

# 第二章 工业机器人的结构设计基础

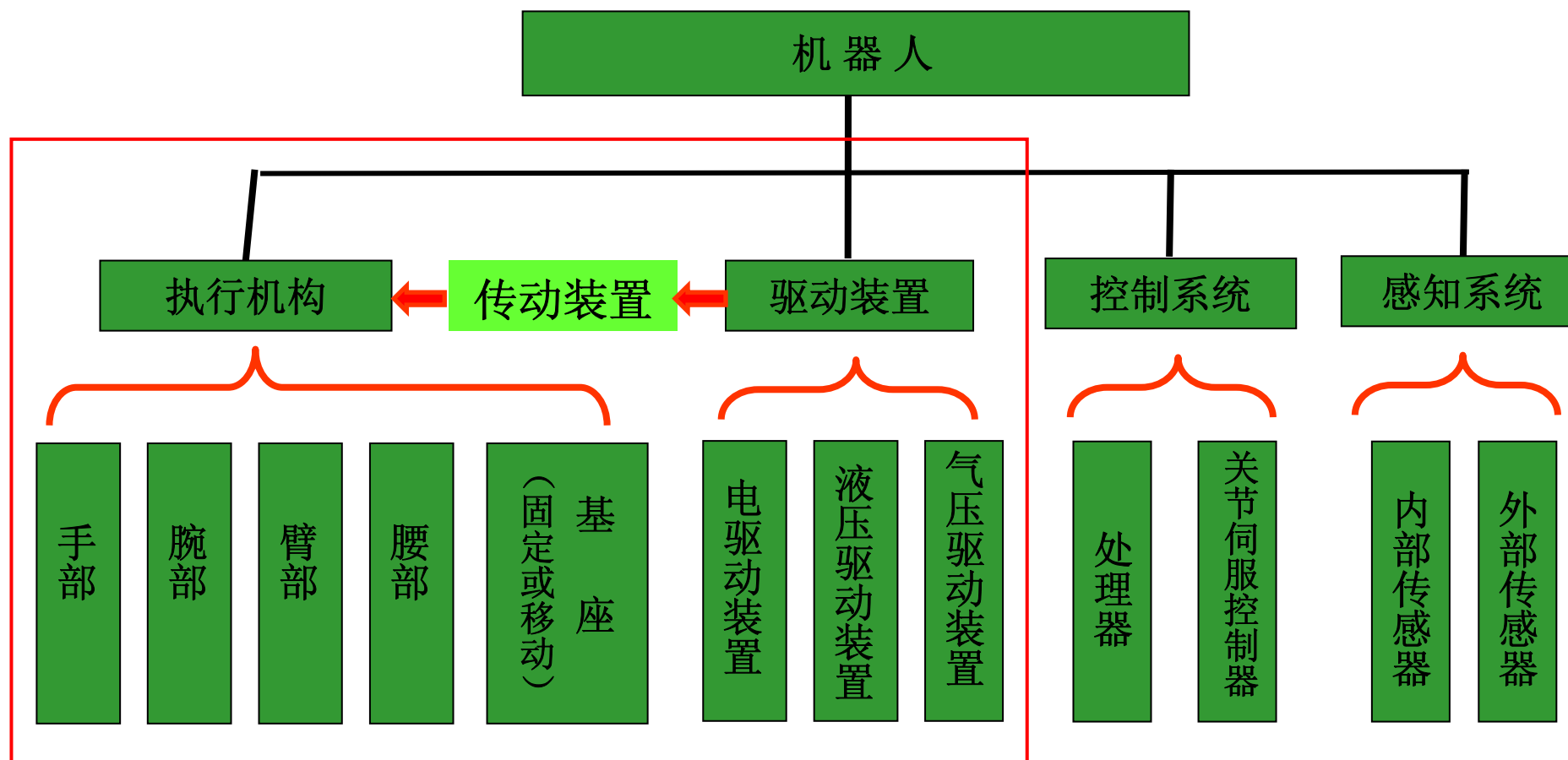
---

不同应用领域的机器人结构设计上的差异比机器人其它系统设计上的差异大得多。设计和制造一个什么活都能干的机器人是不现实的。

- **本章主要内容:**

- 2.1 工业机器人机械结构设计的步骤
- 2.2 工业机器人的驱动与传动系统结构
- 2.3 工业机器人机身和臂部设计
- 2.4 工业机器人腕部设计
- 2.5 机器人的手部
- 2.6 工业机器人本体材料的选择

## 本章内容在机器人系统组成中的位置：



## 2.1 机器人机械结构设计的步骤

---

### 1、系统分析

机器人是实现生产过程自动化、提高劳动生产率的有力工具。首先确定使用机器人是否需要与合适，决定采用后需要做如下分析工作：

- 明确采用机器人的目的和任务。
- 分析机器人所在系统的工作环境，包括设备兼容性等。
- 认真分析系统的工作要求，确定机器人的基本功能和方案。如机器人的自由度数、信息的存储容量、定位精度、抓取重量……
- 进行必要的调查研究，搜集国内外的有关技术资料。

---

## 2、总体方案设计

- (1) 确定动力源
- (2) 确定机型
- (3) 确定自由度
- (4) 确定动力容量和传动方式
- (5) 优化运动参数和结构参数
- (6) 确定平衡方式和平衡质量
- (7) 绘制机构运动简图

---

### 3、结构设计

包括机器人驱动系统、传动系统的配置及结构设计，关节及杆件的结构设计，平衡机构的设计，走线及电器接口设计等。

### 4、动特性分析

估算惯性参数，建立系统动力学模型进行仿真分析，确定其结构固有频率和响应特性。

### 5、施工设计

完成施工图设计，编制相关技术文件。

# 主体结构设计

---

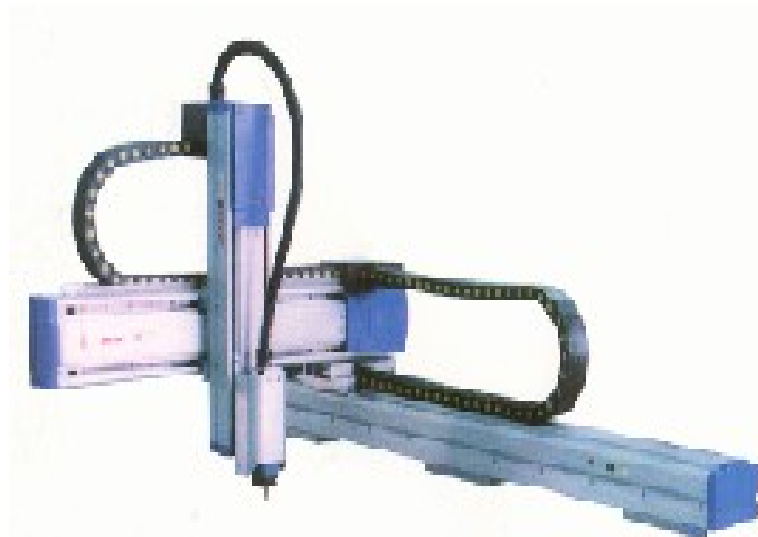
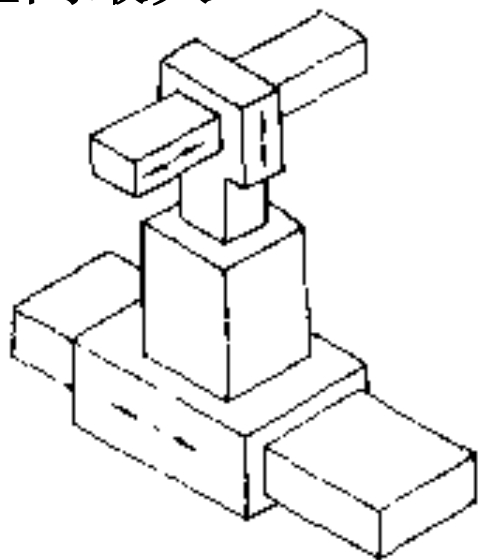
对于工业机器人，主要是选择由连杆和运动副组成的坐标形式。主要有以下几种：

- 直角坐标型
- 圆柱坐标型
- 极坐标型（球面坐标型）
- 关节坐标型
- 平面关节坐标型

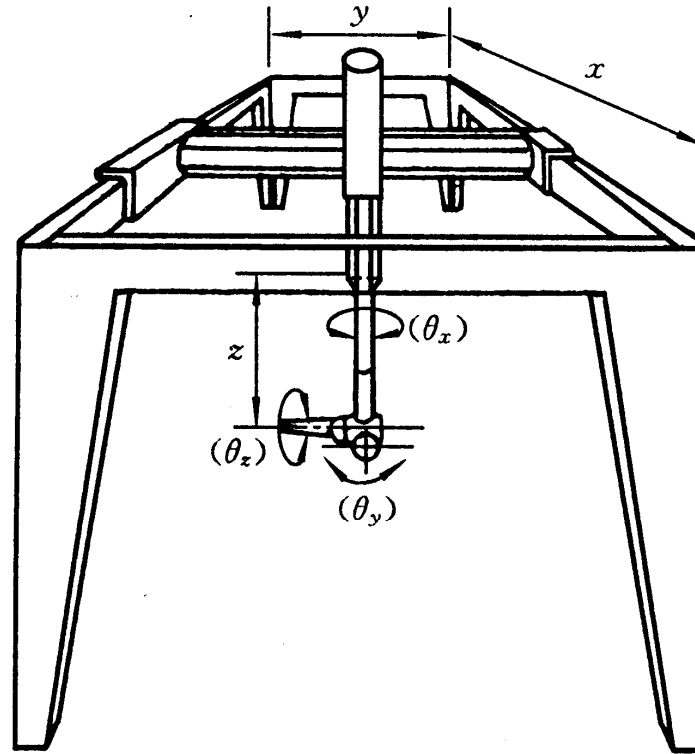
## 1、直角坐标型

其特点：结构简单；容易编程；若采用直线滚动导轨，运动速度和定位精度都较高；在三个坐标轴方向上的运动是解耦的，控制简单。

但其导轨面的密封防护较困难，运动灵活性较差，自身占据空间最大。



用途：主要用于生产设备的上下料，高精度的装配和检测作业，约占工业机器人总数的**14%**



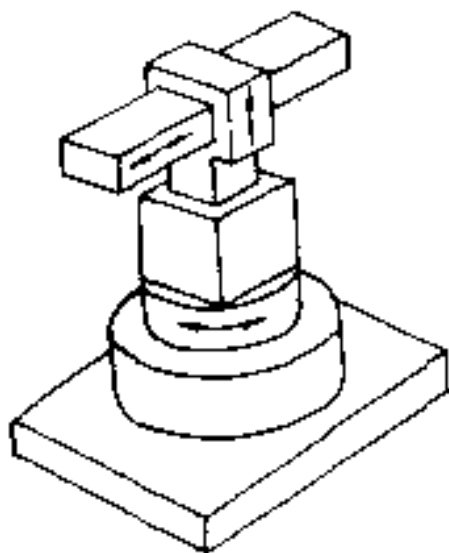
图示为一种起重机台架式直角坐标机器人，适用于飞机构件装配等大型车间。其在X、Y轴向的移动距离分别可达100m和40m，沿Z轴方向可达5m，可谓目前最大的工业机器人。



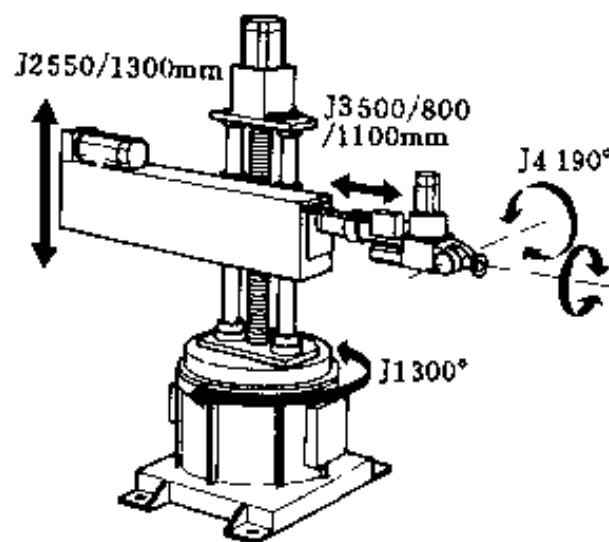
## 2、圆柱坐标型

其结构紧凑，运动耦合性较弱，控制也较简单，运动灵活性稍好。但自身占据空间也较大，工作范围受限。

此类机器人约占工业机器人总数的**47%**。



圆柱坐标型机器人模型



Verstran 机器人

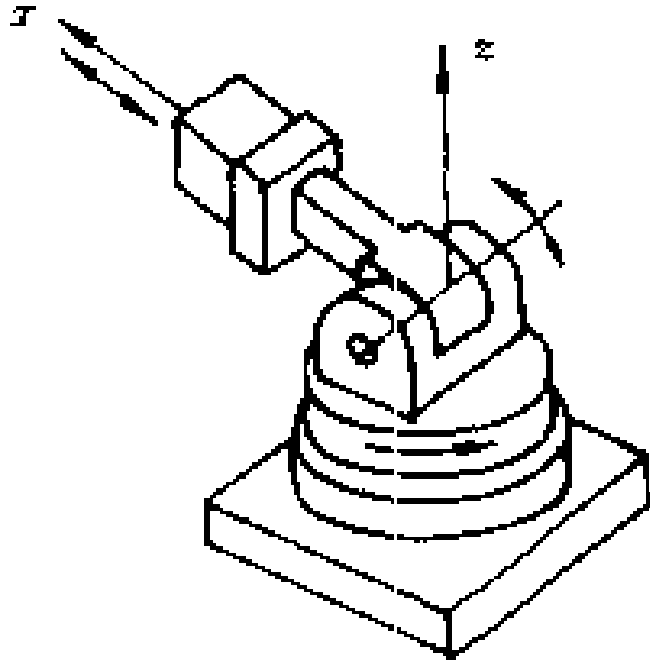


Verstran 机器人

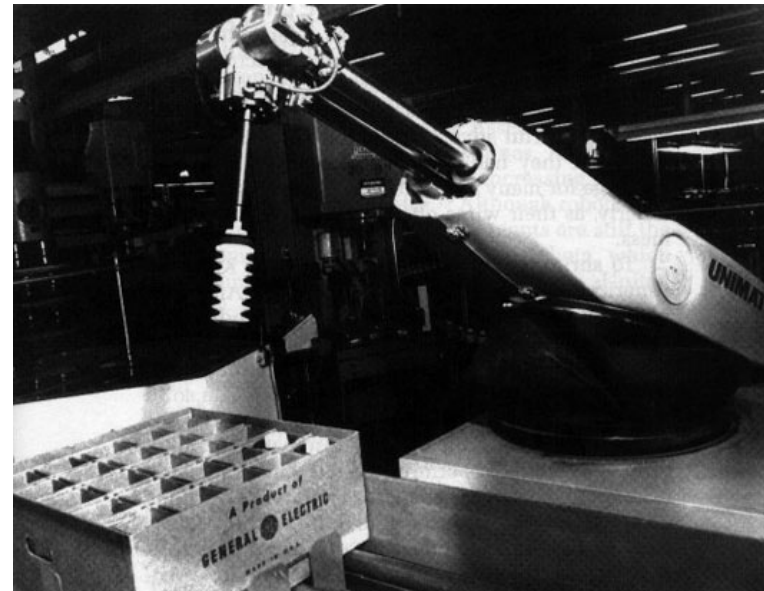
### 3、极坐标型（也称球面坐标型）(2RP)

其运动耦合性较强，控制也较复杂。但运动灵活性好。自身占据空间也较小。

此类机器人约占工业机器人总数的13%。



极坐标型机器人模型

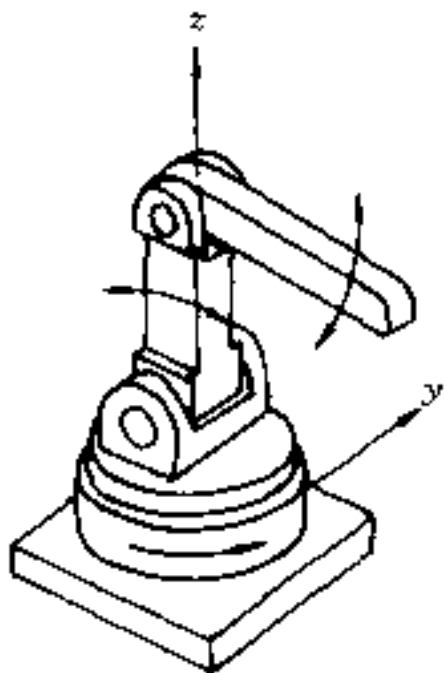


Unimate 机器人

#### 4、关节坐标型 (3R)

其运动耦合性强，控制较复杂。但结构紧凑，运动灵活性最好，自身占据空间最小。

此类机器人约占工业机器人总数的**25%**。



关节型机器人模型



关节型搬运机器人



关节型焊接机器人

## 5、平面关节型 (SCARA)

**SCARA** (Selective Compliance Assembly Robot Arm, 中文译名：选择顺应性装配机器手臂)，其转动轴线相互平行，仅平面运动有耦合性，控制较通用关节型简单。但运动灵活性更好，铅垂平面刚性好。可以认为是关节坐标式的一个特例。

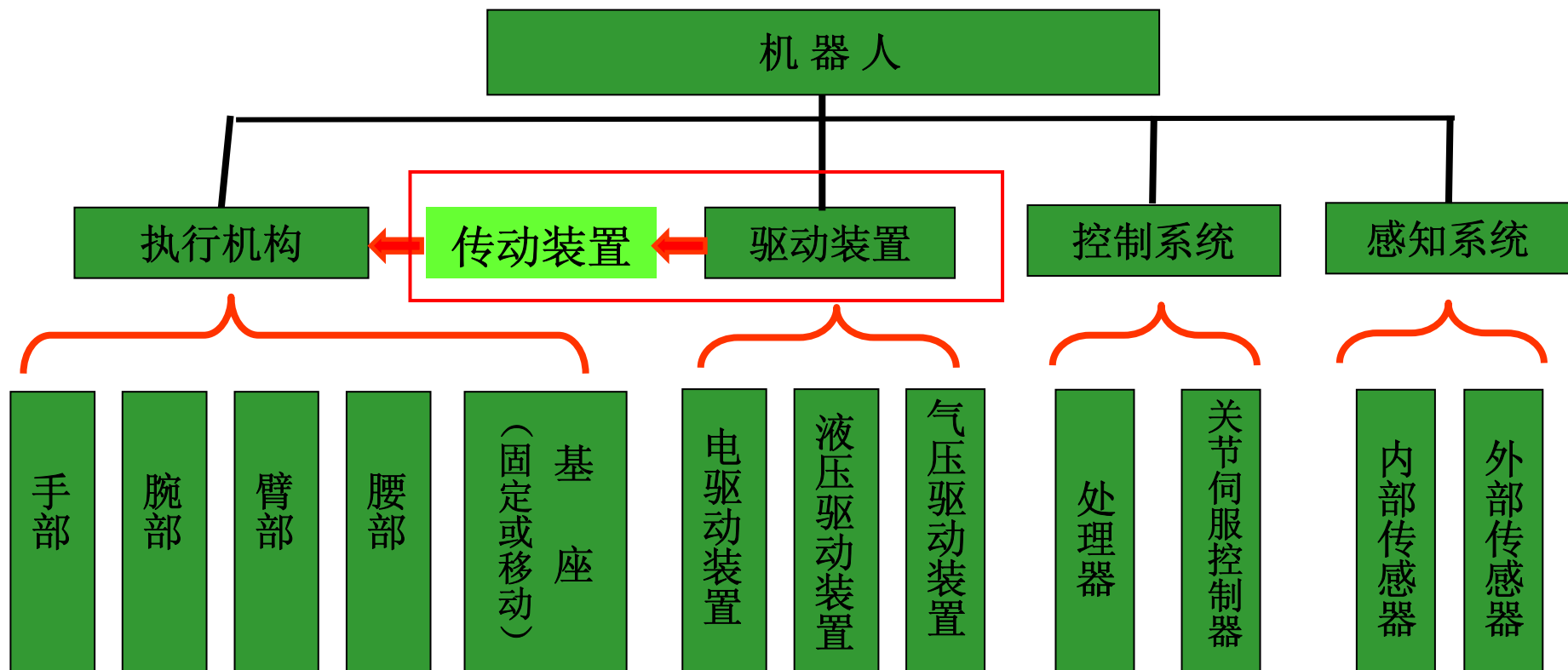


SCARA型装配机器人

## 2.2 工业机器人的驱动与传动系统结构

### 2.2.1 驱动—传动系统的构成

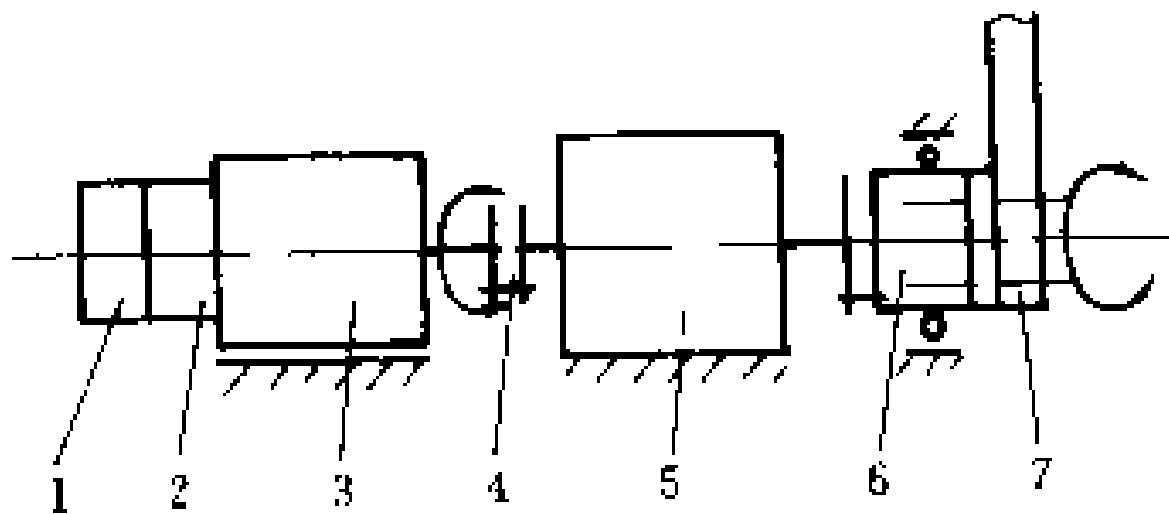
在机器人机械系统中，驱动器通过联轴器带动传动装置(一般为减速器)，再通过关节轴带动杆件运动。



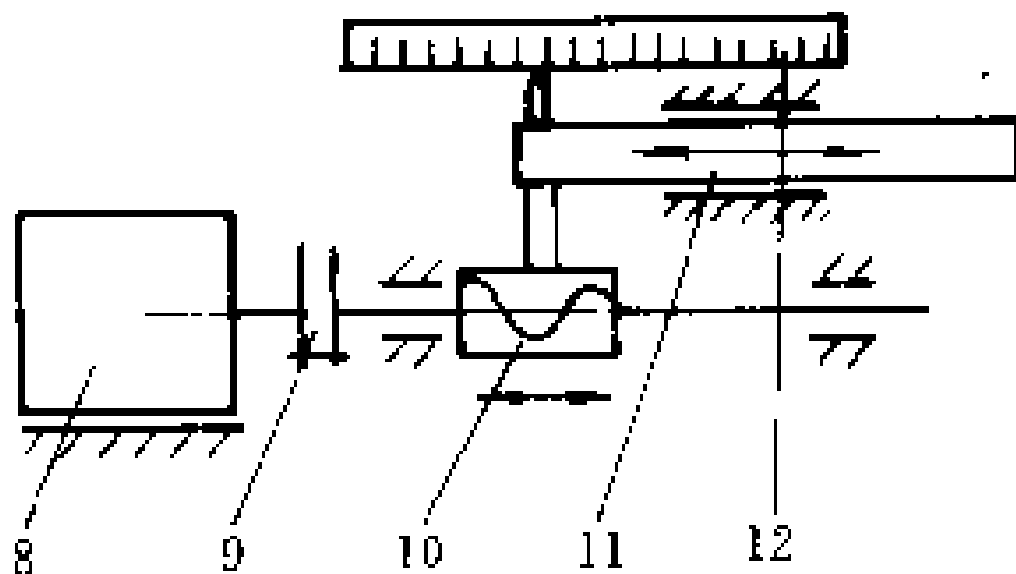
---

机器人一般有两种运动关节：转动关节（简写为**R**）和移(直)动关节（简写为**P**）。

为了进行位置和速度控制，驱动系统中还包括位置和速度检测元件。检测元件类型很多，但都要求有合适的精度、连接方式以及有利于控制的输出方式。对于伺服电机驱动，检测元件常与电机直接相联；对于液压驱动，则常通过联轴器或销轴与被驱动的杆件相联。



- 1—码盘;
- 2—测速机;
- 3—电机;
- 4—联轴器;
- 5—传动装置;
- 6—转动关节;
- 7—杆



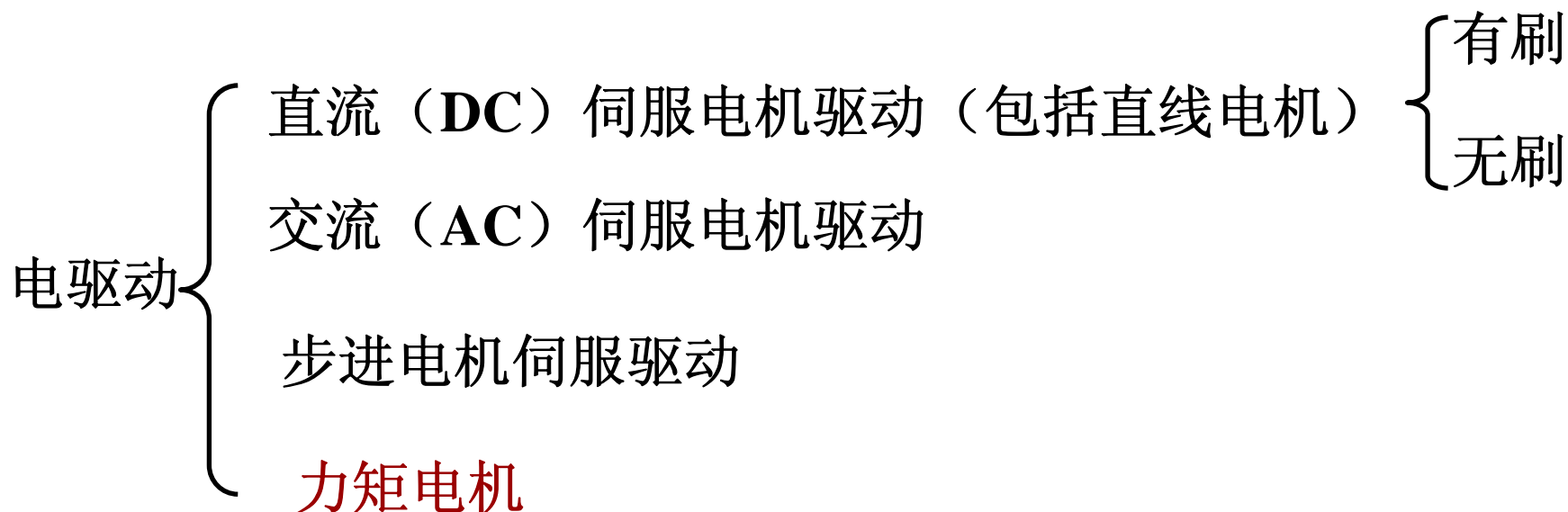
- 8—电机;
- 9—联轴器;
- 10—螺旋副;
- 11—移动关节;
- 12—电位器  
(或光栅尺)

## 2.2.2 驱动器的类型和特点

### 1. 电动驱动器

电动驱动器的能源简单，速度变化范围大，效率高，速度和位置精度都很高。但它们多与减速装置相联，直接驱动比较困难。

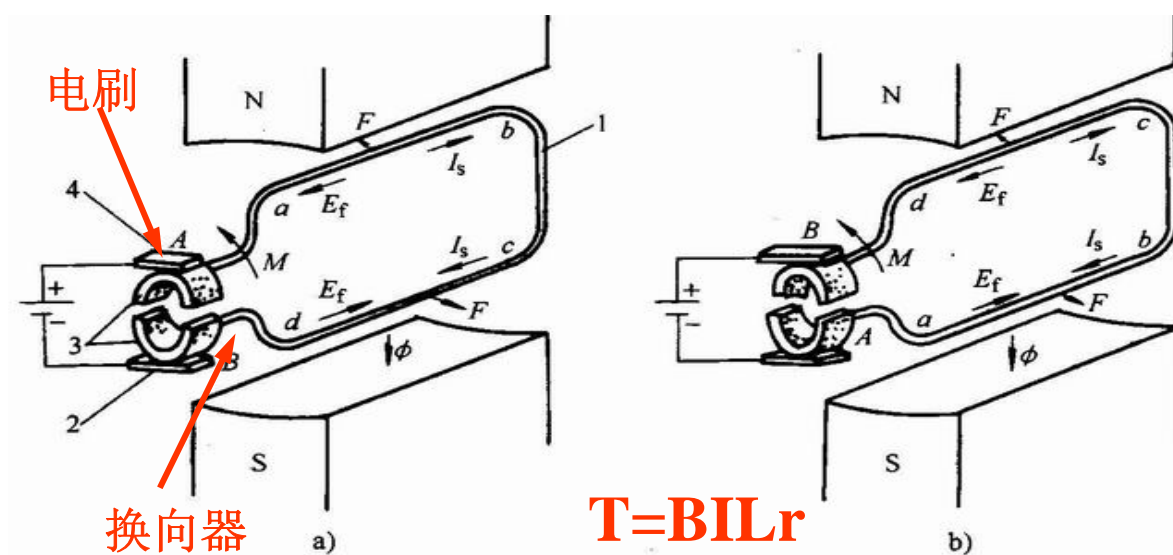
电动驱动器的类型很多，可分为以下几种类型：





## (1) 直流伺服电机 (DC Servo Motor)

直流 (DC) 伺服电机转动惯性小，启停反应快，速度变化范围大，调速方便（可无级调速），调速范围宽，低速性能好（启动转矩大，启动电流小），效率高，运行平稳，转矩和转速容易控制，速度和位置精度都很高。



直流电机工作原理

# 直流伺服电机的机械特性

The diagram shows the mechanical characteristic equation of a DC servomotor,  $n = \frac{U_c}{K_e \phi} - \frac{R}{K_e K_t \phi^2} T$ , with callouts for each term:

- 转速** (Speed) points to  $n$ .
- 控制电压** (Control voltage) points to  $U_c$ .
- 电机结构常数** (Motor structure constant) points to  $K_e$ .
- 每极磁通** (Flux per pole) points to  $\phi$ .
- 电枢回路电阻** (Armature circuit resistance) points to  $R$ .
- 负载转矩** (Load torque) points to  $T$ .

