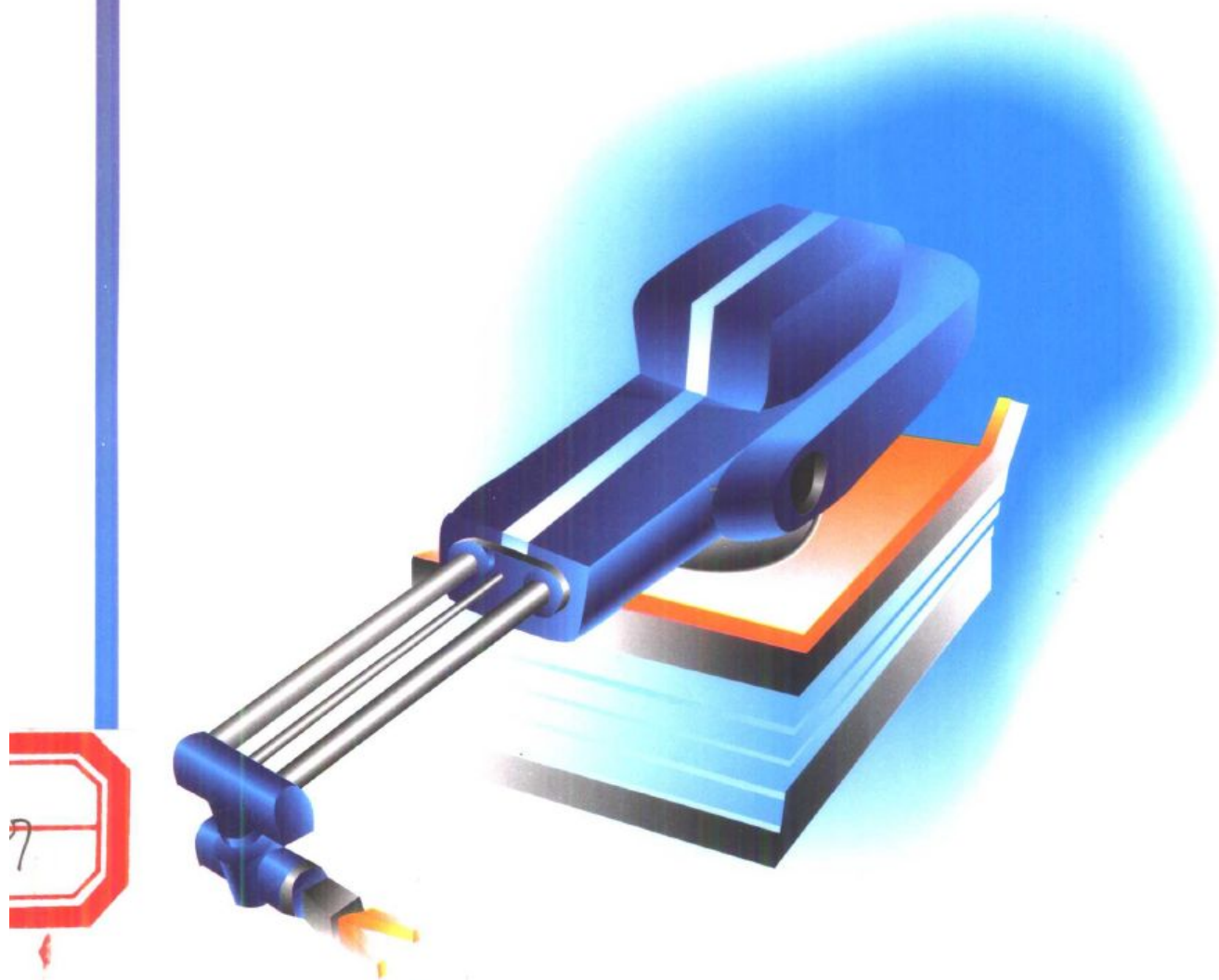


· 高等学校专业教材 ·

工业机器人

· 徐元昌 主编 陶学恒 沈晓红 副主编 ·



 中国轻工业出版社

高等学校专业教材

工业机器人

主 编 徐元昌

副主编 陶学恒 沈晓红



中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人/徐元昌主编. - 北京:中国轻工业出版社,
1999.8

ISBN 7-5019-2428-7

I.工… II.徐… III.工业机器人 IV.TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 17363 号

责任编辑:王 群 责任终审:滕炎福 封面设计:达冠桂仁图文设计公司
版式设计:智苏亚 责任校对:方 敏 责任监印:崔 科

出版发行:中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号,邮编:100740)

