

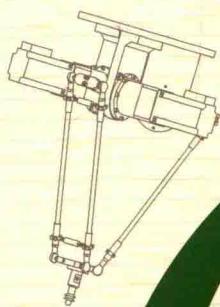
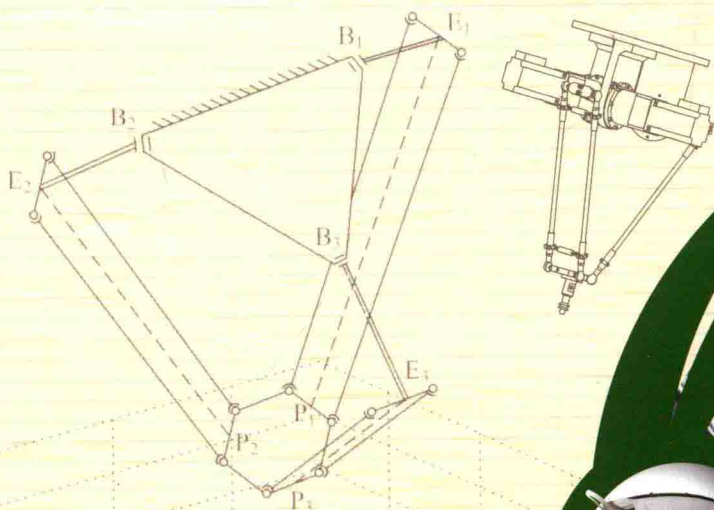
“十三五”规划教材

人才培养指定用书

工业机器人 原理及应用

(DELTA并联机器人)

张明文 于振中 主编 ◆



<http://www.irobot-edu.com>
教学视频+电子教案+技术交流论坛



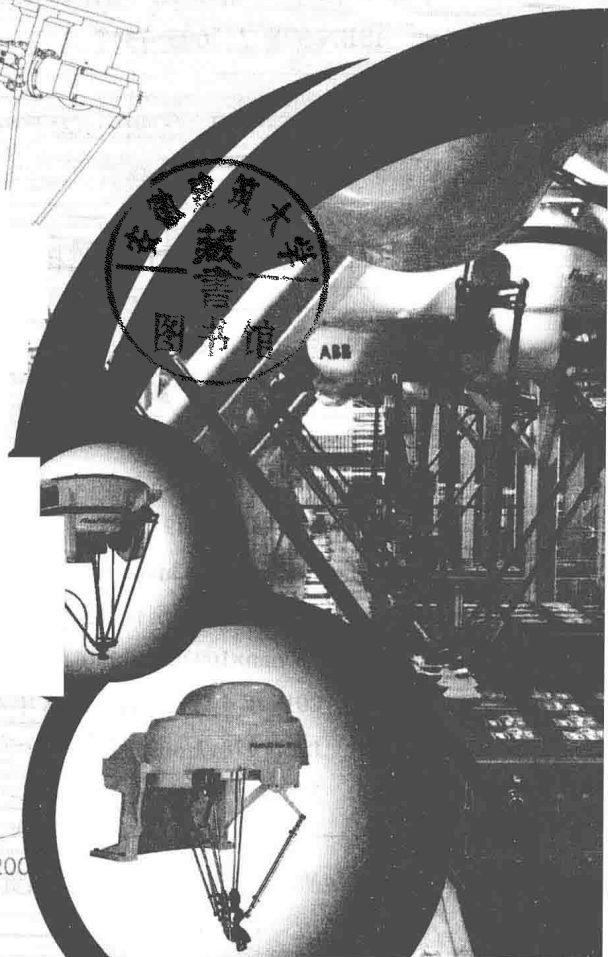
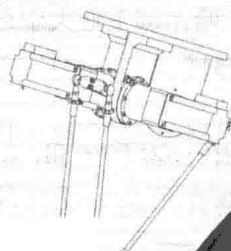
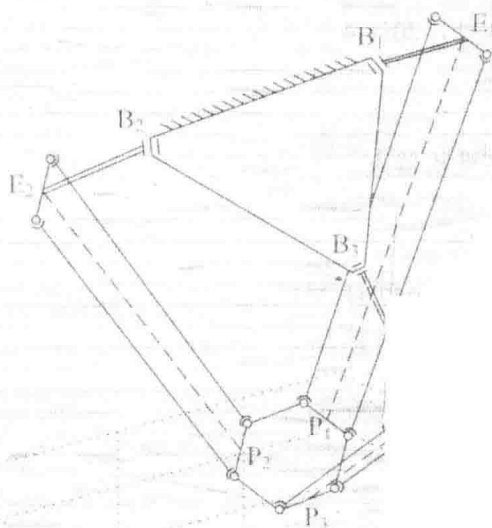
哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

