



工业机器人的机械结构和运动控制





工业机器人的机械结构和运动控制

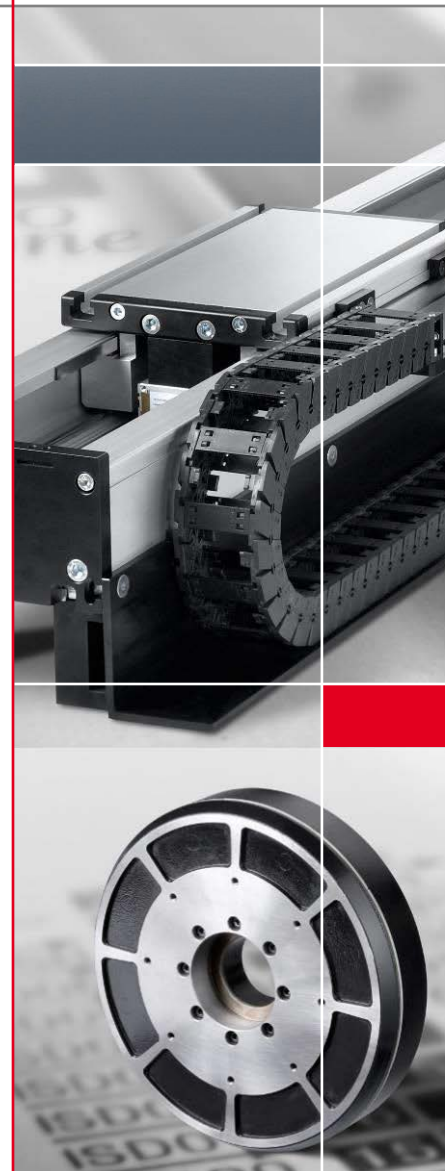


- 1、工业机器人的系统组成
- 2、工业机器人的技术指标
- 3、工业机器人的运动控制

工业机器人的机械结构和运动控制

提及机器人，大家更多的可能是想到那些具有人类形态、拟人化的机器人。但事实上，除部分场所中的服务机器人外，大多数机器人都不具有基本的人类形态更多的是以机械手的形式存在，这点在工业机器人身上表现明显。

下面将简明扼要地阐述有关工业机器人系统的进本组成、技术参数及运动控制等基础性问题。



工业机器人的机械结构和运动控制

机器人市场潜力巨大，随着人力成本的上升和高级技工的缺乏，越来越多的企业开始注重设备更新，增加自动化的工业机器人。“如果机器人能做的事就让机器去做，人类应该从事富有创造性的活动。”50多年前，自动化技术的先驱者欧姆龙公司提出了这一口号。如今，这一梦想已经快要成为现实，但这对中国这样一个人口大国来说，其效应是多方面的。



工业机器人的机械结构和运动控制

众所周知，中国机器人产业由于先天因素，在单体与核心零部件仍然落后于日、美、韩等发达国家。虽然中国机器人产业经过30年的发展，形成了较为完善的产业基础，但与发达国家相比，仍存在较大差距，产业基础依然薄弱，关键零部件严重依赖进口。



工业机器人的机械结构和运动控制

整个机器人产业链主要分为上游核心零部件（主要是机器人三大核心零部件——**伺服电动机**、**减速器**和**控制系统**，相当于机器人的“大脑”）、中游机器人本体（机器人的“身体”）和下游系统集成商（国内95%的企业都集中在这个环节上）三个层面。



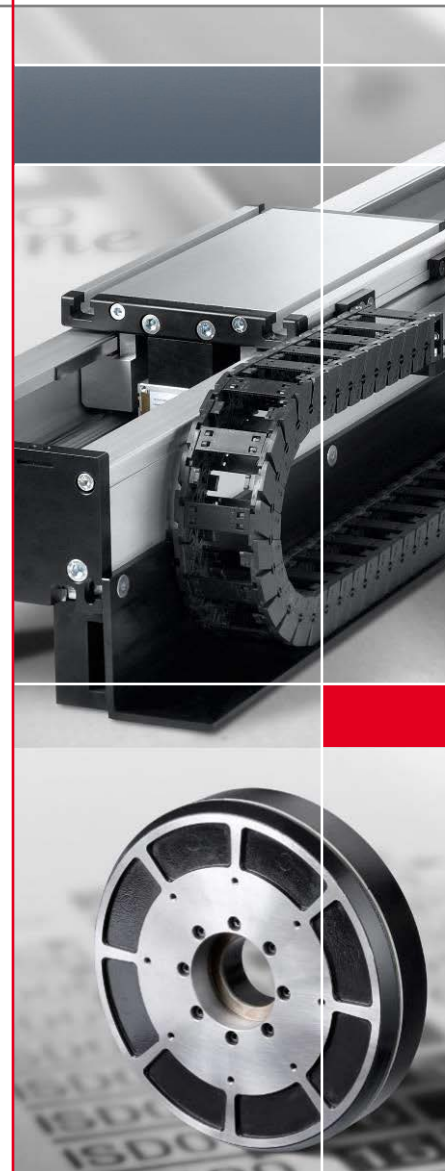
工业机器人的机械结构和运动控制

减速器用来将电动机的高速运转降低至机器人适用的速度，占到机器人成本的30%以上。全球75%的市场被日本两家企业占据，纳博特斯克（Nabtesco）生产的RV减速器约占60%，哈默纳科（Harmonica）生产的谐波减速器约占15%。目前，国内还没有能够规模化且性能可靠的精密减速器生产企业，苏州绿的谐波传动科技有限公司生产的谐波减速器接近国外水平。精密减速器成为制约降低国产工业机器人成本的第一因素。



