

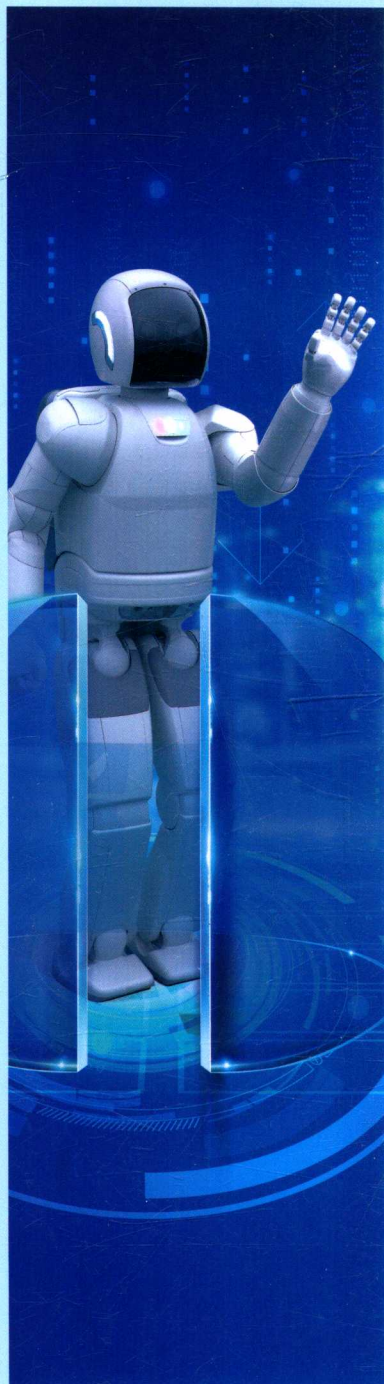
“东北林业大学优秀教材及学术专著  
出版与奖励专项资金”资助出版



# 机器人控制技术

JIQIREN KONGZHI JISHU

主 编 辛 颖 侯卫萍 张彩红  
主 审 薛 伟



东北林业大学出版社  
Northeast Forestry University Press

“东北林业大学优秀教材及学术专著  
出版与奖励专项资金”资助出版

# 机器人控制技术

主 编 辛 颖 侯卫萍 张彩红  
主 审 薛 伟

东北林业大学出版社  
Northeast Forestry University Press

• 哈尔滨 •

版权专有 侵权必究

举报电话：0451-82113295

---

图书在版编目 ( CIP ) 数据

机器人控制技术 / 辛颖, 侯卫平, 张彩虹主编. —  
哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2017. 12  
(东北林业大学优秀教材系列丛书)  
ISBN 978-7-5674-1310-8

I. ①机… II. ①辛… ②侯… ③张… III. ①机器人  
控制-高等学校-教材 IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 303353 号

---

责任编辑: 潘琦

责任校对: 姚大彬

封面设计: 乔鑫鑫

出版发行: 东北林业大学出版社

(哈尔滨市香坊区哈平六道街6号 邮编: 150040)

印 装: 哈尔滨市石桥印务有限公司

规 格: 185 mm×260 mm 16 开

印 张: 10.75

字 数: 255 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

印 次: 2017 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 26.00 元

# 前 言

机器人控制系统的核心是控制理论和方法。机器人控制是一项综合性技术，涉及自动控制、计算机技术、人工智能等多个学科，是重要的技术领域之一。

随着科学技术的发展，机器人的应用范围也日益扩大，遍及工业、国防、宇宙空间、海洋开发、医疗康复等各个领域。在发达国家，工业机器人的开发和研究成果已得到广泛应用，尤其是在机器人控制研究中，随着计算机科学和人工智能等控制理论的发展，早期的基于机器人动力学模型的计算实时控制方案得到进一步拓展和重视。在机器人控制理论研究中，控制方法的设计显得越来越重要，已成为提高机器人性能的关键问题之一。由于机器人控制涉及机器人学、现代控制理论、力学和计算机控制等多方面的知识，其综合控制策略和方法显现出越来越重要的价值，特别是在目前受到广泛关注的智能机器人控制研究领域，经典的控制方案，诸如自适应控制、变结构控制等正由于人工智能理论技术的发展而得到更深入的研究和发展。

本书系统地介绍了机器人控制理论的相关知识。全书共分七章，重点介绍了机器人的运动学、动力学、传感器、现代机器人控制技术、智能机器人与智能控制、机器人的编程与应用等内容。作者在编写过程中参考和引用了有关机器人控制方面的论著和资料，力争做到深入浅出、实用性强。

本书由辛颖、侯卫萍、张彩红任主编。辛颖编写第1, 2, 3, 4章；侯卫萍编写第6, 7章；张彩红编写第5章。本书由薛伟担任主审。在编写本书的过程中，作者参阅了许多专家的文献、资料，在这里一并向他们表示深深的谢意！