本专业“十三五”规划教材
应用人才培养指定用书

工业机器人 原理及应用

(DELTA并联机器人)

张明文 于振中 主编 ◆



<http://www.irobot-edu.com> -200

教学视频+电子教案+技术交流论坛



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书以 DELTA 并联机器人为研究对象,由浅入深、循序渐进地介绍了 DELTA 并联机器人的基础共性知识、运动学和控制系统;基于自主设计的机器人,阐述了 DELTA 并联机器人机械、控制系统的设计原理和系统控制方法,并通过典型实例介绍其控制系统的编程应用;最后以 ABB 和 FANUC 机器人为例,系统介绍了工业领域中常用 DELTA 并联机器人的操作、编程、调试与应用等实用内容。

本书图文并茂,通俗易懂,具有很强的实用性和可操作性,既可作为应用型本科、中高职院校工业机器人相关专业的教材,又可作为工业机器人培训机构用书,并可供相关行业的技术人员参考。

本书有丰富的配套教学资源,凡使用本书作为教材的教师可咨询相关的机器人实训装备,也可通过书末“教学资源获取单”索取相关数字教学资源。咨询邮箱: edubot_zhang@126.com。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人原理及应用: DELTA 并联机器人/张明文,
于振中主编. —哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2018.4
ISBN 978-7-5603-7317-1

I. ①工… II. ①张… ②于… III. ①工业机器人
IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 069947 号

策划编辑 王桂芝 张 荣

责任编辑 王桂芝 刘 威

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨久利印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 320 千字

版 次 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-7317-1

定 价 36.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

工业机器人技术专业“十三五”规划教材
工业机器人应用人才培养指定用书

编 审 委 员 会

名誉主任 蔡鹤皋

主 任 韩杰才 李瑞峰 付宜利

副 主 任 于振中 张明文

委 员 （按姓氏首字母排序）

包春红 陈健健 陈 霞 封佳诚 高春能

高文婷 何定阳 顾三鸿 赫英强 李晓聪

刘馨芳 卢 昊 宁 金 齐建家 邵文涛

滕 武 王璐欢 王 伟 王伟夏 王 欣

吴冠伟 吴洪涛 吴战国 霰学会 杨润贤

姚立波 尹 政 喻 杰 袁静云 张广才



序 一

现阶段，我国制造业面临资源短缺、劳动成本上升、人口红利减少等压力，而工业机器人的应用与推广，将极大地提高生产效率和产品质量，降低生产成本和资源消耗，有效地提高我国工业制造竞争力。我国《机器人产业发展规划（2016—2020）》强调，机器人是先进制造业的关键支撑装备和未来生活方式的重要切入点。广泛采用工业机器人，对促进我国先进制造业的崛起，有着十分重要的意义。“机器换人，人用机器”的新型制造方式有效推进了工业转型升级。

工业机器人作为集众多先进技术于一体的现代制造业装备，自诞生至今已经取得了长足进步。当前，新科技革命和产业变革正在兴起，全球工业竞争格局面临重塑，世界各国紧抓历史机遇，纷纷出台了一系列国家战略：美国的“再工业化”战略、德国的“工业4.0”计划、欧盟的“2020增长战略”，以及我国推出的“中国制造2025”战略。这些国家都以先进制造业为重点战略，并将机器人作为智能制造的核心发展方向。伴随机器人技术的快速发展，工业机器人已成为柔性制造系统（FMS）、自动化工厂（FA）、计算机集成制造系统（CIMS）等先进制造业的关键支撑装备。

随着工业化和信息化的快速推进，我国工业机器人市场已进入高速发展时期。国际机器人联合会（IFR）统计显示，截至2016年，中国已成为全球最大的工业机器人市场。未来几年，中国工业机器人市场仍将保持高速的增长态势。然而，现阶段我国机器人技术人才匮乏，与巨大的市场需求严重不协调。《中国制造2025》强调要健全、完善中国制造业人才培养体系，为推动中国制造业从大国向强国转变提供人才保障。从国家战略层面而言，推进智能制造的产业化发展，工业机器人技术人才的培养首当其冲。

目前，结合《中国制造2025》的全面实施和国家职业教育改革，许多应用型本科、职业院校和技工院校纷纷开设工业机器人相关专业，但作为一门专业知识面很广的实用型学科，普遍存在师资力量缺乏、配套教材资源不完善、工业机器人实训装备不系统、技能考核体系不完善等问题，导致无法培养出企业需要的专业机器人技术人才，严重制约了我国机器人技术的推广和智能制造业的发展。江苏哈工海渡工业机器人有限公司依托哈尔滨工业大学在机器人方向的研究实力，顺应形势需要，产、学、研、用相结合，组织企业专家和一线科研人员开展了一系列企业调研，面向企业需求，联合高校教师共同编写了“工业机器人技术专业‘十三五’规划教材”系列图书。

该系列图书具有以下特点:

(1) 循序渐进, 系统性强。该系列图书从工业机器人的入门实用、技术基础、实训指导, 到工业机器人的编程与高级应用, 由浅入深, 有助于系统学习工业机器人技术。

(2) 配套资源, 丰富多样。该系列图书配有相应的电子课件、视频等教学资源, 以及配套的工业机器人教学装备, 构建了立体化的工业机器人教学体系。

(3) 通俗易懂, 实用性强。该系列图书言简意赅, 图文并茂, 既可用于应用型本科、职业院校和技工院校的工业机器人应用型人才培养, 也可供从事工业机器人操作、编程、运行、维护与管理等工作的技术人员参考学习。

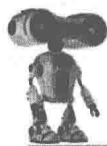
(4) 覆盖面广, 应用广泛。该系列图书介绍了国内外主流品牌机器人的编程、应用等相关内容, 顺应国内机器人产业人才发展需要, 符合制造业人才发展规划。

“工业机器人技术专业‘十三五’规划教材”系列图书结合实际应用, 教、学、用有机结合, 有助于读者系统学习工业机器人技术和强化、提高实践能力。本系列图书的出版发行, 必将提高我国工业机器人专业的教学效果, 全面促进“中国制造 2025”国家战略下我国工业机器人技术人才的培养和发展, 大力推进我国智能制造产业变革。

中国工程院院士



2017年6月于哈尔滨工业大学



序 二

自出现至今短短几十年中，机器人技术的发展取得长足进步；伴随产业变革的兴起和全球工业竞争格局的全面重塑，机器人产业发展越来越受到世界各国的高度关注，主要经济体纷纷将发展机器人产业上升为国家战略，提出“以先进制造业为重点战略，以‘机器人’为核心发展方向”，并将此作为保持和重获制造业竞争优势的重要手段。

作为人类在利用机械进行社会生产史上的一个重要里程碑，工业机器人是目前技术发展最成熟且应用最广泛的一类机器人。工业机器人现已广泛应用于汽车及零部件制造，电子、机械加工，模具生产等行业以实现自动化生产线，并参与焊接、装配、搬运、打磨、抛光、注塑等生产制造过程。工业机器人的应用，既保证了产品质量，提高了生产效率，又避免了大量工伤事故，有效推动了企业和社会生产力发展。作为先进制造业的关键支撑装备，工业机器人影响着人类生活和经济发展的方方面面，已成为衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志。

伴随着工业大国相继提出机器人产业政策，如德国的“工业 4.0”、美国的“先进制造伙伴计划”与“中国制造 2025”等国家政策，工业机器人产业迎来了快速发展态势。当前，随着劳动力成本上涨、人口红利逐渐消失，生产方式向柔性、智能、精细转变，中国制造业转型升级迫在眉睫。全球新一轮科技革命和产业变革与中国制造业转型升级形成历史性交汇，中国已经成为全球最大的机器人市场。大力发展工业机器人产业，对于打造我国制造业新优势、推动工业转型升级、加快制造强国建设、改善人民生活水平具有深远意义。

我国工业机器人产业迎来爆发性的发展机遇，然而，现阶段我国工业机器人领域人才储备数量严重不足，对企业而言，从工业机器人的基础操作维护人员到高端技术人才普遍存在巨大缺口，缺乏经过系统培训、能熟练安全应用工业机器人的专业人才。现代工业是立国的基础，需要有与时俱进的职业教育和人才培养配套资源。

