

机器人原理及其应用

ROBOTICS: PRINCIPLES AND APPLICATIONS

● 蔡自兴 编著 ●

R

中南工业大学出版社

蔡自兴 编著

机器人原理及其应用

ROBOTICS: PRINCIPLES AND APPLICATIONS



中南工业大学出版社

机器人原理及其应用

蔡自兴 编著

责任编辑：肖梓高

•

中南工业大学出版社出版发行

湖南省地质测绘印刷厂印装

湖南省新华书店经销

•

开本：787×1092 1/16 印张：24.25 字数：620千字

1988年8月第1版

1988年8月第1次印刷

印数：0001—4000

•

ISBN 7-81020-151-4/TP·007

定价：4.00元

序

在过去十年中, 机器人制造业和整个机器人学有了很大的发展。工业机器人的产量以每年递增25—30%的速率发展; 机器人的工作能力, 尤其是智能程度日益提高; 机器人的应用范围进一步扩大, 遍及工业、国防、太空、海洋探索以及人类生活的各个方面; 有关机器人技术的知识与日俱增。现在, 机器人热潮, 已席卷全世界。可能还难以找到一个其它的专业领域, 能够有如此迅速的发展。

虽然机器人学的发展还没有使基础科学发生根本变化, 但是它已极大地加深了人们对许多学科理论和本质的理解。尤其是一些与机器人学密切相关的学科, 如自动控制、机构学、力学、人工智能、传感技术以及计算机系统……已明显地受到机器人发展的影响。而智能机器人则已成为自动控制学科进一步发展和应用的重要领域之一, 也是当代高科技领域之一。

目前, 许多先进技术国家已先后把机器人技术, 特别是对智能机器人的研究列入国家计划, 进行大力研究。我国对机器人学的研究也已经起步, 并把“机器人开发研究”和“柔性制造技术系统和设备开发研究”等与机器人技术有关的研究课题列入国家“七五”科技发展计划以及高科技发展计划。国内越来越多的人表现出对机器人技术的热情关注和浓厚兴趣。然而, 有关机器人学的书刊和资料却难以找到。许多有关机器人的知识被分散在国内外许多期刊上。现时, 国内尚缺乏全面阐述机器人学基本原理、主要技术、应用情况及发展方向等内容的自编著作。蔡自兴副教授所编著的《机器人原理及其应用》一书的出版, 无疑为读者提供了一本高水平的机器人学读物, 并为我国机器人学的发展和机器人技术的推广作出积极贡献。

综观全书, 它很好地把理论与实践结合起来。从本书也可看出, 机器人学是一门跨学科的新兴学科。全书内容系统、全面, 涉及机器人学的概况、数理基础、传动、控制、编程、传感器、视觉、人工智能、计算机、机器人应用以及发展方向等。

本书可作为高院校高年级学生和研究生《机器人学》课程的教材或教学参考书; 也可供从事机器人研究、设计、制造和应用的科技人员使用。我特别希望从事自动化技术工作的同志们, 能够学点机器人知识, 以便对机器人技术有所了解, 进而为我国自动化技术赶超世界先进水平作出新的贡献。

张钟俊

1987年7月15日于上海交通大学

作 者 的 话

第一台工业机器人问世已有四分之一世纪。二十多年来,特别是70年代中期以来,机器人技术获得极其迅速的发展。现在,机器人制造业已成为发展最快最好的经济部门之一。

机器人学既是一门边缘学科,又是一门对国民经济和人民生活有着深远影响的新兴学科。在我国,一个快速发展机器人技术的时期即将到来。希望本书的编著和出版能够对我国的机器人学教学、科研和应用起点促进作用。

本书介绍机器人技术的基本原理及其应用,是一本机器人学的入门著作。全书共十章。第一章叙述了机器人技术的概况以及机器人学与人工智能的关系;第二章介绍机器人学的数学基础;第三章阐述了机械手运动方程的表示与求解;第四章涉及机器人的动力学方程、动态特性和静态特性;第五章讨论了机器人的各种传动装置、控制原则和机器人控制器的设计;第六章和第七章分析了各种机器人传感器(视觉、触觉和力觉等)的作用原理及其应用;第八章说明了机器人的程序设计技术及其实例;第九章研究了机器人规划,包括基于专家系统的规划;第十章探讨了应用机器人必须考虑的因素、工业机器人的应用范围和实例,以及机器人技术的发展趋向等。章后附有大量习题,并备有英汉机器人常用名词术语对照表,供练习和阅读英文资料时参考。

