业的研究生教材,也可作为有关研究人员和工程技术人员的参考书。

工程智能控制

陈燕庆等 编 著

责任编辑 胡梦仙

责任校对 樊 力

西北工业大学出版社出版发行

(西安市友谊西路 127 号)

全国各地新华书店经销

陕西省富平县印刷厂印装

ISBN 7-5612-0310-1/TP·49

开本 850×1168 毫米 1/32 8.875 印张 214 千字

1991 年 8 月第 1 版 1991 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1-1700 册 定价: 5.90 元

前 言

随着科学技术的进步，人类所面临的问题越来越多，需要加以控制的过程和对象也日趋复杂。此外，过程或对象所处的环境也变得日益恶化和多变。在这种情况下，许多系统都具有强烈的非线性和不确定性，以致无法用数学模型来加以描述。对于这类系统，经典的反馈控制技术已显得无能为力。自适应控制和变结构控制虽然在一定程度上使问题得到缓解，但由于这种控制技术在很大程度上仍依赖于系统的数学模型，因此并未从根本上使问题得到解决。

与此同时，人们发现，人类专家或技术人员却能对这类系统进行完美而有效的控制。特别是近年来，随着人工智能和专家系统的不断成熟，一种以控制理论、计算机科学和人工智能三者为基础的新的控制技术——智能控制以令人耳目一新的面貌出现了，这必将对控制理论和控制技术产生巨大的影响。

本书从工程技术的角度出发，结合作者近年来的航空科学基金资助项目的研究成果，论述了智能控制系统的构成原理、主要类型、设计方法及应用实例，其中，第一、二、三、七章由陈燕庆同志编写；第四章由吴成富同志编写；第五、六、九章由宋东同志编写；第八章由齐先华同志编写。由于我们水平有限，书中缺点错误在所难免，希望广大读者批评指正。

在编写过程中参阅和摘引了许多先行者的著作和论文，在此谨致谢意。

编著者

1991年4月

EAD 9/104

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 智能控制产生的背景	1
§ 1-2 智能控制的形成及发展	5
§ 1-3 智能控制的含义及特点	6
第二章 智能控制系统的构成及分类	10
§ 2-1 智能控制系统的构成	10
§ 2-2 智能控制系统的分类	11
第三章 模糊控制(Fuzzy Control)	25
§ 3-1 概述	25
§ 3-2 模糊控制的数学基础	26
§ 3-3 模糊控制的基本原理	33
§ 3-4 模糊控制器的设计方法	41
§ 3-5 Fuzzy / PID 双模态控制	47
§ 3-6 专家模糊控制(Expert Fuzzy Control)	48
第四章 专家系统与专家控制	50
§ 4-1 概述	50
§ 4-2 专家系统的一般概念	50
§ 4-3 过程控制与专家系统	53
§ 4-4 直接专家控制	56
§ 4-5 间接专家控制	73

第五章 分级递阶智能控制	85
§ 5-1 分级智能控制理论	85
§ 5-2 自组织控制方法	91
§ 5-3 机械臂的分级智能控制	103
第六章 动态系统的实时智能控制	111
§ 6-1 多级实时智能控制原理	112
§ 6-2 多级实时智能控制的实现方法	116
§ 6-3 仿人智能控制方法	133
§ 6-4 仿人智能控制基本算法及其应用	140
§ 6-5 智能 PID 控制方法	155
§ 6-6 实时控制中人工智能方法的应用	160
第七章 神经网络理论及应用	168
§ 7-1 概述	168
§ 7-2 神经网络研究的发展历史	174
§ 7-3 几种典型网络介绍	180
§ 7-4 神经网络在控制工程中的应用	190
第八章 智能决策支持系统及应用	196
§ 8-1 决策支持系统	196
§ 8-2 智能决策支持系统的基本概念	209
§ 8-3 专家决策支持系统	215
§ 8-4 智能决策支持系统的应用	222
第九章 用于智能控制的计算机系统	229
§ 9-1 概述	229

