

## 第3章

# 机器人的组成与结构



本章主要介绍机器人的组成,包括机器人的机械结构、机器人的传感器系统、机器人的驱动系统、机器人控制系统等子系统,能够使读者了解机器人机械系统的总体组成,机器人传感器的选择与要求,工业机器人传感器分类,机器人的液压驱动系统、气压驱动和电气驱动系统,工业机器人控制系统的特点、组成及分类和机器人智能控制技术。

### 3.1 机器人的组成

机器人的种类很多,不同结构和用途的机器人其组成当然也不完全一样。这里以工业机器人为例,介绍其组成。工业机器人由机械部分、传感部分、控制部分三大部分组成。这三大部分可分成驱动系统、机械结构系统、传感系统、机器人与环境交互系统、人机交互系统、控制系统六个子系统。工业机械臂的组成如图 3-1 所示。

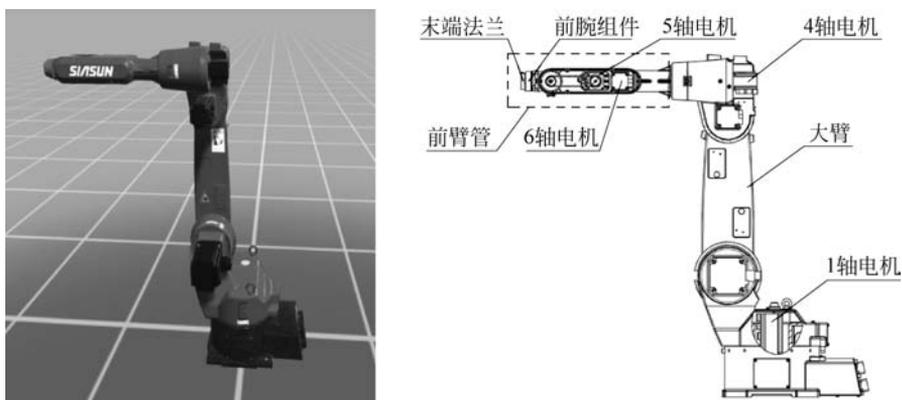


图 3-1 工业机械臂组成

### 3.1.1 驱动系统

要使机器人运行起来,需给各个关节即每个运动自由度安置传动装置,这就是驱动系统。工业机器人的驱动系统,按动力源分为液压、气动和电动三大类。根据需要也可由这三种基本类型组合成复合式的驱动系统。这三类基本驱动系统各有自己的特点。

### 3.1.2 机械结构系统

机器人的机械结构系统由机身、手臂、末端操作器三大件组成。每一大件都有若干自由度构成一个多自由度的机械系统。若机身具备行走机构便构成行走机器人。若机身不具备行走及旋转机构,则构成机器人臂。手臂一般由大臂、小臂和手腕组成。末端操作器是直接装在手腕上的一个重要部件,它可以是两手指或多手指的手爪,也可以是喷漆枪、焊枪等作业工具。

### 3.1.3 传感系统

传感系统由内部传感器模块和外部传感器模块组成,获取内部和外部环境状态中有意义的信息。智能传感器的使用提高了机器人的机动性的水准。人类的感受系统对感知外部世界信息是极其灵巧的。然而,对于一些特殊的信息,机器人比人类的感受系统更有效。

### 3.1.4 机器人与环境交互系统

机器人与环境交互系统是实现机器人与外部环境中的设备相互联系和协调的系统,机器人与外部设备集成为一个功能单元,如加工制造单元、焊单元、装配单元等。当然,也可以是多台机器人、多台机床或设备、多个零件存储装置等集成为一个执行复杂任务的功能单元。

### 3.1.5 人机交互系统

人机交互系统(human-computer interaction system)是人与机器人进行联系和参与机器人控制的装置。人机交互技术是指通过计算机输入、输出设备,以有效的方式实现人与机器人对话的技术。它包括机器人通过输出或显示设备给人提供大量有关信息及提示请示等,人通过输入设备给机器人输入有关信息及提示等。归纳起来为两类:指令给定装置和信息显示装置。例如,计算机的标准终端、指令控制台、信息显示板、危险信号报警器等。人机交互技术是计算机用户界面设计中的重要内容之一,它与认知学、人机工程学、心理学等学科领域有密切的联系。

### 3.1.6 控制系统

控制系统的任务是根据机器人的作业指令程序以及从传感器反馈回来的信号,支配机器人的执行机构去完成规定的运动和功能。如果机器人不具备信息反馈特征,则为开环控制系统;具备信息反馈特征,则为闭环控制系统。根据控制原理可分为程序控制系统、适应性控制系统和人工智能控制系统。根据控制运动的形式可分为点位控制和连续轨迹控制。

## 3.2 机器人的机械结构

### 3.2.1 机器人的机身

机器人机械结构有三大部分：机身、手臂(包括手腕)、手部。机器人机身又称为立柱，是支撑手臂的部件，并能实现手臂的升降、回转或俯仰运动。机器人必须有一个便于安装的基础件，这就是机器人的机座。机座往往与机身做成一体。

机身的典型结构根据采用哪种自由度形式由机器人的总体设计决定。比如，圆柱坐标式机器人把回转与升降两个自由度归属于机身；球坐标式机器人把回转与俯仰两个自由度归属于机身；关节坐标式机器人把回转自由度归属于机身；直角坐标式机器人有时把升降 $Z$ 轴或水平移动 $X$ 轴的自由度归属于机身。一般如没有特殊说明，工业上机器人的机身指机座，机座是整个机器人的支持部分，要有一定的刚度和稳定性。若机座不具备行走功能，则构成固定式机器人；若机座具备移动机构，则构成移动式机器人。

#### 1. 固定式基座

固定式机器人的机座一般用铆钉固定在地面或者工作台上，也有的固定在横梁上，如图 3-2 所示。



(a) 固定在地面 (b) 固定在工作台上 (c) 固定在横梁上

图 3-2 固定式机座

#### 2. 移动式基座

移动式机座有的采用专门的行走装置，有的采用轨道、滚轮机构。其通常由驱动装置、传动机构、位置检测元件、传感器电缆及管路等组成，如图 3-3 所示。

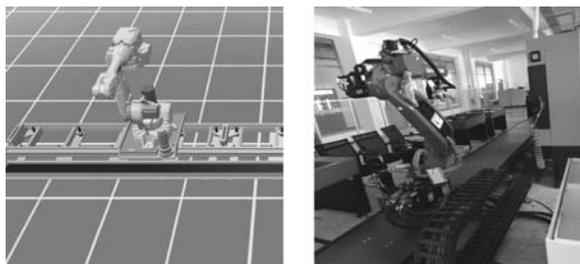


图 3-3 移动式机座

移动式机座一方面支撑机器人的机身、手臂和末端执行器，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。

机身设计要注意的问题：

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

### 3.2.2 机器人的臂部

工业机器人臂部是用来支撑机器人腕部和手部的机构,并用来改变手部在空间中位置的部件。臂部的主要运动有伸缩、回转、横移、升降或俯仰。机器人臂部一般由大臂、小臂(或多臂)组成,用来支撑手腕和末端执行器,实现较大的运动范围。臂部的各种运动通常由驱动结构和各种传动结构来实现,总质量较大,受力一般比较复杂,在运动时,它直接承受手腕、末端执行器和工件的静、动载荷,尤其在高速运动时,将产生较大的惯性力(或惯性力矩),引起冲击,影响定位精度。工业机器人臂部拆装图如图 3-4 所示。

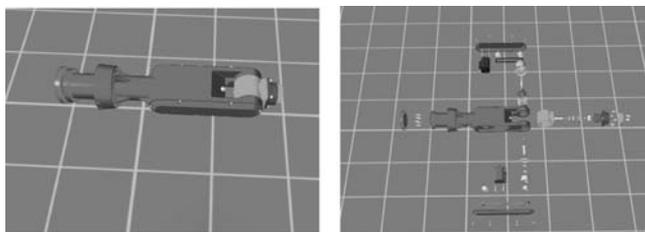


图 3-4 机器人臂部拆装图

#### 1. 机器人臂部设计特点

机器人臂部的结构、工作范围、灵活性、抓重大小(即臂力)和定位精度都直接影响机器人的工作性质,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。手臂的特征如下。

##### 1) 刚度要求高

为防止手臂在运动过程中产生过大的变形,手臂的断面形状要选择合理。工字形断面弯曲刚度一般比圆断面的大;空心管的弯曲刚度和扭转刚度要比实心轴的大得多,所以常用钢管来做臂杆及导向杆,用工字钢和槽钢来做支撑杆。为了提高手臂刚度,也可采用多重闭合的平行四边形的连杆机构代替单一的刚性构件的臂杆,如图 3-5 所示。

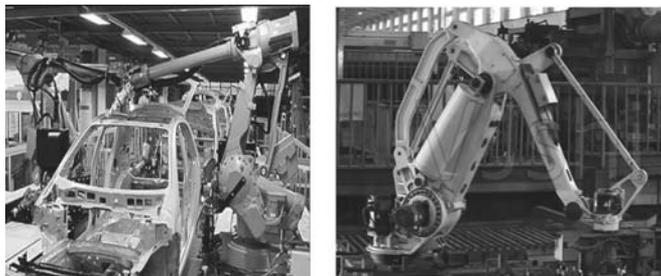


图 3-5 空心管手臂及平行四边形结构手臂

## 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,可将导向装置设计成方形、花键等形式的臂杆。

## 3) 重量要轻

为提高机器人的运动速度,要尽量减轻手臂运动部分的重量,以减小整个手臂对回转轴的转动惯量。可用特殊实用材料和几何学减轻手臂结构的重量,从而也减小了与之直接相关的重力和惯性载荷。由镁合金或铝合金构成的横截面恒定的冲压件,对于实现直线运动的结构来说非常方便。要求高加速度的机器人(喷涂机器人)可用碳和玻璃纤维合成物,使其轻量化。热塑性塑料提供了廉价的连杆结构,但它的负载能力会有所降低。一种机器人的臂部结构图如图 3-6 所示。



图 3-6 轻量化臂杆

## 4) 运动平稳,定位精度高

手臂运动速度越高,惯性力引起的定位前的冲击也就越大,运动不平稳,定位精度也不高。因此,除了手臂设计上要求结构紧凑、重量较轻,同时也要采用一定形式的缓冲措施,例如采用弹簧与气缸作为臂部缓冲装置。

## 2. 手臂分类

### 1) 按结构形式分

按结构形式分,手臂有单臂式、双臂式及悬挂式几种类型,如图 3-7 所示。



图 3-7 手臂的结构形式

### 2) 按运动形式分

按运动形式分,手臂有移动型、旋转型和复合型等几种类型。移动型的手臂,可分为单极型和伸缩型。单极型手臂由一个可沿另外一个固定表面移动的表面组成,具有结构简单和高刚度的优点,如图 3-8 所示。伸缩型手臂本质上是由单极型关节嵌套或组合成的,具有

连接紧凑、伸缩比大、惯性小的优点,如图 3-9 所示。旋转型手臂的运动形式有左右旋转与上下摆动等,如图 3-10 所示。复合型的手臂的组合形式有直线运动和旋转运动的组合、两个直线运动的组合和两个旋转运动的组合等。

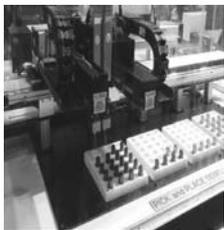


图 3-8 单极型手臂



图 3-9 伸缩型手臂图

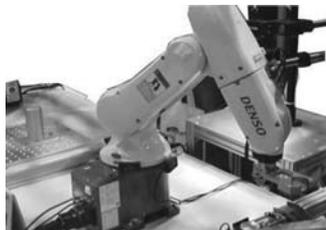


图 3-10 旋转型手臂

### 3.2.3 机器人的手部

机器人的手部也叫末端执行器,相当于人的手,主要作用是夹持工件或让其按照规定的程序完成指定的工作。机器人手部应根据抓取对象和工作条件进行设计。除了其有足够的夹持力外,还要保持适当的精度,手指应能顺应被抓对象的形状。手爪自身的大小、形状、结构和自由度是机械结构设计的要点。要根据作业对象的大小、形状和位姿等几何条件,以及重量、硬度、表面材质等物理条件来综合考虑。同时还要考虑机器人抓手与被抓物体接触后产生的约束和自由度等问题。智能手爪部应该装有相应的传感器(触觉或力传感器等),能感知手爪与物体的接触状态、物体表面状况和夹持力大小等。因此,手部设计的主要研究方向是柔性化、标准化、智能化。

工业机器人的手部直接安装于手腕。有了手部,工业机器人才能搬运物品,装卸材料,组装零件,进行焊接、喷漆等,在处理高温、有毒产品时,它比人手更能适应工作。手部关乎机器人的柔性,关乎工作质量的好坏。有的末端执行器类似人手,有的则是进行某种作业的专用工具,如焊枪、油漆喷头与吸盘等。

根据用途不同,工业机器人手部分为手爪和工具。

#### 1. 机器人手爪

机器人手爪具有一定的通用性,主要功能是抓住工件、握持工件、释放工件。它是直接与工件接触的部件。末端执行器松开和夹紧工件,就是通过手指的张开与闭合实现的。机器人的末端执行器一般有 2 根手指,也有的有 3 根或多根手指,其结构形式常取决于被夹持工件的形状和特性。各种形式的机器人手爪如图 3-11 所示。

#### 2. 机器人手部工具

机器人手部工具是机器人直接用于抓取和握紧(或吸附)专用工具(如喷枪、扳手、焊具、喷头等进行操作的部件。工业机器人是一种通用性很强的自动化设备,配上各种专用的末端执行器

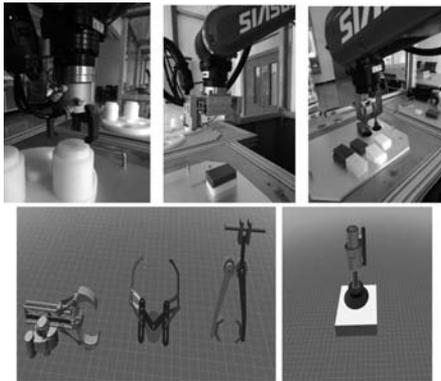


图 3-11 机器人的手爪

后,就能完成各种任务。如在通用机器人上安装焊枪就能使其成为一台焊接机器人,安装吸附式末端执行器则使其成为一台搬运机器人。目前有许多由专用电动、气动工具改型而成的操作器,如装配机、焊枪、电磨头、电钻头、抛光头、激光切割机等。它们形成了一整套的专用末端执行器供用户选用,使机器人能胜任各种工作。机器人末端执行器如图 3-12 所示。

某些机器人的作业任务较为集中,需要更换一定量的末端执行器,又不必配备数量较多的末端执行器库,此时可以在机器人手腕上设置一个多工位的换接装置,如图 3-13 所示。在按钮开关装配工位上,机器人要依次装配开关外壳、复位弹簧、按钮等几种零件,采用多工位换接装置,可以从几个供料位依次抓取几种零件,然后逐个进行装配,这样既可以节省几台专用机器人,也可以避免通用机器人频繁换接操作,节省装配作业时间。



(a) 绘图机器人 (b) 焊接机器人

图 3-12 机器人末端执行器

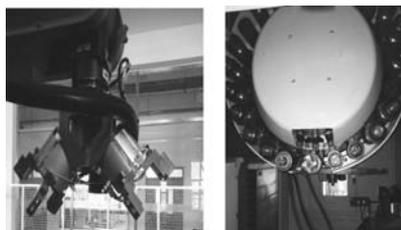


图 3-13 机器人多工具手部

### 3.2.4 机器人的腕部

工业机器人腕部是机器人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。为了使手部能处于空间任意方向,要求腕部能实现对空间三个坐标轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的转动,即具有偏转、俯仰和回转三个自由度,如图 3-14 所示。通常也把手腕的偏转叫作 Yaw,用  $Y$  表示;把手腕的俯仰叫作 Pitch,用  $P$  表示;把手腕的回转叫作 Roll,用  $R$  表示。当手腕具有俯仰、偏转和回转运动能力时,可简称为 RPY 运动。

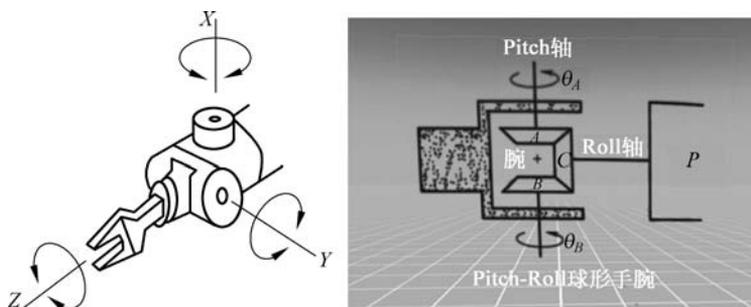


图 3-14 机器人腕部的 RPY 运动

#### 1. 手腕运动形式

手腕回转产生的效果有 3 种。

- (1) 臂转: 绕小臂轴线方向的旋转称为臂转;
- (2) 手转: 使末端执行器(手部)绕自身轴线方向的旋转称为手转;

