

普通高等教育“十三五”规划教材
卓越工程师培养计划系列教材

工业机器人 技术基础与应用分析

Technical Foundation and Application Analysis of
Industrial Robot

罗 霄 罗庆生 © 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

工业机器人技术基础与 应用分析

罗 霄 罗庆生 编著



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

工业机器人技术基础与应用分析/罗霄, 罗庆生编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-5682-4954-6

I. ①工… II. ①罗…②罗… III. ①工业机器人-高等学校-教材 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 270047 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 17.5

字 数 / 406 千字

版 次 / 2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 48.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

在现代制造领域，随着工业自动化水平的快速提升，急需各种高性能的工业机器人。时至今日，工业机器人已经成为自动化生产领域的核心装备，在汽车制造、机械制造、船舶制造、电子器件、集成电路、器件封装、塑料加工、食品加工、陶瓷加工等对产品质量要求较严、对生产效能要求较高的企业都广泛应用着工业机器人。

工业机器人是机器人家族中的重要成员，也是机器人在工业应用环境中的一个重要分支，其操作机具有自动控制、可重复编程、多用途、可对3个以上的轴进行编程等显著特点，它可以是固定式的，也可以是移动式的。不同的国际学术机构对工业机器人的定义有所不同，但是其可编程性、拟人性、通用性和机电一体化的特点得到了业界的公认，成为人们判别工业机器人的基本标识。

机器人是一种自动执行工作、完成预期使命的机器装置。它既可以接受人类临场的指挥，又可以运行预先编排的程序，还可以根据以人工智能技术制定的原则纲领自主行动。其任务是协助或代替人类在恶劣、危险、有害、未知的环境或条件下从事单调、复杂、艰苦、繁重的各项工作。机器人技术作为20世纪人类伟大发明的产物，从20世纪60年代初问世以来，经历50多年的发展，现已取得突飞猛进的发展和持续创新的进步，已经成为当代最具活力、最有前途的高新技术之一。

经过几十年改革开放的快速发展，目前我国已经成为举世公认的制造业大国，形形色色的国产商品布满天下。但随着我国人口红利的不断丧失，劳动力成本在不断提高，我国的经济发展模式 and 制造产业结构必须进行调整。发展高新科技产业，提高制造业生产的自动化、智能化水平，实现从劳动密集型向技术密集型转变已经迫在眉睫、势在必行。从2010年开始，我国工业机器人需求量猛增，较2009年增长了1.71倍。2016年6月，国际机器人联合会发布的一组数据显示，2015年全球工业机器人的销量已经达到24.8万台，比2014年增长了12%，是2009年销量的4倍多。全球自动化产业已经从国际金融危机的噩梦中醒来，正在走向繁荣。其中，光是中国、韩国、日本、美国、德国五个国家就贡献了全球75%的销量。而我国以6.7万台的用量，成为工业机器人的第一大市场。

我国虽是工业机器人销量的第一大国，但自主品牌的市场占有率却很低，核心零部件主要依赖进口，大量的销售利润被国外机器人制造厂商攫取。为了跟上全球制造业升级的前进步伐，我国先后发布了《中国制造2025》《机器人产业发展规划（2016—2020）》，提出到2020年，我国自主品牌的工业机器人年产量将达到10万台，6轴和6轴以上的工业机器人年产量将达到5万台以上，要培育出3家以上具有国际竞争力的工业机器人生产龙头企业，打造出5个以上的工业机器人配套产业集群。国务院《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》中明确指出，“发展战略性新兴产业已成为世界主要国家抢占新一轮经济和科技发展制高点的重大战略”，该决定将“高端装备制造产业”列为7大战略性新兴产业之一，预计今后10年我国高端装备制造业的销售产值将占全部装备制造业销售产值的30%以上。工业机器人行业作为高端装备制造产业的重要组成部分，未来发展空间十分巨大。

2014年6月9日，习近平主席出席中国科学院第十七次院士大会、中国工程院第十二次院士大会，就科技创新，尤其是“机器人革命”发表讲话。他表示：科技是国家强盛之基，创新是民族进步之魂。自古以来，科学技术就以一种不可逆转、不可抗拒的力量推动着人类社会向前发展。从某种意义上说，科技实力决定着世界政治经济力量对比的变化，也决定着各国各民族的前途命运。而机器人技术领域的创新则是新一轮科技革命和产业变革的产物，将成为各国科技创新赛场上的“亮点”。他说，“我看了一份材料，说‘机器人革命’有望成为‘第三次工业革命’的一个切入点和重要增长点，将影响全球制造业格局，而且我国将成为全球最大的机器人市场。国际机器人联合会预测，‘机器人革命’将创造数万亿美元的市场。”他接着还说：国际上有舆论认为，机器人是“制造业皇冠顶端的明珠”，其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志。机器人主要制造商和国家纷纷加紧布局，抢占技术和市场制高点，我国将成为机器人的最大市场。他最后强调，我国不仅要把机器人水平提高上去，而且要尽可能多地占领市场。“这样的新技术新领域还很多，我们要审时度势、全盘考虑、抓紧谋划、扎实推进。”

