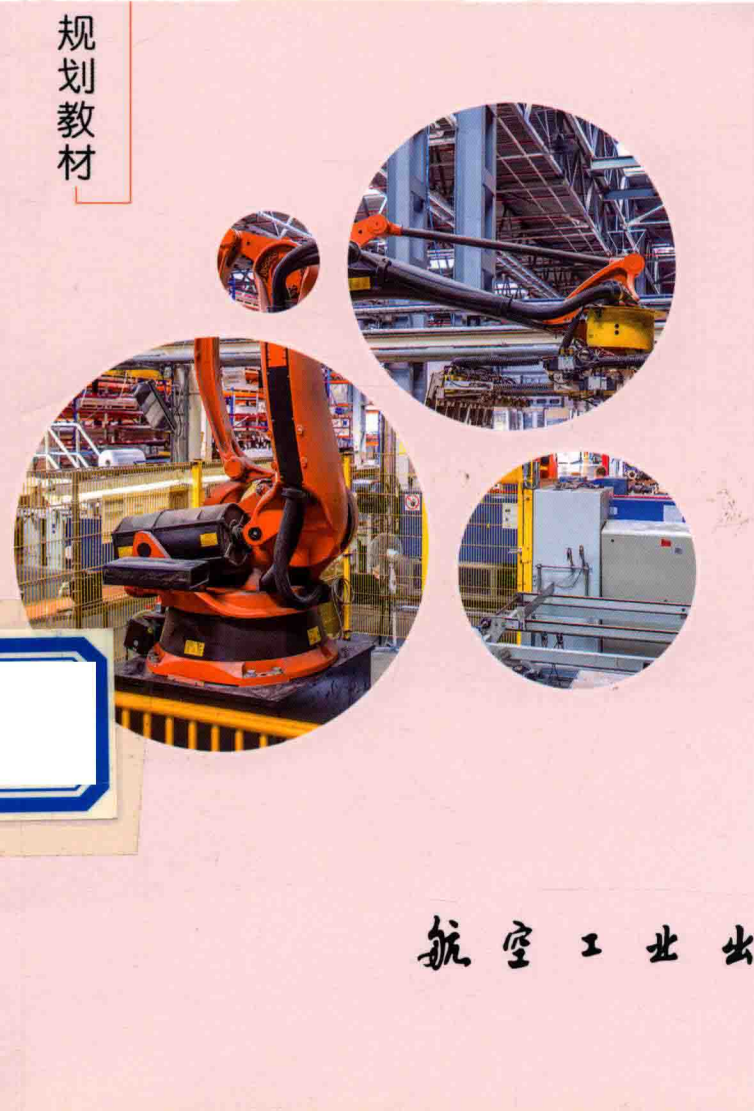
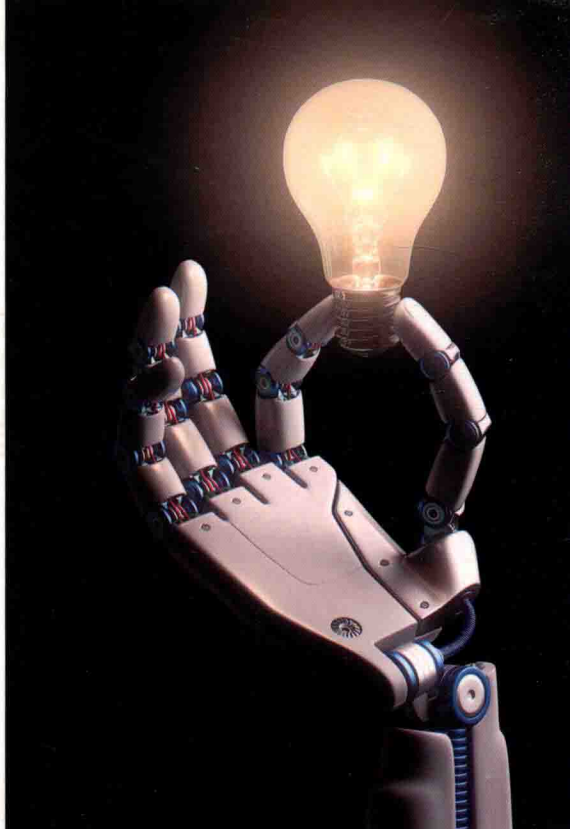