工业机器人的机械结构和运动控制

相对于减速机，伺服电动机和控制系统市场未形成主要厂商垄断现象，而且几大国际厂商在中国也建立了分工厂，供应充足，产品价格相对合理。伺服电动机的主流供应商有日系的松下、安川和欧美的倍福、伦茨等，中国的汇川技术、广州数控、中科伺服等公司也占据一定的市场份额。控制系统的主流供应商包括美国的DeltaTau和Gail、英国的TRIO和中国的固高等公司。



1、工业机器人的系统组成



- (1)、操作机
- (2)、控制器
- (3)、示教器

1、工业机器人的系统组成

工业机器人是一种模拟人手臂、手腕和手功能的机电一体化装置，可对物体运动的位置、速度和加速度进行精确控制，从而完成某一工业生产的作业要求。

当前工业中应用最多的第一代工业机器人主要由以下几个部分组成：操作机、控制器和示教器。对于第二代及第三代工业机器人还包括感知系统和分析决策系统，它们分别由传感器及软件实现。



1.1 操作机

操作机（或称机器人本体）是工业机器人的机械主体，是用来完成各种作业的执行机构。它主要由机械臂、驱动装置、传动单元及内部传感器等部分组成。

由于机器人需要实现快速而频繁的启停、精确地到位和运动，因此必须采用位置传感器、速度传感器等检测元件实现位置、速度和加速度闭环控制。

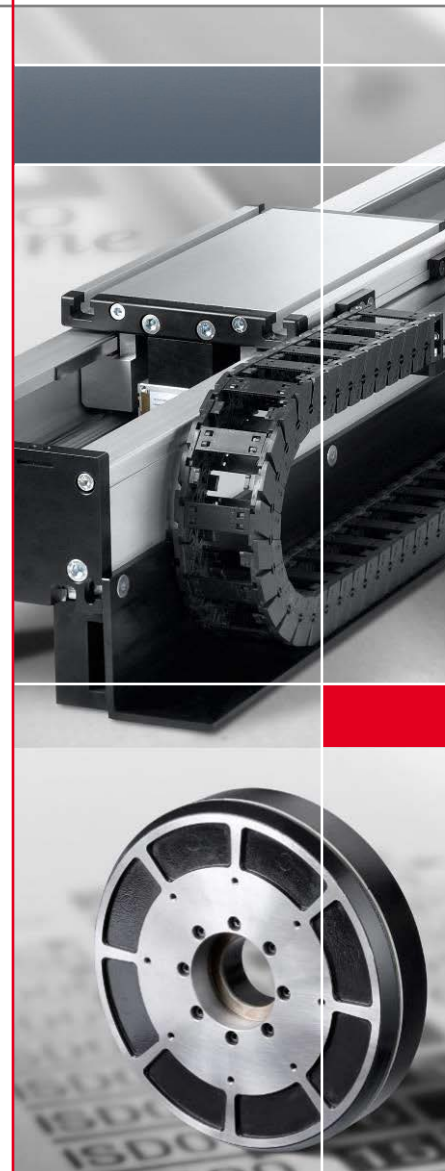
为适应不同的用途，机器人操作机最后一个轴的机械接口通常为一个连接法兰，可接装不同的机械操作装置（习惯上称末端执行器），如夹紧爪、吸盘、焊枪等。

末端执行器是安装在机器人手腕上用来进行某种操作或作业的附加装置。机器人末端执行器的种类很多，以适应机器人的不同作业及操作要求。末端执行器可分为搬运用、加工用和测量用等。搬运用末端执行器是指各种加持装置，用来抓取或吸附被搬运的物体；加工用末端执行器是带有喷枪、焊枪、砂轮、铣刀等加工工具的机器人附加装置，用来进行相应的加工作业；测量用末端执行器是装有测量头或传感器的附加装置，用来进行测量及检验作业。



1.1.1 操作机—机械臂

(1) 机械臂 关节型工业机器人的机械臂是由关节连在一起的许多机械连杆的集合体。它本质上是一个拟人手臂的空间开链式机构，一端固定在基座上，另一端可自由运动。关节通常是移动关节和旋转关节。移动关节允许连杆作直线移动，旋转关节仅允许连杆之间发生旋转运动。由关节--连杆结构所构成的机械臂大体可分为基座、腰部、臂部（大臂和小臂）和手腕4个部分，由4个独立旋转“关节”（腰关节、肩关节、肘关节和腕关节）串联而成，它们可在各个方向运动，这些运动就是机器人在“做工”。



1.1.1 操作机—机械臂

1) 基座 基座是机器人的基础部分，起支撑作用。整个执行机构和驱动装置都安装在基座上。对固定式机器人，直接连接在地面基础上；对移动式机器人，则安装在移动机构上，可分为有轨和无轨两种。

