

工业机器人操作与编程

主 编 雷红华 公 相

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工业机器人操作与编程 / 雷红华, 公相主编.

北京 : 北京工业大学出版社, 2024. 12. -- ISBN 978-7-5639-8740-5

I . TP242.2

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024K50H22 号

工业机器人操作与编程

GONGYE JIQIREN CAOZUO YU BIANCHENG

主 编: 雷红华 公 相

责任编辑: 戴奇钰

封面设计: 刘志伟

出版发行: 北京工业大学出版社

编 委 会

主 编 雷红华 公 相

副主编 李雪婧 秦凯歌 陈 舒

吴坚文、罗素娟



工业机器人是 20 世纪 60 年代在自动操作机基础上发展起来的一种能模仿人的某些动作和控制功能，并按照可变的预定程序、轨迹及其他要求操作工具，实现多种操作的自动化机械系统。工业机器人代替生产工人出色地完成着各种各样的极其繁重、复杂、精密或者充满着危险的工作。它综合了精密机械、控制传感和自动控制技术等领域的最新成果，在工厂自动化和柔性生产系统中起着关键的作用，并已经广泛应用于工农业生产、航空航天和军事技术等各个领域。而 ABB 工业机器人作为世界领先的机器人制造商生产的工业机器人，掌握其应用和编程操作对促进工业发展有着极其重要的作用。

本书遵循“项目任务式驱动、知识技能型学习为主线”原则，依据任务复杂程度，“由浅入深”地设置一系列学习单元，引领学生学习技术知识、进行实验实训，并嵌入职业核心能力知识点，改变知识与实验实训相剥离的传统教材组织方式，为学生提供在完成工作任务过程中发展综合职业能力的学习工具。本书是纸质书与数字化资源一体化的新形态教材，利用互联网技术，将丰富的教育资源，尤其是拓展学习资源，以动画、电子文档等形式，通过二维码嵌入纸质书中，学生通过手机等移动设备扫描二维码即可实现线上学习。

本书对 ABB 工业机器人的使用与操作进行了详细介绍，总共分为五大项目，分别为认识工业机器人、工业机器人的示教器与手动运行、工业机器人的图形轨迹编程、工业机器人的外部自动运行程序和工业机器人综合应用程序。每个项目均配有作业与测验，教材还另附独立的任务工单册。

为了保证科学性与先进性，新式教材的开发、教学资源的获取更需深化校企合作，本书的编写团队由企业专家和学校教师共同构成，编写出适合高职学生学习需求的教材。

本书由雷红华、公相担任主编，李雪婧、秦凯歌、陈舒担任副主编。感谢北京华航唯实机器人科技股份有限公司的专家提供的部分技术支持。本书在编写过程中，参考并引用了一些书籍和网上资料。在此，对所有原作者表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请使用本书的师生和读者批评指正！

编委会

2024 年 10 月

目 录

项目一 认识工业机器人 / 1

任务一 工业机器人的发展与应用	3
任务二 工业机器人的分类.....	9
任务三 工业机器人的参数与组成	13
任务四 工业机器人的末端执行器	18
任务五 工业机器人的外围设备和行走机构	24
任务六 工业机器人的运动轨迹规划与示教功能.....	28

项目二 工业机器人的示教器与手动运行 / 31

任务一 启动工业机器人	33
任务二 关闭工业机器人	43
任务三 工业机器人的急停恢复	48
任务四 示教器的操作环境.....	50
任务五 设置工业机器人的运行模式和速度	57
任务六 工业机器人的单轴运动	62
任务七 工业机器人的线性运动和重定位运动	66

项目三 工业机器人的图形轨迹编程 / 71

任务一 更新转数计数器	73
任务二 设置坐标系	79
任务三 RAPID 编程语言与程序架构	93
任务四 工业机器人的运动指令	99



项目四 工业机器人外部自动运行程序 / 107

任务一 配置工业机器人的标准 I/O 板	109
任务二 连接适配器	117
任务三 I/O 信号的定义及监控	127
任务四 程序数据的定义及赋值	153

项目五 工业机器人综合应用程序 / 183

任务一 逻辑判断指令与调用例行程序指令	185
任务二 I/O 控制指令	189
任务三 功能指令与数组	194
任务四 程序流程控制指令	204
任务五 程序的自动运行与导入导出	214

参考文献 / 231

附录 1	232
附录 2	232



学习目标

知识目标

了解工业机器人的定义、特点、发展史、行业应用情况；
了解工业机器人的组成、分类及相关技术参数；
掌握工业机器人的末端执行器；
理解工业机器人的行走机构组成及运动轨迹规划。

技能目标

学会认识工业机器人的末端执行器；
学会解说工业机器人的基本机构组成。

素质目标

提高查阅资料的能力；
提高安全意识、规范意识和创新意识；
树立精益求精的工匠精神；
提高团队协作能力；
弘扬劳动精神。

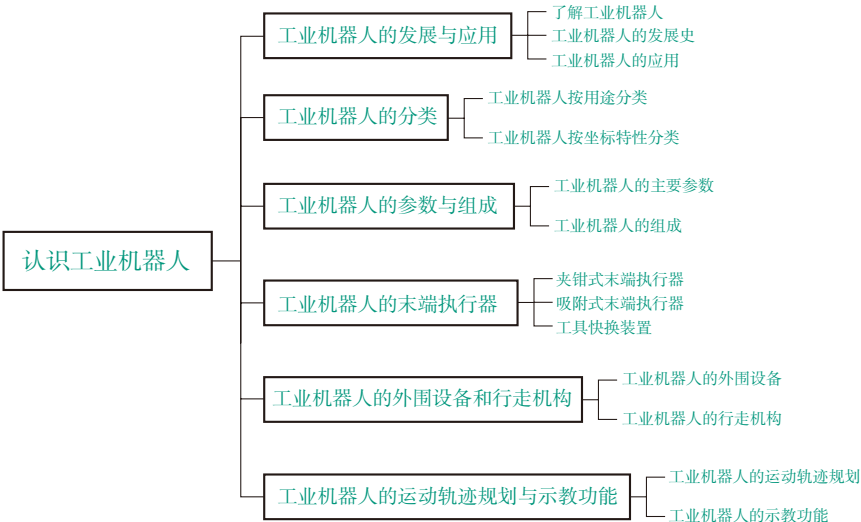
重点难点

工业机器人的组成、分类及相关技术参数；工业机器人的行走机构组成及运动轨迹规划。

学习指导

工业机器人是指用来搬运材料、零部件、工具等，具有可再编程序和多功能机械手的，能通过调用不同的程序来完成各种工作任务的一种特种装置。搞清楚工业机器人的组成、分类、性能参数、应用场合等，是手动运行工业机器人的基础。

知识导图



课程思政

中国制造——新松机器人的发展

随着信息化、智能化时代的到来，与机器人有关的话题成为各国关注的焦点。目前，我国机器人技术的发展愈加成熟，以沈阳新松公司为代表的机器人研发已经名列世界前列。



任务一

工业机器人的发展与应用

一个国家机器人的制造及应用水平，代表了一个国家制造业的水平，发展机器人产业应上升到国家战略高度。广泛应用机器人是我国从制造业大国走向制造业强国的重要手段和途径。广泛采用工业机器人，不仅可以提高产品的质量与产量，而且对保障人身安全、改善劳动环境、减轻劳动强度、提高劳动生产率、节约原材料消耗以及降低生产成本，有着十分重要的意义。

 必备知识

一、了解工业机器人

(一) 工业机器人概述

机器人是什么？提到机器人，很多人会想到在影视作品或小说中刻画的机器人形象。事实上，机器人是集机械、电子、控制、传感、人工智能等多学科先进技术于一体的自动化装备。自 1956 年机器人产业诞生后，经过多年的发展，机器人已经被广泛应用于装备制造、新材料、生物医药、智慧新能源等高新产业。

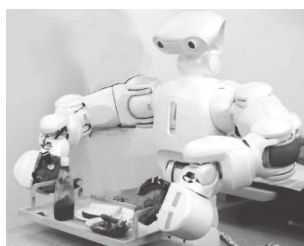
在当代工业中，机器人通常是指能自动执行任务的人造机器装置，用以协助或取代人类工作。它们一般是机电装置，由计算机程序或是电子电路控制。

