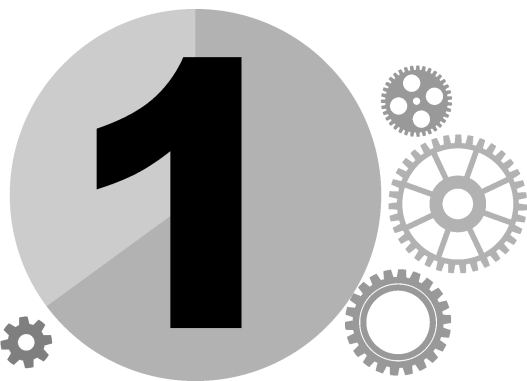


# 项目 工业机器人概论

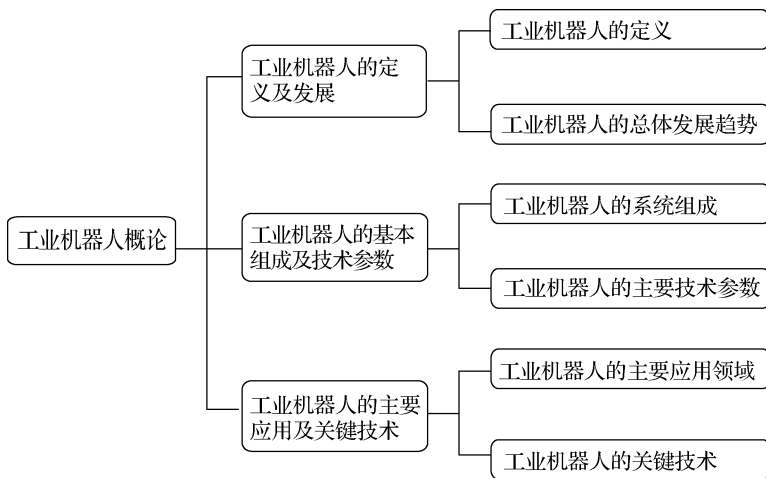


## 学习要求

通过本项目的学习，了解工业机器人的定义、分类、发展现状和趋势；熟悉工业机器人的基本组成、主要技术参数和结构特点；掌握工业机器人的关键技术及各型机器人的适用领域和选型要点；能够根据不同的生产应用和运行节拍要求，以及被操作件的材料、功能和结构特点，选择合适的工业机器人种类和规格型号。



## 知识脉络图





## 任务 1.1 工业机器人的定义及发展

### 1.1.1 工业机器人的定义

工业机器人是机器人家族中技术最成熟、应用最多的一类机器人，国际上尚没有统一的定义。美国工业机器人协会（Robotic Industries Association, RIA）认为工业机器人是一种用来搬运物料、部件、工具或专门装置的可重复编程的多功能操作器，并可采用改变程序的方法来完成各种不同任务。日本工业机器人协会（Japan Industrial Robot Association, JIRA）将工业机器人定义为一种装备有记忆装置和末端执行器，并能够完成各种移动来代替人类劳动的通用机器。德国工程师协会（Verein Deutscher Ingenieure, VDI）定义工业机器人是一种具有多自由度的、能进行各种动作的自动机器，具有执行器、工具及制造用的辅助工具，可以完成材料搬运和制造等操作。国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）将工业机器人定义为一种能自动控制的、可重复编程的、多功能、多自由度的操作机，而且能搬运物料、工件或操持工具完成各种作业。

工业机器人起源于 20 世纪 60 年代，但当时的工业机器人仅能完成上下料这类简单的工作，并进入了一个缓慢的发展期。直到 20 世纪 80 年代，随着汽车工业的蓬勃发展，工业机器人产业才得到快速发展，成为机器人发展的一个里程碑。这一时期开发了点焊、弧焊、喷涂以及搬运等类型的工业机器人，其系列产品不断成熟并形成产业化规模。

20 世纪 80 年代之后，相继开发成功了装配机器人和柔性装配线，装配机器人和柔性装配技术得到了广泛应用，并进入了快速发展时期。目前，工业机器人已发展成为一个庞大的产业，与数字控制、可编程控制器共同成为工业自动化的三大关键技术，被广泛应用于制造业的各个领域。



工业机器人应用展示

### 1.1.2 工业机器人的总体发展趋势

#### 1. 全球工业机器人行业现状和发展趋势

1962 年，美国推出 Unimate 型和 Versatran 型工业机器人之后，工业机器人在发达国家得到了迅速发展。在 1970—1980 年的十年间，美国工业机器人台数增加了 20 倍以上，尽管在数量上还不如日本，但其技术水平较高。1998 年，美国拥有 8 万多台工业机器人，德国则有 7 万多台，分别占世界工业机器人总数的 15% 和 13% 左右，排名世界第 2 位和第 3 位。韩国的工业机器人产业发展迅速，排名世界第 5 位。日本、韩国和新加坡的制造业中每万名雇员拥有的工业机器人数量位居世界前 3 名。西欧的意大利、法国、英国和东欧的匈牙利、波兰以及北美的加拿大等国家的工业机器人制造及应用情况也都有很大发展。

