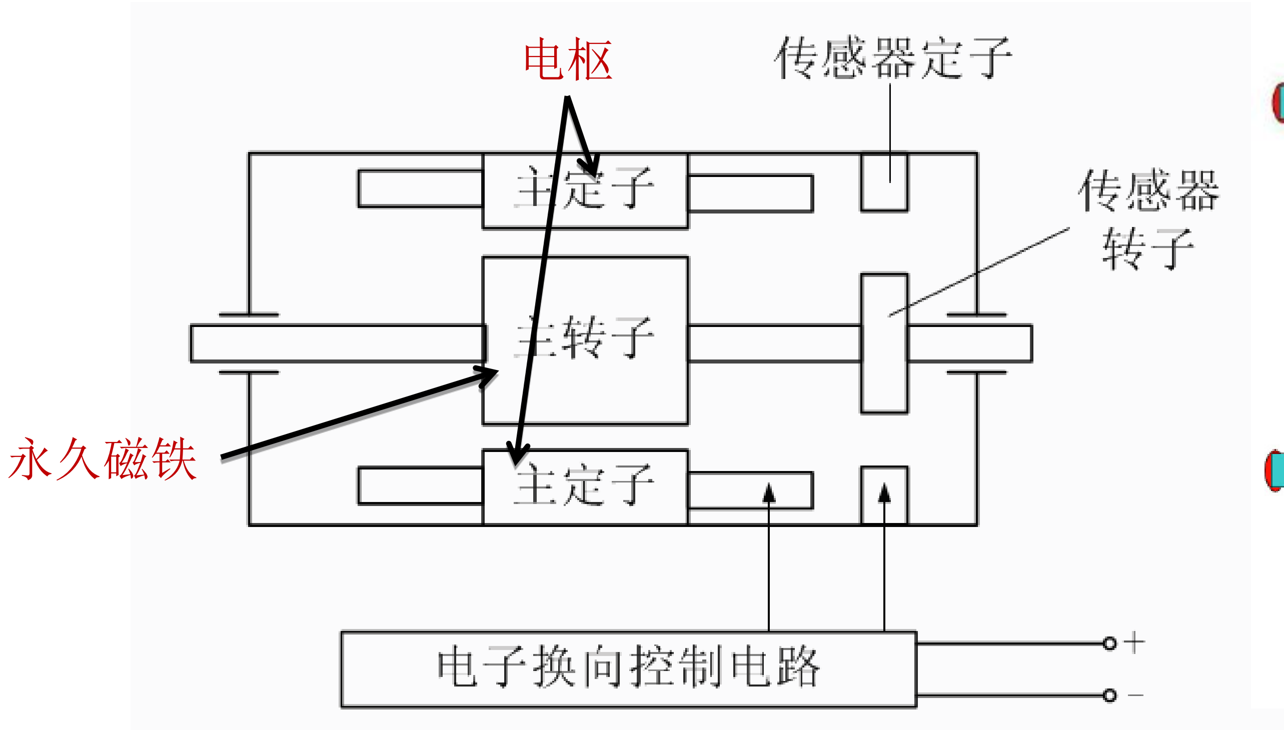
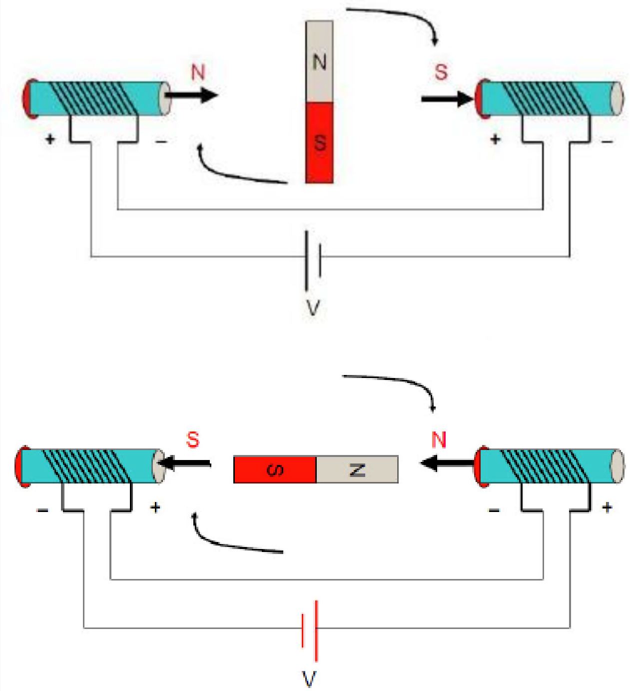
# 机器人导论-复习课


朱秋国
控制科学与工程学院

2023年4月21日

# 无刷直流电机结构



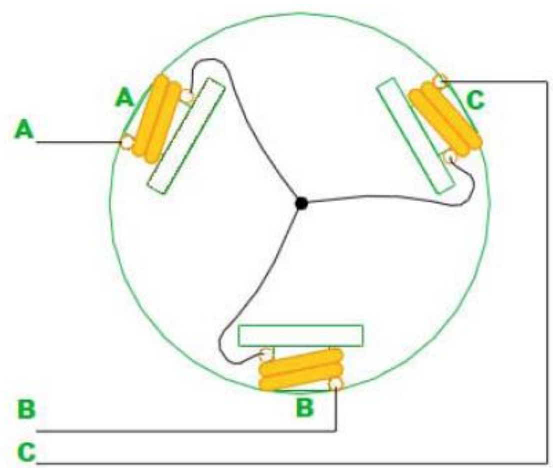




1、无刷直流电机由**电机本体、位置传感器、电子换向电路**三大部分组成。

2、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。

# 无刷直流电机结构

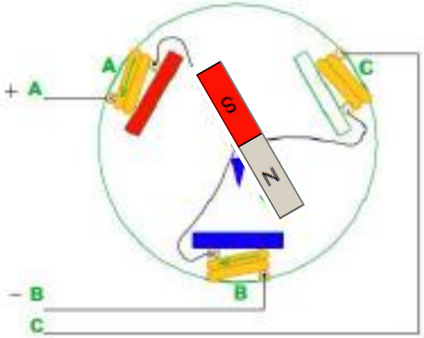
一般而言，无刷电机的绕组有星形联结方式和三角联结方式，而**三相星形联结（Y型）的二二导通方式最为常见**。
我们以三相3绕组2极（1对极）为例：