2015年11月20日，在“致2015世界机器人大会贺信”中，国家主席习近平指出：在人类发展进程中，诞生了大量具有里程碑意义的创新成果。巴比伦的计时漏壶、古希腊的自动机、中国的指南车等，都是古代人类创造的自动装置中的精妙之作。这些创造发明源于丰富多彩的生产生活实践，体现了人类创造生活、利用自然的执着追求和非凡智慧。他还指出：当前，世界正处在新科技革命和产业革命的交汇点上。科学技术在广泛交叉和深度融合中不断创新，特别是以信息、生命、纳米、材料等科技为基础的系统集成创新，以前所未有的力量驱动着经济社会发展。随着信息化、工业化不断融合，以机器人科技为代表的智能产业蓬勃兴起，成为现时代科技创新的一个重要标志。中国将机器人和智能制造纳入了国家科技创新的优先重点领域，我们愿加强同各国科技界、产业界的合作，推动机器人科技研发和产业化进程，使机器人科技及其产品更好为推动发展、造福人民服务。

正如习主席所说，科技创新就像撬动地球的杠杆，总能创造令人意想不到的奇迹。当前机器人技术获得了井喷式的发展，是世界各国抢滩未来经济科技发展的重要时机，中国必须紧紧抓住并牢牢把握这一难能可贵的历史机遇，在创新的道路上奋起直追、迎头赶上、力争超越。

随着2018年的到来，我们已经迈过了21世纪超过六分之一的历程。回顾过去，展望未来，我们心潮澎湃、浮想联翩。20世纪，人类取得了辉煌的成就，从量子理论和相对论的创立，脱氧核糖核酸双螺旋结构的发现，到原子能的和平利用、人类基因组图谱的绘制，世界科技发生了深刻的变革，并给人类生活带来蓬勃前进的动力。尤其是机器人技术，尽管问世的时间还不太长，但其在改变人类工作方式、提高企业生产效率、丰富人们日常生活、增强国家经济实力等方面表现出来的强劲势头不可阻挡。以工业机器人为例，其在经历了诞生—成长—成熟期后，已成为制造业中不可或缺的核心装备。目前，世界上有近百万台工业机器人正与工人师傅并肩战斗在各条战线上，将工人师傅们从繁重的体力劳动和辛苦的脑力劳动中解放出来。

今天，工业机器人虽已获得广泛使用，并正在各行各业中大显身手，但人们常常还会对工业机器人存在神秘感，人们会问：什么是工业机器人？工业机器人的基础知识有哪些？工业机器人的关键技术又有哪些？工业机器人的基本组成包含哪些部分？工业机器人的基本组成部分如何构成有机的整体？工业机器人如何操作与应用？

机器人的出现与发展是社会进步和经济发展的必然结果。机器人是为了提高社会的生产水平和人类的生活质量应运而生的，让机器人替人们去干那些人们不愿干或干不了、干不好的工作。在现实生活中有些工作会对人体造成很大的伤害，如汽车制造厂里面的喷漆、焊接作业等；有些工作会对人们提出很高的要求，如生产流水线上的精密装配、重物搬运等；有些工作环境让人无法身临，如火山探险、深海探密、空间探索等；有些工作条件让人无所适从，如毒气弥漫、废水横流、辐射泄漏等……这些场合都是机器人大显身手的地方。以机器人代替人，将人从繁重的体力劳动和辛苦的脑力劳动中解放出来已经成为一种不可逆转的趋势。

本书是为从事工业机器人研究与应用的专业人士和高等院校相关专业的学生们而写的，帮助他们了解工业机器人的基本知识、熟悉工业机器人的关键技术、掌握工业机器人的应用技能。全书由第1章绪论、第2章工业机器人机械结构技术、第3章工业机器人理论分析技术、第4章工业机器人仿真模拟技术、第5章工业机器人系统控制技术、第6章工业机器人传感探测技术、第7章典型工业机器人的操作与应用，以及参考文献等组成。通过本书的系统学习，能够让以工业机器人的学习与应用为目标的学习者循序渐进地了解工业机器人的基础学科知识，掌握工业机器人的基本设计方法，熟悉工业机器人的基本操作技能。

原国务委员、中国工程院院长宋健同志曾经指出：“机器人学的进步和应用是20世纪自动控制最有说服力的成就，是当代最高意义上的自动化。”工业机器人技术综合了多专业、多学科、多领域的高新科技及其发展成果，代表了当代高新技术的发展前沿，它在人类生活应用领域的不断扩大正引起国际社会重新认识工业机器人技术的作用。

“工欲善其事，必先利其器。”人类在认识自然、创新实践的过程中，不断创造出各种各样为人类服务的工具。作为 20 世纪自动化领域的重大成就，工业机器人已经和人类社会的生产、生活密不可分。世间万物，人是最宝贵的，人力资源是第一资源，这是任何其他物质不能替代的。我们的责任在于让工业机器人帮助人类把人力资源的优势尽量发挥。我们完全有理由相信，像其他许多科学技术的发明和发现一样，工业机器人应该，也一定能够成为人类的好助手、好朋友，让工业机器人技术帮助我国广大青年学生真正成为创新型人才吧！