电机转速的控制：“调压调速”（★）

“调磁调速”

## ➤ 直流伺服电机的主要技术参数

---

- ✓ 额定输入电压
- ✓ 空载转速
- ✓ 堵转转矩
- ✓ 输出功率
- ✓ 空载电流
- ✓ 转矩系数
- ✓ 电枢电阻
- ✓ 电枢感应系数
- ✓ 最大效率
- ✓ 最大径向载荷
- ✓ 最大轴向载荷



直流伺服电机与驱动放大器

---

直流伺服电机有很多优点，具有很高的性价比，一直是机器人平台的标准电机。但它的电刷易磨损，必须经常更换，且易形成火花。噪音比交流电机大。因而产生了无刷电机，采用霍尔电路来进行换向。

## (2) 交流伺服电机(AC Servo Motor)

---

交流 (AC)伺服电机较直流伺服电机的功率大，无需电刷，效率高，维护方便，在工业机器人中有一定的应用。

交流伺服电机的主要技术参数与直流伺服电机相近。

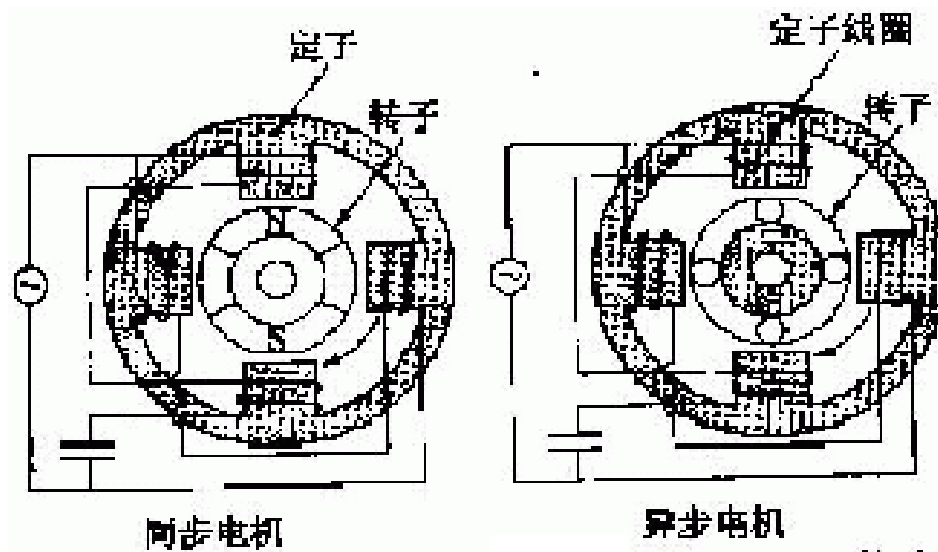


交流伺服电机

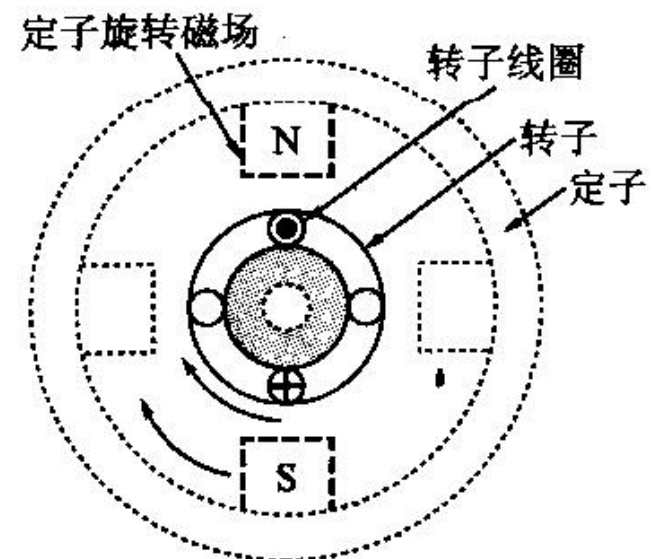


驱动放大器

## 工作原理

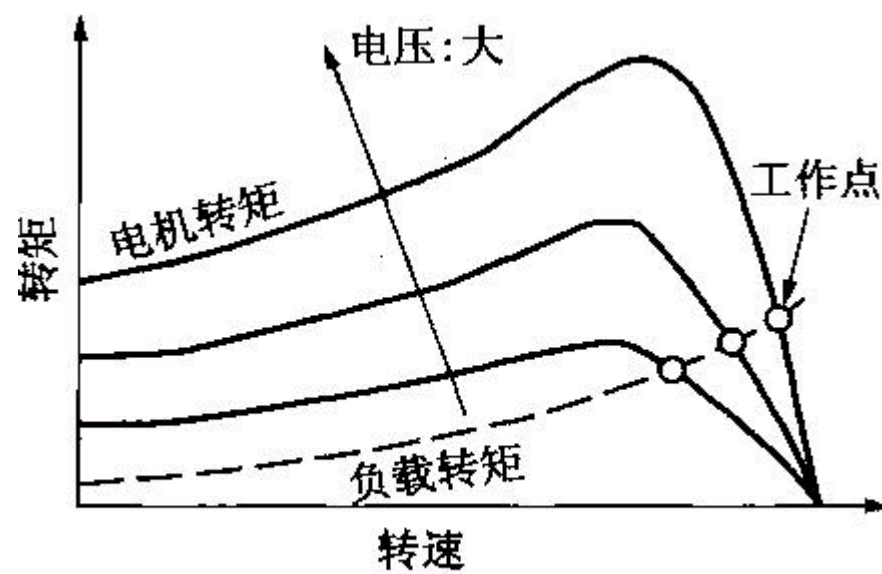


AC电机的构造



异步交流电机的工作原理

## 矩频特性曲线



交流电机的转矩-转速特性

## 交流电机的特点

---

无电刷和换向器，无产生火花的风险；比直流电机的驱动电路复杂、价格高。其同步电机体积小，主要用于要求响应速度快的中等速度以下的工业机器人和机床领域。其异步电机转子惯量很小，响应速度很快，主要用于中等功率以上的伺服系统

## 交流电机的控制方式

改变定子绕组上的电压或频率，即电压控制或频率控制方式。

伺服电机的精度由编码器的精度决定。

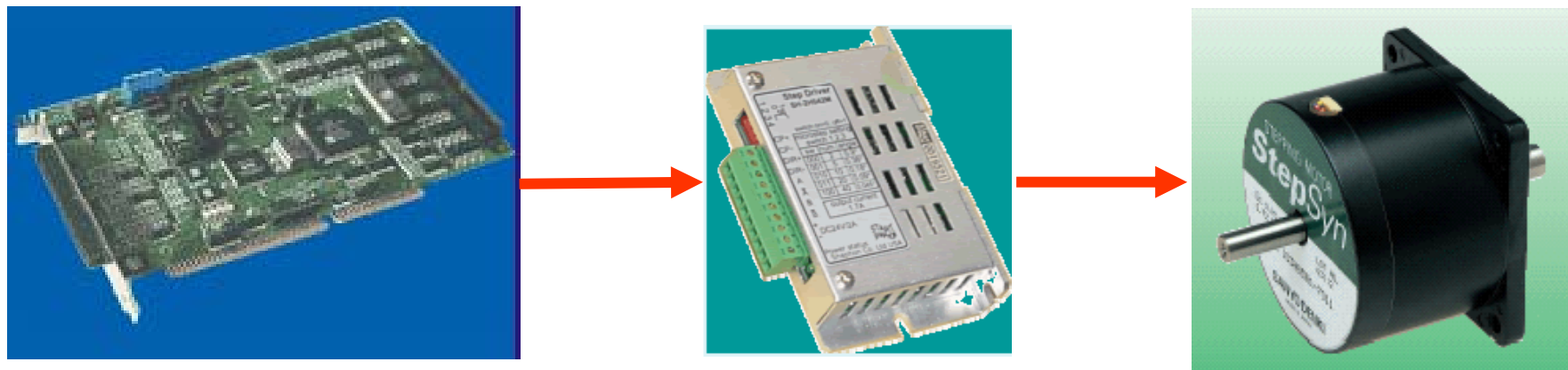


### (3) 步进电机驱动 (stepping motor)

步进电机驱动系统主要用于开环位置控制系统。

优点：控制较容易，维修也较方便，而且控制为全数字化。

缺点：由于开环控制，所以精度不高。

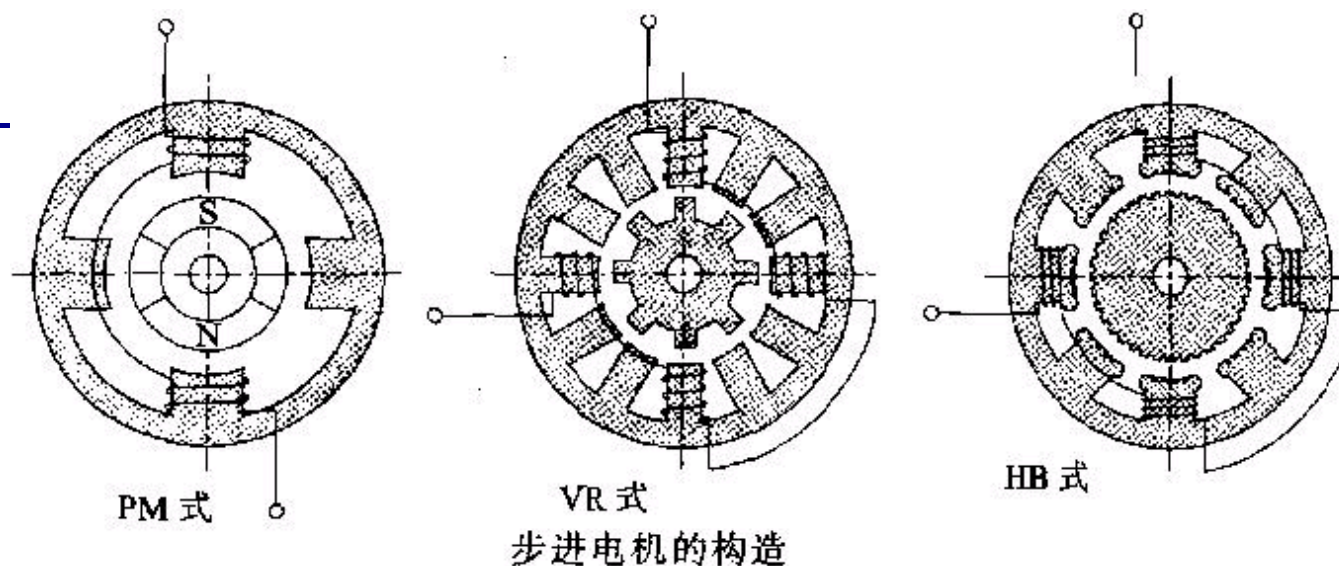


## 步进电机工作原理

---

**步进电机**是一种将电脉冲转化为角位移的执行机构。简单说：当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度（及步进角）。可以通过控制脉冲个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的；同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度，从而达到调速的目的。

**步进电机有三种：**永磁式PM（permanent magnet）；反应式（也称可变磁阻式）VR（variable reluctance），在欧美等发达国家80年代已被淘汰；混合式HB（hybrid），混合式是指混合了永磁式和反应式的优点，混合式步进电机的应用最为广泛。



**PM式步进电机**转子是永磁体，定子是绕组，在定子电磁铁和转子永磁体之间的排斥力和吸引力的作用下转动，步距角一般为 $7.5^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。

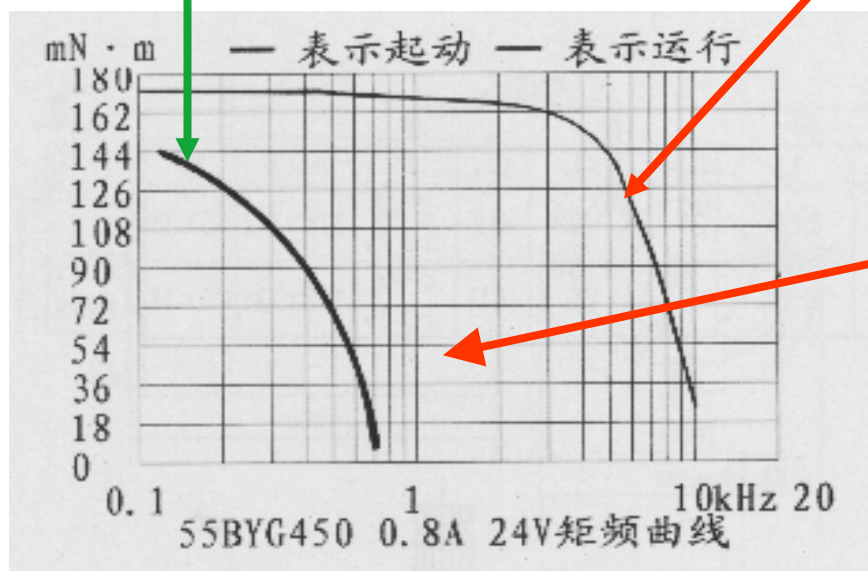
**VR式步进电机**用齿轮状的铁心作转子，定子是电磁铁，上面有绕组。在定子磁场中，转子始终转向磁阻最小的位置。步距角一般为 $0.9^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。

**HB式步进电机**是PM式和VR式的复合形式。在永磁体转子和电磁铁定子的表面上加工出许多轴向齿槽，产生转矩的原理与PM式相同，转子和定子的形状与VR式相似，步距角一般为 $0.9^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。

## 运行矩频特性

起动曲线

运行曲线



在这个输出转矩区间，步进电机启动时的输入脉冲频率必须缓慢增加

## 步进电机驱动的特点

控制系统简单可靠，成本低；控制精度受步距角限制，高负载或高速度时易失步，低速运行时会产生步进运行现象。

## 伺服电机与步进电机比较

---

### 伺服电机的优势:

- 实现了位置，速度和力矩的闭环控制；克服了步进电机失步的问题；
- 高速性能好，一般额定转速能达到2000 ~ 3000转；
- 抗过载能力强，能承受三倍于额定转矩的负载，对有瞬间负载波动和要求快速起动的场合特别适用；
- 低速运行平稳，低速运行时不会产生类似于步进电机的步进运行现象。适用于有高速响应要求的场合；
- 电机加减速的动态响应时间短，一般在几十毫秒之内；
- 发热和噪音明显降低。

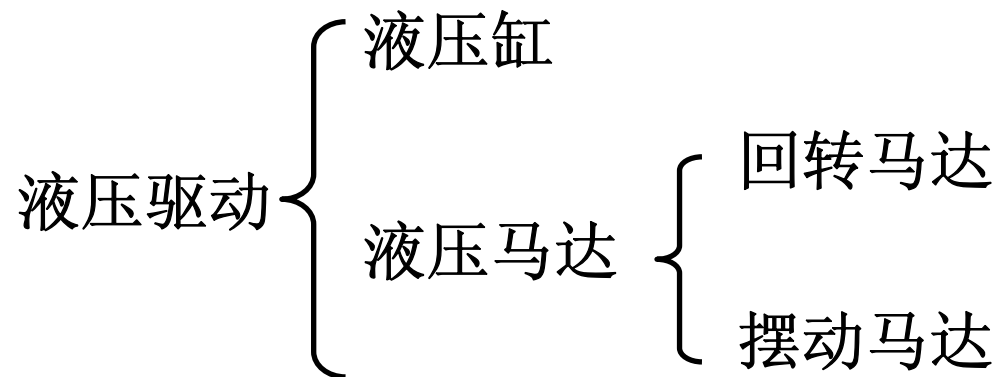
---

步进电机驱动多为开环控制，控制简单但功率不大，有较好的制动效果，但在速度很低或大负载情况下，可能产生丢步现象，多用于低精度小功率机器人系统。

## 2. 液压驱动器

液压驱动器的**优点**是功率大，可省去减速装置而直接与被驱动的杆件相连，结构紧凑，刚度好，响应快，伺服驱动具有较高的精度。**缺点**是需要增设液压源，易产生液体泄漏，不适合高、低温及有洁净要求的场合。故液压驱动器目前多用于特大功率的操作机器人系统或机器人化工程机械。

液压驱动器可分为以下几种类型：



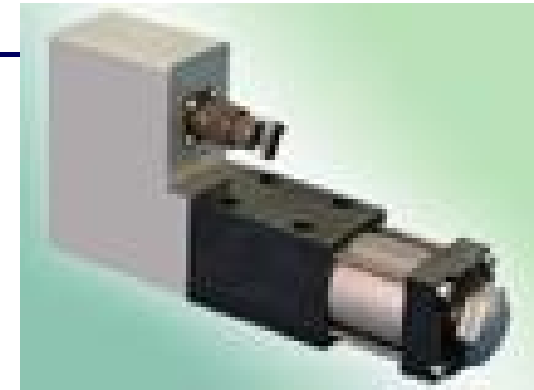




液压泵



液压缸



液压控制阀



液压摆动马达



液压回转马达

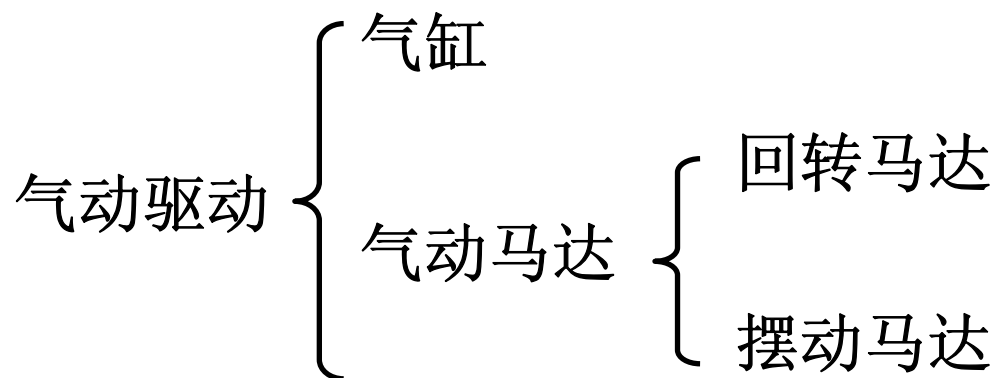


### 3. 气动驱动器

---

气动驱动器的结构简单，清洁，动作灵敏，具有缓冲作用。但也需要增设气压源，且与液压驱动器相比，功率较小，刚度差，噪音大，速度不易控制，所以多用于精度不高、但有洁净、防爆等要求的点位控制机器人。

气动驱动器可分为以下几种类型。





气缸



气动回转马达



气动摆动马达



气泵



气动三大件（过滤器、  
减压阀、油雾器）



气动控制阀

## 4. 其它驱动器

---

作为特殊的驱动装置，有压电晶体、形状记忆合金等



压电微驱动并联机器人



形状记忆合金驱动机器人手

---

## 直接驱动电机（direct drive:DD）

**优点：**不用齿轮减速器直接驱动，因此具有无间隙、摩擦小、机械刚度高等优点，可以实现高速、高精度的位置控制和微小力控制。

**缺点：**因为没有减速机构，所以容易受载荷的影响。

**种类：**直流力矩电机、无刷直流电机、VR式电机等。

## 驱动器的选择

---

- 驱动器的选择应以作业要求、生产环境为先决条件，以价格高低、技术水平为评价标准。

一般说来，目前负荷为**100 kg**以下的，可优先考虑电动驱动器，并根据机器人的用途选择合适的电机。

只须点位控制且功率较小者，或有防爆、清洁等特殊要求者，可采用气动驱动器。

负荷较大或机器人周围已有液压源的场合，可采用液压驱动器。

- 对于驱动器来说，最重要的是要求起动力矩大，调速范围宽，惯量小，尺寸小，同时还要有性能好的、与之配套的数字控制系统。

## 驱动器的安装

---

- 底座安装——较大体积的驱动器。
- 法兰安装——中小型驱动器。
- 卡箍安装——微小型驱动器。
- 临时安装——微小型驱动器。



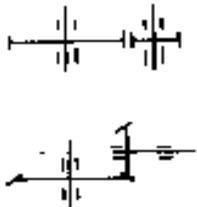

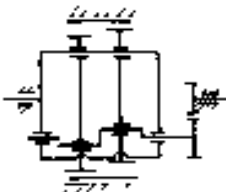
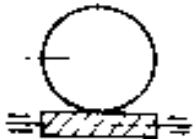
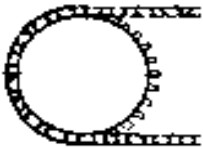
## 2.2.3 机器人的常用传动机构

---

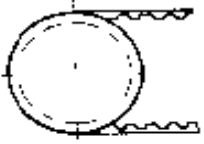
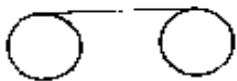
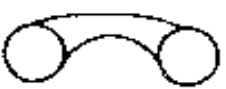

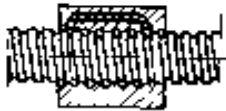
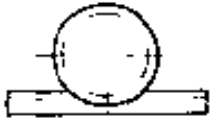
### ➤ 机器人传动机构的基本要求:

- (1) 结构紧凑，即同比体积最小、重量最轻；
- (2) 传动刚度大，即承受扭矩时角度变形要小，以提高整机的固有频率，降低整机的低频振动；
- (3) 回差小，即由正转到反转时空行程要小，以得到较高的位置控制精度；
- (4) 寿命长、价格低。

➤ 机器人几乎使用了目前出现的绝大多数传动机构，其中最常用的为谐波传动、**RV**摆线针轮行星传动和滚动螺旋传动。

序号	类 别	原理简图	特 点	轴间距	应用场合
1	齿 轮 传 动		响应快, 扭矩大, 刚性好, 可实现旋转方向的改变和复合传动	不大	腰、腕关节
2	谐波传动		大速比, 同轴线, 响应快, 体积小, 重量轻, 回差小, 转矩大	零	所有关节
3	摆线针轮行星传动 (RV)		大速比, 同轴线, 响应快, 刚度好, 体积小, 回差小, 转矩大	零	前三关节, 特别是腰关节
4	蜗轮传动		大速比, 交错轴, 体积小, 回差小, 响应小, 刚度好, 转矩大效率低, 发热大	交错 不大	腰关节, 手爪机构
5	链传动		速比小, 扭矩大, 刚度与张紧装置有关	大	腕关节 (驱动器后置)



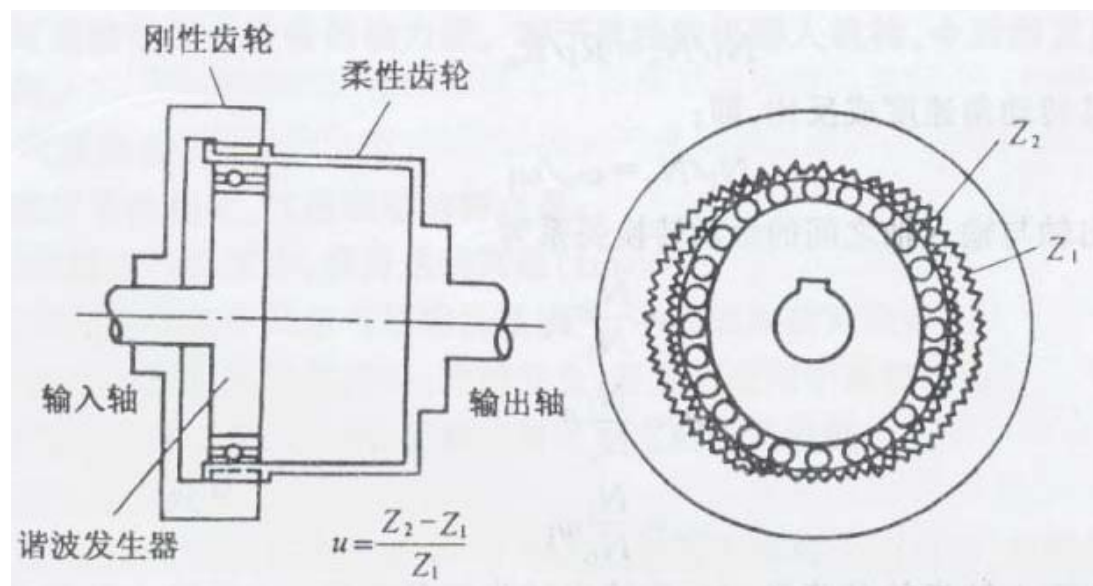
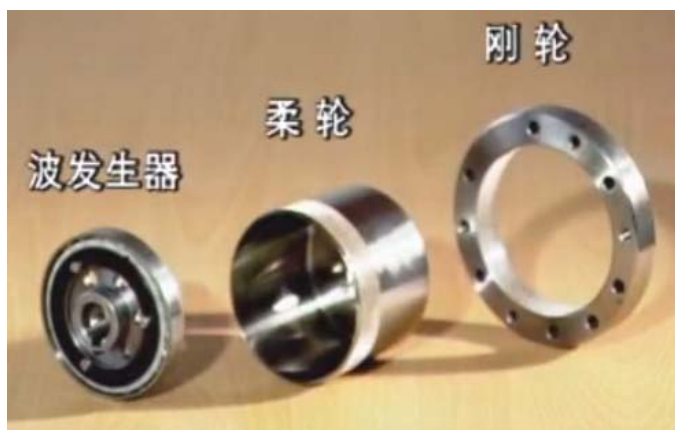
序号	类 别	原理简图	特 点	轴间距	应用场合
6	齿形带传动		速比小, 转矩小, 刚性差, 无间隙	大	各关节的一级传动
7	钢带传动		速比小, 转矩小, 刚性与张紧装置有关, 无间隙	大	腕关节(驱动器后置)
8	钢丝绳传动		速比小, 无间隙	特大	腕关节, 手爪机构
9	连杆及摇块传动		回差小, 刚性好, 扭矩中等, 可保持特殊位形, 速比不匀	大	腕关节, 臂关节(驱动器后置)
10	滚动螺旋传动		效率高, 精度好, 刚度好, 无回差, 可实现运动方式改变, “速比”大	零	直动关节, 摇块传动
11	齿轮齿条传动		效率高, 精度好, 刚度好, 可实现运动方式变化	交错	直动关节, 手爪机构

---

其中腰关节最常用谐波传动、齿轮/蜗轮传动；臂关节最常用谐波传动、RV摆线针轮行星传动和滚动螺旋传动（滚珠丝杠传动）。腕关节最常用齿轮传动、谐波传动、同步带传动和纲绳传动。

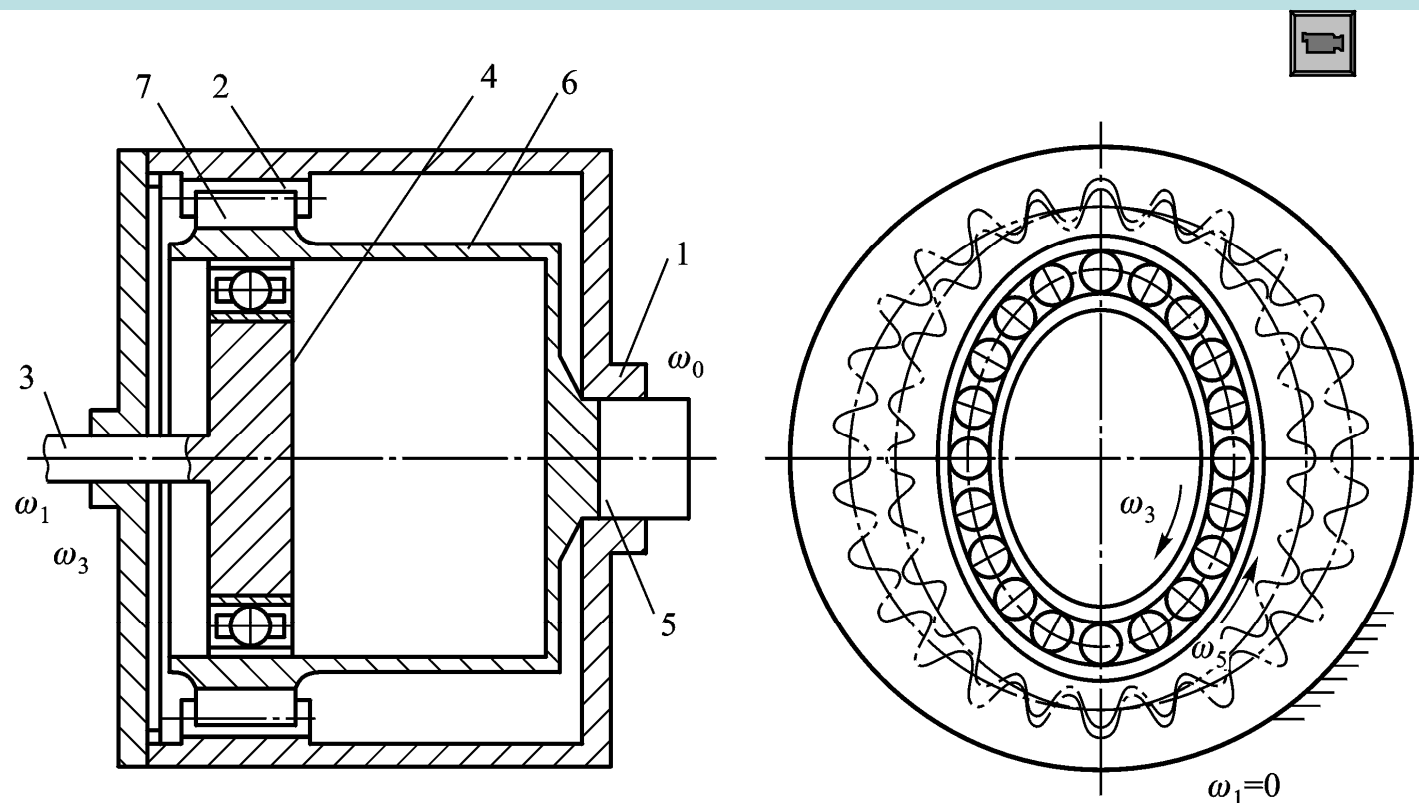
## 1. 谐波齿轮传动

谐波传动是利用一个构件的可控制的弹性变形来实现机械运动的传递。谐波传动通常由**三个基本构件**(俗称三大件)组成,包括一个有内齿的**刚轮**,一个工作时可产生径向弹性变形并带有外齿的**柔轮**和一个装在柔轮内部、呈椭圆形、外圈带有滚动轴承的**波发生器**。柔轮的外齿数少于刚轮的内齿数。



目前, 机器人的旋转关节有**60%~70%**都使用谐波齿轮。

在波发生器转动时，相应于长轴方向的柔轮外齿正好完全啮入刚轮的内齿；在短轴方向，则外齿全脱开内齿。当刚轮固定，波发生器转动时，柔轮的外齿将依次啮入和啮出刚轮的内齿，柔轮齿圈上的任一点的径向位移将呈近似于余弦波形的变化，所以这种传动称作谐波传动。



1—刚轮；2—刚轮内齿圈；3—输入轴；4—谐波发生器；  
5—输出轴；6—柔轮；7—柔轮齿圈

## 减速比计算公式:

---

- ✓ 若刚性齿轮（齿数 $Z_1$ ）固定，谐波发生器为输入，柔性齿轮（齿数 $Z_2$ ）为输出，则速比为  $i = -\frac{z_2}{z_1 - z_2}$  负号表示方向与输入相反。
- ✓ 若柔性齿轮（齿数 $Z_2$ ）固定，谐波发生器为输入，刚性齿轮（齿数 $Z_1$ ）为输出，则速比为  $i = \frac{z_1}{z_1 - z_2}$  正号表示方向与输入相同。