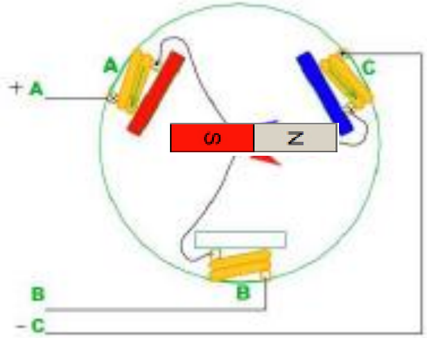

整个电机就引出三根线A, B, C。当它们之间两两通电时，有6种情况，分别是AB, AC, BC, BA, CA, CB。

*参考自Freescale PZ104文档*

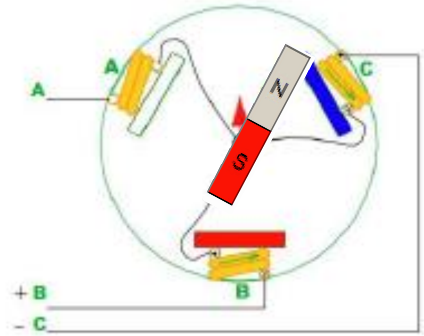
# 红色和蓝色分别表示磁感应强度的方向



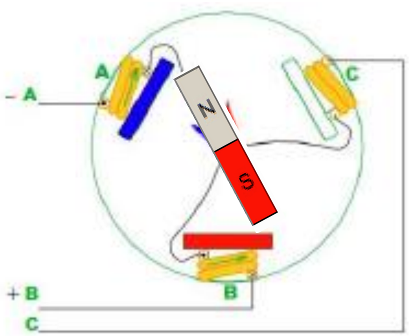

(a) AB 相通电情形



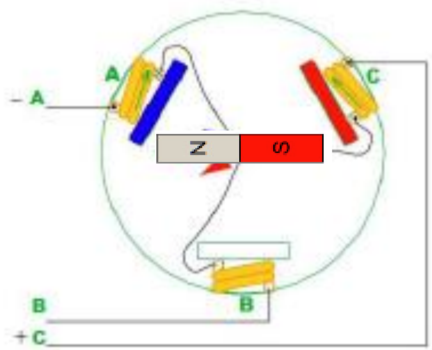

(b) AC 相通电情形



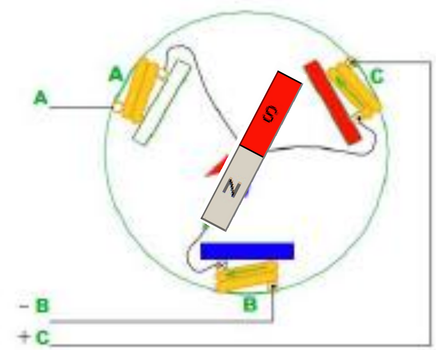

(c) BC 相通电情形




(d) BA 相通电情形



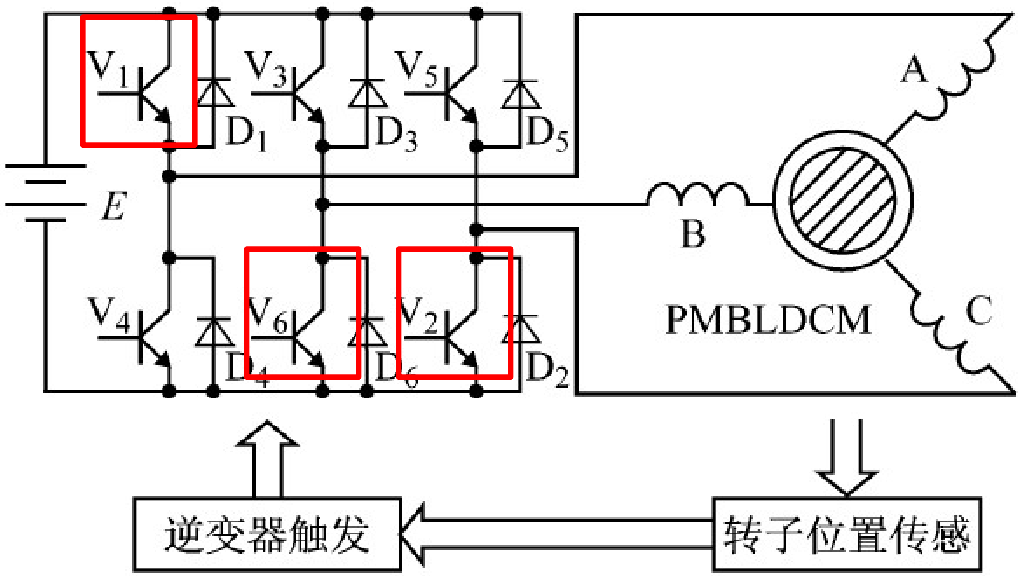

(e) CA 相通电情形



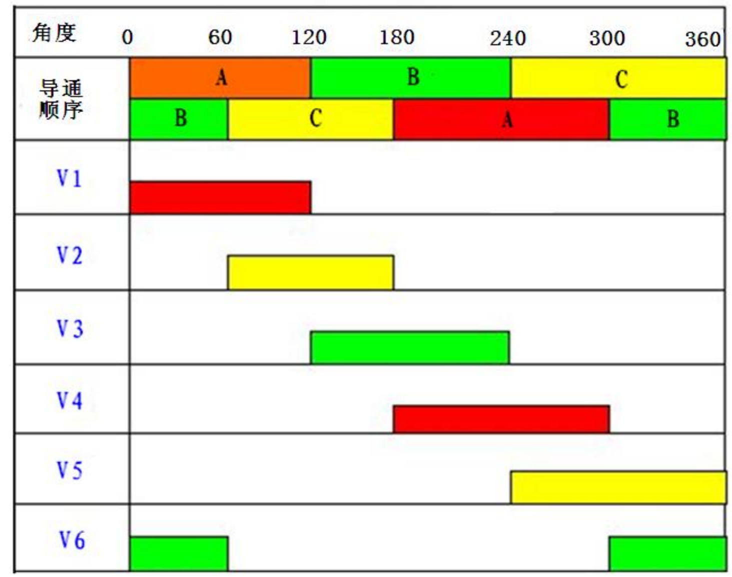

(f) CB 相通电情形

**注意：换相只与转子位置有关，与速度无关**

# 无刷直流电机结构




六臂全桥驱动原理图




绕组导通的状态

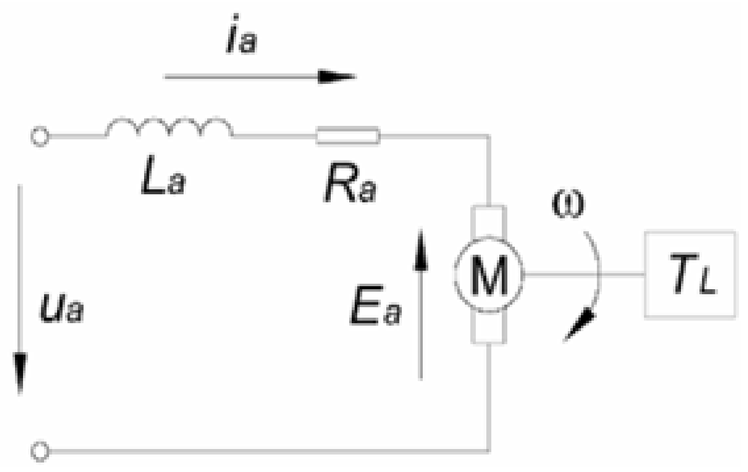
位置传感器：光电编码器、霍尔传感器。

一般在电机的不同位置上装三个霍尔传感器，就可测出转子的位置。

# 三个最重要的物理量

电枢电动势$E_a$、电磁转矩$T$和电磁功率$P$

$$E_a = K_e n$$
$$T = K_m I$$
$$P = E_a \cdot I = T \cdot \varpi$$




$K_e$是速度常数

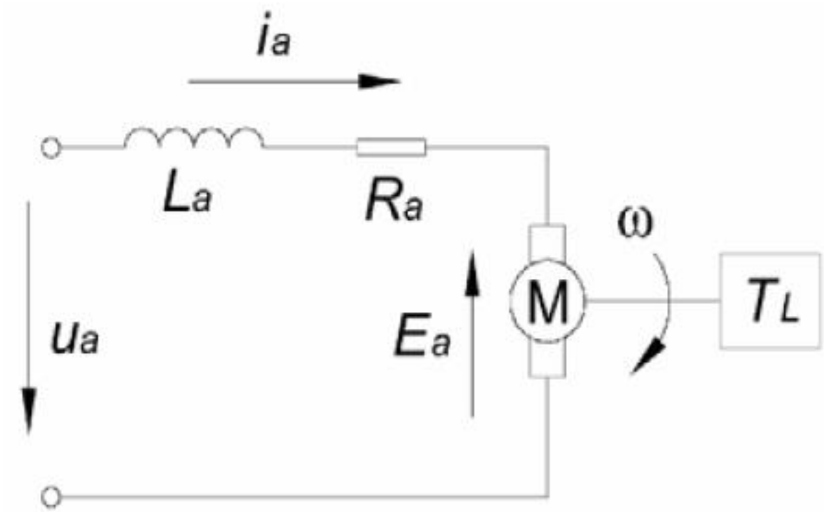
$K_m$是力矩常数

$n$是电机转速，$I$是电枢电流，$\varpi$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

直流伺服电机电枢等效电路



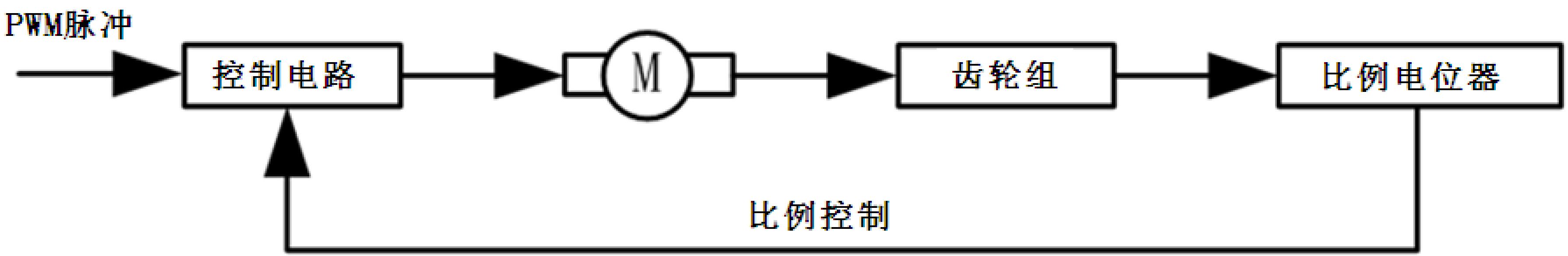

$$U = E_a + I \cdot R_a = K_e \cdot n + I \cdot R_a$$

$$n = \frac{U - I \cdot R_a}{K_e}$$

简单起见，可以忽略电枢回路中的调节电阻。

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。

# 模拟舵机



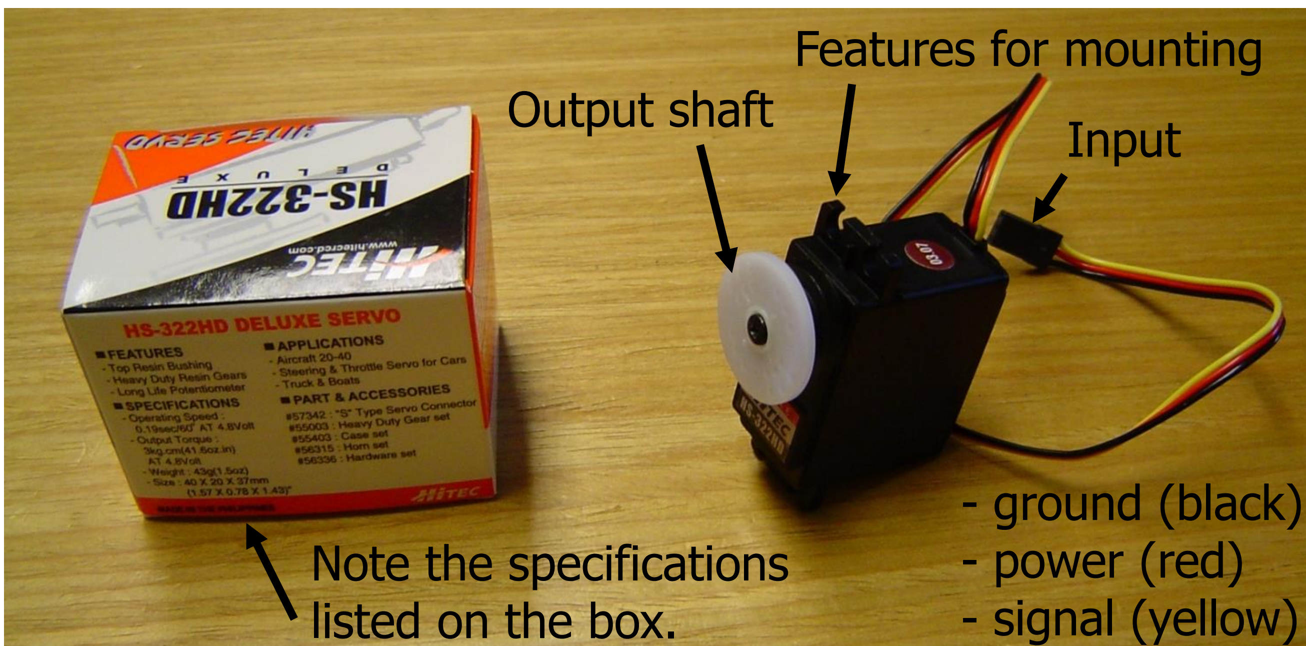

舵机系统原理图

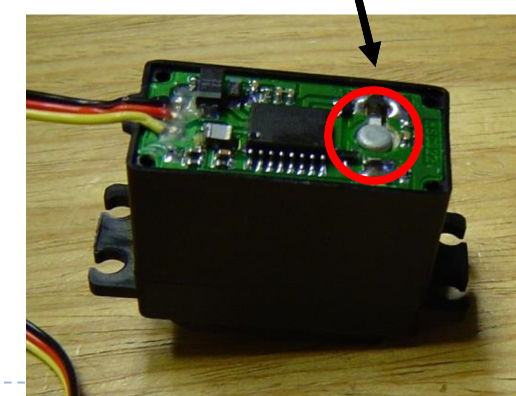
根据上图，请问舵机采用的是什么控制？

# 模拟舵机

减速齿轮组由电机驱动，其输出带到动一个线性的比例电位器作为位置检测，该电位器把转角坐标转换为比例电压反馈给控制线路板，控制线路板将其与输入的控制脉冲信号比较，产生纠正脉冲，并驱动电机正/反转。

