



普通高等教育“十二五”规划教材

# 智能控制技术

修春波 夏琳琳 等 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)



普通高等教育“十二五”规划教材

# 智能控制技术

修春波 夏琳琳 等 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书介绍了智能控制的发展历史及其主要形式与特点、模糊推理与模糊控制技术、专家系统及专家控制、混沌概念及混沌控制、神经网络理论及神经网络控制、仿人控制、智能优化算法等内容。

本书可作为高等院校自动化、电气工程、计算机以及电子信息等专业学生的本科生、研究生教材，也可供从事智能控制研究与应用的科技工作者学习参考。

### 图书在版编目（C I P）数据

智能控制技术 / 修春波等编著. -- 北京：中国水利水电出版社，2013. 11  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5170-1387-7

I. ①智… II. ①修… 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(2013)第265169号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 <b>智能控制技术</b>
作 者	修春波 夏琳琳 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：(010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：(010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.75印张 350千字
版 次	2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	<b>29.00元</b>

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

## 编写人员

---

修春波 夏琳琳 王 娜

陈奕梅 成 怡 田慧欣

罗 菁 张继德

智能控制的思想最早是由美国的 K. S. Fu 教授在 20 世纪 60 年代中期提出的。智能控制从二元论（人工智能与控制论）开始，经历了三元论（人工智能、运筹学和控制论），发展到四元论（人工智能、模糊集理论、运筹学和控制论），取得了丰硕的研究成果。

智能控制作为多学科交叉的前沿学科，其理论的完善和发展得益于人工智能、认知科学、模糊集理论和生物控制论等许多学科的发展，同时也促进了相关学科的发展。

在历经了 50 多年的坎坷发展后，今天的智能控制终于发展成为目前相对比较完善的学科，无数的志士仁人为智能控制的发展作出了大量不可磨灭的贡献。在此，我们怀着崇敬的心情对智能控制的先驱者们表示由衷的敬佩。

本书是作者在多年教学和科研实践的基础上，参阅了国内外现有教材和相关文献后编写的。全书注重理论与实践的结合，注重算法的实际应用与实现方法，注重创新思维的训练与培养。

本书内容着重于基本理论与实际应用相结合，强调内容的新颖性、先进性、实用性和可读性。特别注重算法的编程实现和实际问题的分析与解决。为易于读者理解相关的理论知识，书中简化了相关理论证明，并给出了大量的应用实例，增加了学习的趣味性和直观性。

本书的编写过程注重学生创新思维的培养与训练。在介绍基本理论知识后，给出了应用实例，一方面可加深学生对基本理论知识的理解，另一方面可培养学生独立思考与分析的能力，有利于学生寻找创新点，训练学生的创新思维。

本书共分为 9 章，第 1 章简述了智能控制的发展历史、主要特点和形式、应用领域；第 2 章介绍了模糊理论的基础知识；第 3 章介绍了模糊控制技术与应用；第 4 章介绍了专家系统及专家控制技术；第 5 章介绍

了混沌理论的基本概念和混沌控制；第6章介绍了神经网络的基础理论知识；第7章介绍了神经网络控制技术；第8章介绍了仿人智能控制及应用；第9章介绍了智能优化算法。其中第1章由修春波和罗菁合作编写，第2章由陈奕梅编写，第3章由陈奕梅和王娜合作编写，第4章由成怡编写，第5章由修春波编写，第6章、第7章由夏琳琳、修春波合作编写，第8章由田慧欣、修春波合作编写。全书由修春波统稿。

