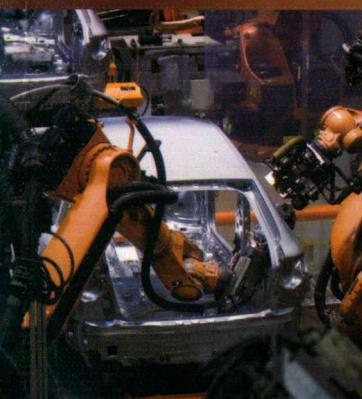


“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材



Industrial Robot Technology

工业机器人技术

朱洪前 © 主编

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材

工业机器人技术

主 编 朱洪前
副主编 周国雄 宋海鹰 陈白帆
参 编 高自成 王振力 李列文



机械工业出版社

工业机器人相比于传统的机电产品,具有更好的环境适应性和智能,其涉及大量最新的机械与自动化知识。本书注重基础,内容深度控制在机械类学生能够接受的范围,既力求通俗易懂又不失先进性和前沿性。本书的内容十分广泛,包括工业机器人设计、开发、使用、维护所涉及的运动学、动力学、机械系统、动力系统、感知系统、控制系统、通信及编程。

本书可作为机械工程、林业工程、矿业工程、农业工程等机械类、近机械类专业的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业机器人技术/朱洪前主编. —北京:机械工业出版社, 2019.6
“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系列精品教材
ISBN 978-7-111-62449-3

I. ①工… II. ①朱… III. ①工业机器人-高等学校-教材
IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 065858 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:余 焯 责任编辑:余 焯 安桂芳 任正一

责任校对:张 薇 封面设计:张 静

责任印制:张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·12.25 印张·301 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-62449-3

定价: 32.80 元

电话服务

客服电话: 010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

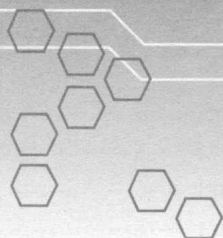
机 工 官 网: www.cmpbook.com

机 工 官 博: weibo.com/cmp1952

金 书 网: www.golden-book.com

机工教育服务网: www.cmpedu.com

前 言



随着人工智能、机器视觉等关键技术的高速发展,工业机器人技术的应用领域正在迅速扩大。各地政府都在努力发展机器人产业,机械、林业、矿业、农业等部门和相关企业也在加速推广应用机器人技术。近年来,在工业 4.0 及“中国制造 2025”政策的引导下,我国机器人产业整体市场规模持续扩大。2013—2018 年,国内产业的平均增长率达到 29.7%,增速保持全球第一。2017 年,我国机器人产业整体市场规模超过 1200 亿元。工业机器人应用场景已从生产线、车间扩展到仓储和物流,应用领域已从汽车、电子等产业扩展到新能源、新材料等产业;服务机器人应用场景扩展更加迅速,已服务于家庭、学校、商场、银行、酒店、医院等多种场所,并进入日常生活的诸多领域。

工业机器人的应用领域和科学技术都在飞速进步,因此教育要迎接巨大的挑战。一方面,高校要大力加强工业机器人发展所需要的多学科和跨学科教育,培养更多机械、自动化、通信、液压等相结合的复合型人才;另一方面,劳动者也要能够终身学习、自主学习,主动适应机器人时代对劳动者提出的新要求,不断完善和丰富自己的知识结构体系。针对机械工程、林业工程、矿业工程、农业工程等机械类、近机械类专业对工业机器人人才培养的要求,本书选择了工业机器人相关各学科最基本的、最重要的知识,组合成一个整体,进行了全面的介绍。

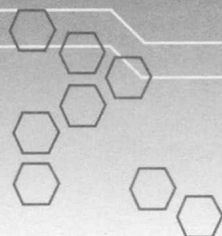
全书共分八章,各章编写分工如下:第 1 章由长沙师范学院李列文副教授编写,第 2 章由中南林业科技大学周国雄副教授编写,第 3 章由中南林业科技大学高自成副教授编写,第 4 章由中南林业科技大学朱洪前副教授和广东技术师范大学宋海鹰副教授共同编写,第 5 章由中南大学陈白帆副教授编写,第 6 章由朱洪前和周国雄共同编写,第 7 章由哈尔滨华德学院王振力副教授编写,第 8 章由宋海鹰编写。全书由朱洪前统稿。

感谢中南林业科技大学伍希志博士、湖南傲派自动化设备有限公司李平工程师,他们为本书的编写提供了帮助。感谢中南林业科技大学汪洋、杨云杰、鲁月、陈安琪、陈子云、徐永鸿、罗祺、蒋鑫、肖鹏同学,苏州大学高天天同学,他们为本书的编写提供了素材。感谢中南林业科技大学李科军博士,他为本书的编写提出了宝贵的意见。

全书参考教学学时数为 32~60,各学校可以根据教学大纲要求进行取舍和调整。各章节的参考教学学时如下:第 1 章 2 学时,第 2 章 8~12 学时,第 3 章 4~6 学时,第 4 章 4~8 学时,第 5 章 4~8 学时,第 6 章 2~6 学时,第 7 章 4~8 学时,第 8 章 4~10 学时。

本书有配套的电子课件,可在机械工业出版社教育服务网注册后下载。各位读者如发现书中错误或不足之处需要与编者探讨,或者需要索取相关教学资料,都可以与编者联系,编者邮箱 553750207@qq.com。

