

工业机器人控制系统组成

机器人控制技术

2023 下学期

- 灵活的机器人工作单元
- 商用机器人机构和类型
 - 机械臂性能
 - 常见的运动学配置
 - 商用机器人驱动类型
- 商用机器人控制器
- 传感器类型及数据处理

□ 机器人工作站是指使用一台或多台机器人，配以相应的周边设备，用于完成某一特定工序作业的独立生产系统，也可称为机器人工作单元。

□ 早期：

机器人在工厂自动化等地方围绕传送带等系统固定布局；

每个机器人在其中执行特定任务；

机器人在工作站级别用于执行装配、钻孔、表面精加工、焊接、码垛等操作。

装配线上，零件通过传送带按顺序运送到工作站。

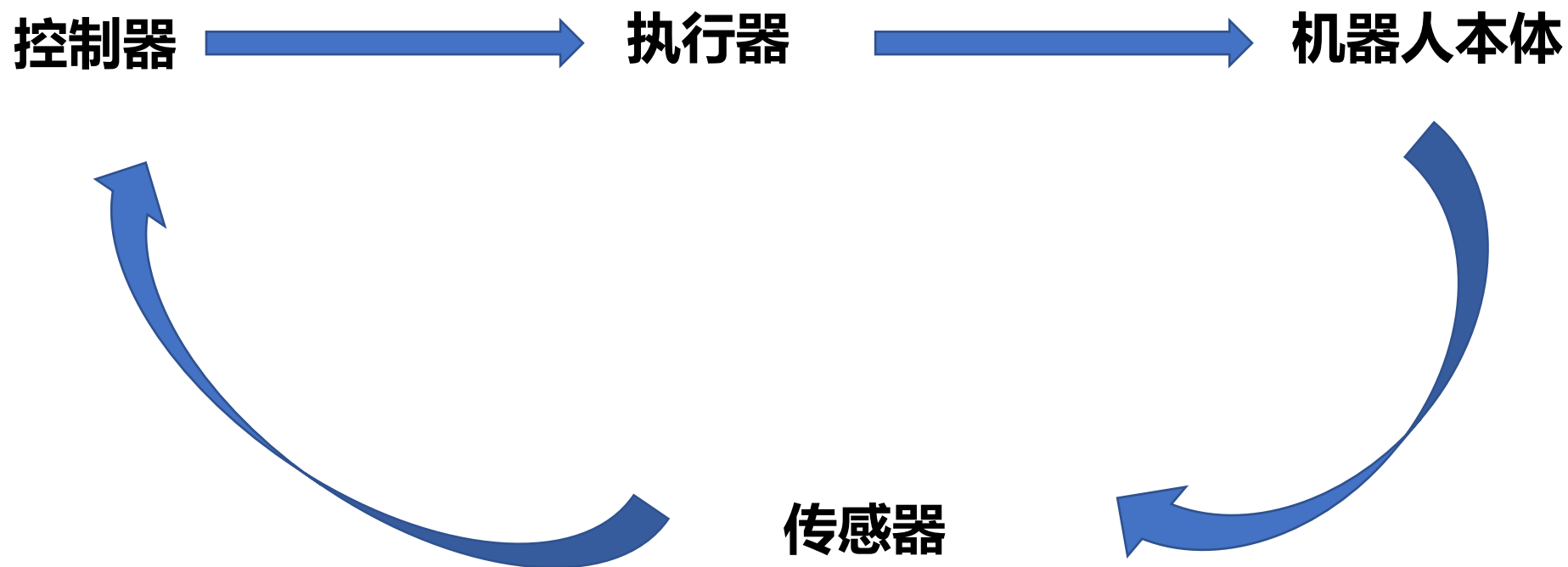
工作单元的设计是为了充分利用机器人的工作空间，铣床、钻床、振动给料机等部件被放置在机器人的工作空间内，以便由机器人进行维修。与装配线相反，物理布局并不预先规定操作或工作的固定顺序。因此，随着产品需求的变化，所有需要做的就是软件中重新编程工作单元。

□ 特点:

系统安装昂贵，需要一群工程专家来设计和编程；
灵活度差-随着需求变化修改或重新编程及其困难；
不适当当今多品种小批量制造场景。

□ 机器人工作单元:

适合制造业和其他新兴的HMLV条件；
将重点从硬件设计转移到创新的软件技术和架构上（包括规划、协调、控制功能）；
因此需要对机器人控制器进行大量研究，以便为机器人提供现代灵活工作单元所需的灵活性。

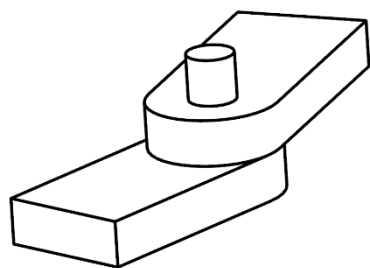


工业机器人系统的组成

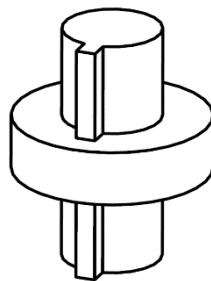
- ◆ 机器人机构是机器人的本体，是机器人的执行部分，由手臂、手腕、手爪、腿、脚、步行机构等组成，实现运动机能，完成规定的操作。机械结构的类型、布局、传动方式、驱动方式直接影响机器人的性能；
- ◆ 工业机器人是由一系列连杆（**刚性构件**）通过铰链（**关节**）顺序连接而成的操作臂，机器人机构的基本元素为连杆和铰链（又称运动副）；
- ◆ 多个连杆通过运动副以串联形式连接成不封闭的机构称为串联机构；多个连杆连接成首尾封闭的机构则称为并联机构。

- 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

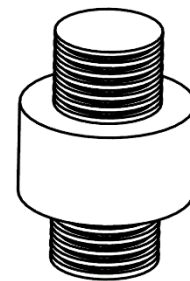
六种常见的低副机构



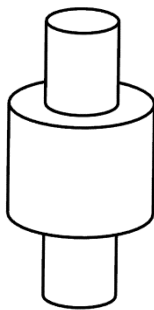
旋转副 (R)
1个自由度



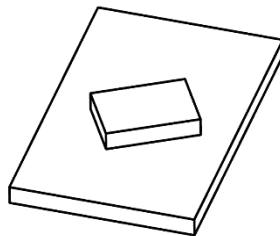
移动副 (P)
1个自由度



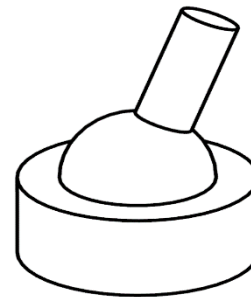
螺旋副 V (H)
1个自由度



圆柱副 (C)
2个自由度



平面副 (E)
3个自由度

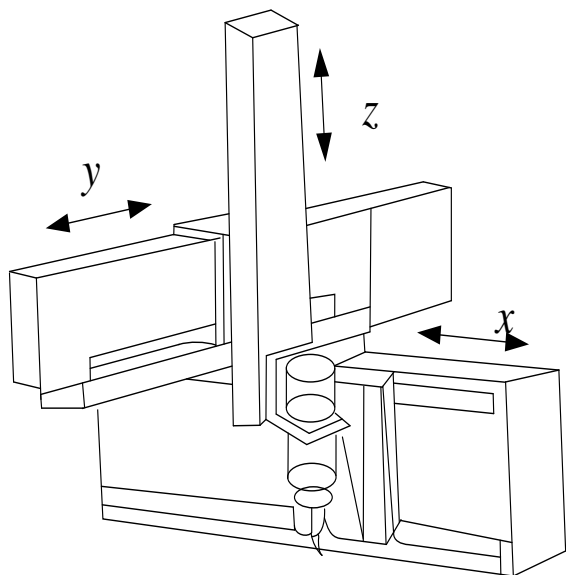


球面副 (S)
3个自由度

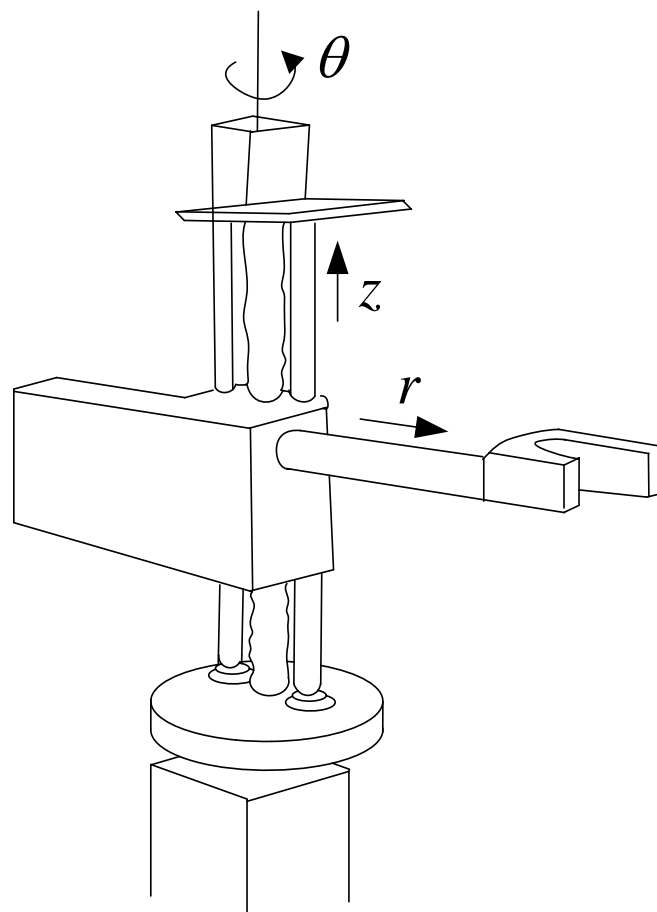
- 串联机器人：最常见的关节（运动副）为旋转副和移动副
- 旋转副/移动副有1个自由度：关节数等于它的自由度数
- 刚体在空间有6个自由度：完成作业任务需要6个自由度
- 定位机构：手臂有3个关节，用以改变手腕中心点位置
- 定向机构：手腕有3个关节，用以改变末端执行器姿态

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

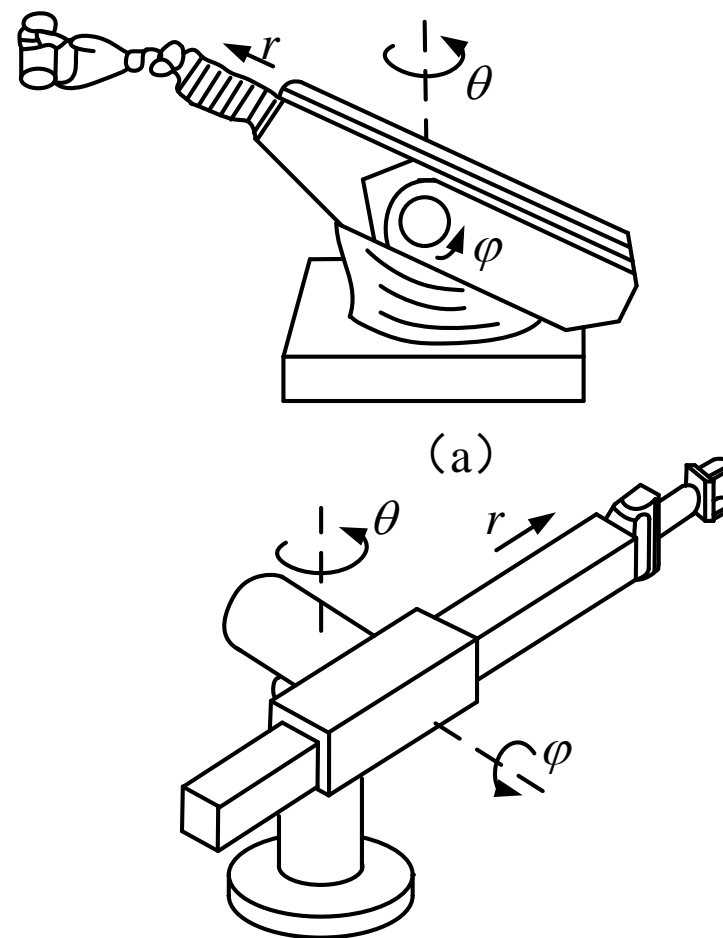
P表示平移、R表示旋转



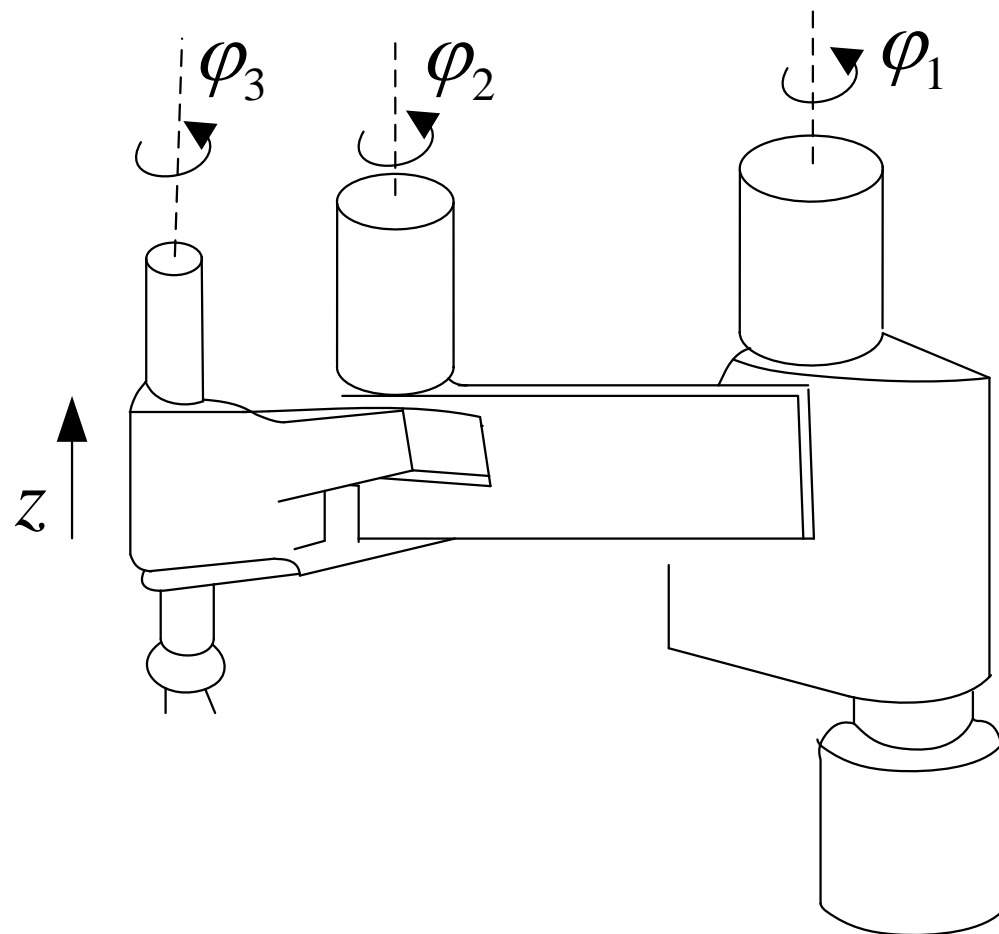
直角坐标式机器人：CMM



圆柱坐标式机器人



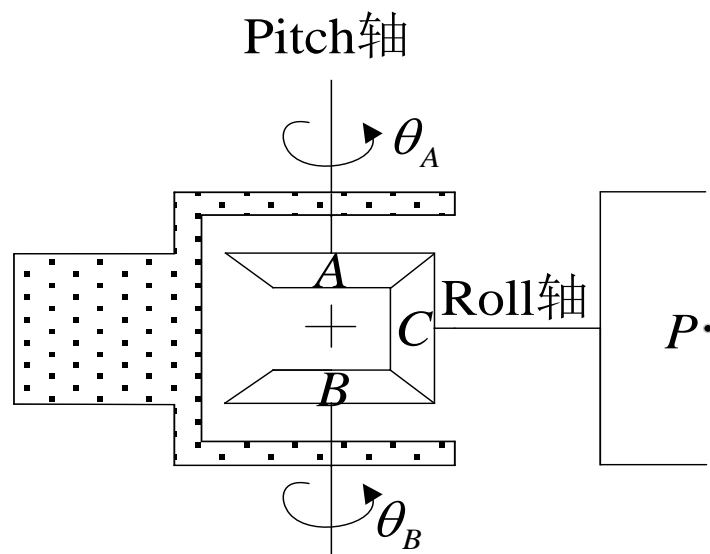
球（极）坐标式机器人：工程机械/Stanford机器人



SCARA机器人

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；

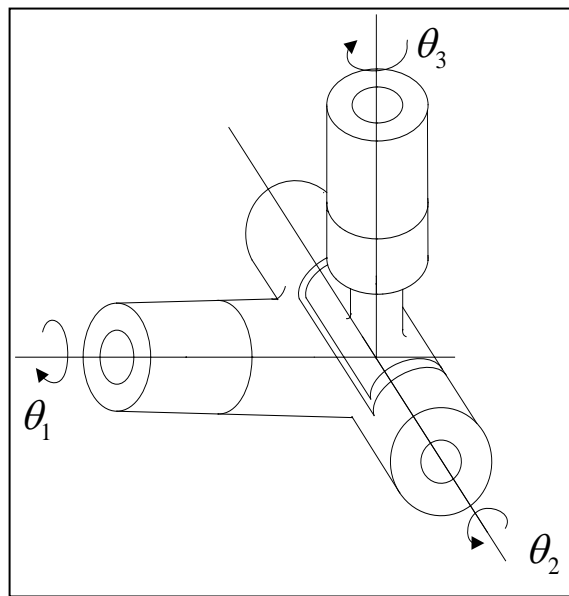
- 2自由度球形手腕：3个锥齿轮组成，齿轮C与工具Roll轴固接，齿轮A、B通过链传动与2个马达相连—差动机构。AB同速同向转--绕P轴转；AB同速反向转--绕R轴转。



(a) Pitch-roll球形手腕

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。

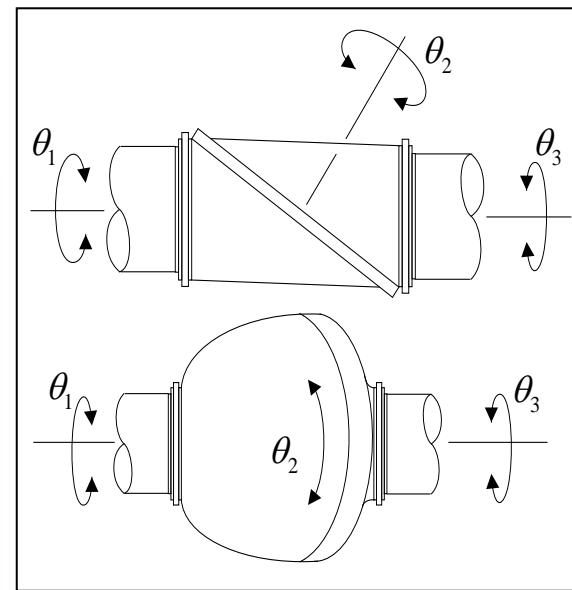
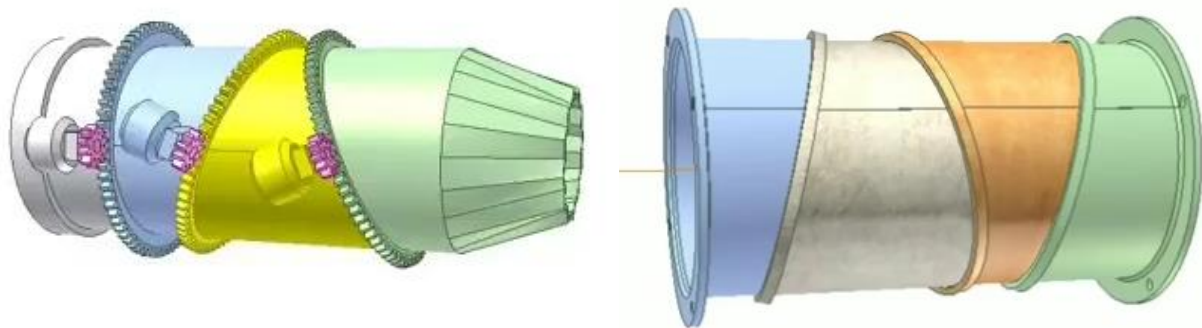


(b) 三轴垂直相交手腕

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；

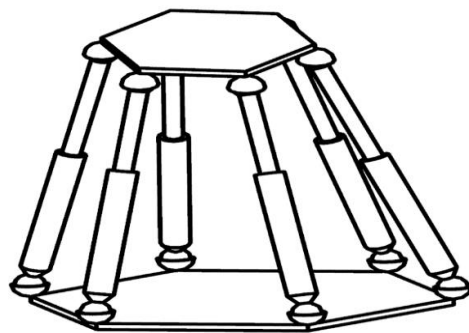
- 可连续转动手腕：4个连杆以空间交错轴的形式连接，三个转动副可连续整周转动。

美国五代机“F35B”发动机尾喷口工作原理



(c) 可连续转动手腕

- 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

□ 运动学结构、轴驱动机构设计和实时运动控制的综合影响决定了机械臂的

主要性能：

可达性、灵巧性、有效载荷、速度和精度。

根据厂家公布的性能指标做决定比较必须谨慎，因此并无标准化的测量方法。

通常使用运动测试、模拟或其他分析技术来验证个体性能。

可达性:

测量由机器人运动描述的工作空间范围和由各关节角位移决定的灵巧性。

一些机器人在其触及范围内有无法使用的空间，如：死区、奇异姿态和腕缠绕姿态。

有效负载重量:

由工业机器人厂家指定。一些制造商还指定了旋转手腕轴的惯性负载。在极端速度和到达条件下给出有效载荷是很常见的。所有工具、工件、电缆和软管的重量和惯性都必须作为有效载荷的一部分。

速度：

很重要，但是在发布的机器人规格中难以确定。大多数制造商会指定单个关节或特定运动工具点的最大速度。然而，工作周期中的平均速度是更感性其的快速特性。

精度:

通常指重复精度。几乎所有机器人厂家都指定了静态位置重复性。很少指定精度，但它可能比可重复性大4倍。通常不指定动态精度，或在连续路径上跟踪位置、速度和加速度的重复性和准确性。

思考题：定位精度、重复定位精度实现的难易？

□ 以串联机械臂为主：

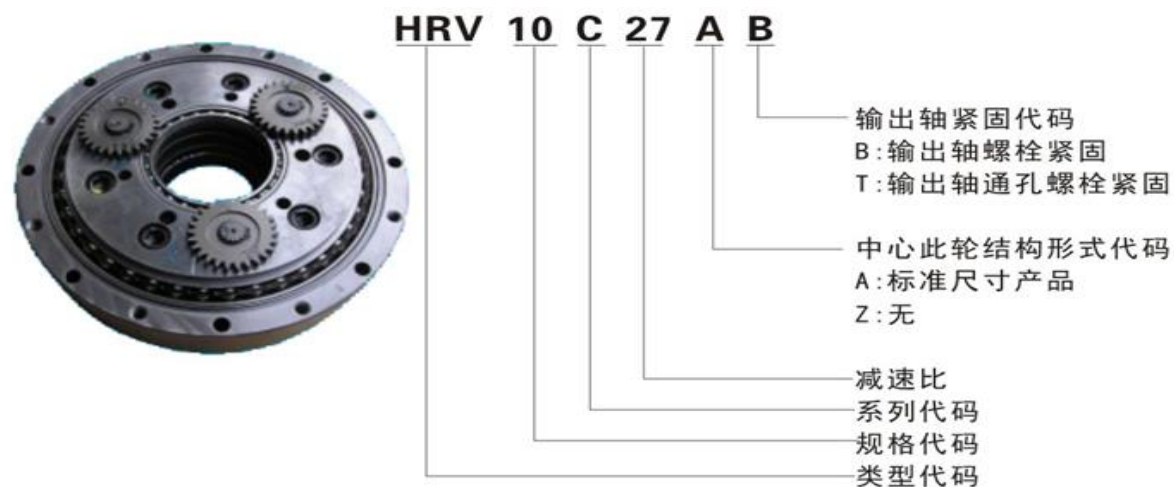
- 具有不超过六个运动学耦合的运动轴；
- 按照惯例，运动轴从底部到手腕遇到的顺序编号；
- 前3轴负责机器人的空间定位运动，它们的配置决定了机器人可以定位的空间形状；
- 运动链中的任何后续轴通常提供旋转运动以定向机器人手臂的末端（手腕轴）。

- 在三维空间中，完全独立的空间定位需要3个自由度，完全独立的方向定位需要3个自由度。
- 根据机器人的前三个轴的方向和类型对它们进行分类，由四种非常常见的商用机器人配置：铰接型、I型SCARA、II型SCARA和笛卡尔型。

□ 多数使用带有减速传动装置的电动伺服电机驱动器：

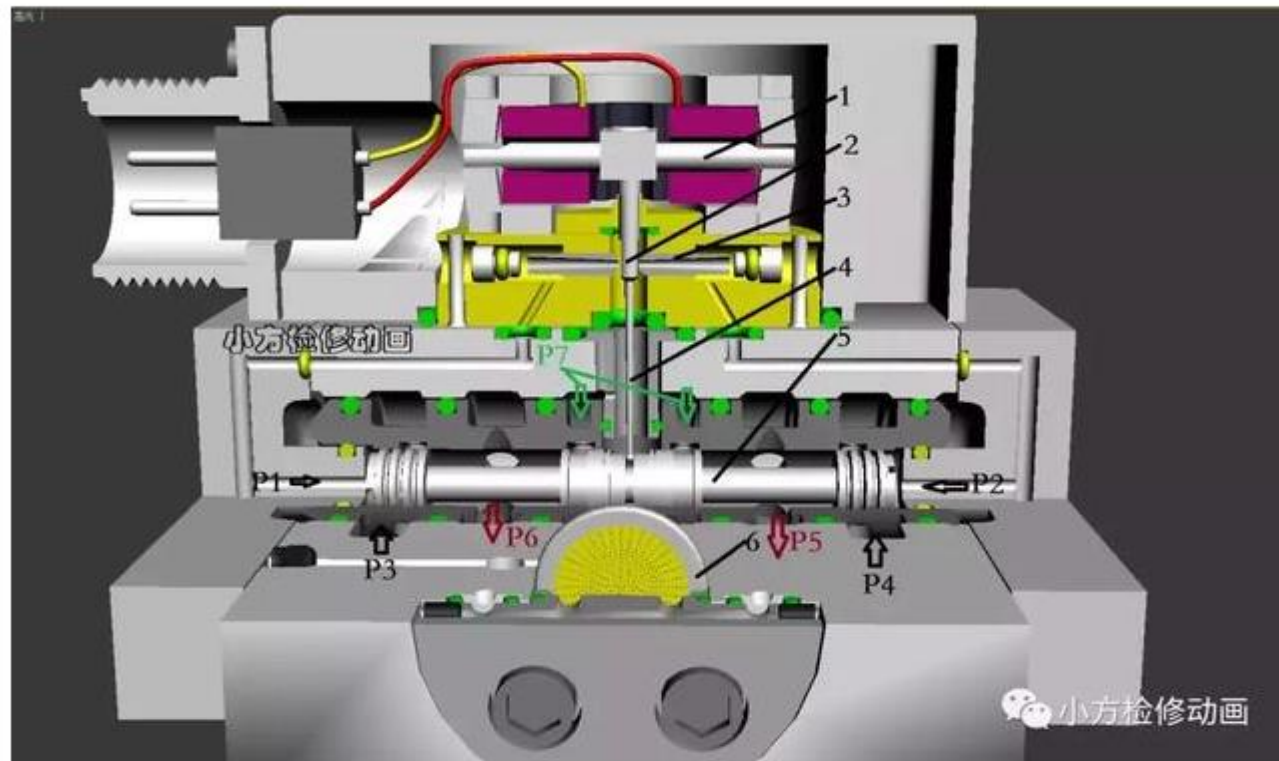
- 交流和直流电机应用最广；
- 一些伺服液压关节臂机器人现在可用于喷涂应用；
- 机械传动装置目前趋势是使用low齿隙、zero齿隙的驱动器；
- 也有使用直接驱动方法来消除与其他驱动相关的惯性和机械反冲的放大。
- 实时伺服控制所需的关节角位置传感器通常被认为是传动系统的重要组成部分，较少情况下，提供速度反馈传感器。

- ◆ 减速器是一种用作原动件与工作机或执行机构之间起匹配转速和传递转矩作用的减速传动装置；
- ◆ 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。传动比大/精度高，承载高，运行平稳等优点。



	液压	气压	电动
功率/质量比	大	小	较大
综合功率	20-30%	< 10%	60-70%
控制性能	精度较高 反应灵敏	精度较低 低速不易控制	精度高 系统较复杂
维护与应用	方便 对油温要求高	方便 对气压要求高	方便
对环境影响	漏油	噪声	基本没有
投资/运行成本	较高/高	低/低	高/较低
应用范围	低速、重型	快速、小型	通用

伺服阀实物剖面图



伺服阀剖面图

1、衔铁；2、档板；3、喷嘴；4、反馈杆（既弹簧片）；5、滑阀；6、滤网；P1：滑阀左边控制油压；P2：滑阀右边控制油压；P3、P4：压力油；P5：通油动机活塞下部；P6：集成块上连接盲板

注：P3、P4压力油未经过6（滤网），P1、P2滑阀控制油经过6（滤网）

液压传动是一种流体传动，理论基础是流体力学。以液体为介质，利用液体压力来传递动力和进行控制的一种传动方式

液体静力学，帕斯卡原理
密闭液体上的压强，能够大小不变地向各个方向传递

液压驱动主要优点:

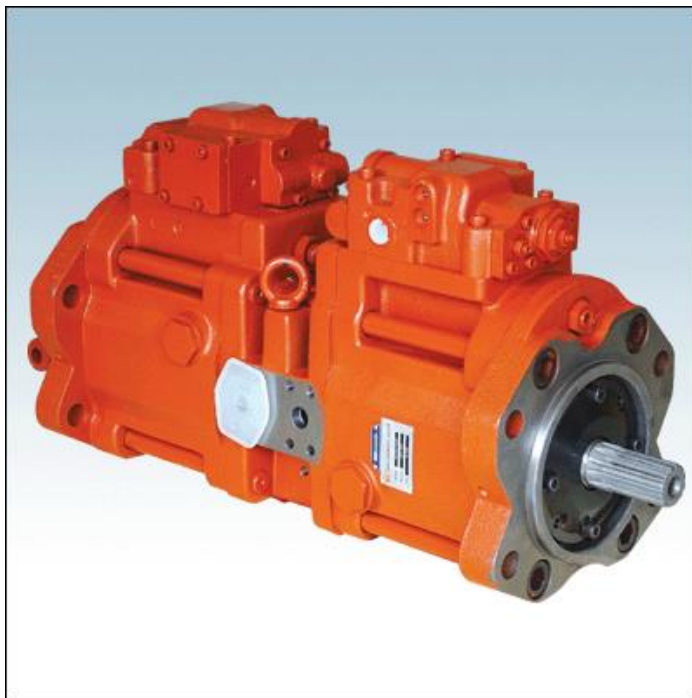
- (1) 无级调速;
- (2) 功率体积比功率大, 元件布置灵活;
- (3) 易实现过载保护;
- (4) 工作平稳;
- (5) 便于实现自动化;
- (6) 元件能够自行润滑, 使用寿命长;
- (7) 液压元件易实现系列化、标准化和通用化。

液压驱动主要缺点:

- (1) 传动比不稳定,不能保证严格的传动比 (泄漏, 压缩性)
- (2) 对油温变化敏感;
- (3) 不宜远距离输送动力, 传动效率较低
- (4) 元件制造精度要求高, 加工装配较困难, 且对油液的污染较敏感, 成本高。
- (5) 不易查找故障。
- (6) 易对环境造成污染。

液压驱动动力部分：

将原动机的机械能转换为油液的压力能（液压能）



液压驱动控制元件：

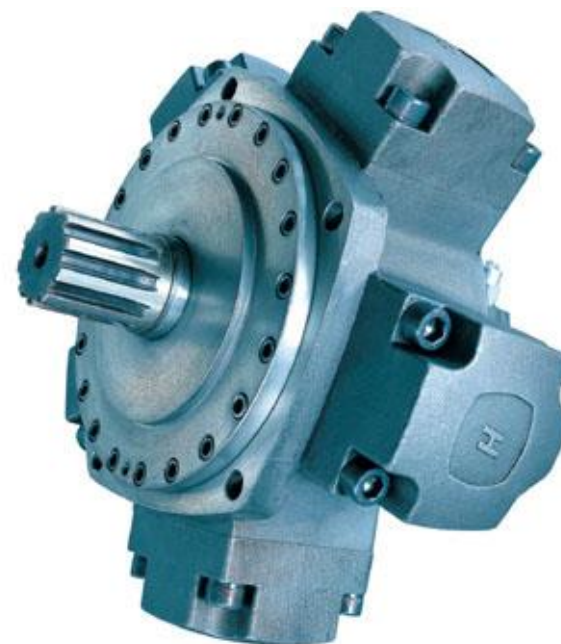
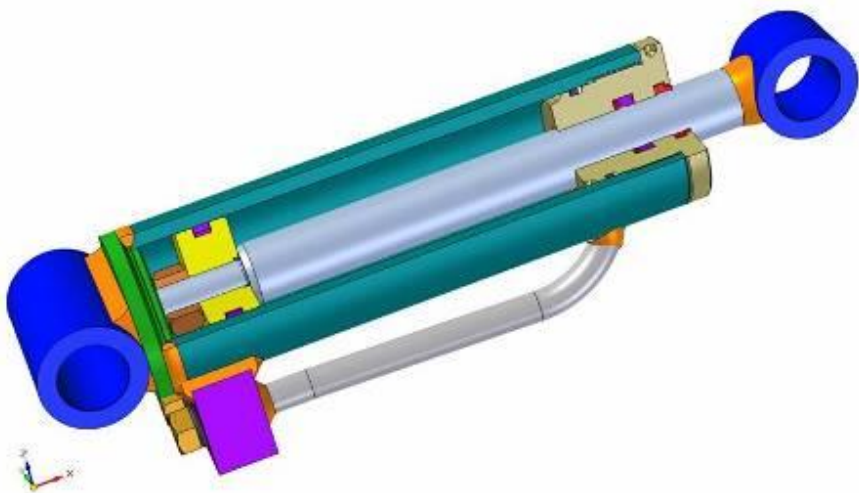
将原动机的机械能转换为油液的压力能（液压能）

控制阀，其功能是对系统中的压力、流量或流动方向进行控制，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。如溢流阀、节流阀、换向阀等。



液压驱动执行部分：

它是将液体的液压能转换成机械能。其中，油缸做直线运动，马达做旋转运动。



电机分类：

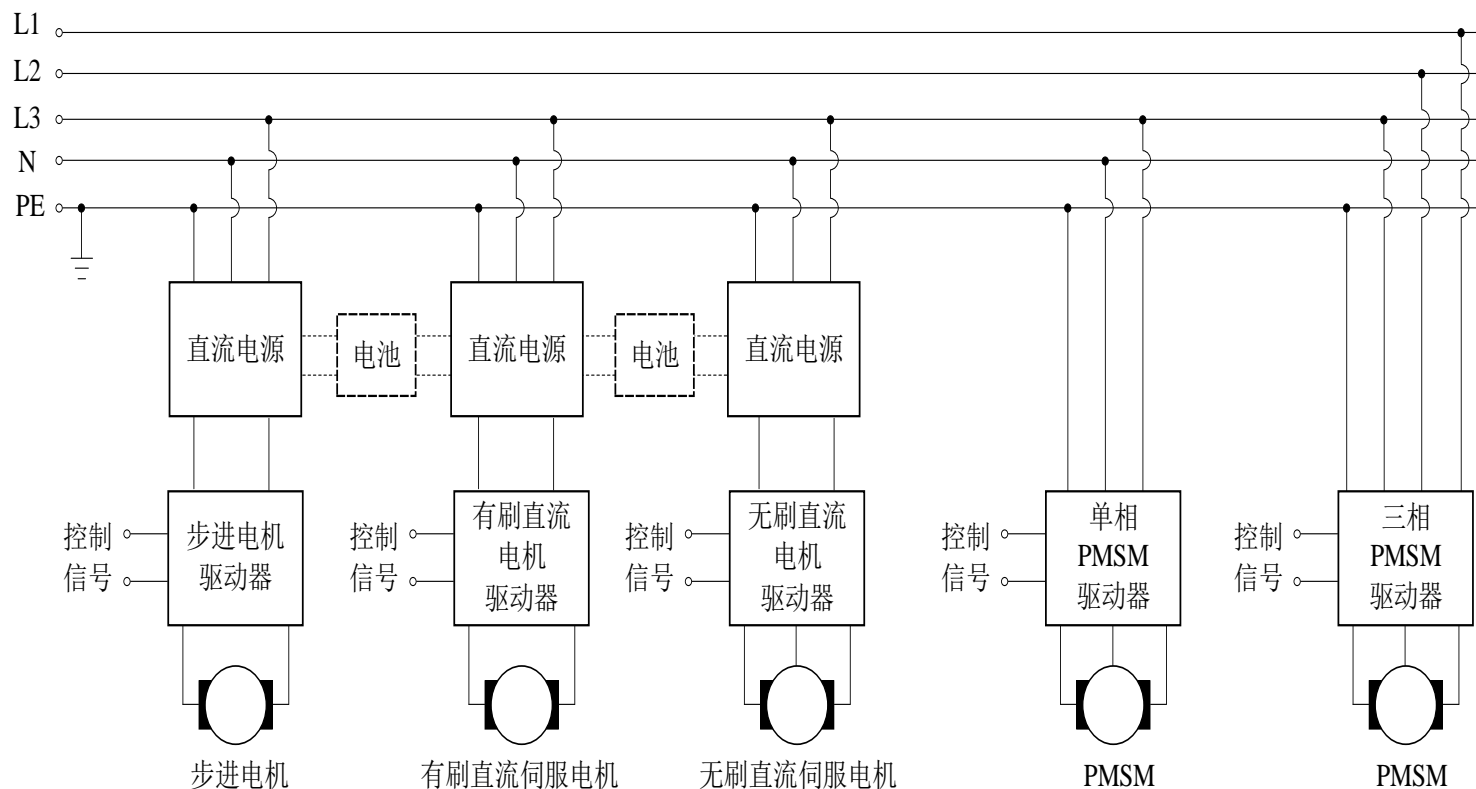
按照电机连接电网的方式可分为：

1、步进电机、有刷直流伺服电机、无刷直流伺服电机。

驱动器需要直流功率电源，也可以由机载动力电池供电。

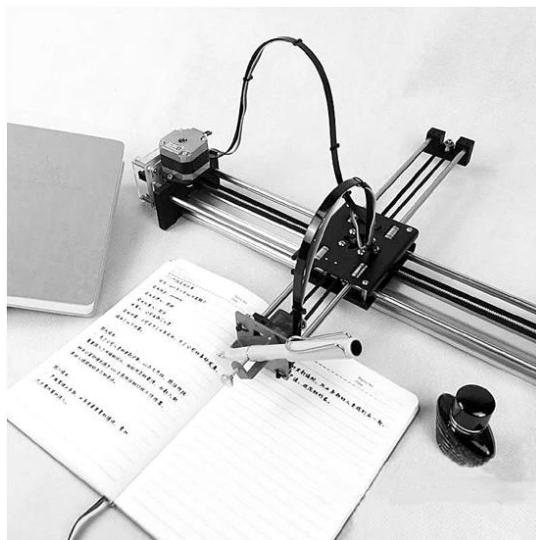
2、自控式永磁同步电机（PMSM）。

驱动器采用交流电源供电，分为单相（220V）和三相（380V）两种。



步进电机适用场合：

- 低成本机器人，例如：教学型机器人、各种家用娱乐机器人
- 对位置精度要求一般，例如：旋转精度大于 1°
- 负载稳定，例如：X/Y直角坐标绘图仪、3D打印机
- 对加速度要求不高的场合

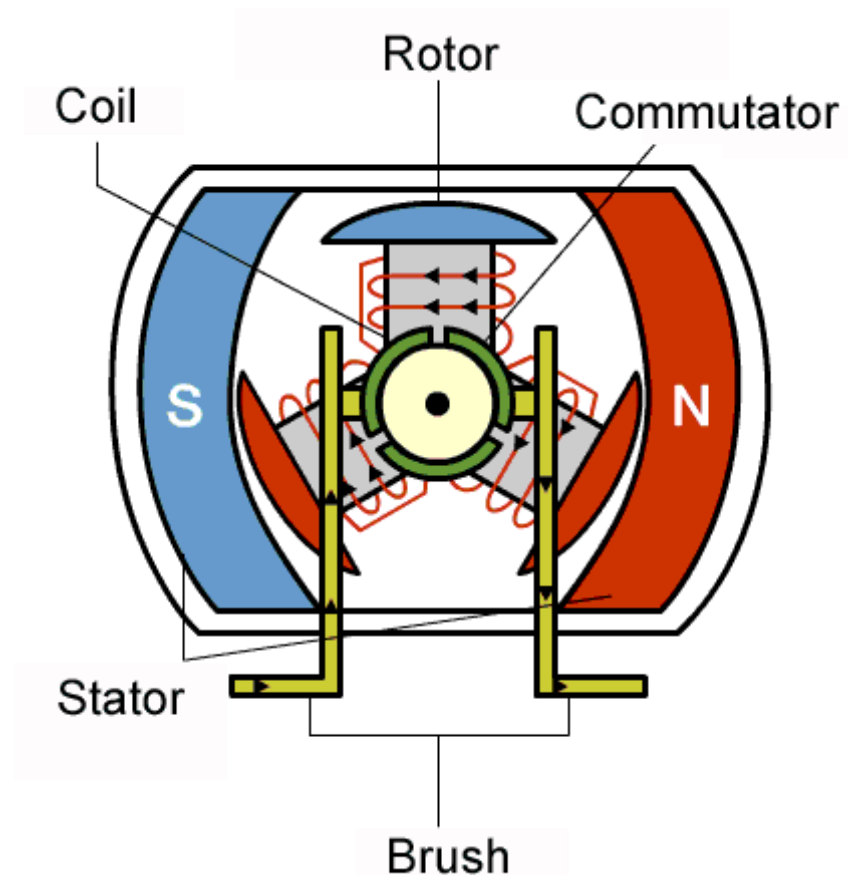


步进电机局限性：

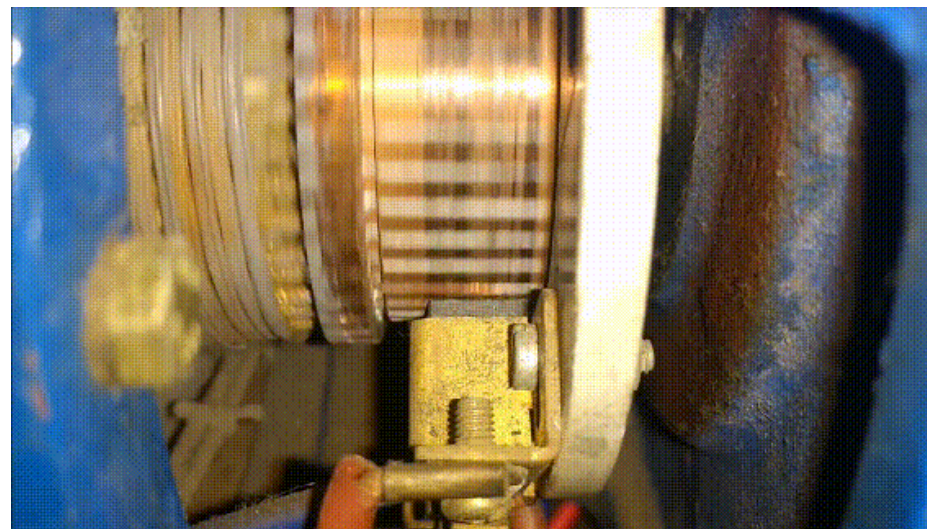
- 力矩可控性不好，快速启停或负载力矩大幅度变化时，容易出现失步
- 仅限于关节负载稳定、速度变化小的机器人
- 运动精度取决于步距角，多数步进精度为 1.8° ，不适用于更高精度场合。



有刷直流电机：



- 换向器和电刷



- 机械换向，控制电路简单
- 电刷易磨损，需保养

空心杯转子电机：

➤ 优点

- 极低的惯量
- 灵敏度高
- 力矩波动小，低速转动平稳，噪声很小
- 换向性能好，寿命长
- 损耗小，效率高



(a) 空心杯转子

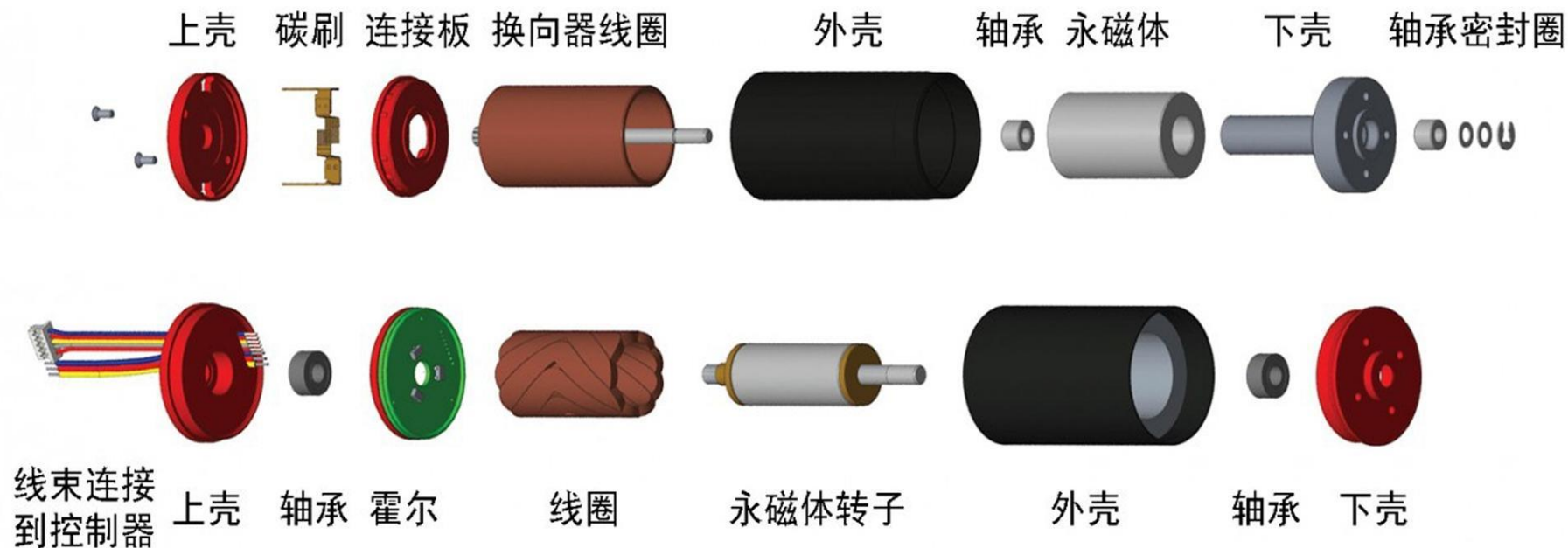


(b) 铁芯转子

无刷直流电机:

- 无刷电机与有刷电机结构对比

直流有刷空心杯电机爆炸图



直流无刷空心杯电机爆炸图



三种伺服电机的特点和适用场合：

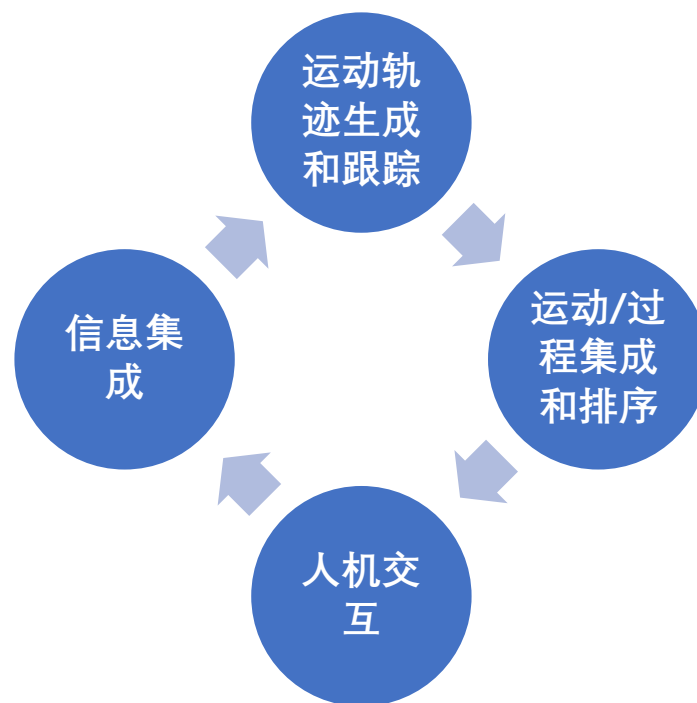
项目	有刷直流永磁伺服电机 (空心杯转子)	无刷直流永磁伺服电机	PMSM
换相原理	电刷和换向器机械换相	霍尔元件和换相电路配合实现电子换相	旋转变压器、换相电路或算法实现电子换相
换相和驱动控制	简单。PWM全桥开关控制调压电路，特殊场合可以没有驱动电路。驱动器有电压型和电流型两种。	较复杂。有专门设计的换相驱动电路，由换相电路和PWM全桥开关控制调压电路构成。驱动器有电压型和电流型两种。	复杂。必须有专门的调压、调频电路或控制器。驱动器内置电流/力矩控制器，可简化成电流型驱动器。
效率	中等。电刷压降带来额外损耗	高	高
驱动器电源	直流	直流	交流
维护	需要定时更换电刷	很少	很少
寿命	短	长	长
转子惯量	小	小	小

三种伺服电机的特点和适用场合：

项目	有刷直流永磁伺服电机 (空心杯转子)	无刷直流永磁伺服电机	PMSM
速度范围	中等，受限于电刷的机械限制	大	大
力矩波动	小	较大。由跳跃的旋转磁场导致	小
价格	较高。空心杯转子制作工艺复杂，但是驱动电路简单	中等。永磁铁心转子制作容易，转子位置检测仅需3个霍尔元件，驱动电路简单	高。需要内置旋转变压器或高精度编码器检测转子位置，换相和驱动控制复杂
适用功率	100W以下	300W以下	300W以上
适用机器人	小型短时工作的关节型机器人，对电机的要求：小功率，速度和位置控制精度高、负载波动大、动态性能要求高、有力控制要求	移动机器人或直角坐标机器人，对电机的要求：尽量免维护、中小功率、速度和位置控制精度较高、负载稳定、无力控制要求	工业机器人，对电机要求：易于维护或免维护、中等功率、速度和位置控制精度高、负载波动大、动态性能要求高、有力控制要求

□ 是专用的多处理器计算系统，基本功能包括：

运动轨迹生成和跟踪、运动/过程集成和排序、人机交互、信息集成



1、运动生成：一个是可以编程的操作范围；一个是执行受控编程运动的能力。

- **实时伺服级运动控制（专有）；**
- **各机器人控制器通过其操作系统程序，将来自上级协调器的数据通过精确计算和高速分配、通讯给各个关节伺服控制器。**
- **从而将各个轴各运动命令转换为协调的手臂运动。采样周期多为16ms。**
- **目前的高级控制器集成了机器人技术、运动控制、机器视觉、力传感和。**
- **从而将各个轴各运动命令转换为协调的手臂运动。采样周期多为16ms。**

2、运动过程集成与排序

运动/过程集成包括协调机械手运动与过程传感器或其它过程控制器设备。最原始的工艺集成是通过离散数字输入/输出 (I/O) 。例如：机器人控制器外部的机器控制器可能会发送一个1位信号，表明它已准备好由机器人加载。机器人控制器必须有能够读取数字信号并使用该信号执行逻辑操作（如果。。。，那是。。。，等待。。。直到。。。，做。。。直到。。。，等）。也就是说，一些机器人控制器内置了一些可编程逻辑控制器（PLC）功能，还经常提供与传感器（如视觉）的协调。

2、运动过程集成与排序

可编程逻辑控制器（PLC）：



西门子



三菱



欧姆龙



施耐德



台达

3、人机接口

控制器的人机界面对于机器人系统的快速设置和编程至关重要。

大多数机器人控制器有两种可用的人机界面：一种是计算机风格的CRT/键盘终端，用于离线编写和编辑程序代码；另一种是教学挂件，这是一种便携式手动输入终端，用于通过触摸键或操作杆给远程机器人发送命令。通常是示教机器人的主要人机接口。

以上方式很难在环境发生变化的情况下进行。



目前更先进的人机接口是采用基于行为的编程，其中各种具体的行为编程到机器人控制器中，然后根据环境对这些行为进行排序，运动参数由更高级别的机器人管理者给出。

4、信息集成

随着越来越多的灵活性和敏捷性对机器人的影响，信息集成变得越来越重要。

现在许多商用机器人控制器通过利用集成PC接口的通讯端口（如：RS-232）或者是直接与机器人控制器总线连接支持信息集成功能。最近的Labview可以方便地实现集成工作，使机器人工作单元与互联网的接口成为可能，从而实现远程现场监控和控制。

现场总线（Field bus）是近年来迅速发展起来的一种工业数据总线，它主要解决工业现场的智能化仪器仪表、控制器、执行机构等现场设备间的数字通信以及这些现场控制设备和高级控制系统之间的信息传递问题。现场总线具有简单、可靠、经济实用等优点。

简单说，现场总线就是以数字通信替代了传统4-20mA模拟信号及普通开关量信号的传输，是连接智能现场设备和自动化系统的全数字、双向、多站的通信系统。

CAN总线；

DeviceNet总线；

Profibus总线；

485/ModBus总线。

本体（内部）传感器是设备内部的传感器，可以测试关于该设备内部状态的信息（例如机器人手臂关节角度传感器）。

外部传感器测试设备外部其它硬件的信息。

传感器产生模拟或数字输出；数字传感器通常提供有关机器或资源状态的信息（夹持器的打开或关闭、机器装载、工作完成）。

传感器产生的输出在所有级别的控制单元都需要，包括用于：

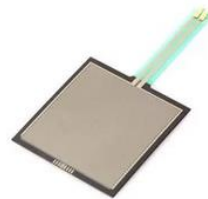
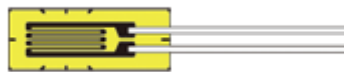
- 伺服级闭环控制（通常是模拟内部传感器）；
- 过程监控与协调（通常是数字外部传感器或检测传感器如视觉）；
- 故障与安全监控（通常是数字的——如：接触传感器，气动压力损失传感器）；
- 质量控制检测（通常是视觉或激光扫描器）。

触觉传感器

触觉是人与外界环境直接接触时的重要感觉功能。触觉传感器按功能可分为接触觉传感器、力-力矩觉传感器、压觉传感器和滑觉传感器等。

接触觉传感器用以判断机器人（主要指四肢）是否接触到外界物体或测量被接触物体的特征的传感器。接触觉传感器有微动开关、导电橡胶、含碳海绵、碳素纤维、气动复位式装置等类型。

力觉传感器



接近传感器

接近传感器，是代替限位开关等接触式检测方式，以无需接触检测对象进行检测为目的的传感器的总称。能检测对象的移动信息和存在信息转换为电气信号。在换为电气信号的检测方式中，包括利用电磁感应引起的检测对象的金属体中产生的涡电流的方式、捕测体的接近引起的电气信号的容量变化的方式、利石和引导开关的方式。

非接触式接近传感器包括基于霍尔效应的器件或基于电磁效应的感应器件，可检测约5毫米以内的黑色材料。这类传感器通常是数字的，产生的是关于是否有物体在附近的二进制信息。基于电容的传感器可以探测到附近任何在5毫米范围内的固体或液体。光学和超声波传感器的范围更大。

接近传感器

在JIS规格中，根据IEC60947-5-2的非接触式位置检测用开关，制定了JIS规格（JIS C 8201-5-2低压开关装置及控制装置、第5控制电路机器及开关元件、第2节接近开关）。在JIS的定义中，在传感器中也能以非接触方式检测到物体的接近和附近检测对象有无的产品总称为“接近开关”，由感应型、电容型、超声波型、光电型、磁力型等构成。

- 感应型接近传感器监测金属存在；
- 电容型接近传感器监测金属及非金属物体存在；
- 利用磁力产生的直流磁场的开关。

距离传感器（位移传感器）

用于感应其与某物体间的距离以完成预设的某种功能，得到了相当广泛的应用。主要产品有手机距离传感器、远距离测量传感器等，应用于智能皮带中。



超声波距离传感器

限位开关:



位置、速度与加速度传感器

用于感应其与某物体间的距离以完成预设的某种功能，得到了相当广泛的应用。主要产品有手机距离传感器、远距离测量传感器等，应用于智能皮带中。

线性位置测量装置包括线性电位器、声纳和激光测距仪。

线速度传感器可以是基于激光或声纳的多普勒效应装置。

关节角位置和速度本体传感器是机械臂伺服控制驱动轴的重要组成部分。

角位置传感器包括使用直流电压的电位器和使用交流电压的解析器，精度为15min。

光学编码器可以使用数字技术提供极高的精度。

增量式光编码器使用三个光学传感器和一个交替不透明/透明区域的环形(图1.4.1(a))，提供相对于参考点的角位置和角速度信息;商业设备每回合可能有1200个槽位。

绝对光编码器，有n个不透明/透明区域交替的同心环，需要n个光学传感器。它们提高了数据读取和传输的准确性，并最小化了数据读取和传输的错误，特别是在采用格雷码的时候。

两个连续部分只有一位在变化。当n为12时，精度为 $360^\circ / 2^n$ 。价格高。

如果补偿了与漂移相关的重复性问题，陀螺仪具有良好的精度。

定向陀螺仪的精度约为1.5度。垂直陀螺仪的精度为0.5度，可用于测量多轴运动(如俯仰和滚转)。

速率陀螺仪直接测量速度的阈值为0.05度/秒左右。

根据应变计(下一段)、陀螺仪或晶体特性，有各种各样的加速度计可供选择。

商用设备可以测量沿三个轴的加速度。一种流行的新技术涉及到微机电系统(MEMS)，它是表面或大块微加工设备。MEMS加速度计体积小、价格便宜、性能稳定、精度高。MEMS传感器尤其被用于汽车工业。



力、扭矩传感器

各种扭矩传感器是可用的，尽管它们往往不是必需的。

例如，机器人手臂关节处的内部力矩可以从电机电枢电流计算出来；

钻井工具上的扭矩传感器可以指示工具何时变得迟钝。

- 线性力可以用测力元件或应变计来测量。
- 应变片是一种弹性传感器，其电阻是施加应变或变形的函数。压电效应，当施加一个力时产生一个电压，也可以用于力的传感。
- 其他的力传感技术是基于真空二极管、石英晶体(其谐振频率随外加力的变化而变化)等。

机器人手臂力-扭矩手腕传感器在灵巧的操作任务中非常有用。商用设备可以测量沿三个垂直轴的力和力矩，提供关于笛卡尔力矢量 f 的完整信息。标准变换允许在其他坐标下计算力和力矩。六轴力-扭矩传感器相当昂贵。

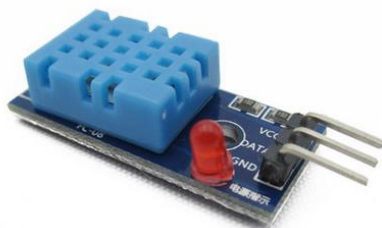
光电传感器

有各种各样的光电传感器可用，有些是基于光纤原理的。它们的响应速度在50微秒附近，范围可达45毫米，用于检测零件和标识，扫描光学条形码，在排序任务中确认零件通道等。

其它传感器

各种传感器可用于测量压力、温度、流体流量等。这些是有用的闭环伺服控制应用的一些过程，如焊接，工作协调和/或安全中断程序在其他方面。

温湿度传感器：



色标传感器：



其它传感器

空气质量传感器：



颜色传感器：



照明

有时机器人工作单元的照明可能会导致严重的操作问题。常见的问题包括**低对比度图像、镜面反射、阴影和外来的细节问题**。这些问题能够通过很复杂的图像处理校正，但是也可以通过在工作单元设计阶段适当注意细节来避免。照明技术包括光谱滤波、选择合适的光源光谱特性、漫射照明技术、背光(产生易于处理的剪影)、结构照明(提供额外的深度信息并简化目标检测和解释)、和定向照明。

视觉传感器:

