

INDUSTRIAL ROBOT

工业机器人

现场编程与调试

韩鸿鸾 蔡艳辉 卢超 主编



化学工业出版社



工业机器人 现场编程与调试

韩鸿鸾 蔡艳辉 卢超 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

工业机器人现场编程与调试/韩鸿鸾, 蔡艳辉, 卢超
主编. —北京: 化学工业出版社, 2017.9
ISBN 978-7-122-30386-8

I. ①工… II. ①韩…②蔡…③卢… III. ①工业机
器人-程序设计 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 190081 号

责任编辑: 贾娜
责任校对: 边涛

文字编辑: 陈喆
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 592 千字 2017 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 89.00 元

版权所有 违者必究

近年来,我国机器人行业在国家政策的支持下,顺势而为,发展迅速,保持着35%的高增长率,远高于德国的9%、韩国的8%和日本的6%。我国已连续两年成为世界第一大工业机器人市场。

我国工业机器人市场之所以能有如此迅速的增长,主要源于以下三点:

(1) 劳动力的供需矛盾。主要体现在劳动力成本的上升和劳动力供给的下降。在很多产业,尤其在中低端工业产业,劳动力的供需矛盾非常突出,这对实施“机器换人”计划提出了迫切需求。

(2) 企业转型升级的迫切需求。随着全球制造业转移的持续深入,先进制造业回流,我国的低端制造业面临产业转移和空心化的风险,迫切需要转变传统的制造模式,降低企业运行成本,提升企业发展效率,提升工厂的自动化、智能化程度。而工业机器人的大量应用,是提升企业产能和产品质量的重要手段。

(3) 国家战略需求。工业机器人作为高端制造装备的重要组成部分,技术附加值高,应用范围广,是我国先进制造业的重要支撑技术和信息化社会的重要生产装备,对工业生产、社会发展以及增强军事国防实力都具有十分重要的意义。

随着机器人技术及智能化水平的提高,工业机器人已在众多领域得到了广泛的应用。其中,汽车、电子产品、冶金、化工、塑料、橡胶是我国使用机器人最多的几个行业。未来几年,随着行业需要和劳动力成本的不断提高,我国机器人市场增长潜力巨大。尽管我国将成为当今世界最大的机器人市场,但每万名制造业工人拥有的机器人数量却远低于发达国家水平和国际平均水平。工信部组织制订了我国机器人技术路线图及机器人产业“十三五”规划,到2020年,工业机器人密度达到每万名员工使用100台以上。我国工业机器人市场将高倍速增长,未来十年,工业机器人是看不到“天花板”的行业。

虽然多种因素推动着我国工业机器人行业不断发展,但应用人才严重缺失的问题清晰地摆在我们面前,这是我国推行工业机器人技术的最大瓶颈。中国机械工业联合会的统计数据表明,我国当前机器人应用人才缺口20万,并且以每年20%~30%的速度持续递增。

工业机器人作为一种高科技集成装备,对专业人才有着多层次的需求,主要分为研发工程师、系统设计与应用工程师、调试工程师和操作及维护人员四个层次。其中,需求量最大的是基础的操作和维护人员以及掌握基本工业机器人应用技术的调试工程师和更高层次的应用工程师,工业机器人专业人才的培养,要更加着力于应用型人才的培养。

为了适应机器人行业发展的形势,满足从业人员学习机器人技术相关知识的需求,我们从生产实际出发,组织业内专家编写了本书,全面讲解了工业机器人现场编程的方法与调试要点,以期给从业人员和大学院校相关专业师生提供实用性指导与帮助。

本书由韩鸿鸾、蔡艳辉、卢超任主编,袁有德、田震、谢华、董晓明任副主编,阮洪涛、刘曙光、徐艇、孔庆亮、程宝鑫、张朋波、孔伟、丛培兰、马岩、张瑞社、李永杉、梁典民、

赵峰、张玉东、王常义、安丽敏、孙杰、柳鹏、丛志鹏、马述秀、褚元娟、汪兴科、王勇、丁守会、李雅楠、陈青、宁爽、梁婷、姜兴道、荣志军、王小方、郑建强、李鲁平、王树平参与编写。全书由韩鸿鸾统稿。在本书编写过程中得到了山东省、河南省、河北省、江苏省、上海市等技能鉴定部门的大力支持，此外，青岛利博尔电子有限公司、青岛时代焊接设备有限公司、山东鲁南机床有限公司、山东山推工程机械有限公司等企业为本书的编写提供了大量帮助，在此深表谢意。

在本书编写过程中，参考了《工业机器人装调维修工》《工业机器人操作调整工》职业技能标准的要求，以备读者考取技能等级；同时还借鉴了全国及多省工业机器人大赛的相关要求，为读者参加相应的大赛提供参考。