§ 9-2 智能控制中的多微机系统.....	234
§ 9-3 LISP 机	241
§ 9-4 并行推理机.....	248
§ 9-5 连接机和神经网络计算机.....	253
§ 9-6 光计算机.....	260
参考文献	270

第一章 绪 论

§ 1-1 智能控制产生的背景

与其它学科一样，控制理论是人类在征服自然改造自然的斗争中逐渐形成的一门学科。简单反馈控制的最早应用可以追溯到古代亚历山大时期利用反馈原理调节流量的克泰希比斯水钟。19世纪中叶，J·C·麦克斯威尔对具有调速器的蒸汽发动机系统进行了稳定性研究。20世纪20年代，布莱克、奈奎斯特和波德在贝尔实验室的一系列研究工作奠定了古典反馈控制的理论基础。第二次世界大战期间，为了解决当时迫切需要的武器控制问题，各国科学家和工程技术人员进行了大量的理论与实验研究，使反馈控制系统在精度、动态特性和设计方法上都取得了重大进展。在战后年代里，随着经济的恢复及发展，工业界对自动化技术提出了普遍的要求，这进一步激发了人们对控制理论的研究热情，并使之在许多领域获得实际应用。至此，古典反馈控制理论趋于成熟，一般把它称作第一代控制理论，它对工业发展和技术进步起到了十分重大的作用。

60年代，出现了以状态空间分析为基础的现代控制理论，系统用一阶矩阵——矢量方程来描述，既简单明了又能包含更多的信息，在此基础上相继解决了系统的可观、可控问题，接着发展了多变量控制、最优控制、估计理论、自适应控制理论、滤波理论及系统辨识理论等。同时，借助于状态模型，揭示了系统输入输出等外部信息与系统内部信息（即状态变量）的关系。多少年来必须通过传感器获得系统信息的观念开始崩溃，从而为有效

地获取系统内部信息，实现高级控制策略开辟了广阔的前景，把控制理论推向了一个新的里程碑。人们把它称作第二代控制理论。

随着科学技术的不断进步和工业生产的不断发展，人们所面临的问题越来越多，需要加以控制的对象和过程变得越来越复杂，对控制质量的要求也变得日益严格，要对那些大型、复杂和具有强烈非线性和不确定性的系统进行有效而精确的控制就非常困难。在这种情况下，现代控制理论也显得软弱无力，其局限性也就日益突出。

实际上，现代许多军事和工业领域中所涉及的被控过程和对象都在一定程度上具有非线性、时变性和不确定性，因而难以建立精确的数学模型。此外，还有一些根本无法建立模型的系统。对于这类系统，现代控制理论更显得无能为力。70年代发展起来的自适应控制和自校正控制虽然能在一定程度上解决不确定性问题，但都要求对过程和被控对象进行在线辨识，其设计思想和传统的控制系统设计方法一样，都直接或间接依赖于对象或过程的精确数学模型，这有时做不到，即使做到了，算法通常都很复杂，运算量很大，实时性难以保证。就在这种控制理论处于停滞不前的情况下，在实践中人们发现，对那些无法获得精确数学模型的大型复杂系统，如社会经济系统、生物医学系统以及那些具有强烈非线性及不确定性的复杂过程，虽然难以用传统的控制理论设计出有效的控制器来对它们加以精确的控制，但有经验的工程技术人员却能凭经验对它们进行很有效的控制。这里，我们举一个很简单的例子来加以说明。

模糊数学的创始人 L·A·查德教授提出过一个引起许多人兴趣的停车问题，该问题的核心是要把一辆汽车停在拥挤的停车场上两辆车之间的一个空隙中去。对于一个搞控制理论的人来说，其做法大致是：让 ω 代表车 c 上一个固定的参考点（一个

近似于车的形状的矩形的中心) 的位置, θ 代表 c 的方向. 从而汽车的状态为 $X = (\omega, c)$, 车的运动微分方程为 $\dot{X} = f(x, u)$, u 是一个有约束的控制矢量, 它有两个分量 u_1 和 u_2 , u_1 是前轮角度, u_2 为车速. 两辆停着的车之间的空隙定义为许可的终局状态的集合 Γ , 邻近两辆车定义为 x 执行中的约束, 记为集合 Ω , 我们的任务是寻找一个控制 $u(t)$, 使在满足各种约束的条件下把初始状态转移到 Γ 中去.

