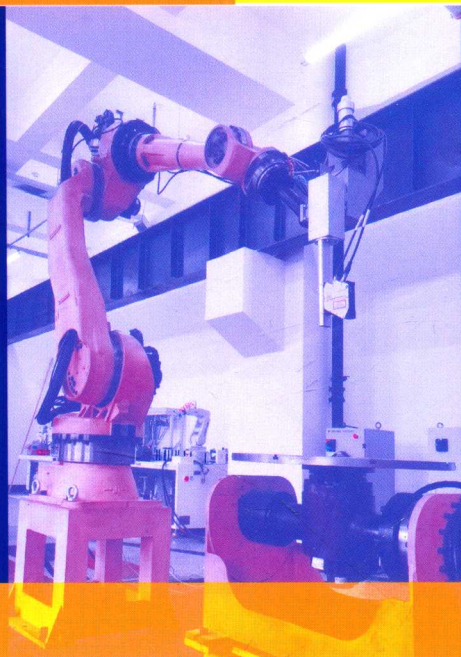




# 新工科机器人工程专业规划教材

机器人技术与系统国家重点实验室 组织编写

蔡鹤皋 院士 / 邓宗全 院士 顾问



## Industrial Robot Technology 工业机器人技术

李瑞峰 葛连正 编著

清华大学出版社

新工科机器人工程专业规划教材

Industrial Robot Technology

# 工业机器人技术

李瑞峰 葛连正 编著



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是作者多年从事工业机器人教学和研发的一些技术总结,分别介绍了工业机器人的数学基础、机械系统、控制系统、软件系统、性能检测、编程及应用等内容,为读者提供了系统的工业机器人理论、设计和应用基础。

本书可供工业机器人研发和应用的技术人员参考,也可以作为高等院校机器人工程专业教师和本科生的教学参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

工业机器人技术/李瑞峰,葛连正编著. —北京:清华大学出版社,2019  
(新工科机器人工程专业规划教材)  
ISBN 978-7-302-53296-5

I. ①工… II. ①李… ②葛… 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138696号

责任编辑:许 龙  
封面设计:常雪影  
责任校对:赵丽敏  
责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京鑫丰华彩印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13.25

字 数:320千字

版 次:2019年7月第1版

印 次:2019年7月第1次印刷

定 价:38.00元

产品编号:080805-01

# 新工科机器人工程专业规划教材

机器人技术与系统国家重点实验室

## ● 组织编写委员会 ●

### 顾 问

蔡鹤皋 院士

邓宗全 院士

### 主 任

刘 宏

赵 杰

### 委 员

(按姓氏拼音排序)

敖宏瑞	丁 亮	董 为	杜志江	付宜利	高海波
高云峰	葛连正	纪军红	姜 力	蒋再男	金明河
李 兵	李隆球	李瑞峰	李天龙	刘延杰	刘 宇
楼云江	倪风雷	曲明成	荣伟彬	王滨生	王 飞
王 珂	王振龙	闫纪红	闫继红	徐文福	于洪健
赵建文	赵京东	赵立军	钟诗胜	朱晓蕊	朱延河

### 秘 书

董 为

许 龙

机器人技术是涉及机械电子、感知测量、控制、通信和计算机等学科的综合性和高新技术，是光机电软一体化研发制造的典型代表。而工业机器人则是机器人技术发展的典型代表，其研发、制造和应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志，是推进传统产业改造升级和结构调整的重要支撑。同时，工业机器人是现代制造业重要的自动化装备，是制造业实现数字化、智能化和信息化的重要载体。工业机器人及其为主体的自动化成套设备是提升制造业发展质量和竞争力的重要途径。目前，工业机器人已经广泛应用于汽车及汽车零部件制造业、机械加工行业、电子电气行业、橡胶及塑料工业、食品工业、物流和制造业等诸多领域中。

随着人口老龄化加剧，劳动力短缺，劳动力成本急剧上升，下游制造行业的生产方式也亟待升级。我国亦高度重视机器人产业的发展，相继出台了《关于推进机器人产业发展的指导意见》《机器人产业发展规划(2016—2020年)》等，在战略上做了顶层设计。地方扶持政策也积极跟进，重点是对研发和“机器换人”应用的扶持。工业机器人作为我国高端装备制造的基础设备之一，是我国“十二五”发展规划中高端制造装备战略性新兴产业的重要组成部分，也是其他战略性新兴产业发展的重要基础装备。目前全国已有四十多家机器人产业园，中国已经成为全球最大的机器人市场。

