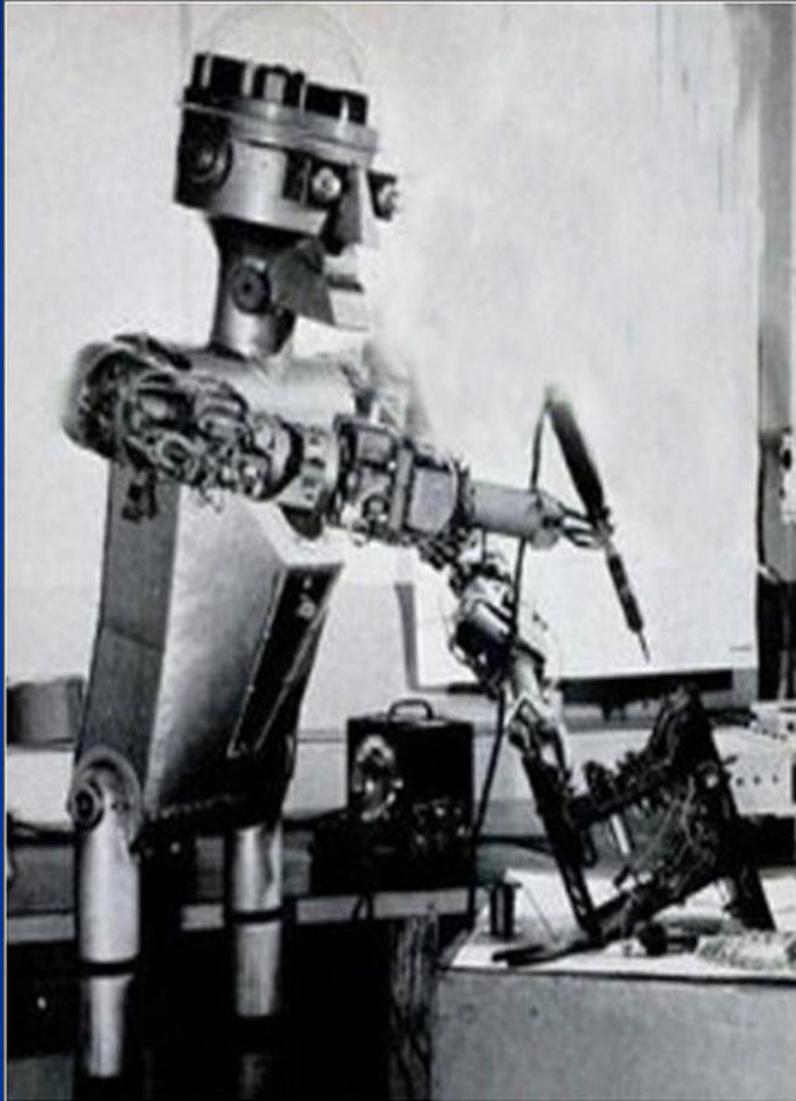


南昌理工学院

Nanchang Institute of Technology



工业机器人

机电工程学院

第五章 工业机器人的控制

5.1 机器人控制系统与控制方式

5.2 单关节机器人模型和控制

5.3 基于关节坐标的控制

5.4 基于作业空间的伺服控制

5.5 机器人末端操作器的力/力矩控制

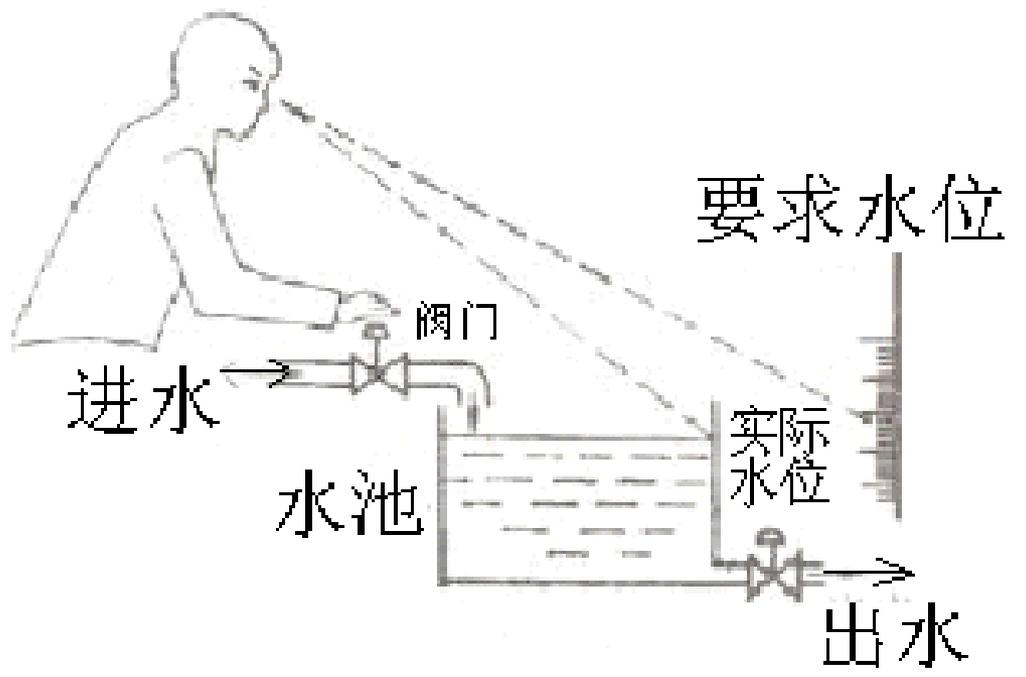
5.6 工业机器人控制系统硬件设计

课程引入：什么是控制？

简单地说，**控制**就是为了达到一定目的而实行的适当操作。

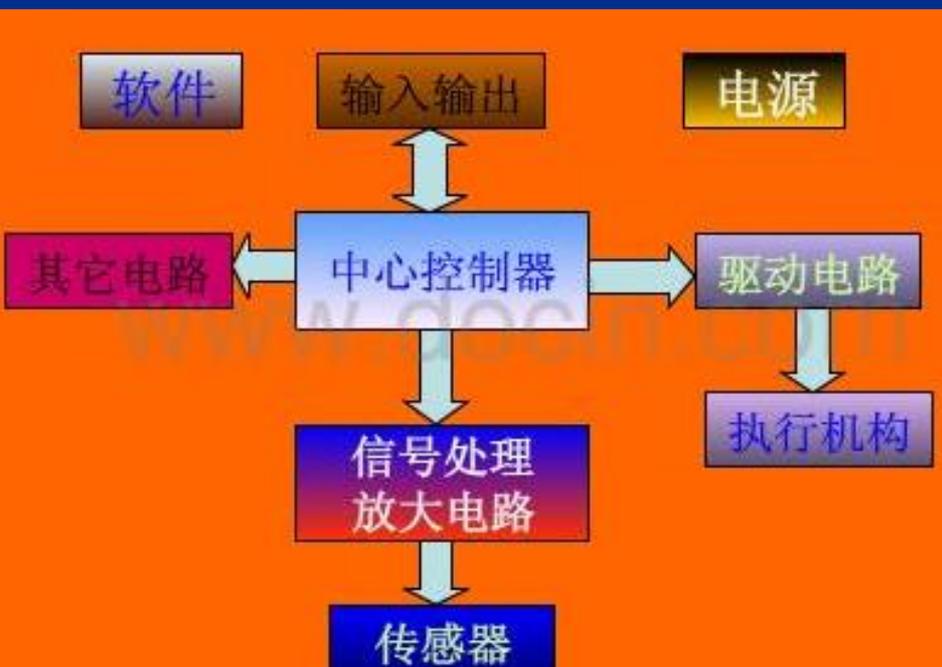
步骤：

- (1) 记住期望水位值；
- (2) 测量水池实际水位；
- (3) 计算期望水位与实际水位的误差；
- (4) 根据误差正确地调节进水阀门。



课程引入：典型机器人的控制系统

机器人控制系统的构成（硬件）



- (1) 中心控制器—单片机
- (2) 驱动电路—桥式PWM调速电路；
- (3) 执行机构—直流伺服电机；
- (4) 信号处理电路—光电隔离接入电路；
- (5) 传感器—光电传感器、各类开关；
- (6) 输入输出—编程器。

课程引入： 机器人的控制

- ◆ 机器人的控制方法有很多，从大的方面来分，可分为轨迹控制和力控制两类
- ◆ 力控制进一步可以区分为阻抗控制和混合控制

5.1.1 机器人控制的特点（与一般自动化设备比较）

➤ 机器人的动力学运动方程式

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

式中 $M(q)$ —— 惯性矩阵;
 $h(q, \dot{q})$ —— 离心力和科氏力的向量;
 B —— 粘性摩擦系数矩阵;
 $G(q)$ —— 重力项的向量;
 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$ —— 关节驱动力向量。

➤ 机器人的动力学运动方程式是非常复杂的非线性方程式

5.1.1 机器人控制的特点

➤ 机器人的结构是一个空间开链机构，其各个关节的运动是独立的，为了实现末端点的运动轨迹，需要多关节的运动协调。因此，其控制系统与普通的控制系统相比要复杂的多，具体如下：

(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，应当根据需求选择不同的参考坐标系，并做适当的坐标变换。经常要求正向运动学和反向运动学的解，除此之外还要考虑力的影响

5.1.1 机器人控制的特点

(2) 一个简单的机器人至少要有3-6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。

5.1.1 机器人控制的特点

(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。

(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

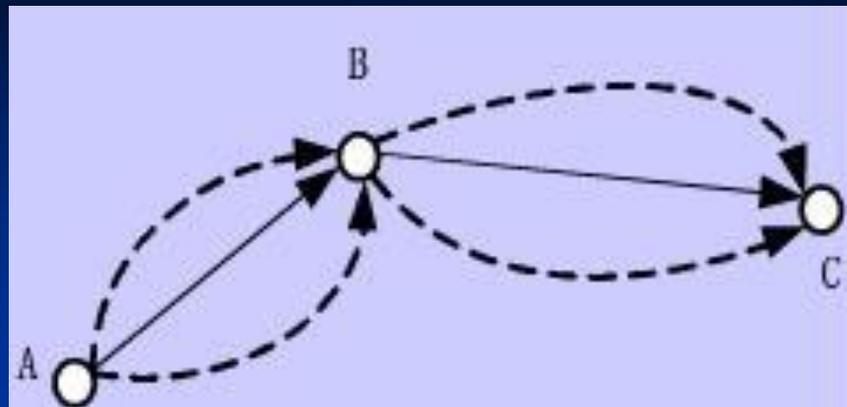
5.1.2 机器人控制方式

机器人控制方式，从**总体上看**，分为**动作控制方式**和**示教控制方式**

- 按**运动坐标控制**的方式，分为**关节空间运动控制**、**直角坐标空间运动控制**
- 按**轨迹控制**的方式，分为**点位控制**和**连续轨迹控制**
- 按**控制系统对工作环境变化的适用程度**，分为**程序控制**、**适应性控制**、**人工智能控制**
- 按**运动控制**的方式，分为**位置控制**、**速度控制**、**力（力矩）控制**
- 按**机器人控制是否带反馈**，分为**非伺服型控制方式**、**伺服型控制方式**