作为访问学者,本人于1983年至1985年访问美国,先后在内华达大学(University of Nevada at Reno)和普渡大学(Purdue University)进修研究机器人学和人工智能。在普渡大学期间,有机会向几位当时在该校任教的国际知名科学家学习,受益匪浅。美国科学院院士、国际模式识别学会首届主席、国际中文计算机学会主席、国际杂志《信息科学》主编和普渡大学优秀教授傅京孙(King-Sun Fu)博士指导我选择了研究方向,并合作进行“机器人规划专家系统”等研究。美国IEEE荣誉会员、《自动控制》杂志机器人学与自动化技术委员会主席陆养生(J.Y.S. Luh)教授的机器人学讲授,使我增添了许多知识,并得到他的直接指教。与国际杂志《机器人学研究》主编、著名机器人专家R.P. Paul教授以及A.J. Koviio教授的讨论,开阔了我的眼界……早在1984年初,我就开始收集资料,准备编写一本全面介绍机器人学各方面基本原理及其应用的书,以期作为向祖国的又一份汇报。

在本书编写和出版过程中,还得到中国科学院学部委员、上海交通大学张钟俊教授、国务委员、国家科委主任宋健教授,中国科学院秘书长、中国自动化学会和中国计算机学会理事长胡启恒教授以及中南工业大学饶立昌教授等的亲切关怀与热情鼓励。张钟俊教授还在百忙中为本

书作序，体现了老一辈科学家对机器人技术的关注和对中青年学者的关怀与期望。国防科技大学张良起教授、常文森副教授和张彭副教授对本书进行了认真的审阅，并提出不少有益建议。在此，特向上述专家一并以诚挚谢意。

限于知识和编写水平，书中错误和缺点在所难免，热忱欢迎广大读者和专家批评指正，不胜感激。

蔡自兴

1988年5月于长沙岳麓山

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍机器人学的基本原理及其应用。该书理论联系实际，既有深入的分析，又列举不少应用实例；内容丰富，涉及机器人学的概况、数理（力学）基础、传动、控制与编程、传感器、视觉与人工智能、计算机与微机控制、应用领域与实例，以及发展方向等。

本书可作为高等院校研究生和高年级学生的《机器人学》教材，也可供从事机器人研究、设计、制造和应用的科技人员使用。对于初学者，也是一本比较合适的自学读物。

07-15/6

目 录

序

作者的话

第一章 概述 (1)

第一节 机器人技术的发展 (1)

1.1.1 机器人的由来 (1)

1.1.2 机器人的定义 (2)

1.1.3 机器人技术的进展 (3)

第二节 机器人的特点、结构与分类 (6)

1.2.1 机器人的主要特点 (6)

1.2.2 机器人系统的结构 (7)

1.2.3 机器人的自由度 (8)

1.2.4 机器人的分类 (9)

第三节 机器人学与人工智能 (12)

1.3.1 机器人学与人工智能的关系 (13)

1.3.2 机器人学的主要研究课题 (13)

1.3.3 智能机器人 (14)

习 题 (16)

第二章 数学基础 (17)

第一节 点与平面的表示 (17)

2.1.1 点矢量 (17)

2.1.2 平面 (13)

第二节 齐次坐标变换 (19)

2.2.1 齐次变换 (19)

2.2.2 平移齐次变换 (19)

2.2.3 旋转齐次变换 (21)

2.2.4 坐标系的选择 (23)

2.2.5 物体的变换与逆变换 (25)

2.2.6 变换方程初步 (26)

第三节 一般旋转变换 (27)

2.3.1 一般旋转变换公式 (27)

2.3.2 等效转角与转轴 (29)

习 题 (30)

第三章 机械手运动学 (34)

第一节 机械手运动方程的表示 (34)

3.1.1 运动姿态与方向角 (34)

3.1.2 运动位置和坐标 (36)

3.1.3 T矩阵与A矩阵 (38)

3.1.4 运动方程表示举例 (41)

第二节 机械手运动方程的求解 (44)

3.2.1 欧拉变换解 (45)

3.2.2 滚、仰、偏变换解 (48)

3.2.3 球面变换解 (49)

3.2.4 运动方程求解举例 (50)

第三节 机械手的微分运动与雅可比公式 (55)

3.3.1 微分运动 (55)

3.3.2 雅可比矩阵 (63)

3.3.3 逆雅可比矩阵 (66)

习 题 (71)

第四章 机器人动力学 (77)

第一节 刚体动力学 (77)

4.1.1 刚体的动能与位能 (78)

4.1.2 动力学方程的两种求法 (79)

第二节 机械手动力学方程 (84)

4.2.1 速度的计算 (85)

4.2.2 动能和位能的计算 (86)

4.2.3 动力学方程的推导 (88)

4.2.4 动力学方程的简化 (90)

第三节 机械手动力学方程举例 (93)

4.3.1 二连杆机械手动力学方程 (93)

