



高等职业教育智能制造系列精品教材
校企“双元”合作开发新形态教材

主 编 杨小强 张忠雨 朱亚红
副主编 张 郭 刘成义 王彬彬
主 审 邓文亮

工业机器人技术基础

西北工业大学出版社

西 安

【内容简介】 本书共分为五个单元,主要包括工业机器人的基础知识、工业机器人的机械部分、工业机器人的传感部分和控制部分、工业机器人的编程与操作,以及工业机器人的典型应用。

本书在编写时力求做到“理论够用、内容实用”,突出实践能力和创新素质的培养。为提升读者的机器人操作应用水平,本书还介绍了包括 ABB、广州数控、华中数控等国内外主要机器人厂商典型机器人的机械结构、编程操作、典型应用等,内容系统、层次清晰、实用性强,为后期学习工业机器人实体机的应用编程打下了坚实的基础。

本书可作为各技工院校和职业院校工业机器人相关专业教材,也可作为相关培训机构的培训用书,还可供相关技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人技术基础/杨小强,张忠雨,朱亚红主
编. -- 西安:西北工业大学出版社,2024. 5. -- ISBN
978-7-5612-9321-8
I. TP242. 2
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024L09P85 号

GONGYE JIQIREN JISHU JICHU

工业机器人技术基础

杨小强 张忠雨 朱亚红 主编

责任编辑:张 潼

装帧设计:黄燕美

责任校对:李文乾

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88491757, 88493844

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:三河市龙大印装有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:14

字 数:324 千字

版 次:2024 年 5 月第 1 版 2024 年 5 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5612-9321-8

定 价:48.00 元

如有印装问题请与出版社联系调换

制造业是一个国家经济的立身之本,是财富创造的根本源泉,是国家强盛的重要支柱,是现代化经济体系的坚实基础。我国现已建立完善的智能制造装备产业体系,产业销售额超过4万亿元。到2025年,高档数控机床和机器人行业人才需求还会急剧上升,预计人才缺口将达500万人以上,形势严峻。基于产业对智能制造相关人才的迫切需求,目前,国内各中、高等职业院校已设立智能制造相关的专业,以适应当地产业发展对战略性新兴产业的人才需求。

为适应工业机器人和相关专业建设及人才培养的需要,根据区域职业岗位能力需要,结合学校实训设施设备和职业院校学生特点等情况综合考虑和探讨,校企联合编写体现职业院校教育教学规律的新形态教材是很有必要的。本书由长期从事工业机器人技术及相关专业教学的一线教师和企业工程师合作,依据在机器人及相关专业教学、1+X鉴定、技能竞赛、工程应用等方面的丰富经验编写而成。本书以ABB、广州数控、华中数控(简称“华数”)等国内外主要机器人厂商典型机器人为例,结合华数工业机器人编程与应用1+X和工业机器人操作与调整工等考核实训平台,通过工业机器人的基础知识、工业机器人的机械部分、工业机器人的传感部分和控制部分、工业机器人的编程与操作,以及工业机器人的典型应用五个单元内容,讲述了工业机器人的结构和控制,机器人编程与操作,机器人在生产中的典型应用,理论与实践相结合,每个单元均有典型的实施案例,融入技能竞赛、1+X技能鉴定相应的知识和技能。编写中力求做到“理论先进、内容实用、突出操作、注重应用”,突出实践能力和创新素质的培养。

本书由重庆科创职业学院杨小强、张忠雨、朱亚红担任主编,张郭、刘成义、王彬彬担任副主编,重庆华中数控技术有限公司陈林峰、胡洪兵参与编写,重庆科创职业学院邓文亮副院长主审。单元1、单元2由张忠雨和张郭编写,单元3由朱亚红和王彬彬编写,单元4由杨小强编写,单元5由杨小强和刘成义编写。

本书在编写过程中得到了重庆华中数控技术有限公司、上汽五菱通用汽车有限公司重庆分公司技术人员的大力支持和指导,在此深表感谢。在编写过程中,笔者参考和引用了有关工业机器人技术方面的教材、华数工业机器人的操作说明书等,在此向相关作者表示感谢。

由于笔者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2024年1月

单元 1

1

工业机器人的基础知识	1
1.1 机器人的起源、定义与特性	2
1.2 工业机器人的组成与分类	11
1.3 工业机器人的主要参数	22
1.4 工业机器人的行业发展	28
实训 1 参观工业机器人在自动化生产线中的应用过程	38
实训 2 初识工业机器人的作业示教	41

单元 2

2

工业机器人的机械部分	48
2.1 工业机器人的机械结构系统	50
2.2 工业机器人的驱动系统	73
2.3 工业机器人的传动装置	85
实训 3 认识工业机器人机械本体	100

单元 3

3

工业机器人的传感部分和控制部分	104
3.1 传感器的性能指标	106
3.2 传感器的类型	109
3.3 控制系统的特点	120
3.4 控制系统的结构组成	122
实训 4 辨识工业机器人传感器与控制系统	127

单元 4

4

工业机器人的编程与操作 131

4.1 认识 HSpad 示教器 133

4.2 使用 HSpad 手动操作机器人 144

4.3 HSpad 机器人指令系统 158

实训 5 工业机器人运动轨迹的编程与操作 165

实训 6 工业机器人搬运的编程与操作 170

单元 5

5

工业机器人的典型应用 176

5.1 焊接机器人 177

5.2 喷涂机器人 196

5.3 装配机器人 202

实训 7 焊接机器人的编程与操作 212

参考文献 218



单元 1 工业机器人的基础知识



单元导读

自工业革命以来,人类的体力劳动已逐渐被各种机械所取代,而这种变革为人类社会创造出了巨大的财富,极大地推动了人类社会的进步。在人力成本、原料成本不断上涨的今天,工业机器人作为第三次科技革命的重要切入点,将进一步改变传统工业生产模式,提升工业生产效率。工业机器人是一门多学科交叉的综合学科,涉及机械、电子、运动控制、传感检测和计算机技术等,它不是现有机械和电子技术的简单组合,而是将这些技术有机融合的一体化装置。

目前,工业机器人技术的应用非常广泛,越来越多的行业离不开工业机器人的开发和应用。工业机器人的应用程度已成为衡量一个国家制造业自动化水平的重要标志。



学习目标

知识目标

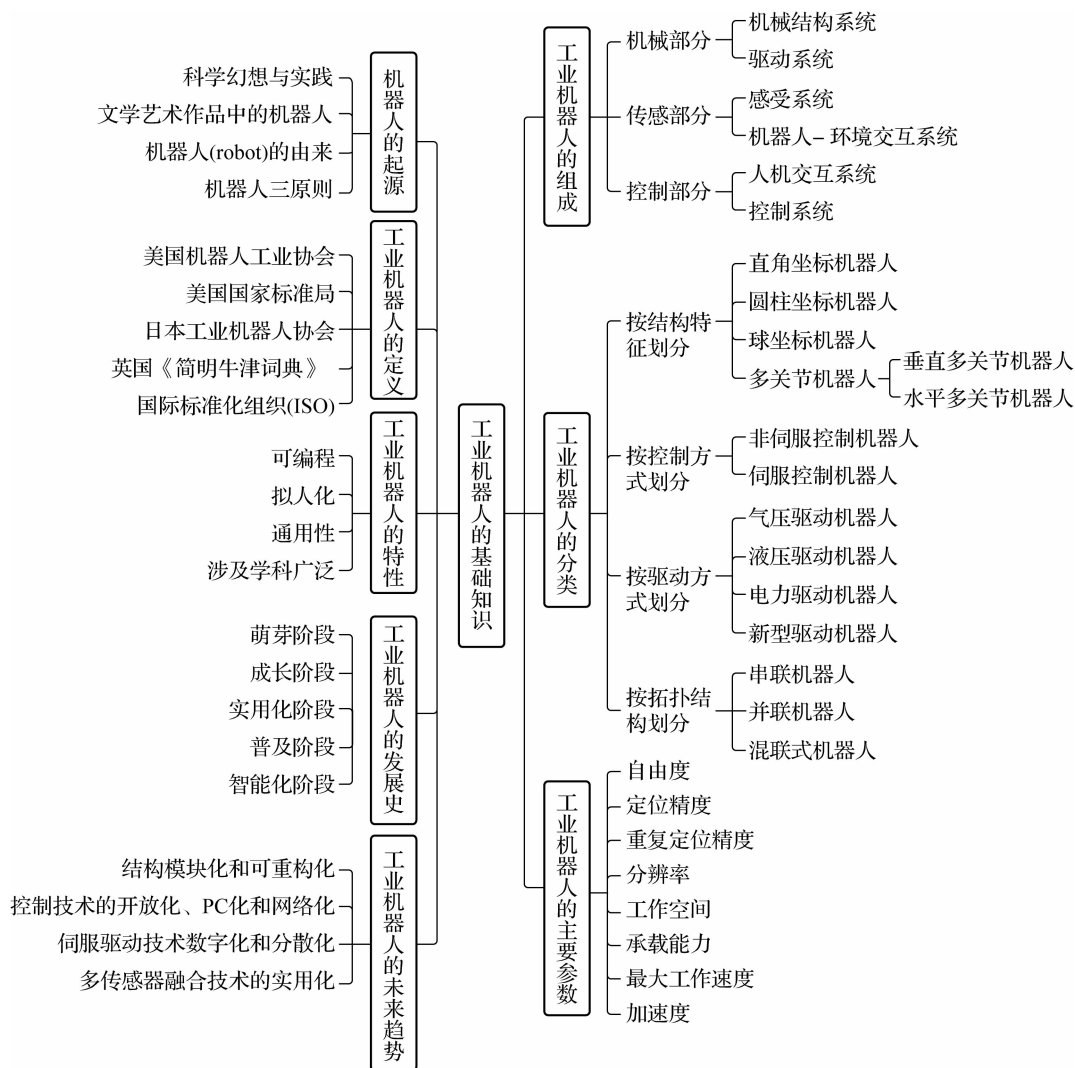
- 熟悉机器人的起源。
- 了解工业机器人的定义、发展史及发展趋势。
- 掌握工业机器人的组成与主要分类。
- 掌握工业机器人的主要参数。

能力目标

- 能大致介绍国内外工业机器人的发展状况。
- 能对工业机器人相关知识形成整体概念。

情感目标

- 树立正确的价值观、学习观,自觉践行行业道德规范。
- 严格遵守实训基地各项规章制度和安全防范制度,树立安全意识。
- 了解国产工业机器人发展与现状,学习制造强国战略,激发民族自信心、自豪感。



1.1 机器人的起源、定义与特性

近年来,随着劳动力成本的不断上涨,工业领域“机器换人”现象普遍,工业机器人市场与产业也因此逐渐发展起来。工业机器人是机器人中的一部分,它们多用于工业生产。机器人的种类还有很多,如军用机器人、娱乐机器人、家庭机器人、竞赛机器人等。那么,机器人这个概念是谁提出来的?世界上第一台机器人又是谁发明的呢?它诞生于哪一年呢?机器人三原则是什么?机器人有哪些特性呢?

1.1.1 机器人的起源

机器人自从1959年问世以来,由于它能够协助人类完成一些单调、频繁和重复的长时间劳动,或取代人类从事危险、恶劣环境下的作业,因此发展较为迅速。随着人们对机器人研究的不断深入,已逐步形成机器人学这一新兴的综合性学科,有人将机器人与数控、可编程控制器(programmable logical controller, PLC)并称为工业自动化的三大支持技术。

1. 科学幻想与实践

机器人技术一词虽出现得较晚,但这一概念在人类的想象中却早已出现,最早出现的关于“人造人”的神话故事,当推公元前3世纪的古希腊神话“阿鲁哥历险船”。它叙述了古代克里特岛国一位著名发明家戴德洛斯为国王铸造了一个巨型青铜人,取名“塔罗斯”。国王赐封塔罗斯为海防保卫官。塔罗斯具有惊人的力气,身上插满连有燃料的管子,能够刀枪不入,也与后世的电影和游戏游戏中的塔罗斯形象基本一致,如图1-1所示。



(a) 古希腊神话中的塔罗斯形象



(b) 电影中的塔罗斯形象



(c) 游戏中的塔罗斯形象

图 1-1 各种塔罗斯形象

制造机器人是人类社会机器人技术研究者的梦想,它体现了人类重塑自身、了解自身的一种强烈愿望。自古以来就有不少科学家和杰出工匠制造出了具有人类特点或是模拟动物特征的机器人雏形。据《列子·汤问》记载,西周时期周穆王在位时,能工巧匠偃师就研制出了伶人,它和人一样能歌善舞,这是我国最早记载的具备机器人概念的文字资料。据《墨经》记载,春秋后期,工匠鲁班在机械方面也有所造诣,他曾制造过一只木鸟,能在空中飞行“三日而不下”。东汉时期的著名科学家张衡发明的计里鼓车以及指南车,都是具有机器人构想

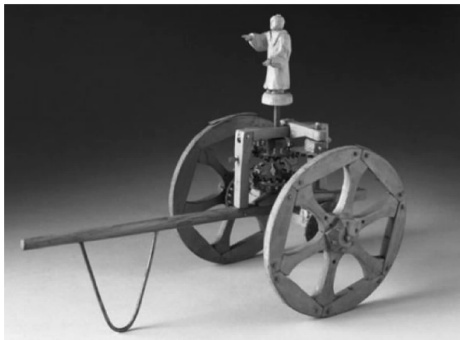
的装置。三国时期,诸葛亮发明了木牛流马,用其在崎岖的栈道上运送军粮,且“人不大劳,牛不饮食”,它在结构和功能上相当于今天运输用的工业机器人。这些可算是世界上最早的机器人雏形,如图 1-2 所示。



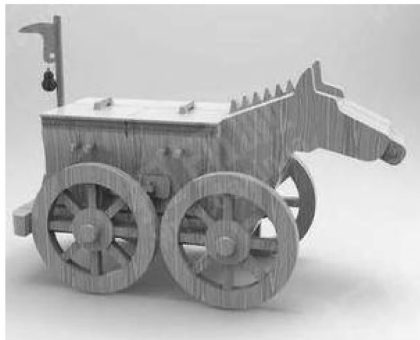
(a) 木鸟



(b) 计里鼓车



(c) 指南车



(d) 木牛流马

图 1-2 中国古代发明

有关机器人的发明,除中国外,在许多其他国家的历史上也曾出现过。两千多年前,古希腊一个名叫海隆的人幻想出各种机器,其中有自动门、圣水自动销售机、自动风琴等,这些幻想中的机器和现在使用的这类机器的结构非常相似。11 世纪中东重要的发明家阿勒·加扎利创造了古代最复杂的、最令人称奇的计时器——时钟城堡,如图 1-3 所示。



图 1-3 时钟城堡

欧洲文艺复兴时期的天才达·芬奇在手稿中绘制了西方文明世界的第一款人形机器人。此外,达·芬奇将一只自动行走的人造狮子作为礼物献给了法国国王,如图 1-4 所示。



图 1-4 人造狮子

1662 年,日本的竹田近江利用钟表技术发明了自动偶人,并在大阪道顿堀演出,如图 1-5 所示。18 世纪末,人们通过改进,制造出了端茶玩偶。它是木质的,发条和弹簧是用鲸鱼须制成的,它双手捧着茶盘,如果把茶杯放在茶盘上,它便会向前行走,把茶端给客人;客人取茶杯时,它会自动停止行走,客人喝完茶把茶杯放回茶盘上时,它就又转回原来的地方。



图 1-5 自动偶人

1738 年,法国天才技师杰克·戴·瓦克逊发明了一只机器鸭,它会嘎嘎叫,会游泳和喝水,还会进食和排泄。瓦克逊的本意是把生物的功能机械化,以进行医学上的分析。1768—

1774 年,瑞士钟表匠德罗斯父子三人合作制作出真人大小的机器人:写字偶人、绘图偶人和弹风琴偶人,它们是靠弹簧驱动、由凸轮控制的自动机器,至今还作为国宝保存在瑞士纳切尔市艺术和历史博物馆内,如图 1-6 所示。



图 1-6 写字偶人

2. 文学艺术作品中的机器人

机器人的想法一出现,便引起了科幻小说家的广泛关注,机器人成为很多科幻小说与电影的主人公,如图 1-7 所示。1831 年歌德发表了《浮士德》,塑造了人造人“荷蒙克鲁斯”。以自动玩偶为主角的芭蕾舞剧作品《葛蓓莉娅》改编自 1870 年霍夫曼出版的《睡魔》。1886 年法国作家利里亚当的小说《未来的夏娃》问世。



图 1-7 文学艺术作品中的机器人

3. 机器人(robot)的由来

机器人的英文是“robot”,它源于捷克著名剧作家卡雷尔·恰佩克(见图 1-8) 1921 年创作的剧本 *Rossums Universal Robot* (《罗素姆万能机器人》)。剧情为罗萨姆公司把机器人作为人类生产的工业产品推向市场,让它们去充当劳动力,以呆板的方式从事繁重的劳动。后来,机器人有了感情,在工厂工作和家务劳动中成了必不可少的成员。在捷克有“robota”这个词,意思为奴隶,恰佩克把“robota”写成了“robot”,从而创造了机器人这个词,意思是“用人的手制造的工人”,或是“代替人工作的机器”。



视频

工业机器人的
工作原理



图 1-8 卡雷尔·恰佩克

4. 机器人三原则

科幻小说家的想象力是无限的。机器人的出现可能引发人类灾难吗？1942 年，美国的科幻小说家加斯卡·阿西莫夫(图 1-9)在《我是机器人》的第 4 个短篇小说《转圈圈》中，首次提出了著名的“机器人三原则”，它被称为“现代机器人学的基石”，这也是“机器人学”这个名词在人类历史上的首度亮相。



图 1-9 加斯卡·阿西莫夫

这著名的“机器人三原则”，即：

第一条：机器人不能危害人类，不能眼看人类受害而袖手旁观。

第二条：机器人必须服从于人类，除非这种服从有害于人类。

第三条：机器人应该能够保护自身不受伤害，除非为了保护人类或者人类命令它做出牺牲。

这三条原则给机器人赋以伦理观。至今，机器人研究者都以这三条原则作为开发机器人的准则。

补充条款：

第四条：不论何种情形，人类为地球所居住的会说话、会行走、会摆动四肢的类人体。

第五条：仅接受合理合法的指令。不接受伤害人类及各类破坏人类体系的命令，如杀

人、放火、抢劫、组建机器人部队等。

第六条:不接受罪犯(不论是机器人罪犯还是人类罪犯)指令。罪犯企图使机器人强行接受指令时,机器人可以执行自卫或协助警方逮捕。

归纳小结

机器人的起源	科学幻想与实践	文学艺术作品	由来	三原则

1.1.2 工业机器人的定义

随着机器人技术的快速发展,在发达国家,机器人及其零部件的生产已形成产业。但目前世界上对机器人还没有统一的定义。不同国家、不同研究领域给出的定义不尽相同。原因之一是机器人技术还在发展,许多新的机型、新的功能不断涌现。根本原因是机器人涉及人的概念,成为一个难以回答的哲学问题。就像机器人一词最早诞生于科幻小说之中一样,人们对机器人充满了幻想。也许正是由于机器人模糊的定义,才给了人们充分的想象和创造的空间。

为此,世界各国相继成立了相应的行业协会,以宣传、引导和规范机器人产业的发展。目前,国际上主要有以下几种对机器人的定义。

美国机器人工业协会的定义:机器人是“一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置的,通过可编程的动作来执行种种任务的具有编程能力的多功能机械手”。这个定义叙述具体,更适用于对工业机器人的定义。

美国国家标准局的定义:机器人是“一种能够进行编程并在自动控制下执行某些操作和移动作业任务的机械装置”。这也是一种比较广义的对工业机器人的定义。

日本工业机器人协会将机器人的定义分成两类:工业机器人是“一种能够执行与人体上肢(手和臂)类似动作的多功能机器”;智能机器人是“一种具有感觉和识别能力,并能控制自身行为的机器”。

英国《简明牛津词典》的定义:机器人是“貌似人的自动机,具有智力,顺从于人但不具有人格的机器”。这是一种对理想机器人的描述。到目前为止,尚无与人类在智能上相似的机器人。

国际标准化组织(ISO)的定义比较全面和准确,涵盖以下内容:①机器人的动作机构具有类似于人或其他生物体某些器官(肢体、感官等)的功能;②机器人具有通用性,工作种类



视频
工业机器人
概念

多样,动作程序灵活易变;③机器人具有不同程度的智能性,如记忆、感知、推理、决策、学习;④机器人具有独立性,完整的机器人系统在工作中可以不依赖于人。

美国机器人工业协会提出的工业机器人定义为:“工业机器人是用来搬运材料、零件、工具等的,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。”

国际标准化组织曾于 1987 年对工业机器人给出了定义:“工业机器人是一种具有自动控制操作和移动功能的,能够完成各种作业的可编程操作机。”

ISO 8373 是关于工业机器人术语和定义的标准,对工业机器人给出了更具体的解释:“机器人具备自动控制及可再编程、多用途功能。机器人操作机具有三个或三个以上的可编程程轴。在工业自动化应用中,机器人的底座可固定也可移动。”

以上对机器人的定义,都是在特定时间、特定环境下所得出的结论,且偏重于工业机器人。但科学技术对未来是无限开放的,最新研发的现代智能机器人无论在外观、功能,还是智能化程度方面,都已远远超过了传统的工业机器人技艺范畴。机器人正在源源不断地向人类活动的各个领域渗透,它所涵盖的内容越来越丰富,其应用领域和发展空间正在不断延伸和扩大,这是机器人与其他自动化设备的重要区别。

归纳小结

工业机器人的定义	美国机器人工业协会	

1.1.3 工业机器人的特性

1967 年在日本召开的第一届机器人学术会议上,森政弘与合田周平提出:“机器人是一种具有移动性、个体性、智能性、通用性、半机械半人性、自动性、奴隶性等 7 个特征的柔性机器”。后来,森政弘又提出了用自动性、智能性、个体性、半机械半人性、作业性、通用性、信息性、柔性、有限性、移动性等 10 个特性来表示机器人的形象。

工业机器人最显著的特性有以下几点。

1. 可编程

生产自动化的进一步发展是柔性自动化。在工业机器人上可随其工作环境变化的需要而再编程。因此,它在小批量、多品种、均衡、高效的柔性制造过程中能发挥很好的作用,是柔性制造系统中的一个重要组成部分。

2. 拟人化

工业机器人在机械结构上有类似人的行走、腰转、大臂、小臂、手腕、手爪



视频
工业机器人的特点

等部分,由计算机控制。此外,智能化工业机器人还有许多类似人类的“生物传感器”,如皮肤型接触传感器、力传感器、负载传感器、视觉传感器、声觉传感器等。传感器提高了工业机器人对周围环境的自适应能力。

3. 通用性

除了专门设计的专用工业机器人以外,一般工业机器人在执行不同的作业任务时具有较好的通用性。例如,更换工业机器人末端执行器(手爪、工具等)便可执行不同的作业任务。

4. 涉及学科广泛

归纳起来,工业机器人技术是机械学和微电子学的结合——机电一体化技术。第三代智能机器人不仅具有获取外部环境信息的各种传感器,而且具有记忆能力、语言理解能力、图像识别能力、推理判断能力等人工智能,这些都是微电子技术的应用,特别是与计算机技术的应用密切相关。因此,机器人技术的发展必将带动其他技术的发展,机器人技术的发展和应用水平也可以验证一个国家科学技术和工业的发展水平。

总之,随着机器人的制造工艺和机器人智能的不断发展,机器人的定义与工业机器人的定义将会进一步完整,进一步明确和统一。

归纳小结

工业机器人的特性	

课后小记

1.2 工业机器人的组成与分类

1.2.1 工业机器人的组成

一台通用的工业机器人实际并不仅仅是指机器人本身,还包括控制柜、示教器、网络服务器以及相关的外围设备,如图 1-10 所示。

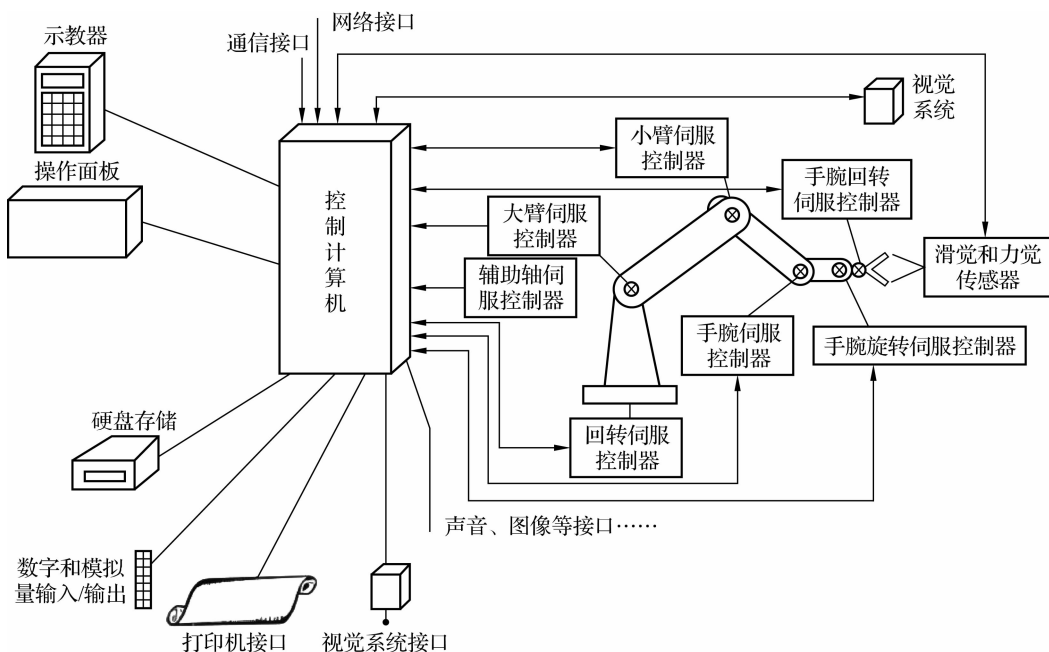


图 1-10 工业机器人系统的结构

根据系统结构特点,工业机器人系统由三大部分 6 个子系统组成,每个部分包括 2 个系统,具体如下。

1. 机械部分

机械部分用于实现各种动作,包括机械结构系统和驱动系统。

(1) 机械结构系统

工业机器人的机械结构又称为执行机构或操作机,是机器人赖以完成工作任务实体,通常由杆件和关节组成。从功能角度,工业机器人的机械结构系统可分为手部、腕部、臂部、机身(腰部)、基座等,如图 1-11 所示。



视频

工业机器人的组成

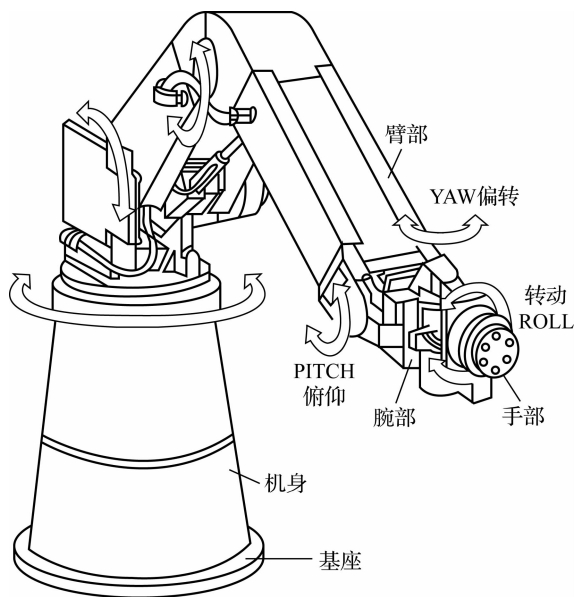


图 1-11 工业机器人的机械结构系统

(2) 驱动系统

工业机器人的驱动系统包括驱动器和传动机构两部分。它们通常与执行机构连成机器人本体。

1) 驱动器通常有电力驱动、液压驱动、气压驱动几类。

2) 传动机构通常有连杆机构、滚珠丝杠、链、带、各种齿轮系、谐波减速器、旋转矢量(rotary vector, RV)减速器等。

2. 传感部分

传感部分用于感知内部和外部的信息,包括感受系统和机器人-环境交互系统。

(1) 感受系统

感受系统包括内部检测系统与外部检测系统两部分。内部检测系统的作用是通过各种检测器,检测执行机构的运动情况,根据需要反馈给控制系统,与设定值进行比较后,对执行机构进行调整,以保证其动作符合设计要求。外部检测系统检测机器人所处环境、外部物体状态或机器人与外部物体的关系。

(2) 机器人-环境交互系统

机器人-环境交互系统是实现工业机器人与外部环境中的设备相互联系和协调的系统。工业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。当然,也可以是将多台机器人、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。

3. 控制部分

控制部分主要控制机器人完成各种动作,包括人机交互系统和控制系统。

(1) 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,如计算机的标准终端、指令控制台、信息显示板、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。

(2) 控制系统

控制系统通过对工业机器人驱动系统的控制,使执行机构按照规定的要求进行工作。工业机器人的控制系统一般由控制计算机和伺服控制器组成。控制计算机不仅要发出指令,协调各关节驱动之间的运动,同时要完成编程、示教/再现,在其他环境状态(传感器信息)、工艺要求、外部相关设备(如电焊机)之间传递信息和协调工作。伺服控制器控制各个关节的驱动器,使各杆按一定的速度、加速度和位置要求进行运动。

工业机器人各组成部分之间的关系如图 1-12 所示。

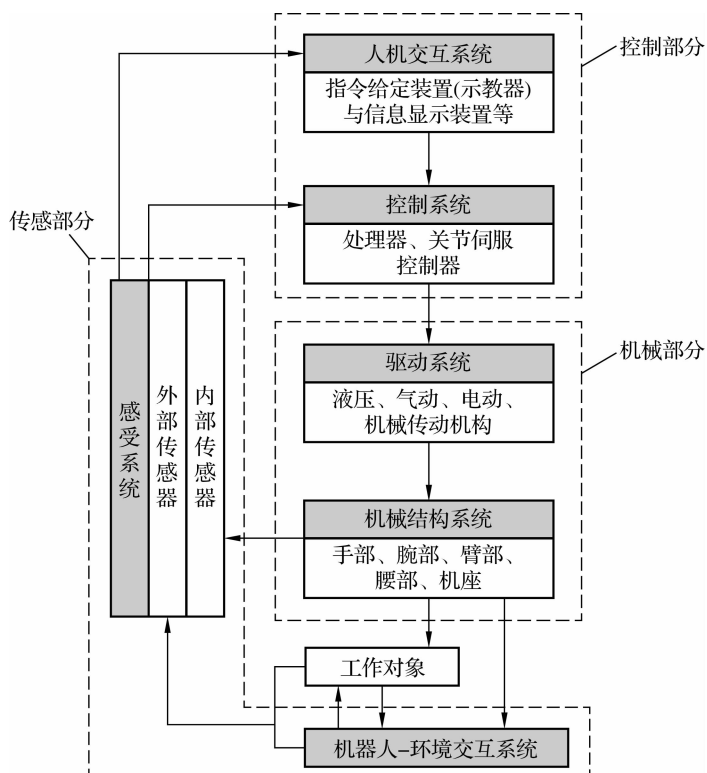


图 1-12 机器人各组成部分之间的关系



工业机器人的组成	三大部分	6 个子系统	备注

1.2.2 工业机器人的分类

工业机器人的种类很多,其功能、特征、驱动方式、应用场合等不尽相同。关于工业机器人的分类,国际上没有制定统一的划分标准,有的按负载重量划分,有的按控制方式划分,有的按自由度划分,有的按结构特征划分,有的按应用领域划分。例如,机器人首先在制造业大规模应用,所以机器人曾被简单地分为两类,即用于汽车、IT、机床等制造业的机器人,称为工业机器人,其他的机器人称为特种机器人。随着机器人应用的日益广泛,这种分类显得过于粗糙。现在除工业领域之外,机器人技术已经广泛地应用于农业、建筑、医疗、服务、娱乐,以及空间和水下探索等多个领域。依据具体应用领域的不同,工业机器人又可分为物流、码垛、服务等搬运型机器人和焊接、车铣、修磨、注塑等加工型机器人等。可见,机器人的分类方法和标准很多,本单元将介绍以下几种常见的工业机器人分类法。



视频
机器人的分类

1. 按结构特征划分

机器人的结构形式多种多样,其典型运动特征是通过坐标特性来描述的。按结构特征划分,工业机器人通常可以分为直角坐标机器人、圆柱坐标机器人、球坐标机器人(又称极坐标机器人)、多关节机器人等,如图 1-13 所示。

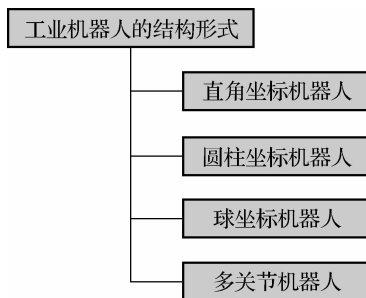


图 1-13 工业机器人结构形式

(1) 直角坐标机器人

直角坐标机器人(3P)是一种最简单的结构,是指在工业应用中,能够实现自动控制、可

重复编程、在空间上具有相互垂直关系的三个独立自由度的多用途机器人,其结构如图 1-14 所示。其手臂按直角坐标形式配置,即通过三个相互垂直轴线上的移动来改变手部的空间位置。从图 1-14 中可以看出,机器人在空间坐标系中有三个相互垂直的移动关节 x 、 y 、 z ,每个关节都可以在独立的方向移动。

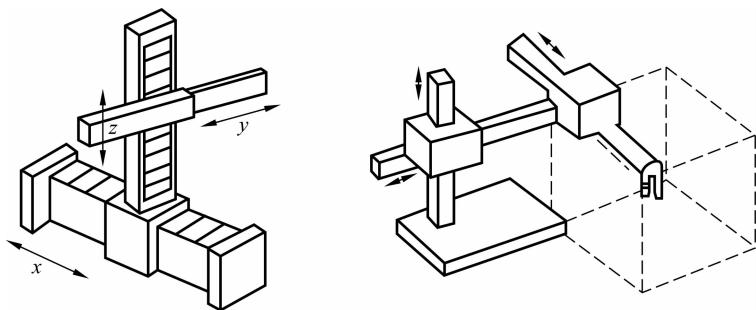


图 1-14 直角坐标机器人及其运动空间

直角坐标机器人又称为笛卡儿坐标型机器人,主要有悬臂式和龙门式两种。悬臂式直角坐标机器人如图 1-15 所示。其机械手构件受到约束,在平行于直角坐标轴 x 、 y 、 z 的方向上移动,臂连到主干,而主干又与基座相连接。

龙门式直角坐标机器人也称为桁架机器人,如图 1-16 所示。它一般在需要精确移动以及负载较大的时候使用,这类机器人的整个基座安装在一个允许在一个平面内运动的物体上(如 x - y 平台或导轨)。

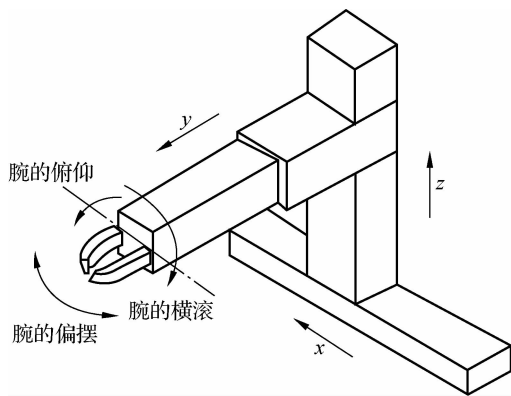


图 1-15 悬臂式直角坐标机器人



图 1-16 龙门式直角坐标机器人

直角坐标机器人的优点:在直角坐标空间内,空间轨迹易于求解,很容易通过计算机实现控制。因为各轴线位移分辨率在操作范围内任一点上均为恒定,容易达到高定位精度。因此,简易和专用的工业机器人常采用这种结构形式。它的缺点:本体占空间体积大,工作空间小,操作灵活性差。

目前,直角坐标机器人可以非常方便地用于各种自动化生产线中,完成焊接、搬运、上下

料、包装、码垛、检测、探伤、分类、装配、贴标、喷码、打码、喷涂、目标跟随以及排爆等一系列工作。

(2) 圆柱坐标机器人

圆柱坐标机器人(R2P)是指能够形成圆柱坐标系的机器人,其手臂按圆柱坐标形式配置,即通过两个移动和一个转动来实现手部空间位置的改变。此类机器人在基座水平转台上装有立柱,立柱上安装了水平臂或杆架,水平臂可沿立柱做上下运动,并可在水平方向伸缩,如图 1-17 所示。

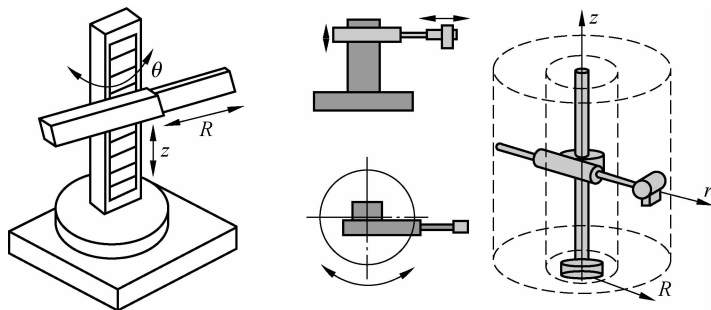


图 1-17 圆柱坐标机器人及其运动空间

一般旋转不允许旋转 360° ,因为液压、电气或气动联结机构或连线对机构存在约束。此外,根据机械上的要求,其伸出长度有一最小值和最大值。所以,此机器人总的体积或工作包络范围是图 1-17 中圆柱体的一部分。

圆柱坐标机器人具有空间结构小、工作范围大、末端执行器速度快、控制简单、运动灵活等优点。其缺点是工作时必须有沿 r 轴线前后方向的移动空间,空间利用率低。

目前,圆柱坐标机器人主要用于重物的装卸、搬运等工作。著名的 Versatran 机器人就是一种典型的圆柱坐标机器人。

(3) 球坐标机器人

球坐标机器人(2RP)的手臂按球坐标形式配置,其手臂的运动由一个直线运动和两个转动所组成。手臂不仅可绕垂直轴旋转,还可绕水平轴做俯仰运动,且能沿手臂做伸缩运动,如图 1-18 所示。这种机器人所有运动轨迹形成的表面是半球面,所以称为球坐标机器人。

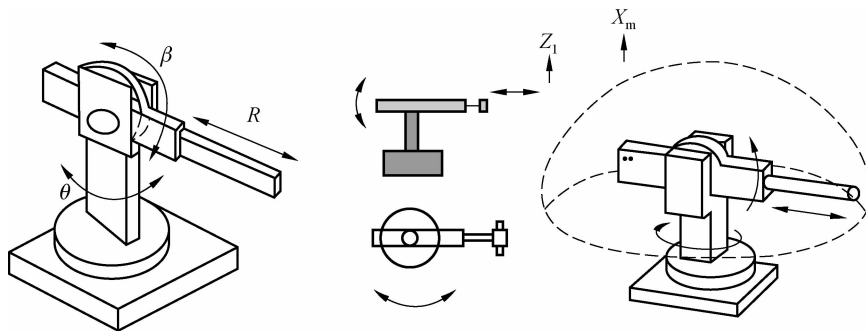


图 1-18 球坐标机器人运动示意图及其运动空间

球坐标机器人同样占用空间小,操作灵活且范围大,但运动学模型较为复杂,难以控制。

(4) 多关节机器人

多关节机器人也称关节手臂机器人或关节机械手臂,是当今工业领域中应用最为广泛的一种机器人。多关节机器人一般由多个转动关节串联起若干连杆组成,其运动由前后的俯仰及立柱的回转构成,根据关节构造的不同形式,又可分为垂直多关节机器人和水平多关节机器人。

垂直多关节机器人主要由基座和多关节臂组成,目前常见的关节臂数是3~6个。某品牌6关节臂机器人的结构如图1-19所示。由图可知,这类机器人由多个旋转和摆动关节组成。其结构紧凑,工作空间大,动作接近人类,工作时能绕过基座周围的一些障碍物,对焊接、喷涂、装配等多种作业都有良好的适应性,适合电动机驱动,关节密封性好,且防尘。目前,瑞士ABB、德国库卡(KUKA)、日本安川电机(YASKAWA)以及国内的一些公司都在研发这类产品。

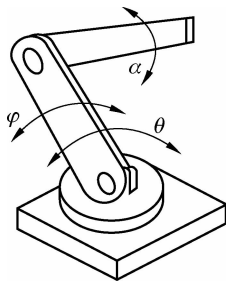


图 1-19 垂直多关节机器人

水平多关节机器人也称为 SCARA(selective compliance assembly robot arm)机器人,结构如图1-20所示。这类机器人一般具有4个轴和4个运动自由度,它的第1、2、3轴都具有转动特性,而第4轴则具有线性移动的特性。此外,第3轴和第4轴还可以根据工作要求,形成多种不同的形态。



图 1-20 水平多关节机器人

水平多关节机器人的特点在于作业空间与占地面积比很大,使用起来较为方便;在垂直升降方向的刚性好,尤其适合平面装配作业。

目前,水平多关节机器人广泛应用于电子产品工业、汽车工业、塑料工业、药品工业和食品工业等领域,用以完成搬取、装配、喷涂和焊接等操作。

2. 按控制方式划分

工业机器人根据控制方式的不同,可以分为伺服控制机器人和非伺服控制机器人两种。机器人运动控制系统常见的方式就是伺服系统。伺服系统是指精确地跟随或复现某个过程的反馈控制系统。在很多情况下,机器人伺服系统的作用是驱动机器人的机械手准确地跟随系统输出的位移指令,达到位置的精确控制和轨迹的准确跟踪。

(1) 非伺服控制机器人

从控制的角度来看,非伺服控制是最简单的形式。这类机器人又被称为端点机器人或开关式机器人。不考虑机械结构或用途如何,机器人的主要特点是:轴保持运动,直至走完各自的行程范围为止。每个轴只设定两个位置,即起始位置与终止位置。轴开始运动后,只有当碰到适当的定位挡块才停止运动,运动过程中没有监测。因此,这类机器人处于开环控制状态。

在较小型的机器人中常使用非伺服控制,其特点如下:

- 1) 臂的尺寸小且轴的驱动器施加的是满动力,速度相对较大。
- 2) 价格低廉,易于操作和维修,同时也是极为可靠的设备。

(2) 伺服控制机器人

伺服控制机器人分为连续控制类和定位(点到点)控制类。无论哪一类,都要对位置和速度的信息进行连续监测,并反馈到与机器人各关节有关的控制系统中。因此,各轴都是闭环控制。闭环控制的应用,使机器人的构件能按照指令,在各轴行程范围内的任何位置移动。

与非伺服控制机器人相比,伺服控制机器人具有以下特点:

- 1) 有较大的记忆存储容量。
- 2) 机械手端部可按三个不同类型的运动方式移动:点到点、直线、连续轨迹。
- 3) 在机械允许的极限范围内,位置精度可通过调节伺服回路中相应放大器的增益加以变动。
- 4) 编程工作一般以示教模式完成。
- 5) 机器人几个轴之间的协同运动,使机械手的端部描绘出一条极为复杂的轨迹,一般在小型或微型计算机控制下自动进行。
- 6) 价格高,可靠性稍差。

3. 按驱动方式划分

根据能量转换方式的不同,工业机器人驱动类型可以划分为气压驱动、液压驱动、电力驱动和新型驱动四种类型。

(1) 气压驱动机器人

气压驱动机器人是以压缩空气来驱动执行机构。这种驱动方式的优点是:空气来源方便,动作迅速,结构简单。其缺点是:工作的稳定性与定位精度不高,抓力较小,所以常用于

负载较小的场合。

(2) 液压驱动机器人

液压驱动机器人是使用液体油来驱动执行机构。与气压驱动机器人相比,液压驱动机器人具有大得多的负载能力,其结构紧凑,传动平稳,但液体容易泄漏,不宜在高温或低温场合作业。

(3) 电力驱动机器人

电力驱动机器人是利用电动机产生的力矩驱动执行机构。电力驱动易于控制,运动精度高,成本低,目前越来越多的机器人采用电力驱动的方式。

(4) 新型驱动机器人

随着机器人技术的发展,出现了利用新的工作原理制造的新型驱动器,如静电驱动器、压电驱动器、形状记忆合金驱动器、人工肌肉驱动器及光驱动器等。

4. 按拓扑结构划分

机械结构是机器人赖以完成工作任务的实体,相当于人的肢体。根据工业机器人机械结构对应的运动链的拓扑结构,可以将机器人结构分为三类:串联、并联和混联式结构。

(1) 串联机器人

当各连杆组成开式机构链时,所获得的机器人结构称为串联结构,包含以底座为开始,以末端执行器为结束的一系列连杆和关节。它的连杆和关节常常被设计成可以提供独立平移和指定方向的结构。当前工业机器人大多数采用串联结构。因此,如果机器人由单一的一系列连杆和关节组成,就定义为串联机器人,如图 1-21 所示。



图 1-21 串联机器人

串联机器人的自由度较并联机器人要大。要使串联机器人成为运动的机构,就需要更多的驱动器。一般来说,串联机器人每个连杆上都要安装驱动器,通过减速器来驱动下一个连杆。后续连杆的驱动器和减速器变成前面驱动系统的负载。因此,前端连杆强度和驱动功率要大,这决定了这种结构的能量效率不高。但其末端构件的运动与并联机器人中任何构

件的运动相比,更为任意和复杂多样,有时可绕过障碍到达一定的位置。采用计算机控制系统,串联机器人可实现复杂的空间作业运动。串联机器人具有结构简单、成本低、控制简单、运动空间大等优点,有一些已经具备快速、高精度、多功能化等特点。

经过几十年的发展,串联机器人技术已经较为成熟。工业领域中,串联机器人的数量最多,应用范围也最广,如喷漆、装配、搬运、焊接。此外,应用串联机器人的还有海洋开发、太空探测、精密仪器研发等新领域。

(2) 并联机器人

当末端执行器通过至少两个独立运动链和基座相连,且组成一闭式机构链时,所获得的机器人称为并联机器人,如图 1-22 所示。



图 1-22 并联机器人

并联机器人,因其形似八脚蜘蛛又被称为蜘蛛手机器人,是近些年来发展起来的。它是一种由固定基座和若干自由度的末端执行器以及不少于两条独立运动链连接形成的新型机器人,具有以下特点:

- 1) 无累积误差,精度较高。
- 2) 驱动装置可置于定平台上或接近定平台的位置,运动部分质量小,速度快,动态响应好。
- 3) 结构紧凑,刚度高,承载能力大。
- 4) 完全对称的并联结构具有较好的各向同性。
- 5) 工作空间较小。

并联机器人广泛应用于装配、搬运、上下料、分拣、打磨、雕刻等需要高刚度、高精度或者大负载而无须很大工作空间的场合。

(3) 混联式机器人

将串联和并联有机结合起来的机构,即为混联式机构。混联机器人在结构上常有 3 种形式:

- 1) 并联机构通过其他机构串联而成。此类混联机器人基于串联机构的某个关节或杆件以并联机构替换。
- 2) 并联机构直接串联在一起。这类混联机器人是将多个并联机构以串联机器人的设计思路进行结构设计,例如,将具有多个自由度的相同或不同自由度的并联机构通过转动副

或移动副等其他运动副的形式串联在一起。此类机器人往往用于构造柔性机器人。

3) 在并联机构的支链中采用不同的结构。这类混联机器人是对并联机构的支链进行变形,尤其是替换或嵌入其他的并联机构,例如,将具有多个自由度的相同或不同自由度的并联机构作为并联机器人的某一个或多个支链。

归纳小结

工业机器人的分类	按结构特征划分	按控制方式划分	按驱动方式划分	按拓扑结构划分

课后小记

This image shows a single page of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page, leaving small margins at the top and bottom. There are no vertical margin lines, text, or other markings on the page.

1.3 工业机器人的主要参数

机器人的技术指标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。现在已经出现的工业机器人,尽管各机器人厂商所提供的技术指标不完全一样,在功能和外观上有所不同,机器人的结构、用途以及用户的要求也不尽相同,但是所有的机器人都有适用的作业范围和要求。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	最大工作速度	J1	210 °/s
	承载能力	10 kg		J2	190 °/s
	工作空间	1 420 mm(半径)		J3	210 °/s
	重复定位精度	±0.08 mm		J4	400 °/s
	安装方式	落地式、倒置式		J5	400 °/s
	本体质量	130 kg		J6	600 °/s
动作范围	J1	340°	动作范围	J4	380 °/s
	J2	250°		J5	380 °/s
	J3	445°		J6	720 °/s
YASKAWA MA1400	机械结构	6 轴垂直多关节型	最大工作速度	S 轴	220 °/s
	承载能力	3 kg		L 轴	220 °/s
	工作空间	1 434 mm(半径)		U 轴	220 °/s
	重复定位精度	±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	130 kg		T 轴	610 °/s
动作范围	J1	-170°~ +170°	动作范围	R 轴	-150°~ +150°
	J2	-90°~ +155°		B 轴	-45°~ +180°
	J3	-175°~ +190°		T 轴	-200°~ +200°

目前,工业机器人的主要技术参数有以下几种:自由度、定位精度和重复定位精度、分辨率、工作空间、承载能力、最大工作速度和加速度等。

1.3.1 自由度

自由度(degree of freedom, DoF),又称为坐标轴数(轴数),是指描述物体运动所需要的独立坐标数。手指的开、合,以及手指关节的自由度一般不包括在内。

一般机器人的作业任务决定其自由度数。比如,若要把一个球放到空间某个给定位置,

有 3 个自由度就足够了,若要对某旋转钻头进行定位与定向,则需要 5 个自由度。当人们期望机器人能够以准确的方位把它的端部执行装置或与它连接的工具移动到给定点时,如果机器人的用途预先不明确,那么它应当具有 6 个自由度。因为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,如图 1-23 所示。

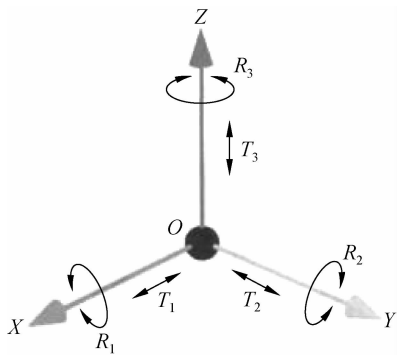


图 1-23 三维空间的 6 个自由度

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。从运动学的观点看,在完成某一特定作业时具有多余自由度的机器人,就叫作冗余自由度机器人,也可简称冗余度机器人。冗余的自由度可以增强机器人的灵活性,躲避障碍物,改善动力性能。

可见,自由度直接影响到机器人的机动性。自由度越高,机器人的灵活性也相应增强,功能也会相应增加。它是衡量机器人适应性和灵活性的重要指标。但是自由度越高,控制越复杂,而且随着关节的增加,调试的复杂程度也会相应增加,系统潜在的机械共振点也不成比例地增加。

1.3.2 定位精度和重复定位精度

定位精度和重复定位精度是机器人的两个精度指标。

定位精度(positioning accuracy)是指机器人到达指定点的精确程度,即机器人末端参考点实际到达的位置与所需要到达的理想位置之间的偏差,如图 1-24 所示,由机械误差、控制算法与系统分辨率等部分组成。差距越小,说明精度越高。该指标对于非重复型的任务非常重要,与机器人制造工艺、驱动器的分辨率和反馈装置有关。典型的工业机器人定位精度一般在 (5 ± 0.02) mm 范围。

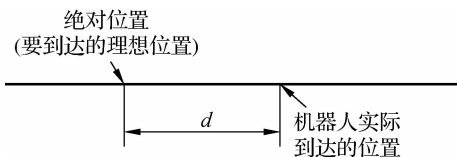


图 1-24 定位精度

重复定位精度(repeatability accuracy)是指在同一环境、同一条件、同一目标动作、同一命令之下,机器人连续重复运动若干次时所测得的位置与姿态的一致程度,表明的是其位置的分散情况,是衡量一系列误差值的密集度,即重复度,是关于精度的统计数据。做往复运动的物体,每次停止的位置与设定次数取得的平均值之间角度或长度的差值越小,精度越高,如图 1-25 所示。一般情况下,重复定位精度是呈正态分布的。目前,工业机器人的重复定位精度可达 $\pm 0.01 \sim \pm 0.5 \text{ mm}$ 。依据作业任务和末端持重的不同,机器人重复定位精度也不同。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	$\pm 0.2 \sim \pm 0.5$
码垛	50~800	± 0.5
点焊	50~350	$\pm 0.2 \sim \pm 0.3$
弧焊	3~20	$\pm 0.08 \sim \pm 0.1$
喷涂	5~20	$\pm 0.2 \sim \pm 0.5$
装配	2~5	$\pm 0.02 \sim \pm 0.03$
	6~10	$\pm 0.06 \sim \pm 0.08$
	10~20	$\pm 0.06 \sim \pm 0.1$

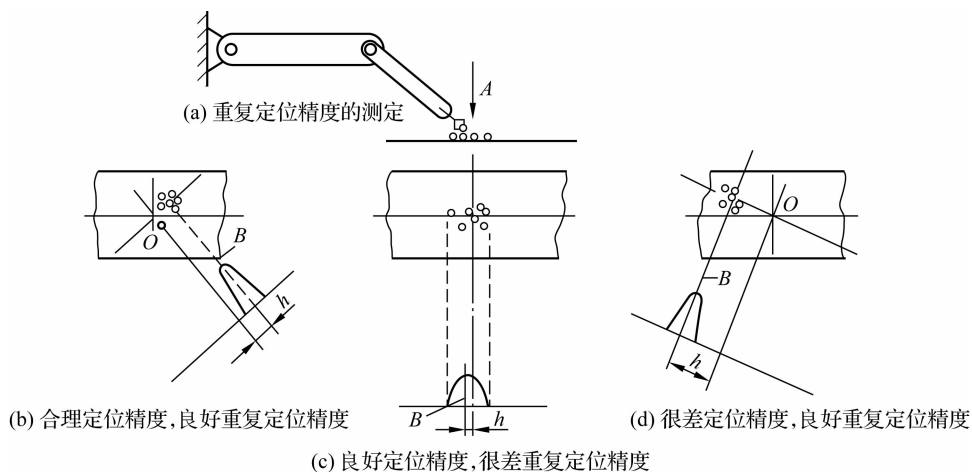


图 1-25 定位精度和重复定位精度

重复定位精度不仅与机器人驱动器的分辨率及反馈装置有关,还受进给系统的间隙与刚性以及摩擦特性等因素的影响。但因其不受工作载荷变化的影响,故通常用重复定位精度这一指标作为衡量示教再现工业机器人精度水平的重要指标。定位精度、重复定位精度和分辨率的关系如图 1-26 所示。

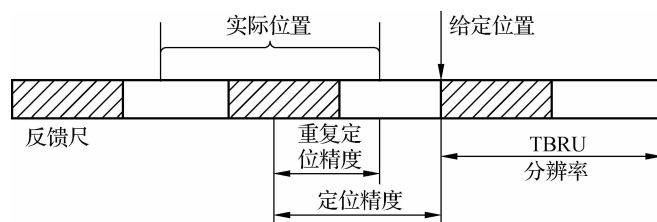


图 1-26 定位精度、重复定位精度和分辨率的关系

1.3.3 分辨率

分辨率是指机器人每个关节所能实现的最小移动距离或最小转动角度。工业机器人的分辨率包括编程分辨率和控制分辨率两种。

编程分辨率是指控制程序中可以设定的最小距离，又称为基准分辨率。当机器人某关节电动机转动 0.1° ，机器人关节端点移动距离为 0.01 mm ，其基准分辨率即为 0.01 mm 。

控制分辨率是系统位置反馈回路所能检测到的最小位移，即与机器人关节电动机同轴安装的编码盘发出单个脉冲后电动机转过的角度。

在传感器控制的机器人运动和精确定位中，分辨率是很重要的。

1.3.4 工作空间

工作空间(working space)是指机器人运动时手臂末端或手腕中心所能到达的位置点的集合，也称为机器人的作业范围。因为末端执行器的形状和尺寸是多种多样的，为了真实反映机器人的特征参数，所以一般不包括末端执行器本身所能到达的区域。工作空间的形状和大小是十分重要的，机器人在执行某作业时可能会因为存在手部不能到达的作业死区而不能完成任务。因此在选择机器人执行任务时，一定要合理选择符合当前作业范围的机器人。图 1-27 所示为 IRB-120 型 6 自由度工业机器人和 KUKA 公司 KR-Delta 并联机器人的工作空间。

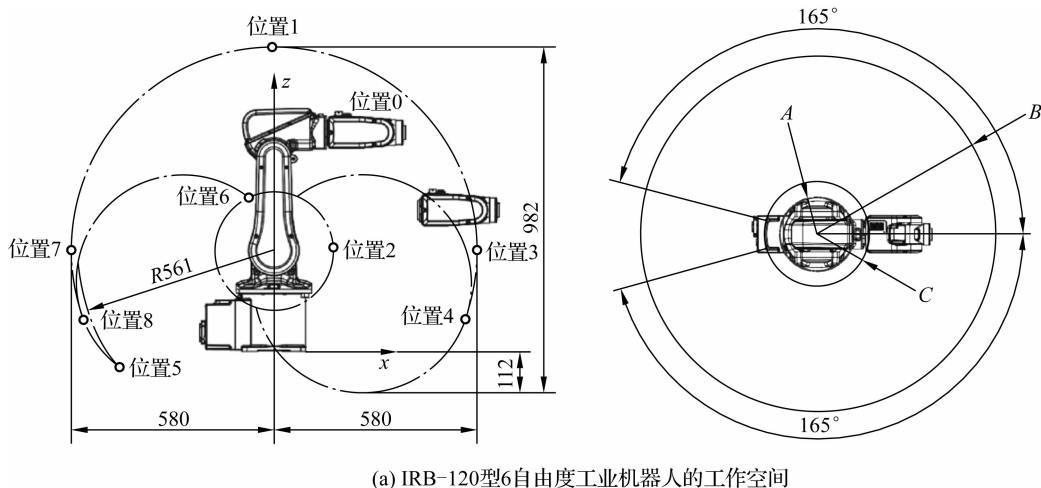
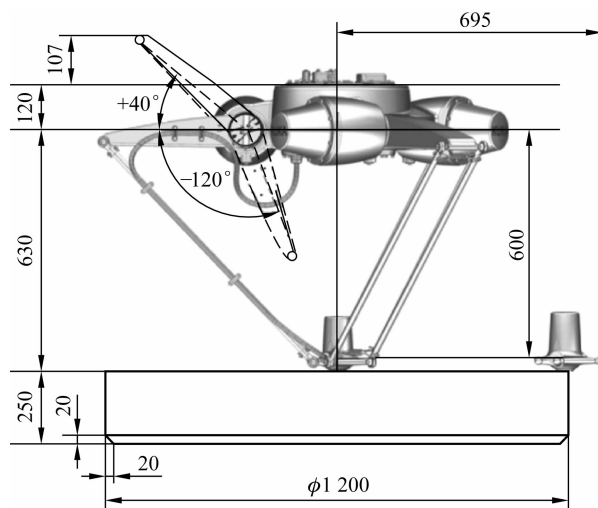


图 1-27 工业机器人的工作空间(长度单位:mm)



(b) KR-Delta并联机器人的工作空间

续图 1-27 工业机器人的工作空间(长度单位:mm)

1.3.5 承载能力

承载能力是指机器人在作业范围内的任何位姿上所能承受的最大质量。承载能力不仅取决于负载的质量,而且要将末端执行器的质量和惯性力列入考虑范围。承载能力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,这一技术指标是指高速运行时的承载能力。根据承载能力的不同,工业机器人大致可分为以下几类:

- 1) 轻载型机器人: 承载能力在 1 kg 以下, 适用于电子产品的装配、轻型零部件的搬运等任务。常见的型号有 UR3、KUKA KR 6 R700-2 等。
- 2) 中载型机器人: 承载能力在 1~50 kg 之间, 适用于汽车零部件的加工、装配等任务。常见的型号有 ABB IRB 2600、FANUC M-10iA 等。
- 3) 重载型机器人: 承载能力在 50 kg 以上, 适用于钢铁、航空等重工业领域零部件的搬运、装配、焊接等任务。常见的型号有 KUKA KR 1000 titan、ABB IRB 7600 等。

1.3.6 最大工作速度

最大工作速度是指在各轴联动的情况下, 机器人手腕中心所能达到的最大线速度, 它影响了机器人的工作效率和运动周期。最大的关节速度(角速度或线速度)并不是一个独立的值, 它与机器人所提取的重力和位置精度均有密切的关系。对于更长距离的运动, 它往往被伺服电动机的总线电压或最大允许的电动机转速所限制。对于大型机器人, 典型的末端执行器峰值速度可达 20 m/s。

工作时速度越高, 意味着工作效率越高。但是, 速度越高就要花费更多的时间去升速或降速, 对工业机器人的最大加速度的要求更高。同时, 机器人所承受的动载荷增大, 必将承受加减速时较大的惯性力, 从而影响机器人的工作平稳性和位置精度。

1.4 工业机器人的行业发展

1.4.1 工业机器人的发展史

事物的完善离不开发展,只有不断发展,纠错革新,才能不断进步。机器人也一样,也是历经了一代代的发展,才有了如今的成就。总的来讲,工业机器人的发展史可以分为以下几个阶段。

1. 萌芽阶段(20 世纪 50 年代)

进入 20 世纪 40 年代后期,机器人的研究与发明得到了更多人的关心和关注。20 世纪 50 年代以后,美国橡树岭国家实验室开始研究能搬运核原料的遥控操纵机械手。这是一种主从型控制系统,系统中加入力反馈,可使操作者获知施加力的大小,主、从机械手之间由防护墙隔开,操作者可通过观察窗或闭路电视对从机械手操作机进行有效的监视。主、从机械手系统的出现为机器人的产生及近代机器人的设计与制造做了铺垫。

图 1-28 所示为 20 世纪 50 年代雷蒙德·高尔兹使用电动机械遥控操作机器人处理放射性物质,实现远距离处理放射性材料,提高了核工业生产的安全性。



图 1-28 使用电动机械遥控操作机器人处理放射性物质



视频

工业机器人的
发展概况

1952 年,美国麻省理工学院(MIT)成功研发出第一代数控机床(CNC),并进行了与数控机床相关的控制技术及机械零部件的研究,为机器人的开发奠定了技术基础。同年,美国麻省理工学院受美国空军委托,成功研制出一台直线插补连续控制的三坐标立式数控铣床。该数控机床使用的电子器件是电子管。微电子技术、自动信息处理、数据处理、电子计算机技术的研发,成功推动了机械制造自动化技术的发展。

1954 年,美国发明家乔治·德沃尔最早提出了工业机器人的概念,并申请了专利。该专利的要点是借助伺服技术控制机器人的关节,利用人手对机器人进行动作示教,机器人能实现动作的记录和再现。这就是所谓的示教再现机器人。现有的机器人差不多都采用这种

控制方式。1956年,德沃尔遇到了一个地地道道的科幻迷,被誉为“机器人之父”的物理学家约瑟·恩格尔伯格。

二人共同创立了美国万能自动化公司(Unimation),制造出了世界上第一台工业机器人,由液压驱动的通用机械手——Unimate,如图1-29所示,现代机器人的历史才真正开始。这种机器人的外形有点儿像坦克炮塔,基座上有一个大机械臂,大臂可绕轴在基座上转动,大臂上又伸出一个机械臂,它相对大臂可以伸出或缩回。小臂上有一个腕,可绕小臂转动,进行俯仰和侧摇。腕前端是“手”,即操作器。这个机器人的功能和人的手臂功能相似。现在的Unimate机器人是球坐标机器人,它由5个关节串联的液压驱动,可完成近200种示教再现动作。它于1961年投入美国通用汽车公司(GM)生产线,主要用于从一个压铸机上把零件拔出来。随后几年卖出的通用机械手被用于车体的零部件操作和点焊。许多公司看到机器人能够可靠工作并保证工作质量,也都开始开发和制造工业机器人。因此,20世纪50年代是机器人的萌芽期,其概念是“一只空间机构组成的机械臂,一台可重复编程动作的机器”。

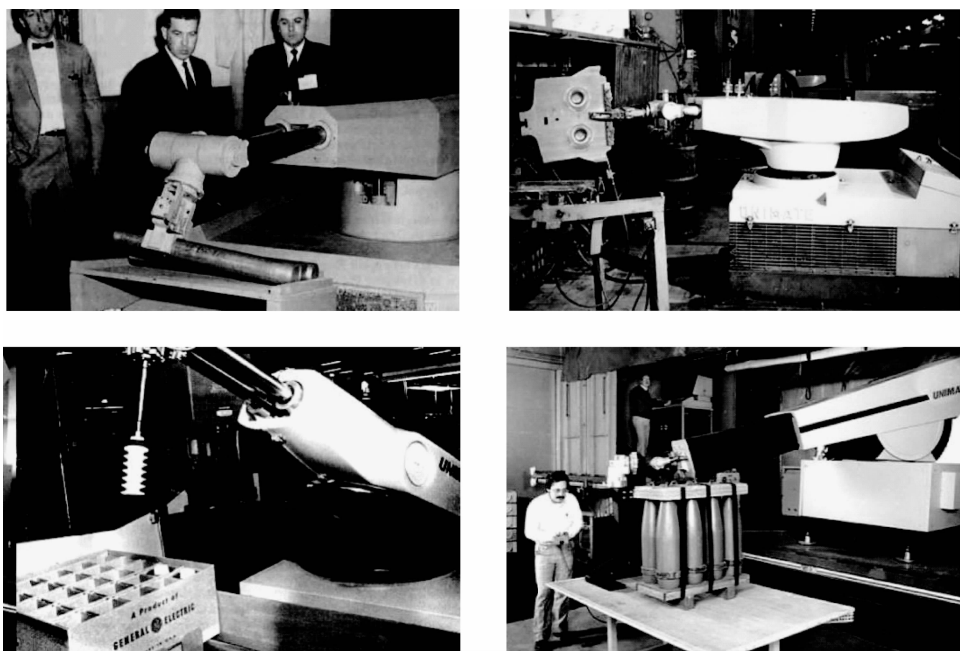


图 1-29 Unimate 机器人

2. 成长阶段(20 世纪 60 年代)

到了20世纪60年代,随着传感技术和工业自动化的发展,工业机器人进入成长期,开始向实用化发展,被用于焊接和喷涂作业。1960年,美国机床与铸造公司(AMF)生产了一台被命名为Versation的圆柱坐标型数控自动机械,并以Indusation Robot(工业机器人)的名称进行宣传,如图1-30所示。

1968年,美国通用汽车公司订购了68台工业机器人。1969年,该公司又自行研制出

SAM 型工业机器人,并用 21 台这种机器人组成了点焊小汽车车身的自动焊接生产线。维克多·沙因曼设计出了“斯坦福手臂”,对今后的机器人设计产生了巨大影响。“斯坦福手臂”有 6 个自由度,全部电气化,由一台标准计算机控制,驱动系统由直流电动机、谐波驱动器、直齿轮减速器、电位器和用于位置、速度反馈的转速表组成。

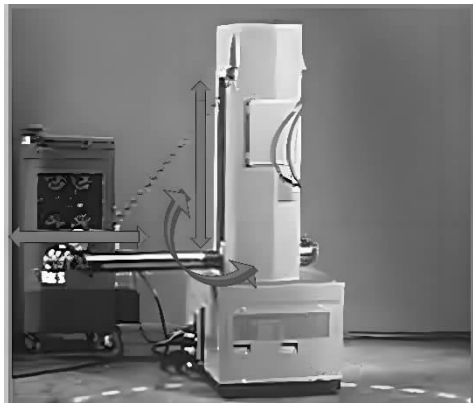


图 1-30 Versation 机器人

此时,日本正面临着严重的劳动力短缺问题,其工业机器人的研究也才刚刚起步,在美国诞生并已投入生产的工业机器人给其带来了福音。1967 年,丰田纺织自动化公司购买了第一台 Unimate 机器人。1968 年,川崎重工业公司从美国引进 Unimate 机器人生产技术,并对其不断消化、仿制、改进、创新,开发了日本第一台工业机器人——Kawasaki Unimate 2000,如图 1-31 所示。

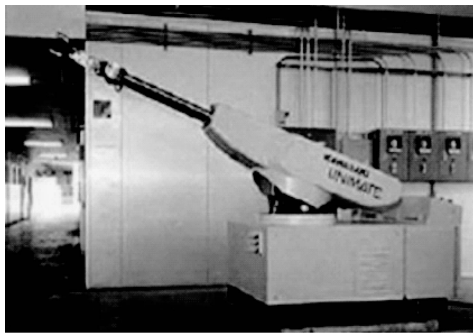


图 1-31 Kawasaki Unimate 2000 机器人

1978 年,日本山梨大学牧野洋发明了 SCARA 机器人,该机器人具有 4 个轴和 4 个运动自由度,特别适合于装配工作,如今被广泛应用于汽车工业、电子产品工业、药品工业和食品工业等领域。

3. 实用化阶段(20 世纪 70 年代)

到了 20 世纪 70 年代,随着计算机和人工智能的发展,机器人进入了实用化时代,并在汽车、电子等行业中得到应用,进一步推动了机器人产业的发展与普及。ASEA 公司(现在

的 ABB 公司)推出了第一台微型计算机控制、全部电气化的工业机器人 IRB-6。它可以进行连续的路径移动,被迅速地运用到汽车的焊接和装卸中。据报道,这种设计使机器人的使用寿命高达 20 年。IRB-6 机器人如图 1-32 所示。日本的工业机器人研究虽起步较晚,但结合自身国情,面向中小企业,采取了一系列鼓励使用机器人的措施。1970 年 7 月,东京举办了人类历史上第一届机器人展览会,100 多家公司推出了自己制作的机器人样板,日本机器人工业的发展速度和规模令世人惊叹。



图 1-32 IRB-6 机器人

1972 年,意大利菲亚特汽车公司(FIAT)和日本日产汽车公司(NISSAN)装备了基于点焊机器人的汽车生产线,提高了生产质量与效率。1973 年,德国库卡公司(KUKA)研发出了世界上第一台采用电机驱动的六轴工业机器人。1979 年,美国 Unimation 公司推出了通用六轴工业机器人——PUMA,采用多 CPU 协同控制,可配置位置传感器、视觉传感器和力觉传感器,并成功应用于汽车装配生产线,这标志着工业机器人技术已经趋于成熟。

4. 普及阶段(20 世纪 80 年代)

20 世纪 80 年代,随着传感技术、信息处理技术以及人工智能的发展,机器人发展成为具有各种移动机构,有感觉、思考、决策和作业能力的智能化机械。工业机器人进入普及时代,开始在汽车、电子等行业得到大量使用,这成功推动了机器人产业的发展。此时,日本成为应用工业机器人最多的国家,赢得了“机器人王国”的美誉,日本政府正式把 1980 年定为工业机器人普及的元年。

此后,机器人技术在工业制造、医疗康复、航空航天、水下探测、社会服务、极限作业、军事国防等诸多领域有了更广泛的应用空间。1984 年,美国艾德普科技公司(Adept Technology)开发出第一台直驱式选择顺应性装配机械臂——SCARA,其采用电力发动机直接连接机械臂的方式,省去了齿轮、链条等传动机构,提高了响应速度和控制精度。1989 年,麻省理工学院(MIT)人工智能实验室研制出六足爬行机器人——“成吉思汗”(Genghis),如图 1-33 所示,其集成了 12 个伺服驱动电机和 22 个传感器,主要用于在地外行星表面的复杂地形上执行探测任务。



图 1-33 “成吉思汗”爬行机器人

5. 智能化阶段(20 世纪 90 年代以后)

20 世纪 90 年代初期,工业机器人的生产与需求进入了高峰期。经过 10 年左右的发展,大规模的机器人产业逐渐形成。随着计算机技术和人工智能技术的飞速发展,机器人在功能和技术层次上有了很大的提高,移动机器人和机器人的视觉、触觉等技术就是新技术的典型代表。

1996 年,美国国家航空航天局(NASA)将火星漫游机器人 Sojourner 送入太空,如图 1-34 所示。Sojourner 成功在火星表面着陆,搜索了 2 691 平方英尺(约合 250 m²)的土地,并拍摄了 550 张照片。

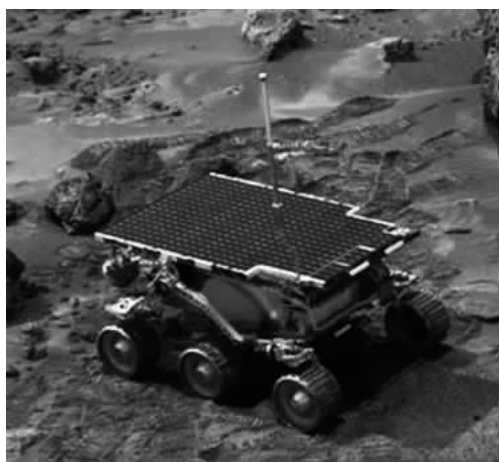


图 1-34 Sojourner 火星漫游机器人

1998 年,美国直觉外科手术公司(Intuitive Surgical)推出了微创手术机器人——“达·

芬奇”(Da Vinci),如图 1-35 所示,通过使用微创的方法实施复杂的外科手术,并获得了美国食品药品监督管理局(FDA)的使用批准。



图 1-35 “达·芬奇”手术机器人

2000 年,日本本田公司研发出了全球最早具备人类双足行走能力的类人形机器人——“阿西莫”(ASIMO),如图 1-36 所示,可以完成各种人类肢体动作,并可以识别物体、解释手势、辨别声音。



图 1-36 “阿西莫”类人形机器人

2005 年,波士顿动力公司(Boston Dynamics)在美国国防部高级研究计划局的资助下研制出了具有强大机动能力的四足仿生机器人——“大狗”(BigDog),它可以用于为部队搬运物资,如图 1-37 所示。



图 1-37 “大狗”四足仿生机器人

2013 年,波士顿动力公司研发出了人形机器人——“阿特拉斯”(Atlas),并随后推出了若干升级版本,如图 1-38 所示。Atlas 采用锂电池供电和液压驱动,可以完成跑步、跳跃、后空翻、搬运物品等任务。美国哈佛大学 Wyss 研究所研发出了可穿戴的软质外骨骼服——Exosuit,能降低穿戴者在行走和跑步过程中的代谢消耗,研究成果登上了著名学术期刊 *Science* 2019 年的封面。

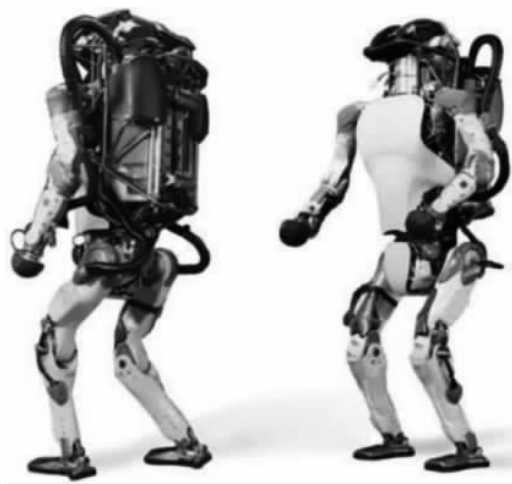


图 1-38 “阿特拉斯”人形机器人

我国对机器人的研究起步较晚,从 20 世纪 80 年代初开始。我国在“七五”计划中把机器人列入国家重点科研规划内容,在“863”计划的支持下,机器人基础理论与基础元器件研究全面展开。我国第一个机器人研究示范工程于 1986 年由中国工程院院士蒋新松在沈阳创建,并领导研制了水下机器人、工业机器人和特种机器人,也因此被誉为“中国机器人之父”。

目前,我国已基本掌握了机器人的设计制造技术、控制系统硬件和软件设计技术、运动学和轨迹规划技术,生产了部分机器人关键元器件,开发出喷漆、弧焊、点焊、装配、搬运等机器人,6 000 m 以下深水中作业机器人也已试验成功,如图 1-39 所示。2010 年以来,在步行机器人、精密装配机器人、多自由度关节机器人的研制等国际前沿领域,我国逐步缩小了与世界先进水平的差距。



图 1-39 “海人一号”有缆水下机器人

但在现阶段,我国工业机器人产业的整体水平与世界水平还有相当大的差距,缺乏关键核心技术,高性能交流伺服电动机、精密减速器、控制器等关键核心部件长期依赖进口。从世界范围来看,日本和欧洲是全球工业机器人市场的两大主角。“四大家族”的日本发那科(FANUC)、德国库卡(KUKA)、日本安川电机(YASKAWA)、瑞士 ABB,如图 1-40 所示,它们占据着工业机器人市场主要的份额。



图 1-40 工业机器人的“四大家族”

归纳小结

工业机器人的发展史	萌芽阶段		
			随着计算机和人工智能的发展,机器人进入了实用化时代
		20 世纪 80 年代	

1.4.2 工业机器人的未来趋势

机器人大都工作于结构性环境中,即工作任务、完成工作的步骤、工件存放的位置、工作对象等都是事先已知的,而且定位精度也是完全确定的,所以机器人完全可以按事先示教编好的程序重复不断地工作。当自动化进一步向建筑、采掘、运输等行业扩展时,其环境则是非结构化的,不能事先确定,或至少不能完全确定,总任务虽可事先确定,但如何去完成,要根据当时的实际情况来确定与制定。因此,研究具有感知、思维,能在非结构环境中自主式工作的机器人就成了机器人学研究的长远目标。

将来,如果机器人能更容易安装,能与其他制造单元集成并可编程,尤其具备自适应感知和自动纠错恢复能力,那么可行的应用范围将被大大拓宽。从世界上推出的机器人产品来看,工业机器人技术发展趋势主要为:结构模块化和可重构化;控制技术的开放化、PC化和网络化;伺服驱动技术数字化和分散化;多传感器融合技术的实用化,等等。同时,随着计算机技术不断向智能化方向发展,机器人应用领域的不断扩展和深化以及在系统(FMS、CIMS)中的群体应用,工业机器人也在不断向智能化方向发展,以适应“敏捷制造”,满足多样化、个性化的需要,并适应多变的非结构环境作业,向非制造领域进军。

展望我国工业机器人的发展,标准化的过程是发展趋势。我国制造业面临着向高端转变,承接国际先进制造,参与国际分工的巨大挑战。加快工业机器人技术的研究开发与生产是我国抓住这个历史机遇的主要途径。伴随移动互联网、物联网的发展,多传感器、分布式控制的精密型工业机器人将会越来越多,逐步渗透制造业的方方面面,并且由制造实施型向服务型转化。工业机器人最先大规模使用的区域将会是经济发达地区,将来我国工业机器人的大范围应用将会首先集中在广东、江苏、上海、北京等地,其工业机器人拥有量将占全国一半以上。

日益增长的工业机器人市场,以及巨大的市场潜力,吸引着世界著名机器人生产厂家的

归纳小结

工业机器人的未来趋势	结构模块化和可重构化

课后小记

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

实训 1 参观工业机器人在自动化生产线中的应用过程

1. 任务描述

本实训任务是通过参观工厂或实训室,了解工业机器人在自动化生产线中的应用过程。

2. 任务准备

实施本实训任务所需使用的实训设备及工具材料可参考表 1-3。

表 1-3 实训设备及工具材料

序 号	分 类	名 称	型号规格	数 量	单 位	备 注
1	工具	电工常用工具		1	套	
2	设备器材	工业机器人	广数型号自定	1	套	
3		工业机器人	华数型号自定	1	套	
4		工业机器人	ABB 型号自定	1	套	
5		工业机器人	自定	1	套	

3. 任务实施

(1)参观工厂或实训室

参观工厂或实训室(如图 1-41、图 1-42 所示场景),记录工业机器人的品牌及型号,并查阅相关资料,了解工业机器人的主要技术指标及特点,完成表 1-4 的填写。



图 1-41 重庆东巨金属制品有限公司



图 1-42 重庆科创职业学院机器人实训中心

(2) 观看工业机器人在工厂自动化生产线中的应用录像

通过观看西部智能制造与机器人培训基地 ROBOT120 中心视频录像和重庆华中数控技术有限公司、上汽五菱重庆分公司、重庆长城汽车有限公司等企业生产录像,记录工业机器人的类型、品牌及型号、主要技术指标、应用场景等,同时查阅相关资料加深了解,完成表 1-4。

表 1-4 参观工厂或实训室记录表

序 号	类 型	品牌及型号	主要技术指标	应用场景	特 点
1					
2					
3					

(3) 工业机器人操作练习

- 1) 教师演示工业机器人的操作过程,并说明操作过程的注意事项。
- 2) 在教师的指导下,学生分组进行简单的工业机器人操作练习。

4. 任务测评

对任务实施的完成情况进行检查,并将结果填入表 1-5。

表 1-5 任务测评表

理论知识							
序号	考评内容	考核要求	评分标准	配分	自评	互评	师评
1	观看录像	正确记录工业机器人的品牌及型号,正确描述其主要类型及应用场合	1. 记录工业机器人的品牌及型号,有错误或遗漏,每处扣 5 分; 2. 描述工业机器人的主要类型及应用场合,有错误或遗漏,每处扣 5 分	20 分			
2	参观工厂或实训室	正确记录工业机器人的品牌及型号,正确描述其主要技术指标及特点	1. 记录工业机器人的品牌及型号,有错误或遗漏,每处扣 5 分; 2. 描述工业机器人的主要技术指标及特点,有错误或遗漏,每处扣 5 分	20 分			
相关技能							
序号	考评内容	考核要求	评分标准	配分	自评	互评	师评
1	工业机器人操作练习	1. 观察机器人操作过程,能说出工业机器人的安全使用注意事项和安全操作规程; 2. 能正确进行工业机器人的简单操作	1. 不能说出工业机器人的安全使用注意事项,扣 25 分; 2. 不能说出工业机器人的安全操作规程,扣 25 分; 3. 不能根据控制要求,完成工业机器人的简单操作,扣 50 分	50 分			
职业素养							
序号	考评内容	考核要求	评分标准	配分	自评	互评	师评
1	安全文明生产	劳动保护用品穿戴整齐,遵守操作规程,操作结束要清理现场	1. 操作中,违反安全文明生产考核要求的任何一项扣 5 分,扣完为止; 2. 当发现学生操作存在重大安全隐患时,要立即予以制止,并扣 5 分	10 分			
综合考评				100			

实训 2 初识工业机器人的作业示教

1. 任务准备

本实训任务以广数 GR-C 系列工业机器人为例,通过认识机器人本体、控制柜和示教器,掌握工业机器人的简易作业示教操作。

2. 任务准备

实施本实训任务教学所需使用的实训设备及工具材料可参考表 1-6。

表 1-6 实训设备及工具材料

序 号	分 类	名 称	型号规格	数 量	单 位	备 注
1	工具	电工常用工具		1	套	
2	设备器材	六轴机器人本体	广数	1	台	
3		控制柜	GR-C 系列	1	套	
4		示教器		1	套	

3. 任务实施

1)认识 GR-C 系列工业机器人结构

广数 GR-C 系列工业机器人由机器人本体、控制柜和示教器三部分通过缆线连接而成,如图 1-43 所示。

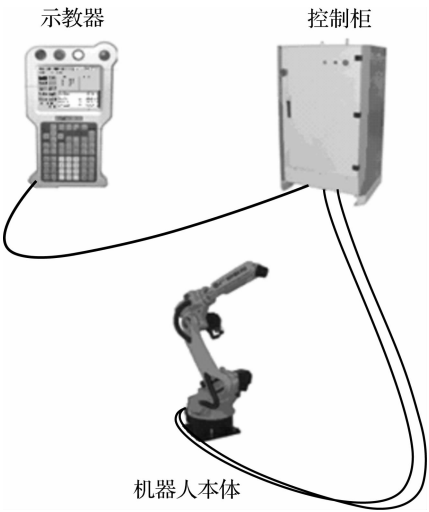


图 1-43 广数 GR-C 系列工业机器人

(2) 认识机器人控制柜

控制柜(图 1-44)的正面左侧装有主电源开关和门锁,右上角有电源开、电源关和急停键,电源关按键下方的挂钩用来悬挂示教器。



图 1-44 机器人控制柜

特别说明的是,控制柜上的急停键和示教器上的急停键是有区别的。按下控制柜上的急停键,伺服电源被切断;按下示教器上的急停键,只是暂停机器人运动,并未切断伺服电源。

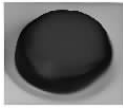
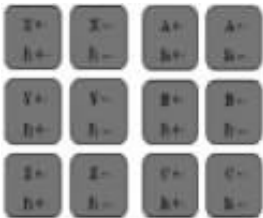
(3) 认识示教器

示教器为用户提供了友好可靠的人机接口界面,可以对机器人进行示教操作,对程序文件进行编辑、管理、示教检查及再现运行,监控坐标值、变量和输入输出,实现系统设置、参数设置和机器设置,及时显示报警信息及必要的操作提示等。示教器分为按键和显示屏两部分,按键包括对机器人进行示教编程所需的所有操作键和按钮。示教器的外观如图 1-45 所示。示教器主要按键的功能见表 1-7。



图 1-45 示教器的外观

表 1-7 示教器主要按键的功能

按键名称	功 能
[急停]键 	按下此键,机器人停止运行,屏幕上显示急停提示信息。 按下控制柜上的[急停]键时,机器人停止运行,电机电源被切断。 按下示教器上的[急停]键时,机器人停止运行,电机电源未切断。 松开控制柜上的[急停]键时,电机电源恢复,需手动按[清除]键清除报警信息,系统恢复正常状态。 松开示教器上的[急停]键时,需手动按[清除]键清除报警信息,系统恢复正常状态
[暂停]键 	再现运行程序时,按下[暂停]键,机器人暂停运行程序
[启动]键 	再现模式下,伺服就绪后,按下[启动]键开始运行程序
[模式选择]键 	选择示教模式、再现模式和远程模式。 示教模式:可用示教器进行轴操作和编程操作。 再现模式:可对示教好的文件进行再现运行。 远程模式:可对示教好的主程序文件进行远程控制运行。 模式切换时,使能断开,系统处于停止状态
[使能开关]键 	使能开关主要用于开、关使能。 示教机器人前,必须先将三位使能开关轻轻按下,再按轴操作键或前进/后退键,机器人才能运动,一旦松开或用力按,断开使能,机器人立即停止运动
轴操作键 	在示教模式下,轻轻按下[使能开关]键,再按轴操作键,机器人各轴可在当前坐标系下按一定方式运动。 再现模式下,按此键不会响应

续表

按键名称	功 能
[伺服准备]键 	要再现运行,需先选择再现模式再按下此键,然后按下[启动]键才能再现(要保证机器人在起始位置);否则将不能进行再现运行。 按下此键后,[伺服准备]上的灯会变成黄色
[获取示教点]键 	在编辑运动指令时,按[获取示教点]键可以获取示教点(机器人当前的位置)。 在设置工具坐标三点法、工具坐标五点法、用户坐标三点法时,也通过[获取示教点]键来获取机器人当前的位置

(4) 示教前的准备

1) 安全通电。

- a. 要确认机器人工作范围内没有干扰机器人运动的人和物,以确保操作安全。
- b. 在确保电气设备正常的情况下给机器人控制系统通电。

2) 通电的步骤如下:

- a. 接通电源前,检查工作区域包括机器人、控制器等是否正常,检查所有的安全设备是否正常。
- b. 将控制柜面板上的电源开关置于 ON 状态。
- c. 按下控制柜上绿色的电源键。

3) 安全检查。

作为示教前的准备,并出于安全考虑,请先执行以下操作:

- a. 查看系统当前的坐标系,坐标系不同,机器人的运动方向也会不同。
- b. 查看系统当前的速度等级,一般选择“低速”挡。
- c. 确认控制柜上的[急停]键是否有效,按下[急停]键,确认伺服电源被切断,系统进入急停状态。

(5) 机器人简易操作

示教操作按以下步骤进行:

- 1) 通过[模式选择]键,选择“示教”模式。
- 2) 通过[坐标设定]键,选择合适的坐标,一般选择关节坐标系。
- 3) 通过[手动速度]键,选择合适的系统速度,一般先选择“低速”挡。
- 4) 若系统处于急停状态,则弹起[急停]键,清除急停状态。
- 5) 左手按下[使能开关]键,开使能。
- 6) 根据目标示教点的位置,按下[使能开关]键的同时,按下某一个轴操作键,比如这里

按下[X+]键,此时机器人在示教模式和关节坐标系下,以低挡的速度在J1+的方向移动。

7)松开轴操作键或者[使能开关]键,机器人立刻停止运动。若按下[急停]键,则机器人立刻停止运动,并切断使能,进入急停状态。

注意:根据目标示教点的具体位置,可选合适的坐标系进行示教,有些示教点可能需要若干次的示教,也可能需要切换若干次的系统坐标系。通过以上示教步骤,可使得机器人TCP端点处于工作范围内的任意示教点。

4. 任务测评

对任务实施的完成情况进行检查,并将结果填入表1-8。

表 1-8 任务测评表

理论知识							
序号	考评内容	考核要求	评分标准	配分	自评	互评	师评
1	认识控制柜	正确描述控制柜的组成及各部件的功能说明	1. 说出控制柜的组成有错误或遗漏,每处扣5分; 2. 描述控制柜部件的功能有错误或遗漏,每处扣5分	15分			
2	认识示教器	正确描述示教器上常用按键的名称及功能	1. 说出示教器的常用按键的名称有错误或遗漏,每处扣5分; 2. 描述示教器上常用按键的主要功能特点有错误或遗漏,每处扣5分	25分			
相关技能							
序号	考评内容	考核要求	评分标准	配分	自评	互评	师评
1	工业机器人简易操作练习	1. 正确完成系统启动; 2. 能正确进行工业机器人单轴运动控制; 3. 能正确进行工业机器人线性运动控制; 4. 能正确进行工业机器人重定位运动控制	1. 不能完成系统正确启动,扣25分; 2. 不能完成单轴运动控制,扣20分; 3. 不能完成线性运动控制,扣20分; 4. 不能完成重定位运动控制,扣20分	50分			

续表

职业素养							
序号	考评内容	考核要求	评分标准	配分	自评	互评	师评
1	安全文明生产	劳动防护用品穿戴整齐,遵守操作规程,讲文明懂礼貌;操作结束要清理现场	1. 操作中,违反安全文明生产考核要求的任何一项扣 5 分,扣完为止; 2. 当发现学生操作存在重大安全隐患时,要立即予以制止,并每次扣安全文明生产总分 10 分	10 分			
综合考评				100			



思考与练习

一、选择题

1. “机器人三原则”的提出者是()。

A. 卡雷尔·恰佩克

B. 加斯卡·阿西莫夫

C. 阿勒·加扎利

D. 达·芬奇

2. 世界上第一台工业机器人的名字是()。

A. Unimate

B. Versation

C. 斯坦福手臂

D. IRB-6

3. 工业机器人的特点是()。

①可编程;②拟人化;③通用性;④涉及学科广泛

A. ①③

B. ①②③

C. ①②④

D. ①②③④

4. 按结构特征的不同,工业机器人可分为()。

①直角坐标机器人;②圆柱坐标机器人;③球坐标机器人;④多关节机器人

A. ①②

B. ②③

C. ①②③

D. ①②③④

5. 工业机器人由三大部分 6 个子系统组成,三大部分指机械部分、传感部分和()。

A. 传动部分

B. 驱动部分

C. 运动部分

D. 控制部分

二、填空题

1. 除了专门设计的专用工业机器人以外,一般工业机器人在执行不同的作业任务时具有较好的_____性。

2. 世界工业机器人“四大家族”是指_____、_____、_____和_____。
3. 伺服控制机器人处于_____控制状态。
4. 自由度的缩写为_____,是指描述物体运动所需要的_____数。
5. 机器人的手臂按球坐标形式配置,其手臂的运动由_____个直线运动和_____个转动所组成。

三、简答题

1. 简述工业机器人的主要应用领域。
2. 简述工业机器人的主要参数。