

第2章：机器人机构



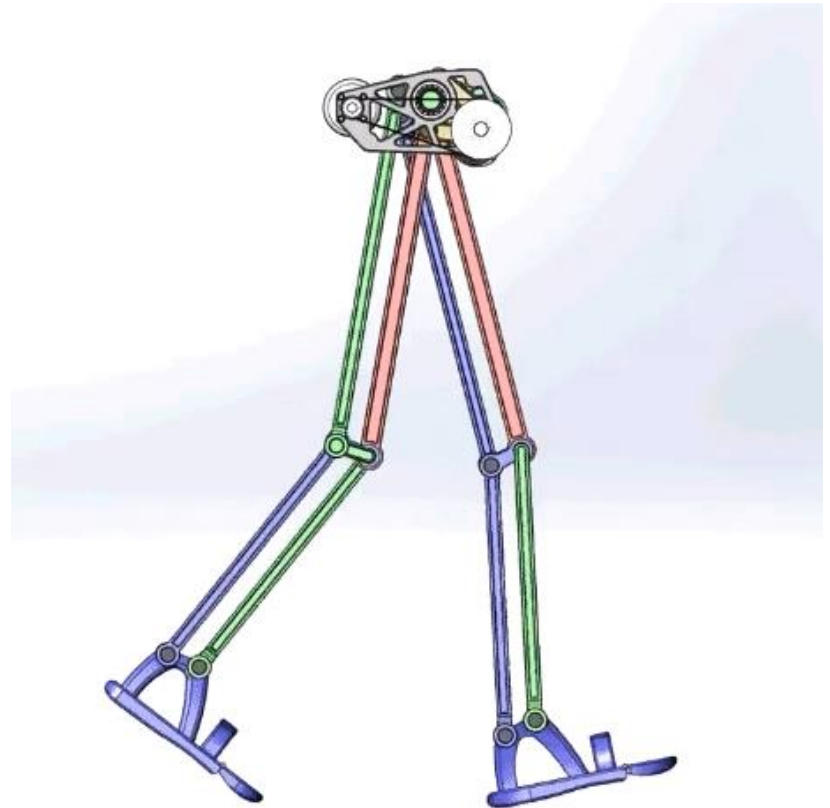
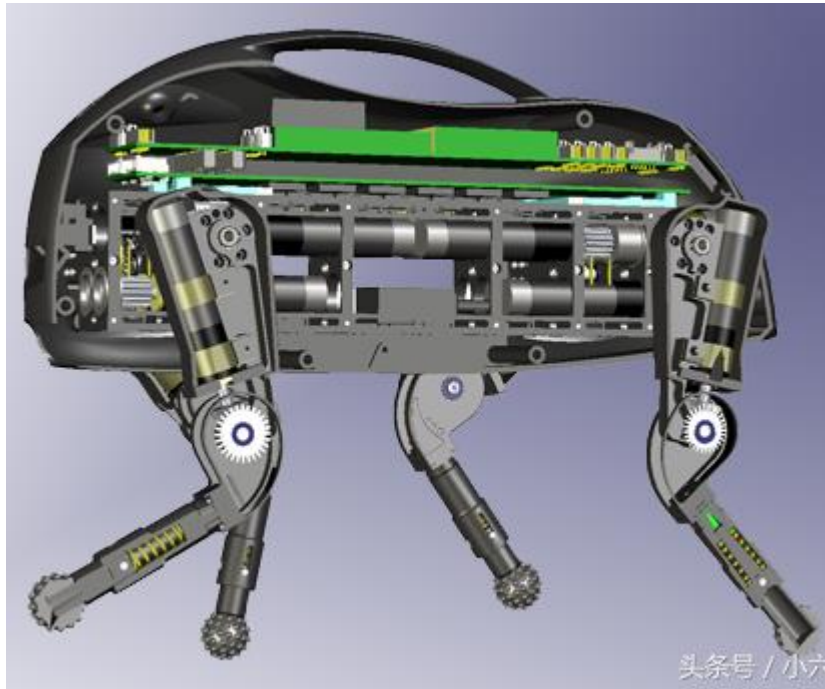
主讲：许璟、周家乐

单位：信息科学与工程学院

邮箱：jingxu@ecust.edu.cn

办公：徐汇校区 实验19楼1213室

机器人机构



本章提纲

2.1 运动副

2.2 串联机器人机构

2.3 并联机器人机构

2.4 机器人手爪

2.5 探测车悬架机构

2.6 多足步行机器人机构

2.7 RV减速器和谐波减速器

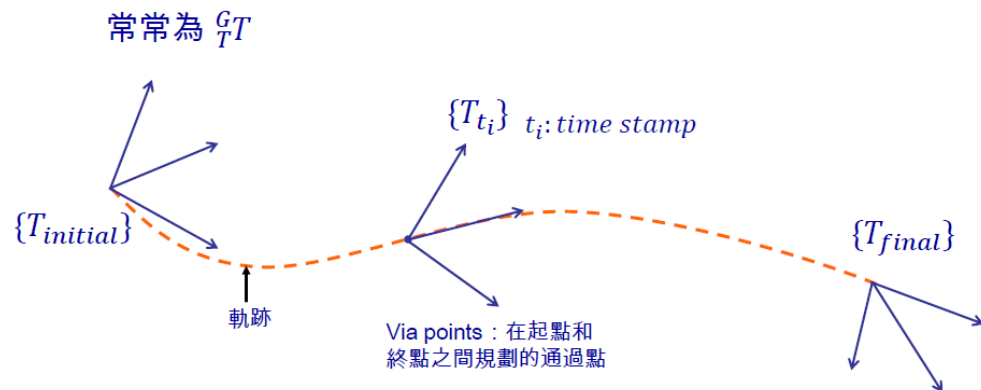
2.1 引言

- 机器人机构是机器人的本体，是机器人的执行部分，由手臂、手腕、手爪、腿、脚、步行机构等组成，实现运动机能，完成规定的操作。机械结构的类型、布局、传动方式、驱动方式直接影响机器人的性能；
- 工业机器人是由一系列连杆通过铰链顺序连接而成的操作臂，机器人机构的基本元素为连杆和铰链（又称运动副）；
- 多个连杆通过运动副以串联形式连接成不封闭的机构称为串联机构；多个连杆连接成首尾封闭的机构则称为并联机构。

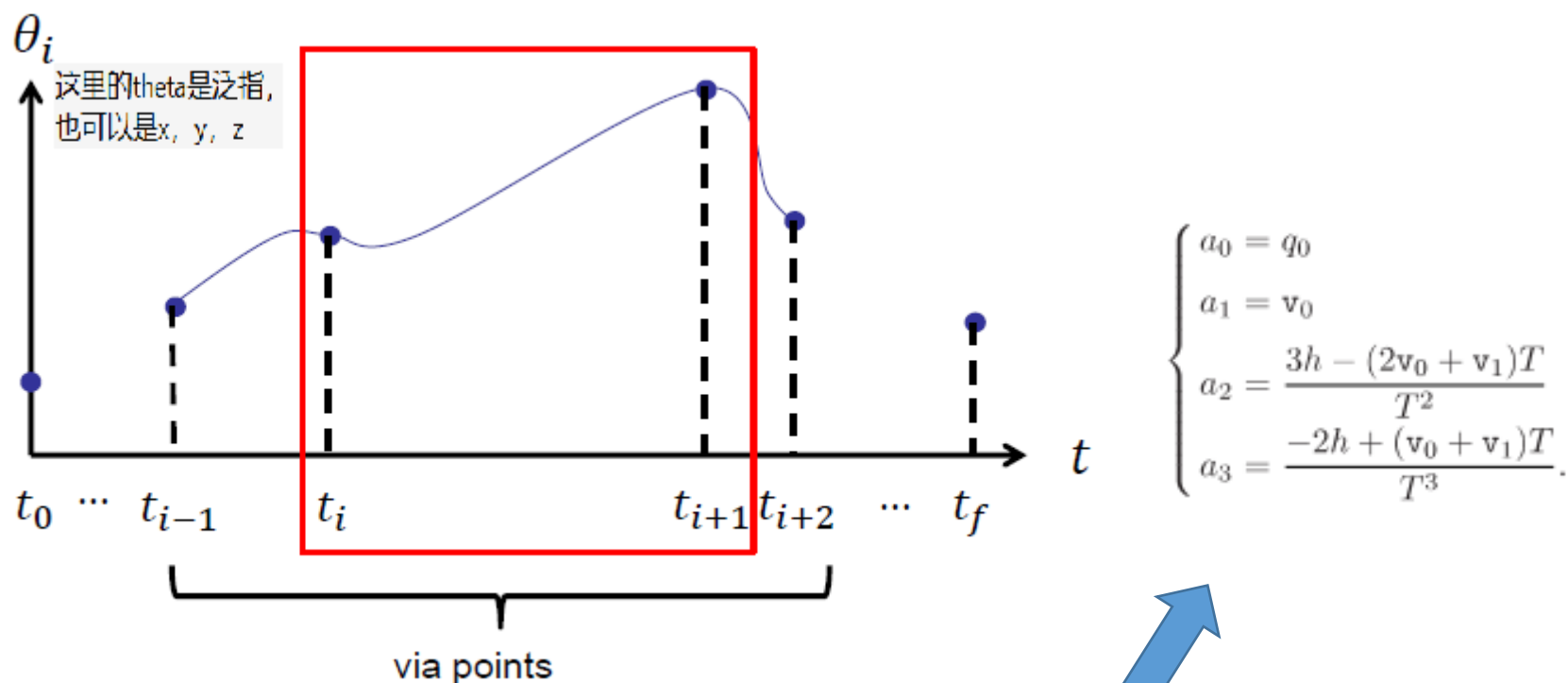
2.1 引言

手臂部件

- 手臂部件的作用是**支撑腕部和手部**，并带动它们在空间运动。
- 机器人的臂部包括臂杆以及与其伸缩、屈伸或自转等运动有关的构件，如传动机构、驱动装置、导向定位装置、支撑联接和位置检测元件等。此外，还有与腕部或手臂的运动和联接支撑等有关的构件、配管配线等。
- **机器手臂的轨迹规划问题**则是机器手臂的**核心问题**所在，因此轨迹规划的好坏直接决定了机器手臂的好坏。
- 机器人手臂的轨迹是指机器人在运动过程中**每个关节自由度的位置、速度与加速度关于时间的函数曲线**，用函数插值等方法来构成轨迹的方法称为轨迹规划。