2008 年全球金融风暴导致工业机器人的销量急剧下滑，2010 年全球工业机器人市场逐步从 2009 年的谷底恢复。2011 年是全球工业机器人市场的行业顶峰，全年销量达 16.6 万台。2012 年全球工业机器人销量为 15.9 万台，略有回落。随着全球制造业产能自动化水平提升，特别是中国制造业的升级，

2017年全球工业机器人销量达34.6万台，中国销量占比39.3%以上，年复合增长率17.6%，预计至2020年将达52.1万台。

2012年全球机器人本体市场容量为530亿元，本体加集成的市场容量通常按本体的3倍左右估算，工业机器人集成的市场总容量将达1600亿元。据不完全统计，2013—2017年间，包含本体和集成在内的全球工业机器人市场，年复合增长率约为11%，2017年全球工业机器人销量达380550台，2018年由于中国汽车行业的工业机器人用量暴跌25%，全球销量仅比2017年增长1%，约为38.4万台。

全球工业机器人本体市场以日本、美国、德国、韩国和中国5个国家为主，工业机器人存量占全球的比例达71.24%，销量达69.92%。在全球工业机器人本体市场，瑞典ABB、德国KUKA、日本FANUC和安川等机器人龙头企业的年销售收入占全球的比例超过50%。在工业机器人系统集成方面，除了机器人本体企业的集成业务，知名的独立系统集成商还有德国杜尔（DURR）、徕斯（REIS）和意大利柯马（COMAN）等。

## 2. 中国工业机器人行业现状和发展趋势

中国工业机器人起步于20世纪70年代初期，20世纪80年代中期国家组织的对工业机器人需求的行业调研表明，对第一代工业机器人的需求主要集中在汽车行业，占总需求的60%~70%。“七五”期间，国家投入大量资金进行了工业机器人基础技术、基础元器件、几类工业机器人整机及应用工程的研究。中国完成了示教再现式工业机器人的机械手、控制系统、驱动转动单元、测试系统的设计、制造和应用的成套技术，以及小批量生产的工艺技术的开发，研制出了喷漆、弧焊、点焊和搬运等作业机器人整机。一些专用和通用控制系统，关键元器件、零部件的主要性能指标达到了20世纪80年代初期国外同类产品的水平，并形成了小批量生产能力。

20世纪90年代中期，中国选择焊接机器人的工程应用为重点进行开发研究，从而迅速掌握焊接机器人成套开发、关键设备制造、工程配套、现场运行等技术。20世纪90年代后半期是实现国产机器人的商品化、为产业化奠定基础的时期。

2018—2019年中国工业机器人产量年增速达到25%左右。3C消费电子需求占比明显提高，预计近两年将代替汽车成为工业机器人销量第一大领域。在工业机器人领域，中国总体上是净进口国，依赖进口国际高端品牌以满足国内市场需求。国内工业机器人企业在上游核心零部件、中游本体及下游集成应用等方向正多点寻求突破，专业化的集成应用领域有望成为突破口。

从工业机器人密度看，中国约为49台/万人，不仅低于世界平均水平69台/万人，而且与发达国家的600台/万人以上的密度相比差距更大，全球机器人应用大国的汽车行业的机器人密度普遍高于1000台/万人。



## 任务 1.2

## 工业机器人的基本组成及技术参数

## 1.2.1 工业机器人的系统组成

工业机器人由工业机器人本体、工业机器人驱动系统、工业机器人控制系统、工业机器人感受系统、人机交互系统和机器人-环境交互系统六大部分组成。感受系统是指机器人中所用的各类传感器，后有独立任务阐述，故此处不做赘述。机器人-环境交互系统不是所有工业机器人都配备的系统，故此处不做赘述。工业机器人本体一般包括机座和执行机构，部分工业机器人还有行走机构，执行机构通常分为臂部、腕部和手部。工业机器人驱动系统由动力源、驱动器和传动装置组成，用以驱动执行机构产生相应的动作。工业机器人控制系统根据动作要求向工业机器人驱动系统发出指令信号，驱动执行机构运行。

(1) 工业机器人按运动形式分为直角、圆柱、球和关节四种坐标类型，其中关节坐标型又分为空间关节型和平面关节型，如图 1-1 所示。直角坐标型机器人臂部沿三个直角坐标移动；圆柱坐标型机器人臂部可做升降、回转和伸缩等动作；球坐标型机器人的臂部能回转、俯仰和伸缩；关节型机器人臂部可绕多个关节转动。

