



机器人学(第三版)

蔡自兴 主编

中南大学

2016



- 变结构控制
- 自适应控制
- 智能控制

6.1 机器人的变结构控制

- 50年代提出
- 非线性控制的
- 一种简单而又有效的方法
- 根据系统当时的状态偏差及其各阶导数的变化，以跃变的方式按设定的规律作相应改变
- 一类特殊的非线性控制系统
- 滑模变结构控制

6.1.1 变结构控制的特点和原理

■ 特点

- 对系统参数的时变规律、非线性程度以及外界干扰等不需要精确的数学模型，只要知道它们的变化范围，就能对系统进行精确的轨迹跟踪控制。
- 变结构控制系统的控制器设计对系统内部的耦合不必作专门解耦。因为设计过程本身就是解耦过程，因此在多输入多输出系统中，多个控制器设计可按各自独立系统进行，其参数选择也不是十分严格的。
- 变结构控制系统进入滑动状态后，它对系统参数及扰动变化反应迟钝，始终沿着设定滑线运动，因而具有很强的鲁棒性。
- 滑模变结构控制系统快速性好，无超调，计算量小，实时性强，很适合于机器人控制。

6.1.1 变结构控制的特点和原理

- 变结构系统（Variable Structure System, VSS）中变结构
 - 系统各部分间的连接关系发生变化
 - 系统的参数产生变化
 - 与一般程序控制和自适应控制是不同的
 - 系统结构的改变是根据误差及其导数的变化情况来确定的
 - 参数的改变是个突变的过程
 - 不会退化为定常控制，始终保持为变结构控制

6.1.2 机器人的滑模变结构控制

- 含有n个关节的机械手动力学模型为：

$$\mathbf{T} = \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{q}\mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (6.9)$$

- 整个系统的滑动曲面为：

$$\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_n]^T = \dot{\mathbf{E}} + \mathbf{H}\mathbf{E} \quad (6.13)$$

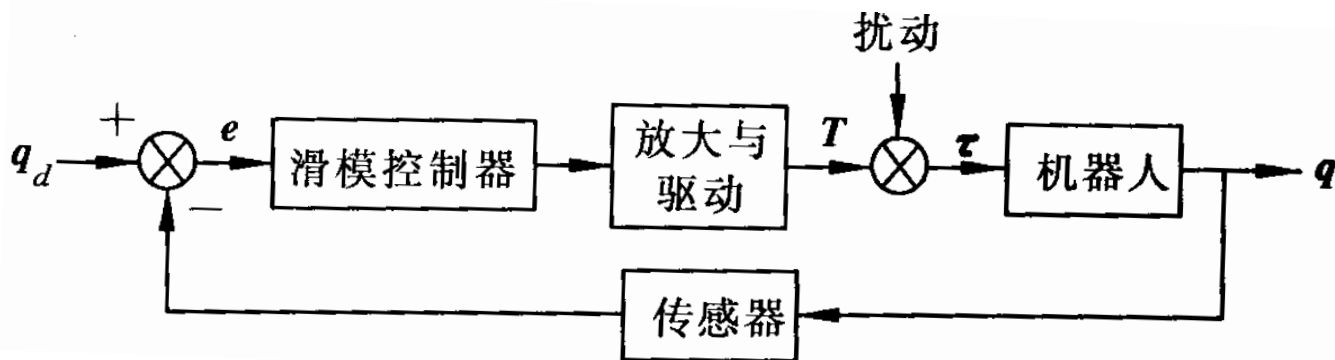


图6.1 机器人滑模变结构控制系统一般结构

6.1.2 机器人的滑模变结构控制

- 根据变结构控制基本理论，要使系统向滑动面运动，并确保产生滑动运动的条件为：

$$\dot{S}_i S_i < 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (6.21)$$

- 滑模变结构控制是一种简单实用设计方法，可直接根据李亚普诺夫函数来确定控制力矩 \mathbf{T} ，使系统状态趋于渐近稳定。
- 准线性化后机器人动力学模型可表示为：

$$\begin{cases} \Omega = \dot{q} \\ \dot{\Omega} = -D^{-1}(q)[C'(q, \dot{q})\Omega + G'(q)] + D^{-1}(q)^T \end{cases} \quad (6.28)$$

6.1.3 机器人轨迹跟踪滑模变结构控制



- 滑模变结构控制方法比较适合于机器人控制
 - 变结构控制不需要被控对象的精确数学模型，只要知道模型中参数的变化范围即可
 - 滑模变结构控制对一类有界干扰和参数变化具有不敏感性，对于机器人控制比较有利，可以削弱由于负载变化或随机干扰对系统控制性能的影响
- 轨迹跟踪滑模变结构控制方法
 - 轨迹跟踪滑模变结构控制系统的设计方法
 - 控制系统的稳定性和抗干扰性能
 - 仿真实验研究

- 存在随机干扰时， n 连杆（ n 关节）机器人动力学方程为：

$$D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + \tau' \quad (6.33)$$

- 所描述的机器人动力学有以下几个特性：
 - $D(q)$ 为正定对称矩阵
 - 选定一组适当的机器人参数
 - 定义矩阵
- 设计变结构控制器

- 取李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} S^T D S + \frac{1}{4} \int_t^\infty \tau^T \tau dt \quad (6.42)$$

- 求导

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} (\dot{S}^T D S + S^T \dot{D} S + S^T D \dot{S}) - \frac{1}{4} \tau'^T \tau' \\ &= \frac{1}{2} (S^T \dot{D} S + S^T D \dot{S}) - \frac{1}{4} \tau'^T \tau' \end{aligned} \quad (6.43)$$

- 推导得

$$\dot{V} < -\left(\frac{1}{4} \tau'^T \tau' + S^T \tau' + S^T S\right) = -\left(\frac{1}{2} \tau' - S\right)^T \left(\frac{1}{2} \tau' - S\right) < 0 \quad (6.51)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_q = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_q = 0$$

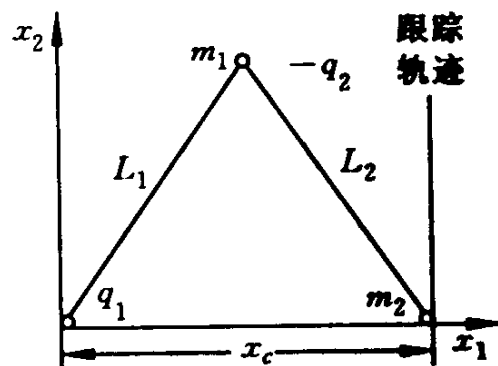


图6.2 二关节机器人模型示意图

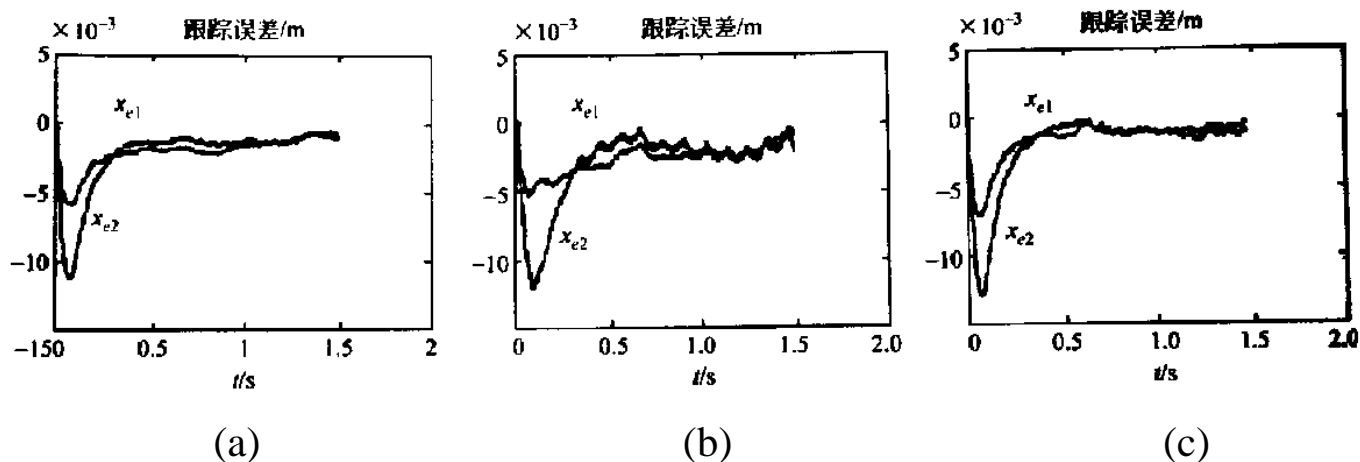


图6.3 机器人参数变化且加入正态分布有界干扰时的跟踪误差曲线图

6.2 机器人的自适应控制

- 三类自适应控制
 - 模型参考自适应控制
 - 自校正自适应控制
 - 线性摄动自适应控制
- 自适应机器人(adaptive robots)由自适应控制器来控制其操作。
- 采用自适应控制来自动补偿上述因素，能够显著改善操作机器人的性能。

6.3 机器人的智能控制

6.3.1 智能控制与智能控制系统概述

■ 智能控制的发展

■ 传统控制理论在应用中面临的难题

- 传统控制系统的设计与分析是建立在已知系统精确数学模型的基础上，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；
- 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；
- 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；
- 为了提高性能，传统控制系统可变得复杂，从而增加了设备的初始投资和维修费用，降低系统的可靠性。

- 自动控制面临严峻挑战的原因
 - 科学技术间的相互影响和相互促进
 - 当前和未来应用的需求
 - 基本概念和时代进程的推动
- 核心在于实现控制器的智能化
- 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。

