



# 第 1 章

## 概述

梦想总是伴随人类的发展而存在。例如,人类梦想发明各种机械工具和动力机器,协助甚至代替人们从事各种体力劳动。18 世纪第一次工业革命中,瓦特发明的蒸汽机开辟了人类利用机器动力代替人力和畜力的新纪元。此后,显著减轻体力劳动和实现生产过程自动化才成为可能。人类又梦想发明各种智能工具和智能机器,协助甚至代替人们从事各种脑力劳动。20 世纪 40 年代计算机的发明和 50 年代人工智能的出现开辟了人类利用智能机器代替自身脑力劳动的新纪元。此后,显著减轻脑力劳动和实现生产过程智能化才成为可能。

人类在发展过程中总要不断有所创新、有所发明、有所前进、与时俱进。自动控制也不例外。我们将从本书看到自动控制近半个世纪以来取得的长足进展。

人工智能(Artificial Intelligence, AI)学科自 1956 年建立以来,已走过半个多世纪的路程。人工智能的发展已引起众多学科和不同专业背景学者们的日益重视,成为一门广泛的交叉和前沿科学。现代计算机的发展使人工智能获得进一步的应用,人工智能的研究将在越来越多的领域超越人类智能,并将为发展人类的物质文明和精神文明做出更大贡献。

人工智能已经促进自动控制向着它的当今最高层次——智能控制(Intelligent Control)发展。智能控制代表了自动控制的最新发展阶段,也是应用计算机模拟人类智能,实现人类脑力劳动和体力劳动自动化的一个重要领域。

本章首先讨论智能控制的产生与发展概况;接着叙述智能控制的定义、特点、一般结构与分类;进而归纳人工智能的学派理论和计算方法及其对智能控制的影响;然后探讨智能控制的学科结构理论,最后介绍本书的主要内容和编排。

## 1.1 智能控制的产生与发展

智能控制的产生和发展反映了当代自动控制的发展趋势，是历史的必然。智能控制已发展成为自动控制的一个新的里程碑，发展成为一种日臻完善和广泛应用的控制新手段。

### 1.1.1 自动控制面临的机遇与挑战

自动控制在 20 世纪 40 年代至 80 年代取得长足进展。在自动控制领域，20 世纪 40 年代至 60 年代，主要研究线性控制和非线性控制机理，这类控制器的设计主要建立在频域理论模型基础上。从 60 年代至 80 年代，控制系统快速发展，出现了许多新的理论创新，包括应用了状态空间法，发展了强有力的可控性和可观测性概念，以及演化了最优控制和随机控制理论等。在这个时期，最优性、自适应性、自学习和鲁棒性等得以引用，不过这时的控制方法论仍然极大地依赖于基于模型的方法，受控装置和随机环境的模型是由它们的物理特性建立的，而且通过离线和在线参数估计。

自动控制科学已对整个科学技术的理论和实践做出重要贡献，并为人类的生产、经济、社会、工作和生活带来巨大利益。然而，现代科学技术的迅速发展和重大进步已对控制和系统科学提出新的更高的要求，自动控制理论和工程正面临新的发展机遇和严峻挑战。传统控制理论，包括经典反馈控制、近代控制和大系统理论等，在应用中遇到不少难题。多年来，自动控制一直在寻找新的出路。

自动控制科学面临的困难及其智能化出路说明：自动控制既面临严峻挑战，又存在良好机遇。自动控制正是在这种挑战与机遇并存的情况下不断发展的。

传统控制理论在应用中面临的难题包括：

(1) 传统控制系统的设计与分析是建立在精确的系统数学模型基础上的，而实际系统由于存在复杂性、非线性、时变性、不确定性和不完全性等，一般无法获得精确的数学模型。

(2) 研究这类系统时，必须提出并遵循一些比较苛刻的假设，而这些假设在应用中往往与实际不相吻合。

(3) 对于某些复杂的和包含不确定性的对象，根本无法以传统数学模型来表示，即无法解决建模问题。

(4) 为了提高性能，传统控制系统可能变得很复杂，从而增加了设备的投入和维修费用，降低系统的可靠性。

(5) 应用要求进行创新，提出新的控制思想，进行新的集成开发，以解决未知环境中复杂系统的控制问题。

自动控制发展现阶段存在一些挑战是基于下列原因的：

(1) 科学技术间的相互影响和相互促进，例如生命科学、计算机、人工智能和超大规模集成电路等技术。

(2) 当前和未来应用的需求，例如空间技术、海洋工程、基因工程和机器人技术等应用要求。

(3) 基本概念和时代思潮发展水平的推动，例如离散事件驱动、高速信息公路、分布式系统、网络系统、非传统模型和人工神经网络的连接机制等。

面对这一挑战，自动控制工作者的任务是：

- (1) 扩展视野，着力创新，发展新的控制概念和控制方法，采用非完全模型控制系统。
- (2) 采用开始时知之甚少和不甚正确的，但可以在系统工作过程中加以在线改进，使之知之较多和日臻正确的系统模型。
- (3) 采用离散事件驱动的动态系统和本质上完全断续的系统。
- (4) 不仅要进行控制系统与计算机系统的结合，而且要实现控制科学与系统科学及生命科学的结合。

从这些任务可以看出，系统与信息理论以及人工智能思想和方法将深入建模过程，不把模型视为固定不变的，而是不断演化的实体。所开发的模型不仅含有解析与数值，而且包含定性和符号数据及仿生算法。它们是因果性的和动态的，高度非同步的和非解析的，甚至是非数值的。对于非完全已知的系统和非传统数学模型描述的系统，必须建立包括控制律、控制算法、控制策略、控制规则和协议等理论。实质上，这就是要建立智能化控制系统模型或者建立传统解析和智能方法的混合（集成）控制模型，而其核心就在于实现控制器的智能化。

上述领域面临问题的解决，不仅需要发展控制理论与方法，而且需要开发与应用计算机科学与工程及生命科学的最新成果。

人工智能的产生和发展正在为自动控制系统的智能化提供有力支持。人工智能影响了许多具有不同背景的学科，它的发展已促进自动控制向着更高的水平——智能控制发展。人工智能和计算机科学界已经提出一些方法、示例和技术，用于解决自动控制面临的难题。例如，简化处理松散结构的启发式软件方法（专家系统外壳、面向对象程序设计和再生软件等）；基于角色（Actor）或真体（Agent）和本体的处理超大规模系统的软件模型；模糊信息处理与控制技术；进化计算、遗传算法、自然计算以及基于信息论和人工神经网络的控制思想和方法等。