2.1 引言



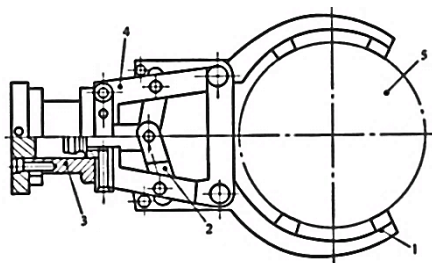
轨迹规划曲线—三次多项式

$$q(t) = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 + a_3(t - t_0)^3, \quad t_0 \leq t \leq t_1 \quad (2.1)$$

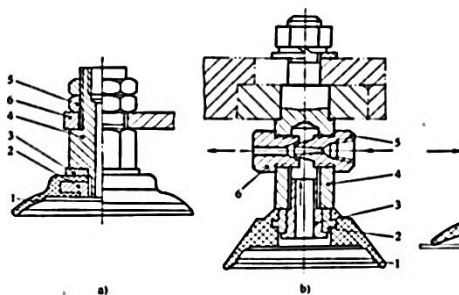
2.1 引言

手部结构

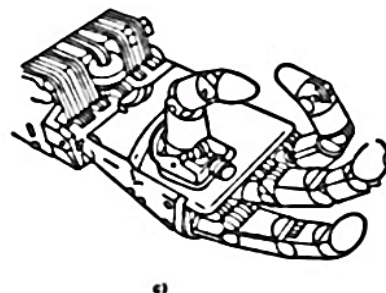
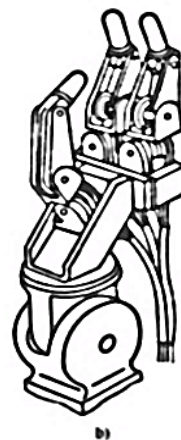
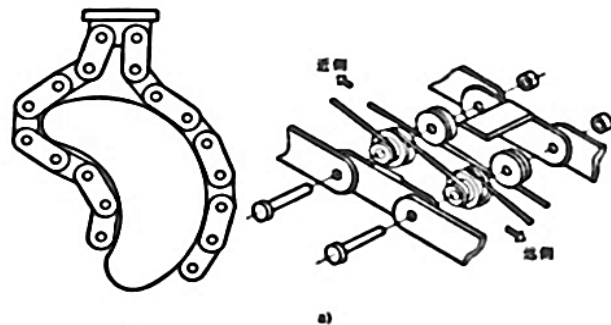
□ 机器人的手部是**末端操作器**，从功能和形态上看，它可分为工业机器人的手部和仿人机器人的手部。常用的手部按其握持原理可以分为夹持类和吸附类两大类。



1. 夹钳式



2. 吸附类



(1) 柔性手 (2) 多指灵活手

2.1 引言

手腕部件

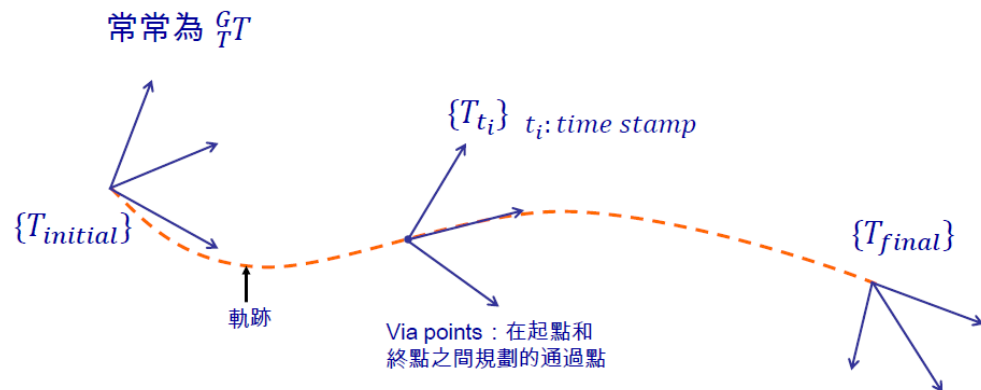
- 单一的翻转功能：手腕关节轴线与手臂的纵轴线共线，常回转角度不受结构限制，可以回转 360° 以上。运动用翻转关节（R关节）实现。
- 单一的俯仰功能：手腕关节轴线与手臂及手的轴线相互垂直，转角度受结构限制，通常小于 360° 。该运动用折曲关节（B关节）实现。
- 单一的偏转功能：手腕关节轴线与手臂及手的轴线在另一个方向上相互垂直；转角度受结构限制，通常小于 360° 。该运动用折曲关节（B关节）实现。



2.1 引言

手臂部件

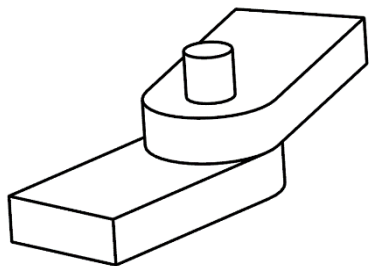
- 手臂部件的作用是**支撑腕部和手部**，并带动它们在空间运动。
- 机器人的臂部包括臂杆以及与其伸缩、屈伸或自转等运动有关的构件，如传动机构、驱动装置、导向定位装置、支撑联接和位置检测元件等。此外，还有与腕部或手臂的运动和联接支撑等有关的构件、配管配线等。
- **机器手臂的轨迹规划问题**则是机器手臂的**核心问题**所在，因此轨迹规划的好坏直接决定了机器手臂的好坏。
- 机器人手臂的轨迹是指机器人在运动过程中**每个关节自由度的位置、速度与加速度关于时间的函数曲线**，用函数插值法等方法来构成轨迹的方法称为轨迹规划。



