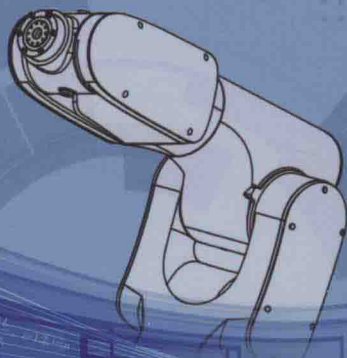


工业机器人技术专业“十三五”规划教材

工业机器人应用人才培养指定用书

# 工业机器人 基础与应用

张明文 主编 ◆



$${}^0T_j = \begin{bmatrix} c\theta_j & -s\theta_j & 0 & a_{j-1} \\ s\theta_j c\alpha_{j-1} & c\theta_j c\alpha_{j-1} & -s\alpha_{j-1} & -d_j s\alpha_{j-1} \\ s\theta_j s\alpha_{j-1} & c\theta_j s\alpha_{j-1} & c\alpha_{j-1} & d_j c\alpha_{j-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 \cdots {}^{n-1}T_n = A_1 A_2 \cdots A_n$$

$$f_j(q) = \frac{\partial x_j(q)}{\partial q_j}, j=1,2,\dots,6; j=1,2,\dots,n$$



<http://www.irobot-edu.com>

教学视频·电子教案·技术交流论坛



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

工业机器人技术专业“十三五”规划教材

# 工业机器人基础与应用

主 编 张明文  
副主编 王 伟 顾三鸿  
参 编 王璐欢 李晓聪 吴冠伟  
主 审 于振中 霁学会



机械工业出版社

本书主要介绍了工业机器人技术的基本知识,结合国内外主流品牌机器人,介绍了工业机器人的定义、特点、发展、分类及应用情况,全面分析了工业机器人的技术参数、基本组成、运动原理和控制系统。本书以ABB和FANUC机器人为例,系统介绍了工业机器人的基本示教操作和实际应用。通过对本书的学习,能够使读者对工业机器人技术和实操应用有一个全面清晰的认识。

本书可作为高校机电一体化、电气自动化及机器人技术等相关专业的教材,也可作为工业机器人培训机构的培训教材,并可供从事相关行业的技术人员参考使用。

本书配有丰富的教学资源,便于开展教学和自学活动。凡使用本书作为教材的教师可咨询相关机器人实训设备,也可通过书末“教学课件下载步骤”下载相关数字教学资源。咨询邮箱:edubot\_zhang@126.com。

## 图书在版编目(CIP)数据

工业机器人基础与应用/张明文主编. —北京:机械工业出版社, 2018.6

工业机器人技术专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-60142-5

I. ①工… II. ①张… 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(2018)第122264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:赵磊磊 责任编辑:赵磊磊

责任校对:张薇 封面设计:张静

责任印制:张博

北京华创印务有限公司印刷

2018年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13.5印张·324千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-60142-5

定价:49.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

## 编审委员会

名誉主任：蔡鹤皋

主任：韩杰才 李瑞峰 付宜利

副主任：于振中 张明文

委员：（按姓氏首字母排序）

包春红	陈健健	陈霞	封佳诚	高春能
高文婷	何定阳	顾三鸿	赫英强	李晓聪
刘馨芳	卢昊	宁金	齐建家	邵文涛
滕武	王璐欢	王伟	王伟夏	王欣
吴冠伟	吴洪涛	吴战国	霰学会	杨润贤
姚立波	尹政	喻杰	袁静云	张广才

# 序 一

## PREFACE

现阶段，我国制造业面临资源短缺、劳动成本上升、人口红利减少等压力，而工业机器人的应用与推广将提高生产效率和产品质量，降低生产成本和资源消耗，有效提高我国工业制造的竞争力。我国《机器人产业发展规划（2016—2020年）》强调，机器人是先进制造业的关键支撑装备和未来生活方式的重要切入点。广泛采用工业机器人，对促进我国先进制造业的崛起，有着十分重要的意义。“机器换人，人用机器”的新型制造方式有效推进了工业升级和转型。