印 刷:中国人民警官大学印刷厂

经 销:各地新华书店

版 次:1999 年 8 月第 1 版 1999 年 8 月第 1 次印刷

开 本:787×1092 1/16 印张:16.75

字 数:402 千字 印数:1~3000

书 号:ISBN 7-5019-2428-7/TP·053 定价:36.00 元

·如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换·

前 言

工业机器人是近 30 年来在自动操作机基础上发展起来的一种能模仿人的某些动作和控制功能,并按照可变的预定程序、轨迹及其他要求操纵工具实现多种操作的自动化机械系统。它综合了精密机械、控制传感和自动控制技术等领域的最新成果,在工厂自动化和柔性生产系统中起着关键作用,并已广泛应用到工农业生产、航天航空和军事技术等各个领域。

本书在详细论述工业机器人运动学和动力学的基础上介绍了有关工业机器人机构,控制方法,环境感觉技术,编程语言和工业机器人的总体设计。

全书共分九章。第一、三、七、八章由徐元昌编写,第二章由孙卫青编写,第四、五章由祁广利编写,第六章由沈晓红、祁广利编写,第九章由陶学恒编写。

西安交通大学林廷圻教授和唐建中副教授认真审阅了全部书稿,谨致以衷心感谢。

作者

1999年 6 月

内 容 提 要

本书在详细论述工业机器人运动学和动力学基础上,介绍了有关工业机器人机构,控制方法,环境感觉技术,编程语言和工业机器人的总体设计。

本书可作为大专院校工科专业的教材,也可供有关工程技术人员学习参考。

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 机器人与自动化	(1)
§ 1-2 工业机器人的分类和组成	(2)
一、工业机器人的分类	(2)
二、工业机器人的组成	(5)
§ 1-3 工业机器人的应用和发展	(6)
一、工业机器人的应用	(6)
二、工业机器人的发展	(9)
第二章 工业机器人机构	(10)
§ 2-1 机器人末端执行器	(10)
一、夹钳式取料手	(10)
二、吸附式取料手	(15)
三、专用末端操作器及换接器	(19)
四、仿生多指灵巧手	(21)
§ 2-2 机器人手腕	(22)
一、手腕的自由度	(22)
二、手腕的典型结构	(23)
三、柔顺手腕结构	(27)
§ 2-3 机器人手臂	(28)
一、手臂直线运动机构	(28)
二、手臂回转运动机构	(30)
三、手臂俯仰运动机构	(31)
四、手臂复合运动机构	(31)
§ 2-4 机器人机座	(34)
一、固定式机器人	(34)
二、行走式机器人	(34)
第三章 工业机器人运动学	(41)
§ 3-1 齐次变换	(41)
一、齐次坐标	(41)
二、齐次变换	(42)
§ 3-2 机器人运动学方程	(59)
一、机器人操作机的位置与姿态	(59)
二、末端执行器的位姿 T_6	(61)

三、机器人运动学方程	(65)
四、机器人的工作空间	(78)
§ 3-3 微分运动	(80)
一、机器人的微运动	(80)
二、微分平移及微分旋转	(82)
三、微分旋转的无序性	(83)
四、两坐标系间微分运动的关系	(85)
五、雅可比矩阵	(87)
第四章 工业机器人动力学	(90)
§ 4-1 拉格朗日方程法	(90)
一、拉格朗日动力学方程	(90)
二、拉格朗日动力学方程的应用	(91)
三、工业机器人动力学方程	(94)
§ 4-2 牛顿—欧拉方程法	(98)
一、牛顿—欧拉方程	(98)
二、递推计算公式及算法	(99)
三、递推算法的应用	(103)
第五章 工业机器人控制技术	(107)
一、工业机器人控制系统的特点	(107)
二、工业机器人控制系统的主要功能	(107)
三、工业机器人的控制方式	(107)
四、工业机器人控制系统的组成	(108)
§ 5-1 示教再现控制	(109)
一、示教及记忆方式	(109)
二、示教编程方式	(110)
§ 5-2 运动控制	(110)
一、关节运动伺服指令的生成	(111)
二、关节运动的伺服控制	(119)
§ 5-3 工业机器人的计算机控制	(123)
一、工业机器人计算机控制的分类	(124)
二、微型计算机直接控制工业机器人	(125)
第六章 工业机器人语言	(127)
§ 6-1 工业机器人语言的特点及分类	(127)
一、工业机器人语言的特点	(127)
二、工业机器人语言的分类	(127)
三、工业机器人语言的控制处理过程	(128)
§ 6-2 VAL 语言	(129)
一、VAL 语言系统概况	(129)