4.3.2 三连杆机械手的速度和加速度方程 (95)

第四节 机器人的动态特性 (104)

4.4.1 动态特性概述 (104)

4.4.2 稳定性 (105)

4.4.3 空间分辨率 (106)

4.4.4 精 度 (107)

4.4.5 重复性 (108)

第五节 机械手的稳态负荷 (110)

4.5.1 静力和静力矩的表示 (110)

4.5.2 不同坐标系间静力的变换 (111)

4.5.3 关节力矩的确定 (113)

4.5.4 负荷质量的确定 (114)

习 题 (115)

第五章 机器人的传动与控制 (119)

第一节 机器人的传动装置 (119)

5.1.1 对机器人传动装置的要求 (119)

5.1.2 液压传动装置 (120)

5.1.3	气压传动装置	(124)	6.3.3	典型触觉传感器	(202)
5.1.4	电气传动装置	(127)	6.3.4	应力传感器	(208)
5.1.5	变速机构	(130)	6.3.5	接近度传感器	(210)
第二节	机器人的基本控制原则	(131)	6.3.6	其它外传感器	(212)
5.2.1	基本控制原则	(131)	第四节	应用举例	(214)
5.2.2	伺服控制系统举例	(133)	6.4.1	应用光电传感器进行机器人零 件装箱作业	(214)
第三节	位置控制	(137)	6.4.2	传感器导引弧焊机器人系统	(214)
5.3.1	直流电动机传动系统数学模型	(138)	6.4.3	十六通道光反射式多传感器触 觉系统	(215)
5.3.2	单关节位置控制器	(141)	习 题		(217)
5.3.3	多关节位置控制器	(147)	第七章	机器人视觉技术	(219)
第四节	阻力控制	(149)	第一节	图象的理解与分析	(219)
5.4.1	被动依从和主动依从	(149)	7.1.1	视觉信息的表达方法	(220)
5.4.2	主动阻力控制	(150)	7.1.2	边缘距离的计算	(221)
第五节	力和位置混合控制	(154)	7.1.3	表面方向的计算	(224)
5.5.1	作业约束与力控制	(154)	第二节	物体形状的分析与识别	(227)
5.5.2	力和位置混合控制方案	(156)	7.2.1	复杂形状物体的表示	(227)
5.5.3	力和位置混合控制系统控制 规律的综合	(157)	7.2.2	三维物体的形状描述	(230)
第六节	机器人的最优控制	(162)	7.2.3	物体形状识别方法	(231)
5.6.1	机器人机械手的最优/PID控 制系统	(163)	第三节	机器人视觉装置	(234)
5.6.2	具有非线性反馈的机械手最优 动态控制	(167)	7.3.1	机器人眼	(234)
第七节	机器人的自适应控制	(172)	7.3.2	视频信号数字变换器	(236)
5.7.1	状态模型和主要结构	(172)	7.3.3	固态视觉装置	(237)
5.7.2	模型参考自适应控制器的设计	(174)	第四节	机器人视觉系统举例	(240)
5.7.3	自校正自适应控制器的设计	(177)	7.4.1	EYECOM I 机器人视觉系统	(240)
5.7.4	线性摄动自适应控制器	(179)	7.4.2	机器人三维视觉系统	(242)
习 题		(181)	习 题		(246)
第六章	机器人传感器	(184)	第八章	机器人的程序编制	(250)
第一节	机器人传感器的特点与分 类	(184)	第一节	机器人的编程语言	(250)
6.1.1	机器人为什么需要感觉	(184)	8.1.1	机器人的程序编制层级	(250)
6.1.2	机器人传感器的特点与分类	(185)	8.1.2	对机器人编程语言的要求	(252)
6.1.3	应用传感器时应考虑的问题	(187)	8.1.3	机器人编程技术	(254)
第二节	内传感器	(189)	第二节	基本程序功能与数据结构	(256)
6.2.1	位移(位置)传感器	(189)	8.2.1	基本程序功能	(256)
6.2.2	速度和加速度传感器	(193)	8.2.2	数据结构	(258)
6.2.3	力觉传感器	(195)	第三节	由函数定义运动的程序编 制	(264)
第三节	外传感器	(198)	8.3.1	机械手运动过程	(264)
6.3.1	机器人对环境的自适应能力	(198)	8.3.2	时变函数定义的运动	(265)
6.3.2	触觉传感器的技术要求与研究 方向	(200)	8.3.3	末端执行装置的并入	(267)
			第四节	微机控制机器人的程序编 制	(268)