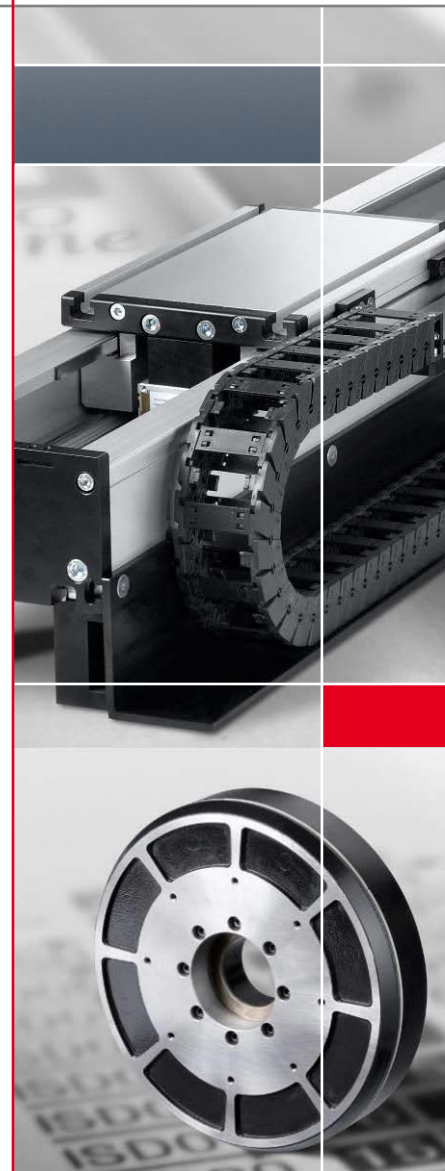
2) 腰部 腰部是机器人手臂的支撑部分。根据执行机构坐标系的不同，腰部可以在基座上转动，也可以和基座制成一体。有时腰部也可以通过导杆或导槽在基座上移动，从而增大工作空间。



1.1.1 操作机—机械臂

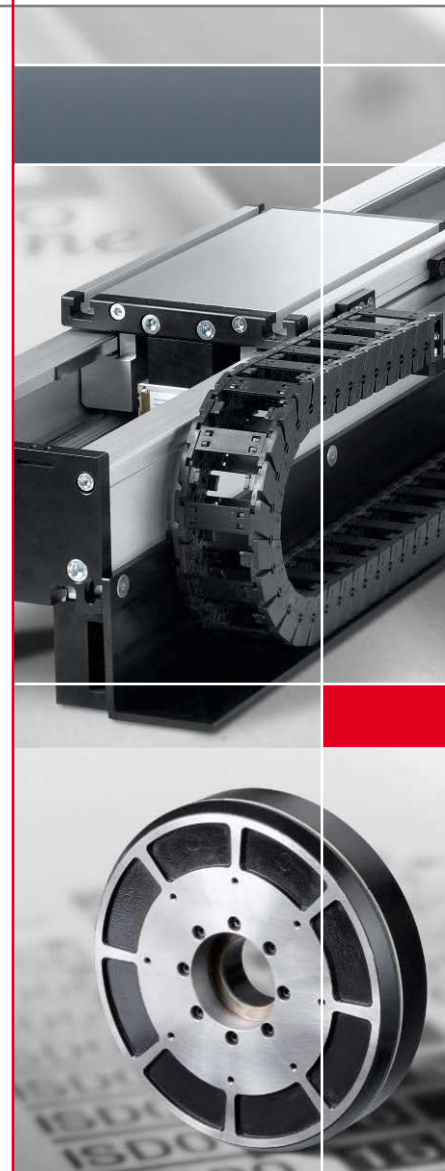
3) 手臂 手臂是连接机身和手腕的部分，由操作机的动力关节和连接杆件等构成。它是执行结构中的主要运动部件，也称主轴，主要用于改变手腕和末端执行器的空间位置，满足机器人的作业空间，并将各种载荷传递到基座。

4) 手腕 手腕是连接末端执行器和手臂的部分，将作业载荷传递到臂部，也称次轴，主要用于改变末端执行器的空间姿态。



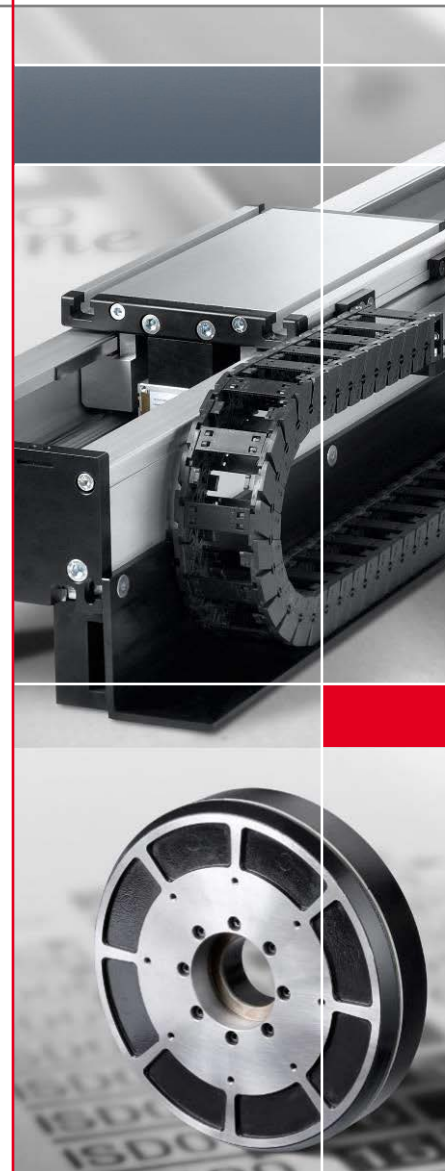
1.1.2 操作机—驱动装置

(2) 驱动装置 驱使工业机器人机械臂运动的机构。按照控制系统发出的指令信号，借助于动力元件使机器人产生动作，相当于人的肌肉、筋络。机器人常用的驱动方式主要有液压驱动、气压驱动和电气驱动三种类型。目前，除个别运动精度不高、重负载或有防爆要求的机器人采用液压、气压驱动外，工业机器人大多采用电气驱动，而其中交流伺服电动机应用最广，且驱动器布置大都采用一个关节一个驱动器。