综上所述，自动控制既面临严峻挑战，又存在良好的发展机遇。为了解决面临的难题，一方面要推进控制硬件、软件和智能的结合，实现控制系统的智能化；另一方面要实现自动控制科学与计算机科学、信息科学、系统科学、生命科学以及人工智能的结合，为自动控制提供新思想、新方法和新技术，创立边缘交叉新学科，推动智能控制的发展。

### 1.1.2 智能控制的发展和学科的建立

人工智能已经促进自动控制向着它的当今最高层次——智能控制发展。智能控制是人工智能和自动控制的重要部分和研究领域，并被认为是通向自主机器递阶道路上自动控制的顶层。图 1.1 表示自动控制的发展过程和通向智能控制路径上控制复杂性增加的过程。从图 1.1 可知，这条路径的最远点是智能控制，至少在当前是如此。智能控制涉及高级决策并与人工智能密切相关。

智能控制思潮第一次出现于 20 世纪 60 年代，几种智能控制的思想和方法得以提出和发展。60 年代中期，自动控制与人工智能开始交接。1965 年，著名的美籍华裔科学家傅京孙（K.S.Fu）首先把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统；1971 年他又论述了人工智能与自动控制的交接关系。由于傅先生的重要贡献，他已成为国际公认的智能控制的先行者和奠基人。

模糊控制是智能控制的又一活跃研究领域。扎德（Zadeh）于 1965 年发表了其著名论文“模糊集合”（fuzzy sets），为模糊控制打下基础。此后，在模糊控制的理论探索 and 实际应用两个方面都进行了大量研究，并取得一批令人感兴趣的成果。值得一提的是，自从 70 年代以来，模糊控制的应用研究获得广泛开展，并取得一批令人感兴趣的成果。

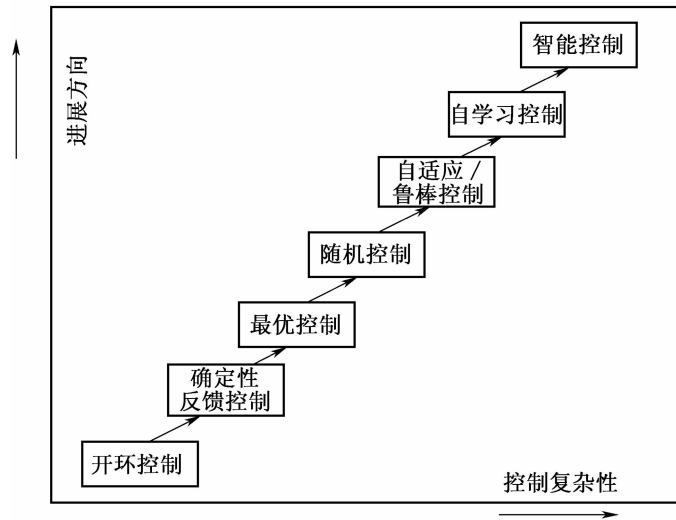


图 1.1 自动控制的发展过程

1967年，利昂兹（Leondes）等人首次正式使用“智能控制”一词。这一术语的出现要比“人工智能”晚11年，比“机器人”晚47年。初期的智能控制系统采用一些比较初级的智能方法，如模式识别和学习方法等，而且发展速度十分缓慢。

近十多年来，随着人工智能和机器人技术的快速发展，对智能控制的研究出现一股新的热潮。各种智能决策系统、专家控制系统、学习控制系统、模糊控制、神经控制、主动视觉控制、智能规划和故障诊断系统等已被应用于各类工业过程控制系统、智能机器人系统和智能化生产（制造）系统。

萨里迪斯（Saridis）对智能控制系统的分类做出贡献。他把智能控制发展道路上的最远点标记为人工智能。他认为，人工智能能够提供最高层的控制结构，进行最高层的决策。他领导的研究小组建立的智能机器理论采用“精度随智能降低而提高”原理和三级递阶结构，即组织级、协调级和执行级。这些思想成为递阶智能控制的基础。虽然递阶控制的应用实例较少，但递阶控制思想已渗透到其他智能控制系统，成为这些智能控制的有机组成部分。

阿尔布斯（Albus）等开发出一个分层控制理论，它能够表示学习，并提供复杂情况下学习的反射响应。此外，他还提出了问题求解和规划功能，这些功能通常与人工智能领域内的最高层智能作用有关，并含有用于纠正中间各控制层次错误的专家系统规则。

奥斯特洛姆（Åström）、迪席尔瓦（de Silva）、周其鉴、蔡自兴、霍门迪梅洛（Homen de Mello）和桑德森（Sanderson）等于80年代分别提出和发展了专家控制、基于知识的控制、仿人控制、专家规划和分级规划等。例如，奥斯特洛姆等1986年的论文“专家控制”（Expert Control）就是很有影响的，并促进了专家控制的发展。

麦卡洛克和皮特茨于1943年提出的脑模型，其最初动机在于模仿生物的神经系统。随着超大规模集成电路（VLSI）、光电子学和计算机技术的发展，人工神经网络（ANN）已引起更为广泛的注意。近十多年来，基于神经元控制的理论和机理已获进一步开发和应用。神经控制器具有并行处理、执行速度快、鲁棒性好、自适应性强和适宜应用等优点，因而具有广泛的应用前景。以神经控制器为基础而构成的神经控制系统已在非线性和分布式控制系统以及学习系统中得到不少

成功应用。

近年来,以计算智能为基础的一些新的智能控制方法和技术已被先后提出。这些新的智能控制系统有仿人控制系统、进化控制系统和免疫控制系统等。把源于生物进化的进化计算机制与传统反馈机制相结合,实现一种新的控制——进化控制;而把自然免疫系统的机制和计算方法用于控制,则可构成免疫控制。进化控制和免疫控制是两种新的智能控制方案,其研究推动智能控制的进一步发展。

随着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。会上集中讨论了智能控制原理和智能控制系统的结构。1987年1月,在美国费城由IEEE控制系统学会与计算机学会联合召开了智能控制国际会议(ISIC)。这是有关智能控制的第一次国际会议,显示出智能控制的长足进展。这次会议及其后续相关事件表明,智能控制作为一门独立学科已正式在国际上建立起来。近20年来,世界各地成千上万具有不同专业背景的研究者投身于智能控制研究行列,并取得很大成就。这也是对人工智能研究的一种促进。