本书的编写得到了中国水利水电出版社的大力帮助和支持，在此深表感谢。

由于编者能力和水平有限，书中不妥与错误之处在所难免，恳请各位专家和读者不吝指导和帮助。对此，我们深表感谢。

**编著者**

2013年9月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 智能控制的发展史 .....	1
1.2 智能控制的特点 .....	3
1.3 智能控制的主要形式 .....	4
1.4 智能控制的应用 .....	8
<b>第 2 章 模糊理论</b> .....	10
2.1 模糊理论的产生与发展 .....	10
2.2 模糊理论的数学基础 .....	11
2.3 模糊推理 .....	17
<b>第 3 章 模糊控制</b> .....	24
3.1 基本模糊控制系统及模糊控制器 .....	24
3.2 模糊 PID 控制器的设计 .....	32
3.3 T-S 模糊模型 .....	36
3.4 Mamdani 模糊模型 .....	38
<b>第 4 章 专家控制</b> .....	50
4.1 专家系统的概述 .....	50
4.2 专家控制 .....	55
4.3 专家控制系统知识表示 .....	59
4.4 专家控制系统设计 .....	64
<b>第 5 章 混沌理论初步与混沌控制</b> .....	73
5.1 混沌理论 .....	73
5.2 混沌控制 .....	80
<b>第 6 章 神经网络</b> .....	91
6.1 神经网络研究的兴起与发展 .....	91
6.2 人工神经网络智能模型 .....	92
6.3 典型神经网络 .....	97
6.4 G-S 混沌神经网络在目标识别中的应用 .....	125

6.5	自适应神经模糊系统在足球机器人比赛射门点中的应用 .....	127
<b>第 7 章</b>	<b>神经网络控制</b> .....	134
7.1	神经网络控制系统的分类 .....	135
7.2	基于传统控制理论的神经控制 .....	135
7.3	基于神经网络的智能控制 .....	158
7.4	基于模糊控制的单神经元自适应 PID 控制仿真实例 .....	161
<b>第 8 章</b>	<b>仿人智能控制</b> .....	172
8.1	仿人智能控制原理 .....	172
8.2	仿人智能控制理论基础研究 .....	173
8.3	仿人智能控制器设计方法研究 .....	182
8.4	仿人控制器设计示例 .....	186
<b>第 9 章</b>	<b>智能优化计算</b> .....	194
9.1	优化问题的分类 .....	194
9.2	优化算法分类 .....	195
9.3	梯度优化计算 .....	196
9.4	混沌优化 .....	196
9.5	模拟退火算法 .....	199
9.6	遗传算法 .....	200
9.7	蚁群算法 .....	213
9.8	粒子群算法及应用 .....	217
9.9	鱼群算法简介 .....	222
9.10	混合优化计算方法简介 .....	223
<b>参考文献</b>	.....	225



# 第 1 章 绪 论

智能控制技术是控制理论发展的新阶段，主要用来解决那些用传统控制方法难以解决的复杂系统的控制问题。智能控制也是一门新兴的交叉前沿学科，它的发展得益于人工智能、模糊集理论、认知科学和生物控制论等许多学科的发展，同时对相关学科的发展也起到了积极的促进作用。智能控制也是发展十分快速的学科，尽管理论体系还不够成熟和完善，但智能控制理论和应用研究所取得的成果已深入到众多领域中，例如，航天航空、军事、工业、家居及服务行业等，显示出其旺盛的生命力，所涉及的各个研究领域受到了相关学者和工程技术人员的关注。

## 1.1 智能控制的发展史

随着人工智能和计算机技术的发展，智能控制已经有可能把自动控制、人工智能、系统论（如系统工程、系统学及运筹学）、信息论、神经生理学、进化计算和计算机等多种学科结合起来，建立一种适用于复杂系统的控制理论和技术。智能控制是自动控制技术的最新发展阶段，也是用计算机模拟人类智能进行控制的研究领域，并被许多国家确认为提高国家竞争力的核心技术。

从 20 世纪 60 年代开始，智能控制的概念逐渐形成、发展、成熟起来，其发展过程大致可划分为 3 个阶段。

### 1. 智能控制的发展早期（1960—1979 年）

20 世纪 60 年代，由于计算机的飞速发展，空间技术得以发展。数学家们在这一时期提出了状态空间法，即将高阶微分方程转化为一阶微分方程，用以描述系统的动态过程，从而诞生了以空间法为代表的“现代控制理论”。这一阶段的控制系统具有初步的智能和一定的自适应性，如 PID 控制和模型参考自适应控制。