1.1.3 操作机—传动单元

(3) 传动单元 驱动装置的受控运动必须通过传动单元带动机械臂产生运动，以精确的保证末端执行器所要求的位置、姿态和实现其运动。目前工业机器人广泛采用的机械传动单元是减速器，与通用减速器相比，机器人关节减速器要求具有传动链短、体积小、功率大、质量轻和易于控制等特点。大量应用在关节型机器人上的减速器主要有两类：**RV**减速器和谐波减速器。精密减速器使机器人伺服电动机在一个合适的速度下运转，并精确地将转速降到工业机器人各部位需要的速度，在提高机械本体刚性的同时输出更大的转矩。一般将**RV**减速器放置在基座、腰部、大臂等重负载位置（主要用于20kg以下的机器人关节）。此外，机器人还采用齿轮传动、链条（带）传动、直线运动单元等。



1.1.3 操作机—传动单元

1) 谐波减速器 同行星齿轮传动一样，谐波齿轮传动（简称谐波传动）通常由3个基本构件组成，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、外圈带有柔性滚动轴承的波发生器。在这3个基本构件中可任意固定一个，其余一个为主动件一个为从动件（如刚轮固定不变，波发生器为主动件，柔轮为从动件）。

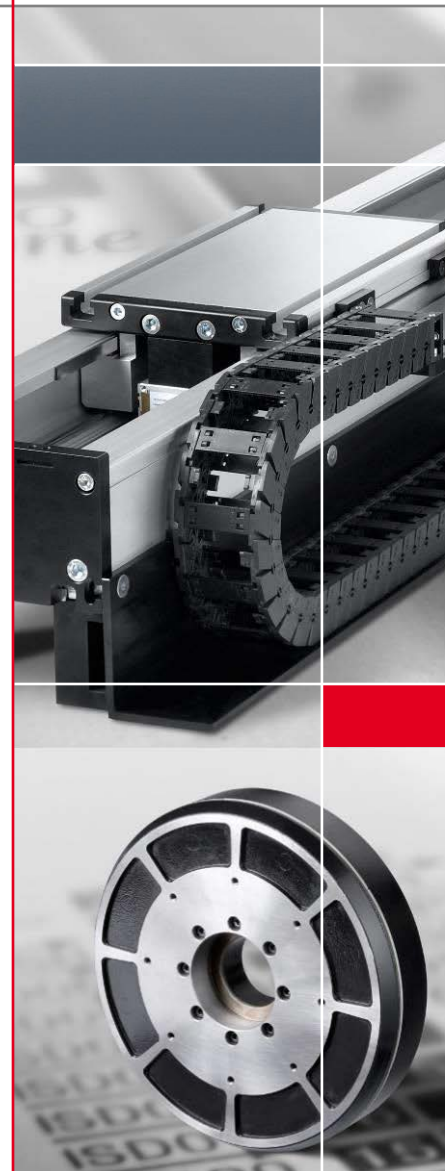
当波发生器装入柔轮后，迫使柔轮的剖面由原先的圆形变成椭圆形，其长轴两端附近的齿与刚轮的齿完全啮合，而短轴两端附近的齿则与刚轮完全脱开，周长上其他区段的齿处于啮合和脱离的过渡状态。当波发生器沿某一方向连续转动时，柔轮的变形不断改变，使柔轮与刚轮的啮合状态也不断改变，啮入、啮合、啮出、脱开、再啮入……，周而复使地进行，柔轮的外齿数少于刚轮的内齿数，从而实现柔轮相对刚轮沿波发生器相反方向的缓慢旋转。



1.1.3 操作机—传动单元

2) **RV减速器** 与谐波传动相比，RV传动具有较高的疲劳强度和刚度以及较长的寿命，而且回差精度稳定，不像谐波传动，随着使用时间的增长，运动精度就会显著降低，故高精度机器人传动多采用RV减速器，且有逐渐取代谐波减速器的趋势。RV减速器主要由太阳轮（中心轮）、行星轮、转臂（曲柄轴）、转臂轴承、摆线轮（RV齿轮）、针齿、刚性盘与输出盘等零部件组成。

RV传动装置是由第一级渐开线圆柱齿轮行星减速机构和第二级摆线针轮行星减速机构两部分组成，是一封闭差动轮系。执行电动机的旋转运动由齿轮轴或太阳轮传递给两个渐开线行星轮，进行第一级减速；行星轮的旋转通过曲柄轴带动相距 180° 的摆线轮，从而生成摆线轮的公转。同时，由于摆线轮在公转过程中会受到固定于针齿壳上针齿的作用力而形成与摆线轮公转方向相反的力矩，进而造成摆线轮的自转运动，完成第二级减速。运动的输出通过两个曲柄轴使摆线轮与刚性盘构成平行四边形的等角度输出机构，将摆线轮的转动等速传递给刚性盘及输出盘。



