

《机器人导论》期末复习

CC98：梁毅浩

一、绪论

工业机器人的定义

机器人是一种能够进行编程并在自动控制下执行某些操作和移动作业任务的机械装置

机器人是一种自动的、位置可控的、具有编程能力的多功能机械手，这种机械手具有几个轴，能够借助可编程序操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置，以执行种种任务

服务机器人的定义

指除从事工业生产以外的一大类半自主或全自主工作的机器人，能完成有益于人类的服务工作。

- 在特殊环境下作业的机器人
- 服务于人的机器人

机器人的本质

机器人是一种人造的机器

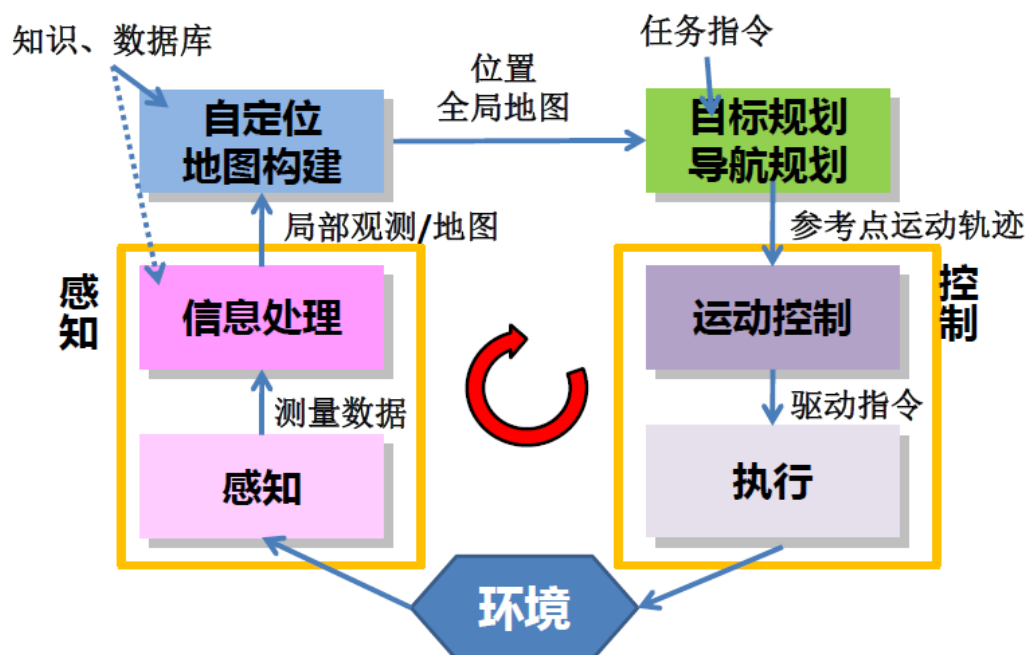
机器人具有人类的特性：体能，智能

- 体能：依赖电荷、驱动和传动维持机器的运转
- 智能：依赖传感器和电子线路实现控制反馈过程

机器人的核心技术

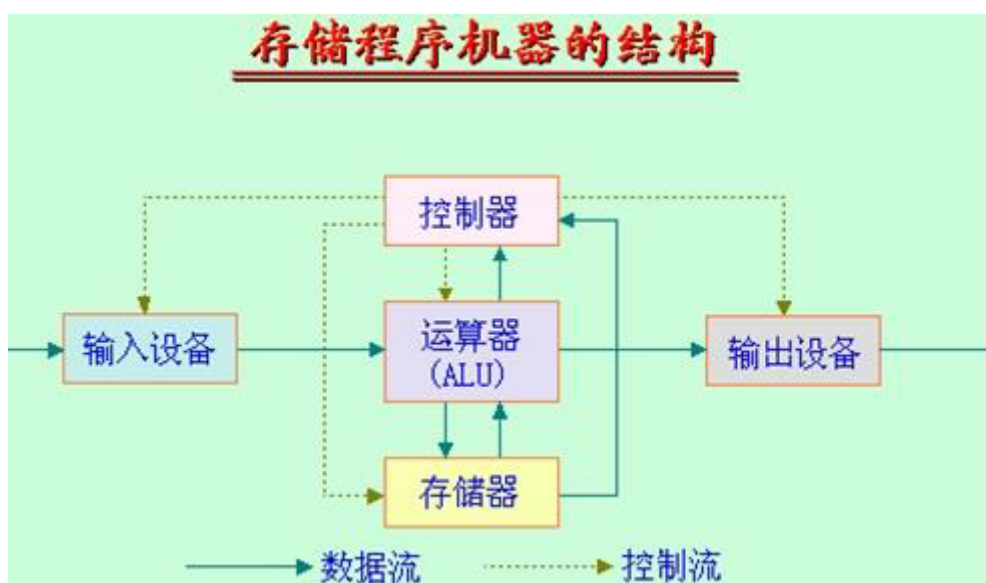
- 机器人的肌肉——驱动
- 机器人的骨骼——机构
- 机器人的运动——建模及控制
- 机器人的感官——传感器
- 机器人的知觉——识别理解
- 机器人的作业——决策规划
- 机器人的协作——多智能体

自主移动机器人的一般架构



二、微控制器

冯·诺依曼计算机结构



三、机器人传感器

传感器定义

用于 **定量** 感知环境 **特定物质属性** 的 **电子、机械、化学设备**，并能够把各种物理量和化学量等 **精确** 地变换为 **电信号**，再经由电子电路或计算机进行分析与处理，从而对这些量进行检测。

内部传感器

测量机器人自身状态，常用于底层运动控制

传感器	检测功能
电位器、旋转变压器、码盘	位移、角度
测速发电机、码盘	速度、角速度
加速度传感器	加速度
倾斜仪	倾斜角度
陀螺仪	方位角
力/力矩传感器	力/力矩

外部传感器

测量机器人所处环境，用于底层运动控制和上层运动规划

传感器	感知内容	传感器	感知内容
视觉	环境图像	嗅觉	气味
触觉、滑动觉	物体存在检测、尺寸、形状、材质、硬度、光滑	听觉	声音
接近觉	障碍检测、距离	味觉	味道
热觉	温度	力觉	力、力矩

传感器的特性

静态特性

指检测系统的输入为不随时间变化的恒定信号时，系统的输出与输入之间的关系

基本要求：输出相对于输入保持一定的对应关系

主要静态特性：

- 灵敏度：对输入信号变化的响应敏感度
- 信噪比（S/N）：传感器输出信号中信号分量与噪声分量的平方平均值之比
- 线性：输入与输出量之间为线性比例关系
- 稳定性：输入量恒定，输出量向一个方向偏移（温漂 零漂）
- 精度：**准确度**：测量值对真值的偏离程度；**精密度**：测量相同对象，每次测量会得到不同测量值

动态特性（响应特性）

指检测系统的输入为随时间变化的信号时，系统的输出与输入之间的关系

- 瞬态响应特性
- 频率响应特性

传感器的选择

- 测量条件
- 传感器的性能
- 成本、尺寸、重量
- 使用条件

陀螺仪

角速度测量仪器

机械陀螺仪

物体高速旋转时，角动量很大，旋转轴会一直稳定指向一个方向，定向仪器

- 旋转轮的角动量使陀螺仪的轴保持惯性稳定
- 外枢轴力矩无法传送到轮轴上，因此转轴是空间稳定的

光纤陀螺仪

- 塞格尼克理论：光束的速度保持不变。当光束在一个环形的通道中前进时，如果环形通道本身具有一个转动速度，那么光束沿着通道转动的方向前进所需要的时间要比沿着这个通道转动相反的方向前进所需要的时间多。
- 光干涉原理：在闭合光路中，由同一光源发出沿顺时针方向和逆时针方向的两束光，利用检测相位差或者干涉条纹的变化测出闭合光路旋转角速度。

