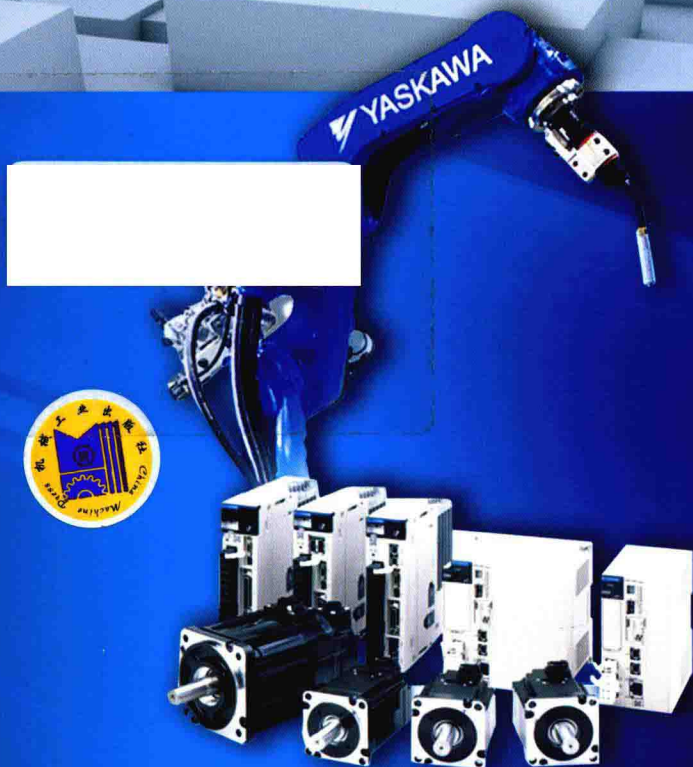


# 工业机器人

从入门到应用

龚仲华 编著



# 工业机器人从入门到应用

龚仲华 编 著



机械工业出版社

本书介绍了工业机器人的产生、发展和分类概况，工业机器人的组成、特点和技术性能等入门知识；全面系统地阐述了工业机器人本体的机械结构及安装维护要求；对谐波减速器、RV 减速器等核心部件的结构原理和装配调整方法，进行了深入具体的介绍；对工业机器人的电气控制系统和各组成部件的安装连接技术，以及工业机器人的手动操作、示教编程、再现运行等操作编程技术，进行了完整详细的说明。

本书选材典型、内容先进、案例丰富，理论联系实际，面向工程应用，是工业机器人设计、使用、维修人员和高等学校师生的优秀参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

工业机器人从入门到应用/龚仲华编著. —北京: 机械工业出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-111-52847-0

I. ①工… II. ①龚… III. ①工业机器人 IV. ①TP242. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 021376 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: 徐明煜 责任编辑: 闫洪庆

责任校对: 纪敬 封面设计: 陈沛

责任印制: 李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 21 印张 · 519 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-52847-0

定价: 59.90 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

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前 言

## PREFACE

工业机器人是集机械、电子、控制、计算机、传感器、人工智能等多学科先进技术于一体的机电一体化设备，被称为工业自动化的三大支持技术之一。随着社会的进步和劳动力成本的增加，机器人在我国的应用已越来越广。

工业机器人是一种功能完整、可独立运行的自动化设备，它有自身的控制系统，能依靠自身的控制能力来完成规定的作业任务。工业机器人的操作、调试、维修人员需要熟悉机器人的结构，掌握其操作和编程技术，才能充分发挥机器人的功能，确保其正常可靠运行。

本书不仅介绍了工业机器人的产生、发展和分类概况，工业机器人的组成、特点和技术性能等入门知识，而且重点针对工业机器人的操作、编程、调试、维修人员的实际需求，全面、系统地阐述了工业机器人本体的机械结构及安装维护要求；对谐波减速器、RV 减速器等核心部件的结构原理和装配调整要求，进行了深入具体的介绍；对工业机器人的电气控制系统和各组成部件的安装连接技术，以及工业机器人的手动操作、示教编程、再现运行等操作编程技术，进行了完整详细的说明。本书可为企业工业机器人设计、使用、维修人员及高校师生提供参考。

第1~2章介绍了机器人的产生、发展、分类及工业机器人的产品与应用情况；对工业机器人的组成、特点和技术性能进行了具体说明。

第3章详细阐述了工业机器人的结构形式及各部分的机械结构，并以典型产品为例，系统介绍了机械部件的安装要求和维修方法。

第4章对工业机器人常用的交叉滚子轴承、同步带、滚珠丝杠、直线导轨等基础部件的结构原理、安装维护要求进行了详细的介绍。

第5~6章对工业机器人的机械核心部件——谐波减速器和RV 减速器的结构原理、产品分类、安装维护要求进行了深入具体的介绍。

第7章介绍了工业机器人电气控制系统的结构与组成，并以典型产品为例，全面介绍了电气控制系统各组成部件的功能和安装、连接要求。

第8章以典型系统为例，具体介绍了工业机器人的安全操作、点动操作及示教编程、命令编辑、再现运行的基本方法和步骤。

由于编著者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，殷切期望广大读者提出批评、指正，以便进一步提高本书的质量。

本书编写参阅了安川公司、Harmonic Drive System 公司、Nabtesco Corporation 及其他相关公司的技术资料，并得到了安川公司技术人员的大力支持与帮助，在此表示衷心的感谢！