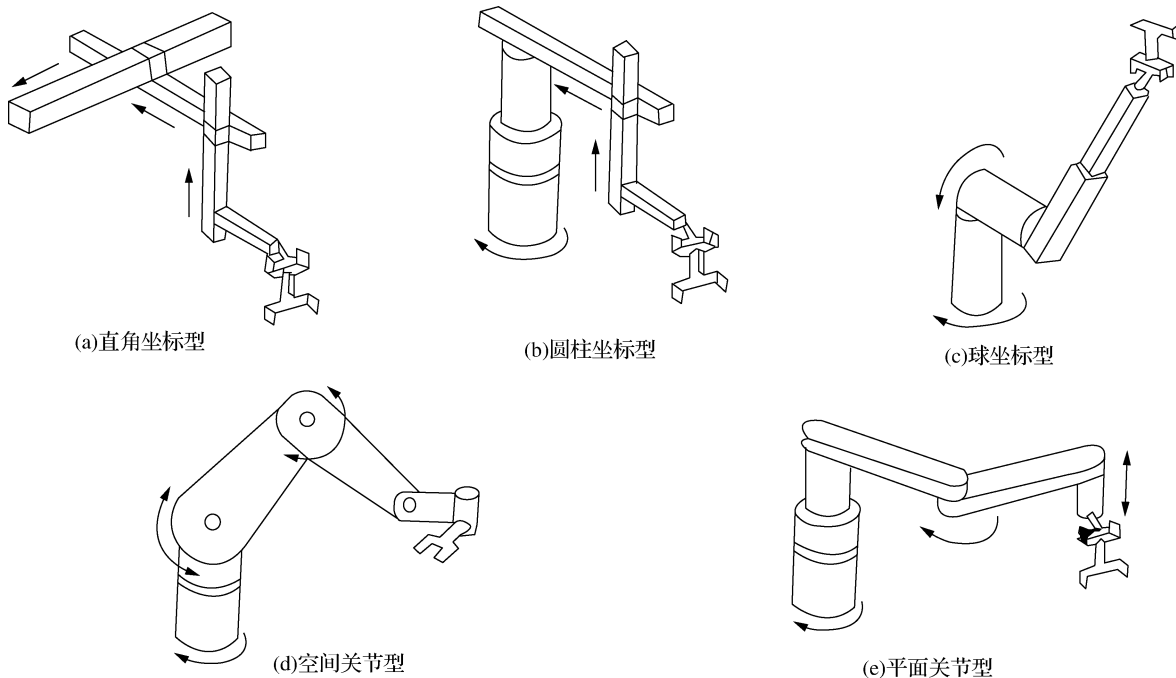


图 1-1 机器人的坐标分类

(2) 工业机器人按控制机能分为点位控制型和连续轨迹型两类。点位控制型机器人只控制执行机构由一点到另一点的准确定位，适用于机床上下料、点焊和一般搬运、装卸等作业；连续轨迹型机器人可

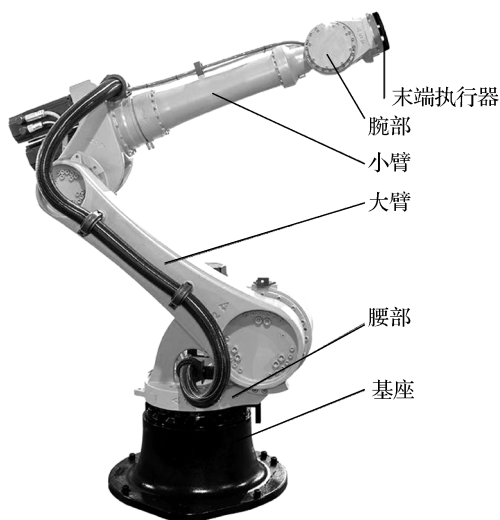
控制执行机构按给定轨迹运动，适用于连续焊接和涂装等作业。

(3) 工业机器人按程序输入方式分为编程输入型和示教输入型两类。编程输入型是将计算机上已编好的作业程序文件，通过 RS232 串口或者以太网等通信方式传给机器人控制系统。示教输入型有两种示教方法：一种是由操作者通过手动示教盒将指令信号传给驱动系统，使执行机构按要求的动作顺序和运动轨迹运行；另一种是由操作者直接移动执行机构，按照规定的动作顺序和运动轨迹运行。在示教过程的同时，工作过程和位姿信息自动存入程序存储器中。在机器人自动运行时，控制系统从程序存储器中调出相应的信息，将指令信号传给驱动机构，使执行机构再现示教的各种动作。示教输入程序的工业机器人称为示教再现型工业机器人。

具有触觉、力觉、简单视觉的工业机器人能在较为复杂的环境下工作，具有识别功能或更进一步地增加自适应、自学习功能，即称为智能型工业机器人。这种机器人能够按照给定的“宏指令”自选或自编程序去适应环境，自动完成更为复杂的工作。

### 1. 工业机器人本体

工业机器人有四轴、五轴和六轴，以及并联结构等形式。常用的关节型工业机器人本体一般由基座、腰部、大臂、小臂、腕部、末端执行器和驱动系统组成，如图 1-2 所示。依次有腰部回转、大臂俯仰、小臂俯仰、手腕回转、手腕俯仰、手腕侧摆等运动。