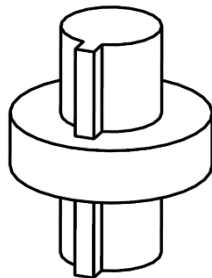
2.1 运动副

- 低副：两连杆之间面接触——接触面压强低
- 高副：两连杆之间线/点接触——接触面压强高

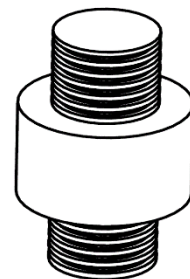
六种常见的低副机构



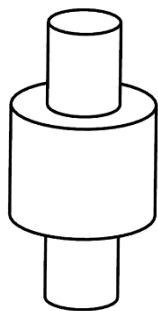
旋转副 (R)
1个自由度



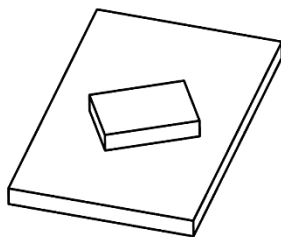
移动副 (P)
1个自由度



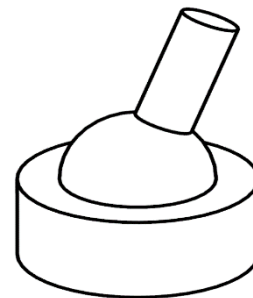
螺旋副 V (H)
1个自由度



圆柱副 (C)
2个自由度

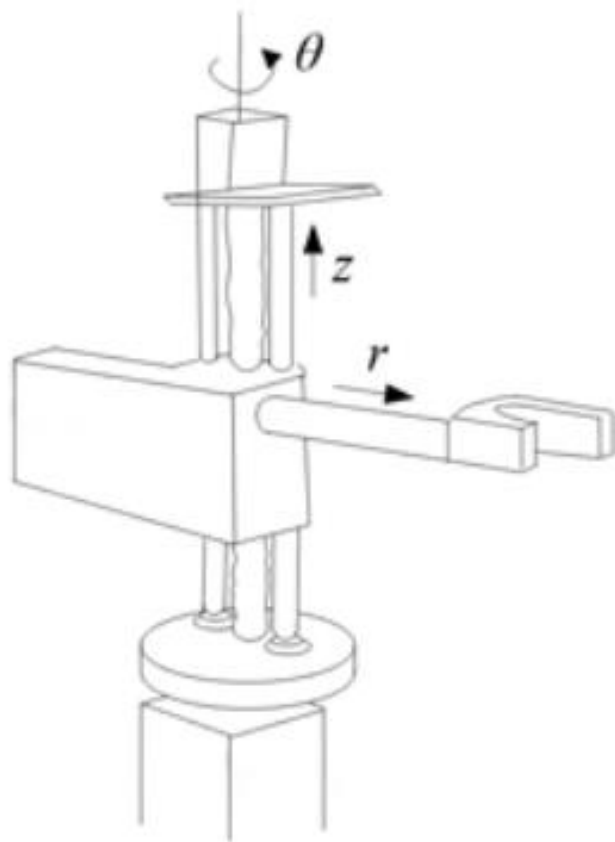


平面副 (E)
3个自由度

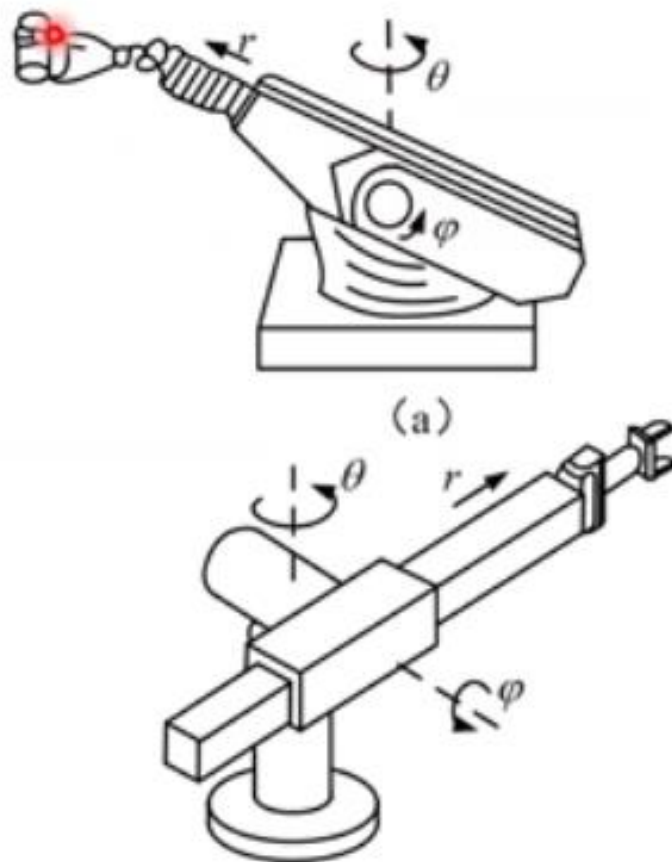


球面副 (S)
3个自由度

2.2 串联机构



圆柱坐标式机器人



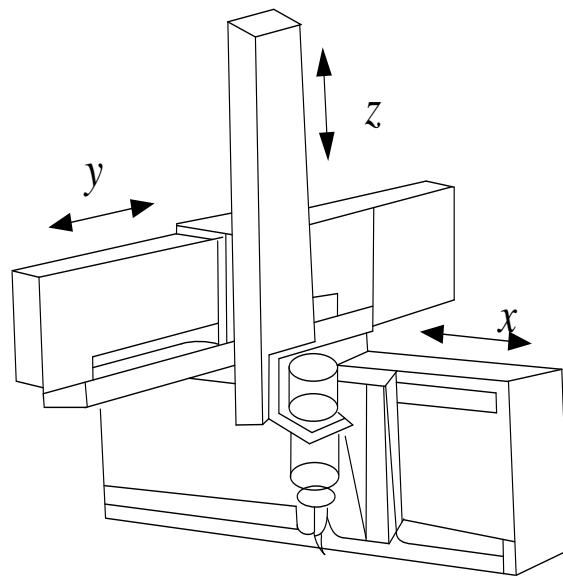
球（极）坐标式机器人：工程
机械/Stanford机器人

2.2 串联机构

- 串联机器人：最常见的关节（运动副）为**旋转副**和**移动副**
- 旋转副/移动副有1个自由度：关节数等于它的自由度数
- 刚体在空间有6个自由度：完成作业任务需要6个自由度
- 定位机构：手臂有3个关节，用以改变**手腕中心点位置**
- 定向机构：手腕有3个关节，用以改变**末端执行器姿态**

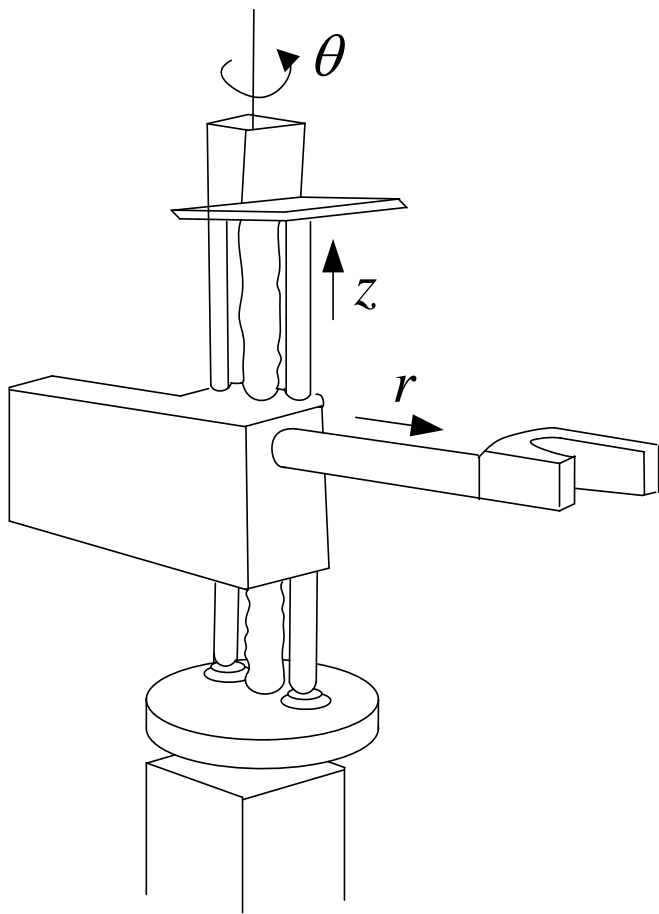
机器人类型	关节1	关节2	关节3	旋转关节
直角坐标式	P	P	P	0
圆柱坐标式	R	P	P	1
球坐标式	R	R	P	2
SCARA	R	R	P	2
关节式	R	R	R	3

P表示平移、R表示旋转

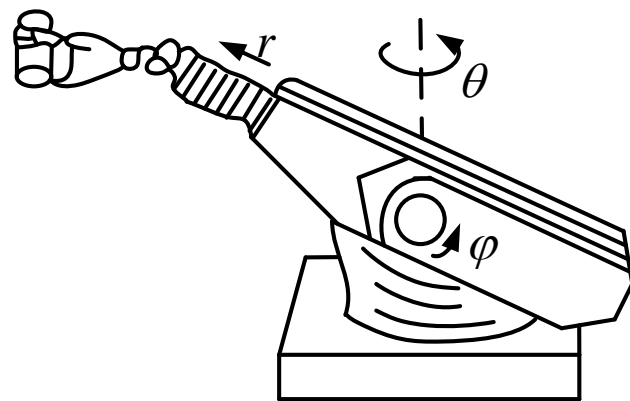


直角坐标式机器人：CMM

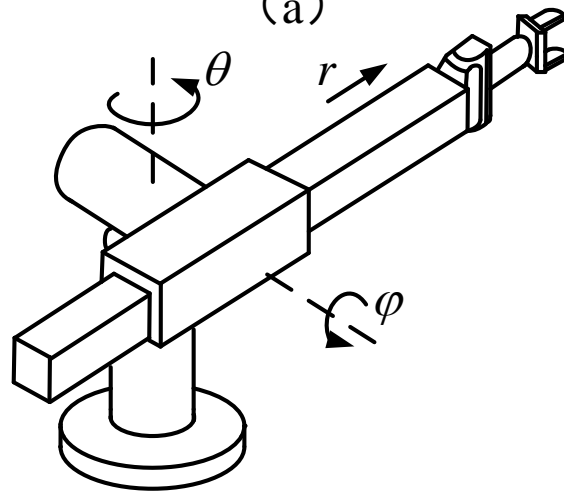
2.2 串联机构



圆柱坐标式机器人

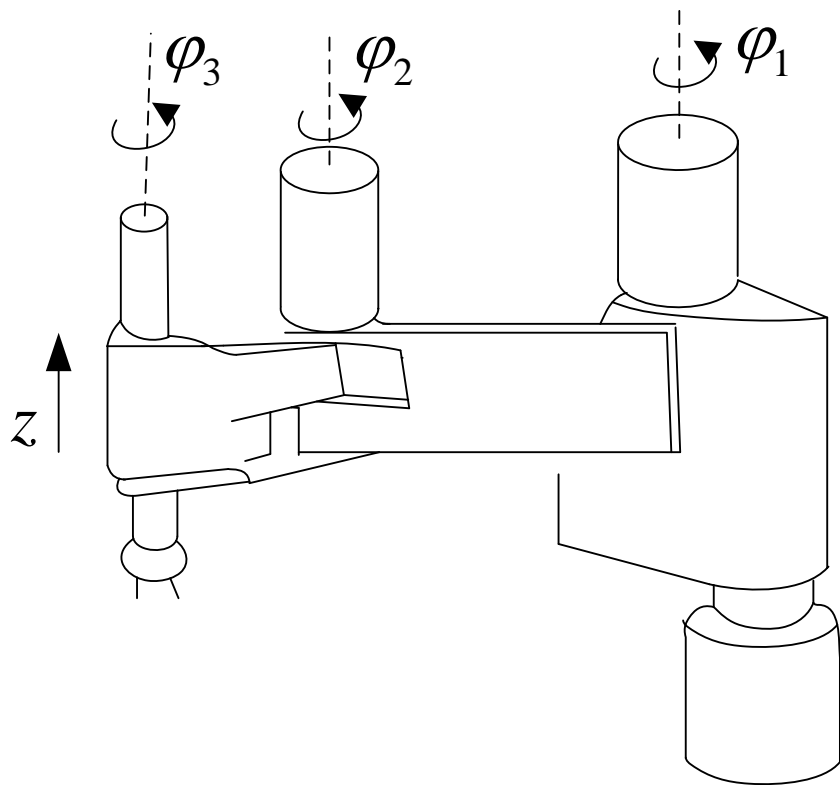


(a)



