

机器自动化：
工业机器人及其关键技术研究

李素云 著

JIQI ZIDONGHUA:
GONGYE JIQIREN JIQI GUANJIAN JISHU YANJIU

中国原子能出版社

机器自动化：
工业机器人及其关键技术研究

李素云　著

学院图书馆
藏书专用章

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

机器自动化 ：工业机器人及其关键技术研究 / 李素云著. -- 北京 ：中国原子能出版社，2018.3

ISBN 978-7-5022-8910-2

Ⅰ. ①机… Ⅱ. ①李… Ⅲ. ①工业机器人—研究 Ⅳ. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 048515 号

内 容 简 介

工业时代的核心技术是工业自动化，工业机器人是实现自动化的一个手段。本书较为全面、深入地对工业机器人的相关技术展开了讨论，注重理论联系实际，并尽量反映国内外近年来在机器人理论研究和生产应用方面的最新成果。本书主要内容包括：工业机器人的机械结构、工业机器人的感知技术、工业机器人的控制技术、工业机器人的编程技术、工业机器人工作站及生产线、工业机器人的管理与维护、工业机器人技术的新发展等。本书内容丰富翔实，具有较高的实用价值，是一本值得学习研究的著作。

机器自动化 ：工业机器人及其关键技术研究

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 张 琳
责任校对 冯莲凤
印 刷 北京亚吉飞数码科技有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 17
字 数 220 千字
版 次 2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-8910-2 定 价 60.00 元

网址：http://www.aep.com.cn E-mail:atomep123@126.com
发行电话:010－68452845
版权所有 侵权必究

前　言

工业机器人是集机械、电子、控制、计算机、传感器、人工智能等多学科先进技术于一体的现代制造业重要的自动化装备。自1954年由美国研制出世界上第1台可编程的机器人以来，各工业发达国家都相继研制和应用工业机器人，机器人技术及其产品得到飞速发展，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)的重要工具。在当今大规模制造业中，企业为保障人身安全、提高生产效率和产品质量，普遍重视生产过程的自动化程度。工业机器人作为自动化生产线上的重要成员，逐渐被企业所认同并采用。

与计算机、网络技术一样，工业机器人的广泛应用正在日益改变着人类的生产和生活方式。工业机器人的技术水平和应用程度已成为评价一个国家自动化程度高低的重要标志之一。目前，工业机器人主要承担焊接、喷涂、搬运以及码垛等重复且劳动强度极大的工作，工作方式一般采取示教再现方式及部分离线编程方式。随着《中国制造2025》规划的落实与推进，工业机器人的应用将越来越广泛，需求越来越大，其技术研究与发展越来越深入，这将极大地提高社会生产效率，提升工业产品质量，为社会创造巨大的财富。

随着产业结构的调整，国内机器人产业已表现出爆发性的发展态势，而机器人需要操作、编程、调试和维护等，这带来了对安全和熟练使用工业机器人的作业人员的大量需求。目前国内关于工业机器人方面的专著不少，但大多偏重于理论，对实际操作指导意义不大。机器人生产厂商提供的培训往往只求让设备动起来，难以取得系统而实用的培训效果。因此，本书在撰写时更加注重理论与实践操作相结合，依据学习者的认知规律，侧重工

业机器人的技术要点，通过相关典型实例讲解，使读者快速掌握工业机器人的基本操作和行业应用，实现理论和实践的有机结合。

全书共分为8章。第1章为走近工业机器人，第2章为工业机器人的机械结构，第3章为工业机器人的感知技术，第4章为工业机器人的控制技术，第5章为工业机器人的编程技术，第6章为工业机器人工作站及生产线，第7章为工业机器人的管理与维护，第8章为工业机器人技术的新发展。

本书在撰写过程中以作者在工业机器人方面的研究工作为基础，参考并引用了国内外专家学者的研究成果和论述，在此向相关内容的原作者表示诚挚的敬意和谢意。

由于作者水平有限，加之时间仓促，错误和遗漏在所难免，恳请读者批评指正。

作　者

2017年11月

目　录

第 1 章　走近工业机器人 …… 1

1.1　发展工业机器人的意义 …… 1
1.2　工业机器人的历史发展 …… 2
1.3　工业机器人的定义及特点 …… 4
1.4　工业机器人的基本组成及技术参数 …… 7
1.5　工业机器人的应用现状 …… 13
1.6　生产工业机器人的代表性企业 …… 14

第 2 章　工业机器人的机械结构 …… 21

2.1　机器人的结构基础 …… 21
2.2　工业机器人的末端操纵器 …… 29
2.3　工业机器人的腕部 …… 43
2.4　工业机器人的臂部 …… 50
2.5　工业机器人的机身和行走机构 …… 56
2.6　工业机器人的传动机构 …… 66
2.7　工业机器人机械系统实例 …… 72

第 3 章　工业机器人的感知技术 …… 74

3.1　工业机器人的感知技术概述 …… 74
3.2　工业机器人传感器的种类与选择 …… 76
3.3　常用工业机器人的传感器 …… 79
3.4　多传感器的融合及应用 …… 86
3.5　工业机器人视觉技术 …… 90
3.6　机器人传感器应用系统 …… 92

第 4 章　工业机器人的控制技术 …… 96

4.1　工业机器人控制方式 …… 96
4.2　工业机器人控制系统的功能和组成 …… 98
4.3　工业机器人的位置控制与力(力矩)控制 …… 102
4.4　机器人的其他控制单元 …… 116

第 5 章　工业机器人的编程技术 …… 124

5.1　工业机器人的编程方式 …… 124
5.2　工业机器人编程要求与语言类型 …… 126
5.3　工业机器人语言系统结构和基本功能 …… 128
5.4　常用的工业机器人编程语言 …… 132
5.5　机器人的示教编程、离线编程 …… 136

第 6 章　工业机器人工作站及生产线 …… 152

6.1　认识工作站 …… 152
6.2　在生产中引入工业机器人系统的方法 …… 152
6.3　焊接机器人系统 …… 156
6.4　搬运机器人系统 …… 165
6.5　码垛机器人系统 …… 173
6.6　装配机器人系统 …… 181
6.7　涂装机器人系统 …… 187
6.8　工程工业机器人和外围设备 …… 194
6.9　工业机器人生产线 …… 196

第 7 章　工业机器人的管理与维护 …… 209

7.1　设备维护理论简介 …… 209
7.2　工业机器人的管理 …… 210
7.3　工业机器人的维护及常用工具 …… 218
7.4　机器人保养计划 …… 228

第 8 章 工业机器人技术的新发展 …… 230

8.1 机器人的最新发展 …… 230
8.2 智能机器人技术 …… 246
8.3 网络机器人技术 …… 251

参考文献 …… 254

第 1 章　走近工业机器人

一直以来，工业生产对机械化的要求在不断提升，正是由于机器人的诞生，工业生产的理想化模型也成为现实。在今天，机器人已经逐步应用于社会生产中，相信机器人的作用会越来越大。

1.1　发展工业机器人的意义

工业机器人最早应用于汽车生产领域，随后，日本、德国、美国等制造业发达国家开始在其他行业的工业生产中也大量采用机器人作业。进入 21 世纪以来，随着劳动力成本的不断提高和技术的不断进步，各国开始陆续进行制造业的转型与升级，出现了机器人替代人的热潮。

使用工业机器人进行生产具有 9 大优势，如图 1-1 所示。除了降低成本，使用机器人进行工业生产还具有显著提高生产效率、提高良品率、保证产品品质、增强生产柔性等一系列优势。

①工业机器人能够做某些单调、重复的体力劳动，大大地消除了枯燥无味的工作，降低工人的劳动强度。

②工业机器人可以广泛用于高危险、极端恶劣的环境下作业。

③工业机器人能够完成对人体有害的物料的搬运或工艺操作，增强工作场所的健康安全性，并能从事特殊环境下的劳动，减少劳资纠纷。

④工业机器人能够提高生产自动化程度，减少工艺过程中的

停顿时间，从而提升生产效率。

⑤工业机器人能够提高对零部件的处理能力，保证产品质量，提高成品率，并提升产品的质量，是企业补充和替代劳动力的有效方案。

⑥工业机器人有助于提高自动化生产效率，调整生产能力，实现柔性制造。

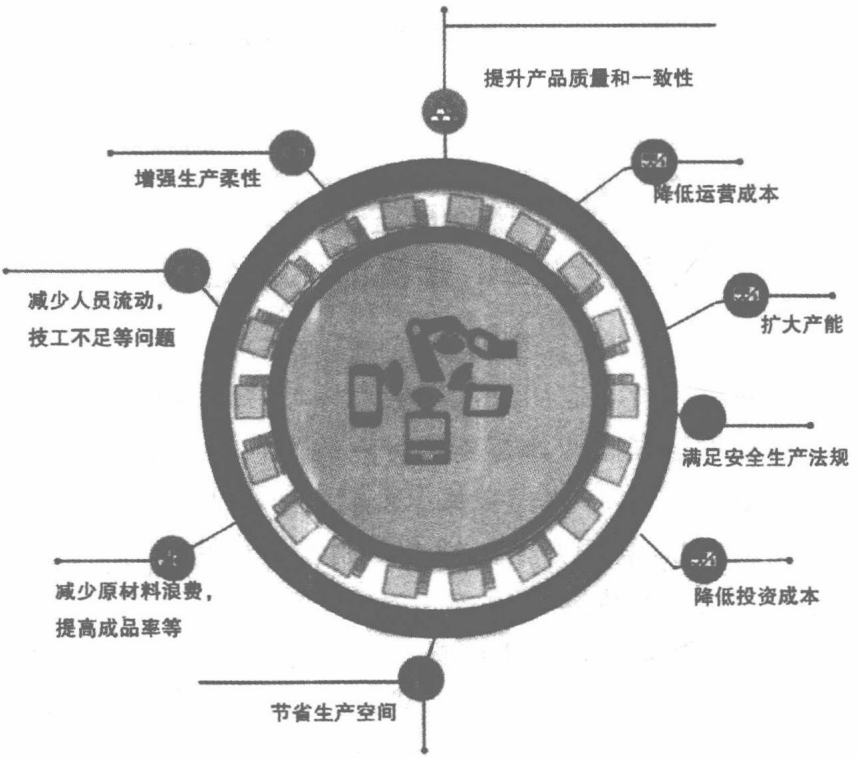


图 1-1　工业机器人的 9 大优势

1.2　工业机器人的历史发展

“工业机器人”的设想最早来自美国人乔治·德沃尔关于示教机器人的专利——通过示教(Teaching)与再现(Playback)能够取放物品(Putandtake)的机械。这种机器人灵活多变，能够按照

不同的指令完成不同的动作。

基于这一专利，1958 年美国 Consolideted Control 公司成功研制出世界上第一台数控机器人原型机——Automatic Programmed Apparatus，四年之后，美国 Unimation 公司和 AMF 公司都推出了示教再现机器人的样机，表 1-1 反映了机器人发展的重要节点。

20 世纪 60 年代日本国内经济高速增长，劳动力出现严重不足，日本的企业将目光瞄准了工业机器人，在 1967 年日本从美国引进了一批示教再现机器人，从此日本拉开了研发和量产工业机器人的序幕。

工业机器人能够代替人类在一些高危环境、高污染地区从事简单、重复的工作，从而提高效率，降低安全隐患，确保高质量地完成任务，因此受到制造业领域的广泛采用。

表 1-1　工业机器人大事记

时间/年	机器人发展历程
1954	美国乔治·德沃尔获得示教再现的专利
1958	美国 Consolideted Control 公司研发并制造了世界上第一台数控机器人原型机
1960	美国 Unimation 公司实现了示教机器人的量产化
1962	美国 Unimation 公司开始将示教机器人作为工业产品出售
1962	美国 AMF 公司开始销售示教再现机器人
1968	日本开始大量生产机器人
1970	美国举办首届机器人峰会
1972	日本成立工业机器人联合会
1973	早稻田大学开发出类人机器人 WABOT-1
1973	瑞典 ASEA 公司研发出有关节的电动机器人
1974	日本举办了首届国际机器人会展
1980	日本机器人出现普及，这一年称之为“机器人元年”
1983	日本机器人学会成立
1987	国际机器人联盟(IFR)成立

通常认为,工业机器人在20世纪70年代开始“量产化”,80年代机器人开始普及,由此诞生了柔性旨在系统(FMS)和工厂自动化(FA)等新型工业生产系统。从此传统的大规模生产逐渐转变为中批量中种类、小批量多种类的生产。正是由于工业机器人更为广泛的用途,机器人的产业得到了迅速地发展。

因此,在2000年以前,工业机器人的应用有着明确的目的,那就是在工厂车间的危险环境下替代人来工作。

随着中央处理器等许多核心零部件体积更小、价格更低、性能更高、可靠性更强、存储量更大,机器人本身的控制性越来越高、可靠性越来越强,价格也越来越低。工业机器人有望在制造业各领域得到广泛普及。

1.3 工业机器人的定义及特点

1.机器人的定义

1920年,捷克剧作家卡雷尔·卡佩克发表了科幻剧本《罗萨姆的万能机器人》,他在剧本中首次提出了“robot”这个词,并且把robot描绘成像人一样的机器,不知疲倦地工作。从此以后,不仅robot这个词广泛地流行,而且设计制造robot的活动也异常风行。日本研究人员依据自身理解将robot翻译成日文“机器人”,中文也采用了这个词,这种翻译结果至今持续影响着很多人对robot的理解和研究方向的选择。

初期人们一般的理解,机器人是具有一些类似人的功能的机械电子装置或者自动化装置,它仍然是个机器,特点是具有感知功能、执行功能、可编程功能。随着人工智能技术的发展,作为人造的机器或者机械电子装置机器人演变成了能够自主感知环境、自主逻辑判断、自主控制执行和自主学习的机器,甚至是具有自我情感意识的机器。如图1-2所示为拉小提琴的机器人。

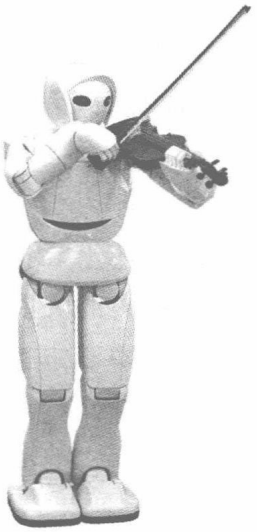


图 1-2　拉小提琴的机器人

与生物进化的历程相比，机器人在不同领域的出色表现以及人性化的快速发展引起了一些人的担心，人们担心机器人的智能化是否会超越人类，甚至危害或统治人类。例如，1978 年 9 月 6 日，日本广岛一间工厂的切割机器人在切割钢板时，突然将一名值班工人当作钢板，切成肉片，这一惨案成为世界上第一宗机器人杀人事件。南非试验的机器人火炮曾突然将炮口转向无辜的人群，引起了军事科研人员的恐慌。人们有理由怀疑，随着科技的发展和机器人功能的日益强大，它们可能会对人类造成威胁。

为了避免类似的机器人伤害人类事件的发生，著名作家阿西莫夫在 1940 年提出了“机器人三原则”，即著名的“阿西莫夫机器人定律”。

(1)机器人不得伤害人类，或看到人类受到伤害而袖手旁观。

(2)在不违反第一定律的前提下，机器人必须绝对听从于人类的命令。

(3)在不违反第一定律和第二定律的前提下，机器人必须尽力保护自己。

这是给机器人赋予的伦理性纲领，机器人学术界一直将这三原则作为机器人开发的准则。但是作者认为：①实际情况是该理

想无法得到遵守，21 世纪以来以美国为首的发达国家积极推动空中战斗无人机、地面无人战斗平台、水中无人攻击舰艇，从海陆空各个层面全面突破了这一伦理底线，因此目前停留在担心层面已经没有意义，有远见的人们要大力发展和提高对机器人技术的掌控能力，唯有不断的创新才能保证人类自身的安全。②目前与其说大家担心机器人的潜在威胁，还不如说大家担心的是其中的人工智能技术，包括科学家霍金在内的人其实是对人类能否驾驭人工智能技术缺乏信心，因此真正需要审慎的是人工智能技术的发展与运用。

2. 智能机器人的定义

人们通常将智能机器人理解为一个独立的可以自我控制的“活物”。其实机器人这个“活物”远没有人体这样灵活和微妙。智能机器人具备多种传感器，如具备视觉、听觉、触觉和嗅觉等感受器还具有效应器，作为应用于周围环境的手段，这些“筋肉”能使手、脚、长鼻子、触角等动起来。

智能机器人最大的特点是它具有独立的“思考”能力，它能够理解人类的语言，同操作者直接对话，它从自我的“意识”中获取了能够使它独立生存的外界环境——实际情况详尽模式。它能够及时了解内外环境，快速制订出动作计划。并在信息条件不充足且外界环境快速变化的条件之下完成相应的动作。当然要像人类一样应对各种复杂问题是不可能的。一些科学家试图通过计算机所能理解的方式，培养机器人的思维，并通过自我学习提高其智力水平，从而实现真正的机器智能。

根据目前的技术进展和研究理解，智能机器人是能够自主感知环境、自主逻辑判断、自主控制执行和自主学习的机器，服务于直接和间接掌控智能机器人技术的人群，即使未来可能被赋予一定的自我意识和情感意识，可以自我复制、自我修复，它仍然只能活动在不断进化、不断创新的人类影子中，脱离人类控制实现自我进化仍然是难以想象的事情。

1.4　工业机器人的基本组成及技术参数

1.4.1　工业机器人的基本组成

组成工业机器人是一种模拟人手臂、手腕和手功能的机电一体化装置。一台通用的工业机器人从体系结构来看，可以分为三大部分：机器人本体、控制器与控制系统以及示教器，具体结构如图 1-3 所示。

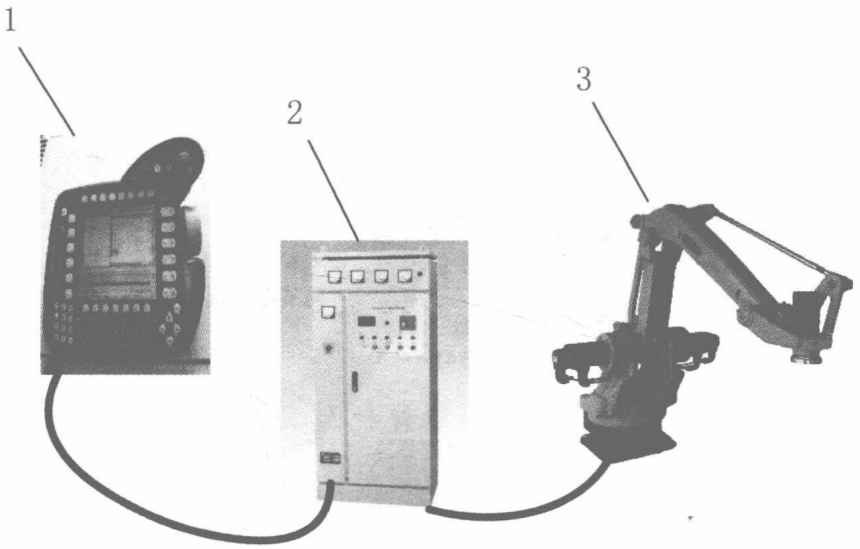


图 1-3　工业机器人的基本组成

1—示教器；2—控制器；3—机器人本体

1. 机器人本体

机器人本体是工业机器人的机械主体，是完成各种作业的执行机构。一般包含互相连接的机械臂、驱动与传动装置以及各种内外部传感器。工作时通过末端执行器实现机器人对工作目标的动作。

(1)机械臂

大部分工业机器人为关节型机器人,关节型机器人的机械臂是由若干个机械关节连接在一起的集合体。图 1-4 所示为典型六关节工业机器人,由机座、腰部(关节 1)、大臂(关节 2)、肘部(关节 3)、小臂(关节 4)、腕部(关节 5)和手部(关节 6)构成。

①机座。机座是机器人的支承部分,内部安装有机器人的执行机构和驱动装置。

②腰部。腰部是连接机器人机座和大臂的中间支承部分。工作时,腰部可以通过关节 1 在机座上转动。

③臂部。六关节机器人的臂部一般由大臂和小臂构成,大臂通过关节 2 与腰部相连,小臂通过肘关节 3 与大臂相连。工作时,人、小臂各自通过火节电动机转动,实现移动或转动。

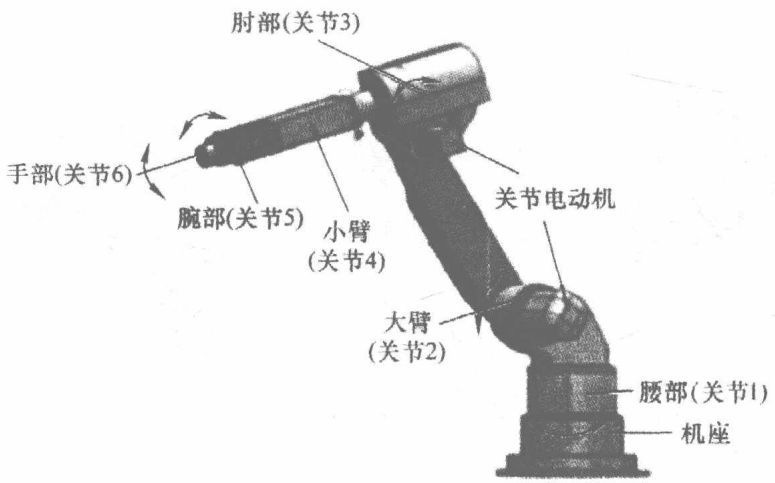


图 1-4 典型六关节工业机器人

④手腕。手腕包括手部和腕部,是连接小臂和末端执行器的部分,主要用于改变末端执行器的空间位置,联合机器人的所有关节实现机器人预期的动作和状态。

(2)驱动与传动装置

工业机器人的机座、腰部关节、大臂关节、肘部关节、小臂关节、腕部关节和手部关节构成了机器人的外部结构或机械结构。

机器人运动时，每个关节的运动通过驱动装置和传动机构实现。图 1-5 所示为机器人运动关节的组成，要构成多关节机器人，其每个关节的驱动及传动装置缺一不可。

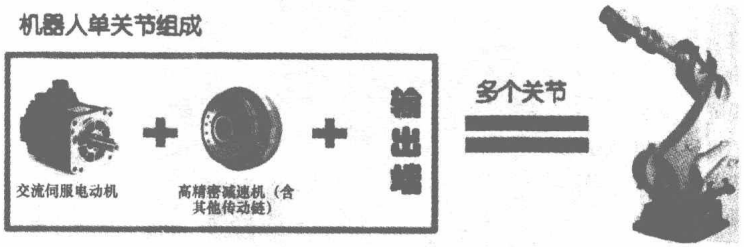


图 1-5　机器人运动关节的组成

驱动装置是给机器人机械臂提供动力和运动的装置，机器人的类型不同，所采用的驱动装置也不同，驱动的传动方式也不相同。目前常见的驱动方式主要有四种，分别是液压式驱动装置、气压式驱动装置、电力式驱动装置和机械式驱动装置。工业上比较常用的是电力驱动，其特点是使用方便、响应快、驱动力大、操作灵活。最为常用的驱动电动机是步进电动机和伺服电动机。与电动机配合使用的减速器一般采用谐波减速器、摆线针轮减速器或者行星轮减速器。

(3)传感器

为检测作业对象及工作环境，在工业机器人身上安装诸如触觉、力觉、视觉传感器。有这些装备，机器人可以适应复杂多变的环境，能够完成更为复杂的工作。

2. 控制器及控制系统

控制系统是构成工业机器人的神经中枢，由计算机硬件、软件和一些专用电路、控制器、驱动器等构成。工作时，根据编写的指令以及传感信息控制机器人本体完成一定的动作或路径，主要用于处理机器人工作的全部信息。控制柜内部结构如图 1-6 所示。