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。

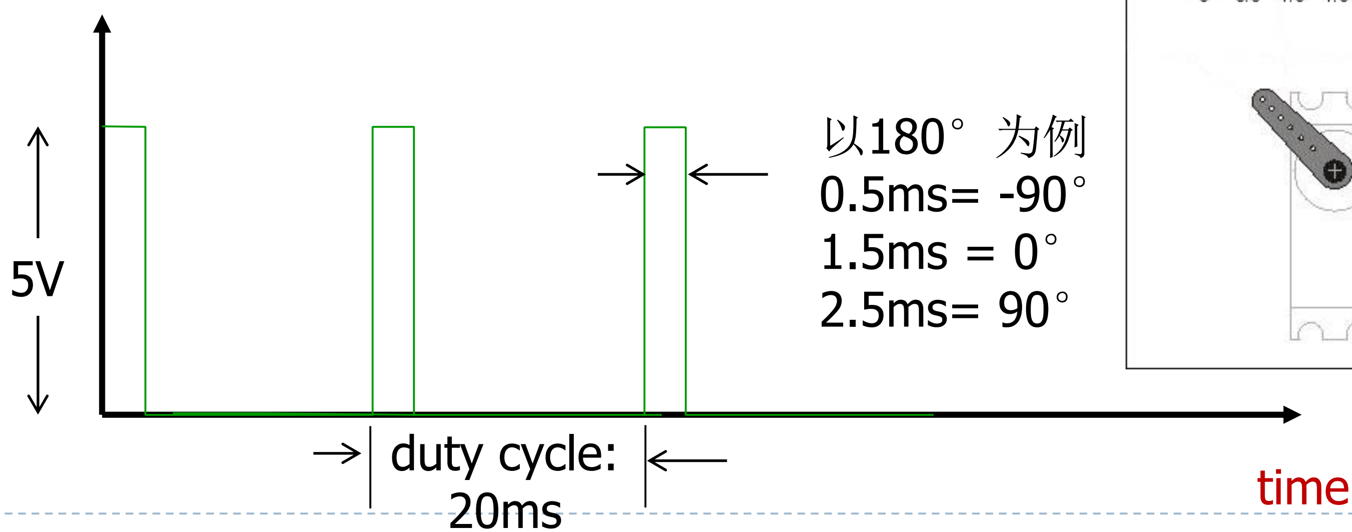


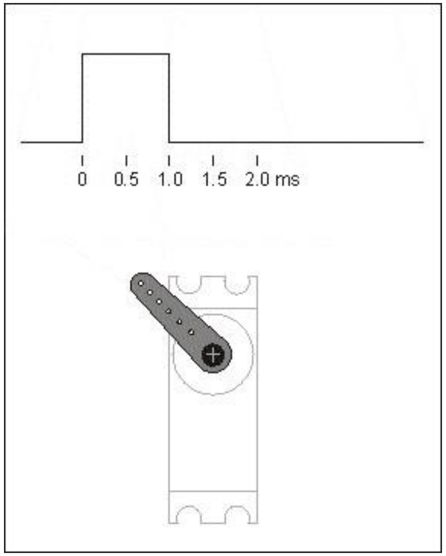



# 舵机位置控制

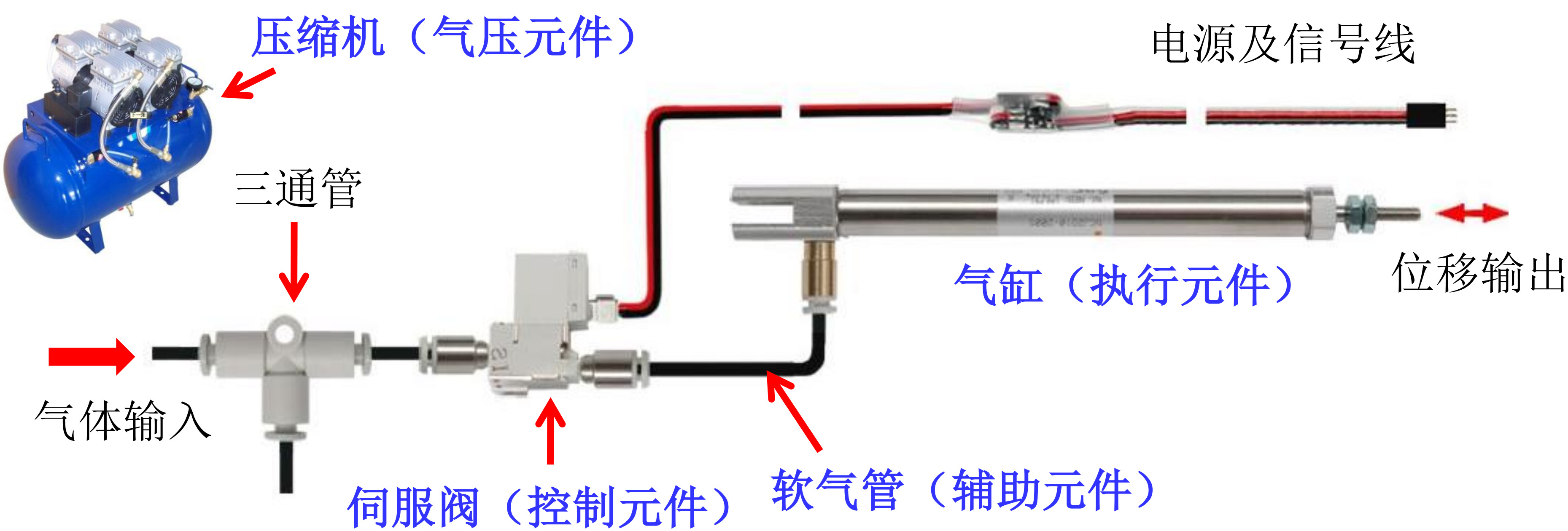
- 舵机转动角度由**PWM**（脉冲宽度调制）信号的占空比来实现；
- **PWM**周期为**20ms**，脉宽分布在**0.5～2.5ms**之间；
- 不同脉宽对应不同转角位置。

黄色信号线的电压值



# 机器人用简易气动设计



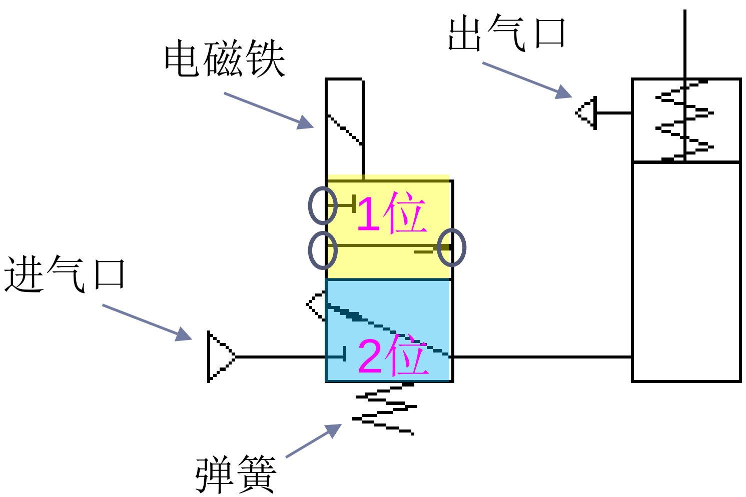

一个简易的气动系统由：气压元件、控制元件、执行元件和辅助元件组成。使用气动要注意安全。

# 气动驱动系统

- 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

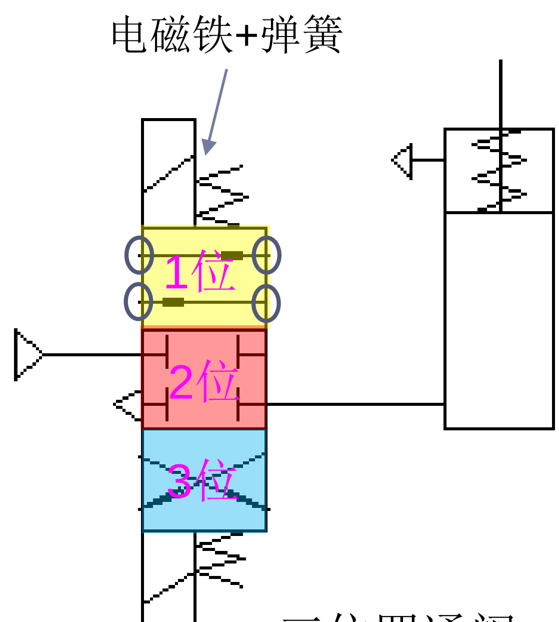
# 方向控制回路

- 单作用气缸换向回路
  - 掌握几位几通的概念


两位三通阀

(a)

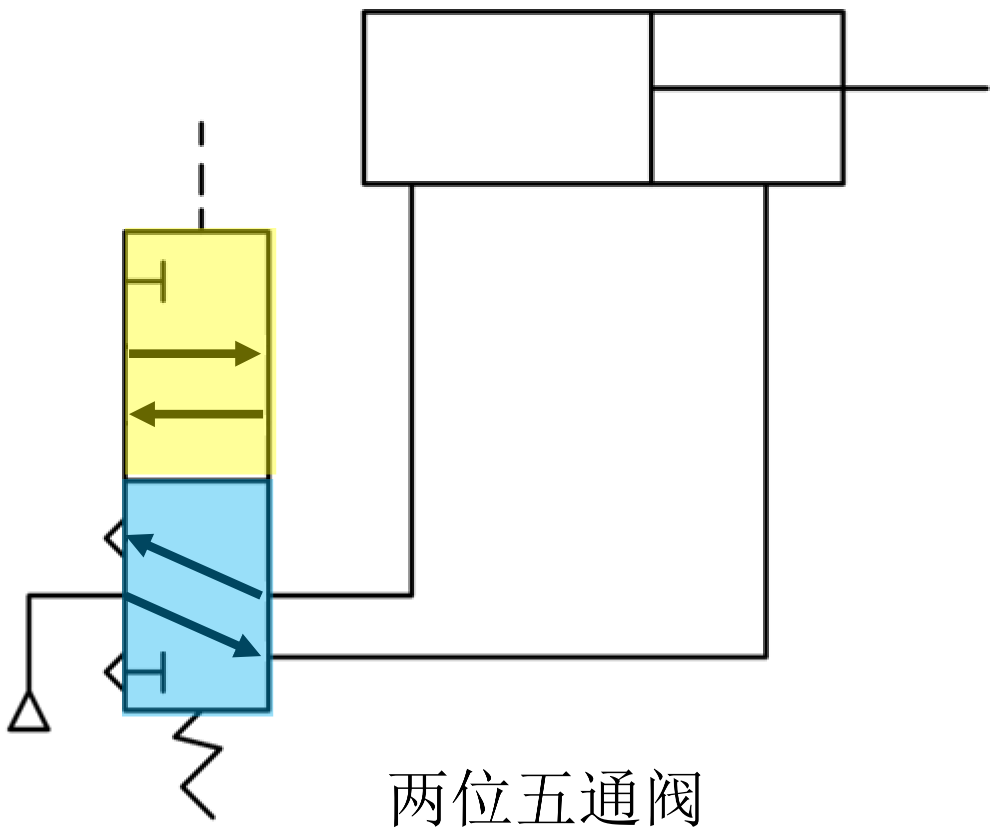



三位四通阀

(b)

# 方向控制回路

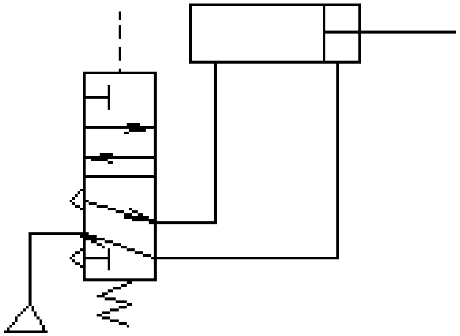
- 双作用气缸换向回路



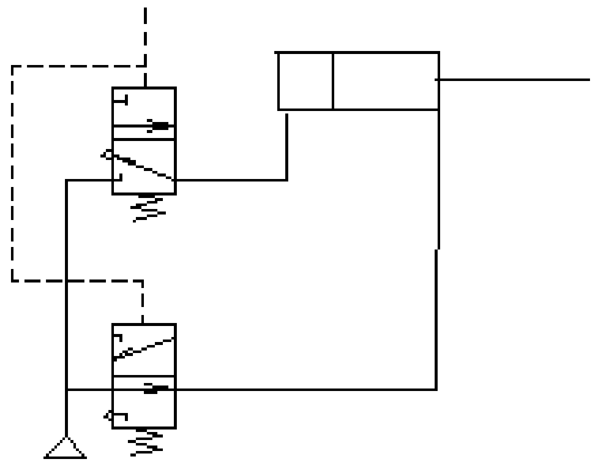
两位五通阀

# 方向控制回路

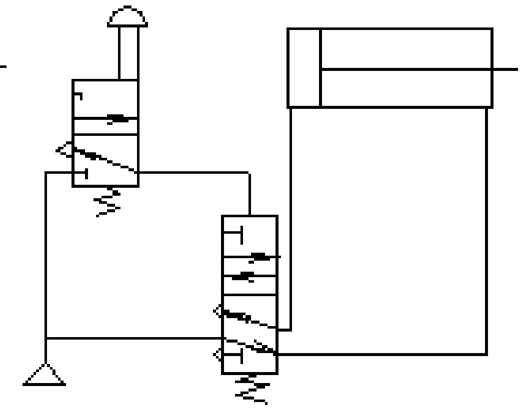
## 双作用气缸换向回路

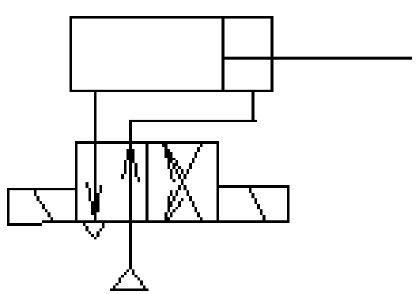
(a)



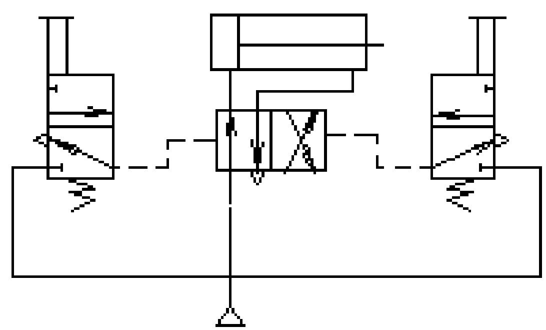
(b)



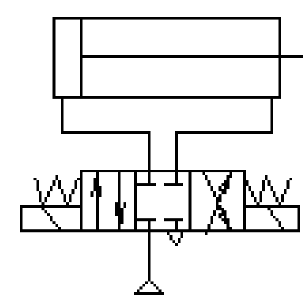
(c)



(d)



(e)