MEMS陀螺仪

利用科里奥利力（旋转物体在径向运动时所受到的切向力），旋转中的陀螺仪可对各种形式的直线运动产生反映，通过记录陀螺仪部件受到的科里奥利力可以进行运动的测量与控制。

通常安装有两个方向的可移动电容板，“径向的电容板加震荡电压迫使物体作径向运动，横向的电容板测量由于横向科里奥利运动带来的电容变化。”这样，MEMS陀螺仪内的“陀螺物体”在驱动下就会不停地来回做径向运动或震荡，从而模拟出科里奥利力不停地在横向来回变化的运动，并可在横向作与驱动力差90°的微小震荡。

由电容的变化可以计算出MEMS陀螺仪的角速度。

电机驱动部分通过静电驱动方法，使机械元件前后**振荡**，产生谐振，利用科里奥利力把**角速率转换成一个特定感应结构的位移**，两个正在运动的质点向相反方向做连续运动。只要从外部施加一个角速率，就会出现一个力，力的方向垂直于质点的运动方向。

优点：

- 体积小，重量轻
- 低成本
- 高可靠性：内部无转动部件，全固态装置，抗大过载冲击，工作寿命长。
- 低功耗
- 大量程
- 易于数字化、智能化

力觉传感器

- **压阻式**：半导体压阻效应：当对一块半导体在某一方向上施加应力时，其电阻率会产生一定的变化，这种 **导体电阻率变化和应力之间的相互关系**
- **压电式**：压电效应：对某些特殊晶体进行挤压或拉伸时，晶体两端会产生不同的电荷，其 **电压与压力存在对应关系**
- **电容式**：电容机理：电容量由电极面积和两个电极间的距离决定。当硅膜片两边存在压力差时产生形变，电容器极板间距发生变化，从而引起电容量的变化。因此，电容变化量与压差有关

力矩传感器

当力矩作用在弹性轴上，轴会产生扭曲变形，存在剪切应变和应力

四、机器人驱动

电机驱动

最常用、最普遍

- 优点：控制调节简单、稳定性较好。
 - 缺点：力矩小、刚度低，常常需要配合减速器使用。
-
- 直流电机：可以输出力矩和速度，如小车的直线运动、转弯等。需要驱动芯片以及控制方式。
 - 舵机：用于角度、位置伺服，如机械手转动；PWM波（占空比可变的方波）控制。

模拟舵机

标准舵机有三条控制线，分别为**电源线、地线和控制线**。控制线连接到控制芯片上。

舵机转动角度由 PWM（脉冲宽度调制）信号的占空比来实现：

0.5ms=90°

1.5ms = 0°

2.5ms= 90°

有刷直流电机

由 **磁极、电枢绕组、电刷和换向片** 组成。

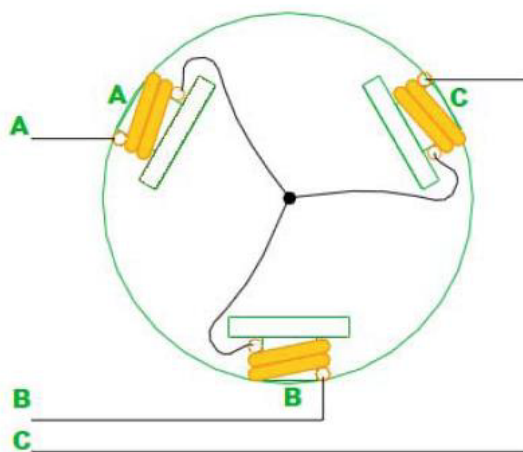
- 磁极在工作中固定不动，称为 **定子**（用于产生磁场）
- 电枢绕组是转动部分，称为 **转子**

无刷直流电机

由 **电机本体、位置传感器、电子换向电路** 组成。

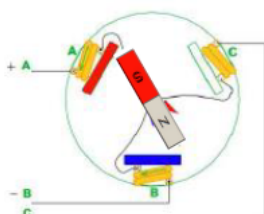
电机主体由主定子、主转子组成。**主转子是永久磁铁，主定子是电枢**。当定子绕组通直流电时，与转子作用产生电磁转矩，定子电流必须根据转子的位置变化适时换向，才能获得单一方向的电磁转矩，使电机转动。

绕组有星形联结方式和三角联结方式，三相星形联结（Y型）的二二导通方式最为常见。

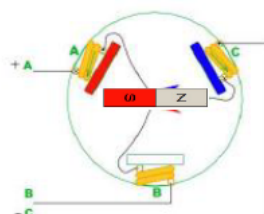


整个电机引出三根线A, B, C。当它们之间两两通电时，有 6 种情况，分别是 AB, AC, BC, BA, CA, CB。注意：换相只与转子位置有关，与速度无关。

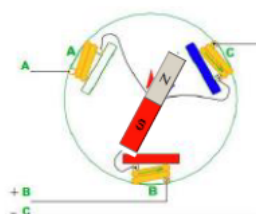
红色和蓝色分别表示磁感应强度的方向



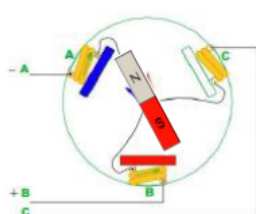
(a) AB 相通电情形



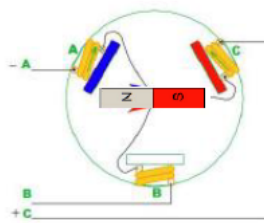
(b) AC 相通电情形



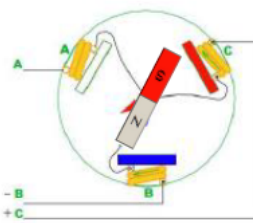
(c) BC 相通电情形



(d) BA 相通电情形



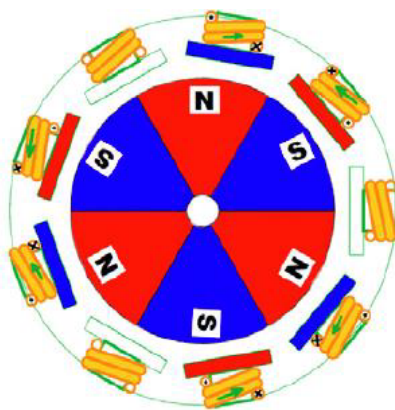
(e) CA 相通电情形



(f) CB 相通电情形

电源+对应S，排斥，-对应N，吸引

三相9 绕组 6 极（3 对极）：



采用9绕组6极，而不是6绕 6极：为了防止定子的齿与转子的磁钢相吸而对齐，产生类似步进电机的效果，此情况下转矩会产生很大波动。

三个重要物理量

$$\begin{aligned}E_a &= K_e n \\T &= K_m I \\P &= E_a \cdot I = T \cdot \omega\end{aligned}$$

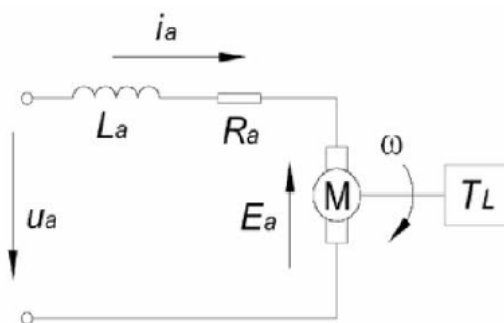
电枢电动势 $E_a = K_e n$ ， K_e 是速度常数， n 是电机转速