8.4.1	机械手指挥器	(268)
8.4.2	模式选择程序	(269)
8.4.3	用BASIC语言编写的机器人程序	(271)
第五节	机器人的离线编程和自动编程	(280)
习 题		(280)
第九章	机器人规划	(283)
第一节	人工智能与机器人规划	(283)
9.1.1	人工智能与问题求解	(283)
9.1.2	归约在问题求解中的应用	(284)
9.1.3	逻辑在问题求解中的应用	(286)
9.1.4	高层机器人规划	(287)
第二节	积木世界的机器人规划	(289)
9.2.1	积木世界机器人问题	(290)
9.2.2	产生式系统及其规则	(290)
9.2.3	用F规则求规划序列	(291)
第三节	STRIPS规划系统	(293)
9.3.1	夏凯机器人及STRIPS系统的组成	(293)
9.3.2	STRIPS系统规划过程	(294)
9.3.3	含有多重解答的规划	(296)
第四节	具有学习能力的规划系统	(299)
9.4.1	问题的提出	(300)
9.4.2	PULP- I 系统的结构与操作方式	(300)
9.4.3	PULP- I 的世界模型和规划结果	(301)
第五节	分层规划	(302)
9.5.1	长度优先搜索	(302)
9.5.2	NOAH规划系统	(303)

第六节	基于专家系统的机器人规划	(305)
9.6.1	专家系统简介	(305)
9.6.2	机器人规划专家系统	(308)
9.6.3	ROPES机器人规划系统	(310)
习 题		(316)
第十章	机器人的应用	(318)
第一节	应用工业机器人必须考虑的因素	(318)
10.1.1	任务估计	(318)
10.1.2	应用机器人的三大要素	(319)
10.1.3	使用机器人的经验准则	(321)
10.1.4	采用机器人的步骤	(324)
第二节	机器人的应用范围	(325)
10.2.1	用于产业部门的机器人	(325)
10.2.2	用于探索的机器人	(327)
10.2.3	服务用机器人	(327)
第三节	工业机器人应用举例	(327)
10.3.1	材料搬运机器人	(328)
10.3.2	焊接机器人	(329)
10.3.3	喷漆机器人	(331)
10.3.4	装配机器人	(333)
第四节	机器人的未来应用	(336)
10.4.1	机器人技术的发展趋向	(336)
10.4.2	机器人的未来应用	(339)
10.4.3	应用机器人引起的社会问题	(341)
习 题		(342)
参考文献		(343)
英汉机器人名词术语对照表		(353)
CONTENTS		(373)

第一章 概述

“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。在我国,对铁臂阿童木的神通广大,已是家喻户晓、老幼皆知了。

但是,现实世界中的机器人,既不象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,它正在迅速发展,并开始对整个工业生产、太空和海洋探索,以及人类生活产生越来越大的影响。

第一节 机器人技术的发展

1.1.1 机器人的由来

“机器人”是存在于多种语言和文字的新造词,它体现了人类长期以来的一种愿望,即创造出一种象人一样的机器,以便能够代替人去进行各种工作^[1]。

尽管直到二十多年前,“机器人”才作为专有名词加以引用,然而机器人的概念在人类的想象中却已存在三千多年了。早在我国西周时代(公元前1066年—前771年),就流传有关巧匠偃师献给周穆王一个歌舞机器人(艺伎)的故事^[2]。作为第一批自动化动物之一的能够飞翔的木鸟是在公元前400年至350年间制成的^[3]。公元前3世纪,古希腊发明家戴达罗斯用青铜为克里特岛国王迈诺斯塑造了一个守卫宝岛的青铜卫士塔罗斯^[4]。在公元前2世纪出现的书籍中,描写过一个具有类似机器人角色的机械化剧院,这些角色能够在宫廷仪式上进行舞蹈和列队表演^[1]。

我国东汉时期(公元25—220年),张衡发明的指南车是世界上最早的机器人雏形。

人类历史进入近代之后,出现了第一次工业和科学革命。随着各种自动机器、动力机和动力系统的问世,机器人开始由幻想时期转入自动机械时期,许多机械式控制的机器人,主要是各种精巧的机器人玩具和工艺品,应运而生。

公元1768—1774年间,瑞士钟表匠德罗斯父子三人,设计制造出三个象真人一样大小的机器人——写字偶人、绘图偶人和弹风琴偶人。它们是由凸轮控制和弹簧驱动的自动机器,至今还作为国宝保存在瑞士纳切特尔市艺术和历史博物馆内。同时,还有德国梅林制造的巨型泥塑偶人“巨龙戈雷姆”,日本物理学家细川半藏设计的各种自动机械图

