



高等学校应用型新工科创新人才培养计划指定教材
高等学校智能制造与工业信息化类专业“十三五”课改规划教材

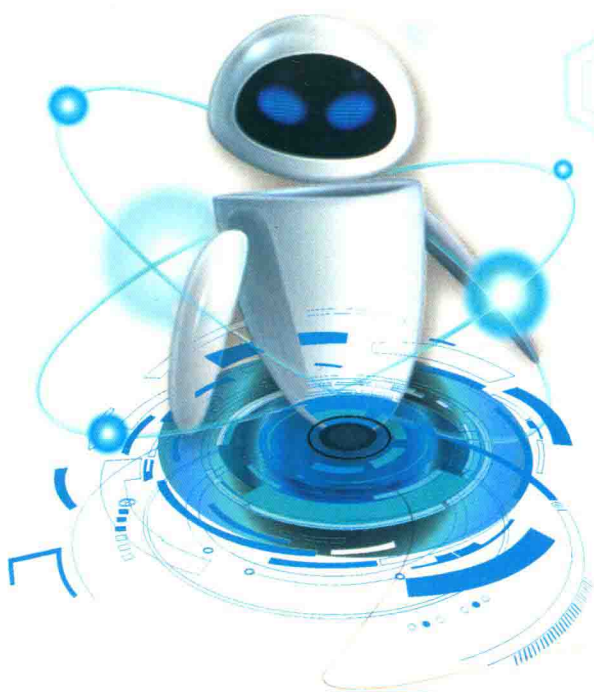


机器人 控制与应用编程

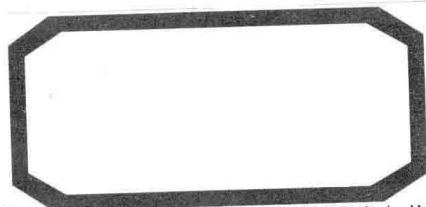
青岛英谷教育科技有限公司 编著

立体化教辅

- ▶ 教学PPT
- ▶ 教学大纲
- ▶ 考试大纲
- ▶ 开源代码
- ▶ 配套设备
- ▶ 在线题库
- ▶ 视频讲解



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

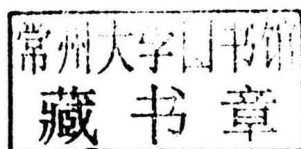


高等学校应用型新工科创新人才培养计划指定教材

高等学校智能制造与工业信息化类专业“十三五”课改规划教材

机器人控制与应用编程

青岛英谷教育科技有限公司 编著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

机器人是先进制造业的关键支撑装备,其研发和应用是衡量一个国家创新和高端制造发展水平的重要标志,对推动工业转型升级和改善人民生活水平具有重要意义。

本书以教学机器人和 ABB 工业机器人为例,深入浅出地讲解了两种典型机器人控制系统的整体概念和编程方法。全书共分为 7 章,第 1 章简要介绍了机器人的发展历史和基础结构;第 2、3 章结合实例介绍了教学机器人的基础知识和编程方法;第 4、5 章介绍了机器人的运动基础和轨迹仿真;第 6、7 章结合实际案例介绍了工业机器人的基础知识和编程方法。理论讲解结合实践练习,帮助读者迅速掌握机器人控制系统开发的必备知识,全面提高实际动手能力。

本书内容精炼、实用性强,可作为高校智能制造专业的教材,也可作为有志于从事机器人行业的读者提供理论参考。

图书在版编目(CIP)数据

机器人控制与应用编程/青岛英谷教育科技有限公司编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2018.2

ISBN 978-7-5606-4833-0

I. ① 机… II. ① 青… III. ① 机器人控制 ② 机器人程序设计 IV. ① TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 015565 号

策 划 毛红兵

责任编辑 买永莲

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 22

字 数 520 千字

印 数 1~3000 册

定 价 57.00 元

ISBN 978-7-5606-4833-0/TP

XDUP 5135001-1

如有印装问题可调换

高等学校智能制造与工业信息化类专业 “十三五”课改规划教材编委会

主 编 王 燕

副主编 黄新平 韩耀振

编 委 李言照 孙如军 武玉强 于振文

钟利军 许建平 连政国 明 哲

叶天迟 罗红宇 油海东 黄金明

解福祥 雷立群 罗忠宝 陈 莉

王长春 刘 君 夏自祥 张 利

陈 洁

❖❖❖ 前 言 ❖❖❖

随着以智能制造为代表的新一轮产业变革的迅猛发展，高端智能装备成为制造业升级改造的主要助力。为加速我国制造业的转型升级、提质增效，国务院提出了“中国制造2025”战略目标，明确将智能制造作为主攻方向，致力于加速培育我国新的经济增长动力，力争抢占新一轮产业竞争的制高点。

备受关注的机器人无疑是先进制造业的关键支撑设备。工信部、发改委、财政部联合印发的《机器人产业发展规划(2016—2020 年)》将机器人作为重点发展领域作了进一步详细部署，意在尽快打造中国制造新优势，加快制造强国建设。当前形势下，旧的增长模式不可持续，工业的转型升级意义重大，机器人则是这场变革的关键。工信部部长苗圩曾指出，要以工业机器人为抓手，通过工业机器人在工业领域的推广应用，提升我国工业制造过程的自动化和智能化水平。

当前，我国机器人市场正处于高速增长期。自 2013 年以来，我国已连续五年成为全球机器人第一大市场。伴随着劳动力成本的增加以及政策的推动，“机器换人”成为国内诸多制造企业升级改造的重要手段。历史表明，广泛的市场应用将带来技术的飞速提升。因此，我国的工业机器人虽然起步较晚，但是随着应用的不断扩大以及国家的各种政策支持，有望在未来进入国际先进行列。

发展机器人是大势所趋，行业前景广阔，但由于种种原因，目前该领域人才供求失衡严重：一方面，机器人厂商、系统集成商及加工制造业等求贤若渴；另一方面，人才供给严重不足，难以满足企业用人需求。究其原因，主要的，一是相对于近年来国内机器人产业的爆发性发展态势，高校、职校等的课程设置滞后，反应速度过慢；二是大机器人厂商有技术壁垒，虽然提供相关培训，但存在品牌针对性过强、配套设施不足、培训网点有限等缺陷，难以形成系统的教学流程和人才培养体系。这些因素在阻碍着中国机器人产业的进一步发展。

本书就是致力于解决上述两个问题的产物——根据机器人相关企业需求设置课程内容，并开发了相关配套设施(英谷教学机器人和工业机器人实训系统)，试图形成系统的机器人教学流程，着力增强动手实操能力，以为中国机器人产业的发展输送更多人才。

本书是面向高等院校智能制造专业、机器人专业方向的标准化教材，包含四个方面的内容：机器人的发展历史和基础知识、机器人运动学及逆运动学分析与仿真、教学机器人编程及 ABB 工业机器人编程和仿真。这四个方面的知识合理分布于整套教材，章节间衔接流畅，由浅入深，理论讲解结合实践练习，让读者既能对机器人控制系统有一个整体清晰的认识，又能具备基础编程能力，提高学以致用和解决实际问题的能力。

本书由青岛英谷教育科技股份有限公司编写，参与本书编写工作的有刘伟伟、刘洋、王一军、金跃云、孙锡亮、金成学、张玉星、王燕等，青岛农业大学的连政国、黄新平、刘君，以及潍坊学院、曲阜师范大学、济宁学院、济宁医学院等高校的教师。本书在编写

期间得到了各合作院校专家及一线教师的大力支持和协作，编者谨在此表示感谢。另外，在本书即将出版之际，编者要特别感谢给予我们开发团队以大力支持和帮助的领导及同事，感谢合作院校的师生给予我们的支持和鼓励，更要感谢开发团队每一位成员所付出的艰辛劳动。

由于编者水平所限，书中难免有错误或不当之处，读者在阅读过程中如有发现，可以通过邮箱(yinggu@121ugrow.com)与我们联系，以期不断完善。

本书编委会
2017 年 12 月

❖❖❖ 目 录 ❖❖❖

第 1 章 机器人概述1	2.3.3 上位机控制功能.....46
1.1 机器人的起源与发展.....2	2.3.4 上位机通信演示.....48
1.1.1 机器人的发展历史.....2	2.4 开发环境搭建.....49
1.1.2 机器人的定义和特点.....5	2.4.1 MDK 安装步骤.....50
1.1.3 机器人的分类.....6	2.4.2 安装芯片支持包.....54
1.1.4 机器人的发展现状.....11	2.4.3 创建程序模板.....55
1.1.5 机器人的发展趋势.....14	2.4.4 使用固件库.....58
1.2 机器人的结构.....16	2.4.5 MDK 选项设置页.....60
1.2.1 机械系统.....16	2.4.6 仿真器 ST-LINK 的连接和驱动.....63
1.2.2 控制系统.....17	本章小结.....64
1.2.3 驱动系统.....19	本章练习.....64
1.2.4 感知系统.....19	第 3 章 教学机器人编程65
1.2.5 机器人与人工智能.....21	3.1 PWM 控制信号.....66
1.3 工业机器人.....22	3.2 控制系统编程.....67
1.3.1 工业机器人的结构.....23	3.2.1 单片机基础.....67
1.3.2 工业机器人主要技术参数.....25	3.2.2 定时器的 PWM 输出模式.....69
1.3.3 常见工业机器人及其应用.....27	3.2.3 舵机控制编程.....72
1.3.4 工业机器人的发展前景.....29	3.2.4 代码优化.....85
1.3.5 工业机器人的知识体系.....31	3.2.5 舵机转动演示.....92
本章小结.....32	3.2.6 多舵机并行.....93
本章练习.....32	3.2.7 舵机并行演示.....97
第 2 章 教学机器人基础33	3.3 外设与接口.....98
2.1 教学机器人实验平台.....35	3.3.1 指示灯.....98
2.1.1 机械臂.....35	3.3.2 按键.....101
2.1.2 运动元件.....36	3.3.3 USART 串行接口.....104
2.1.3 执行单元.....40	3.3.4 存储芯片.....115
2.1.4 控制方式.....41	3.3.5 I ² C 接口.....117
2.1.5 控制单元.....42	3.4 与上位机通信.....130
2.2 教学机器人操作.....43	3.4.1 通信协议.....130
2.3 上位机控制程序.....43	3.4.2 通信协议处理流程.....132
2.3.1 上位机程序安装.....45	3.5 函数列表.....133
2.3.2 上位机控制软件界面.....46	本章小结.....135