机器人可以代替人在危险、恶劣的环境下作业，可以代替人完成工作质量要求高或人类难以长时间坚持的作业以及辅助完成空间与深海作业、精密作业等。

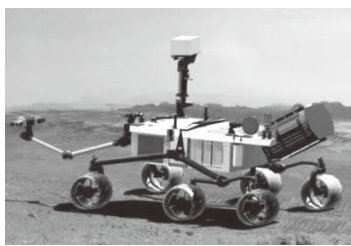
机器人按照应用环境划分，可分为特种机器人和工业机器人。特种机器人是指除工业机器人之外，运用于非制造环境下的服务型与仿人型机器人。特种机器人在服务、空间及海洋探索、娱乐、农业生产、军事和医疗等领域都具有应用前景。针对各个领域的应用特点，科研人员研制出各种类型的特种机器人，比如服务机器人、空间机器人、水下机器人、农业机器人、军用机器人、医疗机器人等，如图 1-1 所示。

服务机器人可以用于家庭生活类服务及公共场所类服务；空间机器人可以用于星际探索、空间开发；水下机器人可以帮助打捞沉船、铺设电缆；农业机器人可以耕耘播种、施肥除虫；军用机器人可以侦察作战、排雷排弹；医疗机器人可以辅助手术、诊疗保健。特种机器人凭借其对环境信息的获取和智能决策能力，能够适应环境进行自主

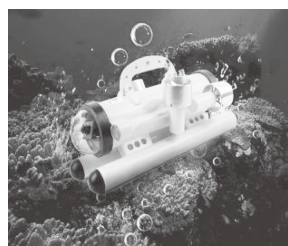




(a) 服务机器人



(b) 空间机器人



(c) 水下机器人



(d) 农业机器人



(e) 军用机器人



(f) 医疗机器人

图 1-1 特种机器人

工作。特种机器人更强调感知、决策和复杂行动能力，符合各应用领域的特殊要求，能使机器人技术呈现出更加广阔的发展空间。

工业机器人应用于制造业，作为生产自动化设备而存在，在自动化生产线上承担搬运、码垛、焊接和装配等工作。工业机器人是机器人家族中重要的一员，也是目前在技术上发展最成熟、应用最广泛的一类机器人。

(二) 工业机器人的定义

国际上对工业机器人的定义有很多。美国机器人工业协会 (Robotic Industries Association, RIA) 对工业机器人的定义是：工业机器人是指用来搬运材料、零部件、工具等可再编程序的多功能机械手，或是通过调用不同的程序来完成各种工作任务的特种装置。日本工业机器人协会 (Japan Industrial Robot Association, JIRA) 对工业机器人的定义是：工业机器人是一种装备有记忆装置和末端执行器的，能够转动并通过自动完成各种移动来代替人类劳动的通用机器。

我国国家标准《机器人与机器人装备 词汇》(GB/T 12643—2013) 将工业机器人定义为一种自动控制、可重复编程、多用途的操作机。国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 将工业机器人定义为一种自动的、位置可控的、具有编程能力的多功能机械手，这种机械手具有几个轴，可对三个或三个以上轴进行编程。能够借助于可编程的操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置，用以执行各种任务。

(三) 工业机器人的特点

1. 可编程性

工业机器人的可编程性是指可以根据不同的工作需求和环境变化，通过编程来修改机器人的动作序列和参数，以实现不同的工作任务。这种特性使得工业机器人在柔



性制造系统中占据重要地位，能够应对小批量、多品种的生产需求。

2. 拟人化

工业机器人在机械结构方面与人类类似，其行走机构、腰部、大臂、小臂、手腕、手爪等部分均由计算机控制。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、语音功能传感器等。

3. 通用性

除了专门设计的专用工业机器人外，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，更换工业机器人的手部末端执行器（手爪、工具等，见图 1-2），便可执行不同的作业任务。

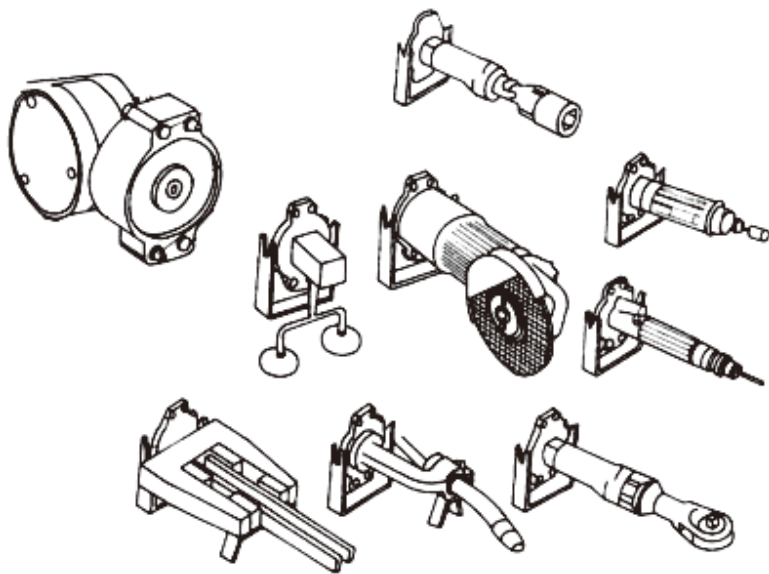


图 1-2 多种多样的末端执行器

4. 机电一体化

智能机器人不仅具有获取外部环境信息的各种传感器，还具有记忆能力、语言理解能力、图像识别能力、推理判断能力等人工智能，这些都与微电子技术以及计算机技术的应用密切相关。

工业机器人与自动化成套技术集成了多个学科，涉及多个技术领域，包括工业机器人控制技术、机器人动力学及仿真、机器人构建有限元分析、激光加工技术、模块化程序设计、智能测量、建模加工一体化、工厂自动化及精细物流等先进制造技术。这些技术具有综合性强的特点。

二、工业机器人的发展史

（一）工业机器人的诞生

“机器人”（robot）这一术语是 1921 年由捷克著名剧作家、科幻文学家、童话



寓言家卡雷尔·恰佩克(Karel Čapek)首创的,一直沿用至今。不过,人类对于机器人的梦想已存在数千年,如古希腊古罗马神话中冶炼之神用黄金打造的机械仆人、希腊神话“阿鲁哥探险船”中的青铜巨人泰洛斯、犹太传说中的泥土巨人、我国古代《列子》中能歌善舞的木偶“倡者”和三国时期诸葛亮的“木牛流马”等传说。到了现代,从机器人频繁出现在科幻小说和电影中我们就不难看出人类对于机器人的向往。

科技的进步使机器人不仅停留在科幻故事里。1959年,美国发明家英格伯格与德沃尔制造了世界上第一台工业机器人尤尼梅特(Unimate),这个外形类似坦克炮塔的机器人可实现回转、伸缩、俯仰等动作,它被称为现代机器人的开端。之后,不同功能的工业机器人相继出现并且被应用在不同的领域。

(二) 工业机器人的发展现状

2005年,日本安川机器人公司推出能够从事此前由人类完成的组装及搬运作业的产业机器人MOTOMAN-DA20和MOTOMAN-IA20。MOTOMAN-DA20机器人是一款在仿造人类上半身的构造物上配备2个六轴驱动臂型的双臂机器人,其上半身构造物本身具有绕垂直轴旋转的关节,尺寸与成年男性大体相同,可直接配置在此前人类进行作业的场所。其单臂负重能力为20 kg,双臂最多可搬运40 kg的工件。

2010年,意大利柯马公司宣布SMART5 PAL码垛机器人研制成功。它专为码垛作业设计,采用当时全新的控制单元C5G和无线示教,有效载荷范围为180~260 kg,作业半径达3.1 m,同时共享机器人家族的中空腕技术和机械配置选项。同年,德国库卡公司推出机器人产品——弧焊机KR 5 arc HW,其机械臂和机械手上有一个50 mm宽的通孔,穿孔敷设不仅可以避免气体软管组件受到机械性损伤,而且可以防止软管在机器人改变方向时随意甩动。这一设计既可用于敷设抗扭转软管组件,也可用于无限转动的气体软管组件。对用户来说,这不仅意味着提高了构件的可接近性,实现了对整套软管的最佳保护,还使离线编程也得到了简化。

日本发那科公司也推出过Robot M-3iA装配机器人。Robot M-3iA装配机器人可采用四轴或六轴模式,具有独特的平行连接结构,并且还具备轻巧便携的特点,承重极限达6 kg。四轴模式下的Robot M-3iA装配机器人具备一个单轴手腕,可用于简单快速的拾取操作,工作速度可达4000(°)/s。另外,手腕的中空设计使电缆可在内部缠绕,大大降低了电缆的损耗。

(三) 工业机器人的发展趋势

工业机器人技术作为20世纪人类最伟大的发明之一,自问世以来,从简单工业机器人到智能工业机器人,其技术发展已取得长足进步。从近几年推出的产品来看,工业机器人技术的发展趋势主要有以下六点。



