工业机器人应用与维护



类目：机电类
书名：工业机器人应用与维护
主编：孙自昌 金红莉 拜颖乾
出版社：中国建设科技出版社
开本：大 16 开
书号：978-7-5160-4366-0
使用层次：通用
出版时间：2025 年 9 月
定价：49.80 元
印刷方式：双色
是否有资源：有

项目统筹：李亚博
责任编辑：汪永涛
封面设计：旗语书装



工业机器人应用与维护

主编◎孙自昌　金红莉　拜颖乾

开门出书·创造价值
专·精·志·远
编　辑　部：010-63567684
事业发展中心：010-63567692
网 上 书 店：www.jskjcbs.com
本社微信公众号　本社天猫旗舰店

ISBN 978-7-5160-4366-0
9 787516 043660 >
定价：49.80元

机电类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材
工业机器人应用与维护
主编◎孙自昌　金红莉　拜颖乾

中国建筑科技出版社有限责任公司

机电类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材

工业机器人应用与维护

主　编◎孙自昌　金红莉　拜颖乾

中国建筑科技出版社有限责任公司
China Construction Science and Technology Press Co., Ltd.

机电类创新融合精品规划教材
“互联网 +”教育改革新理念教材

工业机器人
应用与维护

主　编 ◎ 孙自昌　　金红莉　　拜颖乾

中国建设科技出版社有限责任公司
China Construction Science and Technology Press Co., Ltd.
北　京

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人应用与维护 / 孙自昌，金红莉，拜颖乾主编. -- 北京 ：中国建设科技出版社有限责任公司，2025. 9. --（机电类创新融合精品规划教材）（“互联网+”教育改革新理念教材）. -- ISBN 978-7-5160-4366-0

Ⅰ. TP242. 2

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20257E3Z64 号

工业机器人应用与维护

GONGYE JIQIREN YINGYONG YU WEIHU

主　编　孙自昌　金红莉　拜颖乾

出版发行：中国建设科技出版社有限责任公司

地　　址：北京市西城区白纸坊东街 2 号院 6 号楼

邮　　编：100054

经　　销：全国各地新华书店

印　　刷：唐山唐文印刷有限公司

开　　本：880mm×1230mm　1/16

印　　张：14

字　　数：320 千字

版　　次：2025 年 9 月第 1 版

印　　次：2025 年 9 月第 1 次

定　　价：49. 80 元

本社网址：www. jskjcbs. com，微信公众号：zgjskjcbs

请选用正版图书，采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有，盗版必究。本社法律顾问：北京天驰君泰律师事务所，张杰律师

举报信箱：zhangjie@tiantailaw. com　　举报电话：（010）63567684

本书如有印装质量问题，由我社事业发展中心负责调换，联系电话：（010）63567692

编　委　会

主　编　孙自昌　金红莉　拜颖乾

副主编　赖世杰　张学娟

参　编　马东风　梁晋丽

前　言

随着科技的飞速发展和“中国制造2025”战略的深入实施，工业机器人作为智能制造的核心装备之一，正被广泛地应用于汽车制造、电子电气、食品加工、医药制造、物流仓储等众多领域。这一技术革命不仅极大地提高了生产效率、降低了人力成本，还推动了产业结构的优化升级。为了适应这一发展趋势，培养具备工业机器人应用与维护能力的高素质技能型人才，我们特此编写了本书。

本书分为基础知识和操作训练两篇。第一篇基础知识分为7个项目，分别为认识工业机器人、工业机器人的基础构建、ABB机器人的应用与维护、涂装机器人的应用与维护、焊接机器人的应用与维护、蜘蛛手分拣机器人的应用与维护、搬运机器人的应用与维护；第二篇操作训练共8个实训。

在编写过程中，我们力求体现以下三个特点：

1. 项目化设计

本书采用项目化设计，每个项目既是一个独立的学习单元，又与其他项目相互关联，形成完整的知识体系。这种设计便于教师根据教学需求灵活安排课程进度，也便于学习者根据自身情况分阶段学习，提高学习效率。

2. 强调应用与维护并重

本书不仅关注工业机器人的应用技能培养，还特别强调了机器人的维护与保养知识，确保学习者能够全面掌握机器人的全生命周期管理；通过介绍各种机器人的维护方法和故障排查技巧，提升学习者的综合职业能力，满足企业对复合型人才的需求。

3. 紧跟技术前沿，注重实用性

本书内容紧跟工业机器人技术的最新发展，涵盖当前行业内的先进技术与应用趋势；注重技术的实用性，通过操作流程的讲解，确保学习者能够掌握最实用的技能和知识，为将来的职业发展打下坚实基础。

由于编写水平有限，书中难免存在不足之处，欢迎广大读者批评指正。

编　者

2024年12月

目录

第一篇　基础知识

项目一　认识工业机器人 …… 2

任务一　工业机器人的发展概况 …… 3
任务二　工业机器人的定义 …… 9
任务三　工业机器人的分类 …… 14
任务四　工业机器人的应用 …… 17

项目二　工业机器人的基础构建 …… 20

任务一　工业机器人的基本组成 …… 21
任务二　工业机器人的技术参数 …… 23
任务三　工业机器人的坐标 …… 25
任务四　工业机器人的机构表示方式 …… 27
任务五　工业机器人的控制系统 …… 38

项目三　ABB 机器人的应用与维护 …… 44

任务一　ABB IRB-120 工业机器人的组成 …… 45
任务二　机器人语言 …… 50
任务三　工业机器人基础工作站 …… 64
任务四　轨迹训练模型编程与调试 …… 65
任务五　图块搬运编程与调式 …… 82

项目四　涂装机器人的应用与维护 …… 89

任务一　涂装机器人的分类与特点 …… 90
任务二　涂装机器人的系统组成 …… 95

任务三　涂装机器人的程序设计 …… 101
任务四　涂装机器人的障碍排除与维护 …… 103

项目五　焊接机器人的应用与维护 …… 105

任务一　焊接机器人的分类和特点 …… 106
任务二　焊接机器人的系统组成 …… 108
任务三　焊接机器人程序指令 …… 118
任务四　焊接机器人的故障排除与维护 …… 119

项目六　蜘蛛手分拣机器人的应用与维护 …… 125

任务一　蜘蛛手分拣机器人的特点 …… 126
任务二　蜘蛛手分拣机器人的组成及视觉系统 …… 127
任务三　蜘蛛手分拣机器人程序设计 …… 131
任务四　蜘蛛手分拣机器人故障排除与维护 …… 138

项目七　搬运机器人的应用与维护 …… 141

任务一　搬运机器人的分类与特点 …… 142
任务二　搬运机器人的系统组成 …… 143
任务三　搬运机器人的控制系统 …… 145
任务四　搬运机器人的程序设计 …… 163
任务五　搬运机器人的故障排除与维护 …… 179