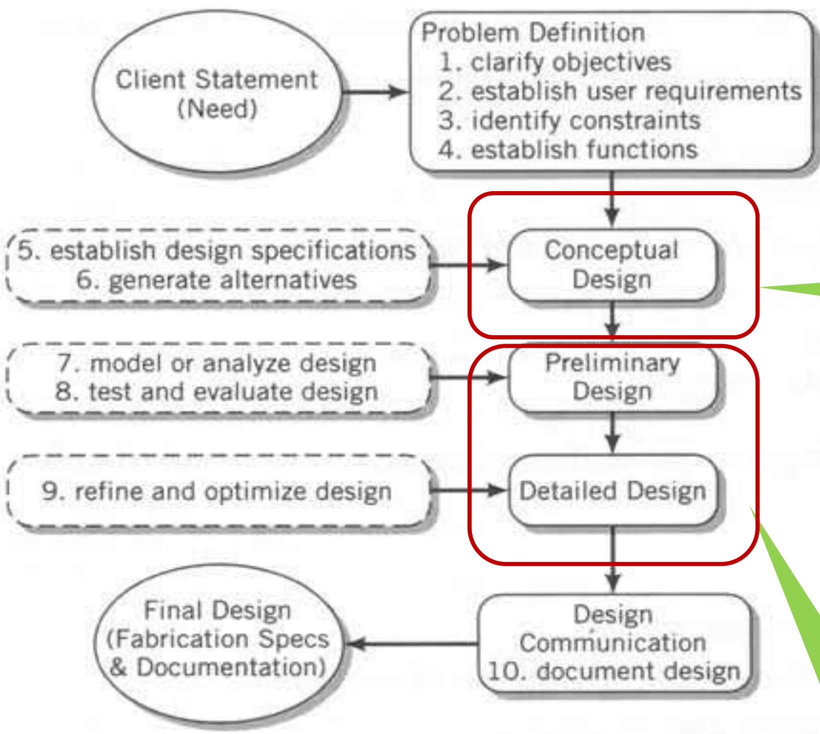


(f)

# 设计流程

## The Design Process: As a Flow Chart

Good idea!




分解和迭代是必不可少的！

Decomposition and iteration are also essential.

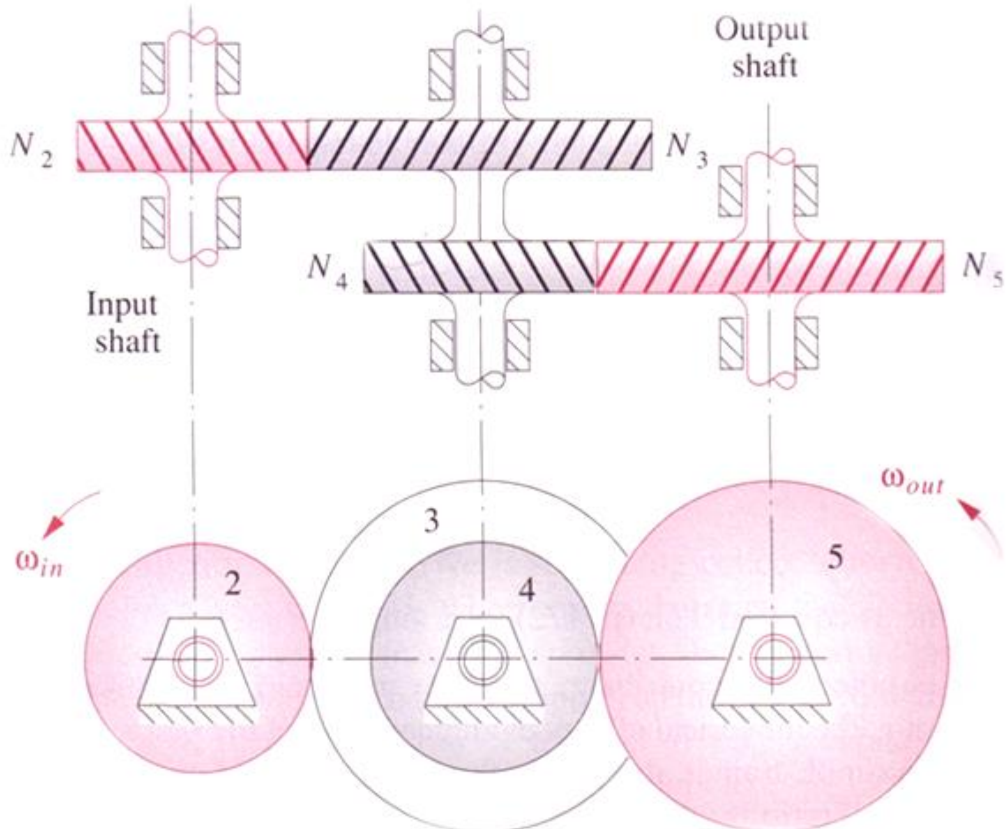
《机器人设计》

**Figure 2.3** A prescriptive, five-stage model of the design process. Like the previous model, this model is also very stylized in that the process is shown as a linear sequence of artifacts (*need* and *final design*) and design phases, within which are situated the design tasks.

《机器人制作》

Dym, C. L., and P. Little, 2000, *Engineering Design: A Project Based Introduction*, John Wiley & Sons, New York.

# 定轴齿轮箱




1、所有转动轴可以是平行的或者交错的；

2、每个轴上可以有多个齿轮。

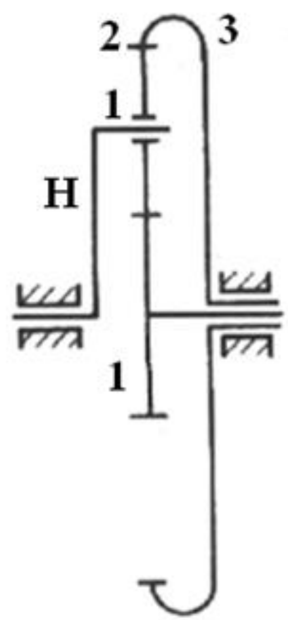
# 周转轮系

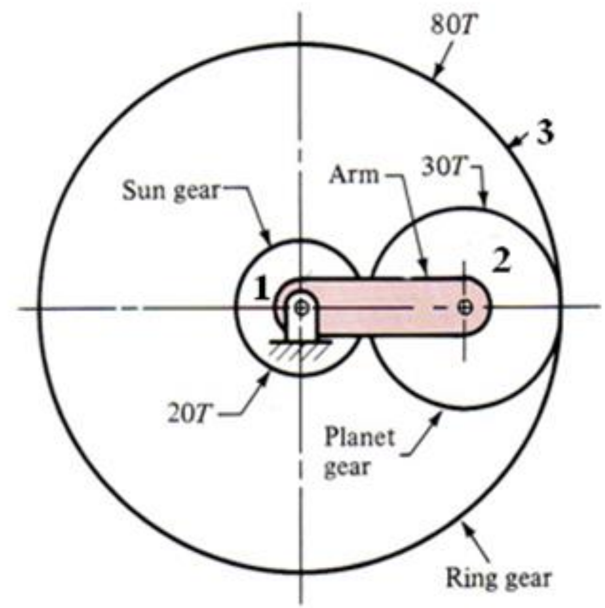
在齿轮系中，**至少有一个齿轮的轴线不固定**，而是绕另一个齿轮的轴线转动的轮系。