1. 高性能

工业机器人技术正向高速度、高精度、高可靠性、便于操作和维修等高性能方向发展,且单机价格还在不断下降。

2. 机械结构向模块化、可重构化发展

目前,工业机器人关节模块中的伺服电动机、减速机、检测系统已实现三位一体化。关节模块、连杆模块等可通过各种方式组合构造机器人整机。国外已有模块化装配的工业机器人产品问世。

3. 本体结构更新加快

随着技术的进步,工业机器人本体结构近10年来发展变化很快。以安川MOTOMAN机器人产品为例,早期L系列机器人的产品生命周期为10年,随后的K系列机器人为5年,到了SK系列机器人则只有3年。

4. 控制技术的开放化、PC化和网络化

控制系统向基于计算机(personal computer, PC)的开放型控制器方向发展,逐渐标准化、网络化,提高了器件集成度,并缩小了控制柜体积。

5. 多传感器融合技术的实用化

工业机器人传感器的作用日益重要,除了传统的位置、速度、加速度传感器以外,装配、焊接机器人还应用了视觉、力觉等传感器,而遥控机器人则采用视觉、声觉、力觉、触觉等多传感器的融合技术来进行环境建模及决策控制。多传感器融合配置技术在产品化系统中已有成熟的应用。

6. 多智能体协调控制技术

多智能体协调控制技术是目前工业机器人研究的一个崭新领域。这个领域主要研究多机器人协作与通信、多智能体的群体体系结构、智能体相互间的通信与磋商机理、人工智能的感知与学习方法、建模和规划、群体行为控制等方面。

三、工业机器人的应用

(一) 工业机器人的工业应用

工业机器人是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种智能化、自动化可编程设备,已在越来越多的领域得到了应用。工业机器人在工业生产中能代替人工完成某些单调、工作时间长、危险、恶劣环境下的作业,例如在冲压、压力铸造、热处理、焊接、涂装、塑料制品成型、机械加工和简单装配等工序上,以及在原子能工业等的研究中,完成对人体有害物料的搬运工作或工艺操作,如图1-3所示。工业机器人广泛应用于汽车制造业、电子电气行业、铸造和锻造行业、食品行业、玻璃行业、建筑行业等。





(a) 焊接



(b) 搬运



(c) 装配



(d) 组装



(e) 打磨



(f) 检测



(g) 码垛



(h) 机械加工

图 1-3 工业机器人典型应用

(二) 工业机器人的国内市场状况

我国是工业机器人应用第一大国,近年来,我国工业机器人行业迅猛发展,产量持续增长。数据显示,2020 年我国工业机器人产量达 23.71 万套,同比增长 19.1%;2021 年 1—4 月我国工业机器人产量达 13.64 万套,同比增长 73.2%。

工业机器人的下游应用领域主要包括汽车、通用工业,计算机类、通信类和消费类电子产品,金属加工、家用电器、食品医疗、塑料加工等。其中,汽车行业作为自动化应用最早的行业,是工业机器人行业的主要下游市场。目前,汽车行业位居工业机器人的第一应用领域,占比达到 35%。不过值得注意的是,除金属加工以外的其他行业占比由 27% 提升至 32%,行业总体容量增长的同时需求分布呈逐渐多元化的趋势。

自我检验

一、填空题

1. 《机器人与机器人装备 词汇》将工业机器人定义为一种_____、_____、_____的操作机。
2. 工业机器人的特点有_____、_____、_____和_____。

二、简答题

工业机器人可以应用在哪些场合?



在线测试



任务二

工业机器人的分类

工业机器人可以按照用途、坐标特性等进行分类。通过对工业机器人进行分类，可以迅速判断工业机器人的适用场合。

必备知识

一、工业机器人按用途分类

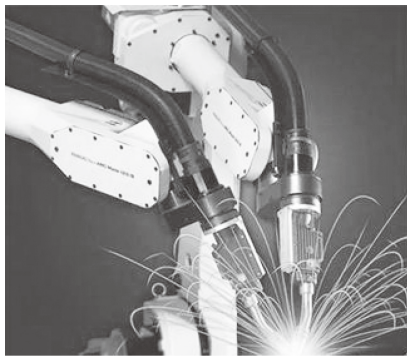
工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人，按用途可以分为焊接机器人、装配机器人、喷涂机器人、搬运机器人、协助机器人等。

(一) 焊接机器人

焊接机器人是从事焊接作业的工业机器人，可分为点焊机器人和弧焊机器人，如图 1-4 所示。



(a) 点焊机器人



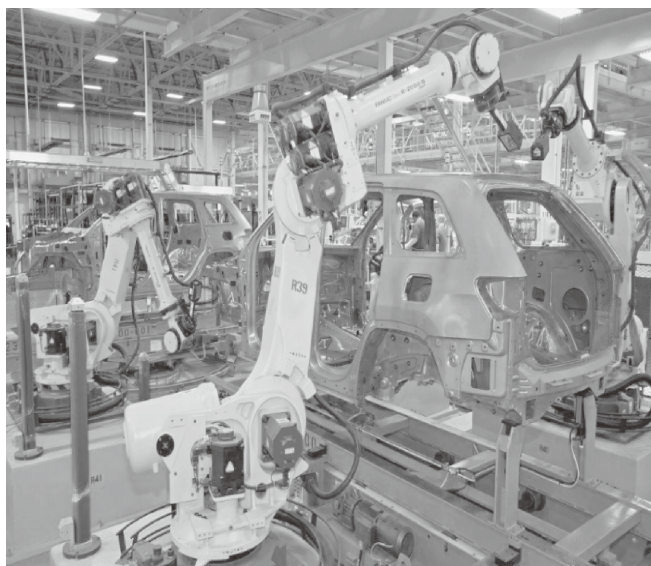
(b) 弧焊机器人

图 1-4 焊接机器人

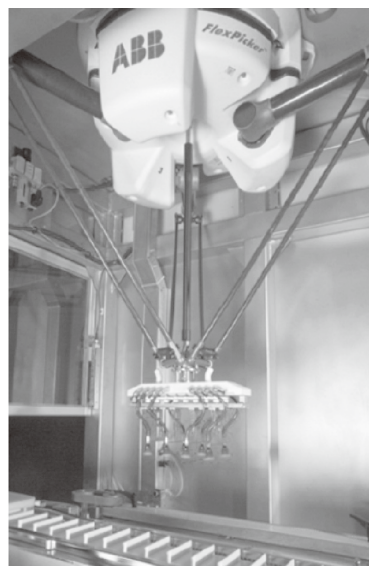
(二) 装配机器人

装配机器人(见图 1-5)可以完成生产线上一些零件的装配或拆卸工作，可分为可编程通用装配操作手(programmable universal manipulator for assembly, PUMA)机器人和水平多关节(selective compliance assembly robot arm, SCARA)机器人两种类型。这类机器人要有较高的位姿精度，手腕具有较大的柔性。目前大多用于机电产品的装配作业。





(a) PUMA机器人



(b) SCARA机器人

图 1-5 装配机器人

(三) 喷涂机器人

如图 1-6 所示, 喷涂机器人又称喷漆机器人, 是可进行自动喷漆或喷涂其他涂料的工业机器人。多用于喷漆生产线上, 重复位姿精度要求不高。但由于漆雾易燃, 喷涂机器人一般采用液压驱动或交流伺服电动机驱动。

(四) 搬运机器人

搬运作业是指用一种设备握持工件, 将工件从一个加工位置移到另一个加工位置。搬运机器人如图 1-7 所示, 是可以进行自动化搬运作业的工业机器人, 用途很广, 一般只需点位控制, 被搬运零件无严格的运动轨迹要求, 只要求始点和终点位姿准确即可。如机床上用的上下料机器人, 工件堆垛机器人, 注塑机配套用的机械手等。



图 1-6 喷涂机器人

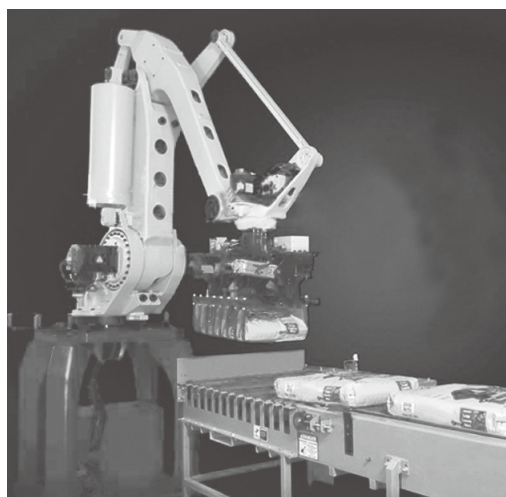


图 1-7 搬运机器人



(五) 协助机器人

在传统的工业机器人逐渐取代单调、重复性高、危险性强的工作之时，协作机器人（见图1-8）也慢慢渗入到各个工业领域，与人共同工作。这将引领一个全新的机器人與人协同工作时代的来临，随着工业自动化的发展，我们发现需要协助型的工业机器人配合人来完成工作任务。这样比工业机器人的全自动化工作站具有更好的柔性和成本优势。



图 1-8 协助机器人

二、工业机器人按坐标特性分类

工业机器人的机械配置形式多种多样，典型机器人的机构运动特性是用其坐标特性来描述的，一般有直角坐标、柱面坐标、球面坐标及多关节，对应直角坐标机器人、圆柱坐标机器人、球面坐标机器人和关节型机器人等。下面将介绍四种典型结构特点的机器人。

(一) 直角坐标机器人

直角坐标机器人又叫笛卡尔坐标机器人，如图1-9所示，是以XYZ直角坐标系为基本数学模型，一般为2~3个运动自由度，每个运动自由度之间的空间夹角为直角。直角坐标机器人多以伺服电动机或步进电动机驱动的单轴机械臂为基本工作单元，以滚珠丝杠、同步传动带、齿轮齿条等常用的传动方式架构起来，使各运动自由度之间成空间直角关系，能够实现自动控制和可重复编程。



图 1-9 直角坐标机器人

大型的直角坐标机器人也称桁架机器人或龙门式机器人，它们一般在需要精确移动以及负载较大的场合使用，这类机器人常常吊装在顶板上。直角坐标机器人因操作工具的不同功能也不同，可用于恶劣的环境，可长期工作，便于操作维修。

(二) 圆柱坐标机器人

圆柱坐标机器人以 Q 、 Z 和 r 为参数构成坐标系。其中，SCARA机器人又称为水平多关节机器人，如图1-10所示，就是圆柱坐标机器人



图 1-10 SCARA 机器人



的一种形式。SCARA 机器人有 3 个旋转关节，其轴线相互平行，在平面内进行定位和定向，还有一个移动关节，用于完成末端件在垂直于平面的运动。SCARA 机器人具有精度高、动作范围较大、坐标计算简单、结构轻便、响应速度快的优点，但是负载较小，其主要用于电子、分拣等领域。

SCARA 系统在 X 、 Y 轴方向上具有顺从性，而在 Z 轴方向具有良好的刚度，此特性特别适合装配工作，SCARA 的另一个特点是其串接的两杆结构类似人的手臂，可以伸进有限空间中作业，然后收回，其适合于搬动和取放物件（如集成电路板）等。

（三）球面坐标机器人

球面坐标机器人（见图 1-11）的运动和控制方式基于球面坐标系，其运动通常涉及两个旋转单元和一个直线移动单元，它们共同作用以实现多自由度的运动。这种机器人的设计允许其在三维空间中灵活移动，类似于人类手臂的运动方式。

球面坐标机器人广泛应用于需要复杂空间操作的场合，例如喷漆机器人等。它们能够在空间中精确定位和定向，以完成特定的任务。

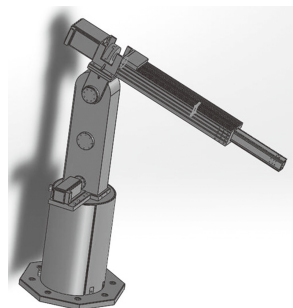


图 1-11 球面坐标机器人

（四）关节型机器人

关节型机器人也称为关节手臂机器人，是当今工业领域中最常见的工业机器人的形态之一，适用于诸多工业领域的机械自动化作业。它拥有五六个旋转轴，类似于人类的手臂。应用领域有装货、卸货、喷漆、表面处理、测试、测量、弧焊、点焊、包装、装配、切削机床、固定、特种装配、锻造、铸造等。

关节型机器人一般有很高的自由度，适用于大多数场合的轨迹或角度。它支持自由编程，能完成自动化的工作，提高生产效率，可控的错误率让它能代替很多不适合人力完成、有害身体健康的复杂工作，比如汽车外壳点焊、金属部件打磨等。

自我检验

一、填空题

1. 焊接机器人：这是目前使用最多的一类机器人，它又可分为_____和_____两类。
2. 并联机器人从运动形式来看，并联机构可分为_____和_____。

二、简答题

按照坐标特性，工业机器人可分为哪几类？



在线测试



任务三

工业机器人的参数与组成

在认识了不同类型的工业机器人的基础上，学习工业机器人的主要技术参数，说明实训室的工业机器人适用的作业范围和要求。

必备知识

一、工业机器人的主要参数

现在已出现的工业机器人在功能和外观上虽有不同，但所有的机器人都有其适用的作业范围和要求。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、工作范围、最大工作速度、承载能力等。

(一) 自由度

自由度是指机器人所具有的独立坐标轴运动的数目，不包括末端执行器的开合自由度。一般情况下，机器人的一个关节对应一个自由度，所以自由度与关节的数目是等同的。自由度是表示机器人动作灵活程度的参数，自由度越多，机器人越灵活，但结构也越复杂、控制难度也越大，所以机器人的自由度要根据其用途设计，一般为3~6个，如图1-12所示。

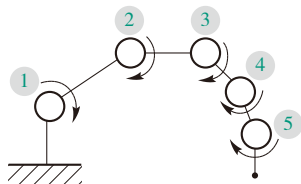


图 1-12 自由度示意图

大于6个的自由度称为冗余自由度。冗余自由度增加了机器人的灵活性，可方便机器人避开障碍物和改善机器人的动力性能。人类的手臂（大臂、小臂、手腕）共有7个自由度，所以工作起来很灵巧，可回避障碍物，并可从不同的方向到达同一目标位置。

(二) 定位精度和重复定位精度

精度是一个位置量相对于其参照系的绝对度量，指机器人手部实际到达位置与所需要到达的理想位置之间的差距，机器人的精度取决于机械精度与电气精度。精度包括定位精度和重复定位精度两种精度指标，如图1-13所示， A 为理想位置， B 为实际到达位置， h 为两者之间的差距。



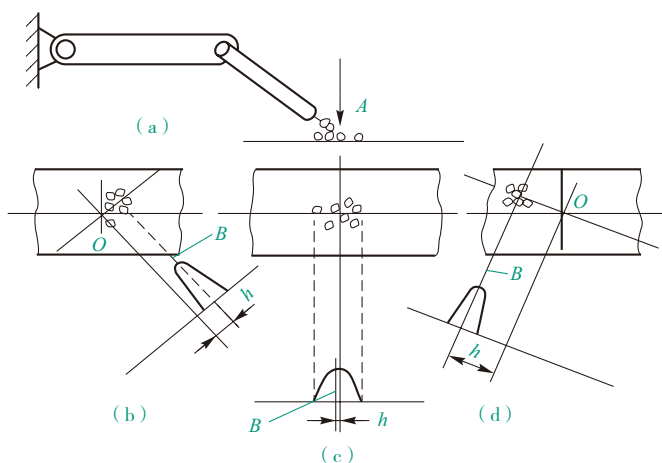


图 1-13 工业机器人定位精度和重复定位精度

(a) 重复定位精度的测定; (b) 合理定位精度, 良好的重复定位精度;
(c) 良好定位精度, 很差的重复定位精度; (d) 很差的定位精度, 良好的重复定位精度

定位精度: 指机器人末端执行器的实际位置与目标位置之间的偏差。典型的工业机器人定位精度一般为 $\pm(0.02 \sim 5) \text{ mm}$ 。

重复定位精度: 指机器人重复到达某一目标位置的差异程度。它是衡量一系列误差值的密集程度, 即重复度。

(三) 分辨率

机器人的分辨率是指每一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分为编程分辨率和控制分辨率两种。

编程分辨率: 指控制程序中可以设定的最小距离, 又称为基准分辨率。例如, 当机器人的关节电动机转动 0.1° 时, 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: 指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时电动机所转过的角度。

精度和分辨率不一定相关。一台设备的定位精度是指命令所设定的运动位置与该设备执行命令后能够达到的运动位置之间的差距, 分辨率则反映实际需要的运动位置和命令所能够设定的位置之间的差距。定位精度、重复定位精度和分辨率的关系如图 1-14 所示。