工业机器人作为集众多先进技术于一体的现代制造业装备，自诞生至今已经取得了长足进步。当前，新科技革命和产业变革正在兴起，全球工业竞争格局面临重塑。世界各国紧抓历史机遇，纷纷出台了一系列国家战略：美国的“再工业化”战略、德国“工业4.0”计划、欧盟“2020增长战略”，以及我国推出的“中国制造2025”战略。这些国家都以先进制造业为重点战略，并将机器人作为智能制造的核心发展方向。伴随机器人技术的快速发展，工业机器人已成为柔性制造系统（FMS）、自动化工厂（FA）、计算机集成制造系统（CIMS）等先进制造业的关键支撑装备。

随着工业化和信息化的快速推进，我国工业机器人市场进入高速发展时期。IFR统计显示，截至2016年，中国已成为全球最大的工业机器人市场。未来几年，中国工业机器人市场仍将保持高速增长态势。然而，现阶段我国机器人技术人才匮乏，与巨大的市场需求严重不协调。《中国制造2025》强调要健全、完善中国制造业人才培养体系，为推动中国制造业从大国向强国转变提供人才保障。从国家战略层面而言，推进智能制造的产业化发展，工业机器人技术人才的培养首当其冲。

目前，结合《中国制造2025》的全面实施和国家职业教育改革，许多应用型本科、职业院校和技工院校纷纷开设工业机器人相关专业，但作为一门专业知识面很广的实用型学科，普遍存在师资力量缺乏、配套教材资源不完善、工业机器人实训装备不系统、技能考核体系不完善等问题，导致无法培养出企业需要的专业机器人技术人才，严重制约了我国的机器人技术推广和智能制造业的发展。江苏哈工海渡工业机器人有限公司依托哈尔滨工业大学在机器人方向的研究实力，顺应形势需要，产、学、研、用相结合，组织企业专家和一线科研人员开展了一系列企业调研，面向企业需求，联合高校教师共同编写了“工业机器人技术专业‘十三五’规划教材”系列丛书。

该系列丛书具有以下特点：

(1) 循序渐进，系统性强。该系列丛书从工业机器人的初级应用、技术基础、实训指导，到工业机器人的编程与高级应用，由浅入深，有助于系统学习工业机器人技术。

(2) 配套资源，丰富多样。该系列丛书配有相应的电子课件、视频等教学资源，与配套

的工业机器人教学设备一起，构建了一体化的工业机器人教学体系。

(3) 通俗易懂，实用性强。该系列丛书言简意赅，图文并茂，既可用于应用型本科、职业院校和技工院校的工业机器人应用型人才培养，也可供从事工业机器人操作、编程、运行、维护与管理等工作的技术人员参考学习。

(4) 覆盖面广，应用广泛。该系列丛书介绍了国内外主流品牌机器人的编程、应用等相关内容，顺应国内机器人产业人才发展需要，符合制造业人才发展规划。

“工业机器人技术专业‘十三五’规划教材”系列丛书结合实际应用，教、学、用有机结合，有助于读者系统学习工业机器人技术和强化提高实践能力。本系列丛书的出版发行，必将提高我国工业机器人专业的教学效果，全面促进“中国制造2025”国家战略下我国工业机器人技术人才的培养和发展，大力推进我国智能制造产业变革。

中国工程院院士



2018年4月于哈尔滨工业大学

# 序 二

## PREFACE

自机器人出现至今的短短几十年中，机器人技术的发展取得长足进步。伴随产业变革的兴起和全球工业竞争格局的全面重塑，机器人产业发展越来越受到世界各国的高度关注，主要经济体纷纷将发展机器人产业上升为国家战略，提出“以先进制造业为重点战略，以‘机器人’为核心发展方向”，并将此作为保持和重获制造业竞争优势的重要手段。