这样一个表面上看起来并不复杂的问题, 在用传统的精确方法求解时, 由于约束因素过多, 所以非常复杂, 即使用一台大型计算机也不够. 因此, 从实用角度来看, 所谈问题可以说没有精确解.

对上面的问题, 汽车司机却可以轻而易举地加以解决. 他的做法是这样的: 首先让车向前运动, 前轮先向右, 后向左, 然后让车向后运动, 前轮仍先向右, 后向左, 经过若干步, 车将横向移动一个所需的距离, 最后向前开, 使车正好停在另外两辆车的空隙之中. 这就是说, 汽车司机通过一些不精确的观察, 执行一些不精确的控制, 就能够达到目的. 精确在这里不但不可行而且也无必要.

在上例中, 驾车人并不清楚控制对象的数学模型, 实际上也不会有人先去推导汽车运动的数学模型, 然后再根据模型去加以控制, 而是利用诸如直觉推理、经验和知识技巧等智能行为再加上学习能力来对汽车进行控制的. 实际情况是, 任何一个控制任务的完满解决都不能单独地靠控制理论去完成, 而都或多或少地隐含着人的直觉推理. 基于单纯数学解析体系的传统控制理论难于处理有关对象或过程中的一些定性信息和运用人的经验、知识、技巧和直觉推理, 因而难以满足对复杂的未精确建模系统的控制要求.

本世纪中叶以来, 随着计算机科学的飞速发展以及控制论、

信息论、系统科学、神经生理学、仿生学以及数学等学科的相互渗透，诞生了一门研究人脑的智能机理，研究如何利用各种方法来模拟人的思维过程和某些智能行为的科学——人工智能。随着人工智能的发展，人们进一步加深了对智能活动机理的认识。

自然界只是在生物体中创造了控制器官，人脑和中枢神经系统就是人和高等动物的控制器官。过去，人们可以制造出机器来代替人的劳动器官，那么，人们能否在这个基础上制造出新型的机器来代替人的思维器官的某些控制功能呢？通过对生物体的研究，人们发现，生物系统是一个十分完美的自我调节和自我控制的系统。生物有机体的这一共同特性和功能正是人们所寻求的那种自动装置的理想模型，是工程技术人员新的设计思想的泉源。但是，在理论上如何把生物系统与机器系统联系起来呢？这一点从维纳创立的控制论中已经深刻阐明了贯穿于其中的共同规律。

在第二次世界大战期间，为了改进当时的防空火力系统，以维纳为首的小组从事研究了一种能代替人类特殊功能的机电系统的工作。在这一工作中，维纳等人利用他们研制的高炮自动瞄准具成功地代替了高炮操作者，维纳从中发现自动控制装置在行为上同人和动物这样的生命有机体非常相似，并在其以后发表的论文《行为、目的和目的论》中进一步指出：“一切有目的的行为都可以看作是需要负反馈的行为”，它们通过“行为”把“反馈”和“目的”联系起来，实际上找到了自动控制装置模拟人的有目的性的动作的机制。后来，维纳在《控制论》一书中明确地提出了控制论的两个基本概念——信息概念和反馈概念，从而揭示了机器、生物和人所遵从的共同基本规律——信息与控制规律，为机器模拟人和动物的行为或功能提供了理论依据。同时，维纳还进一步指出，人的行为是有意识有目的的，围绕这个目的才能使整个有机体趋向共同的目标，进行协调一致的动作。

现代大型快速电子数字计算机能以极高的速度自动处理信

息。因此它可以从功能上部分模拟和代替人脑这个天然的信息处理机。总之，电子计算机的出现使人工智能找到了实现的工具，而人工智能的发展又给自动化学科带来了具有挑战性的新思想和新方法，为智能控制的产生奠定了必需的理论和技术基础。实际上可以说，智能控制是控制理论、人工智能及计算机科学相结合的产物。