1965 年，美国加利福尼亚大学伯克利分校的扎得（L. A. Zadeh）教授提出了模糊集合理论，奠定了模糊控制的数学基础。同年，美国的费根鲍姆着手研制世界上的第一个专家系统，美国普渡大学的傅京孙（K. S. Fu）教授首先提出把人工智能的直觉推理方法用于机器人控制和学习控制系统中，并将智能控制概括为自动控制和人工智能的结合。傅京孙等人从控制理论的角度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。

1966 年，Méndel 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”的新概念。

1967 年, Leondes 和 Mendel 首次正式使用“智能控制”一词, 并在学习控制系统中引入记忆、目标分解等技术, 提高了系统处理不确定性问题的能力。

1971 年, 傅京孙教授提出了智能控制“二元论”思想, 及智能控制是人工智能和自动控制相交叉的学科。

1974 年, 英国伦敦大学玛丽皇后分校的 Mamdani 教授利用模糊逻辑, 开发了世界上第一台模糊控制的蒸汽机, 从而开创了模糊控制的新方法。

1977 年, 萨里迪斯 (Saridis) 提出了智能控制“三元论”思想, 即智能控制是人工智能、运筹学和自动控制相交叉的学科。

20 世纪 70 年代后期, 将规则型模糊推理用于控制领域的研究成为热点, 1979 年, Mamdani 教授又研制出自组织模糊控制器, 使得模糊控制的研究取得了新的进展。

### 2. 智能控制的快速发展时期 (1980—1991 年)

20 世纪 80 年代, 随着专家系统技术的成熟和神经网络理论研究取得的重大突破, 智能控制的研究和应用领域迅速扩大, 智能控制的研究也进入了飞速发展的阶段。

1982 年, Fox 等人采用启发式技术与约束制导的方法完成了一个称为 ISIS 的加工车间调度的专家系统, 在生产中获得成功应用。同年, Hopfield 提出了 Hopfield 神经网络, 通过引入能量函数的方法对网络的稳定性进行了有效证明, 采用简单的模拟电路元件构造了 Hopfield 网络的硬件电路, 并成功应用于 TSP 问题 (旅行商问题) 的求解中。

1983 年, 萨里迪斯将智能控制应用于机器人的控制中。同年, 美国西海岸 AI (人工智能) 风险企业发表了名为 Reveal 的模糊决策支援系统, 在计算机的运行管理和饭店经营管理方面取得了许多成绩。日本富士电机开创了模糊控制在日本的第一项应用——水净化处理, 标志着智能控制已由研制、开发阶段转向应用阶段。

1985 年, IEEE 在美国纽约首次召开了智能控制学术讨论会。从此, 智能控制作为一个新的学科分支正式被学术界接受。

1985 年起, 遗传算法逐渐被广泛应用于许多实际问题, 成为用来解决高度复杂问题的新思路和新方法。遗传算法可用于模糊控制规则的优化和神经网络参数及权值的学习, 在智能控制领域中有着广泛的应用。

1986 年, 美国的 PDP 研究小组提出了 BP 神经网络, 实现了有导师指导下的网络学习, 将人工神经网络再次引入到控制领域, 并迅速得到了广泛应用, BP 神经网络也成为应用最为广泛的神经网络之一。

1987 年, 富士电机在仙台地铁线上采用了模糊控制技术, 并在随后的两年将模糊控制消费品推向高潮。

1987 年, 在美国费城召开了智能控制的首届国际学术会议。此后, 全球智能控制研讨会每年举行一次, 形成了智能控制的研究热潮。

### 3. 智能控制的新阶段 (1991 年至今)

进入 20 世纪 90 年代, 智能控制的研究势头异常迅速, 智能控制进入实际应用阶段, 在工业过程控制、国防军事、航空航天以及家居家电等各领域得到了广泛的应用。各种模糊控制商品也进入到寻常百姓家, 如模糊洗衣机、模糊空调等。