作为人类利用机械进行社会生产史上的一个重要里程碑，工业机器人是目前技术发展最成熟且应用最广泛的一类机器人。工业机器人现已被广泛应用于汽车及零部件制造，电子、机械加工、模具生产等行业以实现自动化生产线，参与焊接、装配、搬运、打磨、抛光、注塑等生产制造过程。工业机器人的应用既保证了产品质量，又提高了生产效率，避免了大量工伤事故，有效推动了企业和社会生产力发展。作为先进制造业的关键支撑装备，工业机器人影响着人类生活和经济发展的方方面面，成为衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志。

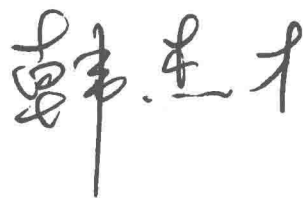
伴随着工业大国相继提出机器人产业政策，如德国“工业4.0”、美国先进制造伙伴计划、我国推出的中国制造2025等，工业机器人产业迎来了快速发展态势。当前，随着劳动力成本上涨，人口红利逐渐消失，生产方式向柔性、智能、精细转变，中国制造业转型升级迫在眉睫。全球新一轮科技革命和产业变革与中国制造业转型升级形成历史性交汇，中国已经成为全球最大的机器人市场。大力发展工业机器人产业，对于打造我国制造业新优势，推动工业转型升级，加快制造强国建设，改善人民生活水平具有深远意义。

我国工业机器人产业迎来了爆发性的发展机遇。然而，现阶段我国工业机器人领域人才储备数量与质量严重不足，对企业而言，从工业机器人的基础操作维护人员到高端技术人才普遍存在巨大缺口，缺乏经过系统培训的、能熟练安全应用工业机器人的专业人才。现代工业立国的基础，需要有与时俱进的职业教育和人才培养配套资源。

“工业机器人技术专业‘十三五’规划教材”系列丛书由江苏哈工海渡工业机器人有限公司联合众多高校和企业共同编写。该系列丛书依托哈尔滨工业大学的先进机器人研究技术，综合企业实际用人需求，充分贯彻了现代应用型人才培养“淡化理论，技能培养，重在运用”的指导思想。该系列丛书可供工业机器人技术或机器人工程专业师生使用，也可供机电一体化、自动化专业开设工业机器人相关课程的学校使用。整套丛书涵盖了ABB、KUKA、YASKAWA、FANUC等国际主流品牌和国内主要品牌机器人的初级应用、实训指导、技术基础、高级编程等知识，注重循序渐进与系统学习，强化学生的工业机器人专业技术能力和实践操作能力。

立足工业，面向教育，该系列丛书的出版，有助于推进我国工业机器人技术人才的培养和发展，助力中国智能制造。

中国科学院院士

Handwritten signature of Han Jiecai in black ink.

2018年4月



# 前言

## PREFACE

机器人是先进制造业的重要支撑装备，也是智能制造业的关键切入点。工业机器人作为机器人家族中的重要一员，是目前技术最成熟、应用最广泛的一类机器人。工业机器人的研发和产业化应用是衡量科技创新和高端制造发展水平的重要标志。发达国家已经把工业机器人产业发展作为抢占制造业市场、提升竞争力的重要途径。汽车、电子电器、工程机械等众多行业大量使用工业机器人组成自动化生产线，在保证产品质量的同时，改善了工作环境，提高了社会生产率，有力推动了企业和社会生产力发展。

当前，随着我国劳动力成本上涨，人口红利逐渐消失，生产方式向柔性、智能、精细转变，构建新型智能制造体系迫在眉睫，对工业机器人的需求呈现大幅增长。大力发展工业机器人产业，对于打造我国制造业新优势，推动工业转型升级，加快制造强国建设，改善人民生活水平具有深远意义。《中国制造 2025》将机器人作为重点发展领域，机器人产业已经上升到国家战略层面。

在全球范围内的制造产业战略转型期，我国工业机器人产业迎来爆发性的发展机遇。然而，现阶段我国工业机器人领域人才供需失衡，缺乏经系统培训的、能熟练安全使用和维护工业机器人的专业人才。国务院《关于推行终身职业技能培训制度的意见》指出：职业教育要适应产业转型升级需要，着力加强高技能人才培养；全面提升职业技能培训基础能力，加强职业技能培训教学资源建设和基础平台建设。针对这一现状，为了更好地推广工业机器人技术的运用，亟须编写一本系统全面的工业机器人入门实用教材。