§ 1-2 智能控制的形成及发展

“智能控制”(Intelligent Control)一词在最近 10 年来才得到普遍的接受与重视。对有些读者来说也许只是最近几年随着人工智能热和智能控制热的兴起才开始对它有所了解的。早在 50 年代，人们在经典控制理论进行深入和广泛的研究中就已经提出过“自适应”、“自组织”、“自寻优”以及“自学习”等的构想和它们的某些工程实现方案。其实在这些问题的探讨中就已经包含了智能控制的基本概念和设计思想，只是由于当时的控制理论特别是计算机技术还未发展到相应的水平，因而无法取得实用的成果。

60 至 70 年代，由于人工智能学科的发展，一些学者在研究自学习、自组织控制的基础上开始把人工智能技术引入控制系统以提高系统的自学习能力。对此，傅京孙 (K·S·Fu) 教授首先提出把人工智能中的直觉推理方法及规则用于学习控制系统，Mendel 教授进一步在空间飞行器的学习控制中应用了人工智能技术，并提出了“人工智能控制”的概念。1967 年，Leonides 和 Mendel 首次正式使用“智能控制”一词。从 70 年代开始，傅京孙、Gloriso 和 Saridis 等人从控制论的角度出发，总结了人工智能技术与自适应、自学习和自组织控制的关系，正式提出了建立智能控制理论的构想。

80 年代以来，随着微处理器及微计算机的高速发展，为实

用的智能控制器的研制及智能控制系统的开发提供了技术基础。人工智能技术中关于知识表达、推理技术以及专家系统的设计与建造方面的技术进展也为智能控制系统的研究和开发准备了新的条件和途径。专家系统被引入控制领域，出现了专家控制系统 (Expert Control System)，并在工业过程控制、航空航天技术和军事决策等方面取得了应用成果。从此，智能控制进入了新的开发时期，并必将取得新的引入注目的应用成果。

§ 1-3 智能控制的含义及特点

智能控制虽已出现了相当一段时间，并已取得了初步的应用成果，但是对究竟什么是“智能”以及什么是智能控制这两个基本问题至今还没有统一的、明确的定义。比较常见的有以下几种提法：智能就是用自己的知识去应付新情况解决新问题的能力；学习能力；预见新情况和新问题的能力；创造新的相互关系的能力；抽象思维的能力等等。英国科学家 W.R.阿斯顿 (Ashby W·R) 博士给智能下的定义为“选择得恰当”，并将“追求目的”列为智能的过程。追求是选择后的一个作为，而这种作为不计其是出于人还是出于机器。他还认为，人脑和机器的智慧能力都不会超过其已有的输入。

概括地说，智能通常称为智慧，这是指人认识客观事物并运用知识解决实际问题的能力。集中表现在反映客观事物深刻、正确、完全的程度和应用知识解决实际问题的速度和质量上，这往往通过观察、记忆、想像、思考、判断等表现出来。总之，智能是泛指人运用知识解决问题的能力。

根据以上关于什么是智能的讨论所得到的结果，对于什么是“智能控制”的问题就不难得到答案了。既然我们认为所谓智能就是人利用知识去解决实际问题的能力，那么，我们显然可以把智

能控制说成是“利用有关知识去使被控过程或对象按一定要求达到预定目的”。这里所说的“有关知识”我们认为大体应包括：

- (1) 系统所处环境的知识；
- (2) 被控过程或被控对象的知识；
- (3) 有关控制理论的知识；
- (4) 逻辑推理知识；
- (5) 控制器本身的知识；
- (6) 传感器执行器的知识；
- (7) 系统与外界通讯的知识。

还可以举出很多，应用时要根据具体系统的实际情况而定。

如前所述，随着科学技术和生产活动不断地向广度和深度发展，对自动控制提出了越来越高的要求。这样，传统的控制技术已不能适应新的情况。虽然从第二次世界大战以来经典控制技术得到长足的进步和发展，解决了许多技术问题，在工业及军事领域中均得到广泛的应用，然而它却存在以下一些本质上的致命弱点。