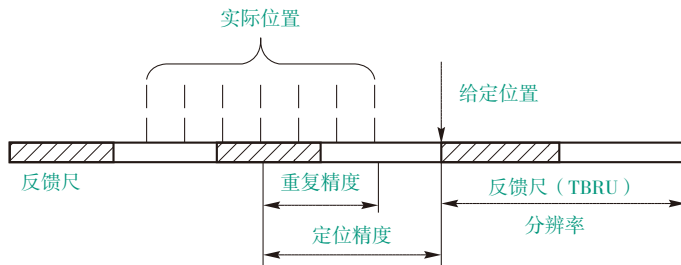


图 1-14 定位精度、重复定位精度和分辨率的关系



(四) 工作范围

工作范围也叫工作区域,是指机器人手臂末端或手腕中心所能到达的所有点的集合。工作范围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。比如库卡-KR 500-R2830 机器人的工作范围如图 1-15 所示。

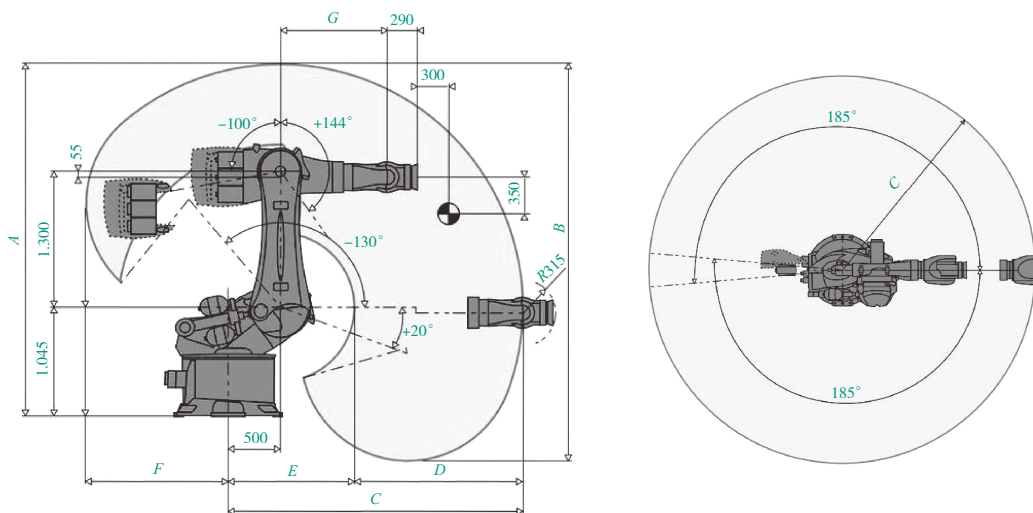


图 1-15 库卡-KR 500-R2830 机器人的工作范围

(五) 最大工作速度

最大工作速度,有的厂家将其设定为工业机器人主要自由度上最大的稳定速度,有的厂家将其设定为手臂末端最大的合成速度,这些通常都在技术参数中加以说明。很明显,工作速度越快,工作效率越高。

(六) 承载能力

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

二、工业机器人的组成

虽然工业机器人分为很多种,工作环境和时间也不一样,但是它们的基本组成是一样的。从体系结构来看,一台通用的工业机器人可分为机器人本体、控制器和控制系统、示教器这三大部分。

(一) 机器人本体

机器人本体也称操作机,它是用来完成各种作业任务的执行机构,主要由机械臂、



驱动与传动装置以及传感器三大部分组成。大部分工业机器人为关节型工业机器人，如图 1-16 所示，关节型机器人的机械臂是由关节连在一起的许多机械连杆的集合体。它本质上是一个拟人手臂的空间开链式机构，一端固定在基座上，另一端可自由运动。关节通常是移动关节和旋转关节，移动关节仅允许连杆做直线移动，旋转关节仅允许连杆之间做旋转运动。

1. 机械臂

(1) 基座：机器人的基础部分，起支撑作用。整个执行机构和驱动装置都安装在基座上，固定式机器人的基座直接连接在地面基础上，移动式机器人的基座则安装在移动机构上。基座可分为有轨和无轨两种。

(2) 腰部：机器人手臂的支撑部分。根据执行机构坐标系的不同，腰部可以在基座上转动，也可以和基座制成一体，有的腰部也可以通过导杆或导槽在基座上移动，从而增大工作空间。

(3) 手臂：连接机身和手腕的部分，由操作机的动力关节和连接杆件等构成。它是执行机构中的主要运动部件，也称主轴，主要用于改变手腕和末端执行器的空间位置，满足机器人的作业空间，并将各种载荷传递到基座。

(4) 腕部：连接末端执行器和手臂的部分，将作业载荷传递到臂部，也称次轴，主要用于改变末端执行器的空间姿态。

2. 驱动与传动装置

工业机器人在运动时，每个关节的运动都是通过驱动装置和传动机构实现的，驱动装置是向机器人各机械臂提供动力的装置。不同的机器人，驱动时采用的动力源不同，驱动系统的传动方式也不同，通常有液压式、气压式、电力式、机械式。电力驱动是现代工业用得最多的一种。

驱动机器人所用的电动机一般为步进电动机或伺服电动机，目前也有部分机器人使用力矩电动机，但是成本较高，操作也复杂。驱动装置的受控运动必须通过传动单元带动机械臂产生运动，以保证末端执行器精确地到达作业所要求的位置，实现所要求的姿态和运动。

3. 传感器

传感器是用来检测作业对象及外界环境的，在工业机器人上安装各类传感器。这些传感器可以帮助机器人工作，可以大大改善机器人的工作状况和工作质量，使其能够高效地完成复杂的任务。

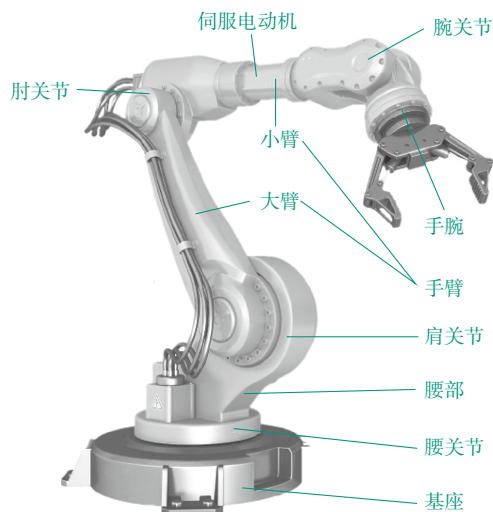


图 1-16 关节型工业机器人的基本构造



(二) 控制器和控制系统

控制系统是工业机器人的神经中枢和控制中心，由计算机硬件、软件，以及一些专用电路、控制器、驱动器等构成。控制器(见图 1-17)主要用来处理工作的全部信息，它根据工程师编写的指令以及传感器得到的信息来控制机器人本体完成一定的动作。控制系统的软件可以更方便地建立、编辑机器人控制程序。



图 1-17 控制器

(三) 示教器

示教器是人机交互的一个接口，也称示教盒或示教编程器，主要是由液晶屏和可触摸操作按键组成，如图 1-18 所示。控制者在操作时只需要手持示教器，通过按键把信号传送到控制柜的存储器中，就能实现对机器人的控制。



图 1-18 示教器

示教器上设有用于对机器人进行示教和编程所需的操作按键和按钮。一般情况下，不同厂家设计的示教器外观不同，但是示教器中都包含中央液晶显示区、功能按键区、急停按钮和出入线端口。

自我检验

一、填空题

1. 工业机器人通常由_____、_____、_____三部分组成。
2. 执行机构的手臂又称臂部，用以连接_____和_____，通常由_____臂杆(大臂和小臂)组成，用以带动腕部运动。
3. 工业机器人的驱动与传动装置包括_____和_____两部分，它们通常与执行机构连成机器人本体。
4. _____是各工业机器人制造商在产品供货时所提供的技术数据。
5. 描述物体运动所需要的独立坐标数，叫作_____。
6. 机器人在规定的性能范围内，机械接口处能承受的最大负载量(包括手部)称为_____。

二、简答题

工业机器人的基本组成及其技术参数有哪些？



在线测试



任务四

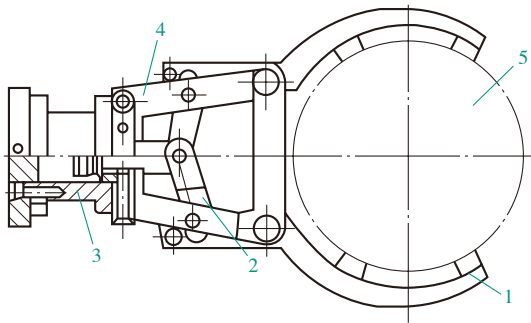
工业机器人的末端执行器

不同的工业机器人构型决定了它的应用场合：有的适合搬运，有的适合分拣。同样，不同的工业机器人末端执行器，适合的场合以及完成的任务也不同。末端执行器是机器人直接用于抓取、握紧或吸附工件或夹持专用工具（如喷枪、扳手、焊接工具）进行操作的部件，它具有模仿人手动作的功能，并安装于机器人手臂的前端。末端执行器大致可以分为：夹钳式末端执行器、吸附式末端执行器、工具快换装置、仿人机器人末端执行器。