“工业机器人技术专业‘十三五’规划教材”系列图书由江苏哈工海渡工业机器人有限公司联合众多高校和企业共同编写完成。该系列图书依托于哈尔滨工业大学的先进机器人研究技术，综合企业实际用人需求，充分贯彻了现代应用型人才培养“淡化理论，技能培养，重在运用”的指导思想。该系列图书既可作为应用型本科、中高职院校工业机器人技术或机器人工程专业的教材，也可作为机电一体化、自动化专业开设工业机器人相关课程的教学用书；系列图书涵盖了国际主流品牌和国内主要品牌机器人的入门实用、实训指

导、技术基础、高级编程等系列教材,注重循序渐进与系统学习,强化学生的工业机器人专业技术能力和实践操作能力。

该系列教材“立足工业,面向教育”,填补了我国在工业机器人基础应用及高级应用系列教材中的空白,有助于推进我国工业机器人技术人才的培养和发展,助力中国智造。

中国科学院院士



2017年6月



前 言

机器人是先进制造业的重要支撑装备，也是智能制造的关键切入点。工业机器人作为机器人家族中的重要一员，是目前技术最成熟、应用最广泛的一类机器人。作为衡量科技创新和高端制造发展水平的重要标志，工业机器人的研发和产业化应用被很多发达国家作为抢占未来制造业市场、提升竞争力的重要途径。在汽车工业、电子电器行业、工程机械等众多行业大量使用工业机器人自动化生产线，在保证产品质量的同时，改善了工作环境，提高了社会生产效率，有力推动了企业和社会生产力的发展。

当前，在全球范围内的制造产业战略转型期，我国工业机器人产业迎来爆发性的发展机遇。并且随着我国劳动力成本上涨，人口红利逐渐消失，生产方式向柔性、智能、精细转变，构建新型智能制造体系迫在眉睫，对工业机器人的需求呈现大幅增长。大力发展工业机器人产业，对于打造我国制造业新优势、推动工业转型升级、加快制造强国建设、改善人民生活水平具有深远意义。《中国制造 2025》将机器人作为重点发展领域进行总体部署，机器人产业已经上升到国家战略层面。

作为工业常用的一种机器人，DELTA 并联机器人广泛应用于多种行业。然而，现阶段我国工业机器人领域人才供需失衡，缺乏设计研发机器人的高端人才和能熟练安全使用与维护工业机器人的专业人才。针对现有国情，为了更好地推广工业机器人技术的应用和加速推进人才培养，亟需编写一本系统、全面的 DELTA 并联机器人原理及应用教材。

本书主要介绍 DELTA 并联机器人的基础知识与设计原理，并结合 ABB 和 FANUC 机器人，介绍了工业生产中常用的并联机器人机型与编程操作。本书依据学习者的认知规律，侧重工业机器人的技术要点，通过相关典型实例，使读者快速掌握 DELTA 并联机器人的系统设计方法和编程应用，实现理论和实践的有机结合。本书可作为高等学校机电一体化、电气自动化及机器人技术等相关专业的教材，也可作为工业机器人培训机构的培训教材，并可供从事相关行业的技术人员参考使用。

工业机器人技术专业具有知识面广、实操性强等显著特点，为了提高教学效果，在教学方法上，建议采用启发式教学、开放性学习，重视实操演练和小组讨论；在学习过程中，建议结合本书配套的教学辅助资源，如工业机器人仿真软件、机器人实训台、教学课件及视频素材、教学参考与拓展资料等。以上资源可通过书末所附“教学资源获取单”咨询获取。

本书由哈工海渡机器人学院张明文和哈工大机器人（合肥）国际创新研究院于振中担任主编，顾三鸿和江南大学高春能任副主编，参加编写的还有李晓聪、吴冠伟和王璐欢等，由王伟和霰学会担任主审。全书由顾三鸿和高春能统稿，具体编写分工如下：高春能编写第1、2、4章，李晓聪编写第3、6章，顾三鸿编写第5章，王璐欢编写第7、8章，吴冠伟编写第9、10章。本书编写过程中，得到了哈工大机器人集团、上海ABB工程有限公司和上海发那科机器人有限公司等单位的有关领导、工程技术人员以及哈尔滨工业大学等学校教师的鼎力支持与帮助，在此表示衷心的感谢！

由于编者的水平有限，书中难免存在不足，敬请读者批评指正。任何意见和建议可反馈至 E-mail:edubot_zhang@126.com。

编者

2018年1月



目 录

第1章 绪 论

1.1 机器人的认知	1
1.1.1 机器人术语的来历	1
1.1.2 机器人原则	1
1.1.3 机器人的分类和应用	2
1.2 工业机器人	3
1.2.1 工业机器人的定义	3
1.2.2 工业机器人的构型	3
1.2.3 工业机器人的应用	6
1.3 DELTA 并联机器人	9
1.3.1 并联机器人的定义及特点	9
1.3.2 DELTA 并联机器人的结构	10
1.3.3 DELTA 并联机器人的应用	12
思考题	14