1. 只能严格按预定程序工作

这种工作模式对那些难以建立或不能建立完全准确数学模型的对象或过程（如某些工业过程、社会经济系统、生物医学工程等）就无法进行有效的控制。即使在给控制器编制算法程序时预先将可能出现的情况及对象应该作出的反应考虑进去，但当遇到意外情况时系统仍然束手无策。

2. 系统与人及周围环境联系不灵活

一般自动控制系统的输入/输出设备与人及外界环境的信息交换很不方便。人们希望能制造出能接受印刷体、图形甚至手写体和口头命令等形式的信息输入装置，使人更加深入而灵活地和系统进行信息交流；同时还要扩大输出装置的能力，能够用文字、图纸、立体形象、语言等形式输出信息。另外，通常的自动

装置不能接受、分析和感知各种看得见、听得着的形象、声音的组合以及外界其它情况。为了扩大信息通道就必须给自动装置安上能够以机械方式模拟各种感觉的精巧的发送器，即文字、图形、声音、物体等识别装置。

3. 可靠性差

随着控制系统的日益复杂，其规模也日益扩大。这样，如果其中的任何一个元件（机械的或电子的）发生故障，联线断路或短路，则整个系统就不能工作了。相比之下，人脑这个天然的信息与控制系统却有很大的优越性。具有 100—150 亿个神经元的中枢神经系统即使有几百万个神经元不能工作，但整个神经系统仍能够差不多全部地保持它的工作能力。

4. 结构庞大、不经济

具有上百亿个神经细胞的大脑，其全部体积只有 1.5L，所需的能量不超过 10W，但如果用一个晶体管触发器模拟一个神经元，其体积为 1cm^3 需要的能量为 0.1W。那么即使在触发器彼此靠得很紧的情况下，模拟人脑的自动装置的全部体积将达到 10^4m^3 ，需要消耗的全部能量将达到 10^6kW 。形象地说，这一自动装置的体积相当于宽 10m 高 100m 的摩天大楼，其能源消耗的相当于一座大型水电站的发电量。

为了克服传统控制系统的上述缺陷，以适应生产和技术发展的需要，研究一种具有人类某些智能，或者说具有仿人智能的控制系统就成为十分必要的了。这样，在控制论、信息论、人工智能、仿生学、心理学以及计算机科学发展的基础上出现了高级的信息与控制系统——智能系统。

模拟具有人的某些智能的机器称为智能机或智能系统。现已研制出和正在研制的智能机主要有学习机、识别机、联想机、翻译机和智能机器人等。但本书所关心的是利用以上这些已有的成果和理论构成各种智能控制系统，去完成各种特定的工程控制任

务，主要是那些包含很多随机的不确定因素的、无法建立精确数学模型的系统，我们把它叫做工程智能控制 (Engineering Intelligent Control)，对此，我们将在第二章详细介绍。

第二章 智能控制系统的 构成及分类

§ 2-1 智能控制系统的构成

近年来，随着被控对象及被控过程的日益复杂，以及环境条件的日趋恶劣，同时控制工程又逐步向社会经济、交通运输、生物医学等领域渗透，而这类系统都包含很多随机的不确定性因素，因此无法建立精确的数学模型。解决这类系统的控制问题显然需要借助人的智能，即把人的控制经验总结成相应的知识，再加上辨识、联想和学习的功能而构成一种新型控制系统——智能控制系统。这种系统一般应具备如下一些特点：

- (1) 控制器具有足够的关于人的控制策略、被控对象及环境的有关知识，以及运用这些知识的知识；
- (2) 有判断决策能力；
- (3) 有自适应、自组织、自学习和自协调能力；
- (4) 有代偿及自修复能力；
- (5) 具有分布并行处理能力；
- (6) 有高度可靠性。

这些特点的核心就是掌握知识运用知识。因此，也有人把智能控制叫做知识控制。根据控制目标、被控对象和环境的特性以及其它要求，可以构成各种不同的智能控制系统，图 2-1 给出智能控制系统的一般结构。