KUKA 机器人本体组成

图 1-2 关节型工业机器人本体组成

(1) 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。

(2) 腰部是机器人手臂的支撑部分，腰部回转部件包括腰部支架、回转轴、支架、减速器、制动器和驱动电机等。

(3) 大臂、小臂及其减速器、传动部件、传动轴等零部件主要控制机器人的位置及运动范围，在小臂前端固定驱动手腕运动的驱动电机。

(4) 腕部包括手腕壳体、传动齿轮和传动轴、机械接口等，主要控制机器人的姿态。末端执行器安装在机器人腕部，根据抓取物体的形状、材质等选择合理的结构。



## 2. 工业机器人驱动系统

为驱动机器人运行在各个关节处安装的动力源和传动装置就是工业机器人驱动系统。动力源常用液压、气动装置或电机承担，也可以是几种动力类型相结合的综合系统，传动形式可以采用直接驱动或通过同步带、链条、轮系、谐波齿轮等传动机构进行间接驱动。

工业机器人广泛采用的机械传动部件是减速器，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。机器人常用RV减速器和谐波减速器。RV减速器一般用在腰关节、肩关节和肘关节等重载位置，而谐波减速器常用于三个手腕关节等轻载位置。

谐波减速器由固定的刚性内齿轮、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三个基本构件组成。波发生器转动时迫使柔轮的截面由原来的圆形变为椭圆形，其长轴两端附近的齿与刚性轮上的齿完全啮合，而短轴两端附近的齿则与刚性轮完全脱开，周长上其他区段的齿则处于啮合和脱离的过渡状态，如图1-3所示。

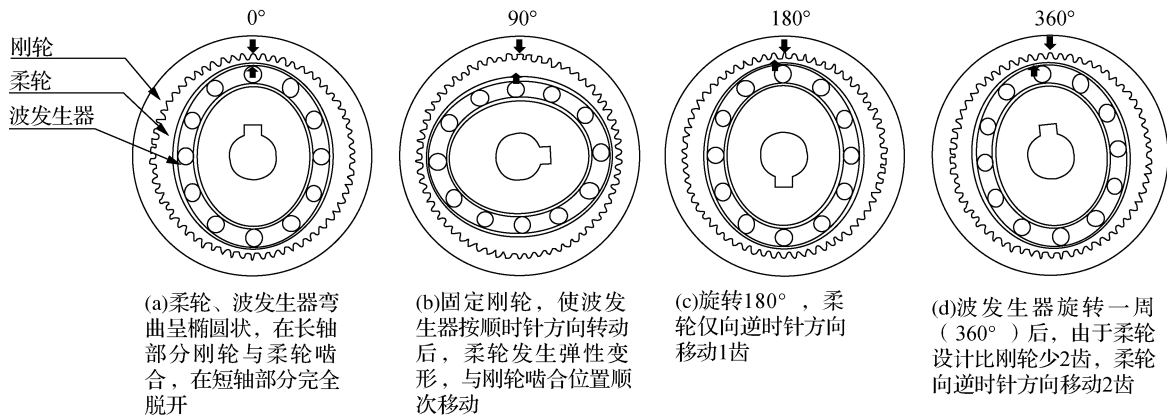


图 1-3 谐波减速器传动原理

RV减速器是一种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组成的封闭差动轮系。与谐波减速器相比，RV减速器具有较高的疲劳强度、刚度及较长的寿命，回转精度稳定；谐波传动会随着使用时间的增长，运动精度将显著降低。一般高精度机器人传动大多采用RV减速器，并有逐渐取代谐波减速器的趋势。

工业机器人常用交流伺服电机驱动，在其额定转速以内都能输出额定转矩，在额定转速以外则为恒功率输出。交流伺服电机具有较强的速度过载和转矩过载能力，其最大转矩可达额定转矩的三倍，可用于克服惯性负载在启动瞬间的惯性力矩。

## 3. 工业机器人控制系统

工业机器人控制系统是通过指令和传感信息控制机器人完成一定动作或作业任务的装置，由硬件和软件两部分组成。硬件主要有传感装置、控制装置及关节伺服驱动器，软件包括运动轨迹规划算法和关节伺服控制算法及相应的工作程序。传感装置分为内部传感器和外部传感器，内部传感器主要用于检测工业机器人内部的各关节的位置、速度和加速度等，而外部传感器是可以使工业机器人感知工作环境和对象状态的视觉、力觉、触觉、听觉、滑觉、接近觉、温度觉等传感器。控制装置用于处理各种感觉信息、执行控制软件和产生控制指令。关节伺服驱动器主要根据控制装置的指令，按作业任务的要求

驱动各关节运动。

工业机器人控制系统的主要任务就是控制工业机器人在工作空间中的运动位置、姿态和轨迹、操作顺序及动作的时间等，应具有以下基本功能：

- (1) 示教功能：包括在线和离线两种示教功能。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 传感器接口：位置检测、视觉、触觉、力觉等。
- (5) 故障诊断安全保护功能：运行时的状态监视，故障状态下的安全保护和自诊断。

根据计算机结构、控制方式和控制算法的处理方法，机器人控制系统分为集中式控制、主从式控制和分布式控制三类。

(1) 集中式控制：使用一台微型计算机实现系统的全部控制功能。其优点是硬件成本较低，便于信息采集和分析，易于实现系统的最优控制，整体性与协调性较好，基于 PC 的硬件扩展方便。其缺点是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要求相冲突；系统连线复杂，降低了系统的可靠性。