第二篇　操作训练

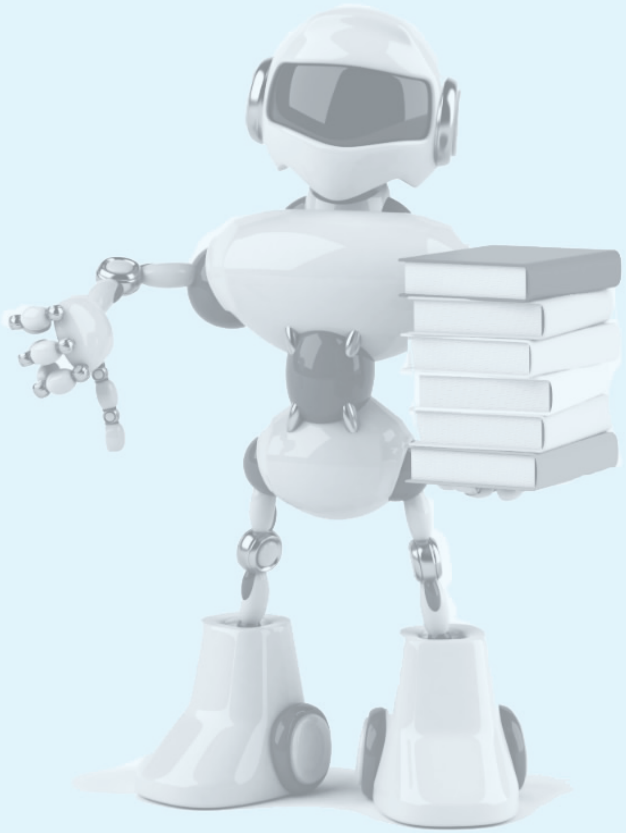
实训 A　认识机器人的机械机构实训 …… 182
实训 B　物料定点搬运实训 …… 184
实训 C　搬运机器人模拟数控机床上下料实训 …… 187
实训 D　焊接机器人实训 …… 190
实训 E　物料搬运实训 …… 195
实训 F　视觉系统物料搬运实训 …… 199
实训 G　汽车保险杠喷涂实训 …… 204
实训 H　汽车车窗涂胶实训 …… 208

参考文献 …… 215

第一篇

基础知识





项目一
认识工业机器人

项目概述

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到越来越重要的作用。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(UNECE)和国际机器人联合会(IFR)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。进入20世纪90年代，机器人产品发展速度加快，年增长率平均在10%左右。

本项目主要对工业机器人的发展概况、定义、分类以及工业机器人的应用进行介绍。

学习目标

◉ 认知目标

1. 了解工业机器人的发展概况。
2. 掌握工业机器人的定义。
3. 掌握工业机器人的分类。
4. 了解工业机器人的应用。

◉ 能力目标

1. 能够掌握工业机器人的定义。
2. 能够掌握工业机器人的分类。

任务一　工业机器人的发展概况

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。自从 1962 年美国研制出世界上第一台工业机器人以来，机器人技术及其产品发展很快，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）的自动化工具。

广泛采用工业机器人，不仅可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。和计算机、网络技术一样，工业机器人的广泛应用正在改变着人类的生产和生活方式。

一、工业机器人的诞生

扫一扫

工业机器人的诞生

工业机器人诞生于 20 世纪 60 年代，在 20 世纪 90 年代得到迅速发展，是最先产业化的机器人技术。它是综合了计算机、控制论、机构学、信息和传感器技术、人工智能、仿生学等多学科而形成的高新技术，是当代研究十分活跃，应用日益广泛的领域。它的出现是为了适应制造业规模化生产，解决单调、重复的体力劳动和提高生产质量而代替人工作业。

日本和欧洲是全球工业机器人市场的两大主角，并且实现了传感器、控制器、精密减速机等核心零部件完全自主化。日本是当今的工业机器人王国，既是工业机器人的最大制造国也是最大消费国。但实际上，工业机器人的诞生地是美国。美国人恩格尔伯格（Joseph F. Engelberger）和同事制造出了世界上第一台工业机器人，他们发现可以让机器人去代替工人做一些简单重复的劳动，而且不需要报酬和休息，任劳任怨。接着，他们合办了世界上第一家机器人制造工厂，生产 Unimate 工业机器人。

1. 工业机器人的发展过程

第一代工业机器人：通常是指目前国际上商品化与使用化的可编程的工业机器人，又称示教再现工业机器人，即为了让工业机器人完成某项作业，首先由操作者将完成该作业所需要的各种知识

（如运动轨迹、作业条件、作业顺序和作业时间等），通过直接或间接手段，对工业机器人进行“示教”，工业机器人将这些知识记忆下来后，即可根据“再现”指令，在一定精度范围内，忠实地重复再现各种被示教的动作。1962 年美国万能自动化公司的第一台 Unimate 工业机器人在美国通用汽车公司投入使用，标志着第一代工业机器人的诞生。

第二代工业机器人：通常是指具有某种智能（如触觉、力觉、视觉等）功能的感觉型机器人，即由传感器得到触觉、力觉和视觉等信息经计算机处理后，控制机器人的操作机完成相应的适当操作。1982 年美国通用汽车在装配线上为工业机器人装备了视觉系统，从而宣布了新一代智能工业机器人的问世。

第三代工业机器人：即所谓的智能型工业机器人。它不仅具有感知功能，而且还有一定的决策及规划能力。

目前在普及第一代工业机器人的基础上，第二代工业机器人经推广应用成为主流安装机型，而第三代智能机器人已占有一定比重并成为发展的方向。

2. 我国工业机器人的发展过程

我国工业机器人起步于 20 世纪 70 年代初，其发展过程大致可分为三个阶段：20 世纪 70 年代的萌芽期；20 世纪 80 年代的开发期；20 世纪 90 年代的实用化期。如今，经过 20 多年的发展，已经初具规模。

目前我国已生产出部分机器人的关键元器件，开发出弧焊、点焊、码垛、装配、搬运、注塑、冲压、喷漆等工业机器人。一批国产工业机器人已服务于国内诸多企业的生产线上；一批机器人技术的研究人才也涌现出来。一些相关科研机构和企业已掌握了工业机器人操作机的优化设计制造技术，工业机器人控制、驱动系统的硬件设计技术，机器人软件的设计和编程技术，运动学和轨迹规划技术，弧焊、点焊及大型机器人自动生产线与周边配套设备的开发和制造技术等。某些关键技术已达到或接近世界水平。2016 年 5 月 26 日，由全国工业机械电气系统标准化技术委员会主办的《工业机器人控制装置》国家标准制定启动会在安徽芜湖举行，与会人员结合国家科技重大专项实施和工业机器人控制装置产业化发展情况，完善工业机械数字控制系统的标准体系，制定工业机器人控制装置技术条件标准，用标准引领产品研发，指导产品设计、制造与验收，填补国内“工业机器人控制装置”标准的空白。

二、工业机器人的现状和未来趋势

1. 国外工业机器人的发展现状

美国是机器人的诞生地，早在 1962 年就研制出世界上第一台工业机器人。美国是世界上机器人强国之一，基础雄厚，技术先进。

日本工业机器人起步晚于美国五六年，经历了 20 世纪 60 年代的摇篮期、20 世纪 70 年代的实用期，在 20 世纪 80 年代跨入普及提高并广泛应用期。经过短短的时间，日本工业机器人产业已迅速发展起来，一跃成为“工业机器人王国”。日本工业机器人的生产、出口和使用方面都居世界榜首。日本工业机器人的装备量约占世界工业机器人装备量的 60%。日本工业机器人保有量一直远远超过其他国家，尤其在 1985—1995 年期间增长非常迅速；相比之下，虽然欧美各国的工业机器人保有台数也一直保持上升趋势，但只是在近年来才有了较大的增长；而日本除外的亚洲国家的工业机器人保有量在近年来才有了快速增长。

