

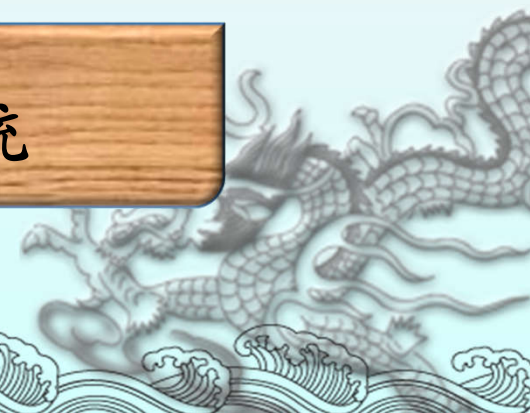
第十章 机器人的控制系统

第一节 机器人控制系统与控制方式

第二节 基于运动坐标的控制

第三节 基于运动参数的控制

第四节 机器人的智能控制系统



【案例导入】

2014年8月24日，浙江大学医学院附属二院神经外科与浙江大学求是高等研究院合作的“脑机接口临床转化应用课题组”在全国首次成功实现了真正意义上的“用意念操控机械手”的人体实验。志愿者刘某通过脑部“电线”连接，用意念控制机械手同步做出“布”的动作，机械手延迟不到0.5秒。图10.1为志愿者用意念控制机械手。

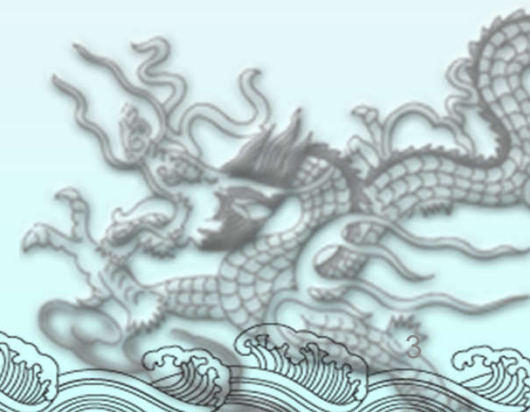


图10.1 意念控制机械手

【教学目标】

◆掌握机器人控制系统与控制方式，了解机器人控制系统的硬件设计和软件设计。

◆掌握基于关节坐标的控制方法以及基于作业空间的控制方法。



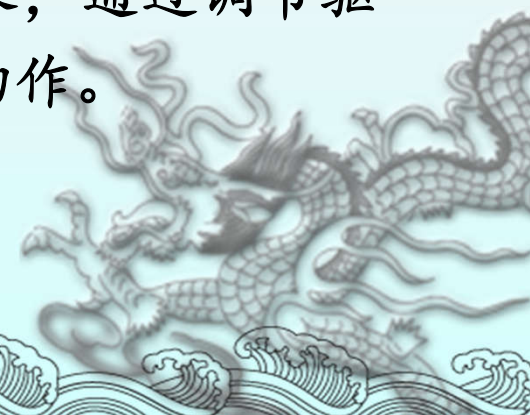
第一节 机器人控制系统与控制方式

- 机器人控制系统的基本原理
- 机器人控制系统的组成
- 机器人控制方式以及控制系统的分类
- 机器人控制系统的要求、特点



1 机器人控制系统的基本原理 (Basic Principles of Robot Control System)

- **控制的目的是**使被控对象产生控制者所期望的行为方式，即通过控制来达到使机器人各个部分按照设计者的意图工作；
- **控制的基本条件是**了解被控对象的特性，即设计者要根据设计任务，选择控制对象，深度解析被控对象的特性，以达到控制目的；
- **控制的实质是**对驱动器输出力矩的控制，即在机器人的控制系统中，设计者一般选取驱动器作为被控对象，通过调节驱动器的输出力矩，进一步控制机器人的整体动作。



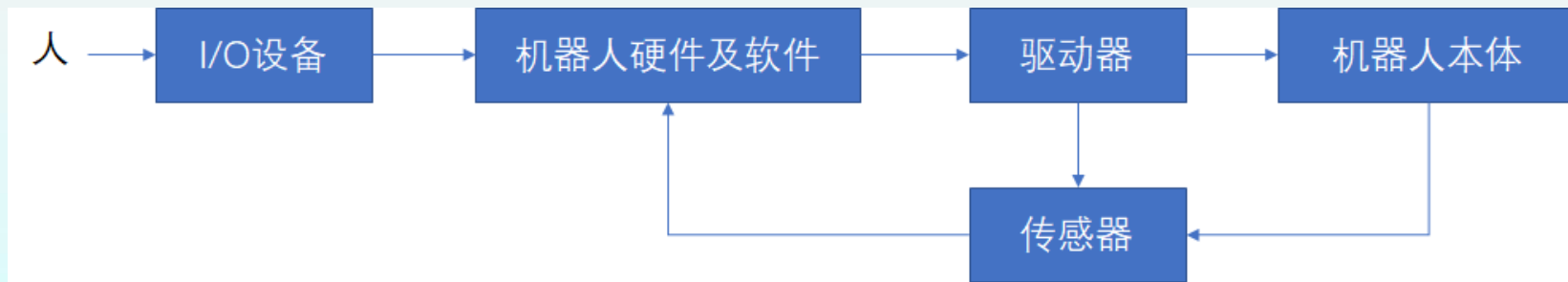
机器人能够按照要求去完成特定的作业任务， 需要以下四个过程：

- (1) 示教过程：通过计算机可以接受的方式，告诉机器人去做什么，给机器人作业命令；
- (2) 计算与控制：负责整个机器人系统的管理、信息获取及处理、控制策略的制订，作业轨迹的规划等任务，这是机器人控制系统的核心部分；
- (3) 伺服驱动：根据不同的控制算法，将机器人控制策略转化为驱动信号，驱动伺服电机等驱动部分，实现机器人的高速、高精度运动，去完成指定的作业；
- (4) 传感与检测：通过传感器的反馈，保证机器人正确地完成指定作业，同时也将各种姿态信息反馈到机器人控制系统中，以便实时监控整个系统的运动情况。



2 机器人控制系统的组成(The composition of the robot control system)

1. **软件组成：**主要是指控制软件，它包括运动轨迹规划算法和关节伺服控制算法及相应的动作程序。
2. **硬件组成：**主要包括中心控制器、传感器、驱动放大器、执行机构、电源等。



3 机器人控制方式以及控制系统的分类(Robot control and control system classification)

机器人控制系统按其控制方式分类

1. **集中控制方式：**一台计算机实现全部控制功能，结构简单，成本低，但实时性差，难以扩展。
2. **主从控制方式：**采用主、从两级处理器实现系统的全部控制功能，实时性较好，适于高精度、高速度控制，但其系统扩展性较差，维修困难。
3. **分散控制方式：**按系统的性质和方式将系统控制分成几个模块，每一个模块各有不同的控制任务和控制策略，实时性好，易于实现高速、高精度控制，易于扩展，可实现智能控制，是目前流行的方式。