假设刚性齿轮有100个齿，柔性齿轮比它少2个齿，则当谐波发生器转50圈时，刚性齿轮转1圈（柔轮固定），这样只占用了很小的空间就可得到1:50的减速比。

## 谐波传动的主要特点

---

- 传动比大，单级为50—300，双级可达 $2 \times 10^6$ 。
- 传动平稳，承载能力高，传递单位扭矩的体积和重量小。在相同的工作条件下，体积可减小20—50%。
- 齿面磨损小而均匀，传动效率高。当结构合理，润滑良好时，对 $i = 100$ 的传动，效率可达0.85。
- 传动精度高。在制造精度相同的情况下，谐波传动的精度可比普通齿轮传动高一级。若齿面经过很好的研磨，则谐波齿轮传动的传动精度要比普通齿轮传动高4倍。
- 回差小。精密谐波传动的回差一般可小于 $3'$ ，甚至可实现无回差传动。
- 可以通过密封壁传递运动。这是其他传动机构难实现的。
- 谐波传动不能获得中间输出，并且杯式柔轮刚度较低。

## 2. RV摆线针轮传动

**RV（Rot-Vector）**摆线针轮传动装置，是由一级行星轮系再串联一级摆线针轮减速器组合而成的。

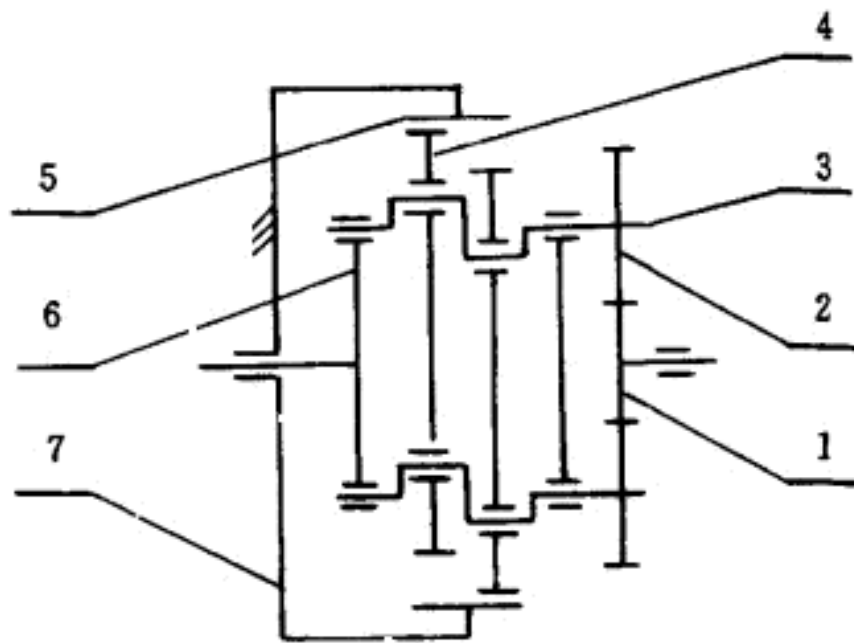
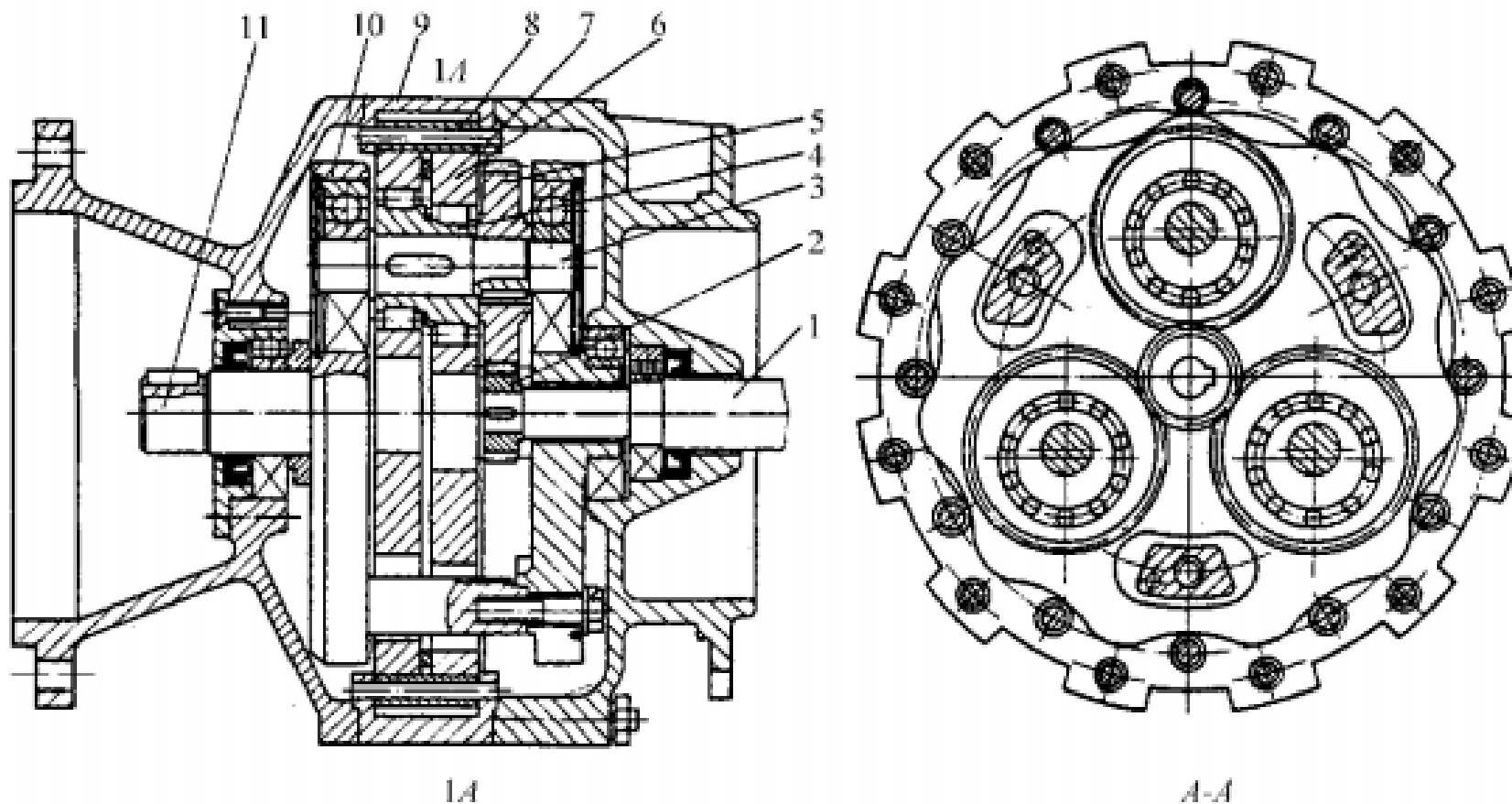


图1 RV减速器传动简图

1—中心轮；2—行星轮；3—曲柄轴  
4—摆线轮；5—针齿；6—输出轴；7—针齿壳

图1是RV减速器传动简图。它由渐开线圆柱齿轮行星减速机构和摆线针轮行星减速机构两部分组成。渐开线行星齿轮2与曲柄轴3连成一体，作为摆线针轮传动部分的输入。如果渐开线中心齿轮1顺时针方向旋转，那么渐开线行星齿轮在公转的同时还有逆时针方向自转，并通过曲柄轴带动摆线轮作偏心运动，此时，摆线轮在其轴线公转的同时，还将反方向自转，即顺时针转动。同时还通过曲柄轴推动钢架结构的输出机构顺时针方向转动。



RV型摆线针轮传动结构图

1-输入轴，2-中心轮，3-转臂（曲轴），4-偏心套，  
5-行星轮，6-摆线轮（RV齿轮），7-针齿销，8-针齿套，  
9-针轮壳体（机架），10-支承圆盘，11-输出轴



---

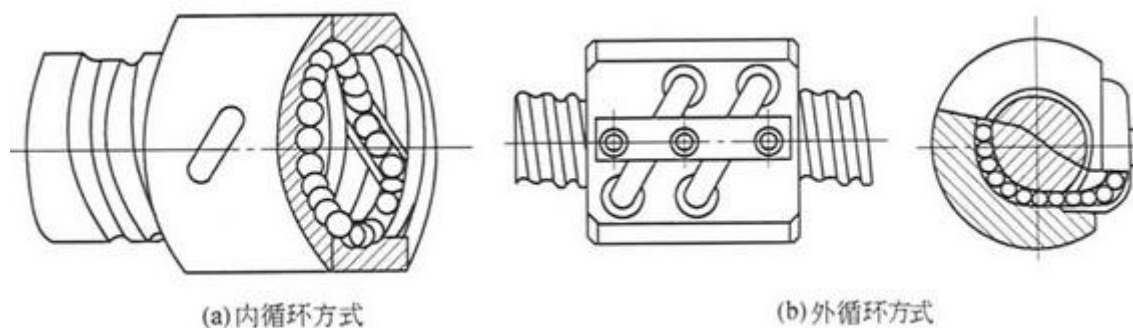
## RV摆线针轮传动主要特点

与谐波传动相比，RV摆线针轮传动除了具有相同的速比大、同轴线传动、结构紧凑、效率高等待点外，最显著的特点是刚性好，传动刚度较谐波传动要大2—6倍，但重量却增加了1—3倍。

该减速器特别适用于操作机上的第一级旋转关节(腰关节)，这时自重是坐落在底座上的，充分发挥了高刚度作用，可以大大提高整机的固有频率，降低振动；在频繁加、减速的运动过程中可以提高响应速度并降低能量消耗。

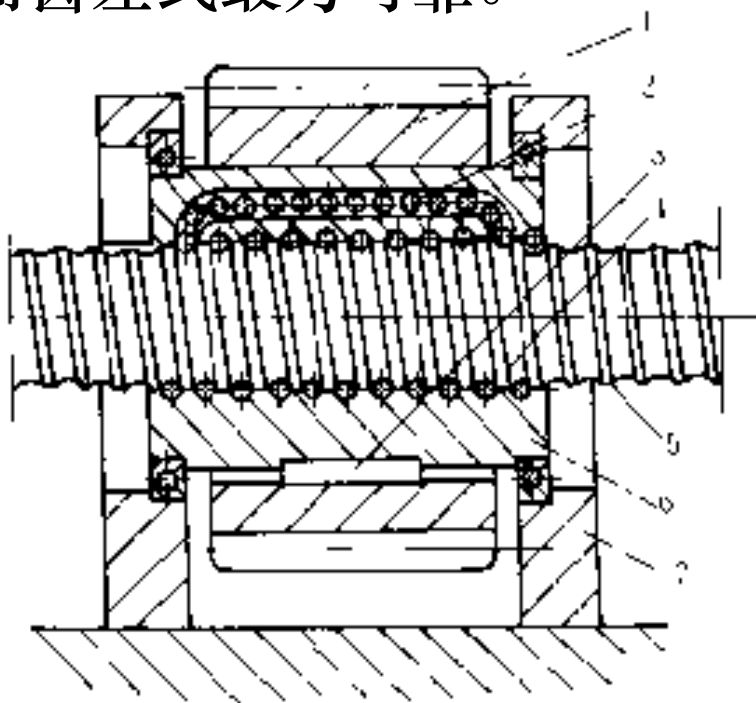
### 3. 滚珠丝杠传动

滚珠丝杠传动可以将精密丝杠的旋转运动，转换成螺母的直线运动。由于在丝杠螺母副的螺旋槽里放置了许多滚珠，使丝杠与螺母之间的传动过程中的滑动摩擦变为滚动摩擦，因此传动效率高（可达到90%），并能消除一般丝杠低速运动时的爬行现象。



滚珠有内循环和外循环两种方式

滚珠丝杠螺母副必须设置滚珠的返回通道，才能使滚珠循环使用。为了**消除回差**(空回)，螺母分成两段，以垫片、双螺母或齿差调整两段螺母的相对轴向位置，以消除间隙和施加预紧力，使得在有额定轴间负荷时也能使回差为零。**其中用的最多的是双螺母式**，而齿差式最为可靠。



- 1—齿轮； 2—返回装置；
- 3—键； 4—滚珠；
- 5—丝杠； 6—螺母；
- 7—支座

### 3. 滚珠丝杠传动

---

#### 滚珠丝杠传动特点：

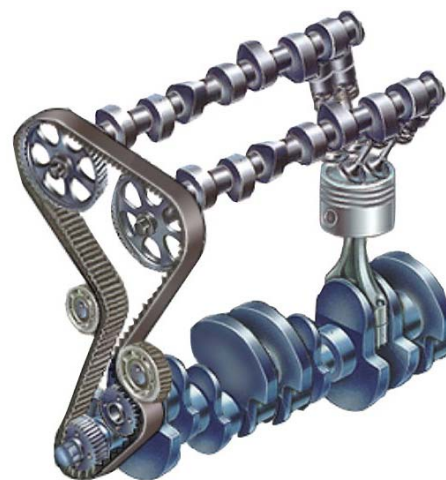
- (1)摩擦小、效率高。一般情况下，传动的效率在90%以上。
- (2)动、静摩擦系数相差极小，传动平稳，灵敏度高。
- (3)磨损小、寿命长。
- (4)可以通过预紧消除轴向间隙，提高轴向刚度。

滚珠丝杠传动不能自锁，必须有防止逆转的制动或自锁机构才能安全地用于有自重下降的场合。最怕落入灰尘、铁屑、砂粒。通常，螺母两端必须密封，丝杠的外露部分必须用“风箱”套或钢带卷套加以密封。



## 2.2.3 机器人的常用传动机构

- 另外，对于齿轮传动、蜗轮传动和齿轮齿条传动，须特别注意**消除间隙**问题，否则回差很大，达不到应有的转角精度要求。
- 对于链传动、齿形带传动、钢带传动和钢丝绳传动，必须考虑**张紧**问题，否则也会产生很大的回差。



齿形带传动机构

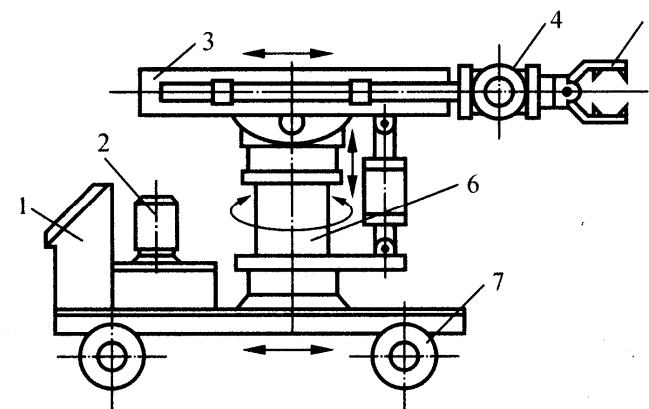
## 2.3 工业机器人机身和臂部设计

### 机身和臂部的作用

- ✓ **机身**（往往与机座做成一体）
  - 起连接、支承和传动的作用
  - 既可以是固定式的，也可以是行走式的

- ✓ **臂部**

- 支承腕部和手部，并带动它们在空间运动
- 在工作中直接承受腕、手和工件的静、动载荷，自身运动又较多，故受力复杂。



1—控制部件，2—驱动部件，3—臂部，4—腕部，5—手部，6—机身，7—行走机构

## 2.3 工业机器人机身和臂部设计

---

### 2.3.1 机身设计

#### 1.机身的典型结构形式

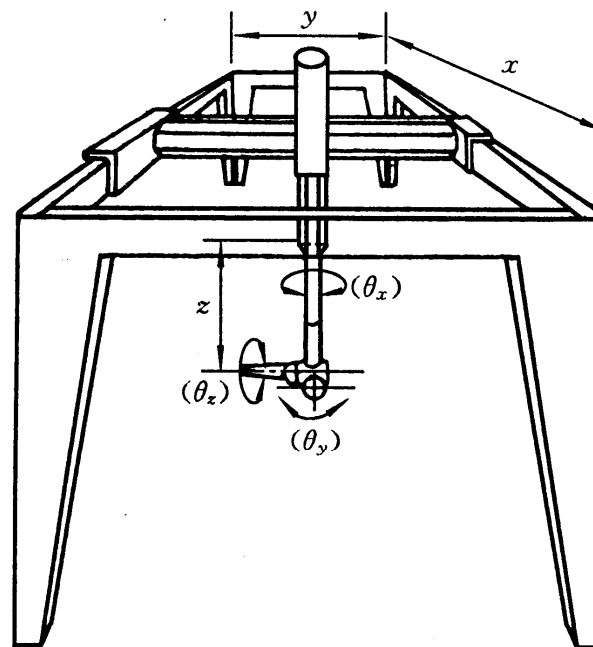
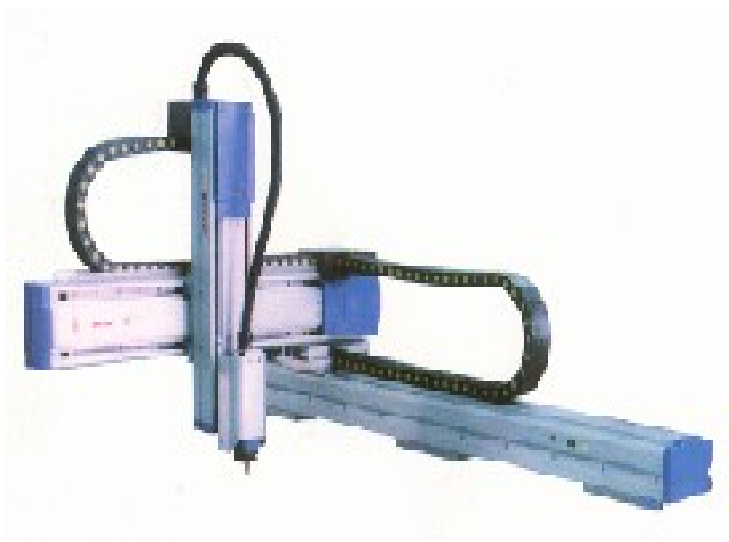
对于工业机器人，采用哪种结构（或自由度）形式由机器人的总体设计来定。主要有以下几种：

- 直角坐标型（3P）
- 圆柱坐标型（R2P）
- 极坐标型（球面坐标型）（2RP）
- 关节坐标型（3R）
- 平面关节坐标型（SCARA）

## 2.3.1 机身设计

### 1.机身的典型结构形式

直角坐标型（3P，升降或水平移动属于机身）



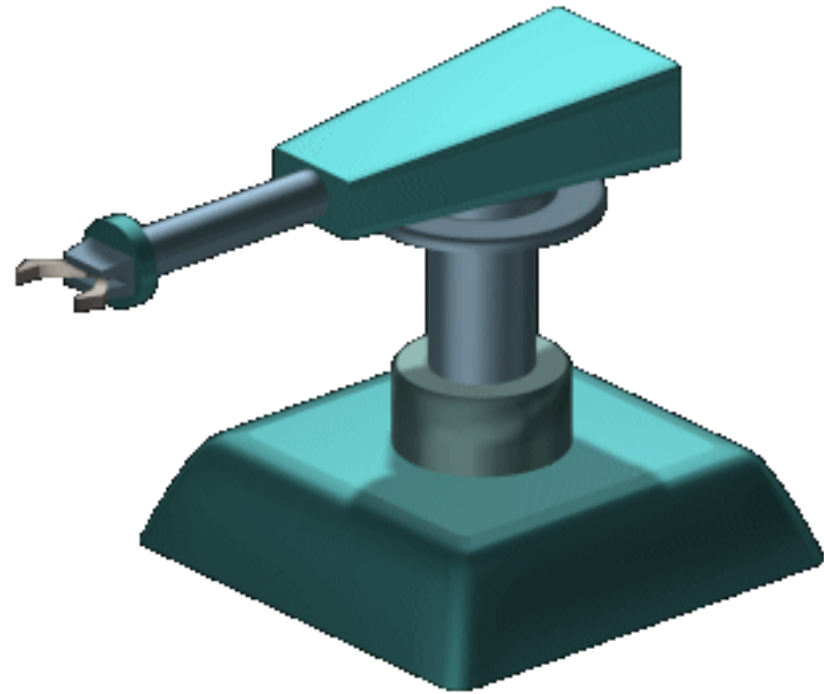
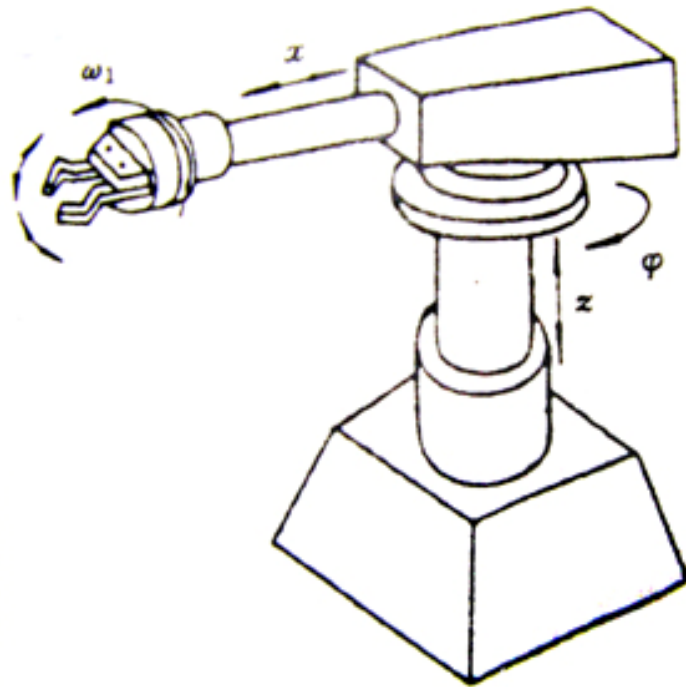
- 优点：控制简单；刚性最大（龙门式）；容易达到高精度。
- 缺点：操作范围小；占地面积大；运动速度低；密封性差。



## 2.3.1 机身设计

### 1.机身的典型结构形式

圆柱坐标型（R2P，回转与升降属于机身）

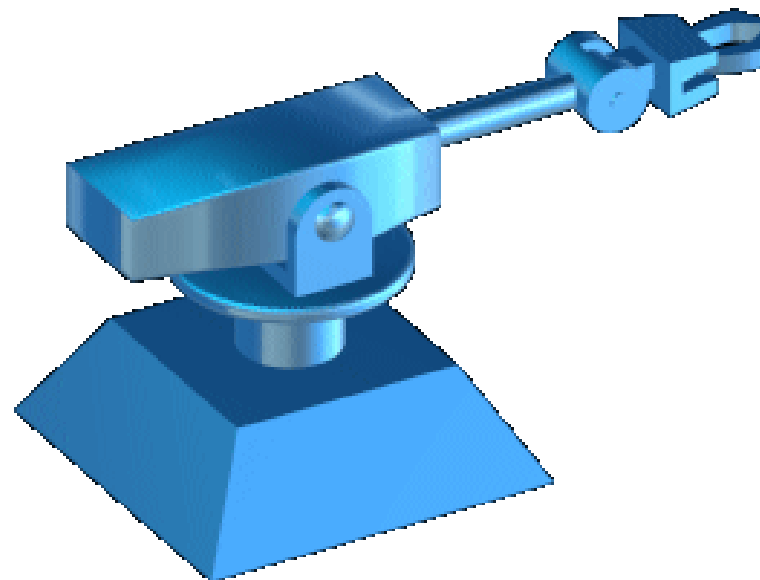
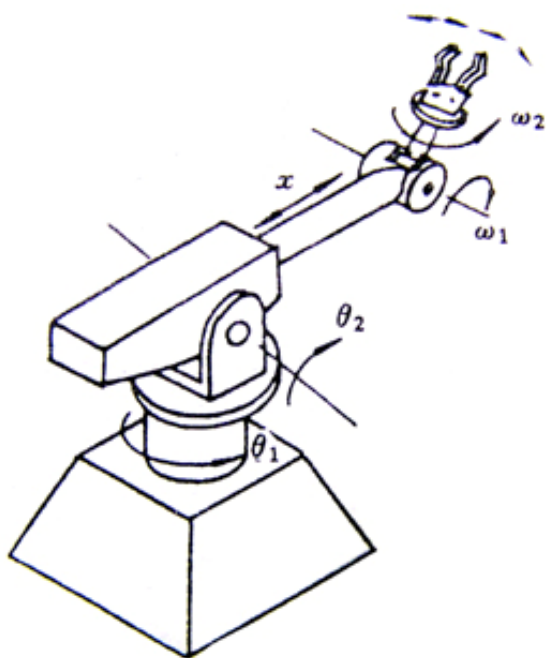


- 优点：工作范围可以扩大；计算简单；动力输出较大；
- 缺点：手臂可达空间受到限制；直线驱动部分难以密封；安全性差。

## 2.3.1 机身设计

### 1. 机身的典型结构形式

球坐标式（**2RP**，回转与俯仰属于机身）

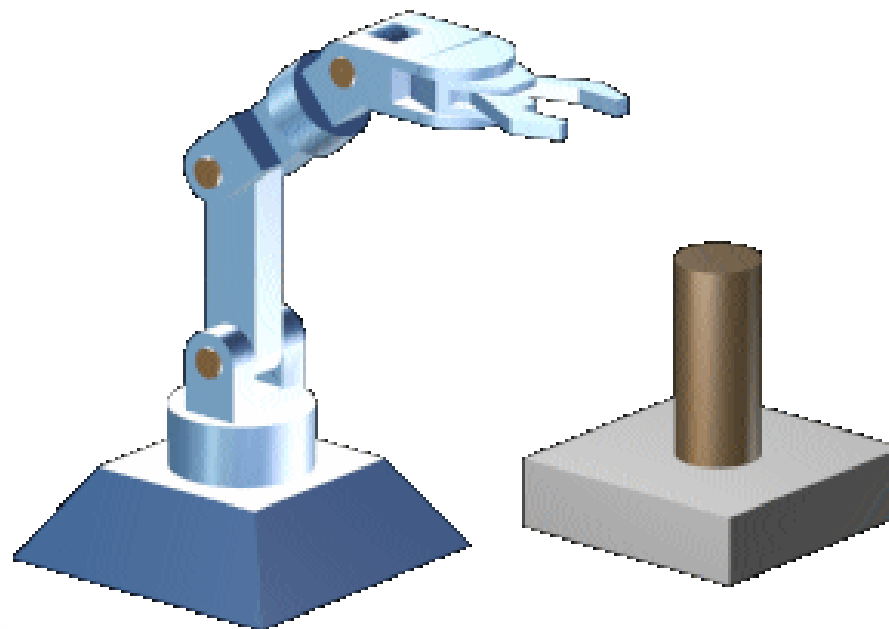
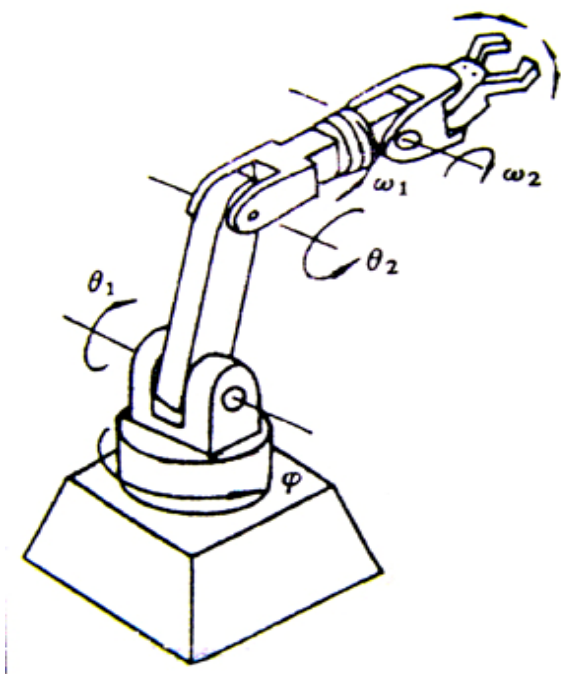


- 优点：中心支架附近的工作范围大；工作空间大。
- 缺点：坐标系复杂，难以控制；存在工作死区；密封性较差。

## 2.3.1 机身设计

### 1.机身的典型结构形式

关节坐标型（3R，回转自由度属于机身）



- 优点：动作灵活；工作空间大；易密封；工作条件要求低；适合用电机驱动。
- 缺点：计算量大；输出动力不大。

## 2.3.1 机身设计

---

### 1.机身的典型结构形式

平面关节型（**SCARA**型，回转自由度属于机身）

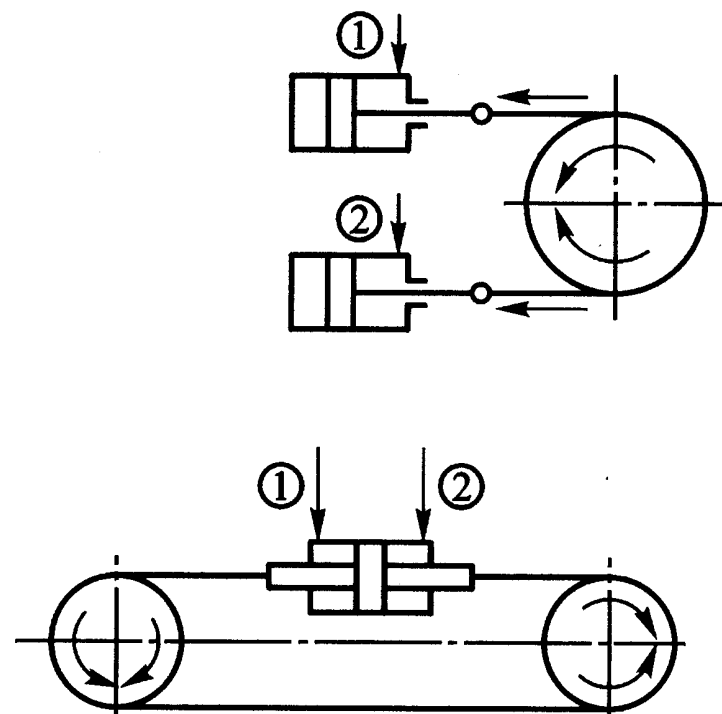
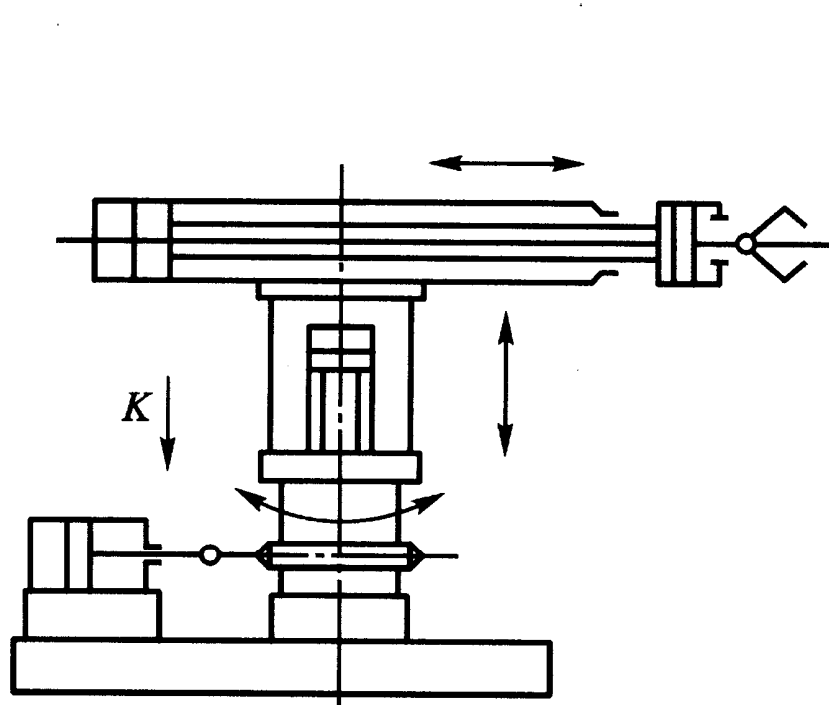