本书可作为高等院校机电一体化、工业工程、森林工程及相关专业的教材，也可供在机器人技术领域工作的相关专业技术人员参考。

由于本书涉及面广，不妥之处在所难免，衷心希望读者提出批评指正。

编 者  
2017年5月

# 目 录

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| <b>1 绪 论</b> .....        | ( 1 )   |
| 1.1 机器人的由来与发展史 .....      | ( 1 )   |
| 1.2 机器人的定义与特点 .....       | ( 3 )   |
| 1.3 机器人的分类 .....          | ( 4 )   |
| 1.4 机器人的组成与技术参数 .....     | ( 10 )  |
| <b>2 机器人控制基础</b> .....    | ( 14 )  |
| 2.1 机器人的位姿描述 .....        | ( 14 )  |
| 2.2 机器人的齐次变换 .....        | ( 20 )  |
| 2.3 机器人的连杆参数和齐次变换矩阵 ..... | ( 28 )  |
| 2.4 机器人的运动学方程 .....       | ( 31 )  |
| 2.5 机器人的速度分析 .....        | ( 41 )  |
| 2.6 机器人的静力分析 .....        | ( 45 )  |
| 2.7 机器人的动力学分析 .....       | ( 49 )  |
| <b>3 机器人传感器</b> .....     | ( 54 )  |
| 3.1 视觉传感器与图像处理 .....      | ( 54 )  |
| 3.2 触觉传感器 .....           | ( 60 )  |
| 3.3 旋转编码器 .....           | ( 70 )  |
| 3.4 陀螺仪 .....             | ( 74 )  |
| <b>4 机器人现代控制技术</b> .....  | ( 77 )  |
| 4.1 概述 .....              | ( 77 )  |
| 4.2 位置控制 .....            | ( 81 )  |
| 4.3 机器人的力控制 .....         | ( 92 )  |
| 4.4 示教-再现控制方式 .....       | ( 103 ) |
| 4.5 主从操作 .....            | ( 104 ) |
| <b>5 智能机器人与智能控制</b> ..... | ( 111 ) |
| 5.1 智能机器人概述 .....         | ( 111 ) |
| 5.2 智能机器人的新型驱动器 .....     | ( 113 ) |
| 5.3 智能机器人的模糊控制 .....      | ( 116 ) |
| 5.4 智能机器人的人工神经网络控制 .....  | ( 122 ) |

---

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| <b>6 机器人编程</b> .....       | (128) |
| 6.1 编程方式介绍 .....           | (128) |
| 6.2 机器人编程语言的基本要求 .....     | (129) |
| 6.3 编程语言的应用 .....          | (130) |
| 6.4 机器人的离线编程 .....         | (136) |
| <b>7 机器人在不同领域的应用</b> ..... | (141) |
| 7.1 概述 .....               | (141) |
| 7.2 工业机器人的应用 .....         | (142) |
| 7.3 服务机器人的应用 .....         | (150) |
| 7.4 农业机器人的应用 .....         | (152) |
| 7.5 林业机器人的应用 .....         | (155) |
| 7.6 特种机器人的应用 .....         | (157) |
| 7.7 机器人技术的发展趋势 .....       | (160) |
| <b>参考文献</b> .....          | (163) |

# 1 绪 论

“机器人”这个名称对许多人来说，并不陌生。从古代的神话传说，到现代的科学幻想小说、戏剧、电影和电视，都有许多关于机器人的精彩描绘。但是，现实世界中的机器人既不像神话和文艺作品所描写的那样智勇双全，也还没有如某些企业家和宣传家们所宣扬的那样多才多艺。现在，机器人的本领还是非常有限的。不过，机器人技术正在迅速发展，并开始对整个工业生产、太空和海洋探索及人类生活的各方面产生越来越大的影响。

## 1.1 机器人的由来与发展史

机器人一词最早出现在 1920 年捷克斯洛伐克作家雷尔·卡佩克所写的科幻剧《罗萨姆的万能机器人》中。在剧本中，卡佩克把捷克语“Robota”写成了“Robot”，“Robota”是苦力、农奴的意思。英语的 Robot 一词就是由此而来的，此后世界各国都用 Robot 作为机器人的代名词。

机器人一词虽然出现得较晚，然而这一概念在人类的想象中却早已出现。它体现了人类长期以来的一种愿望，即创造出一种像人一样的机器或人造人，以便能够代替人去进行各种工作。自古以来，就有不少科学家和杰出工匠制造出具有人类特点或模拟动物特征的机器人雏形。

西周时期，中国的能工巧匠偃师就研制出了能歌善舞的伶人，这是中国最早记载的具备机器人概念的文字资料。春秋后期，中国著名的木匠鲁班在机械方面也是一位发明家，据《墨经》记载，他曾经制造过一只木鸟，能在空中飞行“三日而不下”，充分体现了中国劳动人民的聪明才智。

东汉时代，著名科学家张衡不仅发明了地动仪、计里鼓车，而且发明了指南车，这些发明都是具有机器人构想的装置。计里鼓车每行进 1 里<sup>①</sup>，车上的木人击鼓一下，每行 10 里，击钟一下；具有复杂轮系装置的指南车，若车上木人运动起始指向南方，则该车无论左转右转、上坡下坡，指向始终不变，可谓精巧绝伦。

三国时期，蜀国丞相诸葛亮成功地制造了木牛流马，用其运送粮草，并用其中的机关“牛舌头”巧胜司马懿，被后人传为佳话。木牛流马虽已失传，但其明显具有机器人的结构和功能。

<sup>①</sup> 注：里为非法定计量单位，1 里 = 500 米。

1662年,日本的竹田近江利用钟表技术发明了自动机器玩偶,并在大阪地道顿崛演出。

1738年,法国天才技师杰克·戴·瓦克逊发明了一只机器鸭,它会嘎嘎叫、游泳和喝水,还会进食和排泄。瓦克逊的本意是想把生物的功能机械化以进行医学上的分析。

1768~1774年,瑞士钟表匠德罗斯父子三人合作制造出三个像真人一样大小的机器人——写字偶人、绘图偶人和弹风琴偶人。它们是靠弹簧驱动、由凸轮控制的自动机器,至今还作为国宝保存在瑞士纳切尔市艺术和历史博物馆内。

自1920年之后,机器人成为很多科幻电影、科幻小说的主人公。如:20世纪30年代末,纽约世界交易会上放映的德国电影《大都市》中的Eleitro步行机器人和机器狗Spardo;20世纪70年代拍摄的电影《星球大战》中的C3P机器人,使人们进一步加深了机器人具有人类一样的外形、情感的这种看法。人类对机器人寄予很高的期望,而这些在当时的科学技术条件下是无法实现的。即使是现在,要造出有类似人的智慧、感情的机器人仍然是科学家的梦想和追求。

现代机器人的研究始于20世纪中期。第二次世界大战期间,由于核工业和军事工业的发展,人们研制了“遥控操纵器”,主要用于放射性材料的生产和处理过程。1947年,人们对这种较简单的机械装置进行了改进,采用电动伺服方式,使其从动部分能跟随主动部分运动,称为“主从机械手”。

1949~1953年,随着先进飞机制造的需要,美国麻省理工学院辐射实验室(MIT Radiation Laboratory)开始研制数控铣床,1953年研制成功了能按照模型轨迹做切削动作的多轴数控铣床。

1954年,美国人乔治·德沃尔研制出第一台电子可编程序的工业机器人——可编程关节传送装置,它第一次使用示教再现的控制方式,并且在20世纪的后几十年中得到惊人的发展。随后应运而生的数控技术和机械手,将工业机器人推上历史舞台,成为现代加工制造业的中坚力量。

1960年美国联合控制公司(Consolidated Control)根据Devol的专利技术,研制出第一台真正意义上的工业机器人,并成立了Unimation公司,开始定型生产名为Unimate的工业机器人。两年后,美国机床与铸造公司(AMF)也生产了另一种可编程工业机器人Versatran。

20世纪70年代,机器人产业得到蓬勃发展,机器人技术也发展成为专门学科,称为机器人学。机器人的应用领域进一步扩大,不同的应用场所促成了各种坐标系统、各种结构的机器人相继出现。大规模集成电路和计算机技术的飞跃发展使机器人的控制性能大大提高,成本不断下降。

20世纪80年代,不同结构、不同控制方法和不同用途的工业机器人在工业发达国家真正进入了实用化的普及阶段。特别是随着传感器技术和智能技术的发展,机器人研究开始进入智能机器人研究阶段。机器人视觉、触觉、力觉、听觉、接近觉等方面的研究和应用,大大地提高了机器人的适应能力,扩大了机器人的应用范围,促进了机器人的智能化进程。

目前,对全球机器人技术发展最有影响力的国家应该是美国和日本。美国在机器人技术的综合研究水平上仍处于领先地位,而日本生产的机器人在数量、种类方面则居世界首位。机器人技术的发展推动了机器人学的建立,许多国家成立了机器人协会,美国、日



本、英国、瑞典等国家设立了机器人学学位。

20世纪70年代以来,许多大学开设了机器人相关课程,开展了机器人学的研究工作,美国的麻省理工学院、斯坦福大学、卡内基梅隆大学、康奈尔大学、普渡大学、加利福尼亚大学等都是研究机器人学富有成果的著名学府。随着机器人学的发展,相关的国际学术交流活 动也日渐增多,目前最有影响的国际会议是美国电气和电子工程师协会(IEEE),该协会每年举行机器人学及自动化国际会议,此外,还有国际工业机器人会议(ISIR)和国际工业机器人技术会议(CIRT)等。

中国的机器人技术起步较晚,约于20世纪70年代末、80年代初开始。20世纪90年代中期,6 000 m以下深水作业机器人试验成功,以后的10年中,中国在步行机器人、精密装配机器人、多自由度关节机器人的研制等方面与国际先进水平的差距正在逐渐缩小,其中有部分技术处于领先水平。

## 1.2 机器人的定义与特点

### 1.2.1 机器人的定义

国际上至今还没有合适的和为人们普遍认可的、统一的对机器人的定义。专家们采用不同的方法来定义这个术语。它的定义还因公众对机器人的想象以及科学幻想小说、电影、电视和网络对机器人形状的描绘而变得更为困难。为了规定技术、开发机器人新的工作能力和比较不同国家和公司的成果,就需要对机器人这一术语产生某些共同的理解。这些定义之间差别较大。

1950年,美国著名科学幻想小说家阿西莫夫在他的小说《我是机器人》中,提出了有名的“机器人三守则”:

- (1) 机器人必须不危害人类,也不允许它眼看着人类将受害而袖手旁观;
- (2) 机器人必须绝对服从于人类,除非这种服从有害于人类;
- (3) 机器人必须保护自身不受伤害,除非为了保护人类或者是人类命令它做出牺牲。

这三条守则,给机器人社会赋以新的伦理性,并使机器人概念通俗化,更易于为人类社会所接受。

国际上,关于机器人的定义主要有如下几种:

(1) 《牛津简明英语字典》的定义。机器人是“貌似人的自动机,具有智力的和顺从于人的,但不具人格的机器”。这是一种理想的机器人。

(2) 美国机器人协会(RIA)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,通过可编程序动作来执行种种任务的,并具有编程能力的多功能机械手”。

(3) 日本工业机器人协会的定义。机器人是“一种装备有记忆装置和末端执行器的,能够转动并通过自动完成各种移动来代替人类劳动的通用机”。

(4) 美国国家标准局的定义。机器人是“一种能够进行某些操作和移动作业任务的

机械装置”。

(5) 国际标准化组织 (ISO) 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机械手, 这种机械手具有几个轴, 能够借助于可编程序操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置, 以执行种种任务”。

综上所述, 概括各种机器人的性能, 可以按以下特征来描述机器人:

- (1) 机器人的动作机构具有类似于人或其他生物体某些器官 (肢体、感官等) 的功能;
- (2) 机器人具有通用性, 工作种类多样, 动作程序灵活易变, 是柔性加工主要组成部分;
- (3) 机器人具有不同程度的智能, 如记忆、感知、推理、决策、学习等;
- (4) 机器人具有独立性, 完整的机器人系统中在工作中可以不依赖于人的干预。

## 1.2.2 机器人的主要特点

### 1.2.2.1 机器人的通用性

机器人的通用性指的是某种执行不同的功能和完成多样的简单任务的实际能力, 取决于其几何特性和机械能力, 通用性也意味着机器人具有可变的几何结构, 即根据生产工作需要变更的几何结构; 或者说, 在机械结构上允许机器人执行不同的任务或以不同的方式完成同一工作。现有的大多数机器人都具有不同程度的通用性, 包括机械手的机动性和控制系统的灵活性。

### 1.2.2.2 机器人的适应性

机器人的适应性是指其对环境的自适应能力, 即所设计的机器人能够自我执行未经完全指定的任务, 而不管任务执行过程中所发生的没有预计到的环境变化。这一能力要求机器人认识环境, 即具有人工知觉。

## 1.3 机器人的分类

机器人的分类方法很多, 也相当复杂, 几乎没有一种分类可以令人满意地将各类机器人均包括在内, 目前多数的机器人是按各种特征、性能来进行分类的。

### 1.3.1 按坐标形式和运动形态分类

通常机器人依据坐标形式和运动形态的不同可分为直角坐标型、圆柱坐标型、球坐标型、关节坐标型和平面关节型。

#### 1.3.1.1 直角坐标型 (3P)

直角坐标型也称为笛卡儿坐标型或台架型。这种机器人由三个线性关节组成, 这三个关节用来确定末端执行器的位置, 通常还带有附加的旋转关节, 用来确定末端执行器的姿态。这种机器人在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴上的运动是独立的, 运动方程可独立处理, 且方程是线性的, 因此, 很容易通过计算机控制实现; 它可以两端支撑, 对于给定的结构长度, 刚性最大; 它的精度和位置分辨率不随工作场合而变化, 容易达到高精度。但是, 它的操作范围

小,手臂收缩的同时,又向相反的方向伸出,即妨碍工作,且占地面积大,运动速度低,密封性不好。图 1-1 为直角坐标型机器人示意图。

### 1.3.1.2 圆柱坐标型 (R2P)

圆柱坐标型机器人采用两个滑动关节和一个转动关节来确定部件的位置,再附加一个旋转关节来确定部件的姿态。它的优点为可以绕中心轴旋转,工作范围可以扩大,且计算简单;直线部分可采用液压驱动,输出的动力大,能够深入行腔内工作。缺点为手臂到达的空间受限,不能达到近立柱或近地面的空间;直线部分难以密封、防尘;后臂工作时,手臂后端会碰到工作范围的其他物体。图 1-2 为圆柱坐标型机器人示意图。

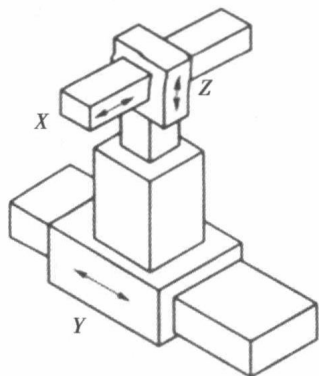


图 1-1 直角坐标型机器人示意图

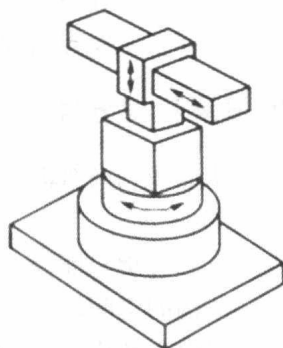


图 1-2 圆柱坐标型机器人示意图

### 1.3.1.3 球坐标型 (2RP)

球坐标型机器人采用球坐标系,用一个滑动关节和两个旋转关节来确定部件的位置,再用一个附加的旋转关节确定部件的姿态。这种机器人可以绕中心轴旋转,中心架附近的工作范围大,两个转动驱动装置容易密封,覆盖空间较大。但该坐标复杂,难于控制,且直线驱动装置仍存在密封和工作死区问题。球坐标型机器人的工作范围呈“球缺状”。图 1-3 为球坐标型机器人示意图。

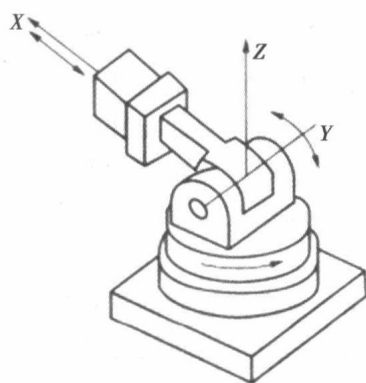


图 1-3 球坐标型机器人示意图

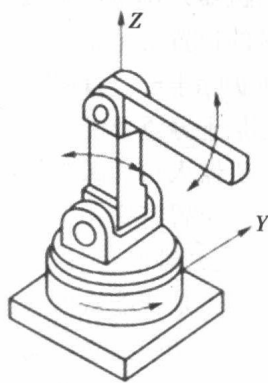


图 1-4 关节坐标型机器人示意图

### 1.3.1.5 平面关节坐标型

这种机器人可看作是关节坐标型机器人的特例，只有平行的肩关节和肘关节，关节轴线共面。如 SCARA 机器人有两个并联的旋转关节，可以使机器人在水平面上运动，此外，再用一个附加的滑动关节做垂直运动。SCARA 机器人常用于装配作业，最显著的特点是它在  $X-Y$  平面有较大柔性，在  $Z$  轴方向有较大刚性。所以，它具有选择性的柔性。这种机器人在装配作业中获得了较好的应用。图 1-5 为平面关节坐标型机器人示意图。

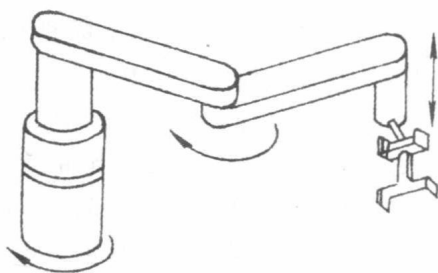


图 1-5 平面关节坐标型机器人示意图

## 1.3.2 按照发展程度分代

机器人按照从低级到高级的发展程度可分三代。

### 1.3.2.1 第一代机器人

第一代机器人主要指只能以示教-再现方式工作的机器人，称为示教-再现型。示教内容为机器人操作结构的空问轨迹、作业条件、作业顺序等。

所谓示教，即由人教机器人运动的轨迹、停留点位、停留时间等。然后，机器人依照人教给它的行为、顺序和速度重复运动，即所谓的再现。示教可由操作员手把手地进行。例如，操作人员抓住机器人上的喷枪把喷涂时要走的位置走一遍，机器人记住了这一连串运动，工作时自动重复这些运动，从而完成给定的喷涂工作。这种方式是手把手示教，但是，比较普遍的示教方式是通过控制面板完成的。操作人员利用控制面板上的开关或键盘控制机器人一步一步地运动，机器人自动记录下每一步，然后重复。目前在工业现场应用的机器人大多采用这一方式。

### 1.3.2.2 第二代机器人

第二代机器人装备有一定的传感装置，能获取作业环境、操作对象的简单信息，通过计算机处理、分析，能做出简单的推理，对动作进行反馈，通常称为低级智能机器人。例如，焊缝自动跟踪技术，在机器人焊接的过程中，一般通过编程或示教方式先给出机器人的运动曲线，机器人携带焊枪按照这个曲线进行焊接。这就要求工件的一致性，也就是说工件被焊接的位置必须十分准确，否则，机器人行走的曲线和工件上的实际焊缝位置将产生偏差。在实际生产过程中，由于受热或其他原因，被焊工件易发生变形，因而，跟踪所要焊的焊缝是十分重要的。焊缝跟踪技术是通过机器人上的传感器感知焊缝位置的，通过反馈控制，机器人自动跟踪焊缝，从而对示教或编程的位置进行修正。即使实际焊缝相对于原始设定的位置有变化，机器人仍然可以很好地完成焊接工作。