部件：1、3 ，称为太阳轮（可作为**输入/输出**）

部件：H ，称为行星架（可作为**输出/输入**）

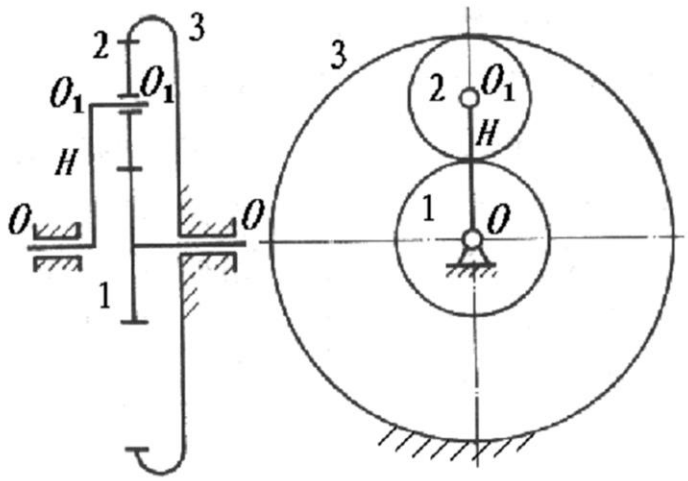
部件：2，称为行星轮

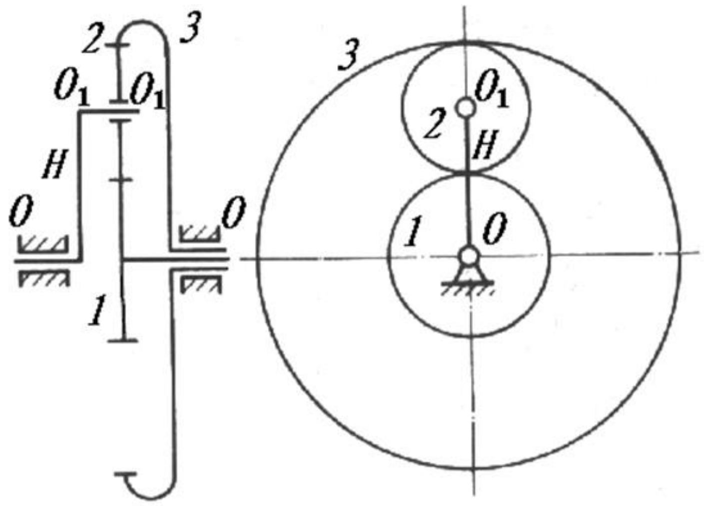



- 太阳轮与行星轮啮合
- 行星轮自转与公转
- 行星架支撑行星轮

# 周转轮系：



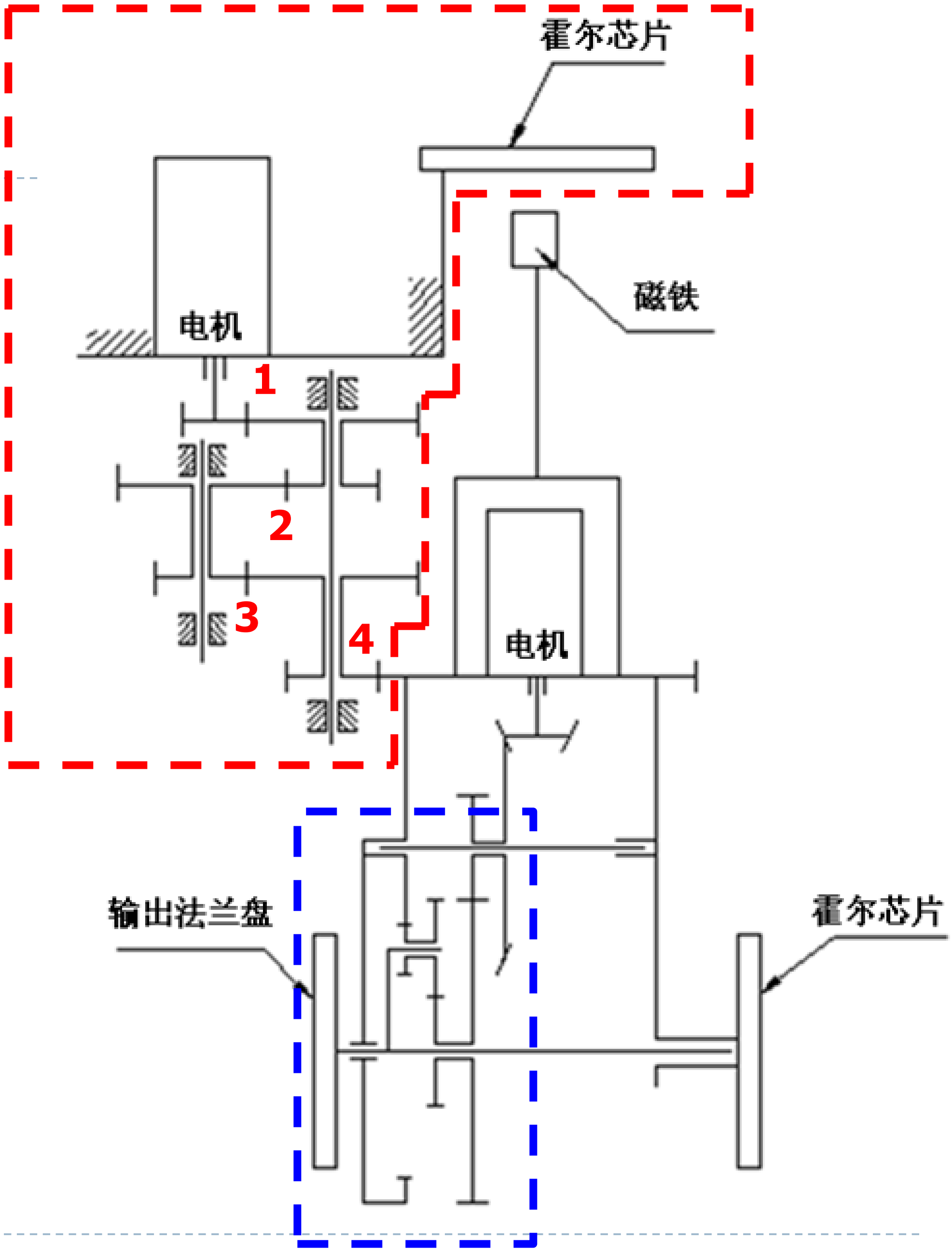

行星轮系

差动轮系

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。**

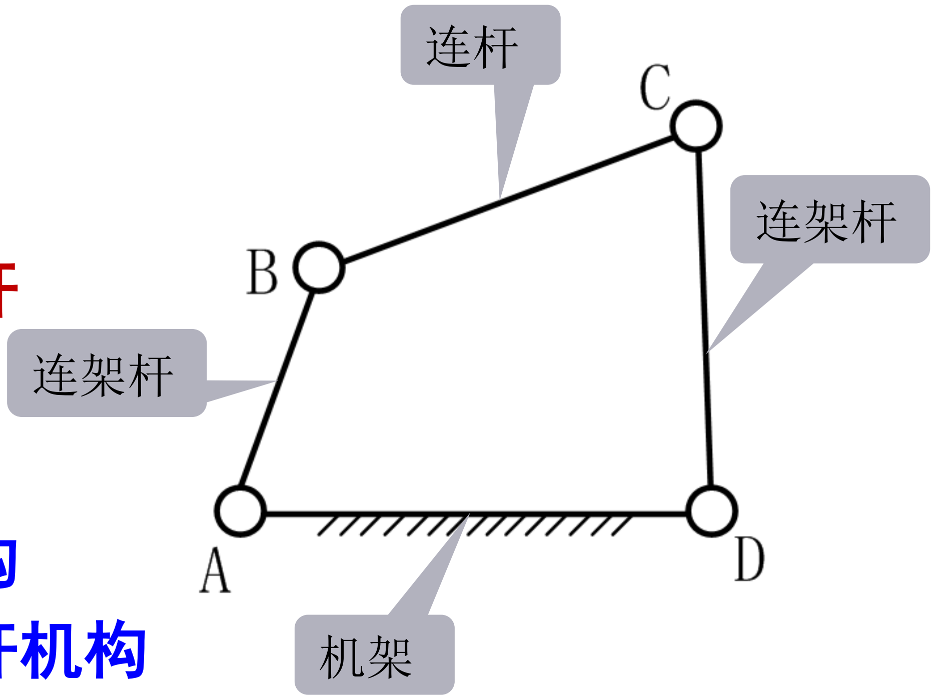
差动轮系有2DOF自由度；
**太阳轮均可动，且3个部件均可动，需要给定两个独立的运动，可用作运动的合成或分解。**

# 应用实例



# 连杆的组成

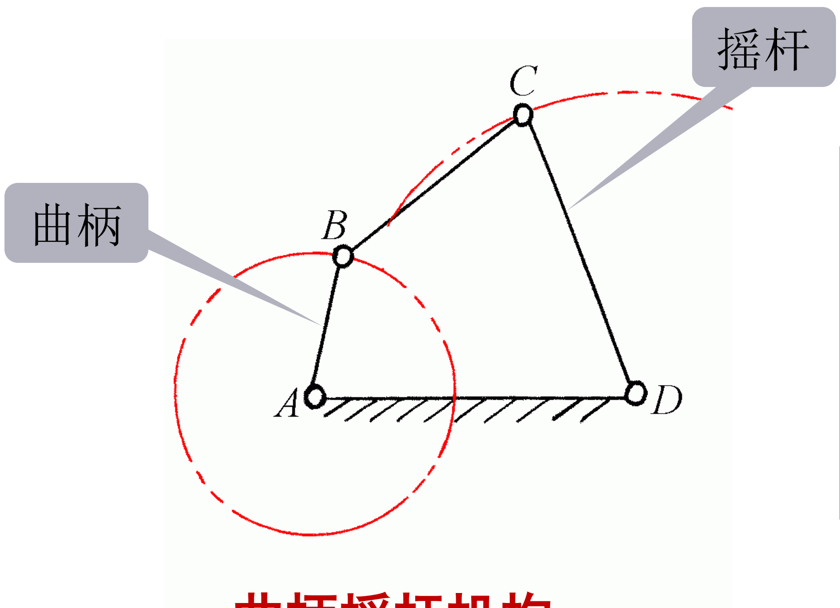
- 铰链四连杆是平面四杆机构的基本形式，其他形式可以认为是它的演化形式。
- 在右图机构中：
  - AD为机架
  - BC为连杆
  - AB、CD与机架相连为连架杆