形^[6]，法国杰夸特设计的机械式可程序织造机等。1893年，加拿大摩尔设计的能行走的机器人“安德罗丁”，是以蒸汽为动力的^[6]。

这些机器人工艺珍品，标志着人类在机器人从梦想到现实这一漫长道路上，前进了一大步。

进入20世纪之后，机器人已噪动于社会和经济的母胎之中，人们含有几分不安地期待着它的诞生。他们不知道即将问世的机器人将是个宠儿，还是个怪物。1920年，捷克剧作家卡雷尔·凯培克在他的幻想情节剧《罗萨姆的万能机器人》(R.U.R)中，第一次提出了“机器人”这个名词^[7]。1951年，美国著名科学幻想小说家阿西摩夫在他的小说《我是机器人》中^[8]，提出了有名的“机器人三守则”：

- (1) 机器人必须不危害人类，也不允许它眼看人将受害而袖手旁观；
- (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作出牺牲。

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。至今，它仍为机器人研究人员、设计制造厂家和用户，提供了十分有意义的指导方针。

多连杆机构和数控机床的发展和应用为机器人技术打下基础^[9]。

1954年，美国人乔治·德沃尔设计了第一台电子程序可编的工业机器人，并于1961年发表了该项机器人专利。1962年，美国万能自动化(Unimation)公司的第一台机器人Unimate在美国通用汽车公司(GM)投入使用，这标志着第一代机器人的诞生^[10—11]。从此，机器人开始成为人类生活中的现实。此后，人类继续以自己的智慧和劳动，谱写机器人历史的新篇章。

1.1.2 机器人的定义

要给机器人下个合适的和为人们普遍(暂不用说一致)同意的定义是困难的。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、电影和电视中对机器人形状的描绘(它们与目前市场上供应的机器人大不相同)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的成果，就需要对机器人这一术语有某些共同的理解。现在，世界上对机器人还没有统一的定义，各国都有自己的定义。这些定义之间差别较大。例如，随着引用定义的不同，对1982年日本的机器人装机总数的估计，可在3000至47 000台之间变化。这种变化的部分原因是很难区别简单的机器人与其密切相关的运送材料的“刚性自动化”技术装置。

国际上，关于机器人的定义主要有如下几种^{[11]、[12]}：

(1) 英国简明牛津字典的定义。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”。

这一定义并不完全正确，因为还不存在与人类相似的机器人在运行，也不期望出现和使用这种机器人。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(manipulator)”。

尽管这一定义较实用些，但仍然并非完美无缺。这里指的是工业机器人。

(3) 日本工业机器人协会 (JIRA) 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 (end effector) 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器”。

或者分为两种情况来定义:

①工业机器人是“一种能够执行与人的上肢 (手和臂) 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”。

前一定义是工业机器人的一个较为广义的定义。后一种则分别对工业机器人和智能机器人进行定义。

(4) 美国国家标准局 (NBS) 的定义。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”。

这也是一种比较广义的工业机器人定义。

(5) 国际标准组织 (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”。

显然, 这一定义与美国机器人协会的定义相似。

(6) 关于我国机器人的定义。随着机器人技术的发展, 我国也面临讨论和制订关于机器人技术的各项标准问题, 其中包括对机器人的定义。有的专家建议把机器人定义为“一种拟人功能的机械电子装置” (a mechanronic device to imitate some human functions) [13]。我们可以参考各国的定义, 结合我国情况, 对机器人作出统一的定义。

1.1.3 机器人技术的进展 [9] [14]—[17]

第一台工业机器人问世后头十年, 从60年代初期到70年代初期, 机器人技术的发展较为缓慢, 许多研究单位和公司所作的努力均未获成功。这一阶段的主要成果有美国斯坦福国际研究所 (SRI) 于1968年研制的移动式智能机器人夏凯 (Shakey) 和辛辛那提·米拉克龙 (Cincinnati Milacron) 公司于1973年制成的第一台适于投放市场的机器人T3等。

进入70年代之后, 人工智能学界开始对机器人产生浓厚兴趣。他们发现, 机器人的出现与发展为人工智能的发展带来了新的生机, 提供了一个很好的试验和应用场所, 是人工智能可能取得重大进展的潜在领域。这一认识, 很快为许多国家的科技界、产业界和政府有关部门所赞同。随着自动控制理论、电子计算机和航天技术的迅速发展, 到了70年代中期, 机器人技术进入了一个新的发展阶段。到70年代末期, 工业机器人有了更大的发展。进入80年代后, 机器人生产继续保持70年代后期的发展势头。现在, 机器人制造业已成为发展最快和最好的经济部门之一。

70年代以来, 机器人技术的发展具有下列几个特点:

(1) 在理论上提出了机器人的偿还期理论公式 [18]。该公式以机器人及其辅助设备的初期总投资为一方面, 以每年所节省的劳务费 (包括工资及津贴等) 加上材料费再减去年维修费为另一方面, 计算出应用机器人能够在多少年内收回成本。一个简化计算公式如下:

$$P = \frac{I}{L - M} \quad (1.1)$$

式中 P ——偿还期 (年);

I ——机器人及其附属设备的总投资;

L——全年节省的劳务费用，包括工资及津贴等；

M——全年维修费用；

另一个比较详细的计算偿还期的公式为：

$$P = \frac{(R + A + E) - C}{(L + M_1 - M_2) \times H \times (1 - TR) + D \times TR} \quad (1.2)$$

式中除已说明过的，其它符号表示：

R——机器人售价；

A——附属设备费用；

E——工程及安装费用；

C——税务信贷；

M₁——材料费用；

M₂——操作维修费用；

H——年运行小时数。设每年工作250天，则对于单班制，H = 250 × 8 × 1 = 2000

对于双班制，H = 250 × 8 × 2 = 4000 对于三班制，H = 250 × 8 × 3 = 6000

TR——公司税率；

D——年折旧费。

对于某种典型的机器人装置，当采用单班制、双班制和三班制时，其偿还期分别计算如下：

$$P_1 = \frac{110\,000 - 6000}{(20 + 1 - 2) \times 2000 \times 0.6 + 10\,000 \times 0.4} = 3.88 \text{ (年)}$$

$$P_2 = \frac{104\,000}{19 \times 4000 \times 0.6 + 4000} = 2.10 \text{ (年)}$$

$$P_3 = \frac{104\,000}{19 \times 6000 \times 0.6 + 4000} = 1.44 \text{ (年)}$$

对于单班、双班和三班制，当时美国的机器人偿还期一般分别为3—4年、2—3年和1—2年。例如，对于上例中的两班制，只要2.1年就能够收回全部投资。如果机器人的有效工作年限为10—15年，那么其余近8—13年时间就可为投资者获取更大的利润。这一理论吸引了更多的人对机器人工业和技术投资以及使用机器人。

值得指出，由于机器人设备情况、所处国别、所在年分、生产组织和工资水平的不同，计算所得偿还期可能有很大的差别。

(2) 日本后来居上^{[19][20]}。1968年日本才开始有了第一台机器人。这一年，日本川崎重工业公司从美国引进Unimate机器人，并对它进行改进，增加了视觉功能，使其成为一种具有智能的机器人。这一成就，引起日本产业界和政府的高度重视，且于1971年（比美国早4年）成立了日本工业机器人协会。此后，日本工业机器人技术得到飞快发展，并在年产量和装机台数上迅速赶上并大大超过美国，跃居世界首位。1971—1981年十年间，日本工业机器人的年产量增加25倍，累计总产量增加30倍以上。1981年日本所拥有的机器人总台数，占全世界机器人总台数的57.5%（按美国机器人协会的定义统计），甚至更高（按JIRA的定义统计）。

由于日本工业机器人的崛起，美日之间在机器人制造业以及与机器人密切相关的汽车制造和电机电器制造等工业技术领域以及国际市场上的竞争，也日益加剧。

(3) 机器人在世界范围内得到迅速发展^[21]。除日本外，世界上许多其它工业国家，如美

国、苏联和西欧一些国家的机器人也发展得很快。例如,在美国,1970—1980年间的机器人台数增加20倍以上。尽管美国所拥有的机器人在数量上不如日本多,但其技术水平较高,占有一定的优势。其中,最具代表性的是1976年由美国国家航空和宇航局(NASA)执行的“海盗”号宇宙飞船火星着陆计划。该宇宙飞船在火星登陆后,送出两台具有采集样品用机械手的机器人。这些机器人在计算机控制下,按照预先编制的程序,操作各种复杂的科学实验仪器设备,在火星上采集样品,进行实验,并把实验所得数据,通过人造火星卫星,送回地面。此外,美国对水下机器人的研究也取得重大进展。除了已能抓起堕入海中的氢弹和参加打捞沉入海底的潜艇外,到1979年,美国已研制成一种具有触觉功能的机器人。该智能机器人对水下物体具有触感辨识能力,能够在无人干预下,在不熟悉的水下环境中工作。