另外, 智能控制在中国也受到广泛重视, 1993 年 8 月, 中国自动化学会召开了全球华

人智能控制与智能化大会。中国自动化学会智能化专业委员会成立于1994年，挂靠清华大学。该委员会提倡实事求是的科学态度，执行“经济建设必须依靠科学技术，科学技术工作必须面向经济建设”的方针，团结全国智能化领域的广大科技工作者，通过组织各种形式的国内外学术交流，推动智能化科学与技术的进步，为促进我国科学技术的发展和现代化建设作出贡献。

该专业委员会涉及智能化理论与应用的前沿领域与研究热点，包括：人工神经网络、模糊系统、进化计算、智能化技术及其应用等，涵盖了这些领域的最新进展和重要成果。

该专业委员会的创建人为戴汝为院士、李衍达院士、张钹院士及涂序彦教授等著名专家。

“中国智能化会议”是该专委会主办的全国性学术会议例会，自1995年以来开始每年举行一次，1997年起每两年举行一次。

智能控制在我国的研究虽然起步较晚，但是发展却十分迅速，目前的研究水平已经得到国际学术界的认可。

## 1.2 智能控制的特点

作为一种新兴的控制理论，智能控制理论是为了解决被控对象和环境存在严重不确定性的控制问题而提出的一种控制理论。

作为一类控制方法，智能控制与传统的或常规的控制本质上没有太大差异，它们之间是密切相关、互相补充的。它们可以很好地有机结合，扩充常规控制方法并建立一系列新的理论与方法来解决更具有挑战性的复杂控制问题。与传统的自动控制相比，智能控制求解的任务一般具有如下的特点。

### 1. 被控对象的不确定性

传统的自动控制一般是建立在确定的模型基础上的，模型是已知的或者是经过辨识可以得到的，而智能控制的模型往往是未知的或者知道的很少，被控对象存在模型严重的不确定性，例如，工业过程的病态结构问题、存在无法预测的随机干扰、或者被控模型的参数在很大范围内发生变化等。在这种情况下，传统的控制方法有时显得无能为力，这也是智能控制诞生的原因之一。

### 2. 被控对象的非线性

对于线性被控对象，由于传统的控制理论具有较成熟的理论，能够很好地进行求解。而对于非线性的被控对象，有一些非线性控制理论可以解决部分问题，但存在算法复杂等缺点。而智能控制为解决这类复杂的非线性问题找到了一个出路，成为解决这类问题行之有效的途径之一。

### 3. 被控对象时变的复杂性

在传统的控制中，被控对象的参数往往是固定不变的或者其工作环境是相对不变的。而在现代智能控制中，被控对象的参数往往随着环境的改变而改变，其模型具有时变性。这就要求控制系统针对这些改变，自适应的改变控制策略。

#### 4. 控制任务的多样性

传统的自动控制系统的控制任务一般比较单一，例如要求输出量为定值（调节系统），或者使输出量跟随期望的运动轨迹（跟随系统）。而智能控制系统的控制任务具有多样性和复杂性的特点，例如在智能机器人控制系统中，要求系统具有自动规划和决策的能力、有自动避障和自动寻迹的能力等。对于这类具有复杂任务的系统，更适合采用智能控制进行求解。

为了能够有效求解具有上述特点的控制系统的任务，与传统控制相比，智能控制一般具有如下特点：

(1) 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能力。

(2) 具有变结构特点，以及自适应、自组织、自学习和自协调的能力，达到系统总体的自寻优控制目的。

(3) 具有自补偿、自修复能力和判断决策能力，可在熟悉或不熟悉的环境中自动地或人机交互地完成拟人任务。

### 1.3 智能控制的主要形式

为了实现规划、决策和学习等智能功能。智能控制将认知系统的研究成果和常规的控制方法有效地结合起来。常规的智能控制方法有模糊逻辑控制、分层递阶智能控制、神经网络控制、专家控制和仿人智能控制等很多种形式。

