

智能控制技术

刘山

浙江大学控制科学与工程学院

课程目的

- 了解智能控制的基本概念、架构与原理
- 掌握智能控制的分类与核心算法
- 具备设计智能控制方案与编写智能控制程序的能力

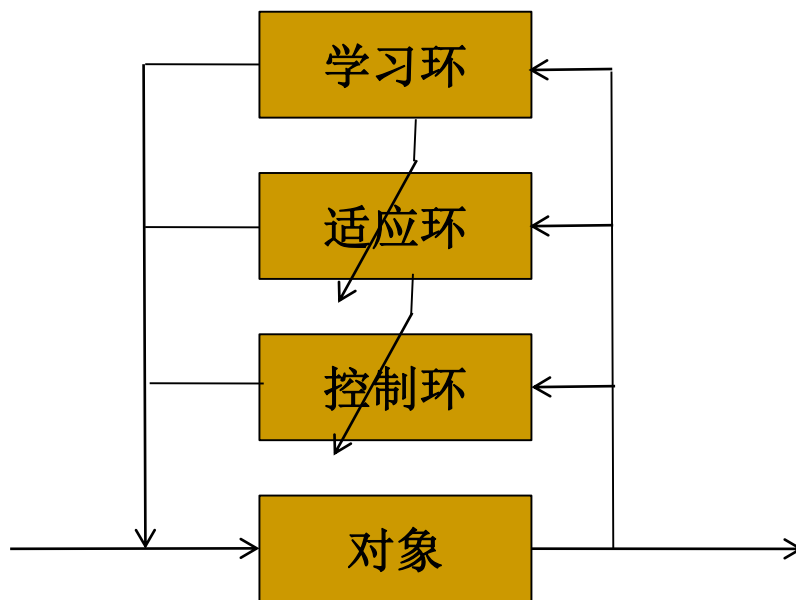
控制论

- 维纳（美国数学家，1894—1964）：
 - 《控制论，关于动物和机器的控制与通讯》（1948，巴黎），核心是反馈
 - 控制论（Cybernetics，治理和统治）：在机器和活的机体中操纵和通讯的理论
- 奥多布莱扎（罗马尼亚神经生理学家，1902-1978）：
 - 《协调心理学》（1938，巴黎）
 - 协调：失调、可逆、平衡、等值、补偿、反馈、循环、变换、终极

智能控制



智能控制的目标不是“智能”，而是“控制”



智能控制

- 本质方法
 - 利用规则，模拟人类的专家控制经验
 - 利用机器学习，模拟人类的学习能力
- 上述本质方法带来智能控制的一个其它控制方式所没有的特点：
 - 面对相同的控制局势，智能控制能够获得比以前控制效果更好的效果。

常见智能控制

- 专家控制 (**Expert systems**)
- 贝叶斯控制 (**Bayesian probability**)
- 模糊控制 (**Fuzzy logic**)
- 神经网络控制 (**Neural networks**)
- 神经模糊控制 (**Neuro-fuzzy control**)
- 进化控制 (**Evolutionary computation**)
- 基因控制 (**Genetic algorithms**)
- 多智能体控制 (**Multi agent**)

课程信息

■ 课程网站:

- 学在浙大, <http://course.zju.edu.cn>

■ 教师: 刘山

- 办公室: 控制老楼404
- 手机: 13958055563
- Email: sliu@zju.edu.cn
- 研究方向:
 - 智能控制理论与技术
 - 机器人技术
 - 工业过程控制

■ 助教: 刘禹骏

- 手机: 13588178237
- Email: 22432020@zju.edu.cn
- 实验室: 教九511

课程主要参考书

- 《智能控制原理及应用》， 蔡自兴 编著， 清华大学出版社， 2007
- 《智能控制理论与技术》， 孙增圻， 张再兴， 邓志东 编著， 清华大学出版社， 1997
- 或其它智能控制参考书

考核方式

- 平时表现和平时作业：（50%）
- 期末报告：（50%）
 - 自选一个具体的过程或系统，设计合适的智能控制算法实现一个控制目标。（为限制范围，必须包含模糊控制和神经网络控制两种方案）
 - 期末报告上交截止时间：2025年1月12日
- 平时作业及期末报告上交：
 - 通过学在浙大系统提交
 - 包括报告文档、源程序及相关文档

平时作业要求

- 源程序（40分）：
 - 算法实现（30分）
 - 程序注释（10分）
- 报告文档（60分）：
 - 问题分析（10分）
 - 算法设计（20分）
 - 结果表现及分析（20分）
 - 排版（10分）

期末报告要求

1. 控制对象应为非线性，模型可来源于实际过程，实验对象或文献资料等。若来自文献，请将相关文献作为附件提交。
2. 控制目标要有明确的意义，需要对问题的背景进行阐述。
3. 需给出详细的问题描述，算法选择的思路分析。鼓励采用创新性的算法，但需要与课程介绍的智能控制算法相关。
4. 具体的智能控制算法设计过程。鼓励分析系统的控制性能。
5. 在**Matlab**中实现整个控制过程的仿真（包含模型和控制算法）。若有真实数据最佳，若没有，则由模型运行得到；仿真中可考虑施加干扰、模型不匹配等条件。
6. 对仿真结果进行分析，最好与**PID**控制进行仿真对比。进一步，可采用不同的智能控制方案进行仿真对比。
7. 需列出参考文献和参考资料，引用规范。
8. 需分别提供报告文档和源程序（执行结果与报告文档一致）。
9. 必须遵守学术道德规范，鼓励相互之间进行讨论，但提交的作业必须独立完成。

期末报告评分准则

- 选题（**10分**）
- 文档内容（**60分**）
 - 问题分析（**15分**）
 - 算法设计与实现（**25**）
 - 结果分析（**20分**）
- 源程序（**20分**）
 - 程序主体（**10分**）
 - 程序注释（**10分**）
- 格式排版（**10分**）