### 1.3.2.3 第三代机器人

第三代机器人是智能机器人，它具有多种感知功能，可进行复杂的逻辑推理、判断及决策，可在作业环境中独立行动，它具有发现问题且能自主地解决问题的能力。

这类机器人带有多种传感器，使机器人可以知道其自身的状态，例如，在什么位置，自身的系统是否有故障等；且可通过装在机器人身上或者工作环境中的传感器感知外部的

情况,如发现道路与危险地段,测出与协作机器的相对位置与距离及相互作用的力等。机器人能够根据得到的这些信息进行逻辑推理、判断、决策,在变化的内部状态与外部环境中,自主决定自身的行为。但是,在已应用的机器人中,机器人的自适应技术仍十分有限,高级智能机器人是今后研究发展的方向。

### 1.3.3 按机器人的性能指标分类

机器人按照结构形态、负载能力和动作空间可分为五种。

(1) 超大型机器人。

超大型机器人的负载能力为 1 000 kg 以上。

(2) 大型机器人。

大型机器人的负载能力为 100~1 000 kg,作业空间为 10 m<sup>2</sup> 以上。

(3) 中型机器人。

中型机器人的负载能力为 10~100 kg,作业空间为 1~10 m<sup>2</sup>。

(4) 小型机器人。

小型机器人的负载能力为 0.1~10 kg,作业空间为 0.1~1 m<sup>2</sup>。

(5) 超小型机器人。

超小型机器人的负载能力为 0.1 kg 以下,作业空间为 0.1 m<sup>2</sup> 以下。

### 1.3.4 按照开发内容和目的分类

机器人按照开发内容和目的可分为三类。

#### 1.3.4.1 工业机器人

工业机器人是在工业生产中使用的机器人的总称,主要用于完成工业生产中的某些作业。依据具体应用目的的不同,又常常以其主要用途命名。焊接机器人是到现在为止应用最多的工业机器人,包括点焊(电阻焊)和电弧焊机器人,用于实现自动焊接作业;装配机器人,比较多地用于电子部件的装配;喷漆机器人,用于代替人进行喷漆作业;搬运、上下料、码垛机器人,它们的功能都是根据一定的速度和精度要求,将物品从一处运到另一处。另外,还有很多其他用途的机器人,如将金属溶液浇到压铸机中的浇铸机器人等。应该说,并不是只有机器人可以完成这些工作,很多工作也可以用专门的机器完成。

工业机器人的优点在于它可以通过程序的更改,方便迅速地改变工作内容或方式,以满足生产要求的变化。比如,改变焊缝轨迹、改变喷漆位置、变更装配部件或位置等。所以随着对工业生产线的柔性要求越来越强,对各种机器人的需求量也就越来越大。

#### 1.3.4.2 操纵机器人

操纵机器人主要用于非工业生产的各种作业,又可分为服务机器人与特种作业机器人等。

服务机器人通常是可移动的,在多数情况下,可由一个移动平台构成,平台上装有一只或几只手臂,代替或协助人完成为人类提供服务和安全保障的各种工作,如清洗玻璃机器人(图 1-6)、爬缆索机器人(图 1-7)、林业采伐机器人(图 1-8)。这些机器人都是

根据某种特殊目的而设计的特种作业机器人，可以帮助人类完成一些高强度、高风险或人类无法完成的工作等。

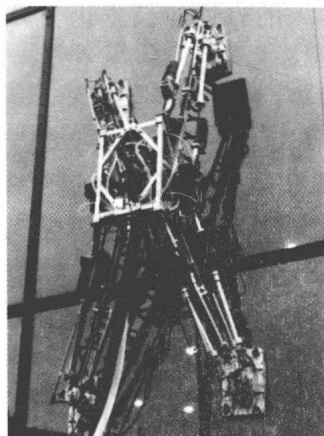


图 1-6 清洗玻璃机器人

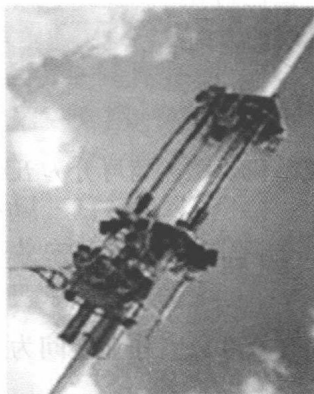


图 1-7 爬缆索机器人



图 1-8 林业采伐机器人

特种作业机器人主要包括水下机器人、空间机器人等。水下机器人，又称水下无人深潜器，如图 1-9 所示。它代替人在水下危险的环境中作业，人类借助潜水器潜入深海之中探秘已有很长的历史。主要是由于这项工作危险很大，而且费用极高，所以人类积极寻找可以代替人类进行危险作业的技术，水下机器人便成了十分受关注的发展方向。空间机器人，如图 1-10、图 1-11 所示，是指在大气层内和大气层外从事各种作业的机器人，包括在内层空间飞行并进行观测、可完成多种作业的飞行机器人，到外层空间其他星球上进行探测作业的星球探测机器人和在各种航天器里使用的机器人。



图 1-9 水下机器人

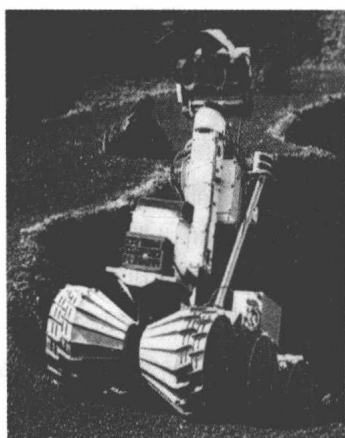


图 1-10 空间机器人：月球车

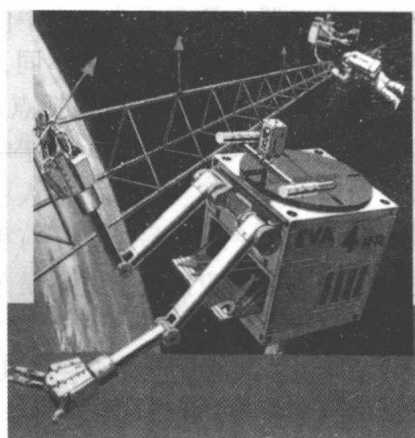


图 1-11 空间机器人：太空操作臂

### 1.3.4.3 智能机器人

智能机器人具有多种由内、外部传感器组成的感觉系统，它不仅可以感知内部关节的运行速度、力的大小等参数，还可以通过外部传感器（如视觉传感器、触觉传感器等），对外部环境信息进行感知、提取、处理并做出适当的决策，可以在结构或半结构化环境中自主完成某项任务。目前，智能机器人尚处于研究和发展阶段。2002 年，日本本田公司在

东京展示了其最新研制的“Asimo”智能机器人,如图 1-12 所示。“Asimo”机器人高 1.2 m,不仅可以行走、爬楼梯,识别各种各样的声音,还能够通过头部的照相机捕捉到的画面,使用事先设计好的程序识别人类的各种手势运动及 10 种不同的脸型。

### 1.3.5 按控制方式分类

#### 1.3.5.1 点位控制

按点位方式进行控制的机器人,其运动为空间上点到点之间的直线运动,在作业过程中只控制几个特定工作点的位置,不对点与点之间的运动过程进行控制。在点位控制的机器人中,所能控制点数的多少取决于控制系统的复杂程度。

#### 1.3.5.2 连续轨迹控制

按连续轨迹方式进行控制的机器人,其运动轨迹可以是空间的任意连续曲线。机器人在空间的整个运动过程都处于控制之下,能同时控制两个以上的运动轴,使得手部位置可沿任意形状的空间曲线运动,而手部的姿态也可以通过腕关节的运动得以控制,这对于焊接和喷涂作业是十分有利的。

### 1.3.6 按驱动方式分类

#### 1.3.6.1 气力驱动式

机器人以压缩空气来驱动执行机构。这种驱动方式的优点是空气来源方便,动作迅速,结构简单,造价低;缺点是空气具有可压缩性,致使工作速度的稳定性较差。因气源压力一般只有 60 MPa 左右,故此类机器人通常适用于抓举力要求较小的场合。

#### 1.3.6.2 液力驱动式

相对于气力驱动来说,液力驱动的机器人具有大得多的抓举能力,可抓举上百千克。液力驱动式机器人具有结构紧凑,传动平稳且动作灵敏等优点,但是对密封的要求较高,不宜在高温或低温的场合工作,且制造精度要求高、成本高。

#### 1.3.6.3 电力驱动式

目前越来越多的机器人采用电力驱动式,这不仅是因为电动机品种众多可供选择,更因为这种方式可以运用多种灵活的控制方法。

电力驱动是利用各种电动机产生的力或力矩,直接或经过减速机构驱动机器人,以获得所需的位置、速度、加速度。电力驱动具有无环境污染、易于控制、运动精度高、成本低、驱动效率高等优点,因此,现在越来越多的机器人采用电力驱动方式。

电力驱动可分为步进电动机驱动、直流伺服电动机驱动、无刷伺服电动机驱动等。

#### 1.3.6.4 新型驱动方式

伴随着机器人技术的发展,出现了利用新的工作原理制造的新型驱动器,如静电驱动器、压电驱动器、形状记忆合金驱动器、人工肌肉及光驱动器等。

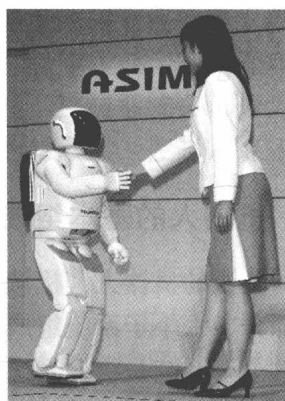


图 1-12 “Asimo”智能机器人

# 1.4 机器人的组成与技术参数

## 1.4.1 机器人的基本组成

不同类型的机器人其机械、电气和控制结构千差万别，但是作为一个机器人系统，通常由三部分、六个子系统组成，如图 1-13 所示。这三部分是机械部分、传感部分、控制部分；六个子系统是机械系统、驱动系统、控制系统、感知系统、机器人-环境交互系统、人机交互系统。

