

工业机器人的机械系统结构是指其机体结构和机械传动系统,也是机器人的支撑基础和执行机构。本章主要介绍工业机器人本体主要组成部分的特点和结构形式,包括机器人的系统构成、执行系统、关节形式、传动机构等,同时对工业机器人的结构设计过程、零部件加工以及机械系统维护等方面进行说明。

本体是工业机器人的重要组成部分,所有的计算、分析、控制和编程最终要通过本体的运动和动作完成特定的任务。同时,机器人本体各部分的基本结构、材料的选择将直接影响机器人整体性能。为此,本章亦对工业机器人的机构优化、系统性能指标及其检测方法进行介绍。

### 3.1 工业机器人的系统构成

组成工业机器人的连杆和关节按功能可以分成两类:一类是组成手臂的长连杆,也称臂杆,其产生主运动,是机器人的位置机构;另一类是组成手腕的短连杆,它实际上是一组位于臂杆端部的关节组,是机器人的姿态机构,确定了手部执行器在空间的方向。

#### 3.1.1 工业机器人系统构成

工业机器人一般包括 5 部分:执行系统、驱动系统、控制系统、传感系统和输入输出系统,如图 3-1 所示。

##### 1. 执行系统

执行系统是工业机器人完成握取工具(或工件)实现所需各种运动的机构部件,是机器人完成工作任务的实体,通常由杆件和关节构成。基于工业机器人的功能,执行机构包括手部、腕部、臂部、腰部和基座等,如图 3-2 所示。

##### 2. 驱动系统

工业机器人驱动系统是向执行系统的各个运动部件提供动力的装置。按照采用的动力源不同,驱动系统分为液压式、气压式、电气式。液压驱动的特点是驱动力大,运动平稳,但泄漏是不可忽视的,同时也是难以解决的问题;气压驱动的特点是气源方便,维修简单,易于获得高速,但驱动力小,速度不易控制,噪声大,冲击大;电气驱动的特点是电源方便,信号传递运算容易,响应快。

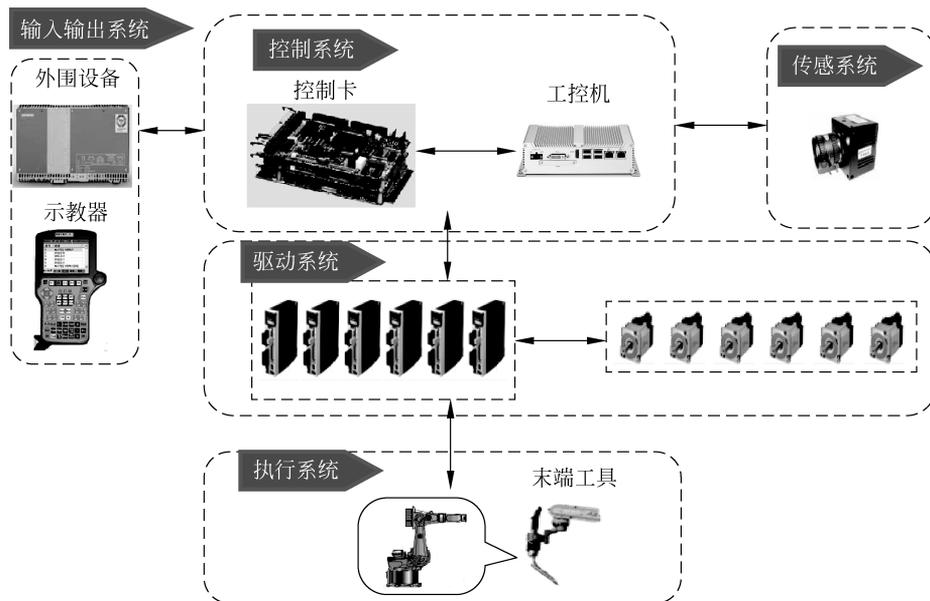


图 3-1 工业机器人系统结构

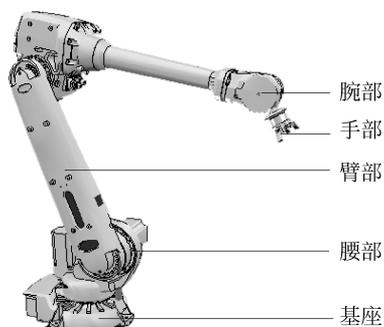


图 3-2 工业机器人执行系统

### 3. 控制系统

控制系统是工业机器人的指挥决策系统，它控制驱动系统，让执行机构按照规定的要求进行工作。按照运动轨迹，可以分为点位控制和轨迹控制。一般由计算机或高性能芯片（DSP、FPGA、ARM 等）完成。

