

机器人学 讲义

授课时间	第 12 周 第 12 节	课次	2
授课方式 (请打√)	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时 安排	2
授课题目（教学章、节或主题）： 第 5 章 工业机器人控制 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			
主要教学方法 与手段	教学方法：启发式教学、实例引导法教学 教学手段：板书+多媒体		
本课次教学目的、要求（分掌握、熟悉、了解三个层次）： 1、掌握机器人控制系统特点及分类；机器人几种典型的控制方式 2、了解单关节系统的数学模型和单关节位置与速度控制			
教学重点及难点： 重点：机器人控制系统特点与分类；工业机器人控制方式 难点：单关节机器人模型和控制			
教学基本内容及过程			
5.1 机器人控制系统与控制方式			
一、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。 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、 机器人控制系统与控制方式			
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) 机器人控制系统本质上是一个非线性系统。 (2) 机器人控制系统是由多关节组成的一个多变量控制系统，且各关节间具有耦合作用。 (3) 机器人控制系统是一个时变系统，其动力学参数随着关节运动位置的变化而变化。			
总而言之，机器人控制系统是一个时变的，耦合的，非线性的多变量控制系统。			

5.1.2 机器人控制方式

1、机器人控制方式分类

- (1) 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
- (2) 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
- (3) 按轨迹控制的方式，分为点位控制和连续轨迹控制
- (4) 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
- (5) 按运动控制的方式，分为位置控制、速度控制、力（力矩）控制
- (6) 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

2、点位控制和连续轨迹控制

(1) 点位控制

概念：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。

主要技术指标：定位精度和运动所需的时间。

应用场合：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

概念：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。

主要技术指标：机器人手部位姿的轨迹跟踪精度及平稳性。

应用场合：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。

1、力（力矩）控制方式

(1) 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。

(2) 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。

2、智能控制方式

(1) 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。

(2) 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习能力。

(3) 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。

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。

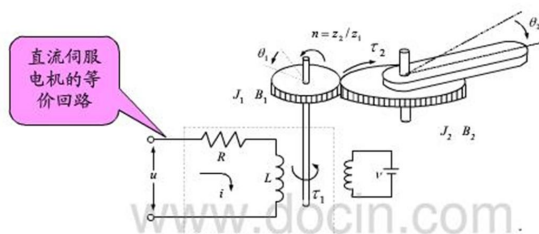
5.2 单关节机器人模型和控制

课程引入：

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：

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。

5.2.1、单关节系统的数学模型



直流伺服电动机驱动机器人关节的简化模型

经过一系列推导得到单关节控制系统所加电压与关节角位移之间的传递函数：

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

5.2.2 阻抗匹配

阻抗匹配的概念：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。

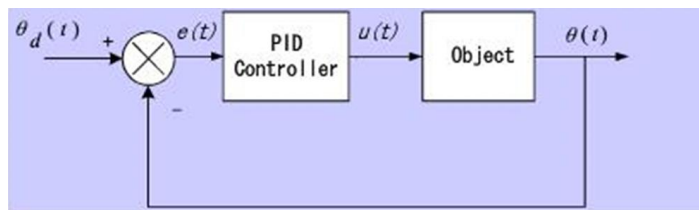
- 1、电机的惯性矩与负载的惯性矩相等，就会使执行装置达到最大的驱动能力。
- 2、适当选择减速器的传动比，使执行装置的惯性矩与负载惯性矩一致。对于其它传动机构，采用不同的惯性矩变换系数也能得到同样的效果。

5.2.3 单关节位置与速度控制

1、PID 控制

引入：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网络控制等。下面来说明在反馈控制中常用的PID控制。

(1) 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。



(1) 各部分作用：

比例（P）调节作用：按比例反映当前系统的偏差。系统一旦出现了偏差，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。