德国工业机器人的总数占世界第三位，仅次于日本和美国。德国智能机器人的研究和应用在世界上处于领先地位。

2. 工业机器人的“四大家族”简介

目前国际上具有影响力的、著名的工业机器人供应商有美国的 Adept Technologe、American Robot、Emerson In-dustriai Automation 等公司。还有日系中的安川、OTC、松下、FANUC、不二越、川崎等公司；欧洲系中的德国 KUKA、CLOOS，瑞典 ABB、意大利的 GOMAU 及奥地利的 IGM 公司。其中，ABB、库卡（KUKA）、发那科（FANUC）、安川电机（YASKAWA）四家称为工业机器人的“四大家族”。

（1）瑞典 ABB 公司

瑞典 ABB 公司是世界上最大的机器人制造公司之一，位列全球 500 强，是电力和自动化技术的领导企业。ABB 致力于在增效节能，提高工业生产率和电网稳定性方面为各行业提供高效而可靠的解决方案。ABB 的业务涵盖电力产品，电力系统，离散自动化与运动控制，过程自动化，低压产品五大领域。ABB 的产品广泛应用于焊接、物料搬运、装配、喷涂、精加工、拾料、包装、货盘堆垛、机械管理等领域。它的核心技术就是运动控制。运动控制技术是实现循径精度、运动速度、周期时间、可编程、多级联动以及域外轴设备同步性等机器人性能指标的重要手段。通过充分利用这些重要功能，用户可提高生产的质量、效率及可靠性。早在 1994 年，ABB 就推出了新一代具有 TrueMove 和 QuickMove 功能的机器人。TrueMove 可确保机器人的运动路径与编程路径严格相符，而不论其运行速度及路径几何形状如何。QuickMove 则是一种独具特色的自动优化型运动控制功能，可确保机器人动作任何时候都达到最高的速度和加速度，从而最大限度地缩短周期时间。第二代 TrueMove 和 QuickMove 功能引入了更精确的动态模型以及优化循径速度和加速度的新方法，进一步提升了 ABB 机器人性能。ABB 由两个拥有 100 多年历史的国际性企业——瑞典的阿西亚公司（ASEA）和瑞士的布朗勃法瑞公司（BBCBrownBoveri）在 1988 年合并而来。ABB 与中国的关系可以追溯到 20 世纪初的 1907 年。当时，ABB 向中国提供了第一台蒸汽锅炉。1974 年，ABB 在香港设立了中国业务部，随后于 1979 年在北京设立了永久性办事处。1974 年，ABB 公司发明了世界第一台六轴工业机器人。ABB 生产机器人已有 40 年的历史，ABB 已经在瑞典、挪威和中国等地设有机器人研发、制造和销售基地。1994 年，ABB 的机器人开始进入中国，早期的应用主要集中在汽车制造以及汽车零部件行业。随着中国经济的快速发展，工业机器人的应用领域逐步向一般行业扩展，如医药、化工、食品饮料以及电子加工行业。2006 年，ABB 全球机器人业务总部落户中国上海。

（2）日本安川电机公司

日本安川电机公司自 1977 年研制出第一台全电动工业机器人“MOTOMAN”以来，已有 40 多年的机器人研发生产的历史，其间相继开发了焊接、装配、喷涂、搬运等各种各样的自动化作业机器人，并一直引领着国内外工业机器人市场。它旗下拥有 Motoman 美国公司、瑞典公司、德国公司以及 Synetics Solutions 美国公司等子公司。其核心的工业机器人产品包括点焊和弧焊机器人、油漆和处理机器人、LED 玻璃板传输机器人和半导体晶片传输机器人等。安川电机公司是最早将工业机器人应用到半导体生产领域的厂商之一。安川电机株式会社创立于 1915 年，是有 100 多年历史的专业电气厂商，它的 AC 伺服和变频器市场份额位居全球第一。安川电机目前主要包括驱动控制、运动控制、系统控制与机器人四个事业部。安川电机常州工厂于 2012 年 7 月 25 日动工，2013 年 6 月投产。

（3）日本发那科公司

日本发那科公司（FANUC）是当今世界上数控系统科研、设计、制造、销售实力最强大的企业之一。1956 年，FANUC 品牌创立。1971 年，发那科数控系统世界第一，占据了全球 70％的市场份额。1976 年发那科公司研制成功数控系统 5，随后又与 SIEMENS 公司联合研制了具有先进水平的数控系统 7，从这时起，发那科公司逐步发展成为世界上最大的专业数控系统生产厂家。掌握数控机床发展核心技术的发那科，不仅加快了日本本国数控机床的快速发展，而且加快了全世界数控机床技术水平的提高。自 1974 年发那科首台机器人问世以来，发那科致力于机器人技术上的领先与创新，是世界上唯一一家由机器人来做机器人的公司。发那科机器人产品系列多达 240 种，负重从 0.5kg 到 1.35t，广泛应用在装配、搬运、焊接、铸造、喷涂、码垛等不同生产环节，满足客户的不同需求。2008 年 6 月，FANUC 成为世界第一个突破 20 万台机器人的厂家；2013 年，FANUC 全球机器人装机量已超 33 万台，市场份额稳居第一。发那科工业机器人的优势包括以下几方面。

1）非常便捷的工艺控制，可以实现对喷涂参数的无级调整，在生产过程中也可修改喷涂参数，手腕动作灵活，高加速度，对提高小型工件喷涂节拍非常高效，和同类型机器人相比，发那科机器人采用独有的铝合金外壳，机器人质量轻，加速快，日常维护保养方便。

2）和同类型机器人相比，FANUC 机器人底座尺寸更小，为客户采用更小的喷房、提供了更好的解决方案。

3）发那科机器人的空心手腕可以让油管、气管布置更加便捷，大幅减少了喷房保洁工作量，为生产赢得时间。

4）发那科机器人独有的手臂设计，让机器人可以靠近喷房壁安装，机器人保证高度灵活生产的条件下也不会与喷房壁干涉。

（4）KUKA 集团

KUKA 集团是由焊接设备起家的全球领先机器人及自动化生产设备和解决方案的供应商之一。KUKA 机器人公司是全球汽车工业中工业机器人领域的三家市场龙头之一，在欧洲则独占鳌头。它的客户主要分布于汽车工业领域，在其他领域（一般工业）中也处于增长势头。KUKA 集团借助其 30 余年在汽车工业中积累的技能经验，也为其他领域研发创新的自动化解决方案，例如用于医疗技术、太阳能工业和航空航天工业等。

KUKA 为纯工业机器人公司，业务包括工业机器人和系统集成。KUKA 机器人公司在全球拥有 20 多个子公司，其中大部分是销售和服务中心。KUKA 在全球的运营点有美国、墨西哥、巴西、日本、韩国、印度和欧洲各国。KUKA 公司工业机器人产量超过 1 万台，至今在全球安装了超过 10 万台工业机器人。