苏联的工业机器人生产也发展很快。1985年机器人产量为1975年的120倍,为1980年的9倍。

西欧的西德、英国、法国、意大利、瑞典和东欧的匈牙利、波兰、南斯拉夫以及加拿大和南朝鲜等,机器人制造业及应用机器人的情况都有很大发展。

(4) 应用范围遍及工业、科技和国防的各个领域^{[22][23]}。在日本,工业机器人应用得最多的工业部门依次为电机制造、汽车制造、塑料成型、通用机械制造和金属加工等工业。其中,电机和汽车制造工业所用机器人数量,占全国一半以上。在美国,制造工业中的焊接、搬运装卸、铸造和材料加工所使用的机器人占多数;其次则为喷漆、装配和精整用机器人。目前,美国有35%的机器人用于汽车工业;今后将逐渐向纤维、食品、电子和家用产品等工业部门扩展。在苏联,机器人的应用范围包括钟表和汽车零件的组装、原子能电站的维护、锻压加工、水下作业、装卸作业以及对人体有害物质的化学处理等。不久前,在全面调查的基础上,日本工业机器人协会公布了233个应用机器人的新领域,其中,涉及农林水产、土木建筑、运输、矿山、通讯、煤气、自来水、原子能发电、宇宙开发、医疗福利以及服务等行业。此外,还有许多军用、办公室用和家用机器人正在应用着。可见机器人的应用范围是非常广泛的。

(5) 形成了新学科——机器人学。机器人技术的迅速发展,已对许多国家的工业生产、太空和海洋探索、国防以及整个国民经济和人民生活产生了重大影响,而且这种影响必将进一步扩大。当一种工业、技术或经济发生重大变化时,总是要求科学和教育系统发生与之相适应的调整和发展。技术革命对机器人的需求和机器人工业的迅速发展,为机器人学的建立奠定了基础。现在,机器人学这一新学科已从它的幼年时代转入朝气蓬勃的青年时代。许多国家已先后成立了机器人协会或学会。在美国、英国、瑞典和日本等国,还设立了机器人学位(包括博士学位)计划^[24—26]。以机器人学科为中心的国际学术会议,如国际工业机器人会议(ISIR)、国际工业机器人技术会议(CIRT)、国际科学技术发展协会(IASTED)主办的国际机器人与自动化学术讨论会以及美国IEEE主办的国际机器人学与自动化会议(ICR&A)等,每年或隔年举行一次。有关出版刊物,也为数不少。其中,国际杂志就有《Robotics Research》,《Robotica》和《Robotics and Automation》等多种。

在我国,1985年已先后在几个学会内设立了机器人专业委员会,以组织和开展机器人学科的学术交流,促进机器人技术的发展,提高我国机器人学的学术水平和技术水平。从1987年起,由中国电子学会、中国自动化学会、中国机械工程学会、中国汽车工程学会和中国宇航学会等联合举办的全国机器人学术讨论会,每两年举行一次。机器人专业刊物,如《机器人》、《机器人技术》等,也已出版发行。此外,还有许多单位的机器人专家学者,参加

了国际机器人学术交流活动。在我国，机器人学这一新学科正在形成。

(6) 机器人向智能化方向发展。目前在工业上运行的90%以上的机器人，都不具有智能。随着工业机器人数量的快速增长和工业生产的发展，对机器人的工作能力也提出更高的要求，特别是需要各种具有不同程度智能的机器人。这些智能机器人，有的能够模拟人类用两条腿走路，可在凹凸不平的地面上行走移动；有的具有视觉和触觉功能，能够进行独立操作、自动装配和产品检验；有的具有自主控制和决策能力……这些智能机器人，不仅应用各种反馈传感器，而且还运用人工智能中各种学习、推理和决策技术。这方面最典型的例子要算日本通产省提出并于1983年开始执行的日本下一代机器人研究计划^[10]。这个计划的首要目标是要研制出用来代替人在危险和恶劣环境下工作的机器人。这种机器人具有自主决策能力，并适于多种应用。这一计划的实现，必将使智能机器人技术获得空前的进步。

在我国，也已把智能机器人列入国家高技术计划，足以证明政府有关部门对发展智能机器人的高度重视^[27]。

第二节 机器人的特点、结构与分类

1.2.1 机器人的主要特点

汇集机器人装置的各种特性信息是一项重要的工作。正在运行的机器人的经验数据，对于机器人制造厂家和用户都是利害悠关的。不过，经验数据通常只有在机器人作为一个生产模型投入运行之后，才能得到。往往需要一些有关性能的先验信息，以便用来制定设计的基本思想，以有助于生产出性能优良的机器人。

通用性和适应性是机器人的两个主要特征。

1. 通用性^[10] 机器人的通用性 (versatility) 取决于其几何特性和机械能力。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。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。

必须指出，通用性不是由自由度单独决定的。增加自由度一般能提高通用性程度。不过，还必须考虑其它因素，特别是末端装置的结构和能力，如它们能否适用不同的工具等。

2. 适应性^[28] 机器人的适应性 (adaptivity) 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其环境，即具有人工知觉。在这方面，机器人使用它的下述能力：

- (1) 运用传感器感测环境的能力；
- (2) 分析任务空间和执行操作规划的能力；
- (3) 自动指令模式能力。

迄今为止所开发的机器人知觉与人类对环境的解释能力相比，仍然是十分有限的。这个领域内的某些重要研究工作正在进行之中。

对于工业机器人来说，适应性指的是它所编好的程序模式和运动速度能够适应工件尺寸和位置以及工作场地的变化。这里，主要考虑两种适应性：

(1) 点适应性, 它涉及机器人如何找到点的位置。例如, 找到开始程序操作点的位置。

点适应性具有四种搜索(允许对程序进行自动反馈调节), 即近似搜索、延时近似搜索、精确搜索和自由搜索。近似搜索允许传感器在程序控制下沿着程序方向中断机器人的运动。延时近似搜索能够在编程传感器被激发一定时间之后中断机器人的运动。精确搜索能够使机器人停止在传感器信号出现变化的精确位置上。自由搜索能够使机器人找到满足所有编程传感器的位置。

(2) 曲线适应性, 它涉及机器人如何利用由传感器得到的信息沿着曲线工作。曲线适应性包括速度适应性和形状适应性两种。

速度适应性涉及选择最佳运动速度的问题。即使有了完全确定的运动曲线, 选择最佳运动速度仍然是困难的。有了速度适应性之后, 就能够根据传感器提供的信息, 来调整机器人的运动速度。

形状适应性涉及要求工具跟踪某条形状未知的曲线问题。

综合运用点适应性和曲线适应性, 能够对程序进行自动调整。初始编制的仅仅是个粗略的程序, 然后由系统自行适应实际位置和形状。

1.2.2 机器人系统的结构

一个机器人系统, 一般由下列四个互相作用的部分组成: 机械手、环境、任务和控制, 如图1.1所示^{[1][23]}。

机械手是具有传动执行装置的机械, 它由臂、关节和末端执行装置(工具等)构成, 组合为一个互相连接和互相依赖的运动

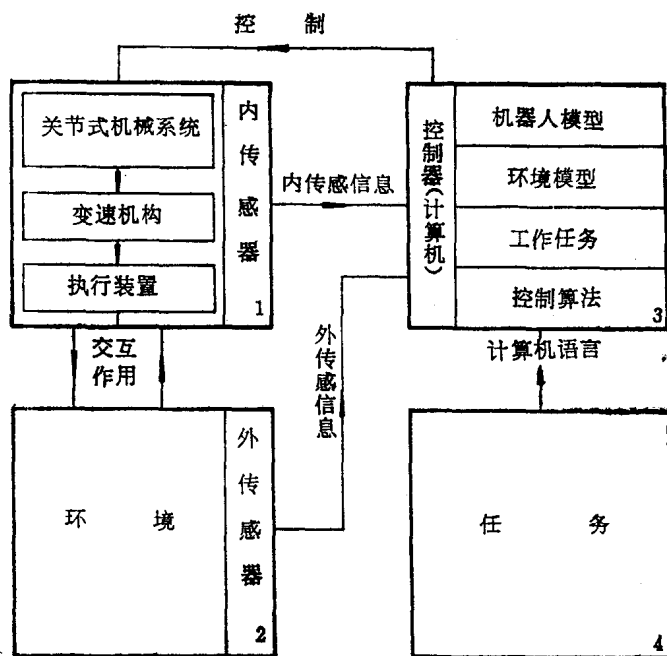


图1.1 机器人系统的基本结构

机构。机械手用于执行指定的作业任务。不同的机械手具有不同的结构类型。图1.2给出机械手的几何结构简图。

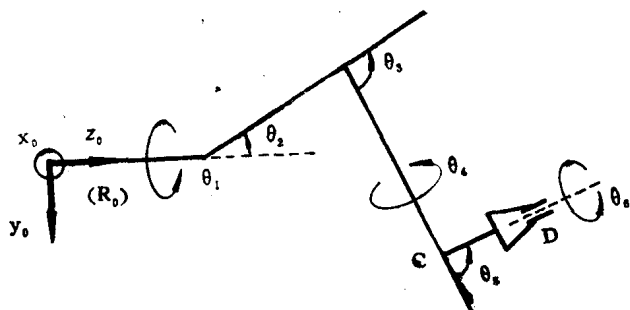


图1.2 机械手的几何结构简图

在一些文献中, 称机械手为操作机、机械臂或操作手。大多数机械手是具有几个自由度的关节式机械结构, 一般具有六个自由度。其中, 头三个自由度引导抓手装置至所需位置, 而后三个自由度用来决定末端执行装置的方向, 见图1.2。我们将在后面进一步讨论机械手的结构。

环境即指机器人所处的周围环境。

环境不仅由几何条件(可达空间)所决定, 而且由环境和它所包含的每个事物的全部自然特