

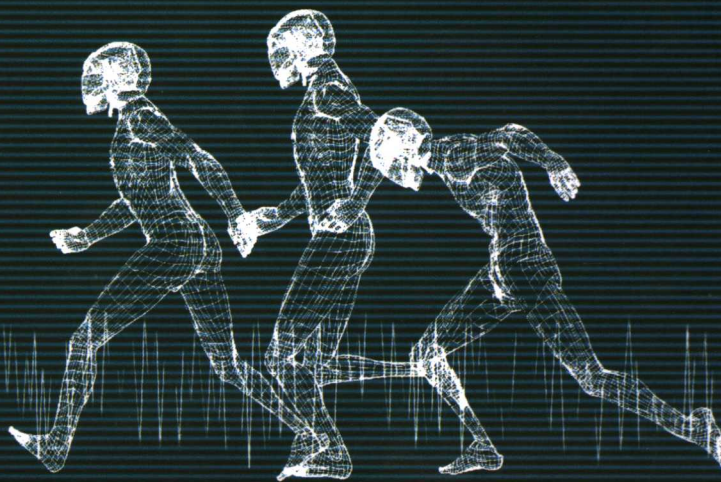
机械工程



国防科工委「十五」规划
教材

工业机器人技术基础

●孙树栋 主编



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·机械工程

工业机器人技术基础

Fundamentals of Robotics

孙树栋 主编

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本教材是编者结合所从事的教学与研究工作,借鉴国内外同行最新研究成果,为满足新时期本科与研究生教学改革与发展的具体要求而编写的。

全书共八章,包括概论、坐标系及其变换、机器人运动学、机器人动力学、机器人控制、机器人路径规划、机器人系统及典型应用以及机器人未来发展。在内容安排上做到循序渐进、由浅入深,既让读者全面掌握机器人学的基本知识,又让读者对现代机器人学的发展前景有一个了解。

本教材可作为计算机应用、自动控制、机械制造及其自动化、工业工程及其相关专业的教材,也可供在机器人技术领域工作的科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人技术基础/孙树栋主编. —西安:西北工业大学出版社,2006.12

国防科工委“十五”规划教材. 机械工程

ISBN 7-5612-2080-4

I. 工… II. 孙… III. 工业机器人—教材 VI. TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 040624 号

工业机器人技术基础

孙树栋 主编

责任编辑 季强 李阿盟

责任校对 季苏平

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

市场部电话:029-88493844 88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:12.25 字数:255千字

2006年12月第1版 2006年12月第1次印刷

印数:1~3000册

ISBN 7-5612-2080-4 定价:20.00元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蒨 史仪凯
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禔
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技



新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提



升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

很早以来,人类就幻想有一种拟人的机械,能实现如人的手、脚一样灵活自由的运动,能代替人从事各种复杂的劳动。随着人类认识的不断深入和科学技术的进步,这种梦想正逐步变成现实。

目前,机器人已经广泛应用于工业生产中,从事点焊、弧焊、喷漆、搬运、装配等工作;在汽车工业、电子工业、核工业等许多工业部门,在服务、娱乐、医疗等行业,在深海、外太空等人类极限能力以外的应用领域,机器人正发挥着巨大的、不可替代的作用。

机器人的广泛应用,极大地提高了劳动生产率,提高了产品质量,降低了产品成本,减轻了人的劳动强度,改善了劳动条件,扩大了人类认知活动的范围。因此,世界上许多发达国家都投入巨资发展机器人技术。

对机器人技术的研究诞生了一门新兴的学科——机器人学(Robotics)。它是一门边缘学科,是力学、机械学、计算机科学、电子学、信息论、控制论等许多学科交叉、融合的结果。短短40多年的时间,机器人学已经从襁褓时期,迅速发展、壮大成为当今举足轻重的学科之一。