(3) 腕摆：使末端执行器相对于手臂进行摆动。

图 3-15(a)所示的腕部关节配置为臂转、腕摆、手转结构,图 3-15(b)所示为臂转、双腕摆、手转结构。

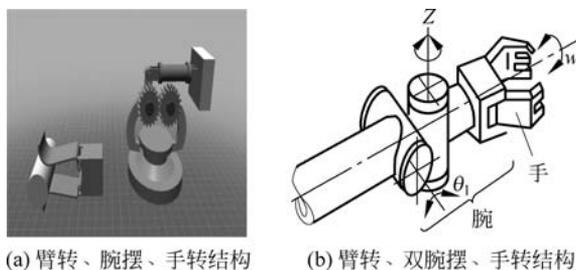


图 3-15 手腕关节配置图

有些手腕为满足使用要求,还可以直线移动。

## 2. 手腕自由度

手腕自由度的选用与机器人的通用性、加工工艺要求、工件放置方位和定位精度等许多因素有关。根据使用要求,一般手腕设有回转或再增加一个上下摆动即可满足工作的要求。若有特殊要求,可增加手腕左右摆动或沿  $Y$  轴方向的横向移动,也有的专用机器人没有手腕的运动。按自由度数目来分,手腕可分为单自由度、二自由度和三自由度。

### 1) 单自由度手腕

该类手腕只有一个自由度,可分为翻转手腕、折曲手腕与移动手腕。

(1) 翻转(Roll)手腕,简称 R 手腕,该手腕关节的  $Z$  轴与手臂纵轴线构成共轴线形式,这种 R 手腕旋转角度大,可达  $360^\circ$  以上。

(2) 折曲(Bend)手腕,简称 B 手腕,该手腕关节的  $X$  轴、 $Y$  轴与手臂纵轴相垂直。这种 B 手腕因为结构上受到干涉,所以旋转角度小,大大限制了方向角。

(3) 移动手腕,简称 T 手腕,该手腕关节做直线移动。

### 2) 二自由度手腕

二自由度手腕可以由一个 R 关节和一个 B 关节组成 BR 手腕,如图 3-16(a)所示,也可以由两个 B 关节组成 BB 手腕,如图 3-16(b)所示。但是,不能有如图 3-16(c)所示的两个共轴线的 R 关节组成 RR 手腕,因为它实际只构成了单自由度手腕。

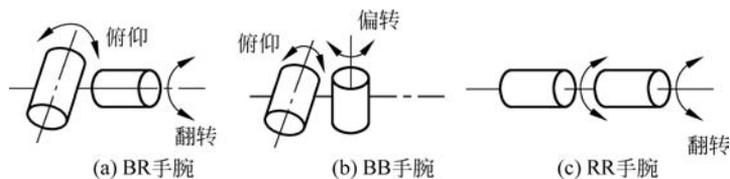


图 3-16 二自由度手腕

### 3) 三自由度手腕

三自由度手腕由 B 关节和 R 关节组合而成,组合的方式多种多样,图 3-17(a)所示为 BBR 手腕,可进行 RPY 运动。图 3-17(b)所示为一个 B 关节和两个 R 关节组成的 BRR 手腕,为了不使自由度退化,使末端执行器获得 RPY 运动,第一个 R 关节必须如图配置。

图 3-17(c)所示为 3 个 R 关节组成的 RRR 手腕,它也可以实现手部 RPY 运动。图 3-17(d)所示为 BRB 手腕,很明显,它已经退化为二自由度手腕。此外,B 关节和 R 关节排列的次序不同,会产生不同形式的三自由度手腕。为了使手腕结构紧凑,通常把两个 B 关节安装在一个十字接头上,这可以大大减小 BBR 手腕的纵向尺寸。

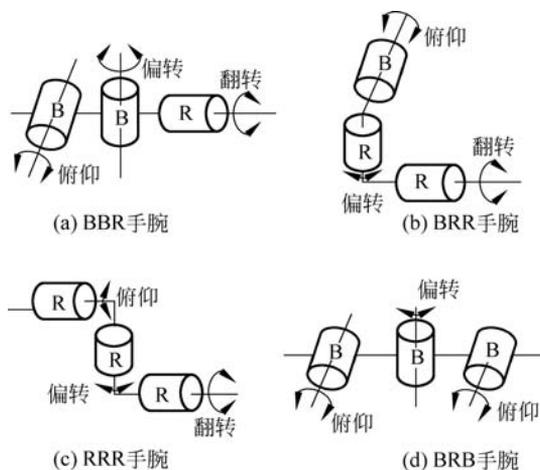


图 3-17 三自由度手腕

### 3. 柔顺手腕结构

在用机器人进行的精密装配作业中,被装配零件之间的配合精度相当高,由于被装配零件的不一致性或工件的定位夹具和机器人手爪的定位精度无法满足装配要求时,会导致装配困难,因此提出了装配动作的柔顺性要求。其动作过程如图 3-18(a)所示,在插入装配中工件局部被卡住时,将会受到阻力,促使柔顺手腕起作用,手爪产生一个微小的修正量,使工件能顺利插入。图 3-18(b)所示是采用板弹簧作为柔性元件组成的柔顺手腕,在基座上通过板弹簧 1、板弹簧 2 连接框架,框架另两个侧面上通过板弹簧 3、板弹簧 4 连接平板和轴。装配时通过 4 块板弹簧的变形实现柔顺装配。

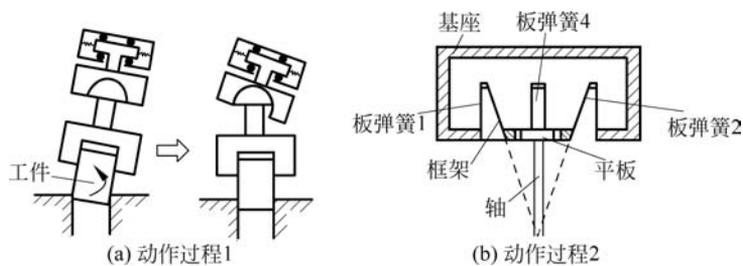


图 3-18 柔顺手腕动作过程

### 3.2.5 机器人的行走机构

机器人的行走机构可分成固定式和行走式两种。一般的机器人多为固定式,但随着海洋科学、原子能工业及宇宙空间事业的发展,移动机器人、自动行走机器人的应用也越来越多。行走机构是行走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、手臂,另一方面还根据工作任务的要求,带动机器人在广阔的空间内运动。

行走机构按其行走运动轨迹,可分为固定轨迹式和无固定轨迹式。固定轨迹式行走机构主要用于工业机器人。无固定轨迹式的行走方式,按其行走机构的结构特点,可分为轮式、履带式 and 步行式。它们在行走过程中,前两者与地面为连续接触,后者为间断接触。前两者的形态为运行车式,后者则为人类(或动物)的腿脚式。运行车式的行走机构用得比较多,多用于野外作业,技术比较成熟。步行式行走机构正在发展和完善中。

### 1. 固定轨迹式行走机构

固定轨迹式行走机构主要用于工业机器人,如横梁式移动机器人。其机身设计成横梁式,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、能有效地利用空间、直观等优点。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,也可专门从地面架设,如图 3-19 所示。图 3-20 是新松 AGV 小车,沿地面粘贴的导引磁条的固定路线行走。



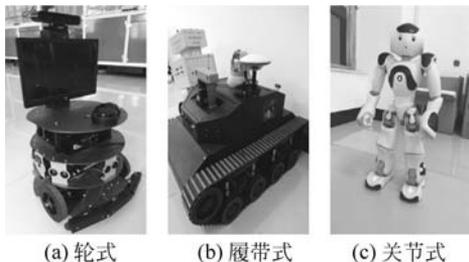
图 3-19 横梁式移动机器人



图 3-20 沿固定轨迹移动的机器人

### 2. 无固定轨迹式行走机构

无固定轨迹式行走机构,按其结构特点可分为轮式行走机构、履带式行走机构和关节式行走机构。在行走过程中,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,分别如图 3-21(a)和图 3-21(b)所示;后者与地面为间断接触,类似人类(或动物)的腿脚式行走,该机构正在发展和完善中,如图 3-21(c)所示。



(a) 轮式 (b) 履带式 (c) 关节式

图 3-21 无固定轨迹式行走机构

行走机构设计应注意的问题:

- (1) 平稳性。平稳性是行走机构设计首先要考虑的问题,不但要求在行走时保持平衡,而且在静止时也要保持平衡。
- (2) 灵活性,行走机构要求其具有人的一些智能,比如变向、转向、越障等。

## 3.3 机器人的传感器系统

### 3.3.1 机器人的传感器技术概述

人类具有五种感觉(视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉),机器人需要通过传感器得到这些感觉信息。目前机器人只具有视觉、听觉和触觉,这些感觉是通过相应传感器得到的。为了使机器人更好地完成各项工作任务,需要给机器人装备各种感觉系统。由于技术上的原因,早期的工业机器人大部分都不具备对外界的感能力,它们无法代替人工去完成那些靠自我感觉才能完成的工作,极大地限制了机器人的应用范围。因此,为机器人研制和装备各种各样的感觉系统已成为人们越来越迫切的要求。

传感器是按一定规律实现信号检测并将被测量(物理的、化学的和生物的信息)通过变换器变换为另一种物理量(通常是电压或电流)。它既能把非电量变换为电量,也能实现电量之间或非电量之间的相互转换。总而言之,一切获取信息的仪表器件都可称为传感器。

国际上,传感技术被列为六大核心技术(计算机、激光、通信、半导体、超导和传感)之一,传感技术也是现代信息技术的三大基础(传感技术、通信技术、计算机技术)之一。传感器一般由敏感元件、转换元件、基本转换电路 3 部分组成,如图 3-22 所示。



图 3-22 传感器的组成

敏感元件是能直接感受被测量,并以确定关系输出某一物理量的元件,如弹性敏感元件可将力转换为位移或应变;转换元件可将敏感元件输出的非电物理量转换成电量;基本转换电路将由转换元件产生的电量转换成便于测量的电信号,如电压、电流、功率等。

传感器可以按不同的方式进行分类,例如,按被测物理量、按传感器的工作原理、按传感器转换能量的情况、按传感器的工作机理、按传感器输出信号的形式(模拟信号、数字信号)等分类。

按机器人用传感器功能可分为检测内部状态信息的内部信息传感器以及检测外部对象和外部环境状态的外部信息传感器。内部信息传感器包括检测位置、速度、力、力矩、温度以及异常变化的传感器。外部信息传感器包括视觉传感器、触觉传感器、力觉传感器、接近觉传感器、角度觉(平衡觉)传感器等。具有多种外部传感器是先进机器人的重要标志。

### 3.3.2 机器人传感器的选择与要求

据有关资料统计,目前已有近 10 万种传感器面市。但并不是所有的传感器均能用于机器人,因为机器人用传感器的要求比较严格,且机器人的控制系统是由计算机控制的,传感器的输出信号必须是电信号才能适用。机器人用传感器的选择包括三个方面:①传感器类型的选择;②传感器性能指标的选择;③传感器物理特征的选择。

### 1. 传感器类型的选择

#### 1) 从机器人对传感器的需要来选择

尽管过去大多数机器人并没有对外界的感觉得能力,它们也能完成各种各样的任务,但由于缺乏感觉得能力,确实已经影响了它们所完成任务的数量和质量。如果这些机器人具备了感觉得能力,它们不但能够更好地完成这些任务,而且能够完成更多更重要的任务。

为了说明机器人对传感器的需要,可以把机器人和人类进行工作的情况加以比较。人类具有相当强的对外感觉得能力,尽管有时人的动作并不十分准确,但是人可以依靠自己的感觉得反馈来调整或补偿自己动作的误差,从而能够完成各种简单的或复杂的工作任务。由此可见,感觉得能力能够补偿动作精度的不足。另一方面,人们的工作对象有时是很复杂的,例如,当人抓取一个物体时,该物体的大小和软硬程度不可能是绝对相等的,有时甚至差别比较大。但人能依靠自己的感觉得能力用恰当的夹持力抓起这个物体并且不损坏它,所以有感觉得能力才能适应工作对象的复杂性,才能有效地完成工作任务。过去,由于机器人没有感觉得能力,唯一的办法就是提高它的动作精度并限制工作对象不能很复杂。但是,动作精度的提高受到了各方面的限制,不可能无限制地提高;工作对象有时也是很难限制的。所以,要使机器人完成更多的任务或者工作得更好,使机器人具有感觉得能力是十分必要的。

机器人也和人一样,必须收集周围环境的大量信息,才能更有效地工作。在拾拾物体时,它们需要知道该物体是否已经被捡起,否则下一步的工作就无法进行。当机器人手臂在空间运动时,它必须避开各种障碍物,并以一定的速度接近工作对象。机器人所要处理的工作对象有的质量很大,有的容易破碎,或者有时湿度很高,所有这些特征和环境情况一样,都要机器人进行识别并通过计算机处理确定相应的对策,使机器人更好地完成工作任务。

以机器人弧焊加工为例。机器人弧焊是在被焊接件上沿需要的路线把被焊接件连接在一起。假如机器人没有感觉得能力,不能自行观察焊接,那么只能在机器人预先编程时精确地输入焊接位置进行焊接。在这种情况下,实际工作中焊接不允许有误差,机器人的运行轨迹也不允许有误差,否则焊缝就会出现误差。这样必然对机器人和被焊接工件提出很高的要求,这些要求有时是很难达到的。为此,人们开始在弧焊机器人上装备感觉得系统,例如较先进的焊接自动跟踪系统。一旦机器人偏离实际工件的焊缝,焊缝自动跟踪系统将反馈偏离信息,机器人允许焊接的工件及其焊缝存在一定的误差,机器人的运动轨迹精度也不需要太高。由此可见,采用机器人感觉得系统将有助于降低机器人的工作精度要求,并提高其工作适应能力和扩大其应用范围。

机器人需要的最重要的感觉得能力可以分为以下几类。

- (1) 简单触觉: 确定工作对象是否存在。
- (2) 复杂触觉: 确定工作对象是否存在以及其形状和尺寸等。
- (3) 简单力觉: 沿一个方向测量力。
- (4) 复合力觉: 沿一个以上方向测量力。
- (5) 接近觉: 对工作对象的非接触探测等。
- (6) 简单视觉: 孔、边、拐角等的检测。
- (7) 复合视觉: 识别工作对象的形状等。

除了上述能力以外,机器人有时还需要具有温度、湿度、压力、滑动量、化学性质等的感觉得能力。

## 2) 机器人对传感器的一般要求

(1) 精度高,重复性好。机器人传感器的精度直接影响机器人的工作质量。用于检测和控制机器人运动的传感器是控制机器人定位精度的基础。机器人是否能够准确无误地正常工作,往往取决于传感器的测量精度。

(2) 稳定性好,可靠性高。机器人传感器的稳定性和可靠性是保证机器人能够长期稳定可靠地工作的必要条件。机器人经常是在无人照管的条件下代替人工操作的,万一它在工作中出现故障,轻则影响生产的正常进行,重则造成严重的事故。

(3) 抗干扰能力强。机器人传感器的工作环境往往比较恶劣,机器人传感器应当能够承受强电磁干扰、强振动,并能够在一定的高温、高压、重污染环境正常工作。

(4) 重量轻,体积小,安装方便可靠。对于安装在机器人手臂等运动部件上的传感器,重量要轻,否则会加大运动部件的惯性,影响机器人的运动性能。对于工作空间受到某种限制的机器人,体积和安装方向的要求也是必不可少的。

(5) 价格便宜。

## 3) 从加工任务的要求来选择

在现代工业中,机器人被用于执行各种加工任务。其中比较常见的加工任务有物料搬运、装配、喷漆、焊接、检验等。不同加工任务对机器人提出了不同的要求。

目前,多数搬运机器人尚不具备感觉能力,它们只能在指定的位置上拾取确定的零件。另外,在机器人拾取零件之前,除了需要给机器人定位以外,还需要采取各种辅助设备或工艺措施,把被拾取的工件准确定位和定向,这就使得加工工序或设备更加复杂。如果搬运机器人具有感觉能力,就会改善这种状况。搬运机器人所需要的感觉能力有视觉、触觉和力觉等。视觉系统主要用于被拾取工件的粗定位,使机器人能够根据要求寻找应该拾取的零件,并把该零件的大致位置告诉机器人。触觉传感器的作用包括3个方面:感知被拾取零件的存在;确定该零件的准确位置;确定该零件的方向。触觉传感器有助于机器人更加可靠地拾取零件。力觉传感器主要用于控制搬运机器人的夹持力,防止机器人手爪部损坏被加工的零件。

装配机器人对传感器的要求类似于搬运机器人,它也需要视觉、触觉和力觉等感觉能力。通常,装配机器人对工作位置的要求更高。现在,越来越多的机器人正在进入装配工作领域,其主要任务是装配一些销、轴、螺钉和螺栓等。为了使被装配的零件对准对应的装配位置,以前常用的方法是提高装配表面的位置精度和机器人的定位精度。由于各方面因素对提高精度有严格的限制,这种方法往往很难实现。现在开始依靠机器人的感觉能力解决这个问题,即采用机器人视觉系统、触觉和力觉传感器来控制机器人装配操作。装配机器人在进行装配工作时,首先运用视觉系统选择合适的装配零件,机器人感觉系统能够自动校正装配位置。