特点：

垂直方向上刚度高；  
水平面内动作灵活；  
适于孔轴装配工作；

## 2.3.1 机身设计

### 2.回转与升降机身

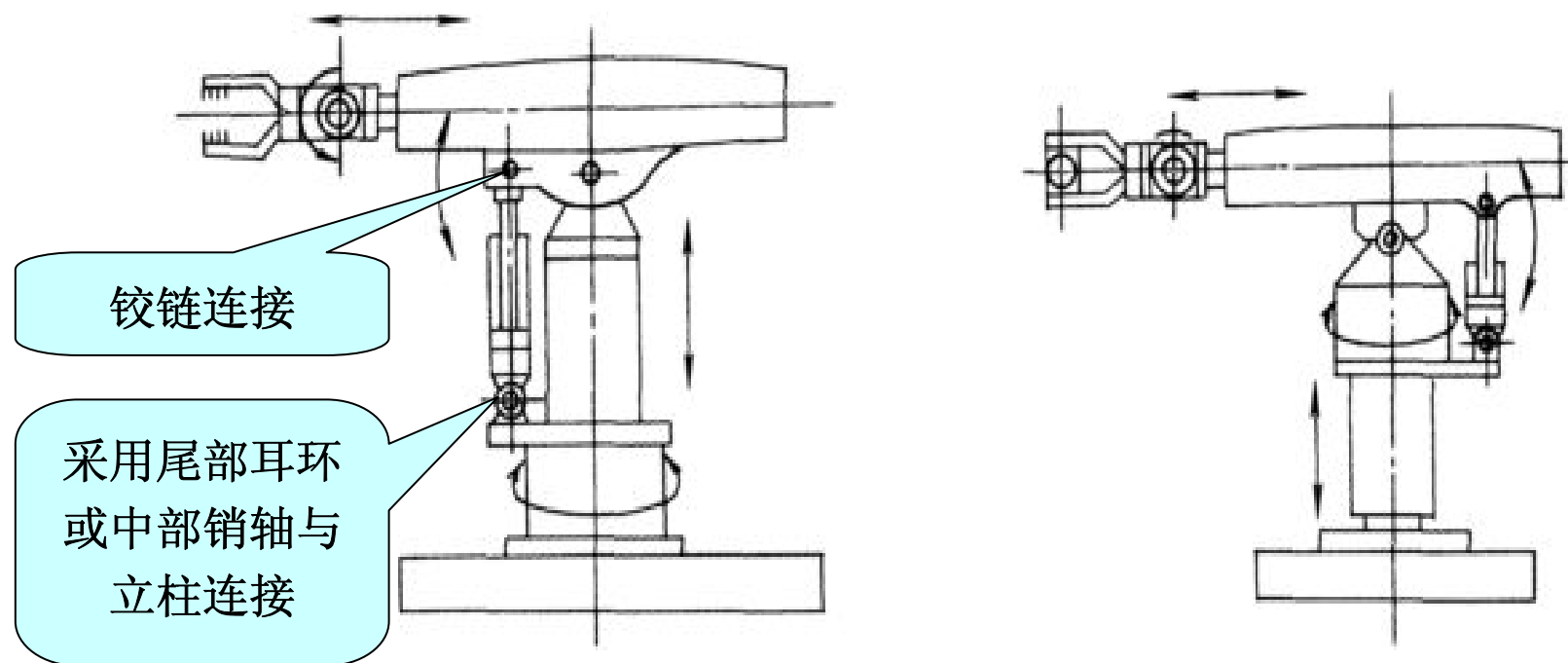


(a) 气动单杆活塞缸驱动, (b) 气动双杆活塞缸驱动

链条链轮型回转机身

## 2.3.1 机身设计

### 2.回转与俯仰机身



回转与俯仰机身

(俯仰自由度由液压缸驱动实现)

### 3. 机身驱动力与力矩计算

总惯性力矩

$$M = M_m + M_g$$

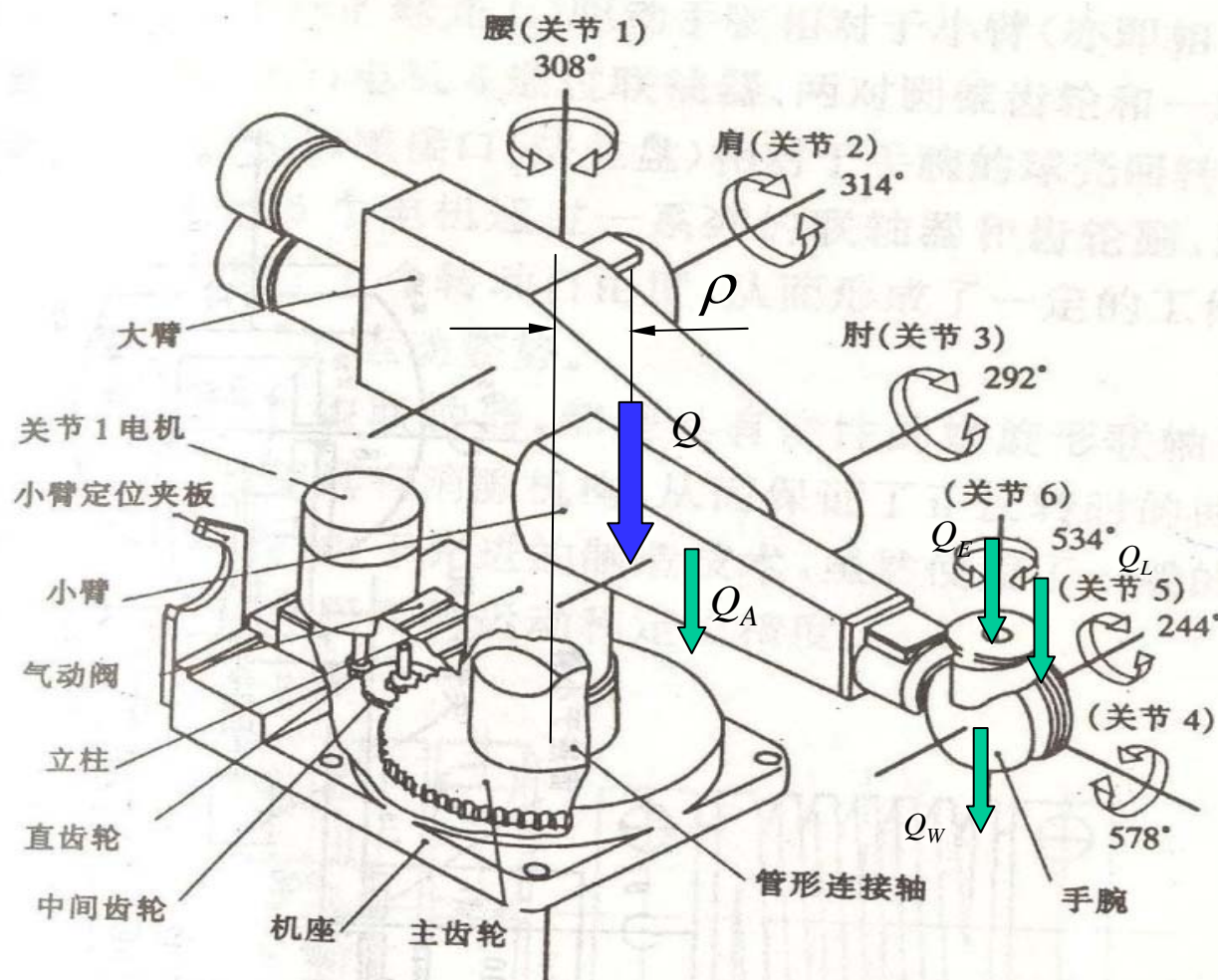
总摩擦力矩

$$M_g = J \frac{\omega}{t}$$

$$Q = Q_E + Q_W + Q_A + Q_L$$

$$M_p = Q \cdot \rho$$

总偏重力矩



## 2.3 工业机器人机身和臂部设计

---

### 2.3.2 臂部设计

#### 1. 手臂的直线运动机构

手臂的伸缩、横向移动都属于直线运动。实现直线运动的常用机构有：活塞油缸、气缸、齿轮齿条、丝杠螺母及连杆机构等。其中，**活塞油缸和气缸在机器人中应用最多。**



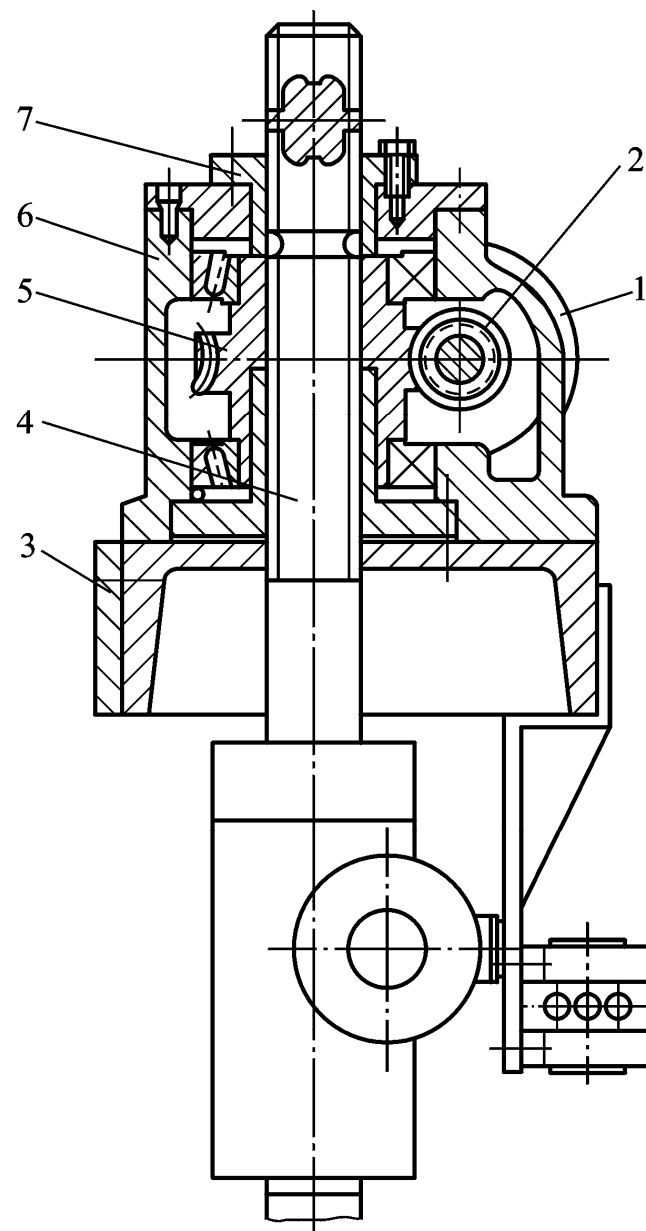
## 2.3.2 臂部设计

由电机1带动蜗杆2使蜗轮5回转，蜗轮内孔有内螺纹，和丝杠4组成丝杠螺母运动副，带动丝杠4作**升降运动**。



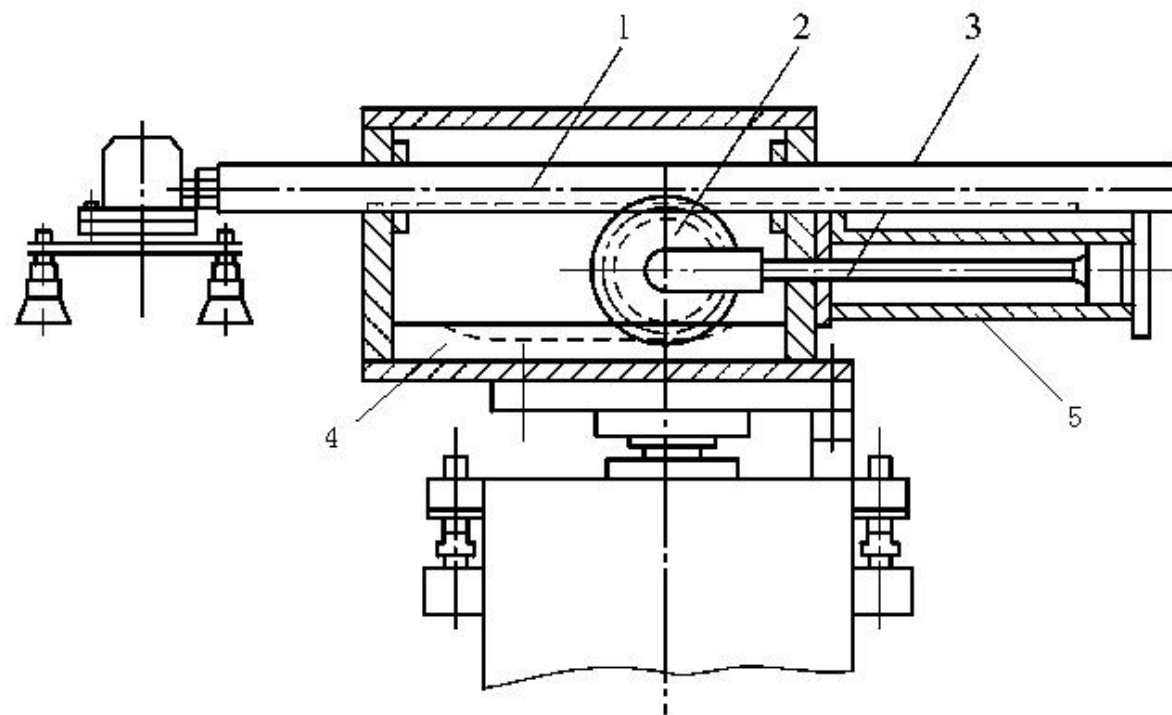
右图：手臂的升降运动

1—电动机；2—蜗杆；3—臂架；4—丝杠；5—蜗轮；6—箱体；7—花键套



## 2.3.2 臂部设计

气缸5中通以压缩空气使活塞杆3左移时，与活塞杆3相连的齿轮2在固定齿条4上滚动，同时带动运动齿条1左移。手臂和运动齿条1固连在一起，从而实现手臂的**直线运动**。



由气缸带动齿轮齿条传动的手臂直线运动

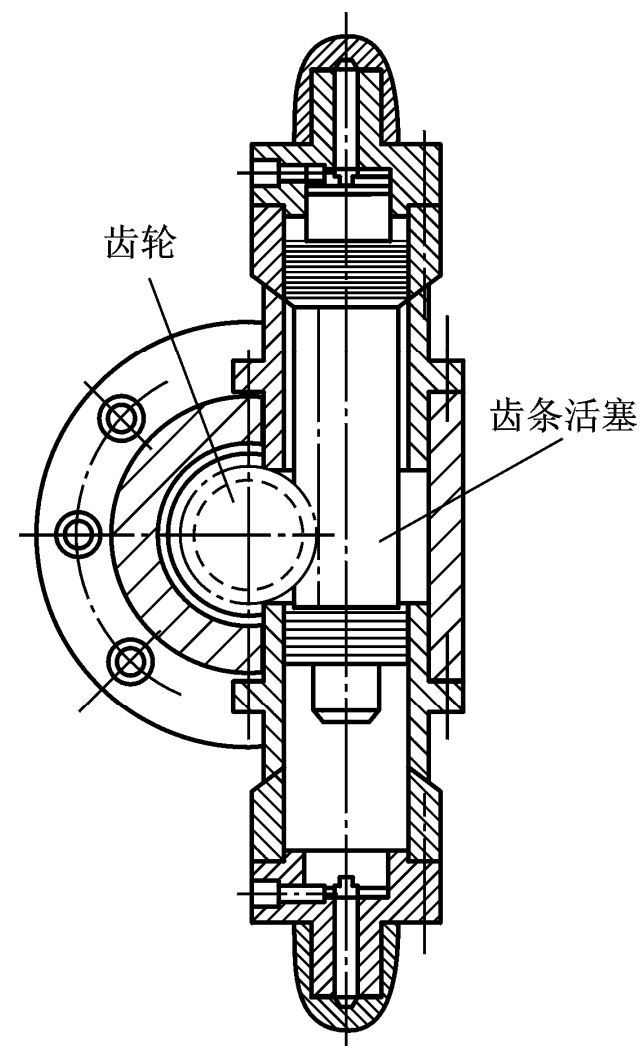
1—运动齿条；2—齿轮；3—活塞杆；4—固定齿条；5—气缸

## 2.3.2 臂部设计

### 2、手臂回转运动机构

实现机器人手臂回转运动的常用机构：齿轮传动、同步带、活塞缸和连杆机构等。

- 右图所示为采用活塞缸和齿轮齿条机构实现手臂的回转运动。
- 活塞缸两腔分别通以压力油推动齿条活塞作往复移动，与齿条啮合的齿轮即作往复回转。由于齿轮和手臂固联，从而实现手臂的回转运动。

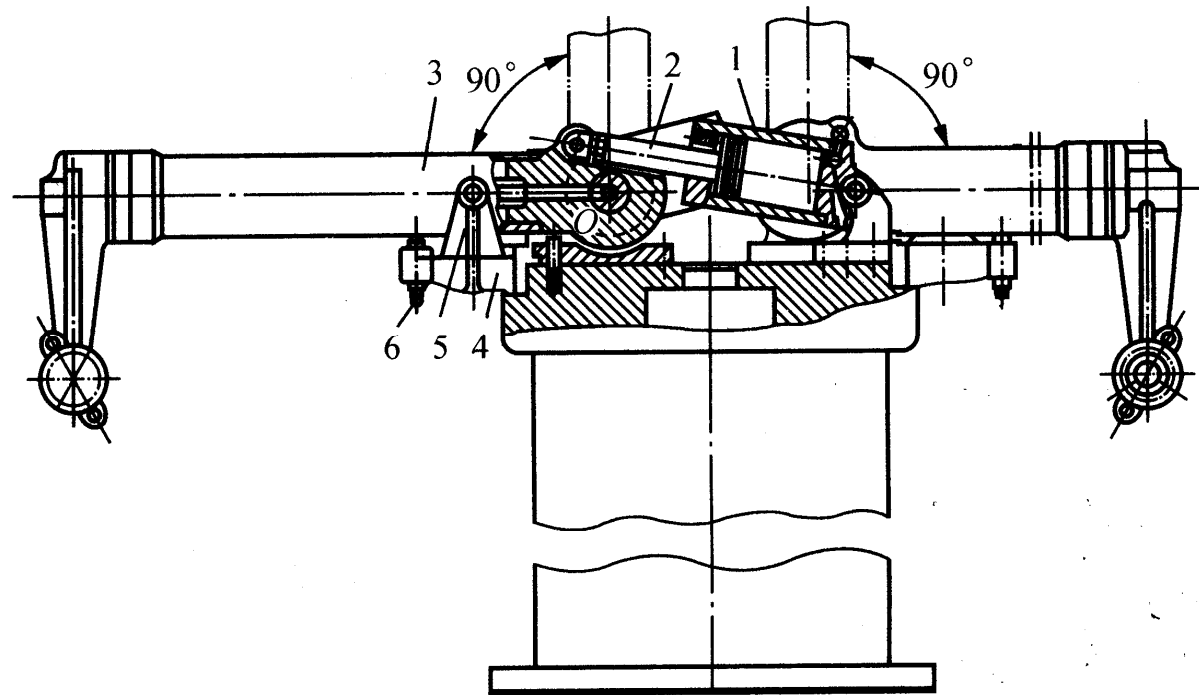


## 2.3.2 臂部设计

### 2、手臂回转运动机构

下图为采用活塞缸和连杆机构的一种**双臂机器人结构图**。

手臂的上下摆动由铰接活塞油缸和连杆机构实现。当活塞缸1的两腔通压力油时，通过连杆2带动曲柄3（即手臂）绕轴心作 $90^\circ$ 的上下摆动。

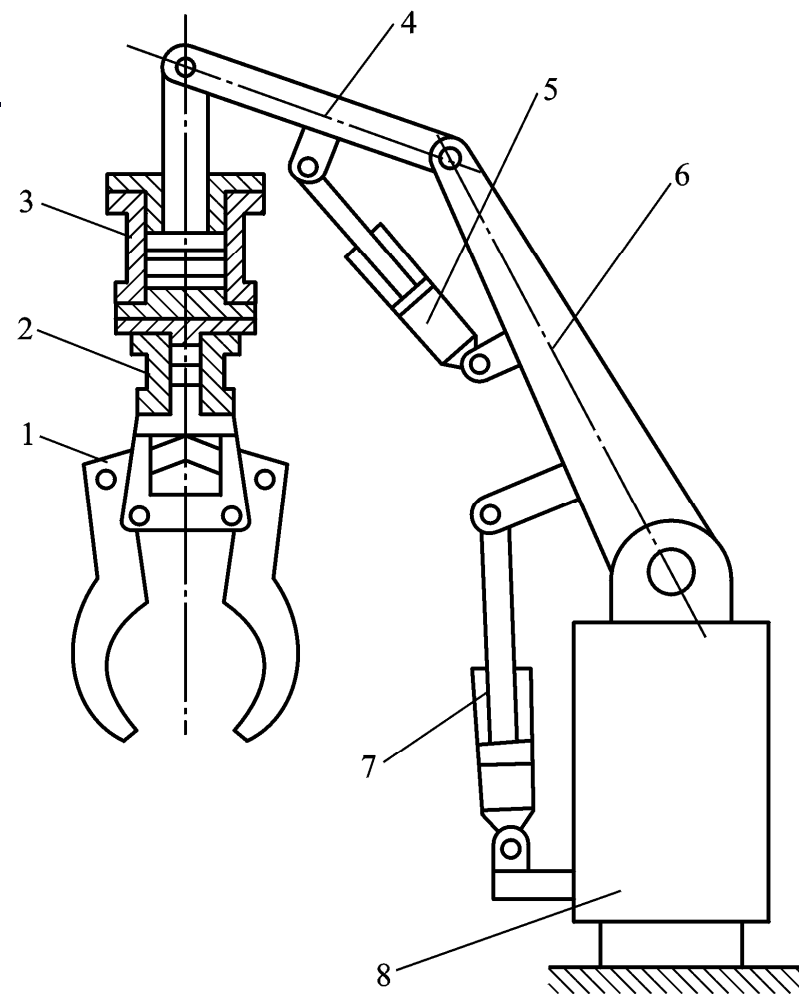


1 - 铰接活塞油缸；2 - 连杆（即活塞杆）；  
3 - 手臂（即曲柄）；4 - 支撑架；5, 6 - 定位螺钉

## 2.3.2 臂部设计

### 3. 手臂俯仰运动机构

通常采用摆动液(气)压缸驱动、铰链连杆机构传动实现手臂的俯仰。



工业机器人手臂俯仰机构

1—手部；2—夹紧缸；3—升降缸；4—小臂；5、7—摆动油缸；6—大臂；8—立柱

### 2.3.3 机身和臂部设计应注意的问题

---

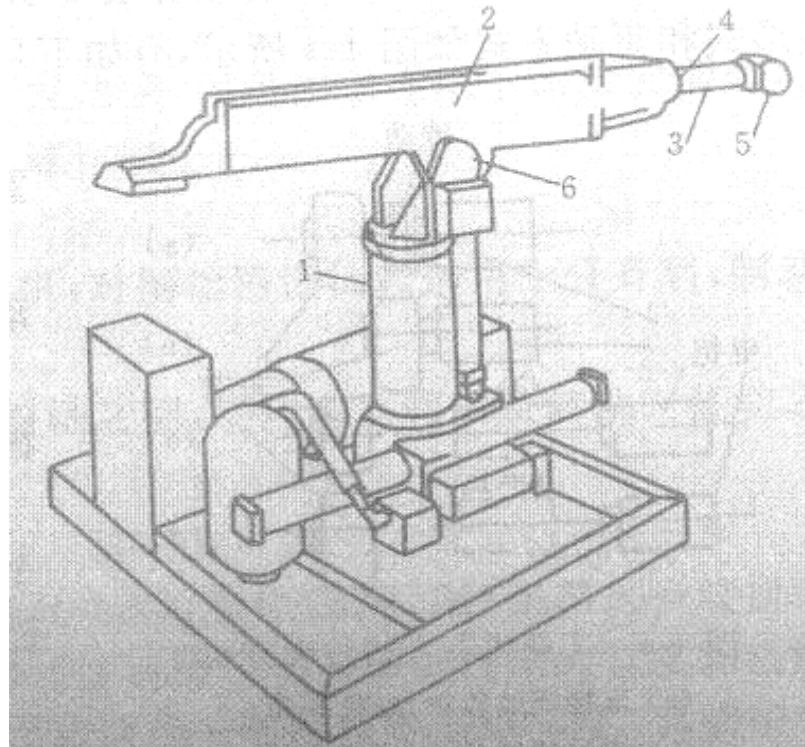
机身和臂部的工作性能的优劣对机器人的负荷能力和运动精度影响很大，设计时应注意以下问题：

#### 1、刚度

刚度是指机身或臂部在外力作用下抵抗变形的能力。用外力和在外力方向上的变形量（位移）之比来度量的，变形越小，刚度越大。在有些情况下，刚度比强度更重要，为了提高刚度，应注意：

1) 根据受力情况，合理选择截面形状或轮廓尺寸。机身和臂部既受弯矩，又受扭矩，应选用抗弯和抗扭刚度较大的截面形状。一般采用具有封闭空心截面的构件。不仅有利于提高结构刚度，而且空心内部还可以布置安装驱动装置、传动机构和管线等，使整体结构紧凑，外形美观。

- 
- 2) 提高支承刚度和接触刚度。支撑刚度主要取决于支座的结构形状。接触刚度主要取决于配合表面的加工精度和粗糙度。
- 3) 合理布置作用力的位置和方向。尽量使各作用力引起的变形互相抵消，如下图Unimate2000机器人。



Unimate2000机器人

---

## 2、精度

机器人的精度最终集中在手部的的位置精度上，影响精度的因素：各部件的刚度、部件的制造和装配精度、定位和连接方式，尤其是导向装置的精度和刚度对机器人的位置精度影响很大。

## 3、平稳性

机身和臂部质量大，负荷重，速度高，易引起冲击和振动，必要时应有缓冲装置吸收能量。从减少能量的产生方面应注意：

- 1) 运动部件应紧凑、质量轻，转动惯量小，以减少惯性力。
- 2) 必须注意各运动部件重心的分布。



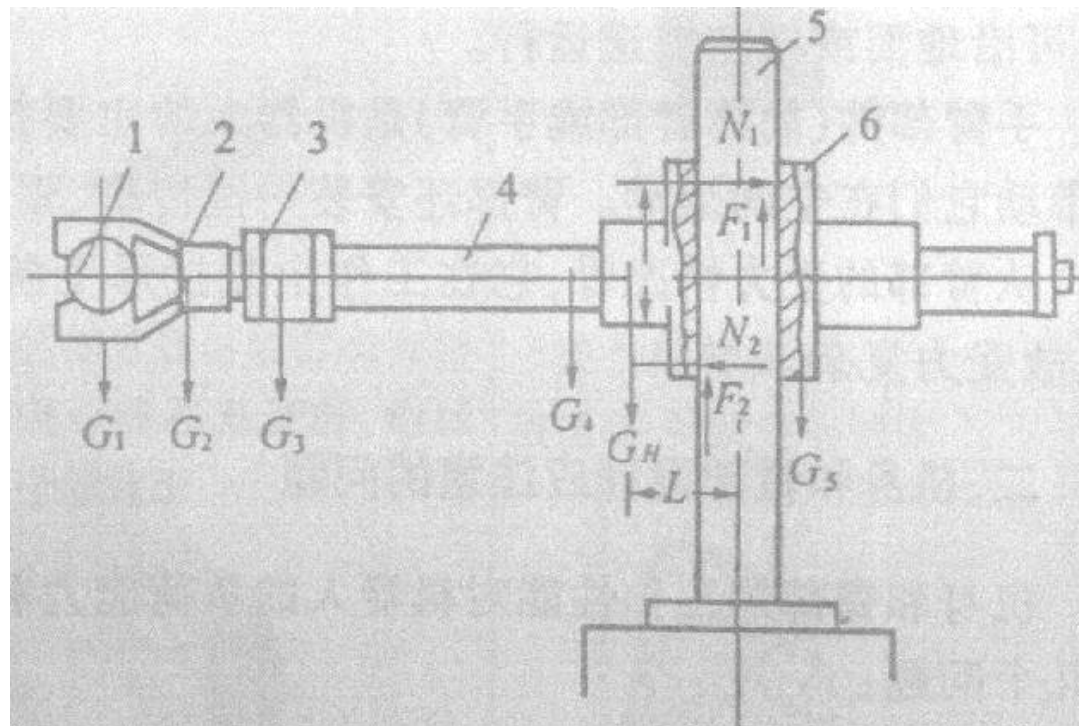


图 2-6 手臂的重力偏心

1—工件;2—手部;3—腕部;4—臂部;5—立柱;6—臂架

$G_1$ —工件重量; $G_2$ —手部重量; $G_3$ —腕部重量;

$G_4$ —臂部重量; $G_5$ —臂架重量; $G_H$ —总重

Unimate2000机器人

---

## 4、其它

- 1) 传动系统应尽量简短，以提高传动精度和效率。
- 2) 各部件布置要合理，操作维护要方便。
- 3) 特殊情况特殊考虑，在高温环境中应考虑**热辐射**的影响；腐蚀性环境中应考虑**防腐蚀**问题；危险环境应考虑**防爆**问题。