### 4. 传感系统

为了使工业机器人正常工作，必须与周围环境保持密切联系，除了关节伺服驱动系统的位置传感器（称作内部传感器）外，还要配备视觉、力觉、触觉、接近觉等多种类型的传感器（称作外部传感器）以及传感信号的采集处理系统。

### 5. 输入输出系统

为了与周边系统及相应操作进行联系与应答，还应有各种通信接口和人机通信装置。工业机器人提供一内部 PLC，它可以与外部设备相连，完成与外部设备间的逻辑与实时控制。一般还有一个以上的串行通信、USB 接口和网络接口等，以完成数据存储、远程控制及离线编程、多机器人协调等工作。

### 3.1.2 工业机器人执行系统

工业机器人执行机构包括手部、腕部、臂部、腰部和基座,本节分别对上述部分进行详细阐述。

#### 1. 手部

手部是工业机器人直接与工件或工具接触,用来完成握持工件或工具的部件。有些工业机器人直接将工具(如焊枪、喷枪、容器)装在手部位置,而不再设置手部。根据被抓取工件、工具等的形状、尺寸、重量和表面粗糙度等不同特性,在工业生产中可使用多种形式的手部机构,最常见的是钳爪式、磁吸式和气吸式。

另外,手部与手腕相连处应该可拆卸,手部与手腕有机械接口,也可能有电、气、液接头。工业机器人作业对象不同时,可以方便地拆卸和更换手部。

##### 1) 钳爪式手部机构

该机构是最常见的手部形式之一,手部可以安装两个、三个或者多个手爪(图 3-3),抓取工件的方式有外卡式和内撑式两种。

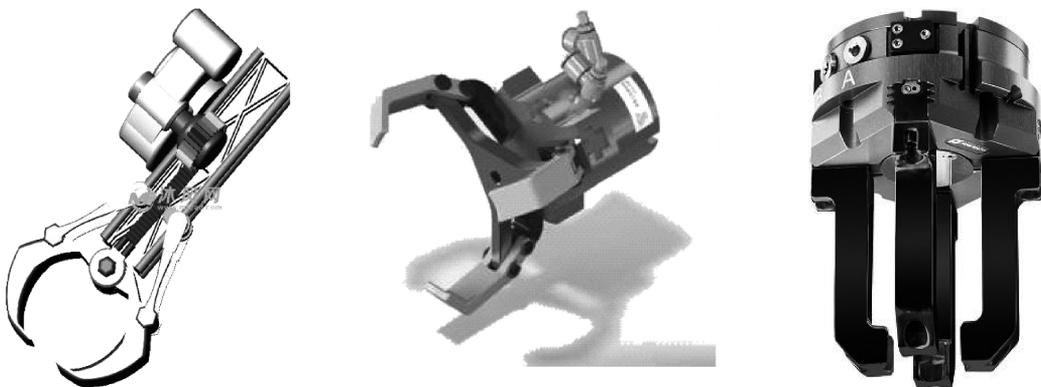


图 3-3 钳爪式手爪

钳爪式手部机构设计要点如下:

(1) 足够的夹紧力。工业机器人的手部机构靠钳爪夹紧工件进行位置操作,考虑工件本身的重量以及运动过程中产生的惯性力合振动等因素,钳爪必须具有足够大的夹紧力,一般要求夹紧力为工件重量 2~3 倍的冗余。

(2) 足够的夹持运动行程。钳爪为了抓取和松开工件,手爪必须具有足够大的张开角度和运动行程,而且夹持工件的中心位置要精确(即定位误差小)。

(3) 工件定位的可靠性。为了使钳爪和被夹持工件保持精确的相对位置,必须根据被夹持工件的形状选用相应的钳爪形状,例如圆柱形工件采用 V 形钳口的手爪,以便自动定心。