编著者

# 目 录

## CONTENTS

### 前言

第1章 绪论	1	2.4.1 主要技术参数	48
1.1 机器人的产生和定义	1	2.4.2 自由度	51
1.1.1 机器人的产生	1	2.4.3 工作范围	53
1.1.2 机器人的定义	3	2.4.4 其他指标	55
1.2 机器人的发展	4	第3章 机械结构与维修	57
1.2.1 技术发展水平	4	3.1 本体的结构形式	57
1.2.2 研发与应用情况	6	3.1.1 基本结构与特点	57
1.3 机器人的分类	10	3.1.2 其他常见结构	59
1.3.1 专业分类法和应用分类法	10	3.1.3 MH6 机器人结构简述	62
1.3.2 服务机器人简介	11	3.2 机身结构与维修	64
1.4 工业机器人及应用	15	3.2.1 基座结构与机器人安装	64
1.4.1 发展简史	15	3.2.2 腰部结构与维修	66
1.4.2 产品分类与应用	17	3.2.3 下臂结构与维修	69
1.4.3 主要生产企业	20	3.2.4 上臂结构与维修	71
第2章 工业机器人的基本特性	29	3.3 手腕结构与维修	73
2.1 工业机器人的组成	29	3.3.1 手腕总体结构	73
2.1.1 工业机器人及系统	29	3.3.2 R 轴结构与维修	76
2.1.2 常用的附件	31	3.3.3 B 轴结构与维修	79
2.1.3 电气控制系统	34	3.3.4 T 轴结构与维修	80
2.2 工业机器人的特点	36	3.4 后驱手腕结构与维修	84
2.2.1 基本特点	36	3.4.1 上臂结构与维修	84
2.2.2 工业机器人与数控机床	37	3.4.2 手腕结构与维修	87
2.2.3 工业机器人与机械手	40	3.5 其他典型结构与维修	90
2.3 工业机器人的结构形态	41	3.5.1 RRR/BRR 手腕结构与 维修	90
2.3.1 垂直串联型	41	3.5.2 前驱 SCARA 结构与维修	92
2.3.2 水平串联型	44	3.5.3 后驱 SCARA 结构与维修	94
2.3.3 并联型	46	第4章 常用基础件的安装与维护	98
2.4 工业机器人的技术性能	48		

4.1 CRB 与同步带的安装与维护 ... 98	列减速器 ..... 151
4.1.1 机械核心部件概述 ..... 98	5.3.6 SHD-2UH 系列中空轴超薄 型减速器 ..... 155
4.1.2 CRB 的安装与维护 ..... 99	5.4 简易单元型减速器的安装与 维护 ..... 156
4.1.3 同步带安装与维护 ..... 102	5.4.1 产品系列与结构特点 ..... 156
4.2 滚珠丝杠的安装与维护 ..... 105	5.4.2 减速器的安装与维护 ..... 158
4.2.1 滚珠丝杠的结构原理 ..... 105	5.5 齿轮箱型减速器的安装与 维护 ..... 162
4.2.2 滚珠丝杠的预紧 ..... 107	5.5.1 产品结构与特点 ..... 162
4.2.3 滚珠丝杠的安装与维护 ... 109	5.5.2 减速器的安装与维护 ..... 164
4.3 滚动导轨的安装与维护 ..... 112	5.6 微型减速器的安装与维护 ..... 166
4.3.1 滚动导轨的结构原理 ..... 112	5.6.1 产品系列及特点 ..... 166
4.3.2 滚动导轨的安装 ..... 114	5.6.2 减速器内部结构 ..... 168
4.3.3 滚动导轨的使用与维护 ... 115	5.6.3 减速器的安装与维护 ..... 171
4.3.4 滚动导轨块的使用与 维护 ..... 117	<b>第 6 章 RV 减速器的安装与维护</b> ..... 173
<b>第 5 章 谐波减速器的安装与维护</b> ..... 119	6.1 RV 减速器结构原理及产品 ..... 173
5.1 谐波减速器结构原理及产品 ... 119	6.1.1 RV 减速器结构原理 ..... 173
5.1.1 谐波减速器的结构原理 ... 119	6.1.2 纳博特斯克产品与性能 ... 178
5.1.2 谐波减速回转执行器 ..... 123	6.2 部件型减速器的安装与维护 ... 182
5.1.3 哈默纳科产品与性能 ..... 125	6.2.1 减速器安装的基本要求 ... 182
5.2 部件型减速器的安装与维护 ... 130	6.2.2 RV 基本型减速器的安装与 维护 ..... 187
5.2.1 CSF/CSG 系列标准 减速器 ..... 130	6.2.3 RV E 标准型减速器的安装 与维护 ..... 191
5.2.2 CSD 系列超薄型减速器 ... 132	6.2.4 RV N 紧凑型减速器的安装与 维护 ..... 194
5.2.3 SHF/SHG 系列标准 减速器 ..... 134	6.2.5 RV C 中空型减速器的安装与 维护 ..... 196
5.2.4 FB/FR 系列薄饼形 减速器 ..... 136	6.3 齿轮箱型减速器的安装与 维护 ..... 199
5.3 单元型减速器的安装与维护 ... 140	6.3.1 GH 高速型减速器的安装与 维护 ..... 199
5.3.1 CSF/CSG-2UH 系列标准减 速器 ..... 140	6.3.2 RD2 标准型减速器的安装与 维护 ..... 202
5.3.2 CSD-2UH 系列超薄型减 速器 ..... 144	6.3.3 RS 扁平型减速器的安装与 维护 ..... 206
5.3.3 CSG-2UK 系列密封型减 速器 ..... 147	
5.3.4 CSD-2UF 系列中空轴超 薄型减速器 ..... 149	
5.3.5 礼帽形 SHF/SHG-2U 系	