由于水平所限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者给予批评指正。

编者

第 1 章 工业机器人现场编程与调试基础 / 1

1.1 工业机器人的组成与工作原理	1
1.1.1 工业机器人的基本组成	1
1.1.2 机器人的基本工作原理	5
1.1.3 机器人应用与外部的关系	6
1.2 机器人的基本术语与图形符号	7
1.2.1 机器人的基本术语	7
1.2.2 机器人的图形符号体系	9
1.2.3 机器人的图形符号表示	11
1.2.4 机器人的提示符号	13
1.2.5 工业机器人技术参数	17
1.2.6 典型机器人的技术参数	19
1.3 工业机器人的坐标系	21
1.3.1 机器人的位姿问题	21
1.3.2 机器人坐标系	21

第 2 章 工业机器人编程概述 / 25

2.1 认识工业机器人的编程	25
2.1.1 对机器人编程的要求	25
2.1.2 机器人编程语言的类型	26
2.1.3 机器人语言系统的结构	27
2.1.4 工业机器人程序设计过程	27
2.1.5 示教编程器	30
2.1.6 离线编程方式	31
2.1.7 基于虚拟现实方式	33
2.2 机器人语言编程系统	33
2.2.1 机器人语言的编程	33
2.2.2 机器人编程语言的功能	34
2.2.3 机器人编程语言的发展	36
2.2.4 工业机器人编程指令	37
2.2.5 VAL 语言简介	45
2.2.6 VAL-II 语言	49
2.2.7 AL 语言简介	50
2.2.8 Autopass 语言简介	54

2.2.9	RAFT 语言简介	55
2.2.10	AML 语言	57
2.2.11	LUNA 语言及其特征	58
2.2.12	C 语言	59
2.3	在线编程	60
2.3.1	在线编程的种类	60
2.3.2	机器人示教器的组成	62
2.3.3	机器人示教器的功能	62
2.3.4	示教再现原理	63
2.3.5	示教再现操作方法	63
2.3.6	示教编程实例	67
2.4	机器人的离线编程	68
2.4.1	机器人离线编程的特点	68
2.4.2	机器人离线编程系统的结构	69
2.4.3	机器人离线编程与仿真核心技术	72
2.4.4	机器人离线编程系统实用化技术研究趋势	73

第 3 章 工业机器人搬运工作站现场编程 / 75

3.1	工业机器人搬运工作站的认识	75
3.1.1	搬运机器人的周边设备与工位布局	75
3.1.2	平面仓储搬运工作站的组成	77
3.1.3	立体仓储搬运工作站的组成	78
3.1.4	常见搬运工作站简介	80
3.2	坐标系及其标定	82
3.2.1	坐标系的选择	83
3.2.2	坐标系的运动	83
3.2.3	机器人坐标系的标定	87
3.3	搬运工作站的现场编程	94
3.3.1	安川工业机器人指令介绍	94
3.3.2	搬运工作站机器人程序编制	114

第 4 章 工业机器人 CNC 机床上下料工作站现场编程 / 117

4.1	认识工业机器人 CNC 机床上下料工作站	117
4.1.1	机器人与数控加工的集成	117
4.1.2	机器人在机床上下料领域的应用	120
4.1.3	上下料系统类型	120
4.1.4	机器人上下料工作站的组成	123
4.1.5	CNC 与机器人上下料工作站的通信	128
4.1.6	工作过程	129
4.1.7	机器人自动生产线的注意事项	130
4.2	工业机器人 CNC 上下料工作站的编程	133
4.2.1	平行移动功能	133

4.2.2	对系统进行初步示教	133
4.2.3	上下料工作站机器人程序	134

第5章 弧焊工业机器人的现场编程 / 136

5.1	认识工业机器人弧焊工作站	136
5.1.1	工业机器人弧焊工作站的组成	136
5.1.2	工业机器人弧焊工作站的常见形式	147
5.2	手动模式操纵焊接机器人	151
5.2.1	手动模式操纵焊接机器人工作站的组成	151
5.2.2	焊接机器人运动轴及坐标系	152
5.2.3	机器人坐标系和运动轴的选取	155
5.2.4	手动移动机器人	158
5.2.5	手动操纵机器人沿 T 形接头焊缝移动	164
5.3	弧焊机器人的示教编程	166
5.3.1	初识焊接机器人的示教编程	166
5.3.2	焊接机器人的直线轨迹示教	197
5.3.3	焊接机器人的圆弧轨迹示教	223
5.3.4	焊接机器人的摆动功能示教	239
5.3.5	焊接机器人的周边设备与控制	250

第6章 工业机器人点焊工作站的现场编程 / 258

6.1	认识工业机器人点焊工作站	258
6.1.1	工业机器人点焊工作站的组成	258
6.1.2	点焊电极	259
6.1.3	电阻焊接控制装置	261
6.1.4	变压器	261
6.1.5	机器人点焊钳	262
6.1.6	冷却水阀组	263
6.1.7	辅助设备工具	264
6.1.8	具体点焊机器人简介	265
6.2	点焊工业机器人工作站现场程序的编制	266
6.2.1	ABB 指令简介	266
6.2.2	ABB 工业机器人仿真软件的应用	275
6.2.3	安川点焊工业机器人工作站的编程	283