(4) 具有足够的强度和刚度。钳爪在运动过程中要受到夹持工件的反作用力、惯性力和振动等影响,因此必须对手爪进行相应的强度、刚度校合计算。

(5) 对夹持对象的适应性。手爪设计必须适应工件的形状、抓取部位的尺寸、夹持工件的材料特性,避免工件损伤等要求。另外还要适应工作位置的状况,如工作空间要求。

(6) 具有一定的通用性。工业机器人在进行智能化作业时,必须要对夹具进行位置和姿态安装位置标定,并且安装过程复杂,应尽量避免反复拆卸。因此钳爪设计时,应考虑产品零件的更换,能够适应不同形状和尺寸要求。

### 2) 磁吸式手部机构

该机构是在手腕部安装电磁铁,通过磁场吸力夹持工件,一般采用电磁吸盘(图 3-4)。电磁吸盘只能吸住铁磁性材料,不能用于有色金属或非金属材料工件。常应用于对工件剩磁无要求和非高温的工件搬运和夹持操作。

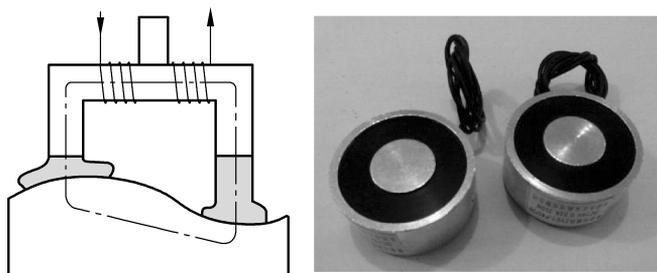


图 3-4 电磁式手爪

磁吸式手部机构设计要点如下:

(1) 足够的电磁吸引力。电磁吸力应根据工件重量确定,电磁吸盘的形状、尺寸及线圈必须根据吸力设计,吸力可以通过施加电压进行微调。

(2) 夹持对象的适应性。应根据被吸附工件的形状、抓取部位的尺寸设计电磁吸盘,并且保证吸附面与工件的被吸附面形状保持一致。

### 3) 气吸式手部机构

气吸式手部是利用橡胶皮腕或软性塑料腕中形成真空或负压吸附工件。特别适用于薄铁皮、矽钢片、板材、纸张、玻璃器皿等零件的抓取。根据不同需求,手部可采用单吸盘、双吸盘、多吸盘或者特殊形状(图 3-5)。



图 3-5 气吸式手爪

气吸式手部机构设计要点如下:

(1) 足够的吸力。吸力大小与设计的吸盘直径大小、吸盘内的真空度(负压大小)以及吸盘的吸附面积大小有关。同时还与工件被吸附表面的形状和表面平整度有关,设计时要充分考虑上述因素,以保证足够的吸力。

(2) 夹持对象的适应性。应根据被抓取工件的形状、抓取部位的尺寸等要求设计吸盘,由于气吸式手爪多吸附薄片状工件,故可用耐油橡胶压制不同尺寸的盘状吸头。

## 2. 腕部

腕部用来连接工业机器人的手部与臂部、确定手部工作位置并扩大臂部动作范围的部件。有些专用机器人没有手腕部件,而是直接将手部安装在手臂部件的端部。典型 6 轴串联式工业机器人的腕部结构如图 3-6 所示。