球（极）坐标式机器人：工程
机械/Stanford机器人

2.2 串联机构

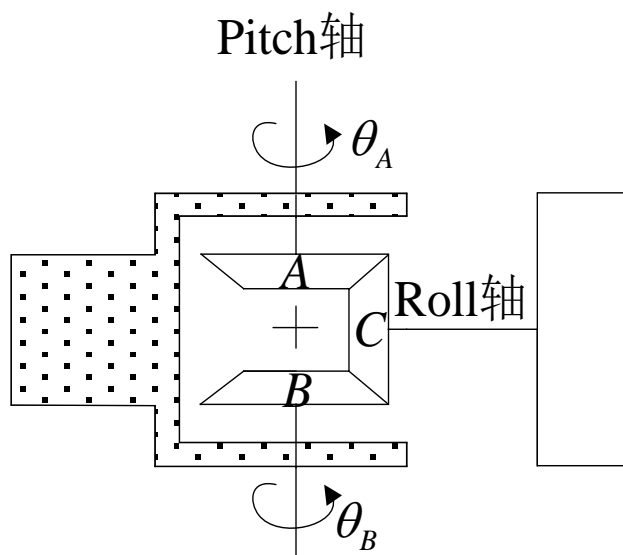


SCARA机器人

2.2 手腕形式

机器人手腕：是手臂与手爪之间的衔接部分，用于改变手爪在空间的方位，通常由**2个或3个相互垂直的关节轴**组成；

- 2自由度球形手腕：3个锥齿轮组成，齿轮C与工具Roll轴固接，齿轮A、B通过链传动与2个马达相连—差动机构。**AB同速同向转--绕P轴转；AB同速反向转--绕R轴转**

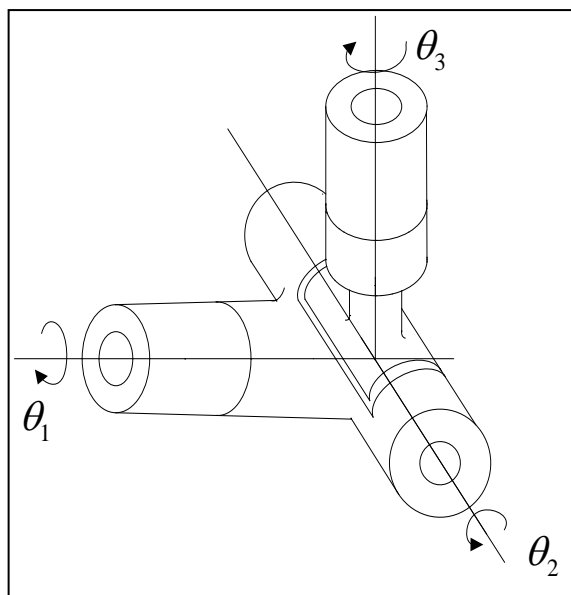


(a) Pitch-roll球形手腕

2.2 手腕形式

机器人手腕：是手臂与手爪之间的衔接部分，用于改变手爪在空间的方位，通常由2个或3个相互垂直的关节轴组成；

- **三轴垂直相交手腕：3个转动副组成，任一转动副轴线与另外两个转动副轴线所在的平面垂直**



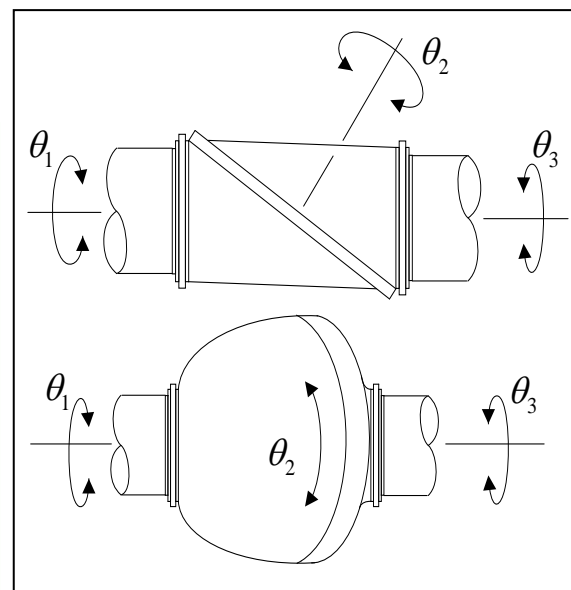
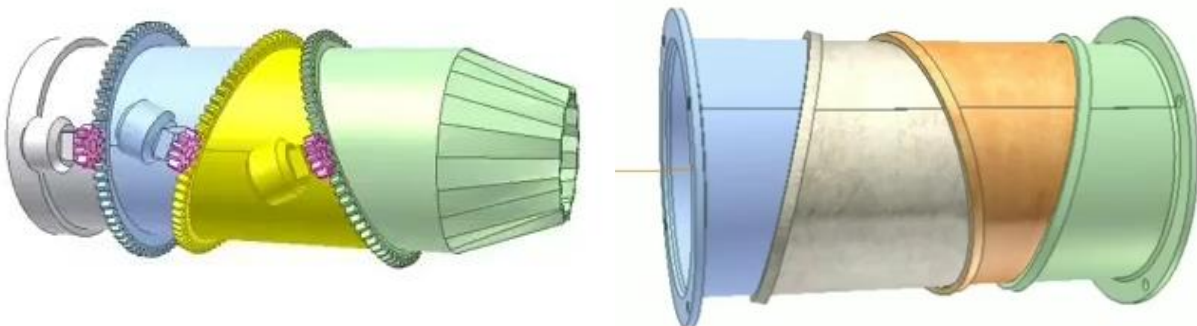
(b) 三轴垂直相交手腕

2.2 手腕形式

机器人手腕：是手臂与手爪之间的衔接部分，用于改变手爪在空间的方位，通常由**2个或3个相互垂直的关节轴**组成；

- **可连续转动手腕：**4个连杆以空间交错轴的形式连接，三个转动副可连续整周转动

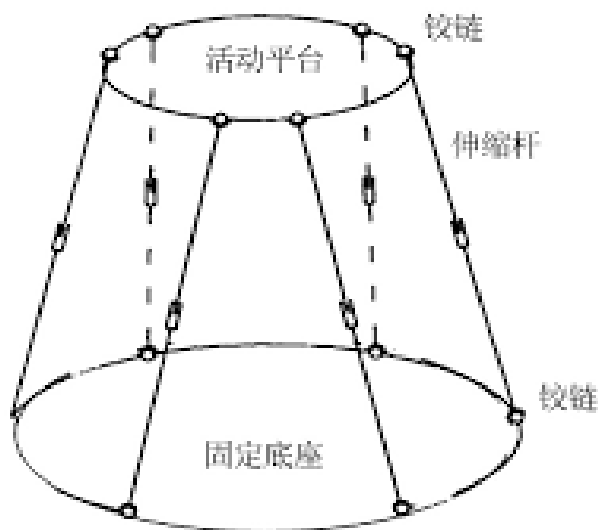
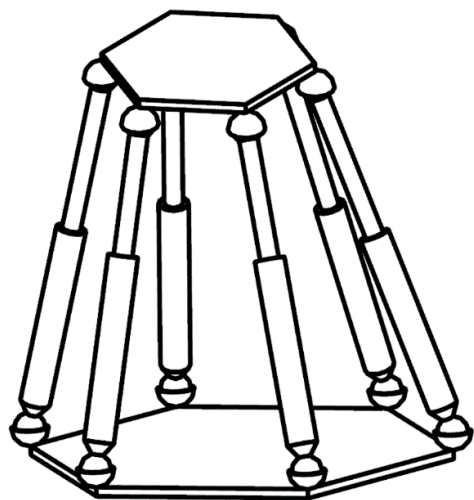
美国五代机“F35B”发动机尾喷口工作原理



(c) 可连续转动手腕

2.3 并联机构

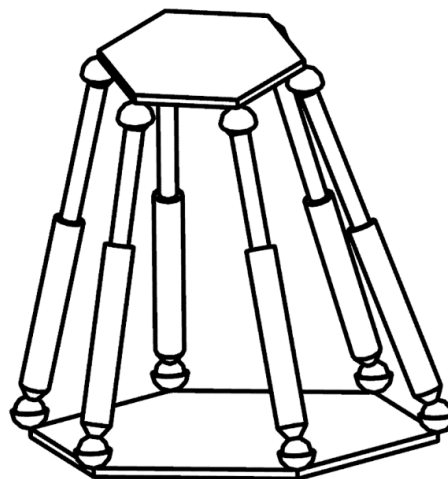
- 闭链机构的典型代表为并联机构，**并联机构刚性高**，但限制了关节的活动范围。
- Stewart并联机构由上部的动平台、下部的静平台和连接动静平台的**6个完全相同的支链**组成，每个支链有1个移动副；每个支链分别**通过两个球副与上下两个平台相连**；
- 这种操作臂将手臂3个自由度和手腕的3个自由度集成在一起，具有**刚度高**特点，但运动范围十分有限；
- 运动学**反解特别简单**；而运动学**正解十分复杂**，有时还不具备封闭的形式



Stewart并联机构

2.3 并联机构

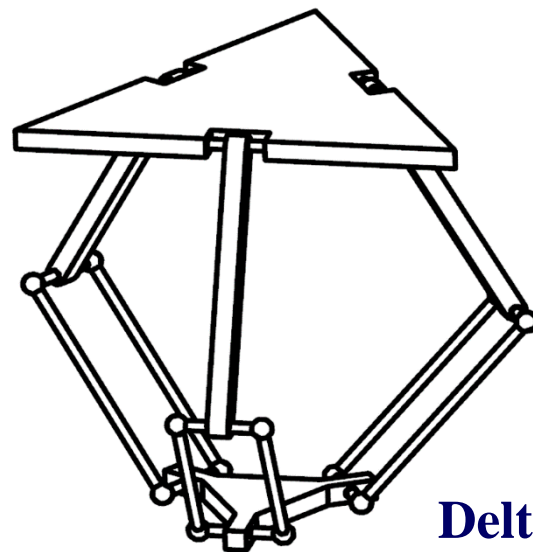
- 闭链机构的典型代表为并联机构，**并联机构刚性高**，但限制了关节的活动范围。
- Stewart并联机构由上部的动平台、下部的静平台和连接动静平台的**6个完全相同的支链**组成，每个支链有1个移动副；每个支链分别**通过两个球副与上下两个平台相连**；
- 这种操作臂将手臂3个自由度和手腕的3个自由度集成在一起，具有**刚度高**特点，但运动范围十分有限；
- 运动学**反解特别简单**；而运动学**正解十分复杂**，有时还不具备封闭的形式



(a) Stewart并联机构

2.3 并联机构

- Delta并联机构由**上部的静平台与下部的动平台**及3条完全相同的支链组成;
- 每条支链都由**1个定长杆和1个平行四边形机构**组成, **定长杆与上面的静平台用转动副连接, 平行四边形机构与动平台及定长杆均以转动副连接**, 这3处转动副轴线相互平行;
- Delta并联机构运动部分的转动惯量很小, 适于高速和高精作业的要求, 广泛应用于轻工业生产线 (相机等智能单元)



Delta并联机构

2.3 并联机构

- **自由度 (DOF)：** 机构的自由度是指确定机构位形所需独立参数的数目，对串联机器人而言，自由度一般是指机器人末端执行器相对于基座的自由度；对并联机器人而言，自由度是指动平台相对静平台的自由度；
- **DOF=6的机构称为满自由度机构，DOF大于6的机构称为冗余自由度机构，DOF小于6的机构称为欠自由度机构；**
- **自由度计算CGK公式（无虚约束和局部自由度）；**

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

其中 d 为机构阶数（对于平面机构 $d=3$ 、对于空间机构 $d=6$ ）， 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

- **试计算Stewart和Delta自由度数？注意虚约束与局部自由度**

2.3 并联机构

Stewart并联机构

六轴并联式空间机构

- 可广泛应用到各种训练模拟器中，如飞行模拟器、汽车驾驶模拟器、地震模拟器、卫星、导弹等飞行器、娱乐设备(动感电影摇摆台)等领域中。在加工业可制成六轴联动机床、机器人等。

$$\sigma = 6m - \sum_{i=1}^n p_i$$

式中： σ 表示机构的自由度， m 表示活动构件总数， n 表示运动副件的个数， p_i 表示第 i 个运动副的限制自由度数。

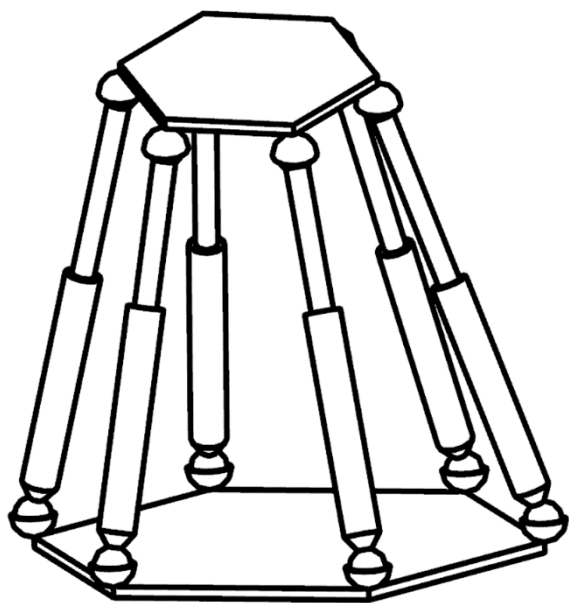
- 虎克铰链的限制自由度数为4，球铰链的限制自由度数为3，伸缩缸体的限制自由度数为5。传统的六自由度并联机器人活动构件的总数一般为13个。
综上，六自由度并联机器人的自由度为： $6*13-(6*3+6*4+6*5)=6$

Delta并联机构

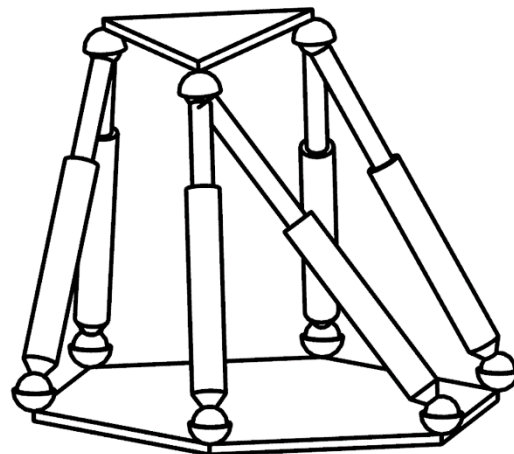
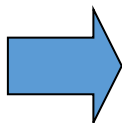
三自由度并联式空间机构

2.3 并联机构构型演变 (Stewart)

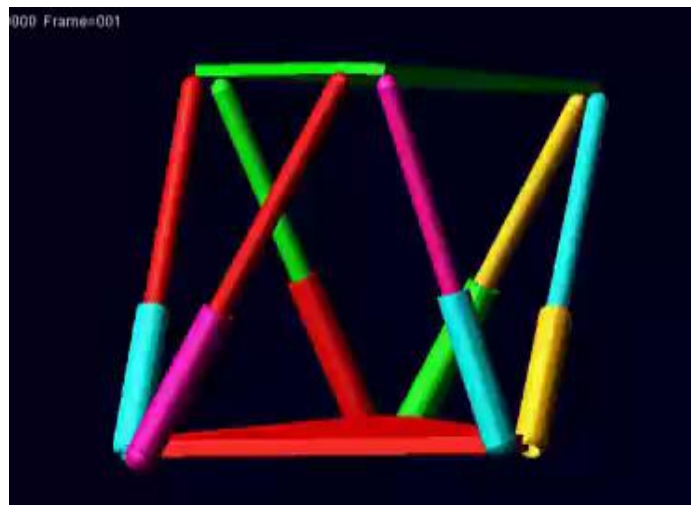
- 改变杆件分布方式：理论上**联接动平台与静平台的6个杆件可任意布置**，在原有6-6型可以衍生多种6自由度并联机构



6-SPS型
6-6

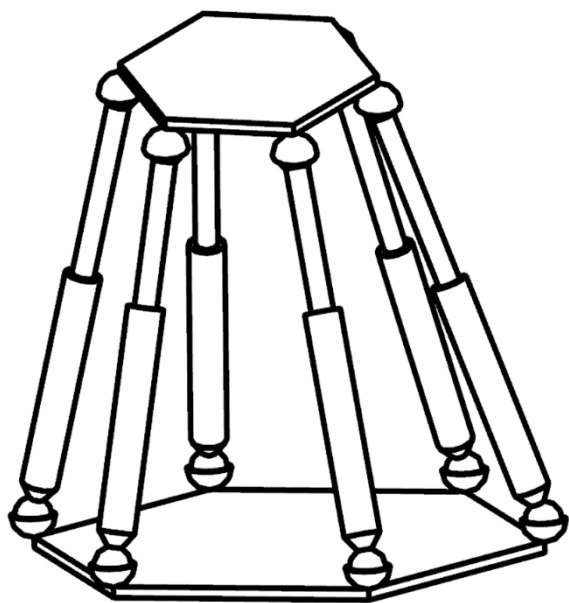


6-SPS型
6-3

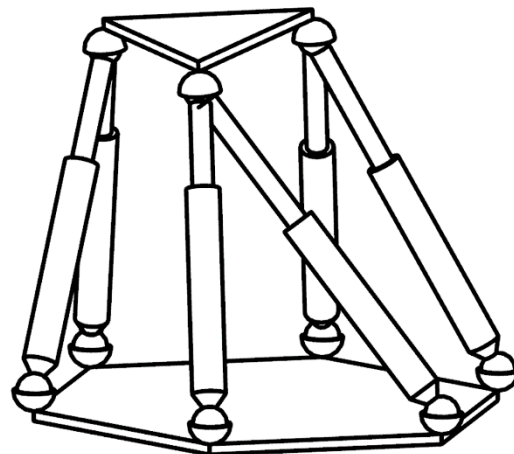
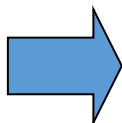


2.3 并联机构构型演变 (Stewart)

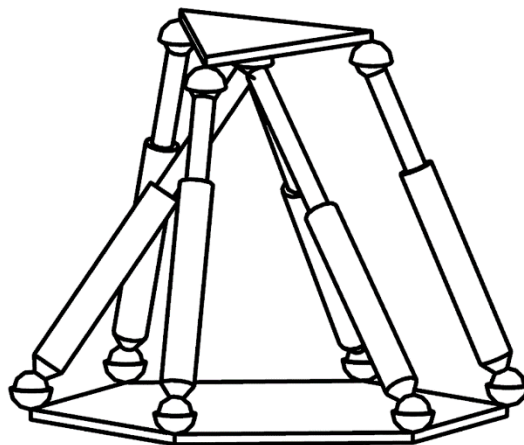
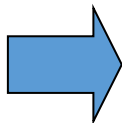
- 改变杆件分布方式：理论上**联接动平台与静平台的6个杆件可任意布置**，在原有6-6型可以衍生多种6自由度并联机构



6-SPS型
6-6



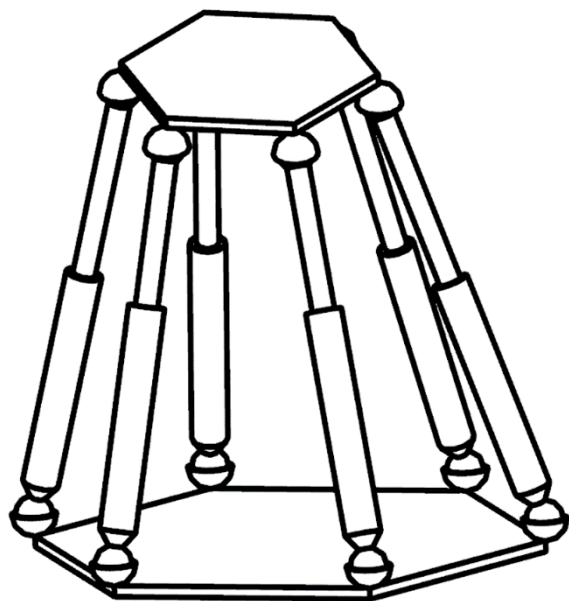
6-SPS型
6-3



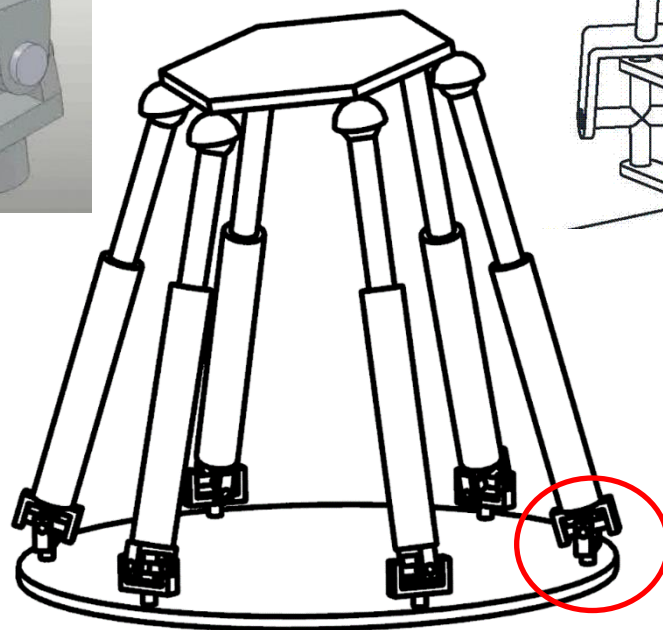
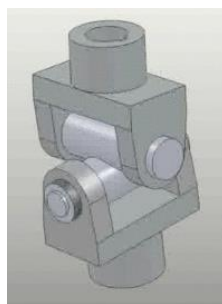
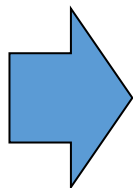
6-SPS型
6-4

2.3 并联机构构型演变 (Stewart)

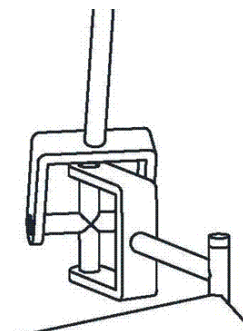
- **改变铰链类型：将连杆中一个球面副换成虎克铰 (6-UPS型)**
- 改变支链中铰链的分布顺序：将6-3型中每个杆的移动副和球面副交换位置，将移动副导轨作为静平台（方向运动优势）
- 拆解或组合运动副；上述方法的组合



6-SPS型

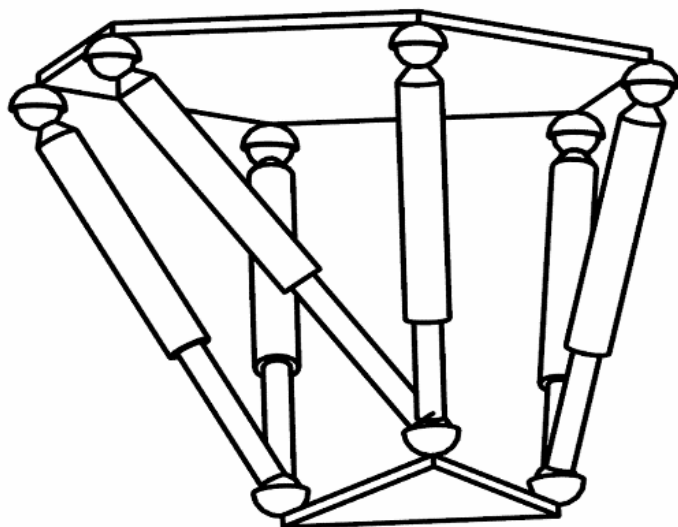


6-UPS型

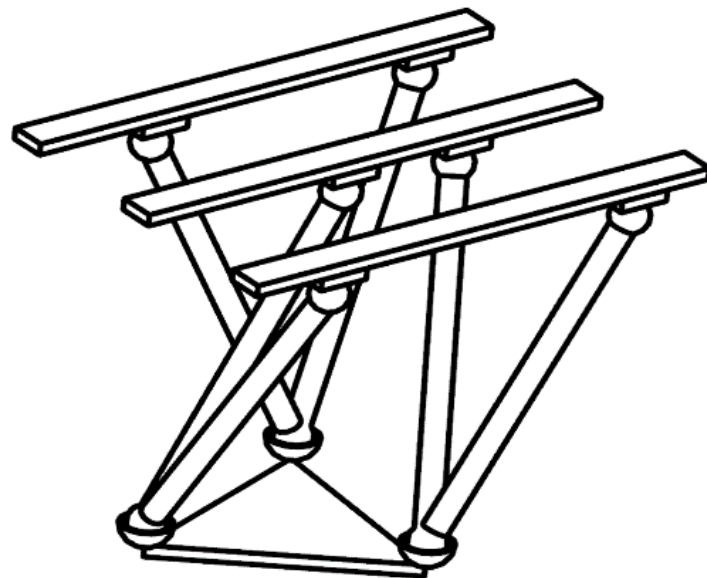
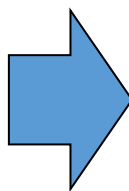


2.3 并联机构构型演变 (Stewart)

- 改变铰链类型：将连杆中一个球面副换成虎克铰 (6-UPS型)
- 改变支链中铰链的分布顺序：将6-3型中每个杆的移动副和球面副交换位置，将移动副导轨作为静平台 (方向运动优势)
- 拆解或组合运动副；上述方法的组合



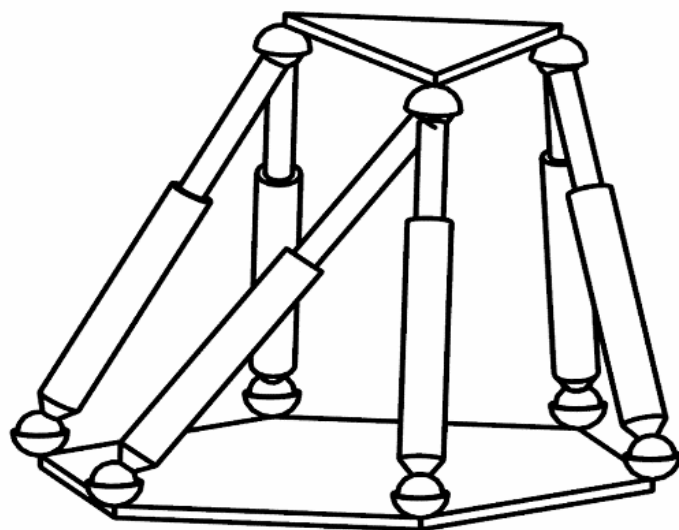
6-SPS型



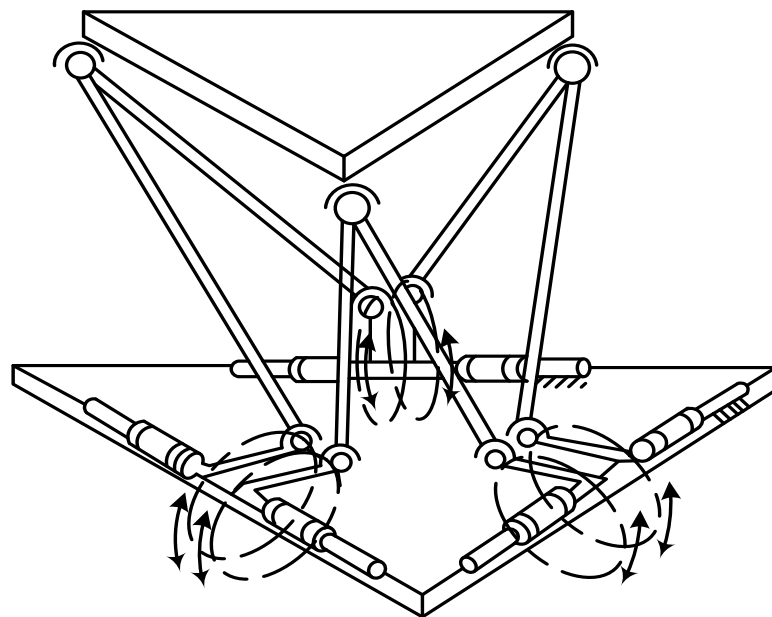
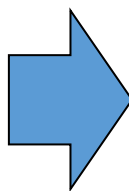
Hexaglide并联操作手