## 2.4 机器人的腕部设计

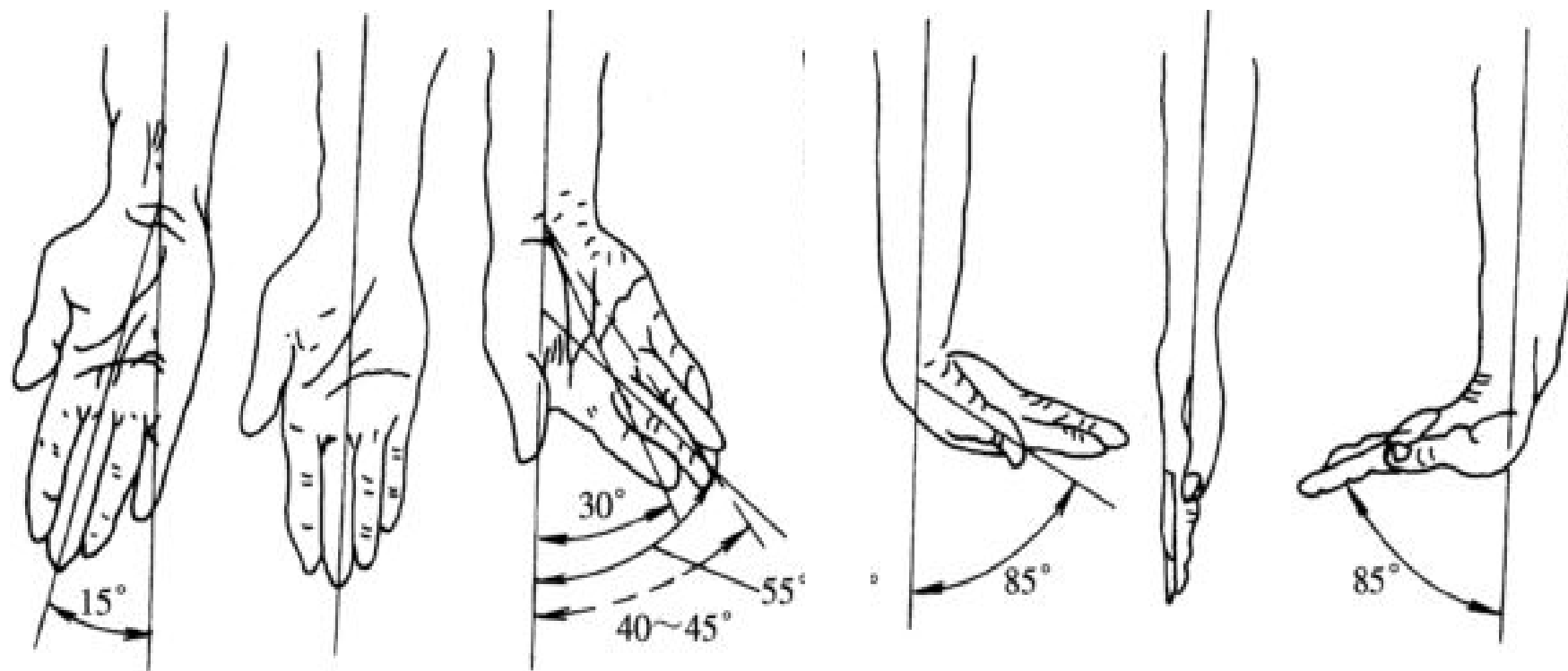
---

### 2.4.1 基本概念

**手腕的作用**：工业机器人的腕部是联接手部与臂部的部件，起支承手部的作用。机器人一般需要六个自由度才能使手部达到目标位置和处于所期望的姿态，手腕上的自由度主要是实现手部所期望的姿态。

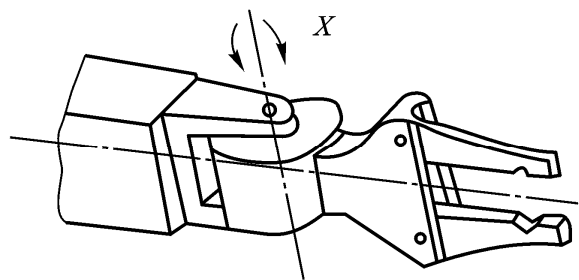
为使手部能处于空间任意方向，要求腕部能实现对空间三个坐标轴X、Y、Z的转动，即具有**翻转、俯仰和偏转（偏航）**三个自由度。

## 人类手腕的两个弯屈 (Bend, 简称为B) 关节

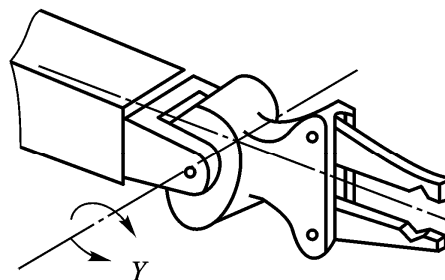


(a) 偏转 (Yaw)      (b) 俯仰 (Pitch)

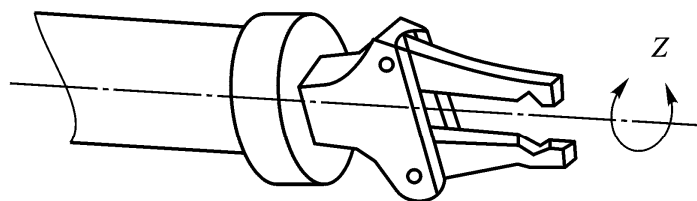
图 人类手腕的两个B关节



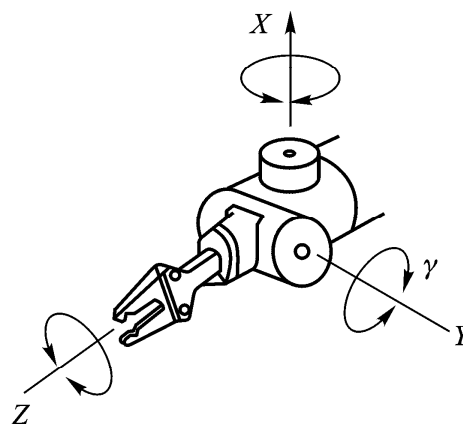
(a) 手腕的偏转



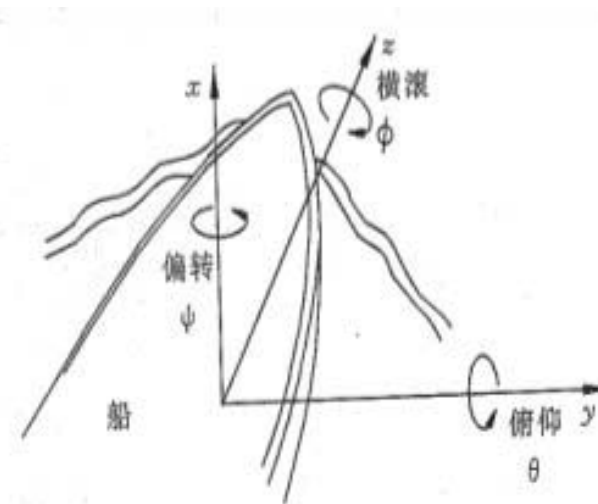
(b) 手腕的俯仰



(c) 手腕的翻转



(d) 腕部坐标系



通常按航海习惯，把手腕的偏转叫作Yaw，用Y表示；把手腕的俯仰叫作Pitch，用P表示；将手腕的翻转叫作Roll，用R表示。

设计时，实际所需自由度数目应根据机器人的工作性能来确定。手腕的大小和重量是手腕设计时需要考虑的关键问题。

## 2.4.2 手腕的分类

---

### 按自由度数目来分类

可分为单自由度手腕、二自由度手腕、三自由度手腕。

#### 1.单自由度手腕

单自由度手腕仅仅实现偏转、俯仰和翻转三个自由度中的一种，其中翻转的角度较大，可达 $360^{\circ}$ 。而俯仰和偏转一般受结构限制，角度较小。这和人的手腕类似，手的左右偏转角只有 $55^{\circ}$ 和 $15^{\circ}$ ，手的上下俯仰角度只有 $85^{\circ}$ 。

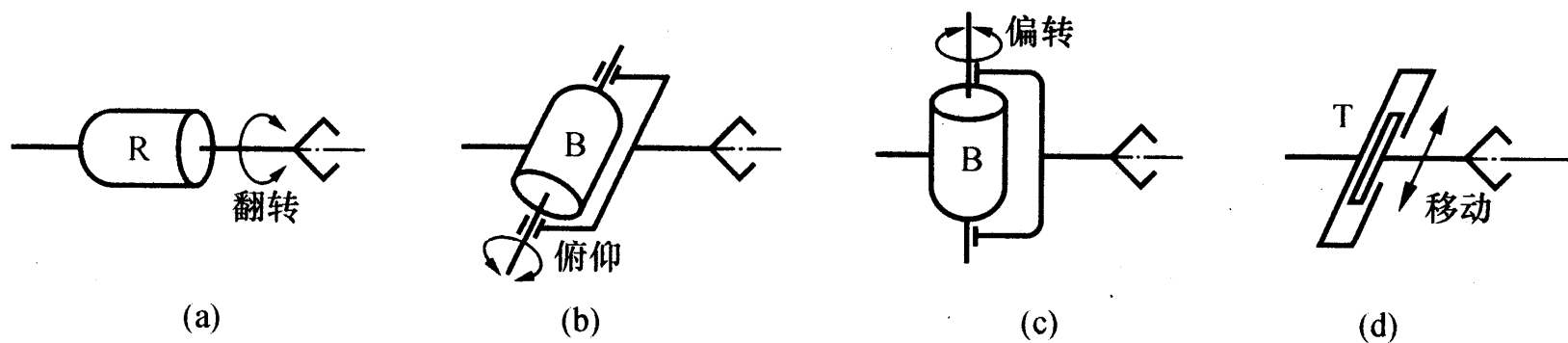
#### 2.二自由度手腕

二自由度手腕通常由偏转、俯仰和翻转三个自由度中任意两个构成。

#### 3.三自由度手腕

通常由偏转、俯仰和翻转三个自由度构成。在此基础上也有许多变化。

# 1.单自由度手腕



单自由度手腕运动形式

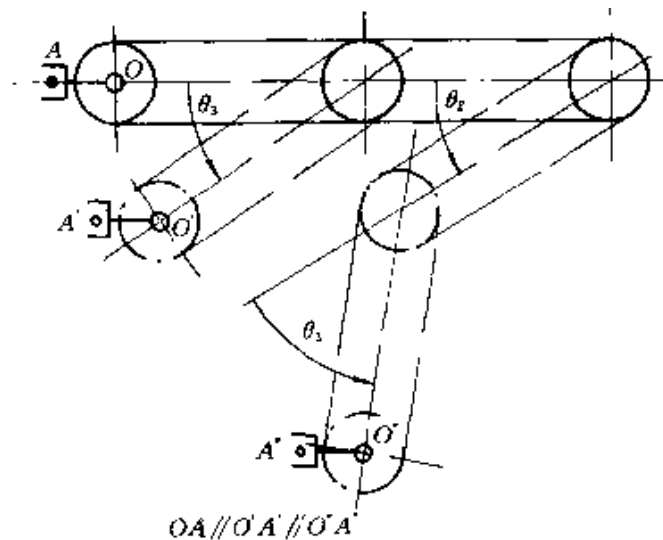
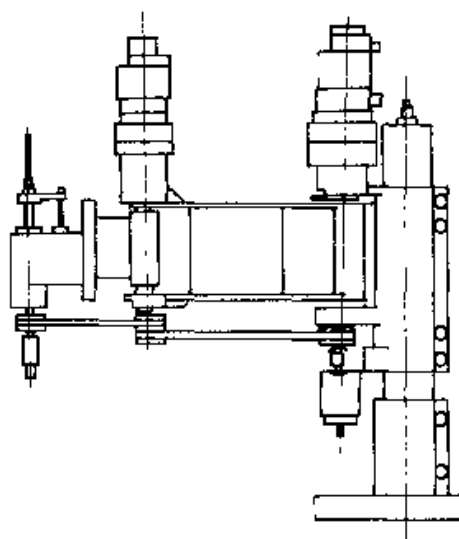
(a) R (Roll) 关节; (b) (c) B (Bend) 关节;  
(d) T (Translate) 关节

## 1、单自由度手腕

**SCARA**水平关节装配机器人的手腕只有绕垂直轴的一个旋转自由度，用于调整装配件的方位。

为了减轻操作机的悬臂重量，手腕的驱动电机固结在机架上。传动为两级等径轮齿形带，所以大、小臂的转动不影响末端执行器的水平方位，而该方位的调整完全取决于腕转动的驱动电机。

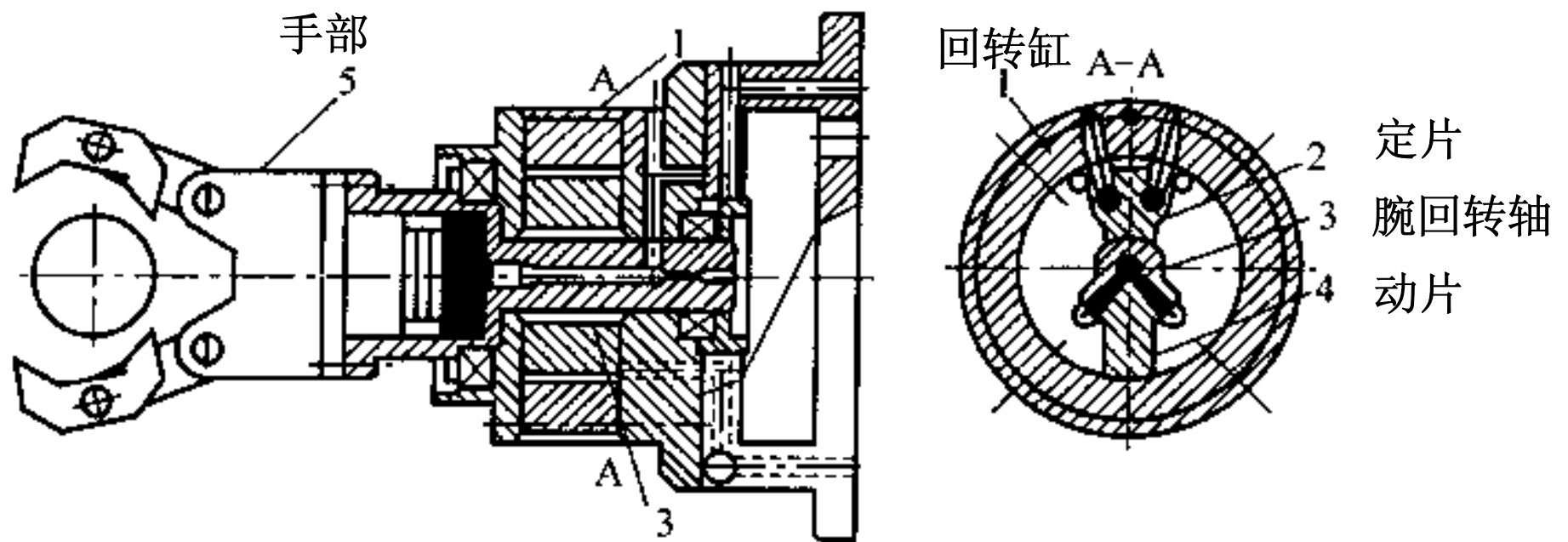
这种传动特点特别适合于电子线路板的插件作业。



SCARA 机器人

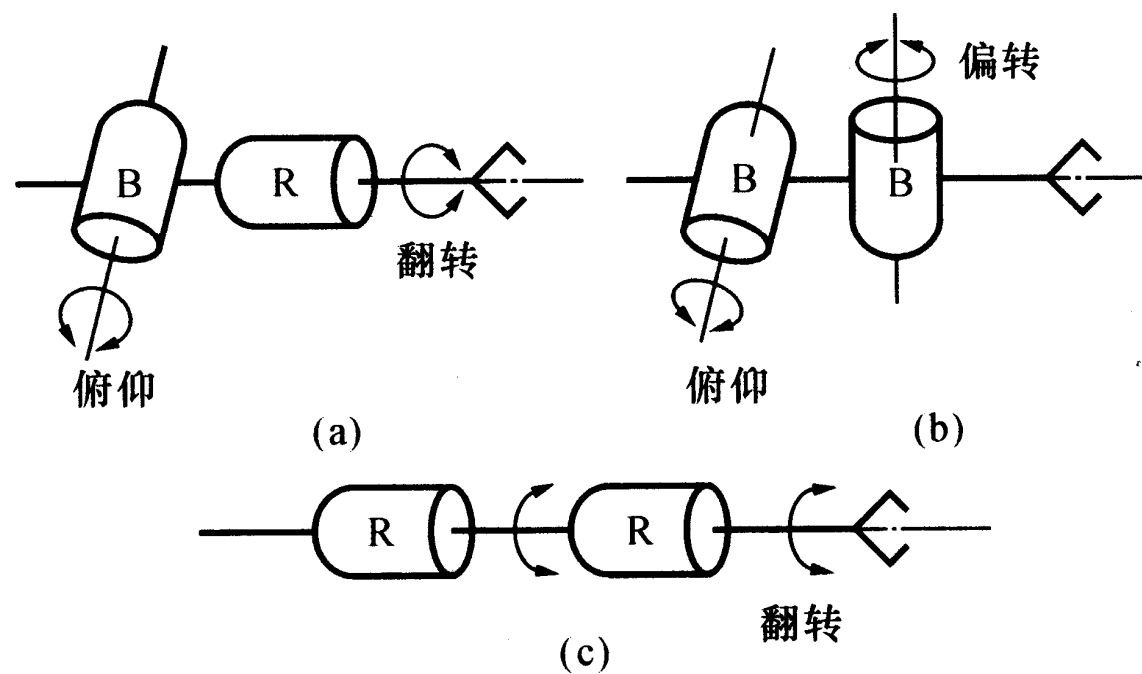


## 1.单自由度手腕



单自由度回转手腕

## 2.二自由度手腕

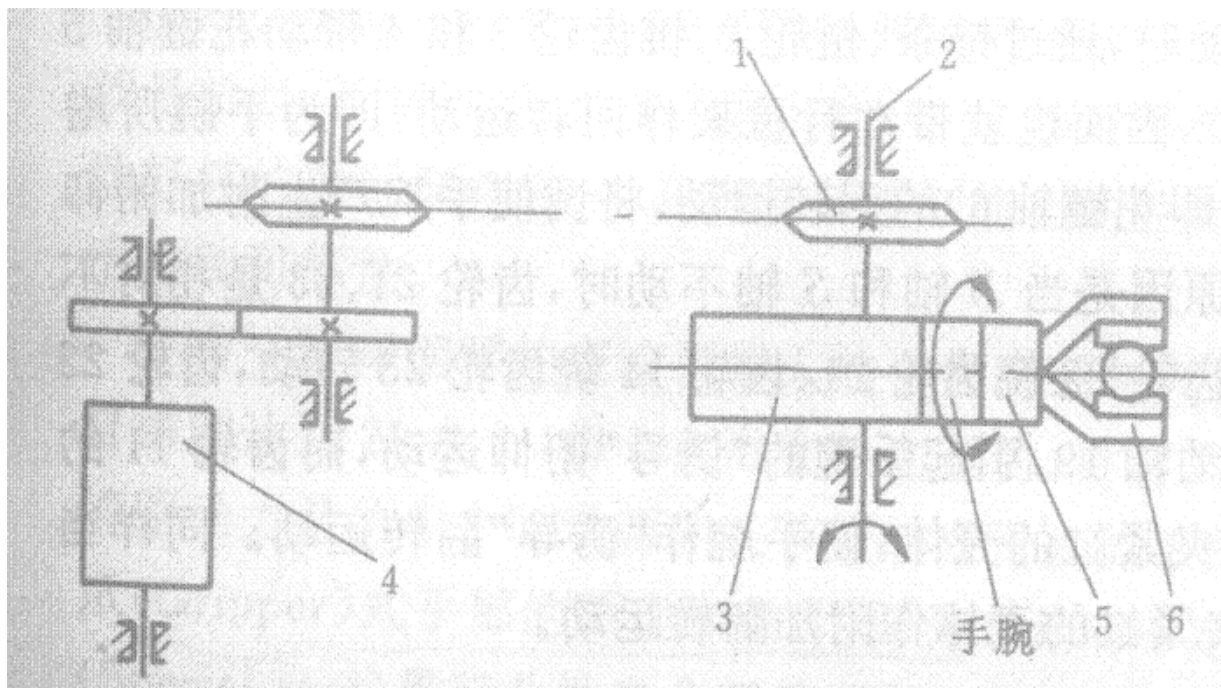


二自由度手腕运动形式

(a) BR手腕； (b) BB手腕； (c) RR手腕

## 2.二自由度手腕

有时为了保证具有足够大的驱动力，驱动装置又不能做得足够小，同时也为了减轻手腕的重量，采用**远距离驱动**方式，驱动源一般放在手臂或机身上。下图是一种具有俯仰和翻转两个自由度的手腕，传动简单，结构紧凑。

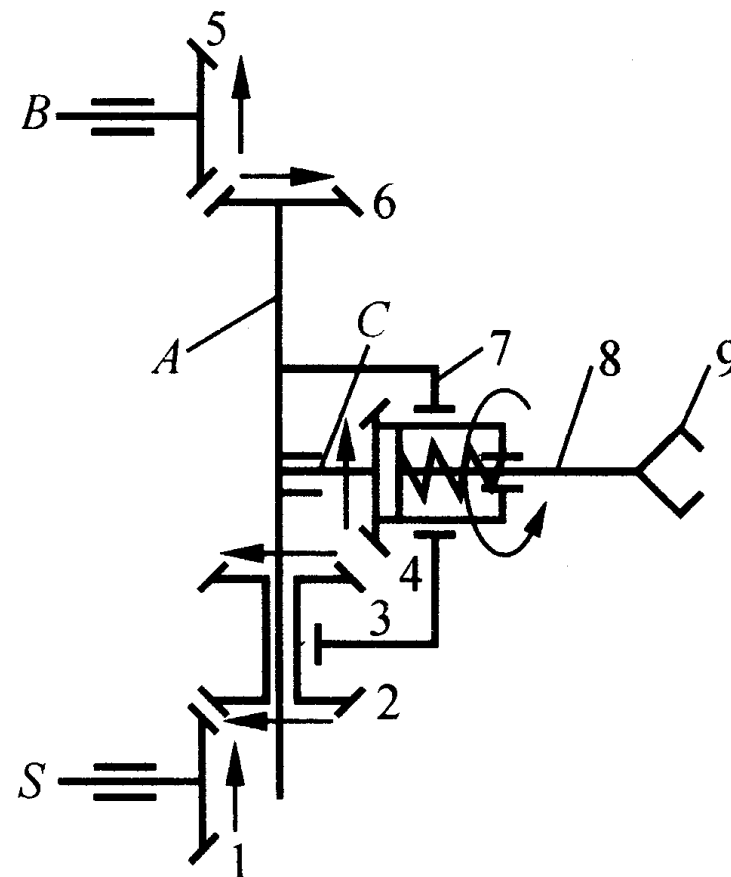


- 1—链轮；
- 2—轴；
- 3、4—回转油缸；
- 5—夹紧油缸；
- 6—手指

手腕的俯仰运动由回转油缸4通过一对齿轮、链轮、链条和手腕上的链轮实现。翻转运动由回转油缸3直接带动夹紧油缸5一起翻转。

## 2.二自由度手腕

右图是一种采用轮系传动具有俯仰和翻转两个自由度的手腕，S轴传递回转运动，B轴给出俯仰运动。此传动机构结构紧凑，传动扭矩大，多用于示教型机械手。

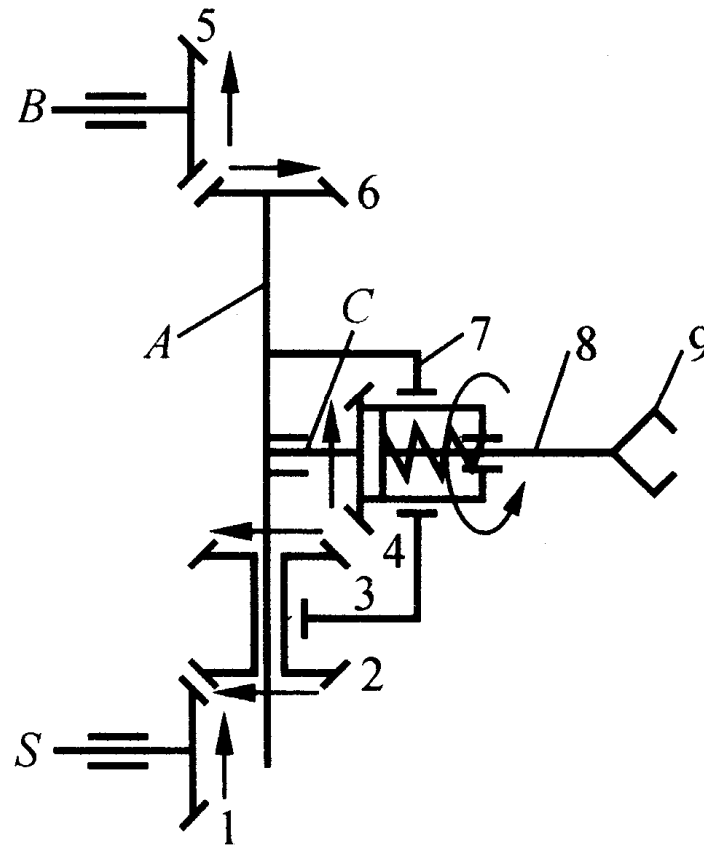


1、2、3、4、5、6—锥齿轮；  
7—腕部壳体。

远距离驱动RB二自由度手腕

## ➤ 诱导运动

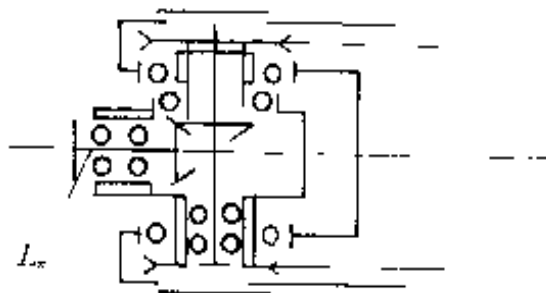
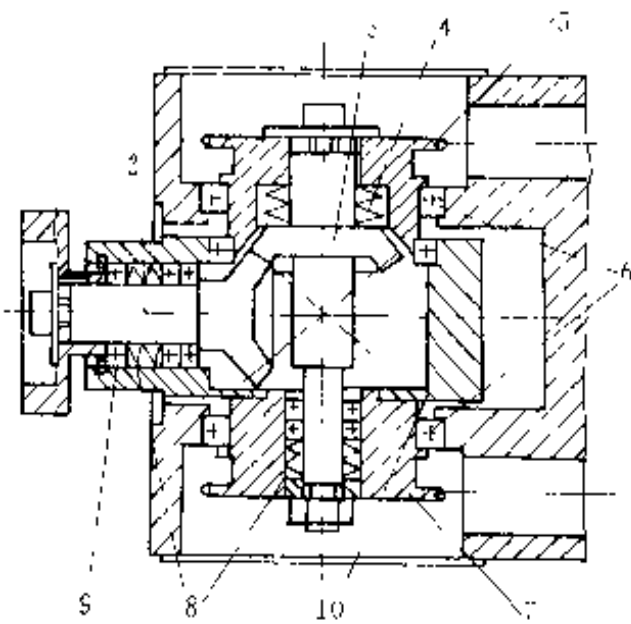
把某一自由度因另一自由度的被驱动而引起的运动，称作诱导运动。在进行机器人运动学计算时，必须考虑诱导运动。



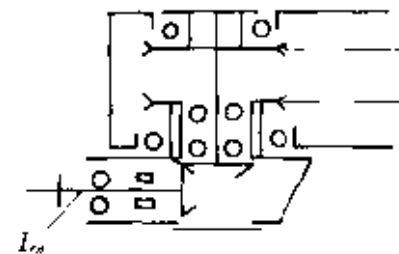
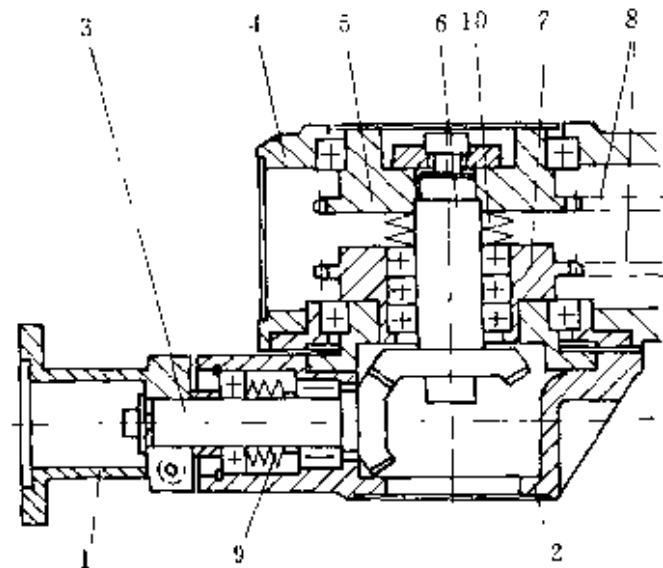
## 2、两自由度手腕

两种常见的配置形式——汇交式和偏置式。

- 1 — 法兰;
- 2 — 锥齿轮轴;
- 3 — 锥齿轮;
- 8, 4 — 弹簧;
- 5, 7 — 链轮;
- 6, 9 — 轴承;
- 10 — 转壳



汇交式两自由度手腕

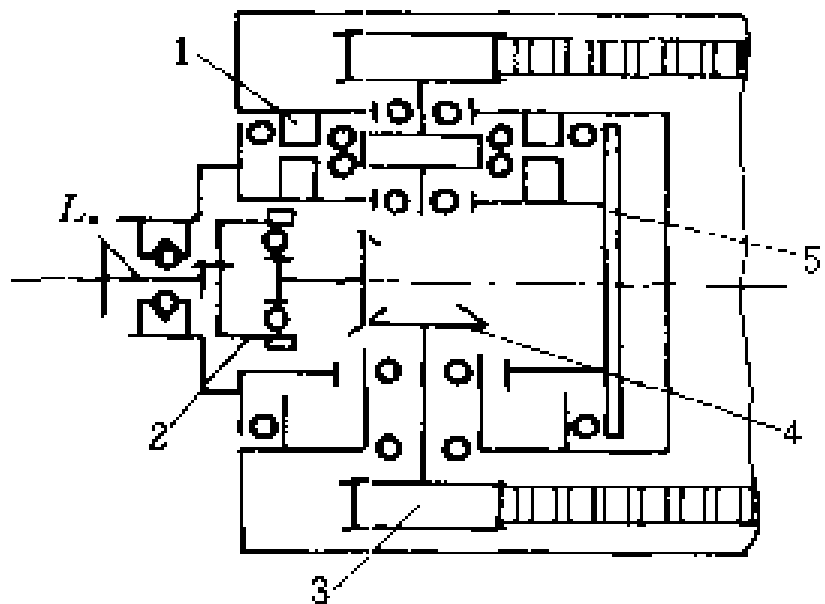


- 1 — 法兰; 2 — 腕壳; 3, 6 — 锥齿轮轴;
- 4 — 小臂; 5, 7 — 链轮, 8 — 链; 9, 10 — 弹簧

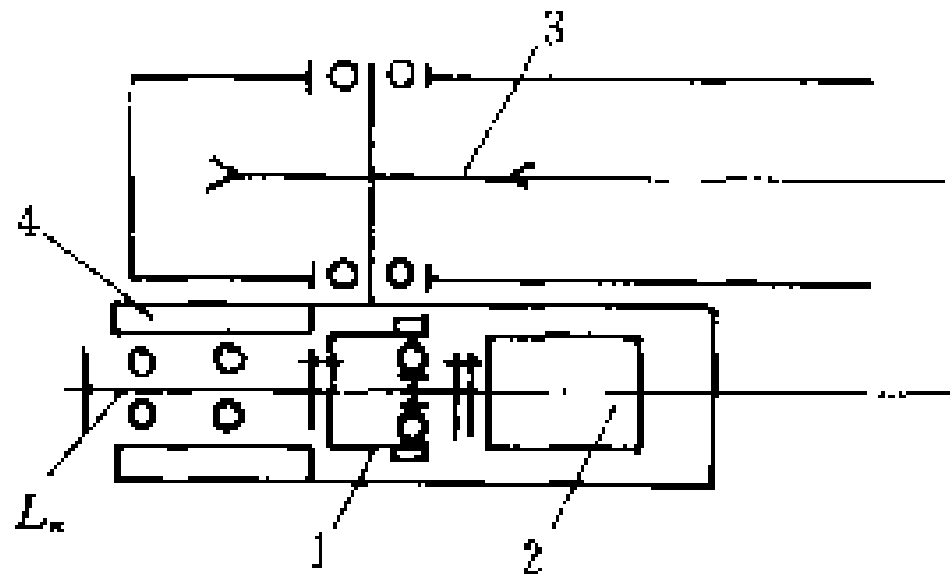
偏置式两自由度手腕

## 两自由度手腕的另两种结构——

- ✓ 谐波减速器前置的汇交型手腕
- ✓ 电机与谐波减速器前置的偏置型手腕



1—扁平谐波； 2—杯式谐波；  
3—齿形带轮； 4—锥齿轮； 5—腕壳  
谐波前置汇交手腕



1—谐波减速； 2—马达；  
3—链轮； 4—腕壳  
电机前置偏置手腕

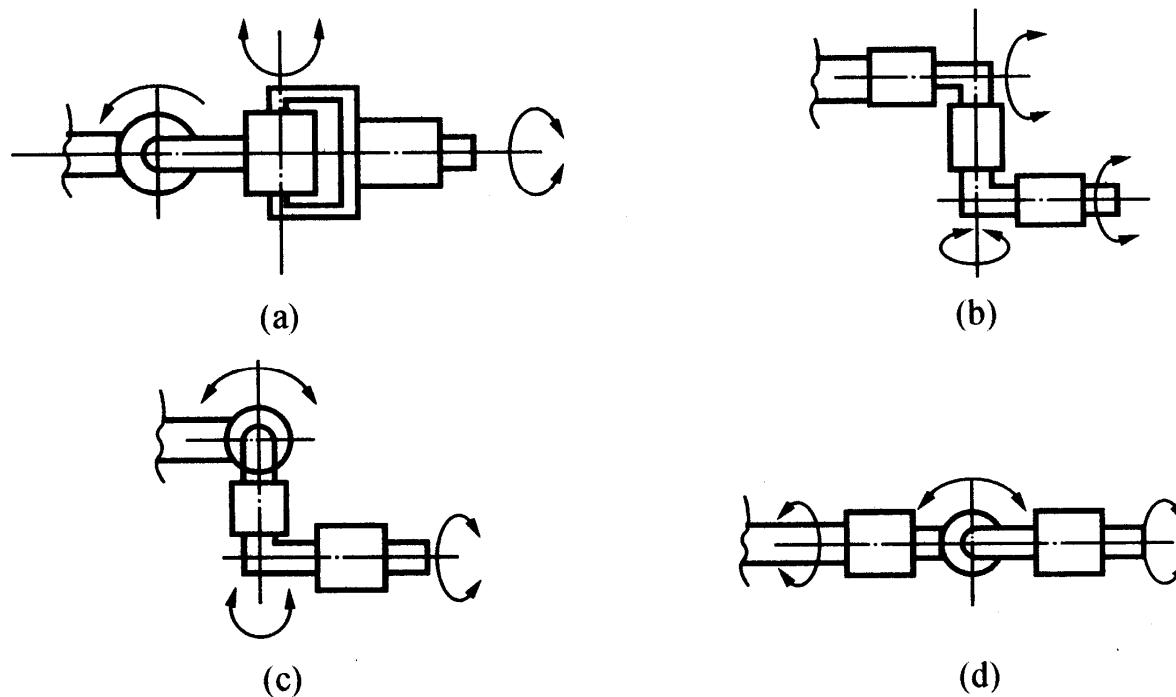
---

汇交型，将谐波减速器置于臂部，驱动器通过齿形带带动谐波，或经锥齿轮再带动谐波使末杆获得沿 $x$ 、 $y$ 轴两自由度运动。

偏置型，则是将驱动电机和谐波减速器连成一体，放于偏置的腕壳中直接带动腕完成角转动。



### 3.三自由度手腕



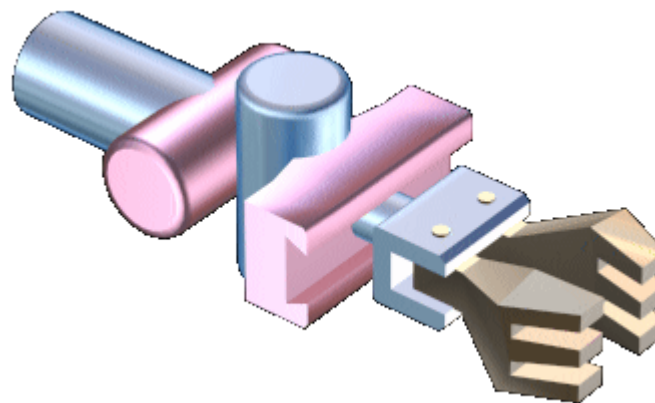
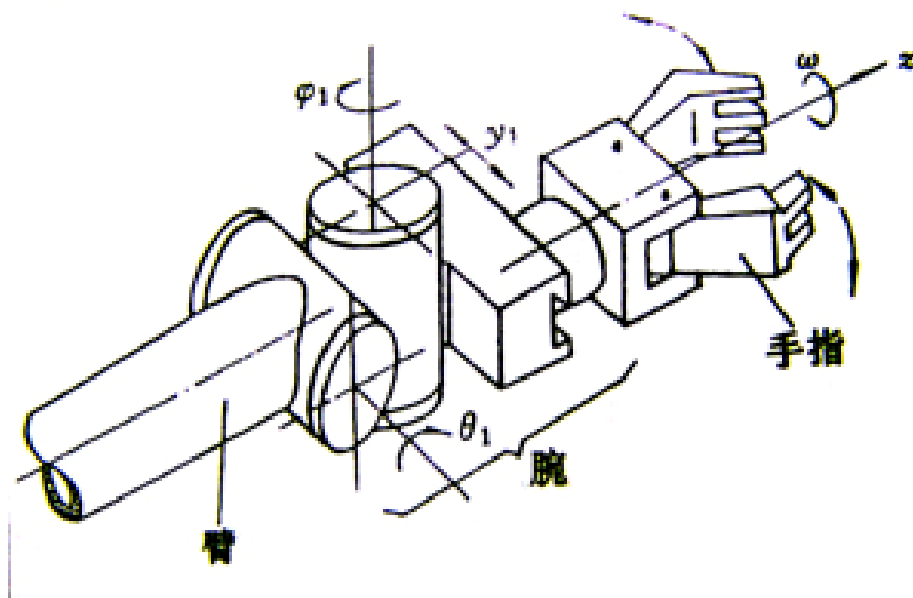
三自由度手腕运动形式

(a) BBR手腕； (b) RRR手腕 (c) BRR手腕；  
(d) RBR手腕

### 3、三自由度手腕

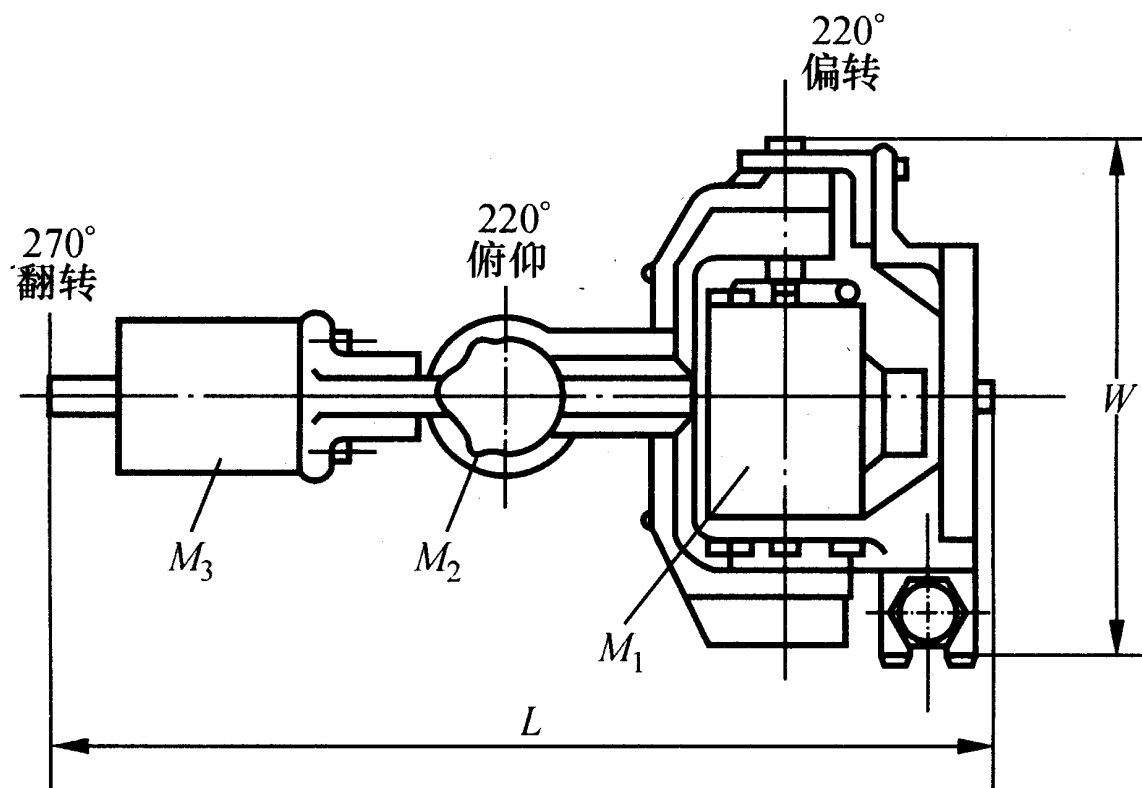
三自由度手腕的结构形式繁多。三自由度手腕是在两自由度手腕的基础上加一个整个手腕相对于小臂的转动自由度而形成的。

三自由度手腕是“万向”型手腕，可以完成很多两自由度手腕无法完成的作业。近年来，大多数关节型机器人都采用了三自由度手腕。



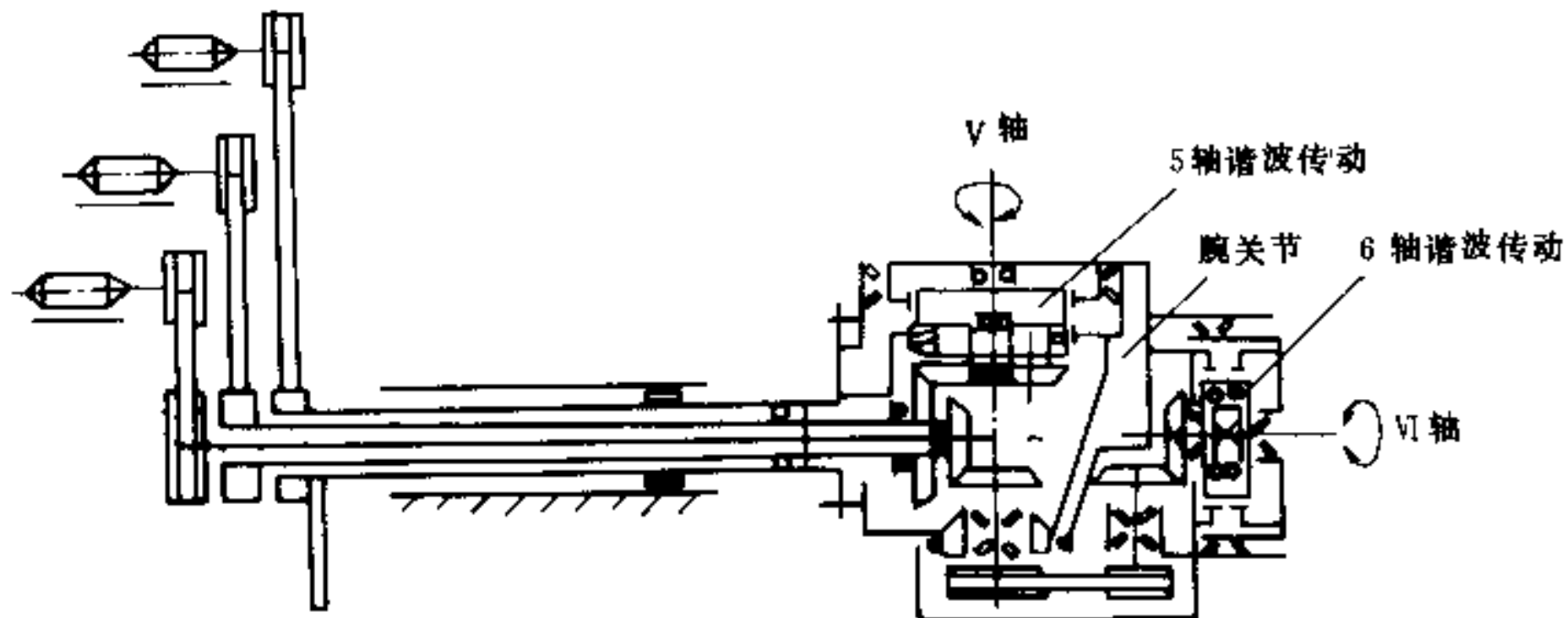
### 3.三自由度手腕

右图：液压驱动的  
BBR三自由度手腕，  
设计紧凑巧妙。其中  
 $M_1, M_2, M_3$ 为液压马  
达



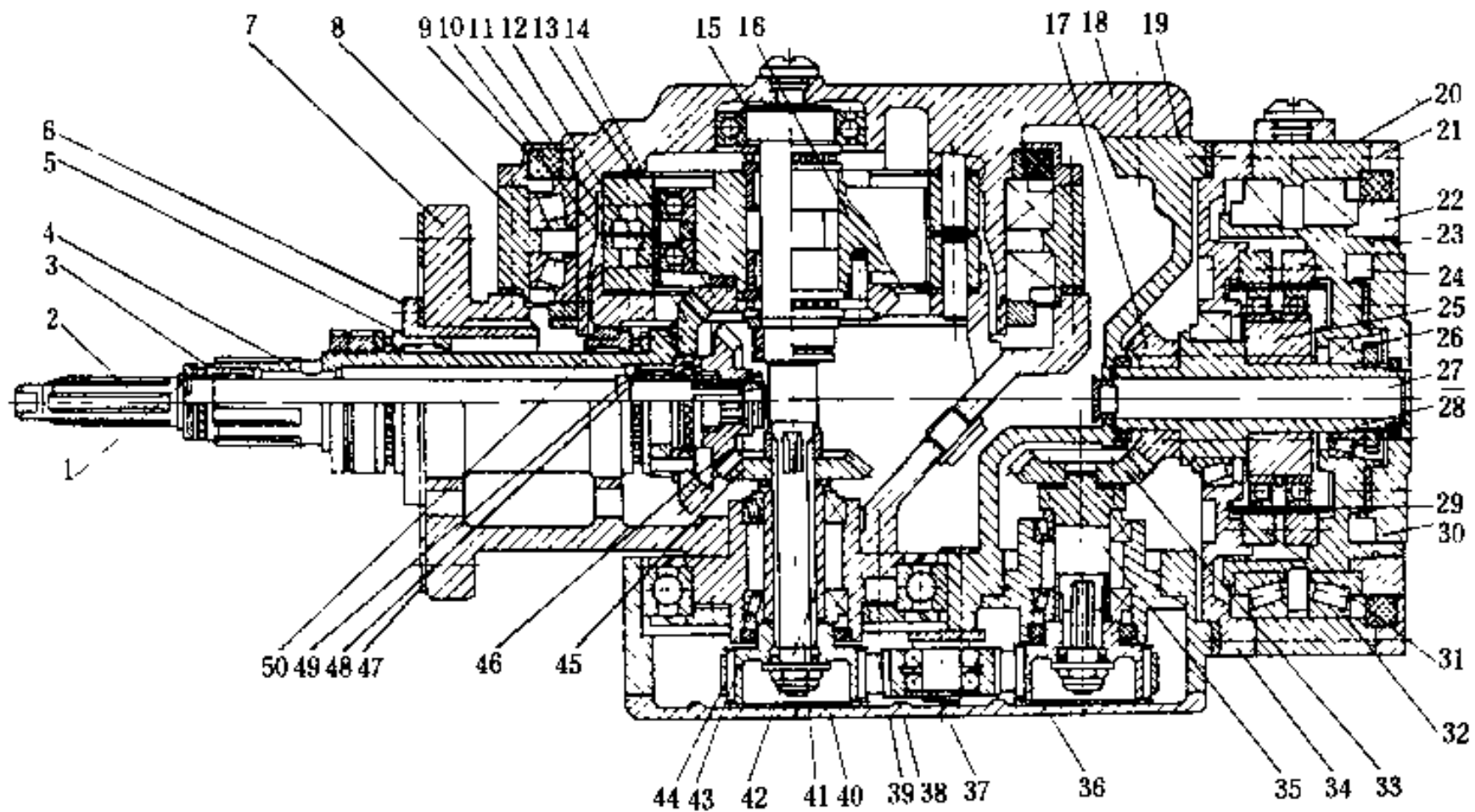
这是一种**直接驱动**手腕，其驱动源一般放在手腕上。这种直接驱动手腕的关键是能否设计和加工出尺寸小、重量轻而驱动扭矩大、驱动性能好的驱动电机或液压马达。

## 4.一些著名机器人手腕



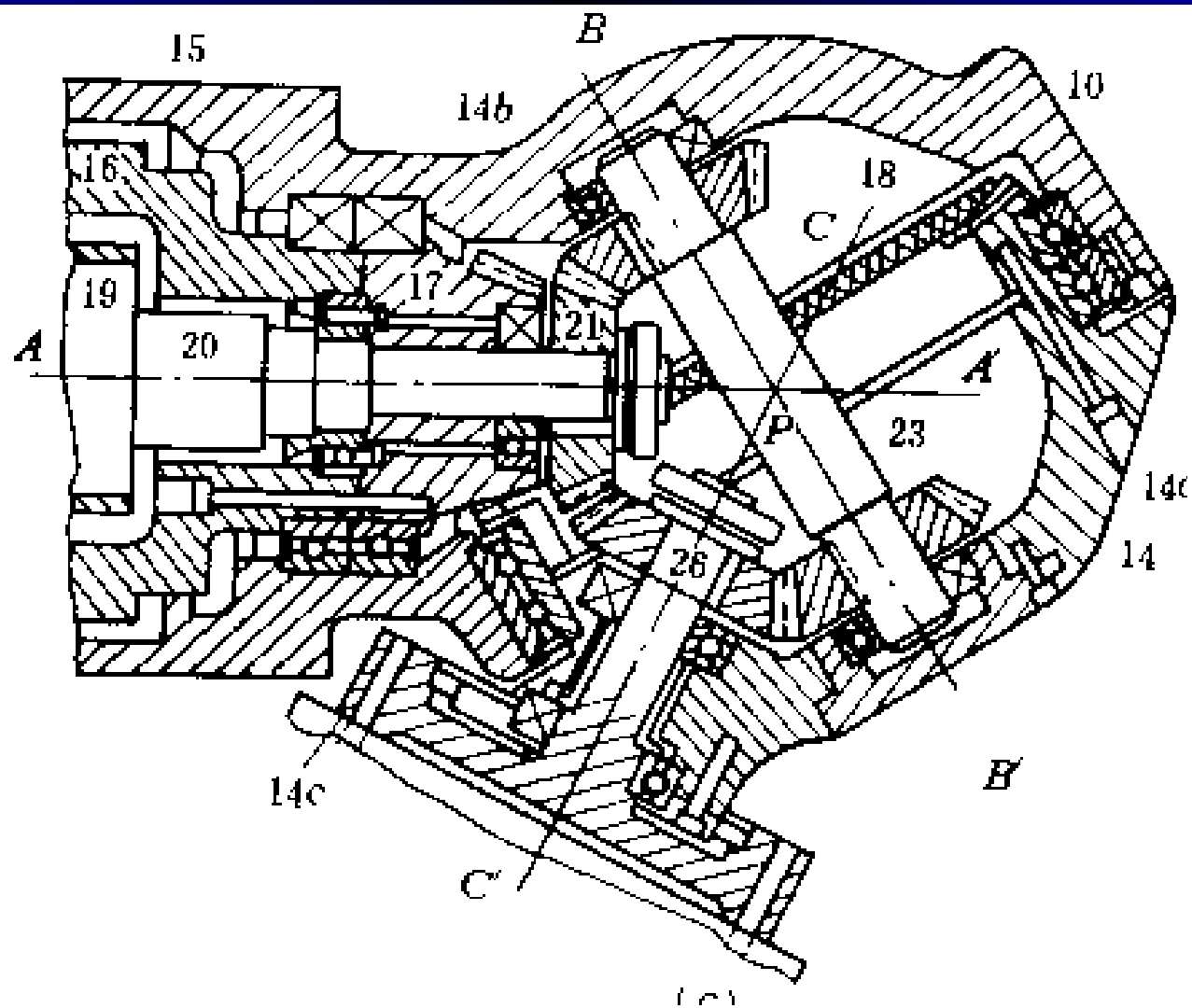
KUKA IR—662 / 100机器人手腕传动图

## 4.一些著名机器人手腕



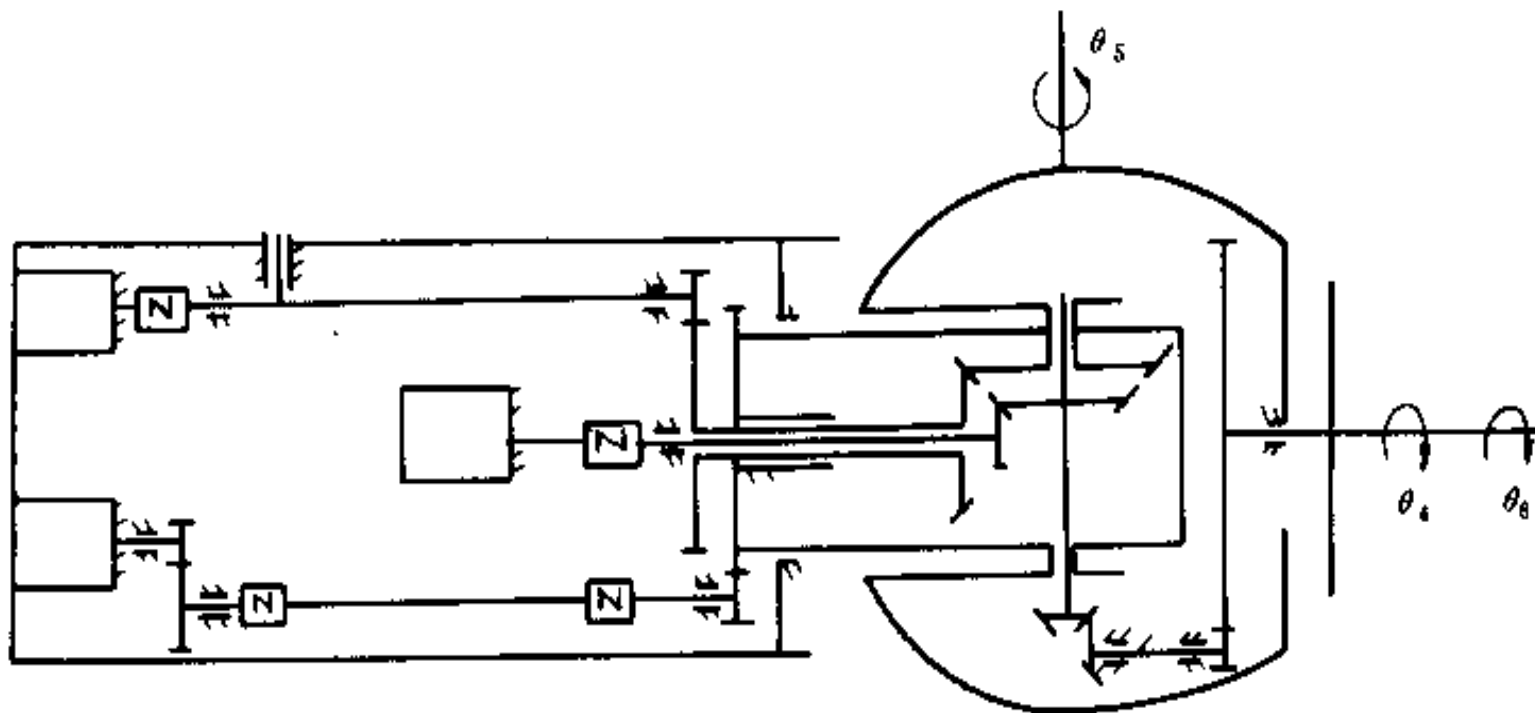
KUKA IR—662 / 100机器人手腕结构图

## 4.一些著名机器人手腕



Cincinnati Milacron T<sup>3</sup> 机器人腕部结构

## 4. 一些著名机器人手腕

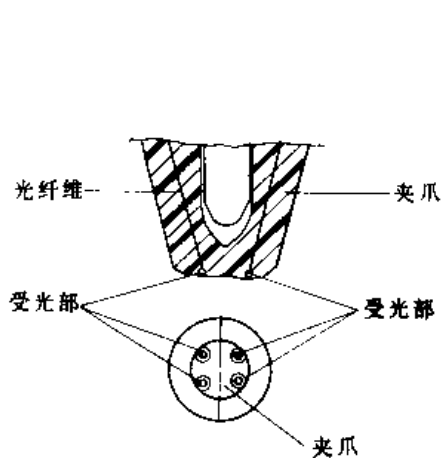


PUMA—562 机器人手腕传动原理

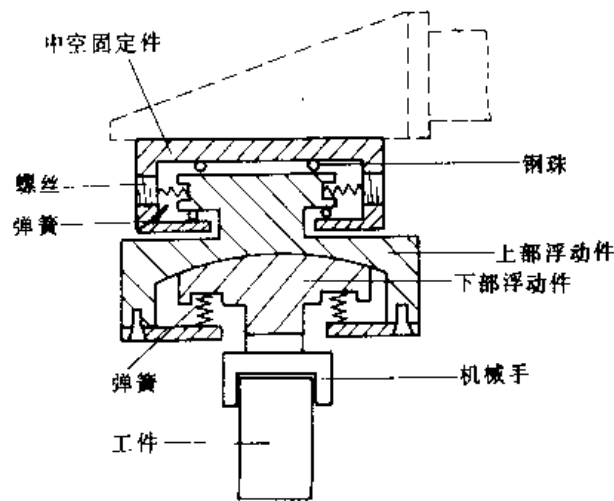
## 5、柔顺手腕结构

机器人精密装配时，由于被装配零件的不一致性、工件定位夹具及机器人手部的定位精度无法满足装配要求时，会导致装配困难甚至失败。这就提出了装配动作的柔顺性要求。

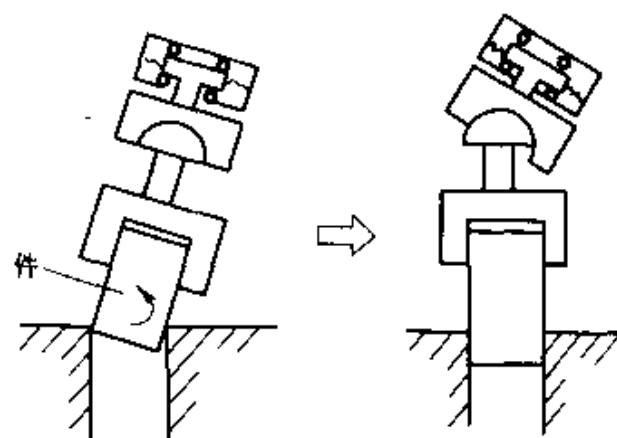
柔顺装配技术有两种：一种是控制的角度，借助检测元件采取边校正、边装配的方式，称为“主动柔顺装配”；另一种是从结构的角度在手腕部配置一个柔顺环节，这种柔顺装配技术称为“被动柔顺装配”即RCC (Remote Center Compliance)。



带检测元件的手腕



移动摆动柔顺手腕



柔顺手腕动作过程



## 2.5 机器人的手部

---

### 2.5.1 基本知识

#### 1. 机器人手部的作用

工业机器人的手部也叫末端操作器（**End-effector**）是用来握持工件或工具而在手腕上配置的的操作机构。

#### 2. 机器人手部的特点

（1）手部是一个独立的部件

工业机器人通常分为三个大的部件：机身、手臂（含手腕）、手部。手部对整个机器人完成任务的好坏起着关键的作用，它直接关系到夹持工件时的定位精度、夹持力的大小等

（2）手部不一定与人的手部结构相同

可以具有手指，也可以不具有手指；可以有手爪，也可以是专用工具。

## 2.5 机器人的手部

---

### 2.5.1 基本知识

#### 2. 机器人手部的特点

##### (3) 手部与手腕相连处可拆卸

手部与手腕处有可拆卸的机械接口：根据夹持对象的不同，手部结构会有差异，通常一个机器人配有多个手部装置或工具，因此要求手部与手腕处的接头具有通用性和互换性。

手部可能还有一些电、气、液的接口：由于手部的驱动方式不同造成。对这些部件的接口一定要求具有互换性。

##### (4) 手部的通用性比较差

工业机器人的手部通常是专用装置：一种手爪往往只能抓住一种或几种在形状、尺寸、重量等方面相近的工件；一种工具只能执行一种作业任务。

## 2.5 机器人的手部

---

### 2.5.1 基本知识

#### 3. 机器人手部的分类

由于机器人作业内容的差异（如搬运、装配、焊接、喷涂等）和作业对象的不同（如轴类、板类、箱类、包类物体等），手部的形式多样。综合考虑手部的用途、功能和结构特点，大致可分成以下几类：

- （1）夹钳式手部；
- （2）吸附式取料手；
- （3）仿生多指灵巧手。

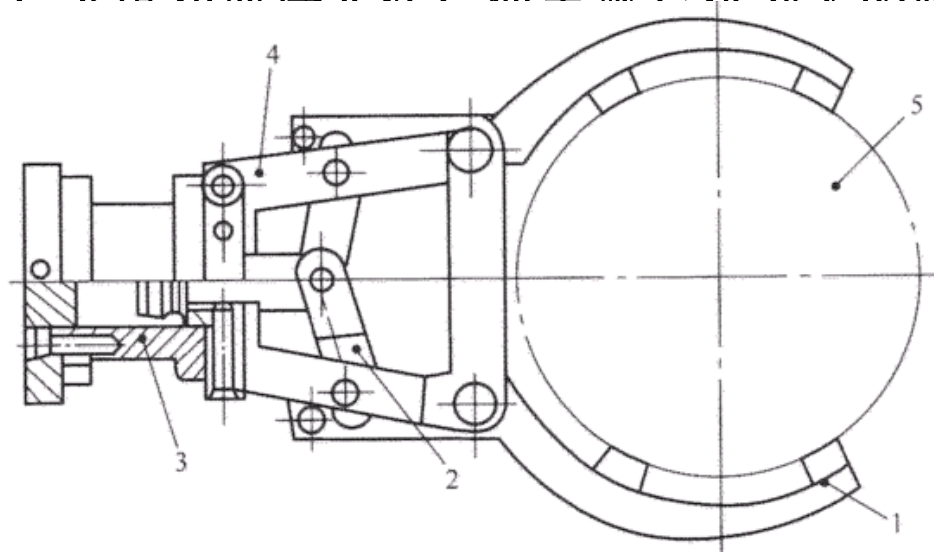
## 2.5.2 夹钳式手部

### 一. 手部的组成和设计注意事项

1. 夹钳式手部的组成:

- 1) 手指: 直接与工件接触的构件。一般只有两个手指, 少数有三个或多个手指, 其结构形式取决于被夹持工件的形状和特性。
- 2) 传动机构: 向手指传递运动和动力, 以实现夹紧和松开动作的机构。
- 3) 驱动装置: 向传动机构提供动力的装置, 有液压、气压、电动和机械驱动。

4) 支撑和连接元件, 使手部与机器其他部分或臂相联接



- 1-手指, 2-传动机构,  
3-驱动装置, 4-支撑连接元件,  
5-被操作工件

## 2.5.2 夹钳式手部

### 2. 夹钳式手部设计注意事项

(1) 手指应具有一定的开闭范围，以保证一定的通用性。此范围指从手指张开的极限位置到闭合夹紧时每个手指位置的变动量。

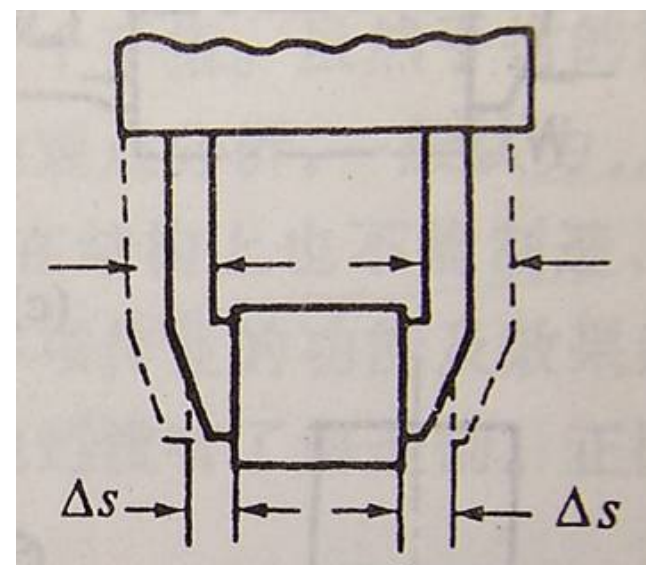
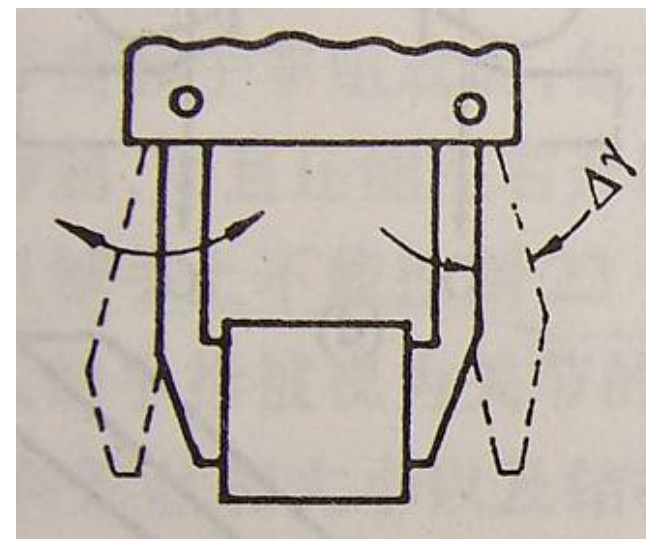
■ 回转型手部的开闭范围可用手指的开闭角（手指从张开到闭合绕支点转过的角度） $\Delta\gamma$ 来表示。

■ 平移型手部的开闭范围可用手指从张开到闭合的直线移动距离 $\Delta s$ 来表示。

(2) 手指应具有适当的夹紧力，特别是对易碎和已精加工过的工件。

夹紧力一般取： $N=(2-3)G$

$G$ 是被抓取物体的重量。



## 2.5.2 夹钳式手部

---

### 2.夹钳式手部设计注意事项

(3) 要保证工件在手指内的定位精度。

根据工件的形状和位置要求及装配精度的要求来选择适当的手指形状和手部结构。

(4) 结构紧凑、重量轻、效率高。

手部处于腕和臂部的最前端，运动状态多变，其重量和结构将直接影响腕部和臂部的结构。尽量选用高强度轻质的材料，如铝合金等。

(5) 具有一定的通用性和可换性。

为提高通用化程度，以适应夹持不同尺寸和形状的工件需要。通常采用可调整的方法，如更换手指，也可以为手部专门设计过渡接头，以迅速准确地更换工具。

## 2.5.2 夹钳式手部

### 二、手指

#### 1、指端的形状:

指端是手指上直接与工件接触的部分，它的结构形状取决于工件的形状。通常有以下几种类型：

##### (1) V形指:

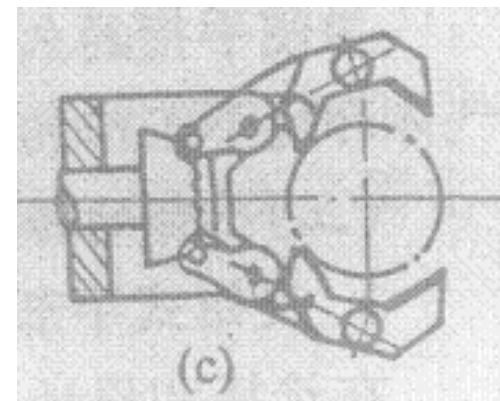
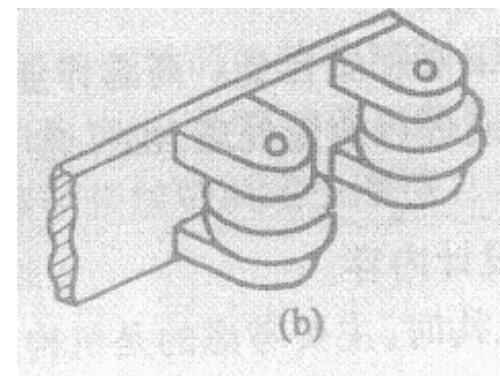
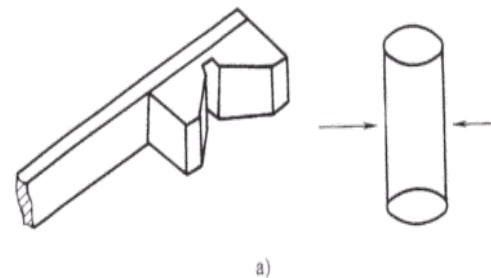
适用于夹持圆柱形工件。

特点：夹紧平稳可靠，夹持误差小。

图a只能夹持相对静止的工件，但定位精度高。

图b能快速夹持旋转中的圆柱体，但定位精度较差。

图c为可浮动的V形指，有自定位能力，与工件接触好，但精度较差，且浮动件不稳定。





## 2.5.2 夹钳式手部

---

### (2) 平面指：

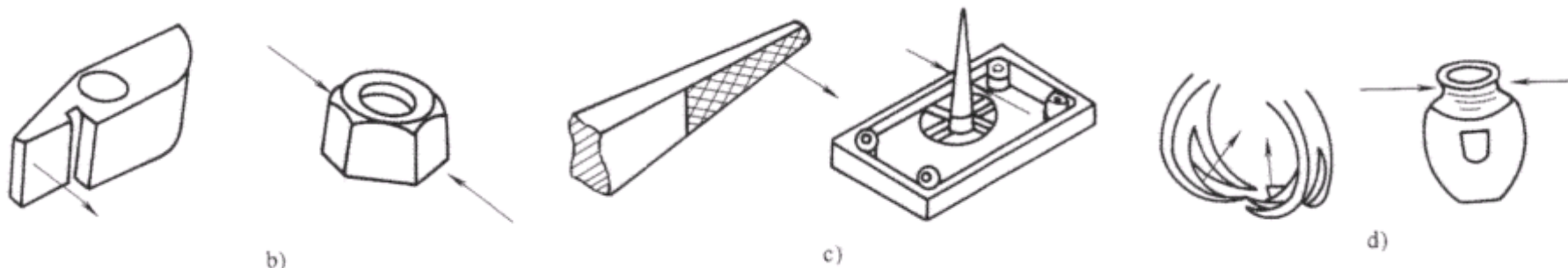
适用于夹持方形工件（具有两个平行表面）、板形或细小棒料。特点：加工简单，成本最低。

### (3) 尖指或薄、长指：

一般用于夹持小型或柔性工件；薄指用于狭窄工作场地。长指可用于夹持炽热的工件。

### (4) 特形指：

用于夹持形状不规则的工件，为专用手指。





## 2.5.2 夹钳式手部

---

### 2、指面形式

主要取决于工件的材质和表面特性。

(1) 光滑指面：指面平整光滑，用于夹持已加工表面，避免光滑表面受损。

(2) 齿形指面：指面刻有齿纹，可增加摩擦力，用于夹持表面粗糙的毛坯和半成品。

(3) 柔性指面：指面镶嵌橡胶、泡沫、石棉等材料，增加摩擦力，保护工件表面，隔热。用于夹持已加工表面、炽热件、薄壁件和易碎件。

### 3、手指的材料

对于夹持式手部，一般用碳素钢和合金结构钢。可镶嵌硬质合金。

高温作业：耐热钢；腐蚀性环境：镀铬或搪瓷处理、玻璃钢等耐腐蚀的材料。

## 2.5.2 夹钳式手部

---

### 三、手部的传动机构

#### 1、夹钳式手部传动机构的设计内容

主要考虑的是机构的传力比、传动比、动作范围、传动效率和传动精度等几个方面。

1) 传力比：机构的传力比是指传动机构的输出力与输入力之比。对于夹钳式手部，主要指手指的夹紧力与驱动装置给予传动机构的驱动力的比值。

传力比的大小反映了机构是增力的还是减力的。

2) 传动比（行程比）：指手指夹紧端的行程与驱动杆行程的比值。

传动比的大小反映了机构是增速的还是减速的。

3) 动作范围：指手部传动机构能使夹钳式手指达到的最大开闭范围。即手指的最大开闭角  $\Delta \nu_{\max}$  和  $\Delta s_{\max}$ 。

## 2.5.2 夹钳式手部

---

(4) 传动效率：主要指传动机构中摩擦损耗所占传动力的百分比，一般用实际传力比对理想传力比（不计摩擦损耗）的比值来表示。即

$$\text{传动效率} = \frac{\text{实际传力比}}{\text{理想传力比}}$$

(5) 传动精度：同传动链的长短、各传动件间的配合间隙及制造和装配精度有关。

\*特别的，增速机构使误差放大。

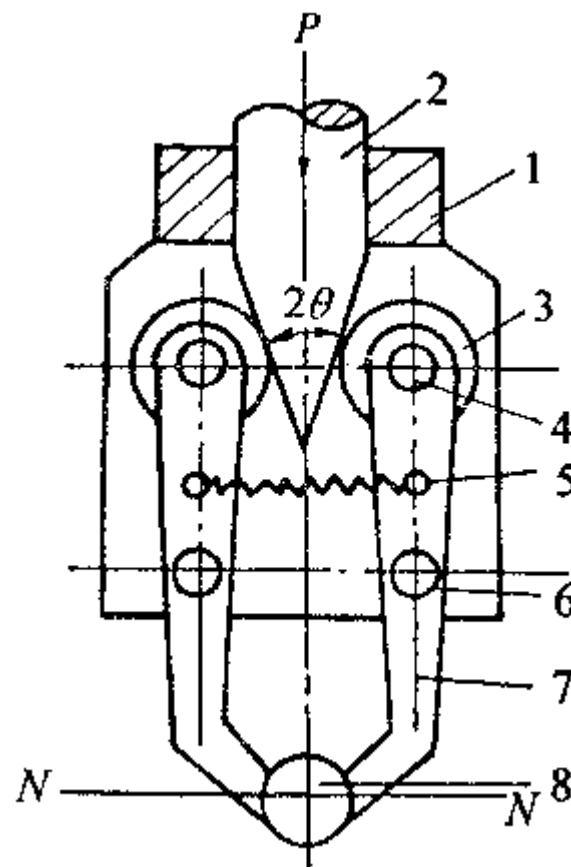
## 2.5.2 夹钳式手部

### 2、回转型手部的常用传动机构

回转型手部应用较多，其手指就是一对杠杆，一般再同斜楔、滑槽、连杆、齿轮、蜗轮蜗杆或螺杆等机构组成复合式杠杆传动机构，用以改变传力比、传动比和运动方向等。

#### (1) 斜楔杠杆式

- 1—壳体；2—斜楔驱动杆；
- 3—滚子；4—圆柱销；
- 5—拉簧；6—铰销；
- 7—手指；8—工件。

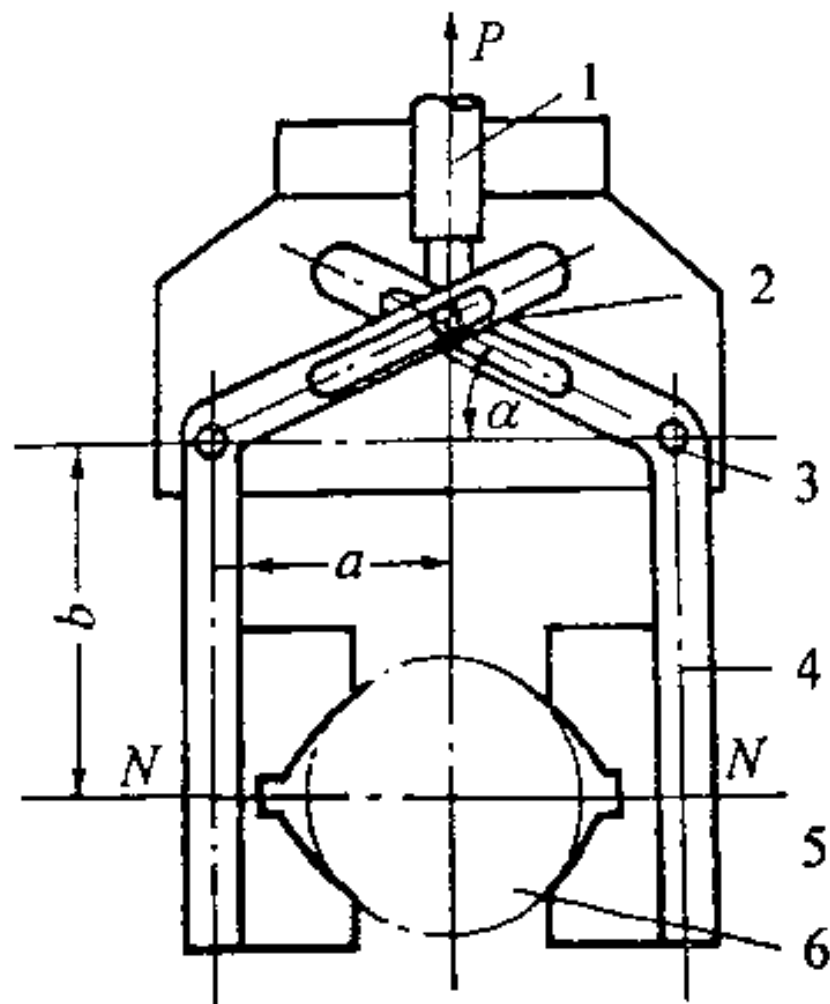


## 2.5.2 夹钳式手部

### 2、回转型手部的常用传动机构

#### (2) 滑槽杠杆式

- 1 - 驱动杆;
- 2 - 圆柱销;
- 3 - 铰销;
- 4 - 手指;
- 5 - V形指;
- 6 - 工件

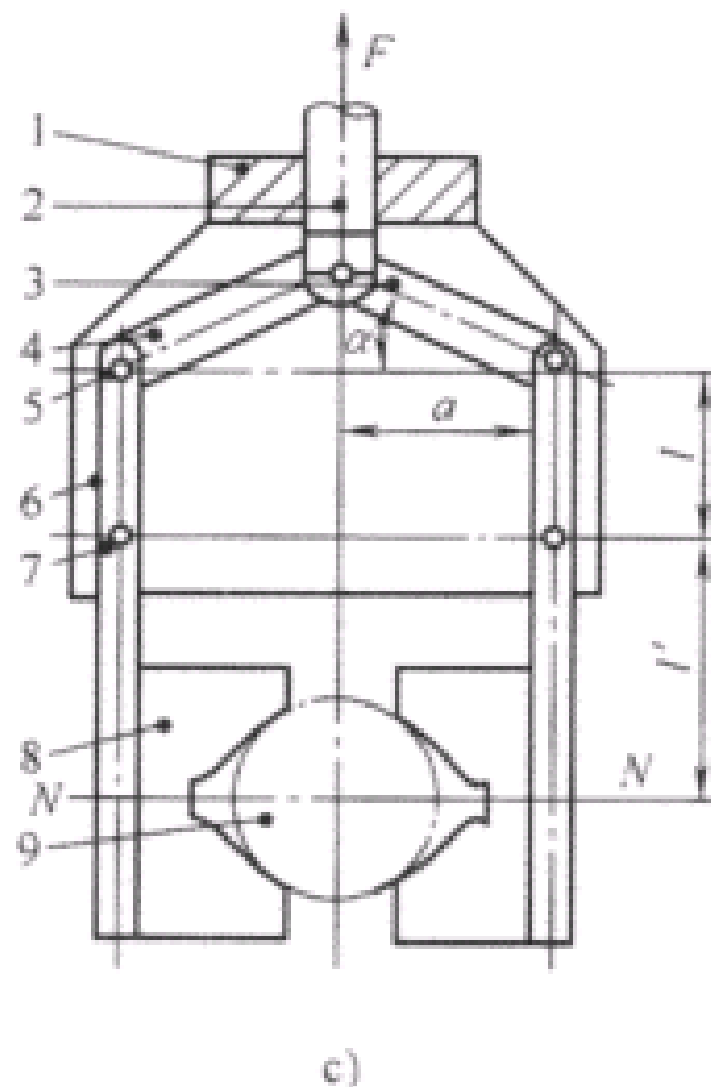


## 2.5.2 夹钳式手部

### 2、回转型手部的常用传动机构

#### (3) 双支点连杆杠杆式

- 1—壳体；
- 2—驱动杆；
- 3、5—圆柱销；
- 4—连杆；
- 7—铰销；
- 6—手指；
- 8—V形指；
- 9—工件

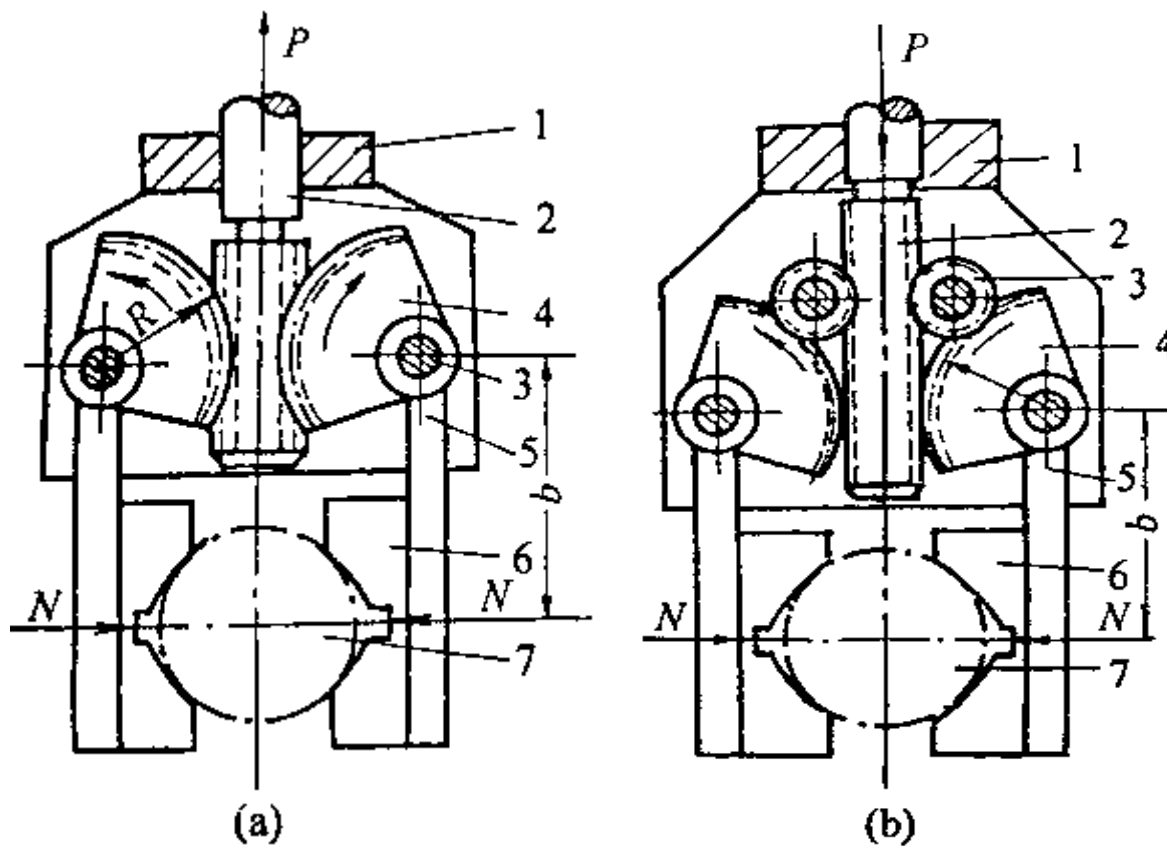


## 2.5.2 夹钳式手部

### 2、回转型手部的常用传动机构

#### (4) 齿条齿轮杠杆式

- 1—壳体；
- 2—驱动杆；
- 3—中间齿轮；
- 4—扇齿轮；
- 5—手指；
- 6—V形指；
- 7—工件



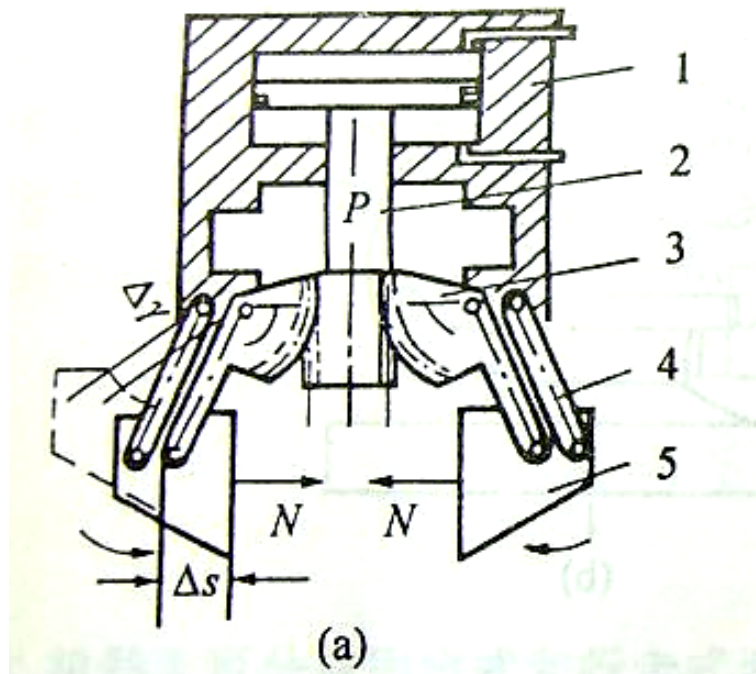
## 2.5.2 夹钳式手部

### 3、平移型手部常用传动机构

平移型夹钳式手部是通过手指的指面作直线往复运动或平面移动来实现张开或闭合动作的，常用于夹持具有平行平面的工件。其结构复杂，不如回转型手部应用广泛。

#### (1) 平面平行移动机构

- 1、支撑架
- 2、齿条
- 3、扇形齿轮
- 4、手指
- 5、平面指



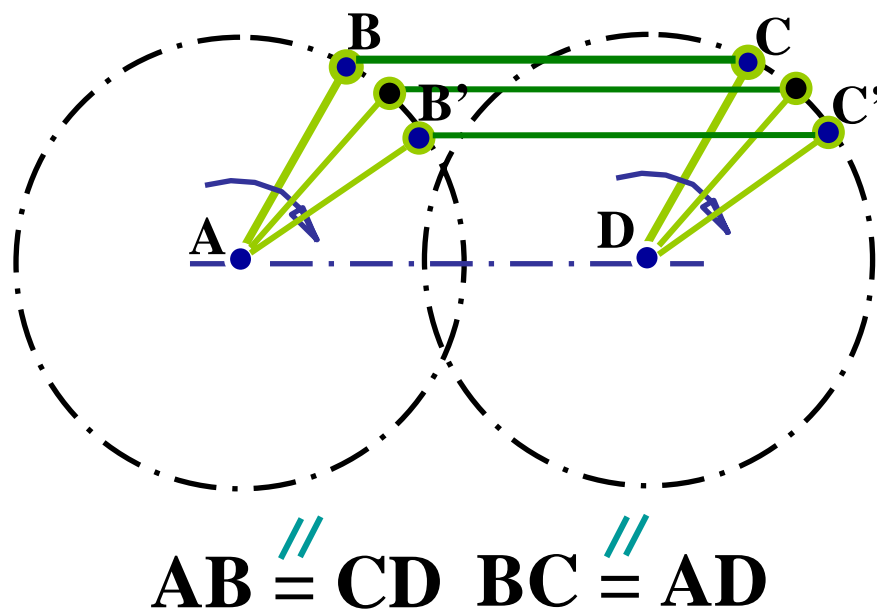


## 2.5.2 夹钳式手部

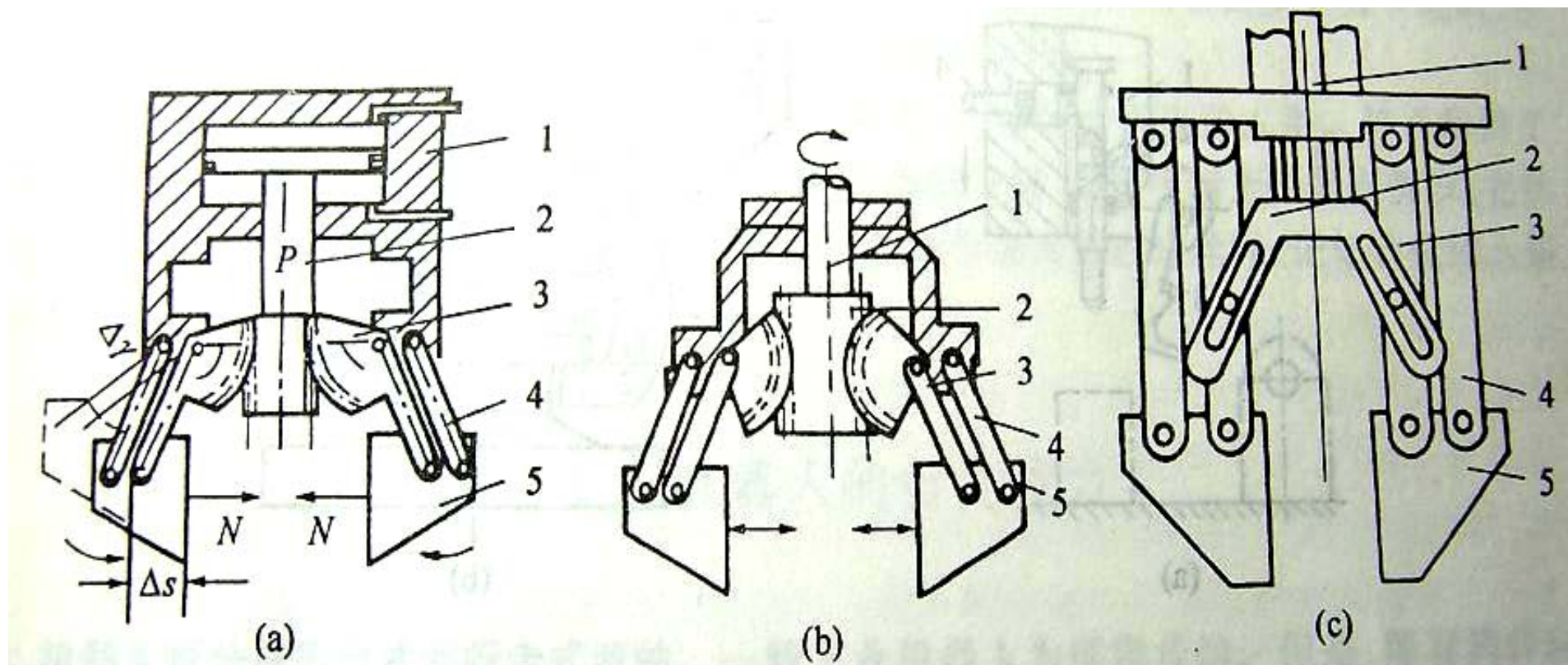
---

本质：双曲柄平行四边形机构

特征：两连架杆等长且平行，BC连杆作平移运动



## 2.5.2 夹钳式手部



齿轮齿条

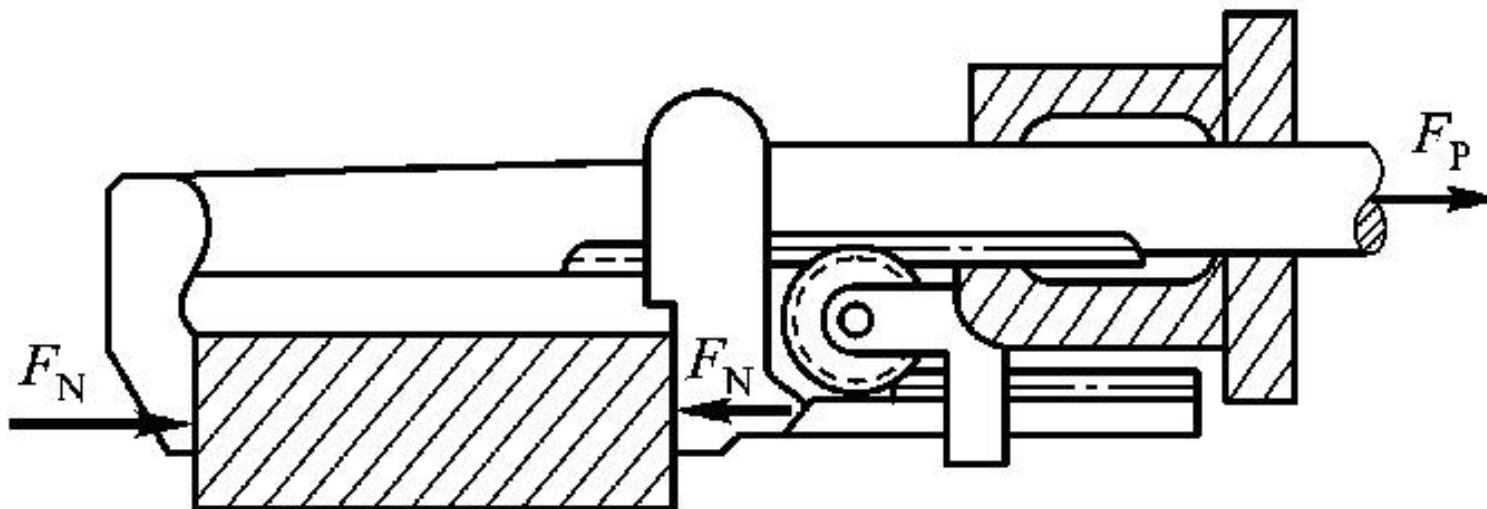
蜗轮蜗杆

连杆斜滑槽

共同点：均采用双曲柄平行四边形连杆机构

## (2) 直线往复移动机构

实现直线往复移动的机构很多，如：齿轮齿条、丝杠螺母等。



齿轮齿条式手爪

## 2.5.3 吸附类手部

### 1、磁力吸盘：

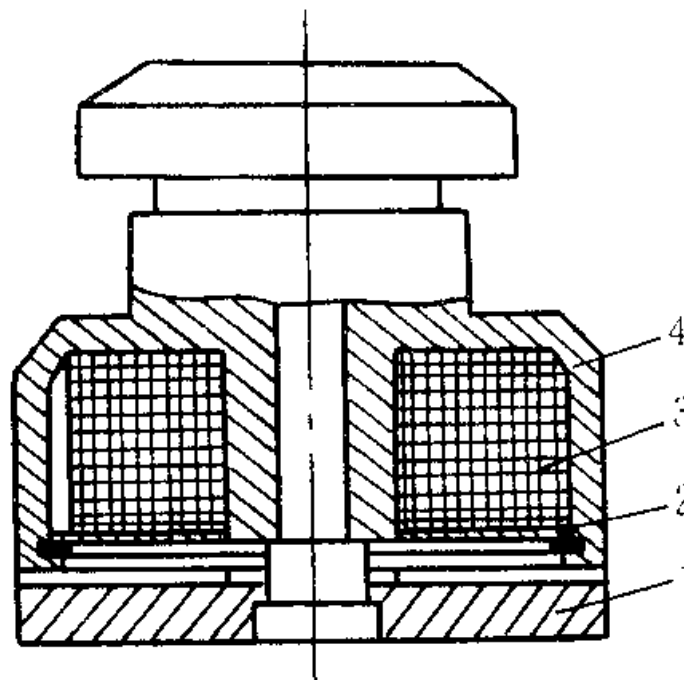
磁力吸盘是在手部装上磁铁，通过磁场的吸力把工件吸住。分为电磁吸盘和永磁吸盘两种。右图为**电磁吸盘**的结构示意图。

注意事项：

1) 只能吸住铁磁材料制成的工件，吸不住有色金属和非金属材料的工件。

2) 被吸取工件有剩磁，不能用于钟表及仪表零件。

3) 不能在高温条件下应用（钢铁等磁性物质在温度为 $723^{\circ}\text{C}$ 以上时，磁性会消失）。



1—磁盘；2—防尘盖；  
3—线圈；4—外壳

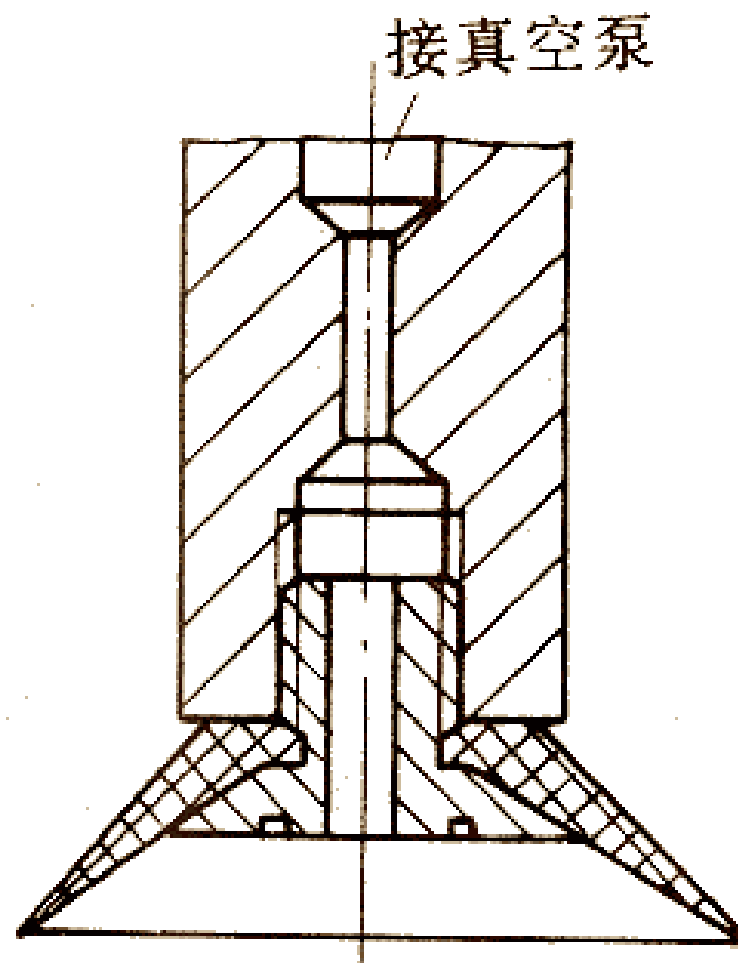
## 2.5.3 吸附类手部

### 2、真空式吸盘：

真空式吸盘主要用于搬运体积大、重量轻的工件，如冰箱、汽车等的壳体、板材、玻璃等。要求工件表面平整光滑、干燥清洁。根据真空产生的原理可分为：

#### (1) 真空吸盘

如右图所示。利用真空泵抽出吸附头的空气而形成真空。

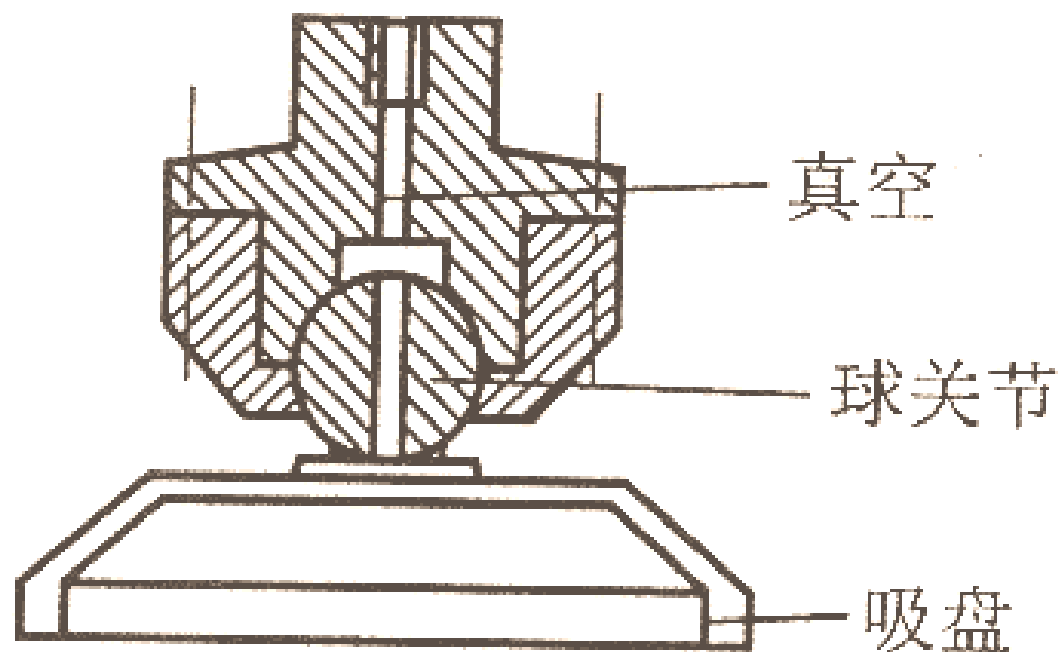


## 2.5.3 吸附类手部

### 自适应吸盘

结构特点：

该吸盘具有一个球关节，使吸盘能倾斜自如，适应工件表面倾角的变化。

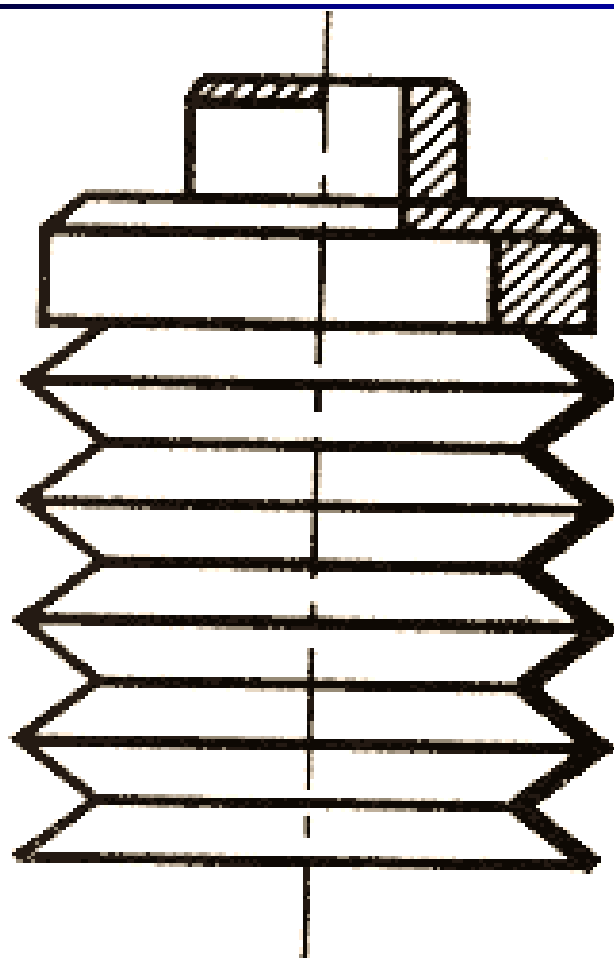


## 2.5.3 吸附类手部

---

### 异形吸盘

通常吸盘只能吸附一般的平整工件，而该异形吸盘可用来吸附鸡蛋、锥颈瓶等物件，扩大了真空吸盘在工业机器人上的应用。



## 2.5.3 吸附类手部

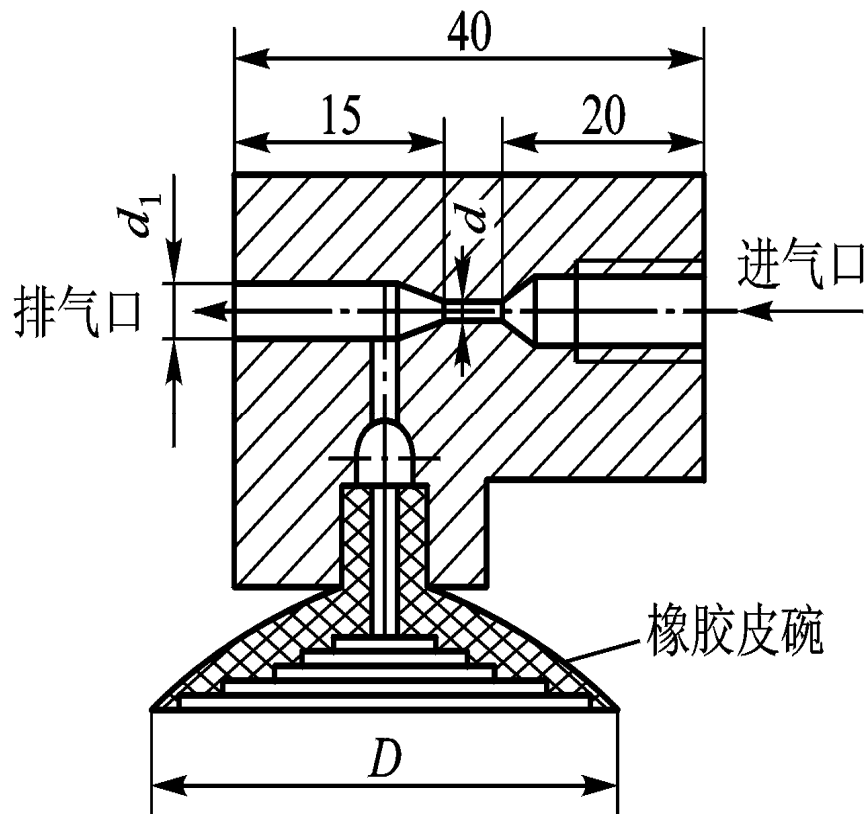
### (2) 喷吸式吸盘

利用伯努利效应产生负压。

**伯努利效应：**流体速度加快时，物体与流体接触的界面上的压力会减小，反之压力会增加。

当压缩空气刚进入时，由于喷嘴口逐渐缩小，致使气流速度逐渐增加。当管路截面收缩到最小处时，气流速度达到临界速度，然后喷嘴管路的截面逐渐增加，使与橡胶皮碗相连的吸气口处，造成很高的气流速度而形成负压。

**特点：**借助压缩空气，无需专用真空泵，应用广泛。

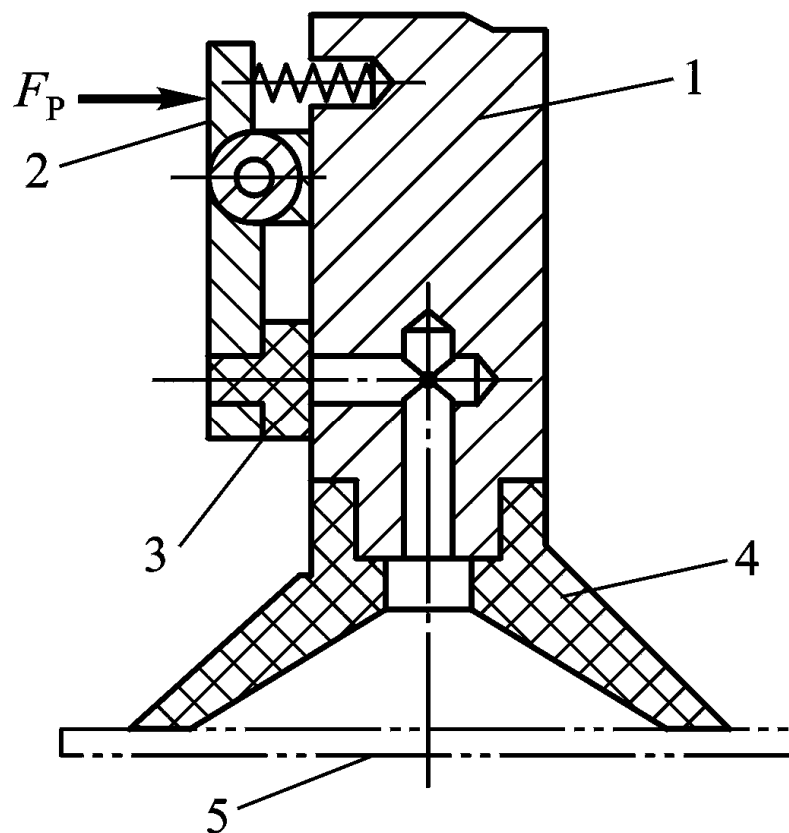




## 2.5.3 吸附类手部

### (3) 挤气负压式吸盘

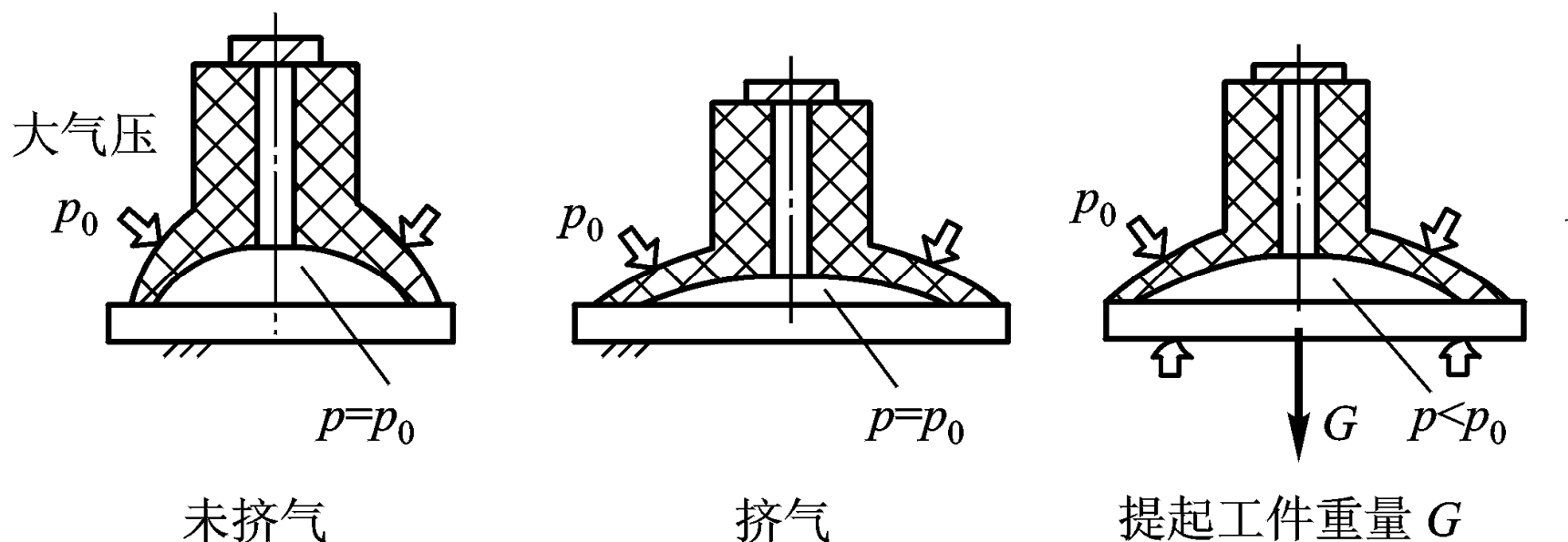
吸盘压向工件表面时，将吸盘内的空气挤出；松开时，压力去除，吸盘恢复弹性变形使吸盘内腔形成负压，将工件牢牢吸住，机械手即可进行工件搬运；到达目标位置后，用碰撞力 $F_p$ 或电磁力使压盖2动作，破坏吸盘腔内的负压，释放工件。



1—吸盘架；2—压盖；  
3—密封垫；4—吸盘；  
5—工件。

## 2.5.3 吸附类手部

### 挤气负压式吸盘工作过程

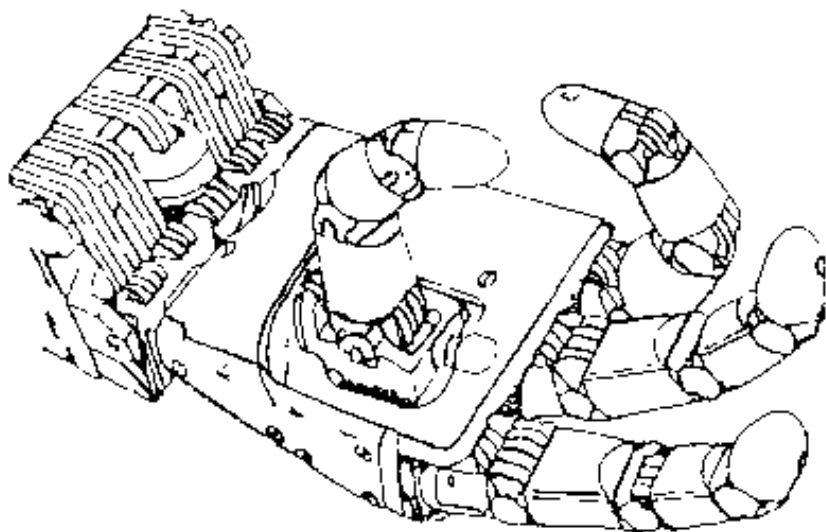


**特点：**无需真空泵系统，也不需压缩空气气源，经济方便；但可靠性稍差。

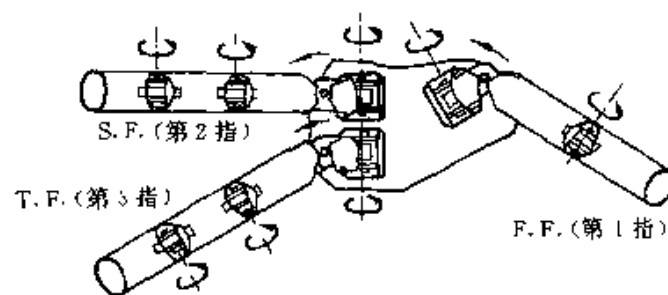
## 2.5.4 仿生多指灵巧手

人手是最灵巧的夹持器，如果模拟人手结构，就能制造出结构最优的夹持器。但由于人手自由度较多（20个），驱动和控制都十分复杂，迄今为止，只是制造出了一些原理样机，离工业应用还有一定的差距。

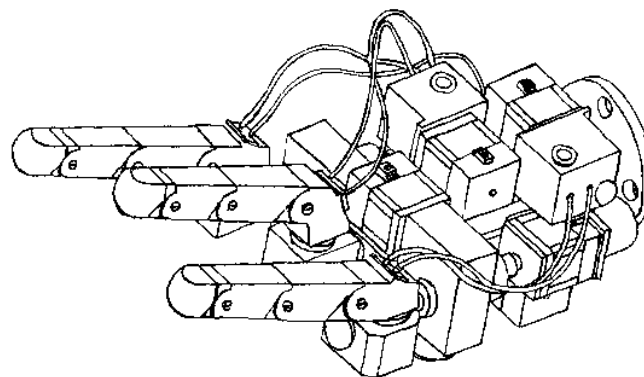
多指灵巧手的技术关键是手指之间的协调控制。



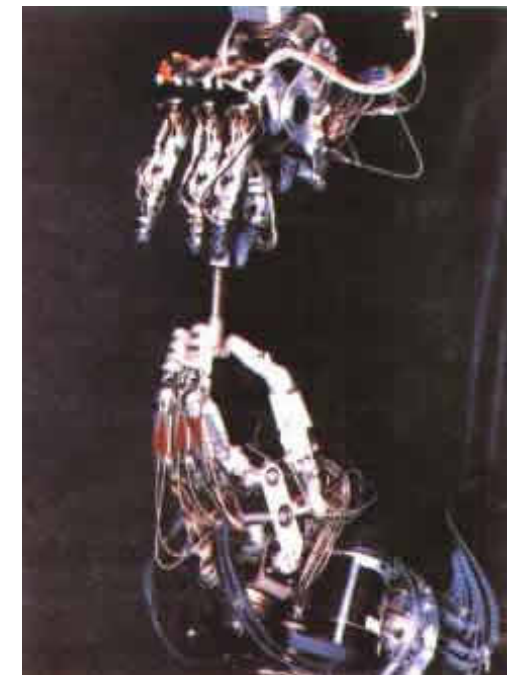
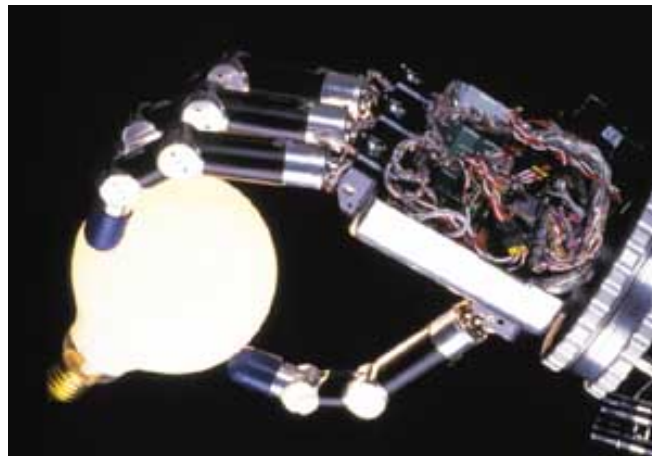
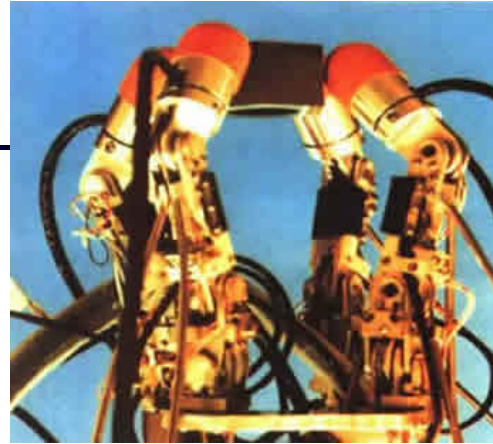
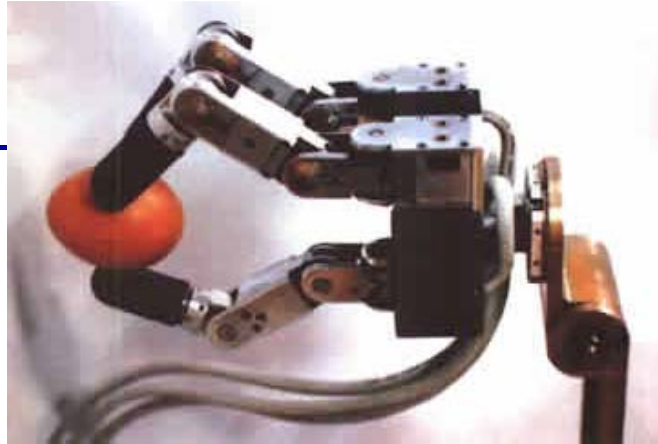
UTACH / MIT 多指手



三指手



双拇指手



## 2.6 机器人本体材料的选择

---

选择机器人本体材料应从机器人的性能要求出发，满足机器人的设计和制作要求。

### 1、材料选择的基本要求

#### 1) 强度高

机器人臂是直接受力的构件，高强度材料不仅能满足机器人臂的强度条件，而且可望减少臂杆的截面尺寸，减轻重量。

#### 2) 弹性模量大

构件刚度(或变形量)与材料的弹性模量 $E$ 有关。弹性模量越大，变形量越小，刚度越大。不同材料弹性模量的差异比较大，而同一种材料的改性对弹性模量却没有太多改变。比如，普通结构钢的强度极限为420MPa，高合金结构钢的强度极限为2000~2300MPa，但是二者的弹性模量 $E$ 却没有多大变化，均为 $2.1 \times 10^5$ MPa。因此，还应寻找其他提高构件刚度的途径。

### 3)重量轻

---

机器人手臂构件中产生的变形很大程度上是由惯性力引起的，与构件的质量有关。也就是说，为了提高构件刚度选用弹性模量 $E$ 大而密度 $\rho$ 也大的材料是不合理的。因此，提出了选用高弹性模量、低密度材料的要求。

### 4)阻尼大

选择机器人的材料时不仅要求刚度大，重量轻，而且希望材料的阻尼尽可能大。机器人臂经过运动后，要求能平稳地停下来。可是在终止运动的瞬时构件会产生惯性力和惯性力矩，构件自身又具有弹性，因而会产生残余振动。从提高定位精度和传动平稳性来考虑，希望能采用大阻尼材料或采取增加构件阻尼的措施来吸收能量。

### 5)材料经济性

材料价格是机器人成本价格的重要组成部分。有些新材料如硼纤维增强铝合金、石墨纤维增强镁合金等用来作为机器人臂的材料是很理想的，但价格昂贵。



## 2、机器人常用材料简介

---

### 1) 碳素结构钢和合金结构钢

这类材料强度好，特别是合金结构钢，其强度增大了4~5倍，弹性模量E大，抗变形能力强，是应用最广泛的材料。

### 2) 铝、铝合金及其他轻合金材料

这类材料的共同特点是重量轻，弹性模量E并不大，但是材料密度小，故 $E/\rho$ 之比仍可与钢材相比。有些稀贵铝合金的品质得到了更明显的改善，例如添加3.2%(重量百分比)锂的铝合金，弹性模量增加了14%， $E/\rho$ 比增加了16%。

### 3) 纤维增强合金

这类合金如硼纤维增强铝合金、石墨纤维增强镁合金等，其 $E/\rho$ 比分别达到 $11.4 \times 10^7$  和  $8.9 \times 10^7$ 。这种纤维增强金属材料具有非常高的 $E/\rho$ 比，但价格昂贵。

---

#### 4) 陶瓷

陶瓷材料具有良好的品质，但是脆性大，不易加工，日本已经试制了在小型高精度机器人上使用的陶瓷机器人臂样品。

#### 5) 纤维增强复合材料

这类材料具有极好的 $E/\rho$ 比，而且还具有十分突出的大阻尼的优点。传统金属材料不可能具有这么大的阻尼，所以在高速机器人上应用复合材料的实例越来越多。

#### 6) 粘弹性大阻尼材料

增大机器人连杆件的阻尼是改善机器人动态特性的有效方法。目前有许多方法用来增加结构件材料的阻尼，其中最适合机器人采用的一种方法是用粘弹性大阻尼材料对原构件进行约束层阻尼处理。



## 主要参考文献:

---

- (1) 柳洪义, 宋伟刚 编著, 《机器人技术基础》, 冶金工业出版社, 2002
- (2) 龚振邦等, 《机器人机械设计》, 电子工业出版社, 1995
- (3) [美] John J. Craig著, 贡远超译, 机器人学导论, 机械工业出版社, 2006.6
- (4) 于登云等, 空间机械臂技术及发展建议, 航天器工程, 2007, 16 (4):1-8
- (5) 韩建海主编, 《工业机器人》, 华中科技大学出版社, 2009
- (6) 刘极峰, 易际明主编, 《机器人技术基础》, 高等教育出版社, 2006

## 思考题：

---

- 1、工业机器人常用的结构类型有哪些？各有什么特点？
- 2、机器人常用的驱动方式及其特点有哪些？
- 3、电驱动器的主要类型及其特点？
- 4、直流电机的主要技术参数有哪些？
- 5、手腕上的自由度主要起什么作用？若要求手部能处于空间任意方向，则手腕应具有什么样的自由度？
- 6、机器人手腕的结构类型？举一例
- 7、机器人手部的作用和特点？
- 8、夹钳式手部在设计时有哪些注意事项？
- 9、真空式吸盘根据工作原理可分为几类？分别简述其工作原理？
- 10、机器人本体的常用材料？
- 11、空间机械臂有哪些结构特点？（见参考文献4）