智能控制概述

刘山

浙江大学控制科学与工程学院

控制技术的发展

- 两个发展领域
 - 理论
 - 应用
- 趋势：倒金字塔结构
 - 深度
 - 广度

理论方法

模糊集合论、模式识别、人工智能、进化计算、图论

泛函分析、微分几何、随机过程、数学规划

积分变换、矩阵理论、变分法

微分方程理论、概率论

研究对象

智能化

大规模、分布参数、多目标

非线性、模糊、不确定、混沌

时变、随机、**MIMO**

线性定常、**SISO**

控制手段

大规模现场总线、超大规模远程控制系统

分布式计算机控制系统：控制站、计算站

工业控制计算机、可编程序控制器

电子调节器、电动控制器

机械机构

学科分支

进化控制、生物控制

学习控制、专家控制、模糊控制、神经控制

自适应控制、鲁棒控制、预测控制

多变量控制、随机控制

线性系统理论

应用对象

■ （以工业工程为例）

集团（虚拟企业，供应链）

企业（人力、技术、财务、供销）

生产线（人力的、技术的）

系统（物理的）

装置（物理的）

部件（物理的）

应用领域

环保、经济、通讯、医疗、农业、家庭

电力、电子、机械、运输、交通

冶金、造纸、制药、建材

炼油、化工、航空

军事

自动化应用的目标与手段

- 目标：经济效益
 - 高效率
 - 高质量
 - 低成本
- 手段：先进理论 + 实用化
 - 面向应用
 - 目标驱动
 - 先进工具

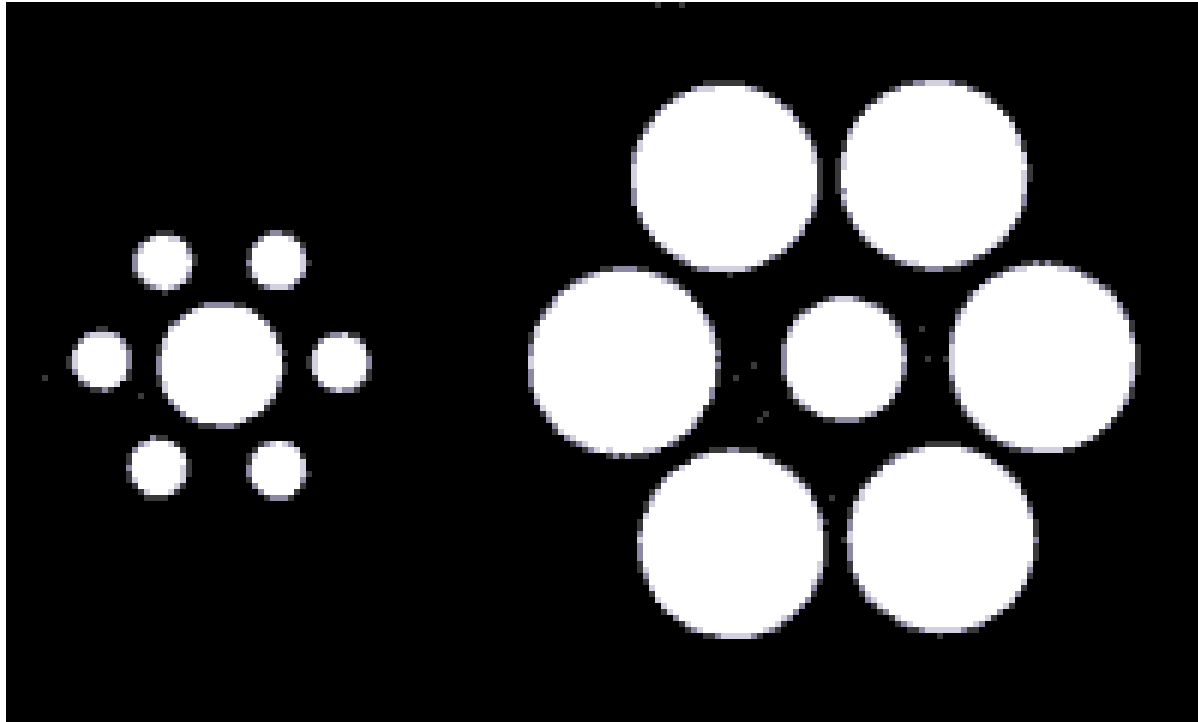
自动控制的机遇与挑战

- 对象的复杂性
 - 高维
 - 时变
 - 随机
 - 非线性
 - 分布
 - 大规模
- 对象和环境的不确定性
 - 机理未掌握（未建模动态）
 - 信息不完全（难检测参数）
- 高目标要求
 - 适应性
 - 鲁棒性
 - 容错性
 - 多目标最优
- 在上述情况下，基于经典数学模型的常规控制理论无法实现有效的控制。
- 智能控制是自动控制理论与技术发展的必然趋势