『互联网+』立体化教材
工业机器人技术专业『十三五』

规划教材



〔含微课〕

GONGYE JIQIREN JISHU JICHU

工业机器人 技术基础

主编 甘宏波 黄玲芝

航空工业出版社

工业机器人技术专业“十三五”规划教材

“互联网+”立体化教材

工业机器人技术基础

主编 甘宏波 黄玲芝

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书根据教育部最新的高等职业教育教学改革要求及工业机器人产业岗位需要,由职业院校骨干教师联合企业技术人员共同编写。全书分为6章,主要内容包括工业机器人概述、工业机器人运动学基础、工业机器人机械部分、工业机器人传感器、工业机器人控制系统、工业机器人编程技术。

本书可作为职业院校工业机器人技术专业及装备制造相关专业的教材,也可作为有关工程技术人员的参考资料和培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人技术基础 / 甘宏波, 黄玲芝主编. — 北京: 航空工业出版社, 2019.2
ISBN 978-7-5165-1853-3

I. ①工… II. ①甘… ②黄… III. ①工业机器人—
高等教育—教材 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第029608号

工业机器人技术基础 Gongye Jiqiren Jishu Jichu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

三河市祥达印刷包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2019年2月第1版

2019年2月第1次印刷

开本: 787×1092

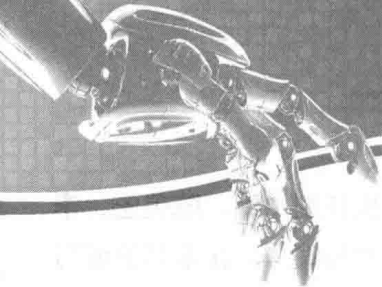
1/16

印张: 10.5

字数: 243千字

印数: 1—3000

定价: 38.00元



前言

preface

工业机器人作为先进制造业中的重要装备，其技术已成为衡量一个国家制造业水平和科技水平的重要标志。目前，我国正处于加快转型升级的重要时期，发展以工业机器人为主体的机器人产业，正是破解我国产业成本上升及环境制约问题的重要途径。

中国工业机器人市场近年来持续表现强劲，市场容量不断扩大。产业的发展亟需大量高素质、技能型专门人才，人才短缺已经成为产业发展的瓶颈。为使同学们尽快了解和掌握工业机器人技术的基础知识，为后续专业课学习打下坚实的基础，我们编写了本书。

本书具有以下几个方面的特点。

1. 校企合作，工学结合

编写本书的过程中，我们在总结长期的教学经验和工程实践的基础上，联合相关企业人员，将理论知识和岗位要求有机融合，使内容贴近企业实际需要。

2. 内容合理，详略得当

本书在教学内容组织上，以工业机器人的基本知识为主，并充分考虑到学生的认知规律，由简入难，循序渐进。另外，本书在编写过程中，弱化了对数学能力的要求，重点介绍了工业机器人的基本结构、控制及编程方法等，为后续专业课打下坚实的基础。

3. 知识新颖，技术先进

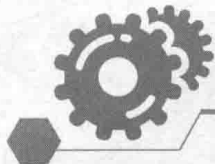
工业机器人综合了电子、机械、传感器等诸多技术，而且这些技术的更新较快。因此，本书介绍的相关载体、实例均为国内外知名品牌的最新内容，使学生真正学到当前最先进的工业机器人相关知识。

4. 图文并茂，体例丰富

为便于学生理解，本书安插了大量的结构图与实物图。同时，书中设有“头脑风暴”“视野”“机器人资讯”“知识角”“注意”等小模块，可以增进师生之间的课堂交流，丰富学生对工业机器人的认知，便于学生对知识点的理解，增强学生的学习兴趣。本书每个章节最后都配有“思维导图”“学以致用”“学习效果综合测试”，方便学生总结重点，巩固所学知识，培养学生解决问题的能力。

5. 辅以微课，轻松学习

本书配有大量微课，学生可扫描二维码观看视频，更加直观地掌握书中知识，令学习更加轻松灵活，视野更加开阔。



本书由甘宏波、黄玲芝担任主编，黄永明、黄红艳、莫宗文担任副主编，陈美宏、李莹、蒋星杰、覃振豪、李晶、胡光良、马增敏、胡召阳、陈宇超参与编写。在本书的编写过程中，我们参考了大量的文献资料，在此向这些资料的作者表示衷心的感谢！由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

另外，本书配有丰富的教学资源包，读者可登录北京金企鹅联合出版中心网站（www.bjjqe.com）下载。

编者
2019年1月

本书编委会

主 编：甘宏波 黄玲芝

副主编：黄永明 黄红艳 莫宗文

参 编：陈美宏 李 莹 蒋星杰

覃振豪 李 晶 胡光良

马增敏 胡召阳 陈宇超

目 录

contents

第 1 章 工业机器人概述

1.1 工业机器人的基础知识	2
1.1.1 工业机器人的定义及特点	2
1.1.2 工业机器人的历史与发展趋势	3
1.1.3 工业机器人的分类	6
1.2 工业机器人的基本组成与技术参数	10
1.2.1 工业机器人的基本组成	10
1.2.2 工业机器人的技术参数	13
1.3 工业机器人的典型应用	17
1.3.1 焊接机器人	17
1.3.2 装配机器人	17
1.3.3 喷涂机器人	18
1.3.4 搬运机器人	18
学以致用——辨识工业机器人及其应用	20
思维导图	21
学习效果综合测试	22

第 2 章 工业机器人运动学基础

2.1 工业机器人数学基础	24
2.1.1 矩阵概述	24
2.1.2 矩阵的运算	26
2.2 坐标系及其关系描述	28
2.2.1 坐标系的分类	28
2.2.2 向量与坐标表示	30
2.2.3 坐标系关系描述	32
2.2.4 刚体的表示方法	34



2.3 坐标变换..... 35

 2.3.1 平移坐标变换..... 35

 2.3.2 旋转坐标变换..... 37

 2.3.3 复合坐标变换..... 39

2.4 工业机器人运动学..... 41

 2.4.1 工业机器人 D-H 表示法..... 41

 2.4.2 工业机器人运动学计算..... 43

学以致用——坐标变换的应用..... 47

思维导图..... 48

学习效果综合测试..... 49

第 3 章 工业机器人机械部分

3.1 末端执行器..... 52

 3.1.1 末端执行器概述..... 52

 3.1.2 夹持式末端执行器..... 53

 3.1.3 吸附式末端执行器..... 56

 3.1.4 专用工具..... 58

3.2 腕部..... 59

 3.2.1 腕部概述..... 59

 3.2.2 常见工业机器人腕部的工作原理..... 60

3.3 臂部..... 64

 3.3.1 臂部概述..... 64

 3.3.2 臂部的配置形式..... 64

 3.3.3 臂部结构的设计..... 66

3.4 机座与行走机构..... 67

 3.4.1 移动式机座与行走机构概述..... 67

 3.4.2 履带式行走机构..... 68

 3.4.3 轮式行走机构..... 70

 3.4.4 足式行走机构..... 71

3.5 驱动器..... 73

 3.5.1 驱动器概述..... 73

 3.5.2 电动驱动..... 74

 3.5.3 液压驱动..... 80

 3.5.4 气动驱动..... 82



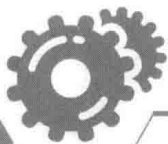
3.6 传动机构	83
3.6.1 谐波减速器	84
3.6.2 RV 减速器	86
学以致用——辨识工业机器人末端执行器	88
思维导图	89
学习效果综合测试	90

第 4 章 工业机器人传感器

4.1 工业机器人传感器概述	94
4.1.1 工业机器人传感器的类型	94
4.1.2 传感器的性能指标	95
4.1.3 工业机器人对传感器的一般要求	98
4.2 工业机器人内部传感器	98
4.2.1 位移传感器	99
4.2.2 速度传感器	104
4.2.3 力觉传感器	106
4.3 工业机器人外部传感器	107
4.3.1 接触觉传感器	107
4.3.2 滑觉传感器	110
4.3.3 接近觉传感器	111
4.3.4 视觉传感器	114
学以致用——辨识传感器	117
思维导图	118
学习效果综合测试	119

第 5 章 工业机器人控制系统

5.1 工业机器人控制系统概述	122
5.1.1 工业机器人控制系统的功能	122
5.1.2 工业机器人控制系统的特点	123
5.1.3 工业机器人控制系统的组成	124
5.1.4 工业机器人控制系统的结构	125
5.1.5 工业机器人控制柜与示教器	127
5.2 工业机器人的控制方式	129
5.2.1 运动控制	129



5.2.2 力控制 130

学以致用——利用示教器手动操纵工业机器人 132

思维导图 134

学习效果综合测试 135

第 6 章 工业机器人编程技术

6.1 工业机器人编程方式 138

 6.1.1 在线编程 138

 6.1.2 离线编程 139

6.2 工业机器人编程语言概述 141

 6.2.1 工业机器人的编程要求 141

 6.2.2 机器人编程语言的特征与特性 143

 6.2.3 机器人编程语言的基本功能 144

 6.2.4 机器人编程语言的发展 146

6.3 机器人编程语言简介 148

 6.3.1 AL 语言 148

 6.3.2 Autopass 语言 149

 6.3.3 VAL 语言 150

 6.3.4 RAPT 语言 151

 6.3.5 IML 语言 151

 6.3.6 RAPID 语言 152

学以致用——辨识工业机器人所用编程语言 153

思维导图 154

学习效果综合测试 155

参考文献 156

第 1 章

Paragraph 1

工业机器人概述

某家具公司成立于 2008 年，其位于广州的工厂在 2017 年的生产率比原有的工作平台提高了 317%，雇用的员工减少了 26.7%。到目前为止，工厂一天能够处理约 5 000 个订单，产能达到每天 15 万件，年产值约 40 亿元。这家家具公司的产值如此之大，其中的秘密是什么呢？

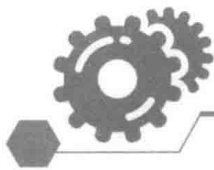
原来，此家具公司的生产线安装有大量的工业机器人。在过去，公司生产柜子、床等家具的钻孔、喷涂环节，是非常危险且影响员工健康的工作。现在，只要通过机器人将原材料运至工厂，生产环节由机器人完成，再将制成品装入准备出口的集装箱，在拥有少量员工的情况下就可以将生产率提升好几倍。

工业机器人如此高效，下面就让我们一起来学习工业机器人是如何帮助人们工作的！



学习目标

- ❖ 掌握工业机器人的定义及特点。
- ❖ 了解工业机器人的历史与发展。
- ❖ 掌握在不同分类方式下，工业机器人的结构与特征。
- ❖ 掌握工业机器人的基本组成及技术参数。
- ❖ 了解工业机器人的典型应用。



1.1

工业机器人的基础知识

我们常在电影、动画中见到机器人，有终结者、阿拉蕾、阿童木等人形机器人，也有那么一些与人类外貌迥异的机器人，如哆啦 A 梦、WALL·E 等。那工业机器人的样子你见过吗？工业机器人与我们平常熟知的机器人相比，有什么特殊的地方？它们又是被谁发明出来的呢？

1.1.1 工业机器人的定义及特点

“工业机器人”一词由《美国金属市场报》于 1960 年提出，经美国机器人协会定义为：“用来进行搬运机械部件或工件的、可程序的多功能操作器，或通过改变程序可以完成各种工作的特殊机械装置。”目前，这一定义已被国际标准化组织所采纳。

工业机器人有以下几个特点。

1. 可编程

生产自动化的进一步发展是柔性自动化。工业机器人可随其工作环境变化的需要而再编程。因此，它在小批量、多品种、均衡、高效的柔性制造过程中能发挥很好的作用，是柔性制造系统中的一个重要组成部分。

2. 拟人化

工业机器人在机械结构上有类似人的大臂、小臂、手腕、手爪等部分。通过类似于人类大脑的电脑来控制其运动。此外，智能化工业机器人还有许多“生物传感器”，如皮肤型接触传感器、力传感器、负载传感器、视觉传感器、听觉传感器等，这些传感器提高了工业机器人对周围环境的自适应能力。



3. 通用性

除了专门设计的专用工业机器人外，一般工业机器人在执行不同的作业任务时具有较好的通用性，只需更换其末端执行器（手爪、工具等）便可。

4. 涉及学科广泛

工业机器人技术实质上是机械学和微电子学的结合——机电一体化技术。

目前，智能机器人不仅具有获取外部环境信息的各种传感器，而且还具有记忆能力、



语言理解能力、图像识别能力、推理判断能力等人工智能，这些都是微电子技术的应用，特别是与计算机技术的应用密切相关。因此，机器人技术的发展必将带动其他技术的发展，机器人技术的发展和水平也可以验证一个国家科学技术和工业技术的发展水平。

1.1.2 工业机器人的历史与发展趋势

1. 工业机器人的历史

大千世界，万事万物都遵循着从无到有、从低到高的发展规律，工业机器人也不例外。总的来讲，工业机器人的历史可以分为以下几个阶段。

1) 萌芽阶段（20世纪40—50年代）

1954年，美国发明家德沃尔对工业机器人的概念进行了定义，并申请了专利。该专利的要点在于借助伺服技术来控制机器人的各个关节，同时可以利用人手完成对机器人动作的示教，实现机器人动作的记录和再现。

1959年，德沃尔与美国发明家约瑟夫·英格伯格联手制造出世界第一台工业机器人 Unimate（见图1-1），使工业机器人的历史真正拉开了帷幕。

2) 初级阶段（20世纪60—70年代）

1961年，德沃尔的 Unimation 公司为通用汽车生产线安装了第一台用于生产的工业机器人，它主要用于生产门窗把手、换挡旋钮、灯具和其他汽车内饰用五金件。

20世纪60—70年代，欧洲和日本正面临着严重的劳动力短缺问题，此时在美国诞生并已投入生产的工业机器人给其带来了福音。

1967年，Unimate 机器人被引入欧洲。1969年，Unimation 公司与川崎重工签署了一项许可协议，为亚洲市场生产和销售 Unimate 机器人。

1978年，日本山梨大学牧野洋发明 SCARA 机器人（见图1-2），该机器人具有四个轴和四个运动自由度，特别适合于装配工作，如今被广泛应用于汽车工业、电子产品工业、药品工业和食品工业等领域。



SCARA 机器人

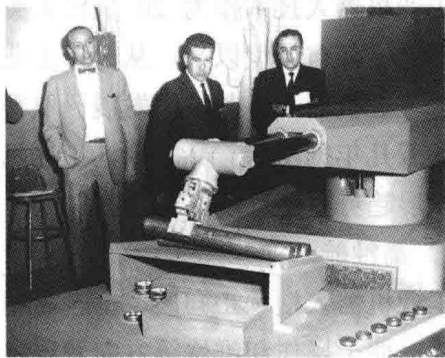


图 1-1 Unimate 机器人

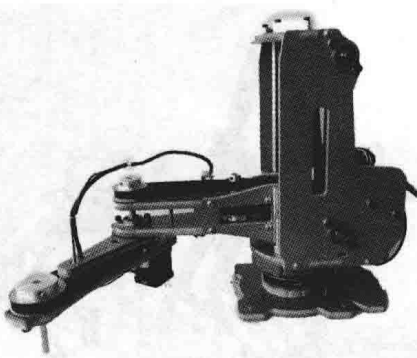


图 1-2 SCARA 机器人



3) 迅速发展阶段 (20 世纪 80—90 年代)

随着电子技术、传感器技术和计算机技术的迅速发展,工业机器人开始具备感知、反馈能力,并逐渐在工业生产中得到应用。与此同时,工业机器人控制系统的发展也开始了质的飞跃。

1981 年,通用汽车公司第一次将 CONSIGHT 机器视觉系统成功地应用在了一个恶劣的制造环境中,利用三台工业机器人以每小时 1 400 个的速度分拣出六种不同的铸件。

1992 年,瑞士 ABB 公司推出开放式控制系统——S4。S4 旨在改善对用户至关重要的两个领域——人机界面和机器人的技术性能。

1994 年, Motoman 公司(即现在的安川电机)推出的机器人控制系统 MRC,使同步控制两台机器人成为可能。MRC 可以从普通 PC 编辑工业机器人作业,且具有控制多达 21 个轴的能力。

4) 智能化阶段 (21 世纪初至今)

进入千禧年后,随着大数据与人工智能在技术上的发展进步,众多机器人制造企业开始着手研制新的具有逻辑思维、决策能力及自主学习能力的智能工业机器人。

2011 年,日本发那科公司的 R-1000iA 机器人利用 LVC(学习减振装置)对机器人运动轨迹加以优化,减小了振动,将动作周期缩短约 20%,从而实现更高速的动作。

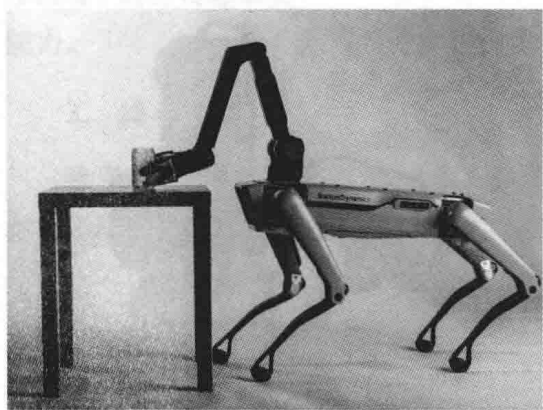
2018 年,发那科公司与首选网络公司合作,首次将人工智能应用于其伺服调谐、工业机器人拾取和热位移补偿等功能上。



机器人资讯

ABB 公司将在上海建设其全球最先进的机器人工厂,该工厂预计将于 2020 年底投入运营。新的上海工厂将采用大量机器学习、数字化和协作解决方案,使其成为机器人行业中最先进、自动化与柔性化程度最高的工厂,实现用机器人制造机器人。此外,新的研发中心还将帮助加快人工智能领域的发展。

2. 工业机器人的发展趋势



工业机器人技术作为 20 世纪人类最伟大的发明之一,自问世以来,从简单工业机器人到智能工业机器人,其技术发展已取得长足进步。从近几年推出的产品来看,工业机器人技术的发展趋势主要有以下几点。

1) 高性能

工业机器人技术正向高速度、高精度、高可靠性、便于操作和维修等方向发展,且单机价格不断下降。



2) 机械结构向模块化、可重构化发展

目前,工业机器人关节模块中的伺服电动机、减速机、检测系统已实现三位一体化。关节模块、连杆模块可通过重组方式构造机器人整机。国外已有模块化装配的工业机器人产品问世。

3) 本体结构更新加快

随着技术的进步,工业机器人本体结构近10年来发展变化很快。以安川MOTOMAN机器人产品为例,早期L系列机器人的产品生命周期为10年,随后的K系列机器人为5年,到了SK系列机器人则只有3年。

4) 控制技术的开放化、PC化和网络化

控制系统向基于PC的开放型控制器方向发展,便于标准化、网络化,提高了器件集成度,并可缩小控制柜体积。

5) 多传感器融合技术的实用化

工业机器人传感器的作用日益重要,除了安装传统的位置、速度、加速度传感器以外,装配、焊接机器人还应用了视觉、力觉等传感器,而遥控机器人则采用视觉、声觉、力觉、触觉等多传感器的融合技术来进行环境建模及决策控制。多传感器融合配置技术在产品化系统中已有成熟的应用。

6) 多智能体协调控制技术

多智能体协调控制技术是目前工业机器人研究的一个崭新领域。它主要针对多机器人协作与通信、多智能体的群体体系结构、相互间的通信与磋商机理、感知与学习方法、建模和规划、群体行为控制等方面进行研究。



视 野

如图1-3所示为国内外知名工业机器人制造公司,其中,瑞士的ABB、德国的库卡、日本的发那科和安川电机最为著名,并称工业机器人四大家族。工业机器人四大家族在亚洲市场同样也是举足轻重,更占据中国机器人产业70%以上的市场份额,几乎垄断了机器人制造、焊接等高阶领域。

(a) ABB (瑞士)



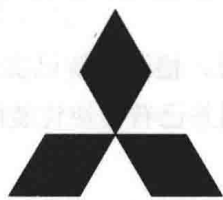
COMAU

(b) 柯马 (意大利)

(c) 库卡 (德国)

(d) 发那科 (日本)

(e) 安川 (日本)



(f) 三菱 (日本)



(g) 沈阳新松 (中国)

图 1-3 国内外知名工业机器人制造公司

1.1.3 工业机器人的分类

工业机器人的分类方式有很多,可以按机械结构、操作机坐标形式和控制方式等进行分类,具体如下。

1. 按机械结构分类

工业机器人按机械结构的不同,可分为串联机器人和并联机器人。串联机器人的特点是一个轴的运动改变另一个轴的坐标原点,其外形如图 1-4 所示。并联机器人所采用的并联机构,其一个轴运动不会改变另一个轴的坐标原点,其外形如图 1-5 所示。