KUKA 工业机器人的用户包括通用汽车、克莱斯勒、福特汽车、保时捷、宝马、奥迪、奔驰（Mercedes-Benz）、大众（Volkswagen）、哈雷-戴维森（Harley-Davidson）、波音（Boeing）、西门子（Siemens）、宜家（IKEA）、沃尔玛（Wal-Mart）、雀巢（Nestle）、百威啤酒（Budweiser）以及可口可乐（Coca-Cola）等众多单位。1973 年，KUKA 研发出第一台工业机器人 FAMULUS，这是世界上第一台机电驱动的 6 轴机器人。今天 KUKA 公司 4 轴和 6 轴机器人有效载荷范围在 3～1300kg、机械臂展在 350～3700mm，机型包括 SCARA、码垛机、门式及多关节机器人，皆采用基于通用 PC 控制器平台控制。

作为世界领先的工业机器人提供商之一和机器人领域中的科技先锋，库卡机器人在业界被赞誉

为“创新发电机”。KUKA 机器人早在 1985 年时，就通过一系列的机械设计革新，去掉了早期工业机器人中必不可少的平行连杆结构，实现真正意义上的多关节控制，并从此成为机器人行业的规范。早在 1996 年时，KUKA 机器人就采用了当时最为开放和被广泛接受的标准工业 PC-Windows 操作系统作为 KUKA 机器人控制系统和操作平台，使 KUKA 机器人成为最开放和标准化程度最高的控制系统，而今也正在逐渐成为全球的标准。KUKA 独一无二的 6D 鼠标编程操作机构，把飞行器操作的理念引入机器人操作，使得机器人的操作和示教犹如打游戏一样轻松方便。此外，KUKA 独特的电子零点标定技术、航空铝制机械本体、模块化控制系统及机械结构等都从本质上诠释了以技术突破和不断创新的宗旨。

KUKA 码垛机器人的显著特点是速度快，因为机器人的手臂采用高分子碳素纤维材料制造而成，既满足机器人手臂在高速运行过程中对刚度的特殊需求，又可以大幅度提高机器人本身的动惯性能以及加速能力。机器人控制器采用和标准机器人完全相同的标准，另外，码垛专用的软件功能包 KUKA. PalletLayout，KUKA. PalletPro，KUKA. PalletTech 可以根据客户要求提供非常轻松的码垛应用和编程环境。

KUKA 机器人早在 1986 年就已进入中国市场，当时是由 KUKA 公司赠送给一汽卡车作为试用，是中国汽车业应用的第一台工业机器人。1994 年，当时作为国内汽车龙头企业的东风卡车公司以及长安汽车公司分别引进了 KUKA 的一条焊装线，随线安装的机器人都达数十台，从此 KUKA 机器人开始大批量进入中国。工业机器人在最初进入中国时，作为技术和资金最为集中的汽车制造业可以说是工业机器人的最主要的使用者，进入 2000 年后，工业机器人在其他领域的应用才逐渐开始被接受。近年来，KUKA 机器人在其他制造领域的应用也越来越广泛，行业覆盖了铸造、塑料、金属加工、包装、物流等，如在中国的烟草行业（包装和码垛应用）以及食品与饮料行业（包装和加工应用），其数量和需求甚至超过了汽车行业。库卡在上海松江新厂建设面积近 2 万 m^2。

3. 国内工业机器人发展现状

在国外，工业机器人技术日趋成熟，已经成为一种标准设备被工业界广泛使用。在发达国家中，工业机器人自动化生产线成套设备已成为自动化装备的主流。同全球主要机器人大国相比，我国工业机器人起步较晚，而真正大规模进入商用仅是在近几年。我国于 1972 年开始研制自己的工业机器人。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。“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；1986 年，国家高技术研究发展计划开始实施，经过几年研究，取得了一大批科研成果，成功地研制出了一批特种机器人。从 20 世纪 90 年代初期起，我国的国民经济进入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，我国的工业机器人又在实践中迈进了一大步，先后研制了点焊、弧焊、装配、喷漆、切割、搬运、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。“九五”期间，国家“863”高技术计划已将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、一汽集团涂装技术开发中心、北京机械工业自动化所上海机电一体工程有限公司、四川绵阳四维焊接自动化设备有限公司等确立为智能机器人主题产业化基地。大连组合机床所、上海富安工厂自动化公司、东风汽车公司、昆明船舶公司、哈尔滨焊接研究所、安川北科公司等单位也都凭借自己开发生产的特色机器人或应用工程项目活跃在当今国内工业机器人市场上。2012 年，四种新型工业机器人在我国哈尔

滨研制成功，这四种工业机器人分别是哈尔滨工业大学和哈尔滨风华机器厂等单位研制的华宇Ⅰ型点焊机器人、华宇Ⅱ型弧焊机器人，哈尔滨工业大学与航天部811厂等单位联合研制的东方1号喷漆机器人和国营星光机械厂研制的星光Ⅰ型直角坐标点焊机器人。目前，我国已经能够生产具有国际先进水平的平面关节型装配机器人、直角坐标机器人、弧焊机器人、点焊机器人、搬运码垛机器人等一系列产品，不少品种已经实现了小批量生产。但是与发达国家相比，我国工业机器人还有很大差距。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。工业机器人概念的提出是在1954年，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，而中国直到20世纪80年代才刚刚开始起步，这就已经落后了30年左右。不仅如此，在20世纪80年代起步时期，由于缺乏资金，在工业机器人领域的研发一直进展缓慢，导致落后更加严重。

（2）历史原因。中国在工业机器人的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，目前我国进口的工业机器人主要来自日本。进口的工业机器人成本偏高，大部分企业单位无法承受这么高的成本。因此，我国的工业机器人销售市场并不发达，没有市场的推动，我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，没有形成自己的产业链，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）我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。

（6）从国家角度来说，我国目前待业人口比较多，农民工偏多。他们主要在工厂从事一些体力劳动，如果大量引入工业机器人会增加失业人口，失业人口过多会严重影响到社会安定团结。

4. 国内外机器人的发展趋势

我国工业机器人在“七五”“九五”“十五”期间研究取得了较大进展，在关键技术上有所突破，但还缺乏整体核心技术的突破。未来几年，我国将发展以工业机器人为代表的智能制造技术，将重点研究工业机器人智能化体系结构，高速高精度控制，智能化作业，形成新一代智能化工业机器人的核心关键技术体系，并在相关行业开展应用示范和推广。

日本将机器人列为战略产业，韩国将机器人产业视为“增长发动机产业”，各发达国家政府早年通过制定政策，采取一系列措施鼓励企业应用机器人，设立科研基金鼓励机器人的研发设计，从政策上、资金上给予大力支持，工业机器人的应用和研究走在世界的前列。世界工业机器人市场普遍被看好，各国都在期待机器人的应用研究有技术上的突破。归纳起来，工业机器人技术的发展趋势有以下几点。

（1）机器人的智能化。智能化是工业机器人一个重要的发展方向。目前，机器人的智能化研究可以分为两个层次：一是利用模糊控制、神经元网络控制等智能控制策略，利用被控对象对模型依赖性不强的特点来解决机器人的复杂控制问题，或者在此基础上增加轨迹或动作规划等内容，这是智能化的最低层次；二是使机器人具有与人类类似的逻辑推理和问题求解能力，面对非结构性环境能够自主寻求解决方案并加以执行，这是更高层次的智能化，使机器人能够具有复杂的推理和问题求解能力，以便模拟人的思维方式，目前还很难有所突破。智能技术领域有很多的研究热点，如虚拟现实、智能材料（如形状记忆合金）、人工神经网络、专家系统、多传感器集成和信息融合技术等。