电磁转矩 $T = K_m I$ ， K_m 是力矩常数， I 是电枢电流

电磁功率 $P = E_a \cdot I = T \cdot \omega$ ， ω 是角速度

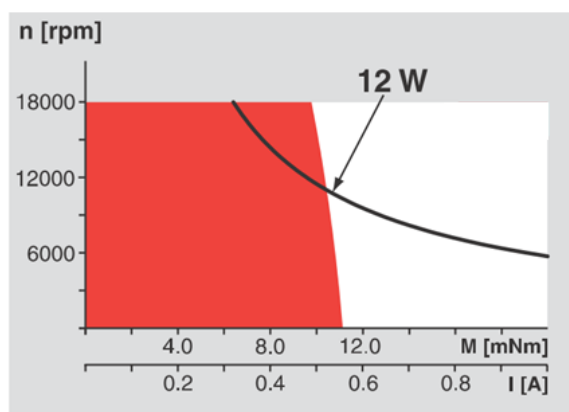
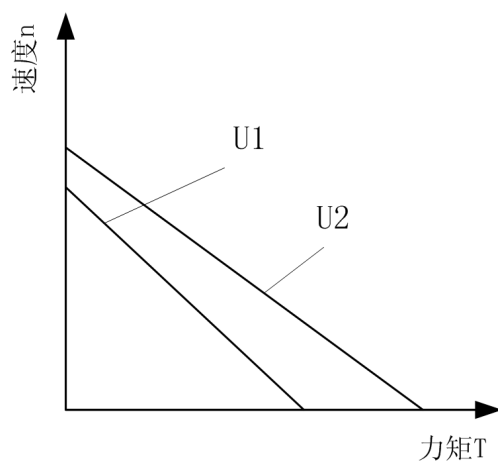
- 转速与感应电动势成正比
- 力矩与电流大小成正比

转矩和转速的关系



$$\begin{aligned}U &= E_a + I \cdot R_a = K_e \cdot n + I \cdot R_a \\n &= \frac{U - I \cdot R_a}{K_e}\end{aligned}$$

检查电机是否烧坏，可以通过测量电机绕组的值是否正常来判断。

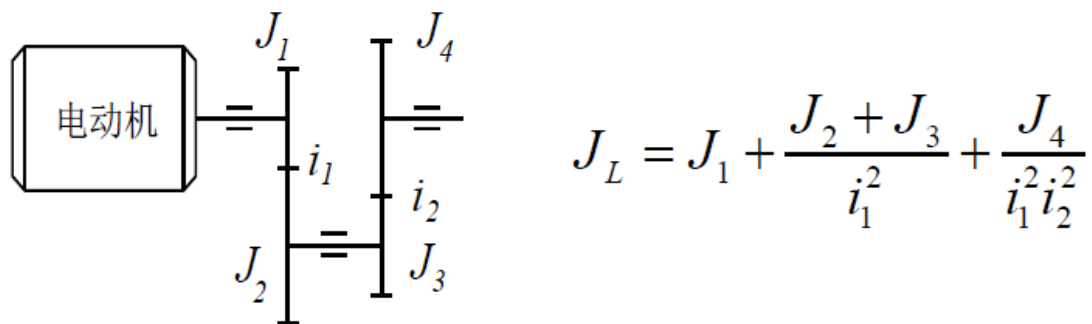


斜率（速度/转矩常数）越小，说明电机的刚性越好，越“硬”。

斜率是电机本身决定的，与端电压和速度无关。

转动惯量的匹配

负载的转动惯量折合到主动轴上时，从动轴上的转动惯量和阻尼系数都要除于传动比的平方，负载转矩除于传动比。



三环控制

电压平衡方程： $u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t)$

感应电动势方程： $E_a(t) = K_e \omega$

电磁转矩方程： $T(t) = K_t i_a(t)$

转矩平衡方程： $T(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_d(t)$

直流电机PWM调速

设电机永远接通电源时，其转速最大为 V_{max} ，占空比 $D = t_1/T$ ，则电机的平均速度为：

$$V_d = V_{max} \cdot D$$

电机+减速器

传递能量传递：驱动→机构

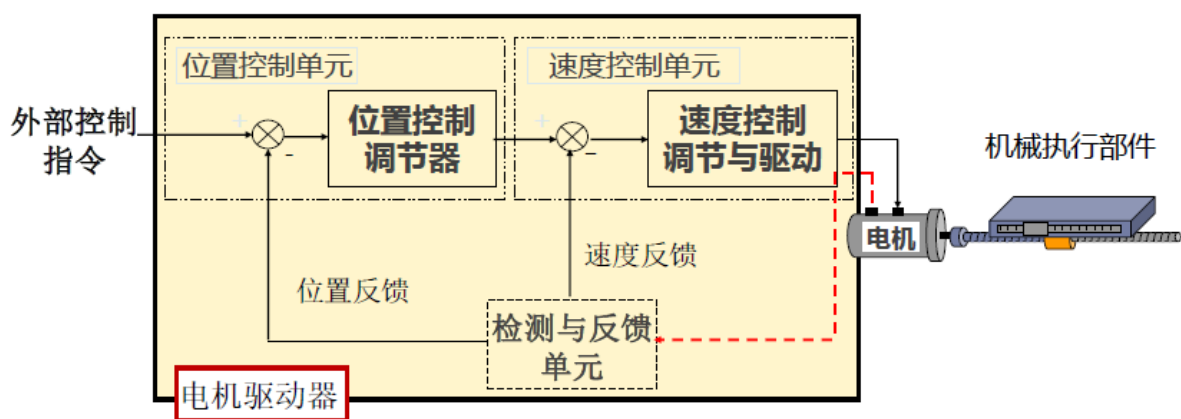
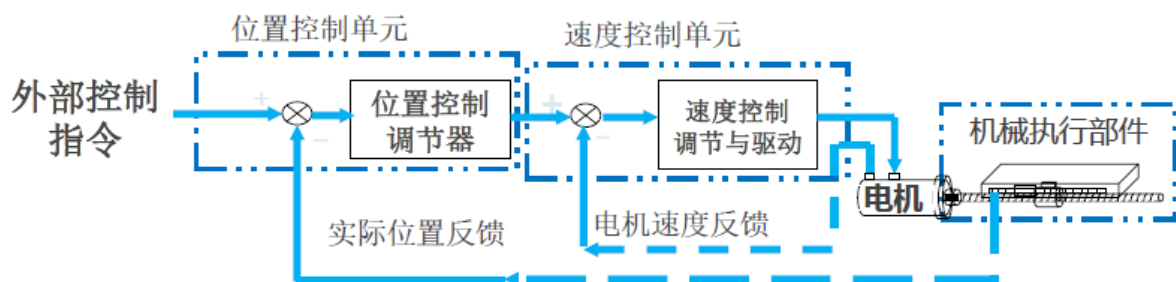
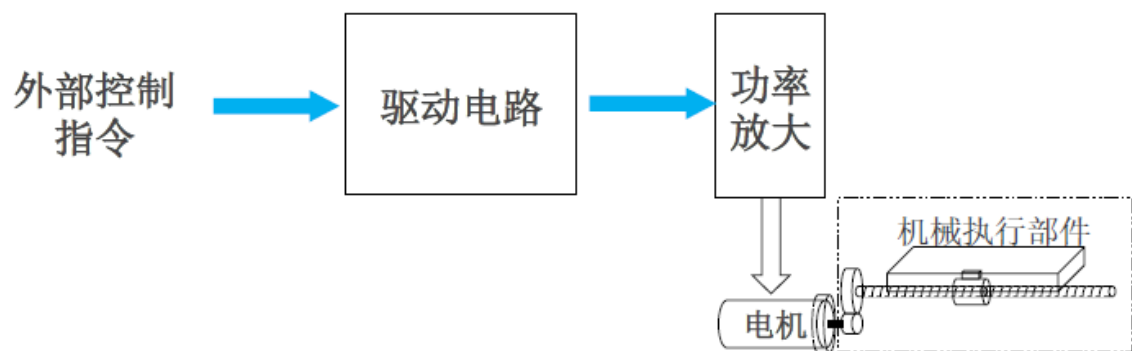
改变运动 速度、力量、方向

基本控制方式

开环伺服系统：由于没有检测反馈装置，系统中各个部分的误差如步进电动机的步距误差、起停误差、机械系统的误差（反向间隙、丝杠螺距误差）等都合成为系统的位置误差，所以其精度较低，但稳定性最好。

闭环伺服系统：闭环控制系统的特点是精度较高，但系统的结构较复杂、成本高，还有系统稳定性的问题。

半闭环控制系统：在开环控制系统的伺服机构中装有角位移检测装置，通过检测伺服机构的滚珠丝杠转角间接检测移动部件的位移，然后反馈到数控装置的比较器中，与输入原指令位移值进行比较，用比较后的差值进行控制，使移动部件补充位移，直到差值消除为止的控制系统。精度和稳定性均介于开环和闭环之间。

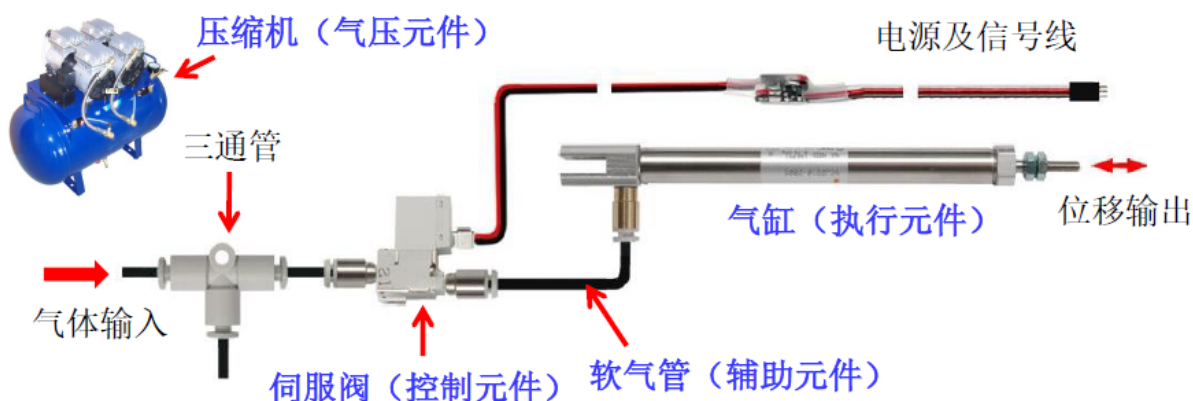


气压驱动

以空气压缩为动力源，主要有气缸、气阀、管路等元件组成；

包括气压发生装置、辅助元件、控制元件和执行元件。

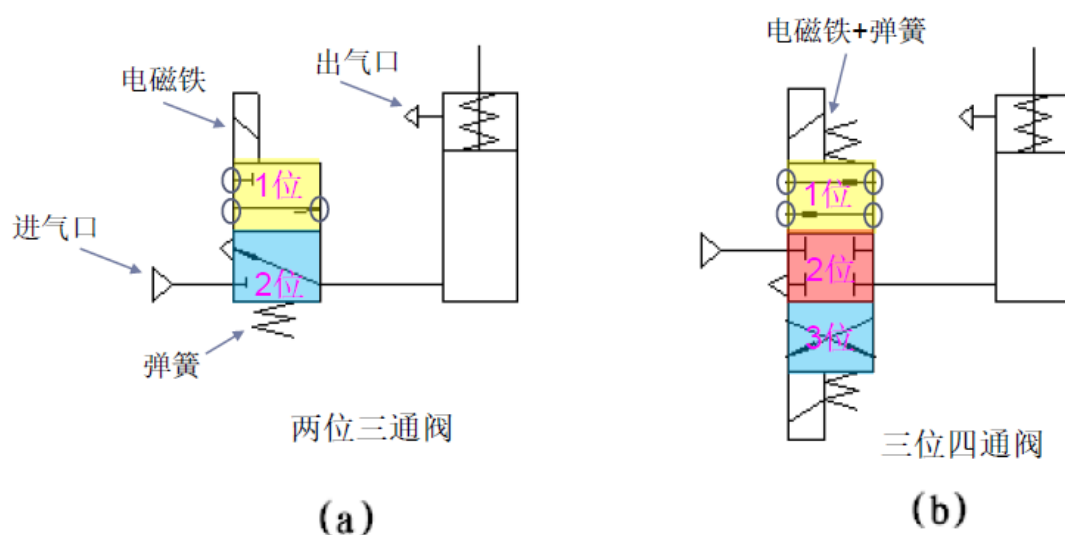
- 优点：气源获得方便、成本低、动作快。
- 缺点：输出功率小，体积大。一般而言，其工作噪声较大、控制精度较差。



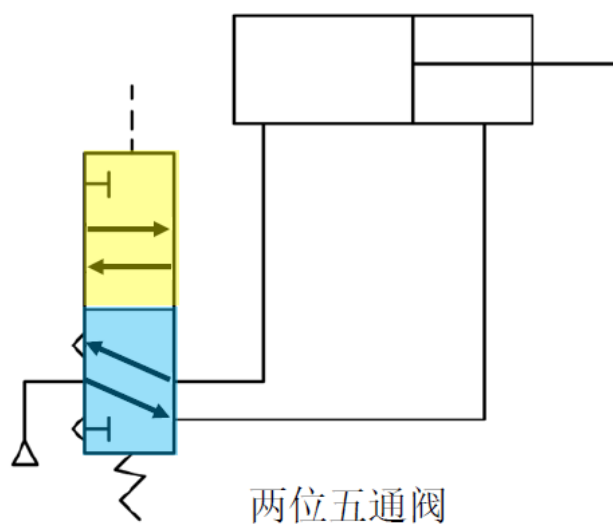
- 气压元件：气源装置，其功能是将原动机输入的机械能转换成流体的压力能，为系统提供动力
- 执行元件：**气缸、气马达**，功能是将流体的压力能转换成机械能，输出力和速度或转矩和转速），以带动负载进行直线运动或旋转运动
- 控制元件：**压力、流量和方向控制阀**，作用是控制和调节系统中流体的压力、流量和流动方向，以保证执行元件达到所要求的输出力（或力矩）、运动速度和运动方向
- 辅助元件：保证系统正常工作所需要的辅助装置，包括**管道、管接头**、储气罐、过滤器和压力计

方向控制回路

单作用气缸



双作用气缸换向回路



每“位”的“通”数均相等，无论是否用上

液压驱动

液压式主要有液压缸、液压马达、阀等组成

液压伺服系统由液压源、伺服阀、传感器、执行机构等构成

- 优点：重量轻、尺寸小、动作平稳、快速性好、产生的力矩非常大。
- 缺点：易漏油、维护困难；不确定性和非线性因素多，控制和校正不如电气式方便。

新型驱动

软体机器人等

五、机器人设计与传动

机器人机构的组成

- 执行机构：完成操作任务：在动力源的带动下，完成预定的操作，如：直流电机、舵机和气缸等；
- 传动机构：转速和转矩的变换器，如：齿轮；也是伺服系统的一部分，要求根据伺服控制系统进行选择设计，以满足控制性能。因此，
- 支撑/导向机构：使运动能安全、准确地完成特定方向的运动，如：轴承和导轨。

设计流程

1. 明确执行机构
2. 确定传动方式
3. 设计导向机构
4. 结构设计
5. 优化分析
6. 组装与测试

传动机构

- 质量和转动惯量应尽量小。
- 刚度尽量大：伺服系统动力损失小（变形损失能量小）；频率要高，超出机构的频带宽度，使之不易产生共振；闭环系统更加稳定。
- 阻尼越大，振动的振幅就越小，衰减也越快。但大阻尼会使系统稳态误差增大、精度降低。共振区域阻尼越大越好；远离共振区域阻尼越小越好。
- 其他要求：摩擦小、抗振性好、传动间隙小等。

强度与刚度

强度：零件在工作中 **发生断裂或残余变形** 均属于强度不足。

刚度：零件在工作中所产生的 **弹性变形** 不超过允许的限度。包括整体刚度和表面刚度两种。

相同的强度，结构不同，刚度不同

减速比

i = 输入速度/输出速度：减小速度

输出力/力矩变为原来的 i 倍：增大力矩

自由度

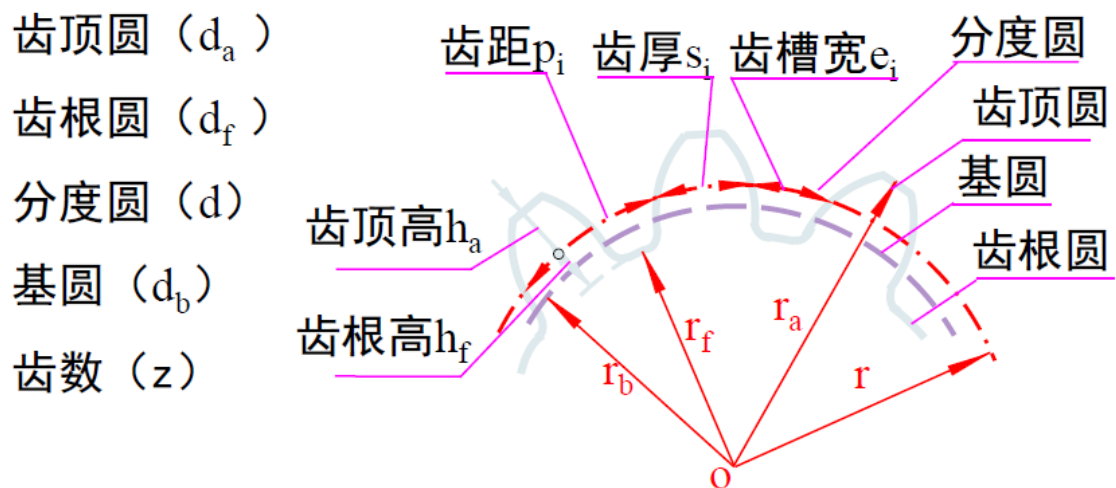
闭环系统中

$$F = 6(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n f_i$$

l 为连杆数（包括基座）， n 为关节总数， f_i 为第 i 个关节的自由度数。

齿轮传动

齿轮的术语



齿距和齿厚均在分度圆上，同一圆周上 $p_i = s_i + e_i$ $s_i = e_i$ 。

模数 $m = p_i / \pi$ ：模数越大，齿厚越大，齿轮的承载能力越高。

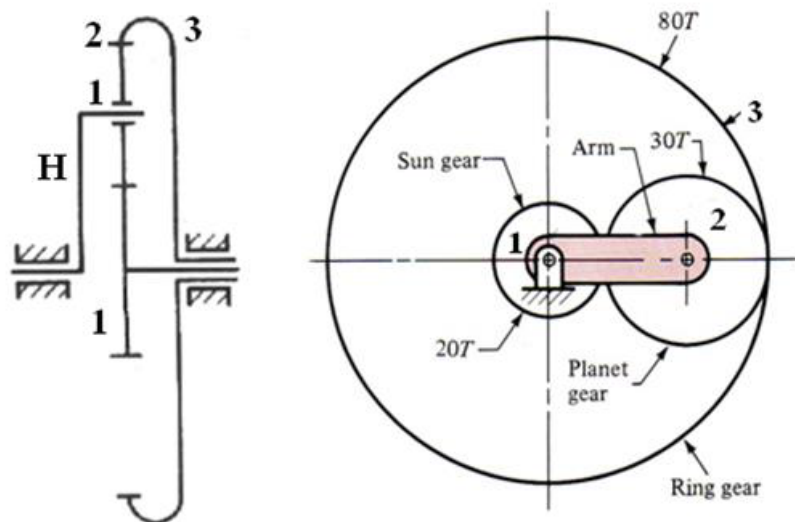
分度圆 $d = mz$

定常传动比 $i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{O_2P}{O_1P}$ P 为节点

齿轮轮系

- 定轴轮系：所有转动轴可以是平行的或者交错的；每个轴上可以有多个齿轮。
- 周转轮系：至少有一个齿轮的轴线不固定，而是绕另一个齿轮的轴线转动的轮系。
- 混合轮系

周转轮系

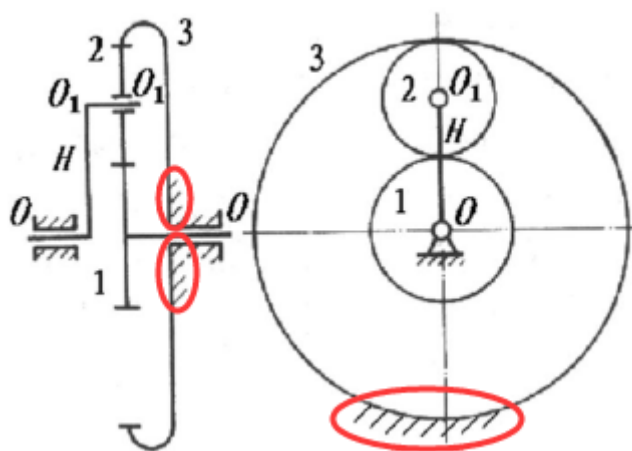


- 1, 3 称为 太阳轮 (可作为 输入/输出) : 只绕自己转动
- H 称为行星架 (可作为 输出/输入) : 万有引力
- 2 称为行星轮

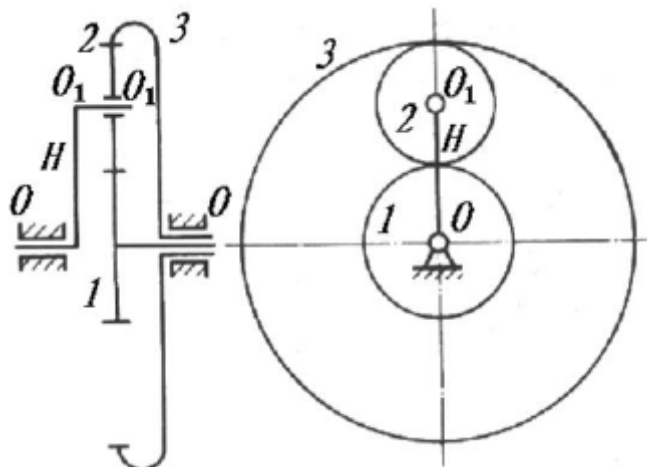
太阳轮与行星轮啮合; 行星轮自转与公转; 行星架支撑行星轮。

- 行星轮系有1DOF 自由度, 一个太阳轮必须件固定, 只需给定一个独立的运动。

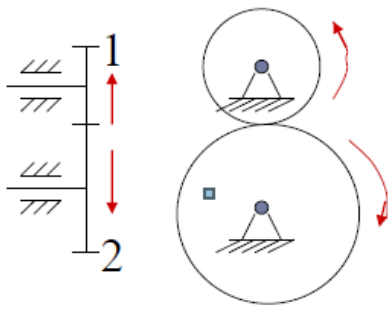
输入是太阳轮1, 输出是行星架 (或反过来)



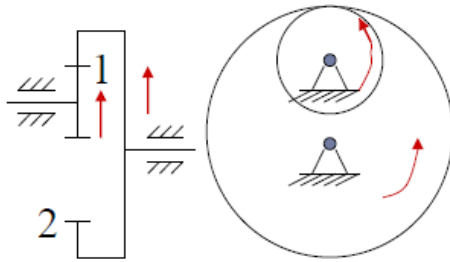
- 差动轮系有2DOF 自由度; 太阳轮均可动, 且3个部件均可动, 需要给定两个独立的运动, 可用作运动的合成或分解。



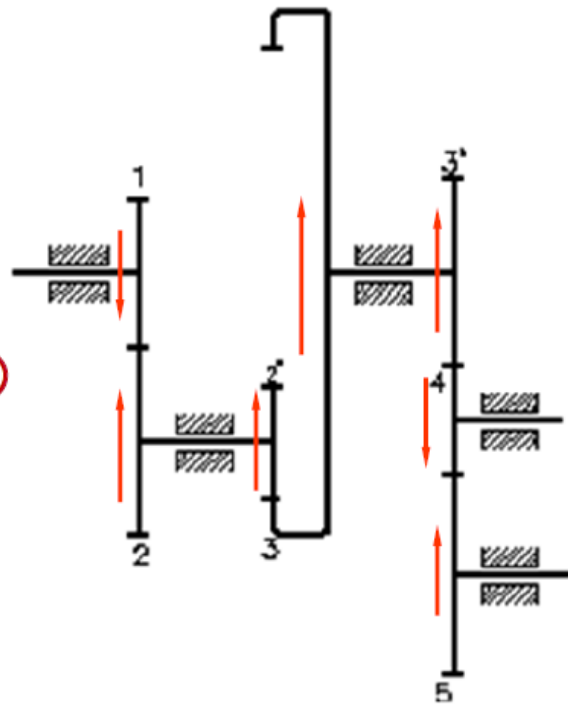
转向关系



外啮合：方向相反 (-)



内啮合：方向相同 (+)



减速比 $i_{\text{首末}} = \frac{\omega_{\text{首}}}{\omega_{\text{末}}} = \frac{Z_{\text{首}}}{Z_{\text{末}}}$ ，由正负之分

$$i_{1,2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{Z_2}{Z_1}, \quad i_{2,3} = \frac{\omega_2}{\omega_3} = +\frac{Z_3}{Z_2}。$$

连杆传动

优点：

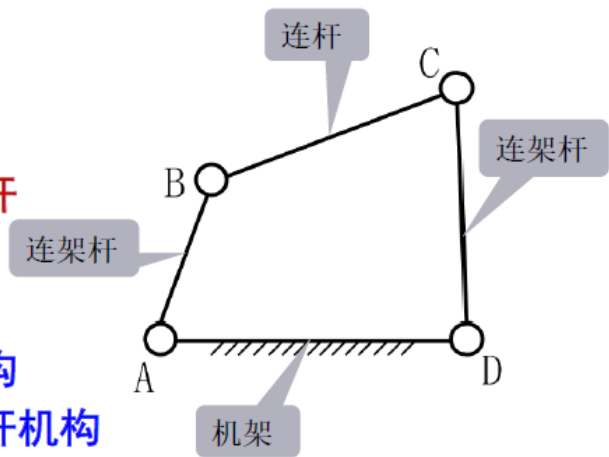
- 连杆机构中的运动副一般均为低副（连杆机构也称低副机构）低副元素之间为面接触，压强较小，承载能力较大；
- 可改变各构件的 长度使得从动件得到不同的运动规律；
- **可以设计出各种曲线轨迹。**

缺点：

- 需要经过中间构件传递运动，传递路线较长，易产生较大的误差，同时，使得**机械效率降低**
- 质心在作变速运动，所产生的惯性力难于用一般平衡方法加以消除，易增加机构的动载荷，**不适宜高速运动**（相对于齿轮而言）。

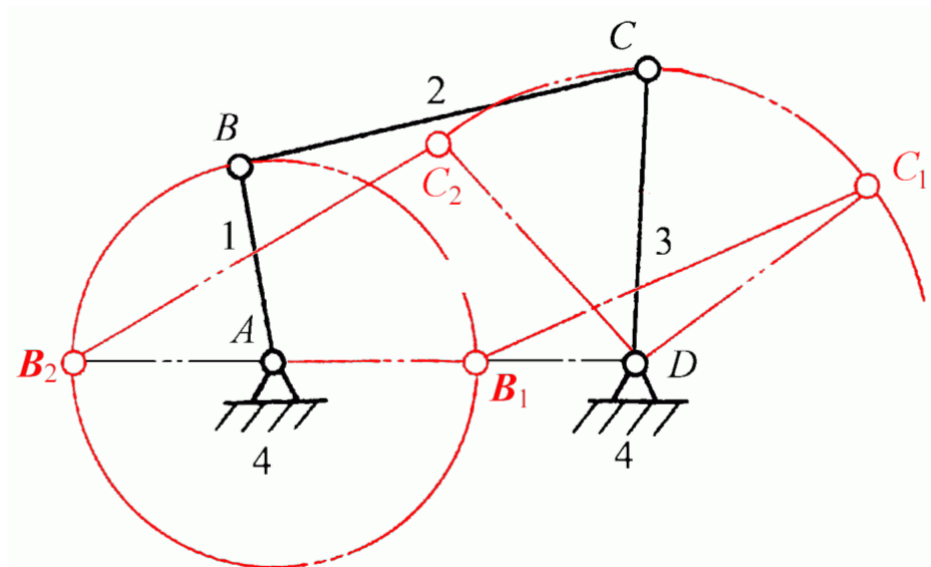
▶ 在右图机构中：

- ▶ AD为**机架**
- ▶ BC为**连杆**
- ▶ AB、CD与机架相连为**连架杆**



- ▶ 能做整周回转者为**曲柄机构**
- ▶ 只能一定范围摆动的为**摇杆机构**

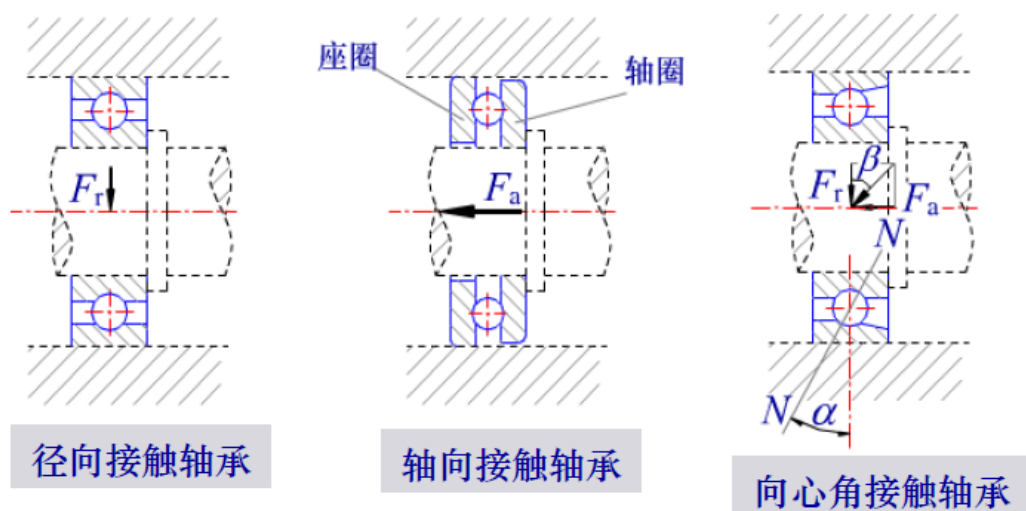
- 曲柄摇杆机构：两个连架杆中有一个为曲柄，另一个为摇杆：**最短杆为连架杆 1 时**
- 双曲柄机构：两个连架杆均为曲柄：**最短杆为机架 4 时**
- 双摇杆机构：两个连架杆均为摇杆：**最短杆为连杆 2 时**