近20年来,国内对智能控制的研究取得显著进展,相关学术组织不断出现,学术会议经常召开,已成立了一些学术团体,如中国人工智能学会智能控制专业委员会及智能机器人专业委员会,中国自动化学会智能自动化专业委员会等。与智能控制相关的刊物,如《模式识别与人工智能》和《智能系统学报》等也先后创刊。我国从事智能控制研究和应用的科教人员已成为国际智能控制一支活跃的主力军。这些情况表明,智能控制作为一门独立的新学科,也已在我国建立起来了。

智能控制作为一门新的学科登上国际科学舞台和大学讲台,是控制科学与工程界以及信息科学界的一件大事,具有十分重要的科学意义和长远影响:

(1) 为解决传统控制无法解决的问题找到一条新的途径。多年来,自动控制一直在寻找新的出路。现在看来,出路之一就是实现控制系统的智能化,即智能控制。

(2) 促进自动控制向着更高水平发展。智能控制的产生和发展正反映了当代自动控制的发展趋势。智能控制已发展成为自动控制的一个新的里程碑,并获得日益广泛的应用。

(3) 激发学术界的思想解放,推动科技创新。智能控制采用非数学模型、非数值计算、生物激励机制和混合广义模型,并可与反馈机制相结合组成灵活多样的控制系统和控制模式,激励人们解放思想,大胆创新。

(4) 为实现脑力劳动和体力劳动的自动化——智能化做出贡献。智能控制已使一些过去无法实现自动化的劳动实现了智能自动化。

(5) 为多种学派合作树立了典范。与人工智能学科相比,智能控制学科具有较大的包容性,没有出现过激烈的对立和争论。

## 1.2 智能控制的基本知识

本节讨论智能控制的基本知识,包括智能控制的定义、特点及智能控制系统的分类和一般结构等问题。

### 1.2.1 智能控制的定义与特点

正如人工智能和机器人学及其他一些高新技术学科一样,智能控制至今尚无一个公认的统一定义。然而,为了探究本学科的概念和技术,开发智能控制新的性能和方法,比较不同研究者

和不同国家的成果，就要求对智能控制有某些共同的理解。

### 1. 智能控制的定义

下面提出的关于智能控制的定义有待于进一步讨论，并在讨论中集思广益，求得完善。

#### 定义 1.1 自动控制

自动控制是能按规定程序对机器或装置进行自动操作或控制的过程。简单地说，不需要人工干预的控制就是自动控制。例如，一个装置能够自动接收检测到的过程物理变量，自动进行计算，然后对过程进行自动调节就是自动控制装置。反馈控制、最优控制、随机控制、自适应控制、学习控制、模糊控制和进化控制等均属于自动控制。

#### 定义 1.2 智能机器

智能机器能够在定形或不定形，熟悉或不熟悉，已知或未知的环境中自主地或交互地执行各种拟人任务（Anthropomorphic Tasks）的机器。

#### 定义 1.3 智能控制

智能控制是采用智能化理论和技术驱动智能机器实现其目标的过程。或者说，智能控制是一类无需人的干预就能够独立地驱动智能机器实现其目标的自动控制。所述智能化理论和技术包括传统人工智能和所谓“计算智能”的理论和技術。对自主机器人的控制就是一例。

#### 定义 1.4 智能控制系统（Intelligent Control Systems）

用于驱动智能机器以实现其目标而无需操作人员干预的系统叫智能控制系统。智能控制系统的理论基础是人工智能、控制论、运筹学和信息论等学科的交叉。

### 2. 智能控制的特点

智能控制具有下列特点：

（1）同时具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型（含计算智能模型与算法）表示的混合控制过程，或者是模仿自然和生物行为机制的计算智能算法，也往往是那些含有复杂性、不完全性、模糊性或不确定性以及不存在已知算法的过程，并以知识进行推理，以启发式策略和智能算法来引导求解过程。

（2）智能控制的核心在高层控制，即组织级。高层控制的任务在于对实际环境或过程进行组织，即决策和规划，实现广义问题求解。为了实现这些任务，需要采用符号信息处理、启发式程序设计、仿生计算、知识表示以及自动推理和决策等相关技术。这些问题的求解过程与人脑的思维过程或生物的智能行为具有一定的相似性，即具有不同程度的“智能”。当然，低层控制级也是智能控制系统必不可少的组成部分。

（3）智能控制系统的设计重点不在常规控制器上，而在智能机模型或计算智能算法上。

（4）智能控制的实现，一方面要依靠控制硬件、软件和智能的结合，实现控制系统的智能化；另一方面要实现自动控制科学与计算机科学、信息科学、系统科学、生命科学以及人工智能的结合，为自动控制提供新思想、新方法和新技术。

（5）智能控制是一门边缘交叉学科。实际上，智能控制涉及更多的相关学科。智能控制的发展需要各相关学科的配合与支持，同时也要求智能控制工程师是个知识工程师（Knowledge Engineer）。自动控制必须与人工智能相结合，才能有更大的发展。

（6）智能控制是一个新兴的研究领域。智能控制学科建立才 25 年，仍处于青年时期，无论在理论上还是在实践上它都还不够成熟、不够完善，需要进一步探索与开发。研究者需要寻找更好的新的智能控制相关理论对现有理论进行修正，以期使智能控制得到更快更好的发展。

### 1.2.2 智能控制器的一般结构

智能控制器的设计具有下列特点：

(1) 具有以微积分（DIC）表示和以技术应用语言（LTA）表示的混合系统方法，或具有仿生、仿人算法表示的系统。

(2) 采用不精确的和不完全的装置分级（递阶）模型。

(3) 含有多传感器递送的分级和不完全的外系统知识，并在学习过程中不断加以辨识、整理和更新。

(4) 把任务协商作为控制系统以及控制过程的一部分来考虑。

在上述讨论的基础上给出智能控制器的一般结构，如图 1.2 所示。

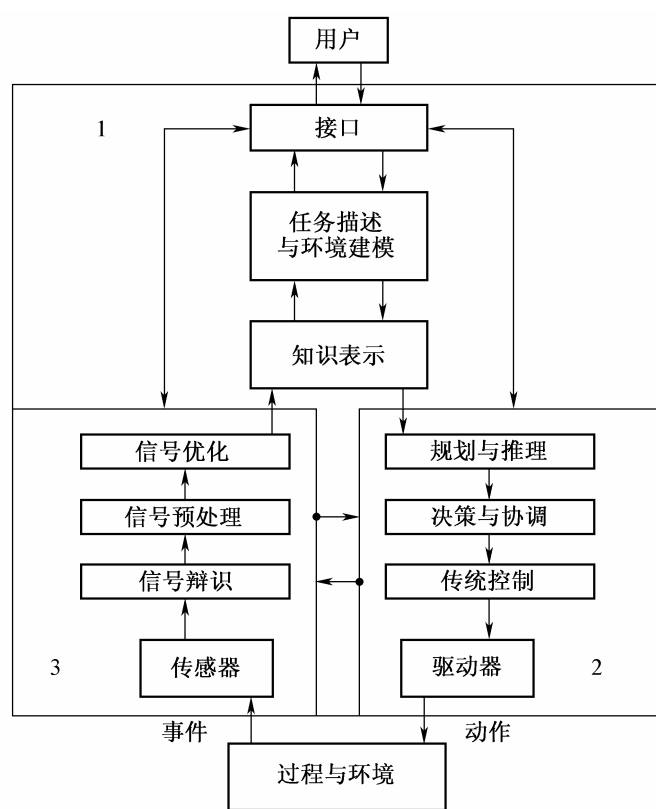


图 1.2 智能控制器的一般结构

已经开发出许多智能控制理论与技术用于具体控制系统，如分级控制理论、递阶控制器设计的熵（Entropy）方法、智能逐级增高而精度逐级降低原理以及控制器设计的仿生和拟人方法等。在这些应用范例中，取得不少具有潜在应用前景的成果，如群控理论、模糊理论、系统理论和免疫控制等。许多控制理论的研究是针对控制系统应用的：自学习与自组织系统、神经网络、基于知识的系统（Knowledge-Based Systems）、语言学 and 认知控制器以及进化控制等。

以图 1.2 为基础，提出了各类的多种智能控制器方案。

### 1.2.3 智能控制系统的分类

分类学与科学学研究科学技术学科的分类问题，本是十分严谨的学问，但对于一些新学科却很难恰切地对其进行分类或归类。例如，至今多数学者把人工智能看作计算机科学的一个分支；但从科学长远发展的角度看，已经有人把人工智能归类于智能科学（Intelligence Science）的一个分支。智能控制也尚无统一的分类方法，目前主要按其作用原理进行分类，可分为下列几种系统：

#### （1）递阶控制系统。

递阶智能控制（Hierarchically Intelligent Control）是在研究早期学习控制系统的基础上，并从工程控制论的角度总结人工智能与自适应、自学习和自组织控制的关系之后而逐渐形成的，也是智能控制的最早理论之一。递阶智能控制还与系统学及管理学有密切关系。

由萨里迪斯提出的分级递阶智能控制方法作为一种认知和控制系统的统一方法论，其控制智能是根据分级管理系统中十分重要的“精度随智能提高而降低”的原理而分级分配的。这种递阶智能控制系统是由组织级、协调级和执行级三级组成的。

#### （2）专家控制系统。

另一种比较重要的智能控制系统为专家控制系统（Expert Control System, ECS），它是把专家系统技术和方法与控制机制，尤其是工程控制论的反馈机制有机结合而建立的。专家控制系统已广泛应用于故障诊断、工业设计和过程控制，为解决工业控制难题提供一种新的方法，是实现工业过程控制的重要技术。专家控制系统一般由知识库、推理机、控制规则集和控制算法等组成。专家系统与智能控制的关系是十分密切的。它们有着明显的共性，所研究的问题一般都具有不确定性，都是以模仿人类智能为基础的。工程控制论（还有生物控制论）与专家系统的结合形成了专家控制系统。

#### （3）模糊控制系统。

模糊控制是一类应用模糊集合理论的控制方法。模糊控制的有效性可从两个方面来考虑：一方面，模糊控制提供了一种实现基于知识（基于规则）的甚至语言描述的控制规律的新机理；另一方面，模糊控制提供了一种改进非线性控制器的替代方法，这些非线性控制器一般用于控制含有不确定性和难以用传统非线性控制理论处理的装置。模糊控制器由模糊化、规则库、模糊推理和模糊判决4个功能模块组成。模糊控制已获得十分广泛的应用。

#### （4）学习控制系统。

学习是人类的主要智能之一。在人类的进化过程中，学习功能起着十分重要的作用。学习控制正是模拟人类自身各种优良的控制调节机制的一种尝试。

学习作为一种过程，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。自学习就是不具有外来校正的学习，没有给出关于系统反应正确与否的任何附加信息。因此，学习控制系统可概括如下：学习控制系统是一个能在其运行过程中逐步获得受控过程及环境的非预知信息，积累控制经验，并在一定的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。

#### （5）神经控制系统。

基于人工神经网络的控制（ANN Based Control）简称神经控制（Neurocontrol），是智能控制的一个较新的研究方向。20世纪80年代后期以来，随着人工神经网络研究的复苏和发展，对神



经控制的研究也十分活跃。这方面的研究进展主要在神经网络自适应控制和模糊神经网络控制及其在机器人控制中的应用上。

神经控制是个很有希望的研究方向。由于神经网络具有一些适合于控制的特性和能力,如并行处理能力、非线性处理能力、通过训练获得学习能力、自适应能力等。因此,神经控制特别适用于复杂系统、大系统和多变量系统的控制。

#### (6) 仿生控制系统。

从某种意义上说,智能控制就是仿生和拟人控制,模仿人和生物的控制机构、行为和功能所进行的控制就是拟人控制和仿生控制。神经控制、进化控制、免疫控制等都是仿生控制,而递阶控制、专家控制、学习控制和仿人控制等则属于拟人控制。

在模拟人的控制结构的基础上,进一步研究和模拟人的控制行为与功能,并把它用于控制系统,实现控制目标,就是仿人控制。仿人控制综合了递阶控制、专家控制和基于模型控制的特点,实际上可以把它看做一种混合控制。

生物群体的生存过程普遍遵循达尔文的物竞天择、适者生存的进化准则。群体中的个体根据对环境的适应能力而被大自然所选择或淘汰。生物通过个体间的选择、交叉、变异来适应大自然环境。把进化计算,特别是遗传算法机制和传统的反馈机制用于控制过程,则可实现一种新的控制——进化控制。

自然免疫系统是一个复杂的自适应系统,能够有效地运用各种免疫机制防御外部病原体的入侵。通过进化学习,免疫系统对外部病原体和自身细胞进行辨识。把免疫控制和计算方法用于控制系统,即可构成免疫控制系统。