#### 1. 分层递阶智能控制

分层递阶是智能控制的最早理论之一，是在早期学习控制系统的基础上，总结人工智能与自适应、自学习和自组织控制的关系后逐渐形成的。

在对人类思维活动的有关研究中发现，人类神经系统至少可以分为 7 个层次，它们以一种递阶的形式来协调控制人体的各种日常活动。G. N. Salidis 等人在研究智能控制的有关理论中，提出智能系统应采取一种分层递阶的组织形式。Salidis 提出了如图 1-1 所示分层递阶的智能控制系统结构：将一个智能控制系统分为组织级、协调级和执行级 3 个层次，3 个层次以递阶形式连接起来，构成一个智能控制系统。各层的任务和分工如下：

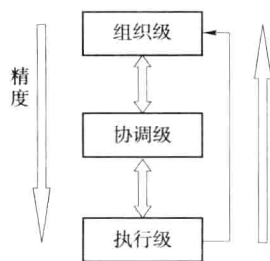


图 1-1 3 级分级递阶智能控制系统

(1) 执行级。作为智能控制系统的最底层，执行级通常由一些经典的反馈控制器组成。这些控制器接收并执行由上层产生的各种控制命令。传统的各种控制理论是构建执行层的有力工具。

(2) 组织级。组织级由一系列的人工智能中的推理决策算法组成，负责对系统的当前状况作出合理的判断，并利用有关的知识产生一个合理的问题解决办法。这层向下一层发出的通常为离散的指令。

(3) 协调级。协调级是连接执行级和组织级的中间环节。它负责将组织级的离散指令解释为执行级各控制器能够接受的控制输入，并对矛盾的控制输入进行仲裁。

在分层递阶的控制系统中，智能随着阶数的增加呈增长趋势；而控制精度随智能的增加而降低。也就是说，最底层的执行级具有最低的智能，但具有最高的控制精度。这种分层递阶的智能控制系统结构目前被认为是提高控制系统自主性的一种有效的结构。

## 2. 模糊逻辑控制

1965年，美国加利福尼亚大学的L. A. Zadeh首先提出了“模糊集合”的概念。基于模糊逻辑推理，模糊控制应运而生。

模糊控制是智能控制的早期发展形式，模糊控制是基于模糊逻辑推理和模仿人类思维具有模糊性的特点，对难以建立精确数学模型的对象实施的一种规则性控制，模糊控制不需要精确的数学模型，其基本的控制规则形式为“IF（条件）THEN（作用）”。

模糊控制器是模糊控制系统设计的关键，一般由模糊化、知识库、模糊推理以及去模糊化等4部分组成，其结构如图1-2所示。

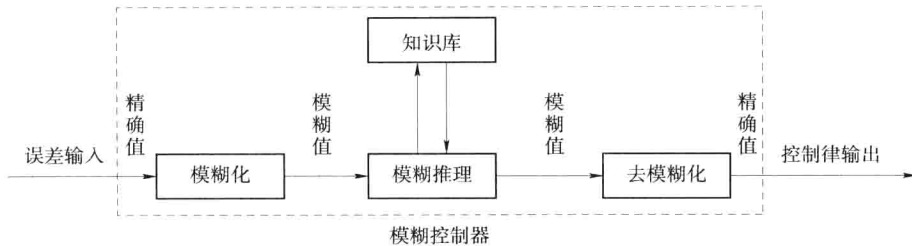


图 1-2 模糊控制器的组成

模糊逻辑控制的主要特点有：①控制系统设计依据专家（操作人员）控制经验和操作数据，不需要精确的数学模型；②具有较强的鲁棒性，可解决传统控制难以解决的非线性、时变及时滞系统的控制；③应用语言变量而不是数学变量，易于构造形成专家系统；④推理过程模仿人的思维过程，采用不精确推理，能够处理复杂的非线性系统和病态系统的控制问题；⑤采用离线推理，在线查表的方式实施控制，能够很好地满足控制系统的实时性要求。

模糊控制作为一种较新的控制方法在许多领域取得了很好的研究和应用成果，许多模糊控制的家电产品更是普遍地出现在日常生活中，模糊控制已经成为目前应用最为广泛的智能控制方法之一。但是模糊控制系统还有许多理论和设计问题亟待解决，例如：①模糊控制的稳定性和鲁棒性等性质的理论分析与数学证明问题；②信息简单的模糊处理会导致系统的控制精度降低和动态品质变差；③模糊控制的设计尚缺乏系统性。