六、机器人的机械设计

轴承

按可承受的载荷方向不同，滚动轴承分为三类：



- 主要用来承受径向力
- 主要用来承受轴向力
- 能同时承受径向力和较大的轴向力

接触角 α : 滚动体的载荷方向线与轴承径向平面之间的夹角；

α 越大，可以承受的轴向力越大

轴承选择

- 高速、轻载：球轴承
- 低速、重载：滚子轴承

轴承的安装

装拆滚动轴承时，**不能通过滚动体来传力**，以免造成滚道或滚动体的损伤。安装需要采用**合适的工具**。

- 配合过盈量小的中、小型轴承可用**压力机**压入
- 配合过盈量大的轴承常用**温差法**（热胀热缩法）装配

轴承的拆卸

- 拉马
- 预留拆卸高度或螺孔

如何在机器中合理地使用轴承？——轴承的安装和固定

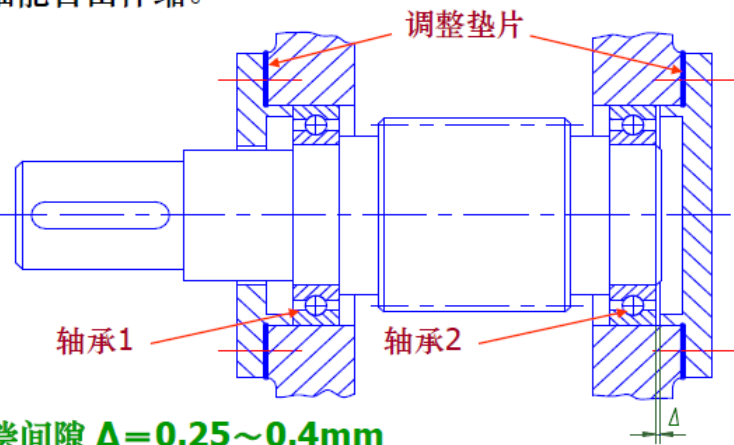
目的：通过轴承与轴和轴承座间的联接固定，使轴系在机器中有确定位置。

要求： { 1) 使轴上的载荷能可靠地传到机架上去，防止轴沿轴向串动。
2) 受热膨胀时，轴能自由伸缩。

➤轴系固定的三种方法：

两端固定支承（最常用）

通过两个轴承共同限制轴的双向串动。其中，轴承1限制轴一个方向的串动，轴承2限制反方向的串动。



对于深沟球轴承，应留热补偿间隙 $\Delta = 0.25 \sim 0.4 \text{mm}$

特点：结构简单，安装调整容易，适用于温度变化不大的短轴。

轴在轴向上的固定方法

- 紧定螺钉
- 键连接
- 销连接
- 联轴器
- 厌氧胶

七、机器人运动学

运动学是指机器人连杆的位置和姿态（简称：位姿）与关节角度关系的理论。

位姿：位置 P ，姿态 R

- 正运动学：已知关节空间 $q(t)$ 求笛卡尔空间 $p(t)$
- 逆运动学：已知笛卡尔空间 $p(t)$ 求关节空间 $q(t)$

坐标变换

r 和 r' 之间的关系可表示为:

$$r' = R_a r$$

R_a 称为旋转矩阵, 是在局部坐标 Σ_a 中的描述。

那么末端点 (end-point) 在世界坐标系中的位置:

$$p_h = p_a + R_a^a p_h$$

在坐标系 Σ_b 中观察的end-point位置为 ${}^b p_h$,
到在 Σ_a 中观察的end-point位置为 ${}^a p_h$ 。

两者的变换关系为:

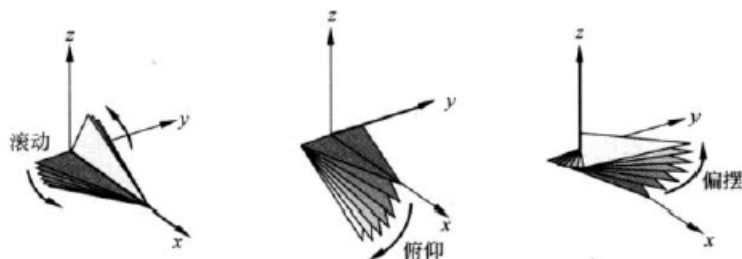
$$\begin{bmatrix} {}^a p_h \\ 1 \end{bmatrix} = {}^a T_b \begin{bmatrix} {}^b p_h \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中 ${}^a T_b$ 称为变换矩阵:

$${}^a T_b = \begin{bmatrix} {}^a R_b & {}^a p_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_N = T_1^1 T_2^2 T_3^3 \cdots T_N^{N-1}$$

T_N 为从 Σ_N 到世界坐标系 Σ_W 的齐次变换矩阵



转动轴	名称	所用符号
x 轴	滚动 (roll)	ϕ
y 轴	俯仰 (pitch)	θ
z 轴	偏摆 (yaw)	ψ

$$R_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

左乘：如果有一点 p 绕原点依次作滚动、俯仰和偏摆，其位置将变成：

$$p' = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\varphi)p$$

其中：

$$R_{rpy}(\varphi, \theta, \psi) = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\varphi)$$

$$= \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\theta + c_\psi s_\theta s_\varphi & s_\psi c_\theta + c_\psi s_\theta c_\varphi \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\theta + s_\psi s_\theta s_\varphi & -c_\psi c_\theta + s_\psi s_\theta c_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\theta c_\varphi \end{bmatrix}$$

八、人工智能

智能的基础是知识，智能的关键是思维

智能 = 知识 + 思维

- 除了 计算机科学 以外，人工智能还涉及 信息论、控制论、自动化、仿生学、生物学、心理学、数理逻辑、语言学、医学和哲学 等多门学科。
- 人工智能学科研究的主要内容包括：知识表示、自动推理和搜索方法、机器学习和知识获取、知识处理系统、自然语言理解、计算机视觉、智能机器人、自动程序设计 等方面。

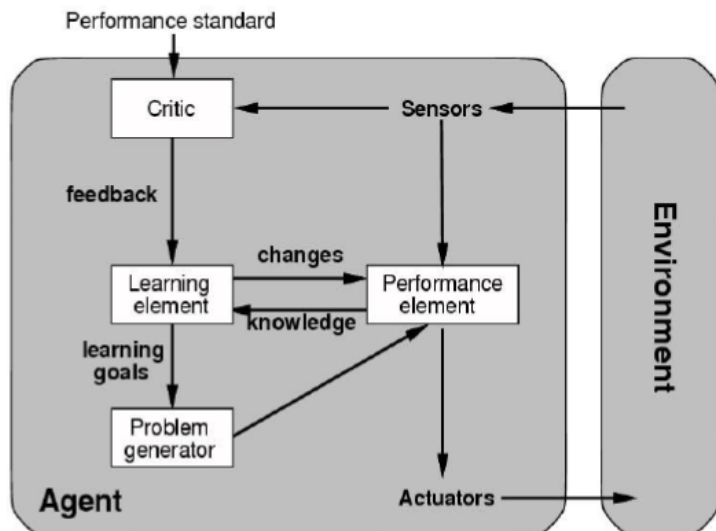
人工智能学习

Performance element: 根据感知选择行为

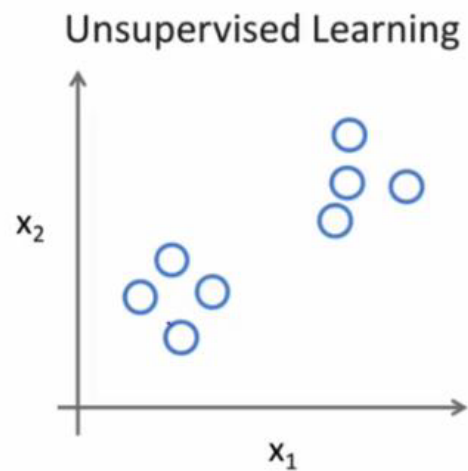
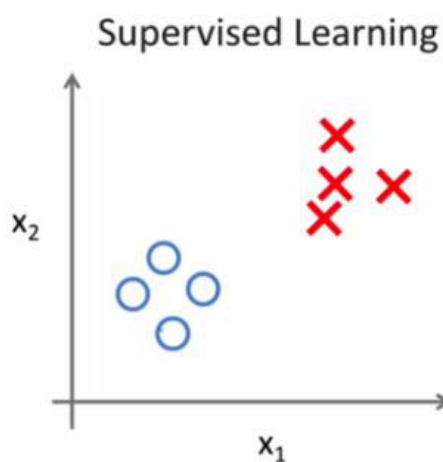
Learning element: 用来改进执行组件