<b>第7章 电气控制系统的安装与连接</b> ..... 208	8.2 机器人的安全操作 ..... 265
7.1 系统组成与连接总图 ..... 208	8.2.1 开机与关机 ..... 265
7.1.1 DX100 控制系统组成 ..... 208	8.2.2 安全模式及设定 ..... 268
7.1.2 DX100 电源连接总图 ..... 212	8.3 机器人的点动操作 ..... 273
7.1.3 DX100 信号连接总图 ..... 214	8.3.1 控制组及坐标系选择 ..... 273
7.2 控制部件的安装与连接 ..... 216	8.3.2 机器人的点动操作方法 ... 276
7.2.1 ON/OFF 单元 ..... 216	8.3.3 本体的点动定位 ..... 280
7.2.2 安全单元 ..... 218	8.3.4 工具的点动定位 ..... 282
7.2.3 I/O 单元 ..... 222	8.3.5 工具的点动定向 ..... 284
7.2.4 电源单元及 IR 控制器 ..... 228	8.4 机器人的示教编程 ..... 288
7.3 伺服驱动器的安装与连接 ..... 230	8.4.1 程序与编程 ..... 288
7.3.1 电源模块 ..... 230	8.4.2 示教准备操作 ..... 292
7.3.2 伺服控制板 ..... 232	8.4.3 移动命令输入操作 ..... 296
7.3.3 逆变模块 ..... 235	8.4.4 作业命令输入操作 ..... 301
7.3.4 制动单元 ..... 237	8.5 命令编辑和程序试运行 ..... 305
7.4 机器人本体的电气连接 ..... 239	8.5.1 移动命令的编辑 ..... 305
7.4.1 器件安装和连接概述 ..... 239	8.5.2 其他命令的编辑 ..... 311
7.4.2 动力电缆的安装与连接 ... 243	8.5.3 连续移动和暂停命令 编辑 ..... 314
7.4.3 信号电缆的安装与连接 ... 246	8.5.4 程序点检查、点重合及试 运行 ..... 316
7.4.4 其他部件的安装与连接 ... 253	8.6 程序的再现 ..... 318
<b>第8章 工业机器人的操作与编程</b> ..... 255	8.6.1 主程序的登录与调用 ..... 318
8.1 示教器及其功能 ..... 255	8.6.2 再现的显示与设定 ..... 320
8.1.1 操作开关与按钮 ..... 255	8.6.3 程序的再现运行 ..... 325
8.1.2 操作面板 ..... 256	
8.1.3 显示器 ..... 261	

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 机器人的产生和定义

#### 1.1.1 机器人的产生

##### 1. 概念的出现

机器人 (Robot) 自从 1959 年问世以来, 由于它能够协助人类完成那些单调、频繁和重复的长时间工作, 或取代人类从事危险、恶劣环境下的作业, 因此其发展较迅速。随着人们对机器人研究的不断深入, 已逐步形成了 Robotics (机器人学) 这一新兴的综合性学科, 有人将机器人与数控、PLC (可编程序控制器) 并称为工业自动化的三大支持技术。

机器人的英文 Robot 一词, 源自于捷克著名剧作家 Karel Čapek (卡雷尔·恰佩克, 1890—1938) 1921 年创作的剧本《Rossumovi univerzální roboti (简称 R. U. R, 罗萨姆的万能机器人)》, 由于 R. U. R 剧中的人造机器被取名为 Robota (捷克语, 本意为奴隶、苦力), 因此, 英文 Robot 一词开始代表机器人。

机器人概念一出现, 首先引起了科幻小说家的广泛关注, 自 20 世纪 20 年代起, 机器人成为了很多科幻小说与电影的主人公, 如星球大战中的 C3P 等。

科幻小说家的想象力是无限的。为了预防机器人的出现可能引发的人类灾难, 1942 年, 美国的科幻小说家 Isaac Asimov (艾萨克·阿西莫夫, 1920—1992) 在《I, Robot (我, 机器人)》的第 4 个短篇《Runaround (转圈圈)》中, 首次提出了“机器人学三原则”, 它被称为“现代机器人学的基石”, 这也是“机器人学 (Robotics)”这个名词在人类历史上的首度亮相。

机器人学三原则的主要内容如下:

原则 1: 机器人不能伤害人类, 或因其不作为而使人类受到伤害。

原则 2: 机器人必须执行人类的命令, 除非这些命令与原则 1 相抵触。

原则 3: 在不违背原则 1、原则 2 的前提下, 机器人应保护自身不受伤害。

到了 1985 年, Isaac Asimov 在机器人系列最后作品《Robots and Empire (机器人与帝国)》中, 又补充了凌驾于“机器人学三原则”之上的“原则 0”, 即

原则 0: 机器人必须保护人类的整体利益不受伤害, 其他 3 条原则都必须在这一前提下才能成立。

继 Isaac Asimov 之后, 其他科幻作家还不断提出了对“机器人学三原则”的补充、修正意见。例如, 1974 年, 保加利亚科幻作家 Lyuben Dilov 在小说《Icarus's Way》中提出了





第4原则：“机器人在任何情况下都必须确认自己是机器人”；1989年，美国科幻作家 Harry Harrison 在《Foundation's Friends》中所提出的原则4是“机器人必须进行繁殖，只要进行繁殖不违反原则1~3”；1983年，保加利亚科幻作家 Nikola Kesarovski 提出的原则5是“机器人必须知道自己是机器人”等。

以上原则的提出，多半是出于小说情节的需要，而不是针对机器人学三原则本身的内容。为此，人们也对机器人学三原则的内容，进行过严肃的讨论、补充和完善。例如，Roger Clarke（罗杰·克拉克）所构思的机器人学原则如下：