目 录



前 言	38
第 1 章 工业机器人概论	1
1.1 工业机器人的定义及发展	1
1.1.1 工业机器人的定义	1
1.1.2 工业机器人的发展	2
1.2 工业机器人的基本组成及技术参数	2
1.2.1 工业机器人的基本组成	2
1.2.2 工业机器人的技术参数	4
1.3 工业机器人的分类及应用	5
1.3.1 工业机器人的分类	5
1.3.2 工业机器人的应用	7
习题	11
第 2 章 工业机器人运动学和动力学	12
2.1 工业机器人运动学	12
2.1.1 工业机器人位姿描述	12
2.1.2 齐次变换和运算	16
2.1.3 工业机器人的连杆参数和齐次变换矩阵	19
2.1.4 工业机器人的运动学方程	20
2.2 工业机器人动力学	25
2.2.1 工业机器人速度雅可比及速度分析	25
2.2.2 工业机器人力雅可比及静力分析	28
2.2.3 工业机器人动力学分析	32
2.3 工业机器人运动轨迹规划	33
2.3.1 路径和轨迹	33
2.3.2 轨迹规划	34
2.3.3 关节空间的轨迹规划	35
习题	37
第 3 章 工业机器人机械系统	38
3.1 工业机器人的底座	39
3.1.1 工业机器人底座的结构和放置形式	39
3.1.2 工业机器人底座的材料和技术要求	41
3.2 工业机器人的机座	41
3.2.1 工业机器人的行走机构	41
3.2.2 轮式行走机构	42
3.2.3 履带式行走机构	43
3.2.4 足式行走机构	44
3.3 工业机器人的机身和臂部	46
3.3.1 工业机器人的机身	46
3.3.2 工业机器人的臂部	49
3.4 工业机器人的腕部	55
3.4.1 工业机器人腕部的运动	55
3.4.2 工业机器人腕部的分类	57
3.4.3 工业机器人腕部的典型结构	58
3.5 工业机器人的末端执行器	60
3.5.1 末端执行器的特点	60
3.5.2 手部的分类	61
3.6 工业机器人的传动机构	66
3.6.1 工业机器人的驱动方式	66
3.6.2 机器人的传动机构	67
3.6.3 工业机器人中主要使用的减速器	68
习题	71
第 4 章 工业机器人动力系统	72
4.1 动力系统分类	72
4.1.1 电动驱动系统	72

4.1.2 液压驱动系统	75	6.2 关节运动控制	126
4.1.3 气动驱动系统	77	6.2.1 关节伺服控制	126
4.1.4 三种驱动方式对照	79	6.2.2 计算力矩方法	127
4.2 交流伺服系统	79	6.3 分解运动控制	132
4.2.1 概述	79	6.3.1 关节坐标与直角坐标间的运动 关系	133
4.2.2 驱动器	82	6.3.2 分解运动速度控制	134
4.2.3 交流永磁同步伺服系统的工作及 控制原理	83	6.3.3 分解运动加速度控制	135
4.3 液压伺服系统	88	6.3.4 分解运动动力控制	136
4.3.1 液压伺服驱动系统	88	习题	138
4.3.2 电液比例控制	90	第7章 工业机器人通信	139
4.3.3 电液比例换向阀	90	7.1 工业机器人编程接口	139
4.3.4 摆动缸	91	7.1.1 RS-232C 接口标准	139
4.3.5 齿条传动液压缸	91	7.1.2 RS-485 接口标准	141
4.3.6 液压伺服马达	92	7.1.3 以太网	143
4.4 气动系统	93	7.2 DeviceNet	144
4.4.1 气压驱动回路	93	7.2.1 DeviceNet 概述	144
4.4.2 气源系统的组成	93	7.2.2 CAN 总线	145
4.4.3 气压驱动器	95	7.2.3 DeviceNet 现场总线	154
习题	96	习题	161
第5章 工业机器人感知系统	97	第8章 工业机器人编程	162
5.1 工业机器人传感器概述	97	8.1 工业机器人编程的概念及特点	162
5.1.1 工业机器人传感器的分类	97	8.1.1 示教再现编程的概念及其特点	162
5.1.2 多传感器信息融合技术的发展	98	8.1.2 离线编程的概念及其特点	163
5.2 工业机器人内部传感器	99	8.2 工业机器人的示教器	164
5.2.1 位置和角度传感器	99	8.2.1 工业机器人示教的硬件环境	164
5.2.2 姿态传感器	103	8.2.2 机器人的示教器及其操作	166
5.3 工业机器人外部传感器	105	8.3 机械手的坐标系	168
5.3.1 触觉传感器	105	8.4 工业机器人示教的主要内容	170
5.3.2 距离传感器	110	8.4.1 运动轨迹的示教	170
5.4 工业机器人视觉技术	112	8.4.2 作业条件的示教	171
5.4.1 机器视觉概述	112	8.4.3 作业顺序的示教	172
5.4.2 工业机器人视觉系统	113	8.5 工业机器人的手动操作	172
5.4.3 CCD 原理	114	8.5.1 三个重要数据的设定	172
5.4.4 机器视觉几何	115	8.5.2 机械手手动操作的三种模式	173
5.4.5 视觉信号处理	119	8.5.3 单轴运动手动操作	174
习题	119	8.5.4 线性运动手动操作	175
第6章 工业机器人控制系统	121	8.5.5 增量模式手动操作	176
6.1 概述	121	8.5.6 重定位手动操作	176
6.1.1 基本特点、要求、功能	121	8.6 工业机器人编程的语言及常见指令	178
6.1.2 硬件结构	123	8.6.1 程序的新建与加载	179
6.1.3 控制算法	124	8.6.2 自动运行程序	180
6.1.4 控制方式	125	8.6.3 运动指令	180

第 1 章

Chapter

工业机器人概论

工业机器人被誉为“制造业皇冠顶端的明珠”，是衡量一个国家创新能力和产业竞争力的重要标志，已成为全球新一轮科技和产业革命的重要切入点。工业机器人技术涉及运动学、动力学、机械系统、动力系统、感知系统、控制系统、通信、编程等方方面面。本章对工业机器人进行了概要的介绍，内容包括工业机器人的定义及发展、工业机器人的基本组成及技术参数、工业机器人的分类及应用。

1.1 工业机器人的定义及发展

1.1.1 工业机器人的定义

工业机器人作为 20 世纪人类最伟大的发明之一，自 20 世纪 60 年代初问世以来，经历 50 多年的发展已取得长足的进步。工业机器人的出现是社会和经济发展的必然，它的高速发展提高了社会的生产水平和人类的生活质量。

“机器人”一词最早出现于 1920 年捷克作家卡雷尔·查培克（Karel Capek）的剧本《罗萨姆的万能机器人》，捷克语的 Robot 意为“苦力”“劳役”，是一种人造劳动者，英语的 Robot 由此衍生出来。

工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度的机器人。它是自动执行工作的机械装置，是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器。工业机器人是机器人家族中的重要一员，也是目前在技术上发展最成熟、应用最多的一类机器人。世界各国对工业机器人的定义不尽相同，但其内涵基本一致。美国机器人工业协会提出的工业机器人定义为：“工业机器人是用来进行搬运材料、零件、工具等可再编程的多功能机械手，或通过不同程序的调用来完成各种工作任务的特种装置。”英国机器人协会、日本机器人协会等也采用了相类似的定义。国际标准化组织（ISO）曾于 1987 年对工业机器人给出了定义：“工业机器人是一种具有自动控制的操作和移动功能，能够完成各种作业的可编程操作机。”ISO 8373



对工业机器人给出了更具体的解释：“机器人具备自动控制及可再编程、多用途功能，机器人操作机具有三个或三个以上的可编程轴，在工业自动化应用中，机器人的底座可固定也可移动”。

机器人学是近 60 年来发展起来的综合性学科，它综合了机械学、电子学、计算机学、自动控制工程、人工智能、仿生学等多个学科的最新研究成果，代表了机电一体化的最高成就，是当今世界科学技术发展最活跃的领域之一。走向成熟的工业机器人以及各种用途的特种机器人的实用化，昭示着机器人技术灿烂的明天。

1.1.2 工业机器人的发展

现代工业机器人的发展开始于 20 世纪中期，依托计算机、自动化以及原子能的快速发展。为了满足大批量产品制造的迫切需求，并伴随着相关自动化技术的发展，数控机床于 1952 年诞生，同时数控机床的控制系统、伺服电动机、减速器等关键零部件为工业机器人的开发打下了坚实的基础；同时，在原子能等核辐射环境下的作业，迫切需要特殊环境作业机械臂代替人进行放射性物质的操作与处理。基于此种需求，1947 年美国阿尔贡研究所研发了遥操作机械手，1948 年接着研制了机械式的主从机械手。1954 年，美国的戴沃尔对工业机器人的概念进行了定义，并进行了专利申请。1962 年，美国的 AMF 公司推出的“UNIMATE”，是工业机器人较早的实用机型，其控制方式与数控机床类似，但在外形上由类似于人的手和臂组成。1965 年，一种具有视觉传感器并能对简单积木进行识别、定位的机器人系统在美国麻省理工学院研制完成。1967 年，机械手研究协会在日本成立，并召开了首届日本机器人学术会议。1970 年，第一届国际工业机器人学术会议在美国举行，促进了机器人相关研究的发展。1970 年以后，工业机器人的研究得到了广泛、较快的发展。1967 年，日本川崎重工业公司首先从美国引进机器人及技术，建立生产厂房，并于 1968 年试制出第一台日本产通用机械手机器人。经过短暂的摇篮阶段，日本的工业机器人很快进入实用阶段，并由汽车业逐步扩大到制造业等其他领域。1980 年被称为日本的“机器人普及元年”，日本开始在各个领域推广使用机器人，这大大缓解了市场劳动力严重短缺的社会矛盾。1980—1990 年，日本的工业机器人处于鼎盛时期。20 世纪 90 年代，装配与物流搬运的工业机器人开始应用。自从 20 世纪 60 年代以来，工业机器人在工业发达国家越来越多的领域得到了应用，尤其是在汽车生产线上得到了广泛应用，并在制造业中，如毛坯制造（冲压、压铸、锻造等）、机械加工、焊接、热处理、表面涂覆、打磨抛光、上下料、装配、检测及仓库堆垛等作业中得到应用，提高了加工效率与产品的一致性。作为先进制造业中典型的机电一体化数字化装备，工业机器人已经成为衡量一个国家制造业水平和科技水平的重要标志。

1.2 工业机器人的基本组成及技术参数

1.2.1 工业机器人的基本组成

工业机器人系统是由机器人和作业对象及环境共同构成的，其中包括工业机器人驱动系统、机械系统、感知系统和控制系统四大部分，它们之间的关系如图 1-1 所示。

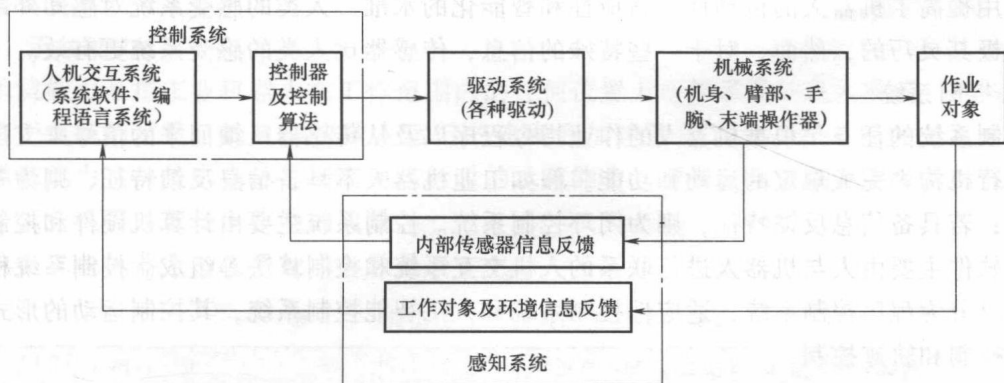


图 1-1 工业机器人系统组成及各部分之间的关系

1. 驱动系统

要使工业机器人运行起来，就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。驱动系统可以是液压驱动、气动驱动、电动驱动，或者是把它们结合起来应用的综合系统，可直接驱动或者通过同步带、链条、轮系、谐波齿轮等机械传动机构进行间接驱动。

电气驱动系统在工业机器人中应用得较普遍，可分为步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机三种驱动形式。早期多采用步进电动机驱动，后来发展了直流伺服电动机，现在交流伺服电动机驱动也逐渐得到应用。上述驱动单元有的用于直接驱动机构运动，有的通过谐波减速器减速后驱动机构运动，其结构简单紧凑。

液压驱动系统运动平稳，且负载能力大，对于重载搬运和零件加工的工业机器人，采用液压驱动比较合理。但液压驱动存在管道复杂、清洁困难等缺点，因此限制了它在装配作业中的应用。

无论是电气驱动还是液压驱动的机器人，其手爪的开合都采用气动形式。气压驱动机器人结构简单、动作迅速、价格低廉，但由于空气具有可压缩性，其工作速度的稳定性较差。但是，空气的可压缩性可使手爪在抓取或夹紧物体时的顺应性提高，防止受力过大而造成被抓物体或手爪本身的损坏。气压驱动系统的压力一般为 0.7MPa ，因而抓取力小，只有几十牛到几百牛。

2. 机械系统

工业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，每一大件都有若干个自由度，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腰转机构，则构成单机器人臂（Single Robot Arm）。手臂一般由上臂、下臂和手腕组成。末端操作器是直接装在手腕上的一个重要部件，它可以是二手指或多手指的手爪，也可以是喷漆枪、焊具等作业工具。

3. 感知系统

感知系统由内部传感器模块和外部传感器模块组成，分别获取内部和外部环境状态中有意义的信息。其中，内部状态传感器用于检测各关节的位置、速度等变量，为闭环伺服控制系统提供反馈信息；外部状态传感器用于检测机器人与周围环境之间的一些状态变量，如距离、接近程度和接触情况等，用于引导机器人，便于其识别物体并做出相应处理。智能传感



器的使用提高了机器人的机动性、适应性和智能化的水准。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，传感器比人类的感受系统更有效。

4. 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来支配机器人的执行机构去完成规定的运动和功能。假如工业机器人不具备信息反馈特征，则为开环控制系统；若具备信息反馈特征，则为闭环控制系统。控制系统主要由计算机硬件和控制软件组成。软件主要由人与机器人进行联系的人机交互系统和控制算法等组成。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，其控制运动的形式可分为点位控制和轨迹控制。

由图 1-1 可以看出，工业机器人实际上是一个典型的机电一体化系统，其工作原理为：控制系统发出动作指令，控制驱动系统动作，驱动系统带动机械系统运动，使末端操作器到达空间某一位置和实现某一姿态，实施一定的作业任务。

1.2.2 工业机器人的技术参数

技术参数是各工业机器人制造商在产品供货时所提供的技术数据。尽管各厂商所提供的技术参数项目不完全一样，工业机器人的结构、用途等有所不同，且用户的要求也不同，但是，工业机器人的主要技术参数一般都应有自由度、重复定位精度、工作范围、最大工作速度及承载能力等。

1. 自由度

自由度是指机器人所具有的独立坐标轴运动的数目（不包括手爪的开合自由度）。在三维空间中描述一个物体的位置和姿态需要 6 个自由度。工业机器人的自由度是根据其用途设计的，可能小于 6 个自由度，也可能大于 6 个自由度。

大于 6 个的自由度称为冗余自由度。冗余自由度增加了机器人的灵活性，可方便机器人避开障碍物和改善机器人的动力性能。人类的手臂（大臂、小臂、手腕）共有 7 个自由度，所以工作起来很灵巧，可回避障碍物，并可从不同的方向到达同一个目标位置。

2. 定位精度和重复定位精度

定位精度和重复定位精度是机器人的两个精度指标。定位精度是指机器人手部实际到达位置与目标位置之间的差异。重复定位精度是指机器人重复定位其手部于同一目标位置的能力，可以用标准偏差这个统计量来表示，它是衡量一系列误差值的密集度，即重复度。

3. 工作范围

工作范围是指机器人手臂末端或手腕中心能到达的所有点的集合，不包括末端操作器。因为末端操作器的形状和尺寸是多种多样的，为了真实反映机器人的特征参数，所以工作范围是指不安装末端操作器时的工作区域。工作范围的形状和大小是十分重要的，机器人在执行某作业时可能会因为存在手部不能到达的作业死区（dead zone）而不能完成任务。

4. 最大工作速度

最大工作速度是指机器人各个方向的移动速度或转动速度。这些速度可以相同，也可以不同。有的厂家指工业机器人主要自由度上最大的稳定速度，有的厂家指手臂末端最大的合成速度，通常都在技术参数中加以说明。很明显，工作速度越高，工作效率越高。但是，工作速度越高就要花费更多的时间去升速或降速，或者对工业机器人的最大加速率或最大减速

率的要求更高。

5. 承载能力

承载能力是指工业机器人在工作范围内的任何位置上所能承受的最大质量。承载能力不仅取决于负载的质量,而且与机器人运行的速度和加速度的大小、方向有关。为了安全起见,承载能力这一技术指标是指高速运行时的承载能力。通常,承载能力不仅指负载,而且包括了工业机器人末端操作器的质量。

典型工业机器人的主要技术参数见表 1-1。

表 1-1 典型工业机器人的主要技术参数

项 目		五自由度、立式关节式机器人技术参数
工作空间	腰部转动	300°(最大角速度 120°/s)
	肩部转动	130°(最大角速度 72°/s)
	肘部转动	110°(最大角速度 190°/s)
	腕部俯仰	±90°(最大角速度 100°/s)
	腕部翻转	±180°(最大角速度 163°/s)
臂长	上臂	250mm
	前臂	160mm
承载能力		最大 1.2kg(包括手爪)
最大线速度		1000mm/s(腕表面)
重复定位精度		0.3mm(腕旋转中心)
驱动系统		直流伺服电动机
机器人质量		约 19kg
电动机功耗		J1~J3 轴:30W;J4、J5 轴:11W

1.3 工业机器人的分类及应用

1.3.1 工业机器人的分类

关于工业机器人分类,国际上尚没有制定统一的标准,可以按机械结构、操作机坐标形式、机器人发展历程、应用领域等划分。

1. 按操作机的坐标形式分类

工业机器人的坐标形式有直角坐标型、圆柱坐标型、球坐标型、关节坐标型和平面关节型,如图 1-2 所示。

按工业机器人的坐标形式,可把工业机器人分为直角坐标型机器人、圆柱坐标型机器人、球坐标型机器人、关节坐标型机器人、SCARA 型机器人五种类型。

(1) 直角坐标型机器人 直角坐标型机器人的外形与数控镗铣床和三坐标测量机相似,其三个关节都是移动关节,关节轴线相互垂直,相当于笛卡儿坐标系的轴。作业范围为立方体状的。其优点是刚度好,多做成大型龙门式或框架式结构,位置精度高,运动学求解简单,控制无耦合;但其结构较庞大,动作范围小,灵活性差且占地面积大。因其稳定性好,

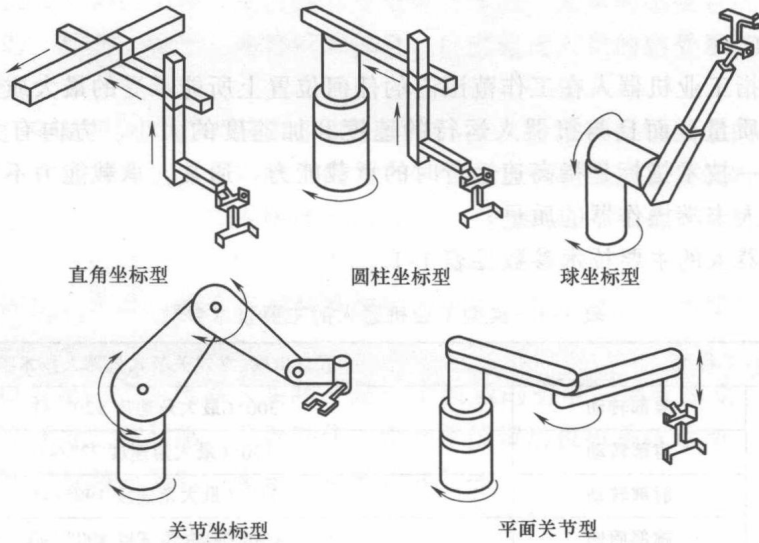


图 1-2 工业机器人的坐标形式

故适用于负载搬送。

(2) 圆柱坐标型机器人 圆柱坐标型机器人具有两个移动关节和一个转动关节，作业范围为圆柱形状的。其优点是位置精度高，运动直观，控制简单，结构简单，占地面积小，价廉，因此应用广泛；但其不能抓取靠近立柱或地面上的物体。

(3) 球坐标型机器人 球坐标型机器人具有一个移动关节（1P）和两个转动关节（2R），作业范围为空心球体状的。其优点是结构紧凑，动作灵活，占地面积小；但其结构复杂，定位精度低，运动直观性差。

(4) 关节坐标型机器人 关节坐标型机器人主要由回转和旋转自由度构成。它可以看成是仿人手臂的结构，具有肘关节的连杆关节结构，从肘至手臂根部的部分称为上臂，从肘到手腕的部分称为前臂，这种结构对于确定的三维空间上任意位置和姿态是最有效的，对于各种各样的作业都有良好的适应性，但其坐标计算和控制比较复杂。关节坐标型机器人的特点是作业范围大、动作灵活、能抓取靠近机身的物体；运动直观性差，要得到高定位精度较困难。

一般关节型机器人手臂采用回转、旋转的自由度结构。关节型机器人根据其自由度的构成方法，可再进一步分成几类。

1) 仿人关节型机器人。仿人关节型机器人是在标准手臂上再加上一个自由度（冗余自由度）。

2) 平行四边形连杆关节型机器人。平行四边形连杆关节型机器人的手臂采用平行四边形连杆，并把前臂关节驱动用的电动机装在手臂的根部，可获得更高的运动速度。

(5) SCARA 型机器人 SCARA 型机器人有三个转动关节，其轴线相互平行，可在平面内进行定位和定向。其还有一个移动关节，用于完成手腕在垂直于平面方向上的运动。手腕中心的位置由两个转动关节的角度及移动关节的位移决定，手爪的方向由转动关节的角度决定。SCARA 型机器人的特点是在垂直平面内具有很好的刚度，在水平面内具有较好的柔顺性，且动作灵活、速度快、定位精度高。

2. 按工业机器人研究、开发和实用化的进程分类

(1) 第一代工业机器人 第一代工业机器人具有示教再现功能, 或具有可编程 NC 装置, 但对外部信息不具备反馈能力。

(2) 第二代工业机器人 第二代工业机器人不仅具有内部传感器, 而且具有外部传感器, 能获取外部环境信息。其虽然没有应用人工智能技术, 但是能进行机器人-环境交互, 具有在线自适应能力。例如, 工业机器人可从运动着的传送带上送来的零件中抓取零件并送到加工设备上, 因为送来的每一个零件具体位置和姿态是随意的、不同的, 要完成上述作业必须获取被抓取零件状态的在线信息。

(3) 第三代工业机器人 第三代工业机器人具有多种智能传感器, 能感知和领会外部环境信息, 包括具有理解像人下达的语言指令这样的能力。其还能进行学习, 具有决策上的自治能力。

1.3.2 工业机器人的应用

工业机器人最早应用在汽车制造工业, 常用于焊接、喷漆、装配、搬运和上下料。工业机器人延伸了人的手足和大脑功能, 它可以代替人从事危险、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、简单重复的劳动, 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组成的柔性制造系统 (FMS) 和计算机集成制造系统 (CIMS) 可以实现生产的自动化。

在工业生产中, 使用机器人有很多优点:

- 1) 可以提高产品质量。由于机器人是按一定的程序作业的, 避免了人为随机差错。
- 2) 可以提高劳动生产率、降低成本, 因为机器人可以不知疲劳地连续工作。
- 3) 改善劳动环境, 保证生产安全, 减轻甚至避免有害工种 (如焊接) 对工人身体的侵害, 避免危险工种 (如冲压) 对工人身体的伤害。
- 4) 降低了对工种熟练程度的要求, 不再要求每个操作者都是熟练工, 从而解决熟练工不足的问题。
- 5) 使生产过程通用化, 有利于产品改型, 如要换一种产品, 只需给机器换一个程序。

目前, 工业机器人由于具有作业的高度柔性和可靠性、操作的简便性等特点, 满足了工业自动化高速发展的需求, 因此被广泛应用于汽车制造、工程机械、机车车辆、电子和电器、计算机和信息以及生物制药等领域。

1. 焊接机器人

焊接作业是机器人的主要用途之一。现在, 机器人能轻而易举且经济地完成两类性质的焊接作业, 即点焊和弧焊。点焊作业要求机器人学会一系列点。由于要连在一起的金属部件形状可能很不规则, 常常要求有一只灵活的机械手腕 (图 1-3)。这只手腕使得焊接工具能准确地对准所要求的焊接点, 且焊枪不与部件的其他部分

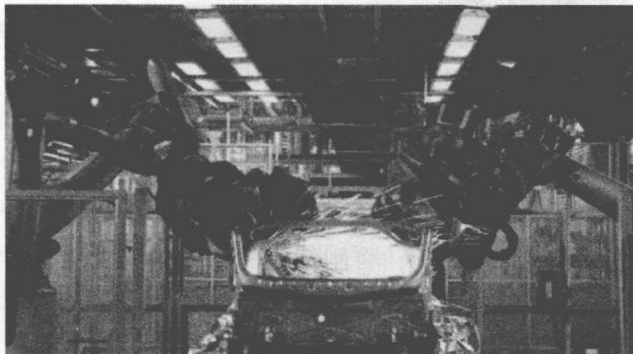


图 1-3 焊接机器人



接触。一般这些机器人所夹持的焊接工具都大而重。通常还要求机械手具有大的活动范围。汽车工业是这类机器人的一个大用户。由于焊点预先示教过，所以判断是否给焊枪通电一般不需要传感器信息。

弧焊也为汽车工业广泛利用，它经常用于焊接形状不规则的或较宽的焊缝。在这种情况下，通常选用为这一特殊用途而专门设计的一种连续轨迹伺服控制机器人。如果要焊的部件可以精确放置并固定，就可以预先将复杂的三维轨迹示教给机器人，不需要外接传感器。现在许多机器人在焊接工具前方装有一只位置传感器，它能提供焊接中有关轨迹不规则性的信息；有的还配备传感器反馈装置。在需处理较宽焊缝时，可以编程使机器人做编织状横摆运动，这样就能保证焊出的焊缝覆盖整个坡口。焊接机器人的主要优点是能严格控制发弧时间。

2. 涂装机器人

涂装作业时易发生火灾，雾状漆还会致癌，因此涂装作业是机器人的特有用途。使用涂装机器人的另一个优点是其最终形成的涂层远比人工涂装出的更加均匀。它能生产出优质产品，返修率低，节省大量的漆。用于此目的的机器人通常能完成直线和连续轨迹运动。

在我国工业机器人的发展历程中，涂装机器人是开发比较早的项目之一，到目前为止，已有很多条涂装自动生产线用于汽车等行业。汽车涂装机器人如图 1-4 所示。

涂装机器人主要由机器人本体、计算机和相应的控制系统组成，液压驱动的涂装机器人还包括液压油源，如液压泵、油箱和电动机等。这种机器人多采用五或六自由度关节式结构，手臂有较大的运动空间，并可做复杂的轨迹运动，其腕部一般有 2~3 个自由度，可灵活运动。较先进的涂装机器人腕部采用柔性手腕，既可向各个方向弯曲，又可转动，其动作类似人的手腕，能方便地通过小孔伸入工件内部，喷涂其内表面。涂装机器人一般采用液压驱动，具有动作速度快、防爆性能好等特点，可通过手把手示教或点位示教来实现示教。涂装机器人广泛用于汽车、仪表、电器、陶瓷等行业工艺部门。

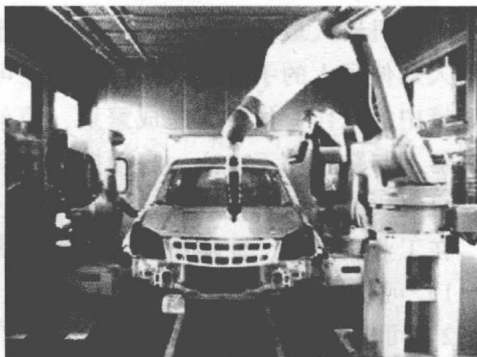


图 1-4 汽车涂装机器人

3. 研磨机器人

两块金属经电弧焊后，在焊缝处会产生焊珠。为了使零部件美观或满足功能的需要，要进行磨削作业。研磨机器人（图 1-5）可以很好地完成这项工作，因为机械手可以使用电弧焊作业时使用过的同样程序，只要卸下焊接工具换上旋转式砂轮即可。另一项重要的磨削工作是在金属铸件上进行的。为了获得铸件的正确外形尺寸，可以将连续轨迹编程的方法示教给机器人，使砂轮磨掉任何要求之外的突出部分，对过大的铸件表面加以修整。机器人磨削还可以用于清理毛刺，将刚钻完的孔周围的无用材料磨掉。为了提高生产率，自动钻孔后也可以用机器人完成清理工作。

在这些磨削用途中，被加工的零部件尺寸常有误差，需要传感器的信息使机器人能精确地“感知”到零部件真实的外形轮廓。这对将电弧焊珠打磨平滑特别重要。目前，已可买

到能提供这种信息的比较简单的触觉传感器。

4. 零部件装卸和传送机器人

将零部件或物体从工作区的某一位置移到另一个位置，是工业机器人最常见的用途之一。从一处拾取零部件，然后挪到另一个地点，这种操作称为“码放”物件；与此相反，将一排排物件卸下，放在工作场地的另一个地点，称为“卸货”。传送机器人如图 1-6 所示。

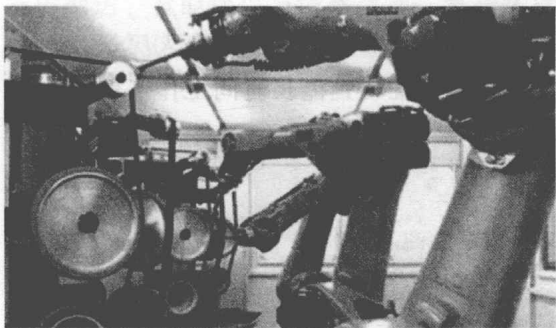


图 1-5 研磨机器人

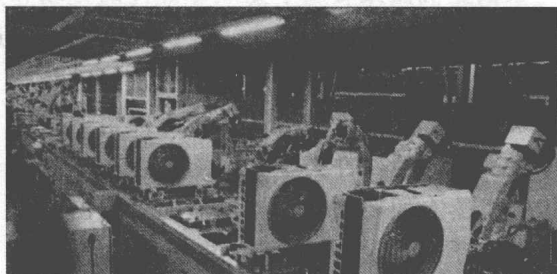


图 1-6 传送机器人

一些重要的零部件在加工过程中的装卸，涉及拾取半成品或未完工的零部件，将其送到其他机床进行加工。若该项作业对人类不安全，则可以交给机器人完成。

在金属热压加工时，需要人在加热的窑炉、压力机、车床或手摇钻床附近工作，工作环境恶劣且有危险，而机器人能在危险、恶劣、高温环境中代替人的工作，从而使人类远离危险。

5. 装配机器人

装配机器人是为完成装配作业而设计的工业机器人，是工业机器人应用种类中适用范围比较广的产品之一。与一般工业机器人相比，它具有精度高、柔顺性好、工作范围小、能与其他系统配套使用等特点。使用装配机器人（图 1-7）可以保证产品质量，降低成本，提高生产自动化水平。

人可以利用眼和手的良好协调动作，再加上触觉，将一组零件组装起来制成成品或组件，但组装工作令人感到乏味，故组装作业是机器人的一项有前景的用途。

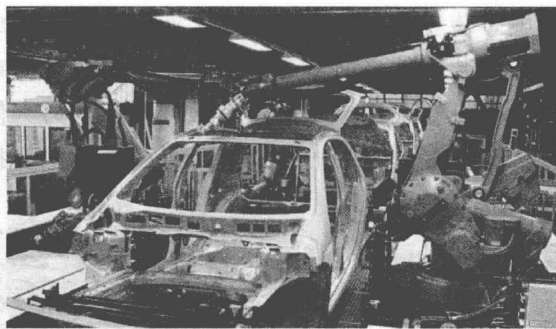


图 1-7 装配机器人

例如，人们将剪刀、钳子和其他简单的手工工具放在一起，将所要加工的点和操作顺序示教给机器人，由机器人来制造小型电机、组装插头插座。通常使用的唯一外部传感器信息是零件或组件是否处在工作单元室内的特定位置。机器人腕部的柔顺性在这些组装作业中显得特别重要。机器人可利用力觉或触觉的反馈信号获得良好的外部感知能力，从而对夹持和放置零件的装置或机器人本身所引起的任何定位误差进行较好的补偿。但是，这样的感知装置（传感器）大部分尚不完善，所以大部分组装工作目前不用外部传感器，而常采用在端部操纵装置和机器人的腕部法兰之间的一个远距定心柔性装置（RCC）来完成。如果要求



精确度高，机械手应配备有外部传感器（如视觉系统）。虽然视觉外部设备会降低系统的产量，但如果视觉系统的硬件和软件价格下降，而且系统本身工作更快，可以预测，其应用将会更加普遍。

例如，库卡装配机器人系统集成中使用的库卡装配机器人是专门为装配而设计的机器人，目前广泛用于各种电器制造，汽车及其部件、计算机、玩具、机电产品及其组件的装配等方面。

6. 分选零部件机器人

工业机器人可用于完成零部件的分级和分选工作。这种作业重复乏味，令人厌烦，因而操作人员易出差错。而由工业机器人来完成这项任务则快而准确且能长时间工作。例如，将一组待分级或分选零件放在传送带上，将视觉系统置于机器人的上方，用于确定通过摄像机视野内的零件类型和取向，并将信息送给机器人的控制器；控制器随后发出指令使机械手移到正确位置，并使取向符合要求；然后，机器人将拾取的零件放进料箱或另一条传送带上。分选机器人如图 1-8 所示。

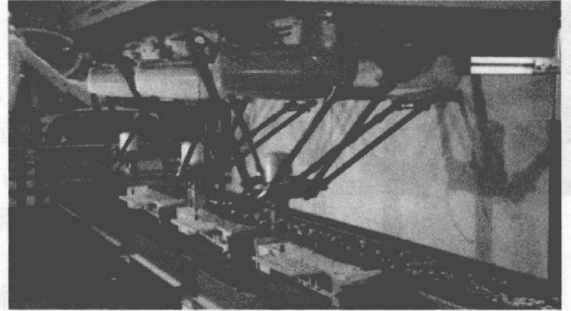


图 1-8 分选机器人

7. 检验零件机器人

工业机器人可以用于检验完工的零件或组件质量。汽车工业是以检验自动化来提高产品质量的典范。轿车车身各个部位的尺寸精度，可用含有许多可动传感器的特殊检测工具来检验。每个传感器移动的距离与预定值加以比较，从而确定被检测零件是否为合格品。这个系统不仅可以剔除超差的部件，还可及时指出潜在的问题。视觉系统已用于这种检验，但价格较高，使用尚不普遍。

电子装置的检验也可以由工业机器人来完成。检验机器人如图 1-9 所示。例如，印制电路板在插装元件之前，必须检验是否有漏钻孔或孔位不当。这项工作可用两种技术来完成。一是工业机器人拣拾印制电路板并与板的另一侧的电极接触。将全部接触点都放在专用夹具上，传感器穿过钻眼的孔，与板另一侧的电极接触。若全部接触点都接通，表示印制电路板

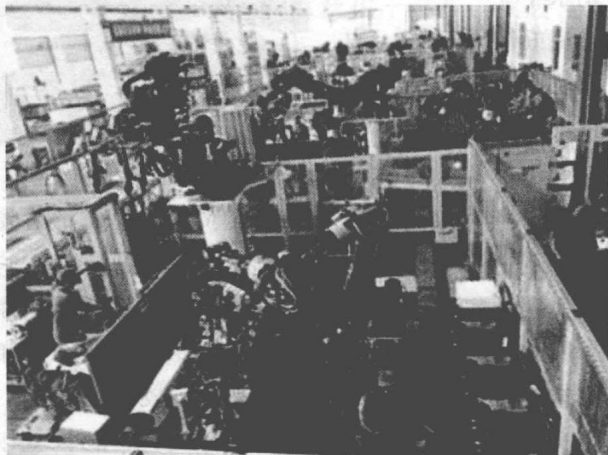


图 1-9 检验机器人