第2章 机器人基础知识

2.1 数理基础	15
2.1.1 位姿	15
2.1.2 平移坐标系	17
2.1.3 旋转坐标系	18
2.2 机构基础	19
2.2.1 机构简介	19
2.2.2 刚体自由度	20
2.2.3 机器人自由度	20
2.3 坐标系	21
2.4 性能参数	25
2.4.1 额定负载	25

2.4.2 工作空间	27
2.4.3 最大工作速度	28
2.4.4 工作精度	29
思考题	30

第3章 机器人运动学 31

3.1 DELTA 并联机构模型	31
3.1.1 自由度计算	32
3.1.2 模型参数定义	33
3.1.3 运动学定义	34
3.1.4 运动学方程	35
3.2 正运动学	36
3.2.1 正运动学解算	36
3.2.2 正运动学验证	39
3.3 逆运动学	41
3.3.1 逆运动学解算	41
3.3.2 逆运动学验证	44
3.4 工作空间	45
3.4.1 工作空间解算	45
3.4.2 工作空间验证	47
思考题	49

第4章 机器人控制系统 50

4.1 控制系统	50
4.1.1 基本结构	50
4.1.2 构成方案	50
4.2 控制器	52
4.2.1 基本组成	53
4.2.2 工作原理及功能	55
4.2.3 分类	56
4.2.4 专用控制器	59
4.2.5 通用控制器	62
4.3 伺服系统	64
4.3.1 伺服电动机	64

4.3.2 伺服驱动器	66
4.4 传感器	66
4.4.1 内部传感器	67
4.4.2 外部传感器	70
思考题	72

第 5 章 DELTA 并联机器人机械设计 74

5.1 DELTA 并联机器人参数确定	74
5.1.1 坐标系确定	74
5.1.2 杆长参数确定	75
5.1.3 关节参数确定	75
5.1.4 传动参数确定	77
5.2 DELTA 并联机器人机械设计	78
5.2.1 静平台设计	79
5.2.2 主动臂设计	80
5.2.3 从动臂设计	80
5.2.4 动平台设计	81
5.3 典型 DELTA 并联机器人	81
5.3.1 ABB IRB 360 机器人	81
5.3.2 FANUC Robot M-1iA 机器人	84
5.3.3 Adept Hornet 565 机器人	85
思考题	88

第 6 章 DELTA 并联机器人控制系统设计 89

6.1 控制系统原理图	89
6.2 运动控制系统	90
6.2.1 PMAC 运动控制器	91
6.2.2 PMAC 跳线配置	92
6.2.3 PMAC 与系统硬件连接	94
6.3 伺服系统	96
6.4 人机交互系统	98
6.5 传感系统	99
6.5.1 回零传感器	99
6.5.2 编码器	100

思考题	101
-----	-----

第7章 DELTA 并联机器人运动控制 102

7.1 编程软件	102
7.2 运动模式	103
7.3 指令介绍	106
7.4 程序编写	107
7.4.1 体系结构	107
7.4.2 运动程序编写过程	108
7.4.3 PLC 程序编写	109
7.5 程序设计	111
7.5.1 I 变量配置	111
7.5.2 M 变量配置	113
7.5.3 运动学算法配置	116
7.5.4 主程序配置	118
思考题	118

第8章 并联机器人项目应用 119

8.1 实训环境	119
8.2 线性运动	120
8.2.1 相关指令介绍	120
8.2.2 运动示例	122
8.3 圆弧运动	123
8.3.1 相关指令介绍	123
8.3.2 运动示例	125
8.4 机器人抓取运动	126
8.4.1 相关指令介绍	126
8.4.2 运动示例	127
8.5 基于红外检测的单输送带跟踪运动	128
思考题	130

第9章 FANUC 并联机器人应用 131

9.1 机器人简介	131
-----------	-----

9.1.1 操作机	131
9.1.2 控制器	132
9.1.3 示教器	133
9.2 实训环境	140
9.3 编程及操作	141
9.3.1 手动操作	141
9.3.2 坐标系建立	143
9.3.3 I/O 通信	144
9.3.4 基本指令	147
9.3.5 程序编辑	152
9.4 项目应用	155
思考题	165