- 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。

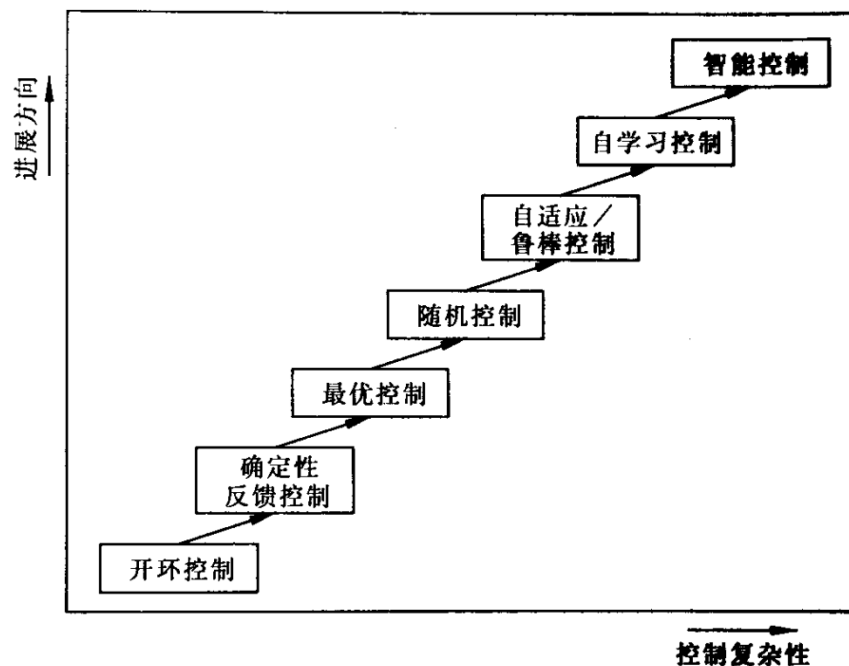


图6.8 自动控制的发展过程



- 智能控制思潮第1次出现在20世纪60年代，几种智能控制的思想和方法被提出和发展。
- 60年代中期，自动控制与人工智能开始交接。
- 20世纪80年代，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。
- 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。

■ 定义

■ 定义6.1 智能机器

能够在各种环境中执行各种拟人任务（Anthropomorphic Tasks）的机器叫做智能机器。或者比较通俗地说，智能机器是那些能够自主地代替人类从事危险、厌烦、远距离或高精度等作业的机器。例如，能够从事这类工作的机器人，就属于智能机器人。

■ 定义6.2 自动控制

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所测得的过程物理变量，自动进行计算，然后对过程进行自动调节，它就是自动控制装置。反馈控制、最优控制、随机控制、自适应控制和自学习控制等均属于自动控制。

■ 定义6.3 智能控制

智能控制是驱动智能机器自主地实现其目标的过程。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。对自主机器人的控制就是一例。

■ 智能控制的两个主要特点

- 同时具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型表示的混合控制过程，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非数字过程，并以知识进行推理，以启发来引导求解过程。
- 智能控制的核心在高层控制，即组织级控制。高层控制的任務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、知识表示以及自动推理和决策等相关技术。

智能控制的定义和特点

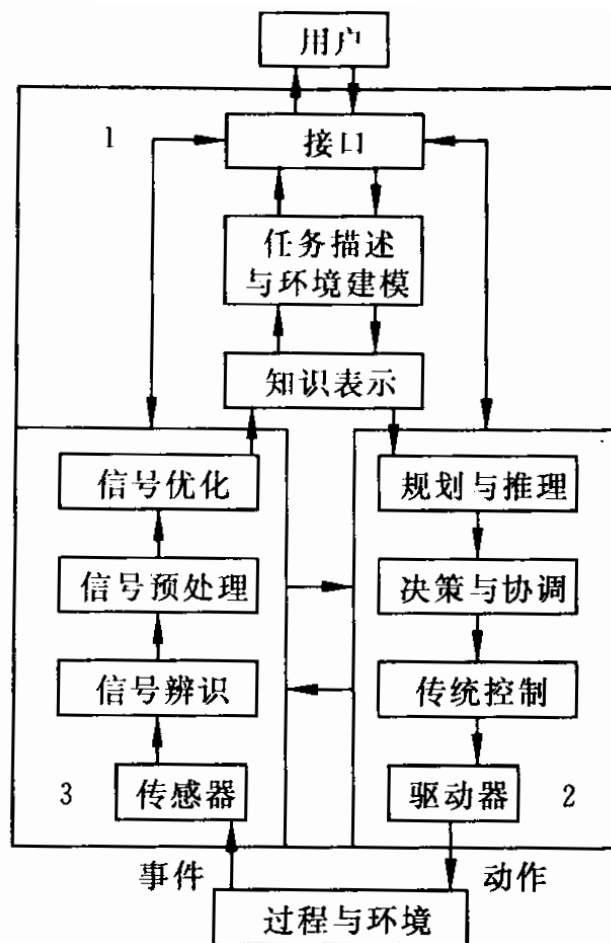


图 6.9 智能控制器的一般结构

1—智能控制系统；2—多层控制器；3—多传感系统

- 二元交集结构（傅京孙）

$$IC = AI \cap AC$$

- 三元交集结构（萨里迪斯）

$$IC = AI \cap AC \cap OR$$

- 四元交集结构（蔡自兴）

$$IC = AI \cap AC \cap IT \cap OR$$

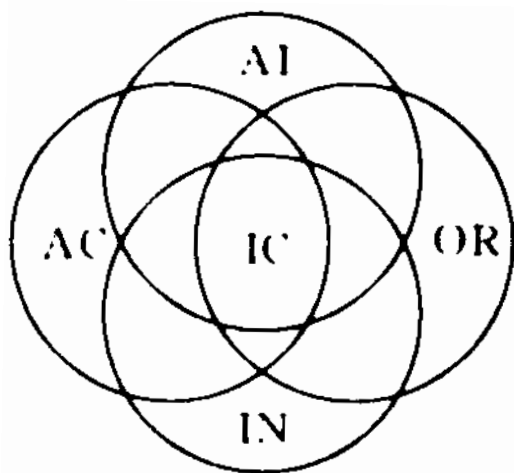
AI表示人工智能(Artificial Intelligence);

AC表示自动控制(Automatic Control);

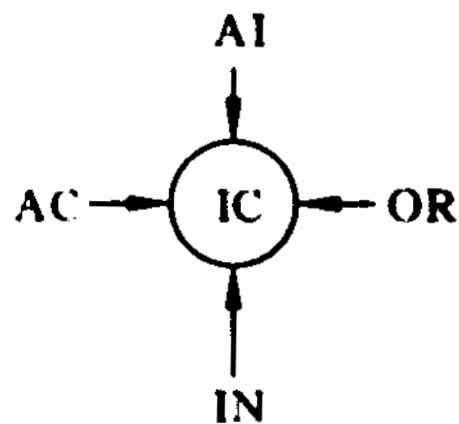
OR表示运筹学(Operation Research);

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

IC表示智能控制(Intelligent Control);



(a)



(b)

图6.12 智能控制的四元结构

(a) 四元智能控制结构; (b) 四元结构的简化图

6.3.2 主要智能控制系统简介



■ 递阶控制系统

递阶智能控制系统是个整体。

- 组织级代表控制系统的主导思想，并由人工智能起控制作用。
- 协调级是上（组织）级和下（执行）级间的接口，承上启下，并由人工智能和运筹学共同作用。
- 执行级是递阶控制的底层，要求具有较高的精度和较低的智能，它按控制论进行控制，对相关过程执行适当的控制作用。

- 智能控制系统是由三个基本控制级构成的，其级联交互结构如图6.13 所示。

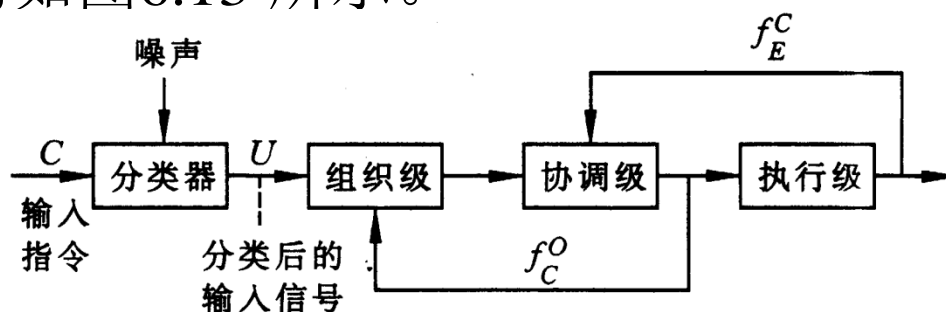


图6.13 递阶智能机器的级联结构

- 递阶智能控制系统遵循提高精度而降低智能（IPDI）的原理。概率模型用于表示组织级推理、规划和决策的不确定性，指定协调级的任务以及执行级的控制作用。采用熵来度量智能机器执行各种指令的效果，并采用熵进行最优决策。

- 图6.14表示具有视觉反馈的PUMA600机械手的智能

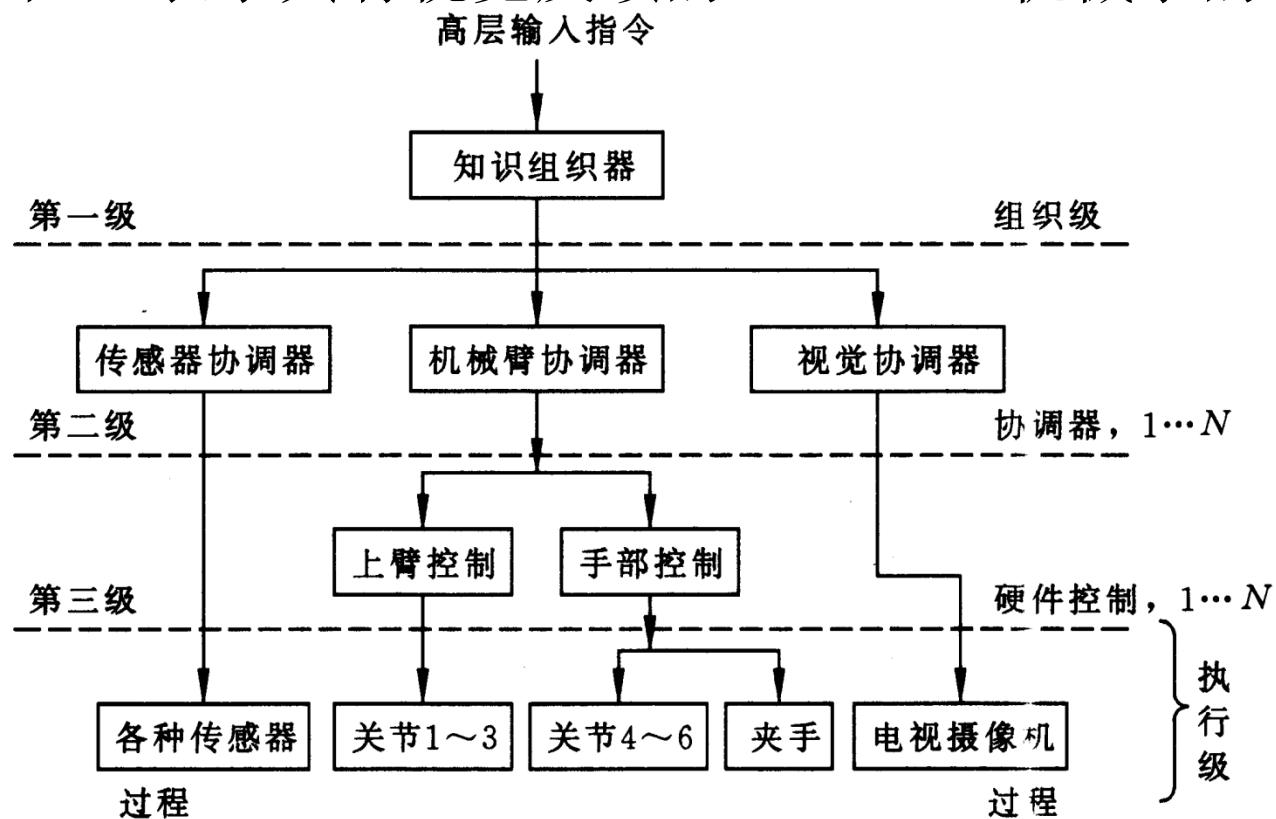


图6.14 具有视觉反馈的机械手递阶控制结构

6.3.2 主要智能控制系统简介



■ 专家控制系统

- 专家控制系统是一个应用专家系统技术的控制系统，也是一个典型的和广泛应用的基于知识的控制系统。
- 几乎所有的专家控制系（控制器）都包含知识库、推理机、控制规则集和或控制算法等。图6.15 画出专家控制系统的基本结构。

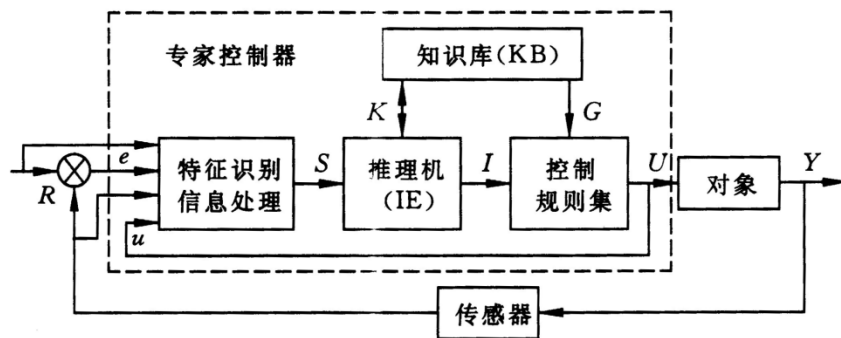


图6.15 专家控制器的典型结构

6.3.2 主要智能控制系统简介



■ 模糊控制系统

有效性:

- 提供一种实现基于知识（基于规则）的甚至语言描述的控制规律的新机理。
- 提供了一种改进非线性控制器的替代方法。

模糊控制系统的基本结构如图6.16所示。

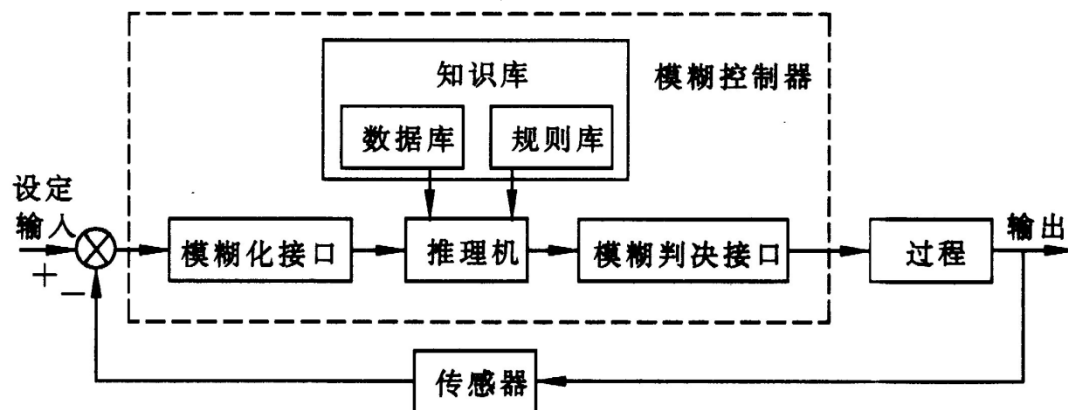


图6.16 模糊控制系统的基本结构

6.3.2 主要智能控制系统简介



■ 学习控制系统

- 学习控制具有4个主要功能：搜索、识别、记忆和推理。
- 在线学习控制系统和离线学习控制系统，分别如图6.17(a)和图6.17(b)所示。

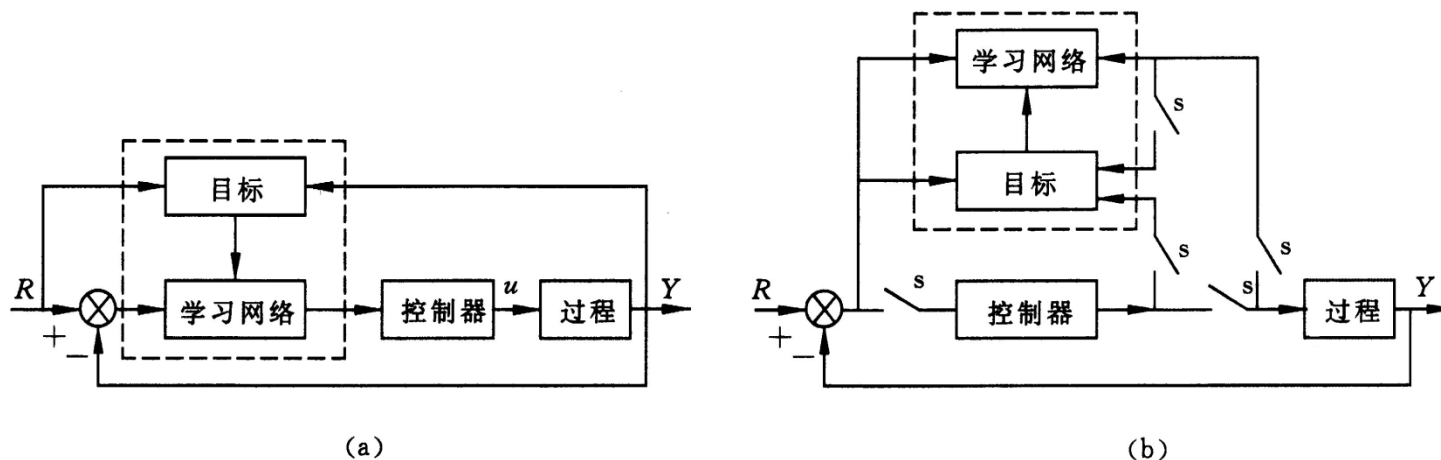


图6.17 学习控制系统原理图

6.3.2 主要智能控制系统简介

■ 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)或NN控制。
- 提出的神经控制的结构方案很多, 包括NN学习控制、NN直接逆控制、NN自适应控制、NN内模控制、NN预测控制、NN最优决策控制、NN强化控制、CMAC控制、分级NN控制 and 多层NN控制等。
- 图6.18表示监督式神经控制器的结构。

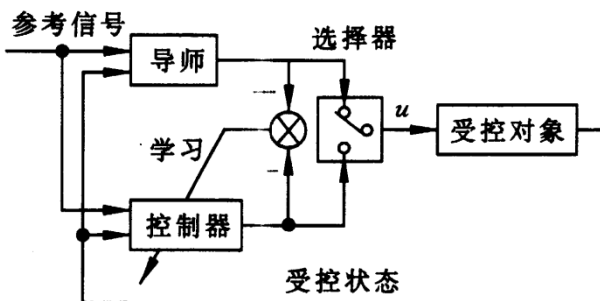


图6.18 监督式学习NN控制器的结构

6.3.2 主要智能控制系统简介



■ 进化控制系统

进化与反馈作为自然界存在的两种基本调节机制，具有明显的互补性。把进化思想与反馈控制理论相结合，产生了一种新的智能控制方法——进化控制。

进化控制是综合考察了几种典型智能控制方法的思想起源、组成结构、实现方法和技术等之后提出来的，它模拟生物界演化的进化机制，将进化思想与反馈控制理论相结合，提高了系统在复杂环境下的自主性、创造性和学习能力。

。



6.3.3 机器人自适应模糊控制

- 模糊控制是应用最广的一种智能控制，它具有多种结构形式，如PID模糊控制、自组织模糊控制、自校正模糊控制、自学习模糊控制、专家模糊控制等。
- 自适应模糊控制器
 - 控制系统设计

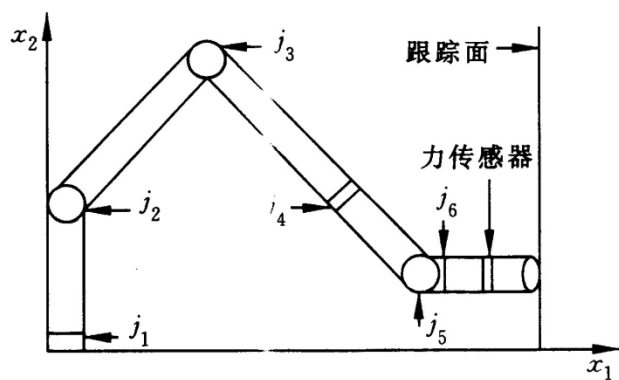


图6.20 Zebra-ZERO机器人模型

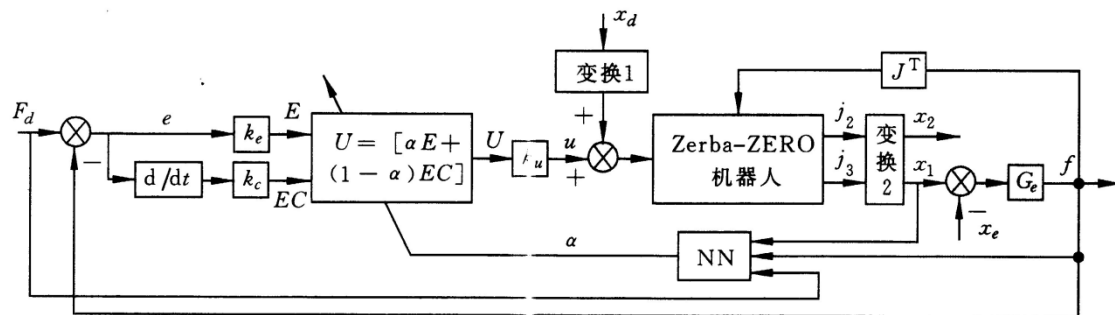


图6.21 附加力外环的机器人力/位置自适应模糊控制系统框图



■ 实验研究

经分析研究和实验研究结果可知，这种含有附加力外环的力 / 位置自适应模糊控制方法，可以在不改变机器人原有位置控制器的情况下，使机械手在其末端执行器与接触刚度变化范围较大的外界工作环境接触时具有较强的适应能力，对力和位置的控制具有良好的鲁棒性和跟踪能力。该方法通用性强，具有一定的实用价值。

6.3.4 多指灵巧手的神经控制

- 多指灵巧手又称多指多关节机械手，是一种关联加串联形式的机器人，一般由手掌和3~5个手指组成，每个手指有3~4个关节。
- 多指灵巧手的机械本体一般较小，自由度又较多，可完成各种抓持及操作。
- 多指灵巧手比一般的机器人具有更强的非线性。
 - 。

6.3.4 多指灵巧手的神经控制

- 网络结构及学习算法
 - 采用一个 $3 \times 20 \times 1$ 的三层前馈网络来学习原有的控制器的输入输出关系。学习结束后，用此前馈网络当作控制器。
 - 学习采用BP算法与趋化算法相结合的混合学习算法，即先用BP算法对网络进行训练，然后再用趋化算法训练。

■ 趋化算法

- ① 把权重 W 设为 $[-0.1, 0.1]$ 上的随机初值，即 W_0 ；
- ② 把样本输入网络并计算网络输出；
- ③ 求目标函数 J 的值，并令 $B_1 = J$ ；
- ④ 产生与权重 W 维数相同、零均值的 $[-1, +1]$ 上正态分布的随机向量；
- ⑤ 令 $W = W_0 + a \times W'$, $a < 1$ ，是一实系数；
- ⑥ 求目标函数 J 的值，令 $B_2 = J$ ；
- ⑦ 如果 $E_2 < E_1$ ，则令 $W_0 = W_1$ ，转到（4）；否则，转到（4）。

5.4.3 多指灵巧手的神经控制

- 基于神经网络的控制器设计
- 控制系统硬件

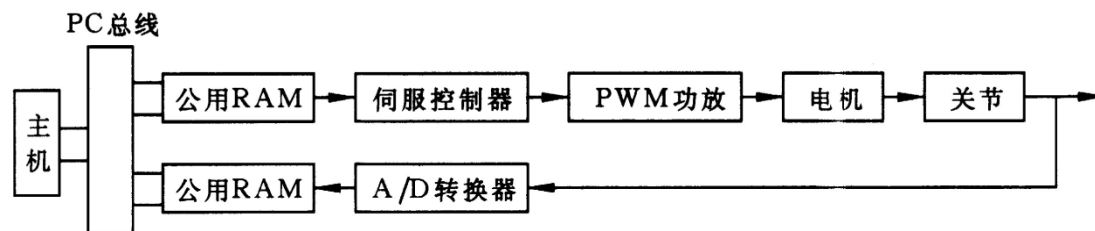


图6.25 控制系统硬件简图

- 控制系统软件

控制软件分为两部分，上位机软件用C语言编写，伺服控制器的软件用MCS—51单片机汇编语言编写。

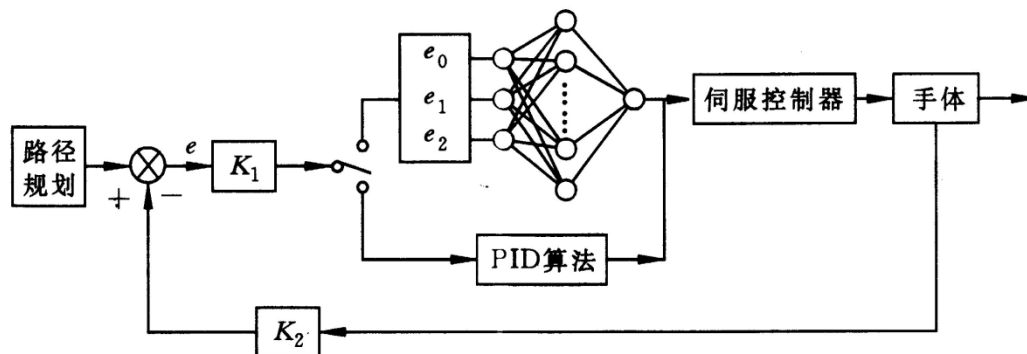


图6.26 控制器结构图

6.3.4 多指灵巧手的神经控制

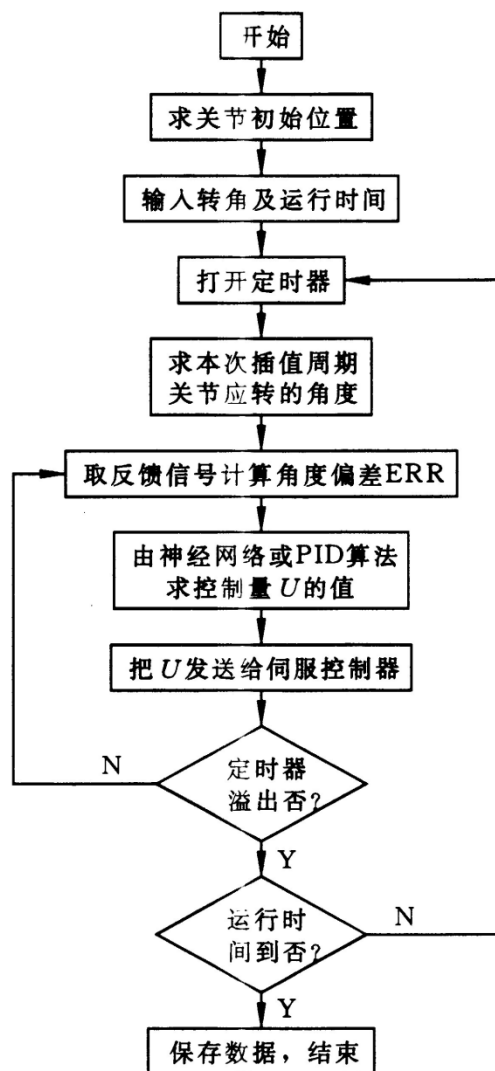


图6.27 主机软件流程图

■ 复合控制方法

通过实验发现，单纯用神经网络控制器进行控制，系统的响应在跟踪阶段可以很好地跟踪给定的轨迹，但稳态效果不好，存在较大的稳态误差。由于时间限制，网络学习只能得到一个近似的最优解，而不可能得到真正的最优解。为了使系统具有良好的稳态响应，采用一个**PID**控制器在稳态时对系统进行控制，利用其积分作用来消除稳态误差，实验结果表明这种复合控制器能保证系统具有良好的稳态响应。

6.4 小结

- 变结构控制
 - 滑模变结构控制
- 自适应控制
- 智能控制
 - 基本概念
 - 面临的挑战和机遇
 - 发展过程
 - 结构理论
- 主要智能控制系统
 - 递阶控制、专家控制、模糊控制、神经控制、学习控制和进化控制