2.3 并联机构构型演变 (Stewart)

- 改变铰链类型：将连杆中一个球面副换成虎克铰 (6-UPS型)
- 改变支链中铰链的分布顺序：将6-3型中每个杆的移动副和球面副交换位置，将移动副导轨作为静平台 (方向运动优势)
- 拆解或组合运动副；上述方法的组合



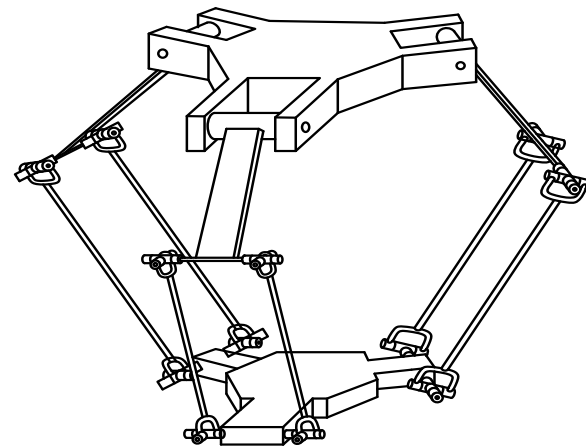
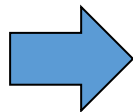
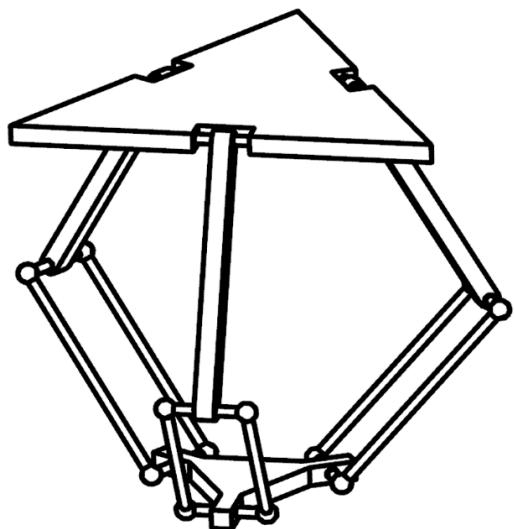
6-3型 6-SPS机构



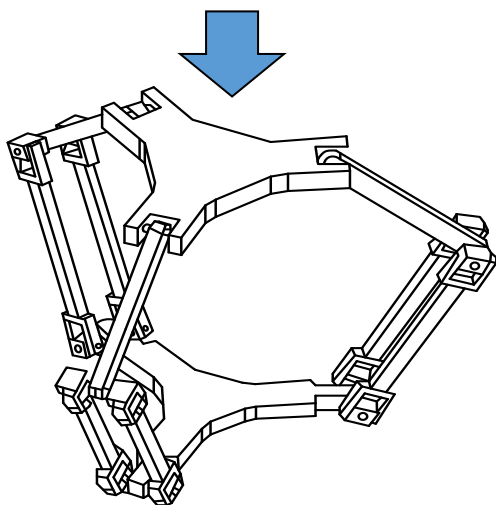
6-3型6-RUS机构

2.3 并联机构构型演变 (Delta)

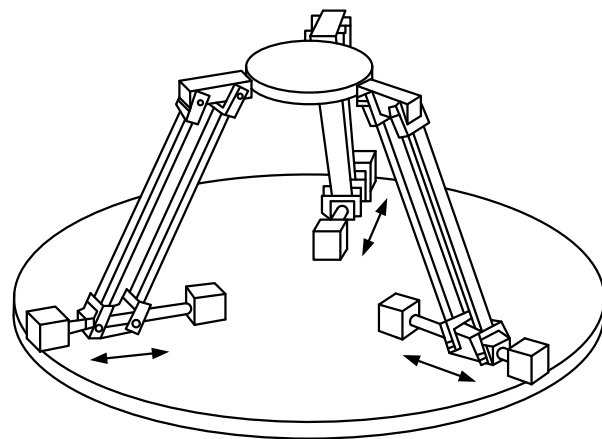
□ 试将Delta机构演化出不同的并联机构?



(a) 3-R4U (虎克铰) 并联机构



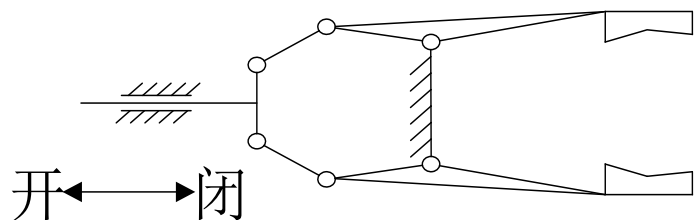
(b) 3R (4R) RR机构



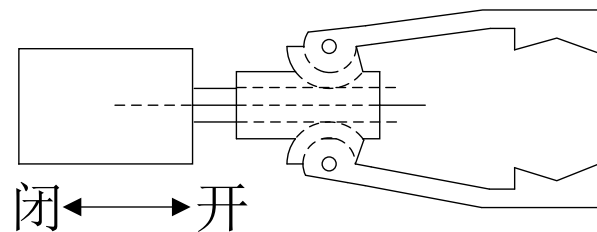
(c) Star机构

2.4 机器人手爪

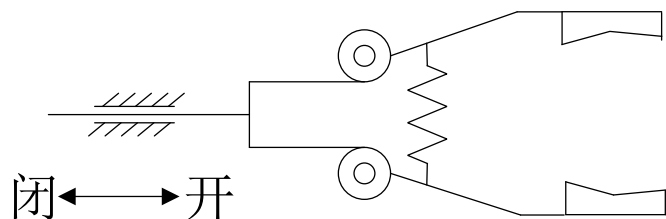
- 人类手指有20多个自由度，完成各种灵巧动作：抓取、剪纸等，抓取的主要动作为捏、握和夹
- 机器人手爪抓取方式取决于**手爪的结构和自由度**
- 夹持式手爪：多采用二手指或三手指，分**回转/平动/平移型**，当手爪抓紧和松开物体时，手指做回转运动



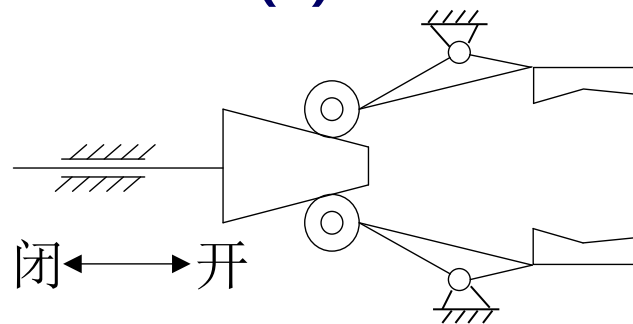
(a)



(b)



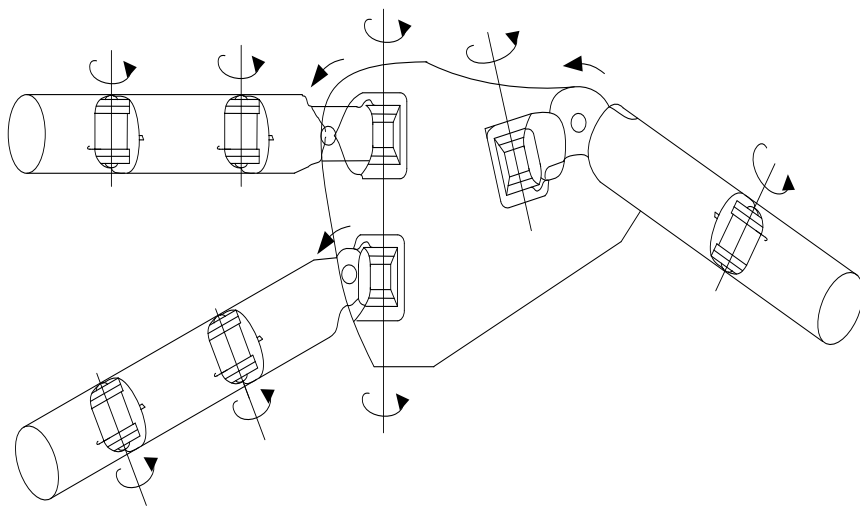
(c)



