

王俊普 主编

智能控制

中国科学技术大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

智能控制/王俊普 主编

—合肥:中国科学技术大学出版社,1996年9月

ISBN 7-312-00828-3

I 智能控制

II 王俊普

III ①专家系统 ②模糊 ③神经网络 ④仿人智能 ⑤分级递阶

IV TP

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路96号,邮编:230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:787 × 1092/16 印张:14.75 字数:360千字

1996年9月第1版 1996年9月第1次印刷

印数:1—3000册

ISBN 7-312-00828-3/TP-153 定价:18.00元

D1149/33
内 容 简 介

本书总结了智能控制研究方面所取得的成就，并结合作者近几年的实践经验，首先阐述了智能控制产生的过程和重要意义；在此基础上，全面、系统地介绍了专家系统控制、模糊控制、神经网络控制、仿人智能控制、分级递阶智能控制等的理论基础、基本结构、工作原理和应用实例；最后还对智能控制的发展趋势进行了探讨。

本书涉及到当前智能控制发展的主要方面和最新研究成果，全书内容充实，技术新颖，理论联系实际，论述深入浅出，可作为高等院校自动控制、工业自动化、系统工程等专业的研究生和高年级本科生的教材，也可作为从事自动控制系统研究、设计和应用的研究人员和工程技术人员的参考书。

前 言

智能控制最初是为了适应控制问题的实际需要，将人工智能各学派在理论、技术和方法方面的研究成果运用到自动控制理论中，作为解决控制问题的一种新途径。在其产生和形成过程中，智能控制又不断地吸纳系统论（尤其是运筹学）、信息论、认知心理学、仿生学、语言学、控制论（尤其是生物控制论和工程控制论）以及计算机科学等的原理和技术，逐步形成一门综合性较强的多学科交叉的新学科，于本世纪八十年代正式形成，并被誉为自动控制理论第三发展阶段，登上世界科学技术舞台。

智能控制作为一门新兴学科，它的完善需要相当长的过程，但是它在形成和发展过程中却表现出非常强大的生命力，广大从事自动控制理论研究和实际应用的科学工作者和工程技术人员迫切需要了解和掌握它。为此，我们结合自己近几年来所从事的智能控制科研、教学实践经验，编著了此书，以飨读者，期望能对高等院校自动控制、工业自动化、系统工程、机器人、计算机等专业的有关教师、研究生、高年级本科生，以及从事自动控制系统研究、设计和应用的广大科技人员有所帮助。

全书共分八章，主要论述了智能控制的基本原理、方法、技术及应用。

第一章是绪论。它简要地介绍了智能控制的产生和发展、含义和特点、理论结构、以及智能控制系统的分类。

第二章主要是为缺少人工智能背景的读者编写的，它包括知识表示、推理技术、机器学习等内容。

第三章在简要介绍专家系统的基本概念的基础上，分类介绍了实时过程故障诊断和监控一体化专家系统、直接专家系统控制、间接专家系统控制。

第四章重点介绍了模糊控制的基本原理、实现方法和应用。

第五章首先介绍了神经网络的基本功能，然后重点阐述了神经网络控制的原理、方法和技术，最后探讨了神经网络控制与模糊控制相结合的智能控制方法。

第六章介绍仿人智能控制的基本结构、原理、方法和实现。

第七章介绍分级递阶智能控制的基本理论和应用，同时也论述了在集散控制系统结构的基础上实现分级递阶智能控制的可行性。

第八章探讨了智能控制的发展趋势。

本书由王俊普同志主编，朱明同志参加了第二章和第五章的部分章节的编写，郑全同志参加了第四章和第五章的部分内容的收集、整理工作。

在本书编著出版过程中，得到中国科技大学自动化系有关同志的鼓励和支持，我们在此表示感谢。在编写过程中，我们参阅和摘引了许多先行者的学术论文和著作，在此谨致谢意。

由于我们水平有限，时间仓促，书中的缺点错误必定在所难免，祈请广大读者和专家们不吝批评指正。

编 者

1996年4月

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 1 绪论 | 1 |
| 1.1 智能控制的产生和发展 | 1 |
| 1.1.1 智能控制是自动控制理论发展的必然趋势 | 1 |
| 1.1.2 人工智能为智能控制的产生提供机遇 | 4 |
| 1.1.3 智能控制是第二次产业革命的重要组成部分 | 6 |
| 1.2 智能控制的含义和特点 | 7 |
| 1.2.1 智能控制的含义 | 7 |
| 1.2.2 智能控制系统的特点 | 9 |
| 1.3 智能控制的理论结构 | 9 |
| 1.4 智能控制系统的分类 | 12 |
| 1.4.1 按系统构成原理分类 | 12 |
| 1.4.2 按系统结构分类 | 14 |
| 1.4.3 按系统实现功能分类 | 15 |
| 2 人工智能的基本原理 | 18 |
| 2.1 知识表示 | 18 |
| 2.1.1 状态空间表示法 | 18 |
| 2.1.2 与/或图表示法 | 20 |
| 2.1.3 谓词逻辑表示法 | 24 |
| 2.1.4 产生式表示法 | 30 |
| 2.1.5 语义网络表示法 | 32 |
| 2.1.6 框架表示法 | 34 |
| 2.2 推理技术 | 36 |
| 2.2.1 状态空间的搜索原理 | 37 |
| 2.2.2 与/或树的搜索原理 | 43 |
| 2.2.3 归结原理 | 47 |
| 2.3 机器学习 | 51 |
| 2.3.1 机器学习的基本知识 | 51 |
| 2.3.2 若干机器学习的算法 | 54 |
| 3 专家系统与专家系统控制 | 58 |
| 3.1 专家系统的一般概念 | 58 |
| 3.1.1 专家系统的结构 | 58 |
| 3.1.2 专家系统的知识表示和获取 | 59 |
| 3.1.3 专家系统的建造步骤 | 62 |
| 3.2 过程诊断与监控专家系统 | 63 |