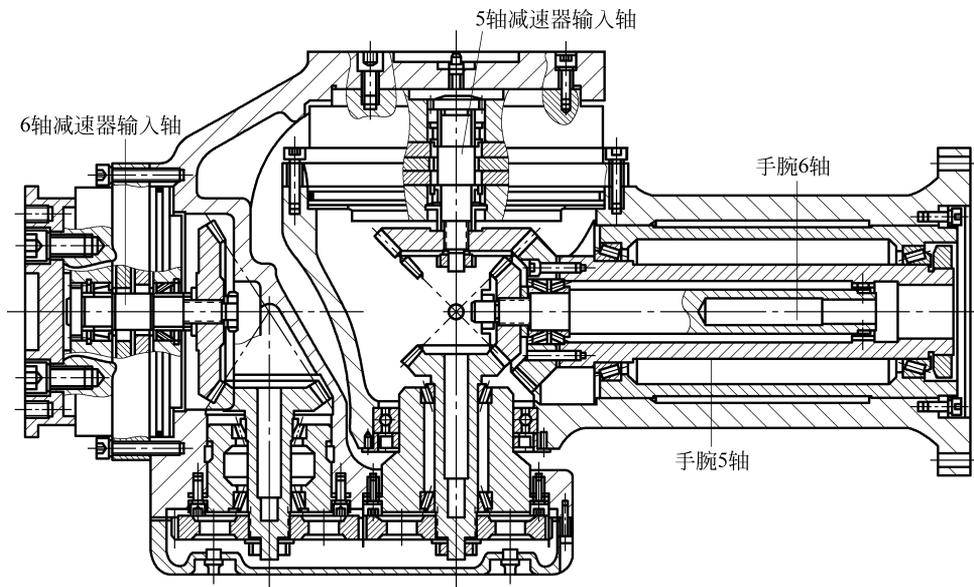


图 3-6 工业机器人腕部结构图

工业机器人的腕部常用来调整工业机器人的姿态,即具有滚动、俯仰和偏航角度的调整功能。腕部实际所具有的自由度数应根据工业机器人的工作性能要求来设计。设计腕部时应注意以下几点:

(1) 结构尽量紧凑,重量尽量轻,结构强度高。对于自由度数目较多以及驱动力要求较大的腕部,结构设计更为复杂,因为腕部的每一个自由度都要相应配置驱动和执行件,在腕部较小的空间内同时配置几套元件,困难较大。必须考虑腕部的结构强度,保证工业机器人的末端运动精度。从现有的结构看,用油(气)缸直接驱动的腕部,一般只有两个自由度,用机械传动的腕部可具有三个自由度。

(2) 转动灵活,密封性好。

(3) 注意腕部与手部、臂部的连接,各个自由度的位置检测、管线布置以及润滑、维修、安装和调整等问题。

(4) 要适应工作环境的需要,特别是在高温作业和腐蚀性介质中工作的工业机器人,要注意工业机器人本体的安全性防护。

## 3. 臂部

臂部是工业机器人用来支撑腕部和手部,实现较大运动范围的部件。它不仅承受被抓取工件的重量,而且承受末端操作器、手腕和手臂自身重量。臂部的结构、工作范围、灵活性、臂力和定位精度都直接影响机器人的工作性能。典型 6 轴串联式工业机器人的臂部结

构如图 3-7 所示。

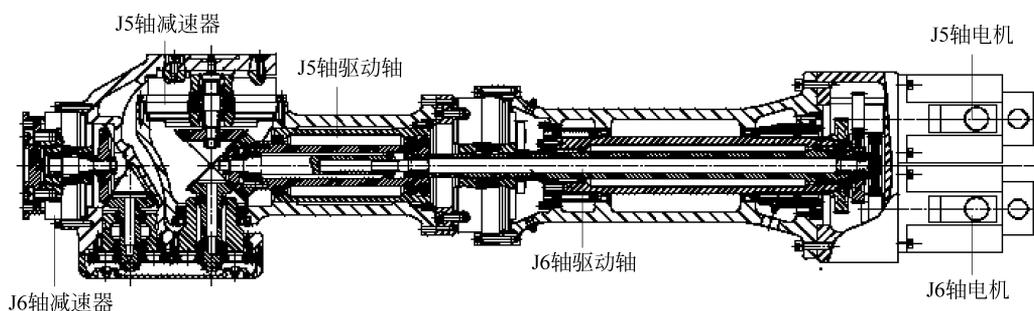


图 3-7 工业机器人臂部结构

臂部的结构形式必须根据工业机器人的运动形式、载荷重量、动作自由度、运动精度等因素进行设计。同时,设计时需要考虑手臂的受力情况、油(气)缸及导向装置的布局、内部管路等因素。因此设计臂部时一般要注意以下要求:

(1) 刚度大。为防止臂部在运动过程中产生过大的变形,臂部的截面形状选择要合理。尽量采用工字形、空心管结构。

(2) 导向性好。为防止手臂运动中沿运动轴发生转动,应设置导向装置,或设计方形、花键等形式的臂杆。

(3) 偏重力矩小。所谓偏重力矩就是指臂部的重量对其支撑回转轴所产生的静力矩,为提高工业机器人的运动速度,要尽量减小臂部运动部分的重量,以减小偏重力矩和整个手臂对回转轴的转动惯量。