本书以 ABB 和 FANUC 机器人为主，结合工业机器人仿真系统和江苏哈工海渡工业机器人有限公司的工业机器人技能考核实训装备，遵循“由简入繁，软硬结合，循序渐进”的编写原则，依据初学者的学习需要，科学设置知识点，结合典型实例讲解，倡导实用性教学，有助于激发学习兴趣，提高教学效率，便于初学者在短时间内全面、系统了解工业机器人操作与编程的常识。

本书图文并茂，通俗易懂，实用性强，既可以作为普通高等院校、职业院校机电一体化、电气自动化及机器人等相关专业的教学和实训教材以及工业机器人培训教材，也可以作为 ABB 和 FANUC 机器人入门的培训教程，供相关行业的技术人员参考。

机器人技术具有知识面广、实操性强等显著特点。为了提高教学效果，在教学方法上，建议采用启发式教学，开放性学习，重视实操演练、小组讨论；在学习过程中，建议使用与本书配套的教学辅助资源，如机器人仿真软件、6 轴机器人实训台、教学课件及视频素材、教学参考与拓展资料等。以上资源可通过书末所附“教学资源获取单”咨询获取。

本书由哈工海渡机器人学院张明文任主编，王伟和顾三鸿任副主编，参加编写的还有

王璐欢、李晓聪和吴冠伟，由于振中和霁学会担任主审。全书由王伟和顾三鸿统稿。具体编写分工如下：王伟编写第1、7章；李晓聪编写第2、3章；顾三鸿编写第4、5章；王璐欢编写第6章；吴冠伟编写第8章。在本书编写过程中，得到了哈工大机器人集团、上海ABB工程有限公司、上海FANUC机器人有限公司的有关领导、工程技术人员以及哈尔滨工业大学相关教师的鼎力支持与帮助，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平及时间有限，书中难免存在不足之外，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## CONTENTS

序一

序二

前言

第1章 工业机器人概述.....	1	3.3.4 典型产品.....	60
1.1 工业机器人的定义和特点 .....	1	3.4 辅助系统.....	62
1.2 工业机器人的发展 .....	2	3.4.1 作业系统.....	63
1.3 工业机器人的分类 .....	5	3.4.2 周边设备.....	68
1.4 工业机器人的应用 .....	8	思考题 .....	68
思考题 .....	13	第4章 工业机器人运动原理 .....	70
第2章 工业机器人基础知识 .....	14	4.1 数理基础.....	71
2.1 基本术语.....	14	4.1.1 位姿.....	71
2.2 主要技术参数.....	21	4.1.2 平移坐标变换.....	74
2.3 工作空间分析.....	27	4.1.3 旋转坐标变换.....	74
思考题 .....	31	4.2 运动学.....	75
第3章 工业机器人系统组成 .....	32	4.2.1 运动学基本问题.....	75
3.1 操作机.....	33	4.2.2 机器人运动方程.....	75
3.1.1 机械臂.....	33	4.2.3 运动学求解.....	78
3.1.2 驱动装置.....	40	4.3 动力学 .....	85
3.1.3 传动装置.....	41	4.3.1 拉格朗日方程.....	86
3.1.4 内部传感器.....	47	4.3.2 平面2连杆机器人 动力学建模.....	86
3.2 控制器.....	49	思考题 .....	88
3.2.1 基本组成.....	49	第5章 工业机器人控制系统 .....	89
3.2.2 基本功能.....	52	5.1 控制系统概述.....	89
3.2.3 工作过程.....	52	5.1.1 控制系统要求.....	90
3.2.4 典型产品.....	53	5.1.2 控制系统类型.....	90
3.3 示教器.....	56	5.1.3 控制系统特点.....	91
3.3.1 基本组成.....	56	5.1.4 控制系统基本结构.....	92
3.3.2 工作过程.....	58	5.2 机器人控制方法.....	93
3.3.3 功能.....	58		

5.2.1 经典控制方法·····	93	7.1.4 主要技术参数·····	148
5.2.2 现代控制方法·····	96	7.2 实训环境·····	149
5.3 伺服电动机控制·····	99	7.3 操作及编程·····	149
5.3.1 伺服电动机控制 系统组成·····	99	7.3.1 手动操作·····	150
5.3.2 伺服控制应用·····	100	7.3.2 工具坐标系建立·····	151
思考题·····	106	7.3.3 用户坐标系建立·····	154
第6章 ABB 机器人编程及应用·····	107	7.3.4 I/O 通信·····	157
6.1 机器人 IRB 120 简介·····	108	7.3.5 基本指令·····	160
6.1.1 操作机·····	108	7.3.6 程序编辑·····	163
6.1.2 控制器·····	109	7.4 综合应用·····	165
6.1.3 示教器·····	111	思考题·····	168
6.1.4 主要技术参数·····	114	第8章 工业机器人离线编程·····	169
6.2 实训环境·····	114	8.1 离线编程技术·····	169
6.3 操作及编程·····	116	8.2 RobotStudio 下载与安装·····	170
6.3.1 手动操作·····	116	8.2.1 RobotStudio 下载·····	170
6.3.2 工具坐标系建立·····	120	8.2.2 RobotStudio 安装·····	170
6.3.3 工件坐标系建立·····	122	8.3 RobotStudio 软件简介·····	171
6.3.4 I/O 通信·····	127	8.3.1 用户界面·····	171
6.3.5 基本指令·····	131	8.3.2 常用操作·····	171
6.3.6 程序编辑·····	134	8.4 输送带搬运实训仿真·····	173
6.4 综合应用·····	136	8.4.1 实训工作站搭建·····	173
思考题·····	139	8.4.2 机器人系统创建·····	176
第7章 FANUC 机器人编程及 应用·····	140	8.4.3 动态输送带创建·····	177
7.1 机器人 LR Mate 200iD/4S 简介·····	141	8.4.4 动态搬运工具创建·····	184
7.1.1 操作机·····	141	8.4.5 搬运程序创建·····	192
7.1.2 控制器·····	142	8.4.6 工作站逻辑设定·····	197
7.1.3 示教器·····	143	8.4.7 仿真·····	197
		思考题·····	201
		参考文献·····	202

# 第 1 章

## Chapter

### 工业机器人概述

机器人是典型的机电一体化装置，其涉及机械、电气、控制、检测、通信和计算机等方面的知识。当今世界以互联网、新材料和新能源为基础，“数字化智能制造”为核心的新一轮工业革命即将到来，而工业机器人则是“数字化智能制造”的重要载体。

#### 1.1 工业机器人的定义和特点

虽然工业机器人是技术上最成熟、应用最广泛的一类机器人，但对其具体的定义，科学界尚未形成统一。目前大多数国家遵循的是国际标准化组织（ISO）的定义。

国际标准化组织（ISO）的定义为：工业机器人是一种能自动控制、可重复编程、多功能、多自由度的操作机，能够搬运材料、工件或者操作工具来完成各种作业。

工业机器人通常具有以下 4 个特点。

- (1) 拟人化 在机械结构上类似于人的手臂或者其他组织结构。
- (2) 通用性 可执行不同的作业任务，动作程序可按需求改变。
- (3) 独立性 完整的工业机器人系统中可以依赖于人的干预。
- (4) 智能性 具有不同程度的智能，如感知系统、记忆功能等可提高工业机器人对周围环境的自适应能力。



1. 工业机器人的定义和特点、工业机器人的发展

## 2 1.2 工业机器人的发展

1954 年美国乔治·德沃尔制造出世界上第一台可编程的机器人，最早提出工业机器人的概念，并申请了专利。

1959 年，乔治·德沃尔与美国发明家约瑟夫·英格伯格联手制造出第一台工业机器人——Unimate，随后，成立了世界上第一家机器人制造工厂——Unimation 公司。

1962 年，美国 AMF 公司生产出工业机器人 Versatran，这是第一台真正商业化的机器人。

1967 年，Unimation 公司推出机器人 Mark II，将第一台涂装机器人出口到日本。同年，日本川崎重工业公司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机器人 Unimate。

1972 年，IBM 公司开发出内部使用的直角坐标机器人，并最终开发出 IBM 7656 型商业直角坐标机器人，如图 1-1 所示。

1974 年，瑞士的 ABB 公司研发了世界上第一台全电控式工业机器人 IRB6，主要应用于工件的取放和物料搬运。

1978 年，Unimation 公司推出通用工业机器人 PUMA，这标志着串联工业机器人技术已经完全成熟。同年，日本山梨大学的牧野洋研制出了平面关节型的机器人。

1979 年，Mccallino 等人首次设计出了基于小型计算机控制，在精密装配过程中完成校准任务的并联机器人，从而真正拉开了并联机器人研究的序幕。

1985 年，法国克拉维尔教授设计出并联机器人 DELTA。

1999 年，ABB 公司推出了 4 自由度的并联机器人 FlexPicker，如图 1-2 所示。

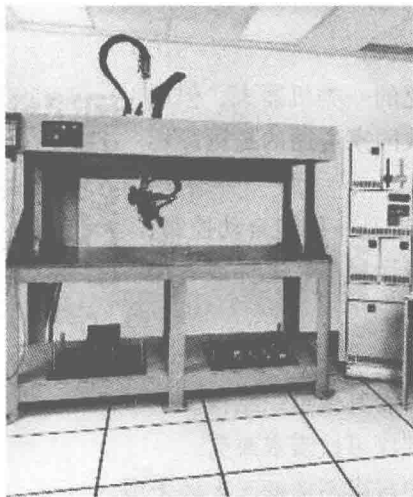


图 1-1 IBM 7656 型商业直角坐标机器人



图 1-2 并联机器人 FlexPicker

2005年,日本安川公司推出了工业机器人 MOTOMAN - DA20 和 MOTOMAN - IA20,能够替代人类完成搬运和装配作业。MOTOMAN - DA20 是一款配备 2 个 6 轴驱动臂的双臂机器人,如图 1-3 所示。MOTOMAN - IA20 是一款 7 轴工业机器人,也是全球首次实现了 7 轴驱动的产业机器人,更加接近人类动作,如图 1-4 所示。

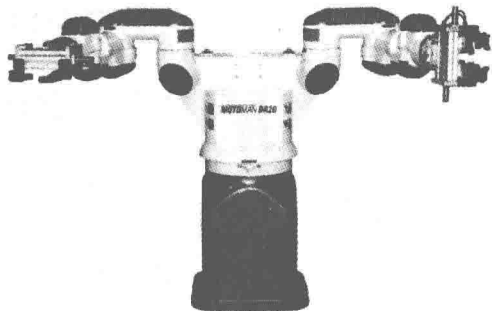


图 1-3 机器人 MOTOMAN - DA20

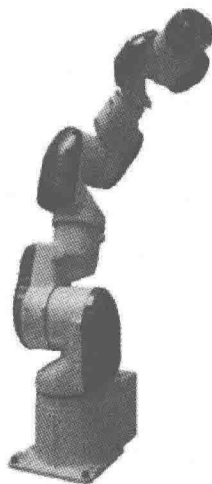


图 1-4 机器人 MOTOMAN - IA20

2014年,ABB公司推出了其首款双7轴臂协作机器人 YuMi,如图 1-5 所示。

2015年,川崎公司推出了双腕平面关节型机器人 duAro,如图 1-6 所示。



图 1-5 机器人 YuMi



图 1-6 机器人 duAro

(1) 国外厂商 工业机器人发展过程中,形成了一些较有影响力的、著名的国际工业机器人公司,主要可分为欧系和日系两种,具体来说,主要可分成“四大家族”和“四小家族”两个阵营,见表 1-1。

(2) 国内厂商 在我国工业机器人的发展过程中,也形成了一些代表性厂商,如沈阳新松机器人自动化股份有限公司、安徽埃夫特智能装备股份有限公司、南京埃斯顿自动化股份有限公司、广州数控设备有限公司、哈工大机器人集团、珞石(北京)