智能认知的不确定性



智能认知的错误



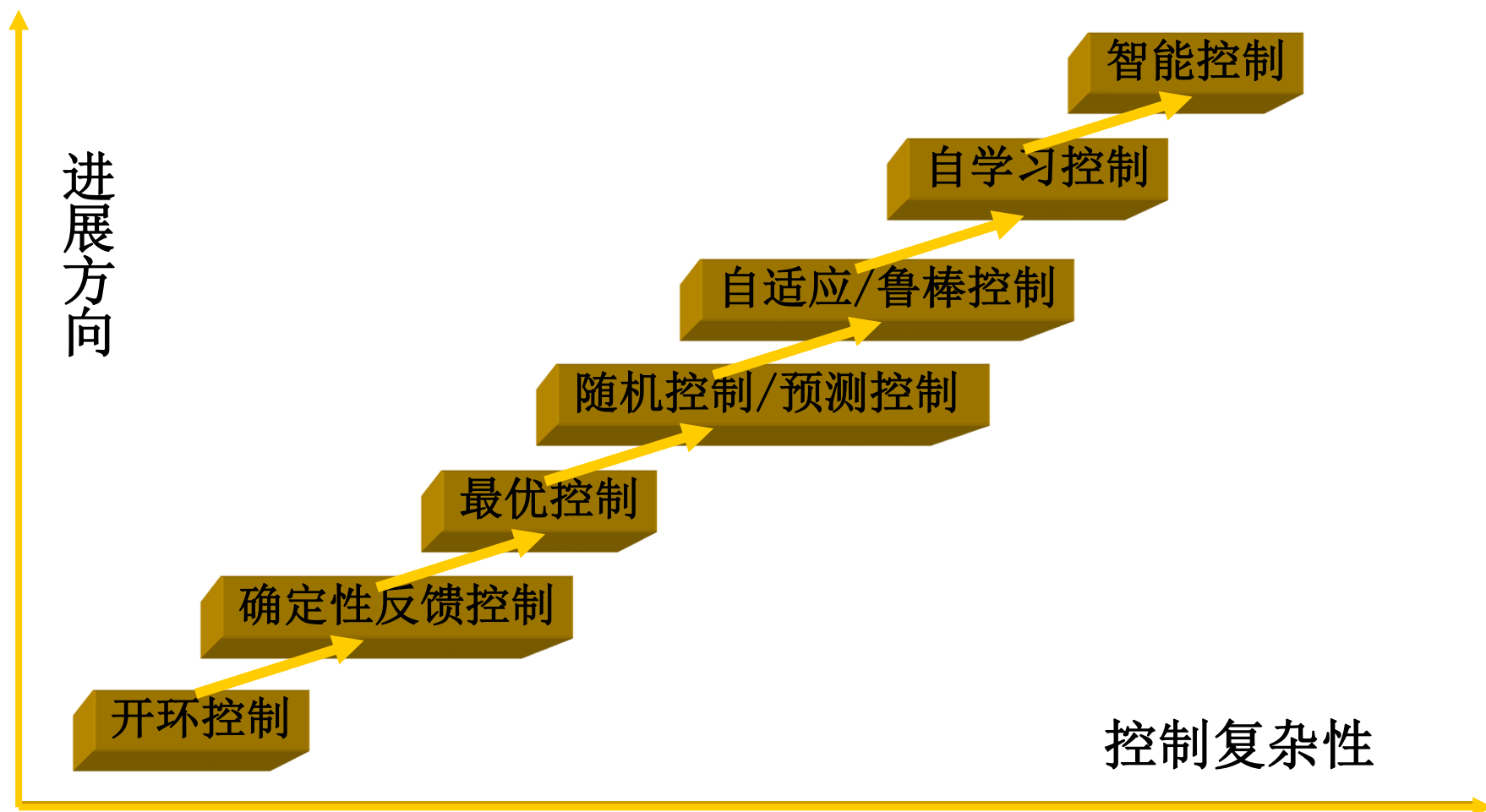
从常规控制到智能控制

- 常规控制：基于数学物理方法的自动控制
 - 精确的、严密的
 - 机械的、脆弱的
- 智能控制：基于人工智能方法的自动控制
 - 模糊的、松散的
 - 柔性的、鲁棒的

自动控制技术的发展阶段

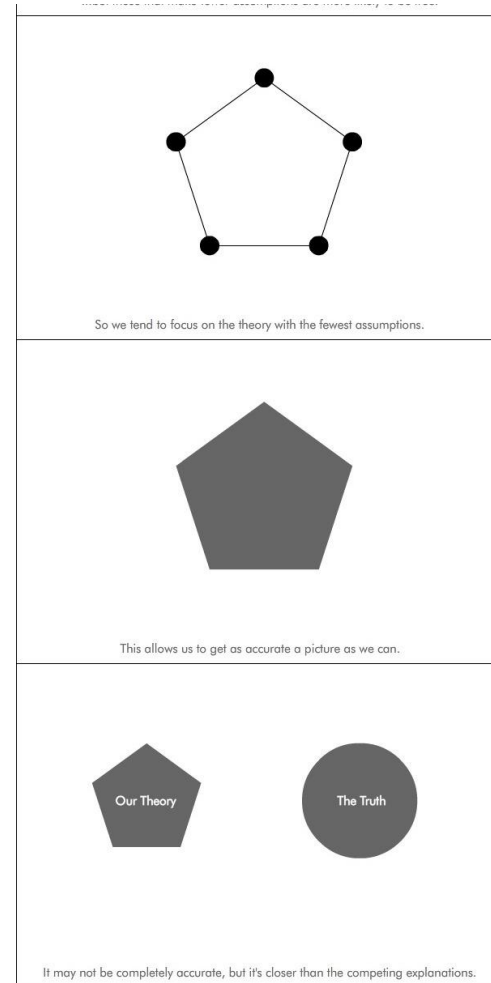
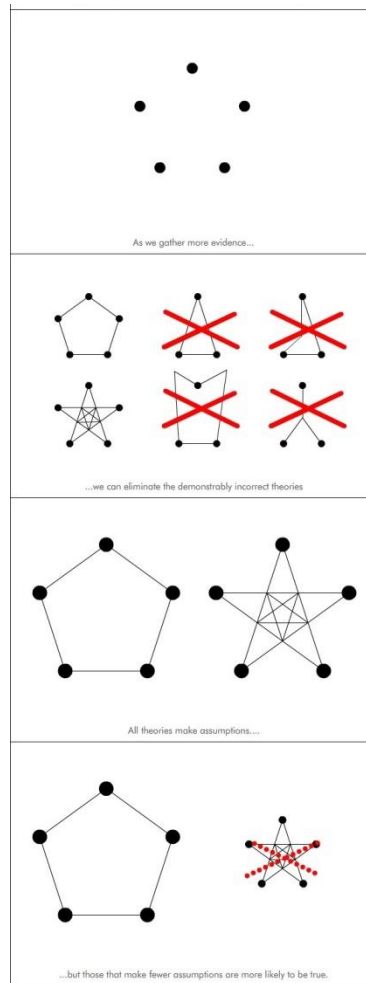
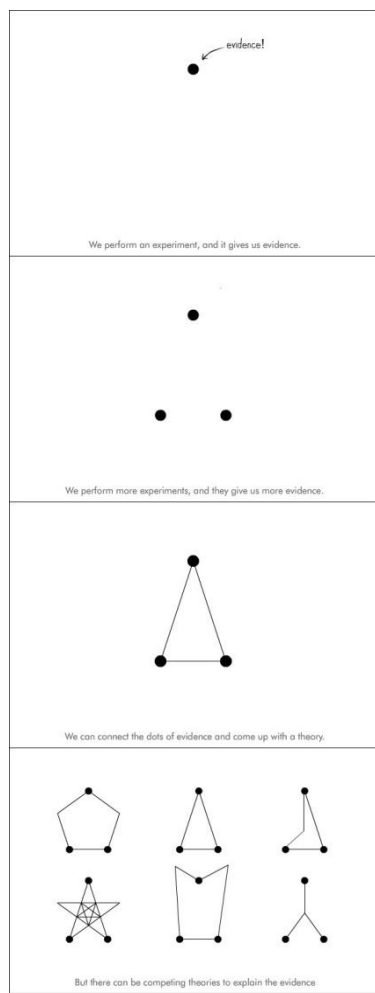
	第一阶段	第二阶段	第三阶段
形成时间	40—50年代	60—70年代	80年代以来
理论基础	经典控制理论	现代控制理论	智能控制理论
研究对象	单入单出系统	多入多出系统	多级多变量系统
分析方法	传递函数频域法	状态方程时域法	多学科交叉
研究重点	反馈控制	最优、随机、自适应控制	不确定、大系统智能控制
控制装置	自动调节器	数字计算机	智能机器
应用	单机自动化	机组自动化	综合自动化

控制技术的发展过程



奥卡姆剃刀原理 (Ockham's Razor)

如无必要，
勿增实体



本课程内容

■ 一 智能控制概论

- 1.1 智能控制的发展概况
- 1.2 智能控制的定义、特点、结构与分类

■ 二 递阶控制

- 2.1 递阶智能控制的原理与结构
- 2.2 集散递阶智能控制

本课程内容

■ 三 专家控制

- 3.1 专家系统的基本概念
- 3.2 专家控制的结构、类型与设计

■ 四 模糊控制

- 4.1 模糊数学基础
- 4.2 模糊控制原理与结构
- 4.3 模糊控制的设计方法

本课程内容

■ 五 神经网络控制

- 5.1 人工神经网络概述
- 5.2 神经网络控制的结构方案
- 5.3 神经网络控制的设计

■ 六 学习控制

- 6.1 基于模式识别的学习控制
- 6.2 迭代学习控制
- 6.3 重复学习控制

本课程内容

- 七 进化控制
 - 7.1 遗传算法概述
 - 7.2 进化控制原理与结构

智能控制概述内容

- 1、智能控制的发展概况
- 2、智能控制的基本概念
- 3、智能控制的结构和分类

智能控制的发展概况

主要人物与事件（一）

■ 1966 年J.M. Mendel

- 在*Self-organizing control systems*上发表论文：“Application of artificial intelligence techniques to a spacecraft control problem”，
- 首次提出智能控制的术语，将机器学习应用到控制领域，采用自学习和自适应方法解决控制系统的随机特性问题。

■ 1965年L.A. Zadeh

- 发表了著名论文“fuzzy sets”（模糊集合）。

■ 1974年E.H. Mamdani

- 将模糊推理应用于控制系统，开辟了模糊控制的新领域。
- 此后，在模糊控制的理论探索和实际应用两个方面，都取得大量的成果。
- 模糊控制是智能控制最活跃的研究领域。

主要人物与事件（二）

■ 1971年傅京孙(K.S. Fu)

- 在IEEE Trans. AC上发表论文：“Learning control systems and intelligent control systems: an intersection of artificial intelligence and automatic control”，
- 提出智能控制理论的框架（三类智能控制系统：人作为控制器、人机协同、无人智能系统），首先把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统。

■ 1977年G.N. Saridis

- 在Proceedings of IEEE上发表综述：“Towards the realization of intelligent controls”，
- 提出分层递阶智能控制结构（三级智能控制系统）。

■ 1986年K.J. Aström

- 在Automatica 上发表论文：“Expert control”，
- 提出实用的智能控制器方案。

主要人物与事件（三）

时间	人物或地点	事 件
1985. 8	美国纽约	IEEE 第一届智能控制学术讨论会，60 名代表，来自美国各地
1987. 1	美国费城	第一届智能控制国际讨论会，150 名代表，来自美国、欧洲、日本、中国及其它国家
1992. 6	中国北京	中国全国智能控制专家讨论会
1993. 8	中国北京	第一届全球华人智能控制与智能化大会，第三届以后改为“全球智能控制与自动化大会”（WCICA）
1992		国际智能自动化联合会（IFIA）成立
1993		国际学术刊物《Intelligent Automation》创刊
1993		中国自动化学会智能自动化专业委员会成立

智能控制的基本概念

智能控制

■ 定义

- 一种在宏观结构上和行为功能上对人控制器进行模拟，能够在各种复杂的不确定环境中，以最低限度的人工干预，高度自主地实现最优目标功能的控制技术。

■ 机制

- 一般不依据数学模型进行处理。
- 根据积累的经验和知识进行在线推理，确定控制策略。
- 在精度和不确定性之间折中。

■ 智能的结构形式

- 基于规则：根据经验形成规则，如专家系统。
- 数据驱动：模拟神经系统工作，如人工神经网络。

智能控制特点

■ 模型要求

- 控制对象一般为不确定的非线性系统，控制的设计和运行基本不依赖于对象数学模型

■ 信息结构

- 复合型信息表达，反映系统运动状态特征信息的经验和知识

■ 知识利用

- 核心在高层控制，实现广义问题求解。利用智能子系统决定控制决策，决策基于知识推理、学习和联想

智能控制系统的功能

- 联想记忆和学习能力
 - 对一个过程或未知环境所提供的信息进行识别与记忆，学习并利用积累的经验进一步改善系统的性能。
- 动态自适应能力
 - 针对系统不确定性及外界环境变化，修正或重构自身结构和参数。
- 组织协调能力
 - 针对复杂任务和分散的传感信息，进行自组织和协调，使系统具有主动性和灵活性。

智能控制研究的数学工具

- 符号推理与数值计算的结合
- 离散事件系统与连续时间系统分析的结合
- 介于两者之间的方法
 - 神经网络
 - 模糊集合论
 - 计算智能方法

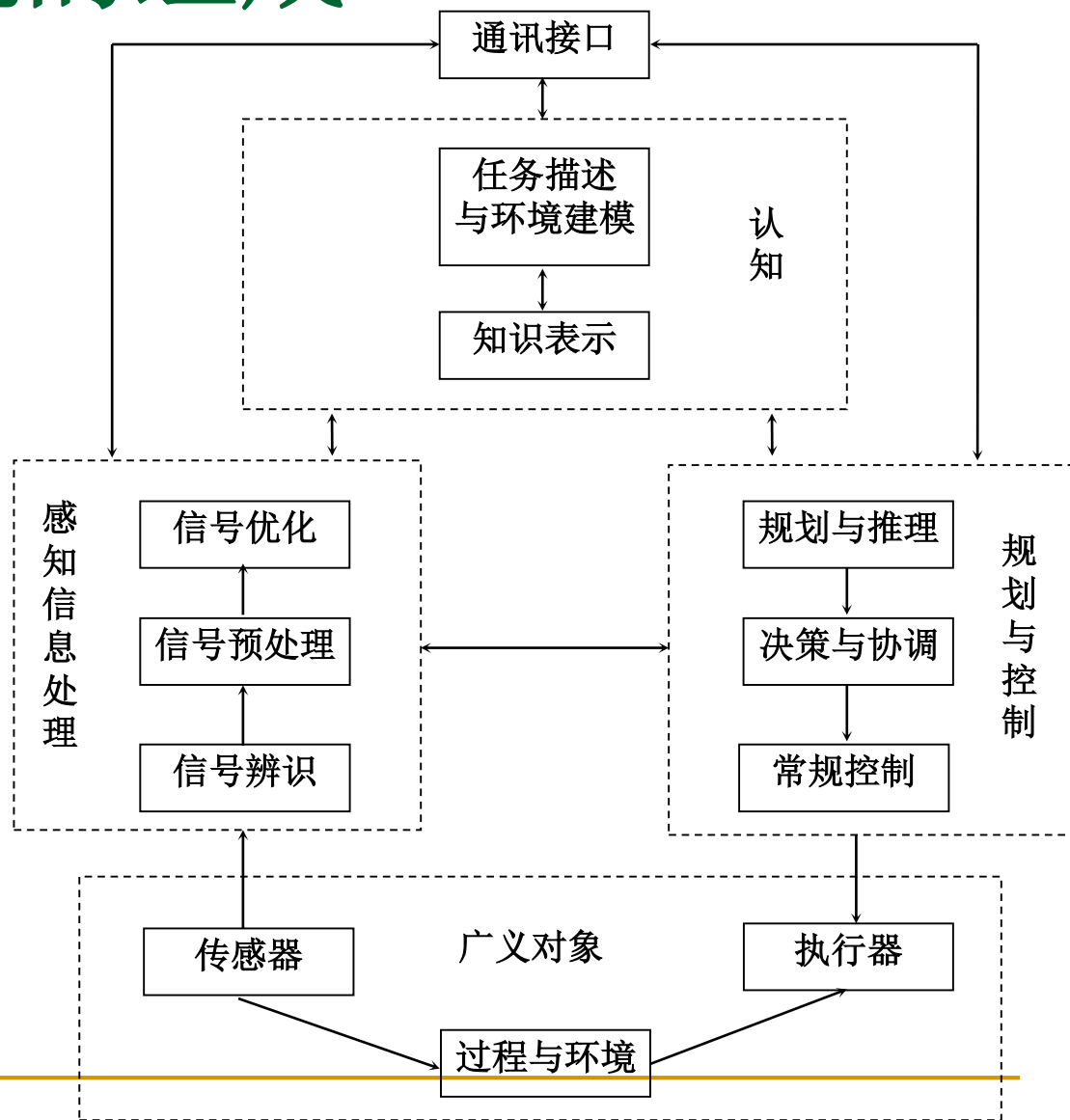
智能控制主要学派

- 符号学派（又称：符号主义、逻辑主义、心理学派、计算机科学派）
 - 用计算机在外部功能上模拟人的智能。
- 联结学派（又称：联结主义、生理学派、仿生学派）
 - 从仿生学观点用硬件模拟人脑结构。
- 行为学派（又称：进化主义、控制论学派）
 - 从进化论观点模拟人在控制过程中的行为特征（如自寻优、自学习、自组织等）基于“感知一动作”模式，不断进化的过程。
- 上述学派是互相渗透的。

智能控制的结构和分类

智能控制系统的组成

- 认知
- 规划与控制
- 感知信息处理



智能控制的结构理论

- 二元交集结构: $IC = AI \cap AC$
- 三元交集结构: $IC = AI \cap CT \cap OR$
- 四元交集结构: $IC = AI \cap CT \cap IT \cap OR$