(2) 主从式控制：使用主、从两级处理器实现系统的全部控制功能。主 CPU 实现管理、坐标变换、轨迹生成和系统自诊断等；从 CPU 实现所有关节的动作控制。主从式控制系统实时性较好，适用于高精度、高速度控制，但其系统扩展性较差，维修困难。

(3) 分布式控制：常采用由上位机和下位机组成的两级控制方式。上位机（机器人主控制器）负责整个系统管理及运动学计算、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相互协调工作，通信总线可以是 RS-232、RS-485、IEEE-488 以及 USB 总线等形式，以太网和现场总线技术是更快速、稳定、有效的通信形式。

对于具有多自由度的工业机器人而言，集中式控制系统能很好地处理各个控制轴之间的耦合关系，可以方便地进行补偿，但当轴的数量增加到使控制算法变得很复杂时，其控制性能会恶化，可能会导致系统需要重新设计。分布式控制系统结构的每一个运动轴都由一个控制器处理，其有较少的轴间耦合和较高的系统重构性。

#### 4. 人机交互系统

人机交互系统的种类和形式多样，下面以常见的示教编程器（简称示教器）为例来介绍。示教器也称编程器或示教盒，主要由屏幕和操作按键组成，由操作者手持操作。它是机器人的人机交互接口，机器人的所有操作基本都是通过示教器完成的，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。

示教器是工业机器人控制系统的主要组成部分，其设计与研究均由各厂家自行完成。市场占有率高的著名品牌主要有德国的 KUKA Roboter，瑞典的 ABB Robotics，日本的 FANUC、Yaskawa 四大家族；以及日本川崎重工、OTC，德国 CLOOS、REISKUKA，美国 Adept Technology、American Robot、Emerson Industrial Automation、S-T Robotics、Miler，意大利 COMAU，英国 Auto-Tech Robotics，加拿大 Jcd International Robotics，以色列 Robogroup Tek，奥地利 IGM 等公司。

#### 5. 工业机器人的运动轨迹与位置控制

工业机器人的作业实质是控制机器人末端执行器的位置和姿态，以实现点位运动或连续轨迹运动。



(1) 点位运动 (PTP): 只关心机器人末端执行器运动的起始点和目标点的位置和姿态, 而不关心这两点之间的运动轨迹。

(2) 连续轨迹运动 (CP): 不仅关注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规划的轨迹在一定精度范围内重复运动。机器人连续轨迹运动的实现以点位运动为基础, 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来实现轨迹的连续化。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机器人运动学逆向运算换成关节角度值, 分别送至机器人各关节或关节控制器, 从而实现连续轨迹运动。

## 1.2.2 工业机器人的主要技术参数

表示机器人特性的基本参数和性能指标, 主要有工作空间、自由度、有效负载、运动精度、运动特性和动态特性等。它们反映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。

### 1. 工作空间

工作空间是指机器人臂杆的特定部位在一定条件下所能到达空间的位置集合。工作空间的形状和大小反映了机器人工作能力的大小。在选择机器人的工作空间时, 应注意以下几点:

(1) 工业机器人说明书中表示的工作空间是指手腕上机械接口坐标系的原点在空间上所能到达的范围, 即手腕端部法兰的中心点在空间所能达到的范围, 而不是末端执行器端点所能达到的范围。因此, 在设计和选用时, 要注意安装末端执行器。

(2) 工业机器人说明书上提供的工作空间往往要小于运动学意义上的最大空间。在可达空间中, 手臂位姿不同时, 有效负载、允许达到的最大速度和最大加速度都不一样, 臂杆的最大位置允许的极限值通常要比其他位置的极限值小。此外, 在机器人的最大可达空间边界上可能存在自由度退化的问题, 此时的位姿称为奇异位形, 而且在奇异位形周围相当大的范围内都会出现自由度变化现象, 这部分工作空间在机器人工作时是不能被利用的。

(3) 实际应用中的工业机器人还可能由于受到机械结构的限制, 在工作空间的内部存在臂端不能达到的区域, 这就是常说的空洞或空腔。空洞是指在沿转轴周围全长上臂端都不能达到的空间, 而空腔是指在工作空间内臂端不能达到的完全封闭空间。

### 2. 自由度

自由度是表示机器人动作灵活程度的参数, 即工业机器人在空间运动所需的变量数, 一般以沿轴线移动和绕轴线转动的独立运动的数目来表示。

自由物体在空间有 3 个转动自由度和 3 个移动自由度, 而工业机器人通常是连杆系, 每个关节运动副只有 1 个自由度, 因此, 机器人的自由度数就等于其关节数。机器人的自由度数目越多, 功能就越强。工业机器人通常具有 4~6 个自由度。当机器人的关节数 (自由度) 增加到对末端执行器的定向和定位不再起作用时, 便出现了冗余自由度 (简称“冗余度”)。冗余度的出现增加了机器人工作的灵活性, 但也使控制变得更加复杂。