本书由罗霄、罗庆生担任主编；韩宝玲、朱琛担任副主编；贾燕、刘星栋、李凯林、黄羽童、王帅、赵玉婷、钟心亮等人参与了本书部分内容的研究与撰写工作。

在本书研究与写作的过程中，得到了北京理工大学相关部门的热情帮助，还得到了业界许多同人的无私支持。值本书即将付印出版之际，谨向所有关心、帮助、支持过我们的领导、专家、同事、朋友表示衷心的感谢！

作 者

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001
1.1 工业机器人概述	001
1.2 工业机器人国内外发展现状	002
1.3 工业机器人发展趋势	011
1.4 工业机器人关键技术	012
1.5 典型工业机器人	015
本章小结与思考	024
本章习题与训练	024
第 2 章 工业机器人机械结构技术	026
2.1 工业机器人总体结构	026
2.2 工业机器人机座结构	034
2.3 工业机器人手臂结构	037
2.4 工业机器人手腕结构	044
2.5 工业机器人手部结构	050
本章小结与思考	062
本章习题与训练	062
第 3 章 工业机器人理论分析技术	064
3.1 工业机器人运动学分析	064
3.2 工业机器人动力学分析	088
本章小结与思考	099
本章习题与训练	099
第 4 章 工业机器人仿真模拟技术	102
4.1 仿真的基本概念	102
4.2 仿真软件简介	103
4.3 数字仿真	120

4.4 虚拟样机	124
本章小结与思考	141
本章习题与训练	141
第5章 工业机器人系统控制技术	143
5.1 工业机器人控制技术概述	143
5.2 工业机器人控制策略概述	145
5.3 工业机器人控制系统的体系架构	153
5.4 工业机器人控制系统硬件设计	155
5.5 工业机器人控制系统软件设计	171
5.6 ROS 机器人操作系统	189
本章小结与思考	194
本章习题与训练	194
第6章 工业机器人传感探测技术	196
6.1 工业机器人传感器概述	196
6.2 工业机器人常用传感器	196
6.3 工业机器人典型传感器系统	209
本章小结与思考	221
本章习题与训练	221
第7章 典型工业机器人的操作与应用	223
7.1 典型工业机器人操作与应用概述	223
7.2 ABB 机器人的操作与应用	223
7.3 KUKA 机器人	243
本章小结与思考	257
本章习题与训练	258
参考文献	259

第 1 章

绪 论

在现代制造领域，随着工业自动化水平的快速提升，急需各种高性能的工业机器人。时至今日，工业机器人已经成为自动化生产领域的核心装备^[1]，在汽车制造、机械制造、船舶制造、电子器件、集成电路、器件封装、塑料加工、食品加工、陶瓷加工等对产品质量要求较严、对生产效能要求较高的许多企业都广泛应用着大量的工业机器人^[2-3]。

工业机器人是机器人家族中的一个重要成员，也是机器人在工业应用环境中的一个重要分支，具有自动控制、可重复编程、多用途、可对 3 个以上的轴进行编程等显著特点^[4-5]，它可以是固定式的或移动式的。不同的国际学术机构对工业机器人的定义有所不同，但是其可编程性、拟人性、通用性和机电一体化等特点得到了业界的公认，成为人们判别工业机器人的基本标识^[6]。

1.1 工业机器人概述

机器人在世界各国或各学术机构的定义不尽相同，但其基本含义趋近一致。国际标准化组织（International Standard Organization, ISO）对工业机器人的定义为：“工业机器人是一种具有自动控制的操作和移动功能，能够完成各种作业的可编程操作机。”^[7-8] ISO 8373 则做了更加具体的解释：“工业机器人有自动控制和再编程、多用途功能，机器人操作机有三个或三个以上的可编程轴，在工业机器人自动化应用中，机器人的底座可固定也可移动。”美国机器人工业协会（U. S. Robotics Industry Association）对工业机器人的定义为：“工业机器人是用来进行搬运材料、零件、工具等可再编程的多功能机械手，或通过不同程序的调用来完成各种工作任务的特种装置。”^[9]日本工业标准（JIS）、德国工业标准（VID），以及英国机器人协会也有类似的定义。故而可知，工业机器人是集机械、电子、控制、计算机、传感器、人工智能等多学科的先进技术于一体的现代制造业自动化的重要装备^[10-11]。

与其他自动化装备相比，工业机器人具有以下四个显著特点：

(1) 仿人化。工业机器人通过各种传感器来感知工作环境，具有自适应能力。在作业功能上，通过模仿人的腰、臂、手腕、手指等部位的功能来实现工业自动化的目的^[12]。

(2) 可编程。工业机器人作为现代柔性制造系统的重要组成部分，可编程能力是其对适应工作环境改变、提升工作效能的品质的一种体现^[13]。

(3) 通用性。工业机器人一般分为通用型和专用型两类。通用型工业机器人只要更换不同的末端执行器就能履行不同的操作动作，完成不同的生产任务^[14]。

(4) 交互性。智能工业机器人在无人干预的条件下,对工作环境应当具有自适应控制能力和自我规划能力。所以,良好的环境交互性对工业机器人来说至关重要。

随着机器人技术的不断发展,以及机器人市场的不断扩大,工业机器人的应用范围越来越广、普及速度越来越快。当前,工业机器人的主要应用领域集中在弧焊、点焊、装配、搬运、喷漆、检测、码垛、研磨抛光、激光加工等方面,相信不久的将来,工业机器人的应用行业将越来越多,远远超出今天的规模^[15-16]。