## 4) 从机器人控制的要求来选择

机器人控制需要采用传感器检测机器人的运动位置、速度、加速度。除了较简单的开环控制机器人外,多数机器人都采用了位置传感器作为闭环控制中的反馈元件。机器人根据位置传感器反馈的位置信息,对机器人的运动误差进行补偿。不少机器人还装备有速度传感器和加速度传感器。加速度传感器可以检测机器人构件受到的惯性力,使控制能够补偿惯性力引起的变形误差。速度检测用于预测机器人的运动时间,计算和控制由离心力引起

的变形误差。

#### 5) 从辅助工作的要求来选择

工业机器人在从事某些辅助工作时也要求有一定的视觉能力。这些辅助工作包括产品的检验和工件的准备等。

机器人在外观检验中的应用日益增多。机器人在这方面的主要用途有检查毛刺、裂缝孔洞的存在,确定表面粗糙度和装饰质量,检查装配体的完成以及确定装配精度等。在外观检验中,机器人主要需要视觉能力。有时也需要其他类型的传感器。

在目前的工厂里,人们总是习惯于把各种零件分类,并分放在各个料盘中,这样零件的运输比较方便。在工件进行加工或装配以前,需要用机器人把它们从料盘中拣出来,这就要求机器人能够在料盘中寻找和识别需要捡拾的零件,并对它们定位和定向。所以,要求从事辅助工作的机器人具有一定的视觉能力。另外,机器人抓取零件时,还需要在手爪上安装传感器,以便检测手爪是否接触到所需抓取的零件。在机器人放置零件时,检测零件是否放置到位。

#### 6) 从安全方面的要求来选择

从安全方面考虑,机器人对传感器的要求包括以下两个方面。

(1) 为了使机器人安全地工作而不受损坏,机器人的各个构件都不能超过其受力极限。

人类在工作时,总是利用自己的感觉反馈,控制使用的肌肉力量不超过骨骼和肌腱的承受能力。同样,为了机器人的安全,也需要监测其各个连杆和各个构件的受力,这就需要采用各种力传感器。现在多数机器人是采用加大构件尺寸的办法来避免其自身损坏的。如果采用力监测控制的方法,就能大大改善机器人的运动性能和工作能力,并减小构件尺寸和减少材料的消耗。机器人自我保护的另一个问题是要防止机器人和周围物体的碰撞,这就要求采用各种触觉传感器。有些工业机器人已经采用触觉导线加缓冲器的方法来防止碰撞的发生。一旦机器人的触觉导线与周围物体接触,立刻向控制系统发出报警信号,在碰撞发生以前,使机器人停止运动。防止机器人与周围物体碰撞也可以采用接近觉传感器。

(2) 从保护机器人使用者的安全出发,也要考虑对机器人传感器的要求。

工业环境中的任何自动化设备都必须装有安全传感器,以保护操作者和附近的其他人,这是劳动安全条例所规定的。要检测人的存在可以使用防干扰传感器,它能够自动关闭工作设备或者向接近者发出警告。有时并不需要完全停止机器人的工作,在有人靠近时,可以暂时限制机器人的运动速度。在对机器人进行示教时,操作者需要站在机器人旁边和机器人一起工作,这时操作者必须按下安全开关,机器人才能工作。即使在这种情况下,也应当尽可能设法保护操作者的安全。例如,可以采用设置安全区域的办法限制机器人不能超出特定的工作区域。另外,在任何情况下都需要安排一定的传感器,检测控制系统是否正常工作,以防止由于控制系统失灵而造成意外事故。

#### 2. 传感器性能指标的选择

结构型传感器和物理型传感器:利用运动定律、电磁定律以及气体压力、体积、温度等物理量间的关系制成的传感器都属于结构型传感器。这种传感器的特点是传感器原理明确,不易受环境影响,且传感器的性能受其结构材料的影响不大,但是结构比较复杂。常用的结构型传感器有电子开关、电容式传感器、电感式传感器、测速码盘等。物理型传感器是利用物质本身的某种客观性质制成的传感器。这类传感器的性能受材料性质和使用环境的

影响较大。物理型传感器的优点是结构简单、灵敏度高。光电传感器、压电传感器、压阻传感器、电阻应变传感器等都是机器人常用的物理型传感器。

**接触型传感器和非接触型传感器：**接触型传感器在正常工作时需要和被检测对象接触，如开关、探针和触点等。非接触型传感器则必须与被测对象保持一段距离，通过某种中间传递介质进行工作。磁场、光波、声波、红外线、X射线等是常见的中间传递介质。接触型传感器主要是将被测量对象的机械运动量转变成为电量输出，在实际使用中，经常需要把这些输出电量转换成为计算机所要求的数字信号，然后输入计算机进行分析计算，实现对机器人的感觉反馈控制。接触型传感器常见的工作方式有电子开关的关闭、电位器触点的移动、压电材料的电压变化等。接触型传感器工作比较稳定可靠，受周围环境的干扰较小。对电磁信号或声波信号进行检测是非接触型传感器的主要工作方式。磁场、电场、可见光、红外线、紫外线和X射线都属于电磁现象。检测这些电磁波的存在状态及其变化情况，就是非接触型传感器工作的根本原理。声波传感器则是靠发射某种频率的声波信号，检测周围物体的反射回波和声波的传播时间，以获得某种感觉能力。由于非接触型传感器不与被测物体接触，所以它不会影响被测物体的状态，这是非接触型传感器的主要优点。在选择机器人传感器时，最重要的是确定机器人需要传感器做些什么事情，达到什么样的性能要求。根据机器人对传感器的工作类型要求，选择传感器的类型。根据这些工作要求和机器人需要某种传感器达到的性能要求，选择具体的传感器。传感器的主要性能指标如下。

#### 1) 灵敏度

灵敏度指传感器的输出信号达到稳态时，输出信号变化与传感器输入信号变化的比值。若输出和输入具有相同的量纲，则传感器的灵敏度也称为放大倍数。假如传感器的输出和输入呈线性关系，其灵敏度可表示为

$$s = \Delta y / \Delta x$$

式中， $s$  为传感器的灵敏度；

$\Delta y$  为传感器输出信号的增量；

$\Delta x$  为传感器输入信号的增量。

假设传感器的输出与输入呈非线性关系，则其灵敏度就是该曲线的导数。传感器输出量的量纲和输入量的量纲不一定相同。一般来说，传感器的灵敏度越大越好，这样可以使传感器的输出信号精确度更高、线性程度更好。但是过高的灵敏度有时会导致传感器的输出稳定性下降，所以应该根据机器人的要求选择大小适中的传感器灵敏度。

#### 2) 线性度

线性度指衡量传感器的输出信号和输入信号之比是否保持为常数的指标。机器人控制系统应该采用线性度较高的传感器。假设传感器的输出信号为  $y$ ，输入信号为  $x$ ，则  $y$  与  $x$  的关系可表示为

$$y = bx$$

若  $b$  为常数，或者近似为常数，则传感器的线性度较高；如果  $b$  是一个变化较大的量，则传感器的线性度较差。实际上，只有在少数情况下，传感器的输出和输入才呈线性关系。在大多数情况下， $b$  都是  $x$  的函数，即

$$b = f(x) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n$$

如果传感器的输入量变化不太大，且  $a_1, a_2, \cdots, a_n$  都远小于  $a_0$ ，那么可以取  $b_0 = a_0$ 。

### 3) 测量范围

测量范围指传感器被测量的最大允许值和最小允许值之差。一般要求传感器的测量范围必须覆盖机器人有关被测量的工作范围。如果无法达到这一要求,可以设法选用某种转换装置。但是,这样会引入某种误差,传感器的测量精度将受到一定影响。

### 4) 精度

精度指传感器的测量输出值与实际被测值之间的误差。应该根据机器人的工作精度要求,选择合适的传感器精度。假如传感器的精度不能满足检测机器人工作精度的要求,机器人则不可能完成预定的工作任务。但是如果对传感器的精度要求过高,不但制造比较困难,而且成本也较高。应注意传感器精度的适用条件和测试方法。所谓适用条件应当包括机器人所有可能的工作条件,例如不同温度、湿度,不同的运动速度、加速度以及在可能范围内的各种负载作用等。用于检测传感器精度的测试仪器必须具有高一级的精度,精度的测试也要考虑到最坏的工作条件。

### 5) 重复性

重复性指传感器在其输入信号按同一方向进行全量程连续多次测量时,其相应测试结果的变化程度。测试结果的变化越小,传感器的测量误差就越小,重复性越好。对于多数传感器来说,重复性指标都优于精度指标。这些传感器的精度不一定很高,但是只要它的温度、湿度、受力条件和其他使用参数不变,传感器的测量结果也没有多大变化。同样,传感器重复性也应当考虑适用条件和测试方法的问题。对于示教再现型机器人,传感器的重复性是至关重要的,它直接关系到机器人能否准确地再现其示教轨迹。

### 6) 分辨率

分辨率指传感器在整个测量范围内所能辨别的被测量的最小变化量,或者所能辨别的不同被测量的个数。如果它辨别的被测量最小变化量越小,或被测量个数越多,则它的分辨率越高;反之,分辨率越低。无论是示教再现型机器人,还是可编程型机器人,都对传感器的分辨率有一定的要求。传感器的分辨率直接影响机器人的可控程度和控制质量。一般需要根据机器人的工作任务规定传感器分辨率的最低限度要求。

### 7) 响应时间

响应时间是一个动态特性指标,指传感器的输入信号变化以后,其输出信号变化到一个稳态值所需要的时间。在某些传感器中,输出信号在到达某一稳定值输出之前会发生短时间的振荡。传感器输出信号的振荡,对于机器人的控制来说是非常不利的,它有时会造成一个虚设位置,影响机器人的控制精度和工作精度,所以总是希望传感器的响应时间越短越好。响应时间的计算应当以输入信号开始变化的时刻为始点,以输出信号达到稳态值的时刻为终点。事实上,还需要规定一个稳定值范围,只要输出信号的变化不再超出该范围,即可认为它已经达到了稳态值。对于具体的机器人传感器应规定响应时间的允许上限。

### 8) 可靠性

对于所有机器人来说,可靠性是十分重要的。由于一个复杂的机器人系统通常是由上百个元件组成的,所以每个元件的可靠性要求就应当更高。必须对机器人传感器进行例行试验和老化试验,凡是不能经受工作环境考验的传感器都必须尽早剔除,否则将给机器人可靠的工作留下隐患。可靠性的要求还应当考虑维修的难易程度。对于安装在机器人内部不

易更换的传感器,应当提出更高的可靠性要求。

### 3. 传感器物理特征的选择

#### 1) 尺寸和质量

尺寸和质量是机器人传感器的重要物理参数。机器人传感器通常需要装在机器人手臂上或手腕上,与机器人手臂一起运动,它也是机器人手臂驱动器负载的一部分。所以,它的尺寸和质量将直接影响机器人的运动性能和工作性能。假如传感器的尺寸和质量过大,有时会使机器人的结构尺寸增大,重量和惯量也随之增大,使机器人的运动加速度受到限制,运动灵活性降低;由于机器人总的惯量增大,使机器人更难控制,很难达到所需要的运动精度。因此,减小机器人传感器的尺寸和质量是传感器设计、选用的主要要求之一。

#### 2) 输出形式

传感器的输出形式可以是某种机械运动,也可以是电压和电流,还可以是压力、液面高度或厚度等。传感器的输出形式一般是由传感器本身的工作原理所决定的。由于目前机器人的控制大多是由计算机完成的,传感器的输出信号通过计算机分析处理,一般希望传感器的输出最好是计算机可以直接接受的数字式电压信号,所以应该优先选用这一输出形式的传感器。

#### 3) 可插接性

传感器的可插接性不但影响传感器使用的方便程度,而且影响机器人结构的复杂程度。如果传感器没有通用外插口,或者需要采用特殊的电压或电流供电,在使用时不可避免地需要增加一些辅助性设备和工件,机器人系统的成本就会因此而提高。另外,传感器输出信号的大小和形式也应当尽可能地和其他相邻设备的要求相匹配。

### 3.3.3 工业机器人传感器分类

机器人传感器按功能可分为两大类:内部状态传感器和外部状态传感器。内部状态传感器用于检测一些变量,例如臂关节位置,以便完成机器人控制。而外部状态传感器则用于检测外部一些变量,例如距离、接近程度和接触。这些外部传感器,用于机器人引导以及物体识别和处理。

内部状态传感器是用于测量机器人自身状态参数的功能元件,具体检测的对象有关节的线位移、角位移等几何量,速度、角速度、加速度等运动量,还有电动机扭矩等物理量。它常被用于控制系统中,是当今机器人反馈控制中不可缺少的元件。该类传感器安装在机器人中,用来感知机器人自身的状态,以调整和控制机器人的行动。

外部状态传感器用于测量与机器人作业有关的外部信息,这些外部信息通常与目标识别、作业安全等有关。检测机器人所处环境(如距离物体有多远等)及状况(如抓取物体是否滑落等)都要使用外部状态传感器。外部状态传感器可获取机器人周围环境、目标物的状态特征等相关信息,使机器人和环境发生交互作用,从而使机器人对环境有自校正和自适应能力。根据机器人是否与被测对象接触,外部状态传感器可分为接触传感器和非接触传感器,常用的外部状态传感器有力觉传感器、触觉传感器、接近觉传感器、视觉传感器等。一些特殊领域应用的机器人还可能需要具有温度、湿度、压力、滑动量、化学性质等感觉能力的传感器。传统的工业机器人仅采用内部状态传感器,用于对机器人运动、位置及姿态进行精确控制。外部状态传感器使得机器人对外部环境具有一定程度的适应能力,从而表现出一定程

度的智能性。机器人传感器的分类如图 3-23 所示。

给工业机器人装备什么样的传感器,对这些传感器有什么要求,这是设计机器人感觉系统时遇到的首要问题。选择机器人传感器应当完全取决于机器人的工作需要和应用特点。因此要根据检测对象、具体的使用环境选择合适的传感器,并采取适当的措施,减小环境因素产生的影响。

1. 机器人的内部状态传感器

内部传感器中,位置传感器和速度传感器也被称作伺服传感器,是当今机器人反馈控制中不可缺少的元件。现已有多种传感器大量生产,但倾斜角传感器、方位角传感器及振动传感器等用作机器人内传感器的时间不长,其性能尚需进一步改进。下面分别介绍检测上述各种物理量的内部状态传感器。

1) 规定位置规定角度的检测

检测预先规定的位置或角度,可以用 ON/OFF 两个状态值。这种方法用于检测机器人的起始原点、越限位置,或者确定位置。

(1) 微型开关。规定的位移量或力作用到微型开关的可动部分时,开关的电气接点断开或接通。限位开关通常装在盒里,以防外力的作用和水、油、尘埃的侵蚀。它的检测精度为±1mm 左右。

(2) 光电开关。光电开关(光电传感器)是光电接近开关的简称,光电开关及其原理图如图 3-24 所示。它利用被检测物对光束的遮挡或反射,把光强度的变化转换成电信号的变化,从而检测物体的有无。一般情况下,光电开关由 3 部分构成:发送器、接收器和检测电路。光电开关是由 LED 光源和光电二极管或光电三极管等光敏元件,相隔一定距离而构成的透光式开关(图 3-24)。当光由基准位置的遮光片通过光源和光敏元件的缝隙时,根据光是否能照射到光敏元件上,从而起到开关的作用。

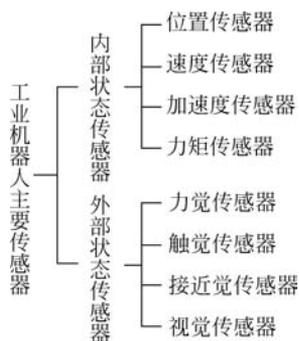


图 3-23 工业机器人传感器分类

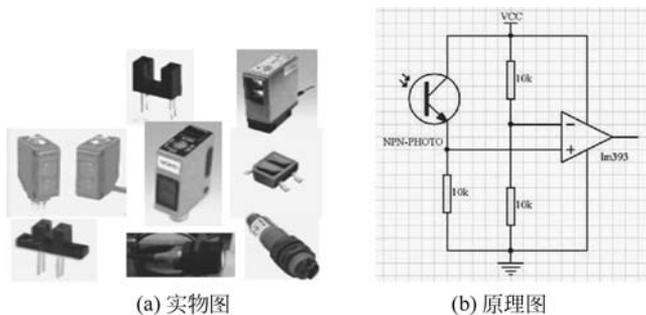


图 3-24 光电开关及其原理图

2) 位置、角度测量

测量机器人关节线位移和角位移的传感器是机器人位置反馈控制中必不可少的元件。

(1) 电位器。电位器式传感器一般由电阻元件、骨架及电刷等组成。根据滑动触头的运动方式,电位器式传感器分为直线型和旋转型。

直线型电位器的结构原理如图 3-25 所示,当测量轴发生直线位移时,与其相连的触头也发生位移,从而改变了触头与滑线电阻端的电阻值和输出电压值,根据输出电压值的变化,可以测出机器人各关节的位置和位移量。

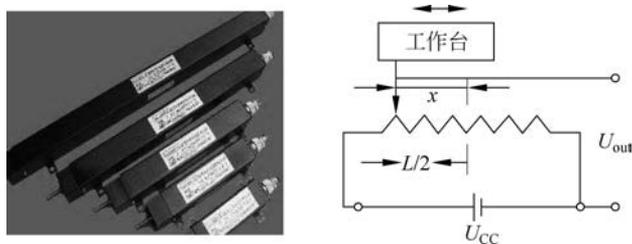


图 3-25 直线型电位器及原理图

旋转型电位器有单圈电位器和多圈电位器两种。前者的测量范围小于  $360^\circ$ ,对分辨率也有限制,后者有更大的工作范围及更高的分辨率。单圈旋转型电位器如图 3-26 所示,电阻元件为圆弧状,滑动触头在电阻元件上做圆周运动。当滑动触头旋转了  $\theta$  角时,触头与滑线电阻端的电阻值和输出电压值也发生了变化。