机器人产业有着多层次的人才需求，教育部等部委联合发布的《制造业人才发展规划指南》预测，到2020年我国高档数控机床和机器人领域人才缺口将达到300万；到2025年，人才缺口将进一步扩大到450万。虽然我国企业和科研机构不断加大机器人技术与本体研制方向的人才引进与培养力度，但现场调试、维护操作与运行管理等应用型人才的培养力度依然有所欠缺。同时，各高校和职业院校也相继设置了机器人及其应用的相关专业，而系统介绍工业机器人技术和研发的专业技术书籍还不多。编者多年从事工业机器人研发，先后承担过国家重点研发计划、国家数控重大专项、“863”计划项目中的工业机器人研发课题，具有较为丰富的工业机器人研发经验，书中的部分工业机器人实例也是这些国家课题项目的技术成果。

全书共分6章。第1章介绍了工业机器人的概念和定义，阐述了工业机器人按照发展程度、性能、结构、控制、驱动和应用特征分类的情况，并对工业机器人关键技术、国内外工业机器人的发展现状和趋势进行了分析。第2章讲述了工业机器人的数学基础，重点介绍了工业机器人的位姿描述、坐标系转换、运动学模型、工作空间、典型轨迹规划算法。对机器人的雅可比矩阵和机器人动力学进行了简介。第3章分析了工业机器人的机械系统，包括机器人本体的总体结构、关节形式、材料选择、传动机构和机构优化等，讲述了工业机器人的系统标定、性能指标及测试方法。第4章讲述了工业机器人的驱动和控制系统，对工业机器人的各种控制方式进行了阐述，以一种工业机器人控制系统设计为例，对控制系统的硬件和软件结构进行了设计。第5章系统介绍了工业机器人的编程方式、编程语言、当前主要的工业

机器人仿真系统,阐述了机器人的机械系统、控制系统和软件系统的原理及操作流程。第6章介绍了工业机器人在制造业领域的应用状况,包括工业机器人的安全情况、通信方式、传感器系统,以及基于视觉、力觉的工业机器人应用设计案例。分别介绍了焊接、搬运、喷涂、装配和协作等典型工业机器人的应用。

本书针对工业机器人的设计和应用过程,除了介绍和讨论机器人学的基本理论外,更加注重机器人实际设计及工程应用中应该注意的问题和一些关键技术掌握。分别从工业机器人的理论基础、机械系统设计、控制系统设计、机器人编程及应用等方面给读者提供了完整的工业机器人设计和应用流程。本书可供机器人研发、设计、工程应用的技术人员参考,也可以作为高等院校机器人专业教师和本科生的教学参考书。

本书是哈尔滨工业大学机器人研究所工业机器人课题组老师和研究生的共同研究成果。李瑞峰教授负责本书的总体规划和修订,重点编写了第1、3、6章,葛连正助理研究员重点编写了第2、4、5章。本书撰写工作得到了王珂、赵立军、陈健、仝勋伟、王淑英、吴重阳、郭万金、刘志恒等很大的支持与帮助,在此表示衷心感谢。

本书在写作过程中对相关专家进行了咨询,同时查阅了同行专家学者和一些科研单位、院校的教材和文献,在此向各位文献作者致以诚挚的谢意。由于作者水平有限,书中难免存在不足和错误之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2019年5月

第 1 章 绪论	1
1.1 工业机器人定义	1
1.2 工业机器人分类	2
1.2.1 按机器人的发展程度分类	2
1.2.2 按机器人的性能指标分类	4
1.2.3 按机器人的结构特征分类	6
1.2.4 按机器人的结构形式分类	8
1.2.5 按控制方式分类	10
1.2.6 按驱动方式分类	11
1.2.7 按机器人的应用分类	12
1.3 工业机器人关键技术	15
1.4 工业机器人发展现状和趋势	17
1.4.1 国外概况	18
1.4.2 国内概况	19
1.5 小结	22
习题	22
参考文献	22
第 2 章 工业机器人数学基础	23
2.1 工业机器人坐标系	23
2.2 机器人位姿描述和变换	24
2.2.1 机器人末端姿态	25
2.2.2 变换的不同坐标系	30
2.2.3 $A$ 矩阵和 $T$ 矩阵	31
2.3 机器人运动学	34
2.3.1 串联式机器人	34
2.3.2 并联式机器人	38
2.3.3 机器人工作空间	41
2.3.4 机器人雅可比矩阵	43
2.4 基于运动学的机器人轨迹规划	45
2.4.1 机器人梯形速度曲线规划	45
2.4.2 机器人姿态规划算法	46