1.2 工业机器人国内外发展现状

1.2.1 工业机器人国内发展现状

经过几十年改革开放的快速发展,我国已经成为举世公认的制造业大国,各种国产商品布满天下。但随着劳动力成本的不断提高,我国人口红利不断丧失,我国的经济增长模式和制造产业结构必须进行调整,发展高新科技产业,提高制造业生产的自动化、智能化水平,实现从劳动密集型向技术密集型转变已经迫在眉睫、势在必行。从2010年开始,我国工业机器人需求量猛增,较2009年增长了1.71倍^[17-19]。2016年6月22日,国际机器人联合会(International Federation of Robotics, IFR)发布的一组数据显示(见图1.1),2015年全球工业机器人的销量已经达到24.8万台,比2014年增长了12%,是2009年销量的4倍多^[20]。全球自动化产业已经从国际金融危机的噩梦中醒来,正在走向繁荣。其中,光是中国、韩国、日本、美国、德国五个国家就贡献了全球75%的销量。而我国以6.7万台的用量,成为工业机器人的第一大市场。

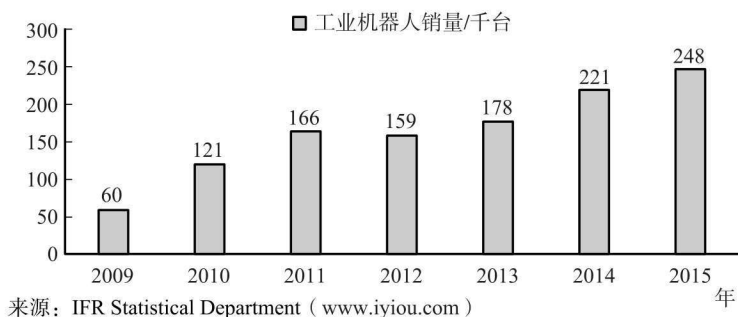


图 1.1 2009—2015 年全球工业机器人销量

我国虽是工业机器人销量第一大国,但自主品牌的市场占有率却很低,核心零部件主要依赖进口,大量的销售利润被国外机器人制造厂商攫取。为了跟上全球制造业升级的前进步伐,我国先后发布了《中国制造2025》、机器人产业发展规划(2016—2020),提出到2020年,我国自主品牌的工业机器人年产量将达到10万台,六轴和六轴以上的工业机器人年产量将达到5万台以上,要培育出3家以上具有国际竞争力的工业机器人生产龙头企业,打造出5个以上的工业机器人配套产业集群^[21]。国务院《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》中明确指出,“发展战略性新兴产业已成为世界主要国家抢占新一轮经济和科技发展制高点的重大战略”,该决定将“高端装备制造产业”列为7大战略性新兴产业之一,预

计今后 10 年我国高端装备制造业的销售产值将占全部装备制造业销售产值的 30% 以上。工业机器人行业作为高端装备制造产业的重要组成部分, 未来发展空间十分巨大。

我国关于工业机器人的研究起始于 20 世纪 70 年代, 大体可分为 4 个阶段, 即理论研究阶段、样机研发阶段、示范应用阶段和初步产业化阶段^[22]。

早期的理论研究阶段跨时为 20 世纪 70 年代—80 年代初期, 研究单位主要分布在国内部分高校。这一阶段里, 由于受当时国家经济基础薄弱、科研经费有限等因素的约束, 主要从事工业机器人基础理论的研究, 在机器人运动学、机构学等方面取得了一定的进展, 为后续工业机器人的研究奠定了基础^[23-24]。

到了 20 世纪 80 年代中期, 受西方工业发达国家开始大量应用和日益普及工业机器人的刺激与影响, 我国工业机器人的研究开始得到政府的重视与支持。国家组织了对工业机器人需求行业的广泛调研, 投入大量的资金开展工业机器人的研究, 进入了样机研发阶段。1985 年, 我国在科技攻关计划中将工业机器人列入了发展序列。1986 年, 我国将智能机器人列入了国家高技术研究发展计划。在这一阶段里, 我国开展了工业机器人基础技术、基础元器件、几类机器人型号样机的攻关, 先后研制出点焊、弧焊、喷漆、搬运等不同功能的机器人样机以及谐波传动组件、焊接电源等, 形成了我国工业机器人发展的第一次高潮。

20 世纪 90 年代为我国工业机器人的示范应用阶段。为了促进高技术发展与国民经济主战场的密切衔接, 我国确定了特种机器人与工业机器人及其应用工程并重、以应用带动关键技术和基础研究发展的战略方针^[25]。在这一阶段里, 我国共研制出平面关节型装配机器人、直角坐标机器人^[26]、弧焊机器人^[27]、点焊机器人^[28]、自动引导车^[29]等 7 种工业机器人系列产品, 以及 102 种特种机器人, 实施了 100 余项机器人应用工程。其中 58 项关键技术和应用基础技术的研究成果达到国际先进水平, 先后获得国家科技进步奖 21 项, 省部级科技进步奖 116 项, 发明专利 38 项, 实用新型专利 125 项。为了促进国产机器人的产业化, 20 世纪 90 年代末, 我国建立了 9 个机器人产业化基地和 7 个科研基地, 其中包括沈阳自动化研究所的新松机器人自动化股份有限公司、哈尔滨博实自动化设备有限公司、北京机械工业自动化研究所机器人开发中心等, 为发展我国机器人产业奠定了坚实基础^[30]。

