



工业机器人系统 及其先进控制方法

宋永端 编著



科学出版社

工业机器人系统及其 先进控制方法

宋永端 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍工业机器人的组成、驱动方式、关键技术及应用,包括工业机器人的体系结构、驱动方式、传感器信息处理、控制理论应用、柔性关节驱动、网络通信与协同等多个方面。本书通过系统和详实的分析,向读者展现工业机器人的基本组成、驱动方式、动力学与运动学建模分析方法、基于动力学与运动学的控制设计方法、基于多智能体技术的分布式协同控制方法、柔性关节建模技术及运动控制方法、工业机器人现场通信技术与实现方法,以及一类工业机器人系统设计与应用案例,旨在培养读者掌握工业机器人分析与控制设计方法和实际应用能力。

本书可作为高等院校及科研机构控制工程与技术、工业自动化、机电工程等专业的低年级本科生及研究生教材,亦可供从事相关专业的从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人系统及其先进控制方法 / 宋永端编著. — 北京: 科学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-03-061042-3

I. ①工… II. ①宋… III. ①工业机器人-系统设计 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 070737 号

责任编辑: 张 展 孟 锐 / 责任校对: 彭 映

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年4月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019年4月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 362 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

工业机器人主要包含精密减速器、伺服电机、控制系统与本体四大部分，是典型的机电一体化、数字化装备，具备技术附加值高、应用范围广等特点。作为先进制造业的支撑技术和信息化社会的新兴产业，工业机器人是机械设计、传感器技术、计算机技术、控制技术、通信技术等多领域、多学科融合的产物，在工业生产中占据越来越重要的地位，也对社会发展起着越来越大的推动作用。

目前，工业机器人研究与应用的重点和难点，主要在于如何使单台甚至多台机器人在高度不确定、复杂、动态的环境下，独立或共同完成某项任务，即工业机器人需要同时具备鲁棒性、智能性以及协同性。这方面的研究，不仅可以推动相关学科的发展、科学技术的进步，同时其应用也将带动工业机器人产业的发展，促进工业生产和组织形式的变革。

本书是作者依据自身多年的研究工作，吸收和借鉴国内外相关文献内容编著而成的。全书遵循理论联系实际、原理与应用结合、突出研究重点、服务实际需求的原则，既注重基础原理，为工业机器人的入门学习提供系统的理论指导，又兼顾工业实际，较为完整地介绍典型工业机器人系统的实际设计步骤和方法。此外，本书还针对工业机器人的发展趋势，介绍一些新的控制技术和控制方法，帮助学有余力的读者开阔视野。

本书围绕工业机器人所涉及的主要技术展开，从体系结构、驱动方式、传感器信息处理、控制理论应用、柔性关节驱动、网络通信与协同等多个方面对工业机器人的关键技术进行系统阐述。本书包含 8 章：第 1 章介绍工业机器人的概念、发展、分类和关键技术；第 2 章阐述工业机器人驱动方式；第 3 章介绍工业机器人常用的各种传感器，特别是其基本原理、应用范围和使用方法；第 4 章分析工业机器人的结构和动力学特性，介绍一些新的控制方法；第 5 章介绍工业机器人协同控制的相关概念和理论，以及一种有限时间的多机器人协同方法；第 6 章针对工业机器人的结构特点，介绍关节驱动的相关概念，以及关节驱动控制方法；第 7 章介绍工业机器人相关的通信技术，以及常用的通信方式和方法；第 8 章通过实际案例，从系统设计、综合集成的角度，介绍一类工业机器人系统的设计开发、运行调试的完整过程以及相关注意事项。

本书的编写得到国家重点基础研究发展计划、国家自然科学基金的资助。在策划与编写过程中，得到了温长云、薛方正、黄江帅、王玉娟、敖伟、高瑞贞、赖俊峰、罗小锁、罗邵华、高辉、黄秀财、赵凯、何镒、周淑燕、曹晔、温长云、薛方正等的大力协助，书中部分内容来自其中几位的相关文献及成果，在此一并表示感谢。本书的编写还得到重庆