	二、VAL 语言简介	(129)
	三、VAL 程序编程举例	(136)
§ 6-3	AL 语言	(137)
	一、语言的特点和运行环境	(137)
	二、主要命令简介	(139)
	三、编程举例	(145)
§ 6-4	AUTOPASS 语言	(146)
	一、语言特点及支撑环境	(146)
	二、语法简介	(147)
	三、编程举例	(148)
第七章	工业机器人的环境感觉技术	(149)
§ 7-1	机器人视觉	(149)
	一、视觉系统的组成	(149)
	二、图像存储、处理与识别	(153)
	三、机器人视觉的应用	(160)
§ 7-2	机器人触觉	(162)
	一、机器人接触觉	(162)
	二、机器人接近觉	(165)
	三、机器人压觉	(166)
	四、机器人滑觉	(167)
	五、机器人力觉	(170)
§ 7-3	机器人听觉	(172)
	一、声音信号的特征	(172)
	二、发言人识别系统	(175)
	三、语义识别系统	(176)
第八章	工业机器人的总体设计	(179)
§ 8-1	工业机器人的设计	(179)
	一、确定总体设计方案	(179)
	二、详细设计	(179)
	三、制造、安装和调试	(180)
§ 8-2	工业机器人的设计步骤	(181)
	一、确定机器人的技术参数	(181)
	二、选择机器人的机械结构	(186)
	三、确定机器人手臂配置	(188)
	四、机器人控制系统设计	(190)
	五、工业机器人的设计计算	(190)
§ 8-3	工业机器人的传动系统设计	(196)
	一、工业机器人的驱动系统	(196)

二、工业机器人的传动系统设计	(199)
§ 8-4 典型工业机器人系统	(200)
一、SCARA 型装配机器人	(200)
二、PUMA 多关节机器人	(204)
三、ASEA 焊接机器人	(207)
四、BJDP-1 机器人	(211)
§ 8-5 工业机器人设计实例——六足步行机器人	(216)
一、全方位六足步行机器人(LR-1 型)	(216)
二、适应性主动悬挂车辆(ASV)	(224)
第九章 工业机器人的应用	(232)
§ 9-1 工业机器人的应用	(232)
一、焊接机器人	(232)
二、喷漆机器人	(234)
三、装配机器人	(235)
四、核能领域中的机器人技术	(238)
五、医用机器人	(240)
六、堆列搬运机器人	(242)
§ 9-2 工业机器人技术的发展趋势	(244)
一、工业机器人技术的发展趋势	(244)
二、工业机器人应用预测	(245)
附录一 工业机器人常用术语	(246)
附录二 典型机器人传动系统	(248)
附录三 主要机器人的产品性能	(254)
附录四 主要机器人语言	(258)
参考文献	(259)

第一章 绪论

机器人一词最早出现于 1920 年捷克作家 Karel Capek 的剧本《罗萨姆的万能机器人》中，捷克的 Robota 意为“苦力”、“劳役”，是一种人造劳动者，英语 Robot 由此衍生而来。

本世纪 20 年代，在自动机和自动线上出现了可以代替人力传递和装卸工件的机械手，随后在某些危险作业领域出现了由操作人员直接控制或遥控的操作机。工业机器人是近 30 年来在自动操作机基础上发展起来的一种能模仿人的某些动作和控制功能，并按照可变的预定程序、轨迹和其他要求，操纵工具实现多种操作的自动化机械系统。它综合了精密机械、控制传感和自动控制技术等领域的最新成果。

§ 1-1 机器人与自动化

真正的工业机器人是在第二次世界大战期间发展起来的，始于 40 年代的美国橡树岭国家实验室的搬运核原料的遥控机械操作手研究。这是一种主从型的控制系统，如图 1-1 所示。

50 年代初，由于生产先进飞机的需要，美国麻省理工学院（简称 MIT）把复杂的伺服系统技术与数字计算机技术结合起来建立了数字控制系统，可控制铣床的伺服轴按照模型轨迹作切削动作。

1954 年美国 George C. Devol 设计、制作了可程序的关节型搬运装置，并获得专利。60 年代，Devol 和 Joseph F. Engelberger 组建了 Unimation 公司，生产了世界上第一台机器人—Unimate（意为“万能自动”），是一台用于压铸的五轴液压机器人。手臂的控制由一台计算机完成，能记忆完成 180 个工作步骤。同时，美国 AMF 公司（机床与铸造公司）也研制了另一种可编程机器人—Versatran（即 Versatile transfer 多才多艺搬运机），它主要用于设备间的物料运输。采用液压传动，机器人手臂可绕底座回转，沿垂直方向升降，也可沿半径方向伸缩。这种机器人以“示教再现”方式成功地在汽车生产线上代替人工进行搬运、焊接和喷漆等作业。

各种生产过程的机械化和自动化是现代技术发展的趋势。制造工业的第一次革命是单件小批量手工作业到大批量生产的自动化生产线，随着技术进步和市场需求的发展，又进一步要求实现产品的小批量和多品种。这就要求制造系统具有柔性，即只要改变程序就可用同样设备生产新的产品，从而出现了 FMS（柔性制造系统）和 FA（工厂自动

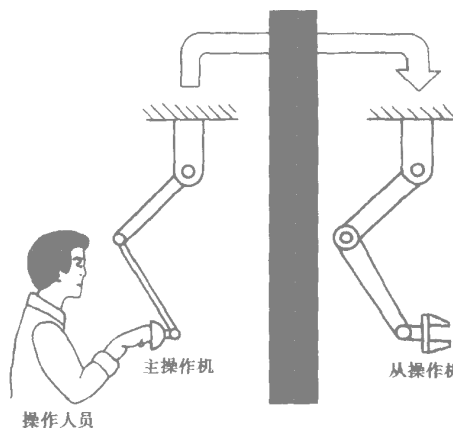


图 1-1 主从式机械手

化)技术。作为现代生产的 FMS 和 FA 技术的重要组成部分—工业机器人也得到迅速发展。

工业机器人是提高生产过程自动化,改善劳动条件,提高产品质量和生产效率的有效手段之一。1984年 ISO(国际标准化组织)采纳了美国机器人协会(RIA)的建议,给机器人下了定义,即“机器人是一种可反复编程和多功能的用来搬运材料,零件、工具的操作机或为了执行不同任务而具有可改变和可编程的动作的专门系统”(A reprogrammable and multifunctional manipulator, devised for the transport of materials, parts, tools or specialized Systems, with varied and programmed movements, with the aim of carrying out varied tasks)。我国国家标准 GB/T12643—90 将工业机器人定义为“是一种能自动定位控制,可重复编程的,多功能的、多自由度的操作机。能搬运材料、零件或操持工具,用以完成各种作业。”

机器人与机械手的主要区别是前者具有独立的控制系统,可通过编程方法实现动作程序的变化;而后者则只能完成简单的搬运、抓取及上下料工作,一般作为自动机或自动线上的附属装置,其程序固定不变。

工业机器人的发展过程可分为三个阶段:第一代机器人就是目前工业中大量使用的“示教再现”机器人,主要由夹持器、手臂、驱动器和控制器组成。示教内容为机器人操作机构的空间轨迹,作业条件,作业顺序等。示教方法可以是操作者“手把手”直接做,或与计算机编程结合,通过示教存储信息,工作时读出这些信息,向执行机构发出指令,执行机构按指令再现示教的操作,广泛用于上下料、焊接、喷漆和搬运。第二代机器人是带感觉的机器人,能获取作业环境,操作对象的简单信息,通过计算机处理和分析,对外界信息进行反馈,采用自适应控制,从 90 年代起进入实用阶段。第三代机器人即智能机器人,是指具有适应性的自治机器人,能理解指示命令,感知环境,识别对象,具有知识库和专家系统,在作业环境中能独立工作,目前还处于实验阶段。

机器人技术的发展产生了一个崭新的工程领域——机器人学,这是一门研究机器人设计、制造和使用的学科。1950 年美国科幻小说家 I·阿西莫夫在他的小说《我是个机器人》中首次使用了“Robotics”一词,即机器人学。他还在书中提出“机器人三原则”:

- (1)机器人不可伤害人;
- (2)机器人必须服从人给它的与原则(1)不矛盾的指令;
- (3)在与前两个原则不矛盾的前提下,机器人可维护自身不受伤害。

有关机器人技术的国际交流也日趋广泛,除 IEEE 每年举行“机器人学及自动化”国际会议外,还有 ISIR(国际工业机器人会议)和 CIRT(国际工业机器人技术会议)。有关机器人研究的杂志有 Robot Today、Robotics Research 和 Robotics and Automation 等。

§ 1-2 工业机器人的分类和组成

一、工业机器人的分类

工业机器人大体可按其坐标形式,驱动方法,运动控制方式和使用范围进行分类。

1. 按坐标形式分

坐标形式是指操作机手臂在运动时所取的参考坐标系的形式。

(1)直角坐标式(代号 PPP) 如图 1-2 所示, 机器人是通过沿 $x-y-z$ 三个互相垂直的直角坐标的移动来实现末端执行器(手部)空间位置的改变, 即沿 x 轴的纵向移动, 沿 y 轴的横向移动和沿 z 轴的升降。这种类型机器人以 IBM RS-1 型为代表。这种机器人位置精度高, 控制无耦合, 比较简单, 避障性好, 但占空比大(即机器人机构所占空间与动作空间之比), 灵活性较差。

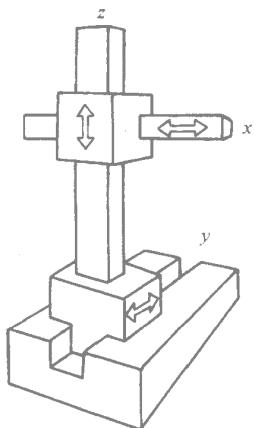


图 1-2 直角坐标式机器人

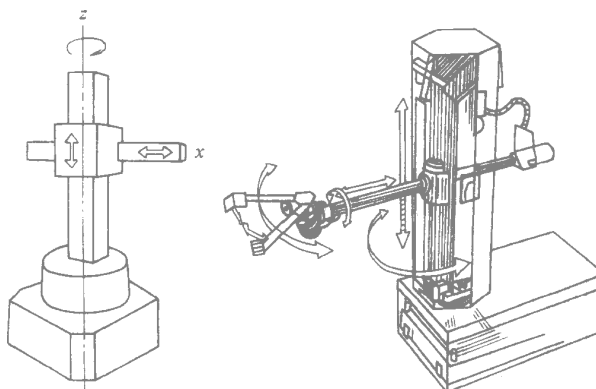


图 1-3 圆柱坐标式机器人

(2)圆柱坐标式(代号 RPP) 如图 1-3 所示, 机器人通过两个移动和一个转动来实现末端执行器空间位置的改变。这种机器人以 Versatran 型为代表, 这种机器人的位置精度仅次于直角坐标式, 控制简单, 避障性好, 但结构庞大, 两个移动轴的设计较复杂, 难与其他机器人协调工作。

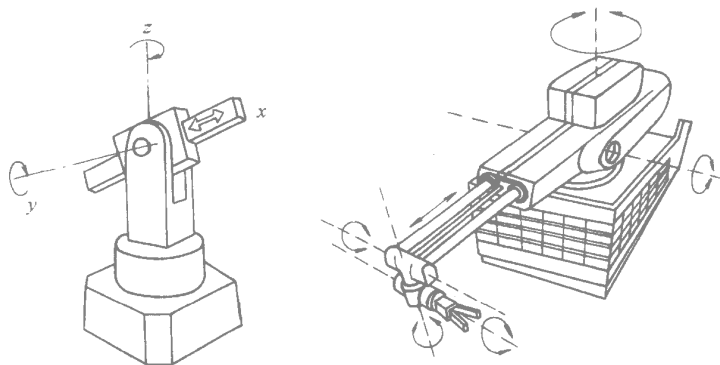


图 1-4 球坐标式机器人

(3)球坐标式(代号 RRP) 如图 1-4 所示, 又称极坐标式。机器人手臂运动由 1 个

直线运动和 2 个转动所组成，即沿 x 轴方向的伸缩，绕 y 轴的俯仰和绕 z 轴的回转。这种机器人以 Vimate 型为代表，机器人体积小，结构紧凑，其位置精度尚可，但避障性差，有平衡问题，位置误差与臂长成比例，能与其他机器人协调工作。

(4) 关节坐标式(代号 RRR) 如图 1-5 所示，又称回转坐标型，分为垂直关节坐标和平面(水平)关节坐标，机器人由立柱和大小臂组成，立柱与大臂通过肩关节相连接，立柱绕 z 轴旋转，形成腰关节，大臂与小臂形成肘关节，可使大臂作回转和俯仰，小臂作俯仰。这种机器人以 PUMA 型为代表，机器人工作空间范围大，动作灵活，避障性好，能抓取靠近机座的物体，但位置精度较低，有平衡问题，控制耦合比较复杂，能与其他机器人协调工作，目前应用越来越多。

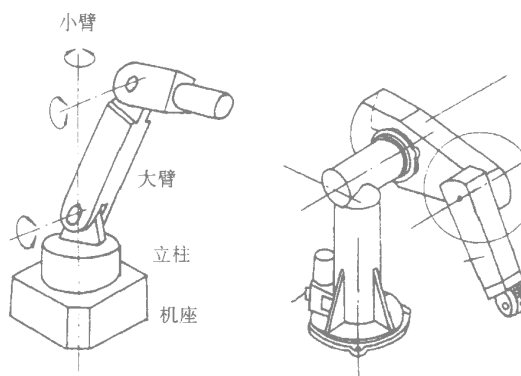


图 1-5 关节坐标式机器人

还有一种平面关节式，如图 1-6 所示，这种机器人以 SCARA 型为代表，采用两个回转关节和一个移动关节；两个回转关节控制前后、左右运动，而移动关节实现上下运动。平面关节型机器人结构简单，动作灵活，多用于装配作业中，特别适合小规格零件的插接装配。

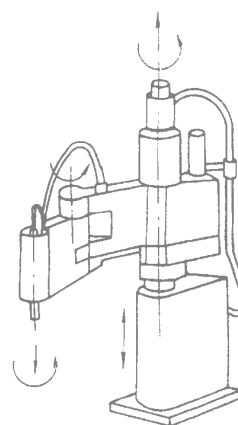


图 1-6 平面关节坐标式机器人

2. 按驱动方法分

工业机器人的驱动方法可分为电力、液压和气压驱动三种。

(1) 电力驱动 这种驱动是目前在工业机器人中用的最多的一种。早期多采用步进电动机(SM)驱动，后来发展了直流伺服电动机(DC)，现在交流伺服电动机(AC)驱动也开始广泛应用。上述驱动单元有的直接驱动机构运动，有的通过谐波减速器装置来减速，结构简单紧凑。

(2) 液压驱动 液压传动机器人有很大的抓取能力，抓取力可高达上百公斤力，液压力可达 7MPa 。液压传动平稳，动作灵敏，但对密封性要求高，不宜在高或低温现场工作，需配备一套液压系统。

(3) 气压驱动 气压传动机器人结构简单，动作迅速，价格低廉，由于空气可压缩，所以工作速度稳定性差，气压一般为 0.7MPa ，因而抓取力小，只有几十牛到百牛力。

3. 按运动控制方式分

(1) 点位控制(PTP, Point to Point) 采用点位控制，机器人运动为空间点到点间的直线运动，不涉及两点间的移动路径，只在目标点处控制机器人末端执行器的位置和姿态。这种控制方式简单，适用于上下料、点焊、卸运等作业。

(2) 连续轨迹控制(CP, Continuous Path) 这种控制方式不仅要求机器人以一定精度

达到目标点，而且对运动的轨迹也有一定精度要求。运动轨迹是空间的连续曲线，机器人在空间的整个运动过程都要控制，比较复杂。这种控制常用于焊接、喷漆和检测等。

目前多数工业机器人实际上采用 PTP“示教”（对于直线轨迹为两点指定，对于圆弧则为三点或四点指定）。点间的轨迹由微处理器作插补运算（直线或圆弧插补），再发出相应的“再现”指令。

4. 按使用范围分

(1) 可编程序的通用机器人 其工作程序可按不同工作对象改变，通用性强，适用于多品种，中小批量的生产系统中。

(2) 固定程序专用机器人 一般根据工作要求设计成固定程序，多为液动或气动驱动，电动较少，结构简单。

工业机器人按编程方式可分为人工编程，手把手示教编程和示教盒示教编程；按操作功能可分为抓放式、专用式和通用式；按程序存储方式则可分为顺序开关，微处理器，可编程控制，插销板和气动逻辑元件等；按控制系统的方式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。

二、工业机器人的组成

工业机器人一般由操作机、驱动装置和控制系统三部分组成。如图 1-7 所示。

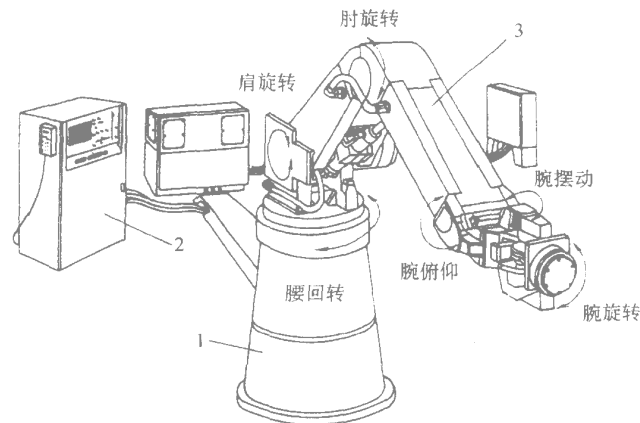


图 1-7 工业机器人的组成
1. 机座 2. 控制装置 3. 操作机

1. 操作机（也称执行机构）

如图 1-8 所示，操作机具有和人臂相似的功能，是可在空间抓放物体或进行其他操作的机械装置。包括机座、手臂、手腕和末端执行器。

(1) 末端执行器（又称手部）是操作机直接执行工作的装置，可安装夹持器、工具、传感器等。夹持器可分为机械夹紧、真空抽吸、液压张紧和磁力等四种。

(2) 手腕 是连接手臂与末端执行器的部件，用来支承和调整末端执行器的姿态，一

般有 2~3 个回转自由度，并可扩大手臂的工作范围。有的专用机器人可以没有手腕而直接将末端执行器安装在手臂的端部。手腕有弯曲式和旋转式两种。

(3) 手臂 它由操作机的连接杆件和关节组成，用于支承和调整手腕和末端执行器。手臂有时不止一条，还应包括肘关节和肩关节。一般将靠近末端执行器的一节称为小臂，靠近机座的称为大臂。手臂与机座间用关节连接，因而扩大了末端执行器姿态的运动范围。

(4) 机座 是机器人中相对固定并承受相应力的部件。分为固定式和移动式两类，移动式机座下部安装行走机构，可扩大机器人的工作范围；行走机构多为滚轮或履带，分为有轨与无轨两种。近些年来发展的步行机器人，则其行走机构多为连杆机构。

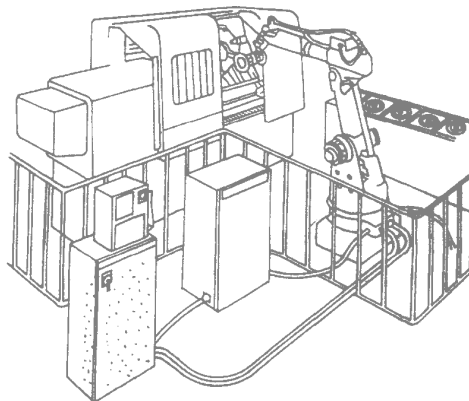


图 1-8 机器人的操作机

2. 驱动装置

机器人的驱动装置用来驱动操作机工作，按动力源的不同分为电动、液动和气动三种，其执行机构电动机、液压缸和气缸可以与操作机直接相连，也可通过齿轮、谐波和链条装置与操作机连接。

3. 控制系统

控制系统用来控制工业机器人按规定要求动作，可分为开环控制系统和闭环控制系统。很多工业机器人采用计算机控制，一般分为决策级、策略级和执行级三级：决策级的功能是识别环境，建立模型，将作业任务分解为基本动作序列；策略级将基本动作变为关节坐标协调变化的规律，分配给各关节的伺服系统；执行级给出各关节伺服系统执行给定的指令。

§ 1-3 工业机器人的应用和发展

一、工业机器人的应用

工业机器人最早应用在汽车制造业，常用于焊接、喷漆、上下料和搬运。工业机器人延伸和扩大了人的手足和大脑功能，它可代替人从事危险、有害、有毒、低温和高热等恶劣环境中的工作；代替人完成繁重、单调重复劳动，提高劳动生产率，保证产品质量。机器人与数控加工中心，自动搬运小车以及自动检测系统可组成柔性制造系统（FMS）和计算机集成制造系统（CIMS），实现生产自动化，如图 1-9 所示。

随着工业机器人技术的发展，其应用已扩展到宇宙探索、深海开发、核科学研究和医疗福利领域。火星探测器就是一种遥控的太空作业机器，图 1-10 所示为遥控太空机器人 SPDM。工业机器人也可用于海底采矿，深海打捞和大陆架开发等，图 1-11 所示为深

海遥控机器人。在核科学研究中，机器人常用于核工厂设备的检验和维修，如前苏联切尔诺贝利核电站发生事故后，就利用机器人进入放射性现场检修管道。在军事上则可用于排雷和装填炮弹。医疗福利和生活服务领域中，机器人应用更为广泛，如护理、导盲、擦窗户等。

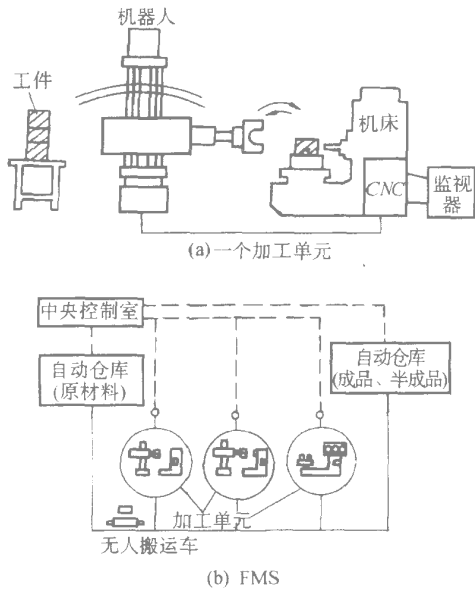


图 1-9 FMS 系统

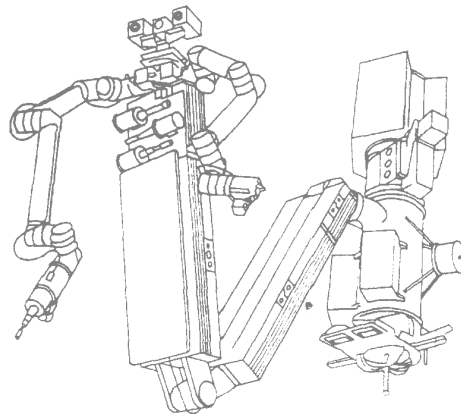


图 1-10 太空遥控机器人

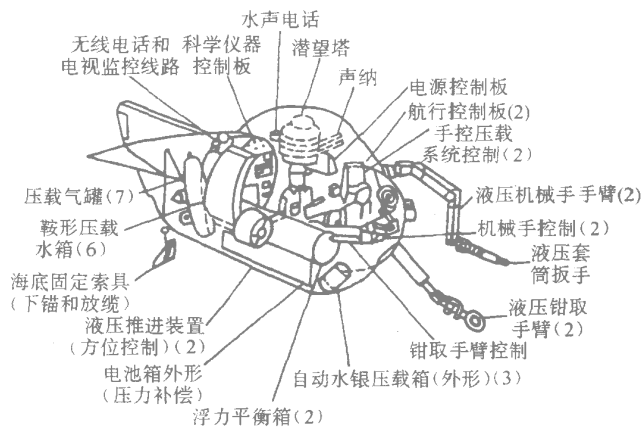


图 1-11 深海遥控机器人

除了上述操作型机器人，还有一类是移动型机器人：有轮式车、履带车、足腿式以及蛇行，蠕动和变形式机器人，如图 1-12 所示。

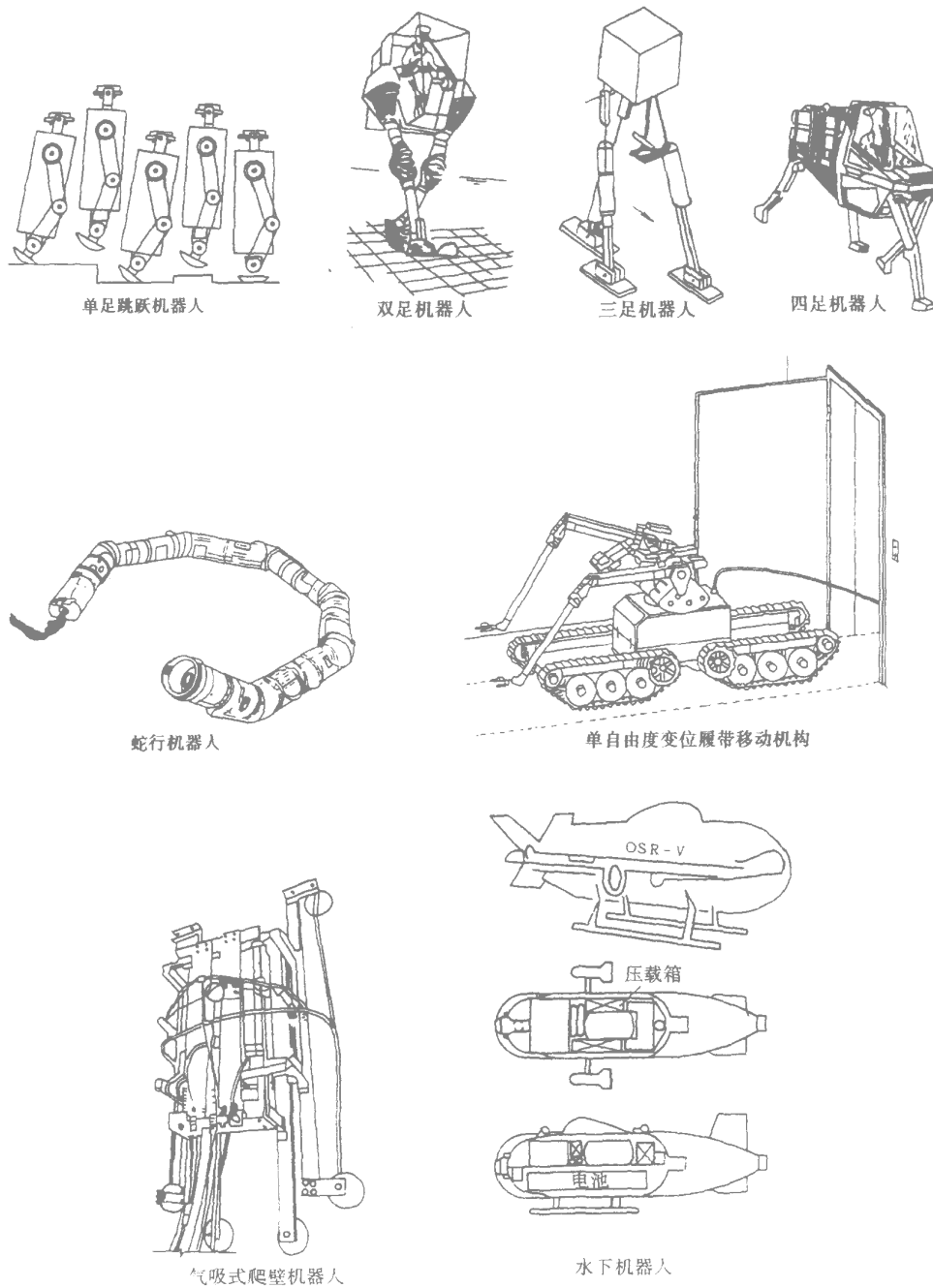


图 1-12 移动式机器人