另外，模糊控制的关键技术问题之一是隶属度函数的选取和隶属规则的确定。而隶属度函数和隶属规则往往根据大量的经验预先确定完成，在控制过程中是不能改变的。因此，经典的模糊控制一般不具备自适应和学习的能力。为此，许多学者将模糊控制与其他理论方法相结合，提出了许多改进方法，如模糊自适应控制、模糊神经网络控制等。目前，模糊控制仍然是智能控制领域最活跃的研究内容之一。

## 3. 神经网络控制

近年来，人工神经网络以其独特的优点引起了人们的极大关注。其基本思想是从仿生学的角度对人脑的神经系统进行模拟，使机器具有人脑那样的感知、学习和推理等智能。

对于控制界，神经网络的吸引力在于：①能够充分通过任意复杂的非线性关系；②能够学习与适应严重不确定性系统的动态特性；③所有定量或定性的信息都等势分布储存于网络内的各神经元，故有很强的鲁棒性和容错性；④采用并行分布处理方法，使得快速进行大量运算成为可能。这些特点显示了神经网络在解决高度非线性和严重不确定性系统的控制方面的巨大潜力。

神经网络在控制中的作用可分为 3 类：①用于基于模型的各种控制结构，如在内模控制、模型参考自适应控制、预测控制等控制中充当对象的模型；②神经网络本身用作控制器；③在控制系统中起优化计算的作用。

常见的神经网络控制方法有监督控制、间接自校正控制、直接自适应控制、模型参考自适应控制、内模控制以及神经网络预测控制等。这些控制方法都已在实际系统中取得良好的应用效果。

尽管神经网络控制器具有良好的发展和应用潜力，但目前还存在一些难题尚未完全解决：例如：①神经网络的稳定性与收敛性的证明比较困难，需要寻求更有效的分析手段；②神经网络的学习速度一般比较慢，在有些情况下，这与实时控制的计算速度存在一定的矛盾，成为自适应神经网络控制在实际控制系统中推广应用的主要障碍之一；③在神经网络结构拓扑方面还有待进一步深入开展理论研究，尤其需要研究构建适合于控制领域的神经网络结构；④基于神经网络的控制系统在稳定性、鲁棒性与收敛性的分析上存在较大的困难，需要开展深入的理论研究；⑤将神经网络与模糊控制相结合构造模糊神经网络，在控制领域取得了良好的应用效果，两者都是无模型的估计器，学习和推理功能非常类似于人脑，而且易于硬件实现。如何进一步提高其控制精度将是今后研究的重点内容之一。

#### 4. 基于知识工程的专家控制

20 世纪 80 年代初，正当人工智能中的专家系统技术方兴未艾之时，自动控制领域的学者开始在控制系统中引入专家系统的思想，试图解决仅仅依靠传统的自动控制方法难以解决的种种实际控制问题，从而推进自动控制理论和技术的发展，由此产生了专家控制这种新颖的控制方法。

专家控制的实质是以智能的方式来利用控制对象和控制规律的各种知识，从而达到受控系统的优化和实用化。

专家系统有知识库和推理机制两个主要要素。知识库用于存储按某种格式表示的某个专门领域中的专家知识条目；推理机制通过调用知识库中的条目进行推理、判断和决策，实现类似专家推理的问题求解。

专家系统的知识库与推理机在组织结构上分离建造，而在运行过程中又相互作用，这使得系统具有极大的灵活性，知识的增删、修正和更新独立于推理机制，同时又具有很好的透明性，推理的结论和根据可以与系统外部交互。

总之，专家系统将专门领域中的问题求解思路、经验、方式组织成一个实际运行的形式系统，表现出一种拟人的智能性，它与传统的自动控制理论和方法结合，形成了专家系统控制的基本思想。

为了实现专家控制，必须把控制系统看作是一个基于知识的系统，而控制器则要体现知识推理的机制和机构。

一般可以把控制系统涉及的知识分为两类。

(1) 受控对象或过程的知识。其中的一部分属于先验知识，例如控制问题类型（受控变量等），以及定性的过程信息（开环特性等）；另一部分属于系统运行时的动态知识（对象或过程的参数变化和中间控制结果等）。

(2) 控制、辨识、监督的知识。其中一部分属于定量知识，即各种有关的解析算法，另一部分属于定性知识，即各种有关的经验原则。

控制器的推理机制可以表示为如下模型：

$$U = f(E, K, I)$$

式中： $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  为控制器的输入集； $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$  为系统的知识项集； $I = \{i_1, i_2, \dots, i_p\}$  为某种推理机构的输出集； $U = \{u_1, u_2, \dots, u_q\}$  为控制器的输出集。

而  $f$  为一种智能算子，其基本形式为：

IFE AND K THEN <IF I THEN U>

即根据输入信息  $E$  和系统中的知识  $K$  进行推理，然后根据推理结果  $I$  输出相应的控制行为  $U$ 。

类似于专家系统，整个控制问题领域的知识库和一个体现知识决策的推理机就构成了专家控制的主体。

知识库可采用人工智能中的各种知识表示方法构建其内部的组织结构。其中，知识包括数据和规则两部分，如事实（先验知识）、证据（动态信息）、假设（由事实、证据推得的中间状态）和目标（离线设定的或在线建立的性能目标）都属于数据，数据常常用一种框架（Frame）结构组织在一起，形成数据库。而定性的推理知识则属于规则，它们往往表示为产生式规则（Production rule），组成规则库。

推理机的基本功能在于按某种策略选用推理规则实现推理，对于专家控制，同样可采用人工智能中的前向推理或后向推理等策略实现推理。

专家控制为传统控制技术的发展开辟了新的思路，实现了解析规律与启发式逻辑的结合，从而使控制作用的描述得以完整化，尤其对复杂的受控对象或过程表现出了良好的控制性能和广泛的应用前景。

由于各种控制知识具有复杂性和多样性的特点，如何有效地实现知识的获取和组织是专家控制应用的关键问题之一，而如何有效地实现实时推理是专家控制应用的另一个关键问题。目前，专家控制尚未形成较为系统的理论体系，控制的稳定性、鲁棒性等问题都有待于深入的研究。

## 5. 混沌控制

混沌控制由1963年美国气象学家Lorenz首先提出。1963年，Lorenz研究两无限平面间的流体的运动，在用计算机求数值解时发现，在参数取适当值时，解是非周期的，而且具有随机性。这是最先明确地从决定性方程得到随机性结果。随后Henon和Rossler等人也得到了类似的结果，Ruelle、May、Feigenbaum和Couette等人也对这类随机运动的一些特性进行了研究，开创了一种新的运动形态——混沌的发现和研究的。

混沌和混沌控制是非线性动力系统的新理论、新方法和新概念，是智能控制的重要组成部分。

混沌控制是指混沌的控制与诱导。研究这一题目的科研人员来自工程、数学、物理、化学、生物、医学、经济以至社会科学的众多领域。已提出了多种控制（或诱导）混沌的方法，诸如参数扰动方法、纳入轨道和强迫迁徙方法以及工程反馈控制方法等。

由于混沌控制在工程技术上的重大研究价值和极其诱人的应用前景，近几年，混沌控制问题引起了国际上非线性动力系统和工程控制专家的极大关注，成为了非线性科学研究的热点之一。混沌系统和混沌现象的控制是一个全新的科学前沿，很多系统的理论和有效的方法尚待开发。

## 1.4 智能控制的应用

智能控制在自然科学和社会科学的各个领域中有着广泛的应用前景，其工程应用现状日益成熟。为了便于智能控制的研究和应用，大量的研究人员还开发设计了各种软硬件技术。例如，Math works 公司推出的高性能数值计算可视化软件 Matlab 中含有神经网络、模糊逻辑等多个智能控制领域的工具箱或函数模块等，便于工程人员进行仿真开发研究。随着嵌入式系统的发展，如 DSP 技术、ARM 技术的普及应用，为智能控制的推广应用提供了基本的硬件保障。下面简单介绍智能控制的工程应用现状。