1、点位控制与连续轨迹控制

--（手部在空间中的运动方式）



（1）点位控制方式——PTP

点位控制又称为**PTP**控制，其特点是只控制机器人手部在作业空间中某些规定的离散点上的位姿。

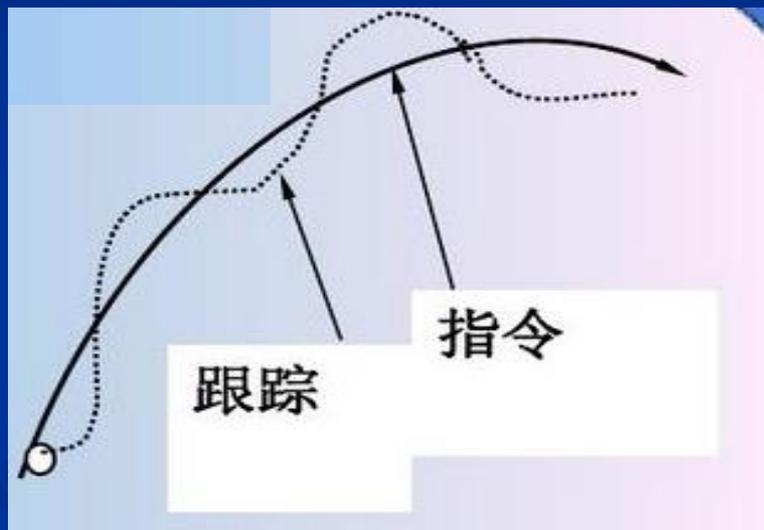
这种控制方式的主要技术指标是**定位精度**和**运动所需的时间**。

常常被应用在上下料、搬运、点焊和在电路板上插接元器件等定位精度要求不高且只要求机器人在目标点处保持手部具有准确位姿的作业中。

(2) 连续轨迹控制方式——CP

连续轨迹控制又称为CP控制，其特点是连续的控制机器人手部在作业空间中的位姿，要求其严格的按照预定的路径和速度在一定的精度范围内运动。

- 这种控制方式的主要技术指标机器人手部位姿的**轨迹跟踪精度**及**平稳性**。
- 通常弧焊、喷漆、去毛边和检测作业的机器人都采用这种控制方式。
- 有的机器人在设计控制系统时，上述两种控制方式都具有，如对进行装配作业的机器人的控制等。



2、伺服和非伺服控制方式

(1) 非伺服型控制方式

非伺服型控制方式是指未采用反馈环节的开环控制方式。

在这种控制方式下，机器人作业时严格按照在进行作业之前预先编制的控制程序来控制机器人的动作顺序，在控制过程中没有反馈信号，不能对机器人的作业进展及作业的质量好坏进行监测，因此，这种控制方式只适用于作业相对固定、作业程序简单、运动精度要求不高的场合，它具有费用省，操作、安装、维护简单的优点。

(2) 伺服型控制方式

伺服型控制方式是指采用了反馈环节的闭环控制方式。

这种控制方式的特点是在控制过程中采用内部传感器连续测量机器人的关节位移、速度、加速度等运动参数，并反馈到驱动单元构成闭环伺服控制。

如果是适应型或智能型机器人的伺服控制，则增加了机器人用外部传感器对外界环境的检测，使机器人对外界环境的变化具有适应能力，从而构成总体闭环反馈的伺服控制方式。

3、示教-再现控制

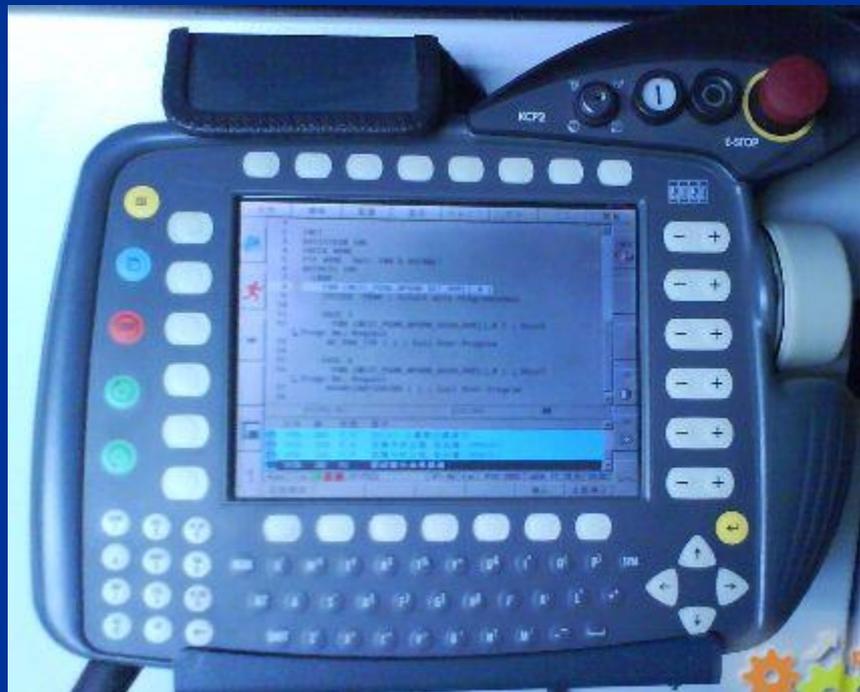
- **示教** -- 教机器人如何去做。在示教过程中，机器人将作业顺序、位置、速度等信息记录下来。
- **再现** -- 根据存储的信息再现示教的动作
- 机器人的示教再现功能易于实现，编程方便，在机器人的初期得到了较多的应用。

(1) 示教的方式

示教的方式总的可以分为**集中示教方式**和**分离示教方式**

集中示教方式就是指同时对位置、速度、操作顺序等进行的示教方式。

分离示教方式是指在示教位置之后，再一边动作，一边分别示教位置、速度、操作顺序等的示教方式



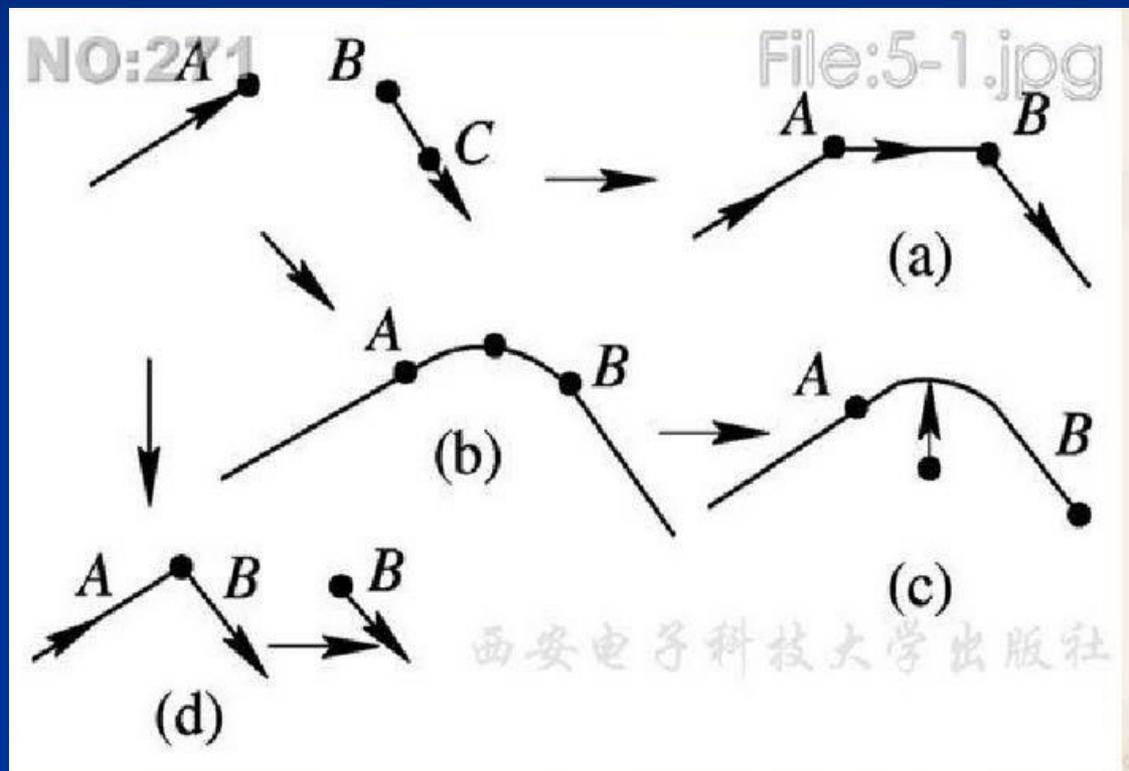
- ① 当对**PTP(点位控制方式)**控制的工业机器人示教时，可以分步编制程序，且能进行编辑、修改等工作。但是在作曲线运动而且位置精度要求较高时，示教点数一多，示教时间就会拉长，且在每一个示教点都要停止和启动，因而很难进行速度的控制

- ② 对需要**控制连续轨迹**的喷漆、电弧焊等工业机器人进行连续轨迹控制的示教时，示教操作一旦开始，就不能中途停止，必须不中断地进行到完，且在示教途中很难进行局部修正

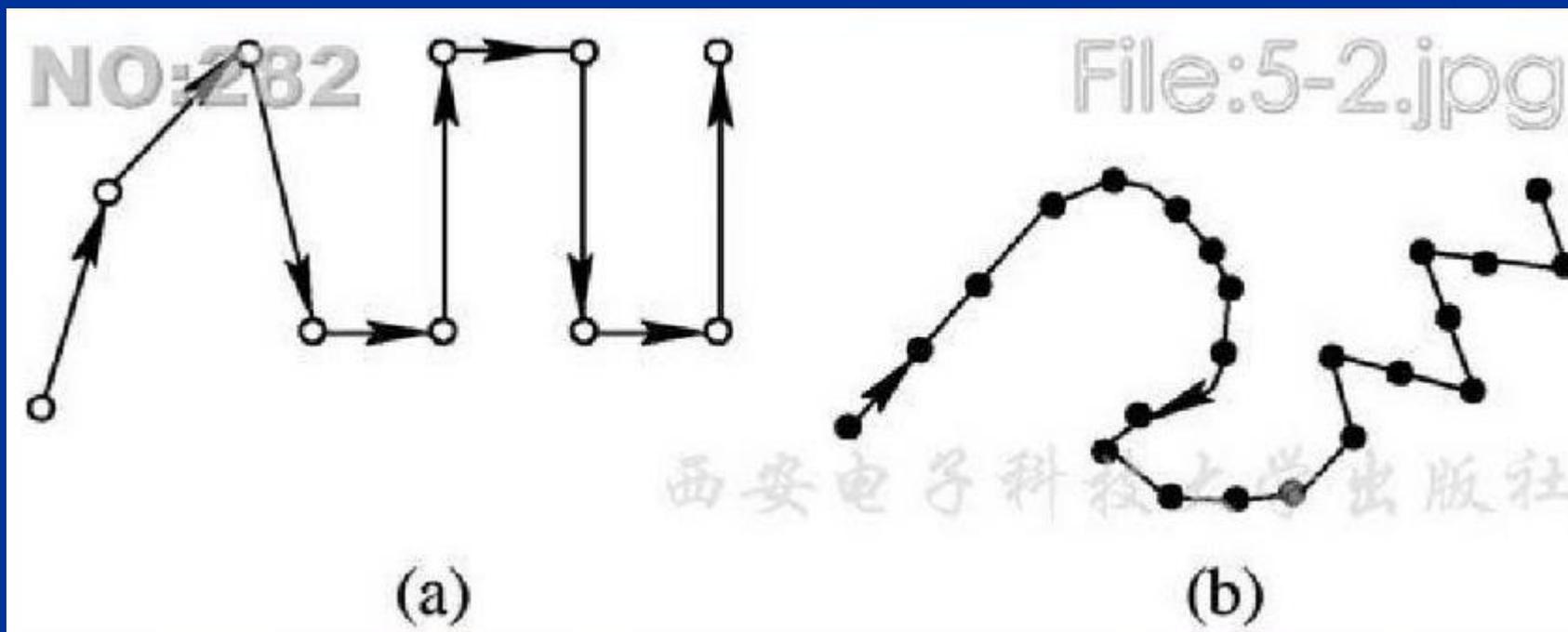
- 示教方式中经常会遇到一些数据的编辑问题，其编辑器能有下面几种方法

要连接A与B两点时，可以这样做：

- a) 直接连接
- b) 先在A与B之间指定一点x，然后用圆弧连接
- c) 用指定半径的圆弧连接
- d) 用平行移动的方式连接



- 在CP（连续轨迹控制方式）控制的示教中，由于CP控制的示教是多轴同时动作，因此与PTP控制不同，它几乎必须在点与点之间的连线上移动，故有下面两种方法



(2) 记忆的方式

工业机器人的记忆方式随着示教方式的不同而不同。又由于记忆内容的不同，故其所用的记忆装置也不完全相同。通常，工业机器人操作过程的复杂程序取决于记忆装置的容量。容量越大，其记忆的点数就越多，操作的动作就越多，工作任务就越复杂。