大学自动化学院智慧工程研究院、星际(重庆)智能装备技术研究院、重庆大学信息物理社会可信服务计算教育部重点实验室的大力支持。此外，本书内容还得益于国内外工业机器人领域的专家与学者的相关论文和专著，作者在此深表谢意。

工业机器人技术和应用快速发展、日新月异，由于作者的水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正！

目 录

第1章 工业机器人概述	1
1.1 工业机器人定义	2
1.2 工业机器人发展历程	2
1.3 国内外工业机器人发展现状与趋势	3
1.3.1 国内外发展现状	3
1.3.2 工业机器人的应用现状	6
1.3.3 工业机器人技术发展趋势	7
1.4 工业机器人基本类型及关键技术	8
1.4.1 工业机器人基本类型	8
1.4.2 工业机器人关键技术	9
1.5 典型的工业机器人	10
1.5.1 移动机器人	10
1.5.2 点焊机器人	11
1.5.3 弧焊机器人	12
1.5.4 激光加工机器人	12
1.5.5 真空机器人	13
1.5.6 洁净工业机器人	14
思考题与练习题	15
参考文献	15
第2章 工业机器人驱动技术	16
2.1 步进电动机驱动	16
2.1.1 步进电动机驱动控制	16
2.1.2 步进电动机驱动应用	18
2.2 直流伺服电动机驱动	19
2.2.1 直流伺服电动机驱动技术	19
2.2.2 直流伺服电动机驱动应用	19
2.3 交流伺服电动机驱动	20
2.3.1 交流伺服电动机	20
2.3.2 交流伺服驱动系统	21
2.3.3 交流伺服电动机应用	22
2.4 气动驱动	23

2.4.1	气动驱动系统	23
2.4.2	比例/伺服控制阀选择	24
2.4.3	气动驱动应用	25
2.5	液压驱动	26
2.5.1	液压驱动系统	26
2.5.2	液压驱动系统分类以及应用	27
	思考题与练习题	28
	参考文献	29
第3章	工业机器人中的传感器	30
3.1	传感器技术基础知识	30
3.1.1	传感器的基本概念	30
3.1.2	传感器的性能指标、命名和代号	30
3.1.3	传感器的基本特性	31
3.1.4	传感器基本测量电路	32
3.2	典型传感器	34
3.2.1	电阻应变式传感器	34
3.2.2	电感式传感器	34
3.2.3	电容式传感器	35
3.2.4	压电式传感器	36
3.2.5	磁电式传感器	37
3.2.6	热电式传感器	38
3.2.7	光电式传感器	39
3.2.8	磁敏传感器	40
3.2.9	射线及微波检测传感器	41
3.2.10	光导纤维传感器	42
3.2.11	MEMS 传感器	44
3.2.12	陀螺传感器	44
3.2.13	超声波传感器	45
3.2.14	码盘式传感器	46
3.3	图像传感器原理与应用	46
3.3.1	图像传感器	46
3.3.2	CCD 成像	47
3.3.3	成像原理	50
3.3.4	成像亮度	51
3.3.5	相机标定	52
3.4	激光测距仪传感器	59
	思考题与练习题	61
	参考文献	62