(4) 运动平稳、定位精度高。臂部运动速度越高、重量越大,惯性力引起的定位冲击越大,运动不平稳降低了工业机器人的定位精度。因此应尽量减小臂部运动部分重量,使结构紧凑、重量轻,同时要采取必要的轨迹规划或者一定形式的缓冲措施。

#### 4. 腰部

腰部是连接臂部和基座,并安装驱动装置及其他装置的部件。机身结构在满足结构强度的前提下应尽量减小尺寸,降低重量,同时考虑外观要求。典型 6 轴串联式工业机器人的腰部结构如图 3-8 所示。

工业机器人腰部要承担机器人本体的小臂、腕部和末端负载,所受力及力矩最大,要求其具有较高的结构强度。材料为球墨铸铁,采用筋板式结构。由于其结构复杂,焊接不能保证其精度和强度。为满足日后批量生产的要求,所以采用铸造方式,然后对各基准面进行精密加工。

#### 5. 基座

基座是整个工业机器人的支撑部分,有固定式和移动式两种。其中,移动式机构是工业机器人用来扩大活动范围的机构,有的采用专门的行走装置,有的采用轨道、滚轮机构。典型 6 轴串联式工业机器人的基座结构如图 3-8 所示,底座和回转座材料为球墨铸铁,采用铸造技术,有利于批量生产。

综上所述,工业机器人本体基本结构的特点主要可归纳为以下 4 点:

(1) 一般可以简化成各连杆首尾相接、末端无约束的开式连杆系,连杆系末端自由且无支撑,这决定了机器人的结构刚度不高,并随连杆系在空间位姿的变化而变化。

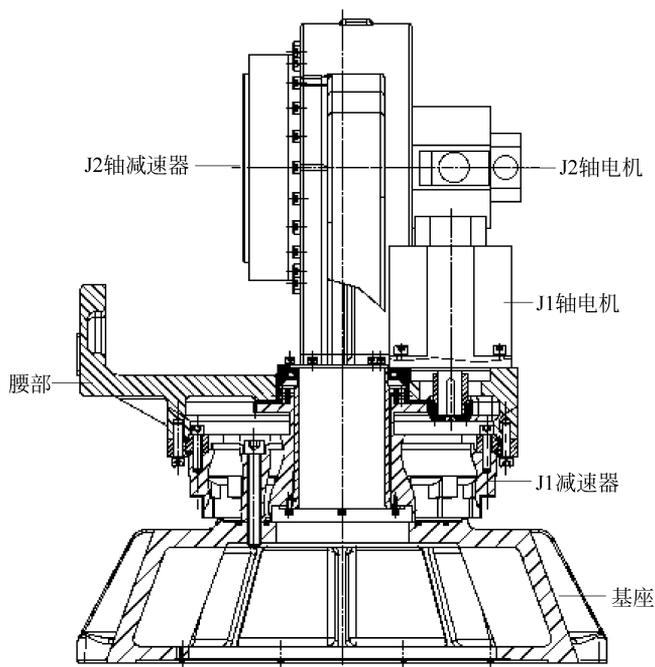


图 3-8 工业机器人腰部、基座示意图

(2) 开式连杆系中的每根连杆都具有独立的驱动器,属于主动连杆系,连杆的运动各自独立,不同连杆的运动之间没有依从关系,运动灵活。

(3) 连杆驱动扭矩的瞬态过程在时域中的变化非常复杂,且和执行器反馈信号有关。连杆的驱动属于伺服控制型,因而对机械传动系统的刚度、间隙和运动精度都有较高的要求。

(4) 连杆系的受力状态、刚度条件和动态性能都随位姿的变化而变化,因此,极容易发生振动或出现其他不稳定现象。

综合以上特点可见,合理的机器人本体结构应当使其机械系统的工作负载与自重的比值尽可能大,结构的静、动态刚度尽可能高,并尽量提高系统的固有频率和改善系统的动态性能。臂杆质量小有利于改善机器人操作的动态性能。