（2）机器人的多机协调化。由于生产规模不断扩大，对机器人的多机协调作业要求越来越迫切。在很多大型生产线上，往往要求很多机器人共同完成一个生产过程，因而每个机器人的控制就不单纯是自身的控制问题，需要多机协调动作。此外，随着 CAD/CAM/CAPP 等技术的发展，更多地把设计、工艺规划、生产制造、零部件储存和配送等有机地结合起来，在线制造、计算机集成制造等现代加工制造系统中，机器人已经不再是一个个独立的作业机械，而是成为其中的重要组成部分，这些都要求多个机器人之间、机器人和生产系统之间必须协调作业。多机协调也可以认为是智能化的一个分支。

（3）机器人的标准化。机器人的标准化工作是一项十分重要而又艰巨的任务。机器人的标准化有利于制造业的发展，但目前不同厂家的机器人之间很难进行通信和零部件的互换。机器人的标准化问题不是技术层面的问题，而主要是不同企业之间的认同和利益问题。

（4）机器人的模块化。智能机器人和高级机器人的结构力求简单紧凑，其高性能部件甚至全部机构的设计已向模块化方向发展。其驱动采用交流伺服电动机，并向小型和高输出方向发展；其控制装置向小型化和智能化方向发展；其软件编程也在向模块化方向发展。

（5）机器人的微型化。微型机器人是 21 世纪的尖端技术之一。目前已经开发出手指大小的微型移动机器人，预计将生产出毫米级大小的微型移动机器人和直径为几百微米甚至更小（纳米级）的医疗和军事机器人。微型驱动器、微型传感器等是开发微型机器人的基础和关键技术，它们将对精密机械加工、现代光学仪器、超大规模集成电路、现代生物工程、遗传工程和医学工程等产生重要影响。介于大中型机器人和微型机器人之间的小型机器人也是机器人发展的一个趋势。

纵观世界各国在发展工业机器人的产业过程，可归纳为三种不同的发展模式，即日本模式、欧洲模式和美国模式。

（1）日本模式。日本模式的特点是各司其职，分层面完成交钥匙工程，即机器人制造厂商以开发新型机器人和批量生产优质产品为主要目标，并由其子公司或社会上的工程公司来设计制造各行业所需要的机器人成套系统，并完成交钥匙工程。

（2）欧洲模式。欧洲模式的特点是一揽子交钥匙工程，即机器人的生产和用户所需要的系统设计制造，全部由机器人制造厂商自己完成。

（3）美国模式。美国模式的特点是采购与成套设计相结合。美国国内基本上不生产普通的工业机器人，企业需要时机器人通常由工程公司进口，再自行设计、制造配套的外围设备，完成交钥匙工程。

任务二　工业机器人的定义

工业机器人（Industrial Robot）是工业生产中使用的机器人。1987 年 ISO（国际标准化组织）对工业机器人进行的定义是：“工业机器人是一种具有自动操作和移动功能，能完成各种作业的可编程操作机。”我国国家标准 GB/T 12643—2013 将工业机器人定义为“是一种能自动定位控制、可重复编程的、多功能的、多自由度的操作机，能搬运材料、零件或操持工具，用以完成各种作业”，而将操作机定义为“具有和人手臂相似的动作功能，可在空间抓放物体或进行其他操作的机械装置”。工业机器人与专用机械手的区别是工业机器人具有独立的控制系统（大多应用计算机技术），可以容

易地通过再编程的方法实现动作程序的变化来适应不同的作业要求；专用机械手只能完成比较简单的搬运、抓取及上/下料工作，常常作为机器设备的附属装置，其程序是固定不变的。



工业机器人的特点

一、工业机器人的特点

（1）可编程生产自动化的进一步发展是柔性启动化工业机器人，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具有均衡高效率的柔性制造过程中能发挥很好的功用，是柔性制造系统中的一个重要组成部分。技术先进工业机器人集精密化、柔性化、智能化、软件应用开发等先进制造技术于一体，通过对过程实施检测、控制、优化、调度、管理和决策，实现增加产量、提高质量、降低成本、减少资源消耗和环境污染，是工业自动化水平的最高体现。

（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、手爪等部分，在控制上有电脑。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、语言功能等。传感器提高了工业机器人对周围环境的自适应能力。技术升级工业机器人与自动化成套装备具备精细制造、精细加工以及柔性生产等技术特点，是继动力机械、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，是实现生产数字化、自动化、网络化以及智能化的重要手段。

（3）通用性除了专门设计的专用的工业机器人外，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。比如，更换工业机器人手部末端操作器（手爪、工具等）便可执行不同的作业任务。工业机器人与自动化成套装备是生产过程的关键设备，可用于制造、安装、检测、物流等生产环节，并广泛应用于汽车整车及汽车零部件、工程机械、轨道交通、低压电器、电力、IC 装备、军工、烟草、金融、医药、冶金及印刷出版等众多行业，应用领域非常广泛。

（4）机电一体化。工业机器人技术涉及的学科相当广泛，归纳起来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，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，这些都是微电子技术的应用，特别是和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技术的发展水平。工业机器人技术集中并融合了多项学科，涉及多项技术领域，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、工厂自动化以及精细物流等先进制造技术，技术综合性强。

二、工业机器人的种类

工业机器人根据不同方式可以分成很多种类型，下面简单介绍喷涂机器人、码垛机器人、装配机器人、搬运机器人、清洁机器人、涂胶机器人、焊接机器人、上/下料机器人和移动机器人。

1. 喷涂机器人

喷涂机器人又叫喷漆机器人（Spray Painting Robot），是可进行自动喷漆或喷涂其他涂料的工业机器人，1969 年由挪威 Trallfa 公司（后并入 ABB 集团）发明。喷漆机器人主要由机器人本体、计算机和相应的控制系统组成，液压驱动的喷漆机器人还包括液压油源，如油泵、油箱和电机等。多采用 5 或 6 自由度关节式结构，手臂有较大的运动空间，并可做复杂的轨迹运动，其腕部一般有 2～3 个自由度，可灵活运动。较先进的喷漆机器人腕部采用柔性手腕，既可向各个方向弯曲，又可转动，

其动作类似人的手腕，能方便地通过较小的孔伸入工件内部，喷涂其内表面。喷漆机器人一般采用液压驱动，具有动作速度快、防爆性能好等特点，可通过手把手示教或点位示数来实现示教。喷漆机器人广泛用于汽车、仪表、电器、搪瓷等工艺生产部门。图 1-1 所示为机器人对汽车零部件进行喷漆。



图 1-1　喷涂机器人

喷涂机器人分为有气喷涂机器人和无气喷涂机器人两种。有气喷涂机器人也称低压有气喷涂，喷涂机依靠低压空气使油漆在喷出枪口后形成雾化气流作用于物体表面（墙面或木器面），有气喷涂相对于手刷而言无刷痕，而且平面相对均匀，单位工作时间短，可有效地缩短工期。但有气喷涂有飞溅现象，存在漆料浪费，在近距离查看时，可见极细微的颗粒状。一般有气喷涂采用装修行业通用的空气压缩机，相对而言一机多用、投资成本低，市面上也有抽气式有气喷涂机、自落式有气喷涂机等专用机械。无气喷涂机器人可用于高黏度油漆的施工，而且边缘清晰，甚至可用于一些有边界要求的喷涂项目。视机械类型，其可分为气动式无气喷涂机、电动式无气喷涂机、内燃式无气喷涂机、自动喷涂机等多种。另外要注意的是，如果对金属表面进行喷涂处理，最好是选用金属漆（磁漆类）。

喷涂机器人主要有以下优点。

（1）柔性大，工作范围大。

（2）提高喷涂质量和材料使用率。

（3）易于操作和维护。可离线编程，大大缩短现场调试时间。

（4）设备利用率高。喷涂机器人的利用率在 90％～95％。

2. 码垛机器人

码垛机器人是机械与计算机程序有机结合的产物，为现代生产提供了更高的生产效率。图 1-2 所示为机器人对物资进行堆放。码垛机器人的特点有以下几个。



图 1-2　码垛机器人

（1）结构简单、零部件少。因此，零部件的故障率低、性能可靠、保养维修简单、所需库存零部件少。

（2）占地面积少。有利于客户厂房中生产线的布置，并可留出较大的库房面积。码垛机器人可以设置在狭窄的空间，即可有效地使用。

（3）适用性强。当客户产品的尺寸、体积、形状及托盘的外形尺寸发生变化时只需在触摸屏上稍做修改即可，不会影响客户正常的生产，而机械式的码垛机更改相当麻烦甚至是无法实现的。

（4）能耗低。通常机械式的码垛机的功率在 26kW 左右，而码垛机器人的功率为 5kW 左右，大大降低了客户的运行成本。

（5）全部控制只需在控制柜屏幕上操作即可，操作非常简单。

（6）只需定位抓起点和摆放点，示教方法简单易懂。

3. 装配机器人

装配机器人是柔性自动化装配系统的核心设备，由机器人操作机、控制器、末端执行器和传感系统组成。其中，操作机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；控制器一般采用多 CPU 或多级计算机系统，实现运动控制和运动编程；末端执行器为适应不同的装配对象而设计成各种手爪和手腕等；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。常用的装配机器人主要有可编程通用装配操作手（Programmable Universal Manipulator for Assembly）即 PUMA 机器人（最早出现于 1978 年，工业机器人的祖始）和平面双关节型机器人（Selective Compliance Assembly Robot Arm）即 SCARA 机器人两种类型。与一般工业机器人相比，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，主要用于各种电器制造（包括家用电器，如电视机、录音机、洗衣机、电冰箱、吸尘器）、小型电机、汽车及其部件、计算机、玩具、机电产品及其组件的装配等方面。图 1-3 所示为机器人进行汽车组装。

4. 搬运机器人

搬运机器人（Transfer Robot）是可以进行自动化搬运作业的工业机器人。最早的搬运机器人出现在 1960 年的美国，Versatran 和 Unimate 两种机器人首次用于搬运作业。搬运作业是指用一种设备握持工件，从一个加工位置移到另一个加工位置。搬运机器人可安装不同的末端执行器以完成各种不同形状和状态的工件搬运工作，大大减轻了人类繁重的体力劳动。世界上使用的搬运机器人逾 10 万台，被广泛应用于机床上/下料、冲压机自动化生产线、自动装配流水线、码垛搬运、集装箱等的自动搬运。部分发达国家已制定出人工搬运的最大限度，超过限度的必须由搬运机器人来完成。图 1-4 所示为机器人进行物资搬运。



图 1-3　装配机器人

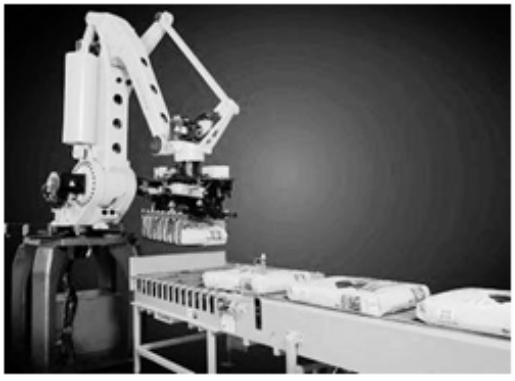


图 1-4　搬运机器人

搬运机器人是近代自动控制领域出现的一项高新技术，涉及力学、机械学、电气液压气压技术、自动控制技术、传感器技术、单片机技术和计算机技术等学科领域，已成为现代机械制造生产体系中的一项重要组成部分。它的优点是可以通过编程完成各种预期的任务，在自身结构和性能上有了人和机器的各自优势，尤其体现出了人工智能和适应性。

5. 清洁机器人



图 1-5　清洁机器人

清洁机器人是为人类服务的特种机器人，主要从事家庭卫生的清洁、清洗等工作。按照应用范围和用途的不同，清洁机器人有不同类型。清洁机器人有以下特点。

（1）扫地省时、省力。整个清洁过程不需要人控制。

（2）低噪声。音量小于 50dB，清洁房间的过程免受噪声之苦。

（3）净化空气。内置活性炭，吸附空气中有害物质。

（4）轻便小巧，轻松打扫普通吸尘器清理不到的死角。

图 1-5 所示为油烟管道清洗机器人。

6. 涂胶机器人

涂胶机器人广泛应用于汽车领域，它的涂胶系统实现汽车的顶棚横梁和发动机盖的不同型号工件的涂胶工作。图 1-6 所示为机器人进行汽车涂胶工作。



图 1-6　涂胶机器人

7. 焊接机器人

焊接机器人主要包括机器人和焊接设备两部分。焊接机器人由机器人本体和控制柜（硬件及软件）组成，而焊接装备（以弧焊及点焊为例）则由焊接电源（包括其控制系统）、送丝机（弧焊）、焊枪（钳）等部分组成。对于智能机器人还应有传感系统，如激光或摄像传感器及其控制装置等。世界各国生产的焊接用机器人基本上都属关节机器人，绝大部分有 6 个轴。其中，1～3 轴可将末端工具送到不同的空间位置，而 4～6 轴解决工具姿态的不同要求。焊接机器人本体的机械结构主要有两种形式：一种为平行四边形结构，另一种为侧置式（摆式）结构。焊接机器人目前已广泛应用在汽车制造业，汽车底盘、座椅骨架、导轨、消声器以及液力变矩器等焊接，尤其在汽车底盘焊接生产中得到了广泛的应用。图 1-7 所示为机器人对工件进行焊接工作。

8. 上/下料机器人

上/下料机器人能满足快速/大批量加工节拍、节省人力成本、提高生产效率等要求，成为越来越多工厂的理想选择。图 1-8 所示为其中一种上/下料机器人。它有以下几个特点。



图 1-7　焊接机器人



图 1-8　上/下料机器人

（1）可以实现对圆盘类、长轴类、不规则形状、金属板类等工件的自动上料/下料、工件翻转、工件转序等工作。

（2）不依靠机床的控制器进行控制，机械手采用独立的控制模块，不影响机床运转。

（3）刚性好，运行平稳，维护非常方便。

（4）可选独立料仓设计，料仓独立自动控制。

（5）可选独立流水线。

9. 移动机器人

移动机器人是一种在复杂环境下工作的，具有自行组织、自主运行、自主规划的智能机器人，融合了计算机技术、信息技术、通信技术、微电子技术和机器人技术等。它具有移动功能，在代替人从事危险、恶劣（如辐射、有毒等）环境下作业和人所不及的（如宇宙空间、水下等）环境作业方面，比一般机器人有更强的机动性、灵活性。根据移动方式来分，移动机器人可分为轮式移动机器人、步行移动机器人（单腿式、双腿式和多腿式）、履带式移动机器人、爬行机器人、蠕动式机器人和游动式机器人等类型；按工作环境来分，移动机器人可分为室内移动机器人和室外移动机器人；按控制体系结构来分，移动机器人可分为功能式（水平式）结构机器人、行为式（垂直式）结构机器人和混合式机器人；按功能和用途来分，移动机器人又可分为医疗机器人、军用机器人、助残机器人、清洁机器人等。

任务三　工业机器人的分类

工业机器人可以按手臂运动形式、控制形式、程序输入方式、驱动方式等进行分类。

一、按工业机器人手臂运动形式分类

工业机器人按手臂运动形式（操作机的手臂在运动时所取的参考坐标系的形式）可分为以下几类。

1. 直角坐标型工业机器人

直角坐标型工业机器人的运动部分由三个线性关节组成，这三个关节用来确定末端操作器的位置，通常还带有附加的旋转关节，用来确定末端操作器的姿态。直角坐标型工业机器人在 x、y、z 轴上的运动是独立的，运动方程可独立处理，且方程是线性的，很容易通过计算机控制实现，其工作空间图形为长方形，如图 1-9 所示。它在各个轴向的移动距离，可在各个坐标轴上直接读出，直观性强，易于位置和姿态的编程计算，定位精度高，控制无耦合，结构简单，但机体所占空间体积大，动作范围小，灵活性差，难与其他工业机器人协调工作。

2. 圆柱坐标型工业机器人

圆柱坐标型工业机器人由两个滑动关节和一个旋转关节来确定部件的位置，再附加一个旋转关节来确定部件的姿态。这种机器人可以绕中心轴旋转一个角，工作范围可以扩大，且计算简单；直线部分可采用液压驱动，可输出较大的动力；能够伸入机器内部。但是，它的手臂可以到达的空间受到限制，不能到达近立柱或近地面的空间；直线驱动部分难以密封、防尘；后臂工作时，手臂后端会碰到工作范围内的其他物体。圆柱坐标机器人的工作范围呈圆柱形状，如图 1-10 所示。

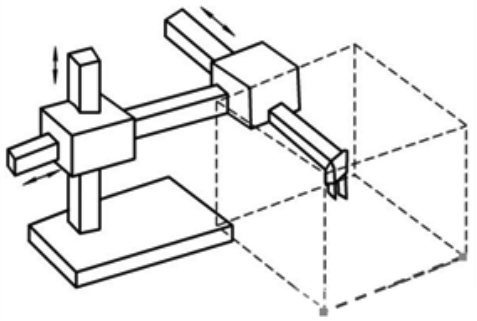


图 1-9　直角坐标型工业机器人的工作空间示意图

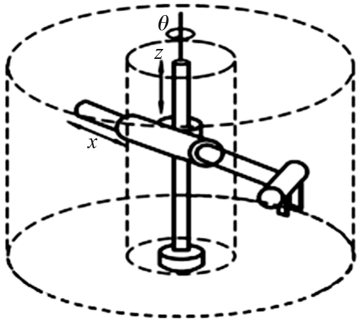


图 1-10　圆柱坐标型工业机器人的工作空间示意图

3. 球坐标型工业机器人

球坐标型工业机器人又称为极坐标型工业机器人，采用球坐标系，其手臂的运动由一个滑动关节和两个旋转关节（RRP，一个回转，一个俯仰和一个伸缩运动）来确定部件的位置，再用一个附加的旋转关节确定部件的姿态。它可以做上下俯仰动作并能抓取地面上或较低位置的协调工件，其位置精度高，位置误差与臂长成正比。它还可以绕中心轴旋转，中心支架附近的工作范围大，两个转动驱动装置容易密封，覆盖工作空间较大。但该坐标复杂，难以控制，且直线驱动装置仍存在密封及工作死区的问题。球坐标机器人的工作范围呈球缺状，如图 1-11 所示。

4. 多关节型工业机器人

多关节型工业机器人又称回转坐标型工业机器人，这种工业机器人的手臂与人体上肢类似，是工业机器人中最常见的结构，其前三个关节是回转副（RRR），多关节工业机器人一般由立柱和大小臂组成，立柱与大臂间形成肩关节，大臂和小臂间形成肘关节，可使大臂做回转运动和俯仰摆动，小臂做俯仰摆动。其结构最紧凑，灵活性大，占地面积最小，能与其他工业机器人协调工作，但位置精度较低，有平衡问题，控制耦合，这种工业机器人应用越来越广泛。它的工作范围较为复杂，图 1-12 所示为 PUMA 机器人的工作范围。

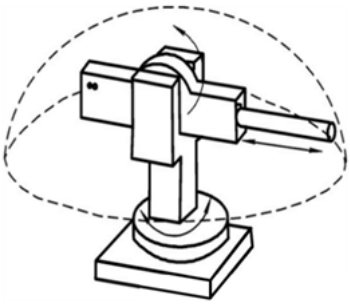
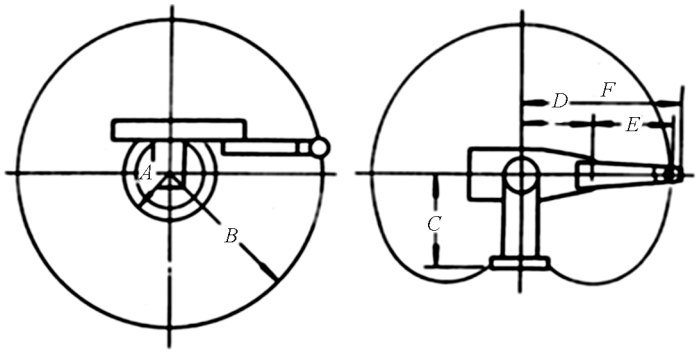


图 1-11　球坐标型工业机器人的工作范围



（a）顶视图　　（b）侧视图

图 1-12　PUMA 机器人的工作范围

5. 平面关节型工业机器人

平面关节型工业机器人可被看作关节坐标式机器人的特例，它采用一个移动关节和两个回转关节（PRR），移动关节实现上下运动，而两个回转关节则控制前后、左右运动。这种形式的工业机器人又称（SCARA）装配机器人，其最显著的特点是它们在平面上的运动具有较大的柔性，而沿 z 轴具有很强的刚性。它结构简单，动作灵活，多用于装配作业中，特别适合小规格零件的插接装配，如在电子工业的插接、装配中应用广泛。平面关节型工业机器人的工作空间如图 1-13 所示。

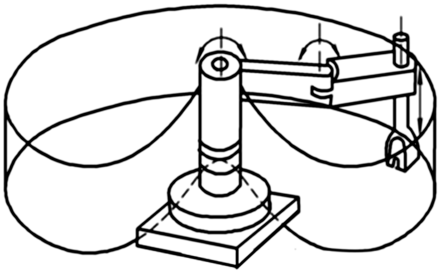
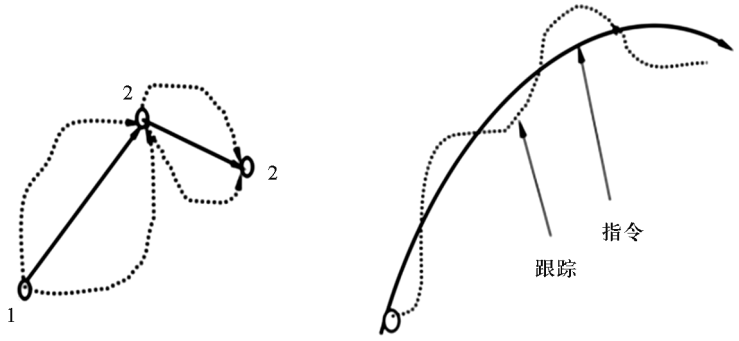