本章练习136

第 4 章 机器人运动基础137

4.1 机器人坐标系138

4.2 机器人坐标变换139

4.2.1 齐次坐标139

4.2.2 平移变换140

4.2.3 旋转变换142

4.2.4 坐标系变换的一般情况145

4.3 机器人连杆坐标系149

4.3.1 机器人连杆149

4.3.2 机器人连杆参数149

4.3.3 机器人连杆坐标系150

4.3.4 连杆坐标系的建立步骤152

4.3.5 教学机器人连杆坐标系的确定153

本章小结156

本章练习156

第 5 章 机器人轨迹与仿真157

5.1 机器人轨迹分析158

5.1.1 运动学正问题158

5.1.2 教学机器人运动学正问题分析161

5.1.3 运动学正问题的 Matlab 分析163

5.1.4 教学机器人运动学正问题编程167

5.1.5 运动学逆问题171

5.1.6 教学机器人运动学逆问题分析176

5.1.7 运动学逆问题的 Matlab 分析180

5.1.8 教学机器人运动学逆问题编程181

5.1.9 ABB IRB 1200 机器人
运动学分析187

5.2 机器人运动分析192

5.2.1 矢量的速度和角速度表示方法192

5.2.2 刚体的运动描述193

5.2.3 连杆的运动描述196

5.2.4 雅可比矩阵200

5.2.5 教学机器人的雅可比矩阵203

5.2.6 机械臂静力分析204

5.2.7 速度和静力的笛卡尔变换207

5.3 机器人仿真与实时控制208

5.3.1 刚体加速度208

5.3.2 牛顿方程和欧拉方程209

5.3.3 牛顿-欧拉动力学方程211

5.3.4 拉格朗日方程217

5.3.5 动力学的 Matlab 分析219

本章小结223

本章练习224

第 6 章 工业机器人编程基础225

6.1 工业机器人编程226

6.1.1 控制系统编程226

6.1.2 编程方式227

6.1.3 离线编程软件230

6.1.4 离线编程语言235

6.2 开发环境配置238

6.2.1 安装 RobotStudio238

6.2.2 软件界面242

6.2.3 构建工作站243

6.3 Rapid 语言介绍252

6.3.1 Rapid 语言程序架构253

6.3.2 程序及声明253

6.3.3 数据与程序数据256

6.4 Rapid 数据类型257

6.4.1 原子型257

6.4.2 别名型258

6.4.3 记录型259

6.4.4 非值型263

6.4.5 组合数据类型265

6.4.6 信号相关的数据类型268

6.4.7 程序数据269

6.4.8 数组271

6.5 Rapid 语法基础272

6.5.1 表达式272

6.5.2 语句274

6.5.3 指令279

本章小结287

本章练习288

第 7 章 工业机器人编程实例289

7.1 基本概念290

7.1.1 运动方式290

7.1.2 手动模式291

7.1.3 工作模式294

7.1.4 工件坐标系	295	7.3.2 机器人轨迹	309
7.2 构建程序数据	295	7.3.3 逻辑指令	315
7.2.1 设定工具坐标系	296	7.3.4 I/O 编程	326
7.2.2 设定工件坐标系	297	7.3.5 程序仿真、调试和运行	338
7.2.3 设置载荷数据	305	本章小结	341
7.3 机器人编程实例	306	本章练习	341
7.3.1 程序创建及编辑	306	参考文献	342

第1章 机器人概述



本章目标

- 了解机器人的发展历史。
- 掌握机器人的定义、分类、特点。
- 掌握机器人的结构组成。
- 掌握工业机器人的主要技术参数。
- 了解常见工业机器人及其应用场合。



机器人是能够自动执行任务的机械装置，它能够取代或协助人类进行某些工作，是人类科学技术发展的综合性产物。广义上，一切能够模拟人或者其他生物行为的机械结构均能称为机器人，而不管它是否具有人的形态。

1.1 机器人的起源与发展

“机器人”(Robot)一词出自原捷克斯洛伐克剧作家卡雷尔·凯培克的《罗萨姆的万能机器人》(1920)一书。书中讲述了一个名为 Robot 的机器人，它能够不吃饭、不知疲倦地工作。随后，“机器人”一词开始在世界范围内流传起来。

当时，机器人仅存在于科幻小说中，而并未与人们的日常生活和工作相结合，但这体现了人们的一种愿望：希望能够创造出一种机器来代替人们工作，尤其是那些重复枯燥的工作。

1.1.1 机器人的发展历史

从广义的机械结构概念来讲，机器人的起源最早可追溯到 3000 多年前。早在我国西周时期就流传着艺妓(歌舞机器人)的故事。此外，春秋时期的木鸟、东汉时期的记里鼓车、三国时期的木牛流马等广为人知的机械产品，也可以归类到早期机器人的范畴。图 1-1 为复原的三国木牛图。

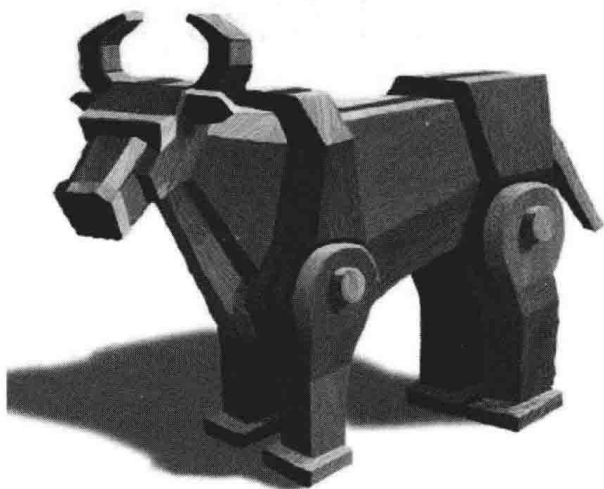


图 1-1 根据史书记载复原的三国时期木牛图

同时，国外也有一些国家早早开始了此类机器人的研究，早年的古希腊，后来的日本、法国、瑞士等国家均有丰富的相关成果。

在日本的江户时代，出现了各式各样的机械娃娃(见图 1-2)，也被称作傀儡娃娃。通过内部的齿轮、发条等机械装置，这些娃娃有的可以行走和鞠躬，有的能够射箭，还有的可以前手翻下楼梯。这些娃娃通常用于娱乐。



图 1-2 日本的傀儡娃娃及其内部构造

第二次世界大战之后,各国的工业进入快速发展期,随之而来的是繁重的体力劳动和危险度极高甚至对人体有害的工作,创造出一种机器代替人进行这种工作的需求变得更为强烈。在这样的背景下,1947年,美国研发出第一台遥控机械手,它能够代替工人完成核燃料的搬运和处理工作。

其后,随着电子技术的出现与发展,机器人技术逐渐受到重视。1962年,美国 AMF 公司生产出 VERSTRAN(万能搬运)机器人,它与 Unimation 公司生产的 Unimate(通用机械手)成为真正商业化的工业机器人。它们也被称为真正意义上的机器人,标志着机器人技术开始走向成熟。Unimate 机器人如图 1-3 所示。

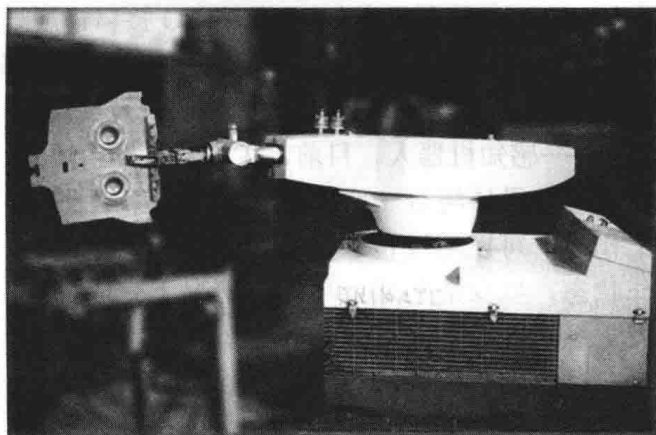


图 1-3 1961 年的 Unimate 机器人

相对于前面论及的广义机器人,这些机器人可称为狭义机器人,即现代机器人。本书所称的机器人,除非特别说明,均指现代机器人。

从第一台工业机器人诞生到目前为止,机器人的发展过程可分为三个阶段。第一阶段为示教再现机器人(可简称示教机器人)。它是一个由计算机控制的多自由度的机器人,主要运用机器人的示教再现功能,先由用户操控机器人完成操作任务(在这个过程中,机器人存储每个动作的位姿、运动等参数,并自动生成完成此任务的程序),然后,只需发送一个启动命令,机器人就可以精确地重复示教动作,完成全部操作步骤。

VERSTRAN 和 Unimate 都是示教再现机器人。



我国在 1977 年研制的第一台通用型工业机器人 JSS35, 也是示教再现机器人, 如图 1-4 所示。它的样子与 Unimate 机器人相似, 可用于工件上下料和搬运, 装上不同的专用工具还可用于焊接、喷漆及打磨毛刺等。JSS35 机器人曾用于二汽生产车间(中国第二汽车制造厂车身分厂, 二汽后来改名为东风汽车公司)的点焊作业。

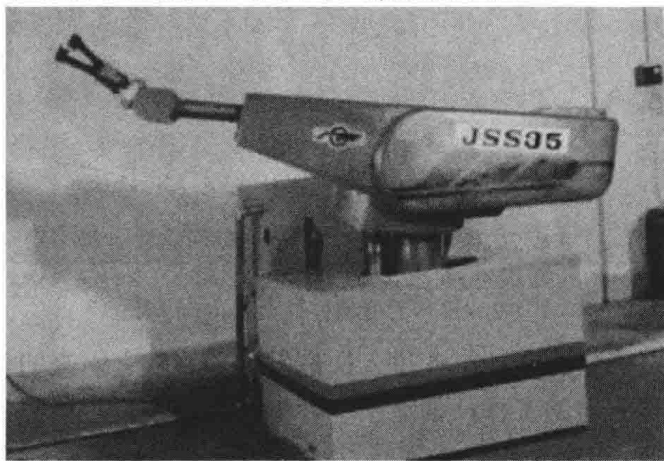


图 1-4 中国第一台示教再现机器人 JSS35

示教再现机器人的最大缺点是: 只能重复单一动作, 无法感知外界环境, 不能向控制系统产生反馈信号。

1973 年 ASEA 公司(机器人四大家族之一 ABB 公司的前身)推出了 IRB 6 机器人, 它是世界上第一台全电动微型处理器控制的机器人。IRB 6 的 S1 控制器使用了英特尔 8 位微处理器, 内存容量为 16 KB。控制器有 16 个数字 I/O 接口, 通过 16 个按键编程, 并具有 4 位数的 LED 显示屏。此后, 随着微电子技术及微型计算机(单片机)技术的发展, 机器人逐渐向多传感器智能控制方向进化, 其结构、控制系统及应用场景更加广泛。这也是机器人发展的第二个阶段——感知机器人。目前, 大多数机器人还处于第二阶段。

第二代感知机器人对外界环境有一定的感知能力, 具有听觉、视觉、触觉等感知功能。此类机器人在工作时, 可以通过传感器感知外界环境, 进而灵活调整自己的工作状态, 以保证在适应环境的情况下完成相应工作。例如, 具有视觉系统的机器人可以执行分拣任务, 具有障碍系统的机器人能够自动改变行进路径。青岛英谷教育科技股份有限公司自主研发的工业机器人实训系统 RI-A10, 即可通过工业级别摄像头实现视觉分拣的功能, 可扫描右侧二维码观看视频。



视觉分拣演示

近年来, 随着计算机技术和人工智能的发展, 智能化成为机器人新的发展方向。因此, 在感知机器人的基础上诞生了第三代机器人——智能机器人。它能够依靠人工智能的深度学习、自然语言处理等技术对所获取的外界信息进行独立的识别、推理、决策, 在不需要人为干预的情况下完成一些复杂的工作。这也是机器人发展的第三个阶段。

目前, 我们常见的智能机器人通常用于家庭陪护、餐厅服务以及教育教学, 它们一般具备人类的外形。但事实上, 只要有一个高度发达的“大脑”, 都可以称之为智能机器人, 而不必拘泥于具体的形态, 例如蛋形、动物形状, 甚至仅仅是一个程序或者一个算法。而这也引起了人们对机器人的重新定义和分类。图 1-5 为几种常见的智能机器人。

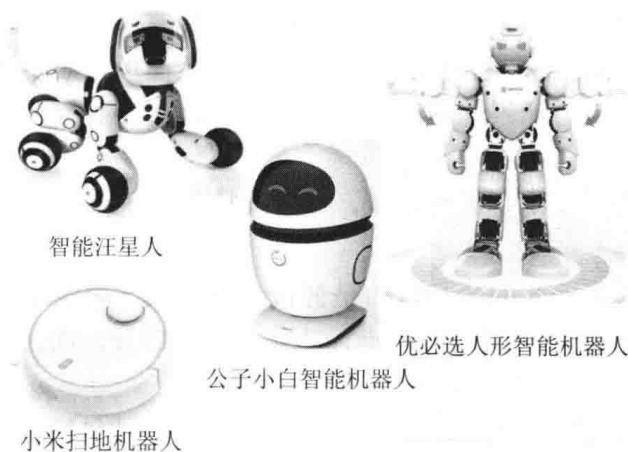


图 1-5 智能机器人的各种形态

综上所述，机器人的三个发展阶段及其特点如表 1-1 所示。

表 1-1 机器人的三个发展阶段及特点

发展阶段	特 点
第一阶段： 示教机器人	可精确地重复示教动作 无法感知环境 无法向控制系统反馈信号
第二阶段： 感知机器人	可通过传感器感知外界环境 可向控制系统反馈数据 可根据编程逻辑进行有限的互动
第三阶段： 智能机器人	有自主学习的能力 能够自主决策，完成复杂任务

1.1.2 机器人的定义和特点

到目前为止，机器人虽然尚未形成统一的定义，但国际上对于机器人的概念已逐渐趋于一致。总的来说，机器人被认定为是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器，它接受人类的指挥，可以运行预先设定的程序，也可以根据人工智能技术制定的原则行动，进而协助或者取代人类工作。

国际标准化组织(ISO)对机器人的定义包括：

- (1) 机器人的动作机构具有类似于人或其他生物体的某些器官的功能(肢体的感受等)。
- (2) 机器人具有通用性，工作种类多样，动作程序灵活易变。
- (3) 机器人具有不同程度的智能性，如记忆、感知、推理、决策、学习等。
- (4) 机器人具有独立性，完整的机器人系统在工作时可以不依赖于人的干预。

我国科学家对机器人的定义是：机器人是一种自动化的机器，所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能，如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力，是一种具有高级灵活性的自动化机器。

从以上机器人的定义可以看出，机器人主要是指具备传感器、智能控制系统和驱动系统这三个要素的机械结构，具有以下特点：



(1) 通用性：机器人在执行不同任务时，不需要修改其电气、机械特性。例如，在抓取不同形状的工件时，只需要更换机器人的末端执行器即可，而不需要更换机器人本体。

(2) 适应性：机器人可通过传感器感知外界环境确定自身位置，能够适应不同的外界环境。

(3) 可编程：机器人系统是柔性系统，即它允许根据不同环境条件进行再编程，特别适合于柔性制造系统。

(4) 拟人化：机器人产生的最初目的是替代人类完成一些重复而枯燥、危险性较高的工作，因此在结构上会包含类似人类行走、动作等功能部分，而且通过控制器、传感器等来模拟人类的大脑和感官，有极强的环境适应能力。

可见，机器人技术是一门综合性的技术，所涉及的领域包括控制、传感器、通信、机械等。机器人技术的发展必须依靠这些技术的发展，同时也会促进相关技术领域的发展。

未来，随着互联网技术和人工智能技术的发展，机器人仅通过智能控制系统便能够应用于社会的各个场景之中。随着机器人所涵盖范围的日趋广泛，其定义也可能会发生改变，一些之前并未被定义成机器人的设备，也将因为其更加智能而被纳入机器人的范畴，例如无人驾驶汽车、智能家电等。

再比如因人机围棋大战而名声大噪的 AlphaGo(见图 1-6)，只是一款谷歌开发的围棋类人工智能程序，通过深度学习算法，结合落子选择和棋局评估两个功能合作来下棋，却战胜了众多世界围棋冠军。未来 AlphaGo 还将与医疗结合，在医疗领域发挥重要作用。



图 1-6 计算机程序 AlphaGo

因此可以说，机器人的定义和特点也还在发展过程中，未来充满无数的想象和可能。

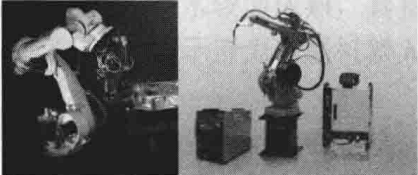
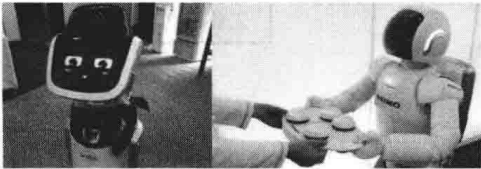
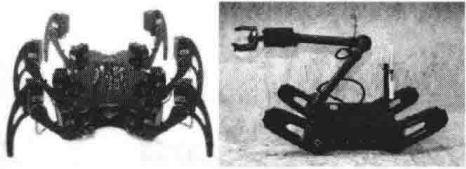
1.1.3 机器人的分类

机器人是 20 世纪人类最伟大的发明之一，在经历几十年的发展后，已取得了巨大的成就。目前，机器人的应用已不再局限于工业场景，而是涵盖了越来越多的技术领域。那么机器人应该如何分类呢？比较科学的方式是按照应用场景的不同来进行分类。

我国专家通常将机器人分为工业机器人、服务机器人和特种机器人三大类，如表 1-2 所示。下面加以详细说明。



表 1-2 我国的机器人分类

分类	说 明	示 例
工业机器人	特指用于工业领域的机器人，多数工业机器人的结构是仿照手臂、有不同关节数的机械手	
服务机器人	特指为人提供服务的机器人，比如扫地机器人、餐厅服务机器人以及医疗机器人等	
特种机器人	用于非制造业并服务于人类的有特殊用途的机器人，比如军事机器人、探险机器人、水下机器人等	

1. 工业机器人

工业机器人是用于工业领域的多关节机械手或多自由度的机器装置。它可以接受操作者的指挥，也可以按照预先编写好的程序运行。自从第一台工业机器人问世以来，工业机器人技术及产品发展迅速，已逐渐成为柔性制造系统、智能工厂、计算机集成制造系统中不可或缺的高端智能装备。我们通过图 1-7 来看看几种常见的工业机器人。

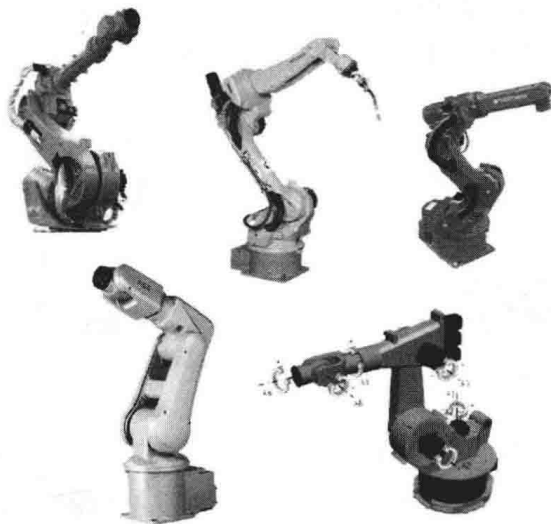


图 1-7 常见的工业机器人

工业机器人的种类繁多，分类方式也多种多样，比较常见的有按作业用途分类，按手臂的运动形式、关节结构类型以及按控制方式分类等。

按照作业用途，常见的工业机器人可分为五大类，如图 1-8 所示。



图 1-8 工业机器人分类

按手臂的运动形式，工业机器人又可分为四类：

- (1) 直角坐标型：手臂沿三个直角坐标系移动。
- (2) 圆柱坐标型：手臂可做升降、回转和伸缩动作。
- (3) 球坐标型：手臂可做回转、俯仰和伸缩动作。
- (4) 多关节型：手臂具有多个转动关节。

这四种类型的工业机器人，其结构样式如图 1-9 所示。

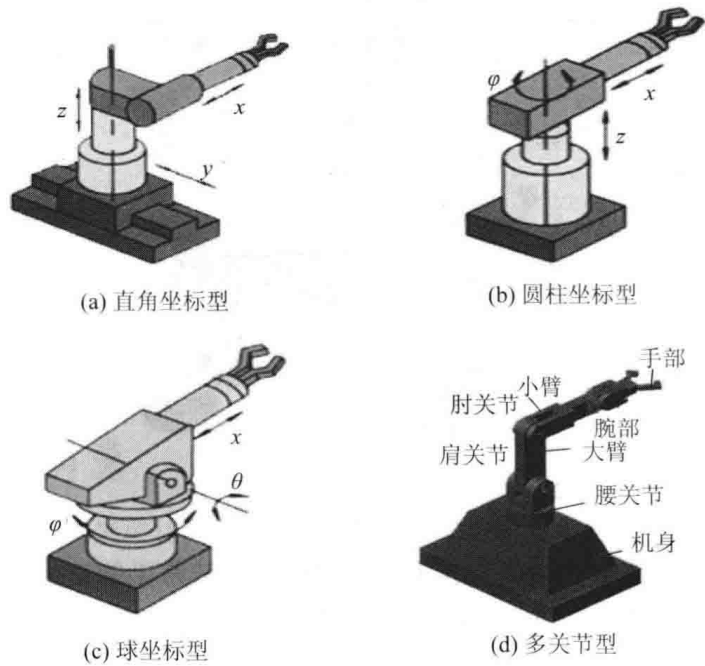


图 1-9 四种手臂运动形式