机器人控制系统按其运动控制方式分类：

1. 位置控制方式：工业机器人位置控制又分为点位控制和连续轨迹控制两类。

✓ 点位控制

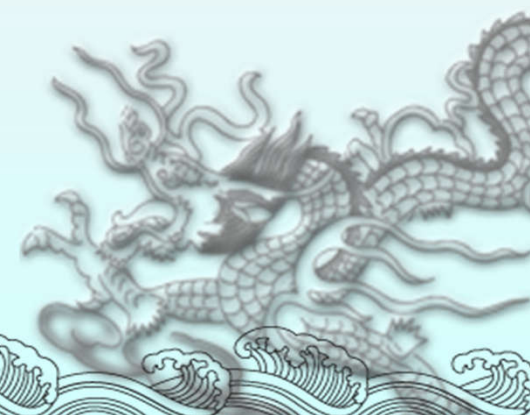
主要技术指标是定位精度和完成运动所需时间。

【例】印刷电路板上安插元件、点焊、搬运、上下料等

✓ 连续轨迹

主要技术指标是轨迹精度和平稳性。

【例】弧焊、喷漆、切割等



2. 速度控制方式

【例】在连续轨迹控制方式的情况下，工业机器人按预定的指令，控制运动部件的速度和实行加、减速，以满足运动平稳、定位准确的要求。

工业机器人是一种工作情况（行程、负载）多变、惯性负载大的运动机械，要处理好快速与平稳的矛盾，必须控制启动加速和停止前的减速这两个过渡运动区段。

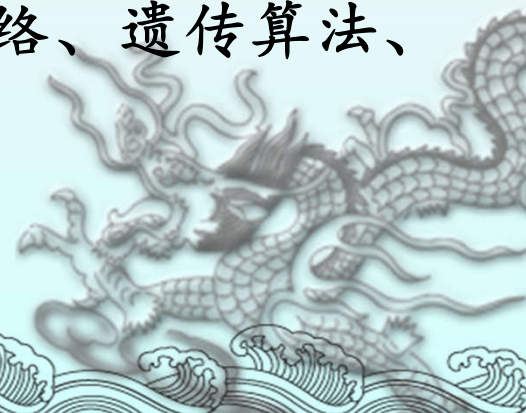


3. 力（力矩）控制方式

力（力矩）控制是对位置控制的补充，这种方式的控制原理与位置伺服控制原理也基本相同，只不过输入量和反馈量不是位置信号，而是力（力矩）信号。

4. 智能控制方式

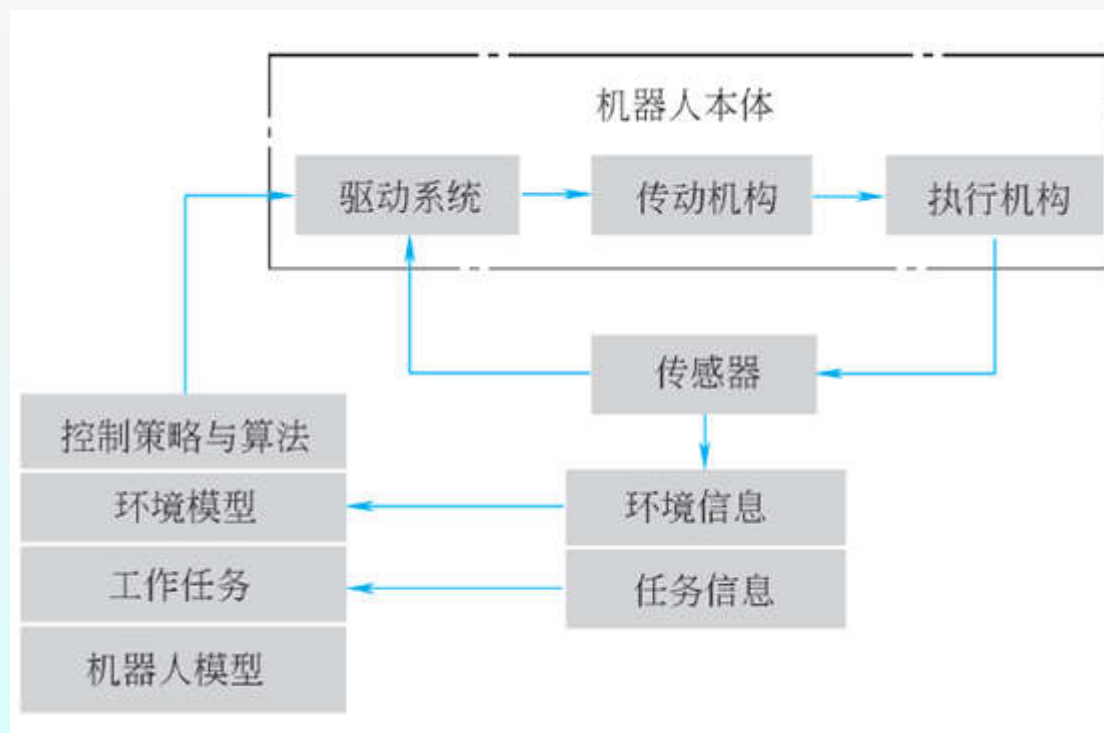
通过传感器获得周围环境的知识，并根据自身内部的知识库做出相应的决策。采用智能控制技术，使机器人具有较强的环境适应性及自学习能力。人工神经网络、遗传算法、专家系统、模糊逻辑等技术。



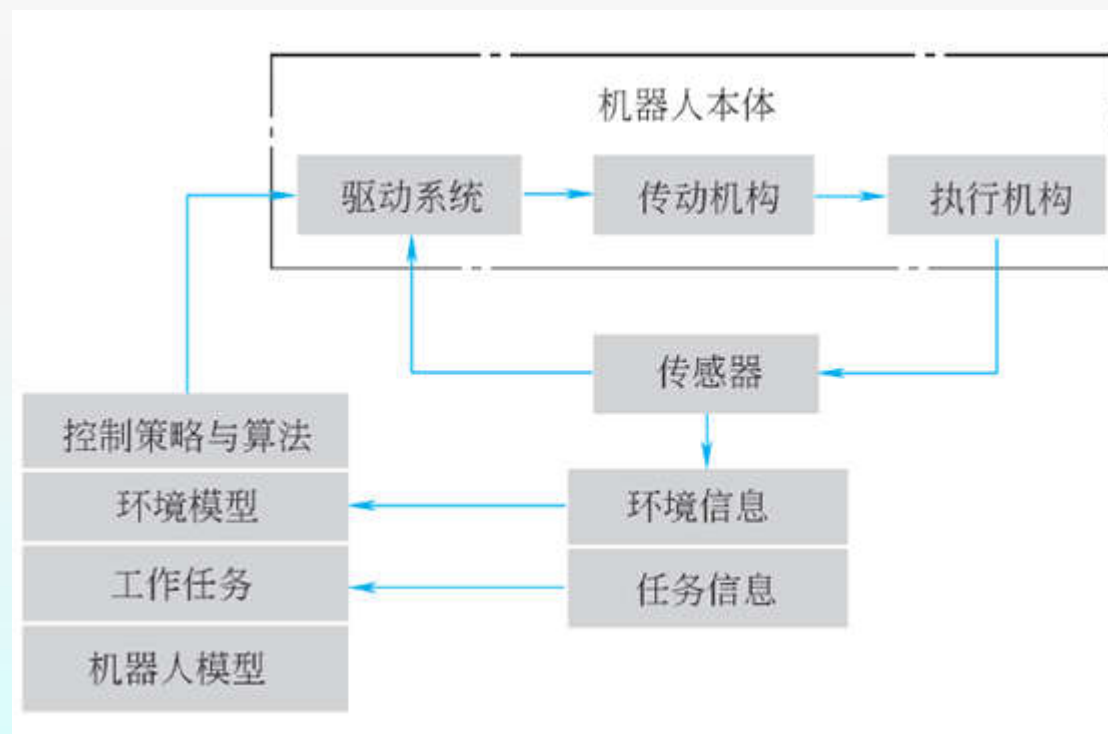
4 机器人控制系统的要求、特点(Robot control system requirements, characteristics)

一般要求：控制系统应该满足记忆、示教、与外围设备联系、坐标设置、人机接口、传感器接口、位置伺服、故障诊断安全保护等基本功能。

如图所示，机器人控制系统分为四部分：机器人及其感知器、环境、任务、控制器。机器人是由各种机构组成的装置，它通过感知器实现本体和环境状态的检测及信息交互，也是控制的最终目标；环境是指机器人所处的周围环境，包括几何条件、相对位置等，如工件的形状、位置、障碍物、焊缝的几何偏差等；

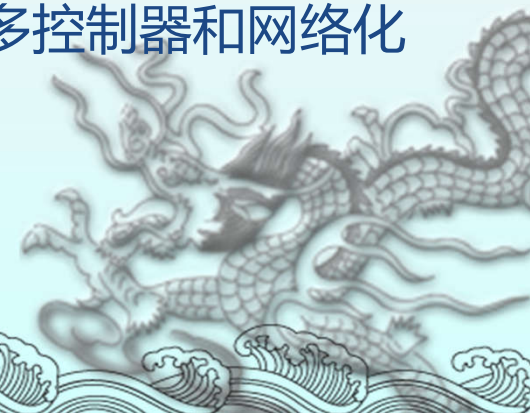


任务是指机器人要完成的操作，它需要适当的程序语言来描述，并把它们存入主控制器中，随着系统的不同，任务的输入可能是程序方式，或文字、图形或声音方式；控制器包括软件（控制策略和算法以及实现算法的软件程序）和硬件两大部分，相当于人的大脑，它是以计算机或专用控制器运行程序的方式来完成给定任务的。