第7章 喷涂工业机器人工作站的现场编程 / 287

7.1	喷涂工业机器人工作站	287
7.1.1	涂装机器人的分类	288
7.1.2	涂装机器人的组成	289
7.1.3	涂装机器人工作站的组成	292
7.1.4	涂装机器人的周边设备	296
7.2	ABB 工业机器人仿真软件在玻璃涂胶现场编程上的应用	299

7.2.1 指令简介	299
7.2.2 玻璃涂胶现场仿真编程	300
7.3 ABB 工业机器人仿真软件在车灯涂胶现场编程上的应用	308
7.3.1 指令简介	308
7.3.2 车灯涂胶现场仿真编程	310

第 8 章 工业机器人装配工作站的现场编程 / 317

8.1 工业机器人装配工作站	317
8.1.1 装配机器人的组成	317
8.1.2 装配机器人的分类	320
8.1.3 工业机器人装配工作站的组成	324
8.2 ABB 工业机器人仿真软件在车窗玻璃装配现场编程上的应用	327
8.2.1 指令简介	327
8.2.2 车窗玻璃装配现场仿真编程	328

参考文献 / 336

第 1 章

工业机器人现场编程与调试基础

1.1 工业机器人的组成与工作原理

1.1.1 工业机器人的基本组成

工业机器人通常由执行机构、驱动系统、控制系统和传感系统四部分组成，如图 1-1 所示。工业机器人各组成部分之间的相互作用关系如图 1-2 所示。

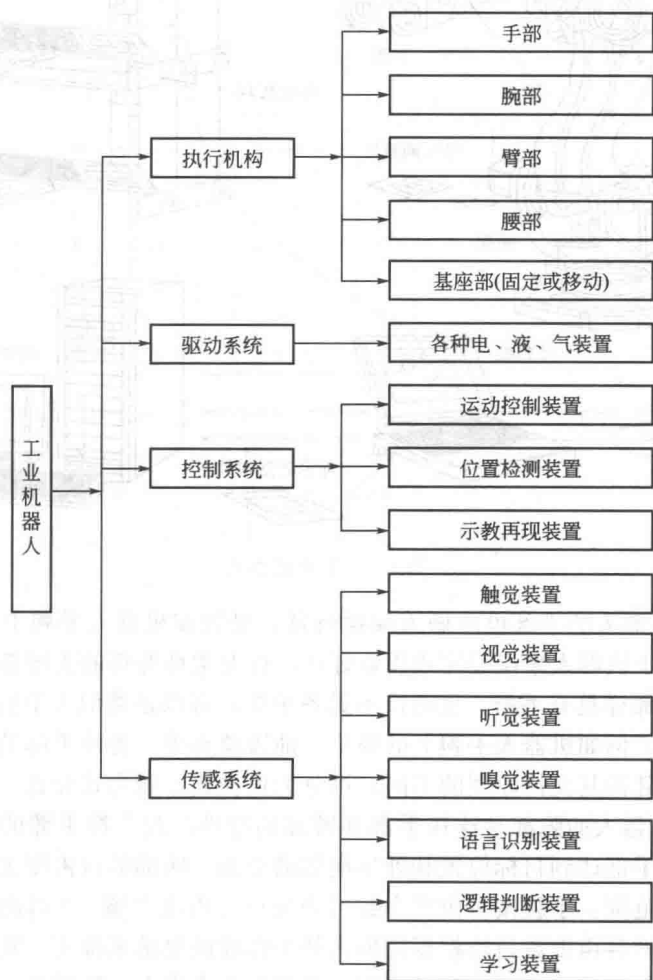


图 1-1 工业机器人的组成

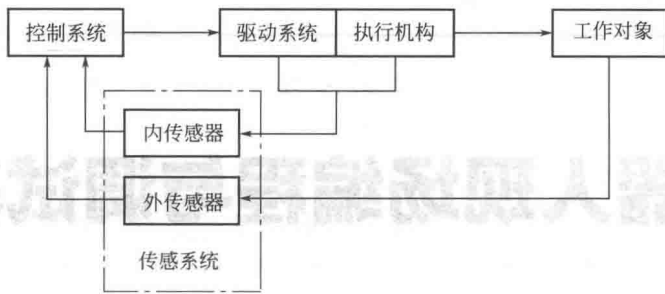


图 1-2 机器人各组成部分之间的关系

(1) 执行机构

执行机构是机器人赖以完成工作任务的实体，通常由一系列连杆、关节或其他形式的运动副所组成。从功能的角度可分为手部、腕部、臂部、腰部和机座，如图 1-3 所示。

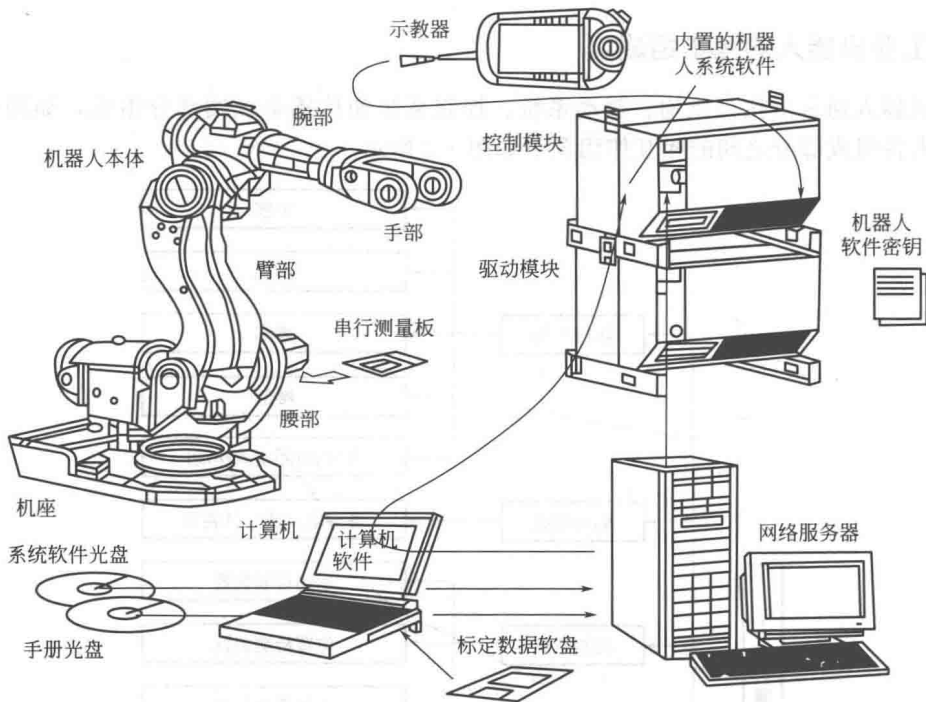


图 1-3 工业机器人

① 手部 工业机器人的手部也叫做末端执行器，是装在机器人手腕上直接抓握工件或执行作业的部件。手部对于机器人来说是完成作业好坏、作业柔性好坏的关键部件之一。

手部可以像人手那样具有手指，也可以不具备手指；可以是类似人手的手爪，也可以是进行某种作业的专用工具，例如机器人手腕上的焊枪、油漆喷头等。各种手部的工作原理不同，结构形式各异，常用的手部按其夹持原理的不同，可分为机械式、磁力式和真空式三种。

② 腕部 工业机器人的腕部是连接手部和臂部的部件，起支撑手部的作用。机器人一般具有 6 个自由度才能使手部达到目标位置和处于期望的姿态，腕部的自由度主要是实现所期望的姿态，并扩大臂部运动范围。手腕按自由度个数可分为单自由度手腕、2 自由度手腕和 3 自由度手腕。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：翻转和俯仰或翻转和偏转。有些专用机器人没有手腕部件，而是直接将手部安装在手部的前端；有的腕部为了特殊要求还有横向移动自由度。

③ 臂部 工业机器人的臂部是连接腰部和腕部的部件，用来支撑腕部和手部，实现较大运动范围。臂部一般由大臂、小臂（或多臂）所组成。臂部总质量较大，受力一般比较复杂，在运动时，直接承受腕部、手部和工件的静、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。

④ 腰部 腰部是连接臂部和基座的部件，通常是回转部件。由于它的回转，再加上臂部的运动，就能使腕部作空间运动。腰部是执行机构的关键部件，它的制作误差、运动精度和平稳性对机器人的定位精度有决定性的影响。

⑤ 机座 机座是整个机器人的支持部分，有固定式和移动式两类。移动式机座用来扩大机器人的活动范围，有的是专门的行走装置，有的是轨道、滚轮机构。机座必须有足够的刚度和稳定性。

(2) 驱动系统

工业机器人的驱动系统是向执行系统各部件提供动力的装置，包括驱动器和传动机构两部分，它们通常与执行机构连成一体。驱动器通常有电动、液压、气动装置以及把它们结合起来应用的综合系统。常用的传动机构有谐波传动、螺旋传动、链传动、带传动以及各种齿轮传动等机构。工业机器人驱动系统的组成如图 1-4 所示。

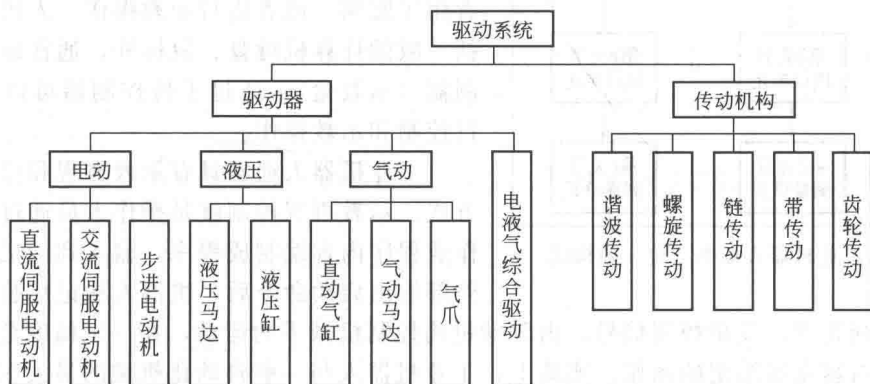


图 1-4 工业机器人驱动系统的组成

① 气力驱动 气力驱动系统通常由气缸、气阀、气罐和空压机（或由气压站直接供给）等组成，以压缩空气来驱动执行机构进行工作。其优点是空气来源方便、动作迅速、结构简单、造价低、维修方便、防火防爆、漏气对环境无影响，缺点是操作力小、体积大，又由于空气的压缩性大、速度不易控制、响应慢、动作不平稳、有冲击，气源压力一般只有 60MPa 左右，故此类型机器人适宜抓举力要求较小的场合。

② 液压驱动 液压驱动系统通常由液动机（各种油缸、油马达）、伺服阀、油泵、油箱等组成，以压缩机油来驱动执行机构进行工作。其特点是操作力大、体积小、传动平稳且动作灵敏、耐冲击、耐振动、防爆性好。相对于气力驱动，液压驱动的机器人具有大得多的抓举能力，可高达上百千克。但液压驱动系统对密封的要求较高，且不宜在高温或低温的场合工作，要求的制造精度较高，成本较高。

③ 电力驱动 电力驱动是利用电动机产生的力或力矩，直接或经过减速机构驱动机器人，以获得所需的位置、速度和加速度。电力驱动具有电源易取得，无环境污染，响应快，驱动力较大，信号检测、传输、处理方便，可采用多种灵活的控制方案，运动精度高，成本低，驱动效率高等优点，是目前机器人使用最多的一种驱动方式。驱动电动机一般采用步进电动机、直流伺服电动机以及交流伺服电动机。由于电动机转速高，通常还须采用减速机构，目前有些机构已开始采用无需减速机构的特制电动机直接驱动，这样既可简化机

构，又可提高控制精度。

④ 其他驱动方式 采用混合驱动，即液、气或电、气混合驱动。

(3) 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完成固定的运动和功能。若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。

工业机器人的控制系统主要由主控计算机和关节伺服控制器组成，如图 1-5 所示。上位主

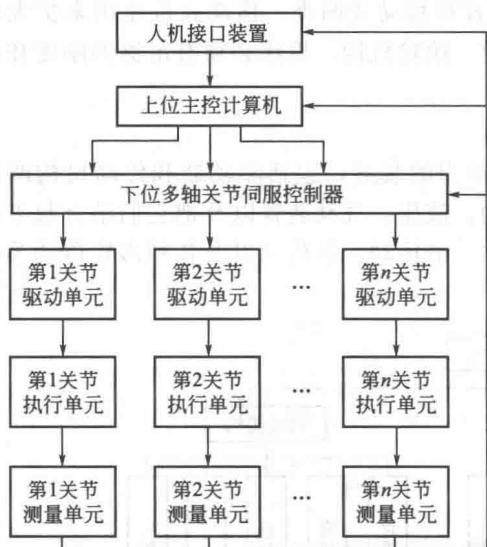


图 1-5 工业机器人控制系统一般构成

控计算机主要根据作业要求完成编程，并发出指令控制各伺服驱动装置使各杆件协调工作，同时还要完成环境状况、周边设备之间的信息传递和协调工作。关节伺服控制器用于实现驱动单元的伺服控制，轨迹插补计算，以及系统状态监测。机器人的测量单元一般安装在执行部件中的位置检测元件（如光电编码器）和速度检测元件（如测速电机），这些检测量反馈到控制器中或者用于闭环控制，或者用于监测，或者进行示教操作。人机接口除了包括一般的计算机键盘、鼠标外，通常还包括手持控制器（示教盒），通过手持控制器可以对机器人进行控制和示教操作。

工业机器人通常具有示教再现和位置控制两种方式。示教再现控制就是操作人员通过示教装置把作业程序内容编制成程序，输入到记忆装置中，在外部给出启动命令后，机器人从记忆装置中读出信息并送到控制装置，发出控制信号，由驱动机构控制机械手的运动，在一定精度范围内按照记忆装置中的内容完成给定的动作。实质上，机器人与一般自动化机械的最大区别就是它具有“示教再现”功能，因而表现出通用、灵活的“柔性”特点。

工业机器人的位置控制方式有点位控制和连续路径控制两种。其中，点位控制这种方式只关心机器人末端执行器的起点和终点位置，而不关心这两点之间的运动轨迹，这种控制方式可完成无障碍条件下的点焊、上下料、搬运等操作。连续路径控制方式不仅要求机器人以一定的精度达到目标点，而且对移动轨迹也有一定的精度要求，如机器人喷漆、弧焊等操作。实质上这种控制方式是以点位控制方式为基础，在每两点之间用满足精度要求的位置轨迹插补算法实现轨迹连续化的。

工业机器人的位置控制方式有点位控制和连续路径控制两种。其中，点位控制这种方式只关心机器人末端执行器的起点和终点位置，而不关心这两点之间的运动轨迹，这种控制方式可完成无障碍条件下的点焊、上下料、搬运等操作。连续路径控制方式不仅要求机器人以一定的精度达到目标点，而且对移动轨迹也有一定的精度要求，如机器人喷漆、弧焊等操作。实质上这种控制方式是以点位控制方式为基础，在每两点之间用满足精度要求的位置轨迹插补算法实现轨迹连续化的。

(4) 传感系统

传感系统是机器人的重要组成部分，按其采集信息的位置，一般可分为内部和外部两类传感器。内部传感器是完成机器人运动控制所必需的传感器，如位置、速度传感器等，用于采集机器人内部信息，是构成机器人不可缺少的基本元件。外部传感器检测机器人所处环境、外部物体状态或机器人与外部物体的关系。常用的外部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方面的传感器。机器人传感器的分类如表 1-1 所示。

传统的工业机器人仅采用内部传感器，用于对机器人运动、位置及姿态进行精确控制。使用外部传感器，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。

表 1-1 机器人传感器的分类

内部传感器	用途	机器人的精确控制
	检测的信息	位置、角度、速度、加速度、姿态、方向等
	所用传感器	微动开关、光电开关、差动变压器、编码器、电位计、旋转变压器、测速发电机、加速度计、陀螺、倾角传感器、力(或力矩)传感器等
外部传感器	用途	了解工件、环境或机器人在环境中的状态,对工件的灵活、有效的操作
	检测的信息	工件和环境:形状、位置、范围、质量、姿态、运动、速度等 机器人与环境:位置、速度、加速度、姿态等 对工件的操作:非接触(间隔、位置、姿态等)、接触(障碍检测、碰撞检测等)、触觉(接触觉、压觉、滑觉)、夹持力等
	所用传感器	视觉传感器、光学测距传感器、超声测距传感器、触觉传感器、电容传感器、电磁感应传感器、限位传感器、压敏导电橡胶、弹性体加应变片等

1.1.2 机器人的基本工作原理

现在广泛应用的工业机器人都属于第一代机器人,它的基本工作原理是示教再现,如图 1-6 所示。

示教也称为导引,即由用户引导机器人,一步步将实际任务操作一遍,机器人在引导过程中自动记忆示教的每个动作的位置、姿态、运动参数、工艺参数等,并自动生成一个连续执行全部操作的程序。

完成示教后,只需给机器人一个启动命令,机器人将精确地按示教动作,一步步完成全部操作,这就是示教与再现。

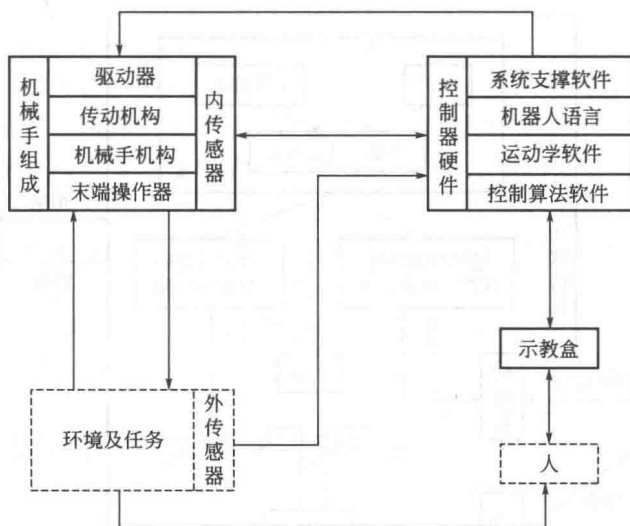


图 1-6 机器人工作原理

(1) 机器人手臂的运动

机器人的机械臂由数个刚性杆体和旋转或移动的关节连接而成,是一个开环关节链,开链的一端固接在基座上,另一端是自由的,安装着末端执行器(如焊枪),在机器人操作时,机器人手臂前端的末端执行器必须与被加工工件处于相适应的位置和姿态,而这些位置和姿态是由若干个臂关节的运动所合成的。

因此,机器人运动控制中,必须要知道机械臂各关节变量空间和末端执行器的位置和姿态之间的关系,这就是机器人运动学模型。一台机器人机械臂的几何结构确定后,其运动学模型

即可确定，这是机器人运动控制的基础。

(2) 机器人轨迹规划

机器人机械手端部从起点的位置和姿态到终点的位置和姿态的运动轨迹空间曲线叫做路径。

轨迹规划的任务是用一种函数来“内插”或“逼近”给定的路径，并沿时间轴产生一系列“控制设定点”，用于控制机械手运动。目前常用的轨迹规划方法有空间关节插值法和笛卡儿空间规划两种方法。

(3) 机器人机械手的控制

当一台机器人机械手的动态运动方程已给定，它的控制目的就是按预定性能要求保持机械手的动态响应。但是由于机器人机械手的惯性力、耦合反应力和重力负载都随运动空间的变化而变化，因此要对它进行高精度、高速度、高动态品质的控制是相当复杂而困难的。

目前工业机器人上采用的控制方法是把机械手上每一个关节都当做一个单独的伺服机构，即把一个非线性的、关节间耦合的变负载系统，简化为线性的非耦合单独系统。

1.1.3 机器人应用与外部的关系

(1) 机器人应用涉及的领域

机器人技术是集机械工程学、计算机科学、控制工程、电子技术、传感器技术、人工智能、仿生学等学科为一体的综合技术，它是多学科科技革命的必然结果。每一台机器人，都是一个知识密集和技术密集的高科技机电一体化产品。机器人与外部的关系如图 1-7 所示，机器人技术涉及的研究领域有如下几个。

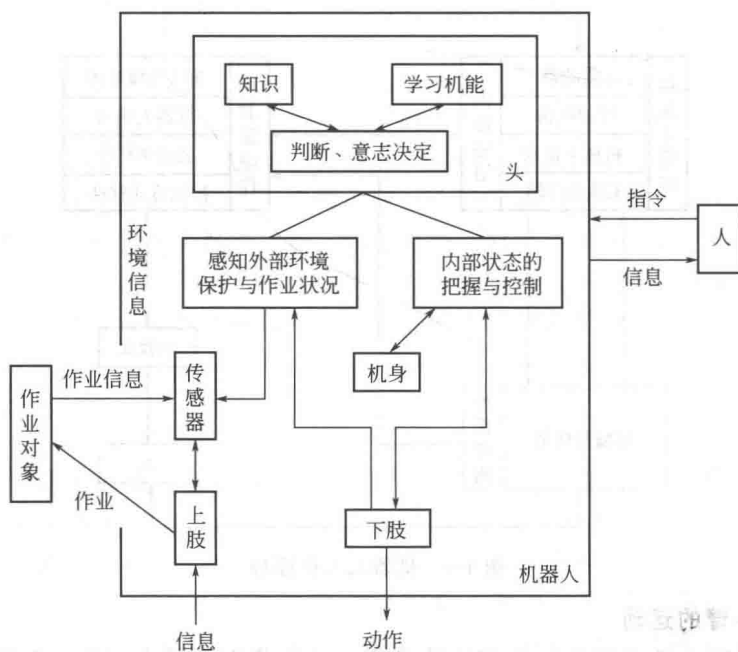


图 1-7 机器人与外部的关系

- ① 传感器技术。得到与人类感觉机能相似的传感器技术。
- ② 人工智能计算机科学。得到与人类智能或控制机能相似能力的人工智能或计算机科学。
- ③ 假肢技术。
- ④ 工业机器人技术。把人类作业技能具体化的工业机器人技术。

- ⑤ 移动机械技术。实现动物行走机能的行走技术。
- ⑥ 生物功能。以实现生物机能为目的的生物学技术。

(2) 机器人研究内容

机器人研究的基础内容有以下几方面。

① 空间机构学 空间机构在机器人中的应用体现在：机器人机身和臂部机构的设计、机器人手部机构设计、机器人行走机构的设计、机器人关节部机构的设计，即机器人机构的型综合和尺寸综合。

② 机器人运动学 机器人的执行机构实际上是一个多刚体系统，研究要涉及组成这一系统的各杆件之间以及系统与对象之间的相互关系，为此需要一种有效的数学描述方法。

③ 机器人静力学 机器人与环境之间的接触会在机器人与环境之间引起相互的作用力和力矩，而机器人的输入关节力矩由各个关节的驱动装置提供，通过手臂传至手部，使力和力矩作用在环境的接触面上。这种力和力矩的输入和输出关系在机器人控制中是十分重要的。静力学主要讨论机器人手部端点力与驱动器输入力矩的关系。

④ 机器人动力学 机器人是一个复杂的动力学系统，要研究和控制这个系统，首先必须建立它的动力学方程。动力学方程是指作用于机器人各机构的力或力矩与其位置、速度、加速度关系的方程式。

⑤ 机器人控制技术 机器人的控制技术是在传统机械系统的控制技术的基础上发展起来的，两者之间无根本的不同。但机器人控制系统也有许多特殊之处，它是有耦合的、非线性的多变量的控制系统，其负载、惯量、重心等随时间都可能变化，不仅要考虑运动学关系还要考虑动力学因素，其模型为非线性而工作环境又是多变的，等等。主要研究的内容有机器人控制方式和机器人控制策略。

⑥ 机器人传感器 机器人的感觉主要通过传感器来实现，如表 1-1 所示。

⑦ 机器人语言 机器人语言分为通用计算机语言和专用机器人语言，通用机器人语言的种类极多，常用的有汇编语言、FORTRAN、PASCAL、FORTH、BASIC 等。随着作业内容的复杂化，利用程序来控制机器人显得越来越困难，为了寻求用简单的方法描述作业，控制机器人动作，人们开发了一些机器人专用语言，如 AL、VAL、IML、PART、AUTOPASS 等。作为机器人语言，首先要具有作业内容的描述性，不管作业内容如何复杂，都能准确加以描述；其次要具有环境模型的描述性，要能用简单的模型描述复杂的环境，要能适应操作情况的变化改变环境模型的内容；再次要求具有人机对话的功能，以便及时描述新的作业及修改作业内容；最后要求在出现危险情况时能及时报警并停止机器人动作。

1.2 机器人的基本术语与图形符号

1.2.1 机器人的基本术语

(1) 关节

关节 (Joint)：即运动副，是允许机器人手臂各零件之间发生相对运动的机构，是两构件直接接触并能产生相对运动的活动连接，如图 1-8 所示。A、B 两部件可以做互动连接。

高副机构 (Higher Pair)：简称高副，指的是运动机构的两构件通过点或线的接触而构成的运动副。例如齿轮副和凸轮副就属于高副机构。平面高副机构拥有两个自由度，即相对接触面切线方向的移动和相对接触点的转动。相对而言，通过面的接触而构成的运动副叫做低副

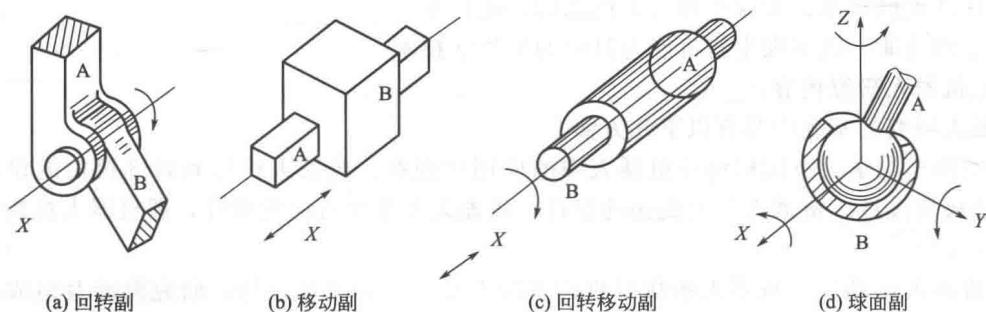


图 1-8 机器人的关节

机构。

关节是各杆件间的结合部分，是实现机器人各种运动的运动副，由于机器人的种类很多，其功能要求不同，关节的配置和传动系统的形式都不同。机器人常用的关节有移动、旋转运动副。一个关节系统包括驱动器、传动器和控制器，属于机器人的基础部件，是整个机器人伺服系统中的一个重要环节，其结构、重量、尺寸对机器人性能有直接影响。

① 回转关节 回转关节又叫做回转副、旋转关节，是使连接两杆件的组件中的一件相对于另一件绕固定轴线转动的关节，两个构件之间只作相对转动的运动副。如手臂与机座、手臂与手腕，并实现相对回转或摆动的关节机构，由驱动器、回转轴和轴承组成。多数电动机能直接产生旋转运动，但常需各种齿轮、链、带传动或其他减速装置，以获取较大的转矩。

② 移动关节 移动关节又叫做移动副、滑动关节、棱柱关节，是使两杆件的组件中的一件相对于另一件作直线运动的关节，两个构件之间只作相对移动。它采用直线驱动方式传递运动，包括直角坐标结构的驱动，圆柱坐标结构的径向驱动和垂直升降驱动，以及极坐标结构的径向伸缩驱动。直线运动可以直接由气缸或液压缸和活塞产生，也可以采用齿轮齿条、丝杠、螺母等传动元件把旋转运动转换成直线运动。

③ 圆柱关节 圆柱关节又叫做回转动副、分布关节，是使两杆件的组件中的一件相对于另一件移动或绕一个移动轴线转动的关节，两个构件之间除了作相对转动之外，还同时可以作相对移动。

④ 球关节 球关节又叫做球面副，是使两杆件间的组件中的一件相对于另一件在三个自由度上绕一固定点转动的关节，即组成运动副的两构件能绕一球心作三个独立的相对转动的运动副。

(2) 连杆

连杆 (Link): 指机器人手臂上被相邻两关节分开的部分，是保持各关节间固定关系的刚体，是机械连杆机构中两端分别与主动和从动构件铰接以传递运动和力的杆件。例如在往复活塞式动力机械和压缩机中，用连杆来连接活塞与曲柄。连杆多为钢件，其主体部分的截面多为圆形或工字形，两端有孔，孔内装有青铜衬套或滚针轴承，供装入轴销而构成铰接。

连杆是机器人中的重要部件，它连接着关节，其作用是将一种运动形式转变为另一种运动形式，并把作用在主动构件上的力传给从动构件以输出功率。

(3) 刚度

刚度 (Stiffness): 是机器人机身或臂部在外力作用下抵抗变形的能力。它用外力和在外力作用方向上的变形量 (位移) 之比来度量。在弹性范围内，刚度是零件载荷与位移成正比的比例系数，即引起单位位移所需的力。它的倒数称为柔度，即单位力引起的位移。刚度可分为静刚度和动刚度。

在任何力的作用下，体积和形状都不发生改变的物体叫做刚体 (Rigid Body)。在物理学