进入 21 世纪以后, 国家中长期科学和技术发展规划纲要突出增强自主创新能力这一条主线, 着力营造有利于自主创新的政策环境, 加快促进企业成为创新主体, 大力倡导企业为主体, 产学研紧密结合, 提升我国高端制造业装备的研发水平。在国家政策的感召下, 国内一大批企业或自主研制, 或与科研院所、高等院校合作, 进入工业机器人研制和生产行列, 我国工业机器人进入了初步产业化阶段。在这一阶段里, 先后涌现出新松机器人自动化股份有限公司、哈尔滨博实自动化设备有限公司、芜湖奇瑞装备有限责任公司、安徽巨一自动化装备有限公司、广州数控设备有限公司、上海沃迪自动化装备股份有限公司、青岛软控股份有限公司等数十家实力较强、影响较大、水平较高的专门从事工业机器人生产的企业。其中具有代表性的工业机器人产品包括新松机器人公司自行开发研制的 6 台 RD120-A 型点焊机器人及 II 型电阻焊控制器, 实现了“小红旗”“世纪星”2 种轿车车身组焊线中的车身前、后风窗和左、右车门点焊焊装工作交钥匙工程^[31]。新松机器人公司研制的自动导航小车 (Automated Guided Vehicles, AGV), 开始广泛应用于汽车制造、机械加工、电子、纺织、造纸、卷烟、食品、印刷、图书出版等行业, 占据了国内 AGV 市场 70% 以上的份额, 并进入国际市场, 先后出口到美国、韩国、俄罗斯、加拿大等国家, 开创了国产机器人出口的先

河。哈尔滨博实自动化装备股份公司研制的搬运机器人广泛应用于石化行业粉粒料和橡胶的后处理生产线中，年销售量近 100 台。天津大学先后开发成功了 Diamond、Delta-S 和 Cross-IV 等具有自主知识产权且性能达到国际先进水平的 2~4 自由度高速搬运机器人 3 个系列的新产品，并在锂电池分选（天津力神电池股份有限公司）、医药软袋包装（北京双鹤药业股份有限公司）、果奶灌装和塑性炸药填充（云南安化有限公司）等 10 余条包装和搬运自动化生产线上得到成功应用。安徽巨一自动化装备有限公司研发的车身焊装机器人成套技术已经在中国第一汽车集团公司、东风汽车有限公司、北京汽车股份有限公司、奇瑞汽车股份有限公司、安徽江淮汽车集团股份有限公司、长城汽车股份有限公司等国内整车企业，以及伊朗、埃及等国外的整车企业中得到了广泛应用，为客户方提供焊装生产线 40 多条。芜湖奇瑞装备有限责任公司与哈尔滨工业大学合作研制的 165kg 点焊机器人，已在线应用约 50 台，分别用于焊接、搬运等场合。上述成果表明我国工业机器人产业化发展的新局面已初步形成。

近年来，受到国家和地方政府一系列政策的鼓励与支持，我国机器人产业蓬勃发展，在发展机器人产业的道路上，我国虽然起步相对较晚，但发展相对较快，已经开始进入机器人时代。国内多地已经开启了制造业“机器换人”改革模式，各个省份对工业机器人产业的投入也都如火如荼。“忽如一夜春风来，千树万树梨花开”，全国陆续产生了约 3 400 家机器人公司，各地方有超过 40 个以发展机器人为主的产业园区，我国机器人产业腾飞已成定局。其中，又以工业机器人的发展最为热门。作为我国家电生产的龙头企业，美的集团“海淘”瞄准了“工业 4.0”，该集团在 2016 年 5 月 19 日披露，拟筹划通过要约方式收购在德国上市的全球领先的机器人及智能自动化公司 KUKA Aktiengesellschaft（简称“库卡集团”或 KUKA）事宜，预计交易对价最高不超过 40 亿欧元。2016 年跃居《财富》全球 500 强第 25 位的富士康科技集团也已经开始了机器换人计划。

中国互联网知名企业中的百度公司（Baidu）、阿里巴巴集团（Alibaba）和腾讯公司（Tencent）这三大巨头（简称 BAT，系三大公司首字母缩写）热衷投资的服务机器人和商用机器人，目前在国内市场还处于探索期和试用期。与其相比，工业机器人正进入全面普及的阶段。国产工业机器人服务的领域现今已达国民经济建设的 36 个行业大类和 87 个行业中类，搬运与上下料、焊接和钎焊、装配及拆卸、涂层与封胶、加工与洁净则是其主要应用领域。根据 IFR 的新近统计数据（见图 1.2），2015 年，我国自主品牌生产的工业机器人销量达到 2 万台以上，占国内总销量的 30%。在 2013 年，这一数字仅为 25%。国产工业机器人

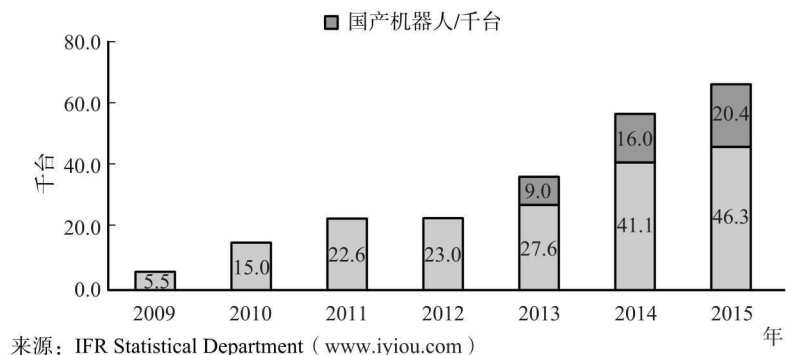


图 1.2 2009—2015 年我国工业机器人市场规模

的市场占有率正在逐步提高。但相对于每万名工人工业机器人拥有量韩国 478 台、日本 314 台,我国仅为 36 台,甚至低于世界平均水平,这表明我国工业机器人的市场空间还很大。根据 IFR 估计,2018 年超过 1/3 的全球工业机器人将被安装在中国^[32]。

如此广袤的机器人产业蓝海,怎能让人不心动、不行动?国际机器人生产巨头企业瑞典 ABB,日本 FANAC、安川,德国 KUKA 捷足先登,先后在中国建厂,布局中国工业机器人市场。国内方面,新松机器人自动化股份有限公司、哈尔滨博实自动化设备有限公司、广州数控设备有限公司、上海新时达电气股份有限公司,以及安徽埃夫特智能装备有限公司等则背靠科研院所,已经在工业机器人的研发与应用方面形成初步优势。

综上所述,可知我国工业机器人的发展经历了一系列国家攻关、计划支持、行业扶助的应用工程开发,奠定了我国独立自主发展工业机器人产业的基础。但毋庸讳言,我国机器人在总体技术与核心能力上与国外先进水平相比还有很大差距,仅相当于国外在 20 世纪 90 年代中期的水平。目前我国工业机器人的生产企业数量很多,可是规模仍然不大,多数是单件小批生产。尤其令人揪心的是,关键配套的单元部件和器件始终处于进口状态,我国企业生产的工业机器人,性价比较低,市场占有率不高。国际工业机器人知名企业如 ABB、FANAC 等纷纷在中国建厂,国外知名品牌工业机器人的价格逐年下降,严重制约了我国工业机器人产业的形成和规模化的发展,我国工业机器人新装机量近 90% 仍然依赖进口,我国在成为制造业强国的道路上依然任重道远。可喜的是,伴随我国经济的高速增长,以汽车等行业需求为强劲牵引,我国对工业机器人需求量将急剧增加,为我们研发生产自主品牌机器人提供了巨大的契机。

1.2.2 工业机器人国外发展现状

1954 年,美国人乔治·德沃尔设计出世界上第一台电子可编程的工业机器人,并于 1961 年发表了该项专利,1962 年美国通用汽车公司将其投入使用,标志着世界第一代机器人正式诞生^[33]。从此,机器人开始成为工业生产中不可缺少的工具和助手。美国是工业机器人的诞生地,早在 1962 年就研制出世界上第一台工业机器人,比起号称“机器人王国”的日本起步至少要早五到六年^[34]。经过 50 多年的发展,美国现已成为世界机器人强国之一,基础雄厚,技术先进,品种多样,应用广泛。综观美国机器人的发展史,可用“波浪式前进,螺旋式上升”来形容。由于美国政府在 20 世纪 60 年代初到 70 年代中的十几年间,并没有把工业机器人列入重点发展项目,只是几所大学和少数公司开展了一些研究工作。对于企业来说,在只看到眼前利益而政府又无财政支持的情况下,宁愿错过良机,固守在使用刚性自动化装置上,也不愿冒着风险,去应用或制造工业机器人^[35]。加上当时美国的失业率高达 6.65%,政府担心发展机器人会造成更多人失业,因此不予投资,也不组织研制机器人,这不能不说是美国政府的战略决策错误。到了 20 世纪 70 年代后期,美国政府和业界虽有所转变,开始重视机器人,但在技术路线上仍把发展重点放在研究机器人软件及军事、宇宙、海洋、核工程等特殊领域的高级机器人的开发上,致使日本的工业机器人产业后来居上,在工业生产的机器人应用方面和机器人制造产业方面很快超过了美国,机器人产品也在国际市场上形成了较强的竞争力^[36]。进入 20 世纪 80 年代之后,美国各界才感到形势紧迫,政府和企业才对机器人真正重视起来,政策上也有所体现:一方面鼓励工业界发展和应用机器人,另一方面制订计划、提高投资、增加机器人的研究经费,把机器人看成美国再

次工业化的特征，使美国的机器人迅速发展。80年代中后期，随着美国各大厂家应用机器人的技术与条件日臻成熟，第一代机器人的技术性能越来越满足不了实际需要，美国开始生产带有视觉、力觉的第二代机器人，并很快占领了美国60%的机器人市场，逐步显露出机器人强国的色彩。

尽管美国在机器人发展过程中走过一条重视基础理论研究、忽视应用开发探索的曲折道路，但美国机器人技术在国际上仍然处于领先地位，其技术全面、先进、可靠、适用，具体表现在：