机器人主控制器是控制系统的核心部分，直接影响机器人性能的优劣。在控制器中，控制策略和算法主要是指机器人控制系统结构、控制信息产生模型和计算方法、控制信息传递方式等。根据对象和要求不同，可采用多种不同的控制策略和算法，如控制系统结构可以采用分布式或集中式；控制信息传递方式可以采用开环控制或PID伺服关节运动控制；控制信息产生模型可以是基于模型或自适应等。

目前，机器人控制技术与系统的研究已经由专用控制系统发展到采用通用开放式计算机控制体系结构，并逐渐向智能控制技术及其实际应用发展，技术特点归纳起来主要在两个方面：①智能控制、多算法融合和性能分析的功能结构；②实时多任务操作系统、多控制器和网络化的实现结构。



机器人控制系统的特点

与一般的伺服系统或过程控制系统相比，机器人控制系统有如下特点：

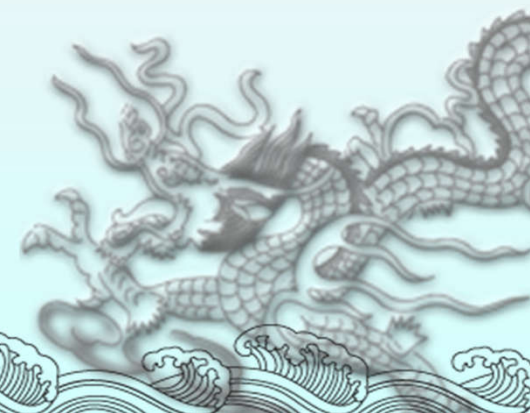
1) 机器人的控制与机构运动学及动力学密切相关。机器人手足的状态可以在各种坐标下进行描述，应当根据需要，选择不同的参考坐标系，并做适当的坐标变换。经常要求解运动学正问题和逆问题，除此之外还要考虑惯性力、外力（包括重力）、哥氏力、向心力的影响。

2) 一个简单的机器人也至少有 3 ~ 5 个自由度，比较复杂的机器人有十几个、甚至几十个自由度。每个自由度一般包含一个伺服机构，它们必须协调起来，组成一个多变量控制系统。



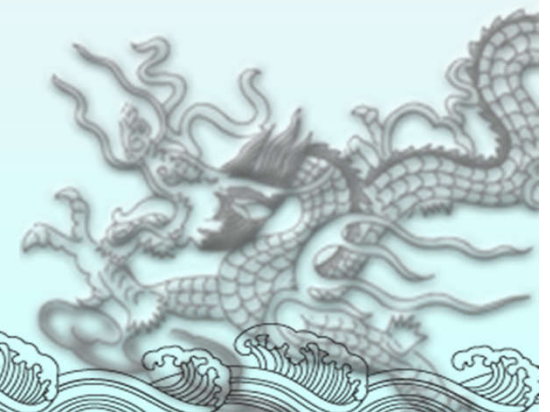
3) 把多个独立的伺服系统有机地协调起来，使其按照人的意志行动，甚至赋予机器人一定的“智能”，这个任务只能由计算机来完成。因此，机器人控制系统必须是一个计算机控制系统。同时，计算机软件担负着艰巨的任务。

4) 描述机器人状态和运动的数学模型是一个非线性模型，随着状态的不同和外力的变化，其参数也在变化，各变量之间还存在耦合。因此，仅仅利用位置闭环是不够的，还要利用速度闭环，甚至加速度闭环。系统中经常使用重力补偿、前馈、解耦或自适应控制等方法。



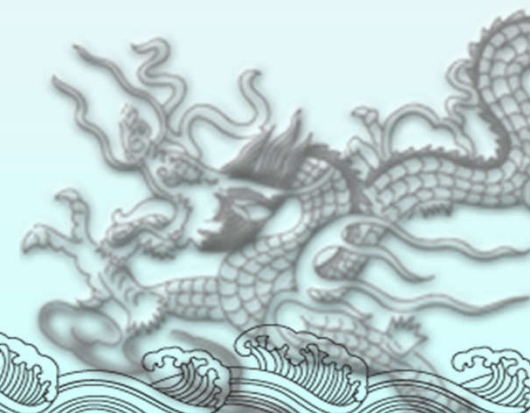
5) 机器人的动作往往可以通过不同的方式和路径来完成，因此存在一个“最优”的问题。较高级的机器人可以用人工智能的方法，用计算机建立起庞大的信息库，借助信息库进行控制、决策、管理和操作。根据传感器和模式识别的方法获得对象及环境的工况，按照给定的指标要求，自动地选择最佳的控制规律。

总而言之，机器人控制系统是一个与运动学和动力学原理密切相关的、有耦合的、非线性的多变量控制系统。由于它的特殊性，经典控制理论和现代控制理论都不能照搬使用。然而到目前为止，机器人控制理论还是不完整的、不系统的。相信随着机器人事业的发展，机器人控制理论必将日趋成熟。



第二节 基于运动坐标的控制

- 基于关节坐标的控制
- 基于作业空间的控制



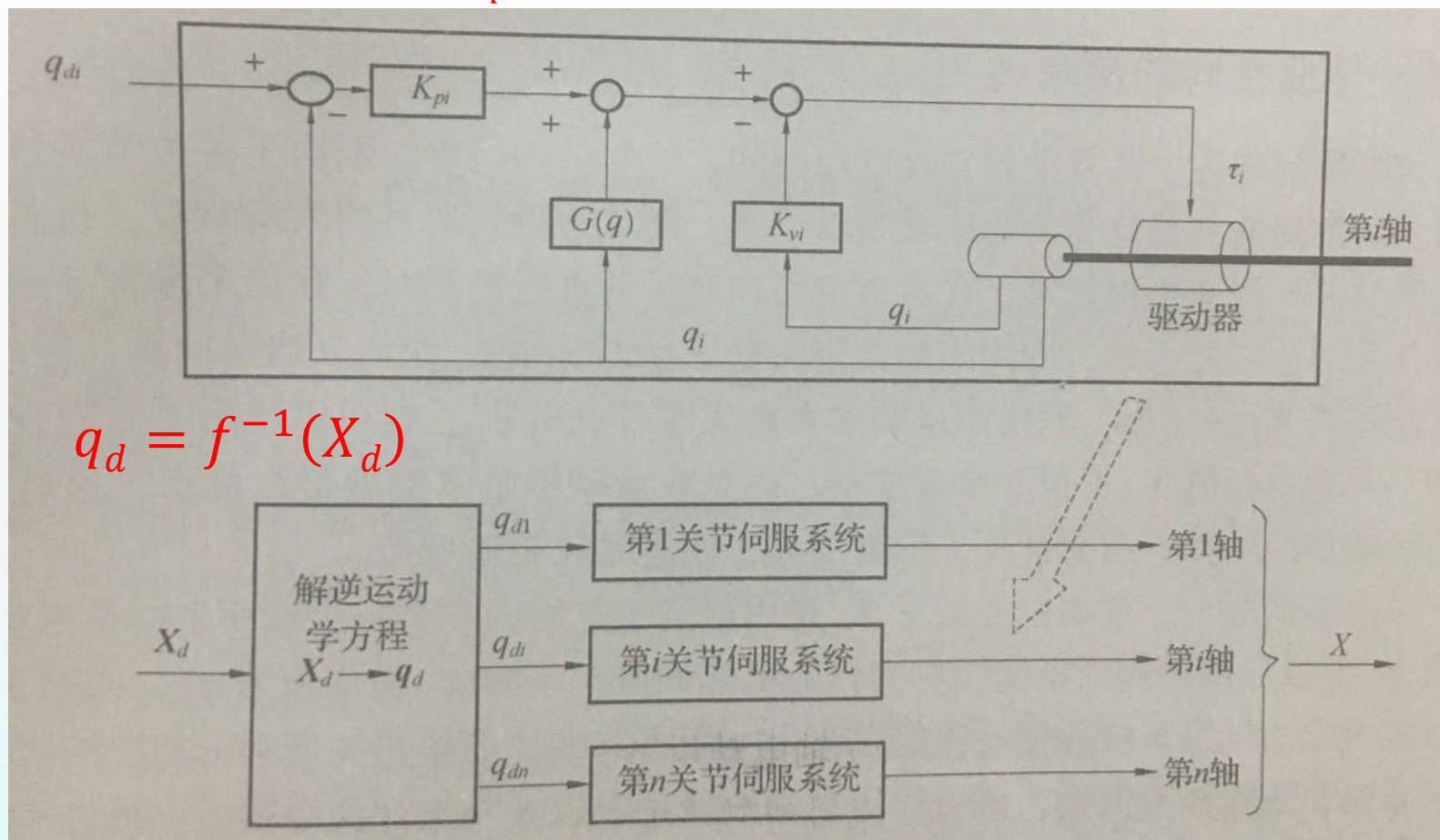
1 基于关节坐标的控制(Control based on joint coordinates)