1、机器人单关节的PID控制

操作量：

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

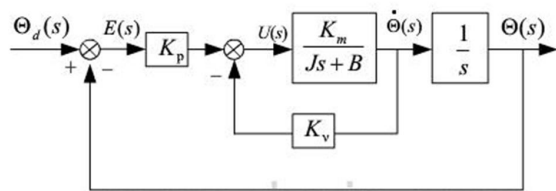
机器人单关节PID控制系统框图：

3、实用 PID 控制 — PD 控制

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：

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

位置+速度反馈闭环系统框图



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、速度反馈增益的确定

作业和思考题：

P130 5-1 ; 5-2

课后小结：

机器人控制系统的特点；

机器人控制方式的分类；

点位控制和连续轨迹控制的概念及应用场合；

单关节系统的数学模型及单关节位置与速度控制（PID 控制）

机器人学 讲义

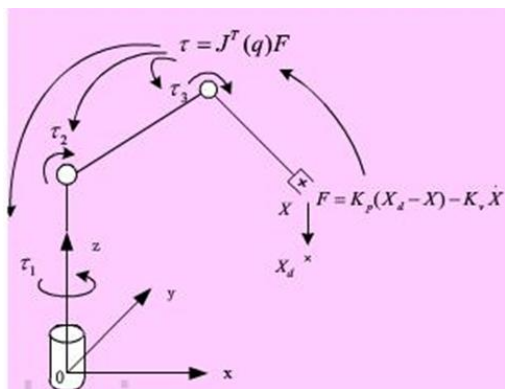
授课时间	第 13 周 第 13 节	课次	2
授课方式 (请打√)	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时 安排	2
授课题目（教学章、节或主题）： 第 5 章 工业机器人控制 5.3 基于关节坐标的控制 5.4 基于作业空间的伺服控制 5.5 机器人末端操作器的力/力矩控制 5.6 工业机器人控制系统硬件设计			
主要教学方法 与手段	教学方法：启发式教学、实例引导法教学 教学手段：板书+多媒体		
本课次教学目的、要求（分掌握、熟悉、了解三个层次）： 1、了解工业机器人控制方法 2、了解工业机器人控制系统的硬件构成			
教学重点及难点： 重点：工业机器人控制方法和控制系统的硬件构成 难点：工业机器人控制方法			
教学基本内容及过程			
<h2 style="margin: 0;">5.3 基于关节坐标的控制</h2> <p style="margin: 0;">基于关节坐标的伺服控制系统，把每一个关节作为单纯的单输入、单输出系统来处理，所以结构简单，现在的工业机器人大部分都是由这种关节伺服系统控制的。这种控制方式称为局部线性 PD 反馈控制，对非线性多变量的机器人动态性而言，该控制方法是有效的。对工业机器人而言，多数情况下用该种控制方法已足够。</p>			
图 基于关节坐标的伺服控制系统框图			

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。这种伺服系统实际上是一个半闭环控制系统，如上图所示。对于直角坐标采用开环控制方式，原因是目前尚无有效、准确获取检测机器人末端操作器位姿的手段。

5.4 基于作业空间的伺服控制

由于在很多情况下，末端位姿矢量 X_d 是用固定于空间内的某一个作用坐标系来描述的，所以把以 X_d 为目标值的伺服系统统称为作业坐标伺服系统。

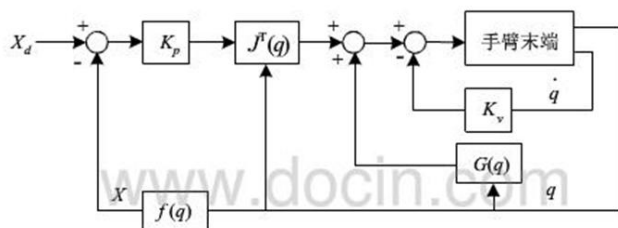
基于作业空间的伺服系统控制原理如下图所示：



基于作业空间伺服控制的思路是：

先将末端位姿误差矢量乘以相应的增益，得到手臂末端手爪的操作力矢量，该力作用在末端手爪上以减小末端位姿误差；再将末端手爪的操作力矢量由雅可比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，减小运动误差。

基于作业坐标的伺服控制系统框图，如下图所示：



5.5 机器人末端操作器的力/力矩控制

课程引入

对于焊接、喷漆等工作，机器人末端操作器在运动过程中不与外界物体相接触，只需实现位置控制就够了；而对于切削、磨光、装配作业，仅靠位置控制难以完成工作任务，还必须控制机器人与操作对象间的作用力，以顺应接触约束。采用力控制，可以使机器人在具有不确定性的约束环境下实现与该环境相适应的运

动，从而胜任更复杂的操作任务。

比较常用的机器人力控制方法有阻抗控制、位置/力混合控制、柔顺控制和刚度控制四种。

5.5.1 阻抗控制

用质量-阻尼-弹簧模型来表示末端操作器与环境之间的作用，对该系统实施力控制的方法称为阻抗控制。阻抗控制模型是用目标阻抗代替实际机器人的动力学模型，当机器人末端位置和理想的轨迹存在偏差时，机器人在其末端产生相应的阻抗力 F 。

5.5.2 位置与力的混合控制

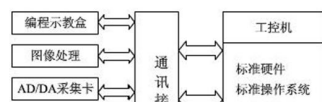
位置与力的混合控制是指机器人末端的某个方向因环境关系受到约束时，同时进行不受约束方向的位置控制和受约束方向的力控制的控制方法。

5.6 工业机器人控制系统硬件设计

5.6.1 单关节伺服控制系统

5.6.2 工业机器人控制系统的硬件构成

开放式机器人控制系统如下图所示：



开放式机器人控制系统

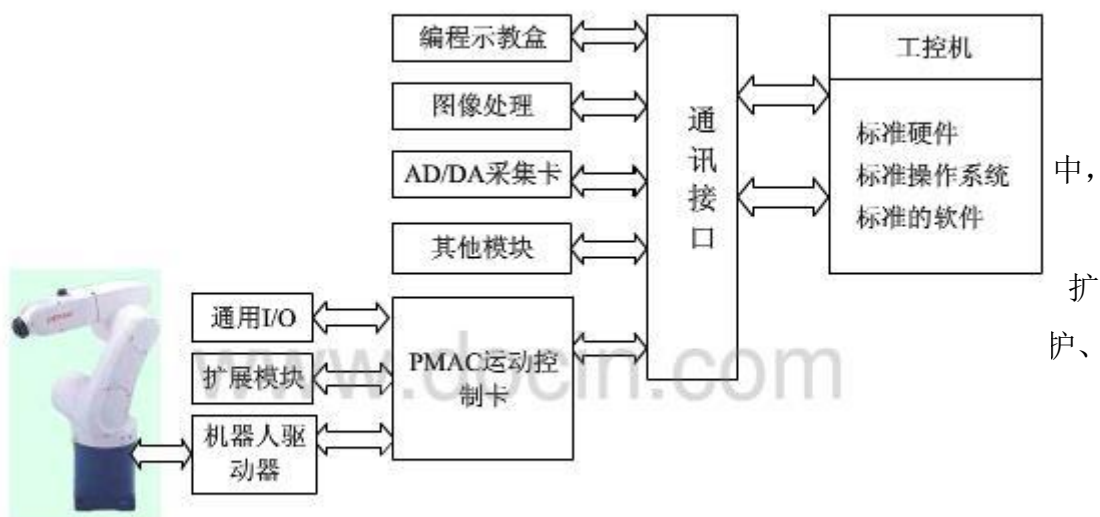


图 开放式机器人控制系统结构

作业和思考题：

机器人在什么场合中要实施力-位置控制？

课后小结：

基于关节坐标控制，基于作业空间的伺服控制，机器人末端操作器的力/力矩控制的基本原理及应用场合；

工业机器人控制系统的硬件构成。