2.4.3	机器人关节空间内 B 样条插补算法 .....	47
2.4.4	机器人空间直线插补算法 .....	48
2.4.5	机器人空间圆弧插补算法 .....	49
2.5	机器人系统动力学 .....	53
2.5.1	拉格朗日方程 .....	53
2.5.2	平面二连杆机器人动力学建模 .....	54
2.6	小结 .....	56
	习题 .....	56
	参考文献 .....	57
<b>第 3 章</b>	<b>工业机器人机械系统 .....</b>	<b>58</b>
3.1	工业机器人的系统构成 .....	58
3.1.1	工业机器人系统构成 .....	58
3.1.2	工业机器人执行系统 .....	60
3.2	机器人关节及自由度 .....	64
3.2.1	自由度 .....	64
3.2.2	关节及自由度的构成 .....	65
3.2.3	机器人关节形式 .....	66
3.3	工业机器人本体材料选择 .....	67
3.4	机器人传动机构 .....	68
3.4.1	机器人齿轮传动机构 .....	68
3.4.2	机器人丝杠传动机构 .....	72
3.4.3	机器人带传动与链传动机构 .....	73
3.4.4	机器人绳传动与钢带传动机构 .....	75
3.5	机器人机构优化 .....	76
3.5.1	机器人机构优化形式 .....	76
3.5.2	机器人机构优化指标 .....	77
3.5.3	机器人机构优化流程 .....	79
3.5.4	机器人机构优化算法 .....	80
3.6	工业机器人设计流程 .....	81
3.6.1	机器人性能参数确定 .....	81
3.6.2	机器人机构设计方案 .....	82
3.6.3	机器人三维建图及仿真建模 .....	86
3.6.4	机器人本体优化设计 .....	87
3.6.5	机器人生产图输出 .....	91
3.6.6	机器人零部件加工与装配 .....	93
3.7	工业机器人系统标定及性能测试 .....	95
3.7.1	工业机器人系统标定 .....	95
3.7.2	工业机器人性能测试指标 .....	100

3.7.3 工业机器人性能测试举例	104
3.8 小结	107
习题	108
参考文献	108
<b>第4章 工业机器人驱动与控制</b>	<b>109</b>
4.1 工业机器人驱动系统	109
4.1.1 电机驱动器	109
4.1.2 液压驱动器	114
4.1.3 气动系统	114
4.2 工业机器人控制系统结构	116
4.2.1 工业机器人控制器技术现状	116
4.2.2 机器人控制系统的主要构成	118
4.2.3 机器人控制系统的各功能单元	119
4.3 机器人控制理论及方法	121
4.3.1 机器人控制结构	121
4.3.2 机器人经典控制方法	122
4.3.3 机器人现代控制方法	125
4.4 机器人控制系统工程实现	130
4.4.1 工业机器人控制体系结构	130
4.4.2 工业机器人控制系统设计流程	130
4.5 基于 IPC 的机器人控制系统设计	131
4.5.1 机器人控制器硬件结构	132
4.5.2 机器人控制器软件结构	134
4.6 小结	136
习题	136
参考文献	137
<b>第5章 机器人软件及操作</b>	<b>138</b>
5.1 机器人编程	138
5.1.1 工业机器人编程方式	138
5.1.2 工业机器人编程语言要求和类别	142
5.1.3 HJG30 编程语言应用	143
5.2 机器人软件设计	146
5.2.1 上位机软件设计	146
5.2.2 下位机软件设计	148
5.3 工业机器人系统仿真	152
5.3.1 MATLAB 仿真	152
5.3.2 ADAMS 仿真	153

5.3.3	V-REP 仿真 .....	155
5.3.4	ROS 系统仿真 .....	156
5.4	机器人操作 .....	156
5.4.1	弧焊机器人简介 .....	156
5.4.2	机器人操作安全注意事项 .....	158
5.4.3	机器人操作 .....	159
5.4.4	设备的维护 .....	162
5.5	小结 .....	164
	习题 .....	165
	参考文献 .....	165
<b>第 6 章</b>	<b>工业机器人综合应用技术 .....</b>	<b>167</b>
6.1	工业机器人安全 .....	167
6.2	工业机器人通信 .....	168
6.3	工业机器人传感及控制 .....	169
6.3.1	工业机器人传感器 .....	169
6.3.2	工业机器人智能控制系统 .....	174
6.3.3	基于视觉的机器人目标抓取系统 .....	175
6.3.4	基于力觉的机器人打磨作业系统 .....	177
6.4	工业机器人典型应用 .....	181
6.4.1	焊接机器人 .....	182
6.4.2	搬运机器人 .....	187
6.4.3	喷涂机器人 .....	189
6.4.4	装配机器人 .....	195
6.4.5	协作机器人 .....	198
6.5	小结 .....	199
	习题 .....	200
	参考文献 .....	200

1954年,美国人 G. C. 戴万获得了第一项工业机器人专利,1958年美国机械与铸造公司(A. M. F)研制成功一台数控自动通用机器,商品名为 Versatran,并以“工业机器人”(Industrial Robot)为商品广告投入市场,这就是世界上最早的工业机器人。经过 60 多年的迅速发展,工业机器人已经广泛应用于汽车及汽车零部件制造业、机械加工行业、电子电气行业、橡胶及塑料工业、食品工业、物流和制造业等诸多领域中。作为先进制造业中不可替代的核心自动化装备,工业机器人已经成为衡量一个国家制造水平和科技水平的重要标志。同时,工业机器人的发展是一个动态过程,其性能及应用将随着科技的发展而同步提升。为此,本节将对工业机器人的基本概念、发展状况及其应用前景做一整体介绍,为后续章节的学习奠定基础。