| | | |
|----------|-----------------------|------------|
| 3.2.1 | 系统的基本结构 | 63 |
| 3.2.2 | 知识表示与获取 | 64 |
| 3.2.3 | 系统设计 | 66 |
| 3.2.4 | 学习与系统维护 | 70 |
| 3.2.5 | 诊断与监控一体化 | 71 |
| 3.3 | 直接专家系统控制 | 72 |
| 3.3.1 | 直接专家控制系统的基本结构 | 72 |
| 3.3.2 | 专家控制器的设计原则 | 73 |
| 3.3.3 | 直接专家控制系统实现 | 75 |
| 3.4 | 间接专家系统控制 | 80 |
| 3.4.1 | 专家整定PID控制系统 | 81 |
| 3.4.2 | 协调型专家监控系统 | 85 |
| 4 | 模糊控制 | 90 |
| 4.1 | 模糊控制的数学基础 | 91 |
| 4.1.1 | 模糊集合和隶属函数 | 91 |
| 4.1.2 | 模糊关系和模糊关系矩阵 | 96 |
| 4.1.3 | 模糊语言和模糊推理 | 99 |
| 4.2 | 模糊控制原理 | 104 |
| 4.2.1 | 输入模糊化 | 106 |
| 4.2.2 | 模糊决策 | 107 |
| 4.2.3 | 输出逆模糊化 | 112 |
| 4.3 | 模糊控制器设计 | 113 |
| 4.3.1 | 规则库 | 114 |
| 4.3.2 | 隶属函数库 | 115 |
| 4.3.3 | 模糊关系运算 | 116 |
| 4.3.4 | 模糊控制总表 | 118 |
| 4.3.5 | 自组织模糊控制器设计 | 119 |
| 4.4 | 模糊控制器的实现 | 122 |
| 4.4.1 | 多元逻辑电路直接实现法 | 122 |
| 4.4.2 | 查表法模糊控制器的软件实现 | 127 |
| 4.4.3 | 模糊推理法的软件实现 | 130 |
| 5 | 人工神经网络控制 | 135 |
| 5.1 | 人工神经网络的基本概念 | 136 |
| 5.1.1 | 人工神经网络的基本原理 | 136 |
| 5.1.2 | 神经元模型 | 138 |
| 5.1.3 | 人工神经网络的结构 | 143 |
| 5.2 | 用于智能控制的人工神经网络 | 144 |
| 5.2.1 | 静态多层前向网络 | 144 |
| 5.2.2 | 动态反馈网络 | 151 |

| | | |
|----------|----------------------------|------------|
| 5.3 | 神经网络控制 | 155 |
| 5.3.1 | 神经网络控制系统的结构 | 156 |
| 5.3.2 | 神经网络系统辨识 | 158 |
| 5.3.3 | 自适应神经网络控制 | 164 |
| 5.4 | 神经网络模糊控制 | 168 |
| 5.4.1 | 基于神经网络的自适应模糊控制 | 169 |
| 5.4.2 | 神经网络模糊控制器 | 169 |
| 5.4.3 | 基于 TBP 学习的神经网络模糊控制器 | 172 |
| 6 | 仿人智能控制 | 177 |
| 6.1 | 人控制器的特性 | 177 |
| 6.2 | 仿人智能控制基本理论 | 180 |
| 6.2.1 | 仿人智能控制的基本思想 | 180 |
| 6.2.2 | 仿人智能控制系统的概念和结构 | 180 |
| 6.3 | 仿人智能控制的基本算法 | 184 |
| 6.3.1 | MC 的仿人智能控制算法 | 184 |
| 6.3.2 | ST 的控制周期的自校正方法 | 188 |
| 6.3.3 | TA 的在线参数辨识方法 | 189 |
| 6.4 | 实现仿人智能控制的多微机系统 | 192 |
| 7 | 分级递阶智能控制 | 196 |
| 7.1 | 基本理论 | 196 |
| 7.1.1 | 分级递阶智能控制的基本结构 | 196 |
| 7.1.2 | 分级递阶智能控制的语言决策模式 | 198 |
| 7.1.3 | 执行级的自组织控制方法 | 200 |
| 7.1.4 | 分级递阶智能控制的熵准则 | 207 |
| 7.2 | 机械臂的分级递阶智能控制 | 208 |
| 7.3 | 集散递阶智能控制 | 212 |
| 7.3.1 | 集散控制系统组成 | 212 |
| 7.3.2 | 集散控制系统的特点及其智能化 | 215 |
| 8 | 关于智能控制发展趋势的探讨 | 217 |
| | 参考文献 | 221 |

1 绪论

科学技术是第一生产力，是经济和社会发展的首要推动力量。我们正处于世界科学技术发展的重要时期—第二次科学革命时期。其首要目标在于突破人类智力的局限性，用机器代替人类从事各种体力和脑力劳动，把社会生产力发展到更高水平。第二次科学革命必将引起第二次产业革命，促进工业社会向信息社会的转变。