总原则：机器人不得实施除符合机器人原则以外的行为。

原则0：机器人不得伤害人类整体，或者因其不作为，致使人类整体受到伤害。

原则1：除非违反上级原则，否则，机器人不得伤害人类个体，或者因其不作为致使人类个体受到伤害。

原则2：机器人必须服从人类的命令，除非该命令与上级原则抵触。

原则3：如不与上级原则抵触，机器人必须保护上级机器人和自己的存在。

原则4：除非违反上级原则，机器人必须执行内置程序赋予的职能。

原则5：机器人不得参与机器人设计和制造，除非新机器人的行为符合机器人原则。

以上原则大都是科幻小说家对想象中机器人所施加的限制，实际上，“人类的整体利益”等概念本身就是模糊的。因此，目前人类的认识和科学技术，实际上还远未达到制造科幻片中的机器人的水平，能制造出具有类似人类智慧、感情、思维的机器人，仍属于科学家的梦想和追求。

## 2. 机器人的产生过程

现代机器人的研究起源于20世纪中叶的美国，它从工业机器人的研究开始。

第二次世界大战期间，由于军事、核工业的发展需要，需要有操作机械来代替人类，在原子能实验室的恶劣环境下，进行放射性物质的处理。为此，美国的 Argonne National Laboratory（阿贡国家实验室）开发了一种可用于放射性物质生产和处理的遥控机械手（Teleoperator）。接着，又在1947年，开发出了一种伺服控制的主从机械手（Master-Slave Manipulator），这些可说是工业机器人的雏形。

工业机器人的概念由美国发明家 George Devol（乔治·德沃尔，1912—2011）最早提出，他在1954年申请了专利，并在1961年获得授权。

1958年，美国著名的机器人专家 Joseph F. Engelberger（约瑟夫·恩盖尔伯格，1925—2015）建立了 Unimation 公司，并利用 George Devol（乔治·德沃尔）的专利技术，于1959年研制出了世界上第一台真正意义上的工业机器人 Unimate（见图1.1-1），开创了机器人发展的新纪元。

Joseph F. Engelberger（约瑟夫·恩盖尔伯格）对世界机器人工业的发展做出了杰出的贡

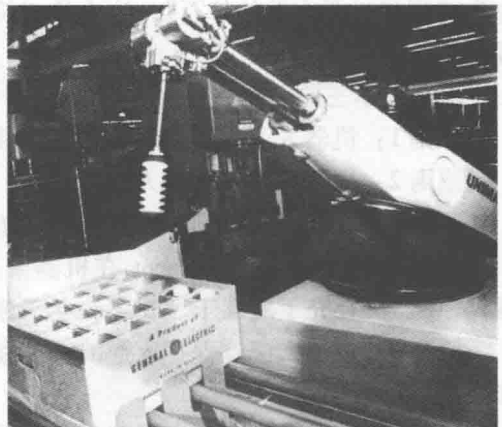


图 1.1-1 工业机器人 Unimate

献,被称为“机器人之父”。1983年,就在工业机器人销售日渐增长的情况下,他又毅然地将 Unimation 公司出让给了美国 Westinghouse Electric Corporation (西屋电气公司,又译威斯汀豪斯公司),并创建了 TRC 公司,前瞻性地开始了服务机器人的研发。

从 1968 年起,Unimation 公司先后将机器人的制造技术转让给了日本 KAWASAKI (川崎)公司和英国 GKN 公司,机器人开始在日本和欧洲得到了快速发展。

据有关方面的统计,目前世界上至少有 48 个国家在发展机器人,其中,有 25 个国家已在进行智能机器人的开发,美国、日本、德国、法国等都是机器人的研发制造大国,这些国家无论在基础研究或是产品研发制造等方面都居世界领先水平。

## 1.1.2 机器人的定义

### 1. 标准化组织

随着机器人技术的快速发展,在发达国家,机器人及其零部件的生产已形成产业,为此,世界各国相继成立了相应的行业协会,以宣传、引导和规范机器人产业的发展。目前,世界主要机器人生产与使用国的机器人行业协会如下。

1) International Federation of Robotics (IFR, 国际机器人联合会)。该联合会成立于 1987 年第 17 届国际机器人学术研讨会期间,目前已有 25 个成员国,是世界公认的机器人行业代表,已被联合国列为正式的非政府组织。

2) Japan Robot Association (JRA, 日本机器人协会)。该协会原名 Japan Robot Industrial Robot Association (JIRA, 日本工业机器人协会),它是全世界最早的机器人行业协会之一。JIRA 成立于 1971 年 3 月,最初称为“工业机器人恳谈会”;1972 年 10 月更名为 Japan Robot Industrial Robot Association (JIRA);1973 年 10 月成为正式法人团体;1994 年更名为 Japan Robot Association (JRA)。

3) Robotics Industries Association (RIA, 美国机器人协会)。该协会成立于 1974 年,是美国机器人行业的专门协会。

4) Verband Deutscher Maschinen Und Anlagebau (VDMA, 德国机械设备制造业联合会)。VDMA 拥有 3100 多家会员企业、400 余名专家,下设 37 个专业协会,并拥有一系列跨专业的技术论坛、委员会及工作组,它是目前欧洲最大的工业联合会和工业投资品领域中最大、最重要的组织机构。自 2000 年起,VDMA 专门设立了 Deutschen Gesellschaft Association für Robotik (DGR, 德国机器人协会)。

5) French Research Group in Robotics (FRGR, 法国机器人协会)。该协会原名 Association Française de Robotique Industrielle (AFR, 法国工业机器人协会),2007 年更名。

6) Korea Association of Robotics (KAR, 韩国机器人协会),成立于 1999 年。

### 2. 机器人的定义

由于现代机器人的应用领域众多、发展速度快,加上它又涉及有关人类的概念,因此,对于机器人,世界各国标准化机构,甚至同一国家的不同标准化机构,至今尚未形成一个统一、准确、世所公认严格定义。

例如,欧美国家一般认为,机器人是一种“由计算机控制、可通过编程改变动作的多功能、自动化机械”。而作为机器人大的日本,则将机器人分为“能够执行人体上肢(手和臂)类似动作”的工业机器人和“具有感觉和识别能力,并能够控制自身行为”的智能