- (1) 性能可靠，功能全面，精确度高；
- (2) 机器人语言研究发展较快，语言类型多、应用广，水平高居世界之首；
- (3) 智能技术发展快，视觉、触觉等人工智能技术已在航天、汽车工业中广泛应用；
- (4) 高智能、高难度的军用机器人、太空机器人等发展十分迅速，主要用于扫雷、布雷、侦察、站岗及太空探测方面。

早在1966年，美国Unimation公司的尤尼曼特机器人和AMF公司的沃莎特兰机器人就已经率先进入英国市场。1967年英国的两家大型机械公司还特地为美国这两家机器人公司在英国推销机器人。此后不久，英国Hall Automation公司研制出了自己的机器人RAMP。20世纪70年代初期，由于英国政府科学研究委员会颁布了否定人工智能和机器人的Lighthall报告，对工业机器人实行了限制发展的严厉措施，因而机器人工业一蹶不振，在西欧差不多处于“副班长”位置。但是，国际上机器人蓬勃发展的形势很快使英国政府意识到：机器人技术的落后必将导致英国商品在国际市场上的竞争力大为下降。于是，从70年代末开始，英国政府转而采取支持态度，推行并实施了一系列支持机器人发展的政策和措施，如广泛宣传使用机器人的重要性、在财政上给购买机器人的企业以补贴、积极促进机器人研究单位与企业的联合等，使英国机器人开始了在生产领域广泛应用及大力研制的兴盛时期^[37]。

相比而言，法国不仅在机器人拥有量上居于世界前列，而且在机器人应用水平和应用范围上也处于世界先进水平^[38]。这主要归功于法国政府一开始就比较重视机器人技术，特别是把重点放在开展机器人的应用研究上。法国机器人的发展比较顺利，主要原因是通过政府大力支持的研究计划，建立起了一个完整的科学技术体系，即由政府组织一些机器人基础技术方面的研究项目，而由工业界支持开展应用和开发方面的工作，两者相辅相成，使机器人在法国企业界很快得到发展和普及。

德国工业机器人的总数占到世界第三位，仅次于日本和美国。它比英国和瑞典引进机器人大约晚了五六年。之所以如此，是因为德国的机器人工业一起步就遇到了国内经济不景气、推广应用不现实的影响。但是德国的社会环境却是有利于机器人工业发展的。因为第二次世界大战的缘故，导致德国劳动力短缺，这成为机器人发展的推手之一；另外，德国国民的科技素养高、创新意识强，这也成为机器人发展的推手之一；两者都是实现使用机器人的有利条件。到了20世纪70年代中后期，政府采用行政手段为机器人的推广开辟道路；在“改善劳动条件计划”中规定，对于一些危险、有毒、有害的工作岗位，必须以机器人来代替人类劳动。这个计划为机器人的普及应用开拓了广泛的市场，并推动了工业机器人技术的蓬勃发展。日耳曼民族是一个看重实际的民族，他们始终坚持技术应用和社会需求相结合的原则。除了像大多数国家一样，将机器人主要应用在汽车工业之外，与众不同之处是德国在纺织工业中用机器人技术改造原有企业，增加机器人，报废旧机器，使纺织工业的生产成本

逐步下降,产品质量稳定提高,花色品种更加适销对路。到1984年,终于使纺织工业这一被喻为“快要完蛋的行业”重新振兴起来。与此同时,德国看到了机器人等先进自动化技术对工业生产的作用,提出了1985年以后要向高级的、带感觉的智能型机器人转移的目标。经过多年的努力,其智能机器人的研究和应用水平在世界处于领先地位。

在苏联(主要是在现在的俄罗斯),从理论和实践方面探讨机器人技术是从20世纪50年代后半期开始的。到了50年代后期,苏联开始了机器人样机的研制工作;1968年成功试制出一台深水作业机器人;1971年研制出工厂用的万能机器人。早在苏联第九个五年计划(1970—1975年)开始时,就把发展机器人列入国家科学技术发展纲领之中。到1975年,已研制出30个型号的120台机器人,经过20年的努力,苏联的机器人在数量、质量水平上均处于世界前列。政府有目的地把促进科学技术进步当作推动社会生产发展的强力手段,并以此来安排机器人的研究与制造;有关机器人的研究、生产、应用、推广和提高等工作都由政府安排,有计划、按步骤地进行。

日本在20世纪60年代末正处于经济高速发展时期,年增长率达到11%。第二次世界大战以后,日本的劳动力本来就十分紧张,而高速发展的经济更加剧了劳动力不足的困难。为此,日本在1967年由川崎重工业公司从美国Unimation公司引进机器人及其技术,建立起生产车间,并于1968年试制出第一台川崎的“尤尼曼特”机器人。正是由于日本当时劳动力严重不足,机器人在企业里受到了“救世主”般的欢迎。日本政府一方面在经济上采取了积极的扶植政策,鼓励企业发展和推广机器人,从而进一步激发了众多企业从事机器人产业的积极性。尤其是政府对中小企业实施了一系列的经济优惠政策,如由政府银行提供优惠的低息资金,鼓励民间集资成立“机器人长期租赁公司”,由公司出资购入机器人后再长期租给用户,使用者每月只需支付低廉的租金,大大减轻了企业购入机器人所需的资金负担;政府把由计算机控制的示教再现型机器人作为特别折扣优待产品,企业除享受新设备通常的40%折扣优待外,还可再享受13%的价格补贴。另一方面,国家出资对小企业进行应用机器人的专门知识教育和技术指导等。这一系列扶植政策使日本机器人产业迅速发展起来,经过短短十几年时间,到80年代中期,日本已一跃成为“机器人王国”,其机器人的产量和装机量在国际上跃居首位。按照日本产业机器人工业会常务理事米本完二的说法:“日本机器人的发展经过了60年代的摇篮期,70年代的实用期,到80年代进入普及提高期。”日本把1980年定为“产业机器人的普及元年”,开始在各个领域内广泛推广使用机器人。