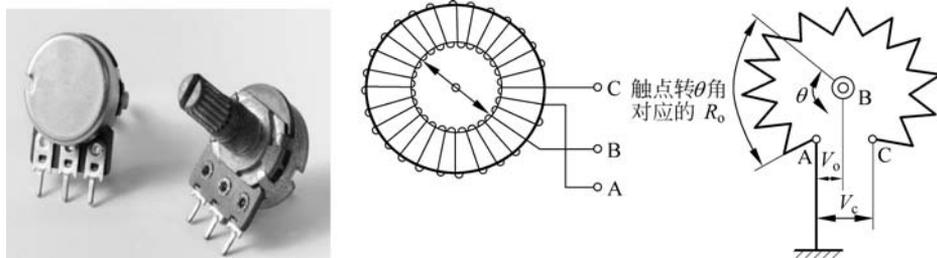


图 3-26 单圈旋转型电位器及其工作原理

电位器式传感器有很多优点,除了价格低廉、结构简单、性能稳定、使用方便外,它的位移量与输出电压量之间是线性关系。由于电位器的滑动触点位置不受电源影响,故其即使断电也不会丢失原有的位置信息。但是其分辨率不高,电刷和电阻之间接触容易磨损,影响电位器的可靠性及使用寿命。因此,电位器式传感器在工业机器人上的应用逐渐被光电编码器取代。

(2) 旋转变压器。旋转变压器由铁芯、两个定子线圈和两个转子线圈组成,是测量旋转角度的传感器。定子和转子由硅钢片叠层制成,在槽里绕上线圈。定子和转子分别由互相垂直的两相绕组构成。为了说明检测原理,图 3-27 给出内部接线电路图。当定子绕组通过交流电流时,转子绕组中便有感应电动势产生,且随着转子的转角  $\theta$  变化。旋转变压器的原理如图 3-27 所示。

使用时将旋转变压器的转子与工业机器人的关节轴连接,测出转子感应电动势的相位就可以确定关节轴的角位移了。旋转变压器具有耐冲击、耐高温、耐油污、高可靠、长寿命等优点;其缺点是输出为调制的模拟信号,输出信号解算较复杂。

(3) 光电编码器。光电编码器在工业机器人中的应用非常广泛,其分辨率完全能满足技术要求。它是一种通过光电转换将输出轴上的直线位移或角度变化转换成脉冲或数字量

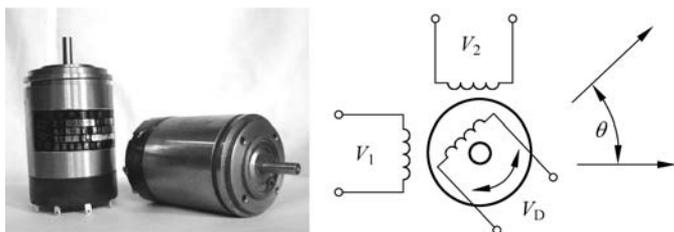


图 3-27 旋转变压器原理

的传感器,属于非接触式传感器。光电编码器主要由码盘、检测光栅和光电检测装置(光源、光敏器件、信号转换电路)、机械部件等组成,如图 3-28 所示。

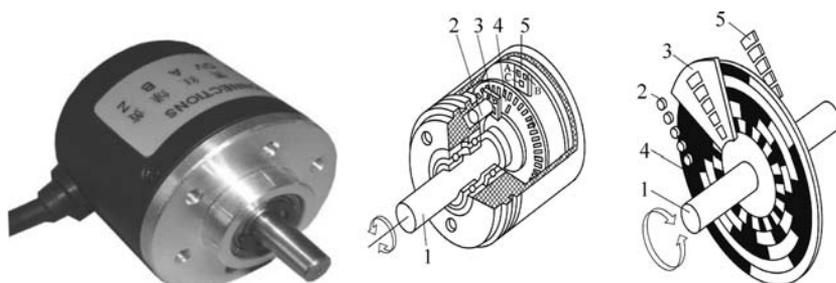


图 3-28 光电编码器结构图

1—转轴; 2—LED; 3—检测光栅; 4—码盘; 5—光敏器件

码盘上有透光区与不透光区。光线透过码盘的透光区,使光敏元件导通,产生电流,输出端电压为高电平。若光线照射到码盘的不透光区,则光敏元件不导通,输出电压为低电平,如图 3-29 所示。根据码盘上透光区域与不透光区域分布的不同,光电编码器又可分为绝对式和相对式(增量式),如图 3-30 所示。

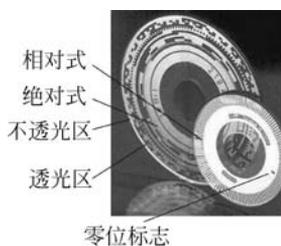


图 3-29 码盘

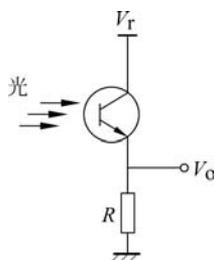


图 3-30 光电编码器工作原理

### 3) 速度、角速度测量

速度、角速度测量是驱动器反馈控制必不可少的环节。有时也利用位移传感器测量速度及检测单位采样时间位移量,然后用 D/A 转换器变成模拟电压。下面介绍测量角速度的测速发电机。

测速发电机或称为转速表传感器,恒定磁场中的线圈发生位移,线圈两端的感应电压  $E$  与线圈内磁通  $\Phi$  的变化速率成正比,输出电压为

$$E = d\Phi/dt$$

根据这个原理测量角速度的测速发电机,可按其构造分为直流测速发电机、交流测速发电机和感应式交流测速发电机。

#### 4) 加速度测量

随着机器人的高速化、高精度化,由机械运动部分刚性不足所引起的振动问题开始受到重视,为了解决振动问题,有时在机器人的运动手臂等位置安装加速度传感器,测量振动加速度,并把它反馈到驱动器上,将测得的加速度进行数值积分并加到反馈环节中,以改善机器人的性能。从测量振动的目的出发,加速度传感器日趋受到重视。

机器人的动作是三维的,而且活动范围很广,因此可在连杆等部位直接安装接触式传感器。虽然机器人的振动频率仅数十赫兹,但由于共振特性容易改变,所以要求传感器具有低频高灵敏度的特性。这些加速度传感器包括:

- (1) 应变片式加速度传感器;
- (2) 伺服加速度传感器;
- (3) 压电感应式加速度传感器;
- (4) 其他类型传感器。

#### 5) 倾斜角的测量

倾斜角测量传感器测量重力方向,应用于机械手末端执行器或移动机器人的姿态控制中。根据测量原理,倾斜角测量传感器可分为液体式、垂直振子式和陀螺式。

#### 6) 方位角测量

在非规划路径上移动的自主导引车(AGV),为了实现姿态控制,除了测量倾斜角之外,还要时刻了解自身的位置。虽然可通过安装在各驱动器上测量(角)位移的内传感器累计计算路径,但由于存在累计误差等问题,因此还需要辅之以其他传感器。

方位角传感器能测量运动物体的方位变化(偏转角),今后将在大范围活动的机器人中广泛使用。方位角传感器包括陀螺仪和地磁传感器。

(1) 陀螺仪。陀螺仪按构造可分为内部带旋转体的传统陀螺和内部不带旋转体的新型陀螺,检测单轴偏转角可用传统的速率陀螺、速率积分陀螺,或新型气体速率陀螺、光陀螺等。陀螺转速达 24000r/min 后,通常便能自行保持其转轴方向固定,以这个方向不变的转轴为基准,万向支架的相对转角可用同步器测出。

(2) 地磁传感器。地磁传感器是一类利用被测物体在地磁场中的运动状态不同,通过感应地磁场的分布变化而指示被测物体的姿态和运动角度等信息的测量装置。由于被测设备在地磁场中处于不同的位置状态,地磁场在不同方向上的磁通分布是不同的,地磁传感器就是通过检测三个轴线上磁场强度的变化而指示被测设备的状态的。

## 2. 机器人的外部状态传感器

### 1) 触觉传感器

触觉是接触、冲击、压迫等机械刺激感觉的综合,触觉可以用来进行机器人抓取,利用触觉可进一步感知物体的形状、软硬等物理性质。一般把检测感知和外部直接接触而产生的接触觉、压力、触觉及接近觉的传感器称为机器人触觉传感器。

(1) 接触觉。接触觉是通过与对象物体彼此接触而产生的,所以最好使用手指表面高密度分布触觉传感器阵列,它柔软易变形,可增大接触面积,并且有一定的强度,便于抓握。接触觉传感器可检测机器人是否接触目标或环境,用于寻找物体或感知碰撞,如图 3-31 所示。

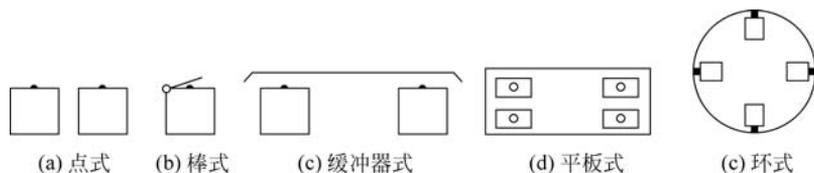


图 3-31 接触觉传感器

接触觉传感器主要有如下几种：

① 机械式传感器：利用触点的接触、断开获取信息，通常采用微动开关来识别物体的二维轮廓，由于结构关系无法高密度列阵。

② 弹性式传感器：这类传感器都由弹性元件、导电触点和绝缘体构成。如采用导电性石墨化碳纤维、氨基甲酸乙酯泡沫、印制电路板和金属触点构成的传感器，碳纤维被压后与金属触点接触，开关导通。也可由弹性海绵、导电橡胶和金属触点构成，导电橡胶受压后，海绵变形，导电橡胶和金属触点接触，开关导通。也可由金属和铍青铜构成，被绝缘体覆盖的青铜箔片被压后与金属接触，触点闭合。

③ 光纤式传感器：这种传感器包括由一束光纤构成的光缆和一个可变形的反射表面。光通过光纤束投射到可变形的反射材料上，反射光按相反方向通过光纤束返回。如果反射表面是平的，则通过每条光纤所返回的光的强度是相同的。如果反射表面因与物体接触受力而变形，则反射的光强度不同。用高速光扫描技术进行处理，即可得到反射表面的受力情况。

(2) 接近觉。接近觉传感器一般使用非接触式测量元件，如霍尔效应传感器、电磁式接近开关和光学接近传感器。接近觉是指机器人能感觉到距离几毫米到十几厘米远的对象物或障碍物，能检测出物体的距离、相对角等。

接近觉传感器可分为 5 种：电容式、电感式（感应电流式）、光电式（反射或透射式）、超声波式和距离传感器，如图 3-32 所示。

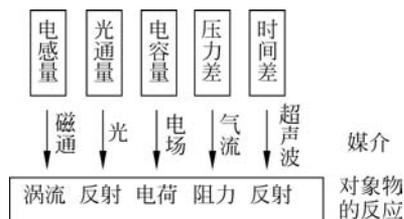


图 3-32 接近觉传感器

接近觉传感器由发光二极管和光敏晶体管组成。发光二极管发出的光经过反射被光敏晶体管接收，接收到的光强和传感器与目标的距离有关，输出信号是距离的函数。红外信号被调制成某一特定频率，可大大提高信噪比。

(3) 滑觉。机器人在抓取不知属性的物体时，其自身应能确定最佳握紧力的给定值。当握紧力不够时，要检测被握紧物体的滑动，利用该检测信号，在不损害物体的前提下，考虑最可靠的夹持方法，实现此功能的传感器称为滑觉传感器。

可以用力觉来控制握力，则滑觉用来检测滑动，修正设定的握力以防止滑动。早期基于位移的专用滑动传感器用于检测移动元件的运动，比如夹持器表面的滚轮或针状物。滑觉传感器有滚轮式、球式和振动式。物体在传感器表面上滑动时，和滚轮或球相接触，把滑动变成转动。滑动物体引起滚轮的转动，可用磁铁和静止的磁头进行检测。滚轮式滑觉传感器如图 3-33 所示。

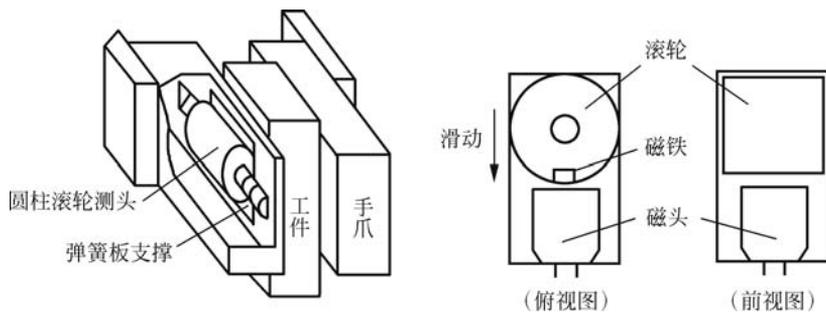


图 3-33 滚轮式滑觉传感器

也可用球代替滚轮,图 3-34 所示为球式滑觉传感器的典型结构。它由一个金属球和触针组成,金属球表面分成许多个相间排列的导电(图 3-34 中球面黑色部分)和绝缘小格(图 3-34 中球面白色部分)。触针头很细,每次只能触及一格。当工件滑动时,金属球也随之转动,在触针上输出脉冲信号,脉冲信号的频率反映了滑移速度,个数对应滑移的距离。

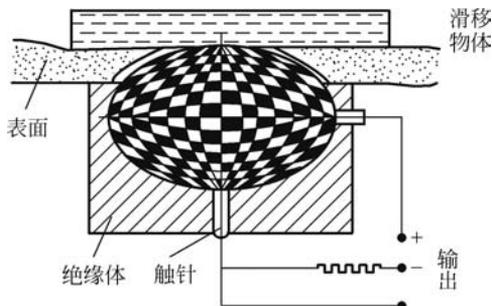


图 3-34 机器人专用球式滑觉传感器

还可根据振动原理制成滑觉传感器。钢球指针与被抓物体接触,若工件滑动,则指针振动,线圈输出信号,如图 3-35 所示。

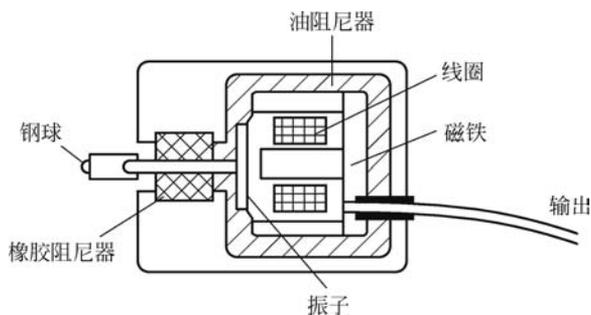


图 3-35 基于振动的机器人专用滑觉传感器

最新的方法是使用一个热传感器和一个热源,当被抓的物体开始滑动时,先前传感器下温暖的表面移开了,导致传感器下方表面的温度下降,如图 3-36 所示。

## 2) 力觉传感器

力觉是指对机器人的四肢和关节等在运动中所受力的感知。通常用于控制与被测物体

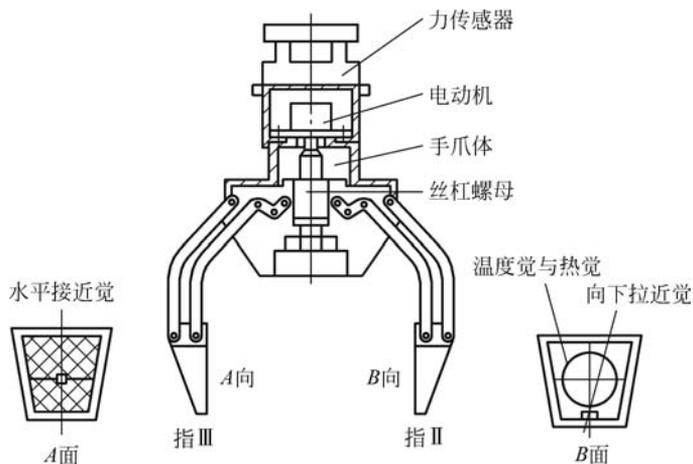


图 3-36 装有多种传感器(力、温度、接近)的机械手爪

自重和相关的力,或举起或移动物体。力觉在旋紧螺母、轴与孔的嵌入等装配工作中也有广泛应用。比如,使用压力传感器衡量载荷,由已知的负载与结构变形之间的关系,建立连杆变形的模型,增加刚性机器人的定位精度。

力觉主要包括腕力觉、关节力觉和支座力觉等。根据被测对象的负载,可以把力传感器分为测力传感器(单轴力传感器)、力矩表(单轴力矩传感器)、手指传感器(检测机器人手指作用力的超小型单轴力传感器)和六轴力觉传感器。

力觉传感器根据力的检测方式不同,可以分为:

- (1) 检测应变或应力的应变片式,应变片力觉传感器被机器人广泛采用;
- (2) 利用压电效应的压电元件式;
- (3) 用位移计测量负载产生的位移的差动变压器、电容位移计式。

对于一般的力控制作业,需要 6 个力分量来提供完整的接触力信息,即 3 个平移力分量和 3 个力矩。通常,力/扭矩传感器安装在机器人腕部。在这种情况下,通常假设安装在传感器与环境之间的工具(末端执行器)的重量和惯性是可以忽略的,或者是可以从力/扭矩测量中适当地补偿。但也有例外情况,比如力传感器可以安装在机器人手的指尖上,外部的力和扭矩也可以通过关节扭矩传感器对轴扭矩的测量来估计。

在选用力传感器时,首先要注意额定值;其次在机器人通常的力控制中,力的精度意义不大,重要的是分辨率。在机器人上实际安装使用力觉传感器时,一定要事先检查操作区域,清除障碍物。这对实验者的人身安全、对保证机器人及外围设备不受损害具有重要意义。

### 3) 距离传感器

距离传感器是一种从自身的位置获取周围世界三维结构的设备。通常它测量的是距离物体最近表面的深度。这些测量可以是穿过扫描平面的单个点,也可以是一幅在每个像素都具有深度信息的图像。距离信息可以使机器人合理地确定相对于该距离传感器的实际周围环境,从而允许机器人更有效地寻找导航路径,避开障碍物、抓取物体或在工业零件上操作。这里主要介绍基于激光的三角测量距离传感器,测距原理如图 3-37 所示,当一束激光从 A 点位置投射到被观测物表面,产生的光点被位于另一个位置的传感器接收到。已知激

光和传感器的相对位置和方位,使用三角法则就能计算被照射的表面点的三维位置了。

距离传感器可用于机器人导航和回避障碍物,也可用于机器人空间内的物体定位及确定其一般形状特征。目前最常用的测距法有两种。

(1) 超声波测距法。超声波是频率 20kHz 以上的机械振动波,利用发射脉冲和接收脉冲的时间间隔推算出距离。超声波测距法的缺点是波束较宽,其分辨力受到严重的限制,因此,主要用于导航和回避障碍物。

(2) 激光测距法。激光测距法也可以利用回波法,或者利用激光测距仪,其工作原理为:氦氖激光器固定在基线上,在基线的一端由反射镜将激光点射向被测物体,反射镜固定在电动机轴上,电动机连续旋转,使激光点稳定地对被测目标扫描。由 CCD(电荷耦合器件)摄像机接受反射光,采用图像处理的方法检测出激光点图像,并根据位置坐标及摄像机光学特点计算出激光反射角。利用三角测距原理即可算出反射点的位置。

#### 4) 视觉传感器

人工视觉系统中,相当于眼睛视觉细胞的光电转换器件有光电二极管、光电三极管和 CCD 图像传感器等。过去使用的管球形光电转换器件,由于工作电压高、耗电量多、体积大等缺点,随着半导体技术的发展,它们逐渐被固态器件所取代。机器人视觉系统一般需要处理三维图像,这不仅需要了解物体的大小、形状,还要知道物体之间的关系。因此视觉系统的硬件组成中还包括距离测定器,如图 3-38 所示。

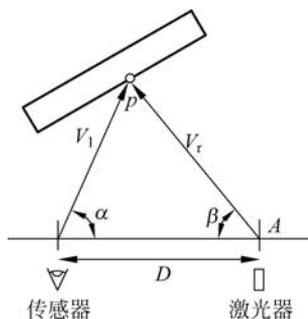


图 3-37 使用一个激光点的三角测量法

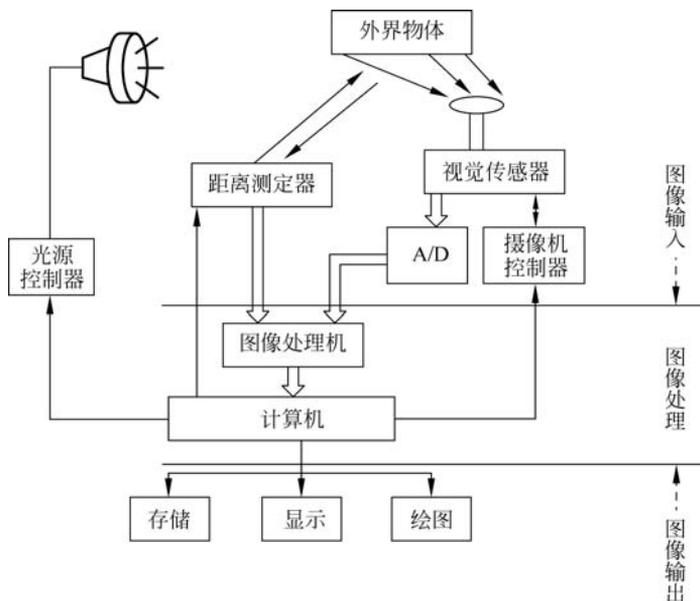


图 3-38 机器人视觉系统组成

在机器人腕部配置视觉传感器,可用于对异形零件进行非接触式测量,这种测量方法除了能完成常规的空间几何形状、形体相对位置的检测外,如果配上超声、激光、X射线探测装置,还可进行零件内部的缺陷探伤、表面涂层、厚度测量等作业。机器人腕部具有视觉系统的非接触式测量系统如图 3-39 所示。

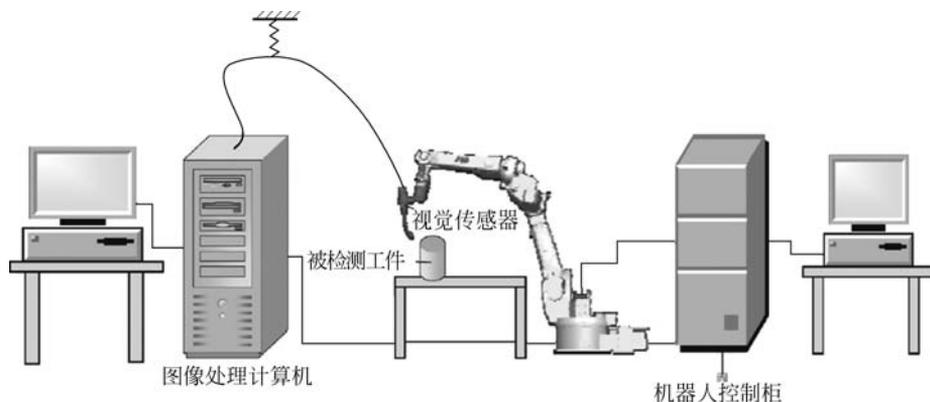


图 3-39 具有视觉系统的机器人进行非接触式测量

图 3-40 为具有自主控制功能的智能机器人,可以用来完成按图装配产品的作业。两个视觉传感器作为机器人的眼睛,一个用于观察装配图纸,并通过计算机来理解图中零件的立体形状及装配关系;另一个用于从实际工作环境中识别出装配所需的零件,并对其形状、位置和姿态等进行识别。



图 3-40 带视觉的装配机器人

#### 5) 其他外传感器

除以上介绍的机器人外部传感器外,还可根据机器人特殊用途安装听觉传感器、味觉传感器及电磁波传感器,这些机器人主要用于科学研究、海洋资源探测或食品分析、救火等特殊用途。这些传感器多数尚处于开发阶段,有待进一步完善,以丰富机器人专用功能。

### 3.3.4 多传感器信息融合技术

机器人系统中使用的传感器种类和数量越来越多,每种传感器都有一定的使用条件和感知范围,并且又能给出环境或对象的部分或整个侧面的信息,为了有效地利用这些传感器信息,需要采用某种形式对传感器信息进行综合、融合处理,不同类型信息的多种形式的处理系统就是传感器融合。传感器的融合技术涉及神经网络、知识工程、模糊理论等信息、检测、控制领域的新理论和新方法。

机器人外部传感器采集到的信息是多种多样的,为使这些信息能得以统一协调地利用,对信息进行分类是必要的。为使信息分类与多传感器信息融合的形式相对应,将其分为以下三类:冗余信息、互补信息和协同信息。

#### 1. 冗余信息

冗余信息是由多个独立传感器提供的关于环境信息中同一特征的多个信息。也可以是

某一传感器在一段时间内多次测量得到的信息,这些传感器一般是同质的。由于系统必须根据这些信息形成一个统一的描述,所以这些信息又称为竞争信息。冗余信息可用来提高系统的容错能力及可靠性。

冗余信息的融合可以减少测量噪声等引起的不确定性,提高整个系统的精度。由于环境的不确定性,感知环境中同一特征的两个传感器也可能得到彼此差别很大甚至矛盾的信息,冗余信息的融合必须解决传感器间的这种冲突,所以,同一特征的冗余信息融合前要进行传感数据的一致性检验。

### 2. 互补信息

在一个多传感器系统中,每个传感器提供的环境特征都是彼此独立的,即感知的是环境各个不同的侧面,将这些特征综合起来就可以构成一个更为完整的环境描述,这些信息称为互补信息。

互补信息的融合减少了由于缺少某些环境特征而产生的对环境理解的歧义,提高了系统描述环境的完整性和正确性,增强了系统正确决策的能力。由于互补信息来自异质传感器,它们在测量精度、范围、输出形式等方面有较大的差异,因此融合前先将不同传感器的信息抽象为同一种表达形式就显得尤为重要。这一问题涉及不同传感器统一模型的建立。

### 3. 协同信息

在多传感器系统中,当一个传感器信息的获得必须依赖于另一个传感器的信息,或一个传感器必须与另一个传感器配合工作才能获得所需信息时,这两个传感器提供的信息称为协同信息。协同信息的融合,很大程度上与各传感器使用的时间或顺序有关。如在一个配备了超声波传感器的系统中,以超声波测距获得远处目标物体的距离信息,然后根据这一距离信息自动调整摄像机的焦距,使之与物体对焦,从而获得监测环境中物体的清晰图像。协同信息的融合在技术上完全有别于前两种信息的融合。

目前,要使多传感器信息融合体系化尚有困难,而且缺乏理论依据。多传感器信息融合的理想目标应是人类的感觉、识别、控制体系,但由于对后者尚无一个明确的工程学的阐述,所以机器人传感器融合体系要具备什么样的功能尚是一个模糊的概念。相信随着机器人智能水平的提高,多传感器信息融合理论和技术将会逐步完善和系统化。

## 3.4 机器人的驱动系统

### 3.4.1 概述

工业机器人驱动装置是带动臂部到达指定位置的动力源。通常动力是直接或经电缆、齿轮箱或其他方法送至臂部。工业机器人驱动系统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基本类型,根据需要也可将这三种类型组合成为复合式的驱动系统。近年来,随着特种用途机器人如微型机器人等的出现,动力来自压电效应、超声波、化学反应的驱动系统相继出现,把这类驱动系统归类为特种驱动系统,本书不做介绍。

在选用机器人的驱动方式时,首先必须了解各种驱动方式的特点,并结合具体情况确定最佳的驱动方案。

### 1. 液压驱动的特点

液压驱动所使用的压力为 0.5~14MPa。

#### 1) 优点

- (1) 驱动力或驱动力矩大,即功率质量比大。
- (2) 可以把工作液压缸直接做成关节的一部分,故结构简单紧凑,刚度好。
- (3) 由于液体的不可压缩性,因此定位精度比气压驱动高,并可实现任意位置的停止。
- (4) 液压驱动调速比较简单,能在很大调整范围内实现无级调速。
- (5) 液压驱动平稳,且系统的固有频率较高,可以实现频繁而平稳的变速与换向。
- (6) 使用安全阀,可简单而有效地防止过载现象发生。
- (7) 有良好的润滑性能,寿命长。

#### 2) 缺点

- (1) 油液容易泄漏,影响工作的稳定性与定位精度,易造成环境的污染。
- (2) 油液黏度随温度变化,不但影响工作性能,而且在高温与低温条件下很难应用。如果有必要,需要采取油温管理措施。
- (3) 油液中容易混入气泡及水分等,使系统刚性降低,速度响应特性及定位相应变差。
- (4) 需配备压力源及复杂的管路系统,因而成本较高。
- (5) 易燃烧。

液压驱动方式具有动力大、力(或力矩)与惯量比大、快速响应高、易于实现直接驱动等特点。大多用于要求输出力较大的场合,适于在承载能力大、惯量大以及在防焊环境中工作的机器人中应用。效率比电动驱动系统低,在低压驱动条件下比气压驱动速度低。

### 2. 气压驱动的特点

气压驱动在工业机器人中用得较多。使用的压力通常为 0.4~0.6MPa。

#### 1) 优点

- (1) 快速性好。这是因为压缩空气的黏性小。
- (3) 废气可直接排入大气,不会造成污染,所以比液压驱动干净。
- (4) 通过调节气量可实现无级变速。
- (5) 由于空气的可压缩性,气压驱动系统具有缓冲作用。
- (6) 结构简单,易于保养,成本低。

#### 2) 缺点

- (1) 由于工作压力低,所以功率质量比小,装置体积大。
- (2) 基于气体的可压缩性,气压驱动很难保证较高的定位精度。
- (3) 使用后的压缩空气向大气排放时,会产生噪声。
- (4) 因压缩空气含冷凝水,使得气压系统易锈蚀。在低温下由于冷凝水结冰,有可能启动困难。

气压驱动具有速度快、系统结构简单、维修方便、价格低等特点。大多用于输出力小于 300N,但要求运动速度快的场合,也适于在易燃、易爆和灰尘大的场合工作,适于在中、小负荷的机器人中采用。

### 3. 电气驱动的特点

电气驱动是利用各种电动机产生的力和力矩直接或经过机械传动机构去驱动执行机

构,以获得机器人的各种运动。电气驱动可分为普通电机驱动、直流伺服电机驱动、交流伺服电机驱动、步进电机驱动等。

#### 1) 普通电机驱动

在一些定位精度要求不高的机器人中,可采用交流异步电机或直流电机进行驱动。直流电机能够实现无级调速,但直流电源价格较高。另外,由于普通电机转子的转动惯量较大,反应灵敏性没有同功率的液压马达及交、直流伺服电机快。

#### 2) 直流伺服电机驱动

直流伺服电机可分有刷和无刷两种。其优点是因其转子的转动惯量小,动态特性好。它的体积小、出力大、效率高、启动力矩大,速度可以任意选择,电枢和磁场都可以控制,可以在很宽的速度范围内保持高的效率。有刷直流伺服电机的缺点是因电机的机械接触点的连接易产生电火花,在易燃介质下容易引起事故,并且电刷的摩擦、磨损带来了维护和寿命的问题。

为了降低电机转子的惯性、提高响应速度,在直流伺服电机中发展了微型电动机和印刷线路电动机。这些电动机采用平滑型电枢结构,具有电气时间常数小的优点。

直流伺服电机因上述优点而在工业机器人中广泛应用。

#### 3) 交流伺服电机驱动

近年来,交流伺服电机在机器人驱动系统中已大量应用。其优点是:除轴承外无机械接触点外,还无有刷直流伺服电机因电刷接触产生电火花的缺点,可在有易燃介质环境中使用,例如在喷漆机器人中应用。此外,交流伺服电机坚固,维护方便,控制比较容易,回路绝缘简单,漂移小。其缺点是:比直流伺服电机效率低,平衡时励磁线圈有电力消耗,重量比同等驱动力的其他类电机大。交流伺服电机驱动由于有上述优点,其在机器人中的应用将会越来越广泛。

#### 4) 步进电机驱动

步进电机又称为脉冲电机,是数字控制系统中常用的一种执行元件。它能将脉冲电信号转换成相应的角位移或直线位移。电机转动的步数与脉冲数成对应关系,在电机的负载能力范围内,此关系不因电机电压、负载大小、环境条件的波动而变化,因此步进电机可以在很宽的范围内通过改变脉冲频率来调速,能快速启动、反转与制动。

步进电机的输入脉冲速度增高,相应输出力矩减少,因而在大负载场合需采用电液式步进电机。步进电机一般采用开环控制,因此结构简单,位置与速度容易控制,响应速度快,力矩比较大,可以直接用数字信号控制。但是由于步进电机控制系统大多采用全开环控制方式,没有误差校正能力,其精度较差,负载过大或振动冲击过大时会造成失步现象,难以保证精度。

上述三种驱动方式各有优缺点,而一般在工业领域里工业机器人机械手的要求,大多应选用气压传动作为机械手的驱动系统。

除了上述驱动方式之外,近年来国外在一些平面关节型装配机器人中开始采用直接驱动方式,它不需要机械减速装置而由电机直接驱动机器人关节。它消除了机械减速装置引起的误差,具有精度高和速度高的特点,但是直接驱动装置的技术难度较高,目前应用还不普遍。

### 3.4.2 液压驱动系统

液压驱动以高压油作为工作介质。驱动机构可以是闭环或者是开环的,其实现的运动可以是直线的或者是旋转的。用伺服阀控制的液压缸的简化原理图如图 3-41 所示。

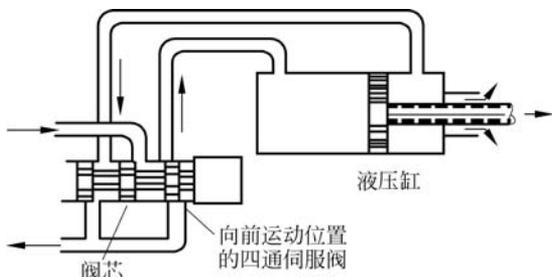


图 3-41 用伺服阀控制的液压缸的简化原理图

#### 1. 直线液压缸

用电磁阀控制的直线液压缸是最简单和最便宜的开环液压驱动装置。在直线液压缸的操作中,通过受控节流口调节流量,可以在达到运动终点时实现减速,使停止过程得到控制。

大直径液压缸不仅本身造价高,且需配备昂贵的电液伺服阀,但能得到较大的出力,工作压力通常达到 14MPa。无论是直线液压缸或旋转液压马达,它们的工作原理都是基于高压油对活塞或对叶片的作用。在开环系统中,阀是由电磁铁打开和控制的;在闭环系统中,则是用电液伺服阀或手动阀来控制的。最初出现的 Unimate 机器人就是用液压驱动的。

#### 2. 旋转执行元件

图 3-42 所示是一种旋转式执行元件。它的壳体由铝合金制成,转子是钢制的。密封圈和防尘圈是用来防止油的外泄和保护轴承。在电液阀的控制下,液压油经进油口进入,并作用于固定在转子上的叶片上,使转子转动。隔板用来防止液压油短路。通过两个小间隙齿轮带动的电位器和一个解算器给出转子的位置信息。电位器给出粗略值,而精确位置由解算器测定。这样,解算器的高精度和小量程就由低精度和大量程的电位器予以补救。当然,整个精度不会超过驱动电位器和与解算器的齿轮精度。

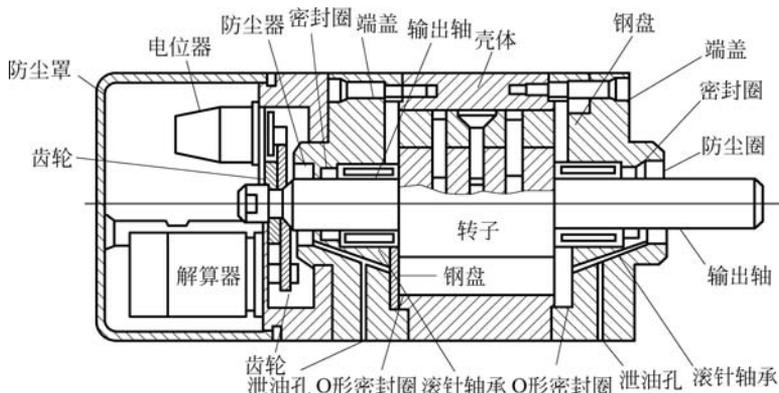


图 3-42 旋转液压马达

### 3. 电液伺服阀

电液伺服阀主要有两种类型：喷嘴挡板伺服阀和射流管伺服阀。

大多数工业机器人使用喷嘴挡板伺服阀，但比较便宜的射流管伺服阀也已得到应用，因为它比喷嘴挡板伺服阀具有较高的可靠性和效率。

在这两种阀中，改变液流方向只需几毫秒。每种阀都有 1 个力矩马达、1 个前级液压放大器和 1 个作为第二级的四通滑阀。力矩马达有 1 个衔铁，它带动 1 个挡板阀或 1 个射流管组件，以控制流向第二级的液流。此液流控制滑阀运动，而滑阀则控制流向液压缸或液压马达的大流量液流。在力矩马达中用一个相当小的电流去控制油流，从而移动滑阀去控制大的流量。

#### 1) 喷嘴挡板伺服阀

在喷嘴挡板伺服阀中，挡板刚性连接在衔铁中部，从 2 个喷嘴中间穿过，在喷嘴与挡板间形成 2 个可变节流口。电流信号产生磁场，它带动衔铁和挡板，开大一侧的节流口而关小另一侧的节流口。这样就在滑阀两端建立起不同的油压，从而使滑阀移动。由于滑阀的移动压弯了抵抗它运动的反馈弹簧，当油压差产生的力等于弹簧力时，滑阀即停止运动。滑阀的移动打开了主活塞的油路，从而按所需的方向驱动主活塞运动。图 3-43 所示为喷嘴挡板伺服阀。

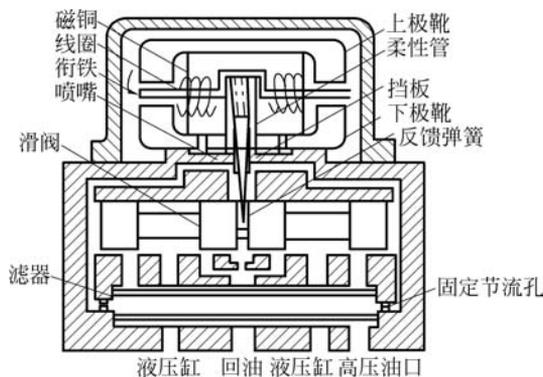


图 3-43 喷嘴挡板伺服阀

#### 2) 射流管伺服阀

射流管伺服阀与喷嘴挡板伺服阀的不同点在于喷嘴挡板式以改变流体回路上通过的阻抗来进行力的控制，而射流管式伺服阀是靠射流喷嘴喷射工作液，将压力变成动能，控制两个接受器获得能量的比例来进行力的控制。当力矩马达加电时，它使衔铁和射流管组件偏转，流向滑阀一端的油流量多于流向另一端的油流量，从而使滑阀移动，否则，流向两边的液流量基本相等。射流管伺服阀的优点在于油流量控制口的面积较大，不容易被油液中的脏物所堵塞。射流管伺服阀如图 3-44 所示。

为了清除油中的杂质，液压系统中要装有过滤器。如果在制造过程中粗心，会从焊点或从油缸、管道及活塞活动处掉下来直径为几微米的颗粒而使伺服阀堵塞。为了减少伺服阀堵塞的潜在危险，需要对油进行过滤和经常清洗滤油器。

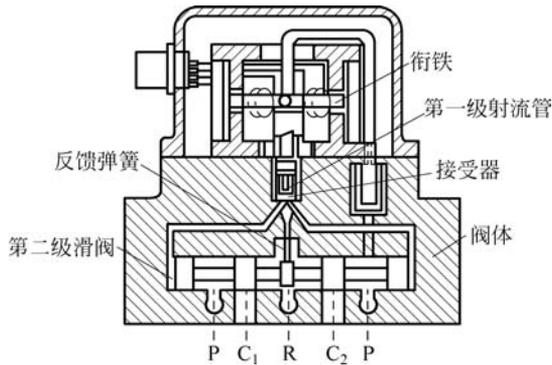


图 3-44 射流管伺服阀

### 3.4.3 气压驱动系统

在所有的驱动方式中,气压驱动是最简单的,在工业上应用很广。气动执行元件既有直线气缸,也有旋转气动马达。有不少机器人制造厂用气动系统制造了很灵巧的机器人。在原理上,它们很像液压驱动,但某些细节差别很大。它的工作介质是高压空气。气动控制阀简单、便宜,而且工作压力也低得多。

多数气动驱动用来完成挡块间的运动。由于空气的可压缩性,实现精确的位置和速度控制是比较困难的。即使将高压空气施加到活塞的两端,活塞和负载的惯性仍会使活塞继续运动,直到它碰到机械挡块,或者空气压力最终与惯性力平衡为止。但用机械挡块实现点位操作中的精确定位时,0.12mm 的精度还是可以很容易达到的。

气动系统的动力源由高质量的空气压缩机提供,这个气源可经过一个公用的多路接头为所有的气动模块所共享。安装在多路接头上的电磁阀控制通向各个气动元件的气流量。电磁阀的控制一般由可编程控制器完成,这类控制器通常是用微处理器来编程,以等效于继电器系统。

比例控制阀加上电子控制技术组成的气动比例控制系统,可满足各种各样的控制要求。比例控制系统基本构成如图 3-45 所示。图中的执行元件可以是气缸或气马达、容器和喷嘴等将空气的压力能转化为机械能的元件。比例控制阀作为系统的电-气压转换的接口元件,实现对执行元件供给气压能量的控制。控制器作为人机的接口,起着向比例控制阀发出控制量指令的作用。它可以是单片机、微机及专用控制器等。比例控制阀的精度较高,即使不用各种传感器构成负反馈系统,也能得到十分理想的控制效果,但不能抑制被控对象参数变化和外部干扰带来的影响。对于控制精度要求更高的应用场合,必须使用各种传感器构成负反馈,来进一步提高系统的控制精度。

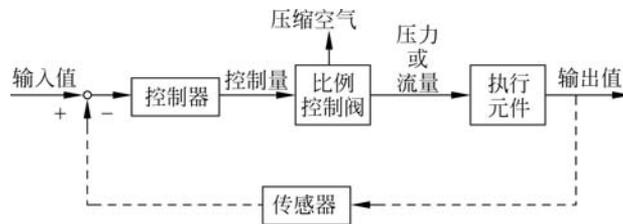


图 3-45 比例控制系统的基本构成

对于 MPYE 型伺服阀,在使用中可用微机作为控制器,通过 D/A 转换器直接驱动。可使用标准气缸和位置传感器来组成伺服控制系统。但对于控制性能要求较高的自动化设备,宜使用厂家提供的伺服控制系统(图 3-46),包括 MPYE 型伺服阀、位置传感器内藏气缸、SPC 型控制器。在图 3-46 中,目标值以程序或模拟量的方式输入控制器中,由控制器向伺服阀发出控制信号,实现对气缸的运动控制。气缸的位移由位置传感器检测,并反馈到控制器。控制器以气缸位移反馈量为基础,计算出速度、加速度反馈量。再根据运行条件(负载质量、缸径、行程及伺服阀尺寸等),自动计算出控制信号的最优值,并作用于伺服控制阀,从而实现闭环控制。控制器与微机相连接后,使用厂家提供的系统管理软件,可实现程序管理、条件设定、远距离操作、动特性分析等多项功能。控制器也可与可编程控制器相连接,从而实现与其他系统的顺序动作、多轴运行等功能。

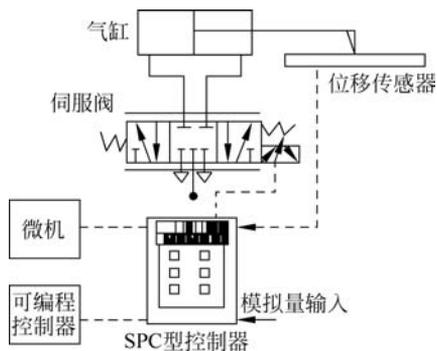


图 3-46 伺服控制系统

主要根据被控对象的类型和应用场合来选择比例阀的类型。被控对象的类型不同,对控制精度、响应速度、流量等性能指标要求也不同。控制精度和响应速度是一对矛盾,两者不可同时兼顾。对于已定的控制系统,以最重要的性能指标为依据,来确定比例阀的类型。然后考虑设备的运行环境,如污染、振动、安装空间及安装姿态等方面的要求,最终选择出合适类型的比例阀。

### 3.4.4 电气驱动系统

#### 1. 直流电动机驱动

直流电动机是工业机器人中应用最广泛的电动机之一,它在一个方向连续旋转,或在相反的方向连续转动,运动连续且平滑,且本身没有位置控制能力。

正因为直流电动机的转动是连续且平滑的,因此要实现精确的位置控制,必须加入某种形式的位置反馈,构成闭环伺服系统。有时,机器人的运动还有速度要求,所以还要加入速度反馈。一般直流电动机与位置反馈、速度反馈形成一个整体,即通常所说的直流伺服电机。由于采用闭环伺服控制,所以能实现平滑的控制和产生大的力矩。

直流电动机可利用继电器开关或采用功率放大器来实现驱动控制。功率放大器利用电子开关来改变流向电枢的电流方向以改变转向,对直流电动机的磁场或电枢电流都可进行控制。

目前,直流电动机可达到很大的力矩/重量比,远高于步进电机,与液压驱动不相上下(大功率除外)。直流驱动还能达到高精度,加速迅速,且可靠性高。现代直流电动机的发展得益于稀土磁性材料的发展。这种材料能在紧凑的电机上产生很强的磁场,从而改善了直流电机的启动特性。另外,电刷和换向器制造工艺的改进也提高了直流电动机的可靠性。此外,还有一个重要因素是固态电路功率控制能力的提高,使大电流的控制得以实现而且费用不高。

由于以上原因,当今大部分机器人都采用直流伺服电机驱动机器人的各个关节。因此,

机器人关节的驱动部分设计包括伺服电机的选定和传动比的确定。

## 2. 步进电动机驱动

对于小型机器人或点位式控制机器人而言,其位置精度和负载力矩较小,有时可采用步进电机驱动。这种电机能在电脉冲控制下以很小的步距增量运动。计算机的打印机和磁盘驱动器常用步进电机实现打印头和磁头的定位。在小型机器人上,有时也用步进电机作为主驱动电机。可以用编码器或电位器提供精确的位置反馈,所以步进电机也可用于闭环控制。尽管与其他电机一样,步进电机有一个定子(或永久磁铁)和一个转子,但它的转子上有多个齿槽,如图 3-47(b)所示。转子在由定子产生的磁场中旋转,并带动负载。通常定子位于转子外部,有很多对磁极,每个磁极根据通电方向不同可形成 N 极或 S 极。步进电机的转子和定子接线图如图 3-47(a)所示。

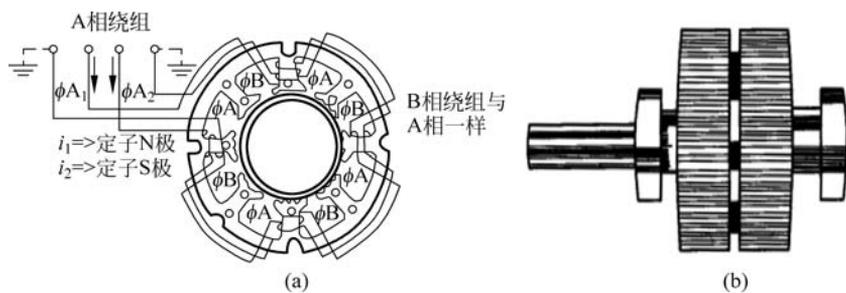


图 3-47 步进电机结构

围绕电枢的定子磁极对电枢形成一个个步距,通过一个个脉冲送入定子绕组,改变定子绕组磁场的极性,从而提供了步进电机转子运动的动力。由于步进电机动作准确可靠,所以位移只要按给定的步数就可实现。但对同样的功率输出来说,步进电机的尺寸要远远大于直流电动机。沿步进电机转子长度方向布置有两组磁极。每组磁极就好像是一个齿轮,两组齿在周围方向互相错开半个齿距。一组齿是转子的 N 极,另一组是 S 极。事实上这是一个多齿或多极的磁铁。在转子上有奇数对磁极,而在定子上有偶数对绕组磁极,所以它们永远不能同时对准。

每种步进电机都有规定的每转步数。尽管在适当的驱动条件下转子可以转半步,但力矩要下降。当把驱动电流加在定于某一选定绕组上时,转子的 N 极就要和定子的 S 极对准。改变定子的极性,就会迫使转子从一稳定位置转到另一个稳定位置。当加到定子绕组上的电流极性改变时,就使转子上的永久磁铁移动一步,每一步都是一次独立的运动。改变相序就可以改变转子的转动方向。步进电机的步进角很精确,其范围大致为  $0.75^\circ \sim 3^\circ$ 。当电磁铁磁极迅速变化时,步进电机几乎以连续的速度运动。然而,即使用最平滑的驱动器,始终还是有单步效应存在。

改变加到定子上电流的相序,可以使步进电机在任何方向旋转。多数步进电机设计成两相、三相或四相形式。常采用的脉冲序列有两种:在单相单拍驱动中,每次只在定子的一相中通电;在双相驱动中,将脉冲同时加到定子的两相绕组中。双相驱动能提供较大的力矩,但结构要复杂一些。将这两种方式混合使用,能实现半步驱动,从而获得比较平滑的响应。

### 3.5 机器人控制系统

机器人系统通常分为机构本体和控制系统两大部分。控制系统的作用是根据用户的指令对机构本体进行操作和控制,完成作业的各种动作。控制器系统性能在很大程度上决定了机器人的性能。一个好的控制器要有灵活、方便的操作方式,多种形式的运动控制方式和安全可靠。构成机器人控制系统的要素主要有计算机硬件系统及控制软件、控制器、输入/输出设备、驱动器、传感器系统。采用四轴运动控制器组成的控制系统如图 3-48 所示。

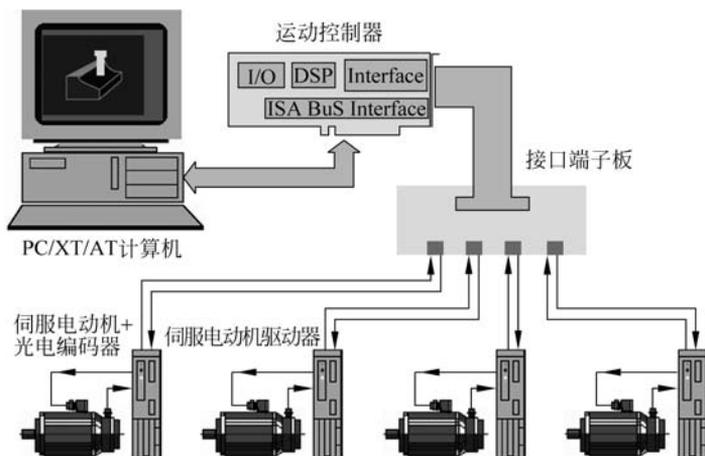


图 3-48 采用四轴运动控制器组成的控制系统框图

#### 3.5.1 机器人控制系统的基本原理

为了使机器人能够按照要求去完成特定的作业任务,需要以下四个过程:

##### 1. 示教过程

通过计算机可以接受的方式,告诉机器人去做什么,给机器人下达作业命令。

##### 2. 计算与控制

负责整个机器人系统的管理、信息获取及处理、控制策略的制定,作业轨迹的规划等任务,这是机器人控制系统的核心部分。

##### 3. 伺服驱动

根据不同的控制算法,将机器人控制策略转化为驱动信号、驱动伺服电机等驱动部分,实现机器人的高速、高精度运动,从而完成指定的作业。

##### 4. 传感与检测

通过传感器的反馈,保证机器人正确地完成指定作业,同时也将各种姿态信息反馈到机器人控制系统中,以便实时监控整个系统的运动情况。

#### 3.5.2 机器人控制系统的特点

工业机器人控制系统是以机器人的单轴或多轴运动协调为目的的控制系统,其控制结

构要比一般自动机械的控制复杂得多。与一般伺服系统或过程控制系统相比,工业机器人控制系统有如下特点:

(1) 传统的自动机械是以自身的动作为重点,而工业机器人的控制系统更着重本体与操作对象的相互关系。无论以多么高的精度控制手臂,机器人必须能夹持并操作物体到达目的位置。

(2) 工业机器人的控制与机构运动学及动力学密切相关。机器人手足的状态可以在各种坐标下描述,且能根据需要选择不同的基准坐标系,并做适当的坐标变换,经常需要求解运动学中的正、逆问题。除此之外,还要考虑惯性、外力(包括重力)及哥氏力、向心力的影响。

(3) 即便一个简单的工业机器人,至少也有3~5个自由度。每个自由度一般包含一个伺服机构,它们必须协调起来,组成一个多变量控制系统。

(4) 描述机器人状态和运动的数学模型是一个非线性模型,随着状态的不同和外力的变化,其参数也在变化。各变量之间还存在耦合。因此,不仅要利用位置闭环,还要利用速度甚至加速度闭环。系统中经常使用重力补偿、解算和基于传感信息的控制器最优PID控制等方法。

### 3.5.3 机器人控制系统的组成及分类

#### 1. 机器人控制系统的组成

工业机器人的控制系统一般分为上、下两个控制层次:上级为组织级,其任务是将期望的任务转化成为运动轨迹或适当的操作,并随时检测机器人各部分的运动及工作情况,处理意外事件;下级为实时控制级,它根据机器人动力学特性及机器人当前运动情况,综合出适当的控制命令,驱动机器人机构完成指定的运动和操作。工业机器人控制系统主要包括硬件和软件两部分。硬件主要有传感装置、控制装置和关节伺服驱动部分。软件主要指控制软件,包括运动轨迹规划算法和关节伺服控制算法等动作程序。一个完整的工业机器人控制系统包括以下几个部分:

- (1) 控制计算机:是控制系统的调度指挥机构。
- (2) 示教盒:用来示教机器人的工作轨迹和参数设定,以及一些人机相互操作,拥有独立的CPU以及存储单元,与主计算机之间实现信息交互。
- (3) 操作面板:由各种操作按键、状态指示灯构成,只完成基本功能操作。
- (4) 硬盘和存储机器人工作程序的外部存储器。
- (5) 数字和模拟量的输入和输出:各种状态和控制命令的输入和输出。
- (6) 打印机接口:记录需要输出的各种信息。
- (7) 传感器接口:用于信息的自动检测,实现机器人柔顺控制。
- (8) 轴控制器:一般包括各关节的伺服控制器,完成机器人各关节位置、速度和加速度控制。
- (9) 辅助设备控制:主要用于和机器人配合的辅助设备控制。
- (10) 通信接口:主要实现机器人和其他设备的信息交换。不同类型的控制系统,其组成情况也不相同。图3-49所示为机器人控制系统结构框图,图3-50是工业机器人控制系统组成图。

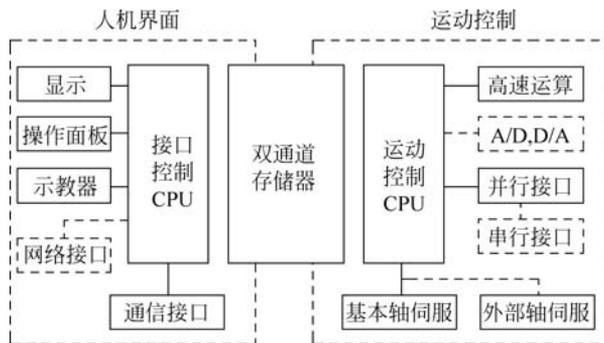


图 3-49 机器人控制系统结构框图

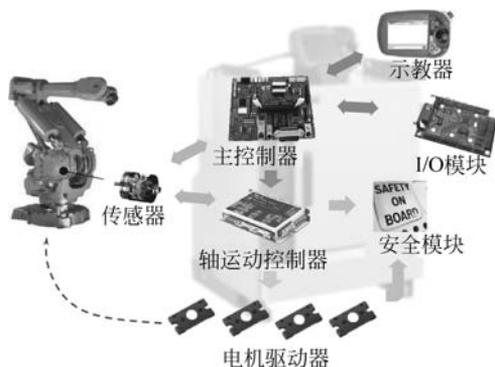


图 3-50 工业机器人控制系统组成图

## 2. 机器人控制系统的分类

工业机器人控制系统的分类没有统一的标准。按照运动坐标控制的方式,可以分为关节空间运动控制和直角坐标空间运动控制;按照控制系统对工作环境变化的适应度,可以分为程序控制系统、适应性控制系统和人工智能控制系统;按照同时控制机器人的数目,可以分为单控制系统和群控制系统。除此之外,通常按照运动控制方式,可以分为位置控制、速度控制和力控制。

机器人运动控制架构如图 3-51 所示,在此基础上可以实现不同的控制方式。

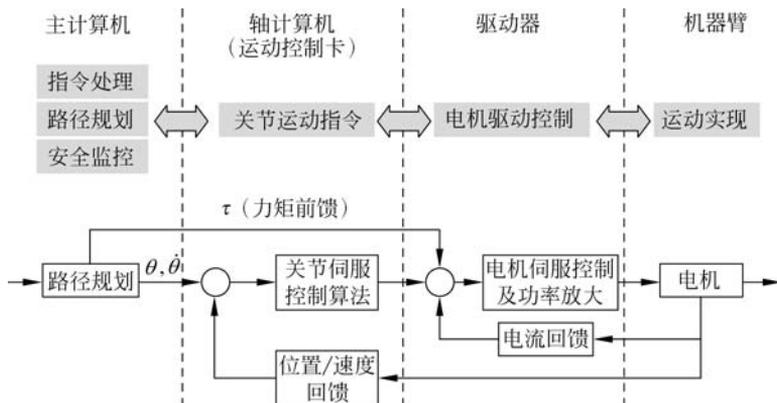


图 3-51 工业机器人运动控制架构图

### 3. 机器人的控制

#### 1) 机器人的位置控制数学模型

在讨论机器人位置控制时,首先有必要了解机器人位置控制模型。图 3-52 所示为简单机械系统的控制问题。质量为  $m$  的物体作单自由度运动,假设物体运动时除了受到弹簧力作用外,还受到与速度成正比的摩擦阻力的作用。若取坐标系原点位于系统平衡的位置,则该系统的运动方程为

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0 \quad (3.1)$$

其解依赖于初始条件,如初始位置和初始速度。一般情况下,上述方程表示的二阶系统的响应并不理想,难以达到临界阻尼状态。如果在系统上增加一个驱动器,利用驱动器在  $x$  方向为物体施加任意大小的力  $f$ ,如图 3-53 所示,则此时系统的运动方程为

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f \quad (3.2)$$

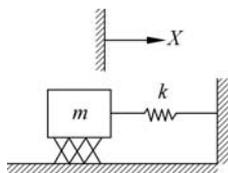


图 3-52 质量-弹簧-阻尼系统

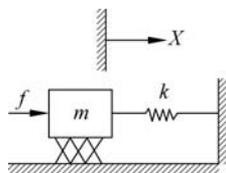


图 3-53 带驱动器的质量-弹簧-阻尼系统

因此,位置控制问题就是建立一个合适的控制器,使物体在驱动力  $f$  的作用下,即使系统存在随机干扰力,也能使物体始终维持在预期位置上。

(1) 定点位置控制。如果能利用传感器检测出物体的位置和运动速度,并且假设控制系统能利用这些信息,则可按下述的控制规律计算驱动器应该施加于物体上的力,即

$$f = k_p x - k_v \dot{x} \quad (3.3)$$

式中,  $k_p, k_v$  —— 控制系统的位置和速度增益(简称控制增益)。

实际上,驱动器采用式(3.3)的控制规律,加力作用在图 3-53 所示的系统上,就形成了实际的闭环系统。此时,系统的运动方程为

$$m\ddot{x} + b'\dot{x} + k'x = 0 \quad (3.4)$$

式中,  $b' = b + k_v, k' = k + k_p$ 。

由式(3.4)可以看出,适当地选择控制系统的增益  $k_p$  和  $k_v$ ,可以得到所希望的任意二阶系统的品质,抑制干扰力,并使物体保持在预定的位置上。通常,系统具有指定的刚度  $k'$ ,这时所选的增益应使系统具有临界阻尼,即

$$b' = 2\sqrt{mk'} \quad (3.5)$$

这种控制系统称为位置调节系统,它能够控制物体保持在一个固定的位置上,并具有抗干扰能力。

(2) 轨迹跟踪位置控制。在工业机器人的控制中,不仅要求受控物体定位在固定位置,而且要求它能跟踪指定的目标轨迹,即控制物体沿一条由时间函数  $x_d(t)$  所给定的轨迹运动。假设给定轨迹  $x_d(t)$  充分光滑,存在一阶和二阶导数  $\dot{x}_d(t), \ddot{x}_d(t)$ ,并且利用轨迹规划器可产生全部时间  $t$  内的  $x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d$ 。由于某一时刻物体的实际位置  $x(t)$ 、速度  $\dot{x}(t)$  可以

由位置传感器和速度传感器分别测得,这样,伺服误差  $e = x_d - x$ ,即目标轨迹与实际轨迹之差也可以计算得到。因此,轨迹跟踪的位置控制规律可选为

$$f = \ddot{x}_d + k_v \dot{e} + k_p e \quad (3.6)$$

显然,将上述控制规律与无阻尼、无刚度的单位质量系统运动方程  $f = m\ddot{x} + \ddot{x}$  联立可得到

$$\ddot{x} = \ddot{x}_d + k_v \dot{e} + k_p e \quad (3.7)$$

即得到系统运动的误差方程为

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = 0 \quad (3.8)$$

由于选择了恰当的控制规律式(3.6),因此导出了系统误差空间的二阶微分方程式(3.8)。通过选择恰当的  $k_p$  和  $k_v$ ,可以很容易地确定系统对于误差的抑制特性。当  $k_v^2 = 4k_p$  时,可以使这个二阶系统处于临界阻尼状态,没有超调,使误差得到最快的抑制。

## 2) 机器人的位置控制

工业机器人位置控制的目的是要使机器人各关节实现预先规划的运动,最终保证工业机器人终端(手爪)沿预定的轨迹运行。

图 3-54 所示的机器人控制系统方框图表示了机器人本身、控制系统和轨迹规划器之间的关系。



图 3-54 机器人控制系统框图

机器人位置控制的目的是要使机器人的各关节或末端执行器的位姿能够以理想的动态品质跟踪给定轨迹或稳定在指定的位姿上。设计控制系统的主要目标是系统的稳定性和动态品质的性能指标。

工业机器人接受控制系统发出的关节驱动力矩矢量  $\tau$ 、安装于机器人各关节上的传感器测出关节位置矢量  $q$  和关节速度矢量  $\dot{q}$ ,再反馈到控制器上,这样就由反馈控制构成了机器人的闭环控制系统,不同形式的控制结构如图 3-55、图 3-56 所示。设计这样的控制系统,其中心问题是保证所得到的闭环系统能满足一定的性能指标要求,其最基本的准则是系统的稳定性。所谓系统是稳定的,是指它在实现所规划的路径轨迹时,即使在一定的干扰作用下,其误差仍然保持在很小的范围之内。

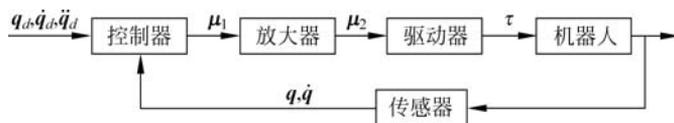


图 3-55 关节空间控制结构

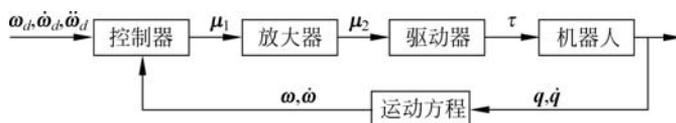


图 3-56 直角坐标空间控制结构

图 3-55 中,  $q_d = [q_{d1} \quad q_{d2} \quad \dots \quad q_{dn}]^T$  是期望的关节位置矢量;  $\dot{q}_d$  和  $\ddot{q}_d$  是期望的关节速度矢量和加速度矢量;  $q$  和  $\dot{q}$  是实际的关节位置矢量和速度矢量;  $\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \dots \quad \tau_n]^T$  是关节驱动力矩矢量;  $\mu_1$  和  $\mu_2$  是相应的控制矢量。

图 3-56 中,  $\omega_d = [p_d^T \quad \phi_d^T]^T$  是期望的工具位姿, 其中,  $p_d = [x_d \quad y_d \quad z_d]$  表示期望的工具位置;  $\phi_d$  表示期望的工具姿态;  $\dot{\omega}_d = [v_d^T \quad \omega_d^T]^T$ , 其中  $v_d = [v_{dx} \quad v_{dy} \quad v_{dz}]$  是期望的工具线速度;  $\omega_d = [\omega_{dx} \quad \omega_{dy} \quad \omega_{dz}]^T$  是期望的工具角速度; 而  $\ddot{\omega}_d$  是期望的工具加速度;  $\omega$  和  $\dot{\omega}$  是表示实际工具的位姿和速度。

运行中的工业机器人一般采用图 3-55 所示的控制结构。该控制结构期望轨迹是关节的位置、速度和加速度, 因而易于实现关节的伺服控制。但在实际应用中通常采用直角坐标系来规定作业路径、运动方向和速度, 而不用关节坐标。这时为了跟踪期望的直角轨迹、速度和加速度, 需要先将机器人末端的期望轨迹经过逆运动学计算变换为在关节空间表示的期望轨迹, 再进行关节位置控制, 如图 3-57 所示。

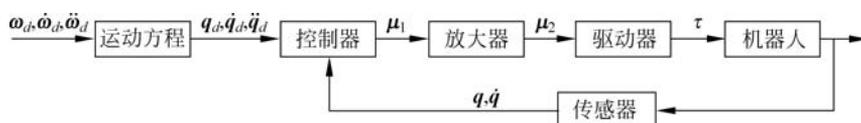


图 3-57 复合控制结构

力矩前馈控制的控制系统结构图如图 3-58 所示, 此种结构能够提高系统伺服控制的响应, 但对控制器计算工作量要求高, 并且机器人动力学的模型的精度直接影响最终的控制精度。

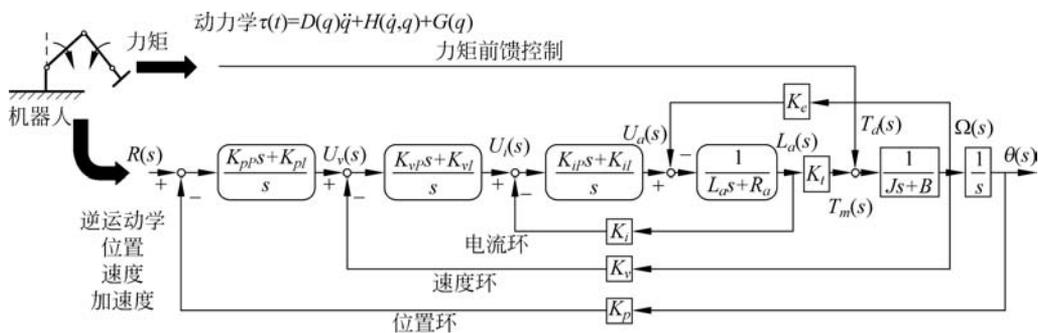


图 3-58 力矩前馈复合控制结构

### 3) 机器人的运动轨迹控制

机器人的轨迹指机器人在运动过程中的位移、速度和加速度。路径是机器人位姿的一定序列, 而不考虑机器人位姿参数随时间变化的因素。

机器人的运动轨迹类型分为点到点轨迹和连续轨迹, 如图 3-59 所示; 连续轨迹可以分为直线轨迹和圆弧轨迹, 如图 3-60 所示。连续轨迹对轨迹上的每个点的位置都有严格要求, 而点到点轨迹只对起始点和终点有严格要求, 其他位置没有要求。直线轨迹是机器人末端执行器保持姿态不变, 并以一定的速度沿着直线运动; 圆弧轨迹是机器人末端执行器保持姿态或者改变姿态, 并沿圆弧轨迹运动。