1、工业机器人的系统组成

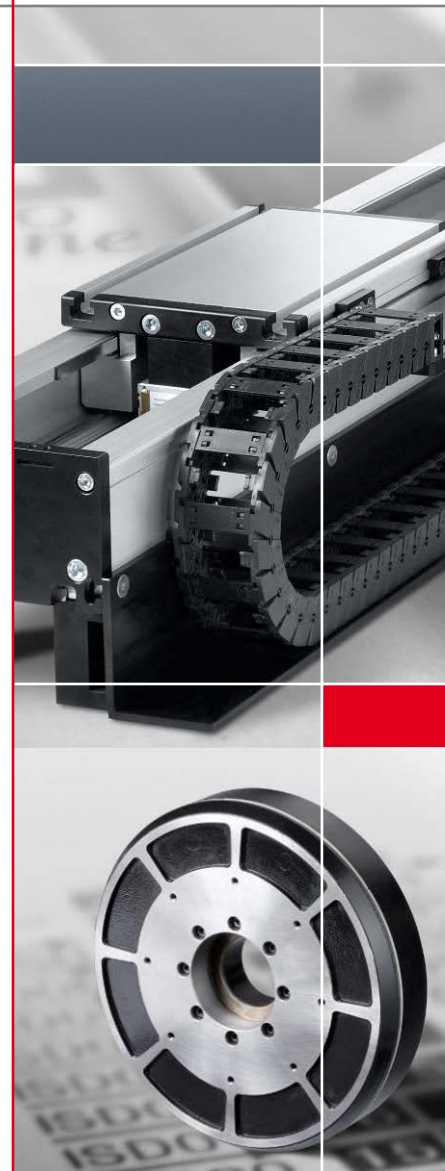


- (1)、操作机
- (2)、控制器
- (3)、示教器

1.2 控制器

如果说操作机是机器人的“肢体”，那么控制器则是机器人的“大脑”和“心脏”。机器人控制器是根据指令以及传感器信息控制机器人完成一定动作或作业任务的装置，是决定机器人功能和性能的主要因素，也是机器人系统中更新和发展最快的部分。它通过各种控制电路中硬件和软件的结合来操纵机器人，并协调机器人与周边设备的关系，其基本功能如下：

- ▶ 示教功能 包括在线示教和离线示教两种方式。
- ▶ 记忆功能 存储作业顺序、运动路径和方式及与生产工艺有关的信息等。
- ▶ 位置伺服功能 机器人多轴联动、运动控制、速度和加速度控制、动态补偿等。



1.2 控制器

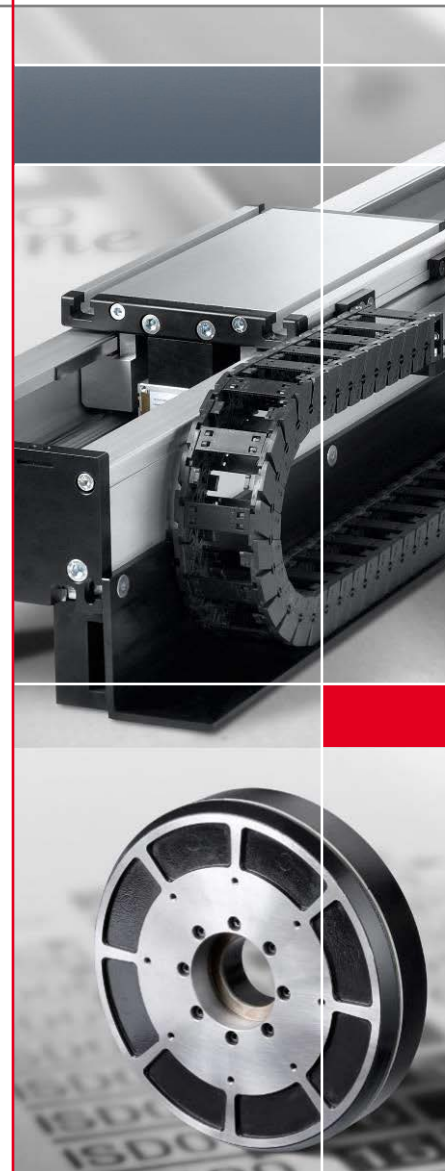
- ▶坐标设定功能 可在关节、直角、工具等常见坐标系之间进行切换。
- ▶与外围设备联系功能 包括输入/输出接口、通信接口、网络接口等。
- ▶传感器接口 位置检测、视觉、触觉、力觉等。
- ▶故障诊断安全保护功能 运行时的状态监视、故障下的安全保护和自诊断。



2.1 控制器

(1) 集中式控制器 利用一台微型计算机实现系统的全部控制功能，早期机器人常采用这种结构。集中式控制器的优点是硬件成本较低，便于信息的采集和分析，易于实现系统的最优控制，整体性与协调性较好，基于PC的系统硬件扩展较为方便。

但其缺点也显而易见：系统控制缺乏灵活性，控制危险容易集中，一旦出现故障，其影响面广，后果严重；由于工业机器人的实时性要求很高，当系统进行大量数据计算时，会降低系统实时性，系统对多任务的响应能力也会与系统的实时性相冲突；此外，系统连线复杂，会降低系统的可靠性。



2.1 控制器

(2) 分布式控制器 其主要思想是“分散控制，集中管理”，即系统对其总体目标和任务可以进行综合协调和分配，并通过子系统的协调工作来完成控制任务，整个系统在功能、逻辑和物理等方面都是分散的。子系统是由控制器和不同被控对象或设备构成的，各个子系统之间通过网络等进行相互通信。分布式控制结构提供了一个开放、实时、精确的机器人控制系统。

分布式系统中常采用两级控制方式，由上位机和下位机组成。上位机负责整个系统管理以及运动学计算、轨迹规划等，下位机由多CPU组成，每个CPU控制一个关节运动。上、下位机通过通信总线（如RS-232、RS-485、CAN总线、以太网等）相互协调工作。分布式控制系统的优点在于系统灵活性好，控制系统的危险性降低，采用多处理器的分散控制，有利于系统功能的并行执行，提高系统的处理效率，缩短响应时间。



1.2 控制器

ABB第五代机器人控制器IRC5就是一个典型的模块化分布设计。是由一个控制模块和一个驱动模块组成，可选增一个过程模块以容纳订制设备和接口如点焊、弧焊和胶合等。配备这三种模块的灵活型控制器完全有能力控制一台6轴机器人外加伺服驱动工件定位器及类似设备。控制模块作为IRC5的心脏，自带主计算机，能够执行高级控制算法，为多达36个伺服轴进行复合路径计算，并且可指挥四个驱动模块。控制模板采用开放式系统架构，配备基于商用Intel主板和处理器的工业PC机以及PCI总线。如需增加机器人的数量，只需为每台新增机器人增装一个驱动模块，还可选择安装一个过程模块。各模块间只需要两根连接电缆，一根为安全信号传输电缆，另一根为以太网连接电缆，供模块间通信使用，模块连接简单易行。由于采用标准组件，用户不必担心设备淘汰问题，随着计算机处理技术的进步能随时进行设备升级。