工业机器人按运动方式分为直线运动 (P) 和旋转运动 (R) 两种, 通常应用简记符号 P 和 R 表示运动自由度的特点, 如 RPRR 表示机器人操作机具有 4 个自由度, 从基座开始到臂端, 关节运动的方式

依次为旋转、直线、旋转和旋转。

### 3. 有效负载

有效负载是指机器人在工作时臂端可能搬运的物体重量或所能承受的力或力矩，用来表示其负荷能力。机器人在不同位姿时，允许的最大可搬运质量是不同的；机器人的额定可搬运质量是指其臂杆在工作空间中任意位姿时，腕关节端部都能搬运的最大质量。

### 4. 运动精度

机器人运动精度包括位姿精度、重复位姿精度、轨迹精度和重复轨迹精度。位姿精度和轨迹精度称为定位精度；重复位姿精度和重复轨迹精度称为重复定位精度。

(1) 定位精度又称绝对定位精度，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。位姿精度是指指令位姿从同一方向接近该指令位姿时实际到达位姿中心之间的偏差。轨迹精度是指机器人机械接口从同一方向多次跟随指令轨迹的接近程度。

(2) 重复定位精度是指机器人重复到达某一目标位置的差异程度；或在相同的位置指令下，机器人连续重复若干次其位置的分散情况。重复位姿精度是指对同指令位姿从同一方向重复响应多次后实际到达位姿的不一致程度。重复轨迹精度是指对同一给定轨迹在同一方向跟随多次后实际到达轨迹之间的不一致程度。

一般而言，工业机器人的绝对定位精度要比重复定位精度低一到两个数量级。其原因是使用机器人的运动学模型来确定机器人末端执行器的位置时，未考虑机器人本体的制造误差、工件加工误差及工件定位误差的情况。

### 5. 运动特性

运动特性包括速度和加速度，是表明机器人运动特性的主要指标。在工业机器人说明书中，通常提供了主要运动自由度的最大稳定速度，但在实际应用中单纯考虑最大稳定速度往往是不够的，还应注意其最大允许加速度。例如，说明书中没有指明最大稳定速度的自由度，则是指在各关节联动的情况下，机器人手腕中心所能达到的最大线速度。工业机器人的最大工作速度越高，生产效率就越高。

### 6. 动态特性

动态特性参数主要包括质量、惯性矩、刚度、阻尼系数、固有频率和振动模态。

工业机器人应尽量减小质量和惯量。如果工业机器人的刚度比较差，其位姿精度和系统固有频率将下降，从而导致系统动态不稳定；但对于装配操作等类型的作业，适当地增加柔顺性是有利的，最理想的情况是机器人臂杆的刚度可调。增加系统的阻尼系数对于缩短振荡的衰减时间、提高系统的动态稳定性是有利的。提高系统的固有频率，避开工作频率范围，也有利于提高系统的稳定性。



## 任务 1.3

## 工业机器人的主要应用领域及关键技术

## 1.3.1 工业机器人的主要应用领域

工业机器人最显著的特点可归纳为可编程、拟人化、通用性和机电一体化。

(1) 可编程。工业机器人可随其工作环境变化的需要进行再编程，在小批量、多品种、具有均衡高效率的柔性制造过程中能够发挥很好的功用，是实现智能制造的重要保障。

(2) 拟人化。工业机器人在机械结构上有类似人类的行走、腰转、大臂、小臂、手腕、手爪等部分，智能化工业机器人还有许多类似人类的触觉、力觉、视觉、声觉和语言功能等“生物传感器”，生物传感器提高了工业机器人对周围环境的自适应能力。

(3) 通用性。除专用工业机器人外，一般工业机器人在执行不同的作业任务时具有较好的通用性，更换工业机器人末端操作器（手爪、工具等），便可执行不同的作业任务。

(4) 机电一体化。工业机器人技术涉及的学科相当广泛，但主要是机械学和微电子学结合的机电一体化技术。第三代智能机器人不仅具有获取外部环境信息的各种传感器，而且具有记忆能力、语言理解能力、图像识别能力和推理判断能力等人工智能。

工业机器人及成套设备因具备以上特点被广泛应用于各个领域，如汽车及汽车零部件制造业、机械加工行业、电子电气行业、橡胶及塑料工业、食品工业、木材与家具制造业等领域，见表 1-1。在工业生产中，弧焊机器人、点焊机器人、装配机器人、喷漆机器人及搬运机器人等工业机器人都已被大量采用。

表 1-1 工业机器人的应用领域

行业领域	具体应用
汽车及零部件	弧焊、点焊、搬运、装配、冲压、喷涂、切割（激光、离子）等
电子电气	搬运、洁净装配、自动传输、打磨、真空封装、检测、拾取等
化工纺织	搬运、包装、码垛、称重、切割、检测、上下料等
机械加工	工件搬运、装配、检测、焊接、去毛刺、研磨、切割（激光、离子）、包装、码垛、自动传送等
电力核电	布线、高压检查、核反应堆检修、拆卸等
食品饮料	包装、搬运、真空包装等
橡胶塑料	上下料、去毛边等
钢铁冶金	搬运、码垛、去毛刺、浇口切割等
家具家电	装配、搬运、打磨、抛光、喷漆、切割、雕刻等
海洋勘探	深水勘探、海底维修、建造等
航空航天	空间站检修、飞行器修复、资料收集等
军事	防爆、排雷、兵器搬运、放射性检测等