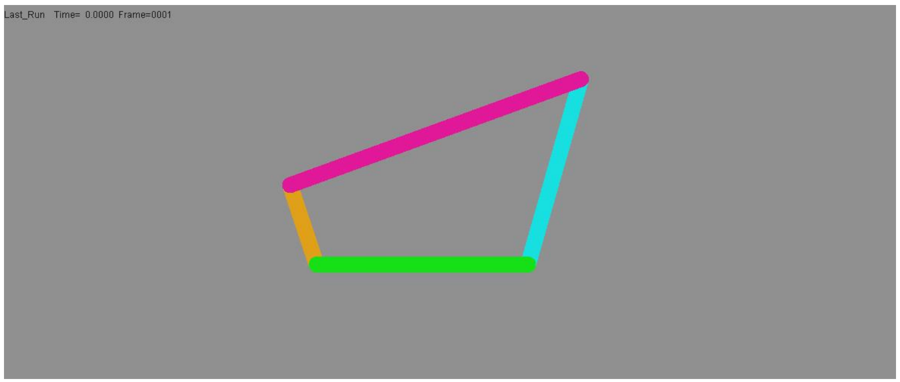

  - 能做整周回转者为曲柄机构
  - 只能一定范围摆动的为摇杆机构

# 基本形式一：曲柄摇杆机构

- **曲柄摇杆机构**：铰链四杆机构的两个连架杆中，有一个为曲柄，另一个为摇杆。

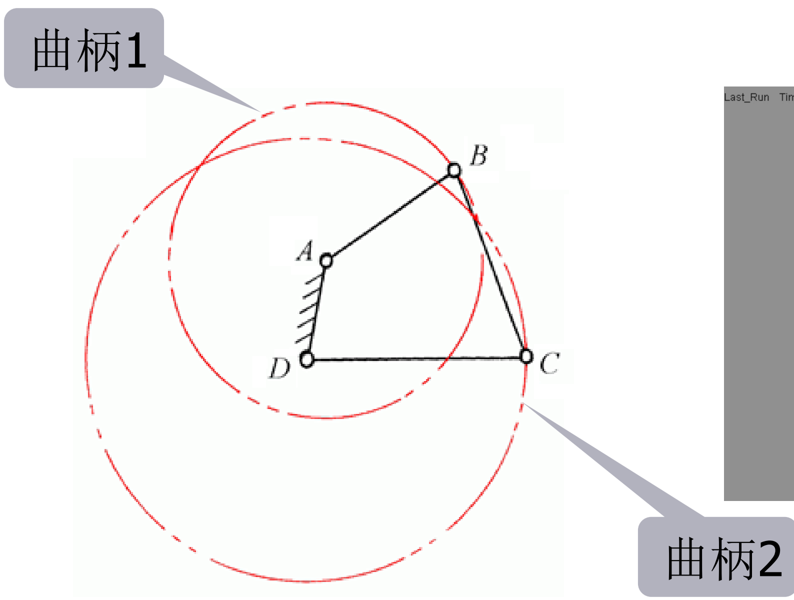



曲柄摇杆机构

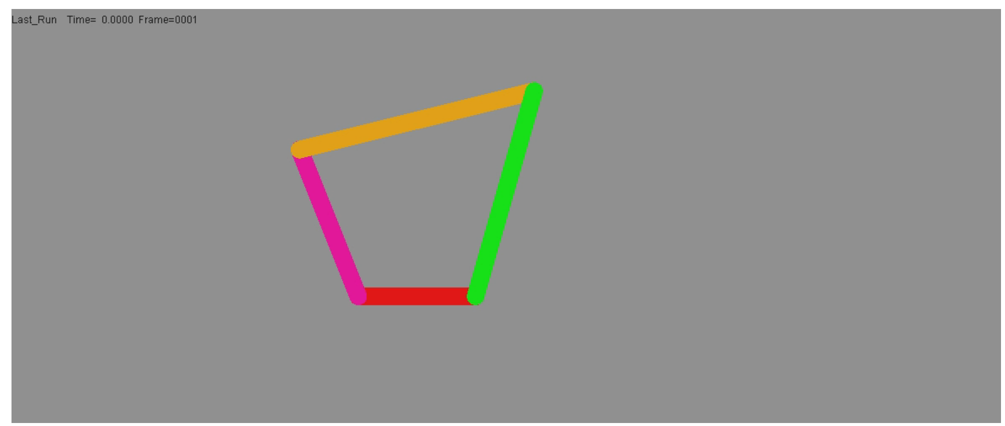


# 基本形式二：双曲柄机构

- 若铰链四杆机构中的两个连杆架均为曲柄，则称其为**双曲柄机构**。

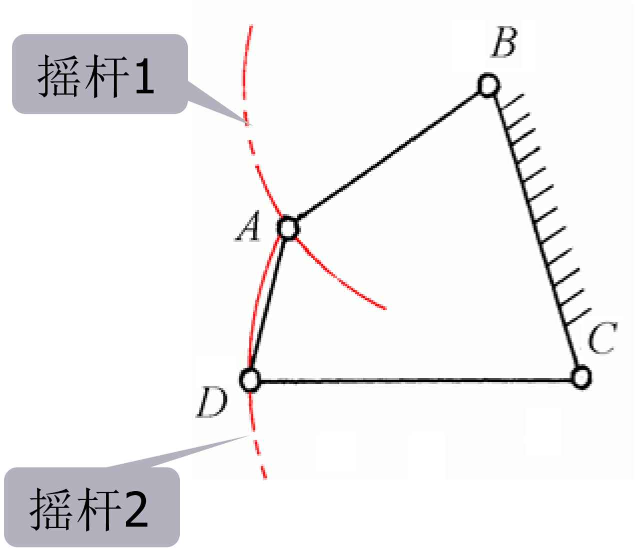



双曲柄机构

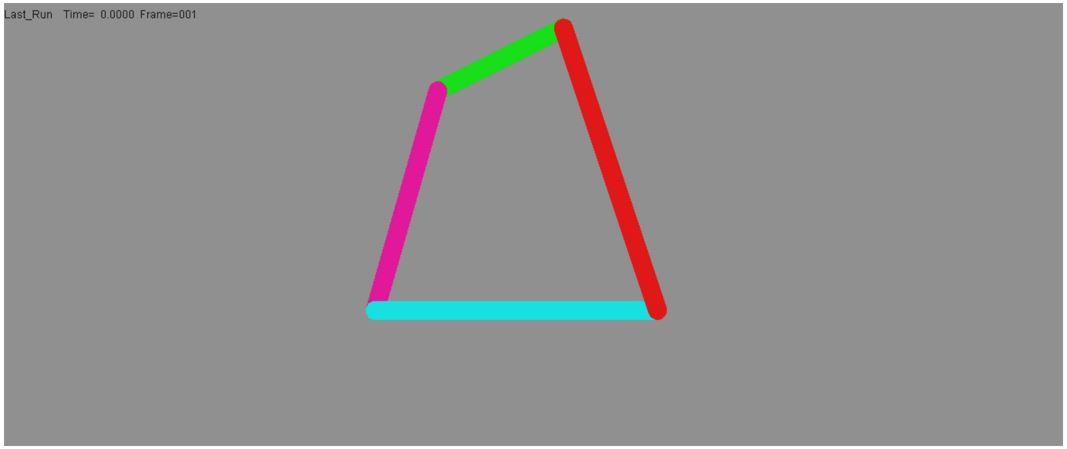


# 基本形式三：双摇杆机构

- 若铰链四杆机构中的两个连杆架均为摇杆，则称其为**双摇杆机构**。

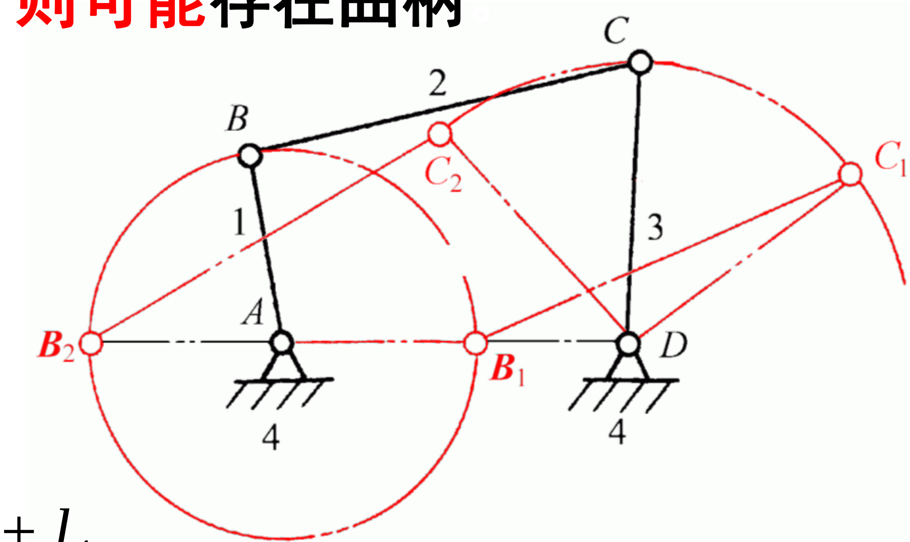



双摇杆机构



# 曲柄摇杆机构的条件

**平面四杆机构具有整转副 ➔ 则可能存在曲柄**




若连架杆1若能整周回转，
必有两次与机架共线。

由△$B_2C_2D$ 可得：

$$l_1+l_4 \le l_2 + l_3$$

由△$B_1C_1D$ 可得：

$$l_3 \le (l_4 - l_1) + l_2 \quad \Rightarrow \quad l_1 + l_3 \le l_2 + l_4$$

$$l_2 \le (l_4 - l_1) + l_3 \quad \Rightarrow \quad l_1 + l_2 \le l_3 + l_4$$

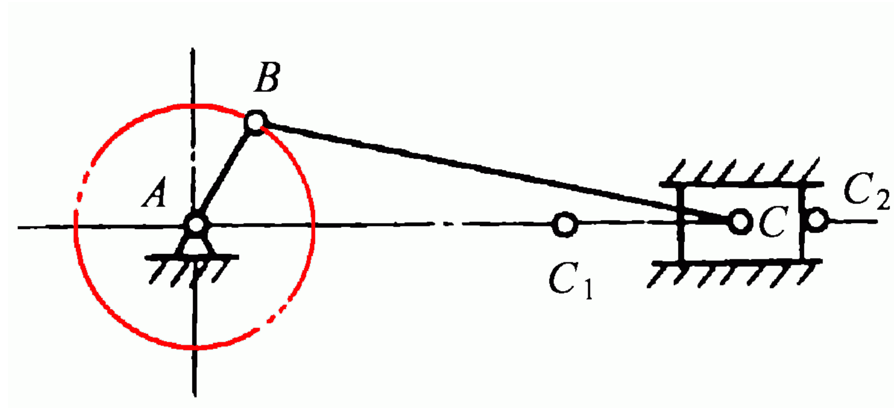
将以上三式两两相加得（满足曲柄摇杆的条件）：

$l_1 \le l_2 \quad l_1 \le l_3 \quad l_1 \le l_4$ ➔ **AB 为最短杆，为曲柄摇杆机构**

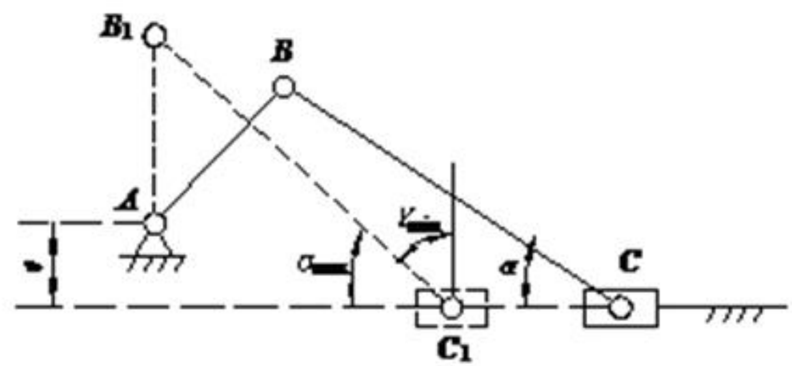
**当最短杆为连杆 $l_2$时，则为双摇杆机构！**
**当最短杆为机架 $l_4$时，则为双曲柄机构！**

# 演化形式一：曲柄滑块机构

曲柄滑块机构：

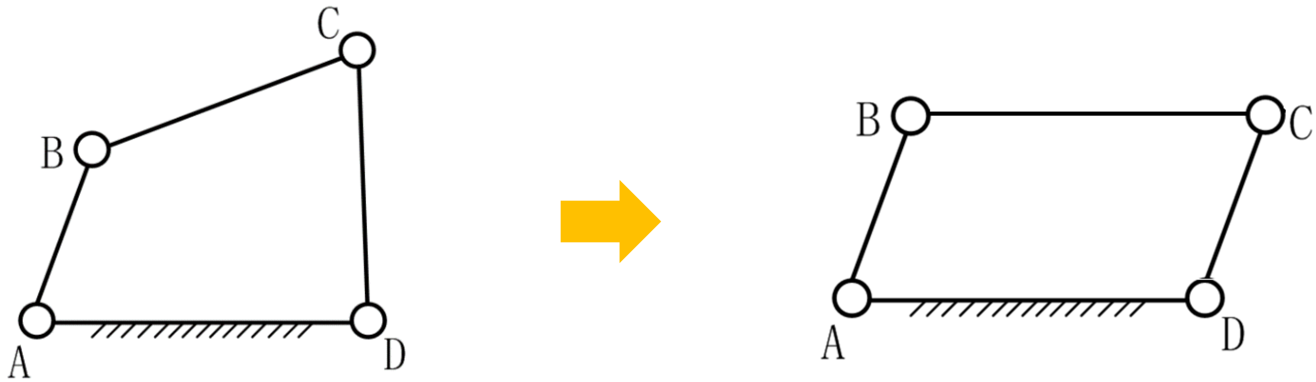


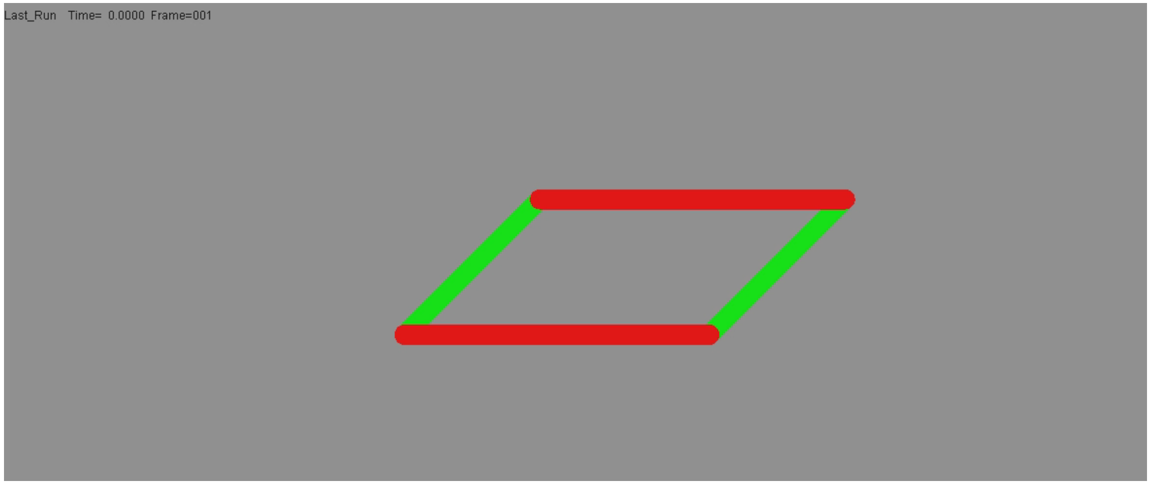

偏置曲柄滑块机构：




**移动副**可认为是回转中心由无穷远处的转动副演化而来。

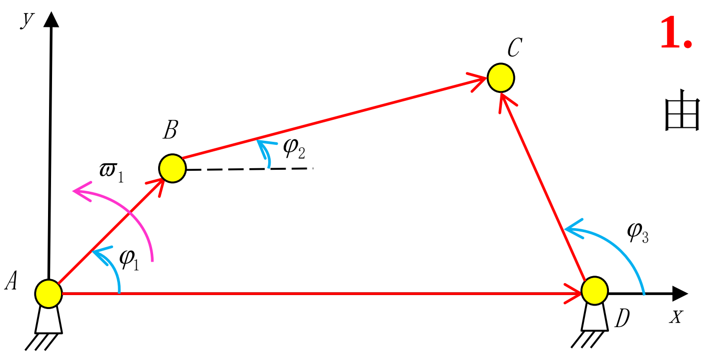
# 演化形式二：平行四边形机构



# 曲柄摇杆机构的位置分析

已知:$\omega_1$、$\varphi_1$、以及各杆的长度；求：$\varphi_3$和$\varphi_2$； $\omega_2$和$\omega_3$；$\alpha_2$和$\alpha_3$。




**1. 建立求$\varphi_3$的三角方程:**

由封闭矢量多边形ABCD可得：AB + BC = AD + DC ,即

$$l_{AB}e^{i\varphi_1}+l_{BC}e^{i\varphi_2}=l_{AD}e^{i0}+l_{DC}e^{i\varphi_3} \qquad (4\text{-}1)$$

将式（4-1）的实部和虚部分别相等可得：

$$l_{AB}\cos\varphi_1+l_{BC}\cos\varphi_2=l_{AD}+l_{DC}\cos\varphi_3 \qquad (4\text{-}2)$$

$$l_{AB}\sin\varphi_1+l_{BC}\sin\varphi_2=l_{DC}\sin\varphi_3 \qquad (4\text{-}3)$$

为了消去角，将式（4-2）和（4-3）移项再平方后相加可得：

$$l_{BC}^2=(l_{AD}+l_{DC}\cos\varphi_3-l_{AB}\cos\varphi_1)^2+(l_{DC}\sin\varphi_3-l_{AB}\sin\varphi_1)^2 \qquad (4\text{-}4)$$

