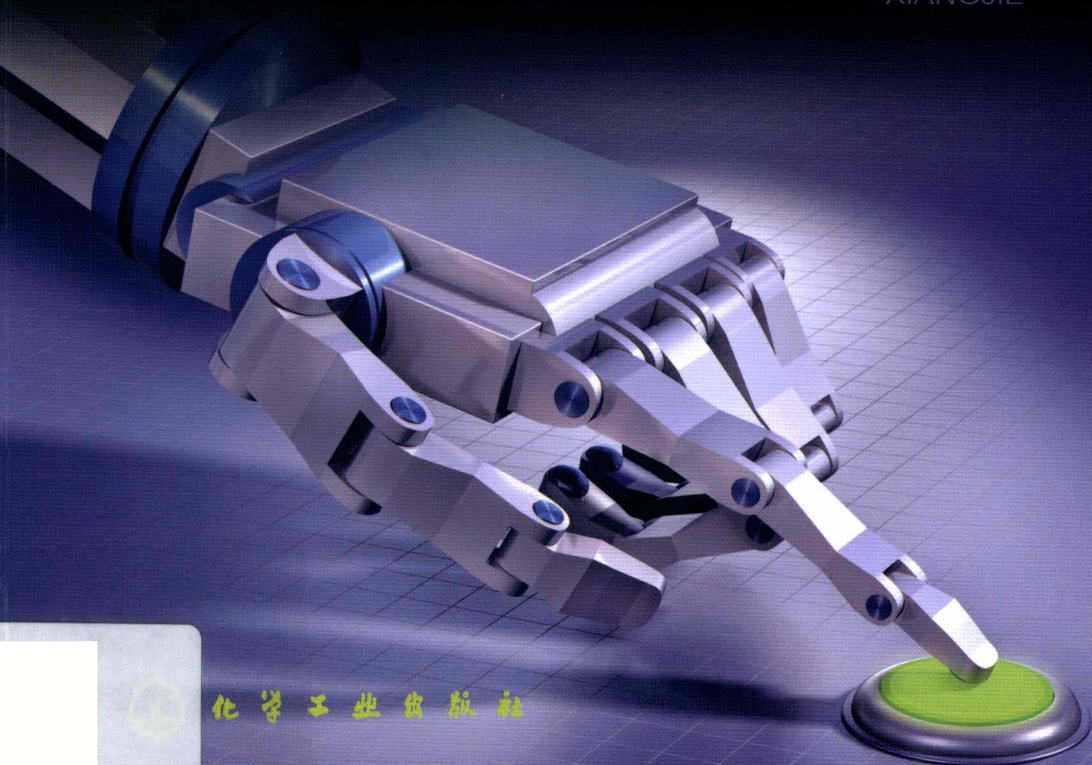


# 工业机器人 设计与实例详解

曹胜男 朱冬 祖国建 编著

GONGYE JIQIREN  
SHEJI YU SHILI  
XIANGJIE



化学工业出版社

# 工业机器人 设计与实例详解

---

GONGYE JIQIREN SHEJI YU SHILI XIANGJIE

---

曹胜男 朱冬 祖国建 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书将在介绍工业机器人基本分类、工作原理与用途的基础上,给出了机器人设计的整体思路和设计方法;同时,通过列举实例,重点介绍了工业机器人机械系统设计、驱动系统设计、控制系统设计、感觉系统设计、编程设计、示教与再现等方面的要求与实现方法,最后通过喷涂机器人、焊接机器人、装配机器人等几个典型实例详细说明不同功能机器人的整体结构特点与设计、实现方法。

本书实用性与可参考性强,可为从事工业机器人设计、操作与维护相关工作的工程技术人员提供帮助,也可供大学院校机电专业、机器人专业的师生学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

工业机器人设计与实例详解/曹胜男,朱冬,祖国建编著. —北京:化学工业出版社,2019.2

ISBN 978-7-122-33450-3

I. ①工… II. ①曹…②朱…③祖… III. ①工业机器人-研究 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 286471 号

---

责任编辑:刘丽宏

文字编辑:陈 喆

责任校对:宋 玮

装帧设计:韩 飞

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京京华铭诚工贸有限公司

装 订:三河市振勇印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 11½ 字数 217 千字

2019 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询:010-64518888 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:49.00 元

版权所有 违者必究



工业机器人设计与实例详解

GONGYE JIQIREN

SHEJI YU SHILI XIANGJIE

## 前言

工业机器人技术是近年来新技术发展的重要领域之一，是以微电子技术为主导的多种新兴技术与机械技术交叉、综合而成的一种综合性高新技术，它涉及计算机科学、机械学、电子学、自动控制、人工智能等多个学科。工业机器人从出现到现在的短短几十年中，已经广泛地应用于国民经济的各个领域，成为现代工业生产不可或缺的好帮手，在提高产品质量、加快产品更新、提高生产效率、促进制造业的柔性化、增强企业和国家的竞争力等方面都发挥着举足轻重的地位，且在航空航天、海底探险、核工业中完成了人类难以完成的工作。因此，工业机器人技术不但在许多学校被列为机电一体化专业的必修课程，而且也成为广大工程技术人员和机电爱好者迫切需要掌握的知识。

近年来，越来越多的国内企业在生产中采用了工业机器人，各种机器人生产厂家的销售量都有大幅度的提高。据调查，我国已有几百余家工业机器人制造企业和系统集成企业，但其中 88% 是系统集成企业，全产业链机器人制造商还不多。中高端驱动器、减速器、控制器等核心元器件还需从国外进口。可以预见，中国的工业机器人产业将会在国民经济中占据重要的地位，工业机器人技术也正因此吸引了越来越多的不同专业背景的科研技术人员开展深入研究。

目前，关于机器人实际操作和应用的知识只能依赖于各种商业机器人产品的用户手册。所以编写一本兼顾理论与实践操作的工业机器人教材就显得十分必要了。

本书主要内容包括工业机器人的基础知识、工业机器人机械系统、电动

机驱动、运动学计算、控制技术、传感器、轨迹规划与编程操作及其应用等。并结合实验教学使学生从机器人实体和实际工程应用两方面对所学知识进行消化理解，以提升教学效果。

本书由娄底职业技术学院曹胜男、朱冬老师和长沙民政职业技术学院祖国建教授编写。在编写过程中，参考了有关机器人方面的论著、资料，在此一并对其作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中内容难免存在不足之处，恳请读者给予批评指正。

编著者

## 第 1 章 工业机器人概论

1

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1.1 工业机器人的定义及工作原理 .....    | 1  |
| 1.1.1 工业机器人的定义 .....       | 1  |
| 1.1.2 工业机器人工作原理 .....      | 2  |
| 1.2 工业机器人的组成及分类 .....      | 2  |
| 1.2.1 工业机器人的组成 .....       | 2  |
| 1.2.2 机器人的分类 .....         | 5  |
| 1.3 工业机器人的主要特征及表示方法 .....  | 9  |
| 1.3.1 工业机器人的主要特征 .....     | 9  |
| 1.3.2 工业机器人的主要特性表示方法 ..... | 9  |
| 1.4 工业机器人的技术性能 .....       | 11 |
| 1.5 工业机器人的基本设计方法 .....     | 16 |
| 1.5.1 工业机器人的设计方法 .....     | 16 |
| 1.5.2 工业机器人设计内容与步骤 .....   | 17 |

## 第 2 章 工业机器人机械结构系统设计

19

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 2.1 工业机器人总体设计 .....      | 19 |
| 2.1.1 系统设计 .....         | 19 |
| 2.1.2 技术设计 .....         | 20 |
| 2.2 工业机器人传动机构设计 .....    | 22 |
| 2.2.1 驱动方式 .....         | 22 |
| 2.2.2 直线驱动机构 .....       | 24 |
| 2.2.3 旋转驱动机构 .....       | 25 |
| 2.2.4 机器人中主要使用的减速器 ..... | 26 |

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 2.3   | 工业机器人机身和臂部设计 .....         | 29 |
| 2.3.1 | 机身设计 .....                 | 29 |
| 2.3.2 | 臂部设计 .....                 | 32 |
| 2.4   | 腕部设计 .....                 | 35 |
| 2.4.1 | 腕部的作用、自由度与手腕的分类 .....      | 35 |
| 2.4.2 | 手腕关节的典型结构 .....            | 38 |
| 2.4.3 | MOTOMAN SV3 机器人的手腕结构 ..... | 42 |
| 2.4.4 | 六自由度关节型机器人的关节布置与结构特点 ..... | 42 |
| 2.5   | 手部设计 .....                 | 43 |
| 2.5.1 | 手部的特点 .....                | 43 |
| 2.5.2 | 手部的分类 .....                | 44 |
| 2.6   | 工业机器人行走机构设计 .....          | 49 |
| 2.6.1 | 车轮式行走机构 .....              | 49 |
| 2.6.2 | 履带式行走机构 .....              | 50 |
| 2.6.3 | 步行机构 .....                 | 51 |
| 2.7   | SCARA 机器人机械系统设计实例 .....    | 52 |

### 第 3 章 工业机器人驱动系统设计

57

|       |                       |    |
|-------|-----------------------|----|
| 3.1   | 工业机器人驱动装置类型及特点 .....  | 57 |
| 3.2   | 工业机器人驱动系统选用原则 .....   | 58 |
| 3.3   | 电液伺服系统 .....          | 59 |
| 3.4   | 气动驱动系统 .....          | 60 |
| 3.5   | 电动驱动系统 .....          | 62 |
| 3.6   | 自动搬运机器人驱动系统设计实例 ..... | 65 |
| 3.6.1 | 行走机构结构设计 .....        | 65 |
| 3.6.2 | 车载机构结构设计 .....        | 66 |

### 第 4 章 工业机器人控制系统设计

69

|       |                             |    |
|-------|-----------------------------|----|
| 4.1   | 机器人控制系统的体系结构、功能、组成和分类 ..... | 69 |
| 4.1.1 | 机器人控制系统的一般要求与体系结构 .....     | 69 |
| 4.1.2 | 机器人控制系统的组成 .....            | 70 |
| 4.1.3 | 机器人控制系统分类 .....             | 71 |
| 4.2   | 机器人整体控制系统设计方法 .....         | 72 |

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
| 4.2.1 | 控制系统结构 .....      | 72 |
| 4.2.2 | 控制系统设计原则 .....    | 74 |
| 4.3   | 几种典型的控制方法 .....   | 75 |
| 4.3.1 | PID 控制 .....      | 75 |
| 4.3.2 | 滑模控制 .....        | 78 |
| 4.3.3 | 自适应控制 .....       | 80 |
| 4.3.4 | 模糊控制 .....        | 81 |
| 4.3.5 | 机器人的顺应控制 .....    | 82 |
| 4.3.6 | 位置和力控制系统结构 .....  | 82 |
| 4.4   | 控制系统硬件构成 .....    | 83 |
| 4.5   | 控制系统软件构成 .....    | 85 |
| 4.5.1 | 软件构成 .....        | 85 |
| 4.5.2 | 软件功能 .....        | 86 |
| 4.6   | 机器人控制系统设计实例 ..... | 86 |

## 第 5 章 工业机器人感觉系统设计

90

|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 5.1   | 工业机器人传感器的分类及要求 ..... | 90  |
| 5.2   | 工业机器人的触觉系统 .....     | 92  |
| 5.2.1 | 接触觉传感器 .....         | 92  |
| 5.2.2 | 滑觉传感器 .....          | 93  |
| 5.3   | 机器人视觉系统的组成 .....     | 94  |
| 5.3.1 | 视觉系统组成 .....         | 95  |
| 5.3.2 | 镜头和视觉传感器 .....       | 97  |
| 5.3.3 | 电气输出接口 .....         | 99  |
| 5.4   | 并联机器人感觉系统设计实例 .....  | 100 |

## 第 6 章 工业机器人编程系统设计

104

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 6.1   | 机器人编程系统及方式 .....   | 104 |
| 6.2   | 编程语言的类型 .....      | 105 |
| 6.2.1 | 编程语言的分类 .....      | 105 |
| 6.2.2 | 机器人编程常用的四大语言 ..... | 107 |
| 6.3   | 工业机器人编程、设计过程 ..... | 113 |

## 第7章 示教与再现

118

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 7.1 示教再现原理 .....    | 118 |
| 7.1.1 示教再现定义 .....  | 118 |
| 7.1.2 示教的分类 .....   | 118 |
| 7.2 示教再现操作方法 .....  | 119 |
| 7.2.1 示教系统的组成 ..... | 119 |
| 7.2.2 示教再现操作 .....  | 119 |

## 第8章 典型工业机器人设计实例

129

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 8.1 喷涂机器人 .....        | 129 |
| 8.1.1 喷涂机器人的结构 .....   | 129 |
| 8.1.2 喷涂机器人控制系统 .....  | 130 |
| 8.1.3 直接示教轻动化 .....    | 136 |
| 8.1.4 应用实例 .....       | 137 |
| 8.2 点焊机器人 .....        | 138 |
| 8.2.1 点焊机器人的结构 .....   | 138 |
| 8.2.2 点焊机器人控制系统 .....  | 140 |
| 8.2.3 点焊机器人应用实例 .....  | 142 |
| 8.3 弧焊机器人 .....        | 144 |
| 8.3.1 弧焊机器人的结构 .....   | 144 |
| 8.3.2 弧焊机器人控制系统 .....  | 146 |
| 8.3.3 弧焊机器人应用实例 .....  | 148 |
| 8.4 搬运机器人 .....        | 149 |
| 8.4.1 搬运机器人的结构 .....   | 149 |
| 8.4.2 搬运机器人控制系统 .....  | 151 |
| 8.4.3 搬运机器人应用实例 .....  | 155 |
| 8.5 装配机器人 .....        | 156 |
| 8.5.1 装配机器人结构 .....    | 156 |
| 8.5.2 装配机器人的驱动系统 ..... | 157 |
| 8.5.3 装配机器人应用实例 .....  | 158 |
| 8.6 冲压机器人 .....        | 159 |
| 8.6.1 冲压机器人的结构 .....   | 159 |
| 8.6.2 冲压机器人控制系统 .....  | 162 |
| 8.6.3 冲压机器人应用实例 .....  | 165 |

8.7 压铸机器人 ..... 167

8.7.1 压铸机器人的结构 ..... 167

8.7.2 压铸机器人控制系统 ..... 168

8.7.3 压铸机器人应用实例 ..... 170

## 1.1 工业机器人的定义及工作原理

### 1.1.1 工业机器人的定义

工业机器人一般指在工厂车间环境中为配合自动化生产的需要,代替人来完成材料的搬运、加工、装配等操作的一种机器人。能代替人完成搬运、加工、装配功能的工作可以是各种专用的自动机器,但是使用机器人则是为了利用它的柔性自动化功能,以达到最高的技术经济效益。有关工业机器人的定义有许多不同说法,通过比较这些定义,可以对工业机器人的主要功能有更深入的了解。

#### (1) 工业机器人协会(JIRA)对工业机器人的定义

工业机器人是“一种装备有记忆装置和末端执行装置的、能够完成各种移动来代替人类劳动的通用机器”。它又分以下两种情况来定义:

① 工业机器人是“一种能够执行与人的上肢类似动作的多功能机器”。

② 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”。

#### (2) 美国机器人协会(RIA)对工业机器人的定义

机器人是“一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置的,通过程序动作来执行各种任务,并具有编程能力的多功能操作机”。

#### (3) 国际标准化组织(ISO)对工业机器人的定义

机器人是“一种自动的、位置可控的、具有编程能力的多功能操作机,这种操作机具有几个轴,能够借助可编程操作来处理各种材料、零件、工具或专用装置,以执行各种任务”。

以上定义的各种机器人实际上均指操作型工业机器人。实际工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度的机器人。工业机器人是自动执行工作的机器装置,是靠自身动力和控制能力来实现某种功能的一种机器。它可以接受人类指挥,也可以按预先编排的程序运行,现代的工业机器人还可以根据人工智能技术制定的原则纲领行动。为了达到其功能要求,工业机器人的功能组成中应该

有以下几个部分：

- ① 为了完成作业要求，工业机器人应该具有操作末端执行器的能力，并能正确控制其空间位置、工作姿态及运行程序和轨迹。
- ② 能理解和接受操作指令，把这种信息指令记忆、存储，并通过其操作臂各关节的相应运动复现出来。
- ③ 能和末端执行器（如夹持器或其他操作工具）或其他周边设备（加工设备、工位器具等）协调工作。

1.1.2 工业机器人工作原理

机器人系统实际上是一个典型的机电一体化系统，其工作原理为：控制系统发出动作指令，控制驱动器动作，驱动器带动机械系统运动，使末端操作器到达空间某一位置和实现某一姿态，实施一定的作业任务。末端操作器在空间的实时位姿由感知系统反馈给控制系统，控制系统把实际位姿与目标位姿相比较，发出下一个动作指令，如此循环，直到完成作业任务为止。

1.2 工业机器人的组成及分类

1.2.1 工业机器人的组成

工业机器人由三大部分六个子系统组成。这三大部分是机械部分、传感部分、控制部分。六个子系统是驱动系统、机械结构系统、感觉系统、机器人-环境交互系统、人机交互系统、控制系统，如图 1-1 所示。其中传感部分包括感觉系统和机器人-环境交互系统，控制部分由人机交互系统和控制系统构成，机械部分则包括驱动系统和机械结构系统。六个子系统的作用分述如下。

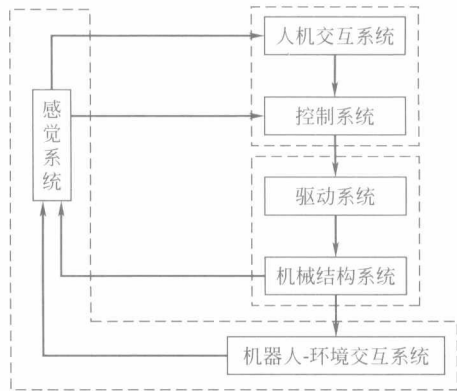


图 1-1 机器人系统组成

### (1) 驱动系统

要使机器人运行起来需给各个关节即每个运动自由度安置传动装置，这就是驱动系统。驱动系统可以是液压、气压或电动的，也可以是把它们结合起来应用的综合系统。可以直接驱动，还可以通过同步带、链条、轮系、谐波齿轮等机械传动机构进行间接驱动。

### (2) 机械结构系统

工业机器人的机械结构系统由机身、手臂、手腕、末端操作器四大件组成，如图 1-2 所示。每一个大件都有若干自由度，构成一个多自由度的机械系统。若基座具备行走机构便构成行走机器人；若基座不具备行走及腰转机构，则构成单机器人臂（single robot arm）。手臂一般由上臂、下臂和手腕组成。末端操作器是直接装在水腕上的一个重要部件，它可以是二手指或多手指的手爪，也可以是喷漆枪、焊具等作业工具。

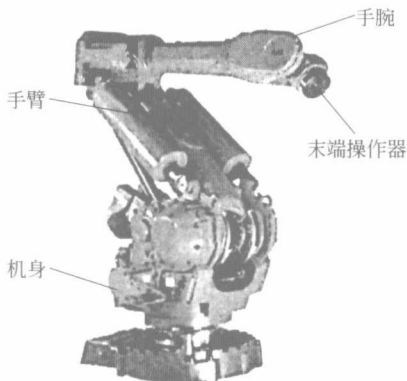


图 1-2 工业机器人机械结构系统

### (3) 感受系统

感受系统由内部传感器和外部传感器组成，获取内部和外部环境状态中有意义的信息。现也可以应用智能传感器提高机器人的机动性、适应性和智能化的水平。人类的感受系统对感知外部世界信息是极其敏感的。但是，对于一些特殊的信息，机器人传感器比人类的感受系统更有效、更准确。

### (4) 机器人-环境交互系统

机器人-环境交互系统是实现机器人与外部环境中的设备相互联系和协调的系统。工业机器人与外部设备集成为一个功能单元，如加工制造单元、焊接单元、装配单元等。当然，也可以是多台机器人、多台机床或设备、多个零件存储装置等集成一个去执行复杂任务的功能单元。图 1-3 为气缸模块化装配生产线，其中的机器人用在气缸装配作业中，该机器人需要与周围的传送带控制器、冲压机控制器进行交互，才能完成工作。

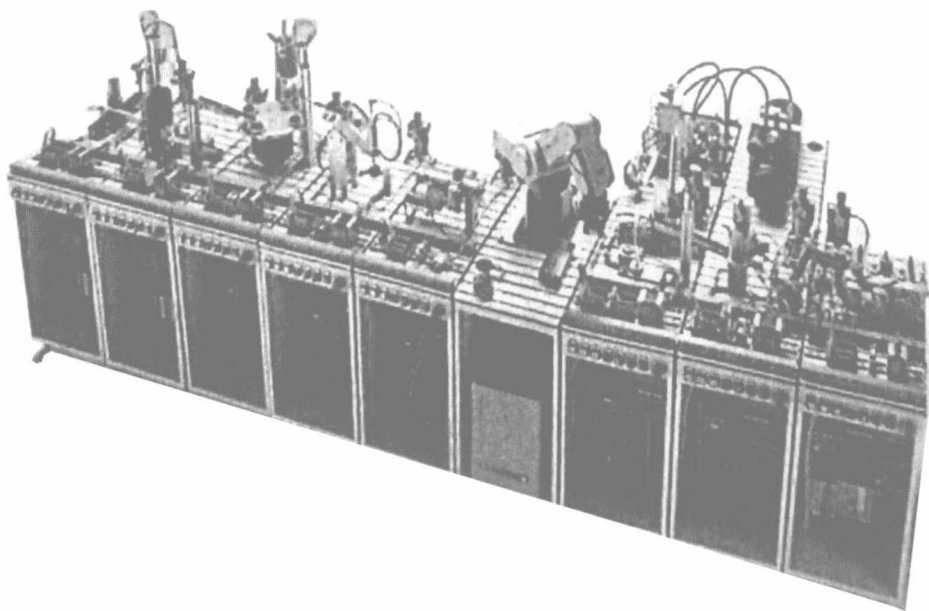


图 1-3 气缸模块化装配生产线

### (5) 人机交互系统

人机交互系统是操作人员与机器人进行交互的装置，可分为两大类：指令给定装置，如示教盒、触摸屏等；信息显示装置，如显示器等。如图 1-4 所示的机器人示教盒就是一种人机交互系统。

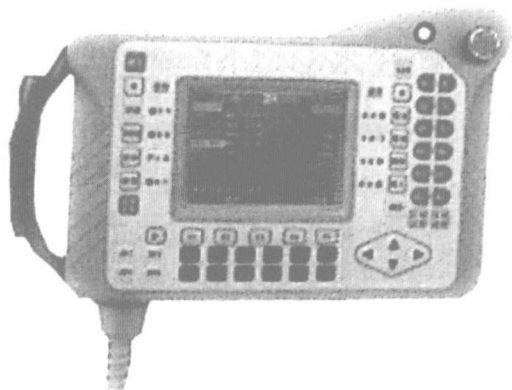


图 1-4 人机交互系统示教盒

### (6) 控制系统

控制系统的任务是根据机器人的作业指令程序以及从传感器反馈回来的信号支配机器人的执行机构完成规定的运动和功能。

图 1-5 为一台典型的工业机器人系统。它包括机械部分（机器人的手指、手腕、手臂、手臂的连接部分和机座等）、执行装置（驱动机座上的机体、手臂、手指、手腕等运动的电机和电磁铁等）、能源（驱动电机的电源和驱动液压系统、气压系统的液压源和气压源）、传感器（检测旋转编码器和检速发电机等旋转角度和旋转角速度，用于检测机器人的运动）、计算机（根据来自旋转编码器或检速发电机的信号，判断机器人的当前状态，并计算和判断要达到所希望的状态或者移动到某一目标应该如何动作）。

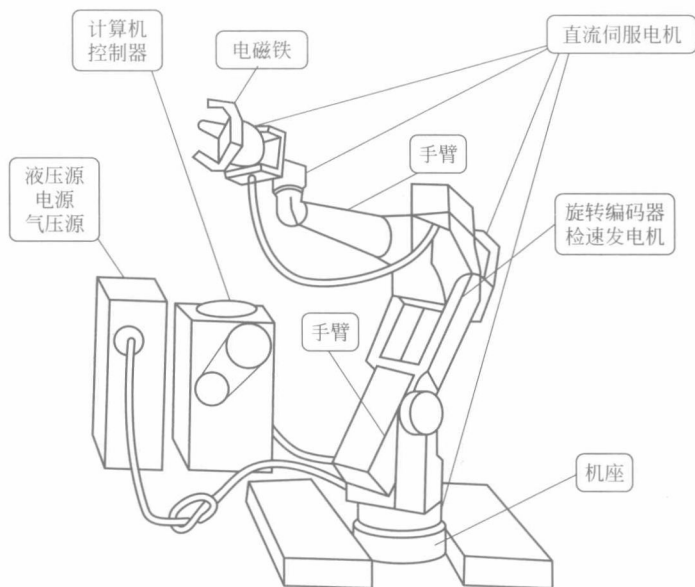


图 1-5 典型的工业机器人系统

### 1.2.2 机器人的分类

机器人的分类方法很多，这里依据两个有代表性的分类方法列举机器人的分类。

#### (1) 按照应用类型分类

机器人按照应用类型可分为工业机器人、极限作业机器人和娱乐机器人。

① 工业机器人 工业机器人有搬运、焊接、装配、喷漆、检查等机器人，主要用于现代化的工厂和柔性加工系统中，如图 1-6、图 1-7 所示。

② 极限作业机器人 极限作业机器人主要是指在人们难以进入的核电站、



图 1-6 弧焊机器人

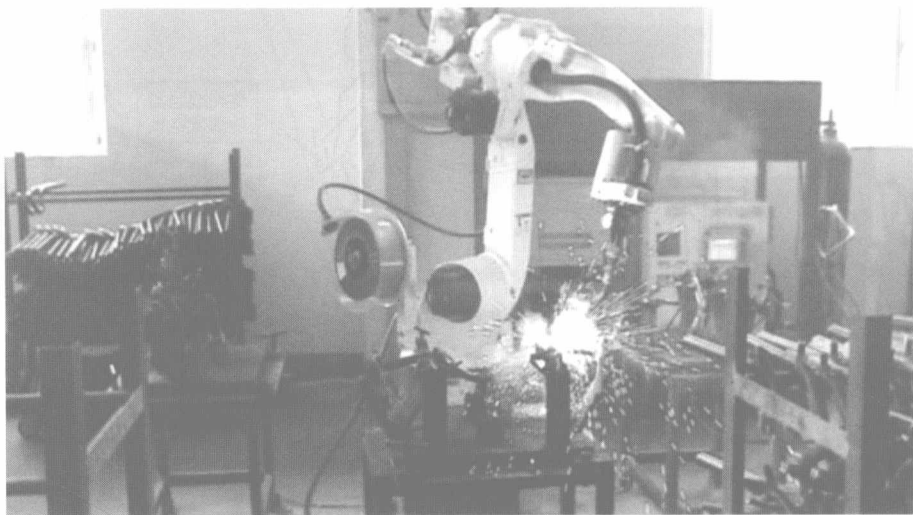


图 1-7 汽车小件焊接机器人系统

海底、宇宙空间进行作业的机器人，也包括建筑、农业机器人等，如图 1-8、图 1-9 所示。

③ 娱乐机器人 娱乐机器人包括弹奏乐器的机器人、舞蹈机器人、玩具机器人等（具有某种程度的通用性），也有根据环境而改变动作的机器人，如图 1-10、图 1-11 所示。

## （2）按照控制方式分类

机器人按控制方式可分为操作机器人、程序机器人、示教再现机器人、智能机器人和综合机器人。

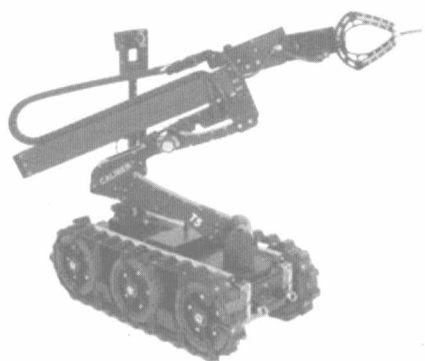


图 1-8 排爆机器人



图 1-9 火星探测机器人

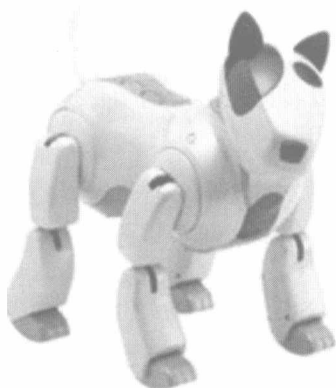


图 1-10 宠物机器人

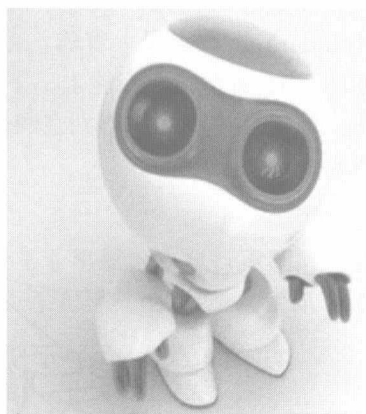


图 1-11 机器小孩

① 操作机器人 操作机器人的典型代表是在核电站处理放射性物质时远距离进行操作的机器人。在这种场合，相当于人手操作的部分称为主动机械手，而从动机械手基本上与主动机械手类似，只是从动机械手要比主动机械手大一些，作业时的力量也更大。

② 程序机器人 程序机器人按预先给定的程序、条件、位置进行作业，目前大部分机器人都采用这种控制方式工作。

③ 示教再现机器人 示教再现机器人同盒式磁带的录放一样，将所教的操作过程自动记录在磁盘、磁带等存储器中，当需要再现操作时，可重复所教过的动作过程。示教方法有手把手示教、有线示教和无线示教，如图 1-12 所示。

④ 智能机器人 智能机器人不仅可以执行预先设定的动作，还可以按照工作环境的变化改变动作。

⑤ 综合机器人 综合机器人是由操作机器人、示教再现机器人、智能机器