### 1.1 工业机器人定义

目前,世界各国对工业机器人还没有统一的明确定义。通常工业机器人是指面向工业领域的多关节机器人或多自由度的机器装置,日本工业机器人协会(JIRA)将工业机器人定义为“一种装备有记忆装置和末端执行器的,能够转动并通过自动完成各种移动来代替人类劳动的通用机器”。根据国家标准,工业机器人定义为“其操作机是自动控制的,可重复编程、多用途,并可对 3 个以上轴进行编程。它可以是固定式或移动式,在工业自动化应用中使用”,操作机又定义为“一种机器,其机构通常由一系列互相铰接或相对滑动的构件所组成。它通常有几个自由度,用以抓取或移动物体(工具或工件)”。

工业机器人具有可编程、拟人化和通用性的显著特点。因此,一般对工业机器人的理解为:具有拟人手臂、手腕和手功能的机械电子装置,它可把任一物件或工具按空间位置和姿态的时变要求进行移动,从而完成某一工业生产的作业任务。如夹持焊钳或焊枪,对汽车或摩托车车体进行点焊或弧焊;搬运压铸或冲压成型的零件或构件;进行激光切割;喷涂;装配机械零、部件等。

机器人技术涉及机构学、控制论、计算机、信息技术、传感技术、仿生学和人工智能等多学科技术,目前并没有统一的定义,其定义和应用领域也必将随着技术发展而持续发展。工业机器人作为一种典型的机电一体化数字化装备,体现着机器人技术的发展成果,可实现制造生产的模块化、智能化,技术附加值高,应用范围广,作为先进制造业的支撑技术和信息化社会的新兴产业,世界各国都将其作为工业自动化发展的重点方向,将对未来生产和社会发展起着越来越重要的作用。

## 1.2 工业机器人分类

工业机器人可按照不同的功能、用途、规模、结构、控制和驱动形式等分成很多类型,目前国内外尚无统一的分类标准。参考国内外相关资料,本节对工业机器人作如下分类。

### 1.2.1 按机器人的发展程度分类

机器人技术融合了多学科的发展成果,随着学科技术的不断发展,工业机器人的发展经历了从低级到高级的过程。工业机器人作为机器人的一种主要类型,可根据从低级到高级的发展程度分为以下几类。

#### 1. 第一代机器人

第一代机器人主要指只能以“示教-再现”方式工作的工业机器人,称为示教再现型(图 1-1)。示教内容为机器人操作结构的空间轨迹、作业条件和作业顺序等。所谓示教,即由操作者指示机器人运动的轨迹、停留点位和停留时间等。然后,机器人依照示教的行为、顺序和速度重复运动,即所谓的再现。

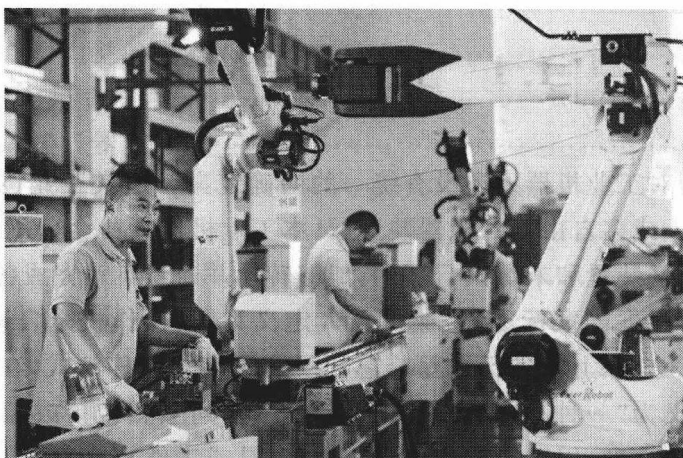


图 1-1 第一代示教再现型工业机器人

普遍的示教方式是通过机器人的控制面板或专用手控盒完成的。操作人员利用控制面板上的开关或键盘控制机器人一步一步地运动,机器人自动记录每一步,然后重复,并且操作者可以对示教的程序进行编辑。目前在工业现场应用的机器人大多采用这一方式。

另外,更为高级、方便的示教方式可由操作员手把手地进行。操作人员抓住机器人上的喷枪把喷涂时要走的位置走一遍,机器人记住这一连串运动的逻辑顺序及示教点的位置和姿态,工作时自动重复这些运动,从而完成给定位置的喷涂工作。