### 1. 军事应用

主要的应用是进行目标的探测、跟踪和识别，包括 C3I 系统、自动识别、自主式运载制导、遥感、战场监视和自动威胁识别系统等。迄今为止，美、英、法、意、日、俄等国家已研制出了上百种军事数据融合与控制系统，智能控制技术在这些系统展现出了优良的应用性能。

### 2. 机器人智能控制

机器人经常工作在动态、不确定与非结构化的环境中，这些高度不确定的环境要求机器人具有高度的自制能力和对环境的感知能力。机器人研究领域所涉及的各种基本问题，如定位、环境建模、检测、控制和规划等，均可采用人工神经网络、模糊控制和专家系统技术进行解决，这方面的研究已经日趋成熟，在实际产品中已经得到实际验证和应用。利用神经网络强大的自学习和非线性映射能力能够实现机器人领域所涉及的多耦合、非线性系统的控制。利用模糊控制可提高机器人控制系统的鲁棒性和自适应能力，遗传算法和进化计算为机器人系统中的参数优化提供了高效的求解方法。智能控制技术也广泛应用于机器人传感器信息融合和视觉处理等方面。此外，水下自主运载器、水下无人机车、无人自动驾驶机动车在未知或复杂危险环境下完成探索、通信、合作等功能也需要智能控制的协助实现。

### 3. 机械制造中的智能控制

在现代先进制造系统中，经常需要利用不够完备或不够精确的数据来求解机械制造中的技术问题，人工智能技术为解决这些难题提供了一条有效的解决途径。随后，智能控制技术也被广泛地应用于机械制造行业中。采用智能控制技术可实现对制造过程的动态环境



建模、信息的预处理和综合、在线模式识别等。

### 4. 电力电子研究领域中的智能控制

电力系统中发电机、变压器、电动机等电机电气设备的设计、生产、运行、控制是一个复杂的过程，国内外的电气工作者将智能控制技术引入到电气设备的优化设计、故障诊断及控制中取得了良好的应用效果。采用智能控制方法实现电气设备的优化设计能够有效降低成本、缩短计算时间、提高产品的质量和生产效率。专家系统等技术成为求解电气设备故障诊断的主要方法。另外，智能控制在电流控制 PWM 技术中的应用是具有代表性的应用方向之一，也是目前研究的新热点之一。

### 5. 工业过程中的智能控制

生产过程的智能控制主要包括两个方面：局部级和全局级。局部级的智能控制是指将智能引入工艺过程中的某一单元进行控制器设计，例如智能 PID 控制器、专家控制器、神经网络控制器等。全局级的智能控制主要针对整个生产过程的自动化，包括整个操作工艺的控制、过程的故障诊断、规划过程操作处理异常等。

### 6. 智能控制在广义控制领域中的应用

从广义上理解，可以认为自动控制系统是指不通过人工干预而对被控对象进行自动操作、控制或调节的系统。系统中的被控对象可以是上述的那些有形的机械或机电设备，也可以是抽象的复杂系统，如经济系统、股市行情、气象信息、城市交通和地震火灾预报等。这类被控对象的特点是以知识表示的非数学广义模型，或者含有不完全性、模糊性、不确定性的数字过程。通常传统的控制方法对这类系统无法实现有效控制，只能采用智能控制理论进行推理和决策。

除上述所提到的领域外，智能控制在智能交通管理系统、遥感技术、太阳能发电等领域也有着广泛的应用。作为一门新兴的学科，智能控制虽然出现时间不长，但在诸多领域中所取得的成果和进展是有目共睹的。随着基础理论不断创新和实际应用方法日益成熟，智能控制在控制领域将产生更大的飞跃，必然会被更广泛地应用于工业、农业、军事等多个领域中。