机器人两大类。客观地说，欧美国家的机器人定义侧重其控制和功能，其定义和工业机器人较接近；而日本的机器人定义更关注机器人的结构和行为特性，并且已经考虑到了现代智能机器人的发展需要。

目前，使用较多的机器人定义主要有以下几种。

1) International Organization for Standardization (ISO, 国际标准化组织) 定义：机器人是一种“自动的、位置可控的、具有编程能力的多功能机械手，这种机械手具有几个轴，能够借助可编程序操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置，执行各种任务”。

2) Japan Robot Association (JRA, 日本机器人协会) 将机器人分为了工业机器人和智能机器人两大类：工业机器人是一种“能够执行人体上肢（手和臂）类似动作的多功能机器人”；智能机器人是一种“具有感觉和识别能力，并能够控制自身行为的机器”。

3) NBS (美国国家标准局) 定义：机器人是一种“能够进行编程，并在自动控制下执行某些操作和移动作业任务的机械装置”。

4) Robotics Industries Association (RIA, 美国机器人协会) 定义：机器人是一种“用于移动各种材料、零件、工具或专用装置的，通过可编程的动作来执行各种任务的，具有编程能力的多功能机械手”。

5) 我国 GB/T 12643—2013 标准定义：工业机器人是一种“能够自动定位控制，可重复编程的、多功能的、多自由度的操作机，能搬运材料、零件或操持工具，用于完成各种作业”。

以上标准化机构和专门组织对机器人的定义，都是在特定环境、特定时间所得到的结论，且偏重于工业机器人。但科学技术对未来是无限开放的，最新研发的现代智能机器人无论在外观，还是功能和智能化程度等方面，都已远超出了传统的工业机器人范畴。机器人正在源源不断地向人类活动的各个领域渗透，它所涵盖的内容越来越丰富，其应用领域和发展空间正在不断延伸和扩大，这是机器人与其他自动化设备的重要区别。

可以想象，未来的机器人不但可接受人类指挥、运行预先编制的程序，而且也可以根据人工智能技术所制定的原则纲领，选择自身的行动，甚至可能像科幻片所描述的那样，脱离人们的意志而自行其是。

## 1.2 机器人的发展

### 1.2.1 技术发展水平

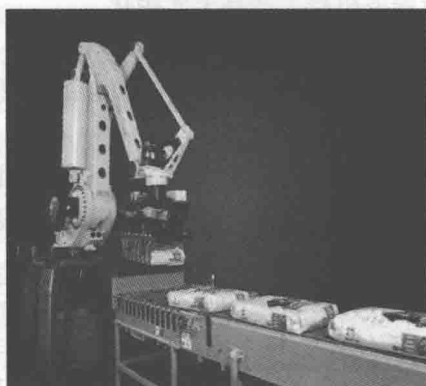
机器人最早应用于工业自动化领域，主要用来协助人类完成单调、频繁和重复的长时间工作，或进行高温、粉尘、有毒、易燃、易爆等恶劣、危险环境下的作业。但是，随着社会进步、科学技术发展和机器人智能化技术研究的深入，各式各样具有感知、决策、行动和交互能力，可适应不同领域特殊要求的智能机器人相继被研发，机器人已在某些领域逐步取代人类，独立从事相关作业。

根据机器人现有的技术水平，人们一般将机器人产品分为如下三代。

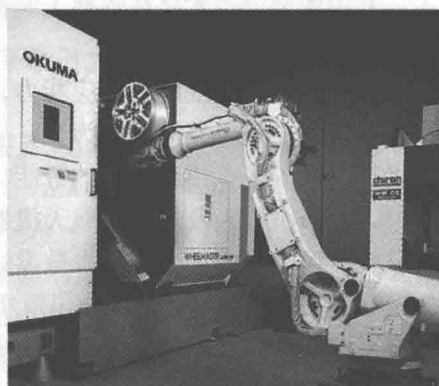
#### 1. 第一代机器人

第一代机器人一般是指可进行编程，并能通过示教操作再现动作的机器人。第一代机器

人以工业机器人为主，它主要用来协助人类完成图 1.2-1 所示的单调、频繁和重复长时间搬运、装卸等作业，或取代人类进行危险、恶劣环境下的作业。



a) 搬运机器人



b) 装卸机器人

图 1.2-1 第一代机器人

第一代机器人的技术和数控机床十分相似，它既可通过离线编制的程序控制机器人的运动，也可通过手动示教操作（数控机床称为 Teach in 操作）记录运动过程并生成程序，从而再现动作。第一代机器人的全部行为完全由人控制，它没有分析和推理能力，不具备智能性，但可通过示教操作再现动作，故又称为示教再现机器人。

第一代机器人现已实用化、商品化、普及化，当前使用的绝大多数工业机器人都属于第一代机器人。

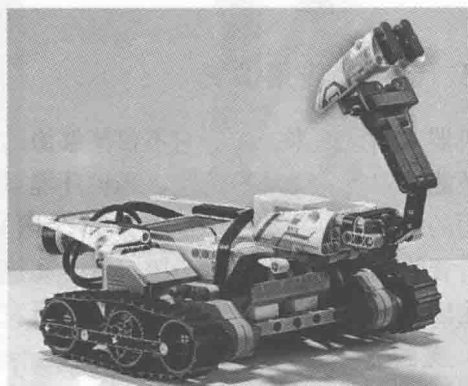
## 2. 第二代机器人

第二代机器人装备有一定数量的传感器，它能够获取作业环境、操作对象等的简单信息，并通过计算机的分析与处理，做出简单的推理，并适当调整自身的动作和行为。

例如，在图 1.2-2 所示的焊接机器人或探测机器人上，通过所安装的摄像头等视觉传感



a) 焊接机器人



b) 探测机器人

图 1.2-2 第二代机器人

系统，机器人能通过图像的识别，来判断、规划焊接加工或探测车的运动轨迹，它对外部环



境具有了一定的适应能力。

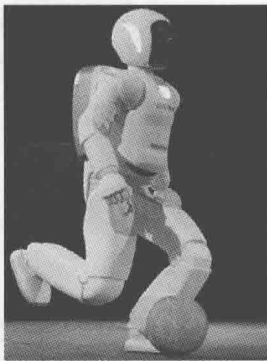
第二代机器人已具备一定的感知能力和简单的推理能力，故又称为感知机器人或低级智能机器人，其中的部分技术已在焊接工业机器人及服务机器人产品上实用化。

### 3. 第三代机器人

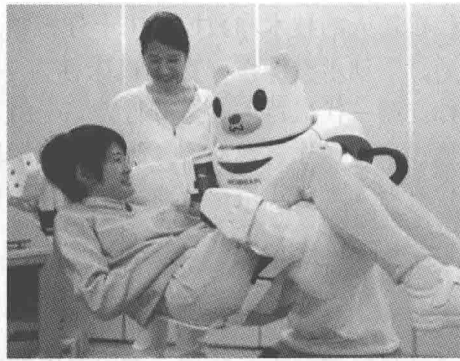
第三代机器人具有高度的自适应能力，它具有多种感知机能，可通过复杂的推理，做出判断和决策，自主决定机器人的行为。

第三代机器人应具有相当程度的智能，故称为智能机器人。第三代机器人技术目前多用于家庭、个人服务机器人及军事、航天机器人，总体而言，它尚处于实验和研究阶段，截至目前，还只有美国、日本和欧洲的少数发达国家能掌握和应用。

例如，日本 HONDA（本田）公司最新研发的图 1.2-3a 所示的 Asimo 机器人，不仅能实现跑步、爬楼梯、跳舞等动作，且还能进行踢球、倒饮料、打手语等简单智能动作。日本 Riken Institute（理化学研究所）最新研发的图 1.2-3b 所示的 Robear 护理机器人，其肩部、关节等部位都安装有测力感应系统，可模拟人的怀抱感，它能够像人一样，柔和地将卧床者从床上扶起，或将坐着的人抱起，其样子亲切可爱、充满活力。



a) Asimo 机器人



b) Robear 机器人

图 1.2-3 第三代机器人

## 1.2.2 研发与应用情况

机器人问世以来，由于它不仅能够协助人类完成那些单调、频繁和重复的长时间工作，而且还能够取代人类从事危险、恶劣环境下的作业，因此得到了世界各国的广泛重视。据有关方面的统计，目前世界上至少有 48 个国家在发展机器人，其中，有 25 个国家已开始或正在进行智能机器人的研发。美国、日本和德国为机器人的研究、制造和应用大国，此外，英国、法国、意大利、瑞士等国的机器人研发水平也居世界前列。

### 1. 美国

美国是机器人的发源地，各方面技术均处于领先地位。美国的机器人的研究领域广泛，产品技术全面、先进，其机器人的研究实力和产品技术水平在全世界占有绝对优势。Adept Technology、American Robot、Emerson Industrial Automation、S-T Robotics、iRobot、Remotec 等都是美国著名的机器人生产企业。

美国的机器人研究最初从工业机器人开始，但目前已更多地转向军用、医疗、家用服务

等高层次、智能机器人的研发。据统计,美国的智能机器人占据了全球约60%的市场,iRobot、Remotec 等公司的服务机器人水平领先世界。

美国在军事机器人 (Military Robot)、场地机器人 (Field Robot) 等方面的研究水平更是遥遥领先于其他国家,无论在基础技术研究、系统开发、生产配套方面,或是在技术转化、实战应用方面都具有优势。

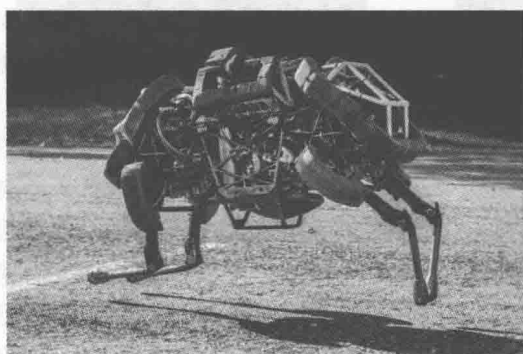
美国的军事机器人、场地机器人的开发与应用已涵盖陆、海、空、天等诸多兵种。Boston Dynamics (波士顿动力, 现已被 Google 并购)、Lockheed Martin (洛克希德马丁)、iRobot 等公司, 均为世界闻名的军事机器人研发制造企业。

美国现有的军事机器人产品包括用于监视和勘察的无人驾驶飞行器、用于深入危险领域获取信息的无人地面车、用来承担补充作战物资的多功能后勤保障机器人、武装机器人战车等多种, 其技术水平、应用范围均远远领先于其他国家。

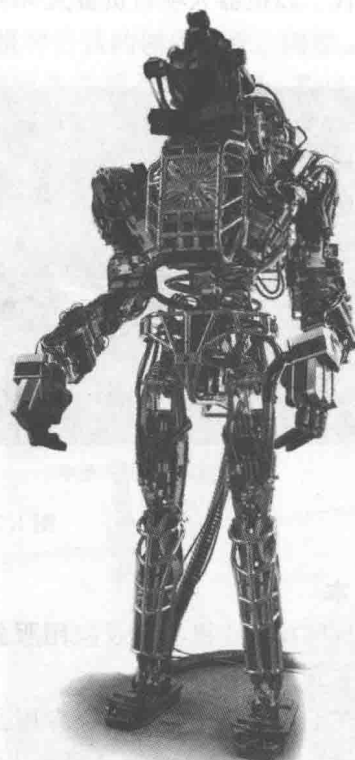
例如, 美国的“哨兵”机器人不但能识别声音、烟雾、风速、火等数据, 而且还可说300多个单词, 并向可疑目标发出口令, 如目标不能正确回答, 便会迅速、准确地瞄准和射



a) BigDog-LS3



b) WildCat



c) Atlas

图 1.2-4 美国的军事机器人

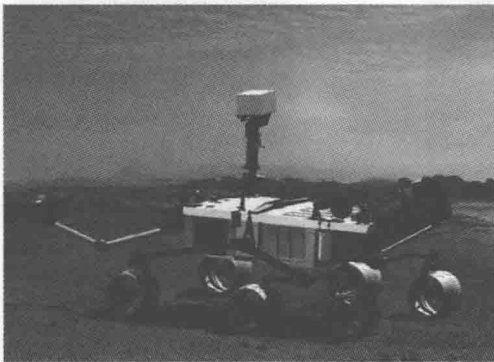
击。再如, Boston Dynamics (波士顿动力) 公司研制的、BigDog (大狗) 系列机器人的军用产品 LS3 (Legged Squad Support Systems, 又名阿尔法狗), 重达 1250lb (约 570kg), 可在搭载 400lb (约 181kg) 重物情况下, 连续行走 20mile (约 32km), 其负载能力相当于一个班, 并能穿过复杂地形、应答士官指令; 研发的 WildCat (野猫) 机器人则能在各种地形



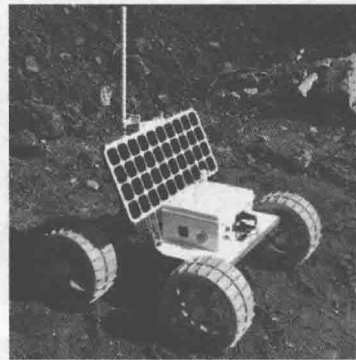
上,以 25km/h 以上的速度奔跑跳跃;该公司最新研发的人形机器人 Atlas (阿特拉斯),其四肢共拥有 28 个自由度,灵活性已接近于人类。

美国的场地机器人研究水平同样令其他各国望尘莫及,其研究遍及空间、陆地、水下,并已经用于月球、火星等天体的探测。

早在 1967 年, National Aeronautics and Space Administration (NASA, 美国国家航空与航天局) 所发射的“海盗”号火星探测器已着落火星,并对土壤等进行了采集和分析,以寻找生命迹象;同年,还发射了“观察者”3 号月球探测器,对月球土壤进行了分析和处理。到了 2003 年, NASA 又接连发射了 Spirit, MER - A (勇气号) 和 Opportunity, MER - B (机遇号) 两个火星探测器,并于 2004 年 1 月先后着落火星表面,它们可在地面的遥控下,在火星上自由行走,通过它们对火星岩石和土壤的分析,收集到了表明火星上曾经有水流动的强有力证据,发现了形成于酸性湖泊的岩石、陨石等。2011 年 11 月,又成功发射了图 1.2-5a 所示的 Curiosity (好奇号) 核动力驱动的火星探测器,并于 2012 年 8 月 6 日安全着落火星,开启了人类探寻火星生命元素的历程。最近, Google 公司又研发了图 1.2-5b 所示的新一代、以机器人项目负责人 Andy Rubin 命名的 Andy (安迪号) 月球车,以便进行新一轮探月。



a) Curiosity 火星车



b) Andy 月球车

图 1.2-5 美国的场地机器人

## 2. 日本

日本目前在工业机器人及家用服务、护理、医疗等智能机器人的研发上具有世界领先水平。

日本在工业机器人的生产、应用及主要零部件供给、研究等方面居世界领先地位。20 世纪 90 年代,日本就开始普及第一代和第二代工业机器人,截至目前,它仍保持工业机器人产量、安装数量世界第一的地位。据统计,日本的工业机器人产量约占全球的 50%; 安装数量约占全球的 23%; 机器人的主要零部件(精密减速机、伺服电机、传感器等)占全球市场的 90% 以上。日本 FANUC (发那科)、YASKAWA (安川)、KAWASAKI (川崎)、NACHI (不二越) 等都是著名的工业机器人生产企业。

日本在发展第三代智能机器人上,同样取得了举世瞩目的成就。为了攻克智能机器人的关键技术,自 2006 年起,日本政府每年都投入巨资,用于智能服务机器人的研发;近年来,为了满足老年护理的市场需求,很多企业已开始大量研发小型家用服务机器人。例如,前述

的 HONDA (本田) 公司 Asimo 机器人, 已能实现跑步、爬楼梯、跳舞、踢球、倒饮料、打手语等简单动作; 日本 Riken Institute (理化学研究所) 最新研发的 Robear 护理机器人, 能够像人一样, 柔和地将卧床者从床上扶起, 或将坐着的人抱起等。

### 3. 德国

德国的机器人研发稍晚于日本, 但其发展十分迅速。在 20 世纪 70 年代中后期, 德国政府在“改善劳动条件计划”中, 强制规定了部分有危险、有毒、有害的工作岗位必须用机器人来代替人工的要求, 它为机器人的应用开辟了广大的市场。据 VDMA (德国机械设备制造业联合会) 统计, 目前德国的工业机器人密度已在法国的 2 倍和英国的 4 倍以上。

德国的工业机器人以及军事机器人中的地面无人作战平台、水下无人航行体的研究和应用水平, 居世界领先地位。德国的 KUKA (库卡)、REIS (徠斯, 现为 KUKA 成员)、Carl - Cloos (卡尔 - 克鲁斯) 等都是全球著名的工业机器人生产企业; 德国宇航中心、德国机器人技术商业集团、karcher 公司、Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automatic (弗劳恩霍夫制造技术和自动化研究所) 及 STN 公司、HDW 公司等都是有名的服务机器人及军事机器人研发企业。