第 10 章 ABB 并联机器人应用

10.1 机器人简介	166
10.1.1 操作机	166
10.1.2 控制器	167
10.1.3 示教器	169
10.2 实训环境	172
10.3 编程及操作	172
10.3.1 手动操作	172
10.3.2 坐标系建立	178
10.3.3 I/O 通信	179
10.3.4 基本指令	183
10.3.5 程序编辑	187
10.4 项目应用	192
思考题	203

参考文献



第1章

绪论

机器人是典型的机电一体化装置，涉及机械、电气、控制、检测、通信和计算机等方面的知识。以互联网、新材料和新能源为基础，“数字化智能制造”为核心的新一轮工业革命即将到来，而工业机器人则是“数字化智能制造”的重要载体。

1.1 机器人的认知

1.1.1 机器人术语的来历

“机器人（Robot）”这一术语来源于一个科幻形象，首次出现在1920年捷克剧作家、科幻文学家、童话寓言家卡雷尔·凯培克发表的科幻剧《罗萨姆的万能机器人》中，



※ 机器人的认知

“Robot”就是从捷克文“Robota（意为农奴，苦力）”衍生而来的。在该剧中，一家虚构的机械生物厂商设计了类人机器 Robot 代替工人，让它们去充当劳动力。它们按照其主人的指令工作，没有感觉和情感，以呆板的方式从事繁重的劳动。

1.1.2 机器人原则

机器人的出现和快速发展是社会、经济发展的必然，也是为了提高社会的生产水平和人们的生活质量的需要。人类制造机器人主要是为了让它们代替人们做一些有危险、难以胜任或不宜长期进行的工作。

为了发展机器人，同时避免人类受到伤害，美国科幻作家阿西摩夫在1940年发表的小说《我是机器人》中首次提出了“机器人三原则”：

➤ 第一原则

机器人必须不能伤害人类，也不允许见到人类将要受伤害而袖手旁观。

➤ 第二原则

机器人必须完全服从于人类的命令，但不能违反第一原则。

➤ 第三原则

机器人应保护自身的安全，但不能违反第一和第二原则。

随着机器人的高速发展，1994年，Fuller 添加了第四条原则：

▶ 第四原则

机器人可从事人类的工作,前提是不会因此使工人失业。

机器人学术界一直将这些原则作为机器人开发的准则。

1.1.3 机器人的分类和应用

目前,机器人的应用比较广泛,按照应用领域的不同,国际上通常将机器人分为2类:工业机器人和服务机器人。

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。

工业机器人的种类较多,常用的有:搬运机器人、焊接机器人、喷涂机器人、装配机器人和码垛机器人等。

2. 服务机器人

服务机器人是指除工业自动化应用外,能为人类或设备完成有用任务的机器人。

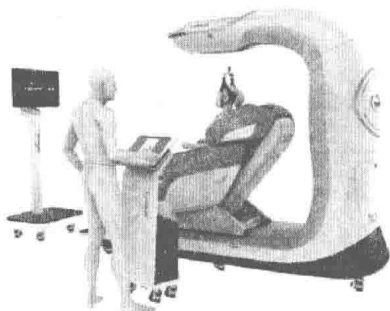
服务机器人可进一步划分为三类:特种机器人、公共服务机器人和个人/家用服务机器人。

▶ **特种机器人** 特种机器人是指由具有专业知识人士操控的、面向国家、特种任务的服务机器人,包括医用机器人(如图 1.1a 所示)、空间探测机器人、排爆机器人(如图 1.1b 所示)、水下作业机器人、管道检测机器人(如图 1.1e 所示)、消防机器人(如图 1.1f 所示)、农场作业机器人等。

▶ **公共服务机器人** 公共服务机器人是指面向公众或商业任务的服务机器人,包括迎宾机器人(如图 1.1d 所示)、餐厅服务机器人、酒店服务机器人、银行服务机器人、场馆服务机器人等。

▶ **个人/家用服务机器人** 个人/家用服务机器人是指在家庭以及类似环境中由非专业人士使用的服务机器人,包括家政(如图 1.1c 所示)、教育娱乐、养老助残、个人运输、安防监控等类型的机器人。

服务机器人的应用涵盖了国防、救援、监护、物流、医疗、养老、护理、教育、家政等领域。



(a) 医用机器人



(b) 排爆机器人