结构静、动态刚度高有利于提高手臂端点的定位精度和对编程轨迹的跟踪精度,这在离线编程时是至关重要的。刚度高还可降低对控制系统的要求和系统造价。机器人具有较好的刚度还可以增加机械系统设计的灵活性,比如在选择传感器安装位置时,刚度高的结构允许传感器放在离执行器较远的位置上,减少了设计方面的限制。

## 3.2 机器人关节及自由度

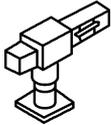
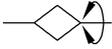
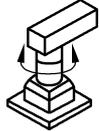
### 3.2.1 自由度

所谓自由度,是表示机器人运动灵活性的尺度,意味着独立的单独运动的数量。手臂由杆件和连接它们的关节构成,在日本工业标准(Japanese Industrial Standards, JIS)中,将杆

件的连接部分称为 Joint,将平移的 Joint 称为移动关节,将旋转的 Joint 称为旋转关节。一个关节可以有一个或多个自由度(Degree of Freedom,DOF)。工业机器人自由度越多,其动作越灵活,适应性越强,但结构相应越复杂。通用的工业机器人一般需要 3~6 个自由度,当具有 6 个自由度时可以实现空间任意位置和姿态。

由驱动器产生主动动作的自由度称为主动自由度,无法产生驱动力的自由度称为被动自由度。分别将这些自由度所对应的关节称为主动关节和被动关节。在表 3-1 中给出了有代表性的单自由度关节的符号和运动方向。

表 3-1 单自由度关节列表

名 称	符 号	举 例
移动		
旋转		

在三维空间中的无约束物体可以作平行于  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴各个轴的平移运动,还有围绕各轴的旋转运动,因此它具有与位置有关的 3 个自由度和与姿态有关的 3 个自由度,共计 6 个自由度。为了能任意操纵物体的位置和姿态,机器人手臂至少须有 6 个自由度。人的手臂有 7 个自由度,其中肩关节有 3 个,肘关节有 2 个,手关节有 2 个。从功能的观点来看,也可以认为肩关节有 3 个,肘关节有 1 个,手关节有 3 个,它比 6 个自由度还多,把这种比 6 个自由度还多的自由度称为冗余自由度。

决定机器人自由度构成的依据是它为完成给定目标作业所必需的动作。例如,若仅限于二维平面内的作业,有 3 个自由度就够了。如果在一类障碍物较多的典型环境中,例如用机器人在狭窄环境里实施维修作业,那么也许将需要 7 个或 7 个以上的自由度。

### 3.2.2 关节及自由度的构成

关节及其自由度的构成方法将极大地影响工业机器人的运动范围和可操作性等性能指标。例如,机器人如果是球形关节构造,由于它具有向任意方向动作的 3 个自由度机构,它能方便地决定适应作业的姿态。然而,由于驱动器的可动范围的限制,它很难完全实现与人的手腕等同的功能,所以,机器人通常是串联杆件型的。

如果采用串联连接的方法,即使是相同的 3 个自由度,由于自由度的组合方法有多种,结果各自的功能也各不同。例如,3 个自由度手腕机构的具体构成方法就有多种。因此,有必要根据目标作业的要求等若干个准则来决定有效的关节构成方式。

### 3.2.3 机器人关节形式

传动机构用来把驱动器的运动传递到关节和动作部位,这涉及关节形式的确定、传动方式以及传动部件的定位和消除等多个方面的内容。

机器人中连接运动部分的机构称为关节。关节有转动型和移动型,分别称为转动关节和移动关节。

#### 1. 转动关节

转动关节就是在机器人中被简称为关节的连接部分,它既连接各机构,又传递各机构间的回转运动(或摆动),用于基座与臂部、臂部之间、臂部和手部等连接部位(图 3-9)。关节由回转轴、轴承、固定座和驱动机构组成。关节一般有以下几种形式:

(1) 驱动机构和回转轴同轴式。这种形式直接驱动回转轴,有较高的定位精度。但是,为减轻重量,要选择小型减速器并增加臂部的刚性。它适用于水平多关节型机器人。

(2) 驱动机构与回转轴正交式。重量大的减速机构安放在基座上,通过臂部的齿轮、链条传递运动。这种形式适用于要求臂部结构紧凑的场合。

(3) 外部驱动机构驱动臂部的形式。这种形式适合于传递大扭矩的回转运动,采用的传动机构有滚珠丝杠、液压缸和气缸。

(4) 驱动电机安装在关节内部的形式。这种方式称为直接驱动方式。

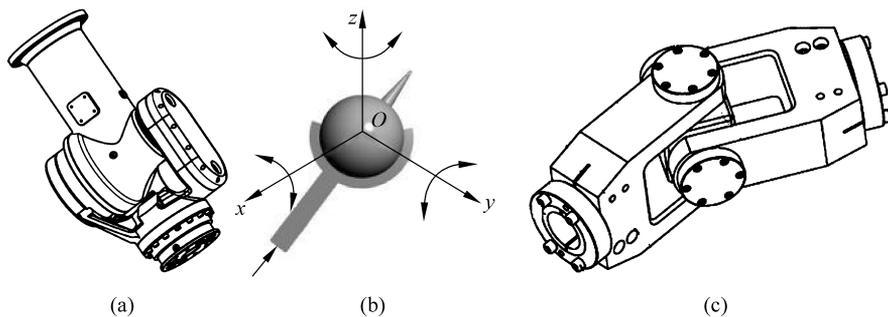


图 3-9 转动关节

(a) 转动; (b) 球面关节; (c) 胡克铰

#### 2. 移动关节

机器人移动关节由直线运动机构和在整个运动范围内起直线导向作用的直线导轨部分组成。导轨部分分为滑动导轨、滚动导轨、静压导轨和磁性悬浮导轨等形式。

一般来说,要求机器人导轨间隙小或能消除间隙。在垂直于运动方向上要求刚度高、摩擦系数小且不随速度变化,并且有高阻尼、小尺寸和小惯量。通常,由于机器人在速度和精度方面的要求很高,故一般采用结构紧凑且价格低廉的滚动导轨。

直线导轨又称线轨、滑轨、线性导轨、线性滑轨,用于直线往复运动场合,拥有比直线轴承更高的额定负载,同时可以承担一定的扭矩,可在高负载的情况下实现高精度的直线运动。

直线导轨的作用是用来支撑和引导运动部件,按给定的方向做往复直线运动。按摩擦

性质,直线运动导轨可以分为滑动摩擦导轨、滚动摩擦导轨、弹性摩擦导轨、流体摩擦导轨等种类,如图 3-10 所示。



图 3-10 直线导轨

直线导轨应用中要注意以下几点:

- (1) 导向精度: 构建运动轨迹的准确水平。
- (2) 精度坚持性: 工作中保持原有的几何精度能力,即耐磨性及其尺寸的稳定性。
- (3) 运动灵敏度和定位精度。
- (4) 运动稳定性。
- (5) 稳定性与抗振性。
- (6) 刚度: 导轨抗变形的能力。

### 3.3 工业机器人本体材料选择

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。机器人本体用来支撑、连接和固定机器人的各部分,同时也包括机器人的运动部分,既有一般机械结构特性相同的地方,也要考虑机器人运动的特殊性。机器人本体所用的材料即是结构材料。但另外,机器人本体又不单是固定结构件,比如,机器人手臂是运动的,机器人整体也是运动的。所以机器人运动部分的材料质量应该尽量小,以减少部件的惯量。

精密机器人对于机器人的刚度有一定的要求,即对材料的刚度有要求。刚度设计时要考虑静刚度和动刚度,要考虑材料对振动的影响。从材料角度看,控制振动涉及减轻重量和抑制振动两方面,其本质就是材料内部的能量损耗和刚度问题,它与材料的抗振性紧密相关。家用和服务机器人的外观造型和使用场合等因素造成其身体材料与工业机器人有不同,一般会选择容易造型、质量较小、外观富有美感的机器人本体材料,如玻璃钢、工程塑料等复合材料。

总之,正确选用结构件材料不仅可降低机器人的成本价格,更重要的是可适应机器人的高速化、高载荷化及高精度化,满足其静力学及动力学特性要求。随着材料工业的发展,新材料的出现给机器人的发展提供了广阔的空间。

与一般机械设备相比,机器人结构的动力学特性十分重要,这是材料选择的出发点。材料选择的基本要求是: