

第 3 章

探索奥秘,展现科学美——机器人结构大解剖

机器人机械结构(包括手臂、手腕、手爪和行走结构等部分)的功能是实现机器人的运动功能,完成规定的各种操作。机器人的“身躯”一般是粗大的机座,或称机架。机器人的“手”则是多节杠杆机械——机械手,用于搬运物品、装卸材料、组装零件等;或握住不同的工具,完成不同的工作,如让机械手握住焊枪,可进行焊接,握住喷枪,可进行喷漆。机械手处理高温、有毒产品时,比人手更能适应工作。机器人技术发展到智能化阶段,机械手也越来越灵巧了,它们已能完成握笔写字、弹奏乐器、抓起鸡蛋甚至穿针引线等精细复杂的工作。

驱动器相当于机器人的“肌肉”。根据机器人所使用的驱动器的不同,驱动器可分为三类:电动驱动器(电动机)、液压驱动器和气动驱动器。电动驱动器由电能产生动能,从而驱动机器人各关节动作。电动机器人能完成高速运动,具有传动机构少、成本低等优点;液压机器人具有精度高、反应速度快的优点;气动机器人则由气动机构产生动力来驱动关节运动。

传动机构用于把驱动器产生的动力传递到机器人的各个关节和动作部位,实现机器人的平稳运动。常见的传动机构有齿轮传动、丝杠传动、传送带和链传动、流体传动和连杆传动等。

3.1 机器人本体的基本结构

机器人本体是机器人的重要部分,所有的计算、分析和编程最终都要通过本体的运动和动作来完成特定的任务。机器人本体各部分的基本结构、材料的选择将直接影响整体性能。

3.1.1 机器人本体的基本结构形式

1. 基本结构

机器人本体主要包括传动件、机身及行走机构、臂部、腕部、手部。

2. 基本结构要求

- (1)自重小:改善机器人操作的动态性能。
- (2)静动态刚度高:提高定位精度和跟踪精度;增加机械系统设计的灵活性;减小定位时的超调量和缩短稳定时间,降低对控制系统的要求和系统造价。
- (3)固有频率高:避开机器人的工作频率,有利于系统的稳定。

3.1.2 机器人本体基本结构的举例

下面以关节型机器人为例来说明机器人本体的基本结构。

关节型机器人的主要特点是模仿人类腰部到手臂的基本结构,因此本体结构通常包括机器人的机座(底部和腰部的固定支撑)结构及腰部关节转动装置、大臂(大臂支撑架)结构及大臂关节转动装置、小臂(小臂支撑架)结构及小臂关节转动装置、手腕(手腕支撑架)结构及手腕关节转动装置和末端执行器(手爪部分)。目前,可以像人一样行走的关节型机器人已经研制成功,并向具有高级智能的方向拓展。

进行机器人本体的运动学、动力学和其他相关分析时,一般可将机器人简化成连杆、关节和末端执行器通过关节首尾相连而构成的一个开式连杆系。在连杆系的开端安装有末端执行器(简称手部)。汽车机器人如图 3-1 所示。



图 3-1 汽车机器人

末端执行器(手部)是机器人直接参与工作的部分。手部可以是各种夹持器,也可以是各种工具,如焊枪、喷头等。操作时,往往要求手部不仅能达到指定的位置,而且要有正确的姿态。

组成机器人的连杆和关节按功能可以分为两类: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,它确定了手部执行器在空间的方向。

机器人本体基本结构的特点主要可归纳为以下四点:

(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承,这决定了机器人的结构刚度不高,并随连杆系在空间中位置的变化而变化。

(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,且和执行器的反馈信号有关。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是随位置的变化而变化的,因此,极易发生振动或出现其他不稳定现象。

综合以上特点,合理的机器人本体结构应该使其机械系统的工作负载与自重的比值尽可能大,结构的静态刚度尽可能大,并尽量提高系统的固有频率和改善系统的动态性能。

臂杆的质量小,有利于改善机器人操作的动态性能。结构的静(动)态刚度大,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。刚度大还

可以降低对控制系统的要求和系统造价。机器人具有良好的刚度还可以增加机械系统设计的灵活性,如在选择传感器安装位置时,刚度大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。

尽可能提高机器人结构固有频率的目的在于避开机器人的工作频率。通常,机器人的低阶固有平频率为 $5\sim 25$ Hz,以中等速度运动时,输入信号的脉冲延续时间为 $0.05\sim 1$ s,振荡频率相当于 $1\sim 20$ Hz,因而机械系统可能会因此激发振荡。提高机械系统的固有频率有利于系统的稳定。运动速度变化时振荡的振幅和衰减时间是衡量机器人动力学性能好坏的重要指标。动态刚度大,可以减小定位时的超调量,缩短达到稳定状态的时间,从而提高机器人的使用性能。

3.2 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。机器人本体用来支承、连接、固定机器人的各部分,当然也包括机器人的运动部分,这一点与一般机械结构的特性相同。机器人本体所用的材料也是结构材料。但机器人本体又不单是固定结构件,如机器人的手臂是运动的,机器人整体也是运动的,所以,机器人运动部分的材料质量要轻。精密机器人对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,即要考虑振动问题。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。另外,家用和服务机器人的外观与传统机械大有不同,故将会出现比传统工业材料更富有美感的机器人本体材料。从这一点看,机器人材料又应具备柔软和外表美观等特点。

总之,正确选用结构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,新材料的出现将会给机器人的发展提供宽广的空间。

3.2.1 材料选择的基本要求

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。机器人本体材料选择的基本要求如下。

1. 强度高

机器人手臂是直接受力的构件,高强度材料不仅能满足机器人手臂的强度条件,而且有望减小臂杆的截面尺寸,减轻重量。

2. 弹性模量大

由材料力学的知识可知,构件刚度(或变形量)与材料的弹性模量 E 、 G 有关。弹性模量越大,变形量越小,刚度越大。不同材料的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。例如,普通结构钢的强度极限为 420 MPa,高合金结构钢的强度极限为 $2\ 000\sim 2\ 300$ MPa,但是两者的弹性模量 E 却没有多大的变化,均为 2.1×10^5 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大而密度 ρ 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。机器人手臂经过运动后,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,如碳纤维增强铝合金、石墨纤维增强镁合金等,用来作为机器人手臂的材料是很理想的,但是价格昂贵。

3.2.2 机器人常用材料简介

1. 碳素结构钢和合金结构钢

碳素结构钢和合金结构钢的强度高,特别是合金结构钢,其强度增大了4~5倍,弹性模量大,抗变形能力强,是应用最为广泛的材料。

2. 铝、铝合金及其他轻合金材料

铝、铝合金及其他轻合金材料的共同特点是重量轻,弹性模量并不大,但是材料密度小,故 E/ρ 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,如添加3.2%(重量百分比)锂的铝合金,弹性模量增加了14%, E/ρ 增加了16%。

3. 纤维增强合金

纤维增强合金如碳纤维增强铝合金、石墨纤维增强镁合金等,其 E/ρ 分别达到 $11.4 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $8.9 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。这种纤维增强金属材料具有非常高的 E/ρ ,而且没有无机复合材料的缺点,但价格昂贵。

4. 陶瓷

陶瓷材料具有良好的品质,但是脆性大,不易加工成具有长孔的连杆,与金属零件连接的接合部需特殊设计。目前,日本已经试制成功了在小型高精密机器人上使用的陶瓷机器人手臂样品。

5. 纤维增强复合材料

纤维增强复合材料具有极好的 E/ρ ,但存在老化、蠕变、高温热膨胀及与金属连接困难等问题。这类材料不但重量轻、刚度大,而且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。叠层复合材料的制造工艺还允许用户进行优化,改进叠层厚度、纤维倾斜角、最佳横断面尺寸等,使其具有最大阻尼值。

6. 黏弹性大阻尼材料

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,其中最合适机器人采用的一种方法是用黏弹性大阻尼材料对原构件进行约束层阻尼处理。吉林工业大学和西安交通大学进行了黏弹性大阻尼材料在柔性机械臂振动控制中应用的试验,结果表明,机械臂的重复定位精度在阻尼处理前为 $\pm 0.30 \text{ mm}$,在阻尼处理后为 $\pm 0.16 \text{ mm}$;残余振动时间在阻尼处理前后分别为0.9 s和0.5 s。

3.3 机器人的基础部分

机器人必须有一个便于安装的基础件机座或行走机构。机座往往与机身做成一体。机身和臂部相连,机身支承臂部,臂部又支承腕部和手部。

3.3.1 机器人机座

机器人机座是机器人的基础部分,起支承作用,可分为固定式和移动式两种。一般工业机器人中的立柱式、机座式和屈伸式机器人大多数是固定式的;但随着海洋科学、原子能工业及宇宙空间事业的发展,具有智能的、可移动的机器人是今后机器人的发展方向。

1. 固定式机器人的机座

固定式机器人的机座既可直接连接在地面基础上,也可固定在机身上。图 3-2 所示为美国 PUMA-262 型垂直多关节型机器人,主要包括立柱回转(第一关节)的二级齿轮减速传动,减速箱体即为机座。

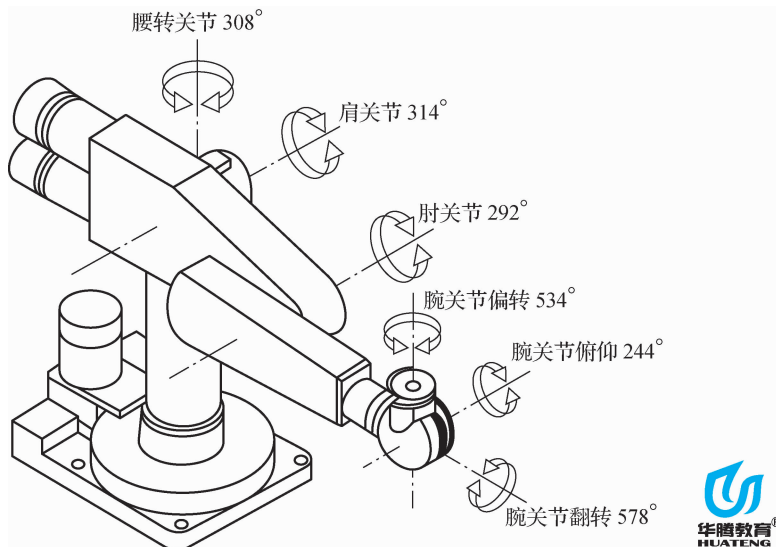


图 3-2 美国 PUMA-262 型垂直多关节型机器人

2. 移动式机器人的机座

移动式机器人,也称行走式机器人。行走机构是行走式机器人的重要执行部件,它由行走的驱动装置、传动机构、位置检测元件、传感器电缆及管路等组成。它一方面支承机器人的机身臂和手部,因而必须具有足够的刚度和稳定性;另一方面还根据作业任务的要求,带动机器人在更广阔的空间内运动。

行走式机器人按运动轨迹可分为固定轨迹式行走机器人和无固定轨迹式行走机器人。固定轨迹式行走机器人主要用于工业机器人,如横梁式机器人。无固定轨迹式行走机器人按其行走机构的特点分为车轮式移动机器人、履带式移动机器人和关节式移动机器人。前两者与地面连续接触,其形态为运行车式,多用于野外、较大型作业场所,应用得较多也较成熟;后者与地面为间断接触,为人类(或动物)的腿脚式,该机构正在发展和完善中。

1) 固定轨迹式行走机器人

固定轨迹式行走机器人的机身设计成横梁式,用于悬挂手臂部件,这是工厂中常见的一种配置形式。这类机器人的运动形式大多为直移式。它具有占地面积小、能有效利用空间、直观等优点,横梁可设计成固定的或行走的。一般情况下,横梁可安装在厂房原有建筑的柱梁或有关设备上,也可专门在地面上架设。

双臂悬挂式结构大多数是为一台主机上、下料服务的,一个臂用于上料,另外一个臂用于下料,这种形式可以减少辅助时间,缩短动作循环周期,有利于提高生产率。双臂在横梁上的具体配置形式,视工件的类型、工件在机床上的位置和加紧方式、料道与机床的相对位置及运动形式而异。

当轴类工件的轴向尺寸较长时,机器人上、下料时移动的距离亦将增加。这种机器人的横梁架于机床上空,如图 3-3 所示。

臂的配置也有不同的形式。图 3-3(a)所示为双臂平行配置机器人。双臂与横梁在同一平面内,上料道与下料道分别设在机床两端。为了使双臂能同时动作,缩短辅助时间,两臂间的距离应与料道至机床两顶尖间中点的距离相同,且两臂同步地沿横梁移动。

图 3-3(b)所示为双臂交叉配置机器人。双臂交叉配置在横梁的两侧,并垂直于横梁轴线。两臂轴线交于机床中心。两臂交错伸缩进行上、下料,并同时沿横梁移动,移动的行程与双臂平行配置的机器人相同。这种配置形式采用同一料道,缩短了横梁长度,且两臂位于横梁两侧,可减少横梁的扭转变形。

图 3-3(c)所示为横梁为一悬伸梁的双臂交叉配置机器人。它一般采用等强度铸造横梁,受力比较合理。其行程较图 3-3(a)和图 3-3(b)所示的机器人更短些。由于结构的限制,其双臂必须位于横梁的同一侧。

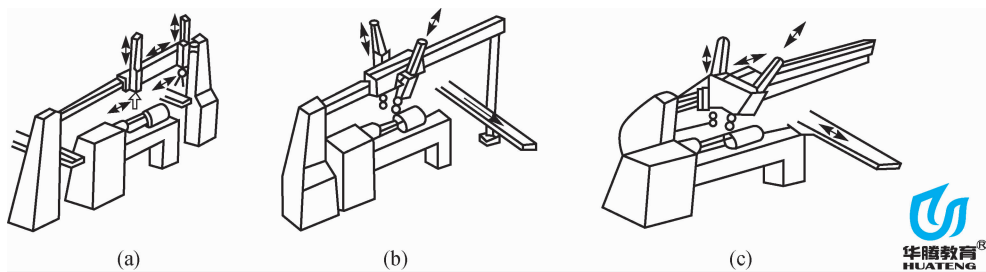


图 3-3 轴类零件抓取用双臂悬挂机器人

2) 无固定轨迹式行走机器人

(1) 车轮式移动机器人。在相对平坦的地面上,用车轮移动方式行走是相当有优势的。车轮式移动机器人如图 3-4 所示。

车轮式移动机器人主要由以下几个部分组成:

- ① 1 台车轮驱动的自动引导车,作为机器人的移动机座。
- ② 1 台可编程的具有 6 个自由度的机器人。
- ③ 转台,以及用于放置和运输工件的托盘。
- ④ 自动引导车和机器人用的单元控制器、蓄电池和辅助定位装置等。

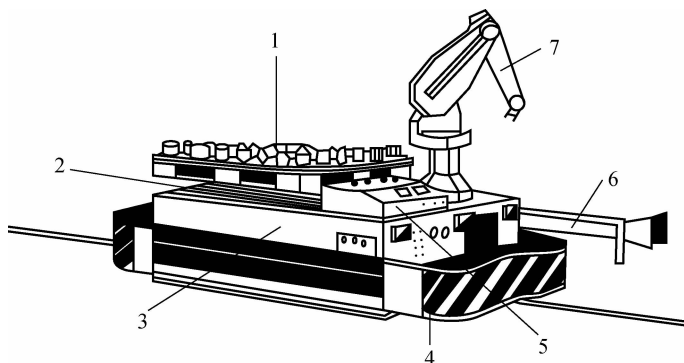


图 3-4 车轮式移动机器人

1—托盘；2—转台；3—自动引导车；4—浮动碰撞边；5—操作机控制器；
6—充电用接触机；7—操作机

如此配置的移动机器人可用于机床上、下料，机床间工件或工具的传送接收等。车轮式移动机器人是自动化生产由单元生产向柔性生产线乃至无人车间发展的重要设备之一。

(2)履带式移动机器人。车轮式移动机器人在野外或海底工作时，遇到松软地面的情况可能陷车，此时宜采用履带式移动机器人。它是车轮式移动机器人的拓展，履带本身起着给车轮连续铺路的作用。

图 3-5 所示为 MF2 履带式移动机器人。它像一辆小型坦克车，其主要操作设备是安装在转塔上的抓重为 200 kg 的 6 自由度机器人手臂。在手臂的肘关节处附有一个承载量为 400 kg 的吊钩，作为辅助起重设备。履带式移动机器人左、右两条履带的驱动轮位于前方，由直流电动机通过齿轮减速器装置驱动。底盘的支撑轮悬挂在扭力杆上，可以减少行驶过程中因颠簸而引起的振动，操作时可将弹簧悬挂系统锁紧以保持稳定。底盘上装有蓄电池组，作为移动机器人的直流电源。机器人的主要观测设备大都装在一个位于转塔上的云台上。此云台可以左右摆动和俯仰，以扫描前方的半个球面的视野，必要时还可以向左横移一半的距离。

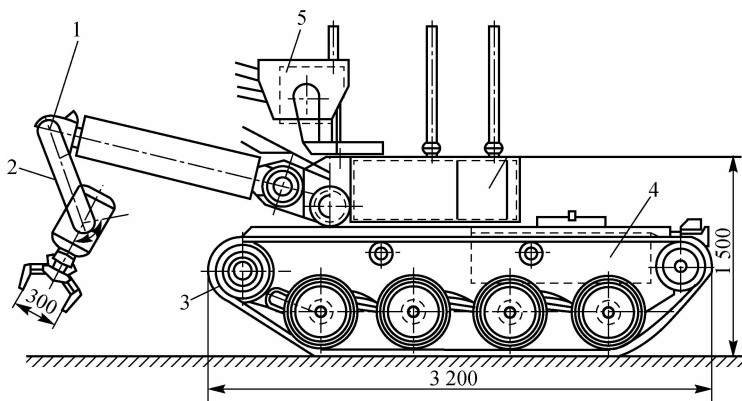


图 3-5 MF2 履带式移动机器人

1—肘关节；2—吊钩；3—驱动轮；4—蓄电池组；5—云台

装在云台上的观察设备主要有 2 台用来观察操作状况的主体电视摄像机,1 台用作远距离定向观察、带有变焦镜头的平面电视摄像机,4 盏用于远距离照明和宽射束照明的灯,2 台用来传输附近音响的立体收音器,必要时还可以装上 1~2 架小型电影摄影机(立体摄影机)或 1 架 16 mm 电影摄影机。

此外,转塔前方有 1 台剂量率探测器和 1 台环境温度探测器,用来对放射性环境进行检测。

履带式移动机器人和车轮式移动机器人相比,有以下优点:

①支撑面积大,接地比压小,适合于松软或泥泞场地作业,下陷度小,滚动阻力小,通过性能较好。

②越野机动性好,爬坡、越沟等性能均比车轮式移动机器人优越。

③履带支承面上有履齿,不易打滑,牵引附着性能好,有利于发挥较大的牵引力。

同时,履带式移动机器人也存在结构复杂、重量大、运动惯性大、减震功能差、零件易损坏等不足。

(3)步行式移动机器人(见图 3-6)。与运行车式机构相比,步行式移动机器人有以下优点:

①可以在高低不平的地段上行走。

②由于脚的主动性,身体不随地面晃动。

③在柔软的地面上运动,效率并不显著降低。因为脚在软地上行走时,地面的变形是分散的,至多是损失踏一个坑的能量,而且脚还可以利用下沉产生推力,即脚的运动能量变成地面弹性的位能储存。当腿前进时,这个位能又释放出来,因而可以减少步行机构动能的损失。如果设法减轻拔脚的阻力,那么步行机构就会以较高的效率向前运动。

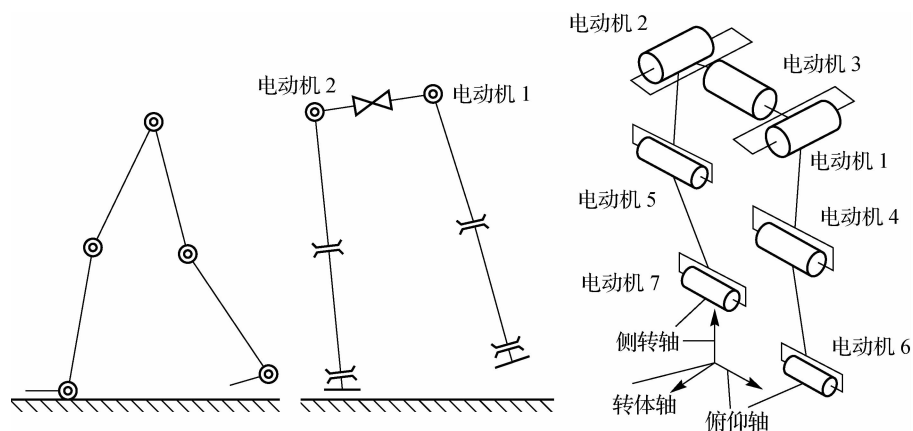


图 3-6 步行式移动机器人

ASIMO(Advanced Step Innovative Mobility)是最出色的步行机器人的代表,是日本本田公司开发的目前世界上最先进的步行机器人,也是世界上唯一能够上、下楼梯,慢速奔跑的双足机器人,如图 3-7 所示。虽然其他公司也有类似的双足机器人,但是没有任何一家的产品能在步态仿真度上达到 ASIMO 的水准。ASIMO 的智能也是同样的出色,具有语言识

别功能、人脸识别功能甚至使用手势进行交流的功能。不仅如此,ASIMO 的手臂还能够开电灯,开门,拿东西,托盘子(见图 3-8),甚至是推车。



图 3-7 ASIMO

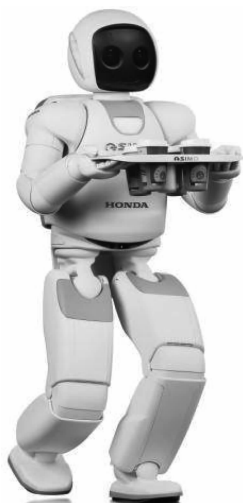


图 3-8 ASIMO 在送咖啡

3.3.2 机器人机身

机器人机身(或称立柱)是支撑臂部及手部的部件。

1. 机身的典型结构

机身结构一般由机器人总体设计确定。例如,圆柱坐标型机器人把回转与升降这两个自由度归属于机身;球形坐标型机器人把回转与俯仰这两个自由度归属于机身;关节坐标型机器人把回转自由度归属于机身;直角坐标型机器人有时把升降(Z 轴)或水平移动(X 轴)自由度归属于机身。

下面介绍回转与升降机身和回转与俯仰机身。

1) 回转与升降机身

(1) 回转运动采用摆动油缸驱动,升降油缸在下,回转油缸在上。因摆动油缸安置在升降活塞杆的上方,故活塞杆的尺寸要加大。

(2) 回转运动采用摆动油缸驱动,回转油缸在下,升降油缸在上,相比之下,回转油缸的驱动力矩要设计得大一些。

(3) 链条传动机构。链条链轮传动是将链条的直线运动变为链轮的回转运动,它的回转角度可大于 360° 。图 3-9(a)所示为气动机器人采用单杆活塞气缸驱动链条链轮传动机构实现机身的回转运动。此外,也有用双杆活塞气缸驱动链条链轮回转的方式,如图 3-9(b)所示。

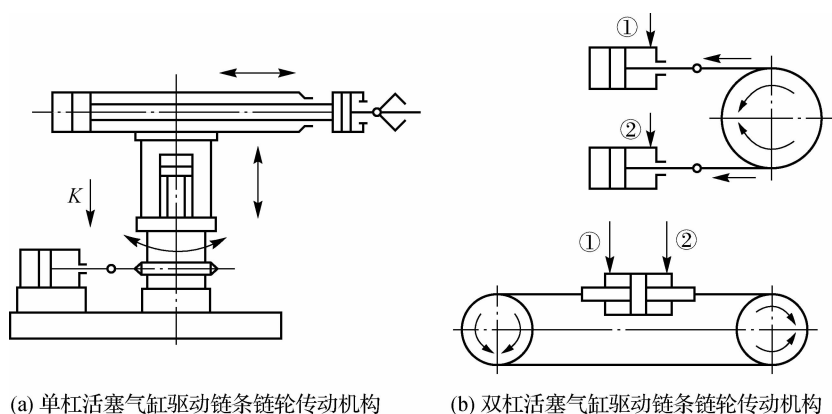


图 3-9 链条链轮传动实现机身回转的原理

2) 回转与俯仰机身

机器人手臂的俯仰运动一般采用活塞油(气)缸与连杆机构实现。手臂俯仰运动用的活塞位于手臂的下方,其活塞杆和手臂用铰链连接,缸体采用尾部耳环或中部销轴等方式与立柱连接,如图 3-10 所示。此外,有时也采用无杆活塞缸驱动齿条齿轮或四连杆实现手臂的俯仰运动。

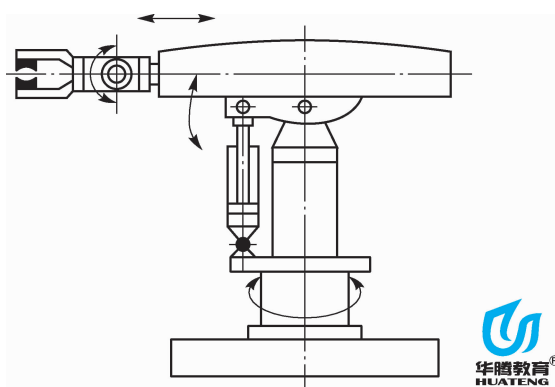


图 3-10 回转与俯仰机身

2. 机身驱动力(力矩)计算

1) 垂直升降运动驱动力的计算

做垂直运动时,除了克服摩擦力外,还要克服机身自身运动部件的重力和其支承的手臂、手腕、手部及工件的总重力及升降运动的全部部件的惯性力,故其驱动力 P_q 可按式(3-1)计算。

$$P_q = F_m + F_g \pm W \quad (3-1)$$

式中, F_m 为各支承处的摩擦力(N); F_g 为启动时的总惯性力(N); W 为运动部件的总重量(N);式中的正、负号,上升时为正,下降时为负。

2) 回转运动驱动力矩的计算

回转运动驱动力矩只包括两项：回转部件的摩擦总力矩和机身自身运动部件及其支承的手臂、手腕、手部及工件的总惯性力矩。故驱动力矩 M_q 可按式(3-2)计算。

$$M_q = M_m + M_g \quad (3-2)$$

式中, M_m 为总摩擦阻力矩(N·m); M_g 为各回转运动部件的总惯性力矩(N·m), 而

$$M_g = J_0 \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (3-3)$$

式中, J_0 为全部回转零部件对机身回转轴的转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), 如果零件轮廓尺寸不大, 重心到回转轴线的距离远, 一般可按质点计算它对回转轴的转动惯量; $\Delta\omega$ 为升速或制动过程中的角速度增量(rad/s); Δt 为回转运动升速过程或制动过程的时间(s)。

3) 升降立柱下降不卡死(不自锁)的条件计算

偏重力矩是指臂部全部零部件与工件总重量对机身回转轴的静力矩, 如图 3-11 所示。当手臂悬伸到最大行程时, 其偏重力矩最大。故偏重力矩应按悬伸最大行程且最大抓重时进行计算。

各零部件的重量可根据其结构形状和材料密度进行粗略计算。由于大多数零件采用对称形状的结构, 其中心位置就在几何截面积的几何中心上, 因此, 根据静力学原理可求出手臂总重心位置距机身立柱轴的距离 L , 亦称作偏重力臂。

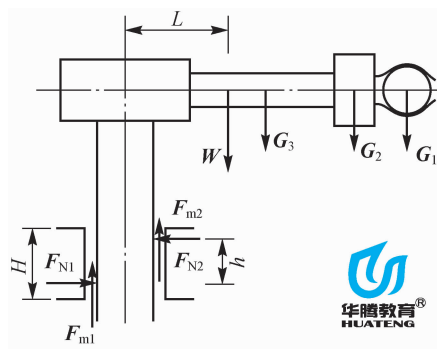


图 3-11 机器人手臂的偏重力矩

偏重力臂 L 为

$$L = \frac{\sum G_i L_i}{\sum G_i} \quad (3-4)$$

式中, G_i 为零件及工件的重量(N); L_i 为零部件及工件的重心到机身回转轴的距离(m)。

偏重力矩 M 为

$$M = WL \quad (3-5)$$

式中, W 为零部件及工件的总重量(N)。

手臂在总重量 W 的作用下有一个偏重力矩, 而立柱支承导套中有阻止手臂倾斜的力矩, 显然偏重力矩对升降运动的灵活性有很大影响。如果偏重力矩过大, 可使支承导套与立柱之间的摩擦力过大, 而出现卡滞现象, 此时必须增大升降驱动力, 相应的驱动及传动装置

的结构庞大。如果依靠自重下降,立柱可能卡死在导套内而不能做下降运动,这就是自锁。因此,必须根据偏重力矩的大小来决定立柱导套的长短。根据升降立柱的平衡条件可知 $F_{N1}h = WL$, 所以 $F_{N1} = F_{N2} = (L/h)W$ 。

要使升降立柱在导套内下降自由,臂部总重量 W 必须大于导套与立柱之间的摩擦力 F_{m1} 及 F_{m2} , 因此升降立柱依靠自重下降而不引起卡死的条件为

$$W > F_{m1} + F_{m2} = 2F_{N1}f = 2\frac{L}{h}Wf$$

即

$$h > 2fL \quad (3-6)$$

式中, h 为导套的长度(m); f 为导套与立柱之间的摩擦系数, $f = 0.015 \sim 0.1$, 一般取较大值; L 为偏重力臂(m)。

假如立柱升降都是依靠驱动力进行的,则不存在立柱自锁(卡死)条件,升降驱动力计算中的摩擦阻力按式(3-6)计算。

3. 机身设计要注意的问题

- (1)刚度和强度大,稳定性好。
- (2)运动灵活,导套不宜过短,避免卡死。
- (3)驱动方式适宜。
- (4)结构布置合理。

3.4 机器人的手臂

机器人的手臂由大臂、小臂(或多臂)所组成。机器人手臂的驱动方式主要有液压驱动、气动驱动和电动驱动几种形式,其中,电动形式最为通用。

机器人手臂的各种运动通常由驱动机构和各种传动机构来实现,因此它不仅承受被抓取工件的重量,而且承受末端执行器、手腕和手臂自身的重量。手臂的结构、工作范围、灵活性、抓重大小(臂力)和定位精度都直接影响机器人的工作性能,所以臂部的结构形式必须根据机器人的运动形式、抓取重量、动作自由度、运动精度等因素来确定。

3.4.1 机器人手臂的特性与材料的选择

1. 机器人手臂的特性

(1)刚度要求高。为了防止臂部在运动过程中产生过大的变形,手臂的断面形状要合理选择。工字形断面弯曲刚度一般比圆形断面的大;空心管的弯曲刚度和扭转刚度都比实心轴的大得多,所以常用钢管做臂杆及导向杆,用工字钢和槽钢做支撑板。

(2)导向性要好。为防止手臂在直线运动中沿运动轴线发生相对转动,或设置导向装置,或设计方形、花键等形式的臂杆。

(3)重量要轻。为提高机器人的运动速度,要尽量减小臂部运动部分的重量,以减小整个手臂对回转轴的转动惯量。

(4)运动要平稳,定位精度要高。臂部运动速度越高,惯性力引起的定位前的冲击也就

越大,运动既不平稳,定位精度也不高。因此,除了臂部设计上要力求结构紧凑、重量轻外,还要采取一定形式的缓冲措施。

2. 机器人手臂材料的选择

机器人手臂的材料应根据手臂的工作状况来选择。根据设计要求,机器人手臂要完成各种运动。因此,对材料的一个要求是作为运动的部件,它应该是轻型材料。另外,手臂在运动过程中往往会产生振动,这将大大降低它的运动精度。因此,在选择材料时,需要对质量、刚度、阻尼进行综合考虑,以便有效地提高手臂的动态性能。

机器人手臂材料首先应是结构材料。手臂承受载荷时不应有变形和断裂,从力学角度看,即要具有一定的强度。手臂材料应该选择高强度材料,如钢、铸铁、合金钢等。机器人手臂是运动的,又要有很好的受控性,因此,要求手臂比较轻。综合而言,应该优先选择强度大而密度小的材料制作手臂,其中,非金属材料有尼龙 6、聚乙烯和碳纤维等;金属材料以轻合金(特别是铝合金)为主。