(3) 示教编程方式

1、手把手示教编程

- 主要用于喷漆、弧焊等要求实现连续轨迹控制的工业机器人示教编程中。
- 人工利用示教手柄引导末端操作器经过所要求的位置，同时由传感器检测出机器人各关节处的坐标值，并由控制系统记录、存储下这些数据信息。实际工作当中，工业机器人的控制系统重复再现示教过的轨迹和操作技能。
- 手把手示教编程也能实现点位控制，与CP控制不同的是，它只记录各轨迹程序移动的两端点位置，轨迹的运动速度则按轨迹程序段对应功能数据输入

(3) 示教编程方式

2、示教盒示教编程

- 人工利用示教盒上所具有的各种功能的按钮来驱动工业机器人的各关节轴，按作业所需要的顺序单轴运动或多关节协调运动，从而完成位置和功能的示教编程。
- 示教编程控制由于其编程方便，装置简单等优点，在工业机器人的初期得到较多的应用。同时，又由于其编程精度不高、程序修改困难、示教人员要熟练等缺点的限制，促使人们又开发了许多新的控制方式和装置，以使工业机器人能更好更快地完成作业任务。

4、力（力矩）控制方式

- 在完成装配、抓放物体等工作时，除要准确定位之外，还要求使用适度的力或力矩进行工作，这时就要利用力（力矩）伺服方式。
- 力（力矩）方式的控制原理与位置伺服控制原理基本相同，只不过输入量和反馈量不是位置信号，而是力（力矩）信号，因此系统中必须有力（力矩）传感器。

5、智能控制方式

- 机器人的智能控制是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作出相应的决策。
- 采用智能控制技术，使机器人具有了较强的环境适应性及自学能力。
- 智能技术的发展有赖于近年来人工神经网络、基因算法、遗传算法、专家系统等人工智能的迅速发展

第五章 工业机器人的控制

5.1 机器人控制系统与控制方式

5.2 单关节机器人模型和控制

5.3 基于关节坐标的控制

5.4 基于作业空间的伺服控制

5.5 机器人末端操作器的力/力矩控制

5.6 工业机器人控制系统硬件设计

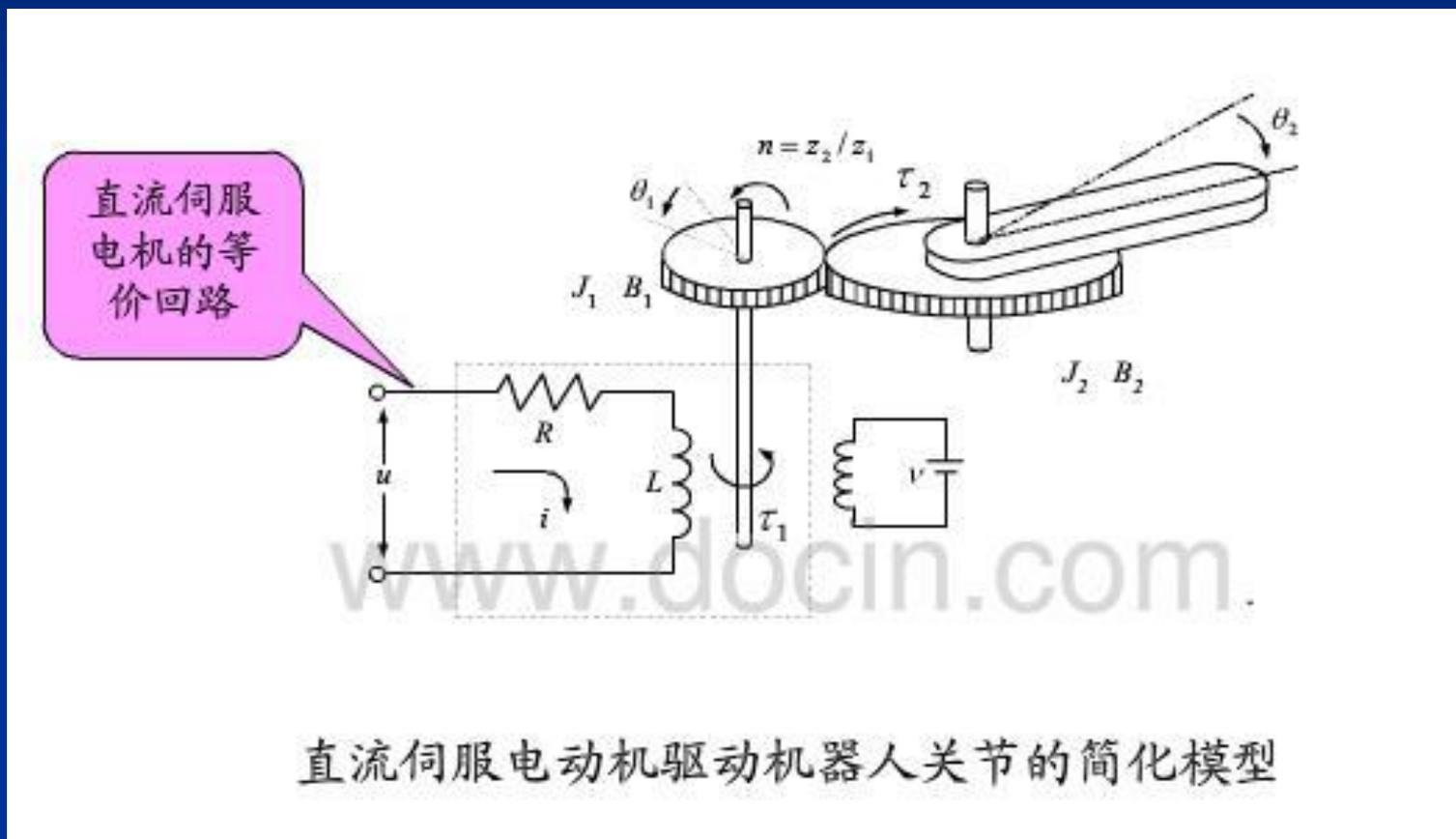
5.2 单关节机器人模型和控制

通常工业机器人各关节的控制按独立关节来考虑，原因如下：

- 机器人的运动速度不高，由速度项引起的非线性作用可以忽略
- 工业机器人常用直流伺服电动机作为关节驱动器，由于减速器的存在，电动机轴上负载变化很小，可以看作定常系统
- 工业机器人系统是耦合的非线性动力系统，但由于减速器的存在，但各关节之间的耦合作用变弱，

➤ 以直流伺服电动机为驱动器的单关节控制

5.2.1、单关节系统的数学模型



电动机的转矩平衡方程为：

$$\tau_1(t) = J_1 \frac{d^2 \theta_1(t)}{dt^2} + B_1 \frac{d\theta_1(t)}{dt} + \tau_2(t)$$

负载轴的转矩平衡方程为：

$$n\tau_2(t) = J_2 \frac{d^2 \theta_2(t)}{dt^2} + B_2 \frac{d\theta_2(t)}{dt}$$

电枢绕组电压平衡方程为：

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + k_b \frac{d\theta_1(t)}{dt} = u(t)$$

互相耦合方程为：

$$\tau_1(t) = k_t i(t)$$

再考虑到转角之间的关系：

$$\theta_1(t) = n \theta_2(t)$$

注：n为电动机经齿轮箱的传动比

$$n = z_2 / z_1$$

忽略电感后得系统微分方程：

$$J \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta(t)}{dt} = k_m u(t)$$

- 若采用传动比 n 大于1的减速机构，则负载的转动惯量和阻尼系数减少为原来的 $1/n^2$

—— 减速器的优点（与直接驱动相比）

开环传递函数为：

$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{k_m}{Js^2 + Bs}$$

- 这一方程代表了单关节控制系统所加电压与关节角位移之间的传递函数。对于**液压或气压传动**系统，也可推出与上式完全类似的关系式，因此，此方程具有一定的普遍意义

5.2.2、阻抗匹配

- 在**电气系统**中，如果电源的内部阻抗与负载阻抗相同，那么负载消耗的电能最大，频率最高。在机械系统和流体传动系统中也有相似的性质。要从某一能源以最高效率获得能量，一般都要使负载的阻抗与能源内部的阻抗一致，这就叫**阻抗匹配**
- 机械传动系统的阻抗包括**惯性阻抗**（惯性质量的惯性矩，相当于电气系统中的线圈感抗）、**摩擦阻抗**（直线运动和旋转运动摩擦，相当于电气系统中的电阻）和**弹性阻抗**（弹簧和轴的扭转弹性变形，相当于电气系统中的电容器）

5.2.2、阻抗匹配

如果

$$n^2 J_1 = J_2$$

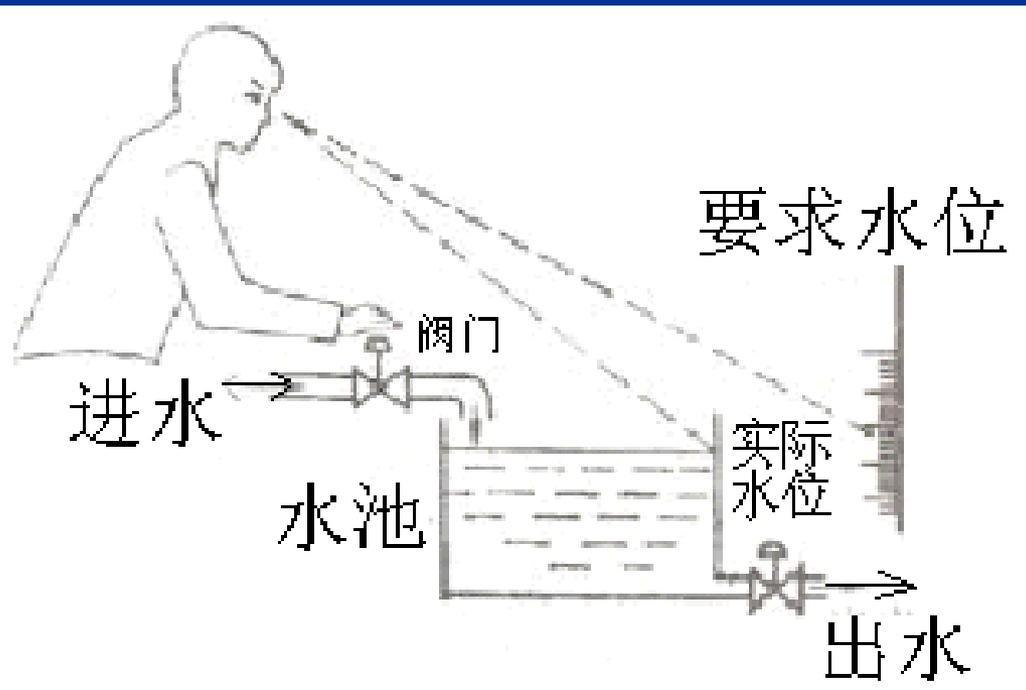
- 即电机的惯性矩与负载的惯性矩相等，就会使**执行装置**达到最大的驱动能力。
- 适当选择**减速器的传动比**，使**执行装置**的惯性矩与**负载**惯性矩一致。对于其它传动机构，采用不同的惯性矩变换系数也能得到同样的效果