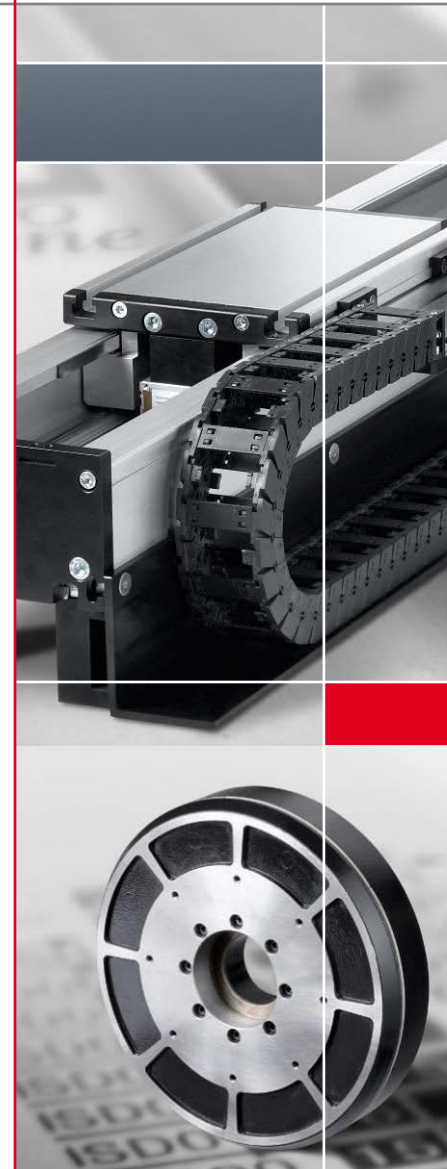
1、工业机器人的系统组成



- (1)、操作机
- (2)、控制器
- (3)、示教器

1.3 示教器

示教器也称示教编程器或示教盒，主要由液晶屏幕和操作按钮组成，可由操作者手持移动。它是机器人的人机交互接口，机器人的所有操作基本上都是通过示教器来完成的，如点动机器人，编写、测试和运行机器人程序，设定、查阅机器人状态设置和位置等。





工业机器人的机械结构和运动控制



- 1、工业机器人的系统组成
- 2、工业机器人的技术指标
- 3、工业机器人的运动控制

2、工业机器人的技术指标

工业机器人的技术指标反映了机器人的适用范围和工作性能，是选择、使用机器人必须考虑的问题。尽管各机器人厂商所提供的技术指标不完全一样，机器人的机构、用途以及用户的要求也不尽相同，但其主要技术指标一般均为：自由度、工作空间、额定负载、最大工作速度和工作精度等。



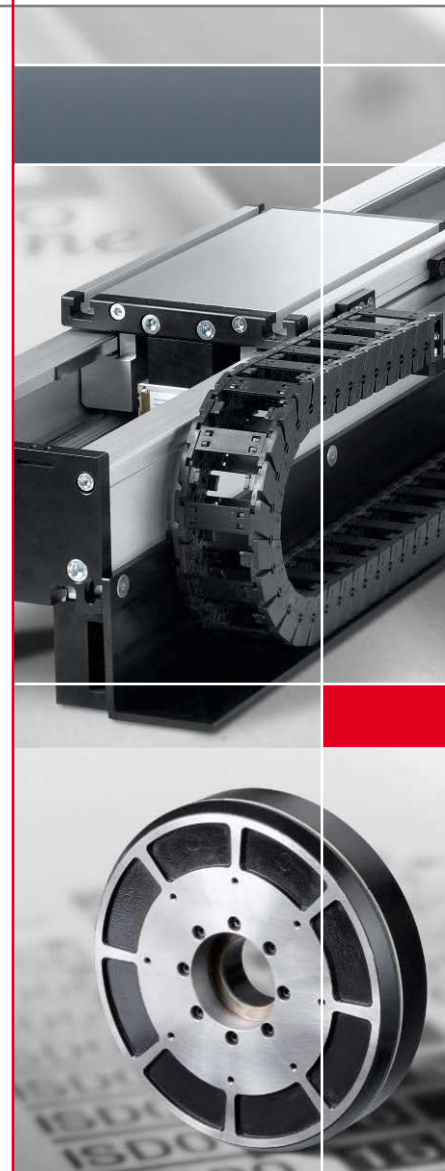
2、工业机器人的技术指标

自由度 物体能够对坐标系进行独立运动的数目，末端执行器的动作不包括在内。通常作为机器人的技术指标，反应机器人动作的灵活性，可用轴的直线移动、摆动或旋转动作的数目来表示。采用空间开链连杆机构的机器人，因每个关节运动副仅有一个自由度，所以机器人的自由度数就等于他的关节数。由于具有六个旋转关节的铰接开链式机器人从运动学上已被证明能以最小的结构尺寸获得最大的动作空间，并且能以较高的位置精度和最优的路径到达指定位置，因而关节机器人在工业领域得到广泛地应用。目前，焊接和涂装作业机器人多为6或7自由度，而搬运、码垛和装配机器人多为4~6自由度。



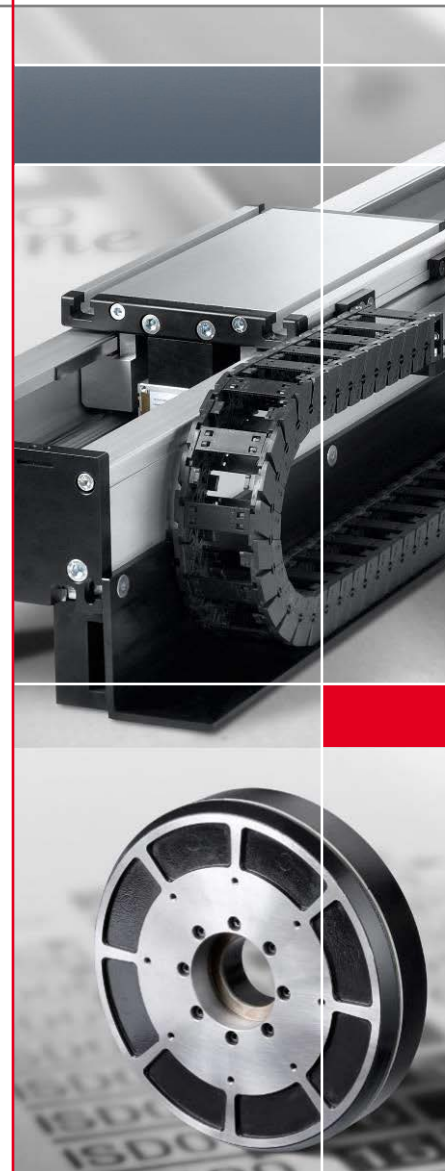
2、工业机器人的技术指标

额定负载 也称持重。正常操作条件下，作用于机器人手腕末端，且不会使机器人性能降低的最大载荷。目前使用的工业机器人负载范围可从0.5kg直至800kg。



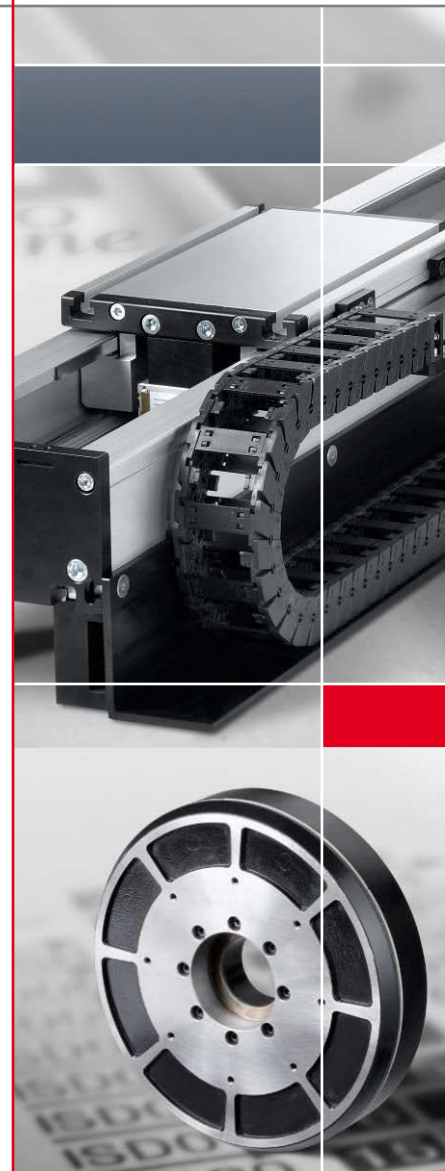
2、工业机器人的技术指标

工作精度 机器人的工作精度主要指定位精度和重复定位精度。定位精度（也称绝对精度）是指机器人末端执行器实际到达位置与目标位置之间的差异。重复定位精度（简称重复精度）是指机器人重复定位其末端执行器于同一目标位置的能力。工业机器人具有绝对精度低，重复精度高的特点。一般而言，工业机器人的绝对精度要比重复精度低一到两个数量级，造成这种情况的主要原因是机器人控制系统根据机器人的运动学模型来确定机器人末端执行器的位置，然而这个理论上的模型和实际机器人的物理模型存在一定的误差，产生误差的因素主要有机器人本身的制造误差、工件加工误差以及机器人与工件的定位误差等。目前，工业机器人的重复精度可达 $\pm 0.01 \sim \pm 0.5\text{mm}$ 。根据作业任务和末端持重的不同，机器人的重复精度亦要求不同。



2、工业机器人的技术指标

工作空间 也称工作范围、工作行程。工业机器人在执行任务时，其手腕参考点所能掠过的空间。由于工作范围的形状和大小反映了机器人工作能力的大小，因而它对于机器人的应用十分重要。工作范围不仅与机器人各连杆的尺寸有关，还与机器人的总体结构有关。为未能真实反映机器人的特征参数，厂家所给出的工作范围一般指不安装末端执行器时可以到达的区域。应特别注意的是，在装上末端执行器后，需要同时保证工具姿态，实际的可达空间会比厂家给出的要小一层，需要认真地用比例作图法或模型法核算一下，以判断是否满足实际需要。目前，单体工业机器人本体的工作半径可达3.5米左右。



2、工业机器人的技术指标

最大工作速度 在各轴联动情况下，机器人手腕中心所能达到的最大线速度。这在生产中是影响生产效率的重要指标。因生产厂家不同而标注不同，一般都会的技术参数中加以说明。很明显，最大工作速度越高，生产效率也就越高；然而，工作速度越高，对机器人最大加速度的要求也就越高。

除上述五项技术指标外，还应注意机器人控制方式、驱动方式、安装方式、存储容量、插补功能、语言转换、自诊断及自保护、安全保障功能等。





工业机器人的机械结构和运动控制



- 1、工业机器人的系统组成
- 2、工业机器人的技术指标
- 3、工业机器人的运动控制

3、工业机器人的运动控制

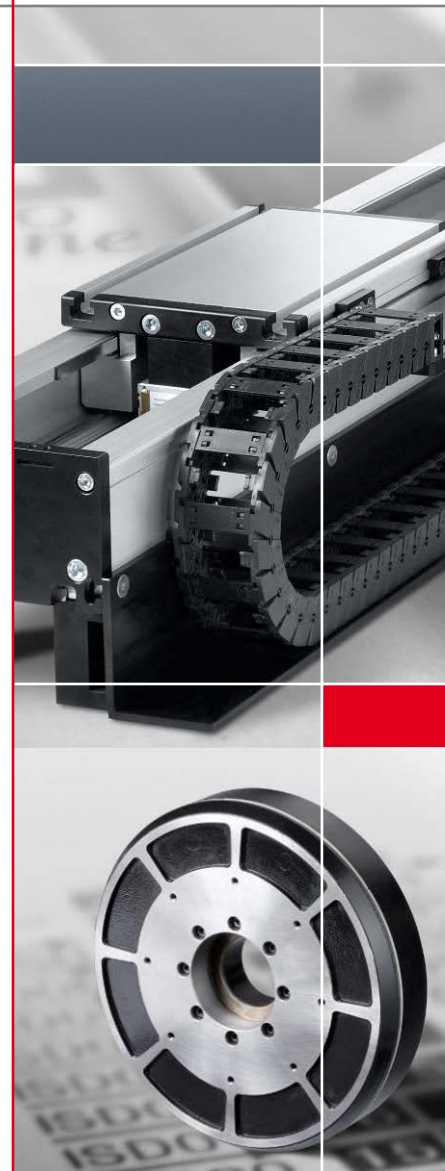
理解了工业机器人的基本组成，那么机器人是怎样运动的？又是如何工作的呢？要弄清这些问题，就需要对机器人的运动控制有一定层次的了解。



3.1、机器人的运动学问题

如前所述，可以将工业机器人操作机看作是一个开链式多连杆机构，始端连杆就是机器人的基座，末端连杆与工具相连，相邻连杆之间用一个关节（轴）连接在一起。对于一个6自由度工业机器人，它由6个连杆和6个关节（轴）组成。编号时，基座称为连杆0，不包含在这6个连杆内，连杆1与基座由关节1相连，连杆2通过关节2与连杆1相连，以此类推。

在操作机器人时，其末端执行器必须处于合适的空间位置和姿态（以下简称位姿），而这些位姿是由机器人若干关节的运动所合成的。可见，要了解工业机器人的运动控制，首先必须知道机器人各关节变量空间和末端执行器位姿之间的关系，即机器人运动学模型。



3.1、机器人的运动学问题

一台机器人操作机几何结构一旦确定，其运动学模型也即确定下来，这是机器人运动控制的基础。简而言之，在机器人运动学中存在两类基本问题：

(1) 运动学正问题 对给定的机器人操作机，已知各关节角矢量，求末端执行器相对于参考坐标系的位姿，称之为正向运动学（运动学正解或Where问题），机器人示教时，机器人控制器即逐点进行运动学正解运算。

(2) 运动学逆问题 对给定的机器人操作机，已知末端执行器在参考坐标系中的初始位姿和目标（期望）位姿，求各关节角矢量，称之为逆向运动学（运动学逆解或How问题）。机器人再现时，机器人控制器即逐点进行运动学逆解运算，并将角矢量分解到操作机各关节。



3.2、机器人的点位运动和连续路径运动

实际上，工业机器人的很多作业实质是控制机器人末端执行器的位姿，以实现点位运动或连续路径运动。

(1) 点位运动 (Point to Point, PTP) 点位运动只关心机器人末端执行器运动的起点和目标点位姿，而不关心这两点之间的运动轨迹。点位运动比较简单，比较容易实现。该运动方式可完成无障碍条件下的点焊、搬运等作业操作。

(2) 连续路径运动 (Continuous Path, CP) 连续路径运动不仅关心机器人末端执行器达到目标点的精度，而且必须保证机器人能沿所期望的轨迹在一定的精度范围内重复运动。该控制方式可完成机器人弧焊、涂装等操作。



3.2、机器人的点位运动和连续路径运动

机器人连续路径运动的实现是以点位运动为基础，通过在相邻两点之间采用满足精度要求的直线或圆弧轨迹插补运算即可实现轨迹的连续化。机器人再现时，主控制器（上位机）从存储器中逐点取出各示教点空间位姿坐标值，通过对其进行直线或圆弧插补运算，生成相应路径规划，然后把各插补点的位姿坐标值，通过对其进行直线或圆弧插补运算生成相应路径规划，然后把各插补点的位姿坐标值通过运动学逆解运算转换成关节角度值，分送机器人各关节或关节控制器（下位机）。由于绝大多数工业机器人是关节式运动形式，很难直接检测机器人末端的运动，只能对各关节进行控制，属于半闭环系统。



3.3、机器人的位置控制

工业机器人控制方式有不同的分类，如按被控对象不同可分为位置控制、速度控制、加速度控制、力控制、力矩控制、力和位置混合控制等，而实现机器人的位置控制是工业机器人的基本控制任务。由于机器人是由多轴（关节）组成的，每轴的运动都将影响机器人末端执行器的位姿。如何协调各轴的运动，使机器人末端执行器完成作业要求的轨迹，是需要解决的问题。关节控制器（下位机）是执行计算机，负责伺服电动机的闭环控制及实现所有关节的动作协调。它在接收主控制器（上位机）送来的各关节下一步期望达到的位姿后，又作一次均匀细分，以使运动轨迹更为平滑。然后将各关节下一细步期望值逐点送给驱动电动机，同时检测光电码盘信号，直至准确到位。