1.1 智能控制的产生和发展

任何科学技术的产生和发展都有它的必然性，智能控制当然也不例外。

1.1.1 智能控制是自动控制理论发展的必然趋势

自动控制理论是人类在征服自然，改造自然的斗争中形成和发展的。自动控制理论的基本思想早已存在。例如，利用反馈原理调节流量的克泰希比斯水钟，以及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的稳定性所做的工作，都标志着人们对控制理论探索的历程，本世纪20年代，布莱克，奈奎斯特和波德等人在贝尔实验室做的一系列工作奠定了经典控制理论的基础。尤其是第二次世界大战期间，新武器的研制和战后经济的恢复与发展，都极大地激发了人们对控制理论的研究热情，使古典控制理论日趋成熟，并获得许多应用成果。

控制理论从形成到发展至今，已经历了六十多年的历程，分为三个阶段。第一阶段是以40年代兴起的调节原理为标志，称为经典控制理论阶段；第二阶段以60年代兴起的状态空间法为标志，称为现代控制理论阶段；第三阶段则是80年代兴起的智能控制理论阶段。控制理论发展的三个阶段的主要特征对照见表1.1。

表 1.1 自动控制理论发展阶段对照表

| 阶段 | 第一阶段 | 第二阶段 | 第三阶段 |
|------|----------|-------------|------------|
| 形成时间 | 40—50年代 | 60—70年代 | 80年代以来 |
| 理论基础 | 经典控制理论 | 现代控制理论 | 智能控制理论 |
| 研究对象 | 单因素控制 | 多因素控制 | 多层次众多因素控制 |
| 分析方法 | 传递函数，频域法 | 状态方程，时域法 | 智能算子，多级控制 |
| 研究重点 | 反馈控制 | 最优，随机，自适应控制 | 大系统理论，智能控制 |
| 核心装置 | 自动调节器 | 电子数字计算机 | 智能机器系统 |
| 应用 | 单机自动化 | 机组自动化 | 综合自动化 |

经典控制理论研究的主要对象多为线性定常系统，主要解决单输入单输出问题，研究方法主要采用以传递函数，频率特性，根轨迹为基础的频域分析法。它的控制思想首先旨在对机器进行“调节”，使之能够稳定的运行；其次则是采用“反馈”的方式，使得一个

动力学系统能够按照人们的要求精确地工作；最终是实现了对系统按指定目标进行的控制。经典控制理论不仅推动了当时社会的自动化技术的发展与普及，而且仍在当今社会的许多工程与技术领域中得到继续应用。

现代控制理论产生于六十年代前后。在这一时期，计算机技术的迅猛发展为现代控制理论的形成与发展奠定了坚实的基础。同时，人类发展航天技术的需要又刺激了控制理论从经典理论到现代控制理论的发展。现代控制理论的形成将控制理论推广到了一个更广泛、更深入的境界。现代控制理论所研究的问题从经典控制理论的单输入单输出系统推广到了多输入多输出系统，不仅可以研究线性系统，而且可以有非线性或分布参数特性的系统。现代控制理论的建模实现了从直接根据被控对象的物理特性的方法向建立一般化的参数估计与系统辨识理论的扩展。它的计算手段也从过去的手工计算向计算机处理的方向转变。

经典控制理论与现代控制理论被统称为传统(或常规)的控制理论。传统控制理论的共同特点是：各种理论与方法都是建立在对象的数学模型基础上的，或者说，传统控制理论的前提条件是必须能够在常规控制理论指定的框架下，用数学公式严格地刻划出被控制对象的动态行为。对象的数学模型可以是基于微积分理论，线性代数或矢量分析。因此我们可以把所有的常规控制理论方法概括地称为“基于数学模型的方法”(Mathematical Model-Based Techniques)。常规控制理论对能够得到准确数学刻划的对象能进行有效的控制。

传统控制理论最适用于以人造设备的参数为对象的控制系统的设计问题。而在应用于过程任务(或追求目标)的控制时，传统控制理论遇到的最大困难是不确定性问题。第一类不确定性是系统模型的不确定性(未建模动力学)。对此可设法使系统对模型的变化不敏感，即鲁棒性控制；或通过在线辨识，使这种不确定性逐渐降低以至消除，即自适应控制。有些控制任务(目标)，可以将结构化的环境当作对象来建立数学模型，并使其不确定性在鲁棒控制或自适应控制能够处理的范围内。第二类不确定性是环境本身的不确定性。假定环境的变化影响可视为随机干扰，并能用独立的概率统计分布描述，则可研究在统计期望意义上的最优控制，即随机最优控制。随机最优控制适用于对象与环境间只存在弱相互作用的过程任务控制的场合。例如航海，航天，航空中的某些控制任务。随着科学技术的不断进步和工业生产的不断发展，人们发现，许多现代军事和工业领域所涉及的控制过程和对象都难于建立精确的数学模型，甚至根本无法建立数学模型。如社会经济系统，生物医学系统等。既使对有些对象和过程可以建立数学模型，但由于极其复杂，难于实现实时的高性能的有效控制。基于数学模型的传统控制理论面临着强有力的挑战。具体表现在：