5.2.3、单关节位置与速度控制---课程引入

简单地说，**控制**就是为了达到一定目的而实行的适当操作。

步骤：

- (1) 记住期望水位值；
- (2) 测量水池实际水位；
- (3) 计算期望水位与实际水位的误差；
- (4) 根据误差正确地调节进水阀门。



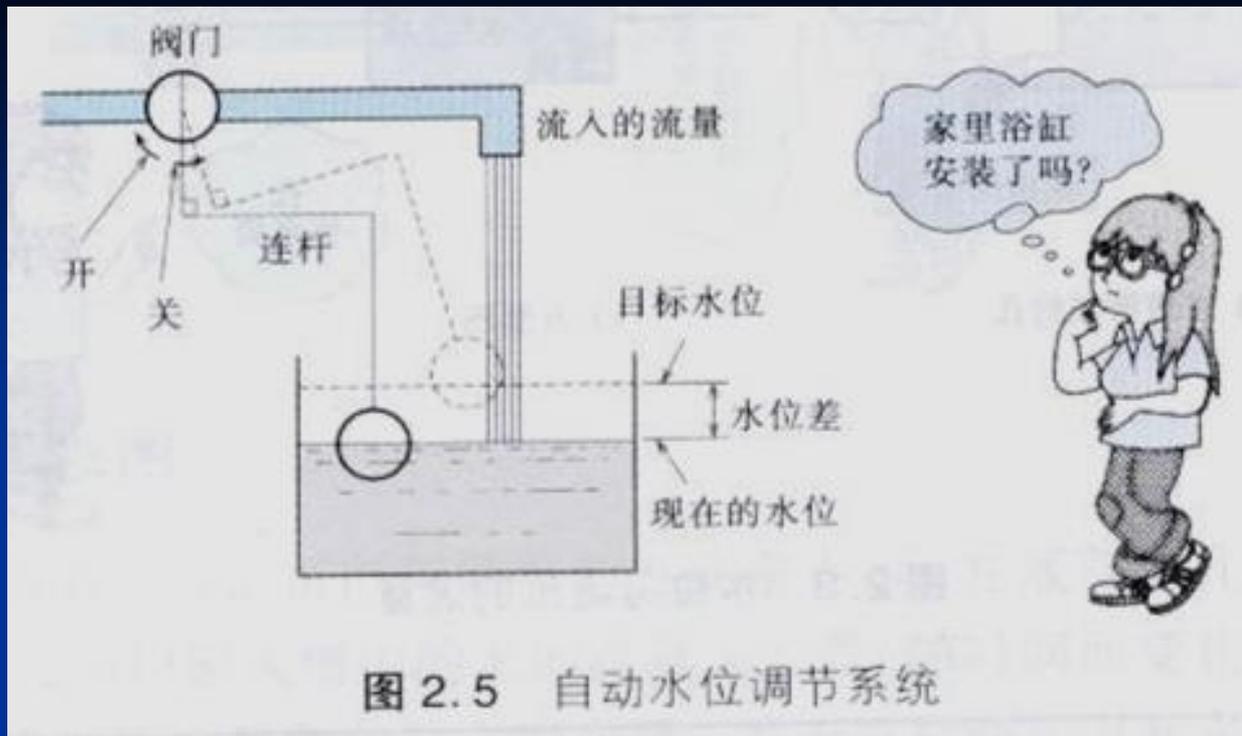
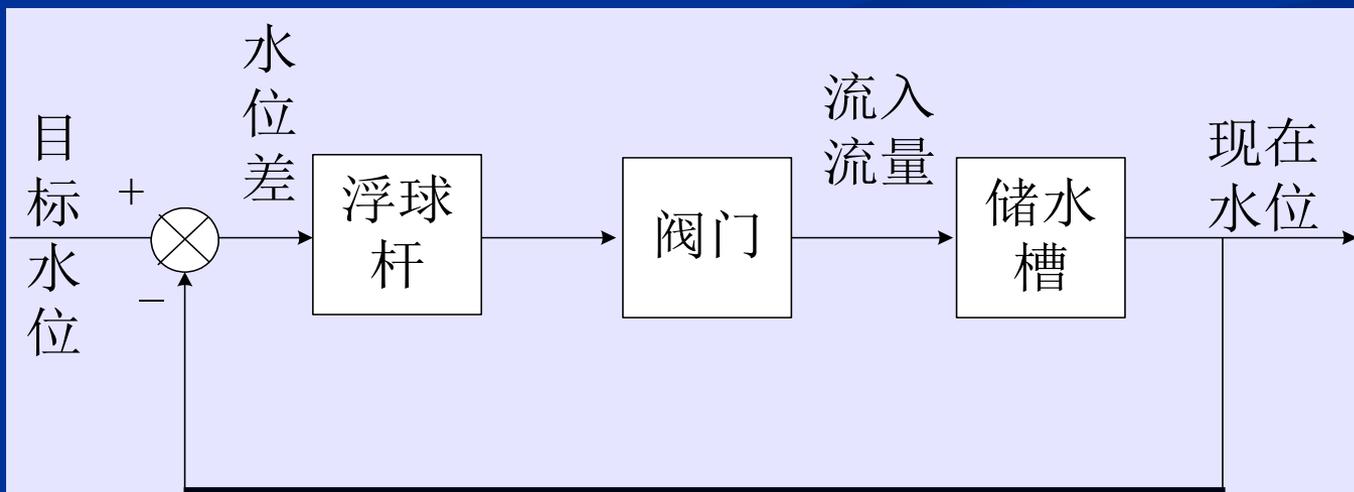
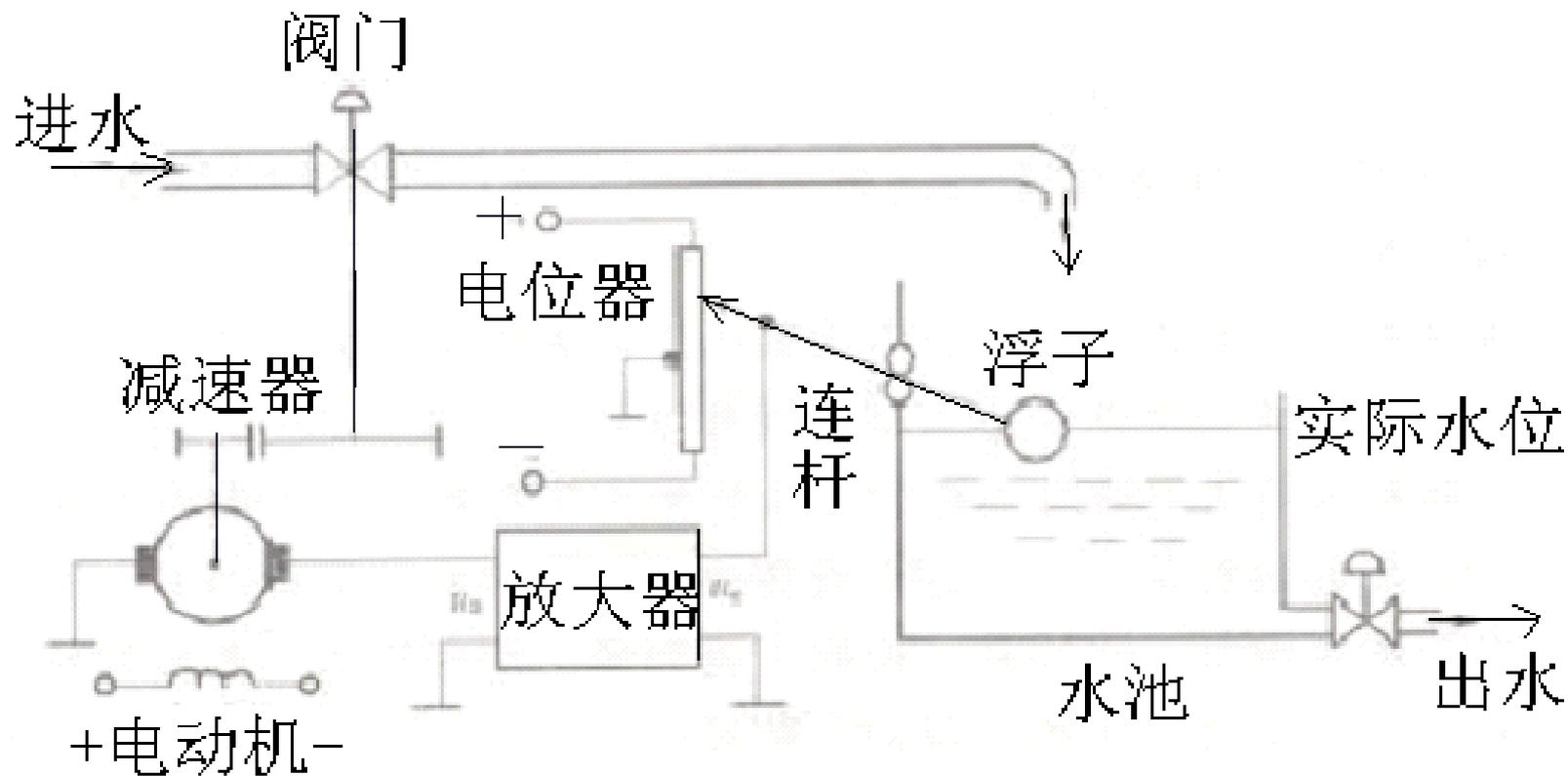