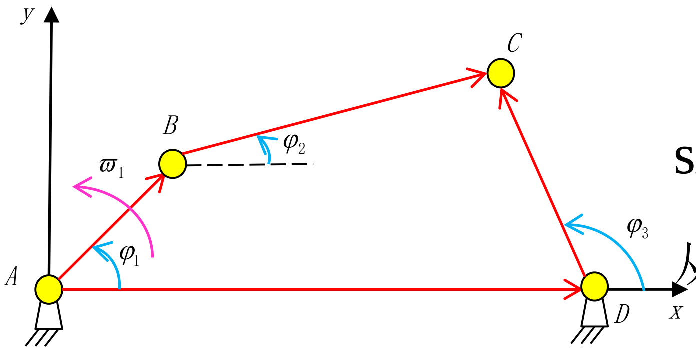
将上式改写为三角方程： $A\sin\varphi_3+B\cos\varphi_3+C=0$ （4-5）

$$A=-\sin\varphi_1 \qquad B=l_{AD}/l_{AB}-\cos\varphi_1$$

$$C=(l_{AD}^2+l_{DC}^2+l_{AB}^2-l_{BC}^2)/(2l_{AB}l_{DC})-l_{AD}\cos\varphi_1/l_{DC}$$

# 曲柄摇杆机构的位置分析

## 2. 求解$\varphi_3$的数学计算




$$A\sin\varphi_3 + B\cos\varphi_3 + C = 0 \quad (4\text{-}5)$$

$$令 x = \tan(\varphi_3/2)$$

$$\sin\varphi_3 = 2x/(1+x^2) \qquad \cos\varphi_3 = (1-x^2)/(1+x^2)$$

从而，式（4-5）可化成下列二次方程式

$$(B-C)x^2 - 2Ax - (B+C) = 0 \quad (4\text{-}6)$$

由（4-6）式解出x可得

$$\varphi_3 = 2\arctan x = 2\arctan\frac{A+(\text{sign})\sqrt{A^2+B^2-C^2}}{B-C} \quad (4\text{-}7)$$

上式中的sign=±1，表示给定$\varphi_1$时，可有两个值。

# 矢量方程解析法的步骤

步骤1、选定直角坐标系；

步骤2、选取各杆的矢量方向与转角；

步骤3、根据所选矢量方向画出封闭的矢量多边形；

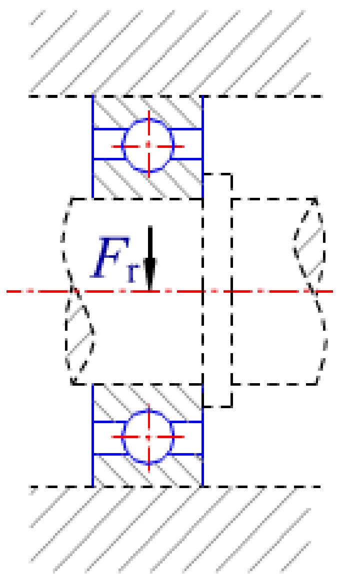
步骤4、根据封闭矢量多边形列出复数极坐标形式的矢量方程式；

步骤5、由矢量方程式的**实部和虚部分别相等**得到**位移方程式**，并求出**位置解析式**；

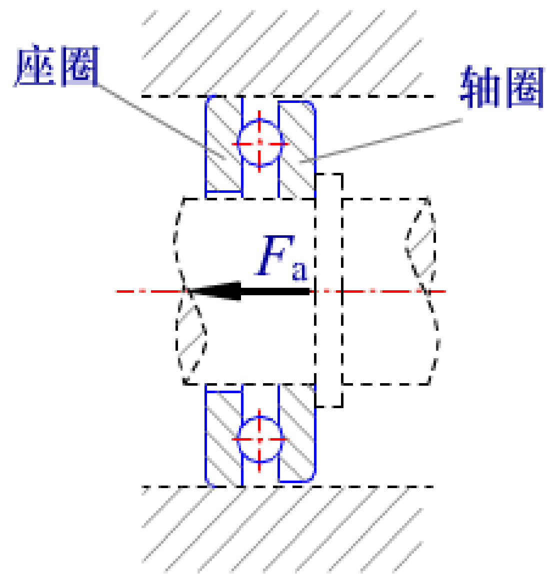
步骤6、将位移方程式对时间求导后，得出**速度方程式**，并求出**速度解析式**；

步骤7、将速度方程式对时间求导后，得出**加速度方程式**，并求出**加速度解析式**。

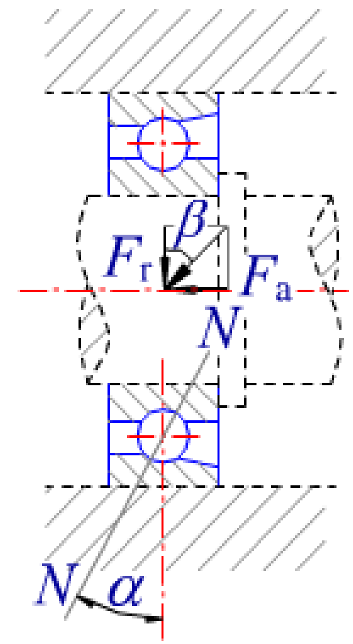
## 按可承受的载荷方向不同，滚动轴承分为三类：




径向接触轴承




轴向接触轴承




向心角接触轴承

- 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$\alpha$：滚动体的载荷方向线与轴承径向平面之间的夹角；