#### 2. 第二代机器人

第二代机器人带有一些可感知环境的装置,通过反馈控制,使工业机器人能在一定程度上适应环境的变化(图 1-2)。

这样的技术现在正越来越多地应用在工业机器人上,例如焊缝跟踪技术。在机器人焊接的过程中,通过示教方式给出机器人的运动曲线,机器人携带焊枪走这个曲线进行焊接。这就要求工件的一致性,也就是说工件被焊接的位置必须十分准确,否则,机器人行走的曲线和工件上的实际焊缝位置将产生偏差。焊缝跟踪技术是在机器人上加一个传感器装置,通过传感器装置感知焊缝的位置,再通过反馈控制,机器人自动跟踪焊缝,从而对示教的位置进行修正。即使实际焊缝相对于原始设定的位置有变化,机器人仍然可以很好地完成焊接工作。

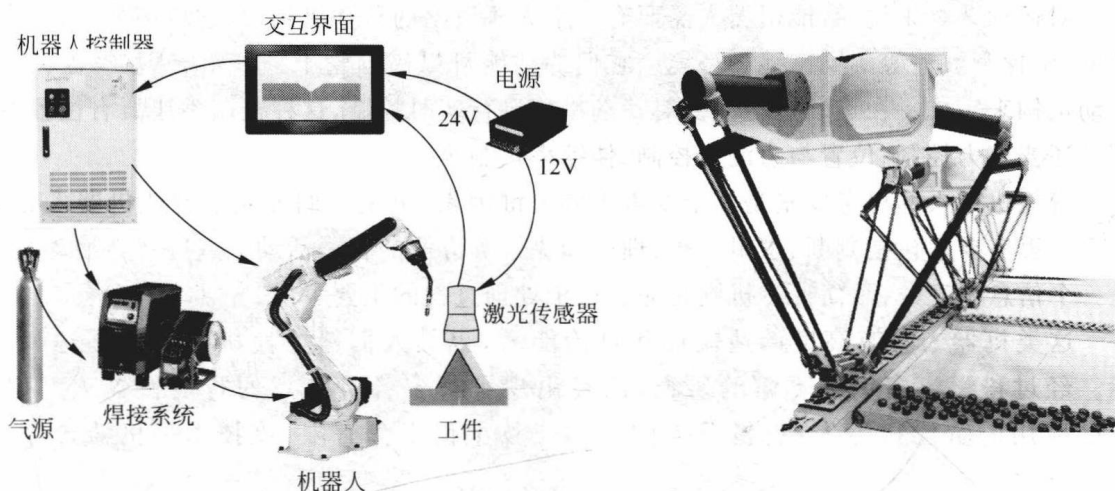


图 1-2 载有传感器的第二代工业机器人

另外一个典型例子为机器人打磨作业,机器人通过安装在腕部或末端的力传感器可以控制打磨力的大小。近年来,FANUC 机器人推出一种视觉识别工业机器人,可以自动判别物料筐中工件的姿态和位置,自动进行散乱堆放零件的挑选,提高了工作效率。

### 3. 第三代机器人

第三代机器人是智能机器人,是机器人学追求的最高级阶段。它具有多种感知功能,可进行复杂的逻辑推理、学习、判断及决策,可在作业环境中独立行动,具有发现问题且能自主解决问题的能力(图 1-3)。

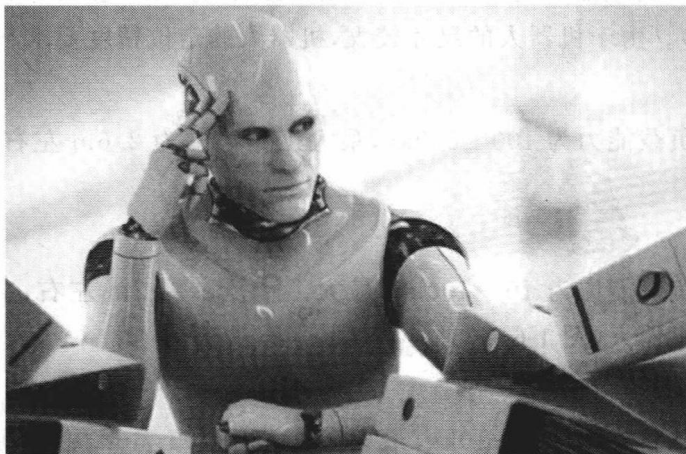


图 1-3 第三代智能机器人

智能机器人至少要具备以下3个要素：①感觉要素，用来认识周围环境状态；②运动要素，对外界做出反应性动作；③思考要素，根据感觉要素所得到的信息，思考出采用什么样的动作。

感觉要素包括感知视觉、接近、距离等非接触型传感器和感知力、压觉、触觉等的接触型传感器。这些要素实质上相当于人的眼、鼻、耳等五官，它们的功能可以通过诸如摄像机、图像传感器、超声波传感器、激光器、导电橡胶、压电元件、气动元件、行程开关和光电传感器等机电元器件来实现。

对运动要素来说，智能机器人需要有一个无轨道型的移动机构，以适应诸如平地、台阶、墙壁、楼梯和坡道等不同的地理环境。它们的功能可以借助轮子、履带、支脚、吸盘、气垫等移动机构来完成。在运动过程中要对移动机构进行实时控制，这种控制不仅要有位置控制，而且还要有力控制、位置与力混合控制、伸缩率控制等。

智能机器人的思考要素是3个要素中的关键因素，也是人们要赋予智能机器人必备的要素。思考要素包括判断、逻辑分析、理解和决策等方面的智力活动。这些智力活动实质上是一个信息处理过程，而计算机则是完成这个处理过程的主要手段。

这类机器人具有高度的适应性和自治能力，也是人们努力使机器人能够达到的目标。经过科学家多年来不懈的研究，已经出现了很多各具特点的智能机器人。但是，在已应用的智能机器人中，机器人的自适应技术仍十分有限，该技术是机器人今后发展的方向。

## 1.2.2 按机器人的性能指标分类

工业机器人作为一种制造业工作单元，或独立工作，或与其他工位协调作业，因此必须考虑工业机器人的工作环境和能力等因素。机器人的工作空间是机器人操作器的工作区域，负载能力和工作空间是工业机器人的重要衡量指标之一，工业机器人按照负载能力和作业空间等性能指标可分为5类。

### 1. 超大型机器人

超大型机器人的负载能力为500kg以上，最大工作范围可达3.2m以上，大多为搬运、码垛机器人(图1-4)。由于机器人的尺寸较大，机器人的定位精度要求不高。

### 2. 大型机器人

大型机器人的负载能力为100~500kg，最大工作范围为2.6m左右，主要是点焊、搬运机器人(图1-5)。

### 3. 中型机器人

中型机器人的负载能力为10~100kg，最大工作范围为2m左右，主要是点焊机器人、浇铸机器人和搬运机器人(图1-6)。

### 4. 小型机器人

小型机器人的负载能力为1~10kg，最大工作范围为1.6m左右，主要是弧焊机器人、点胶机器人和装配机器人(图1-7)，该类型的工业机器人具有较高的定位精度。

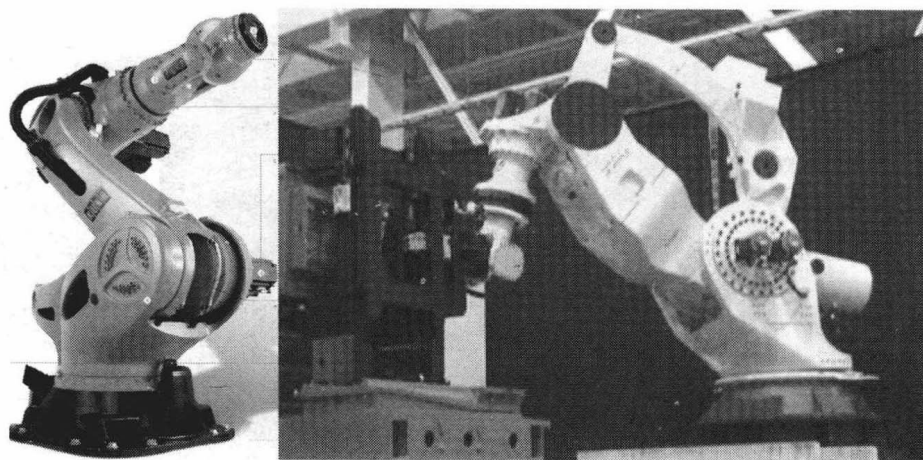


图 1-4 重载搬运机器人

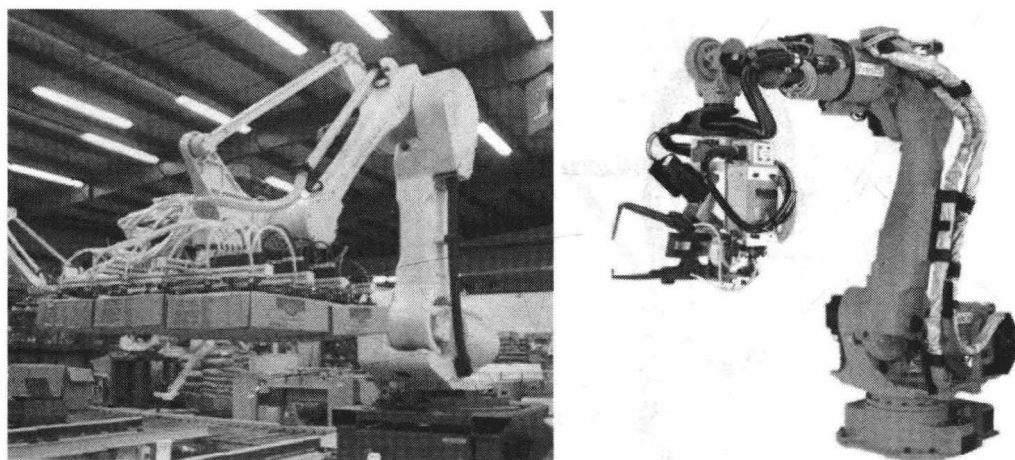


图 1-5 大型码垛和点焊工业机器人

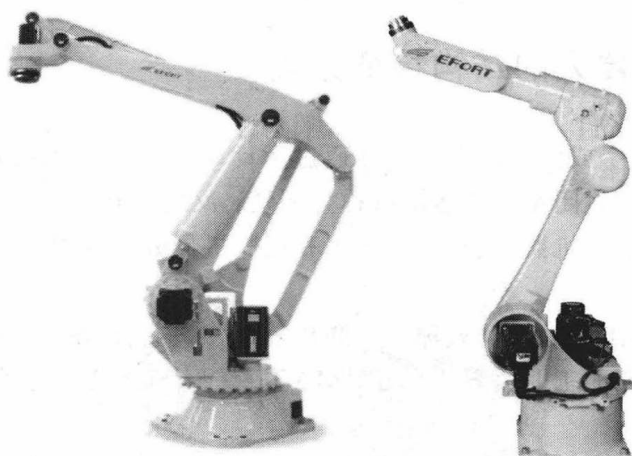


图 1-6 中型工业机器人

### 5. 超小型机器人

超小型机器人的负载能力为 1kg 以下,最大工作范围为 1m 左右,包括洁净环境机器人、精密操作机器人(图 1-8),一般具有较高的运动速度和精度。

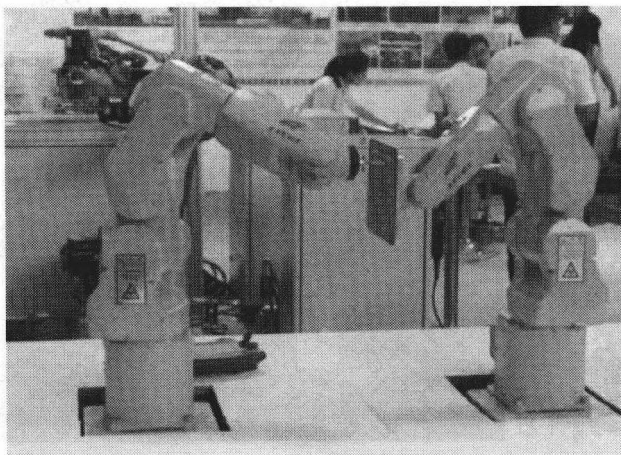


图 1-7 小型工业机器人

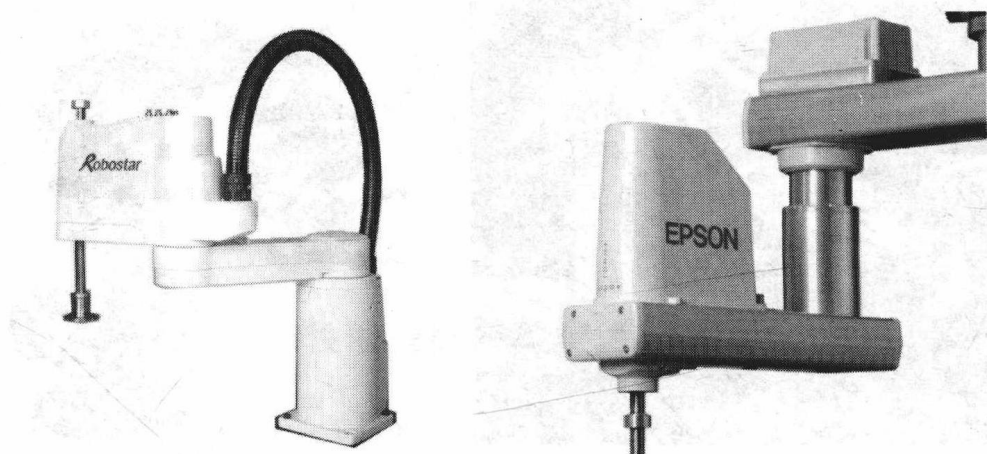


图 1-8 SCARA 装配机器人

### 1.2.3 按机器人的结构特征分类

在机械结构上,两个或两个以上的构件通过运动副而组成的系统称为运动链。组成运动链的各构件构成首末封闭系统的运动链称为闭链;反之为开链。工业机器人按结构特征是否开、闭链,可分为串联机器人、并联机器人和混联机器人 3 种类型。

#### 1. 串联机器人

顾名思义,由开链组成的机器人称为串联机器人。其特点是一个轴的运动改变另一个轴的坐标原点。早期的工业机器人如 PUMA 机器人、SCARA 机器人都是串联机器人,其结构如图 1-9 所示。

目前国内外机器人公司的主流产品均为串联关节型机器人。机器人的运动由大、小臂的俯仰及腰座的回转构成,其结构紧凑,灵活性大,能与其他机器人协调工作。

#### 2. 并联机器人

并联机器人是一种动平台和定平台通过至少两个独立的运动链相连接,机构具有两个或两个以上自由度,且以并联方式驱动的一种闭环机构(图 1-10)。并联机器人结构紧凑,

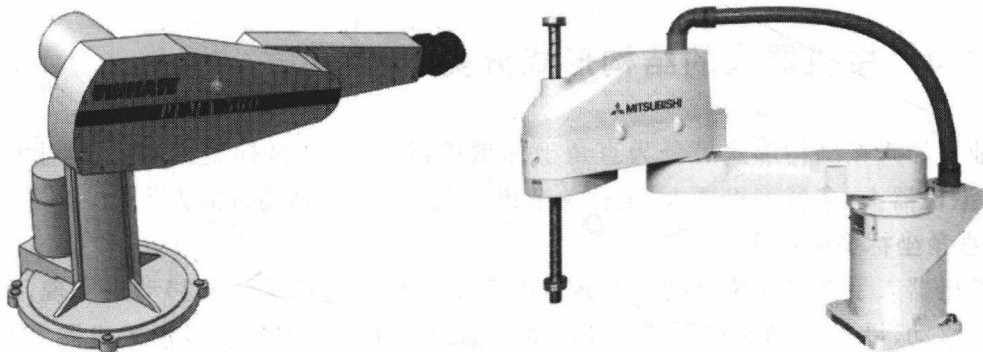


图 1-9 串联机器人

具有精度高、速度高、动态响应好、刚度高、承载能力大和工作空间较小的特点。并联机器人结构较为复杂,这正好同串联机器人形成互补,从而扩大了工业机器人的选择和应用范围。

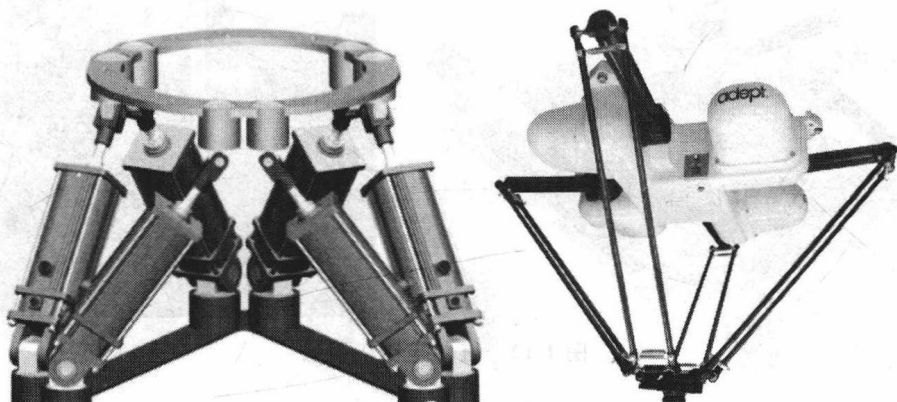


图 1-10 并联机器人

根据这些特点,并联机器人主要应用于需要高刚度、高精度或者大载荷而无须很大工作空间的领域,包括运动模拟器、潜艇救援、装配生产线、并联力传感器、动感娱乐平台、空间飞行器的对接装置、天文望远镜的姿态控制器等。

### 3. 混联机器人

开链中含有闭链的机器人称为串并联机器人,或混联机器人。TRICEPT 机械手模块则是一种典型的混联机器人,它结合了串联型与并联型两者的特点。其结构如图 1-11 所示。

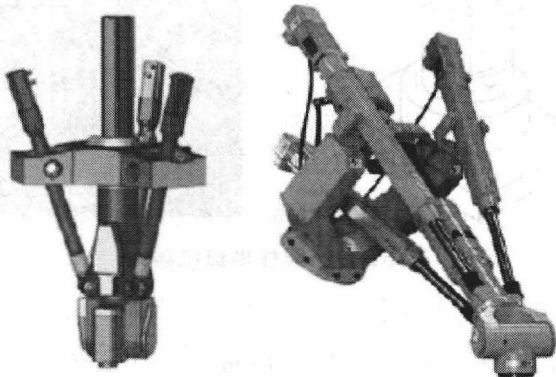


图 1-11 混联工业机器人