图 2.5 自动水位调节系统





较完善的水位自动控制系统

优点：控制的结果总是使实际水位的高度恒等于期望值。

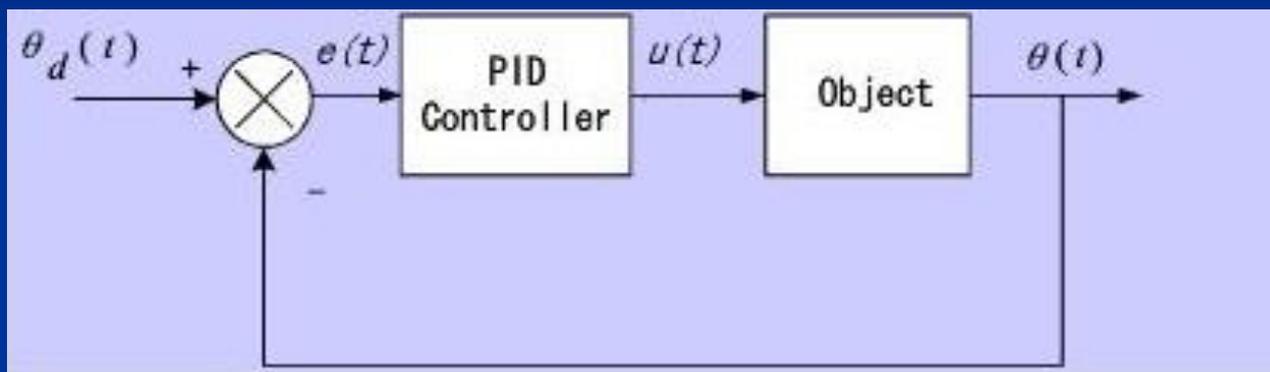
5.2.3、单关节位置与速度控制

1、PID控制

机器人系统中更多的是高度非线性及强耦合系统的控制问题。解决这些问题的新技术有：最优控制、解耦控制、自适应控制、变结构滑模控制及神经元网络控制等。

下面我们来说明一下在反馈控制中常用的PID控制。

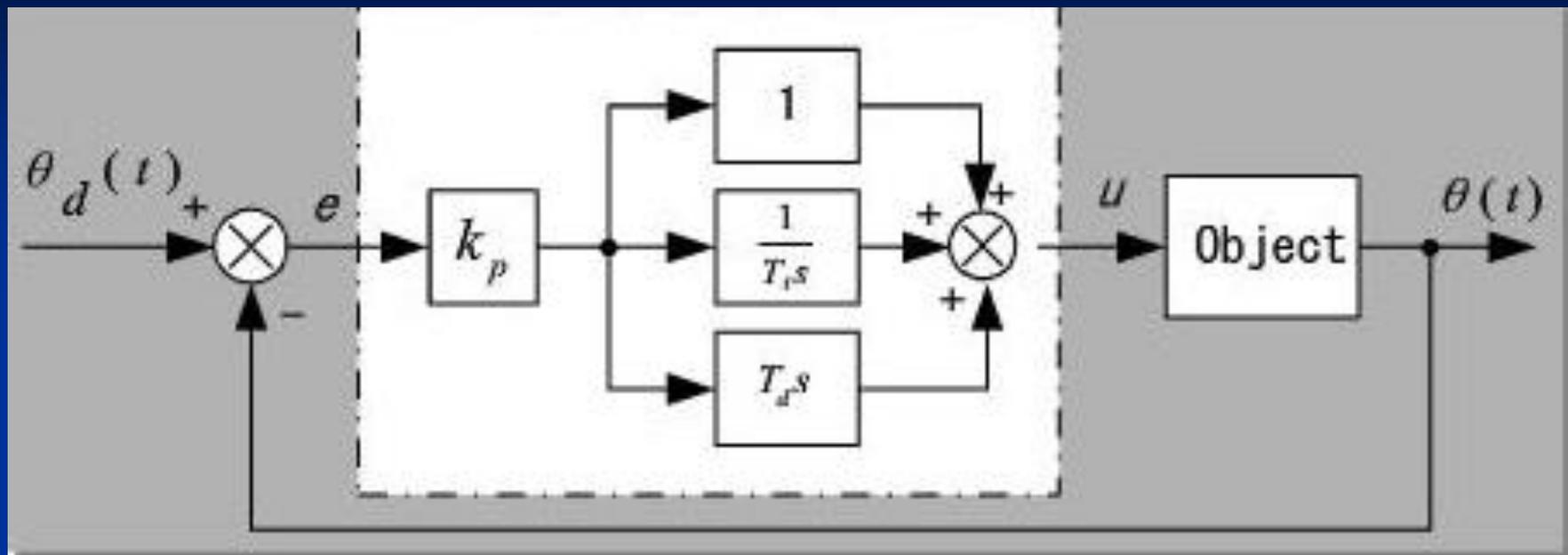
- ◆ **P-Proportional/比例**； **I-Integral/积分**； **D-Derivative/微分**
这意味着可利用偏差，偏差的积分值，偏差的微分值来控制。



操作量 $u(t)$

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (a)$$

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (b)$$



k_p, T_I, T_d 分别为比例系数, 积分时间, 微分时间

- **比例（P）调节作用：**按比例反映**当前**系统的偏差。系统一旦出现偏差，比例调节立即产生调节作用以减少偏差
- **积分（I）调节作用：**是**过去**系统误差的积累。使系统消除稳态误差，提高无差度。因为有误差，积分调节就进行，直至无差，积分调节停止，积分调节输出一常值
- **微分（D）调节作用：**反映**未来**系统偏差信号的变化率，具有预见性，能产生超前的控制作用。可以减少超调，减少调节时间，改善系统的动态性能。微分作用对噪声干扰有放大作用，因此过强的加微分调节，对系统抗干扰不利

PID控制的比例考虑的是现在的偏差值；积分考虑的是过去的偏差值；微分考虑的是未来偏差的变化量。并且以当前的误差为主，兼顾到了误差的过去与将来。



PID控制是一种经典的控制方法

PID控制的哲理--- 人生控制论

P: 就是现在的力量，要抓住现在，立足于现在

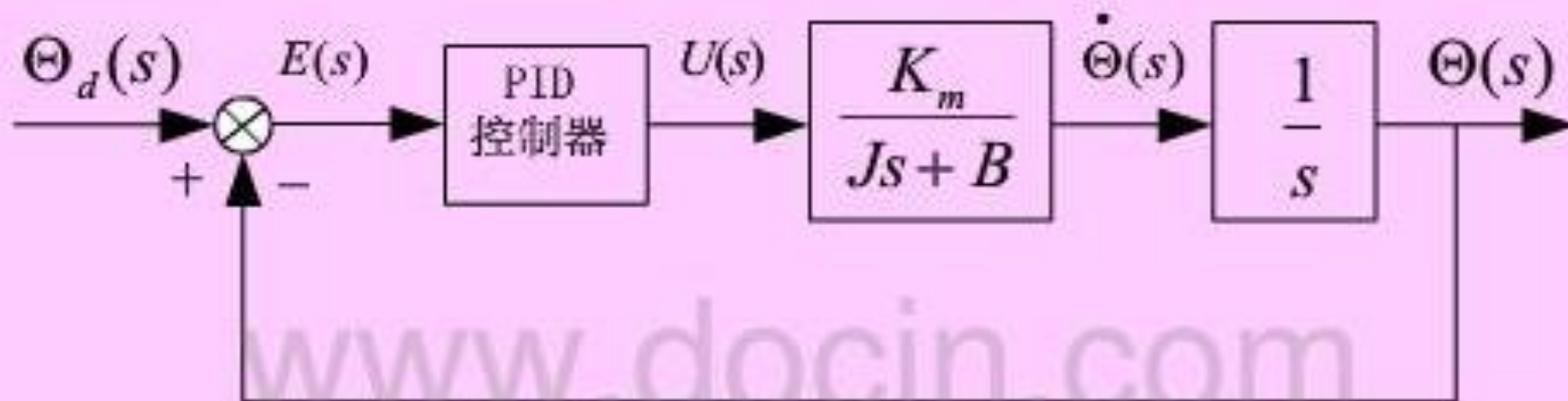
I: 表示了过去经验的积累，要不断地反思过去，从反思中取得经验

D: 是针对未来适应突变的能力，不断学习，提高自身的修养，增强对未来突变的适应能力

如果你能按PID控制人生，才能不受一些外面因素的干扰，把握好人生的方向，快速、平稳地达到追求的目标

2、机器人单关节的PID控制（闭环）

$$u(t) = K_p (\theta_d(t) - \theta(t)) + K_i \int_0^t (\theta_d(\tau) - \theta(\tau)) d\tau + K_D \left(\frac{d\theta_d(t)}{dt} - \frac{d\theta(t)}{dt} \right)$$



机器人单关节PID控制系统框图

系统的闭环传递函数为（仅有比例时）

$$\frac{\theta(s)}{\theta_d(s)} = \frac{k_p \times k_m}{s(Js + B) + k_p k_m} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_p k_m}{J}} \quad \zeta = \frac{B}{2\sqrt{k_p k_m J}}$$

二阶系统，参数均为正时，稳定，增大 k_p 和阻尼，可减少误差。但上式可以看出 k_p 增大，系统响应加快，但阻尼减少

有效方法是引入速度反馈

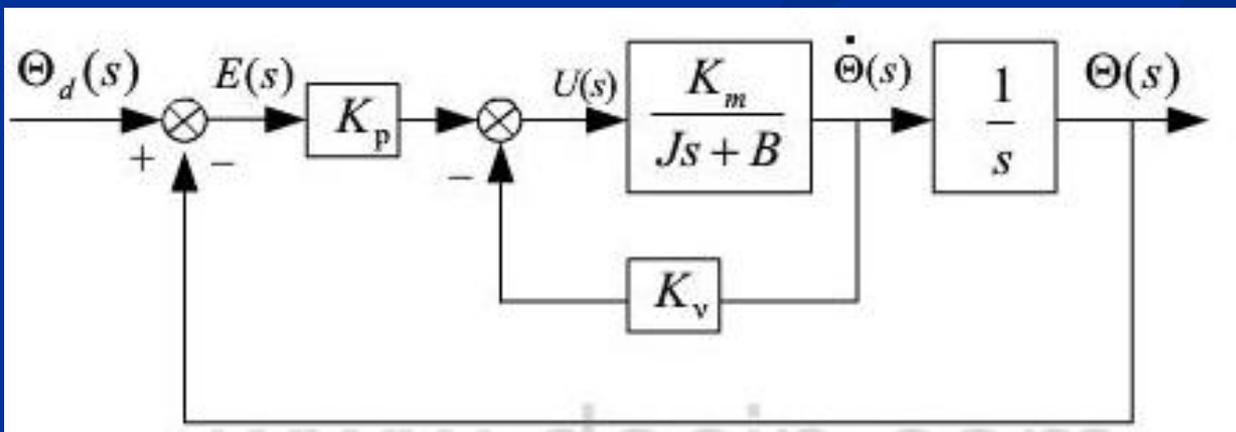
3、实用PID控制 —— PD控制

速度+位置反馈

在实际应用中，特别是机械系统中控制对象的库仑摩擦力小时，即使不用I动作也可得到非常好的控制性能。这种控制方法称为PD控制，其控制规律可表示为：

$$u(t) = K_p (\theta_d(t) - \theta(t)) - K_D \frac{d\theta(t)}{dt}$$

K_D ：速度反馈增益，通常用 K_V 表示



位置+速度反馈闭环系统框图

系统的传递函数为

$$\begin{aligned}\frac{\Theta(s)}{\Theta_d(s)} &= \frac{K_p K_m}{Js^2 + (B + K_v K_m)s + K_p K_m} \\ &= \frac{\frac{K_p K_m}{J}}{Js^2 + \frac{(B + K_v K_m)}{J}s + \frac{K_p K_m}{J}}\end{aligned}$$

引入速度
反馈后，
系统阻尼
增大

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_p k_m}{J}}$$

原来

$$\zeta = \frac{B + k_v k_m}{2\sqrt{k_p k_m J}}$$

$$\zeta = \frac{B}{2\sqrt{k_p k_m J}}$$

- 很明显：位置反馈增益变成了弹簧系数部分，即增大了系统的刚性；速度反馈增益变成了粘性摩擦系数的一部分，即增大了系统的阻尼

4、位置，速度反馈增益的选择（自学）

第五章 工业机器人的控制

5.1 机器人控制系统与控制方式

5.2 单关节机器人模型和控制

5.3 基于关节坐标的控制

5.4 基于作业空间的伺服控制

5.5 机器人末端操作器的力/力矩控制

5.6 工业机器人控制系统硬件设计

- 由于机器人各关节之间存在着惯性项和速度项的动态耦合，严格地讲每个关节都不是单输入单输出系统。
- ◆ 为了减少外部干扰的影响，在保持稳定性范围内，通常把增益 K_p 和 K_v 尽量设置的大一些，特别是当减速比较大时，惯性矩阵和粘性系数矩阵（包含 K_v ），对角线上各项数值相对增大，起支配作用，非对角线上各项的干扰影响相对减小。

□ 惯性矩阵 $M(q)$:

$$M(q) = \begin{bmatrix} n_1^2 I_{r1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & n_n^2 I_{rn} \end{bmatrix}$$

式中 n_i 为第 i 轴的减速比; I_{ri} 为第 i 轴电机转子的惯性矩

□ 粘性摩擦系数矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} n_1^2 B_{r1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & n_n^2 B_{rn} \end{bmatrix}$$

式中 B_{ri} 为第 i 轴电机转子的粘性摩擦系数

- 可以认为速度以及重力的影响相对较小，即 $h(q, \dot{q})$ 和 $G(q)$ 可以忽略不计。

机器人动力学方程式可简化为

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1^2 I_{r1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & n_n^2 I_{rn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \vdots \\ \ddot{\theta}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1^2 B_{r1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & n_n^2 B_{rn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_n \end{bmatrix}$$