Critic: 用来对主体进行评判的一种固定标准（单单依赖感知学习组件无法知道主体的好坏；如果不固定，无法进行学习。）

Problem Generator: 为了得到更多的经验或者数据，而对执行组件提出尝试的要求（否则执行组件总是按照自认的最优方案动作）



- 有监督学习：对每个实例返回正确答案
- 无监督学习：没有明确的输出情况反馈
- 强化学习：对行为的评估反馈



有监督学习

根据样本学习一个未知的目标函数 f ，样本是数据对 $(x, f(x))$

问题：给定一个包含 N 个样本的训练集，寻找一个假设 h 满足 $h \approx f$

- 分类： $f(x)$ 是有限种取值：预测一个离散值，将输入变量与离散的类别对应
- 回归： $f(x)$ 是无限的数值：预测一个连续值，将输入变量和输出用一个连续函数对应

特点：

- 忽略先验知识
- 处于一个确定的，可观测的“环境”中
- 样本给定
- 智能体希望学习 f

无监督学习

通过聚类的方式从数据中提取一个特殊的结构（聚类算法），是指从不需要认为注释的样本的分布中抽取信息。通常与密度估计有关，学习从分布中采样、学习从分布中去噪、寻找数据分布的流形或是将数据中相关的样本聚类。

归纳学习

在假设空间 H 中选择假设 h 使之在训练集上与 f 相吻合（如果 h 在所有的样本点上都与 f 相吻合，则 h 是一致的）

Ockham's Razor原则：优先选择与数据一致的最简单的假设

决策树

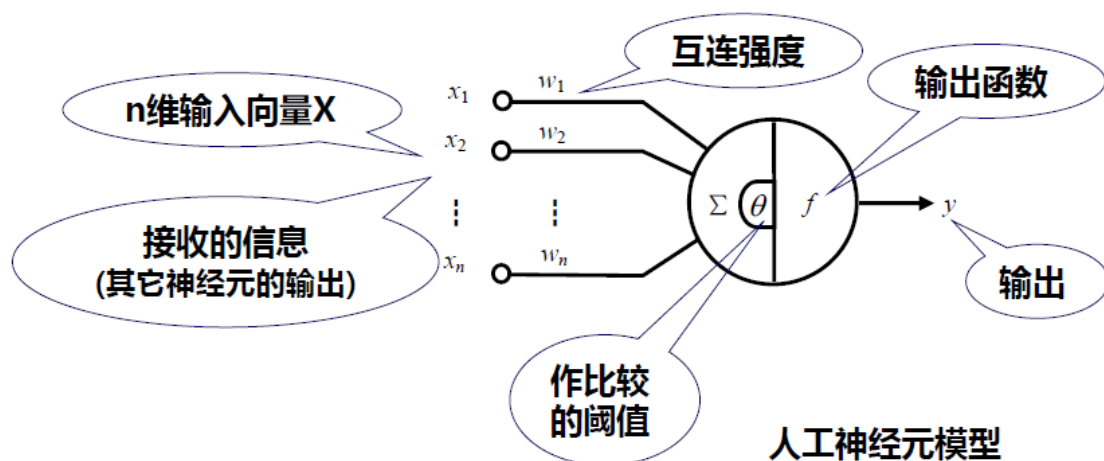
过拟合与交叉检验

- 对于大规模的假设集或者存在噪声的情况，往往会发生 **过拟合** 的现象
- 可采用 交叉检验 的方法来减少过拟合，基本思想是估计每个假设对未知数据进行预测的准确程度。
- k 次交叉检验是进行 k 次实验，每次预留不同的 $1/k$ 的数据用于检测，并对结果进行平均。

神经网络

6个基本特征

1. 神经元及其联接；
2. 神经元之间的 联接强度 决定信号传递的强弱；
3. 神经元之间的联接强度是可以随 训练 改变的；
4. 信号可以是起 刺激 作用的 也可以是起 抑制 作用的；
5. 一个神经元接受的信号的 累积效果 决定该神经元的状态；
6. 每个神经元可以有一个 阈值 。



神经元的动作：

$$\text{net} = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (x_i, w_i \in R)$$

$$y = f(\text{net} - \theta)$$

- 分层结构：前馈网络：有明显层次，信息流向由输入层到输出层。具有任意精度的模式映射能力因而可以用作模式分类、匹配等；
- 相互连接结构：反馈网络：没有明显层次，任意两个神经元之间可达，具有输出单元到隐层单元或输入单元的反馈连接；系统具有多个稳定状态 从某一初始状态开始运动 系统最终可以到达某一个稳定状态；不同的初始连接权值对应的稳定状态也不相同。

前馈神经网络

感知器

结构特点：

- 双层（输入层、输出层）；
- 两层单元之间为全互连；
- 连接权值可调。
- 输出层神经元个数等于类别数（两类问题时输出层为一个神经元）。

输出为： $y_j = f(\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i - \theta_j)$ ， w_{ij} 为输入层第 i 个分量与输出层第 j 个神经元间的连接权， θ_j 是第 j 个神经元的阈值

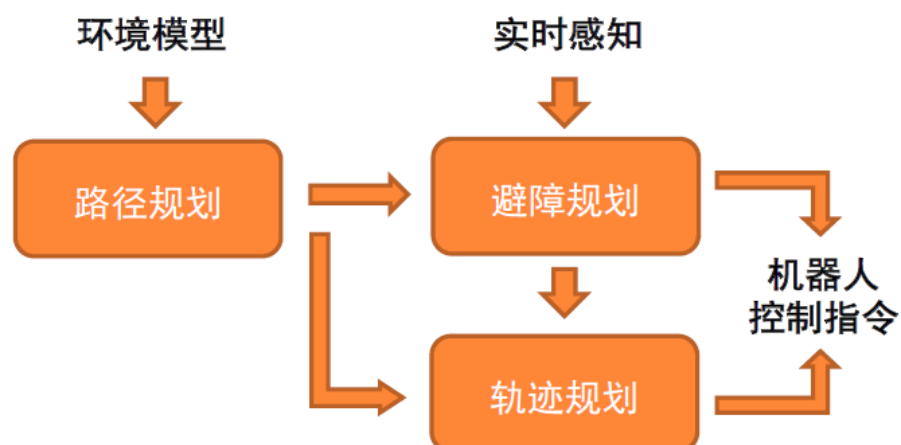
九、感知与运动规划

感知

- 基于特征提取的方法
- 基于识别的方法
- 基于重建的方法

运动规划

详见课件



- 工作空间：移动机器人采用位置和姿态描述，并且需要考虑机器人的体积
- 位形空间：机器人成为一个可以移动的点，不考虑姿态、体积和机器人的非完整运动学约束

位形空间

- 将刚体的规划问题转换为点的规划问题
- 得到位形空间的方法：将障碍物按照机器人的半径进行膨胀
- 机器人成为一个点，只考虑环境几何约束，不考虑机器人的非完整约束以及机器人的其它约束

最优路径搜索方法

- 精确最优搜索法
 - 深度优先方法
 - 广度优先方法
- 近似最优搜索法
 - 启发式搜索法 A* D*
 - 准启发式搜索算法：退火、进化和蚁群优化等

PID控制

将得到车辆轴心速度以及前轮转角发送给下位机，通过 PID 闭环可以快速调节车辆跟踪上当前的参考速度