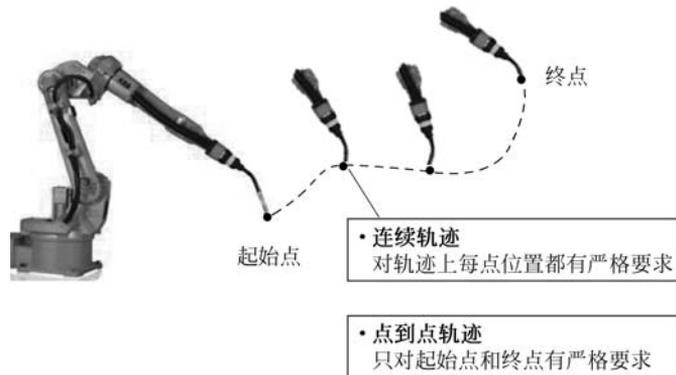


图 3-59 机器人轨迹类型



图 3-60 机器人连续轨迹分类

在编制机器人工作程序时,了解在其路径上无障碍(障碍约束)以及它是否必须沿特定路径运动。把障碍约束和路径约束组合起来,形成四种可能的控制方式,如表 3-1 所示。机械手由初始点(位置和姿态)运动到终止点,经过的空间曲线称为路径。

表 3-1 机械手控制方式

路径约束 \ 障碍约束	障碍约束	
	有	无
有	离线无碰撞路径规划加在路径跟踪	离线路径规划加在路径跟踪
无	位置控制加在障碍检测和避障	位置控制

要实现机器人从初始点到终点的路径就需要应用轨迹规划知识。机器人轨迹规划方法一般是在机器人初始位置和目标位置之间用多项式函数插值或逼近给定的路径(多项式拟合),并产生一系列“控制设定点”。路径端点一般是在笛卡儿坐标中给出的。如果需要某些位置的关节坐标,则可调用运动学逆问题求解程序,进行必要的转换。

机器人轨迹规划主要考虑的是程序设计更容易、缩短运动周期时间、不存在奇异点。基于多项式拟合的轨迹规划最为常用,因为模型简单,计算量较少,但是需要设定速度、加速度限制以及力矩限制,避免电机、齿轮箱或是结构件超载。一些先进的运动轨迹规划方法有考虑动力学限制及加速度限制的运动规划、节拍时间最短的运动规划、最低能耗的运动规划等。

在给定的两端点之间,常有多条可能的轨迹。例如,可以要求机械手沿连接端点的直线运动(直线轨迹),也可以要求它沿一条光滑的圆弧轨迹运动,在两端点处满足位置和姿态约束(关节变量插值轨迹)。

而轨迹控制就是控制机器人手端沿着一定的目标轨迹运动。因此,目标轨迹的给定方

法和如何控制机器人手臂使之高精度地跟踪目标轨迹的方法是轨迹控制的两个主要内容。给定目标轨迹的方式有示教再现方式和数控方式两种。

(1) 示教再现方式。示教再现方式是在机器人工作之前,让机器人手部沿着目标轨迹移动,同时将位置及速度等数据存入机器人控制计算机中。在机器人工作时再现所示教的动作,使手部沿着目标轨迹运动。示教时使机器人手臂运动的方法有两种:一种是用示教盒上的控制按钮发出各种运动指令;另一种是操作者直接用手抓住机器人手部,使其手端按目标轨迹运动。轨迹记忆再现的方式有点位控制和连续路径控制。点位控制主要用于点焊作业、更换刀具或其他工具等情况。连续路径控制主要用于弧焊、喷漆等作业。点位控制中重要的是示教点处的位置和姿态,点与点之间的路径一般不重要,但在给机器人编制工作程序时,要求指出对点与点之间路径的情况,比如是直线、圆弧还是任意的。连续路径控制按示教的方式又分两种:一种是在连续路径上示教许多点,使机器人按这些点运动时,基本上能使实际路径与目标路径相吻合;另一种是在示教点之间用直线或圆弧线插补。

(2) 数控方式。数控方式与数控机床的控制方式一样,是把目标轨迹用数值数据的形式给出,这些数据是根据工作任务的需要设置的。

无论是采用示教再现方式还是用数控方式,都需要生成点与点之间的目标轨迹。此种目标轨迹要根据不同的情况要求生成,但是也要遵循一些共同的原则。例如,生成的目标轨迹应是实际上能实现的平滑的轨迹;要保证位置、速度及加速度的连续性。保证手端轨迹、速度及加速度的连续性,是通过各关节变量的连续性实现的。

设手端在点  $r_0$  和  $r_f$  间运动,对应的关节变量为  $q_0$  和  $q_f$ ,它们可通过运动学逆问题算法求出。为了说明轨迹生成过程,把关节向量中的任意一个关节变量  $q_i$  记为  $\epsilon$ ,其初始值和终止值分别为

$$\epsilon(0) = \epsilon_0 \quad \epsilon(t_f) = \epsilon_f \quad (3.9)$$

把这两时刻的速度和加速度作为边界条件,表示为

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \quad \dot{\epsilon}(t_f) = \dot{\epsilon}_f \quad (3.10)$$

$$\ddot{\epsilon}(0) = \ddot{\epsilon}_0 \quad \ddot{\epsilon}(t_f) = \ddot{\epsilon}_f \quad (3.11)$$

满足这些条件的平滑函数虽然有许多,但其中时间的多项式是最简单的。能同时满足条件式(3.9)~式(3.11)的多项式最低次数是5,所以设

$$\epsilon(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$

其中的待定系数可求出如下结果:

$$a_0 = \epsilon_0, a_1 = \dot{\epsilon}_0, a_2 = \frac{1}{2} \ddot{\epsilon}_0, a_3 = \frac{1}{2t_f^3} [\epsilon_f - 20\epsilon_0 - (8\dot{\epsilon}_f + 12\dot{\epsilon}_0)t_f - (3\ddot{\epsilon}_f - \ddot{\epsilon}_0)t_f^2]$$

$$a_4 = \frac{1}{2t_f^5} [30\epsilon_0 - 30\epsilon_f + (14\dot{\epsilon}_0 + 16\dot{\epsilon}_f)t_f + (3\ddot{\epsilon}_0 - 2\ddot{\epsilon}_f)t_f^2]$$

$$a_5 = \frac{1}{2t_f^5} [12\epsilon_f - 12\epsilon_0 - (6\dot{\epsilon}_f + 6\dot{\epsilon}_0)t_f - (\ddot{\epsilon}_0 - \ddot{\epsilon}_f)t_f^2]$$

当  $\ddot{\epsilon}_0 = \ddot{\epsilon}_f = 0$ ,  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_f$ 、 $\dot{\epsilon}_0$  和  $\dot{\epsilon}_f$  满足如下关系:

$$\epsilon_f - \epsilon_0 = \frac{1}{2} (\dot{\epsilon}_0 + \dot{\epsilon}_f) t_f \quad (3.12)$$

当  $a_5=0$  时,  $\varepsilon(t)$  变为四次多项式。将此四次多项式和直线插补结合起来,可给出多种轨迹。由于机器人手端的位移、速度及加速度与关节变量间不是线性关系,通过生成平滑的关节轨迹不能保证生成平滑的手端路径,因此有必要首先直接生成手端的平滑路径,然后根据运动学逆问题求解关节位移、速度及加速度变化规律。

如果用  $r_0$  和  $r_f$  分别表示开始点和终止点手端位姿,要生成这两点间手端的平滑路径。由于手部的某一位姿要用 6 个坐标来描述,其中 3 个表示位置,另 3 个表示姿态。分别把这 6 个坐标变量用  $\zeta(t)$  表示,用上述生成关节平滑轨迹的方法分别生成这些坐标变量,然后再用机器人正运动学计算出各关节的运动规律。

#### 4) 机器人的视觉引导伺服控制

机器人视觉伺服系统是机器视觉和机器人控制的有机结合。目前机器人视觉伺服主要有两种方式:

##### (1) 基于位置控制的动态 look and move 系统。

基于位置控制的动态 look and move 系统主要由图像处理模块计算出摄像机应具有的速度或位置增量,反馈至机器人关节控制器,其控制系统结构图如图 3-61 所示。

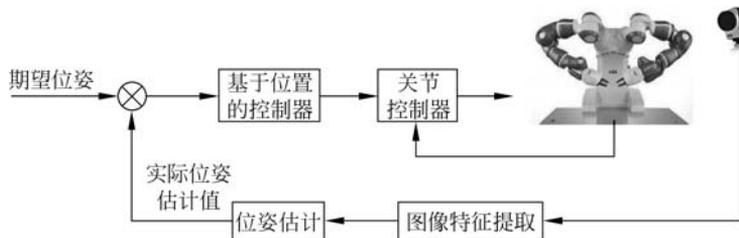


图 3-61 基于位置控制的动态 look and move 系统结构图

##### (2) 基于图像控制的直接伺服控制系统。

基于图像控制的直接伺服控制系统主要由图像处理模块直接计算机器人手臂各关节运动的控制量,其控制系统结构图如图 3-62 所示。

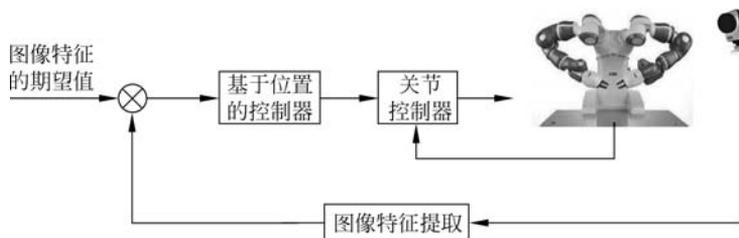


图 3-62 基于图像控制的直接伺服控制系统结构图

这种控制方法,关键的问题是如何建立反映图像差异变化与机器人手臂位姿速度变化之间关系的图像雅可比矩阵。

目前,工业机器人视觉伺服控制存在的主要难点是以下几个方面:需要高精度手眼标定;在实际工业环境下快速、鲁棒地获取图像特征;高效、具有高带宽的机器人控制器开放接口;视觉伺服控制策略与理论。

### 3.5.4 智能控制技术

#### 1. 机器人智能控制概述

智能机器人的控制技术是一个包含智能控制技术、电子电路技术、计算机技术、多传感器信息融合技术、先进制造技术、网络技术等内容相当广泛的多学科交叉的研究领域,本书只就机器人智能控制技术的一部分新近研究成果进行简单整理和介绍。

当今机器人已经深入到人类生活的方方面面。机器人应用领域的广泛性和机器人种类的多样性,深刻反映出机器人控制综合利用了机器人学和自动化领域的最新技术。人类生活对高度智能化机器人的需求,使得基于经典优化方法的控制策略已经远远不能满足智能机器人技术发展的需要。寻找具有柔顺性和智能性的控制策略,已成为智能机器人研究迫切需要解决的问题之一。

1966年J. M. 门德尔(MeMdel)首先主张将人工智能用于飞船控制系统的设计。1971年著名学者博京逊(K. S. FU)从发展学习控制的角度首次正式提出智能控制这个新兴的学科领域。在他的《学习控制系统和智能控制系统:人工智能与自动控制的交叉》一文中,列举了以下三种智能控制系统的例子。

#### 1) 人作为控制器的控制系统

由于人具有识别、决策和控制等功能,因此对于不同的控制任务及不同的对象和环境情况,它具有自学习、自适应和自组织的功能,他能自动采用不同的控制策略以适应不同的情况。

#### 2) 人-机结合作为控制器的控制系统

在这样的系统中,机器(主要是计算机)完成那些连续进行并需要快速计算的常规控制任务,人则主要完成任务分配、决策、监控等任务。

#### 3) 无人参与的自主控制系统

最典型的例子是自主机器人。这时的自主式控制器需要完成问题求解和规划、环境建模、传感信息分析和低层的反馈控制等。

G. N. 萨里迪斯(Saridis)对智能控制的发展做出了重要的贡献。他在1977年出版了《随机系统的自组织控制》一书,同年发表了一篇综述文章《走向智能控制的实现》,在这两篇著作中,他从控制理论发展的观点出发,论述了从通常的反馈控制到最优控制、随机控制,再到自适应控制、自学习控制、自组织控制,并最终向智能控制这个更高阶段发展的过程。他首次提出了分层递进的智能控制结构形式,整个控制结构由上往下分为三个层次,即组织级、协调级和执行级,其控制精度由下往上逐级递减,智能程度由下往上逐级增加。

目前,神经网络的研究受到了越来越多的用户关注和重视,其在控制中的应用就是一个主要方面。由于神经网络在许多方面试图模拟人脑的功能,因此神经元控制并不依赖于精确的数学模型,而显示出具有自适应和自学习的功能。神经网络在机器人中的应用研究已经取得了很多成果,显示出了广泛的应用前景。

在智能控制的发展过程中,另外一个值得一提的著名学者是K. J. 奥斯特洛姆(Astrom)。他在1986年发表的《专家控制》的著名文章中,将人工智能中的专家系统技术引入到控制系统中,组成了另外一种类型的智能控制系统。借助于专家系统技术,它将常规的PID控制、最小方差控制、自适应控制等各种不同的方法有机地组合在一起,它能根据不

同的情况分别采用不同的控制策略,同时也可结合许多逻辑控制的功能,如启停控制、自动切换、越限、报警以及故障诊断等功能。这种专家控制的方法已有许多成功应用的报道。

模糊控制是另一类智能控制的形式。现代计算机虽然有着极高的计算速度和极大的存储能力,但是都只能完成一些看起来十分简单的任务。一个很重要的原因是人具有模糊决策和推理的功能。模糊控制正是试图模仿人的这种功能。1965年L. A. 扎德(Zadeh)首先提出了模糊集理论,为模糊控制奠定了基础。在其后的20多年中已有很多模糊控制在实际中获得成功的例子。

智能控制是控制理论发展的高级阶段,是一个新兴的学科领域。它有着十分广泛的应用前景,主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题,其中包括智能机器人系统、计算机集成制造系统、复杂的工业过程控制系统、航天航空控制系统、社会经济管理系统、交通运输系统、环保及能源系统等。而机器人是智能控制最主要和最典型的应用领域。

## 2. 机器人智能控制技术

### 1) 机器人变结构控制

变结构控制是对不定性动力学系统进行控制的一种重要方法。变结构系统是一种非连续反馈控制系统。其主要特点是它在一种开关曲面上建立滑动模型,称为“滑模”。机器人变结构系统对系统参数及外界干扰不敏感,因而能忽略机器人关节间的相互作用。变结构控制技术的设计不需要精确的动力学模型,只需要参数的范围,所以变结构控制适合机器人的运动控制。

### 2) 机器人自适应控制

机器人的动力学模型存在非线性和不确定因素,这些因素包括未知的系统参数(如摩擦力)、非线性动态特性(如重力、哥氏力、向心力的非线性),以及机器人在工作过程中环境和工作对象的性质和特征的变化。这些未知因素和不确定性,会使控制系统性能变差,采用一般的反馈技术不能满足控制要求。一种解决此问题的方法是在运行过程中不断测量受控对象的特性,根据测得的特征信息使控制系统按新的特性实现闭环最优控制,即自适应控制。自适应控制主要分模型参考自适应控制和自校正自适应控制。

### 3) 机器人鲁棒控制

针对机器人的不确定性有两种基本控制策略,即自适应控制和鲁棒控制。当受控系统参数发生变化时,自适应控制通过及时的辨识、学习和调整控制规律,可以达到一定的性能指标,但实时性要求严格,实现比较复杂,特别是当存在非参数不确定性时,自适应控制难以保证系统的稳定性;而鲁棒控制可以使不确定因素在一定范围内变化,保证系统稳定和维持一定的性能指标,它是一种固定控制,比较容易实现,在自适应控制器对系统不确定性变化来不及做辨识以及校正控制时,可采用鲁棒控制方法。

### 4) 机器人最优控制

用动态规划方法求解最优控制问题是Bellman在20世纪50年代末提出的,其基本思想是:若对一系统做出的一系列决策构成了对一性能指标的最优决策,则不论系统的先前决策如何,相继决策都构成了一个以先前决策所得状态为初始状态的对同一个性能指标的最优决策。

#### 5) 机器人自学习控制

机器人自学习控制是人工智能技术应用到控制领域的一种智能控制方法。已经提出了多种机器人学习控制方法,如基于感知器的学习控制、基于小脑模型的学习控制等。

#### 6) 机器人模糊控制

正如神经网络技术被成功应用于各种机器人的运动规划和控制一样,模糊逻辑也被广泛应用于机器人系统。机器人的模糊控制有两方面的独特优势:一方面它简化了控制算法;另一方面可用于探索模糊逻辑和分析方法学在改善控制系统性能方面的能力。这种方法的主要优点是算法中只需当前和前一状态的测量值,以及一套简单的控制规则,因此可方便地用于实际应用。

#### 7) 机器人人工神经网络控制

人工神经网络属于人工智能领域的重要分支,它首先成功地应用在信号处理领域,包括图像处理、机器视觉、故障诊断、目标检测、自适应滤波和信号压缩等。这些成功,鼓励人们继续深入研究它的基本理论和方法,并把它的应用推广到机器人动力学控制和动态过程规划中。这些内容有机器人逆运动学求解、坐标变换、信息融合和高度非线性机器人动力学控制等。