



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学机械工程及其自动化系列教材

机器人技术与应用

Robot Technology and Application

陈恳 杨向东 刘莉 杨东超 编著

Chen Ken Yang Xiangdong Liu Li Yang Dongchao

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学机械工程及其自动化系列教材

机器人技术与应用

Robot Technology and Application

陈恳 杨向东 刘莉 杨东超 编著

Chen Ken Yang Xiangdong Liu Li Yang Dongchao

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为高等工科院校“机器人技术与应用”课程教材。主要内容包括:机器人及其技术的概论,机器人坐标变换及运动学与动力学建模方法,机器人的控制理论与技术,机器人感知和智能,机器人设计技术,工业机器人和特种机器人的具体应用。

本书适用于高等院校机械工程和其他工程类专业师生和从事机器人科学与系统研究、设计、制造和应用的工程技术人员学习和参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

机器人技术与应用/陈恩等编著. —北京:清华大学出版社,2006.9

(清华大学机械工程及其自动化系列教材)

ISBN 7-302-13498-7

I. 机… II. 陈… III. 机器人技术—高等学校—教材 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 085034 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:张秋玲

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:15 插页:1 字数:320 千字

版 次:2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-13498-7/TH·214

印 数:1~4000

定 价:23.00 元

序言



随着科学技术的发展和经济全球化,当今人类已进入知识经济社会和信息社会。我国经济体制将进一步由计划经济向社会主义市场经济转轨,经济的竞争性、变动性大大加强。过去在计划经济下形成的对口专业教育的观念,需要转向适应不断变化的社会需求,也就是说由对口性转向适应性。由于技术进步迅速发展,知识更新的周期缩短,现代教育观念将转变为终身教育。

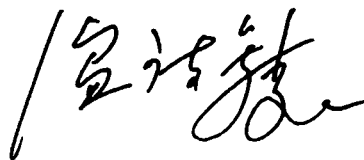
认清当前教育改革的发展趋势,进一步转变教育思想和教育观念,需要立足于培养“高层次、高素质、多样化、创新型”人才。高层次人才要具有良好的素质,包括政治思想素质、业务素质和文化素质。通识教育给学生以宽广的知识面,为进一步深造和就业打下坚实的基础。

通识教育是当代学科发展趋势的需要,通过多学科的交叉和本硕统筹教育模式,把通与专结合起来。使学生既具有本学科的坚实基础,又通晓相关学科的发展趋势和知识。在综合学科的基础上,培养出多样化创新型的人才。我国当前国情与发达国家不尽相同,我国现状是工业化与知识化并存,所以不能照搬国外的培养模式。大学教育应成为提供高素质人才的基础,为我国的经济做出更大贡献。所以通过课程结构调整、教学内容更新和教学方法改革,改善人才的知识结构,才能创出具有特色的一流人才培养模式。

教材在培养人才中起着举足轻重的作用,是深化课程体系和教学内容的改革和教

学方式改革成果的总结。清华大学精密仪器与机械学系组织编写一套系列教材,它主要涉及机械工程学科本科生和研究生课程中的基础课、专业课和实践课。本着“先进性、创新性、实用性”的宗旨,力争反映当代机械科学技术的基本内容和发展趋势,尽可能地将最新的生产和科研成果纳入到教材中。在编写中力图符合教学特点和学生的认识规律,全面提升教材质量,创出新的教学体系。

中国科学院院士



2003年2月24日

清华大学机械工程及其自动化系列教材

编 委 会

顾 问 (按姓氏笔画排序)

金国藩(中国工程院院士)

温诗铸(中国科学院院士)

主 任 李庆祥

副主任 丁天怀 贾惠波 申永胜

委 员 刘朝儒 陈 愚 王东生 王伯雄

毛文炜 郁鼎文 郝智秀 季林红

秘 书 冯 涓 陆体军

前言



各种机器人的创造一直是人类的梦想和追求,也是 21 世纪科技发展的热点之一,其发展具有创新和战略性,对国民经济和国家安全具有巨大影响。

机器人技术建立在多学科发展的基础之上,具有应用领域广、技术新、学科综合与交叉性强等特点。传统的机器人技术涉及机械学、电子学、自动控制等学科;现代机器人技术则综合了更加广泛的学科和技术领域,如计算机技术、仿生学、生物工程、人工智能、材料、微机械、信息工程、遥感等。各种各样的机器人不但已经成为现代高科技的应用载体,而且自身也迅速发展成为一个相对独立的研究与交叉技术领域,形成了特有的理论研究和学术发展方向,具有鲜明的学科特色。