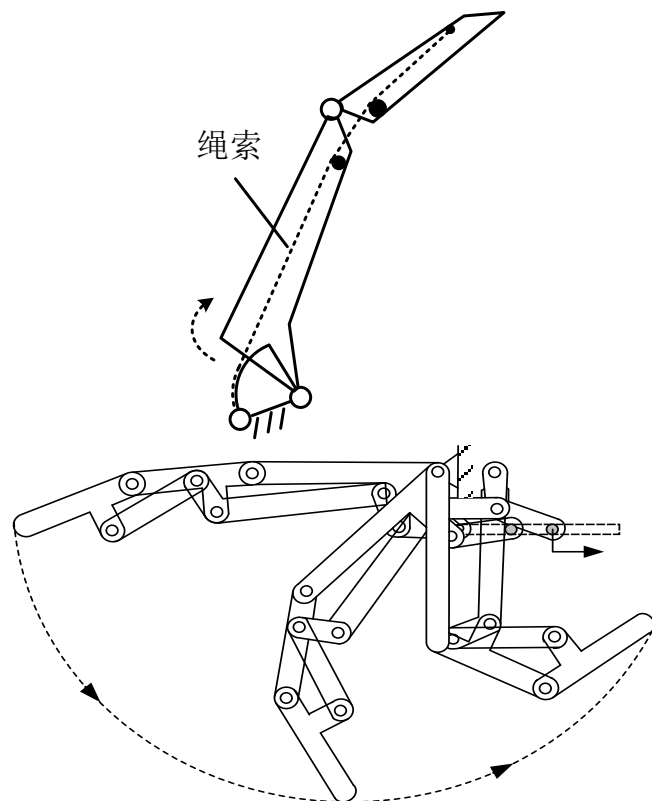
(d)

2.4 机器人手爪

- **多关节多指手爪：**由3到4个手指构成，每个手指（相当于操作臂）有3到4个关节，与人手相似
- **欠驱动手爪：**手指一般包含2-3个关节，1个驱动器，以差动方式驱动手指复现自然抓握运动



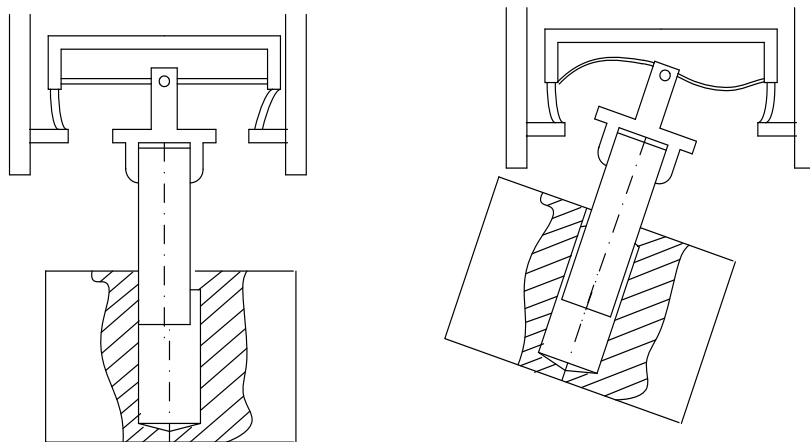
多关节多指手



欠驱动手指

2.4 机器人手爪

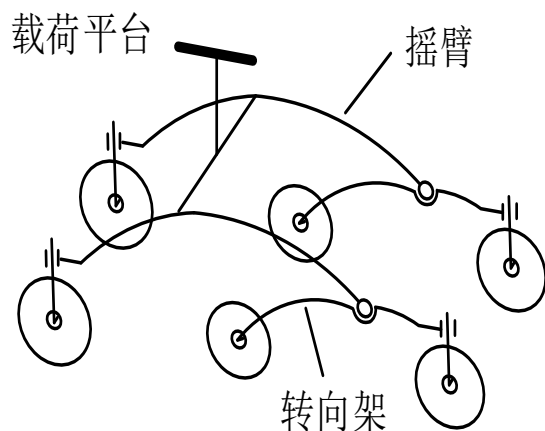
- **顺应手爪：**该类手爪具有一定的柔性，可被动适应工作环境。被动顺应机构是一种典型的顺应手爪，如下图把销轴插入孔的被动顺应机构。
- **主要特点：**在销轴远离夹持部位形成一个顺应中心，其效果相当于在手腕和手爪之间安装一个6自由度的弹簧装置，具有一定的容差能力。



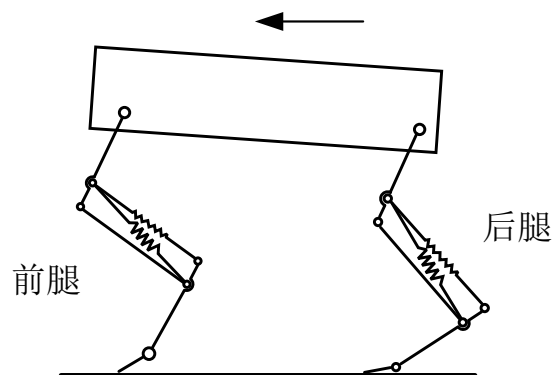
顺应手爪

2.5/6 探测车悬架机构/多足步行机器人机构

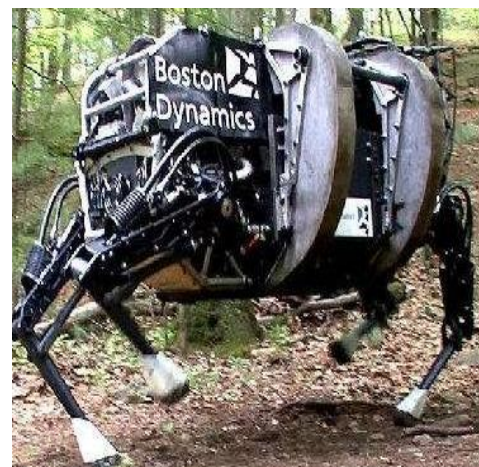
- 探测车是空间探索必不可少的工具，如美国Rocky系列行星探测车和俄罗斯Marsokhod火星探测车均采用轮式移动系统；
- 悬架机构：影响越障能力、地形适应能力、车体波动程度
- 悬架分类：摇臂-转向架、接触悬吊、多体铰链、扭杆式等
- 多足步行机器人：冗余驱动、多支链、时变拓扑运动机构
- 多足机器人分类：两足、四足、六足、八足等



(a) 摇臂-转向架悬架机构

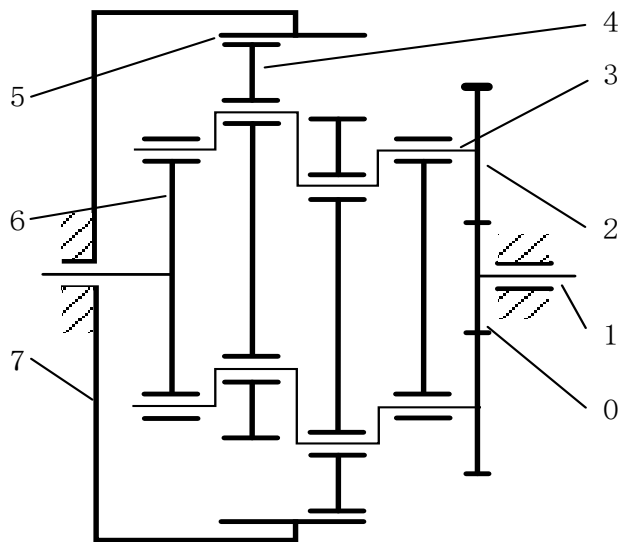


(b) 四足步行机器人

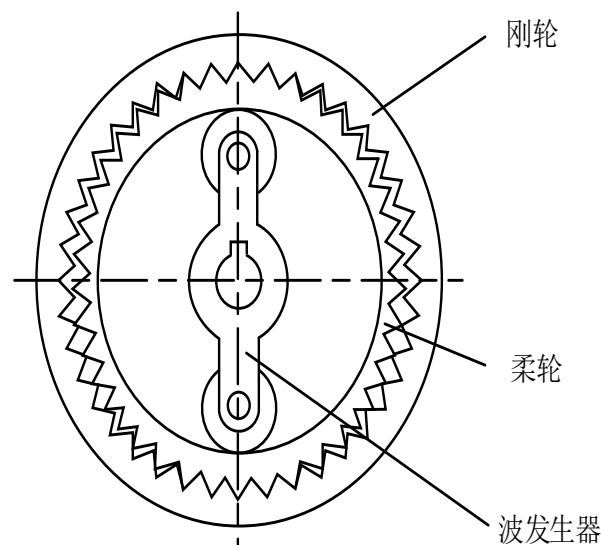


2.7 RV减速器和谐波减速器（阅读）

- **RV减速器**：是一种2级行星齿轮传动减速机构，具有传动比范围大、传动精度高、扭转刚度大、结构紧凑等优点；
- **谐波减速器**：由波发生器、柔轮、刚轮组成，靠波发生器上轴承使柔轮产生可控弹性变形，并与刚轮相啮合来传递运动和动力，具有传动比大/精度高、承载高、运行平稳等优点。



(a) RV减速器传动原理



(b) 谐波减速器传动原理