日本政府和企业充分信任机器人,大胆使用机器人。机器人也没有辜负人们的期望,它们在解决劳动力不足、提高生产率、改进产品质量和降低生产成本方面发挥着越来越显著的作用,成为日本保持经济增长速度和产品竞争能力的一支不可缺少的队伍。

日本在汽车、电子行业大量使用机器人,使日本汽车及电子产品的产量猛增,质量也日益提高,而制造成本则大为降低,从而使日本生产的汽车能够以物美价廉的优势进军号称“汽车王国”的美国市场,并且向机器人诞生国出口日本制造的实用型机器人。此时,日本琳琅满目的家用电器产品也充斥了美国市场,使得“山姆大叔”懊悔不已。日本由于制造、使用机器人,增强了国力,获得了巨大的好处,迫使美、英、法等国家采取措施,奋起直追。如今,日本是世界上工业机器人产量最高和拥有量最多的国家,也是世界上工业机器人

应用最为成熟和作业最为高效的国家。

20世纪80年代以后,世界范围内工业生产技术朝着高度自动化和集成化的方向高速发展,同时也使工业机器人得到迅猛发展,在这个时期里,工业机器人对世界工业经济的发展起到了拉动和促进作用。尤其是进入21世纪之后,在世界范围内,工业机器人的技术水平日趋成熟,装备数量日益增加,但核心技术和领先优势集中在以日、美、欧为代表的少数几个国家与地区。时至今日,工业机器人已经成为一种标准设备被工业界广泛采用并妥善应用。从技术流派上分析,享有世界影响力和知名度的工业机器人制造公司主要分为日系和欧系,日系中的主要代表有FANUC、安川、OTC、松下、不二越、川崎等公司;欧系中主要代表有德国的KUKA、CLOOS,瑞典的ABB,意大利的COMAU和奥地利的IGM公司。经过半个多世纪的持续发展与稳步提升,工业机器人已经成为柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)、工厂自动化(FA)的必备工具。

专家们分析并判定,工业机器人产业是继汽车、计算机之后出现的一种新的大型高技术产业。根据联合国欧洲经济委员会(UNECE)和IFR的统计,世界工业机器人市场的发展态势和前景十分被人看好^[39]。

过去10年里,国外工业机器人的技术水平取得了惊人的进步,传统的功能型的工业机器人已趋于成熟,各国科学家正在致力于研制具有完全自主能力的、拟人化的智能机器人。近年来,欧美劳动力成本上涨了近40%,但机器人的价格却降低了约80%,现在还在继续下降^[40]。现役机器人的平均寿命在10年以上,还有可能提高到15年以上,且易于重新使用。由于机器人及自动化成套装备对提高企业自动化水平、增强企业市场竞争力、提高产品质量和生产效率、改善工作条件和降低劳动强度等起到重大作用,加之成本大幅降低和性能高速提升,其增长速度较快。在国际上,工业机器人在制造业应用范围越来越广阔,其标准化、模块化、智能化、网络化的程度越来越高,功能也越来越强,正向着成套技术和装备的方向发展。与此同时,随着工业机器人向更深、更广的方向发展以及智能化、网络化水平的不断提高,其应用也从传统制造业推广到其他制造业,进而推广到诸如采矿、农业、建筑、灾难救援、资源勘探、星际探险等非制造行业,而且在反恐防暴、国防军事、医疗卫生、生活服务等领域,机器人的应用也越来越多。如无人飞行器、警用机器人、医疗机器人、家用服务机器人等均有应用实例。机器人正在为提高人类的生活质量发挥着越来越重要的作用,已经成为世界各国抢占的新科技制高点。

纵观国外发展工业机器人的产业过程,可归纳为三种不同的发展模式,即日本模式、欧洲模式和美国模式^[41]。

(1) 日本模式。其特点是:各司其职,分层面完成交钥匙工程。即机器人制造厂商以开发新型机器人和批量生产优质产品为主要目标,并由其子公司或社会上的工程公司来设计与制造各行业所需要的机器人成套系统,并完成交钥匙工程。

(2) 欧洲模式。其特点是:一揽子交钥匙工程。即机器人的生产和用户所需要的系统设计制造,全部由机器人制造厂商自己完成。

(3) 美国模式。其特点是:采购配件与成套设计相结合。美国国内基本上不生产普通的工业机器人,当企业需要时,机器人通常由工程公司进口,再自行设计、制造配套的外围设备,完成交钥匙工程。

从第一台工业机器人问世至今,概括起来,工业机器人的发展大致分为三个阶段^[42]: