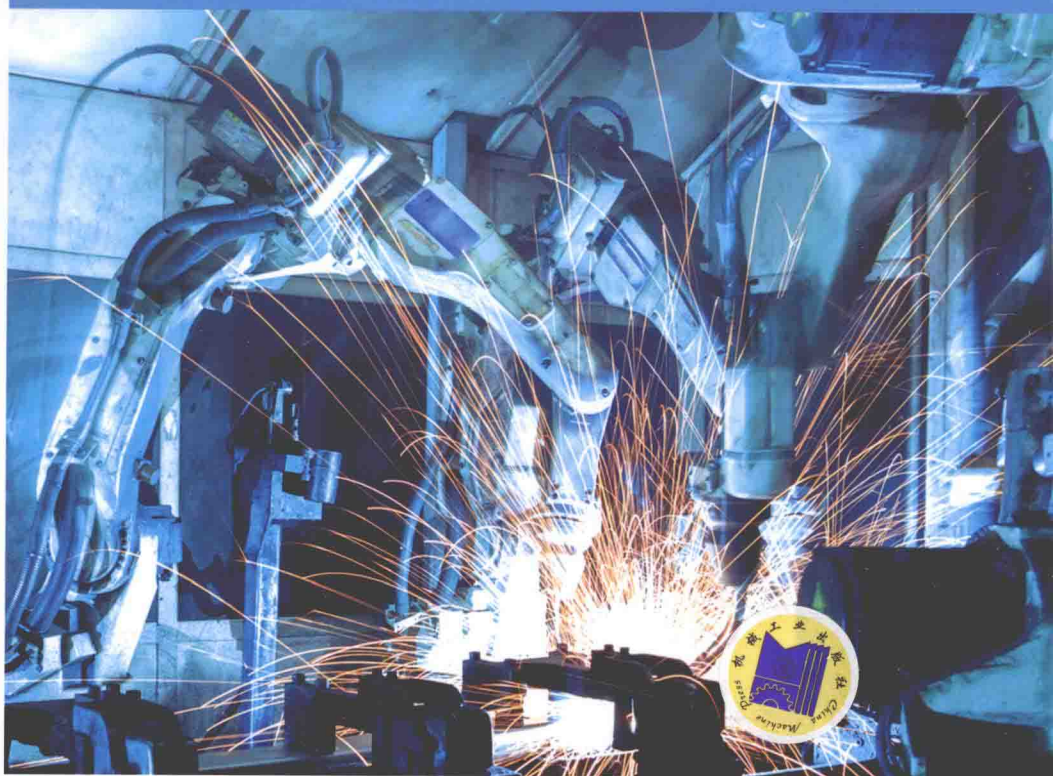


工业机器人

编程与操作

GONGYE JIQIREN
BIANCHENG YU CAOZUO

龚仲华 编著



工业机器人编程与操作

龚仲华 编著



机械工业出版社

本书以焊接（点焊和弧焊）、搬运、通用三大类常用机器人的编程、操作技术为主题，详细阐述了工业机器人基本命令和作业命令的编程格式、编程要点、应用技巧；系统介绍了工业机器人手动操作、示教编程、再现运行的方法和步骤。同时，还对变量编程、平移编程，作业文件编制等高层次编程技术，以及系统设置、参数设定、硬件配置、运行监控、数据备份与恢复、故障诊断与维修等高层次调试、维修操作技术，进行了全面、深入的说明，并提供了丰富的实例。

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相关专业师生的优秀参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人编程与操作/龚仲华编著. —北京：机械工业出版社，2016.9

ISBN 978-7-111-54963-5

I. ①工… II. ①龚… 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(2016)第 232646 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：徐明煜 张沪光

责任校对：赵蕊 封面设计：马精明

责任印制：李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 23.75 印张 · 629 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-54963-5

定价：69.00 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：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

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

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：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，工业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，因此，其编程和操作是工业机器人操作、调试、维修人员必须掌握的基本技能。

本书不仅详细阐述了焊接（点焊和弧焊）、搬运、通用三大类常用机器人的基本命令和作业命令的编程格式、编程要点和应用技巧，系统介绍了工业机器人手动操作、示教编程、再现运行的方法和步骤；而且，还对变量编程、平移编程，作业文件编制等高层次编程技术，以及系统设置、参数设定、硬件配置、运行监控、故障诊断与维修、数据备份与恢复等高层次调试维修操作技术进行了全面、深入的说明，并提供了丰富的实例；它可为企业工业机器人设计、使用、调试、维修人员及高校相关专业师生提供参考。

第1章介绍了机器人的产生、发展、分类；工业机器人的组成、特点和技术性能；工业机器人的技术发展简况、主要生产企业及产品情况等。

第2章详细阐述了工业机器人基本命令的编程格式、编程要点、应用技巧；对变量编程、平移编程等高层次编程技术进行了全面说明，并提供了丰富的程序实例。

第3章对点焊机器人作业命令的编程格式、编程要点，作业文件的编制方法进行了详细阐述；对多点连续焊接、电极修磨与检测、工件搬运等高层次编程技术进行了系统说明，并提供了完整的程序实例。

第4章对弧焊机器人作业命令的编程格式、编程要点，作业文件的编制方法进行了详细阐述；对渐变焊接、摆焊焊接等高层次编程技术进行了系统说明，并提供了完整的程序实例。

第5章对搬运、通用机器人作业命令的编程格式、编程要点，作业文件的编制方法进行了详细阐述；对输入/输出信号功能与要求、作业命令与控制信号间的关系等高层次编程需要涉及的内容进行了深入说明，并提供了完整的程序实例。

第6章系统介绍了工业机器人的示教器使用，安全操作、手动操作、示教编程、命令编辑等基本操作的方法和步骤，并对示教条件设定等高层次操作技术进行了详细说明。

第7章系统介绍了工业机器人的程序编辑操作，速度修改、程序点检查及试运行、再现运行等基本操作的方法和步骤，并对变量编辑、程序的平移和镜像转换、程序点调整等高层次操作技术进行了详细说明。

第8章对工业机器人的原点设定、工具文件设定、高级安装设定、用户坐标系设定、运动保护设定等高层次调试操作技术进行了详细说明。

第9章对工业机器人的示教器设置、系统参数设定与硬件配置、系统数据保存恢复和初始化、运行监控、系统报警与故障处理等高层次维修操作技术进行了详细说明。

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

本书的编写参阅了安川公司的技术资料，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 工业机器人概述 1	2.5 变量和平移命令编程与实例 63
1.1 机器人的产生与发展 1	2.5.1 变量的分类与使用 63
1.1.1 机器人的产生 1	2.5.2 变量读写命令编程实例 65
1.1.2 机器人的发展 3	2.5.3 变量运算命令编程实例 69
1.2 机器人及其分类 7	2.5.4 变量转换命令编程实例 73
1.2.1 机器人的分类 7	2.5.5 平移命令编程实例 77
1.2.2 服务机器人概况 8	第3章 点焊机器人作业命令编程 80
1.2.3 工业机器人概况 11	3.1 焊接机器人概述 80
1.3 工业机器人及产品 12	3.1.1 焊接的基本方法 80
1.3.1 技术发展与产品应用 12	3.1.2 焊接机器人及应用 81
1.3.2 主要企业及产品 14	3.2 机器人点焊系统 85
1.4 工业机器人的技术特性 18	3.2.1 电阻焊原理与工具 85
1.4.1 工业机器人的组成 18	3.2.2 机器人点焊系统 86
1.4.2 工业机器人的特点 21	3.3 点焊作业文件的编制 88
1.4.3 工业机器人的结构形态 23	3.3.1 控制信号与作业命令 88
1.4.4 工业机器人的技术参数 26	3.3.2 焊机特性文件编制和 I/O 设定 92
第2章 工业机器人基本命令编程 33	3.3.3 焊钳特性文件编制 95
2.1 工业机器人编程要点 33	3.3.4 焊钳开合和手动焊接设定 99
2.1.1 程序结构与实例 33	3.3.5 电极参数和TCP点设定 101
2.1.2 控制轴组与坐标系 36	3.4 点焊作业命令编程与实例 104
2.1.3 命令分类与使用条件 40	3.4.1 点焊命令编程实例 104
2.2 移动命令的编程与实例 44	3.4.2 连续焊接命令编程实例 107
2.2.1 编程格式与要求 44	3.4.3 空打命令与拓展应用实例 111
2.2.2 编程技巧与实例 48	3.4.4 焊钳更换命令编程实例 115
2.3 输入/输出命令编程与实例 51	第4章 弧焊机器人作业命令编程 118
2.3.1 I/O 信号及功能 51	4.1 机器人弧焊系统 118
2.3.2 编程格式与要求 53	4.1.1 弧焊原理与方法 118
2.3.3 编程实例 56	4.1.2 机器人弧焊系统 119
2.4 程序控制命令编程与实例 58	4.2 弧焊系统配置文件的编制 123
2.4.1 执行控制命令编程实例 58	4.2.1 弧焊控制与作业命令 123
2.4.2 程序转移命令编程实例 61	

4.2.2 焊机特性文件编制	129	6.4 机器人的示教编程	213
4.2.3 弧焊辅助及管理文件编制 ...	132	6.4.1 示教条件及其设定	213
4.3 弧焊作业命令编程实例	136	6.4.2 程序创建和程序名输入	216
4.3.1 引弧命令编程实例	136	6.4.3 移动命令输入操作	218
4.3.2 熄弧命令编程实例	141	6.4.4 作业命令输入操作	221
4.3.3 焊接条件设定命令编程 实例	145	6.5 命令编辑操作	225
4.3.4 渐变命令编程实例	146	6.5.1 程序的编辑设置与搜索	225
4.3.5 弧焊监控命令编程实例	149	6.5.2 移动命令的编辑	229
4.4 摆焊及摆焊命令编程实例	152	6.5.3 其他命令的编辑	234
4.4.1 摆焊要求与摆焊参数	152	6.5.4 程序暂停及点重合命令 编辑	236
4.4.2 摆焊命令编程实例	157	第7章 程序编辑和再现运行	239
4.4.3 摆焊文件编制与摆焊禁止 ...	158	7.1 程序的编辑操作	239
第5章 搬运、通用机器人作业 命令编程	162	7.1.1 程序复制、删除和重命名 ...	239
5.1 搬运机器人概述	162	7.1.2 注释编辑和程序编辑禁止 ...	242
5.1.1 搬运机器人及应用	162	7.1.3 程序块剪切、复制和粘贴 ...	244
5.1.2 机器人搬运系统	166	7.2 速度修改、程序点检查与 试运行	248
5.2 搬运作业命令编程实例	171	7.2.1 移动速度的批量修改	248
5.2.1 控制信号与作业命令	171	7.2.2 程序点检查与程序试运行 ...	250
5.2.2 搬运命令与编程实例	173	7.3 变量的编辑操作	251
5.3 通用机器人的应用与组成	176	7.3.1 数值及文字型变量的编辑 ...	251
5.3.1 通用机器人及应用	176	7.3.2 位置型变量的编辑	254
5.3.2 机器人加工系统	177	7.4 再现方式与运行条件设定	257
5.3.3 机器人涂装系统	179	7.4.1 主程序设置与调用	257
5.4 通用作业命令编程实例	181	7.4.2 再现显示、速度及运行 方式设定	258
5.4.1 控制信号与作业命令	181	7.4.3 操作条件及特殊运行设定 ...	262
5.4.2 工具启/停命令编程实例	184	7.4.4 程序的平移转换设定	265
第6章 机器人手动及示教编程操作	186	7.4.5 程序的镜像转换设定	268
6.1 示教器及功能	186	7.4.6 程序点的调整 (PAM 设定)	270
6.1.1 示教器的结构与组成	186	7.5 程序的再现运行	274
6.1.2 操作面板与按键	188	7.5.1 再现运行的操作	274
6.1.3 显示器及显示内容	193	7.5.2 预约启动运行	276
6.2 机器人的安全操作	197	第8章 控制系统的功能设定	282
6.2.1 开/关机与基本信息显示	197	8.1 机器人的原点设定	282
6.2.2 安全模式及设定	199	8.1.1 绝对原点的设定	282
6.3 机器人的手动操作	202	8.1.2 第二原点的设定	286
6.3.1 控制轴组及坐标系选择	202	8.1.3 作业原点的设定	288
6.3.2 关节坐标系点动操作	205	8.2 工具文件设定	289
6.3.3 其他坐标系点动操作	208		
6.3.4 工具的点动定向操作	210		