科技有限公司、台达集团、上海新时达电气股份有限公司等，见表 1-2。

表 1-1 工业机器人阵营

阵营	厂商	国家	标志	阵营	厂商	国家	标志
四大家族	ABB	瑞士		其他	三菱	日本	
	KUKA	德国			爱普生	日本	
	YASKAWA	日本			雅马哈	日本	
	FANUC	日本			现代	韩国	
四小家族	松下	日本			克鲁斯	德国	
	欧地希	日本			柯马	意大利	
	那智 不二越	日本			史陶 比尔	瑞士	
	川崎	日本			爱德普	美国	
					优傲	丹麦	

表 1-2 国内工业机器人厂商

厂商	标志	厂商	标志
沈阳新松		哈工大机器人集团	
安徽埃夫特		台达集团	
南京埃斯顿		北京路石	
广州数控		上海新时达	



## 1.3 工业机器人的分类

工业机器人分类方法有很多,常见的有按结构运动形式分类、按运动控制方式分类、按机器人的性能指标分类、按程序输入方式分类和按发展程度分类等。本节仅介绍按结构运动形式分类和按发展程度分类。

## 1. 按结构运动形式分类

(1) 直角坐标机器人 直角坐标机器人在空间上具有多个相互垂直的移动轴,常用的是3个轴,即 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴,如图1-7所示。它的末端的空间位置是通过沿 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴来回移动形成的,其工作空间是一个长方体。此类机器人具有较高的强度和稳定性,负载能力大,位置精度高且编程操作简单。



2. 工业机器人的分类、  
工业机器人的应用

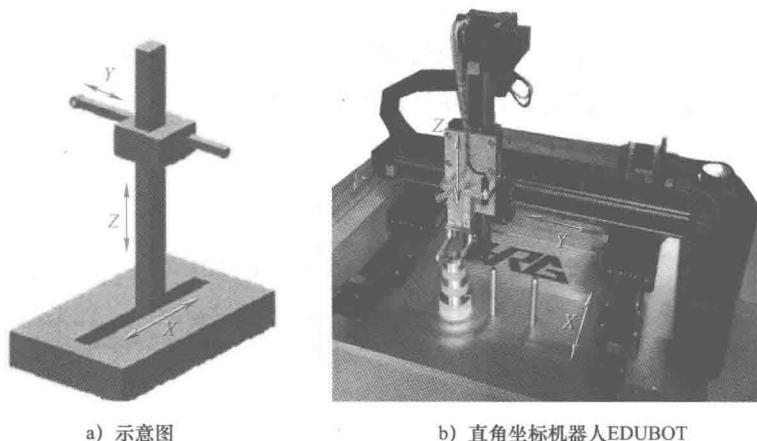


图 1-7 直角坐标机器人

(2) 圆柱坐标机器人 圆柱坐标机器人通过2个移动和1个转动运动来改变末端的空  
间位置,其工作空间是圆柱体,如图1-8所示。

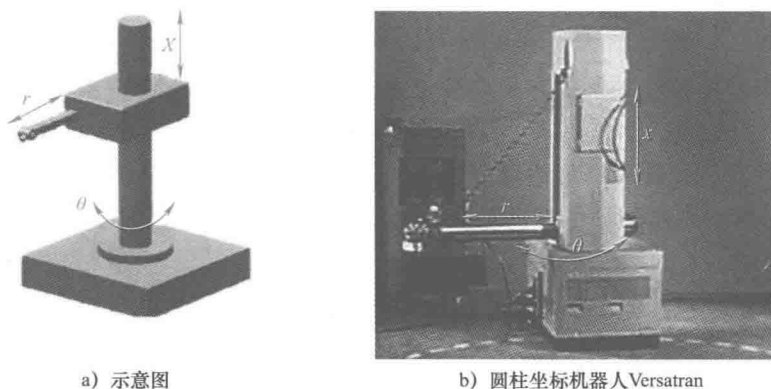


图 1-8 圆柱坐标机器人