#### (7) 网络控制系统。

随着计算机网络技术、移动通信技术和智能传感技术的发展,计算机网络已迅速发展成为世界范围内广大软件用户的交互接口,软件技术也阔步走向网络化,通过现代高速网络为客户提供各种网络服务。计算机网络通信技术的发展为智能控制用户界面向网络靠拢提供了技术基础,智能控制系统的知识库和推理机也都逐步和网络智能接口交互起来。于是,网络控制系统(NCS, Networked Control Systems)就应运而生。网络控制系统是指在某个区域内一些现场检测、控制及操作设备和通信线路的集合,以提供设备之间的数据传输,使该区域内不同地点的设备和用户实现资源共享及协调操作与控制。

#### (8) 复合智能控制系统。

把几种不同的智能控制机理和方法集成起来而构成的控制称为集成(Integrated)智能控制或复合(Compound)智能控制,其系统则称为集成智能控制系统。集成智能控制能够集各智能控制方法之长处,不失为一种控制良策。模糊神经控制、神经学习控制、神经专家控制、自学习模糊神经控制、遗传神经控制、进化模糊控制、进化学习控制等都属于集成智能控制。此外,把智能控制与传统控制(包括经典PID控制和近代控制)有机地组合起来,也可构成复合智能控制系统,能够集智能控制方法和传统控制方法各自的长处,弥补各自的短处,取长补短,也是一种很好的控制策略。例如,PID模糊控制、神经自适应控制、神经自校正控制、神经最优控制、模糊鲁棒控制等就是典型例子。

严格地说,各种智能控制都有反馈机制起作用,因此都可看作复合智能控制。

## 1.3 人工智能的学派理论与计算方法

### 1.3.1 人工智能的学派理论及其对智能控制的影响

人工智能具有不同的学派，他们在人工智能的发展历史、人工智能理论与技术路线等方面存在不同观点，并进行了长期的争论。

#### 1. 人工智能的主要学派

人工智能的学派主要有下列三家：

(1) 符号主义，又称为逻辑主义、心理学派或计算机学派，其原理主要为物理符号系统（即符号操作系统）假设和有限合理性原理。

(2) 连接主义，又称为仿生学派或生理学派，其原理主要为神经网络及神经网络间的连接机制与学习算法。

(3) 行为主义，又称进化主义或控制论学派，其原理为控制论及感知—动作型控制系统。

以上三个人工智能学派将长期共存与合作，取长补短，并走向融合和集成，为人工智能的发展做出贡献。

人工智能尚未形成一个统一的理论体系，甚至也没有统一的人工智能定义。人工智能各学派对于 AI 的基本理论问题，诸如定义、基础、核心、要素、认知过程、学科体系以及人工智能与人类智能的关系等，均有不同观点。下面仅简介他们在理论上的观点。

(1) 符号主义。认为人工智能源于数理逻辑，人的认知基元是符号，而且认知过程即符号操作过程。它认为人是一个物理符号系统，计算机也是一个物理符号系统，因此，能够用计算机来模拟人的智能行为，即用计算机的符号操作来模拟人的认知过程。也就是说，人的思维是可操作的。它还认为，知识是信息的一种形式，是构成智能的基础。人工智能的核心问题是知识表示、知识推理和知识运用。知识可用符号表示，也可用符号进行推理，因而有可能建立起基于知识的人类智能和机器智能的统一理论体系。

(2) 连接主义。认为人工智能源于仿生学，特别是人脑模型的研究，人的思维基元是神经元，而不是符号处理过程。它对物理符号系统假设持反对意见，认为人脑不同于电脑，并提出连接主义的大脑工作模式，用于取代符号操作的电脑工作模式。

(3) 行为主义。认为人工智能源于控制论，智能取决于感知和行动，提出智能行为的“感知—动作”模式。行为主义者认为智能不需要知识、不需要表示、不需要推理；人工智能可以像人类智能一样逐步进化（所以也称为进化主义）；智能行为只能在现实世界中与周围环境交互作用而表现出来。行为主义还认为：符号主义（还包括连接主义）对真实世界客观事物的描述及其智能行为工作模式是过于简化的抽象，因而是不能真实地反映客观存在的。

#### 2. 对智能控制的影响

人工智能各学派的争论对智能控制产生较大影响。在 20 世纪 60 年代至 80 年代，人工智能处于符号主义一枝独秀的年代，智能控制很自然地以基于知识的控制为主要研究方向，专家控制、学习控制以及模糊控制成为研究和应用的重点领域，并与递阶控制相结合。从 80 年代末期至整个 90 年代，连接主义迅速崛起，对神经控制和复合神经控制（如模糊神经控制）的研究形成热潮，丰富了智能控制的研究内涵，促进了智能控制的发展。行为主义在它成为人工智能一个新学派之

前很长一段时间内就已经是反馈控制的一个指导思想，基于感知—动作机制的行为主义之所以也称为控制论学派，就是因为它的作用原理与反馈控制一致。真体（Agent）技术和互联网（Web）技术的发展为基于行为主义的控制开辟了新的研究和发展方向，开辟了基于MAS的控制和网络控制等新的智能控制研究方向，尤其是这两种新的智能控制模式推动了分布式控制和网络控制的蓬勃发展。

### 1.3.2 人工智能与智能控制的计算方法

人工智能各个学派，不仅其理论基础不同，而且计算方法也不尽相同。

基于符号逻辑的人工智能学派强调基于知识的表示与推理，而不强调计算，但并非没有任何计算。图搜索、谓词演算和规则运算都属于广义上的计算。显然，这些计算是与传统的采用数理方程、状态方程、差分方程、传递函数、脉冲传递函数和矩阵方程等数值分析计算有根本区别的。随着人工智能的发展，出现了各种新的智能计算技术，如模糊计算、神经计算、进化计算、免疫计算和粒子群计算等，它们是以算法为基础的，也与数值分析计算方法有所不同。

归纳起来，人工智能和智能控制中采用的主要计算方法如下：

(1) 概率计算。在专家系统和专家控制系统中，除了进行知识推理外，还经常采用概率推理、贝叶斯推理、基于可信度推理、基于证据理论推理等不确定性推理方法。在递阶智能机器和递阶智能控制系统中，用信息熵计算各控制层级的作用。实质上，这些都是采用概率计算，属于传统的数学计算方法。

(2) 符号规则逻辑运算。一阶谓词逻辑的消解（归结）原理、规则演绎系统和产生式系统都是建立在谓词符号演算基础上的 IF→THEN（如果→那么）规则运算。这种运算方法在基于规则的专家系统和专家控制系统中得到普遍应用。这种基于规则的符号运算特别适于描述过程的因果关系和非解析的映射关系等。

(3) 模糊计算。利用模糊集合及其隶属度函数等理论，对不确定性信息进行模糊化、模糊决策和模糊判决（解模糊）等，实现模糊推理与问题求解。根据受控过程的一些定性知识，采用模糊数学和模糊逻辑中的概念与方法，建立系统的输入和输出模糊集以及它们之间的模糊关系。从实际应用的观点来看，模糊理论的应用大部分集中在模糊系统上，也有一些模糊专家系统将模糊计算应用于医疗诊断和决策支持。模糊控制系统主要应用模糊计算技术。

(4) 神经计算。认知心理学家通过计算机模拟提出的一种知识表征理论，认为知识在人脑中以神经网络形式存储，神经网络由可在不同水平上被激活的节点组成，节点间有连接作用，并通过学习对神经网络进行训练，形成了人工神经网络学习模型。神经控制系统主要应用神经计算技术。

(5) 进化计算与免疫计算。可将进化计算用于进化控制系统，将免疫计算用于免疫控制系统。这两种新的智能计算方法都是以模拟计算模型为基础的，具有分布并行计算特征，强调自组织、自学习与自适应。在学习控制系统中常通过系统性能评价修正结构参数。

此外，还有粒子群优化计算、蚁群算法等。

## 1.4 智能控制的结构理论

智能控制的学科结构理论体系是智能控制基础研究一个重要的和令人感兴趣的课题。自从

1971年傅京孙提出把智能控制作为人工智能和自动控制的交接领域以来，许多研究人员试图建立起智能控制这一新学科的体系结构，他们提出一些有关智能控制系统或学科结构的思想，有助于对智能控制的进一步认识。

智能控制具有十分明显的跨学科（多元）结构特点。在此，主要讨论智能控制的二元交集结构、三元交集结构和四元交集结构三种思想，它们分别由下列各交集（通集）表示：

$$IC = AI \cap AC \quad (1.1)$$

$$IC = AI \cap AC \cap OR \quad (1.2)$$

$$IC = AI \cap AC \cap IT \cap OR \quad (1.3)$$

也可以用离散数学和人工智能中常用的谓词公式的合取来表示上述各种结构：

$$IC = AI \wedge AC \quad (1.4)$$

$$IC = AI \wedge CT \wedge OR \quad (1.5)$$

$$IC = AI \wedge AC \wedge IT \wedge OR \quad (1.6)$$

式中，各子集（或合取项）的含义如下：

AI 表示人工智能（Artificial Intelligence）；

AC 表示自动控制（Automatic Control）；

OR 表示运筹学（Operation Research）；

IT 表示信息论（Information Theory 或 Informatics）；

IC 表示智能控制（Intelligent Control）；

$\cap$  和  $\wedge$  分别表示交集和连词“与”符号。

#### 1.4.1 二元交集结构理论

20世纪60至70年代，傅京孙曾对几个与自学习控制有关的领域进行了研究。为了强调系统的问题求解和决策能力，他用“智能控制系统”来包括这些领域。他在1971年指出“智能控制系统描述自动控制系统与人工智能的交接作用”。可以用式（1.1）和（1.4）以及图1.3来表示这种交接作用，并把它称为二元交集结构。

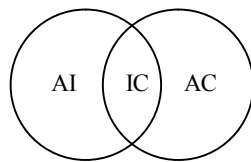


图 1.3 智能控制的二元结构

对自学习系统的研究是走向智能控制系统的基本步骤之一。在自学习控制系统中，当采用人一机组合控制器时，需要比较高层的智能决策。它可由拟人控制器（Anthropomorphic Controller）来做出，例如识别复杂的环境状况、为计算机控制器设定子目标以及纠正计算机控制器做出的不适当决定等。另一方面，对于较低层的智能作用，如数据收集、例行程序执行以及在线计算等，则可由机器控制器来执行。在设计这种智能控制系统时，要尽可能多地把设计者和操作人员所具有的与指定任务有关的智能转移到机器控制器上。

### 1.4.2 三元交集结构理论

萨里迪斯于 1977 年提出另一种智能控制结构，它把傅京孙的智能控制扩展为三元结构，即把智能控制看作是人工智能、自动控制和运筹学的交接，如图 1.4 所示。可以用式 (1.2) 和 (1.5) 来描述这种结构。图 1.5 进一步表示三元结构中各元之间的关系。

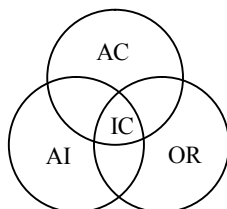


图 1.4 智能控制的三元结构

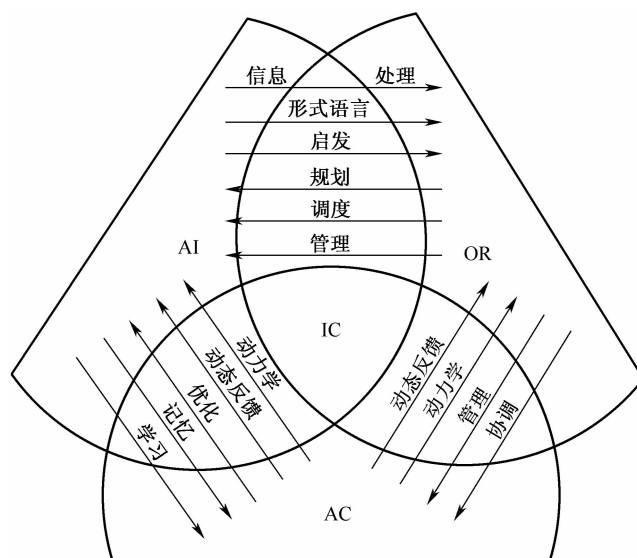


图 1.5 三元结构各元关系图

萨里迪斯认为，构成二元交集结构的二元互相支配，无助于智能控制的有效和成功应用。必须把运筹学的概念引入智能控制，使它成为三元交集中的一个子集。

在提出三元结构的同时，萨里迪斯还提出分级智能控制系统，如图 1.6 所示，它主要由三个智能（感知）级组成：

第一级：组织级，它代表系统的主导思想，并由人工智能起控制作用。

第二级：协调级，是上（第一级）下（第三级）级间的接口，由人工智能和运筹学起控制作用。

第三级：执行级，是智能控制系统的最低层级，要求具有很高的精度，并由控制理论进行控制。

### 1.4.3 四元交集结构理论

在研究了前述各种智能控制的结构理论、知识、信息和智能的定义以及各相关学科的关系之

后，蔡自兴于 1987 年提出四元智能控制结构，把智能控制看作自动控制、人工智能、信息论和运筹学四个学科的交集，如图 1.7 (a) 所示，其关系如式 (1.3) 和 (1.6) 描述。图 1.7 (b) 表示这种四元结构的简化图。

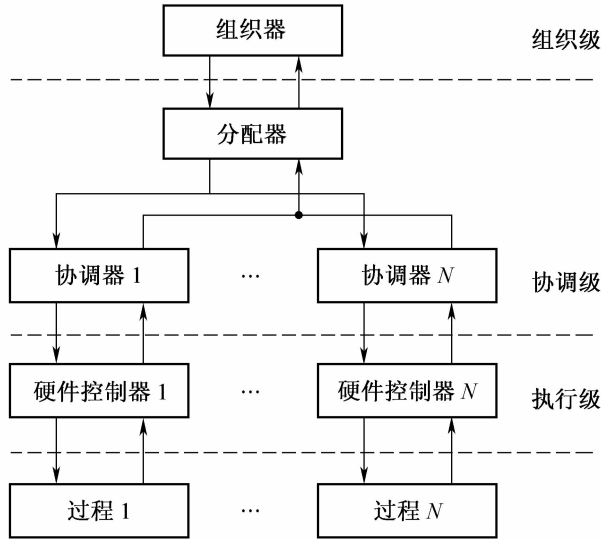


图 1.6 分级智能控制系统

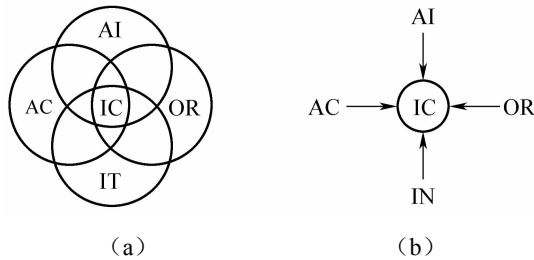


图 1.7 智能控制的四元结构

把信息论作为智能控制结构的一个子集是基于下列理由的。

1. 信息论是解释知识和智能的一种手段

**定义 1.5** 知识是人们通过体验、学习或联想而知晓的对客观世界规律性的认识，这些认识包括事实、条件、过程、规则、关系和规律等。一个人或一个知识库的知识水平取决于其具有的信息或理解的范围。

**定义 1.6** 信息是知识的交流或对知识的感受，是对知识内涵的一种量测。所描述事件的信息量越大，该事件的不确定性越小。

**定义 1.7** 智能是一种应用知识对一定环境进行处理的能力或由目标准则衡量的抽象思考能力。智能的另一个定义为：在一定环境下针对特定的目的而有效地获取信息、处理信息和利用信息从而成功地达到目的的能力。

**定义 1.8** 信息论是研究信息、信息特性测量、信息处理以及人机通信过程效率的数学理论。

从上述定义可得下列推论：

(1) “知识”比“信息”的含义更广，即 (信息)  $\in$  (知识)。

(2) 智能是获取和运用知识的能力。

(3) 可以用信息论来在数学上解释机器知识和机器智能。因此，信息论已成为解释机器知识和机器智能（人工智能）及其系统的一种手段。智能控制系统是这种机器智能系统的一个实例。

## 2. 控制论、系统论和信息论是紧密相互作用的

现代的系统论、信息论和控制论（以下简称“三论”）作为科学前沿突出的学科群，无论从哪一方面来看，都是相互作用和相互靠拢的，并给人们以鲜明的印象。无论是人工智能（含知识工程）、控制论（含工程控制论和生物控制论）还是系统论（含运筹学），都与信息论息息相关。信息观点已成为知识控制必不可少的思想。钱学森曾提出系统科学体系图，图 1.8 是该体系图的一部分。从图 1.8 可见，与系统论、控制论和运筹学一样，信息论也是系统学（人们有争论的上一级学科）的重要组成部分。智能控制系统中的通信更离不开信息论的理论指导。

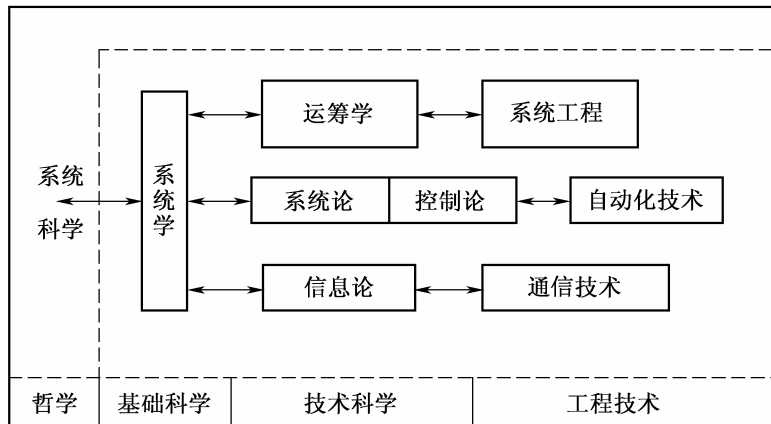


图 1.8 钱学森的系统科学体系图（部分）

## 3. 信息论已成为控制智能机器的工具

通过前面的定义和讨论知道，信息具有知识的秉性，它能够减少和消除人们认识上的不定性。对于控制系统或控制过程来说，信息是关于控制系统或过程运动状态和方式的知识。智能控制比任何传统控制具有更明显的知识性，因而与信息论有更为密切的关系。许多智能控制系统，实质上是以知识和经验为基础的拟人控制系统。智能控制的知识 and 经验源于信息，又可被加工处理成为新的信息，如指令、决策、方案和计划等，并用于控制系统或装置的活动。

信息论的发展已把信息概念推广到控制领域，成为控制机器、控制生物和控制社会的手段，发展为控制仿生机器人和拟人机器人——智能机器的有力工具。许多智能控制系统都力图模仿人体的活动功能，尤其是人脑的思维和决策过程。那么，人体器官的构造功能是否也反映“三论”的密切关系与相互作用呢？Samuelson 曾在一次“国际一般系统论研讨会”上配合幻灯片显示出一幅心脏构造示意图（如图 1.9 所示），说明了“三论”的核心关系。如果我们把心脏受中枢神经控制的作用考虑进去，即引入“智能”的作用，那么这不就是一个形象和自然的“智能控制四元结构”模型吗？

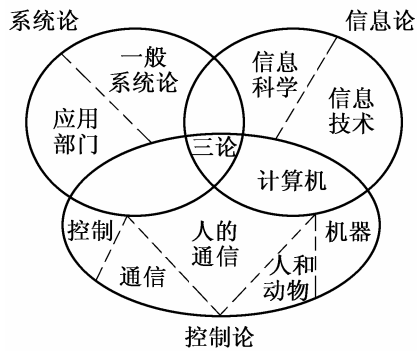


图 1.9 Samuelson 的心脏构形示意图

#### 4. 信息熵成为智能控制的测度

在萨里迪斯的递阶智能控制理论中,对智能控制系统的各级均采用熵作为测度。熵 (Entropy) 在信息论中指的是信息源中所包含的平均信息量  $H$ , 并以下式表示:

$$H = -K \sum_{i=1}^n P_i \log P_i \quad (1.7)$$

式中,  $P$  为信息源中各事件发生的概率,  $K$  为常数, 与选用的单位有关。

组织级是智能控制系统的最高层次, 它涉及知识的表示与处理, 具有信息理论的含义, 此级采用香农 (Shannon) 的熵来衡量所需要的知识。协调级连接组织级和执行级, 起到承上启下的作用, 它采用熵来测量协调的不确定性。在执行级, 则用波尔茨曼 (Boltzman) 的熵函数表示系统的执行代价, 它等价于系统所消耗的能量。把这些熵加起来成为总熵, 用于表示控制作用的总代价。设计和建立智能控制系统的原则就是要使所得总熵为最小。

熵和熵函数是现代信息论的重要基础。把熵函数和信息流一起引入智能控制系统, 正表明信息论是组成智能控制的不可缺少的部分。

#### 5. 信息论参与智能控制的全过程, 并对执行级起到核心作用

一般说来, 信息论参与智能控制的全过程, 包括信息传递、信息变换、知识获取、知识表示、知识推理、知识处理、知识检索、决策以及人机通信等。在智能控制系统的执行级, 信息论起到核心作用。这里, 各控制硬件接收、变换、处理和输出各种信息。例如, 在实时专家智能控制系统 REICS 中, 有个信息预处理器, 用于接收来自硬件的信号和数据, 对这些信息进行预处理, 并把处理了的信息送至专家控制器的知识库和推理机。又如, 有个智能机器人控制系统, 它由基于知识的智能决策子系统和信息 (信号) 辨识与处理子系统组成, 其中, 前者包含智能数据库和推理机, 后者涉及对各种信号的测量与信息处理。这两个例子都说明, 信息处理或预处理是由执行级的信息处理器执行的。可见, 信息论不仅对智能控制的高层发生作用, 而且在智能控制的底层——执行级也起到核心作用。

构成智能控制四元交集结构的每一子集 (即自动控制、人工智能、运筹学和信息论) 之间的关系可由图 1.10 表示。图中, 每一子集都与另三个子集相关。从图 1.10 可见, 四个子集之间的交接关系是十分清晰的, 这种关系要比三元交集关系复杂得多。



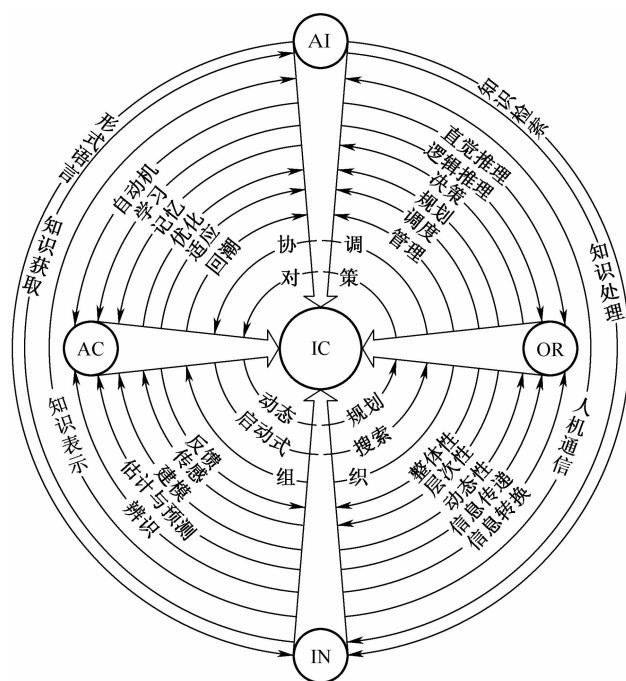


图 1.10 四元结构各元关系图

## 1.5 本书概要

本书作为智能控制的本科生教材，介绍智能控制的基本原理及其应用，着重讨论智能控制几个主要系统的原理、方法及应用。所涉及智能控制系统为递阶控制系统、专家控制系统、模糊控制系统、神经控制系统、学习控制系统、进化控制系统、免疫控制系统、网络控制系统和复合智能控制系统等。具体地说，本书包括下列内容：

(1) 第 1 章简述智能控制产生的背景、起源与发展，讨论智能控制的定义、特点和智能控制系统的一般结构，探讨人工智能学派理论与计算方法及其对智能控制的影响，研究智能控制学科的结构理论，尤其是智能控制的四元交集结构理论，并阐明构成智能控制各元间的关系，揭示各相关学科间的内在关系。

(2) 第 2 章至第 10 章逐章讨论智能控制系统的作用原理、类型结构、设计要求、控制特性和应用示例等。这些系统有递阶控制、专家控制、模糊控制、神经控制、学习控制、进化控制与免疫控制、多真体控制、网络控制、复合控制等。

本书主要作为高等院校自动化、电气工程与自动化、智能科学与技术、测控工程、机电工程、电子工程等专业本科生智能控制类课程教材，也可供从事智能控制和智能系统研究、设计、应用的科技工作者阅读与参考。

### 习题 1

1-1 哪些思想、思潮、时间和人物在智能控制发展过程中起了重要作用？

- 1-2 当代自动控制存在什么机遇与挑战？
- 1-3 智能控制是如何发展起来的？人工智能对自动控制的发展有什么影响？
- 1-4 作为国际智能控制学科的开拓者和奠基者，傅京孙有哪些突出贡献？
- 1-5 什么是智能控制？它具有哪些特点？
- 1-6 试述智能控制器的一般结构和各部分的作用。它与传统控制器有何异同？
- 1-7 按作用原理可把智能控制系统分为哪几类？
- 1-8 在人工智能发展过程中出现过哪些学派？它们对智能控制有什么影响？
- 1-9 智能控制学科有哪几种结构理论？这些理论的内容是什么？
- 1-10 为什么要把信息论引入智能控制学科结构？