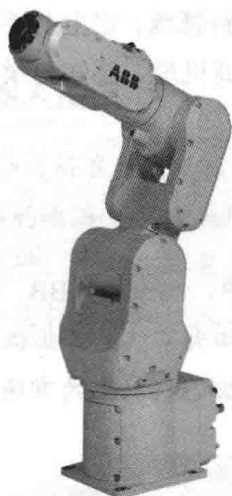


图 1-4 串联机器人

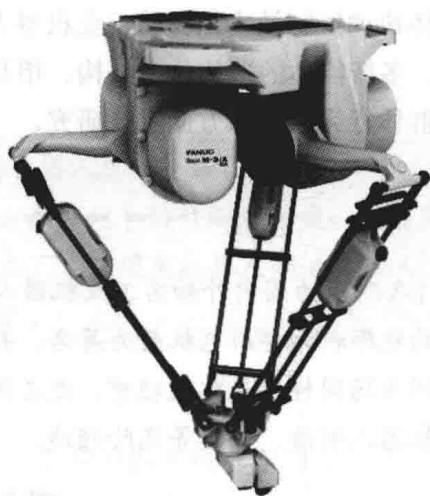


图 1-5 并联机器人

1) 串联机器人

串联机器人的自由度比并联机器人多,通过计算机控制系统的控制,可实现复杂的空间作业运动。串联机器人结构简单、易于控制、成本低、运动空间大,是当前采用最多的工业机器人。



2) 并联机器人

并联机器人具有刚度大、结构稳定、运动负荷小等特点。在位置求解上,串联结构正解容易,但反解十分困难;而并联结构正解困难,反解却十分容易。并联机器人非常适合高速度、高精度或高负荷的场合。



并联机器人



机器人资讯

将串联机器人和并联机器人有机结合起来的工业机器人,称为混联机器人。混联机器人既有并联机器人刚度好的优点,又有串联机器人工作范围大的优点,进一步扩大了机器人的应用范围。

2. 按操作机坐标形式分类

工业机器人按操作机坐标形式的不同,可分为直角坐标机器人、圆柱坐标机器人、球坐标机器人和多关节机器人等。

1) 直角坐标机器人

直角坐标机器人是指在工业应用中,能够实现自动控制的、可重复编程的、空间上具有相互垂直关系的三个独立自由度的多用途机器人,其外形及运动空间如图 1-6 所示。

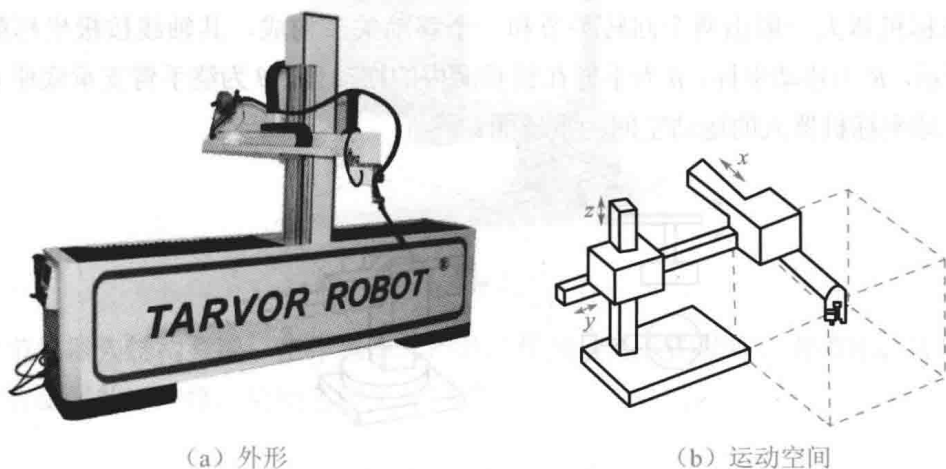


图 1-6 直角坐标机器人

直角坐标机器人控制简单,空间轨迹易于求解,但是其灵活性较差,自身占据空间较大。目前,直角坐标机器人普遍用于各种自动化生产线中,可以完成诸如搬运、上下料、包装、码垛、分类、装配、焊接、喷涂等一系列工作。

2) 圆柱坐标机器人

圆柱坐标机器人是指能够形成圆柱坐标系的机器人,它主要由一个旋转机座形成的转动关节和水平、垂直移动的两个移动关节构成,其外形及运动空间如图 1-7 所示。