

普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

工业机器人技术及应用

刘 军 郑喜贵 主 编

张 莉 蒋玲玲 副主编

邱 慧 陈林林 参 编

周文玉 主 审

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了工业机器人的基本组成、机械机构、运动学及动力学、控制系统、编程与调试、典型应用、管理与维护等内容。全书共7章,第1章介绍了工业机器人的发展与应用、机器人的组成与分类;第2章介绍了工业机器人的常见机械系统,对其机座、臂部、腕部、末端执行器及传动机构均做了比较详细的介绍;第3章主要介绍了工业机器人的运动学及动力学等数学理论基础;第4章介绍了工业机器人的控制系统;第5章介绍了工业机器人的编程与调试;第6章介绍了工业机器人的典型应用,对几类典型工业机器人的系统组成、周边设备及工作站布局做了较为详细的介绍;第7章介绍了工业机器人的管理与维护。本书每章最后都设计了思考与练习题,便于学生加深对相关知识的理解。

本书既可作为高等院校机械设计制造及其自动化、机械电子工程等专业的本科生,以及机械制造与自动化、机电一体化等相关专业的专科生教学使用,也可供工业机器人领域的教师、研究人员和工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人技术及应用/刘军,郑喜贵主编. —北京:电子工业出版社,2017.7
普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材
ISBN 978-7-121-31580-0

I. ①工… II. ①刘… ②郑… 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116693号

责任编辑:郭穗娟

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:374.4千字

版 次:2017年7月第1版

印 次:2019年1月第2次印刷

定 价:49.80元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254502, guosj@phei.com.cn。

前 言

机器人技术从诞生之日起至今,仅仅半个世纪的时间,已经广泛应用于国民经济及人类生活的各个领域。在现代化的工业生产中,机器人已逐步在焊接、搬运、码垛、喷涂、装配、加工检验等诸多领域充当了生产主力军的作用,已经成为人类不可或缺的得力助手。在人类的日常生活中,机器人也在医疗、家政服务、保安、抢险排爆等方面,逐步改变着我们的生活和生存方式。

工业机器人是典型的机电一体化产品,涉及机械工程、电子技术、计算机技术、自动控制及人工智能等多个学科的知识。随着机器人在人类生产和生活中的应用越来越普及,作为“新工科”的大学生和工程技术人员,非常有必要学习和掌握工业机器人相关的专业技术知识。

本书参考有关工业机器人的最新资料和信息,合理设置内容,是以工业机器人的基础性、实用性、共用性为主线,并结合新工科人才培养方向而撰写的。全书共7章,系统地介绍了工业机器人的基本组成、机械机构、运动学及动力学、控制系统、编程与调试、典型应用、管理与维护等内容。

本书内容新颖、系统全面,既有基本理论、基本方法,又有典型应用,理论联系实际,将工业机器人的原理与构造、典型应用、操作与编程、管理与维护等压缩在一本教材里,并且每章都设计了思考与练习题,便于学生加深对相关知识的理解。本书在第2次印刷时,进行了少量修订,使内容更完善。

本书由郑州科技学院刘军、郑喜贵、张莉、蒋玲玲、邱慧、陈林林共同编写,其中刘军、郑喜贵担任主编,张莉、蒋玲玲担任副主编。具体编写分工如下:刘军编写第1章,张莉编写第2章,邱慧编写第3、7章,陈林林编写第4章,蒋玲玲编写第5章,郑喜贵编写第6章。

本书既可作为高等院校机械设计制造及其自动化、机械电子工程等专业的本科生及机械制造与自动化、机电一体化等相关专业的专科生教学使用,也可供工业机器人领域的教师、研究人员和工程技术人员学习参考。

本书在编写过程中参阅了国内外诸多同行专家学者的机器人技术著作,作者在本书最后的参考文献部分已列出,在此致以诚挚的谢意!郑州科技学院周文玉教授审阅了全书,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢!

由于机器人技术的发展日新月异,编者水平有限,本书难以对工业机器人技术进行全面、详细的介绍,书中难免存在不足之处,敬请各位专家和广大读者批评指正,以便进一步提高本书的质量。

编 者
2019年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工业机器人的定义	1
1.2 工业机器人的发展与应用	2
1.2.1 工业机器人的发展	2
1.2.2 工业机器人的应用	4
1.3 工业机器人的基本组成及技术参数	7
1.3.1 工业机器人的基本组成	7
1.3.2 工业机器人的技术参数	8
1.4 工业机器人的分类	11
本章小结	13
思考与练习	13
第 2 章 工业机器人的机械系统	14
2.1 工业机器人的手部结构	15
2.1.1 夹持类手部	15
2.1.2 吸附类手部	18
2.1.3 仿人机器人手部	20
2.2 工业机器人的腕部结构	22
2.2.1 腕部的转动方式	22
2.2.2 腕部的分类	23
2.3 工业机器人的臂部结构	26
2.3.1 臂部特点和设计要求	26
2.3.2 臂部机构	27
2.3.3 机身和臂部的配置形式	30
2.4 工业机器人的机身机构	32
2.5 工业机器人的行走机构	34
2.5.1 车轮式行走机构	35
2.5.2 履带式行走机构	36
2.5.3 足式行走机构	37
2.6 工业机器人驱动装置和传动单元	40
2.6.1 驱动装置	40
2.6.2 传动单元	41



本章小结	43
思考与练习题	44
第3章 工业机器人的运动学和动力学	45
3.1 工业机器人运动学	45
3.1.1 齐次坐标及对象物的描述	45
3.1.2 齐次变换及运算	50
3.1.3 工业机器人的连杆参数和齐次变换矩阵	55
3.1.4 工业机器人运动学方程	57
3.2 工业机器人动力学	66
3.2.1 工业机器人速度分析	66
3.2.2 工业机器人静力分析	71
3.2.3 工业机器人动力学分析	74
本章小结	80
思考与练习	80
第4章 工业机器人控制系统	82
4.1 工业机器人控制装置	82
4.1.1 工业机器人控制装置组成和功能	82
4.1.2 工业机器人控制器	88
4.2 工业机器人驱动装置	92
4.2.1 驱动装置类型和组成	92
4.2.2 交流伺服驱动装置	95
4.2.3 液压气动装置的主要设备	98
4.3 工业机器人检测装置	106
4.3.1 工业机器人传感器概述	106
4.3.2 内部传感器	108
4.3.3 外部传感器	114
本章小结	119
思考与练习	120
第5章 工业机器人的编程	121
5.1 工业机器人的编程方式	121
5.2 工业机器人的示教编程	122
5.2.1 ABB 工业机器人基本运动指令	123
5.2.2 工业机器人示教编程的基本步骤	125
5.3 工业机器人的编程语言	128
5.3.1 工业机器人语言的发展概况	128
5.3.2 工业机器人的编程要求与语言类型	129



5.4 工业机器人语言系统结构和基本功能	131
5.4.1 工业机器人语言系统的结构	131
5.4.2 工业机器人编程语言的基本功能	132
5.5 常用的工业机器人编程语言	134
5.6 工业机器人的离线编程	135
5.6.1 工业机器人离线编程的特点和主要内容	135
5.6.2 工业机器人离线编程系统的结构	136
5.7 工业机器人的离线编程仿真软件及编程示例	139
5.7.1 ABB 工业机器人离线编程仿真软件 RobotStudio	139
5.7.2 工业机器人离线编程示例	145
本章小结	161
思考与练习题	161
第 6 章 工业机器人系统集成与典型应用	163
6.1 工业机器人的应用准则与步骤	163
6.1.1 工业机器人的应用准则	163
6.1.2 工业机器人的应用步骤	164
6.2 工业机器人工作站的构成及设计原则	165
6.2.1 机器人工作站的构成	165
6.2.2 机器人工作站的一般设计原则	165
6.3 焊接机器人	169
6.3.1 焊接机器人的分类及特点	169
6.3.2 焊接机器人的系统组成	173
6.3.3 焊接机器人的周边设备	181
6.3.4 焊接机器人应用实例	185
6.4 搬运机器人	188
6.4.1 搬运机器人的分类及特点	189
6.4.2 搬运机器人的系统组成	193
6.4.3 搬运机器人的周边设备	197
6.4.4 搬运机器人应用实例	198
6.5 喷涂机器人	201
6.5.1 喷涂机器人的分类及特点	202
6.5.2 喷涂机器人的系统组成	205
6.5.3 喷涂机器人的周边设备	209
6.5.4 喷涂机器人应用实例	213
本章小结	214
思考与练习题	215



第7章 工业机器人的管理与维护	216
7.1 工业机器人的管理	216
7.1.1 系统安全和工作环境安全管理	216
7.1.2 主机和控制柜的管理	220
7.2 工业机器人的维护和保养	222
7.2.1 控制装置及示教器的检查	222
7.2.2 机器人本体的检查	223
7.2.3 连接电缆的检查	224
7.2.4 日常维护及保养计划	224
本章小结	225
思考与练习题	225
参考文献	226

电子工业出版社版权所有
盗版必究

- (3) 具有不同程度的智能, 如记忆、感知等。
- (4) 具有独立性, 完整的机器人系统中可以不依赖人的干预。

1.2 工业机器人的发展与应用

1.2.1 工业机器人的发展

美国是机器人的诞生地。1962 年, 美国 AMF 公司与 Consolidated Control Corp 联合研制了世界上第一台实用的示教再现工业机器人。经过 50 多年的发展, 世界各国对工业机器人的研究、开发及应用日趋成熟。工业机器人产品比较完善的国家有美国、日本、德国及法国, 特别是美国的机器人技术在国际上一直处于领先地位, 其技术全面、先进, 适应性也很强。

1947 年美国研究和开发了远程遥控机械手, 继而在 1954 年美国申请了工业机器人专利, 1960 年麻省理工学院的明斯基研究机械手和搭载视觉的行走机器人, 到 1965 年美国 AMF 公司和 Unimation 公司分别推出了工业机器人产品, 并且在 1970 年美国成功地召开了首届工业机器人国际学术会议。

日本在 1967 年从美国引进第一台机器人, 1973 年日本成立了工业机器人研究学会。1976 年以后, 随着微电子的快速发展和市场需求急剧增加, 日本当时劳动力严重缺乏, 工业机器人在企业里受到了极大欢迎, 1980 年开始日本国内各类公司积极地引入工业机器人, 使日本工业机器人得到快速发展。1983 年日本通产省主持开发极限作业机器人等大型项目, 同时成立了日本机器人学会。至今, 无论机器人的数量还是机器人的密度, 日本都位居世界第一, 素有“机器人王国”之称。

德国引进机器人的时间虽然比英国和瑞典大约晚了五六年, 但战争所导致的劳动力短缺、国民的技术水平较高等社会环境, 为工业机器人的发展、应用提供了有利条件。此外, 德国规定, 对于一些危险、有毒、有害的岗位, 必须以机器人来代替普通人的劳动, 这为机器人的应用开拓了广泛的市场, 并推动了工业机器人技术的发展。目前, 德国工业机器人的总数位居世界第二位, 仅次于日本。

法国政府一直比较重视机器人技术, 通过大力支持一系列研究计划, 建立了一套完整的科学技术体系, 使法国机器人的发展比较顺利。在政府组织的项目中, 特别注重机器人基础技术方面的研究, 把重点放在开展机器人的基础研究上, 应用和开发方面的工作则由工业界支持开展。两者相辅相成, 使机器人在法国企业界得以迅速发展和普及, 从而使法国在国际工业机器人界拥有不可或缺的一席之地。

英国从 20 世纪 70 年代末开始, 推行并实施了一系列支持机器人发展的政策, 使英国工业机器人起步比当今的机器人大国日本还要早, 并取得了早期的辉煌。然而, 这时候政府对工业机器人实行了限制发展的错误措施, 导致英国的机器人工业一蹶不振, 在西欧几乎处于末位。

近些年, 意大利、瑞典、西班牙、芬兰、丹麦等国家由于国内对机器人的大量需求, 发展也非常迅速。

随着现代科技的迅猛发展, 工业机器人技术已经广泛地应用于各个生产领域。在制造业中诞生的工业机器人是继动力机、计算机之后出现的全面延伸人的体力和智力的新一代生产工具。



工业机器人的应用是一个国家工业自动化水平的重要标志。在国外,工业机器人产品日趋成熟,已经成为了一种标准设备而被工业界广泛地应用,从而相继形成了一批具有影响力的著名的工业机器人公司,而这些公司已经成为它们所在国家和地区的支柱性产业。

目前,国际上的工业机器人公司主要分为日系和欧系。日系中主要有 Yaskawa、OTC、松下、FANUC 等公司的产品,欧系中主要有德国的 KUKA 和 CLOOS、瑞士的 ABB、意大利的 COMAU 及奥地利的 IGM 等公司的产品。图 1-1 展示了几款由不同公司生产的工业机器人产品。

我国工业机器人起步于 20 世纪 70 年代初期,经过 40 多年发展,大致经历了 4 个阶段:70 年代的萌芽期,80 年代的开发期、90 年代的应用期和 21 世纪的发展期。随着 20 世纪 70 年代世界科技快速发展,工业机器人的应用在世界上掀起了一个高潮。在这种背景下,我国于 1972 年开始研制自己的工业机器人,当时主要是局限于理论探讨。进入 20 世纪 80 年代后,随着改革开放的不断深入,在高技术浪潮的冲击下,我国机器人技术的开发与研究得到了政府的重视与支持。真正进行工业机器人的研究、开发及应用是在“七五”计划、“八五”计划、“九五”计划、“十五”计划、“十一五”计划时期。“七五”期间,国家投入资金,对工业机器人及零部件进行攻关,完成了示教再现式工业机器人成套技术的开发,研制出了喷漆、点焊、弧焊和搬运机器人。尤其是 1986 年我国的国家高技术研究发展计划(863 计划)开始实施之后,该计划将工业机器人技术作为一个重要的发展主题,并且投入了大量的资金进行工业机器人研发,取得了一大批科研成果,成功地研制出了一批特种机器人。



(a) YASKAWA 产品



(b) FANUC 产品



(c) KUKA 产品



(d) COMAU 产品

图 1-1 工业机器人

从 20 世纪 90 年代初期起,我国的国民经济进入了实现两个根本转变期,掀起了新一轮的经济体制改革和技术进步热潮。我国的工业机器人在实践中又迈进了一大步,先后研制了点焊、



弧焊、装配、喷漆、切割、搬运和码垛等各种用途的工业机器人，并实施了一批机器人应用工程，形成了一批工业机器人产业化基地，为我国机器人产业的腾飞奠定了基础。但是，与发达国家相比，我国工业机器人还有很大差距。

1.2.2 工业机器人的应用

根据国际机器人联合会（IFR）的数据，2014 年，全球工业机器人销量增长了 29%，共计 229 261 台，达到有史以来的最高水平。在所有行业中，工业机器人的销量都有所增长。汽车零部件供应商和电气/电子行业的增长是造成其增长的主要驱动力。2014 年，中国销量占全球总供应量的 25%，已站稳全球最大工业机器人市场的领先地位。

自 2010 年以来，由于自动化趋势的持续推进以及工业机器人技术的不断创新，全球对工业机器人的需求不断增长。2010—2014 年，工业机器人年均复合增长率为 17%（CAGR）。在此之前，工业机器人安装量的增速从未如此迅速。2005—2008 年，工业机器人年均销售量约为 115 000 台。从 2010 年到 2014 年，数量增长至 171 000 台，增长量约 48%，这是一个明确的信号，表明全世界对工业机器人的需求显著上升。

2014 年中国购买了 57 096 台工业机器人，比 2013 年增加了 56%。根据中国机器人产业联盟（CRIA）数据表明，中国机器人供应商安装了大约 16 000 台机器人。他们的销量比 2013 年高出约 78%，其中一部分是因为越来越多的公司在 2014 年首次公布了它们的销售数据。国外机器人供应商在中国的销量增长 49%，达到 41 100 台。中国已是全球最大的机器人市场，也是全球增长最快的市场，同时也标志着的中国在制造业方面表现出产业转型的特征。

工业机器人的应用领域不断得到拓展，所能够完成的工作日趋复杂。其主要应用行业是汽车和摩托车制造、金属冷加工、金属铸造与锻造、冶金、石化、塑料制品等。工业机器人不仅可以单一完成作业，也可以由多台机器人协同完成复杂的工作任务。工业机器人已经可替代人工完成搬运、码垛、焊接、喷涂、装配、浇铸、打磨、抛光等工作。为此，本节着重介绍制造业中常见的几类工业机器人的应用情况。

1. 搬运机器人

搬运机器人是可以进行自动化搬运作业的工业机器人。搬运作业是指用机械手等设备握持工件，从一个加工位置移到另一个加工位置。如图 1-2 所示的搬运机器人可安装不同的末端执行件（如机械手、吸盘等），以完成各种不同形状和状态的工件搬运工作，它可以大大地减轻人类繁重的体力劳动。目前世界上使用的搬运机器人约几十万台，它们被广泛地应用于机床上下料、冲压机自动化生产线、自动装配流水线、集装箱等自动搬运。许多发达国家已经制定了人工搬运的最大限度，超过限度的搬运必须由搬运机器人来完成。

2. 码垛机器人

码垛机器人是机电一体化高新技术产品，如图 1-3 所示。它可按照要求的编组方式和层数，完成对料袋、胶块、箱体等各种产品的码垛。码垛机器人可全天候作业，大大提高企业的生产效率和产量，减少人工成本，同时可以避免人工搬运造成的错误。码垛机器人已被广泛应用于化工、饮料、食品、啤酒、塑料等生产企业，对纸箱、袋装、灌装等各种形状的包装成品都适用。

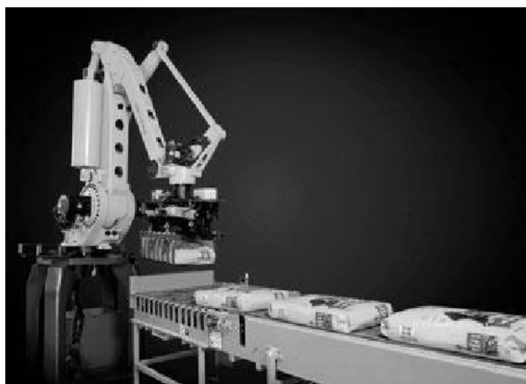


图 1-2 搬运机器人



图 1-3 码垛机器人

3. 焊接机器人

焊接机器人（见图 1-4）是目前应用领域最大的工业机器人，主要在工程机械和汽车、船舶制造领域。焊接机器人能在恶劣的环境下长期连续作业，焊接质量稳定，可以提高工作效率，减轻工人劳动强度。以焊接机器人为核心的白车身焊接生产线正朝着高度自动化，多品种混流生产及大规模定制生产线的方向发展。德国 KUKA 公司为奔驰、大众、宝马、福特等整车企业研制了大型自动化白车身焊接生产线，该生产线上的机器人占有率高达 95% 甚至 98% 以上；意大利 COMAU 公司在多车型混装焊接生产线方面处于领先地位，其研制的主焊接线合装平台可同时生产 4 种以上不同的车型，具有高度柔性化。随着机器人技术的发展，焊接机器人向着智能化的方向发展。



图 1-4 焊接机器人

4. 喷涂机器人

喷涂机器人（见图 1-5）利用了机器人灵活、稳定、高效的特点，适用于生产量大、产品型号多、表面形状不规则的工件外表面，广泛应用于汽车、仪表、电器、建材等行业。

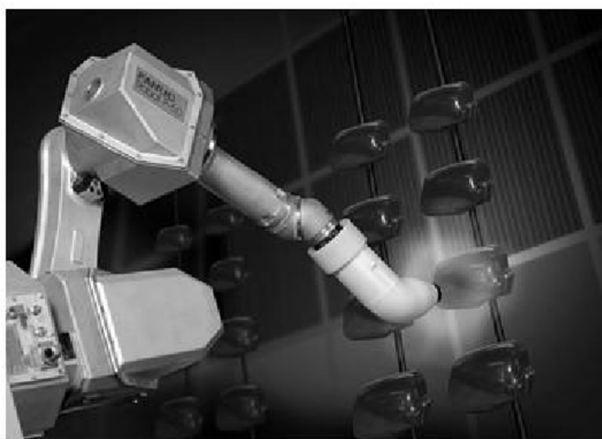


图 1-5 喷涂机器人

5. 装配机器人

为完成装配作业而设计的工业机器人称为装配机器人（见图 1-6）。装配机器人是柔性自动化装配系统的核心设备，它由机械本体、机械手、控制系统、传感系统组成。其中机械本体的结构类型有水平关节型、直角坐标型、多关节型和圆柱坐标型等；控制系统一般采用多 CPU 或多级计算机系统，实现运动控制和运动编程；机械手是为适应不同的装配对象而设计的各种手爪和手腕等；传感系统用来获取装配机器人与环境和装配对象之间相互作用的信息。与一般的工业机器人相比，装配机器人具有精度高、柔顺性好、工作范围小、能与其他系统配套使用等特点，主要用于各种自动化装配线。企业对生产的高智能、高自动化、高效率等需求，决定了未来装配机器人的发展趋势，以期实现并普及多机器人之间的协作达到智能自助移动装配的目的，利用人与机器人协作以实现功能上互补，利用故障预判与应急自处理以实现无人值守作业等。



图 1-6 装配机器人



1.3 工业机器人的基本组成及技术参数

1.3.1 工业机器人的基本组成

工业机器人系统由三大部分六个子系统组成。三大部分是机械部分、传感部分、控制部分，六个子系统是驱动系统、机械结构系统、感受系统、机器人-环境交互系统、人机交互系统、控制系统，如图 1-7 所示。

1. 驱动系统

要使机器人运行起来，需给各个关节即每个运动自由度安置传动装置，这就是驱动系统。驱动系统的作用是提供机器人各部位、各关节动作的原动力。驱动系统可以是液压传动、气动传动、电动传动，或者把它们结合起来应用的综合系统；也可以是直接驱动或者通过同步带、链条、轮系、谐波齿轮等机械传动机构进行间接驱动。

2. 机械结构系统

工业机器人的机械结构系统由机身、手臂、末端操作器三大部分组成，如图 1-8 所示。每一部分都有若干自由度，构成一个多自由度的机械系统。机身部分如同机床的床身结构一样，机器人机身构成机器人的基础支撑。有的机身底部安装有行走机构便构成了行走机器人；有的机身不具备行走及腰转机构，则构成了单机器人臂（Single Robot Arm）。手臂一般由大臂、小臂和手腕组成，完成各种动作。末端操作器是直接装在手腕上的一个重要部件，它可以是二手指或多手指的手爪，也可以是各种作业工具，如焊枪、喷漆枪等。

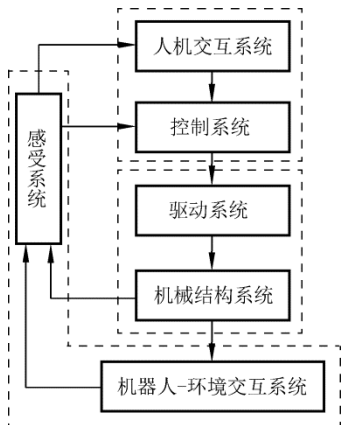


图 1-7 工业机器人的基本组成

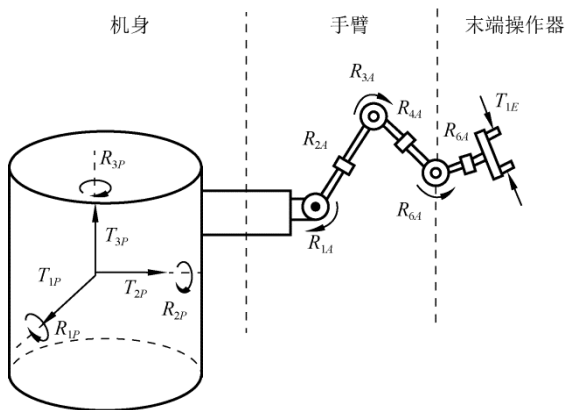


图 1-8 工业机器人机械结构基本组成

3. 感受系统

感受系统由内部传感器模块和外部传感器模块组成，用以获取内部和外部环境状态中有



意义的信息。智能传感器的使用提高了机器人的机动性、适应性和智能化的水准，人类的感受系统对感知外部世界信息是极其灵巧的。然而，对于一些特殊的信息，传感器比人类的感受系统更有效。

4. 机器人-环境交互系统

工业机器人-环境交互系统是实现机器人与外部环境中的设备相互联系和协调的系统。机器人与外部设备集成为一个功能单元，如加工制造单元、焊接单元、装配单元等，也可以是多台机器人、多台机床或设备、多个零件存储装置等集成为一个去执行复杂任务的功能单元。

5. 人机交互系统

人机交互系统是使操作人员参与机器人控制并与机器人进行联系的装置。例如，计算机的标准终端、危险信号报警器等。该系统归纳起来分为两大类：指令给定装置和信息显示装置。

6. 控制系统

控制系统的任务是根据机器人的作业指令程序，以及从传感器反馈回来的信号支配机器人的执行机构去完成规定的运动和功能，分为开环系统和闭环系统。工业机器人若不具备信息反馈特征，则为开环控制系统；若具备信息反馈特征，则为闭环控制系统。根据控制原理可分为程序控制系统、适应性控制系统和人工智能控制系统；根据控制运动的形式可分为点位控制和轨迹控制。

1.3.2 工业机器人的技术参数

技术参数是各工业机器人制造商在产品供货时所提供的技术数据。机器人的技术参数反映了机器人的适用范围和工作性能，是选择、使用机器人必须考虑的问题。尽管各机器人厂商提供的技术参数项目不完全一样，机器人的结构、用途及用户的要求也不尽相同，但工业机器人的主要技术参数一般都应有自由度、工作精度、工作范围、最大工作速度、承载能力等。表 1-1 提供了两种工业机器人的主要技术参数，仅供参考。

表 1-1 两种工业机器人的主要技术参数

FANUC M-10iA	机械结构	6 轴垂直多关节型	最大速度	J1	210°/s
	最大负荷	10kg		J2	190°/s
	工作半径	1420mm		J3	210°/s
	重复精度	±0.08 mm		J4	400°/s
	安装方式	落地式、倒置式		J5	400°/s
	本体质量	130kg		J6	600°/s
动作范围	J1	340°	动作范围	J4	380°
	J2	250°		J5	380°
	J3	445°		J6	720°

续表

YASKAWA MA1400	机械结构	6 轴垂直多关节型	最大速度	S 轴	220°/s
	最大负荷	3kg		L 轴	220°/s
	工作半径	1434mm		U 轴	220°/s
	重复精度	±0.08 mm		R 轴	410°/s
	安装方式	落地式、倒置式		B 轴	410°/s
	本体质量	130kg		T 轴	610°/s
动作范围	S	-170° ~ +170°	动作范围	R 轴	-150° ~+150°
	L	-90° ~ +155°		B 轴	-45° ~+180°
	U	-175° ~ +190°		T 轴	-200° ~+200°

1. 自由度

自由度是指描述物体运动所需要的独立坐标数。机器人的自由度表示机器人动作灵活的尺度，一般以轴的直线移动、摆动或旋转动作的数目来表示，手部（末端执行器）的动作（手指的开、合）及手指关节的自由度不包括在内。机器人的自由度越多，就越能接近人手的动作机能，通用性就越好；但是自由度越多，结构越复杂，对机器人的整体要求就越高，这是机器人设计中的一个矛盾。

在三维空间中描述一个物体的位置和姿态（简称位姿）需要 6 个自由度。但是，工业机器人的自由度是根据其用途而设计的，可能小于 6 个自由度，也可能大于 6 个自由度。工业机器人一般多为 4~6 个自由度，7 个以上的自由度是冗余自由度，是用来避障碍物的。利用冗余自由度可以增加机器人的灵活性、躲避障碍物和改善动力性能。人的手臂（大臂、小臂、手腕）共有 7 个自由度，因此工作起来很灵巧，手部可回避障碍并从不同方向到达同一个目的点。

2. 工作精度

工业机器人的工作精度包括定位精度和重复定位精度。定位精度是指机器人末端参考点实际到达的位置与所需到达的理想目标位置之间的差距。重复定位精度是指机器人重复到达某一目标位置的差异程度，或在相同的位置指令下，机器人连续重复若干次其位置的分散情况。它是衡量一系列误差值的密集程度，即重复度，如图 1-9 所示。目前，工业机器人的重复精度可达 ±0.01~±0.5mm。依据作业任务和末端持重的不同，机器人重复精度也不同。表 1-2 列出了工业机器人典型行业应用的工作精度。

表 1-2 工业机器人典型行业应用的工作精度

作业任务	额定负载/kg	重复定位精度/mm
搬运	5~200	±0.2~±0.5
码垛	50~800	±0.5
点焊	50~350	±0.2~±0.3
弧焊	3~20	±0.08~±0.1
喷涂	5~20	±0.2~±0.5
装配	2~5	±0.02~±0.03
	6~10	±0.06~±0.08
	10~20	±0.06~±0.1

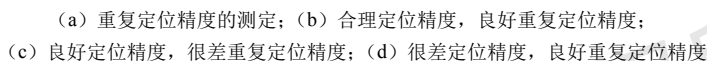
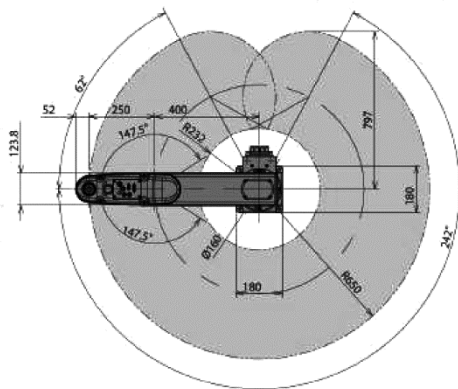


图 1-9 工业机器人定位精度和重复定位精度

工作行程,是指机器人手腕参考点或末端操作器安装点(不包括末端操作器本身)所能到达的空间区域,一般不包括末端操作器本身所能到达的区域。工作范围的形状和大小与末端操作器的形状和尺寸是多种多样的,为了真实反应机械手不安装末端操作器时的工作区域。工作范围的形状和大小可能会因为存在手部不能到达的作业死区(Dead Zone)而有所不同。



(a) 垂直串联多关节机器人

(b) 水平串联多关节机器人

图 1-10 不同本体结构的 YASKAWA 机器人工作范围

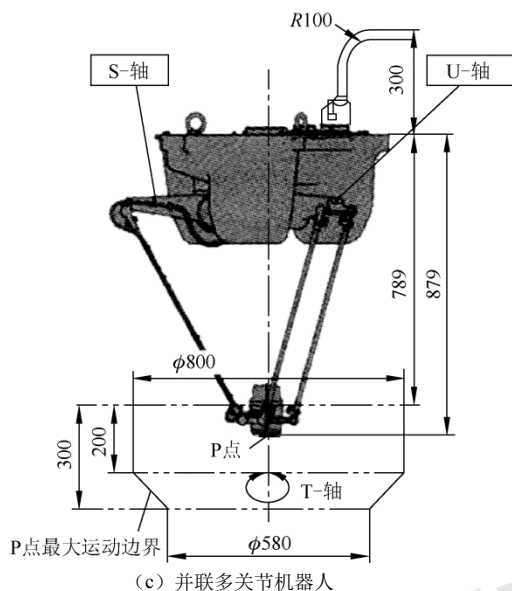


图 1-10 不同本体结构的 YASKAWA 机器人工作范围 (续)

4. 最大工作速度

关于最大工作速度，有的厂家指工业机器人在主要自由度上的最大稳定速度，有的厂家指机器人手臂末端最大的合成速度，通常都在技术参数中加以说明。很明显，工作速度越高，工作效率越高。但是，工作速度越高就要花费更多的时间去升速或降速，或者对工业机器人的最大加速度率或最大减速度率的要求更高。

5. 承载能力

承载能力是指机器人在工作范围内的任何位姿上所能承受的最大质量。承载能力不仅决定于负载的质量，而且还与机器人运行的速度和加速度的大小和方向有关。为了安全起见，承载能力这一技术指标是指高速运行时的承载能力。通常，承载能力不仅指负载，而且还包括机器人末端操作器的质量。

1.4 工业机器人的分类

关于工业机器人分类，国际上没有制定统一的标准，常用的机器人分类方法主要有专业分类法和应用分类法两种

1. 专业分类法

1) 按机器人的技术等级划分

根据机器人目前的技术发展水平，一般可分为示教再现机器人（第一代）、感知机器人（第二代）和智能机器人（第三代）三类。第一代机器人已实用和普及，绝大多数工业机器人都属

于第一代机器人；第二代机器人的技术已部分实用化；第三代机器人尚处于实验和研究阶段。

2) 按机器人的机械结构形态划分

根据机器人现有的机械结构形态，有人将其分为圆柱坐标、球坐标、直角坐标及关节型、并联结构型等，关节型机器人为常用类型。不同形态机器人在外观、机械结构、控制要求、工作空间等方面均有较大的区别。例如，关节型机器人的动作和功能类似人类的手臂，而直角坐标、并联结构型机器人的外形和控制要求与数控机床十分类似。

3) 按机器人的运动控制方式划分

根据机器人的控制方式，一般可分为顺序控制型、轨迹控制型、远程控制型、智能控制型等。顺序控制型又称为点位控制型，这种机器人只需要规定动作次序和移动速度，而不需要考虑移动轨迹；轨迹控制型需要同时控制移动轨迹和移动速度，故可用于焊接、喷漆等连续移动作业；远程控制型可实现无线遥控，它多用于特定行业，如军事机器人、空间机器人、水下机器人等；智能控制型机器人就是前述的第三代机器人，多用于服务、军事等行业，这种机器人目前尚处于实验和研究阶段。

2. 应用分类法

应用分类法是根据机器人应用环境（用途）进行分类的大众分类方法，其定义通俗，易为公众所接受。应用分类的方法同样较多。例如，日本分为工业机器人和智能机器人两类；我国分为工业机器人和特种机器人两类等。然而，由于对机器人的智能性判别尚缺乏科学、严格的标准，加上工业机器人和特种机器人的界线较难划分，因此，在通常情况下，公众较易接受的参照国际机器人联合会（IFR）的分类方法，将机器人分为工业机器人和服务机器人两类。若要进一步细分，则目前常用的机器人基本上可分为图 1-11 所示的几类。



图 1-11 机器人的分类



本章小结

工业机器人产业发展迅速,这就要求许多对工业机器人感兴趣的人应具备一定的基本概念。在本章中,我们讨论了工业机器人的定义、特点、发展、应用、基本组成、主要技术参数及其分类。显然,随着科学技术的不断发展,工业机器人的研究与应用将会越来越广泛。本书的其他部分将讨论工业机器人的组成、运动学与动力学、控制、编程及它们的应用。

思考与练习

- 1-1 简述工业机器人的定义及其特点。
- 1-2 简述工业机器人的主要应用场合及其特点。
- 1-3 简述工业机器人的基本组成。
- 1-4 简述工业机器人的主要技术参数。
- 1-5 工业机器人按坐标形式可以分为几类?查阅资料简述每一类各有什么特点。