3.4.2 机器人手臂结构的基本形式和特点

1. 手臂直线运动机构

机器人手臂的伸缩、升降及横向(或纵向)移动均属于直线运动,而实现手臂往返直线运动的机构形式较多,常用的有液压或气压驱动的活塞油(气)缸。由于活塞油(气)缸的体积小、重量轻,因而在机器人手臂结构中应用得比较多。双导向杆手臂的伸缩结构如图 3-12 所示。

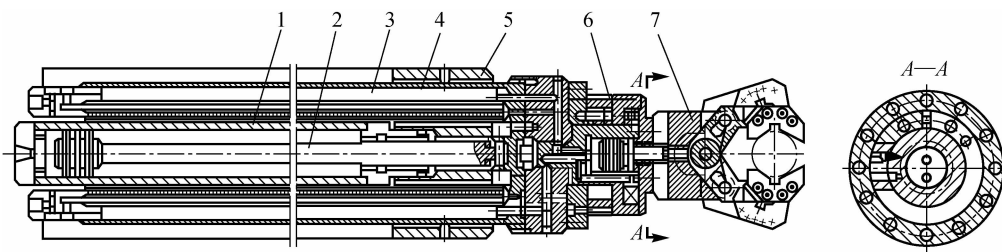


图 3-12 双导向杆手臂的伸缩结构

1—双作用液压缸；2—活塞杆；3—导向杆；4—导向套；
5—支承座；6—手腕回转缸；7—手部

手臂和手腕是通过连接板安装在升降液压缸的上端。当双作用液压缸 1 的两腔分别通入液压油时,推动活塞杆(手臂)2 做往复直线移动;导向杆 3 在导向套 4 内移动,以防手臂伸缩时的转动(并兼作手腕回转缸 6 及手部 7 的夹紧液压缸用的输油管道)。由于手臂的伸缩液压缸安装在两根导向杆之间,由导向杆承受弯曲作用,活塞杆只受拉压作用,故受力简单、传动平稳、外形整齐美观、结构紧凑。

2. 手臂回转运动机构

实现机器人手臂回转运动的机构形式是多种多样的,常用的有叶片式回转缸、齿轮传动机构、链轮传动机构、连杆机构。下面以齿轮传动机构中的活塞缸和齿轮齿条机构为例来说明手臂的回转。

齿轮齿条机构是通过齿条的往复移动,带动与手臂连接的齿轮做往复回转运动,从而实现手臂的回转运动。带动齿条往复移动的活塞缸可以由压力油或压缩气体驱动。手臂升降和回转运动的结构如图 3-13 所示。

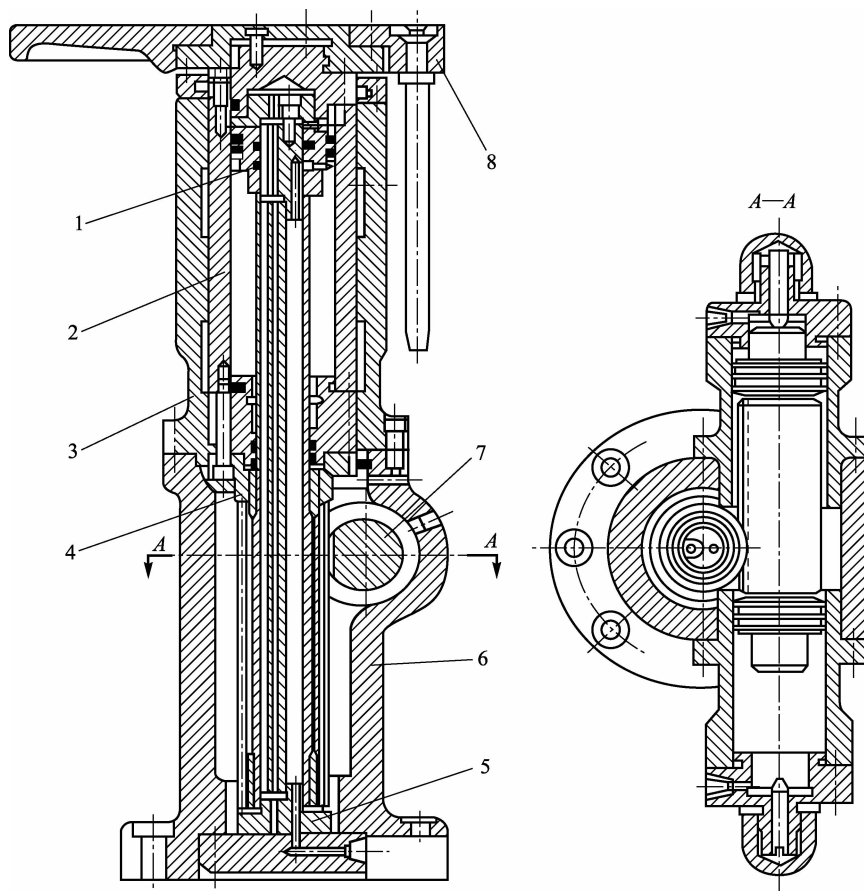


图 3-13 手臂升降和回转运动的结构

1—活塞杆；2—升降缸体；3—导向套；4—齿轮；5—连接盖；
6—机座；7—齿条活塞；8—连接板

活塞液压缸两腔分别进压力油,推动齿条活塞 7 做往复移动(见 A—A 剖面),与齿条活塞啮合的齿轮 4 即做往复回转运动。由于齿轮 4、手臂升降缸体 2 和连接板 8 均用螺钉连接成一体,连接板 8 又与手臂固连,因而实现了手臂的回转运动。升降液压缸的活塞杆 1 通过连接盖 5 与机座 6 连接而固定不动,升降缸体 2 沿导向套 3 做上下移动。升降液压缸因其外部有导向套 3,故刚性好、传动平稳。

3. 手臂俯仰运动机构

机器人的手臂俯仰运动一般采用活塞液压缸与连杆机构来实现。手臂的俯仰运动用的活塞缸位于手臂的下方,其活塞杆和手臂用铰链连接,缸体采用尾部耳环或中部销轴等方式与立柱连接,如图 3-14 所示。

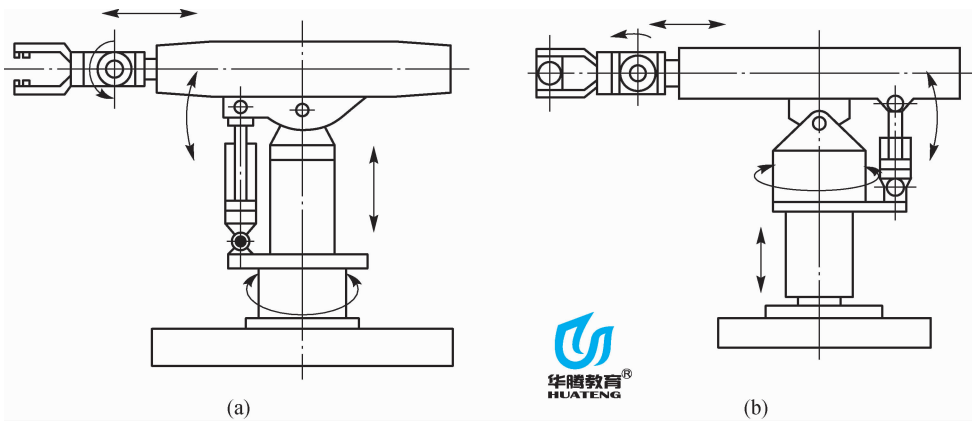


图 3-14 手臂俯仰驱动缸的安装

此外,还可采用铰接活塞缸 2、7 和连杆结构,使小臂 3 相对大臂 1、大臂 1 相对立柱 8 实现手臂 6 的俯仰运动,其结构如图 3-15 所示。

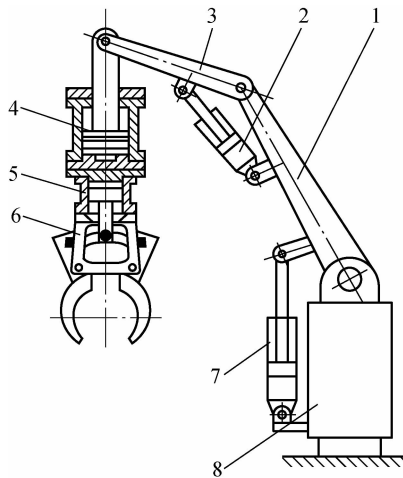


图 3-15 铰链活塞缸实现手臂俯仰的结构

1—大臂；2、7—铰接活塞缸；3—小臂；4—升降缸；5—夹紧缸；6—手臂；8—立柱

4. 手臂复合运动机构

手臂复合运动机构多用于动作程序固定不变的专用机器人,它不仅使机器人的传动机构简单,而且可简化驱动系统和控制系统,并使机器人传动准确、工作可靠,因而在生产中应用得比较多。除手臂实现复合运动外,手腕和手臂的运动也能组成复合运动。

手臂(或手腕)和手臂的复合运动可以由动力部件(如活塞缸、回转缸、齿条活塞缸、齿轮机构等)与常用机构(如凹槽机构、连杆机构、齿轮机构等)按照手臂的运动轨迹(路线)或手臂和手腕的动作要求进行组合。

5. 新型的蛇形机械手臂

目前,普通工业机器人都能够达到 0.1 mm 的重复精度,无论是直线运动,还是绕轴转动,甚至是复杂的曲线移动,现在一般的工业机器人都能够很好地完成。这一方面得益于机

械加工精度的日益提高,另一方面依靠于现代化的控制技术,保证了机器人定位的精确。

蛇形手臂一般具有高度柔性,可深入装配结构中进行均匀涂层,从而提高生产率,适于在飞机翼盒的组装探视工作及引擎组装中进行深度检测等。图 3-16 所示为典型的飞机装配蛇形手臂。

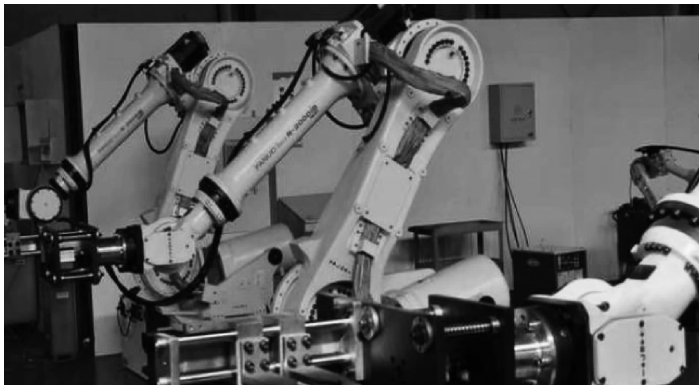


图 3-16 典型的飞机装配蛇形手臂

蛇形机械手臂的原理很简单,它主要由几段组成,每段有 2 个自由度,由 3 根电线控制。每根电线的长度由伺服控制电动机和直线制动器决定,制动器隐藏在手臂底座的制动器包裹内。蛇形机械手臂通过拉动或延伸驱动线的长度来控制形状。用于航空的蛇形机械手臂共有 10 个部分;其他用途的机械手臂则不固定,少则 10 个部分,多则可达 20 个部分。

一旦蛇形机械手臂在合适的位置落定,操作者就可以在笛卡尔模式(Cartesian Mode)下通过操纵杆移动手臂;它也可以自动调整,通过视觉伺服系统为新任务虚位以待。重要的是,当机械手臂收缩时,这一控制程序能够自动考虑到自身的状况而进行姿态调整,因为预先设定的路径可能与实际不一致。

3.5 机器人腕部及手部结构

人类的手是最灵活的肢体部分,能完成各种各样的动作和任务。同样,机器人的手部作为末端执行器是完成抓握工件或执行特定作业的重要部件,需要有多种结构。腕部是臂部与手部的连接部件,起支承手部和改变手部姿态的作用。

3.5.1 机器人腕部结构的基本形式和特点

腕部是机器人的小臂与末端执行器(手部或手爪)之间的连接部件,其作用是利用自身的活动度确定手部的空间姿态。对于一般的机器人,与手部相连接的手腕都具有独驱自转的功能,若手腕能在空间取任意方位,则与之相连的手部就可以在空间取任意姿态,即达到完全灵活。

从驱动方式看,手腕一般有两种形式,即直接驱动和远程驱动。直接驱动是指驱动器(安装在手腕运动关节的附近)直接驱动关节运动,因而传动路线短、传动刚度好,但腕部的尺寸和质量大、惯量大。远程驱动方式的驱动器安装在机器人的大臂、机座或小臂远端上,

通过连杆、链条或其他传动机构间接驱动腕部关节运动,因而手腕的结构紧凑、尺寸小、质量小,对改善机器人的整体动态性能有好处,但传动设计复杂,传动刚度降低。

按转动特点的不同,用于手腕关节的转动可细分为滚转和弯转两种。如图 3-17(a)所示,滚转是指组成关节的两个零件的几何回转中心和相对运动的回转轴线重合,因而能实现 360° 无障碍旋转的关节运动,通常用 R 来标记。如图 3-17(b)所示,弯转是指两个零件的几何回转中心和相对转动轴线垂直的关节运动。由于受到结构的限制,弯转的相对转动角度一般小于 360° 。弯转通常用 B 来标记。

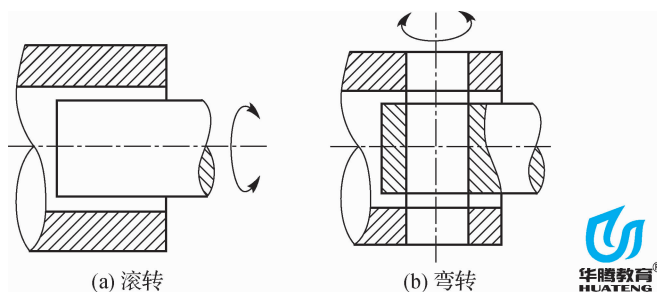


图 3-17 手腕关节的滚转和弯转

1. 腕部自由度

机器人一般具有 6 个自由度才能使手部(末端执行器)达到目标位置和处于期望的姿态。为了使手部能处于空间任意方向,要求腕部能实现对空间 3 个坐标轴 X、Y、Z 的转动,即具有偏转、俯仰和回转 3 个自由度,如图 3-18 所示。

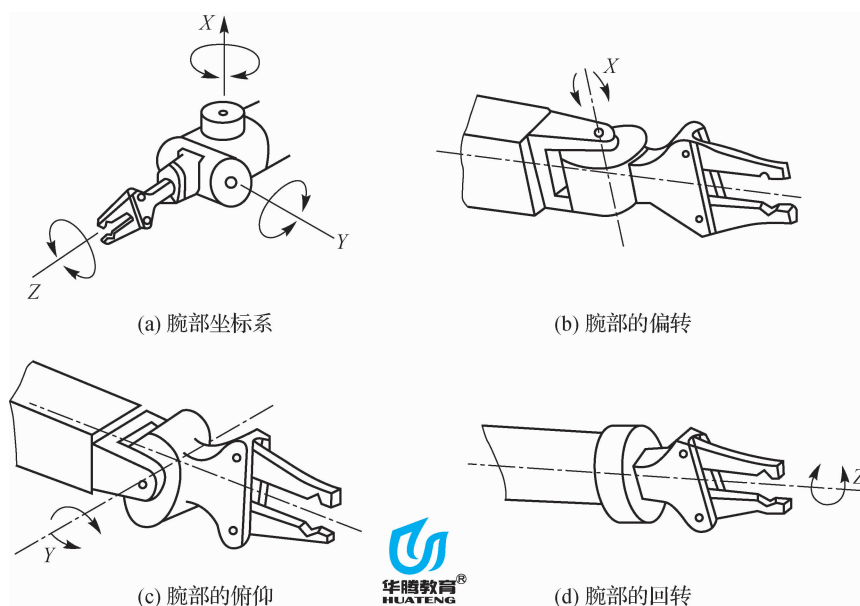


图 3-18 腕部的坐标系和自由度

手腕按自由度个数可分为单自由度手腕、二自由度手腕和三自由度手腕。可以证明,三自由度手腕能使手部取得空间任意姿态。

腕部实际所需要的自由度数目应根据机器人的工作性能要求来确定。在有些情况下,腕部具有两个自由度,即回转和俯仰或回转和偏转。一些专用机械手甚至没有腕部,但有些腕部为了满足特殊要求还有横向移动自由度。6种三自由度手腕的结合方式如图 3-19 所示。

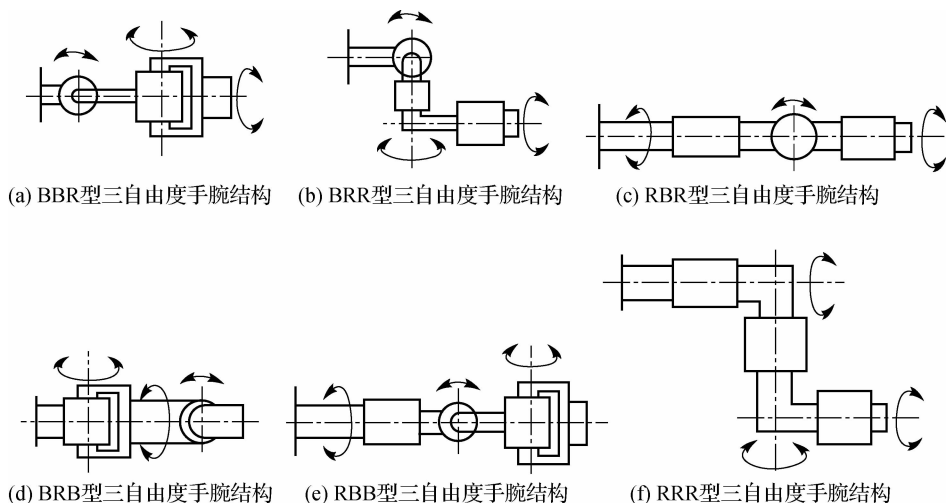


图 3-19 6种三自由度手腕的结合方式

2. RRR 型手腕

RRR 型手腕容易实现远距传动,如图 3-20 所示。RRR 型手腕的结构如图 3-21 所示。

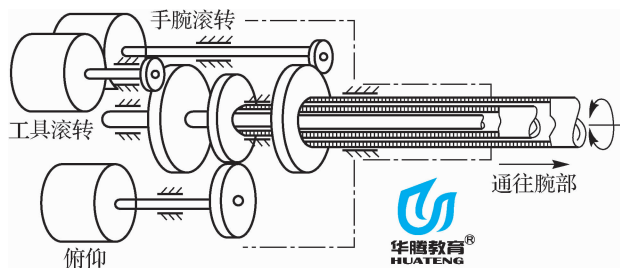


图 3-20 RRR 型手腕关节远程传动

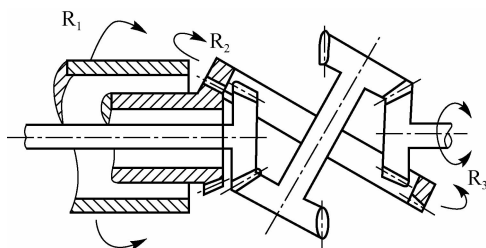


图 3-21 RRR 型手腕的结构

为了实现运动的传递,RRR 型手腕的中间关节是斜置的,3 根转动轴内外套在同一转动轴线上,最外面的转动轴套直接驱动整个手腕转动,中间的轴套驱动斜置的中间关节运动,中心轴驱动第 3 个滚转关节。PUMA-262 型机器人的手腕部就采用了这种远程关节传动形式。RRR 型手腕制造简单,润滑条件好,机械效率高,应用较为普遍。

3. 腕部的典型结构

1) 单自由度手腕

单自由度手腕用回转油缸或气缸直接驱动实现腕部回转运动。图 3-22 所示为采用回转油缸直接驱动的单自由度腕部结构。这种手腕具有结构紧凑、体积小、运动灵活、响应快、精度高等特点,但回转角度受限制,一般小于 270° 。

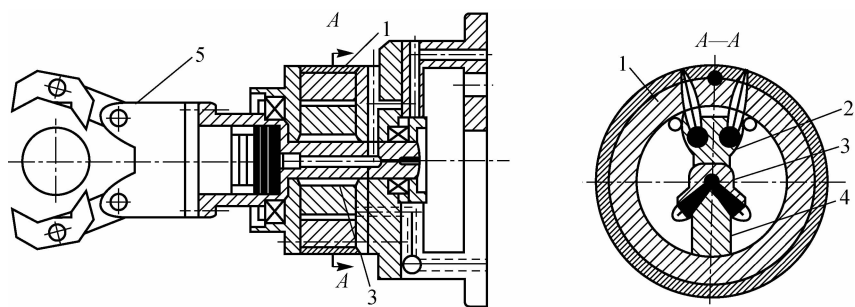


图 3-22 采用回转油缸直接驱动的单自由度腕部结构

1—回转油缸；2—定片；3—腕回转轴；4—动片；5—手腕

2) 二自由度手腕

(1) 双回转油缸驱动的手腕。图 3-23 所示为采用两个轴线互相垂直的回转油缸的腕部结构。 $V-V$ 剖面为腕部摆动回转油缸，工作时，动片 6 带动摆动回转油缸 5 使整个腕部 1 绕固定中心轴 3 摆动。 $L-L$ 剖面为腕部回转油缸，工作时，回转轴 7 带动回转中心轴，实现腕部的回转运动。

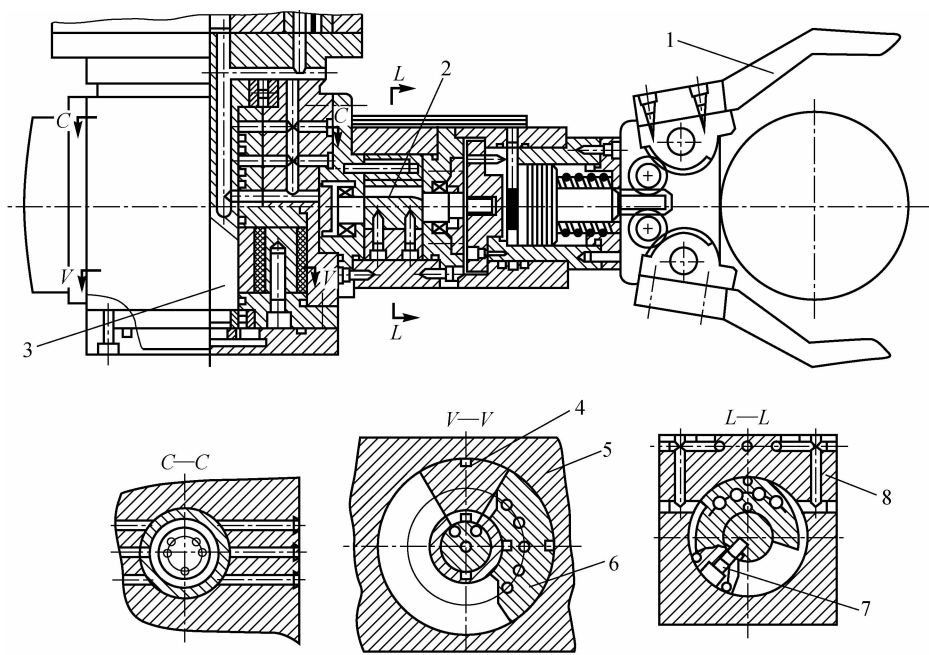


图 3-23 采用两个轴线互相垂直的回转油缸的腕部结构

1—手腕；2—中心轴；3—固定中心轴；4—定片；5—摆动回转油缸；
6—动片；7—回转轴；8—回转油缸

(2) 齿轮传动二自由度腕部。图 3-24 所示为采用齿轮传动机构实现手腕回转和俯仰的原理。手腕的回转运动由传动轴 S 传递,轴 S 驱动锥齿轮 1 回转,并带动锥齿轮 2、3 转动。因手腕与锥齿轮 4 为一体,从而实现手部绕 C 轴的回转运动。手腕的俯仰由传动轴 B 传递,轴 B 驱动锥齿轮 5 回转,并带动锥齿轮 6 绕轴 A 回转,因手腕的壳体 7 与传动轴 A 用销子连接为一体,故而实现手腕的俯仰运动。

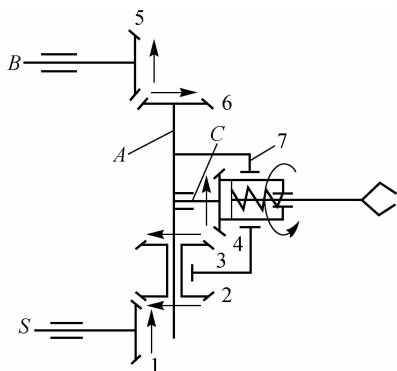


图 3-24 采用齿轮传动机构实现手腕回转和俯仰的原理

1、2、3、4、5、6—锥齿轮；7—壳体

由图 3-24 可知,当轴 S 不转而轴 B 回转时,轴 B 除带动手腕绕轴 A 上下摆动外,还带动锥齿轮 4 绕轴 A 做转动。由于轴 S 不转,故锥齿轮 3 不转,但锥齿轮 4 与 3 相啮合,因此,迫使锥齿轮 4 绕轴 C 有一个附加的自转,即为手腕的附加回转运动。手腕俯仰运动引起的手腕附加回转运动称为诱导运动,这在考虑手腕的回转运动时应予以注意。

这种传动机构结构紧凑、轻巧,传动扭矩大,能提高机器人的工作性能。在示敏型机器人中较多采用这类传动机构作为手腕结构,但该结构的缺点是手腕有一个诱导运动,设计时要注意采取补偿措施,消除诱导运动的影响。

3) 三自由度手腕

(1) 液压直接驱动三自由度手腕。如图 3-25 所示,液压直接驱动三自由度手腕由液压驱动马达直接驱动,具有偏转、俯仰和回转 3 个自由度。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,而驱动力矩大、驱动特性好的驱动电动机或液压驱动马达。

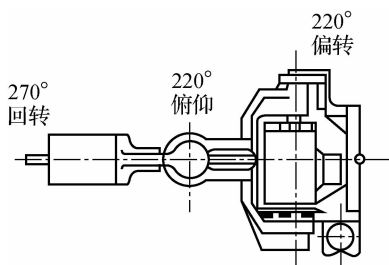


图 3-25 液压直接驱动三自由度手腕

(2) 齿轮链轮传动的三自由度腕部。图 3-26 所示为齿轮链轮传动三自由度手腕的原理。齿轮链轮传动三自由度手腕在图 3-24 的基础上增加了一个 360° 偏转运动。其工作原理如下:当油缸 1 中的活塞做左右移动时,通过链条、链轮 2、锥齿轮 3 和 4 带动花键轴 5 和 6 转动,而花键轴 6 与行星架 9 连成一体,因而也就带动行星架做回转运动,即手腕所增加的 360° 回转运动。由于增加了 T 轴(花键轴)的偏转运动,将诱使手腕产生附加俯仰和附加回转运动。这两个诱导运动产生的原因是当传动轴 B 和传动轴 S 不动时,双联圆柱齿轮 21 和 23 是相对不动的,由于行星架的回转运动,势必引起圆柱齿轮 22 绕双联圆柱齿轮 21 和圆柱齿轮 11 绕双联圆柱齿轮 23 的转动,圆柱齿轮 22 的自转通过锥齿轮 20、16、17、18 传递到摆动轴 19,引起手腕的诱导俯仰运动。而圆柱齿轮 11 的自转通过锥齿轮 12、13、14、15 传递到手部夹紧缸的壳体,使手腕做诱导回转运动。同样当轴 S、T 不动时,轴 B 的转动也会诱使手部夹紧缸的壳体做附加回转运动。设计时要注意采取补偿措施消除诱导运动的影响。

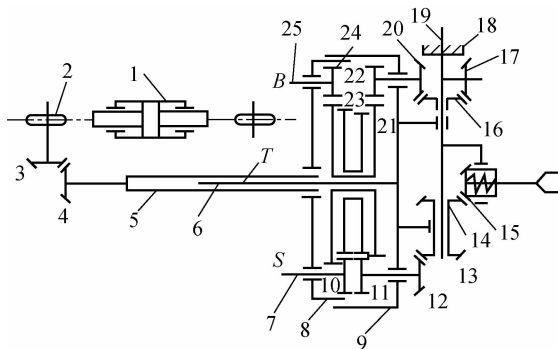


图 3-26 齿轮链轮传动三自由度手腕的原理

- 1—油缸; 2—链轮; 3、4、12、13、14、15、16、17、18、20—锥齿轮; 5、6—花键轴;
7—传动轴 S; 8—腕架; 9—行星架; 10、11、22、24—圆柱齿轮;
19—摆动轴; 21、23—双联圆柱齿轮; 25—传动轴 B

这种机构在轴线重合时会出现奇异状态,即自由度退化。图 3-26 所示手腕所处的位置即为奇异状态。

4. 腕部设计要求

手腕结构是机器人中最复杂的结构,而且因传动系统相互干扰,更增加了手腕结构的设计难度。对腕部的设计要求是质量轻,满足作业对手部姿态的要求,并留有一定的裕量(5%~10%);传动系统结构简单并有利于小臂对整机的静力平衡。一般来说,由于手腕处在开式连杆系末端的特殊位置,它的尺寸和质量对操作机的动态特性与使用性能影响很大。因此,除了要求其动作灵活、可靠外,还应使其结构尽可能紧凑,质量尽可能小。

3.5.2 机器人手部结构的基本形式和特点

用在工业上的机器人的手一般被称为末端操作器,它是机器人直接用于抓取和握紧专用工具进行操作的部件。它具有模仿人手动作的功能,并安装于机器人手臂的前端。机械手能根据计算机发出的命令执行相应的动作,它不仅是一个执行命令的机构,还应该具有识别功能,也就是“感觉”。为了使机器人手具有触觉,在手掌和手指上都装有带弹性触点的元

件;如要感知冷暖,则还可以装上热敏元件。在各指节的连接轴上装有精巧的电位器,它能把手指的弯曲角度转换成外形弯曲信息。把外形弯曲信息和各指节产生的接触信息一起送入计算机,通过计算就能迅速判断机械手所抓取的物体的形状和大小。

1966年,美国海军就是用装有钳形人工指的机器人“科沃”把因飞机失事掉入西班牙近海的一颗氢弹从750 m深的海底捞上来的。1967年,美国飞船“探险者三号”曾把一台遥控操作的机器人送上月球。它在人的控制下,可以在 2 m^2 左右的范围内挖掘月球表面0.4 m深处的土壤样品,并且放在规定位置;还能对样品进行初步分析,如确定土壤硬度、重量等,充当了“阿波罗”载人飞船登月的开路先锋。

现在,机器人手已经具有了灵巧的指、腕、肘和肩胛关节,能灵活自如地伸缩、摆动,手腕也会转动、弯曲。通过手指上的传感器,还能感觉出所抓握东西的质量,可以说已经具备了人手的许多功能。

1. 机器人手部的特点

(1)手部与手腕相连处可拆卸。手部与手腕有机械接口,也可能有电、气、液接头。工业机器人针对不同的作业对象,可以方便地拆卸和更换手部。

(2)手部是机器人的末端执行器。它可以像人手那样具有手指,也可以不具备手指;可以是类人的手爪,也可以是进行专业作业的工具,如装在机器人手腕上的喷漆枪、焊接工具等。

(3)手部的通用性比较差。机器人手部通常是专用的装置。例如,一种手爪往往只能抓握一种或几种在形状、尺寸、重量等方面相近似的工件,一种工具只能执行一种作业任务。

(4)手部是一个独立的部件。假如把手腕归属于手臂,那么机器人机械系统的三大件就是机身、手臂和手部(末端执行器)。手部对整个工业机器人来说是完成作业好坏及作业柔性好坏的关键部件之一。具有复杂感知能力的智能化手爪的出现增加了工业机器人作业的灵活性和可靠性。

目前,工业机器人手部的自由度还比较少,把具备足够驱动力量的多个驱动源和关节安装在紧凑的手内部是十分困难的。

2. 机器人手部的分类

1) 按用途分类

(1)手爪。手爪具有一定的通用性,它的主要功能是抓住工件、握持工件、释放工件。

①抓住工件。在给定的目标位置上以期望姿态抓住工件,工件在手爪内必须具有可靠的定位,保持工件与手爪之间准确的相对位置,并保证机器人后续作业的准确性。

②握持工件。确保工件在搬运过程中或零件在装配过程中定义了位置和姿态的准确性。

③释放工件。在指定点上除去手爪和工件之间的约束关系。

如图3-27所示,平面钳爪夹持圆柱工件时尽管夹紧力足够大,在工件和手爪接触面上有足够的摩擦力来支承工件重量,但是从运动学观点来看其约束条件不够,不能保证工件在手爪上准确定位。