(1) **位置控制问题**：工业机器人位置控制的目的，就是要使机器人各关节实现预先所规划的运动，最终保证工业机器人终端(手爪)沿预定的轨迹运行。

(2) **基于关节坐标的控制**：基于关节坐标的伺服控制是目前工业机器人的主流控制方式，目前工业机器人的位置控制主要基于运动学而非动力学的控制，只适用于运动速度和加速度较小的应用场所。对于快速运动、负载变化大和要求力控的机器人还必须考虑其动力学行为。



$$\tau = K_p(q_d - q(t)) - K_v\dot{q}(t) + G(q)$$



$$q_d = f^{-1}(X_d)$$

基于关节坐标的伺服控制系统框图

PTP(Point-to-Point)控制问题

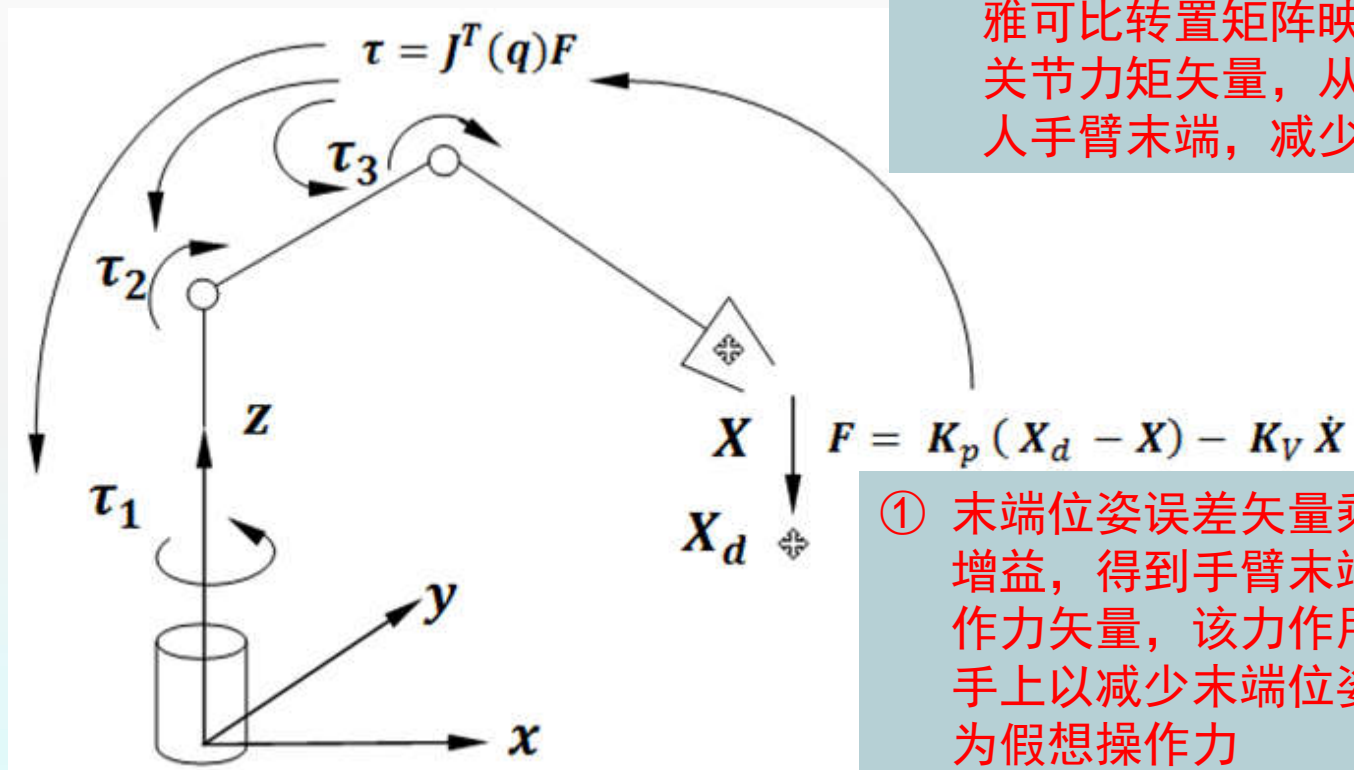
$$\tau = K_p(q_d - q(t)) - Kv\dot{q}(t) + G(q)$$

CP(Continuous Path)控制问题

$$\tau = K_p(q_d(t) - q(t)) - Kv(\dot{q}_d(t) - \dot{q}(t)) + G(q)$$



2 基于作业空间的控制 (Based on task-space control)

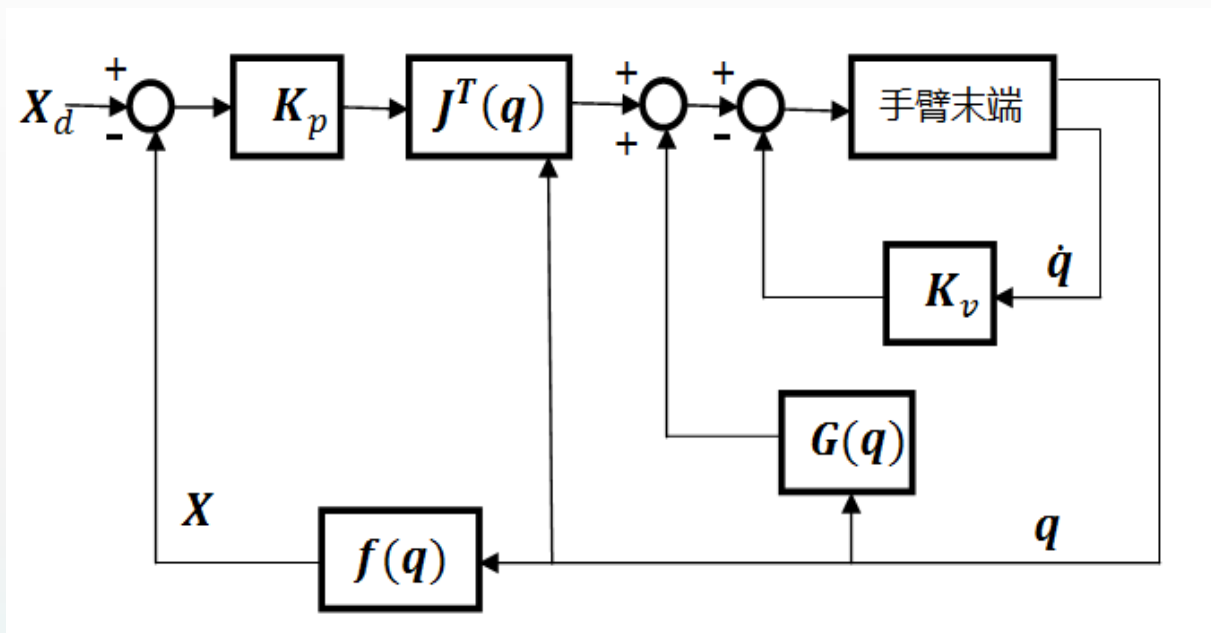


② 再将末端抓手的操作力矢量由雅可比转置矩阵映射为等价的关节力矩矢量，从而控制机器人手臂末端，减少运动误差

① 末端位姿误差矢量乘上相应的增益，得到手臂末端抓手的操作力矢量，该力作用在末端抓手上以减少末端位姿误差, F 为假想操作力

图10.14 基于作业空间的伺服系统控制原理

$$\tau = J^T(q)[K_p(X_d - X) - K_v\dot{X}] + G(q)$$



该控制方法即所谓把末端拉向目标值得方法，不仅直观上容易理解，而且最大的优点是不含逆运动学计算，可提高控制运算速度。

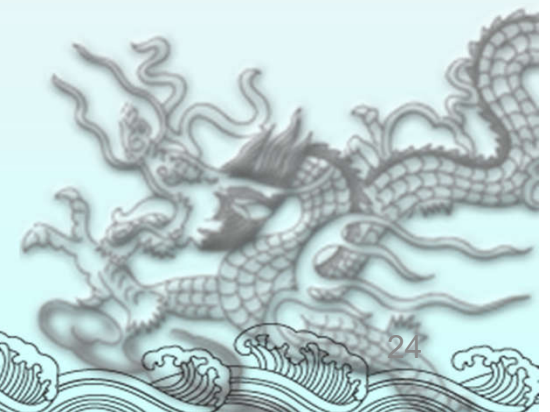
图10.15 基于作业空间的伺服控制系统框图

轨迹跟踪：

$$\tau(t) = J^T(q)[K_p(X_d(t) - X(t)) - K_v(\dot{X}_d(t) - \dot{X}(t))] + G(q)$$

第三节 基于运动参数的控制

- 机器人分解运动的速度控制
- 机器人分解运动的加速度控制
- 力和力矩的控制



1 机器人分解运动的速度控制(Speed Control of Robot Decomposition Movement)

分解运动的速度控制要求各伺服系统的驱动器以不同的分速度同时联合运行，能保证机器人的末端执行器沿着笛卡儿坐标轴稳定地运行。控制时先把末端执行器期望的笛卡儿位姿分解为各关节的期望速度，然后再对各关节进行伺服控制。

机器人操作空间自由度 m 和关节空间自由度 n

$$X(t) = f(q)$$

$$\dot{X}(t) = J(q) \dot{q}(t)$$

$$\text{当 } m=n \text{ 时, } \dot{q}(t) = J^{-1}(q) \dot{X}(t)$$

$$\text{当 } m < n \text{ 时, } \dot{q}(t) = \underline{J^{+}(q)} \dot{X}(t) \quad \text{广义逆/伪逆}$$

$$\text{当 } J \text{ 满秩时, } J^{+} = J^T (JJ^T)^{-1}$$

2 机器人分解运动的加速度控制(Acceleration Control of Robotic Decomposition Motion)

机器人分解运动的加速度控制是分解运动速度控制概念的扩展，其方法是把机器人末端执行器在笛卡儿坐标系下的加速度值分解为关节坐标系下相应各关节的加速度，这样根据相应的系统动力学模型就可以计算出所需施加到各关节电动机上的控制力矩。

$$\ddot{X}(t) = J(t) \ddot{q}(t) + \dot{J}(t) \dot{q}(t)$$

$$e = X_d - X$$

要满足误差 e 逐渐收敛为零，必须满足：

$$\ddot{e} + k_1 \dot{e} + k_2 e = 0$$

选择合适的 k_1 、 k_2 式式子的特征根实部为负数

$$\ddot{q}(t) = -k_1 \dot{q}(t) + J^{-1}(q) [\ddot{X}(t) + k_1 \dot{X}_d(t) + k_2 e(t) - \dot{J}(q, \dot{q}) \dot{q}(t)]$$

3 力和力矩的控制(Force and torque control)

分解运动的力和力矩控制的基本思路是确定加于机器人各关节驱动器上的控制力矩，从而实现机器人末端执行器在笛卡儿坐标下的位姿和速度控制。力和力矩控制的依据是机器人的动力学模型，其计算方法是对逆动力学的求解。力和力矩的控制在机器人关节空间是闭环的。

$$\tau = M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + G(q, \dot{q})$$

$$e_q = q_d - q$$

要满足误差 e_q 逐渐收敛为零，必须满足：

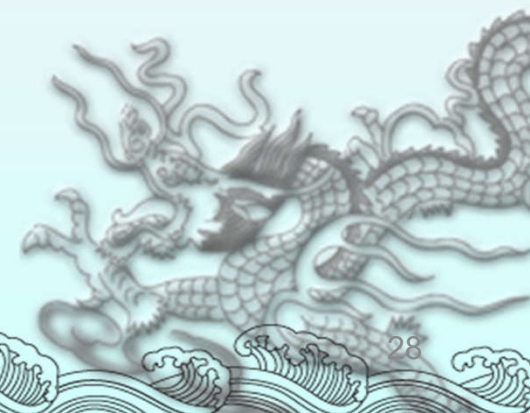
$$\ddot{e}_q + k_{1q}\dot{e}_q + k_{2q}e_q = 0$$

选择合适的 k_{1q} 、 k_{2q} 式式子的特征根实部为负数

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d - k_{1q}\dot{e}_q - k_{2q}e_q) + H(q, \dot{q})\dot{q} + G(q, \dot{q})$$

第四节 机器人的智能控制系统

- 递阶控制系统
- 专家控制系统
- 模糊控制系统
- 学习控制系统
- 神经控制系统
- 进化控制系统



1 递阶控制系统(Hierarchical control system)

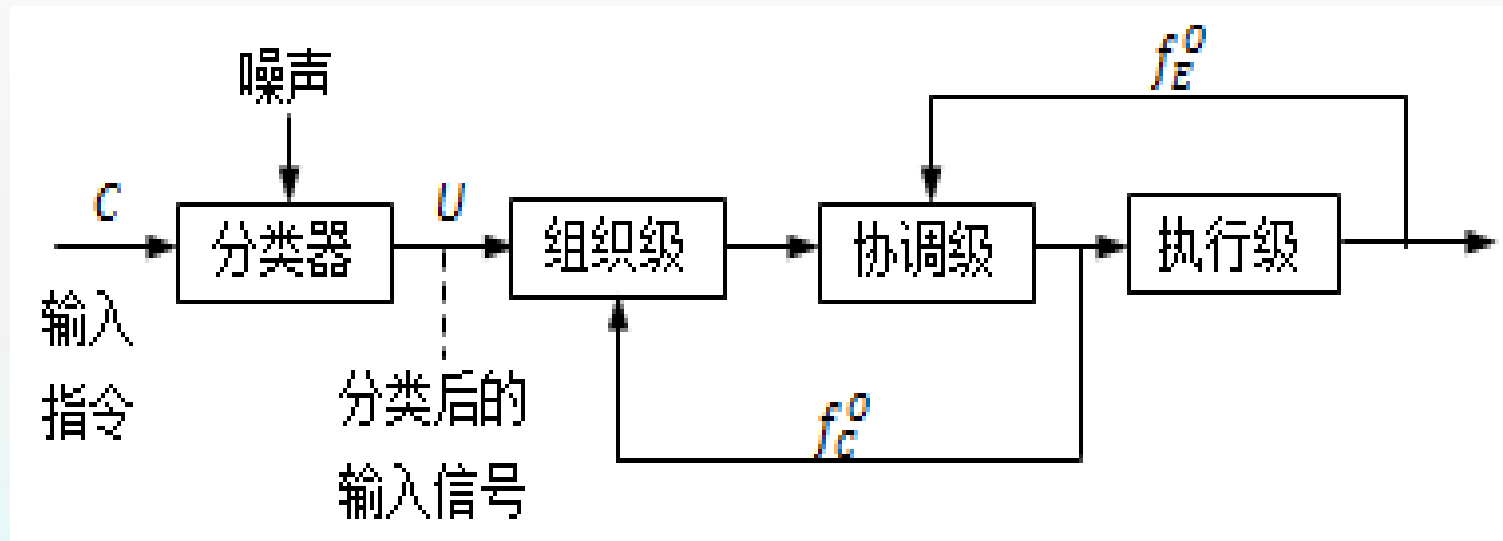


图10.14 递阶智能机器的级联结构

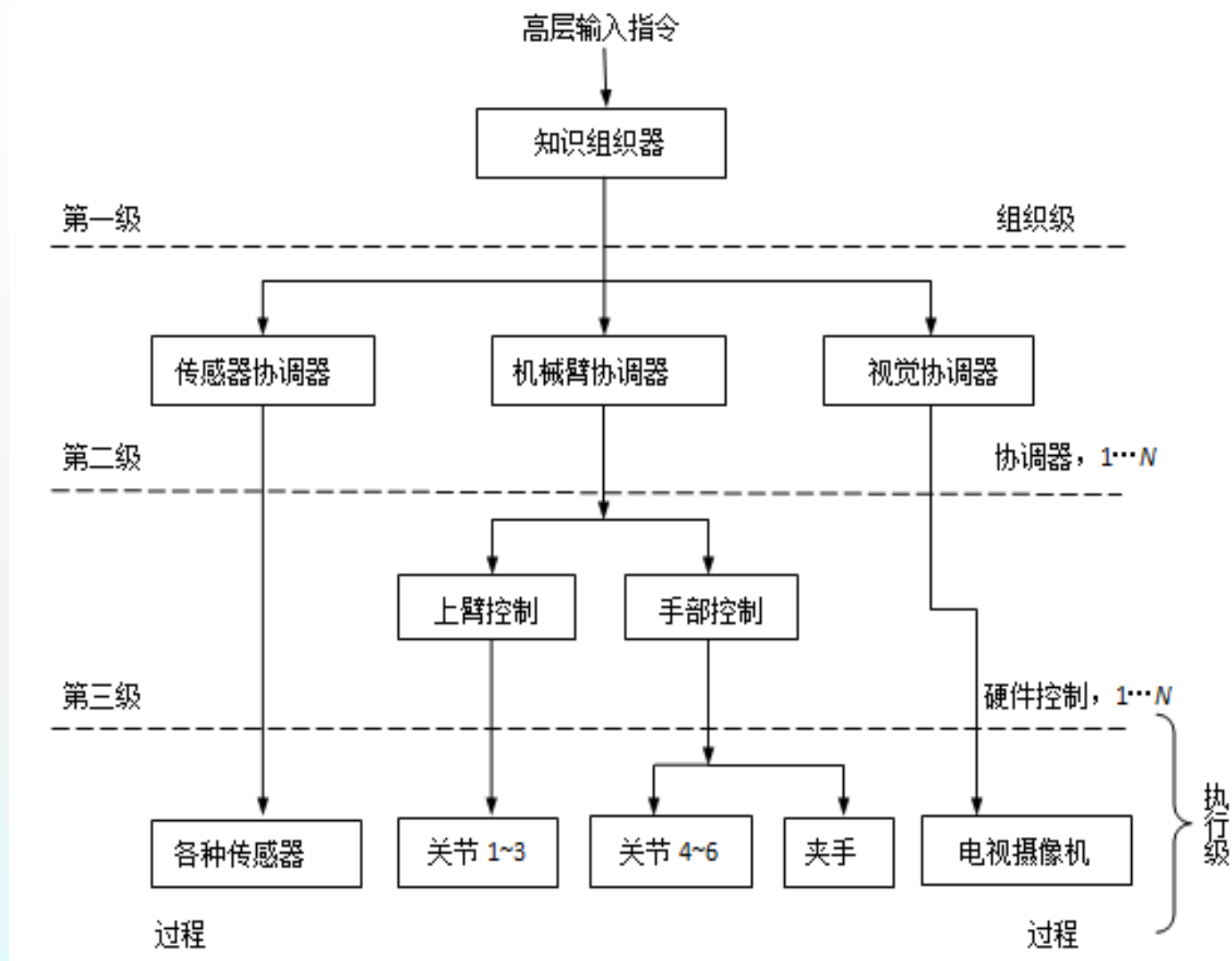


图10.15 具有视觉反馈的机械手递阶控制结构

2 专家控制系统(Expert control system)

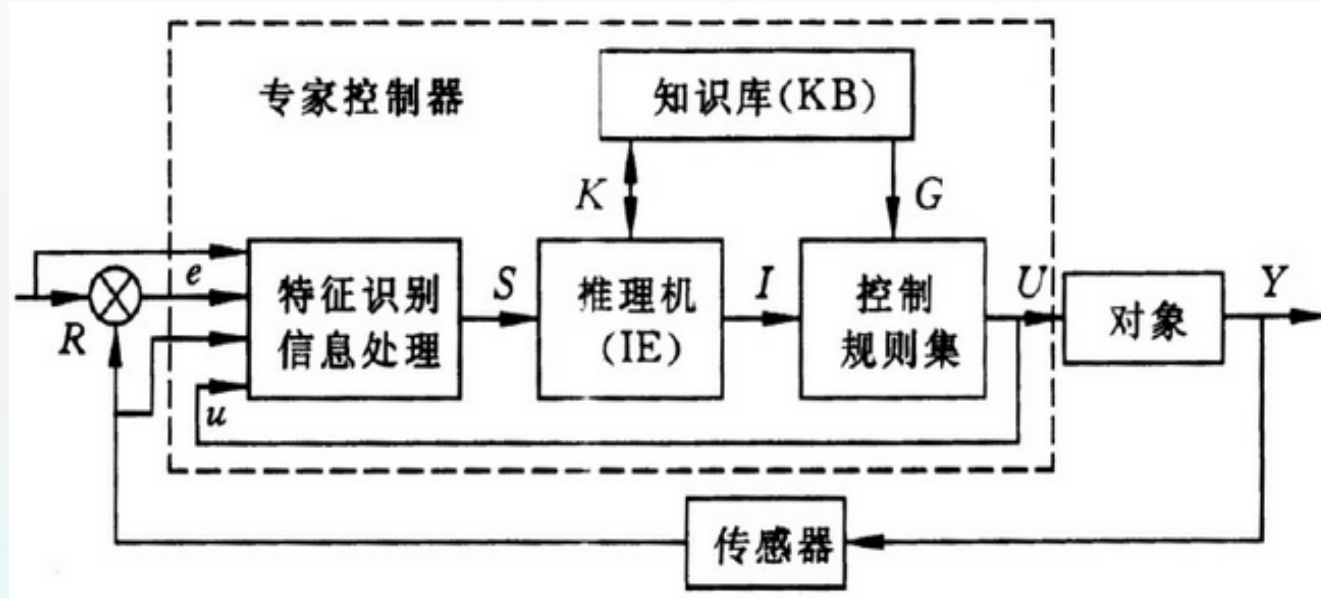


图10.16 专家控制器的典型结构

3 模糊控制系统(Fuzzy control system)

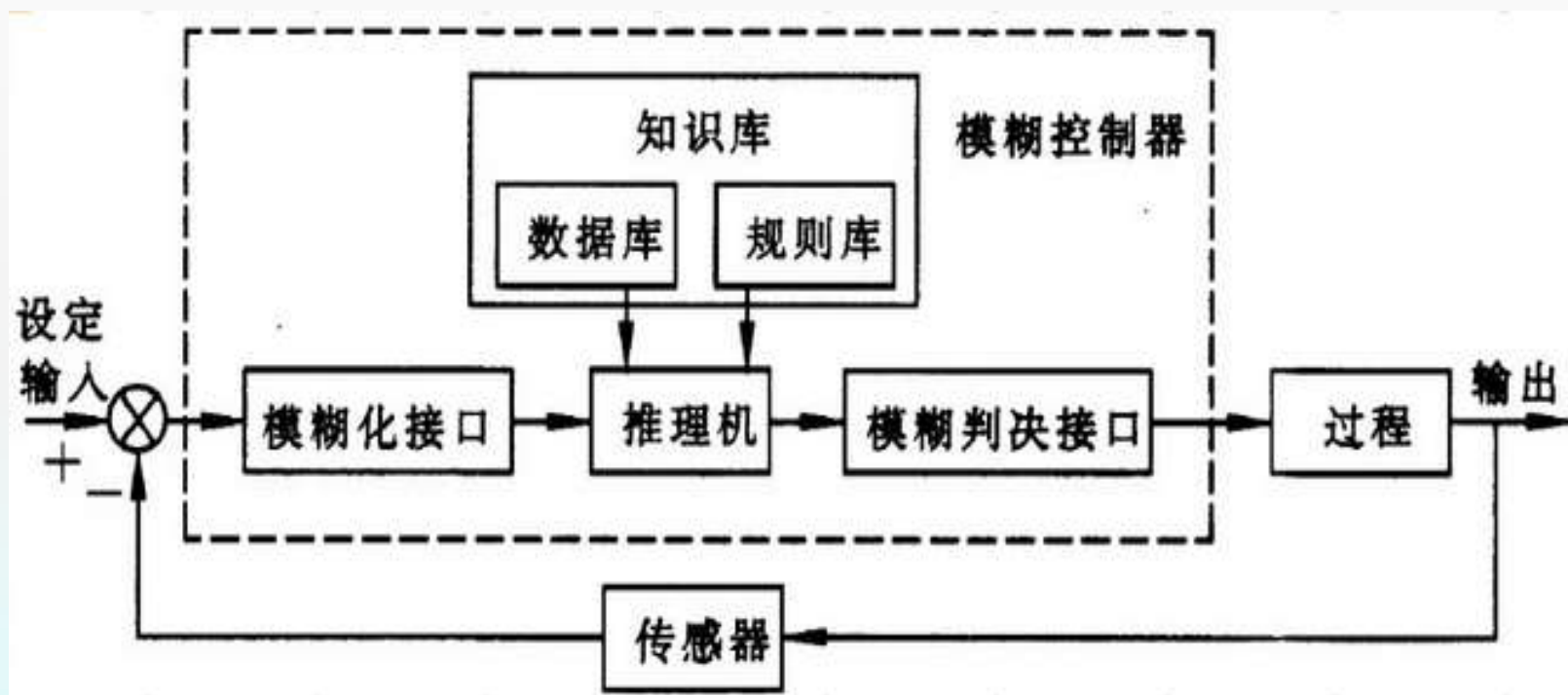
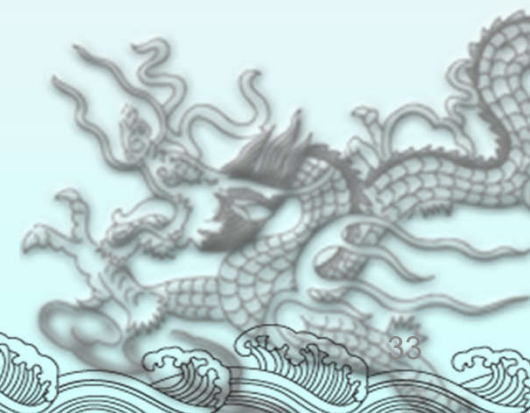


图10.16 模糊控制系统的基本结构

4 学习控制系统(Learning control system)

学习控制用于动态系统的研究，已经提出了许多学习控制方案和方法，包括：

- (1) 基于模式识别的学习控制；
- (2) 迭代学习控制；
- (3) 连接主义学习控制，包括再励(强化)学习控制；
- (4) 基于规则的学习控制，包括模糊学习控制；
- (5) 拟人自学习控制；
- (6) 状态学习控制。



5 神经网络系统(Neural control system)

神经网络技术和计算机技术的发展为神经控制提供了技术基础，而且还由于神经网络具有一些适合于控制的特性和能力。这些特性和能力包括：

(1) 神经网络对信息的并行处理能力和快速性，适于实时控制和动力学控制。

(2) 神经网络的本质非线性特性，为非线性控制带来新的希望。

(3) 神经网络可通过训练获得学习能力，能够解决那些用数学模型或规则描述难以处理或无法处理的控制过程。

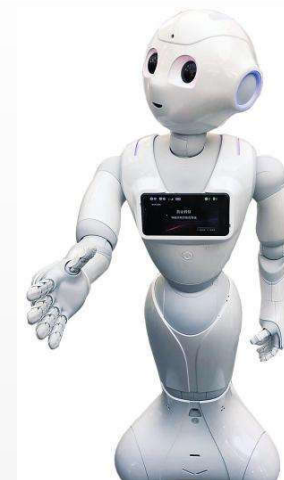
(4) 神经网络具有很强的自适应能力和信息综合能力，因而能够同时处理大量的不同类型的控制输入，解决输入信息之间的互补性和冗余性问题，实现信息融合处理。这特别适用于复杂系统、大系统和多变量系统的控制。

6 进化控制系统(Evolutionary control system)

- 进化控制在对待机器智能的问题上较现有智能控制方法实现了认识与思考方法上的飞跃。进化过程被视为对未知环境的一种创造性的自组织、自适应的发展过程，而不仅仅是一种优化技术。将进化控制应用于复杂系统的控制器设计，可以很好地解决其学习与适应能力问题。
- 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。

【综合实例分析】

礼仪机器人控制系统的设计



1 礼仪机器人应该具有如下功能特点:

- (1) 稳定的行走机构, 保障机器人运行过程中的平稳性;
- (2) 根据不同场合, 可以做出几套不同的迎宾动作;
- (3) 礼仪机器人控制系统的响应速度足够快, 可以识别出障碍物并能够采用对应的避障策略来实现实时的避障;
- (4) 具有人性化的人机界面, 方便人与机器人之间的交流;
- (5) 通过控制底层的遥控模块, 用户也可以利用遥控来向机器人发出迎宾, 引导等各种命令。
- (6) 电池体积小、能量密度大, 保证机器人在各种震动条件下电池的可靠性;
- (7) 对周围环境的感知能力很强并且拥有通畅的传输信息的能力, 不仅可以对周围的环境信息进行稳定可靠的采集, 还可以及时准确地反馈给机器人控制系统。



2 礼仪机器人控制系统体系的结构设计:

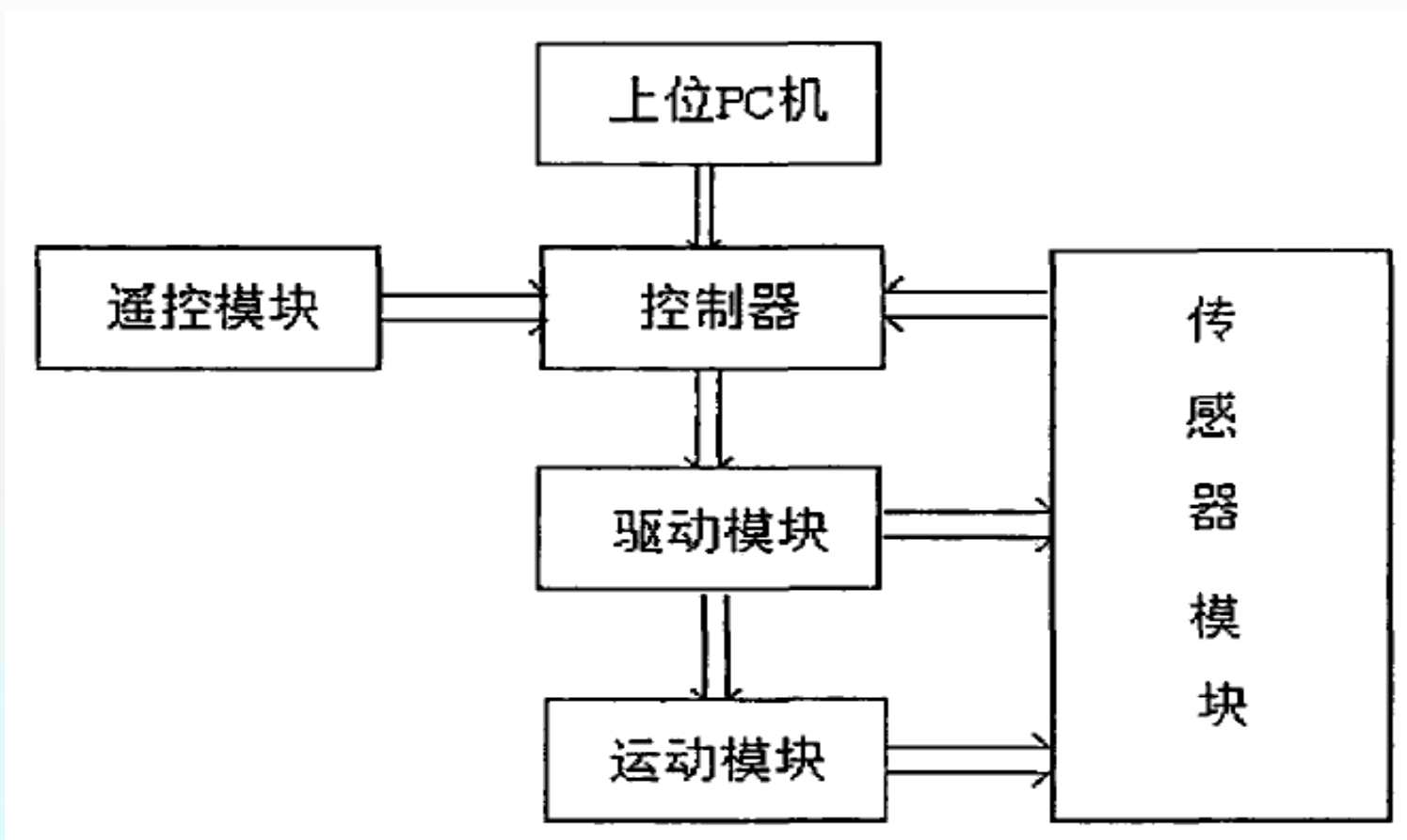


图10.20 礼仪机器人体系结构框图

3 控制系统的硬件组成结构：

礼仪机器人的控制系统在整体上可以分为：

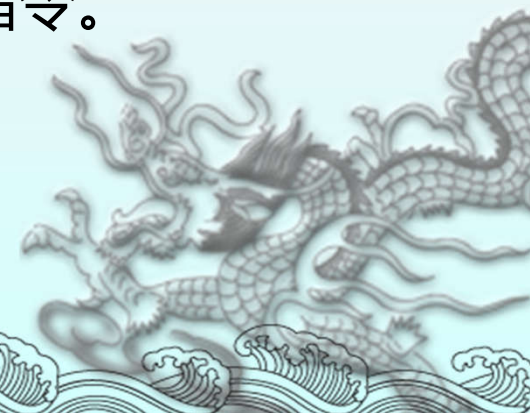


在设计礼仪机器人控制系统硬件结构的时候，应充分考虑控制系统的体系结构及机器人平台，以满足礼仪机器人在功能需求方面的多样性。



图10.21为礼仪机器人控制系统硬件结构的示意图，采用的是分布式的控制方法，由上位机以及下位机组成。

- 上位机为常用的PC机，主要用来与下位机通讯，接收下位机传过来的信息处理结果，并通过人机界面向下位机发送功能指令。
- 下位机采用微控制器控制不同的模块，实时采集各传感器的输入信号，控制各电机的输出，通过RS232串行通讯与上位机通讯，将信息处理的结果传给上位机，接收并执行上位机的功能指令，并通过无线遥控接收装置接收并执行遥控器的指令。



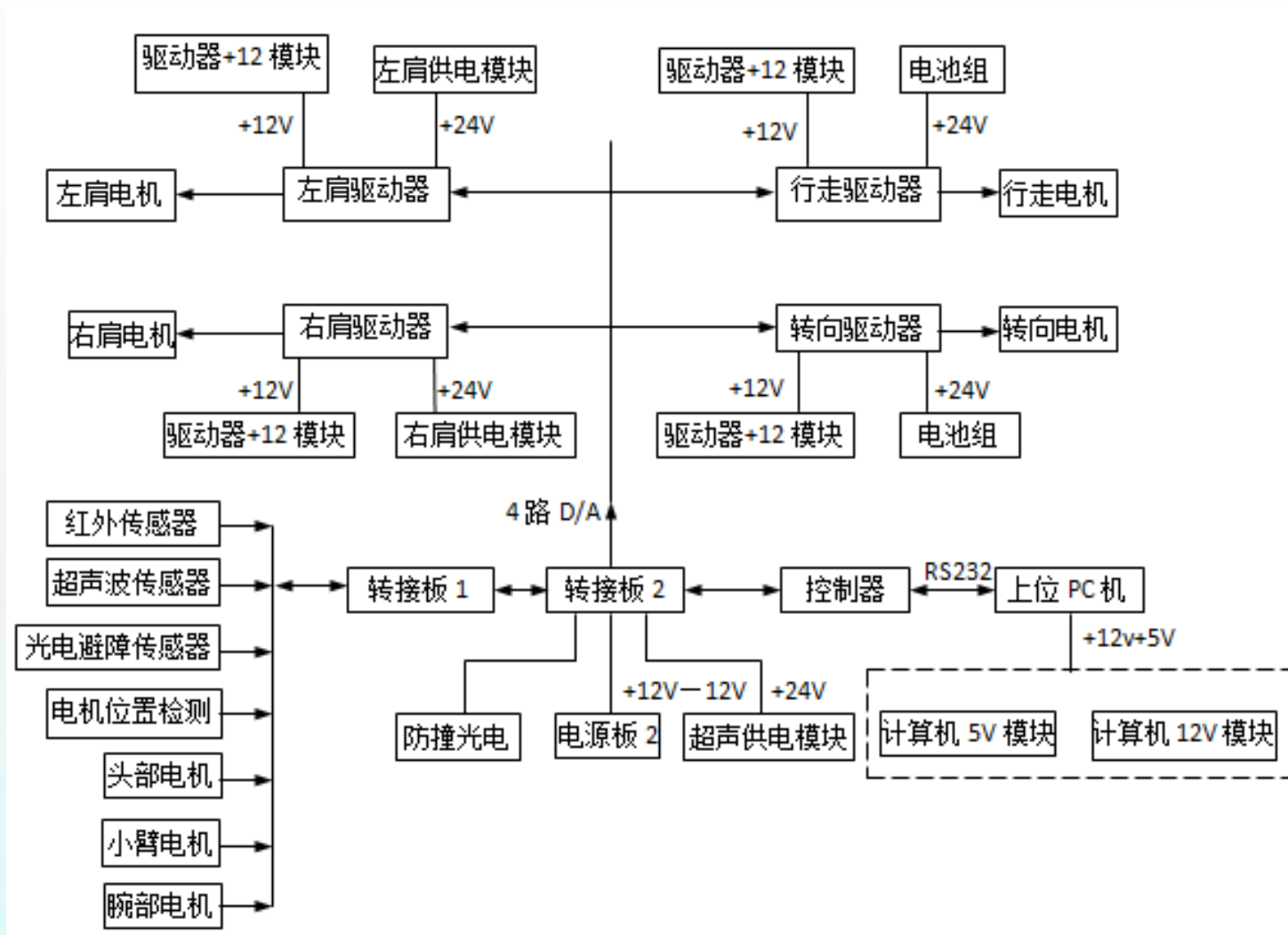


图10. 21礼仪机器人控制系统硬件结构的示意图

4 礼仪机器人控制系统的软件设计:

礼仪机器人控制系统的主程序是软件部分的主体，负责整个控制系统的协调控制工作，通过调用不同的子程序来完成不同的工作。子程序主要包括测距子程序、迎宾子程序、自动表演子程序、引导客人进电梯子程序等。控制系统主流程如图10.22所示。

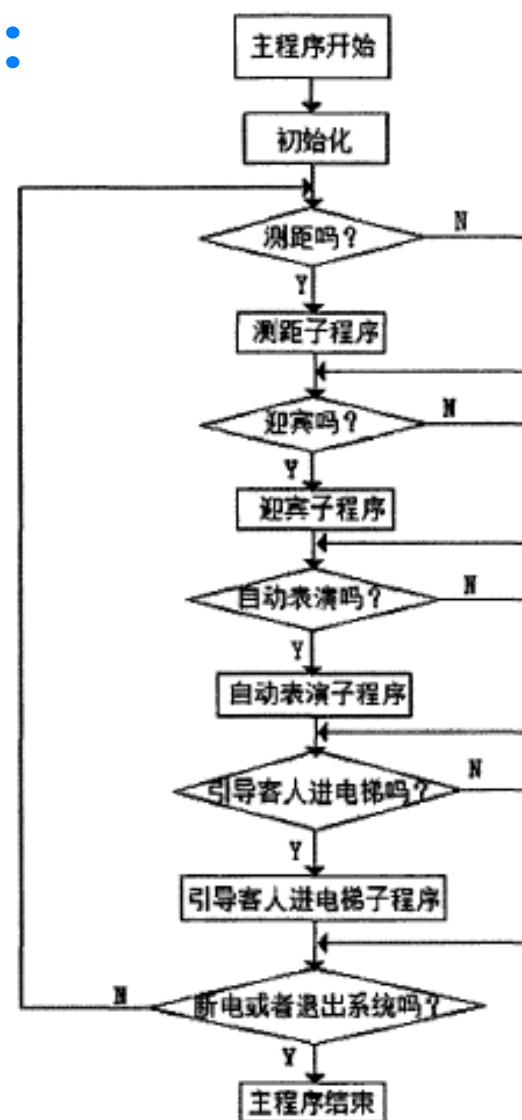


图10.22 控制系统主流程图