上式为采用减速器的一般工业机器人的动力学方程式，表示各轴之间无干涉，与机器人的位姿无关的情况，而把这些耦合当作外部干扰来处理的。

因此，在控制器中各轴相互独立构成PID控制系统，由于近似而产生的误差看作是外部干扰可以通过反馈控制来解决。

第五章 工业机器人的控制

5.1 机器人控制系统与控制方式

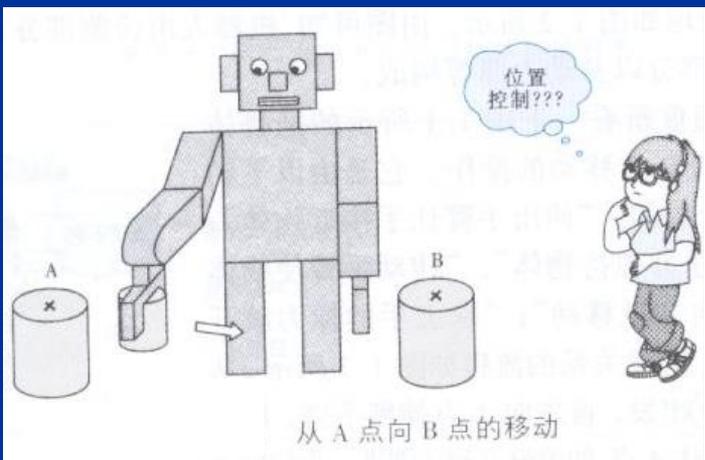
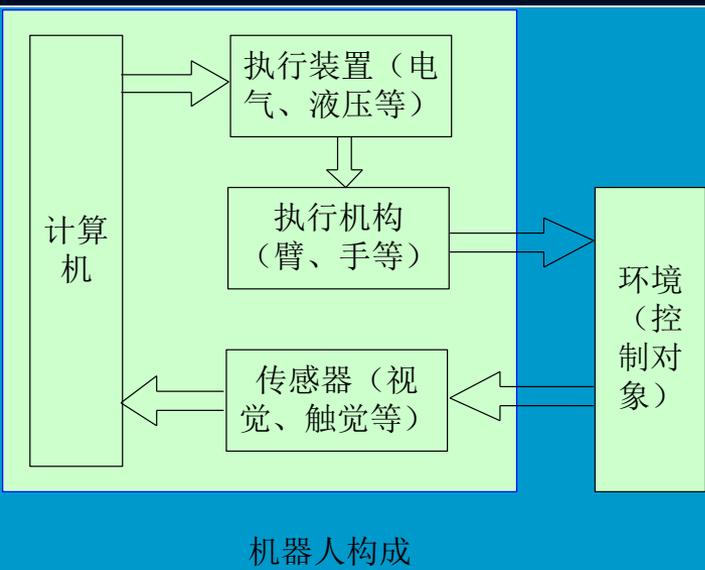
5.2 单关节机器人模型和控制