目前，工业机器人的应用领域非常广泛，机器人搬运、机器人焊接、机器人装配、机器人喷涂和机械加工五大领域是工业机器人及集成系统的主要应用，占总体应用的80%以上。

### 1. 机器人搬运（38%）

随着计算机集成制造技术、物流技术、自动仓储技术的发展，搬运机器人在现代制造业中的应用也越来越广泛。机器人可用于生产加工过程中的物料、工装、辅具、量具的装卸和储运，完成将产品从一个输送装置送到另一个输送装置，或从一台机床上将加工完的零件取下，再安装到另一台机床上去等作业任务。

搬运仍然是工业机器人的第一大应用领域，占机器人应用整体的40%左右。许多自动化生产线需要使用机器人进行上下料、搬运及码垛等操作。近年来，随着协作机器人的兴起，搬运机器人的市场份额呈增长态势。

### 2. 机器人焊接（29%）

焊接机器人是从事焊接工作的工业机器人，分为点焊机器人和弧焊机器人两类。

(1) 点焊机器人的焊钳常采用电伺服驱动，焊钳的张开和闭合由伺服电机驱动，码盘反馈，使焊钳的张开度可以根据实际需要任意选定并预置，电极间的压紧力也可以无级调节。

(2) 弧焊机器人多采用MAG/MIG、TIG气体保护焊等方法，晶闸管式、逆变式、波形控制式、脉冲或非脉冲式等的焊接电源都可以安装到机器人上进行弧焊作业。

机器人控制柜采用数字控制，而焊接电源多为模拟控制，所以在焊接电源与控制柜之间有一个接口。近年来，国外机器人生产厂都有自己特定的配套焊接设备，在这些焊接设备内已经插入相应的接口板，所以弧焊机器人系统中并没有附加接口箱。

机器人焊接主要包括汽车行业使用的点焊和弧焊，虽然点焊机器人比弧焊机器人应用得更早，占有率更高，但是弧焊机器人近年来发展迅猛，许多加工车间都逐步引入焊接机器人，用来实现自动化焊接作业。

### 3. 机器人装配（10%）

装配机器人主要从事零部件的安装、拆卸及修复等工作。装配工作在现代工业生产中占有十分重要的地位，装配劳动量占产品生产劳动量的50%~60%，在电子器件厂的芯片装配、电路板的生产中，装配劳动量占产品生产劳动量的70%~80%。因此，用机器人来实现装配作业自动化显得十分重要。

### 4. 机器人喷涂（4%）

喷涂机器人主要从事点胶、涂装和喷漆等工作。喷涂机器人被广泛应用于汽车车体、家电产品和各种塑料制品的喷涂作业，大约有4%的工业机器人从事喷涂的应用。

### 5. 机械加工（2%）

机械加工行业的机器人应用量并不高，只占2%，主要原因是现有多种自动化设备可以胜任机械加工的任务。机械加工机器人主要从事应用的领域包括零件铸造、激光切割和水射流切割。

## 1.3.2 工业机器人的关键技术

具有编程简单、软件菜单操作、友好的人机交互界面、在线操作提示和使用方便等特点的控制系统



是工业机器人设计开发的关键技术。

### 1. 焊接用机器人

焊接用机器人大多是采用电驱动的六轴关节式机器人，其中 1、2、3 轴的协调运动是把焊枪（钳）送到指定的空间位置，而 4、5、6 轴的协调运动是解决焊枪（钳）的姿态问题，如图 1-4 所示。

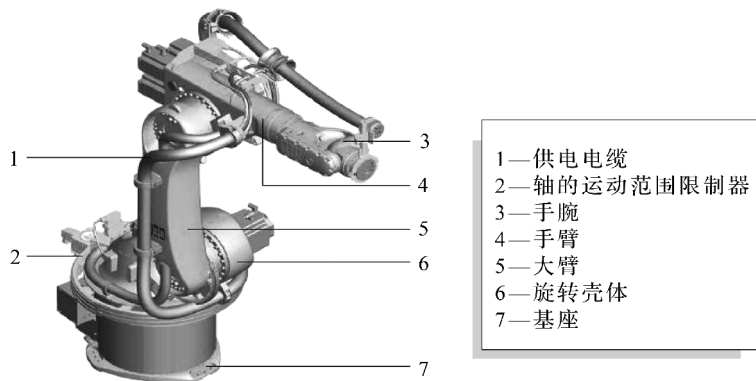


图 1-4 六轴关节式机器人

六轴关节式机器人本体结构一般有两种形式：侧置结构式和平行四边形结构式。侧置结构式机器人的上、下臂活动范围较大，腰部轴无需转动就可以将焊枪（钳）从前下部位置经顶部运动到机器人的后下部，配合腰部轴转动，最大工作空间将接近球面。侧置结构式机器人适合于倒置安装，可增加工作范围，减少占地面积，方便地面的物流。但是，侧置结构式机器人的大、小臂轴为悬臂结构，刚度稍低些，负载能力相对较小，适用于弧焊、切割或激光焊割等。平行四边形结构式和侧置结构式机器人分别如图 1-5、图 1-6 所示。



图 1-5 平行四边形结构式机器人



图 1-6 侧置结构式机器人

点焊和搬运机器人（负载 20~150 kg）一般都采用平行四边形结构。弧焊机器人负载能力都在 3~16 kg 范围，两种形式的机器人都可以选用。目前，更多工厂采用弧焊机器人倒挂安装方式，因而选用侧置结构式机器人逐渐增多。为了适应市场需求的变化趋势，一些原来只生产平行四边形结构式机器人

的公司，现在也开始生产侧置结构式机器人。

焊接机器人的关键技术包括以下三种：

(1) 弧焊机器人系统优化集成技术：弧焊机器人采用交流伺服驱动技术及高精度、高刚性的RV减速机和谐波减速器，具有良好的低速稳定性和高速动态响应，并可实现免维护功能。

(2) 协调控制技术：控制多机器人及变位机的协调运动，既能保持焊枪（钳）和工件的相对姿态以满足焊接工艺的要求，又能避免焊枪（钳）和工件的碰撞。

(3) 精确焊缝轨迹跟踪技术：结合激光传感器和视觉传感器离线工作方式的优点，采用激光传感器实现焊接过程中的焊缝跟踪，提升焊接机器人对复杂工件进行焊接的柔性和适应性，结合视觉传感器离线观察获得焊缝跟踪的残余偏差，基于偏差统计获得补偿数据并进行机器人运动轨迹的修正，在各种工况下都能获得最佳的焊接质量。

## 2. 激光加工机器人

机器人激光加工是将机器人技术应用于激光加工中，通过高精度工业机器人实现更加柔性的激光加工作业。激光加工机器人通过示教盒进行在线操作，也可通过离线方式进行编程。该类机器人通过对加工工件的自动检测，产生加工件的模型，继而生成加工曲线，也可以利用CAD数据直接加工。激光加工机器人可用于工件的激光表面处理、打孔、焊接和模具修复等。

激光焊接具有焊缝的深宽比大、热影响区窄、焊接速度快、焊接线能量低、焊接变形小、聚焦后的光斑直径小（0.2~0.6 mm）和能量密度高（ $10^6 \text{ W/cm}^2$ ）等特点，但是对焊接接头装配精度和间隙要求高，焊缝易出现咬边、气孔和裂缝等缺陷，设备投资大，能量转换效率低。常规熔化极电弧焊的焊接速度慢、焊接线能量大、熔深小、热影响区大、焊接变形大，但是设备投资小，对间隙不敏感，能填充金属。因此，近年来激光焊接的发展趋势之一就是采用激光+电弧的联合焊接方法，将激光和电弧两种热源的优点集中起来，弥补单热源焊接工艺的不足，如图1-7所示。

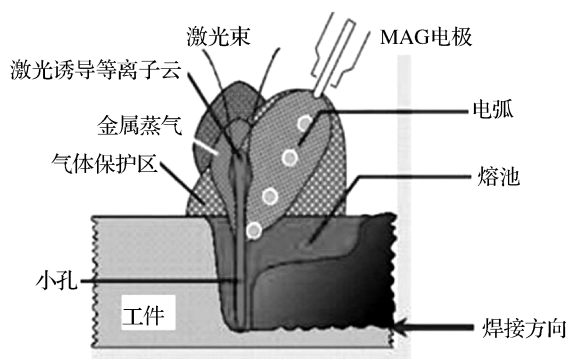


图 1-7 激光+电弧复合热源焊接示意图

激光加工机器人的关键技术包括以下几种：

(1) 激光加工机器人结构优化设计技术：采用大范围框架式本体结构，在增大作业范围的同时，保证机器人精度。

(2) 机器人系统的误差补偿技术：针对一体化加工机器人工作空间大、精度高等要求，结合其结构特点，采取非模型方法与基于模型方法相结合的混合机器人补偿方法，可以完成几何参数误差和非几何参数误差的补偿。



(3) 高精度机器人检测技术：将三坐标测量技术和机器人技术相结合，实现机器人高精度在线测量。

(4) 激光加工机器人专用语言实现技术：根据激光加工及机器人作业特点，完成激光加工机器人专用语言。

(5) 网络通信和离线编程技术：具有串口、CAN 等网络通信功能，实现对机器人生产线的监控和管理，并实现上位机对机器人的离线编程控制。



### 思考与练习

---

1. 简述工业机器人类型选择的一般过程。
2. 工业机器人本体由哪几部分组成？各部分是如何进行连接的？
3. 试绘出三种常用工业机器人控制系统的结构框架。
4. 工业机器人立式安装和倒挂安装各有何优缺点？
5. 关节式工业机器人相比于其他类型机器人的运动有何特点？
6. 什么是机器人示教器？示教器的形式与本质是什么？
7. 工业机器人在线编程和离线编程各有何优缺点？