8.2.1	工具文件的显示和编辑	289	9.2.2	控制系统的 I/O 配置	331
8.2.2	工具控制点及坐标系设定	292	9.2.3	控制系统的基座轴配置	333
8.2.3	工具控制点的示教与确认	294	9.2.4	控制系统的工装轴配置	337
8.3	机器人高级安装设定	297	9.3	系统数据的保存、恢复和初始化	341
8.3.1	工具重量、重心、惯量的设定	297	9.3.1	外部存储器的安装与使用	341
8.3.2	机器人安装与载荷设定	300	9.3.2	文件夹及其设定	343
8.4	用户坐标系的设定	302	9.3.3	文件的保存与安装	345
8.4.1	用户坐标系及设定要点	302	9.3.4	系统备份与恢复	347
8.4.2	用户坐标系的示教设定	304	9.3.5	系统初始化操作	351
8.5	机器人的运动保护设定	305	9.4	系统状态的监控操作	352
8.5.1	软极限及硬件保护的设定与解除	305	9.4.1	I/O 监控、命名与输出强制	352
8.5.2	作业干涉区的设定与删除	309	9.4.2	伺服运行状态监控	355
8.5.3	碰撞检测功能的设定与解除	315	9.5	系统报警与故障处理	357
9.5.1	报警显示、分类及处理	357	9.5.1	报警显示、分类及处理	357
9.5.2	操作错误的显示与处理	359	9.5.2	操作错误的显示与处理	359
9.5.3	模块工作状态指示	361	9.5.3	模块工作状态指示	361
第 9 章	控制系统的调试与维修	317	附录		365
9.1	示教器显示与操作设置	317	附录 A	不同安全模式的菜单显示表	365
9.1.1	示教器显示页面的设置	317	附录 B	DX100 常用系统参数及索引表	368
9.1.2	日历、管理时间及再现速度设定	321			
9.1.3	示教器快捷操作键的定义	323			
9.2	系统参数设定与硬件配置	328			
9.2.1	系统参数的显示与设定	328			

第 1 章

工业机器人概述

1.1 机器人的产生与发展

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、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) 1921 年创作的剧本《Rossumovi univerzální roboti》(罗萨姆的万能机器人, 简称 R. U. R), 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) 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, 又补充了在“机器人学三原则”之上的“0 原则”, 即

原则 0: 机器人必须保护人类的整体利益不受伤害, 其他三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, 但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

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（阿尔贡国家实验室）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）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·恩盖尔柏格）建立了 Unimation 公司，并利用 George Devol 的专利技术，于 1959 年率先研制出如图 1.1-1 所示的 Unimate 工业机器人，开创了机器人发展的新纪元。

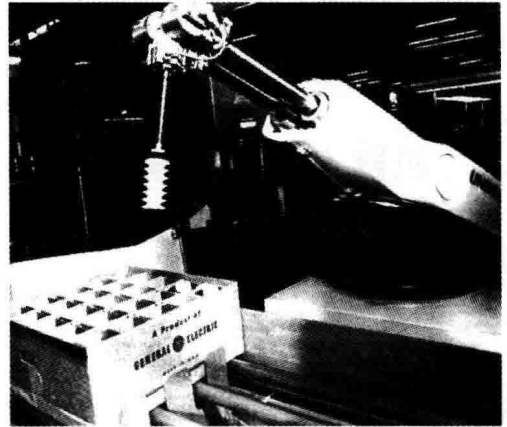


图 1.1-1 Unimate 工业机器人

Joseph F. Engelberger 对世界机器人工业的发展做出了杰出的贡献，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 公司（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于世界领先水平。

3. 机器人的定义

由于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、世所公认的严格定义。

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”。而作为机器人大国的日本，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”；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/T12643—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。科学技术对未来是无限开放的, 最新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, 都已超出了传统工业机器人的范畴。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。

1.1.2 机器人的发展

1. 技术发展水平

机器人最早应用于工业领域, 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 (first generation robots) 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。

第一代机器人所使用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 (second generation robots) 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。

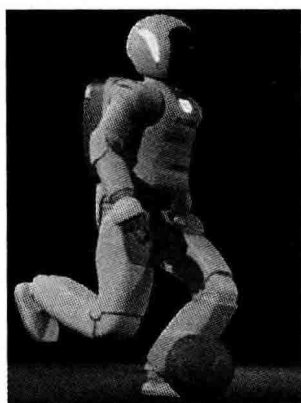
第二代机器人已具备一定的感知能力和简单的推理能力, 故又称感知机器人或低级智能机器人, 其中的部分技术已在焊接工业机器人及服务机器人产品上实用化。



3) 第三代机器人：第三代机器人 (third generation robots) 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 1.1-2a 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 1.1-2b 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，柔和地能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 1.1-2 第三代机器人

机器人问世以来，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。目前，世界主要机器人生产制造国的研发、应用情况如下：

2. 美国的机器人

美国是机器人的发源地，各方面技术均领先全世界。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球占有绝对优势。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、智能机器人的军事机器人、场地机器人研发。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。

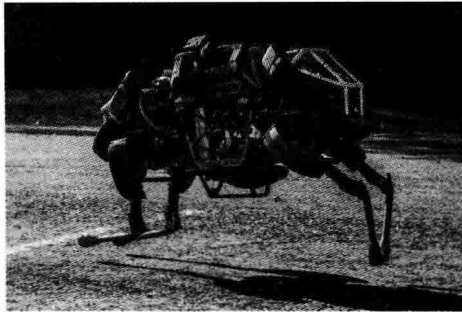
美国在军事机器人 (Military Robot) 方面的研究水平遥遥领先于其他国家，无论在基础技术研究、系统开发、生产配套方面，或是在技术转化、实战应用方面等都具有显著的优势，产品的研发与应用已涵盖陆、海、空、天等诸多兵种。Boston Dynamics (波士顿动力，现已被谷歌公司并购) 公司、Lockheed Martin (洛克希德马丁) 公司、iRobot 公司等，均为世界闻名的军事机器人研发制造企业。美国现有的军事机器人产品包括用于监视和勘察的无人驾驶飞行器、用于深入

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。

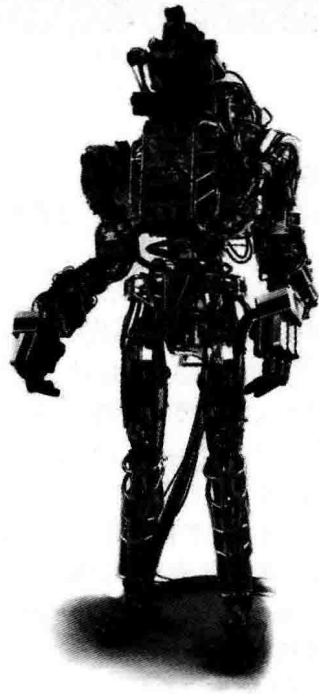
例如，美国的“哨兵”机器人不但能识别声音、烟雾、风速、火等数据；而且还可说 300 多单词，并向可疑目标发出口令，如目标不能正确回答，便会迅速、准确地瞄准和射击。再如，Boston Dynamics（波士顿动力）公司研制的 BigDog（大狗）系列机器人的军用产品 LS3（Legged Squad Support Systems，又名阿尔法狗）（见图 1.1-3），重达 1250lb（约 570kg），可在搭载 400lb（约 181kg）重物情况下，连续行走 20mile（约 32km），并能穿过复杂地形、应答士官指令；WildCat（野猫）机器人则能在各种地形上，以 25km/h 以上的速度奔跑跳跃；而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。



a) BigDog - LS3



b) WildCat



c) Atlas

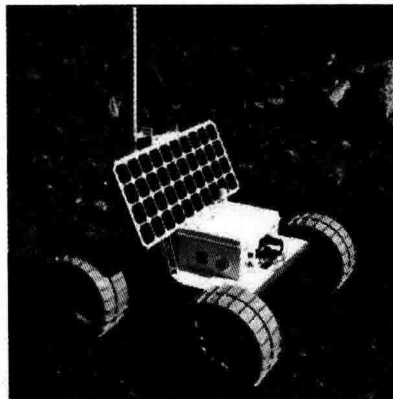
图 1.1-3 美国的军事机器人

美国的场地机器人（Field Robots）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”号火星探测器已着陆火星，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（机遇号）两个火星探测器，并于 2004 年 1 月先后着陆火星表面，它可在地面的遥控下，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，又成功发射了如图 1.1-4a 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 日安全着陆火星，开启了人类探寻火星生命元素的历程；图 1.1-4b 所示为谷歌公司最新研发的 Andy（安迪号）月球车。



a) Curiosity火星车



b) Andy月球车

图 1.1-4 美国的场地机器人

3. 日本的机器人

日本目前在工业机器人及家用服务、护理机、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、安装数量世界领先的地位。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、伺服电动机、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，政府每年都投入巨资用于服务机器人的研发，如前述的 HONDA 公司 Asimo 机器人、Riken Institute 的 Robear 护理机器人等家用服务机器人的技术水平均居世界前列。

4. 德国的机器人

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，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，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、按声控或手势的要求进行自我学习。

5. 中国的机器人

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

年的销量为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。

高端装备制造产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，有望在今后一段时期得到快速发展。

1.2 机器人及其分类

1.2.1 机器人的分类

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三种方式进行分类。

1) 按控制系统水平分类：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，有关内容可参见本书第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，该类机器人目前尚处于实验和研究阶段。

2. 应用分类

应用分类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。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，本书参照国际机器人联合会（IFR）的相关定义，根据机器人的应用环境，将机器人分为工业机器人和服务机器人两类；前者用于环境已知的工业领域；后者用于环境未知的服务领域。如进一步细分，目前常用的机器人，基本上可分为图 1.2-1 所示的几类。



图 1.2-1 机器人的分类

1) 服务机器人：服务机器人（Personal Robot, PR）是除工业机器人之外、服务于人类非生产性活动的机器人总称，它在机器人中的比例高达 95% 以上。根据 IFR 的定义，服务机器人是一种半自主或全自主工作的机械设备，它能完成有益于人类健康的服务工作，但不直接从事工业品的生产。

服务机器人的涵盖范围更广，简言之，除工业生产用的机器人外，其他所有的机器人都属于服务机器人的范畴。因此，人们根据其用途，将服务机器人分为个人/家庭服务机器人（Personal/Domestic Robots）和专业服务机器人（Professional Service Robots）两类，在此基础上还可对每类进行细分。

2) 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，但部分工业机器人（如焊接、装配等）已能通过图像来识别、判断来规划或探测途径，对外部环境具有了一定的适应能力，初步具备了第二代感知机器人的一些功能。

工业机器人的涵盖范围同样很广，根据其用途和功能，又可分为加工、装配、搬运、包装四大类；在此基础上，还可对每类进行细分。

以上两类产品研发、应用的简要情况如下。

1.2.2 服务机器人概况

1. 基本情况

服务机器人是服务于人类非生产性活动的机器人总称。从控制要求、功能、特点等方面看，

服务机器人与工业机器人的本质区别在于，工业机器人所处的工作环境在大多数情况下是已知的，因此，利用第一代机器人技术已可满足其要求；然而，服务机器人所面临的工作环境在绝大多数场合是未知的，故都需要使用第二代、第三代机器人技术。

从行为方式上看，服务机器人一般没有固定的活动范围和规定的动作行为，它需要有良好的自主感知、自主规划、自主行动和自主协同等方面的能力，因此，服务机器人较多地采用仿人或生物、车辆等结构形态。

早在1967年，在日本举办的第一届机器人学术会议上，人们就提出了两种描述服务机器人特点的代表性意见。一种意见认为服务机器人是一种“具有自动性、个体性、智能性、通用性、半机械半人性、移动性、作业性、信息性、柔性、有限性等特征的自动化机器”；另一种意见认为具备如下三个条件的机器，可称为服务机器人：

- 1) 具有类似人类的脑、手、脚等功能要素；
- 2) 具有非接触和接触传感器；
- 3) 具有平衡觉和固有觉的传感器。

当然，鉴于当时的情况，以上定义都强调了服务机器人的“类人”含义，突出了由“脑”统一指挥、靠“手”进行作业、靠“脚”实现移动；通过非接触传感器和接触传感器，使机器人识别外界环境；利用平衡觉和固有觉等传感器感知本身状态等基本属性，但它对服务机器人的研发仍具有参考价值。

服务机器人的出现虽然晚于工业机器人，但由于它与人类进步、社会发展、公共安全等诸多重大问题息息相关，应用领域众多、市场广阔，因此，其发展非常迅速、潜力巨大。有国外专家预测，在不久的将来，服务机器人产业可能成为继汽车、计算机后的另一新兴产业。据国际机器人联合会（IFR）2013年世界服务机器人统计报告等有关统计资料显示，目前已有20多个国家在进行服务型机器人的研发，有40余种服务型机器人已进入商业化应用或试用阶段。2012年全球服务机器人的总销量约为301.6万台，约为工业机器人（15.9万台）的20倍；其中，个人/家用服务机器人的销量约为300万台，销售额约为12亿美元；专业服务机器人的销量为1.6万台，销售额为34.2亿美元。

在服务机器人中，个人/家用服务机器人（Personal/Domestic Robots）为大众化、低价位产品。在专业服务机器人中，则以涉及公共安全的军事机器人（Military Robot）、场地机器人（Field Robots）、医疗机器人的产量较大。

在服务机器人研发领域，美国不但在军事、场地、医疗等高科技专业服务机器人的研究上遥遥领先于其他国家；而且在个人/家用服务机器人的研发上，同样占有绝对的优势，其服务机器人总量约占全球服务机器人市场的60%。此外，欧洲的德国、法国也是服务机器人的研发和使用大国；日本的个人/家用服务机器人产量约占全球市场的50%。我国在服务机器人领域的研发起步较晚，直到2005年才开始初具市场规模，总体水平与发达国家相比存在很大差距；目前，我国的个人/家用服务机器人主要有吸尘、教育娱乐、保安、智能玩具等；专用服务机器人主要有医疗及部分军事、场地机器人等。

2. 个人/家用机器人

个人/家用服务机器人（Personal/Domestic Robots）泛指为人们日常生活服务的机器人，包括家庭作业机器人、娱乐休闲机器人、残障辅助机器人、住宅安全机器人等。个人/家用服务机器人产业是被人们普遍看好的未来具备发展潜力的新兴产业之一。

在个人/家用服务机器人中，家庭作业机器人和娱乐休闲机器人的产量占个人/家用服务机器人总量的90%以上；残障辅助机器人、住宅安全机器人的普及率目前还较低，但市场前景被人



们普遍看好。

家用清洁机器人是家庭作业机器人中最早被实用化和最成熟的产品之一。早在 20 世纪 80 年代, 美国已经开始吸尘机器人的研究, iRobot 公司是目前家用服务机器人行业公认的领先企业, 其产品技术先进、市场占有率全球领先; 德国的 Karcher 公司也是知名的家庭作业机器人生产商, 它在 2006 年研发的 Re3000 家用清洁机器人是世界上率先能够自行完成所有家庭地面清洁工作的家用清洁机器人; 此外, 美国的 Neato、Mint, 日本的 SHINK、PANASONIC (松下), 韩国的 LG、三星等公司也都是全球较知名的家用清洁机器人研发、制造企业。在我国, 由于家庭经济收入和发达国家的差距巨大, 加上传统文化的影响, 大多数家庭的作业服务还是由自己或家政服务人员承担, 所使用的设备以传统工具和普通吸尘器、洗碗机等简单设备为主, 家庭作业服务机器人的使用率非常低。

3. 专业服务机器人

专业服务机器人 (Professional Service Robots) 的涵盖范围非常广, 简言之, 除工业生产用的工业机器人和为人们日常生活服务的个人/家用机器人外, 其他的机器人均属于专业服务机器人, 如军事、场地和医疗机器人等。

1) 军事机器人: 军事机器人 (Military Robots) 是为了军事目的而研制的自主式、半自主式或遥控的智能化武器装备, 它可用来帮助或替代军人, 完成战术或战略任务。军事机器人具备全方位、全天候的作战能力和极强的战场生存能力, 可在超过人类承受能力的恶劣环境, 或在遭到毒气、冲击波、热辐射等袭击时, 继续进行工作。军事机器人也不存在人类的恐惧心理, 可严格地服从命令、听从指挥, 有利于战局的掌控。在未来战争中, 机器士兵完全可能成为军事行动中的主力。

军事机器人研制早在 20 世纪 60 年代就开始, 产品已从第一代的遥控操作器, 发展到了现在的第三代智能机器人。目前, 世界各国的军用机器人已达上百个品种, 其应用涵盖侦察、排雷、防化、进攻、防御及后勤保障等各方面。用于监视、勘察、获取危险领域信息的无人驾驶飞行器 (UAV) 和地面车 (UGV)、具有强大运输功能和精密侦察设备的机器人武装战车 (ARV)、在战斗中担任补充作战物资的多功能后勤保障机器人 (MULE) 是军事机器人的主要产品。

美国的军事机器人应用已涵盖陆、海、空、天等诸兵种。据报道, 美军已装配了超过 7500 架的无人机和 15000 个的地面机器人, 目前正在大量研制和应用无人作战系统、智能机器人集成作战系统, 以系统提升陆、海、空军事实力。此外, 德国的智能地面无人作战平台、反水雷及反潜水下无人航行体的研究和应用; 英国的战斗工程牵引车 (CET)、工程坦克 (FET)、排爆机器人的研究和应用; 法国的警戒机器人和防空御机器人、无人侦察车、野外快速巡逻机器人的研究和应用; 以色列的机器人自主导航车、“守护者 (Guardium)” 监视与巡逻系统、步兵城市作战用的便携式机器人的研究和应用等, 都已达到世界领先水平。

2) 场地机器人: 场地机器人 (Field Robots) 是除军事机器人外, 其他可大范围运动的服务机器人的总称。场地机器人多用于科学研究和公共事业服务, 如太空探测、水下作业、危险作业 (如防爆、排雷)、消防救援、园林作业等。

美国的场地机器人研究始于 20 世纪 60 年代, 其产品已遍及空间、陆地和水中, 从 1967 年的海盗号火星探测器, 到 2003 年的 Spirit MER - A (勇气号) 和 Opportunity (机遇号) 火星探测器、2011 年的 Curiosity (好奇号) 核动力驱动的火星探测器, 都无一例外地代表了全球空间机器人研究的水平。此外, 俄罗斯和欧盟在太空探测机器人等方面的研究和应用也居世界领先水平; 例如, 俄罗斯早期的空间站飞行器对接、燃料加注机器人; 德国于 1993 年研制、由哥伦比亚号航天飞机携带升空的 ROTEX 远距离遥控机器人等产品, 都代表了当时的空间机器人技术水平。