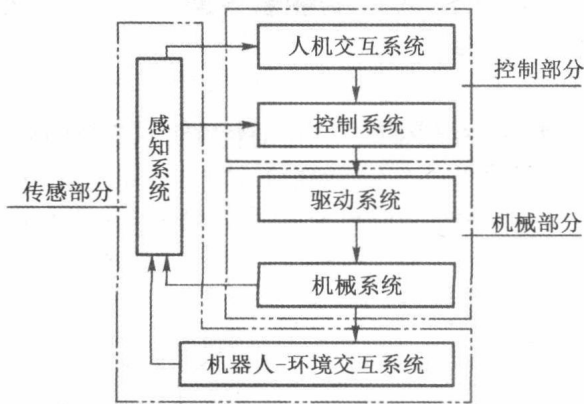


图 1-13 机器人的基本组成

### 1.4.1.1 机械系统

机械系统是机器人的主体部分，由基座、手臂、末端执行器三大件组成，每一大件都有若干自由度，构成一个多自由度的机械系统。如果基座具备行走机构，便构成行走机器人；如果基座不具备行走及腰转机构，便构成单机器人臂。手臂一般由上臂、下臂和手腕组成。末端执行器连接在机械手的最后一个关节上，一般用来抓取物体，与其他机构连接并执行需要的任务，它可以是两手指或多手指的手爪，也可以是喷漆枪、焊枪等作业工具。

### 1.4.1.2 驱动系统

驱动系统是使各种机械部件产生运动的装置。根据驱动源的不同，驱动系统可分为液压、气动和电动三种及把它们结合起来应用的综合系统。气动具有成本低、控制简单的特点，但是噪声比较大、输出小、难以准确地控制位置和速度。液压驱动具有输出功率大、低速平稳、防爆等特点，但液体的泄漏难于克服，要求液压元件有较高的精度和质量，故造价较高。电动是目前应用最多的一种。早期采用步进电机，后来采用直流伺服电机，现在交流伺服电机开始广泛应用。驱动系统可以与机械系统直接相连，也可以通过齿轮链、同步皮带、谐波齿轮传动装置等与机械系统间接相连。



### 1.4.1.3 控制系统

控制系统的任务是根据机器人的作业指令程序及从传感器反馈回来的信号支配机器人的执行机构去完成规定的运动和功能。假如机器人不具备信息反馈特征,则为开环控制系统;若具备信息反馈特征,则为闭环控制系统。根据控制原理,控制系统又可分为程序控制系统、适应性控制系统和人工智能控制系统。根据控制运动的形式,控制系统还可分为点位控制和轨迹控制。

### 1.4.1.4 感知系统

感知系统由内部传感器模块和外部传感器模块组成,获取内部和外部环境状态中的有意义的信息,通过这些信息确定机械部件各部分的运行轨迹、速度、位置和外部环境状态,使机械部件的各部分按预定程序或者工作需要进行动作。智能传感器的使用提高了机器人的机动性、适应性和智能化水平。人类的感知系统对感知外部世界的信息是极其灵巧的,然而对于一些特殊的信息,传感器比人类的感知系统更有效。

### 1.4.1.5 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互相联系和协调的系统。工业机器人可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、多台机床或设备及多个零件存储装置等集成为一个执行复杂任务的功能单元。

### 1.4.1.6 人机交互系统

人机交互系统是实现操作人员参与机器人控制并与机器人进行联系的装置,通常指输入和输出设备。例如,计算机的标准终端、指令控制台、信息显示板及危险信号报警器等。归纳起来人机交互系统可分为两大类:指令给定装置和信息显示装置。

## 1.4.2 机器人的主要技术参数

由于机器人的结构、用途和用户要求不同,机器人的技术参数也不同。一般来说,机器人的技术参数主要包括自由度、精度、工作范围、工作速度、承载能力等。

### 1.4.2.1 自由度

自由度是指机器人所具有的独立坐标轴运动的数目,不包括末端执行器的开合自由度。在三维空间中描述一个物体的位置和姿态需要6个自由度。但是,机器人的自由度是根据其用途而设计的,可能小于6个自由度,也可能大于6个自由度。例如,PUMA 562机器人具有6个自由度,如图1-14所示。

机器人的自由度越多,越接近人手的动作机能,其通用性就越好;但是自由度越多,结构也就越复杂,这是机器人设计中的一个矛盾。在工业机器人中,自由度的选择与生产要求有关,若机器人用于大批量生产中,通常要求其运行速度快,可靠性高,这时,机器人的自由度数可少一些;如果要便于产品更换,增加柔性,机器人的自由度要多一些。工业机器人一般多为4~6个自由度,7个以上的自由度是冗余自由度,是用来规避障碍物的。无论机器人的自由度有多少,其在运动形式上都可分为直线运动(P)和旋转运动(R)。

### 1.4.2.2 精度

精度是指定位精度和重复定位精度。定位精度是指机器人手部实际到达位置与目标位