*$\alpha$ 越大，可以承受的轴向力越大*

# 如何在机器中合理地使用轴承？——轴承的安装和固定

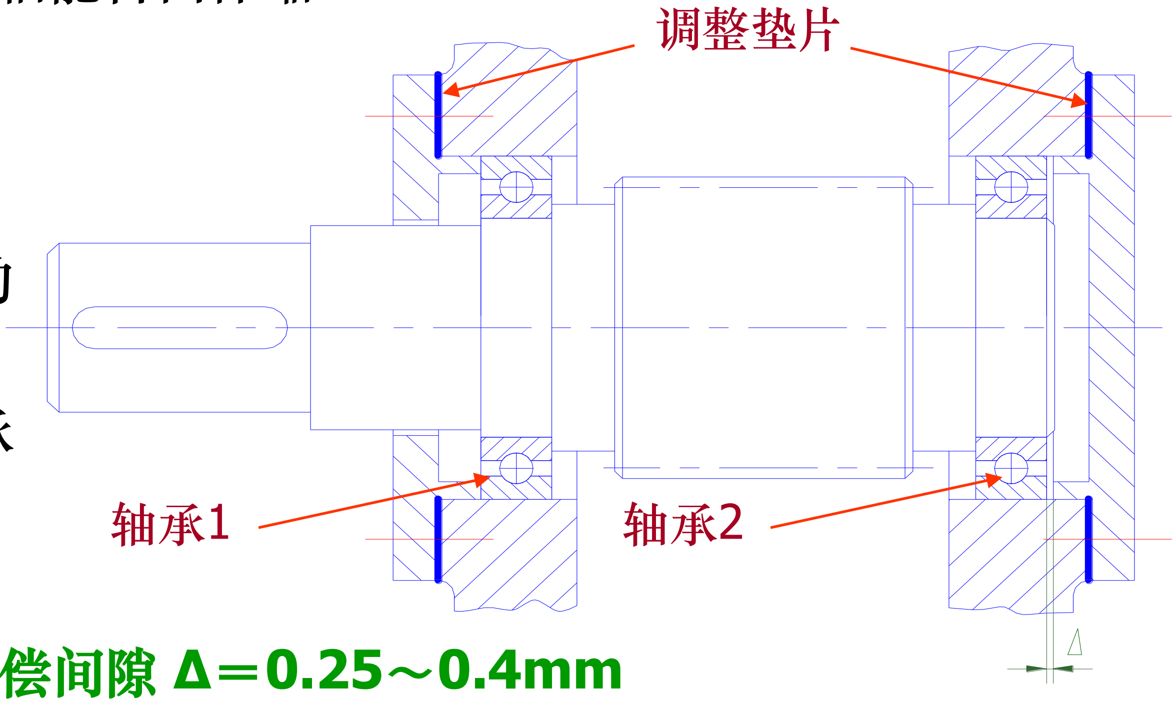
目的：通过轴承与轴和轴承座间的联接固定，使轴系在机器中有确定位置。

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 Δ＝0.25～0.4mm**

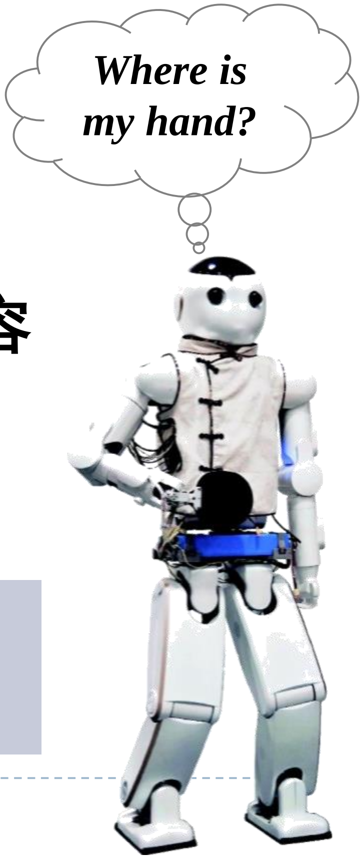
特点：结构简单，安装调整容易，适用于温度变化不大的短轴。

# 机器人运动学

- 运动学（Kinematics）: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。

- 正运动学：已知关节角，求连杆末端的位姿
- 逆运动学：已知连杆末端的位姿，求关节角度

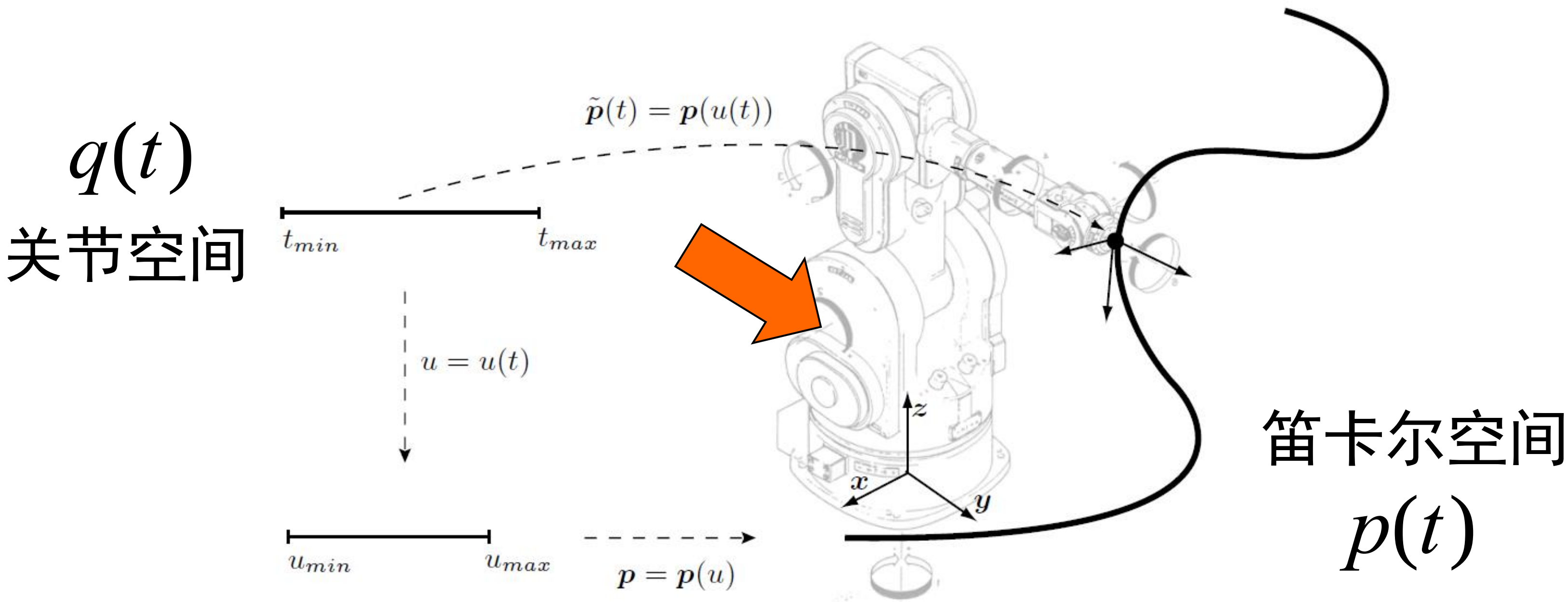
- 涉及内容：坐标变化、转动特性、空间速度等内容




运动学只研究物体的运动
而不考虑引起（或影响）这种运动的力

# 正运动学

- 给定一组关节角的值，计算工具坐标系相对于基坐标系的位置和姿态，即末端执行器位置和姿态



# 机器人逆运动学

- 逆运动学是指根据机器人末端位姿求解关节角
- 正运动学一般用于检验逆运动学是否正确
- 逆运动学的难度高于正运动学

求解结果：

无解

多解（可根据一定的原则，选择最优解）

唯一解

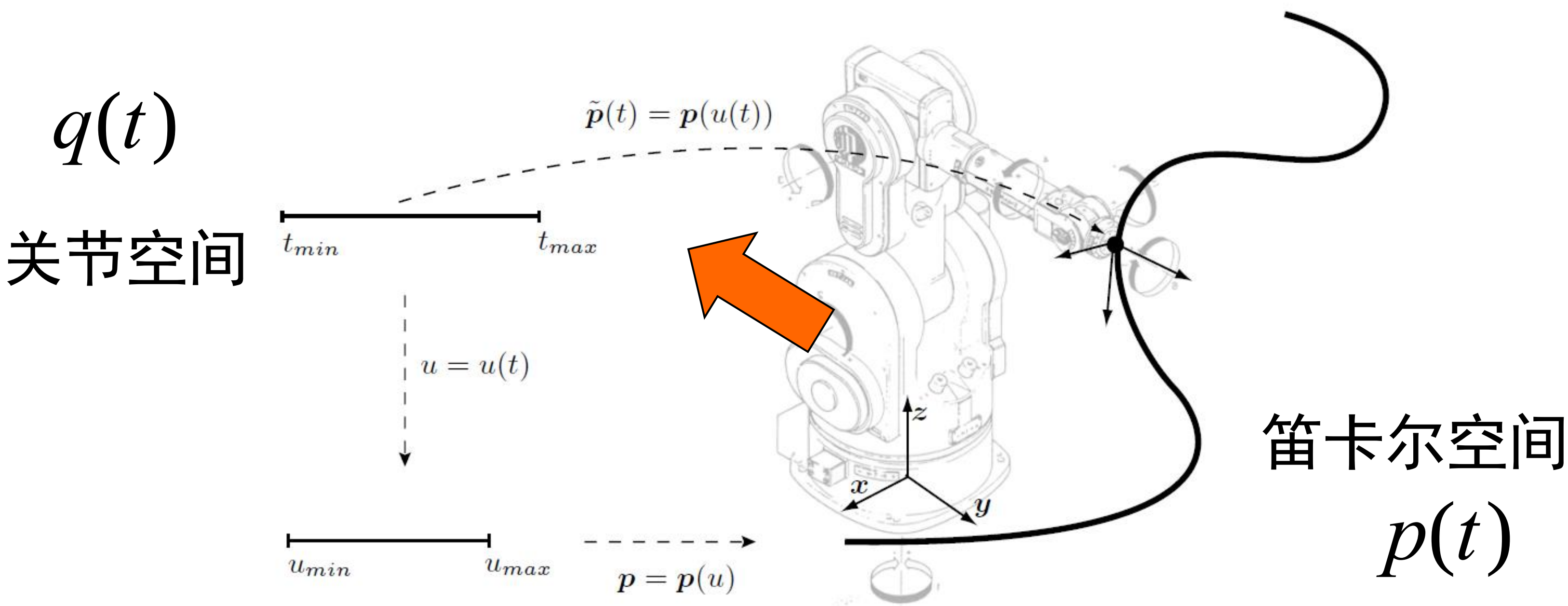
求解方法：

数值方法（需迭代，实时性差，通用性好）

解析方法（无需迭代，实时性好，通用性差）

# 逆运动学

- **给定操作臂末端执行器的位置和姿态，计算所有可达位置和姿态的关节角**

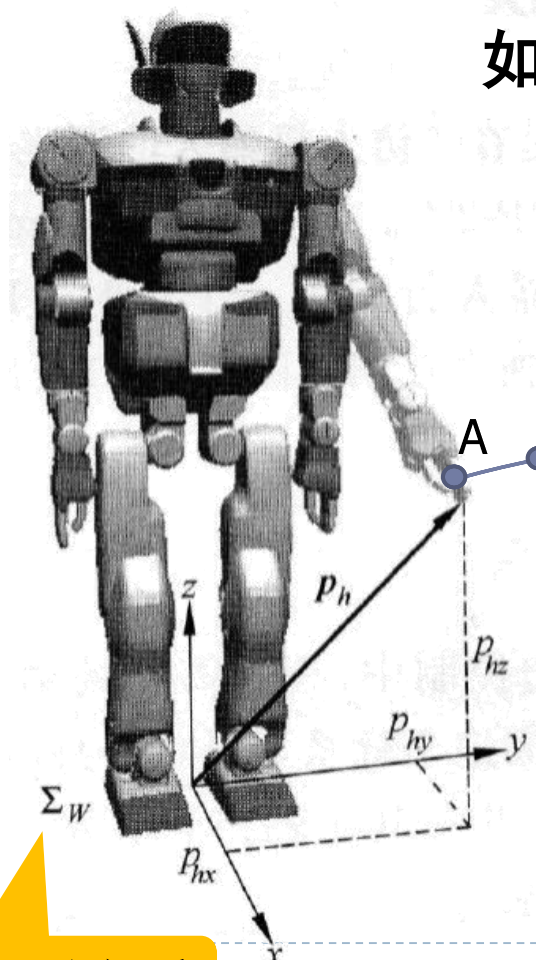



由于运动学方程是非线性的，很难得到封闭解，甚至无解同时提出了解的存在性和多解问题

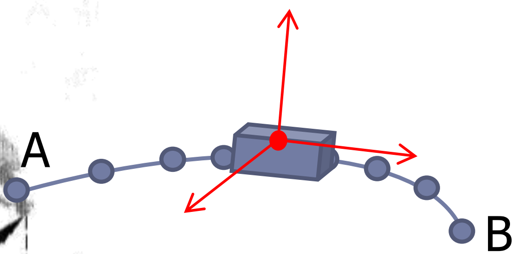
# 坐标变换

- **绝对位置:** 在世界坐标系中来描述的位置，如手臂末端的绝对位置用三维矢量表示：

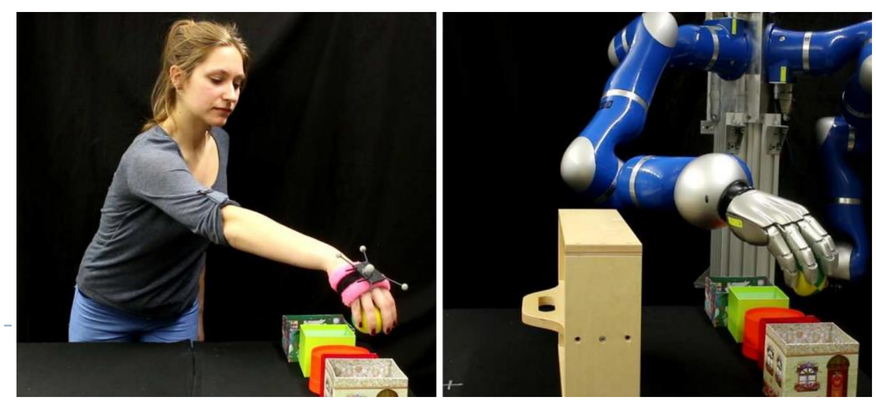
$$\boldsymbol{p}_h = \begin{bmatrix} p_{hx} \\ p_{hy} \\ p_{hz} \end{bmatrix}$$



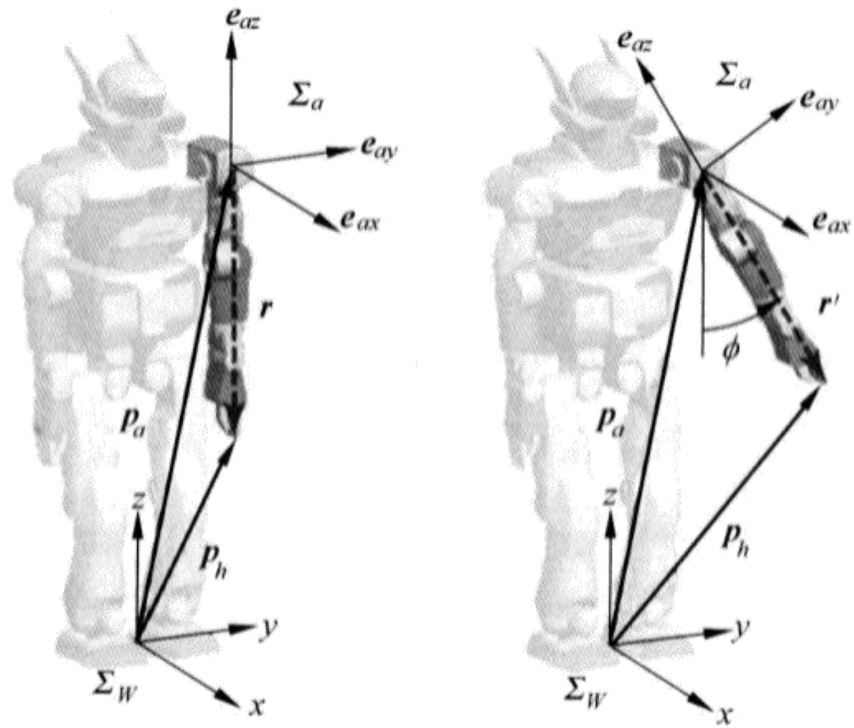

世界坐标系




前提条件：构建每个关节的坐标系（本文略）



# 坐标变换




定义手端在局部坐标系a中位置为 ${}^{a}p_h$
那么：

$$r = {}^{a}p_h$$

那么末端点在世界坐标系中的位置：

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

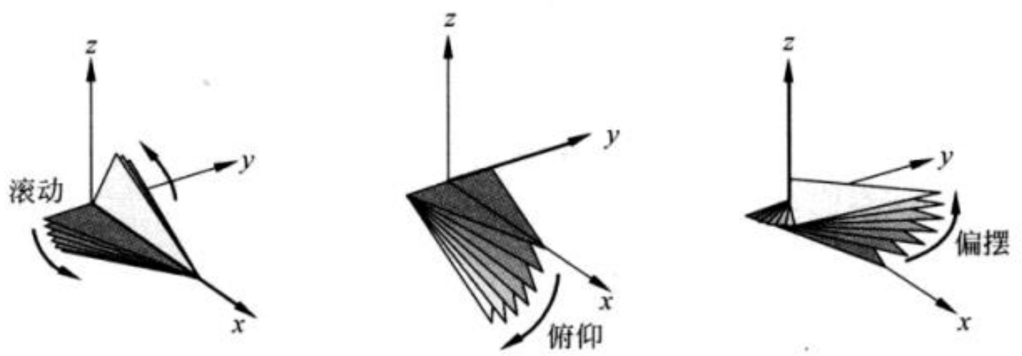
$r$ 和 $r'$ 之间的关系可表示为：

$$r' = R_a r$$

$R_a$ 称为旋转矩阵，是在局部坐标$\sum_a$中的描述。

# 转动特性

- 最基本的转动:是绕 $X$, $Y$ 和 $Z$ 轴的旋转运动，分别称为滚动（roll）、俯仰（pitch）和偏摆（yaw）




| 转　动　轴 | 名　　称 | 所 用 符 号 |
|---|---|---|
| $x$ 轴 | 滚动（roll） | $\phi$ |
| $y$ 轴 | 俯仰（pitch） | $\theta$ |
| $z$ 轴 | 偏摆（yaw） | $\psi$ |

# 转动特性

- 对应于滚动（$\phi$）、俯仰（$\theta$）和偏摆（$\psi$）的旋转矩阵依次为：

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

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

# 转动特性

- **Z-Y-X欧拉角：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：

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

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

- 利用上式，可以实现三维空间中从一个给定的姿态到任一姿态的变换。

**The End.**
**Thanks for your attention.**