AI: 人工智能 (Artificial Intelligence)

AC: 自动控制 (Automatic Control)

CT: 控制论 (Control Theory或Cybernetics)

OR: 运筹学 (Operation Research)

IT: 信息论 (Information Theory或Informatics)

IC: 智能控制 (Intelligent Control)

智能控制系统的分类

- 分级递阶学习控制（**Hierarchically Learning Control**）
 - 交叉学科：模式识别理论
 - 原理：模拟人在不同场合下的经验运用过程
- 专家控制（**Expert Control**）
 - 交叉学科：专家系统理论
 - 原理：将人的经验用知识工程方法系统化地组织起来
- 模糊控制（**Fuzzy Control**）
 - 交叉学科：模糊逻辑理论
 - 原理：知识的数学化表达用于控制决策生成
- 神经控制（**Neurocontrol**）
 - 交叉学科：人工神经网络理论
 - 原理：硬件模拟人脑控制器

分级递阶智能控制

■ 第一级：组织级

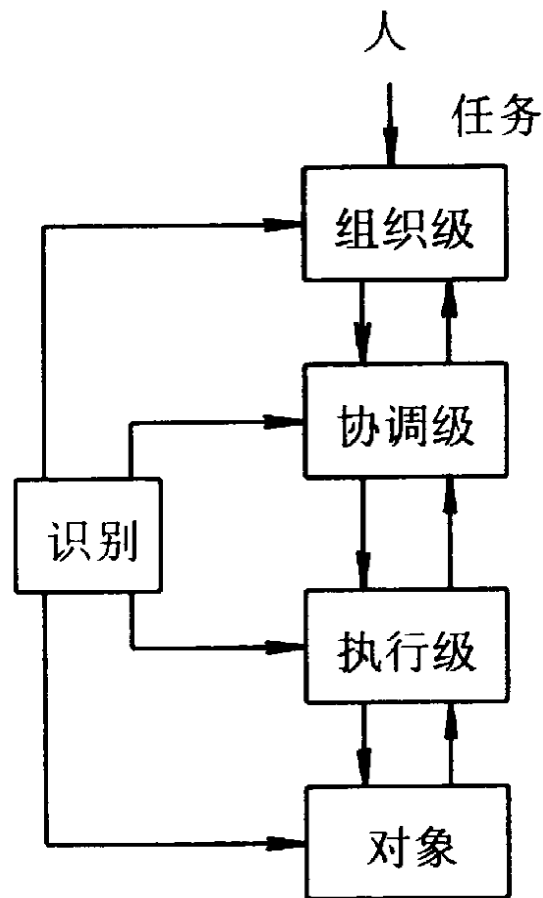
- 代表系统的主导思想，并由人工智能起控制作用。

■ 第二级：协调级

- 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。

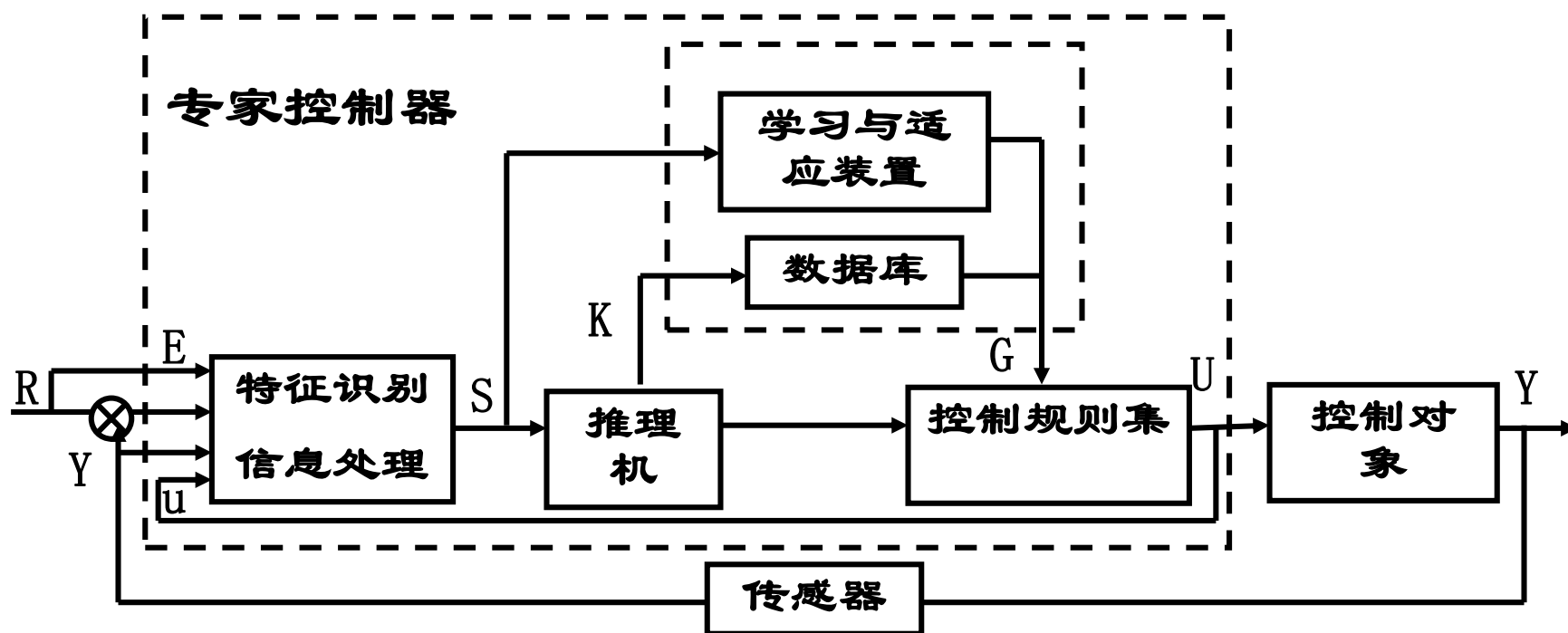
■ 第三级：执行级

- 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。



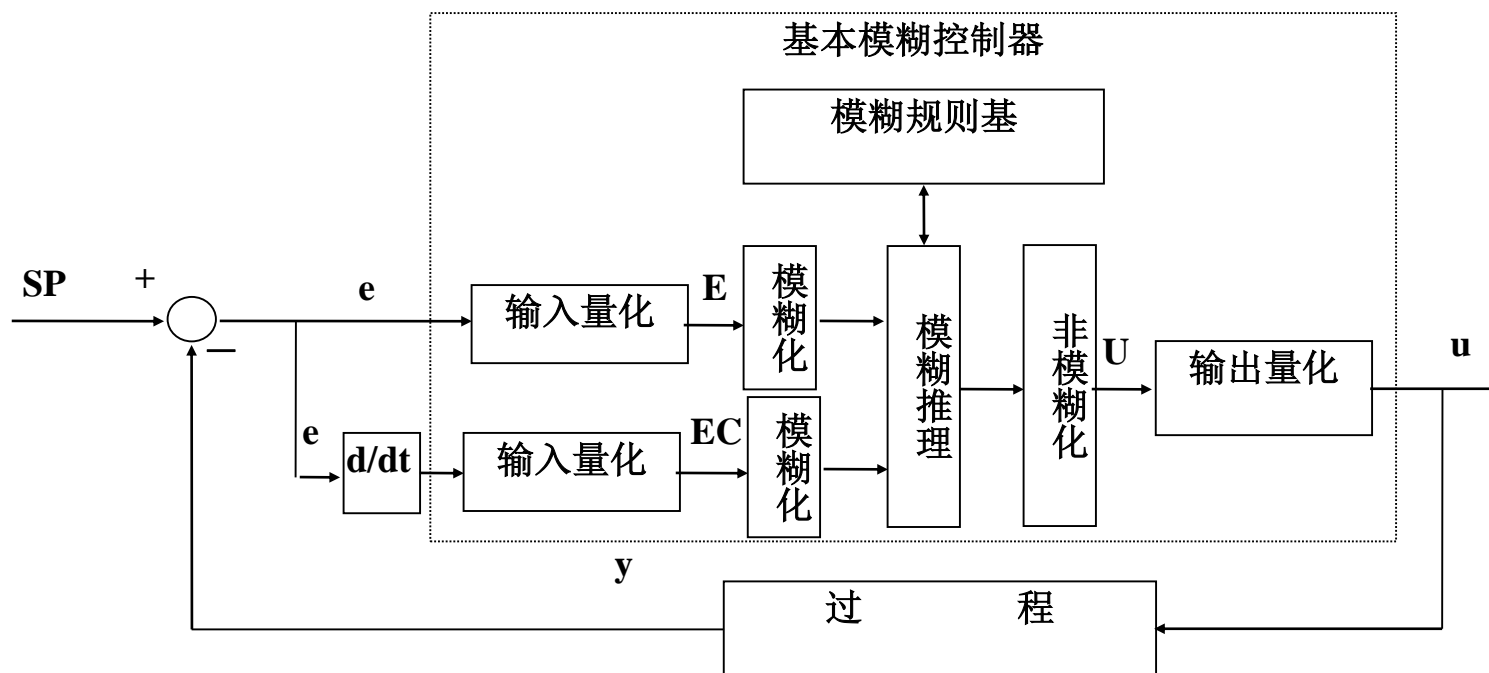
专家控制

- 应用专家系统概念和技术，模拟人类专家的控制知识与经验而建造的控制系统，称为专家控制系统。



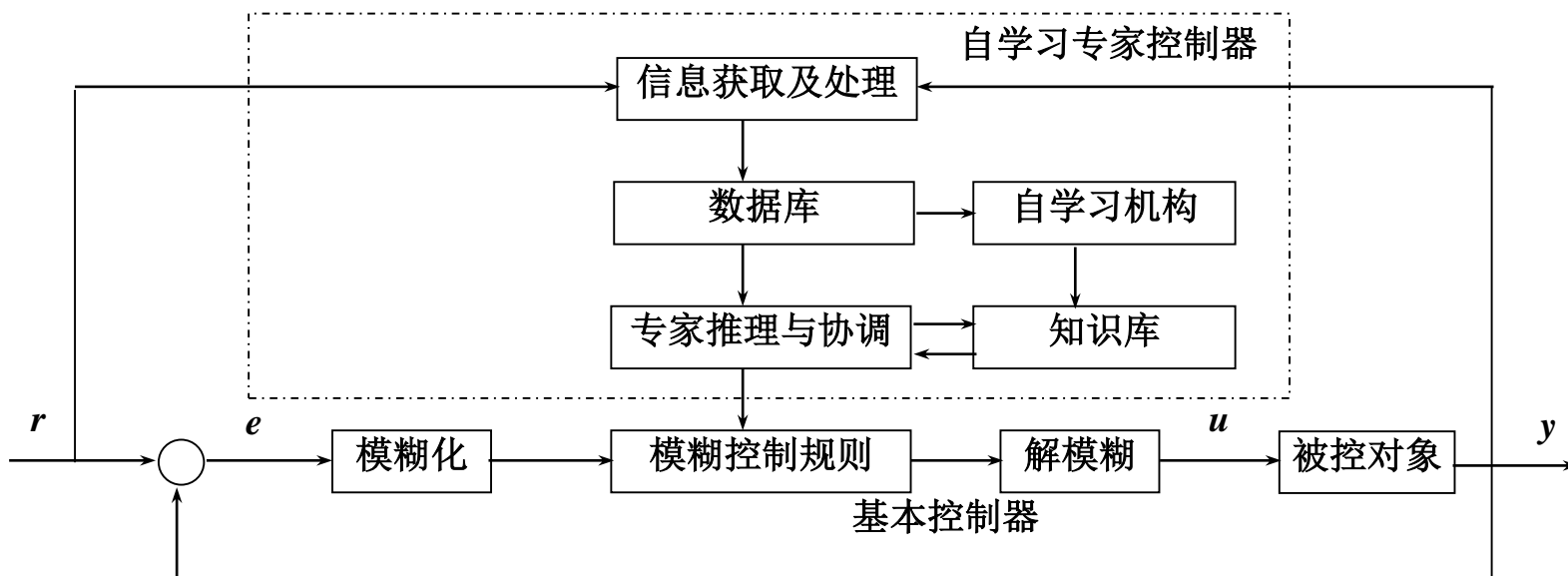
模糊控制

- 在被控制对象的模糊模型的基础上，运用模糊控制器近似推理手段，实现系统控制。
- 模糊模型是用模糊语言和规则描述的一个系统的动态特性及性能指标。



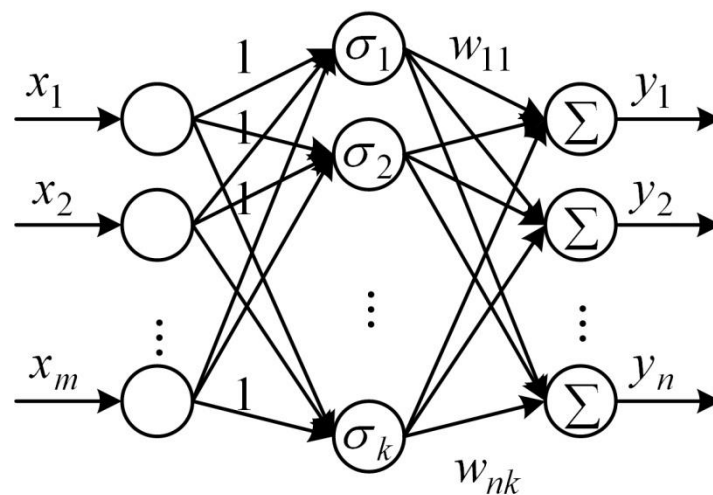
模糊专家控制

- 由专家控制与模糊控制相结合构成的控制系统：
 - 在专家控制系统中引入模糊规则，或用模糊隶属函数来处理专家控制系统中的不确定知识；
 - 在模糊控制系统中采用专家控制系统的推理策略。



神经控制

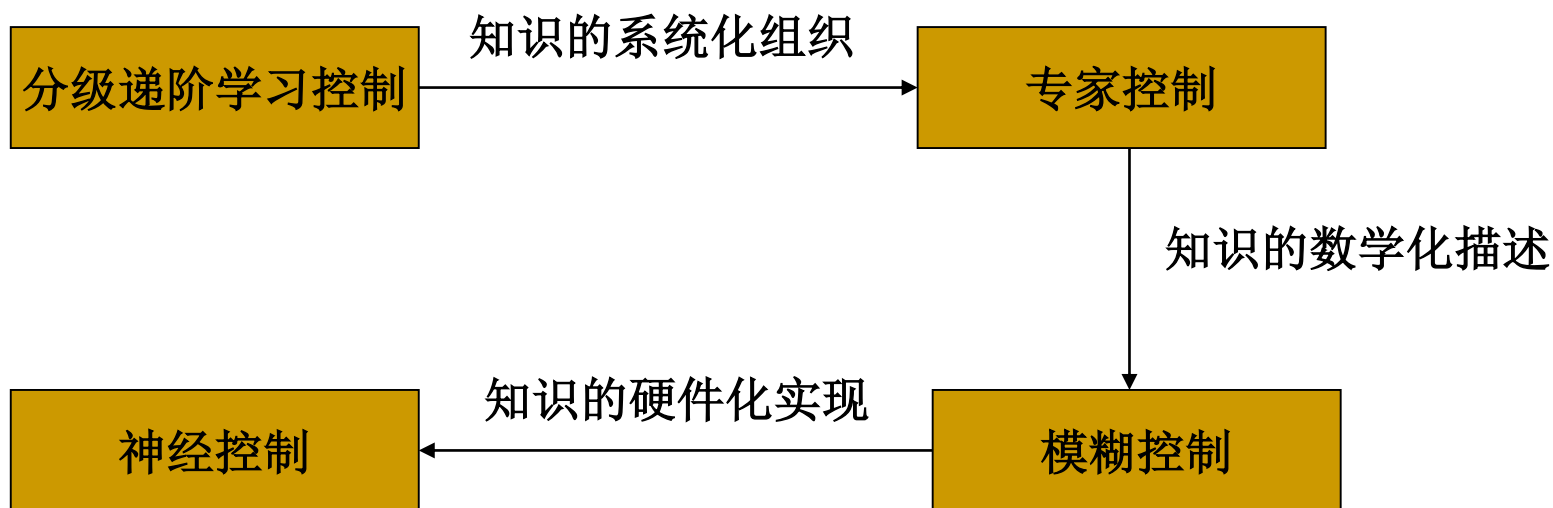
- 神经网络是指由大量与生物神经系统的神经细胞相类似的人工神经元互连而组成的网络。
- 学习算法是神经网络的主要特征。
- 神经网络的学习过程是修改加权系数的过程，最终使其输出达到期望值。
- 神经网络在控制中的应用
 - 模式识别器
 - 信号处理器
 - 系统模型
 - 系统优化器
 - 控制器



学习控制

- 学习是一种过程，它通过重复输入信号，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。
- 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
- 学习控制类型
 - 基于模式识别的学习控制
 - 迭代学习控制
 - 重复学习控制
 - 神经网络学习控制

各类智能控制间关系



- 上述分支的结合是新的发展趋势