5.3 基于关节坐标的控制

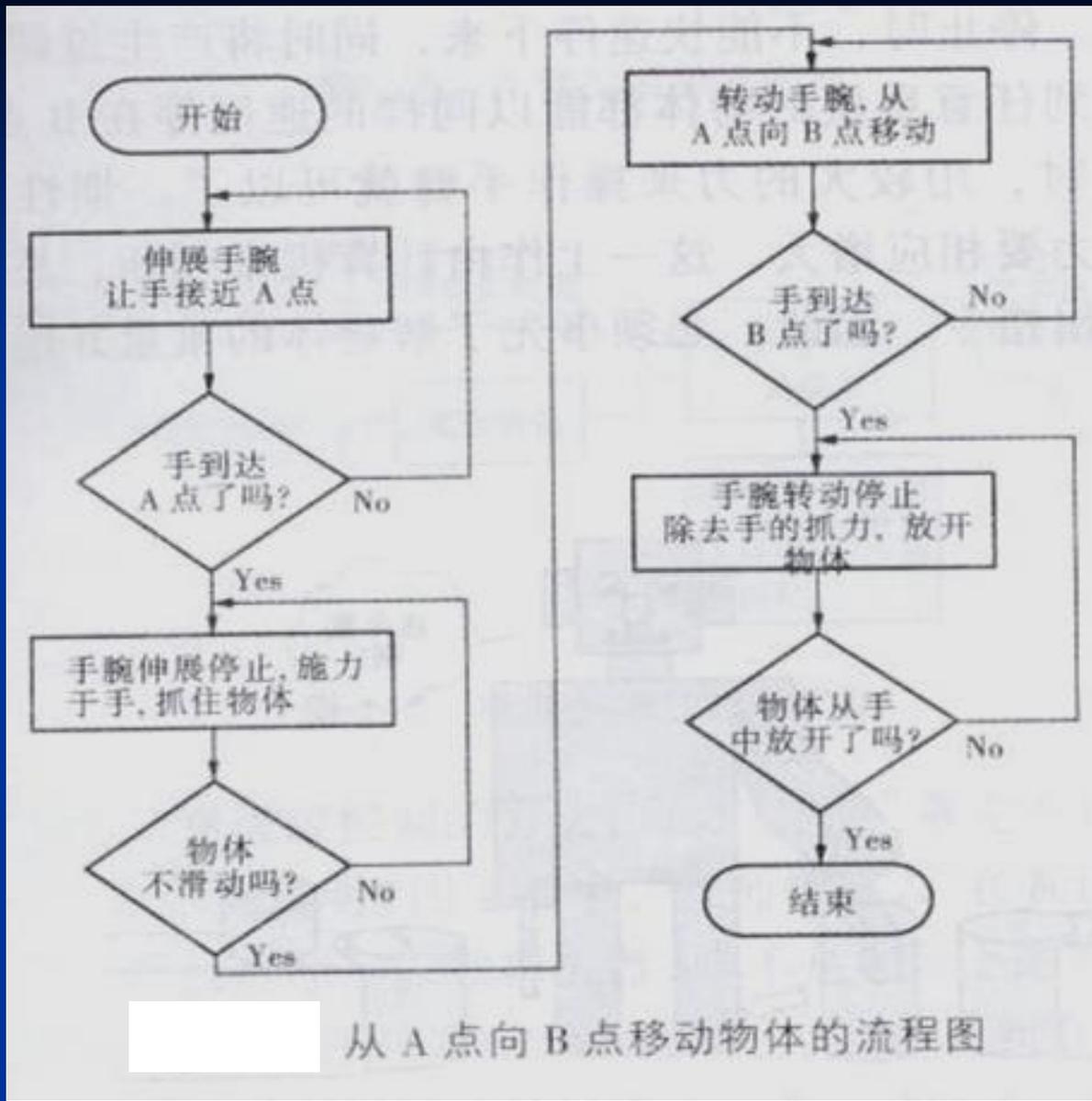
5.4 基于作业空间的伺服控制（自学）

5.5 机器人末端操作器的力/力矩控制

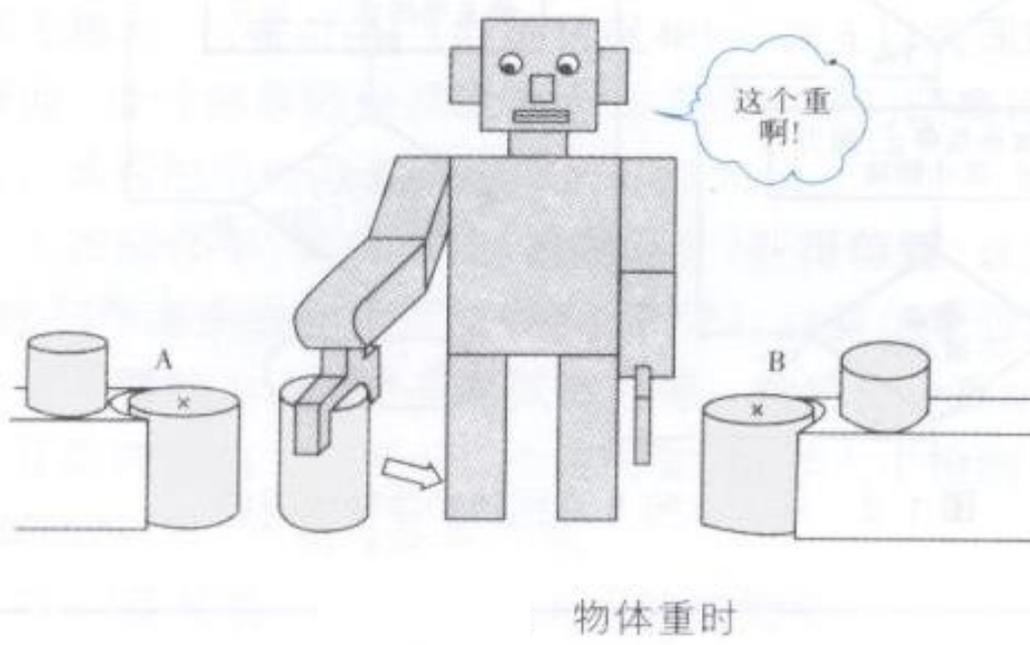
5.6 工业机器人控制系统硬件设计



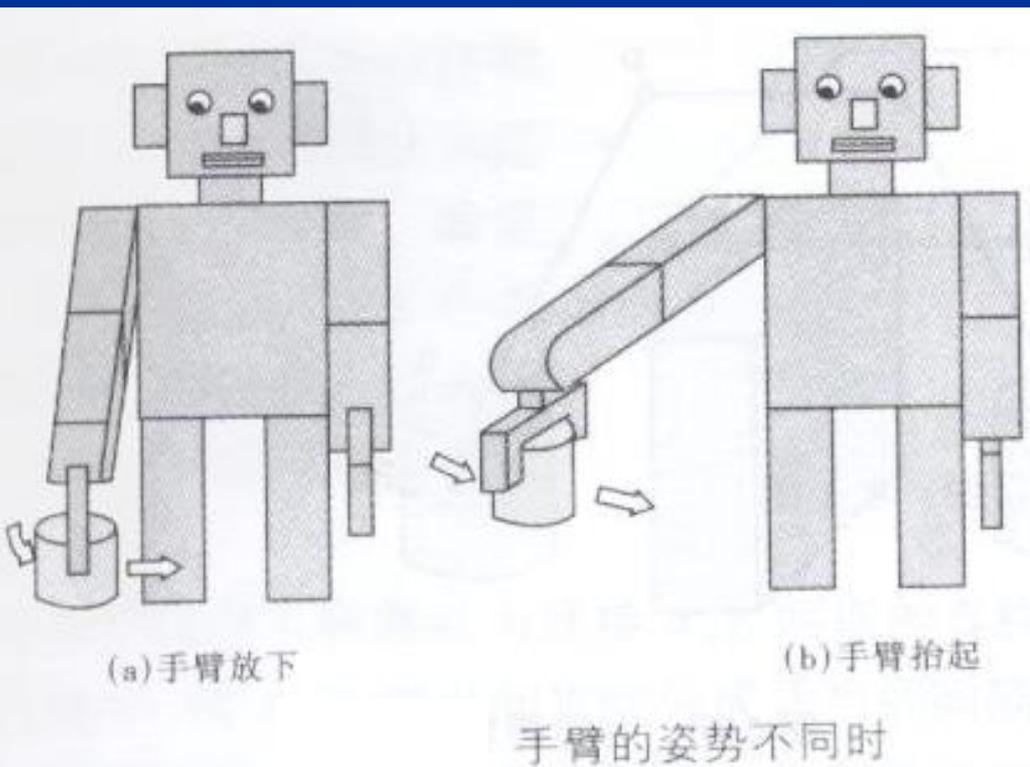
位置控制



惯性矩变化引起的驱动力变化

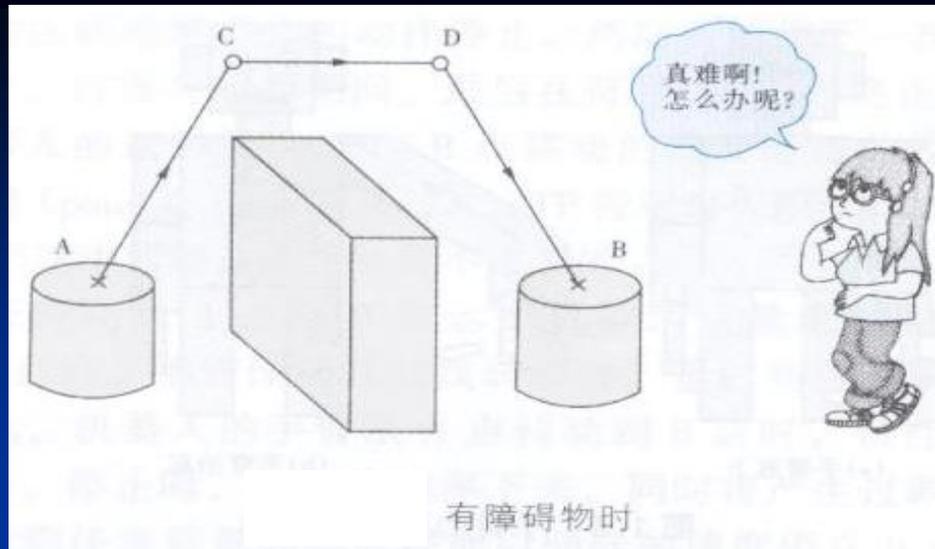


物体重时

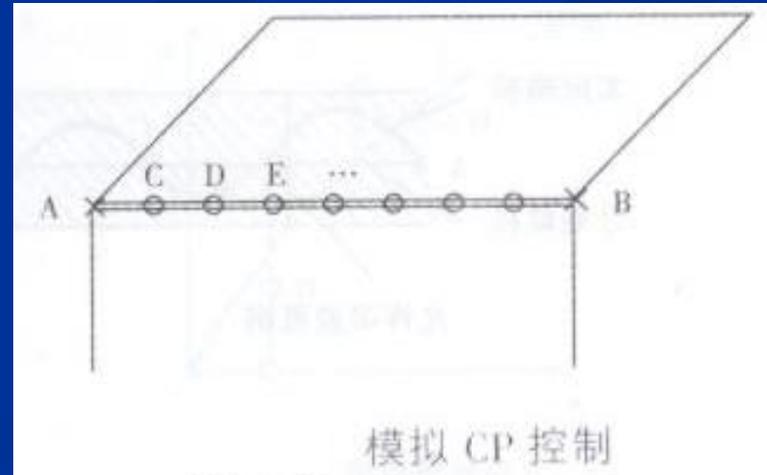
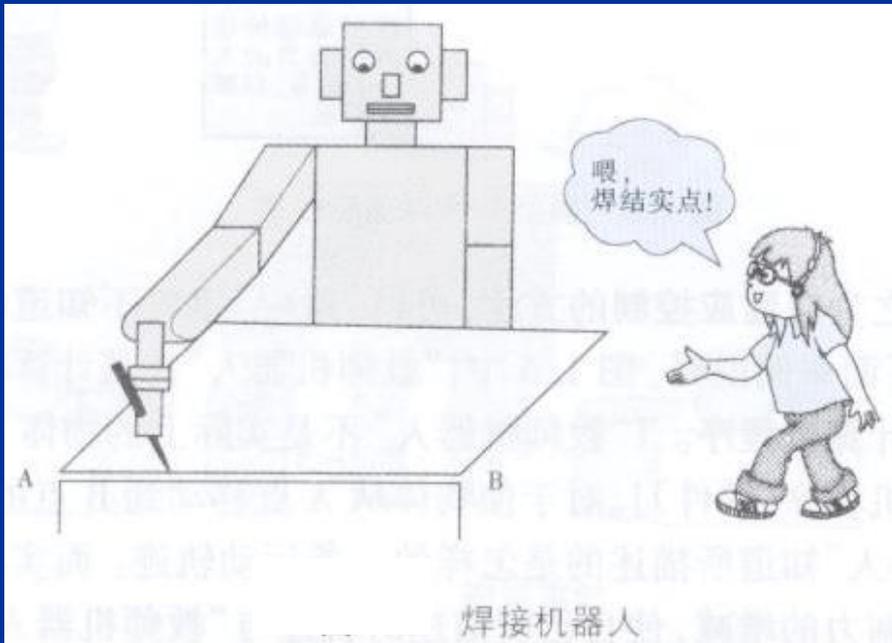


手臂的姿势不同时

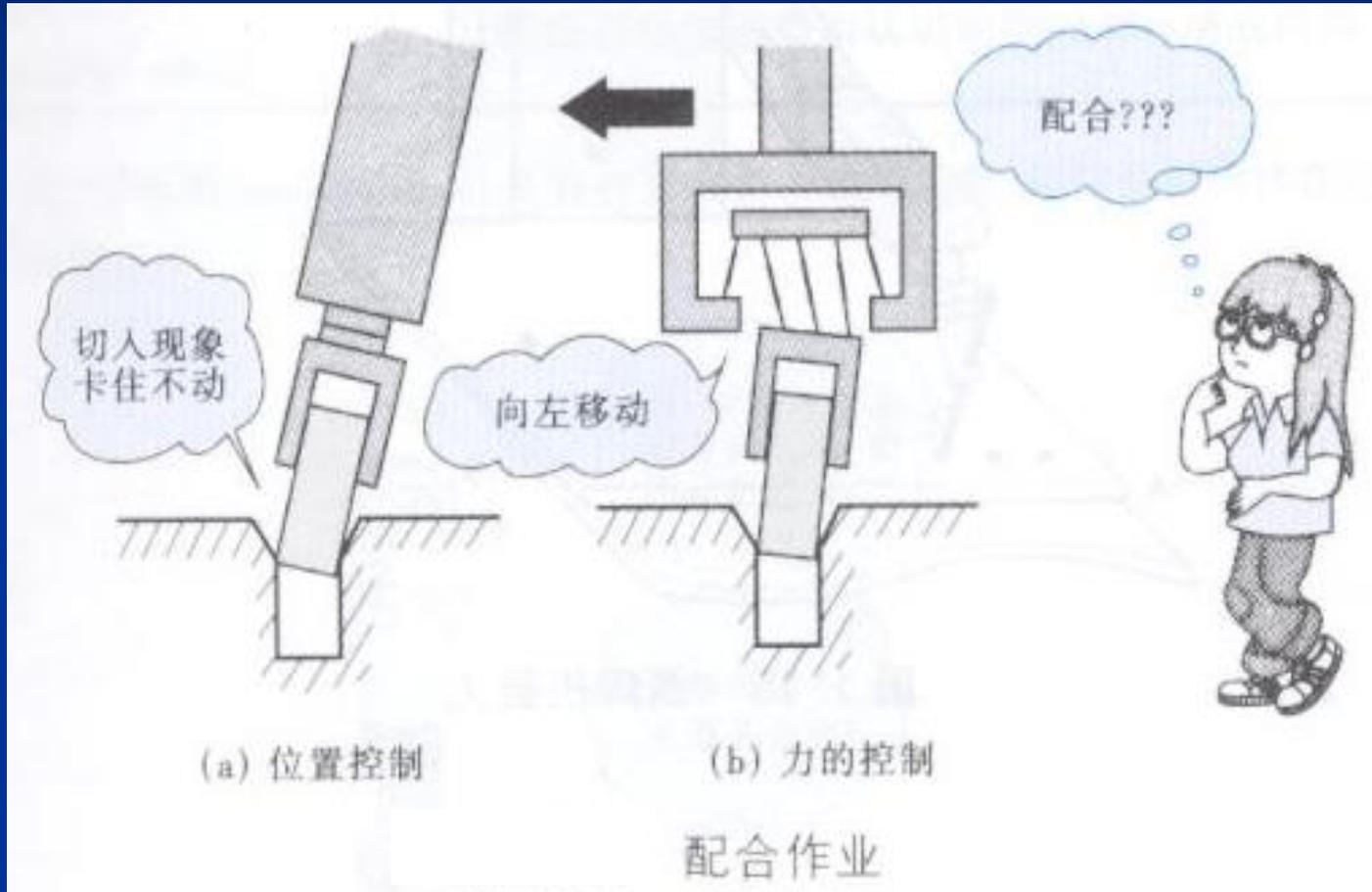
有障碍物时



路径（运动轨迹）控制



力控制



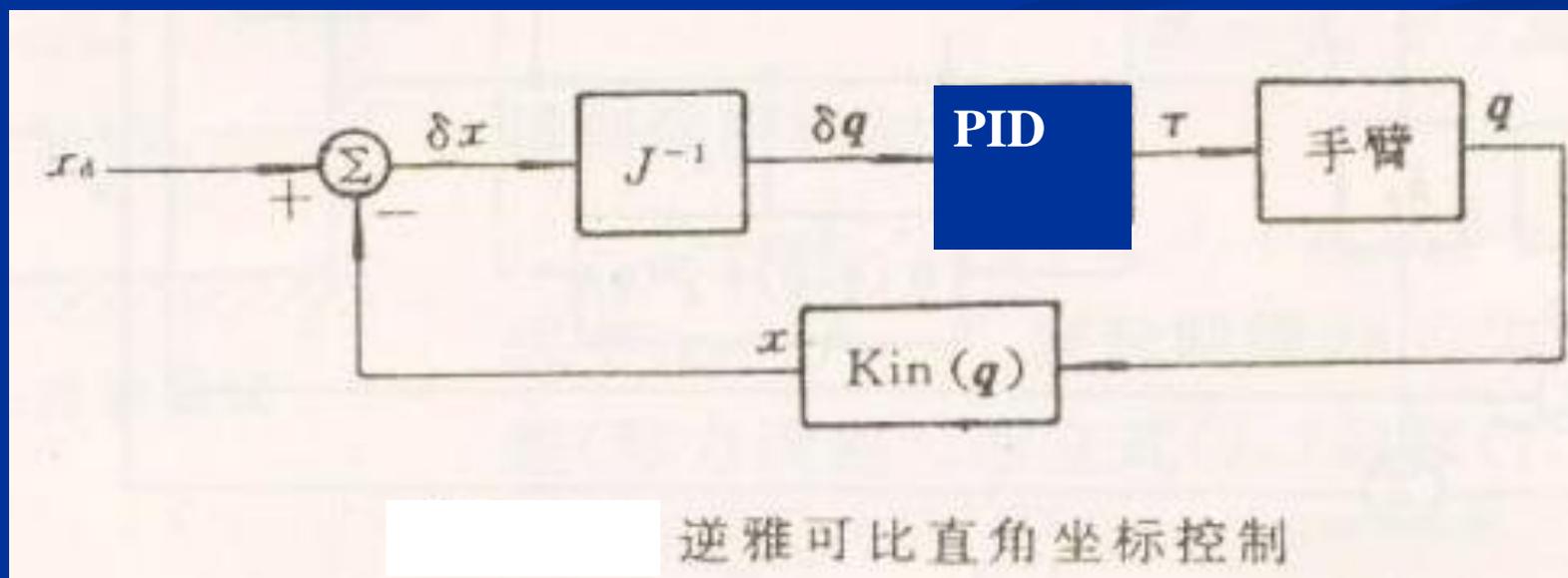
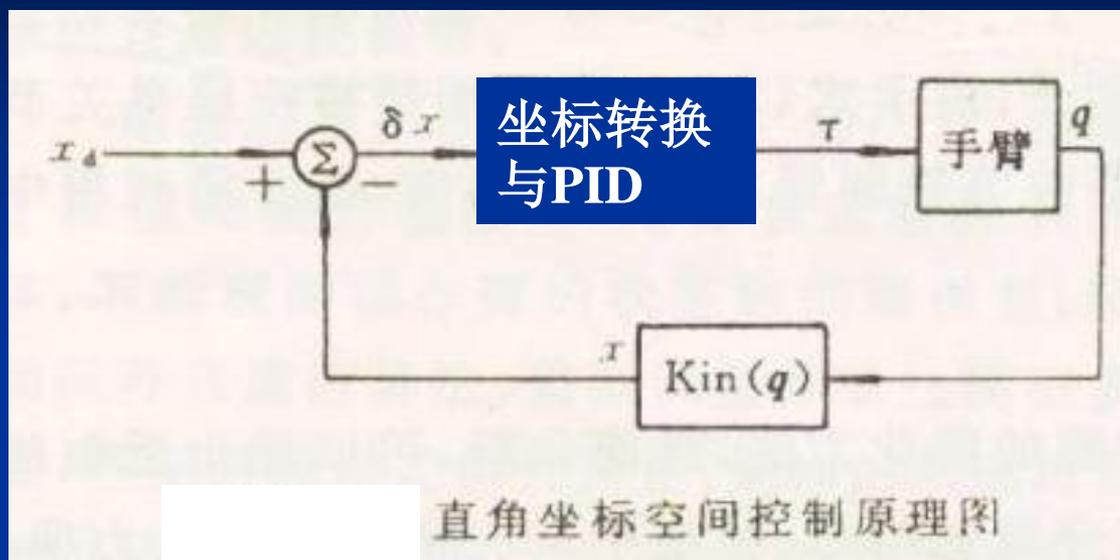
a. 手爪位置的PID控制