必备知识

一、夹钳式末端执行器

夹钳式末端执行器通常也称为夹钳式取料手，是工业机器人最常用的一种末端执行器形式，在装配流水线上应用较为广泛。它一般由手指（手爪）、驱动机构、传动机构、连接与支承元件组成，如图 1-19 所示。夹钳式末端执行器的工作原理类似于常用的手钳，通过手爪的开闭动作实现对物体的夹持。



1—手指；2—传动机构；3—驱动机构；4—连接与支承元件；5—工件

图 1-19 夹钳式末端执行器

（一）手指

手指是直接于工件接触的构件，通过手指的张开和闭合来实现工件的松开和夹紧。指端是手指上直接与工件接触的部位，按形状可分为“V”形指、平面指、尖指和特



形指，如图 1-20 所示。

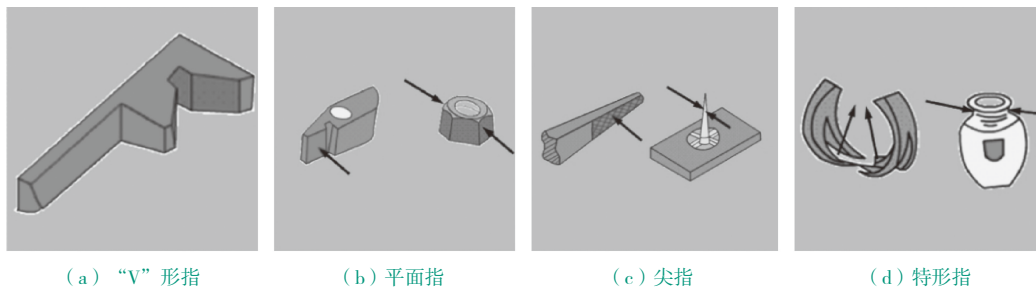


图 1-20 手指类型

根据手指的多少，夹钳式末端执行器可分为二指式和三指式。

根据手指的运动方向，夹钳式末端执行器可分为移动式 and 回转式。

(二) 指面形式

光滑指面：平整光滑，用来夹持已加工表面，避免已加工表面受损。

齿形指面：刻有齿纹可增加夹持工件的摩擦力，多用来夹持表面粗糙的毛坯或半成品。

柔性指面：内镶橡胶、泡沫、石棉等物，一般用于夹持已加工表面、炽热件，也适用于夹持薄壁件和脆性工件。

(三) 夹持方式

夹持式末端执行器通常是由两个或更多的手指组成，通过机器人控制器控制手指的开合来抓取工件或物体，可分为内撑式和外夹式两种夹持方式。

(四) 驱动装置

驱动装置是向传动机构提供动力的装置。执行器通常采用气动装置、液动装置、电动装置和电磁驱动装置来驱动。

(五) 传动机构

驱动源的驱动力通过传动机构驱动手指开合并产生夹紧力。按手指夹持工件时运动方式的不同，传动机构可分为回转型和平移型。

二、吸附式末端执行器

吸附式末端执行器靠吸附力取料，适用于大平面、易碎（如玻璃、磁盘）、微小的物体，因此使用面较广。根据吸附力的不同，其可分为气吸附式和磁吸附式两种。

(一) 气吸附式末端执行器

气吸附式末端执行器由吸盘、吸盘架和气路组成，气吸附式末端执行器按形成压



力差的方法分类,可分为真空吸附、气流负压吸附、挤压排气负气压吸附等。

工作原理:利用轻性塑胶或塑料制成的皮碗,通过抽空与物体接触平面的密封型腔的空气,产生负压真空吸力来抓取和搬运物体。

优点:与夹钳式末端执行器相比结构简单、重量轻、吸附力分布均匀,对于薄片状物体的搬运更具有优越性。

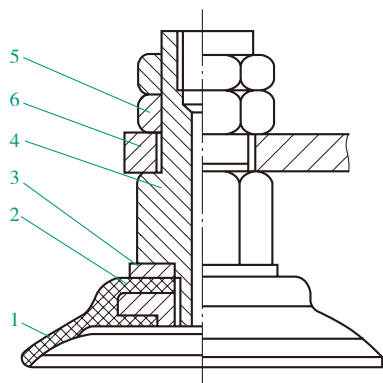
适用场合:广泛应用于非金属材料或不可生磁材料的吸附,但要求物体表面较为平整、光滑、无孔、无凹槽。

1. 真空吸附末端执行器

真空吸附末端执行器(见图1-21)利用真空泵产生的真空,真空度较高。取料时,蝶形橡胶吸盘与物体表面接触,橡胶吸盘在边缘既起到密封作用,又起到缓冲作用,然后真空抽气,吸盘内腔形成真空,吸取物料。放料时,管路接通大气,失去真空,物体放下。

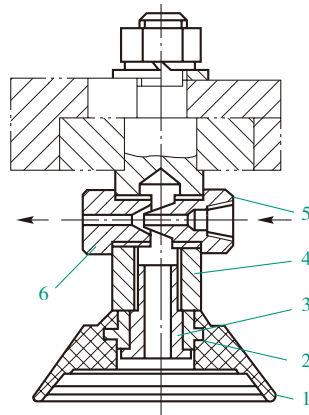
2. 气流负压吸附末端执行器

气流负压吸附末端执行器(见图1-22)利用流体力学的原理,当需要取物时,压缩空气高速流经喷嘴,其出口处的气压低于吸盘腔内的气压,于是腔内的气体被高速气流带走而形成负压,从而完成取物动作;当需要释放时,切断压缩空气即可。



1—蝶形橡胶吸盘; 2—固定环; 3—垫片;
4—支承杆; 5—螺母; 6—基板

图 1-21 真空吸附末端执行器



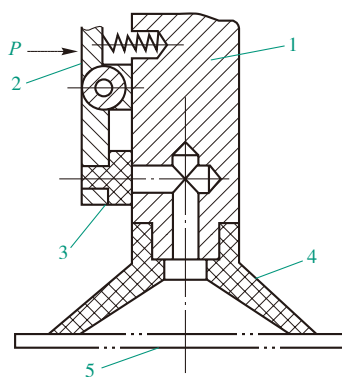
1—橡胶吸盘; 2—心套; 3—通气螺钉;
4—支承杆; 5—喷嘴; 6—喷嘴套

图 1-22 气流负压吸附末端执行器

3. 挤压排气负气压吸附末端执行器

挤压排气负气压吸附末端执行器(见图1-23)取料时末端执行器先向下,吸盘压向工件,橡胶吸盘形变,将吸盘内的空气挤出;之后,手部向上提升,压力去除,橡胶吸盘恢复弹性形变使吸盘内腔形成负压,将工件牢牢吸住,机械手即可进行工件搬运。到达目标位置后要释放工件时,用碰撞力或电磁力使压盖动作,从而使吸盘腔与大气联通而失去负压,破坏吸盘腔内的负压,释放工件。





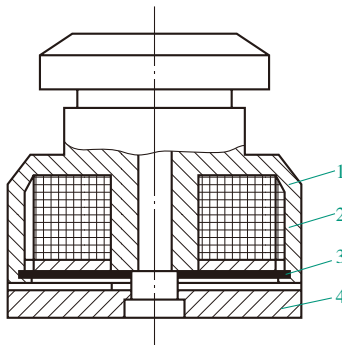
1—吸盘架；2—压盖；3—密封垫；4—橡胶吸盘；5—工件

图 1-23 挤压排气负压吸附末端执行器

（二）磁吸附式末端执行器

磁吸附式末端执行器是利用永久磁铁或电磁铁通电后产生的磁力来吸附工件的，其应用比较广泛，不会破坏被吸件的表面质量。

电磁铁吸附式末端执行器的结构如图 1-24 所示。在线圈通电的瞬间，由于空气间隙的存在，磁阻很大，线圈的电感和启动电流也很大，这时产生磁性吸力将工件吸住，一旦断电，磁性吸力消失，工件就松开。若采用永久磁铁作为吸盘，则必须借外力强行取下工件。



1—电磁吸盘；2—防尘盖；3—线圈；4—外壳体

图 1-24 电磁铁吸附式末端执行器

三、工具快换装置

（一）工具快换装置概述

机器人工具快换装置是一种用于机器人快速更换末端执行器的装置，可以在数秒内快速更换不同的末端执行器，如图 1-25 所示。机器人工具快换装置使机器人柔性更好、效率更高，因此被广泛应用于自动化行业的各个领域。



工具快换装置分为主侧和工具侧两部分，锁紧大多数使用气体锁紧。主侧安装在一台机器人的计算机数控（computer numerical control, CNC）设备或者其他结构上；工具侧安装在工具上，如抓具、焊枪或毛刺清理工具。

另外，工具快换装置在一些重要场合中能够为机器人提供备份工具，有效避免意外事件。相对于人工更换工具的数小时，工具快换装置自动更换备用工具在数秒钟内就能够完成。工具快换装置使生产线更换可以在数秒内完成，维护和修理工具也可以快速更换，大大降低了停工时间。工具快换装置通过使用1个以上的末端执行器，也可以使柔性增强；可以使用自动交换单一功能的末端执行器代替笨重复的多功能工装执行器。

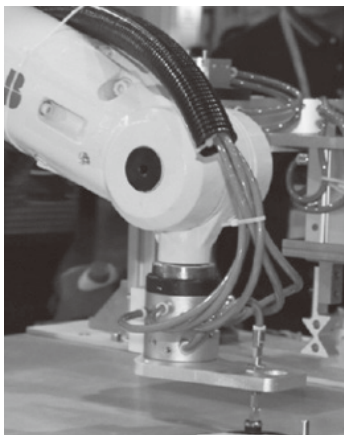


图 1-25 工具快换装置

（二）多工位换接装置

某些机器人的作业任务相对较为集中，需要换接一定量的末端执行器，但又不必配备数量较多的末端操作器库，这时就可以在机器人手腕上设置一个多工位换接装置。多工位换接装置就像数控加工中心的刀库一样，可以有棱锥形和棱柱形两种形式。

四、仿人机器人末端执行器

目前，大部分工业机器人的末端执行器只有两个手指，而且手指上一般没有关节，无法满足对复杂形状的物体的夹持和操作。而仿人机器人末端执行器（见图 1-26）能像人手一样进行各种复杂的作业（如装配作业）。仿人机器人末端执行器有两种，一种叫柔性手，另一种叫仿生多指灵巧手。



图 1-26 仿人机器人末端执行器

（一）柔性手

柔性手可对不同外形物体实施抓取，并使物体表面受力比较均匀，柔性手每个手指由多个关节串接而成，手指传动部分由牵引钢丝绳及摩擦滚轮组成，一侧为紧握状态，另一侧为放松状态，这样的结构可抓取具有凹凸外形的物体，且使物体受力均匀。

（二）仿生多指灵巧手

机器人末端执行器和腕部最完美的形式就是模仿人的多指灵巧手。仿生多指灵巧手有多个手指，每个手指有3个回转关节，每一个关节的自由度都是独立控制的，因此，仿生多指灵巧手几乎能模仿人的手指完成各种复杂的动作，如拧螺钉、弹钢琴（见图 1-27）、

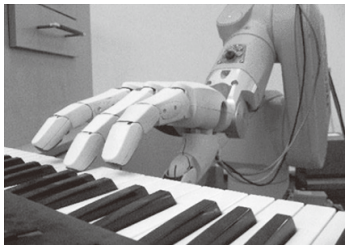


图 1-27 四指灵巧手弹钢琴



做礼仪手势等动作。

自我检验

一、填空题

1. 夹钳式末端执行器由_____、驱动机构、_____及连接与支承元件组成。
2. 夹钳式末端执行器是通过_____动作来实现对物体的夹持。
3. 夹钳式末端执行器传动机构根据手指开合的动作特点分为_____和_____。
4. 夹钳式末端执行器驱动装置按驱动方式不同，有液压、_____、_____和机械驱动。
5. 吸附式末端执行器是靠吸附力取料，根据吸附力的不同分为_____和_____两种。
6. 使用一台通用机器人，要在作业时能自动更换不同的末端操作器，就需要配置具有快速装卸功能的_____。
7. 工业机器人换接器能够实现机器人对_____的快速自动更换。
8. 多工位换接装置可以有_____和_____两种形式。

二、简答题

工业机器人末端执行器有哪些类型呢？各有什么特点？



任务五

工业机器人的外围设备和行走机构

工业机器人外围设备是指可以附加到机器人系统中用来加强机器人功能的设备。如定位装置、装卡装置、传送带等。行走机构是行走式机器人的重要执行部件，它一般由行走驱动装备、传动机构、位置检测元件、传感器、电缆及管路等组成。

必备知识

一、工业机器人的外围设备

灵活性高的工业机器人，外围设备一般比较简单，可适应产品型号变化；灵活性低的机器人，其外围设备一般比较复杂，如果需要更换外围设备，需要付出高额的资金。

工业机器人的外围设备必须与功能协调，要考虑定位方式、夹紧方式和动作速度等。

(一) 传送带

传送带的选择主要与传送能力、传送速度和传送带材质有关。

(二) 定位装置

机器人定位工作台上工件的位置对于机器人来说非常重要。多数机器人没有检测操作位置的功能，而是以坐标系来定位，这样定位装置就很重要。定位装置最重要的参数是定位精度，定位精度要求与任务相适应。

(三) 装卡装置

装卡装置是工业机器人常用的外围设备，其主要要求包括刚度好、不破坏工件、不阻挡机器人操作。

(四) 传感器

工业机器人根据不同的作业内容选择不同的传感器，功能是选择传感器最重要的因素，其余因素还有安装位置、大小、精度等。



(五) 焊接电源

焊接电源是焊接机器人的重要外围设备，其性能参数直接关乎焊接的作业效果。焊接电源体积较大，因此一般距离机器人较远。

(六) 执行末端

执行末端既可以算作机器人本体，也可以算作外围设备，常见的执行末端有弧焊焊枪、点焊焊枪等。

二、工业机器人的行走机构

一方面，工业机器人的行走机构支承机器人的机身、臂部和手部，因而必须具有足够的刚度和稳定性；另一方面，还需根据作业任务的要求，实现机器人在更广阔的空间内的运动。行走机构根据运动轨迹分为固定轨迹式行走机构和无固定轨迹式行走机构。

(一) 固定轨迹式行走机构

固定轨迹式行走机构（见图 1-28）的机身底座安装在一个可移动的拖板座上，靠丝杠螺母驱动，整个机器人沿丝杆纵向移动。这类机器人除采用这种直线驱动方式外，有时也采用类似起重机梁的行走方式。这种机器人主要用在作业区域大的场合，比如大型设备装配、大面积喷涂等。

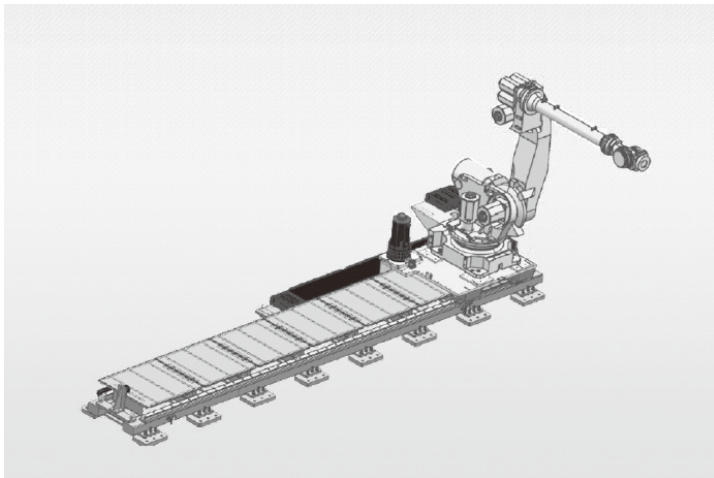


图 1-28 固定轨迹式行走机构

(二) 无固定轨迹式行走机构

一般而言，无固定轨迹式行走机构主要有车轮式行走机构、履带式行走机构、足式行走机构。此外，还有适用于各种特殊场合的步行式行走机构、蠕动式行走机构、混合式行走机构和蛇形行走机构等，下面主要介绍车轮式行走机构、履带式行走机构和足式行走机构。



1. 车轮式行走机构

车轮式行走机构是机器人中应用最多的一种行走机构，在相对平坦的地面上，用车轮移动的行走方式是相当优越的。车轮的形状或结构形式取决于地面的性质和车辆的承载能力。在轨道上运行的车轮多采用实心刚轮，室外路面行驶多采用充气轮胎，室内地面上可采用实心轮胎。

三轮车轮的配置和转向机构如图 1-29 所示。

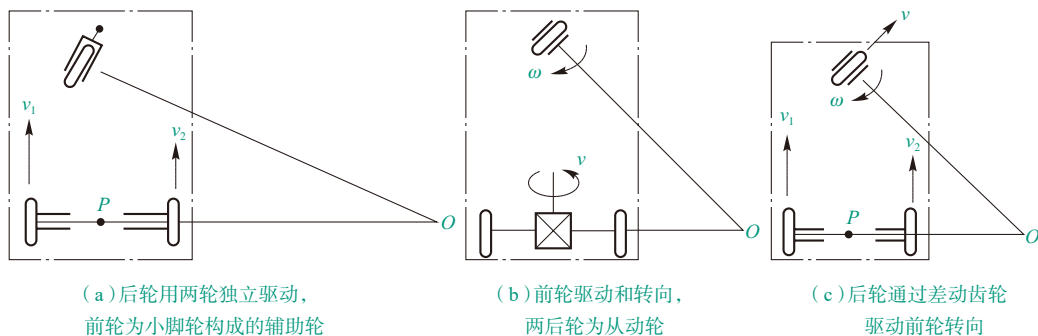


图 1-29 三轮车轮的配置和转向机构

2. 履带式行走机构

履带式行走机构适合在天然路面行走，是车轮式行走机构的扩展，履带本身起着给车轮连续铺路的作用。履带式行走机构由履带、驱动链轮、支承轮、托带轮和张紧轮（导向轮）组成，如图 1-30 所示。履带式行走机构的形状有很多种，主要有一字形、倒梯形等。

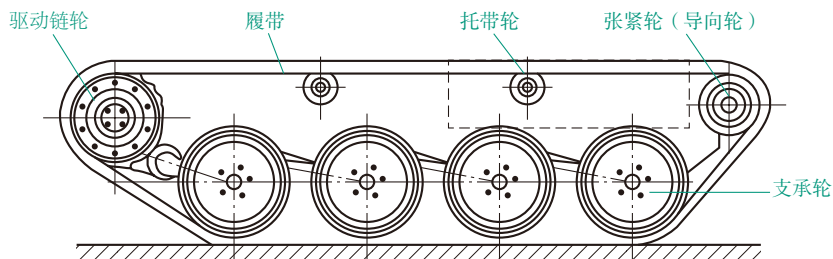


图 1-30 履带式行走机构

3. 足式行走机构

足式行走机构（见图 1-31）有很强的适应性，尤其在有障碍物的通道（如管道、台阶）或人类很难接近的工作场地更有优越性。足式行走机构在不平地面或松软地面上的运动速度较高，能耗较少。足的数目多，适合于重载和慢速运动。双足和四足具有最好的适应性和灵活性，接近人类和动物。

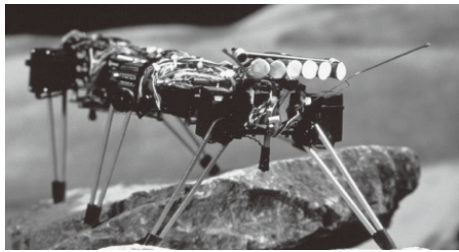


图 1-31 足式行走机构



自我检验

一、填空题

1. 工业机器人的行走机构分为_____行走机构和_____行走机构。
2. 固定轨迹式工业机器人一般采用_____驱动方式，有时也采用类似起重机的行走方式。
3. 固定轨迹式工业机器人的机身底座安装在一个可移动的托板座上，靠_____驱动。
4. 无固定轨迹式行走机构主要有_____行走机构、_____行走机构、_____行走机构。

二、简答题

简述工业机器人行走机构的工作原理。



任务六

工业机器人的运动轨迹规划与示教功能

在工业机器人执行作业任务之前,人们应该预先在关节空间或者作业空间规定它的操作顺序、行动步骤和作业进程,即对工业机器人进行运动轨迹规划。一个基本的机器人规划系统能自动生成一系列避免与障碍物发生碰撞的机器人动作轨迹。机器人的运动轨迹规划能力应力争最优,要求依据某个或某些优化准则(如工作代价最小、行走路线最短、行走时间最短等),在其工作空间中找到一条能避开障碍物的最优轨迹。

必备知识

一、工业机器人的运动轨迹规划

运动规划分为路径规划和轨迹生成两部分。路径规划是找到一系列要经过的路径点,这些点是空间中的一些位置或关节角度。轨迹生成是形成一系列连续运动的参考点,确定机器人怎么走、走多快。

如果机器人从A点运动到B点,再到C点,那么这中间的位姿序列就构成了一条路径,如图1-32所示。路径规划不考虑机器人位姿参数随时间变化的因素,而轨迹生成则强调时间,与机器人的速度和加速度相关,比如机器人抵达B点和C点的时间不同,则相应的轨迹也不同。

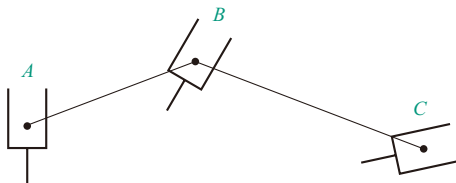


图 1-32 路径和轨迹

机器人的轨迹规划是指根据机器人作业任务的要求(作业规划),对机器人末端执行器在工作过程中位姿变化的路径、取向及其变化速度和加速度进行人为设定。轨迹规划一般有以下三个步骤。

- (1) 对机器人的任务进行描述,即描述运动轨迹;
- (2) 根据已经确定的轨迹参数,在计算机上模拟所要求的轨迹;
- (3) 对轨迹进行实际计算,即在运行时间内按一定的速率计算出位置、速度和加



速度，从而生成运动轨迹。

(一) 关节空间轨迹规划

在关节空间中进行轨迹规划，首先需要用逆运动学方法把路径点转换成关节角度值，形成多组关节路径点。然后，为每个关节相应的关节路径点拟合光滑函数，这些关节函数分别描述了机器人各关节的运动轨迹。由于每个关节在相应路径段运行的时间相同，所有关节都将同时到达路径点和目标点，但各关节函数之间是相互独立的。而在实际工作时，为保证机器人末端的位置精度，要对轨迹进行跟踪控制。

(二) 作业空间轨迹规划

所有用于关节空间的规划方法都可以用于作业空间（或直角坐标空间）轨迹规划。

二、工业机器人的示教功能

(一) 工业机器人控制系统的主要功能

工业机器人的控制系统主要有示教再现功能和运动控制功能。

示教再现功能是指在执行新的任务之前，预先将作业的操作过程示教给工业机器人，然后让工业机器人再现示教的内容，以完成作业任务。

运动控制功能是指对工业机器人末端执行器的位姿、速度、加速度等项进行控制。

(二) 示教再现功能的基本原理

工业机器人示教再现功能的基本原理如图 1-33 所示。其基本原理分为三大步骤：轨迹及位置示教、程序存储、动作再现。

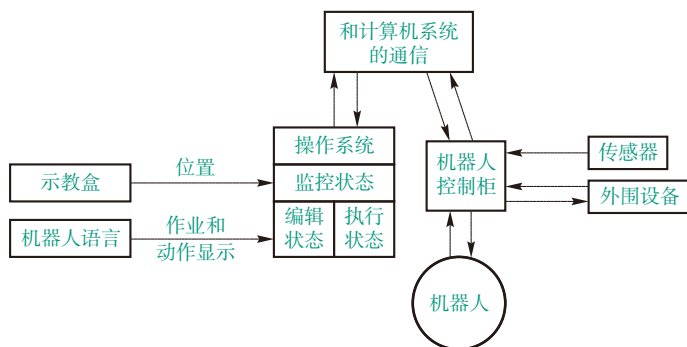


图 1-33 工业机器人示教再现功能的基本原理

(三) 工业机器人的示教再现

工业机器人示教再现通常有人工引导示教、辅助装置示教和示教器示教三种方式。辅助装置示教主要应用于一些特殊环境，如空间探索、水下施工、核电站修复等极限环境下。在这些环境中，操作者不能直接参与，因此需要借助遥控方式进行焊接等任



务。另外两种示教方式如图 1-34 所示。



(a) 人工引导示教



(b) 示教器示教

图 1-34 工业机器人的示教再现

自我检验

一、填空题

1. 工业机器人的运动规划分为_____、_____两部分。
2. 工业机器人的控制系统主要有_____功能和_____功能。
3. 工业机器人示教再现功能的基本原理分为_____、_____和_____三大步骤。

二、简答题

1. 工业机器人辅助装置示教主要应用于哪些特殊环境?
2. 简述示教再现功能的基本原理。

作业与测验

一、填空题

1. 根据用途分类,工业机器人可分为_____、_____、_____、_____和_____。
2. 工业机器人的自由度需根据其用途设计,一般为_____个。
3. 工业机器人的工作范围是指_____所能到达的_____的集合。

二、简答题

简述路径规划和轨迹生成的定义,两者的关系是什么?



在线测试