1. 不确定性

对象(过程)和环境具有许多未知因素和不确定因素，这些因素还会随环境、工况、空间和时间的发生不可预测的变化。第一类不确定性中，对于结构化的环境，可以作为控制对象建立数学模型，然而对于非结构化的复杂环境，或者不能建立这种环境的数学模型，或者所建立的模型不确定性超出了鲁棒性控制或自适应控制所处理的范围，传统的控制理论就不能获得满意的控制效果。第二类不确定性中，对于环境与对象(过程)间存在着因果关系的强相互作用场合(连续生产过程和离散产品加工)，环境的变化不能被视为随机干扰，既使是随机最优控制方法也无能为力。

2. 复杂性

现代工业控制系统是高度复杂的系统，表现在(1)系统的子系统和环节种类繁多，层次各异；(2)子系统的结构和参数具有高维性，时变性，突变性和随机性；(3)环境干扰具有多样性，时变性，随机性及高强度；(4)传感器和执行器数量大，且十分分散；(5)决策机构具有分级分布特征；(6)系统的各状态变量是多重的；(7)信息结构复杂；(8)需处理的数据量庞大，算法复杂；(9)有些系统甚至是具有人一机交互功能的巨系统。

3. 高性能要求

现代工业系统往往既是生产大户也是经济大户，在整个国民经济中占有举足轻重的地位，为了提高社会和经济效益，必须充分挖掘它的潜力，因此对它往往提出多样性的高性能控制目标，以确保生产安全，提高产品质量，降低生产成本和能耗。然而，多样性的高性能要求往往是相互矛盾的，如何实现有效综合，不仅要求生产过程控制自动化，而且希望实现生产与经营管理的综合自动化。对于与控制对象有强相互作用，非结构化和不确定的环境，传统控制理论常常显得无能为力，而促使人们去探索控制理论的新途径。于是智能控制应运而生，从而控制理论进入第三发展时期。

早在本世纪40年代，控制理论刚刚形成的时候，维纳从他们研制高炮自动瞄准具替代高炮操作者的工作中，就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，发表了“控制论—关于在动物和机器中控制和通讯的科学”，“行为，目的和目的论”等论文，以及《控制论》专著。提出了控制论的两个基本概念—信息概念和反馈概念，并通过“行为”把“反馈”和“目的”联系起来，不仅确立了控制理论的正式形成，而且揭示了机器，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思想基础。人们在实践中发现，对于那些难于用传统控制理论实现有效控制的复杂过程，有经验的工程技术人员却能凭经验对它们进行有效的控制。例如停车问题。要把一辆汽车停在拥挤的停车场的两辆车之间的空隙中，传统控制理论的大致做法是：设车C上的一个固定参考点为 ω ，C的方向为 θ ，于是建立状态方程为 $X=(\omega, \theta)$ ，运动方程为 $\dot{X}=f(x, u)$ ，其中 u 为一个约束控制量，其两个分量 u_1 和 u_2 分别表示车前轮的角度和车的速度。另外，设集合 Ω 为停着的两辆汽车确定的约束， Γ 为控制目标状态集合(由车之间的间隙确定)。控制的任务是寻找一控制量 $u(t)$ ，使C从初始状态 $X_0=(\omega_0, \theta_0)$ 在满足各种约束条件下转移到目标状态集中。这个问题无精确解。该问题由于约束因素多，问题变得相当复杂，即使使用一台大型计算机，用传统控制理论方法也很难完成求解任务。然而汽车司机根本不清楚控制过程的数学模型，只是凭借经验和知识技巧，直觉推理等智能行为，加上学习能力，却可以轻而易举地实现控制目标。

在传统控制理论形成和发展进程中，特别是在传统控制理论遇到困难时，人们已经开始注意到开辟控制理论的新途径—避开数学模型，直接用机器模仿工程技术人员的操作经验，实现对复杂过程的有效控制。实际上，这正孕育着新一代控制理论—智能控制诞生。但是，由于社会发展水平和科学技术发展水平的制约，智能控制实际上在80年代才开始形成，并有较大发展。

1.1.2 人工智能为智能控制的产生提供机遇

人工智能产生于本世纪50年代,它是控制论,信息论,系统论,计算机科学,神经生理学,心理学,数学,以及哲学等多种学科相互渗透的结果,也是电子数字计算机的出现和广泛应用的结果。人工智能的基本思想是用机器模仿和实现人类的智能,实现脑力劳动自动化或部分自动化。在如何“实现”问题上,人工智能存在三个学派:(1)符号主义,逻辑主义,心理学派,计算机科学派;(2)联结主义,生理学派,仿生学派;(3)行为主义,进化主义,控制论学派。

符号主义,逻辑主义,心理学派,计算机科学派,通常认为:人脑和计算机都属于物理符号系统,于是可以用计算机模拟人的智能。这是人工智能最具代表性的见解。在1956年,关于用机器模拟智能的学术会议上,正式采用“人工智能”术语,标志人工智能学科诞生。这里的人工智能的基本含义即是用机器通过符号(包括逻辑的和数值的)推理,从外部功能上模拟人的智能。这种见解一直推动着人工智能沿着启发式程序—专家系统—知识工程的道路发展,并在70—80年代取得重大进展,成为人工智能主流派。

联结主义,生理学派,仿生学派,主张从仿生学观点,建立人脑模型,模仿人脑的结构和功能,使机器具有智能。人工神经网络的研究,从神经元到神经元之间的联结关系来模拟人的智能,成为人工智能发展的另一途径。

行为主义,进化主义,控制论学派,主张从控制论的角度,开展人工智能研究。重点在于模拟人在控制过程中的智能活动和行为特性,如:自寻优,自适应,自镇定,自学习,自组织等。该学派认为智能行为是基于“感知—动作”模式,不断进化的过程,Brooks研制的六足行走机器人是具有智能机器的代表作,已具有一定的智能行为。

人工智能的三个学派,虽然出发点不同,但是目的相同,都是研究如何模仿人的智能,实现机器智能,即人工智能。人工智能与控制理论相结合,促成了智能控制的产生和发展。正如傅京孙(K.S.Fu)教授指出的,智能控制理论具有二元结构,它是人工智能与控制理论相互渗透形成的交集。因此我们说,人工智能为智能控制提供产生和发展的机遇。

早在1965年,著名的美籍华人科学家傅京孙教授,首先提出把基于符号操作和逻辑推理的启发式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。这是人工智能的符号主义,逻辑主义学派观点首次与控制理论结合,实现智能控制的大胆尝试。在1971年傅京孙再次强调这种尝试是必要的。他指出,为了解决控制问题,用严格的数学方法研究发展新的工具来对复杂的“环境—对象”进行建模和识别以实现最优控制,或者用人工智能的启发式思想建立对不能精确定义的环境和任务的控制设计方法,这两者都值得一试,而重要的也许是把这两种途径密切地结合起来协调地进行研究。离散事件动态系统(DEDS)理论的研究反映沿上述第一方向所做的努力,并以柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)为应用背景,取得很大进展。而60—70年代关于学习控制系统的研究则认为是沿着第二个方向发展进行的尝试。学习控制系统研究的意义在于它展示了一些新思想的合理性,对智能控制研究的后来发展有启发作用。从智能控制的发展趋势看,许多智能控制系统实际上都综合运用了严格的数学方法和人工智能方法,以实现更有效的控制。

随着人工智能的发展,智能控制术语于1967年由Leondes和Mendel首先使用。从70年

代开始，傅京孙，Gloriso和Saridis等人从控制角度出发，总结了人工智能技术与自适应、自学习和自组织的关系，正式提出了建立智能控制理论的构想，傅京孙教授基于学习控制系统，最早提出智能控制是人工智能和自动控制相结合的理论框架。随着微处理器和微计算机高速发展，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示，推理技术以及专家系统设计与建造方面的技术进展为智能控制系统的研究和开发创造了新的途径。专家系统被引进控制领域，出现了专家控制系统，并获得广泛应用，标志智能控制理论形成的条件逐渐成熟。Saridis在学习控制系统研究的基础上，更强调智能控制系统追求目标的功能，提出了智能控制系统的多级递阶结构，并在此基础上把傅京孙智能控制论的二元论提法发展为：智能控制是人工智能，运筹学和自动控制理论相结合的三元论体系结构。

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，人工智能和运筹学的专家、学者参加了这次讨论会。会上集中讨论了智能控制原理和智能控制系统结构。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，并有200多人参加会员活动。该专业委员会组织了对智能控制定义和研究生课程教学大纲的讨论。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。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多篇论文和专题讨论，显示了智能控制的显著进展。这次会议是个里程碑，它标明智能控制作为一门独立学科，正式在国际上形成。

我们看到，在智能控制的最初产生和形成过程中，启发式程序，专家系统等人工智能思想起到了积极的促进作用。这是因为符号主义学派在人工智能诞生后的一个相当时期内，一直保持着良好的发展势头，特别是70—80年代，专家系统的出现和广泛应用把符号主义学派的人工智能方法和技术的发展推向了高潮。因此智能控制作为人工智能与控制理论相结合的产物，首先是以符号推理为主要特征的专家系统技术在控制系统中的运用。但是，我们强调指出，人工智能的每个重要成就都对智能控制的发展起到积极的推动作用。作为人工智能的主流派的符号主义学派的出现和发展，导致了以学习控制系统，专家控制系统为标志的智能控制系统的产生和形成，并初步确立了智能控制的体系结构和基本技术与方法。

这里值得一提的是，1965年L.A.Zadeh教授提出了模糊集理论，并由E.H.Mamdani于1974年首先将模糊推理应用于控制系统，出现了模糊控制，并且在近20年的实际应用引起了人们的普遍关注。模糊逻辑不同于传统的二值逻辑，它反应了现实世界所存在的不确定性与人们在认识中出现的不确定性，模糊推理则是模拟人类决策过程中的一种智能行为，因此模糊控制属于智能控制。

在进入80年代以后，特别是80年代末，人工智能的联结主义学派对神经网络的研究取得了突破性的进展，最具代表性的成果，包括：1982年Hopfield提出了Hopfield网络模型，同年甘利俊一和Arbib提出了竞争和协作神经网络，这一年Feldmann和Ballard给出了所谓联接主义模型；1984年Hinton, Sejnowski和Ackley提出了玻尔兹曼机(Boltzmann Machine)，同年Kohonen提出了联想记忆模型；特别是1986年Rumelhart McClelland等人提出了PDP(Parallel Distributed Processing)理论框架。在这个框架中给出了至今影响很大的学习算

法—误差反向传播算法(Error Back Propagation Method, 简称BP算法), 神经网络的研究成果迅速被应用于智能控制系统中, 出现了神经网络控制的研究热潮。由于神经网络在建模, 识别, 学习等方面的能力, 它可以被应用于智能控制系统的各个层次。它是基于并行计算的一种分布式结构。神经网络的学习、记忆能力与处理定量数据的能力恰好和模糊逻辑的定性知识表达能力具有互补性。因此, 近年来, 神经网络与模糊控制相结合的研究形成一种新趋势。

近几年来, 人工智能的另一学派, 行为主义学派再度兴起。1990年Brooks提出了无需表达和推理的智能行为的观点, 主张从建立“感知—行动”的直接映射入手, 构造“基于行为的系统”。为此, Brooks在基于动作分解原理的动作理论指导下建立了一个由150多个传感器和23个执行器构成的六足行走机器人(mobot)实验系统。这类基于行为的系统也是一种分布式体系结构。系统中世界模型被分解, 并分布到整个系统中, 取与传感器输出类似的形式, 而不是依赖于通用的符号表达。高层规划不再是系统必须服从的命令, 而成为一种可资利用的资源。行为主义学派的再度兴起为智能控制研究又开辟了一个新途径, 并必将对智能控制的发展起着重大推动作用。

1.1.3 智能控制是第二次产业革命的重要组成部分

生产力是人类社会发展的推动力。众所周知, 1768年瓦特发明并制造了第一台蒸汽机, 带来了18世纪中叶爆发的第一次产业革命。在第一次产业革命中, 各种金属材料(主要是铜和铁)的发现和广泛应用, 出现了工场手工业的迅速发展, 劳动分工很细, 各种工具, 工具机相当发达, 但这时的机器和工具大都是以人、畜的自然体力为原动力。生产力进一步发展, 自然界赋予人的体力的局限性暴露出来, 迫切要求借助机器的力量突破这种局限性, 实现人类的部分体力劳动自动化。当时面临的主要问题是寻求大功率的能源, 并解决其生产, 控制和利用问题。蒸汽机的出现标志着第一次产业革命的开始, 以后的二百多年, 各种能源和动力机械的出现是这场产业革命深入发展的里程碑。动力机和工具机的结合, 使人的部分体力劳动自动化变成了现实, 昔日的手工业生产方式让位于工业化的大生产, 人类开始从繁重的体力劳动中解放出来。第一次产业革命带来了人类今天的物质文明。人类社会从农业, 手工业社会跃入到工业社会。

回顾第一次产业革命前后这一时期的历史, 可以看到, 革命前生产力发展主要靠各种材料(主要是铜, 铁等金属材料)的发现和利用(包括工具机的制造), 革命后, 生产力的发展主要靠各种能源的发现和利用。而革命恰好体现在从材料到能源的转变。从而极大地促进了生产力的发展和人类社会的进步。

材料, 能源和信息是自然界的三大基本要素, 也是社会生产的三大基本问题。如果说, 第一次产业革命是实现从材料到能源的“重心”转移, 解决部分体力劳动自动化问题, 那么第二次产业革命则是实现从能源到信息的“重心”转移, 解决人的部分脑力劳动自动化问题。如果把第一次产业革命称为动力革命, 第二次革命则可称为信息革命或智力革命。本世纪30年代以前, 机器的功率越来越大, 各种动力机也不断涌现, 但其中的信息处理是极简单的, 社会生产和管理中的信息处理也主要靠人来完成。随着生产力的发展, 光靠动力机已不能解决问题, 信息处理问题日益突出, 制约着生产力的发展, 迫切需要借助机器的力量突破自然赋予人的智力的局限性, 使人的部分脑力劳动机械化和自动化。正

是在这种背景下，第一台电子数字计算机在第二次世界大战期间问世，标志第二次产业革命的开始。电子数字计算机是一种智力机，但不是智力机的唯一形式。它扮演着第一次产业革命中蒸汽机所扮演的角色。目前第二次产业革命正在进行着，但革命高潮尚未到来，可以预见，第二次产业革命必然推动人类社会从工业社会进入信息社会。表1.2给出了两次产业革命的对比。

从表中可以看出第二次革命的目的是突破人的智力的局限性，寻求高效率的信息处理系统的产生、控制和利用。研究制造和开发各种智力机器。

控制论本身就是揭示机器，生物和人所遵从的共同规律—信息与控制规律的理论。而智能控制则是以如何用机器(智能机)模拟人类智能，寻求对过程控制与信息处理的完美结合为目标的新一代控制理论。智能控制理论的研究与应用必然导致现代工业生产的综合自动化，极大地推动生产力的发展。因此说，智能控制是第二次产业革命的重要组成部分。我们必须清醒地认识到历史发展的总趋势，掌握这场产业革命的主动权。

表 1.2 两次产业革命的对照表

| 对比项目 | 第一次产业革命 | 第二次产业革命 |
|------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 时代背景 | 劳动分工和工具机充分发展，动力问题突出，人的自然体力的局限性暴露 | 动力机和工具机充分发展，信息处理问题突出，人的自然智力的局限性暴露 |
| 革命目的 | 突破人的体力的局限性，寻求大功率系统的产生、控制和利用 | 突破人的智力的局限性，寻求高效率的信息系统的产生、控制和利用 |
| 核心问题 | 动力(能源) | 智力(信息) |
| 发生时间 | 1768— | 1946— |
| 发生标志 | 蒸汽机问世 | 第一台电子数字计算机诞生 |
| 革命内容 | 研制开发各种动力机，实现人的部分体力劳动自动化 | 研制开发各种智力机和智能系统，实现人的部分脑力劳动自动化 |
| 时代影响 | 农业(手工业)社会向工业社会转变 | 工业社会向信息社会转变 |

1.2 智能控制的含义和特点

智能控制已出现了相当长的一段时间，并且已取得了初步的应用成果。但是究竟什么是“智能”，什么是“智能控制”等问题，至今没有统一的明确定义。虽然有些研究者也曾经给出定义，但是各种定义都是研究者在原来的研究领域进行探讨的结果，因此各有侧重。本节首先列举几个有代表性的对智能控制所下的定义，并展开对智能控制的含义的探讨，然后，我们将阐述智能控制的特点，进一步加深对智能控制的理解。

1.2.1 智能控制的含义

下面我们先列举几个有代表性的定义：

定义1. 智能控制就是由一台智能机器自主地实现其目标的过程。而智能机器则定义为，在结构化或非结构化的、熟悉的或陌生的环境中，自主地或与人交互地执行人的任务(G.N.Saridis)。

定义2. K.J.Astrom则认为,把人类具有的直觉推理和试凑法等智能加以形式化或用机器模拟,并用于控制系统的分析与设计中,以期在一定程度上实现控制系统的智能化,这就是智能控制。K.J.Astrom还认为自调节控制、自适应控制就是智能控制的低级体现。

定义3. 智能控制是一类无需人的干预就能够自主地驱动智能机器实现其目标的自动控制,也是用计算机模拟人类智能的一个重要领域(张仲俊,蔡自兴)。

定义4. 智能控制是研究与模拟人类智能活动及其控制与信息传递过程的规律,研制具有仿人智能的工程控制与信息处理系统的一个新兴分支学科(涂序彦)。

关于什么是“智能”,我们认为它是人所表现的行为。尽管其他某些生物也具有某种智能行为,但不是属于通常意义上的智能。或者说不属于我们讨论的智能范畴。当然就人类智能来说,其定义是不明确的。但是人们就智能问题也取得了一些共识。认为人具有感知环境能力,记忆联想能力,思维能力,推理能力。有人把这些能力称为智力,有人则称为智能,这里不去深究智力和智能的区别,这不会影响我们的讨论。这里值得指出的是智能和知识是密切相关的。知识越丰富,智能越强;智能越强,获取和利用知识的能力越强,知识就越丰富。二者在人类实践活动中是相互促进的。我们可以把人的智能行为归纳为认识世界和改造世界两个方面,但我们更强调改造世界,认识世界是手段,改造世界才是目的。正如W.R.Ashby指出的,智能是“选择的恰当”,并将“追求目的”作为智能的过程。

智能控制概念中的智能,我们认为是机器的行为,是仿人智能的行为,并不等价于人的智能,与图灵意义上的机器智能也有区别。虽然在某些大型复杂智能控制系统中会有人一机协作功能。甚至人直接参与决策过程,但我们强调的是用机器实现人的脑力劳动自动化,或者说强调的是机器高度自主实现追求目标的能力,而尽量避免或减少人的干预。另外,我们这里强调的是机器仿人的智能,而对于如何模仿却没有限定。如上节所述,人工智能各种学派的思想和方法都可以用到智能控制中来。

现在,我们再来进一步探讨智能控制的含义。我们说,智能控制实际只是对自动控制理论与技术发展到一个新阶段的概括。智能控制就是在常规控制理论上,吸收人工智能、运筹学,计算机科学,模糊数学,实验心理学,生理学等其他科学中的新思想,新方法,对更广阔的对象(过程)实现期望控制。其核心是如何设计和开发能够模拟人类智能的机器,使控制系统达到更高的目标。因此,智能控制并不排斥传统控制理论,而是继承和发扬它。首先,表现在控制论里的反馈和信息这两个基本概念,在智能控制理论中仍然占有重要地位。并且更加突出了信息处理的重要性。其次,在智能控制系统中并不排斥传统的控制理论的应用,恰恰相反,在分级递阶结构的智能控制系统中,执行级更强调采用传统控制理论进行设计,这是因为在这一级的被控对象通常具有精确的数学模型,成熟的传统控制理论可以对其实现高精度的控制。而智能方法在传统控制理论显得乏力的场合使用更为恰当。例如在分级递阶系统的组织级。当然,在执行级也不排除智能方法的运用,特别是对对象数学模型不确定或有时变参数的场合,智能方法也可以显示其一定的优越性。

从上面的讨论中,我们不想对智能控制的定义做出什么结论,只期望对智能控制含义能有所理解。

1.2.2 智能控制系统的特点

(1)结构 智能控制系统的结构是多层次的,人造的仿人系统或具有智能行为的各种机器将成为系统的子系统或环节。即智能控制系统含有智能子系统或智能环节。分层结构的系统,其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环境和过程进行组织,通过决策和规划实现广义问题求解。我们说智能控制系统的结构是分层的,并不排除某些系统仅具有一层或二层结构,但是,即使如此,系统也必含有智能子系统或智能环节。

(2)运行机制 智能控制系统中智能子系统或智能环节是系统的主体。系统的结构变更和控制参数修改,信息交换,控制决策和系统运行状态主要由智能子系统或智能环节决定。

(3)模型要求 系统的设计,开发以及系统的运行特性不依赖于或基本上不依赖于被控制过程(对象)的数学模型。因此,在系统设计和开发时,主要注意力不是放在数学公式的表达,计算和处理上,而是集中在任务和世界模型的描述,符号和环境的识别,控制器的结构以及知识库和推理机的设计与开发上。或者说,系统设计及开发的重点在于智能子系统或智能环节的模式设计上。

(4)信息结构 系统具有复合型信息结构,数值的和符号的,定量的和定性的,确定的和模糊的,精确的和非精确的,显式的和隐含的。因此,信息处理过程不仅包括已知算法的数学过程,而且含有符号推理的非数学过程。信息处理方式有串行方式,也可能有并行方式。

(5)知识利用 系统应具有有关知识,并利用知识使被控过程或对象按一定要求达到预定目的。有关知识大体包括:被控过程或对象的知识,系统所处环境知识,控制理论知识,控制器本身知识,执行器传感器知识,逻辑推理知识,系统与外界通讯知识等。这里特别强调逻辑推理知识,它是智能控制系统与传统控制系统区别的重要标志。另外,有些智能控制系统还能够利用已有的知识,通过学习或联想获取新知识。知识获取方式,系统可以在运行过程中在线总结归纳(非监督学习),也可以通过人一机接口向人类专家请教(监督学习)。

(6)高性能 系统应满足多样性目标的高性能要求,包括鲁棒性,适应性,容错性,实时性,多样性等。鲁棒性是指系统对环境的干扰和不确定性等诸因素不敏感;适应性是指系统具有适应被控过程或对象动力学特性变化,环境变化和运行条件变化等;容错性是指系统能够鉴别各类故障,并予以屏蔽,甚至还可以修复;实时性是指系统具有实时在线响应能力;多样性则指在复杂的管控一体化系统中不仅追求控制精度,而且还追求产品数量,质量,能耗,成本等多种目标。

从上面介绍的智能控制系统的特点,可以进一步加深我们对智能控制的含义及其研究的意义理解。

1.3 智能控制的理论结构

智能控制的理论结构明显地具有多学科交叉的特点,有些研究者提出了自己的见解。在这里,就这个问题进行初步地探讨,将有助于对智能控制的进一步认识,以期对从事这一领域研究的读者开展工作有所启迪。

1. 二元结构论

以傅京孙教授为代表，他们对几个与学习控制有关的，含有拟人控制器的控制系统，或含有人—机控制器的控制系统，或自主机器人系统，进行了研究，把它们归纳为智能控制系统，并在此基础上提出智能控制的二元交集结构。即智能控制(IC)是自动控制(AC)与人工智能(AI)的交集，如图 1.1 所示。

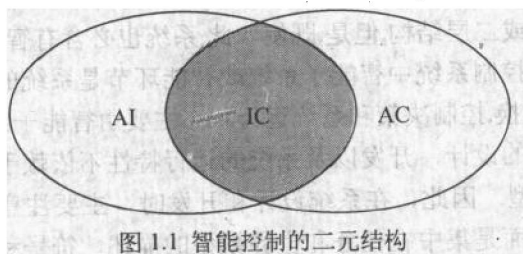


图 1.1 智能控制的二元结构

傅京孙教授以SRI的自主机器人系统为例，对二元结构加以说明。如图1.2所示，系统被控对象为机器人自动车，它可以在一规定范围内行走，控制器由一台SDS-940计算机实现。它的主要功能为感知，模拟，问题求解与规划。系统的自学习能力在于，通过对传感信息分析，动态地识别环境的变化，修改自己的决策去适应环境。

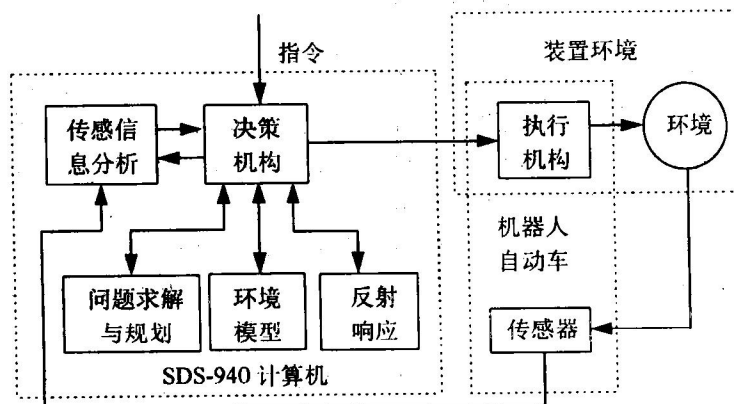


图 1.2 SRT 自主机器人系统

2. 三元结构论

隆里迪斯(Saridis)认为构成二元交集结构的二元相互支配，无助于智能控制的有效和成功的应用。因此，他把运筹学引入到智能控制中，扩展傅京孙的二元结构论，指出智能控制是自动控制，人工智能和运筹学(OR)的交集，如图 1.3 所示，形成智能控制的三元结构。

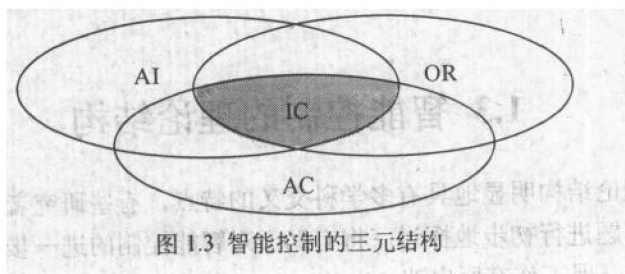


图 1.3 智能控制的三元结构