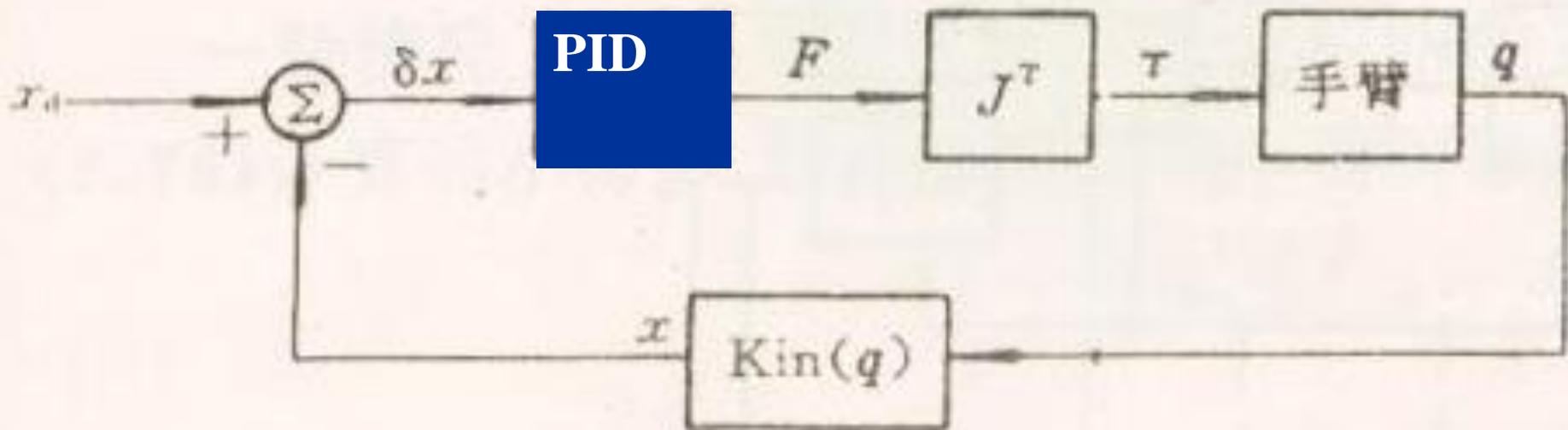
机械手爪与外界接触有两种极端状态：

一种是手爪在空间中可以自由运动，这种属于位置控制问题；

另一种是手爪与环境固接在一起，手爪完全不能自由改变位置，可在任意方向施加力和力矩，属于力控制问题。大多数是位置/力的混合控制问题。

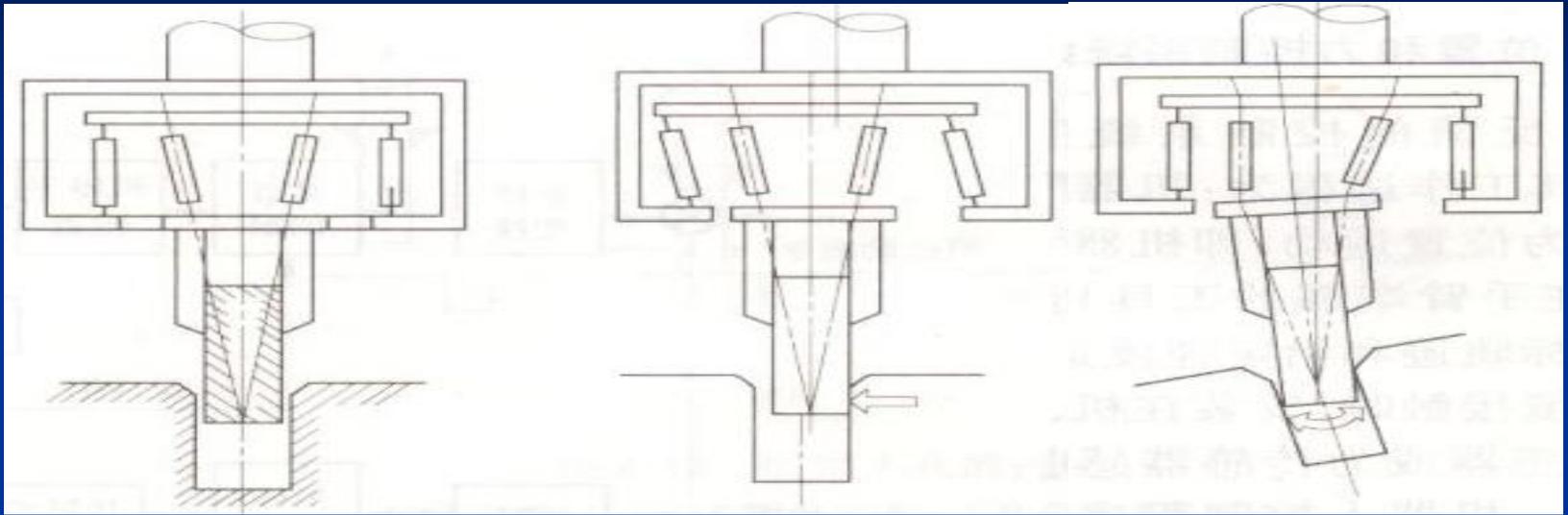
基于直角坐标的PID控制





转置雅可比直角坐标控制

c.顺应（柔顺）控制



顺应控制（柔顺控制）本质上也是力与位置混合控制。分为两类：**被动顺应控制**和**主动顺应控制**。**被动柔顺控制**手腕响应速度快，但它的设计针对性强，通用性不强。**主动顺应控制**使用灵活、通用性强，但对传感器的要求较高。

➤近年来又出现了主动和被动相结合的方法。

第五章 工业机器人的控制

5.1 机器人控制系统与控制方式

5.2 单关节机器人模型和控制

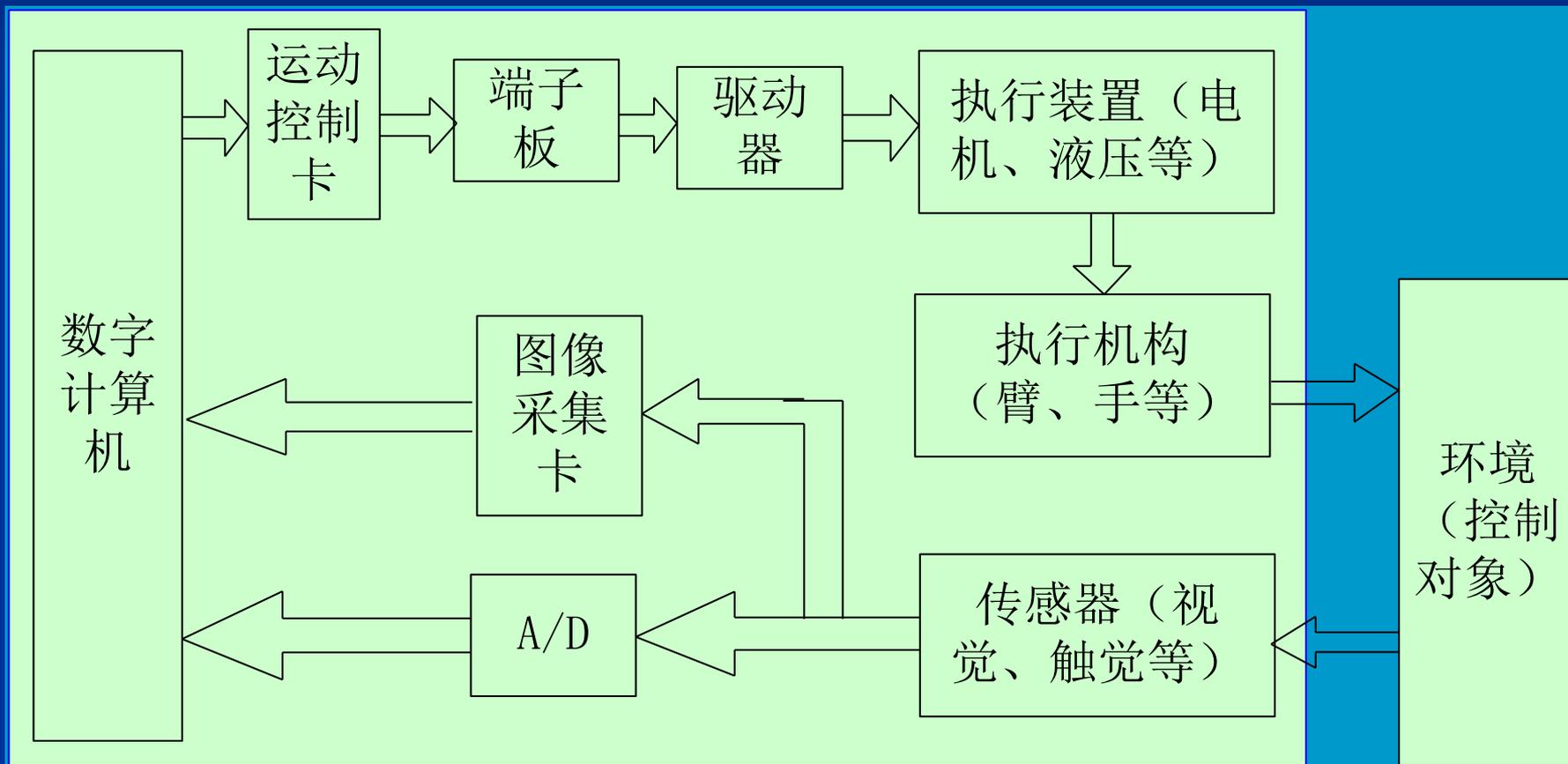
5.3 基于关节坐标的控制

5.4 基于作业空间的伺服控制

5.5 机器人末端操作器的力/力矩控制

5.6 工业机器人控制系统硬件设计

数字控制系统（硬件）



作业

5-2

补充：PID控制器由几部分组成的，
分别叙述每部分的作用。