第 4 章 工业机器人运动控制63

4.1 机器人结构63

4.1.1 工业机器人基本形式63

4.1.2 工业机器人主要技术参数66

4.2 机器人动力学特性68

4.2.1 牛顿-欧拉方程68

4.2.2 拉格朗日方程71

4.2.3 空间动力学方程74

4.3 机器人运动控制75

4.3.1 PI/PID 控制75

4.3.2 鲁棒自适应容错控制80

4.3.3 具有输入非线性的神经网络控制86

思考题与练习题89

参考文献90

第 5 章 工业机器人协同控制92

5.1 多机器人协同基本概念92

5.1.1 多机器人协同的应用92

5.1.2 多机器人协同控制结构93

5.1.3 多机器人协同的问题描述95

5.2 预 备 知 识95

5.2.1 图论基本概念96

5.2.2 图论矩阵分析97

5.2.3 矩阵理论98

5.2.4 有限时间稳定性理论98

5.3 多机器人系统基本协同控制问题99

5.3.1 多机器人系统协同一致性控制100

5.3.2 多机器人系统协同编队控制101

5.4 多机器人系统有限时间一致性控制102

5.4.1 问题描述102

5.4.2 相关定义和引理103

5.4.3 主要结果106

5.4.4 仿真实验与结果分析112

5.5 多机器人系统有限时间编队-合围控制115

5.5.1 问题描述115

5.5.2 主要结果116

5.5.3 仿真实验与结果分析123

思考题与练习题126

参考文献126

第 6 章 柔性关节工业机器人及控制 128

6.1 柔性驱动关节的类型 128

6.1.1 谐波齿轮传动 128

6.1.2 摆线针轮行星传动机构 130

6.1.3 少齿差行星齿轮传动机构 132

6.2 柔性关节建模 132

6.2.1 非线性数学模型 134

6.2.2 LuGre 摩擦模型 134

6.2.3 迟滞间隙 135

6.3 柔性关节机器人控制技术 136

6.3.1 基于自适应 RBF 神经网络的多级滑模控制 136

6.3.2 基于 RBF 网络的动态面控制 141

6.3.3 基于柔性滤波的自适应单参数权值 RBF 网络反演法控制 147

6.3.4 基于柔性滤波的干扰观测器 RBF 网络动态面控制 154

思考题与练习题 163

参考文献 163

第 7 章 工业机器人现场通信设计 165

7.1 工业机器人通信需求与现场总线 165

7.1.1 集散式控制系统 165

7.1.2 现场总线控制系统 166

7.1.3 现场总线含义和标准 166

7.1.4 典型的现场总线 168

7.1.5 基于 Ethernet 和 TCP/IP 的工业以太网协议 172

7.1.6 基于工业以太网的通信设计 176

7.2 工业机器人现场通信系统 180

7.2.1 组件对象模型技术 180

7.2.2 从 COM 技术到 OPC 181

7.2.3 基于 OPC 的异构现场通信实现 182

7.3 工业机器人现场通信系统设计 185

7.3.1 某工业机器人通信系统结构 185

7.3.2 某工业机器人通信网络组成 186

7.3.3 工业机器人通信系统配置 190

7.3.4 工业机器人通信客户端开发 196

思考题与练习题 199

参考文献 199

第 8 章 工业机器人设计与运用案例 201

8.1 项目介绍 201

8.1.1 项目目的201

8.1.2 关键技术和创新201

8.2 项目总体设计202

8.2.1 总体布局202

8.2.2 工艺环节204

8.2.3 节拍设计205

8.2.4 总体方案设计.....208

8.3 项目工业机器人本体设计208

8.3.1 机械本体结构设计208

8.3.2 关键部件设计213

8.3.3 本体安装调试.....216

8.4 项目工业机器人电气设计216

8.4.1 驱动方式及减速器的选择217

8.4.2 电气设计与实现222

8.4.3 电气参数优化.....224

8.5 项目工业机器人控制设计226

8.5.1 总体控制架构.....226

8.5.2 工作流程设计226

8.5.3 工业现场通信设计229

8.5.4 现场调试232

参考文献233

第1章 工业机器人概述

工业机器人是最典型的机电一体化数字化装备,技术附加值很高,应用范围很广,作为先进制造业的支撑技术和信息化社会的新兴产业,将对未来生产和社会发展起着越来越重要的作用。据国外专家预测,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。据联合国欧洲经济委员会和国际机器人联合会的统计,世界机器人市场前景看好,从20世纪下半叶起,世界机器人产业一直保持着稳步增长的良好势头。自20世纪90年代起,机器人产品发展速度加快,平均年增长率为10%左右。2009~2015年,中国工业机器人市场销量年均增长速度达到40%。2013~2015年,我国工业机器人销量分别为36560台、57096台和68000台,超越日本,成为全球第一大工业机器人市场^[1]。

发达国家的经验表明:使用工业机器人可以降低废品率和产品成本,提高机床的利用率,降低工人因误操作带来的残次零件风险等,其带来的一系列效益也是十分明显的,如减少人工用量、减少机床损耗、加快技术创新速度、提高企业竞争力等。机器人具有执行各种任务特别是高危任务的能力,平均故障间隔期达60000h以上,比传统的自动化工艺更加先进。工业机器人具有如下优点:①改善劳动条件,逐步提高生产效率;②实现更强与可控的生产能力,加快产品更新换代;③提高零件的处理能力与产品质量;④完成枯燥的工作,节约劳动力;⑤提供更安全的工作环境,降低工人的劳动强度,减少劳动风险;⑥减少机床损耗;⑦减少工艺过程中的工作量、缩短停产时间及降低库存;⑧提高企业竞争力。在全球性竞争加剧的形势下,制造商正在利用工业机器人技术来生产价格合理的优质产品。一个公司想要获得一个或多个竞争优势,实现机器人自动化生产将是推动业务发展的有效手段。

经过四十多年的发展,工业机器人已在越来越多的领域得到应用。在制造业中,尤其是在汽车产业中,工业机器人得到了广泛的应用,如在毛坯制造(冲压、压铸、锻造等)、机械加工、焊接、热处理、表面涂覆、上下料、装配、检测及仓库堆垛等作业中,机器人逐步取代人工作业。随着工业机器人向更深、更广方向发展以及机器人智能化水平的提高,机器人的应用范围还在不断扩大,已从汽车制造业推广到其他制造业,进而推广到如采矿业、建筑业以及水电系统维护维修业等各种非制造行业。此外,在国防军事、医疗卫生、生活服务等领域,机器人的应用也越来越多,如无人侦察机(飞行器)、警备机器人、医疗机器人、家政服务机器人等。机器人正在为提高人类的生活质量发挥着重要的作用。

此外,随着人工智能技术的发展与应用,智能制造与智能装备是我国乃至世界制造业的发展方向,而工业机器人则是智能装备的重要基础。智能制造实际上是信息技术与制造技术的融合发展,可以细分为发展智能装备和智能产品、推进生产过程智能化和深化互联网在制造领域的应用三个方向。机器人的大规模应用是未来制造业的重要趋势,是实现智

能制造的基础，也是未来实现工业自动化、数字化、智能化的保障。围绕汽车、机械、电子、危险品制造、国防军工、化工、轻工业等行业需求，工业机器人将成为智能制造中智能装备的代表。

本章主要从工业机器人的基本概念、发展历程、国内外发展状况、主要支撑技术以及几种典型工业机器人等方面进行介绍。

1.1 工业机器人定义

国际标准化组织对机器人的定义为：机器人的动作机构具有类似于人或其他生物体某些器官的功能；机器人具有通用性，工作种类多样，动作程序灵活易变；机器人具有不同程度的智能性，如记忆、感知、推理、决策、学习等；机器人具有独立性，完整的机器人系统在工作中基本可以不依赖人类的干预。

本书的研究对象是工业机器人，又称为机器臂或机械手，是指在工业应用中，可以进行自动控制、可重复编程、多自由度、多功能以及多用途的操作机，能搬运材料、工件或操持工具，用以完成各种作业。工业机器人可以固定在一个地方，也可以安置在往复运动的小车上。一般而言，它是指具有与手臂相似的功能，并且可以抓放物体或进行其他操作的机械装置，图 1-1 就是一个典型的焊接工业机器人。

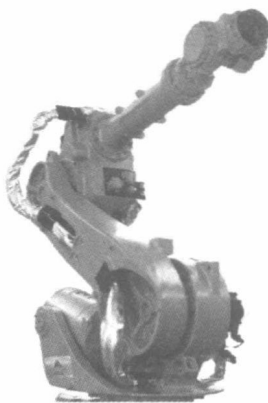


图 1-1 焊接工业机器人

1.2 工业机器人发展历程

随着科学技术的不断进步，我国工业机器人已经处于自主研发阶段，这标志着我国工业自动化走向新的阶段。按照工业机器人的关键技术，其发展过程可分为以下四代。

第一代是程序控制机器人，主要由机器人本体、运动控制器和示教盒组成，操作过程比较简单。第一代机器人使用示教盒在线示教编程，并保存示教信息。当机器人自动运行

时,由运动控制器解析并执行示教程序,使机器人实现预定动作。这类机器人通常采用点到点运动、连续轨迹再现的控制方法,可以完成直线和圆弧的连续轨迹运动,复杂曲线的运动则由多段圆弧和直线运动组合而成。由于操作容易、可视性强,在当前工业中仍然被大规模应用。

第二代是离线编程机器人,该机器人编程系统采用离线式计算机实体模型仿真技术。首先,建立起机器人及其工作环境的实体模型,再采用实际的正逆解算法,通过对实体模型的控制和操作,在离线的情况下进行路径规划;然后,通过编程对实体模型进行三维动画仿真,以检验编程的正确性;最后,将正确的代码传递给机器人控制柜,以控制机器人运动。

第三代是智能机器人,它除了具有第一代和第二代的特点,还带有各种传感器,这类机器人对外界环境不但具有感知能力,而且具有独立判断、记忆、推理和决策的能力,能适应外部对象、环境并协调地进行工作,能完成更加复杂的动作。在工作时,通过传感器获得外部的信息,并进行信息反馈,然后灵活调整工作状态,保证在适应环境的情况下完成工作。此类机器人在弧焊和搬运工作中使用较多。在我国,工业机器人主要应用在制造业,如汽车制造行业和工程机械制造业,主要用于汽车及工程机械的喷涂、焊接及搬运等。

目前,正式投入使用的绝大部分是第一代机器人,即程序控制机器人,这代机器人是固定的、无感应器的电子机械设备,主要以示教再现方式工作,采用点位控制系统,主要用于焊接、喷漆和上下料。第二代机器人内置了感应器和由程序控制的控制器,通过反馈控制,可以根据外界环境信息对控制程序进行校正。这代机器人通常采用接触传感器一类的简单传感装置和相应的适应性算法。第三代机器人正在第一、第二代机器人的基础上蓬勃发展,这代机器人带有多种传感器,可以进行复杂的逻辑推理、判断及决策。它是能感知外界环境与对象,并具有对复杂信息进行准确处理、对自己行为做出自主决策能力的智能化机器人。它们既有固定的,又有移动的;既有自动化的,也有仿生的。它们由复杂的程序设计出来,并且能辨识声音,此外还具备其他高级功能。这代机器人能够根据获得的信息进行逻辑推理、判断和决策,具有一定的适应性和自给能力,在变化的内部状态与外部环境中,自主决定自身的行为。

第四代机器人还在研发中,预计将具备自我复制、人工智能、自动组装和尺寸达纳米级别等特点。

1.3 国内外工业机器人发展现状与趋势

1.3.1 国内外发展现状

1954年,美国的乔治·德沃尔设计出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,该项专利在美国通用汽车公司投入使用,标志着第一代机器人诞生。从此,机器人开始成为人类生活中的一部分,随后,工业机器人在日本得到迅速

的发展。如今,日本已经成为世界上工业机器人产量最大和拥有量最多的国家。20 世纪 80 年代,世界工业生产技术向高度自动化和集成化方向高速发展,同时也使工业机器人得到进一步发展。在这个时期,工业机器人对世界整个工业经济的发展起到了关键性作用。

目前,无论从技术水平上还是从已装配的数量上,机器人都日趋成熟,优势集中在以日本、美国为代表的少数几个发达的工业化国家中,工业机器人已经成为一种标准设备在工业界被广泛应用。国际上成立的具有影响力的、著名的工业机器人公司主要分为日系和欧系,日系主要有安川、OTC、松下、FANUC、川崎等公司;欧系主要有德国的 KUKA、CLOOS,瑞典的 ABB,意大利的 COMAU 及奥地利的 IGM 公司。工业机器人已成为柔性制造系统、计算机集成制造系统、工厂自动化的自动工具。据专家预测,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。

全球拥有现役工业机器人 98 万台。在过去的 10 年,工业机器人的技术水平取得了惊人的进步,传统的功能型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、拟人化的智能机器人。现在,机器人的价格降低了约 80%,而且仍在继续下降,而欧美劳动力成本上涨了 40%。现役机器人的平均寿命在 10 年以上,还可能达 15 年以上,并且还易于重新使用。由于机器人及自动化成套装备对提高制造业自动化水平,提高产品质量、生产效率、增强企业市场竞争力和改善劳动条件等起到了重大的作用,加之成本大幅度降低和性能提升,其增长速度较快。在国际上,工业机器人技术在制造业中的应用范围越来越广,其标准化、模块化、智能化和网络化的程度也越来越高,功能越来越强,正向着成套技术和装备的方向发展,工业机器人自动化生产线成套装备已成为自动化装备的主流及未来的发展方向。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水平的提高,工业机器人的应用已从传统制造业推广到其他制造业,进而推广到如采矿、农业、建筑、灾难救援等非制造行业,而且在国防军事、医疗卫生、生活服务等领域,机器人的应用也越来越多,如无人侦察机(飞行器)、警备机器人、医疗机器人、家用服务机器人等。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科技制高点。

我国的工业机器人研究开始于 20 世纪 80 年代中期,在国家的支持下,通过科技攻关,已经基本实现了从实验、引进到自主开发的转变。工业机器人研究工作促进了我国制造、勘探等行业的发展。截至 2018 年底,我国从事机器人研发的单位有 200 多家,专业从事机器人产业开发的企业有 50 多家。在众多专家的建议和规划下,在国家高技术研究发展计划(863 计划)项目的支持下,沈阳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责任公司、上海机电一体工程有限公司、北京机械工业自动化研究所、四川绵阳四维焊接自动化设备有限责任公司等确立为智能机器人主题产业基地。此外,还有上海富安工厂自动化有限公司、哈尔滨焊接研究院有限公司、北京机电研究所有限公司、首钢莫托曼机器人有限公司、北京安川北科自动化工程有限公司、奇瑞汽车股份有限公司等都以其研发生产的特色机器人或应用工程项目而活跃在当今我国工业机器人市场上。

我国工业机器人主要有以下特点。

(1) 以汽车制造业为主的制造业的发展促进了工业机器人的发展。汽车制造业属于技术、资金密集型产业,也是工业机器人应用最广泛的行业。在我国,工业机器人最初应用

在汽车和工程机械行业，主要用于汽车及工程机械的喷涂及焊接。从2000年开始，受国家宏观政策调控及居民消费水平提高的影响，我国汽车工业进入一个高速增长期。面对这种局面，国际汽车巨头纷纷进入中国市场，并与我国企业合资设厂或扩大原有生产规模，国内企业也纷纷转型或加大对汽车行业的投资，整个行业的增产扩能增加了对工业机器人的需求。据不完全统计，最近几年，国内厂家所生产的工业机器人有超过一半是提供给汽车制造行业的，海关进出口增长数据与汽车行业增长数据具有较高的相关度。由此可知，汽车工业的发展是近几年我国工业机器人增长的原动力之一。

(2) 沿海经济发达地区是工业机器人的主要市场。我国工业机器人的使用集中在广东、江苏、上海、北京等地，工业机器人的拥有量占全国拥有总量的一半以上，这种分布态势和增长趋势符合我国现阶段经济发展状况。我国经济最具活力的地区已经从珠江三角洲地区扩展到长江三角洲地区，而且长江三角洲地区在制造业中所占的比例越来越大。

(3) 外商独资企业、中外合资企业和国有企业是工业机器人的主要客户。工业机器人属于技术含量高、价格相对昂贵的制造装备，采用工业机器人较多的企业，一般对产品的质量要求较高、企业在市场上具有更高的影响力。现阶段，工业机器人使用量最多的仍是外商独资或中外合资企业。国有企业也在加大对工业机器人的采购，如汽车行业中的中国第一汽车集团公司、上海汽车集团股份有限公司等，它们的产品在市场上已经具有了相当强的竞争力，它们对工业机器人有着较大的需求。同时，采购工业机器人能够得到国家和政府的支持，因此制造业中的大中型国有企业的工业机器人使用量一直很大，而且在未来相当长的时间内仍将保持这种增长势头。另外，我国的民营企业正逐渐认识到工业机器人的优势，对工业机器人的使用量也在逐步增加，虽然装备的数量与以上企业仍存在较大差距，但是增长的速度惊人，将很快成为工业机器人市场的重要客户。

目前，国际制造业中心正向中国转移，用信息化带动工业化、用高新技术改造传统产业已成为我国工业发展的必由之路。作为先进制造装备之典型代表的工业机器人必将有一个大的产业发展空间，市场前景广阔。但我们也应注意到，国外机器人巨头大量涌入中国，市场竞争日益加剧，所以中国未来机器人产业的发展不会一帆风顺。国家应借鉴日本机器人产业发展的成功做法，制定机器人产业发展战略和相关政策，这是我国机器人产业发展成败之关键。

目前，在工业机器人领域，中国虽然在部分方面达到了世界先进水平，但是总体上依旧落后于国际领先水平，其原因主要有以下几点。

(1) 中国在工业机器人领域起步较晚。工业机器人的概念于1954年提出，美国、日本在之后几年就开始进行工业机器人的开发和研究，而中国的研究是到20世纪80年代才刚刚开始起步。不仅如此，在起步时期，由于缺乏资金，中国在工业机器人领域的研发一直进展缓慢，导致水平更加落后。

(2) 由于历史原因，中国在工业机器人技术上落后于世界先进水平，生产的工业机器人可靠性较低，先进的工业机器人主要还是依靠从国外进口，成本偏高，大部分企业无法承受这么高的成本。因此，中国的工业机器人销售市场并不发达，没有市场的推动，中国工业机器人的研发必然进展缓慢。

(3) 直到今日，中国也没有大规模的工业机器人制造商，产业规模比较小，没有形成产业链，这在国际竞争中会使国产的工业机器人处于劣势地位，制约我国工业机器人的发展。

(4) 中国的精加工行业比较薄弱，无法满足生产先进的工业机器人所需要的加工精度，这严重制约了国产工业机器人的发展。

(5) 中国工业机器人的研究无统一标准，导致大量重复、低水平的研究，极大地浪费了科研力量。

要缩短我国机器人与国外的差距，必须利用自己的优势走产业化发展道路。因此，我国工业机器人行业在发展的道路上要认识到以下几点。

(1) 工业机器人技术是我国工厂自动化发展的必然趋势，国家要对国产工业机器人有更多的政策与经济支持，吸引高新技术人才，加大技术投入与建设。

(2) 在国家的科学技术发展计划中，应该继续对智能机器人研究开发与应用给予大力支持，形成产品和自动化制造装备同步协调发展的新局面。

(3) 部分国产工业机器人的性能已经与国外相当，企业采购工业机器人时不要盲目进口，应该综合评估，大力弘扬国产工业机器人。

1.3.2 工业机器人的应用现状

目前，工业机器人广泛应用于各种工业生产中，现将其应用范围、应用领域及其用途列举如下(表 1-1)。

表 1-1 工业机器人的应用范围和用途

应用行业	应用环节	工业机器人作用
金属或材料加工	铸造、压铸	向金属模腔内插入型芯，从型腔内取出成品
	锻造	为模锻机、修边机上料、取料、去飞边等
	金属冲压	作为专用设备，用于被加工材料的上料、下料
	研磨、去毛边	抓取工件放入研磨装置，驱动研磨装置加工工件
	其他机械加工	安装高刚性抓取工具，以此定位平面刀具，实现平面加工
	树脂成形	成品取出，剪断成品的浇口、插入嵌件，物料搬运等
焊接	上下料作业	完成机床加工件的毛坯运输、供应，工件的装卸等
	点焊	安装焊钳，完成点焊作业，通过更换焊钳实现打点功能
	弧焊	安装焊枪，完成弧焊作业，多台机器人可以协同工作
	激光焊接	安装激光照射部分，按照给定的速度和位置，完成焊接
	钎焊	安装钎焊装置，完成印刷电路板上元器件与导线的焊接
	其他焊接	安装并驱动其他焊接装置，如摩擦焊装置，完成焊接
切割	机械切割	安装道具，利用刀刃等机械切断装置完成工件的切断作业
	气割	安装割炬，利用燃烧使材料局部融化并将其去除
	激光切割	安装激光照射部分，按照给定的速度和位置，完成切割
	水力切割	安装高压水喷嘴，按照给定的速度和位置，完成切割
	其他切割	安装等离子切割装置，按照给定的速度和位置，完成切割
安装装配	一般装配	利用高精度和高刚性装置，完成转配、紧固等作业
	插装	安装通用机械手或抓混用电子元件转配手爪，将芯片、接线端子、电阻电容等元器件插入印刷电路板

续表

应用行业	应用环节	工业机器人作用
	表面贴装	安装通用机械手或抓混用电子元件转配手爪，将各类芯片贴装到印刷电路板上
	键合	安装专用手指，将芯片贴装到引脚框，或利用 20~50μm 的金丝将芯片电极与引线框的电极连接起来
	密封	安装封口枪，依靠压力将密封材料按数量要求送到指定位置，完成涂布工序
	胶合	安装敷料喷嘴，利用料罐压力将黏合胶送至指定位置，按给定数量涂布在工件上
	螺栓紧固	安装紧固装置，利用真空吸附或磁力吸附握住螺栓，按给定压力和转矩完成螺栓紧固
	其他装配	在转配作业中，完成各种零件的拾取、排列和安放任务

1.3.3 工业机器人技术发展趋势

对近几年国内外推出的工业机器人进行分析可知，工业机器人技术正向智能化、系统化和模块化的方向发展，其发展趋势主要为：可重构化和结构模块化、控制技术开放化、个人计算机化、系统网络化、伺服驱动技术分散化和数字化、多传感器融合技术实用化、工作环境设计优化、作业柔性化、作业智能化等。其中，工业机器人的系统网络化是工业机器人研究的热点。在机器人研究领域出现了微型机器人、仿人型机器人、微操作系统(如微型飞行器等)、智能机器人等。机器人的应用领域正在向非制造业和服务业方向扩展，尤其在服务、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，机器人也正发挥着不可替代的作用，正在蓬勃发展的军用机器人也将越来越多地用于装备部队。

目前，国外机器人自动化生产线成套装备已成为自动化成套装备的主流以及未来自动化生产线的发展方向。国外汽车行业、电子和电器行业、物流与仓储行业(企业级)等已大量使用机器人自动化生产线，从而保证了其产品的质量和生产的高效。典型的机器人设备如大型机器人车体焊装自动化系统技术和成套装备、电子和电器等机器人柔性自动化装配及检测成套技术和装备、机器人整车及发动机装配自动化系统技术和成套装备、AGV(automated guided vehicle, 自动导引运输车)物流与仓储自动化成套技术及装备等的使用，大大推动了相关行业的快速发展，提升了制造技术的先进性^[2]。

当前，国外将机器人自动化生产线成套装备的共性技术作为重点开发内容，主要体现在以下几个方面。

(1) 大型自动化生产线的设计开发技术。利用 CAX(多元化的计算机辅助技术)及仿真系统等多种高新技术和设计手段，快速设计和开发机器人大型自动化生产线，并进行数字化验证。

(2) 自动化生产线“数字化制造”技术。虚拟制造技术发展很快，国外早期从事仿真软件的开发公司已经推出可进入实用的所谓“数字化工厂”商品化软件。国外企业已利用这类软件建立起自己的产品制造工艺过程信息化平台，再与本企业的资源管理信息化平台和车身产品设计信息平台结合，构成支持本企业产品完整制造过程生命周期的信息化平台。自动化生产线的设计、制造、整定及维护也必须基于上述信息化平台，开展并行工