基于机器人技术的特色与发展,随着清华大学教学改革的深入,清华大学精密仪器与机械学系制造工程研究所在 2004 年秋季将机器人基础理论与技术类课程引入本科教学课程体系,第一次面向全校工程类学生开设“机器人技术与应用”课程。开设这门新课程的目的是使学生在掌握机器人学科基本理论与技术知识的同时,强化交叉学科知识,开阔眼界,提高实践能力、想象力和创造力,培养创新精神。

为配合这门新课程的教学,编者结合现代机器人技术的新发展,融入编者近年的科学研究成果,在经过了两届课程讲义试用的基础上,正式编写出版了这本教材。

本教材力图在精练地阐述机器人基础理论与技术方法的基础上,通过大量典型机器人系统实例和例题的分析与讨论,将机器人学科理论与技术进行系统的融合与贯通,以利于读者完整和具体地了解与掌握机器人理论和技术知识基础体系,为所学知识的应用、扩展和深化奠定扎实的基础。

全书由陈恩、刘莉和杨向东主编,其中第 1 章、第 3 章、第 5 章、第 6 章由陈恩、付成龙、宋章军编写,第 2 章由杨向东、杨东超和熊璟编写,第 4 章由刘莉编写。张伯鹏教授审

阅了书稿。清华大学精密仪器与机械学系机器人及其自动化研究室的其他同事和研究生也对稿件的完成提供了无私的支持和帮助。由于机器人技术及其相关学科发展迅速,限于作者水平,本书难免存在不足,在此恳请读者提出宝贵意见。

编著者

2006年6月于清华园

目录

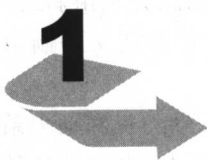


1	绪论	1
1.1	机器人的发展与概念	1
1.1.1	机器人及其技术的发展历史	1
1.1.2	基本术语、定义与概念	6
1.1.3	未来展望	8
1.2	机器人的分类与组成	9
1.2.1	基本分类	9
1.2.2	结构组成及其功能	11
1.2.3	执行机构的自由度布置形式	13
1.3	机器人学的相关理论与技术	16
1.3.1	基础理论	17
1.3.2	技术与方法	17
1.4	本书主要内容	17
	习题	18
2	机器人学的基础理论	19
2.1	刚体的位姿描述	19
2.1.1	刚体旋转运动	19
2.1.2	旋转矩阵	20
2.1.3	坐标变换与齐次坐标	27
2.1.4	刚体的位姿描述	29
2.2	机器人运动学与静力学	31

2.2.1	Denavit-Hartenberg 描述方法与连杆坐标系建立	31
2.2.2	操作臂运动学方程	34
2.2.3	可解耦操作臂的逆运动学问题	36
2.2.4	串联操作臂速度和加速度分析	44
2.2.5	操作臂的奇异性	48
2.2.6	串联操作臂的静力学分析	50
2.2.7	操作性能指标	50
2.3	机器人动力学	52
2.3.1	操作臂的牛顿-欧拉方程	52
2.3.2	操作臂的拉格朗日方程	56
习题		57
3	机器人控制理论与技术	61
3.1	机器人控制问题	61
3.1.1	前言	61
3.1.2	控制系统组成结构	63
3.1.3	控制性能要求	64
3.2	机器人的轨迹控制	65
3.2.1	问题描述	66
3.2.2	单关节轨迹控制	66
3.2.3	多关节的计算力矩控制	70
3.2.4	多关节的 PD 控制	72
3.2.5	工作空间控制	72
3.3	机器人的力控制	74
3.3.1	问题描述	74
3.3.2	阻抗控制	76
3.3.3	混合控制	77
3.4	机器人的高级智能动态控制	78
3.4.1	问题描述	78
3.4.2	自适应控制	79
3.4.3	学习控制	83
3.5	机器人的生物控制	86
3.5.1	行为主义控制理论	86
3.5.2	中枢模式发生器	87

3.5.3 仿生遗传算法控制	89
3.6 多机器人控制	91
3.6.1 多机器人体系结构	91
3.6.2 多机器人的通信	92
3.6.3 多机器人的学习	93
3.6.4 多机器人的协调	93
3.7 机器人控制系统	94
3.7.1 工业机器人控制系统	94
3.7.2 仿人机器人控制系统	96
3.7.3 特种机器人控制系统	102
习题	104
4 机器人感知与智能	106
4.1 基本概念与相关理论	106
4.1.1 机器人信息检测与分析方法	106
4.1.2 机器人感知系统	108
4.1.3 多传感器系统与信息融合	111
4.1.4 机器人与人工智能	111
4.2 机器人感觉与传感器	112
4.2.1 力觉与传感器	112
4.2.2 触觉与传感器	116
4.2.3 接近觉与传感器	120
4.2.4 听觉与传感器	122
4.2.5 视觉与传感器	123
4.2.6 嗅觉与传感器	127
4.3 机器人信息识别、表达与融合	127
4.3.1 触觉信息识别	127
4.3.2 视觉信息识别	129
4.3.3 语音合成与识别	133
4.3.4 多传感器信息融合理论与算法	135
4.4 机器人智能	136
4.4.1 环境模型的描述	137
4.4.2 基于传感信息的规划问题	137
4.4.3 学习与推理	138

4.4.4 人机交互	139
4.5 感知与智能应用系统实例	139
4.5.1 多传感器智能手爪与作业	139
4.5.2 机器人情感表达系统	143
4.5.3 仿人机器人智能行走系统	146
习题	158
5 机器人设计技术	159
5.1 设计方法与设计原则	159
5.1.1 一般设计技术方法	159
5.1.2 仿生设计技术方法	165
5.2 一般工业机器人系统设计	167
5.2.1 设计参数与指标	167
5.2.2 系统总体功能和结构方案设计	169
5.2.3 分系统详细设计及实现	169
5.2.4 系统内外部接口设计	172
5.3 特种机器人系统设计	172
5.3.1 通风管道清扫机器人设计	173
5.3.2 仿人机器人设计	180
5.3.3 油罐检测爬壁机器人设计	185
5.3.4 ZXPJ01 型消防机器人设计	196
习题	201
6 机器人及其技术应用	202
6.1 机器人的应用概况	202
6.1.1 全球机器人应用概况	202
6.1.2 我国机器人应用概况	203
6.2 工业机器人的应用	205
6.2.1 机器人制造系统	205
6.2.2 工业机器人系统应用实例	207
6.3 特种机器人的应用	218
6.3.1 特种机器人系统	218
6.3.2 特种机器人系统应用实例	218
习题	225
参考文献	226



绪 论

机器人技术与系统作为 20 世纪人类最伟大的发明之一,自 60 年代初问世以来,经历 40 多年的发展已取得实质性的进步和成果。

在传统的制造生产领域,工业机器人经过诞生、成长、成熟期后,已成为制造业中不可缺少的核心自动化装备,目前世界上约有近百万台工业机器人正在各种生产现场工作。

在非制造领域,特种机器人作为机器人家族中的后起之秀,由于其用途广泛,近年来发展十分迅速,服务机器人、水下机器人、医疗机器人、军用机器人、娱乐机器人等各种用途的特种机器人纷纷面世,而且正迅速向实用化迈进。

机器人技术是现代科学与技术的交叉和综合体现,先进机器人的发展代表着国家的综合科技实力和水平,目前许多先进工业国家都已将机器人技术列入本国 21 世纪高技术发展计划,其发展呈现两个突出的特点:一个是在横向上,机器人的应用领域在不断扩大,正从传统的制造向人类工作和生活的各种社会领域扩展,机器人的种类日趋增多;另一方面是在纵向上,随着需求范围的扩大,机器人的结构和形态发展多样化,高端系统呈现明显的仿生和智能特征,其性能不断提高,功能不断扩展和完善,各种机器人系统逐步向更高智能化和与人类社会更密切的融合方向发展。

1.1 机器人的发展与概念

1.1.1 机器人及其技术的发展历史

长期以来,人类一直渴望并追求制造一种像人一样的机器,以便将人类从繁杂的劳动中解脱出来。如古希腊诗人 Homeros 的长篇叙事诗《伊利亚特》中用黄金铸造的美丽侍女、希腊神话故事《阿鲁哥探险船》中的青铜巨人泰洛斯(Taloas)、犹太传说中的泥土巨人等时刻激励着人们一定要把美丽的神话变为现实。

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。我国宋代科学家沈括在《梦溪笔谈》一书中,也记载有一个“自动木人抓老鼠”的故事,“该

木人名钟馗,身高三尺,能左手扼鼠,右手持铁简毙之,动作灵巧”。三国时期,诸葛孔明为运送军用物资而发明了木牛流马,相传可以“日行三千、夜走八百”。《三国志·诸葛亮传》记载:“(建兴)九年,亮复出祁山,以木牛运,粮尽退军……十二年春,亮悉大众由斜谷出,以流马运,据武功五丈原,与司马宣王对于渭南。”18世纪瑞士钟表匠德罗斯父子制造了机器人玩具,由弹簧驱动,用凸轮控制,可以写字、弹风琴。

人类进入近代以后,出现了第一次工业革命。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。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的实质性进步。

机器人(Robot)一词是1920年由捷克作家卡雷尔·佩克(Karel Capek)在他的讽刺剧“罗莎姆的万能机器人”中首先提出的,该剧于1923年上演。他在剧中描述一个名为R. U. R.的工厂,为将人类从繁重而乏味的工作中解放出来,研究制造了一种与人类相似,但能不知疲倦工作的机器奴仆。该剧创造了“机器人-ROBOT”的概念,并由此派生出大量的科幻文学和电影作品,从而形成了对机器人的认识:像人,富有知识,甚至还有个性。

现代机器人的研究始于20世纪中期。1954年,美国人乔治·德沃尔(George C. D.)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,将工业机器人推上舞台,成为现代加工制造业的中坚力量。

第二次世界大战之后,美国阿贡国家能源实验室(Argonne & Oak Ridge Lab)为了解决核污染机械操作问题,首先开始研究主从式遥控机械操作手,用于处理放射性物质。这些早期的机械装置包括主操作手和从操作手,经使用者对主操作手的运动示教,通过从操作手加以运动再现。从操作手通过一系列机械连杆与主操作手相连。在通用电气公司制造的远程操作手(teleoperators)上,这些连杆最终被电动或液力耦合器所代替。

1960年,美国Unimation公司根据Devol的专利技术研制出第一台工业机器人样机,并定型生产Unimate(意为“万能自动”)工业机器人。Unimate工业机器人的设计将数控机床的重放特性与Roymond Goetz研制的遥控机械手的伺服控制能力结合起来。1962年,美国General Motors公司在压铸件的一条装配线上,安装了第一台Unimate工业机器人,如图1-1所示。

1967年,日本川崎重工公司从美国购买了工业机器人的生产许可证,日本从此开始了对机器人的研究和制造热潮。在20世纪60年代后期,喷漆弧焊机器人问世并逐步开始应用于工业生产。

进入20世纪70年代,工业机器人商品化程度大大提高,并逐步在工业中推广使用,由于计算机技术、控制技术和人工智能的发展,机器人的研究开发,在水平和规模上都跨上了新的台阶。1979年Unimation公司推出PUMA系列工业机器人,它是一种多CPU

协调控制的先进机器人。同年,日本山梨大学研制成功平面关节型 SCARA 机器人,在此后的装配作业中得到广泛应用。

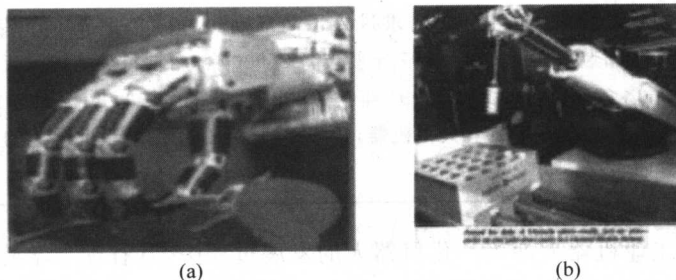


图 1-1 Roymond Goetz 操作机械手(a)和 Unimate 机器人(b)

到了 20 世纪 80 年代,生产技术从大批量生产自动化向小批量、多品种生产自动化转变,由于工业机器人能大大提高生产的柔性而被广泛普及,并逐渐形成了工业机器人产业。同时,少数工业化国家开展了具有视觉、触觉、多臂、能跨越或回避障碍等特殊作业条件下的各种机器人研究。在生产中应用工业机器人能提高生产效率和产品质量,使工人从紧张的工作中解放出来。它作为 20 世纪机械、电子、信息、控制等技术发展的集中体现和学科交叉的典型代表,不仅已被广泛应用在先进工业国家的各种传统工业操作作业中(如汽车壳体焊接、工件抓取、电子元件装配等),发挥着无法替代的重大作用,而且正逐渐向航空航天工程、生命科学工程和先进制造工程等高科技领域以及社会服务业发展,对人类社会的进步、科学探索和高速发展产生了革命性的巨大影响。现在工业机器人的技术已经十分成熟,国际标准化组织(ISO)已经制定了有关工业机器人的国际标准。表 1-1 是近代工业机器人发展的重大年时表。

表 1-1 近代工业机器人发展的重大年时表

时 间	发 展 进 程
1958 年	美国联合控制公司研制出第一台数控工业机器人原型
1959 年	美国 Unimation 公司推出第一台工业机器人
20 世纪 60 年代	随着传感技术和工业自动化的发展,工业机器人进入成长期,机器人开始向实用化发展,并被用于焊接和喷涂作业中
20 世纪 70 年代	随着计算机和人工智能的发展,机器人进入实用化时代。日本虽起步较晚,但结合国情,面向中小企业,采取了一系列鼓励使用机器人的措施,其机器人拥有量很快超过了美国,一举成为“机器人王国”
20 世纪 80 年代	机器人发展成为具有各种移动机构、通过传感器控制的自动化机器。工业机器人进入普及时代,开始在汽车、电子等行业得到大量使用,推动了机器人产业的发展。为满足人们个性化的要求,工业机器人的生产趋于小批量、多品种

续表

时 间	发 展 进 程
20 世纪 90 年代 {	初期,工业机器人的生产与需求进入了高潮期。1990 年世界上新装备机器人 81000 台,1991 年新装备 76000 台,1997 年新装备 85000 台,目前世界上已有近百万台工业机器人工作在各条战线上。20 世纪 90 年代后出现了具有感知、决策、动作能力的智能机器人,产生了智能机器或机器人化机器,并随着信息技术的发展,机器人的概念和应用领域也在不断扩大

在示教再现工业机器人即第一代机器人的发展过程中,麻省理工学院 H. A. Ernst 于 1962 年率先开始研究感知机器人技术,开发出具有触觉感知功能的 MH-1 型机器人,它可以感知识别方块,并自动堆积方块而不需人的干预,这是机器人适应环境的早期例子。随着机器人学这一新领域的发展,在麻省理工学院、斯坦福大学、斯坦福研究所(SRI)以及苏格兰爱丁堡大学这样的理工学院中,出现了好几个机器人研究中心,并出现了涉及人工智能的研究课题。

随着各种工业机器人产品逐渐系列化、标准化,其应用已深入到各个行业中。1982 年,美国通用汽车公司在装配线上为机器人装备了视觉系统,从而宣告了第二代具有基本感知功能的机器人的问世。20 世纪 80 年代以后,第二代机器人开始有了较大发展。与第一代机器人相比,第二代机器人具有更强的外界环境感知能力和环境适应性以及更高的性能,能完成更复杂的工作任务,并具有初步的智能。目前第二代机器人已投入使用。

20 世纪 80 年代和 90 年代,在着重解决机器人感觉的同时,人机接口和机器人与环境的交互接口方面也有了较大的进步。更为重要的是,随着计算机技术和人工智能技术的发展,让机器人模仿人进行逻辑推理的研究也迅速开展起来,出现了所谓的第三代机器人,即智能机器人。它应用人工智能、模糊控制、神经网络等先进控制方法,使机器人具有自主判断和自主决策等初等智能。作为第三代的智能机器人,它的特点是,在智能计算机控制下,通过多传感器感知机器人本体状态和作业环境状态,在知识库支持下进行推理作出决断,并对机器人作多变量实时智能控制。它不仅具有更全面的感覺能力,而且还具有独立判断和行动的能力,并具有记忆、推理和决策的能力,因而能够完成更加复杂的动作。20 世纪末至今,此类机器人的研究得到迅速发展。

从机器人的推广应用角度来看,机器人的发展大致经历了技术发展和探索的起步阶段,在技术有所突破之后的推广应用阶段和被产业界接受之后的普及阶段,只不过因为各个国家情况不同,机器人发展过程中这 3 个阶段的时间先后和各阶段时间的长短并不一样。经历了上述 3 个发展阶段,从机器人的一般技术特征上,形成了通常所说的三代机器人。第一代机器人属于示教再现型,第二代则具备了较丰富的外部感知能力,第三代机器

人是正在发展中的智能机器人。

目前,随着现代科学技术的进步,一方面机器人作为人类有力的工具正向高级智能化方向发展。另一方面,随着机器人的相关支撑技术的不断完善,如新型传感器、新材料和新的通信方法等技术的应用,机器人应用领域也不断扩大。比如深海探测机器人,在无缆操作的情况下能下潜数千米进行作业。又比如,2004 年登上火星的太空机器人,能忍受极端恶劣的太空环境,还要克服地面控制命令严重滞后的困难,在火星表面从事科学考察活动。

在机器人及其技术发展历史中,具有最重要影响的国家是美国和日本。美国在机器人技术的综合水平上仍处于领先地位,日本生产的机器人数量和种类则居世界首位。日本研制机器人的时间比美国大约晚了 10 年,但大有后来者居上之势。机器人的研究工作在റ本很普及,很多著名的高等院校,如东京大学、早稻田大学、京都大学、大阪大学等都有很强的机器人研究队伍,一些国立的专业研究所也在从事机器人的研究工作。尤其值得一提的是日本企业界对机器人研究的支持和推动,企业界不但参与了政府组织的研究项目,还拿出很多经费支持相关研究。比如日本正在实施的、由全国多个著名高校和研究所以参与的 Humanoid 研究项目,预算资金是 50 亿日元,据称其中有一半来自企业。在此之前实施的一个规模更大、耗资数百亿日元的微型机器人研究项目,也有相当大的一部分资金来自企业。

在中国,有人认为应用机器人只是为了节省劳动力,而我国劳动力资源丰富,发展机器人不一定符合我国国情。这是一种误解。机器人将发展成为一种高度自动化的智能工具,其进步和大范围应用,不仅可以将人从繁重和重复单调的工作中解放出来,使之专志于从事智力和创造性以及兴趣所在的工作,而且可以作为生活和探索及改造自然的仆人,极大地改善和丰富人类社会生活。其技术发展和广泛应用将带来社会和生活的革命,不仅能为社会经济建设带来高度的生产力和巨大的经济效益,而且将为我国的宇宙开发、海洋开发、核能利用等新兴领域的发展作出卓越的贡献。

我国已在“七五”计划中把机器人列入国家重点科研规划内容,在沈阳建立了全国第一个机器人研究示范工程,全面展开了机器人基础理论与基础元器件研究。十几年来,北京航空航天大学、中国科学院沈阳自动化所、哈尔滨工业大学、上海交通大学、清华大学等单位在国家“七五”计划和“863 计划”支持下,相继研制出示教再现型的搬运、点焊、弧焊、喷漆、装配等门类齐全的工业机器人及水下作业、军用和特种机器人。目前,示教再现型机器人技术已基本成熟,并在工厂中推广应用。我国自行生产的机器人喷漆流水线已在长春第一汽车厂及东风汽车厂投入运行。1986 年 3 月开始的国家“863”高科技发展规划已列入研究、开发智能机器人的内容。就目前来看,我们应从生产和应用的角度出发,结合我国国情,加快开发和生产实用型工业机器人和某些特种机器人。