德国在智能服务机器人的研究和应用上, 同样具有世界公认的领先水平。例如, 图 1.2-6 所示的弗劳恩霍夫制造技术和自动化研究所最新研发的服务机器人 Care - O - Bot4, 其全身遍布各类传感器、立体彩色照相机、激光扫描仪和三维立体摄像头, 它不但能够识别日常的生活用品, 而且还能听懂语音命令和看懂手势命令, 按声控或手势控制的要求, 进行自我学习。

### 4. 中国

2013 年, 中国的工业机器人销量接近 3.7 万台, 占全球销售量 (17.7 万台) 的 1/5; 2014 年, 总销量达到了 5.7 万台, 占全球销售量 (22.5 万台) 的 1/4。

我国的机器人研发起始于 20 世纪 70 年代初期, 到了 20 世纪 90 年代, 先后研制出了点焊、弧焊、装配、喷漆、切割、搬运、包装码垛等工业机器人, 在工业机器人及零部件研发等方面取得了一定的成绩。上海交通大学、哈尔滨工业大学、天津大学、南开大学、北京航空航天大学等高校都设立了机器人研究所或实验室, 进行工业机器人和服务机器人的基础研究; 广州数控、南京埃斯顿、沈阳新松等企业也开发了部分机器人产品。但是, 总体而言, 我国的机器人研发目前还处于初级阶段, 和先进国家的差距依旧十分明显, 产品以低档工业机器人为主, 核心技术尚未掌握, 关键部件几乎完全依赖进口, 国产机器人的市场占有率十分有限, 目前还没有真正意义上的完全自主机器人生产商。

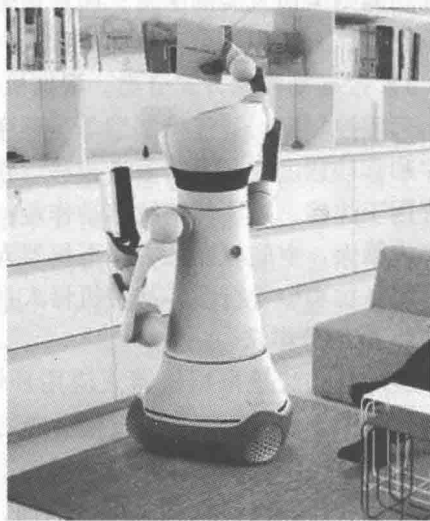


图 1.2-6 Care - O - Bot4

高端装备制造业是国家重点支持的战略性新兴产业, 工业机器人作为高端装备制造业的重要组成部分, 有望在此今后一段时期得到快速发展。





## 1.3 机器人的分类

### 1.3.1 专业分类法和应用分类法

机器人的分类方法很多，但是，由于人们观察问题的角度有所不同，直到今天，还没有一种分类方法能够满意地对机器人进行世所公认的分类。总体而言，常用的机器人分类方法主要有专业分类法和应用分类法两种，简介如下。

#### 1. 专业分类法

专业分类法通常是机器人设计、制造和使用厂家技术人员所使用的分类方法，其技术性较强，业外人士较少使用。目前，专业分类可按机器人的控制系统技术水平、机械结构形态和运动控制方式3种方式进行分类。

1) 按控制系统技术水平分类。根据机器人目前的控制系统技术水平，一般可分为前述的示教再现机器人（第一代）、感知机器人（第二代）、智能机器人（第三代）三类。第一代机器人已实用和普及，绝大多数工业机器人都属于第一代机器人；第二代机器人的技术已部分实用化；第三代机器人尚处于实验和研究阶段。

2) 按机械结构形态分类。根据机器人现有的机械结构形态，有人将其分为圆柱坐标（Cylindrical Coordinate）、球坐标（Polar Coordinate）、直角坐标（Cartesian Coordinate）及关节型（Articulated）、并联结构型（Parallel）等，以关节型机器人为常用。不同形态机器人在外观、机械结构、控制要求、工作空间等方面均有较大的区别。例如，关节型机器人的动作和功能则类似人类的手臂；而直角坐标、并联结构型机器人的外形和控制要求与数控机床十分类似，有关内容可参见第2章。

3) 按运动控制方式分类。根据机器人的控制方式，一般可分为顺序控制型、轨迹控制型、远程控制型、智能控制型等。顺序控制型又称点位控制型，这种机器人只需要规定动作次序和移动速度，而不需要考虑移动轨迹；轨迹控制型需要同时控制移动轨迹和移动速度，故可用于焊接、喷漆等连续移动作业；远程控制型可实现无线遥控，它多用于特定行业，如军事机器人、空间机器人、水下机器人等；智能控制型机器人就是前述的第三代机器人，多用于服务、军事等行业，这种机器人目前尚处于实验和研究阶段。

#### 2. 应用分类法

应用分类法是根据机器人应用环境（用途）进行分类的大众分类方法，其定义通俗，易为公众所接受。

应用分类的方法同样较多。例如，日本分为工业机器人和智能机器人两类；我国分为工业机器人和特种机器人两类等。然而，由于对机器人的智能性判别尚缺乏科学、严格的标准，加上工业机器人和特种机器人的界线较难划分，因此在通常情况下，公众较易接受的是参照国际机器人联合会（IFR）的分类方法，将机器人分为工业机器人和服务机器人两类；如进一步细分，目前常用的机器人基本上可分为图1.3-1所示的几类。

##### (1) 工业机器人

工业机器人（Industrial Robot, IR）是指在工业环境下应用的机器人，它是一种可编程的多用途、自动化设备。当前实用化的工业机器人以第一代示教再现机器人居多，但部分工