本教材是以编者十余年来在机器人学教学与研究中的心得、体会与成果为基础,借鉴国内外同行最新研究成果,为满足新时期本科与研究生教学改革与发展的具体要求而编写的。

全书以向读者传授机器人学基本概念、基本理论、基本方法、典型应用实例为主线,将编者的科研成果与现代机器人学的发展现状及其发展趋势紧密结合起来。在内容安排上做到循序渐进、由浅入深,既让读者全面掌握机器人学的基本知识,又能让读者对现代机器人学的发展前景有一个较全面的了解。

书中第1章对机器人发展简史、定义、基本组成、功能、分类等基础知识进行了介绍;第2章对机器人学研究中用到的坐标系选取、机器人位姿(位置和方向)的描述方法、不同坐标系之间的变换,尤其是机器人学研究中特有的齐次坐标、齐次变换作了深入讲解;第3章对机器人运动学正、



反问题,雅可比矩阵及机器人奇异点等内容作了全面阐述;第4章对机器人动力学研究中常用的一些方法,如牛顿-欧拉方程、拉格朗日方程等进行了深入讲解,通过实例使读者对机器人动力学研究有较深入的理解;第5章对机器人控制系统和控制方法,包括力控制、自适应控制、变结构控制等问题进行了深入探讨;第6章结合编者近十年来的研究成果,特别是在遗传算法方面的研究成果,讲解了机器人路径规划问题;第7章对机器人的各种典型应用进行了深入描述,力争使读者对现代机器人应用系统有一个较全面的、系统的认识,为今后选用机器人系统提供必要的基础;第8章对机器人学今后的发展趋势进行了总结与阐述,使读者对当今机器人学研究前沿有一个清楚的认识。

本教材由孙树栋任主编,徐娅萍、司书宾、黄英亮参加了编写工作。其中由孙树栋编写第1章和第6章,黄英亮编写第2章和第3章,徐娅萍编写第4章和第5章,司书宾编写第7章和第8章,全书由孙树栋统稿。

本教材由清华大学孙增圻教授和南京航空航天大学朱剑英教授任主审,两位专家提出了许多建设性意见和建议,使本教材编写质量得到进一步提高,编者对两位主审老师的辛勤劳动表示衷心的感谢!

本教材在编写过程中,参考了大量国内外同行出版的教材、专著、论文、网络文献等资料,书末附有参考文献。在此,编者对各位原编著者表示衷心感谢。但书中所列文献难免有所遗漏,对此编者敬请原编著者海涵,并请告知我们,以便再版时增补。

本教材的出版得到国防科学技术工业委员会“十五”重点教材建设项目的大力支持,对此编者表示衷心的感谢!同时,感谢西北工业大学出版社的同志们为本书出版所付出的艰辛努力!

限于时间和编者水平,书中难免存在错漏之处,望读者不吝赐教。

编者

2006年6月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 机器人及其发展	1
1.1.1 机器人的由来	1
1.1.2 机器人的发展	2
1.2 机器人定义与基本组成	5
1.2.1 机器人与机器人学定义	5
1.2.2 机器人基本组成	6
1.3 机器人技术参数	7
1.3.1 机器人自由度与机动度	7
1.3.2 机器人额定速度与额定负载	8
1.3.3 机器人工作空间	8
1.3.4 机器人分辨率、位姿准确度和位姿重复性	9
1.4 机器人的分类	9
1.4.1 按机器人的几何结构分类	9
1.4.2 按机器人的控制方式分类	10
1.4.3 按机器人的智能程度分类	11
1.4.4 按机器人的移动方式分类	12
1.5 本章小结	12
习题	12
第 2 章 坐标系及其变换	13
2.1 机器人坐标系	13
2.1.1 参考坐标系	13
2.1.2 关节坐标系	13
2.2 机器人位姿表述	14
2.2.1 直角坐标表示	14
2.2.2 欧拉角表示	16
2.3 坐标变换	17
2.3.1 直角坐标及其变换	17
2.3.2 齐次坐标及其变换	19
2.4 本章小结	28
习题	28



第 3 章 机器人运动学	31
3.1 概述	31
3.2 机器人运动学方程	32
3.2.1 A 矩阵	32
3.2.2 T 矩阵	36
3.2.3 运动学方程	39
3.3 机器人运动学方程求解	41
3.3.1 运动学方程求解方法	41
3.3.2 运动学方程求解实例	45
3.4 雅可比矩阵	47
3.4.1 微分运动和微分变换	47
3.4.2 雅可比矩阵及其应用	53
3.4.3 机器人奇异点	57
3.5 本章小结	58
习题	58
第 4 章 机器人动力学	62
4.1 牛顿-欧拉方程	62
4.1.1 连杆的速度与加速度分析	62
4.1.2 牛顿-欧拉动力学方程	66
4.2 拉格朗日方程	75
4.2.1 拉格朗日函数	75
4.2.2 系统的动力学方程	78
4.3 本章小结	89
习题	89
第 5 章 机器人控制	92
5.1 概述	92
5.2 机器人位置控制	94
5.2.1 单关节位置控制	95
5.2.2 多关节位置控制	102
5.3 机器人的力控制	103
5.3.1 力控制基本概念	104
5.3.2 力和位置混合控制	107
5.4 机器人变结构控制	109
5.4.1 变结构控制的基本原理	110
5.4.2 机器人的滑模变结构控制器	111
5.5 机器人自适应控制	114
5.5.1 模型参考自适应控制	115



5.5.2	自校正自适应控制	117
5.6	本章小结	119
	习题	119
第6章	机器人路径规划	121
6.1	关节空间路径规划	121
6.1.1	三次多项式路径规划	121
6.1.2	含途经点的三次多项式路径规划	123
6.1.3	直线与抛物线路径规划	124
6.1.4	含途经点的直线与抛物线路径规划	125
6.2	直角坐标空间路径规划	128
6.3	移动机器人路径规划	129
6.3.1	拓扑法	130
6.3.2	几何法	130
6.3.3	势场法	132
6.4	遗传算法简介	133
6.4.1	遗传算法概要	133
6.4.2	遗传算法的运算过程	135
6.4.3	手工模拟计算示例	136
6.4.4	遗传算法的特点	138
6.5	基于遗传算法的移动机器人路径规划	139
6.5.1	离散空间中移动机器人路径规划	139
6.5.2	连续空间中移动机器人路径规划	143
6.6	本章小结	146
	习题	146
第7章	机器人系统及典型应用	148
7.1	机器人外围设备	148
7.2	焊接机器人	149
7.2.1	焊接机器人系统组成	149
7.2.2	点焊机器人	151
7.2.3	弧焊机器人	155
7.3	喷涂机器人	159
7.4	装配机器人	163
7.4.1	机器人装配单元	164
7.4.2	机器人装配线	165
7.5	本章小结	171
	习题	171
第8章	机器人未来发展	172
8.1	智能机器人	172



8.1.1 智能机器人现状.....	172
8.1.2 智能机器人关键技术.....	173
8.1.3 进化机器人.....	174
8.2 微机器人	175
8.2.1 微机器人的组成与应用.....	175
8.2.2 微机器人关键技术及发展前景.....	176
8.3 机器人发展趋势	177
8.4 本章小结	180
习题	180
参考文献	181

第 1 章 概 论

人类始终渴望制造一种像人一样的机器,以便将人从繁重的、枯燥的、危险的活动解脱出来。虽然当今机器人的本领还十分有限,但它正在迅速发展,并开始对人类生产、生活的各方面产生越来越大的影响。

1.1 机器人及其发展

1.1.1 机器人的由来

早在我国西周时期(公元前 1066—公元前 771 年),就流传有关巧匠偃师献给周穆王一个歌舞机器人的故事。我国东汉时期(25—220 年),张衡发明的指南车是世界上最早的机器人雏形。

第一次工业革命以来,随着各种自动机器、动力机械的问世,制造机器人开始由梦想转入现实,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。1768—1774 年间,瑞士钟表匠德罗斯父子,设计制造了三个像真人一样大小的写字偶人、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。1893 年,加拿大人摩尔设计制造了以蒸汽为动力的能行走的机器人“安德罗丁”。这些事例标志着人类对于制造机器人从梦想到现实这一漫长道路上前进了一大步。

1920 年,捷克剧作家卡雷尔·查培克(Karel Capek)在他的幻想情节剧《罗萨姆的万能机器人》中,第一次提出了“机器人”这个名词。在剧中,他把机器人描述成与人相似但能不知疲倦地工作的机器,最终机器人背叛它们的创造者而消灭了人类。1950 年,美国著名科幻小说作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,也不允许眼看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。

这三条守则现在仍被机器人研究人员、研制厂家和用户共同遵守。

现代机器人的研究始于第二次世界大战之后处理放射性物质的遥控机械手。当时的遥控机械手包括主操作手和从操作手,从操作手通过一系列连杆与主操作手相连,使用者通过操作主操作手而使从操作手完成同样的动作。1949 年,为了使从操作手能够操作诸如玻璃杯等易



碎片,在从操作手上增加了力反馈。

在遥控机械手发展的同时,由于航空工业的需求,出现了能够完成复杂曲面加工的数控机床(CNC)。1954年,美国人乔治·德沃尔(George Devol)用CNC机床控制器的可编程技术取代遥控机械手的主操作手,发明了第一台“可编程关节式输送装置”,并取得了该项专利,即工业机器人专利。约瑟夫·艾根伯格(Joseph Engelberger)购买了该专利,于1956年成立了万能自动化(Unimation)公司。1961年,该公司研制出第一台机器人Unimate,并在美国通用汽车公司(GM)投入使用,其外形如图1.1所示,这标志着第一代工业机器人的诞生。

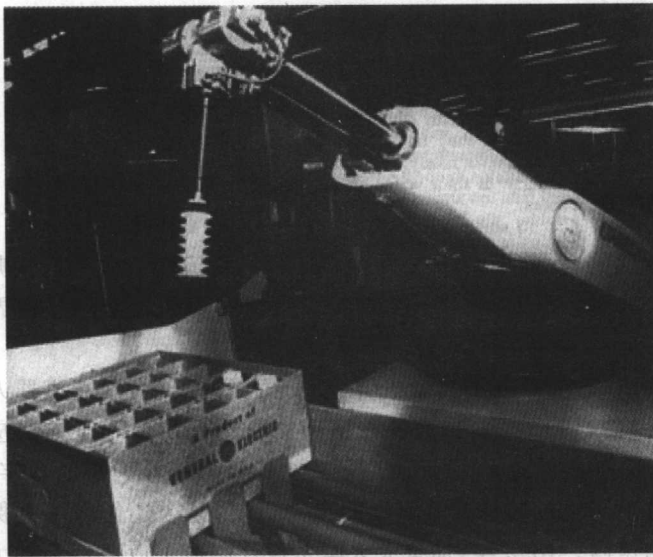


图 1.1 第一台机器人 Unimate

1.1.2 机器人的发展

1962年,斯坦福(Stanford)操作手问世,其外形如图1.2所示。该机器人有6个关节,其中一个移动关节。1974年,机床制造商辛辛那提·米拉克龙(Cincinnati Milacron)的公司研制成功第一台计算机控制的机器人未来工具(The Tomorrow Tool, T³),其外形如图1.3所示。它能提起45kg重物,并能在装配线上跟踪运动的工件。1978年,Unimation公司开发出用于装配的可编程万能机器人PUMA(Programmable Universal Manipulator for Assembly)机器人,其外形如图1.4所示。它是一种多关节结构形式、全电机驱动、多CPU分级控制的机器人,应用范围十分广泛。

1976年,美国国家航空航天局(NASA)成功实现了“海盗”号宇宙飞船火星着陆计划,该宇宙飞船在火星着陆后,释放出两台机器人,它们在地面监控人员和计算机的共同控制下,在火星上采集样品进行实验,并把实验所得数据通过卫星送回地面。

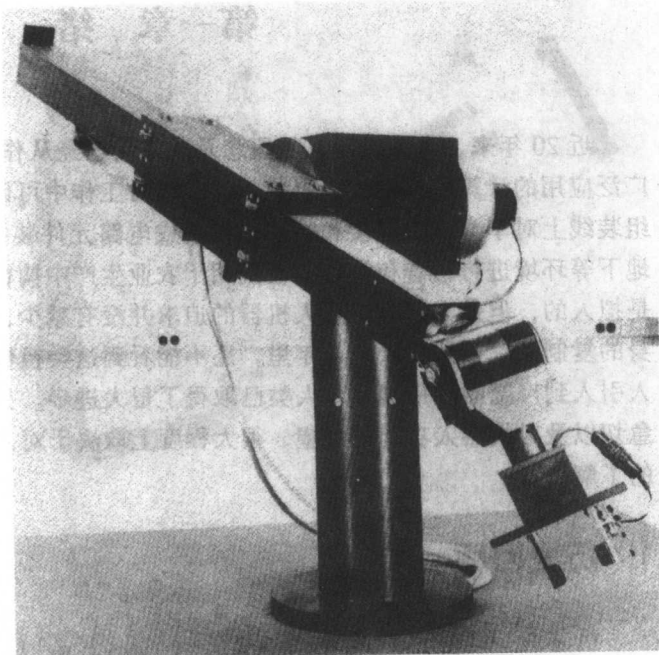


图 1.2 Stanford 操作手



图 1.3 T³ 机器人

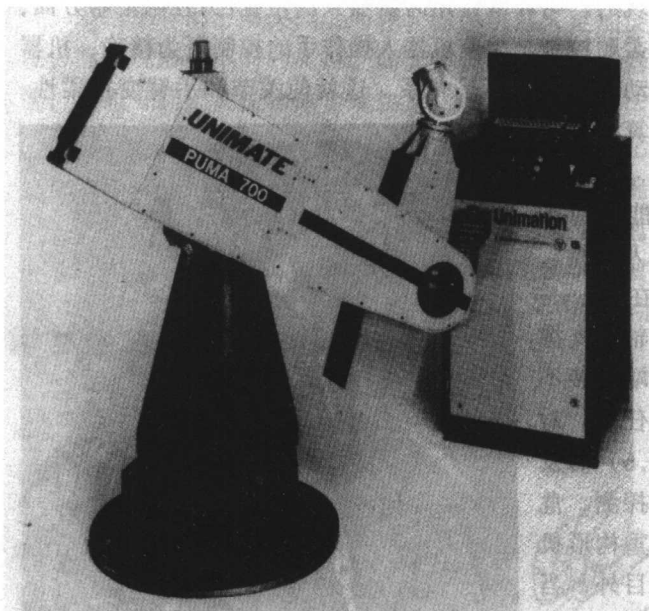


图 1.4 PUMA 机器人

1968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。这一成就引起了日本产业界和政府的高度重视,并在1971年成立了日本工业机器人协会。1979年,日本山梨大学的牧野洋教授研制成功水平关节型 SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm)机器人,其外形如图 1.5 所示,它特别适合于垂直方向装配作业。

随着工业机器人应用的普及和推广,机器人的驱动方式也发生了巨大变化。出于洁净和廉价的考虑,对于轻载作业的机器人常采用电机驱动,但是由于电机只有在高速时才能获得最大功率,机器人在工作时需对电机进行减速,齿轮减速不可避免带来摩擦、间隙等,引起较大运动误差,因此需要寻找一种无须对电机进行减速、能直接驱动机器人关节的方法。1981年,美国卡内基·梅隆大学(Carnegie Mellon)研制成功直接驱动机器人。

我国对于现代机器人研究和开发始于 20 世纪 70 年代,从 80 年代中期进入快速发展阶段。国家科技攻关计划、国家高技术研究与发展计划等都将机器人的研究和开发列为重点。我国先后研制成功点焊、弧焊、喷漆和搬运等工业机器人,并成功用于工业生产中;在特种机器人领域,我国也取得了丰硕成果,先后研制成功 6 000 m 水下自治机器人、双足步行机器人、多手指灵巧手等。

人器器了 E.1 图