图 1-13　平面关节机器人的工作空间

二、按工业机器人控制形式分类

工业机器人按控制形式可分为点位控制和连续轨迹控制工业机器人两类。如图 1-14 所示为工业机器人的两种控制方式。



（a）点位控制　　（b）连续轨迹控制

图 1-14　控制方式

点位控制方式考虑到末端执行器在运动过程中只在某些规定的点上进行操作，因此只要求末端执行器在目标点处保证准确的位姿以满足作业质量要求。它适用于机床上/下料、点焊和一般搬运、装卸等作业。

连续轨迹控制方式要求末端执行器严格按预定的轨迹和速度在一定精度要求内运动，以完成作业要求，这就必须保证机器人各关节连续、同步地实现相应的运动。这种控制方式适用于连续焊接和涂装等作业。

三、按工业机器人程序输入方式分类



按工业机器人程序输入方式分类

工业机器人按程序输入方式区分有编程输入型和示教输入型两类。

编程输入型是将计算机上已编好的作业程序文件，通过 RS232 串口或者以太网等通信方式传送到机器人控制柜。

示教输入型的示教方法有两种：一种是由操作者用手动控制器，将指令信号传给驱动系统，使执行机构按要求的动作顺序和运动轨迹操演一遍；另一种是由操作者直接领动执行机构，按要求的动作顺序和运动轨迹操演一遍。在示教过程的同时，工作程序的信息即自动存入程序存储器中。在机器人自动工作时，控制系统从程序存储器中检出相应信息，将指令信号传给驱动机构，使执行机构再现示教的各种动作。示教输入程序的工业机器人称为示教再现型工业机器人。

工业机器人除了上述三种方式分类外，还可以按驱动方式分为以下几类。

1. 气动式工业机器人

气动式工业机器人以压缩空气来驱动操作机，其优点是空气来源方便，动作迅速，结构简单造价低，无污染，缺点是空气具有可压缩性，导致工作速度的稳定性较差，又因为气源压力一般只有 6kPa 左右，所以这类工业机器人抓举力较小，一般只有几十牛顿，最大百余牛顿。

2. 液压式工业机器人

液压压力比气压压力高得多，一般为 70kPa 左右，故液压传动工业机器人具有较大的抓举能力，可达上千牛顿。液压式工业机器人结构紧凑，传动平稳，动作灵敏，但对密封要求较高，且不宜在高温或低温环境下工作。

3. 电动式工业机器人

电动式工业机器人是目前用得最多的一类工业机器人，因为电动机品种众多，为工业机器人设计提供了多种选择，也因为它们可以运用多种灵活控制的方法。早期多采用步进电机驱动，后来发展了直流伺服驱动单元，目前交流伺服驱动单元也在迅速发展。这些驱动单元或是直接驱动操作机，或是通过诸如谐波减速器的装置来减速后驱动，结构十分紧凑、简单。

任务四　工业机器人的应用

诸多国家近半个世纪的工业机器人的使用实践表明，工业机器人的普及是实现自动化生产，提高社会生产效率，推动企业和社会生产力发展的有效手段。当前，工业机器人技术和产业迅速发展，在生产中应用日益广泛，已成为现代制造生产中重要的高度自动化装备。目前，工业机器人已广泛应

用于汽车及汽车零部件制造业、机械加工行业、电子电气行业、橡胶及塑料工业、食品工业、木材与家具制造业等领域中。在工业生产中，弧焊机器人、点焊机器人、分配机器人、装配机器人、喷漆机器人及搬运机器人等工业机器人都已被大量采用。

扫一扫

工业机器人在工业、生产中的应用

一、工业机器人在工业、生产中的应用

工业机器人在工业生产中能代替人做某些单调、频繁和重复的长时间作业，或是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、塑料制品成形、机械加工、金属制品业和简单装配等工序上，以及在原子能工业等部门中，完成对人体有害物料的搬运或工艺操作。在日、美、西欧等一些工业发达的国家和地区中，工业机器人得到越来越广泛的应用。在我国，工业机器人的最初应用是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。目前，由于机器人技术及研发的落后，工业机器人还主要应用在制造业，非制造业使用的较少。据统计，近几年国内厂家所生产的工业机器人超过一半提供给汽车行业。可见，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。例如，焊接机器人就在汽车制造业中发挥着不可替代的作用，它广泛应用于汽车及零部件制造、摩托车、工程机械等行业，在汽车生产的冲压、焊装、涂装、总装四大生产工艺过程中都有广泛应用，其中应用最多的为弧焊、点焊。目前，焊接工业机器人在一汽、上汽、沈阳中顺、金杯通用、重庆长安、湖南长丰等整车制造企业广泛应用。

多年来，我国汽车零部件生产一直是手工焊、专机焊接占据焊接生产的主要地位，劳动强度大，作业环境恶劣，焊接质量不易保证，而且生产的柔性也很差，无法适应现代汽车生产的需要。近年来，由于焊接机器人的大量应用，提高了零部件生产的自动化水平及生产效率，焊接质量也得到了保证。近年来，焊接机器人在大连华克、上海华克、上海龙马神、南京新迪、长春佛吉亚、上海汇众等零部件及配件生产企业也有着典型的应用。在汽车零部件的生产中广泛应用了点焊、凸焊、缝焊、对焊及电弧焊等焊接工艺。如：横梁总成托架电焊，传动轴平衡片凸焊，汽车燃油箱缝焊，汽车轮圈连续闪光对焊，汽车转向臂、消声器、净化器壳体的电弧焊等。

二、工业机器人在其他领域中的应用

随着科技的发展，机器人功能和性能的不断改善和提高，机器人的应用领域日益在扩大，其应用范围已不限于工业，还广泛应用于农业、林业、交通运输业、原子能工业、医疗、福利事业、海洋和深空探测等事业中。例如在海洋开发方面，我国在争取公海海域优先开采权的过程中，由国家“863”计划研制的 6000m 水下无缆自治机器人系统先后两次出海，获得了海底锰结核分布的珍贵资料，使我国成为世界上少数几个具有深海探测能力的国家之一；在深空探测领域方面，由于机器人的自身特点和功用，可以处在人类无法到达或相当危险的环境中去工作，因此，它的重要性再次体现。例如，我国启动的“嫦娥工程”探月工程论证和关键技术的攻关，中国首先登上月球的是机器人而不是人，由它对月球进行考察、分析、取样。“机器人遥控操作系统”模拟了科学家在地面操作太空机器人的行动。中国几代人航天梦想的实现，使科学家们的眼光越来越集中到深空探测领域。“神舟七号”的发射成功，使机器人的应用显得愈加重要。

三、工业机器人的优点

综上所述，工业机器人的应用给人类带来了许多好处，如：

（1）减少劳动力费用。

（2）提高生产率。

（3）改进产品质量。

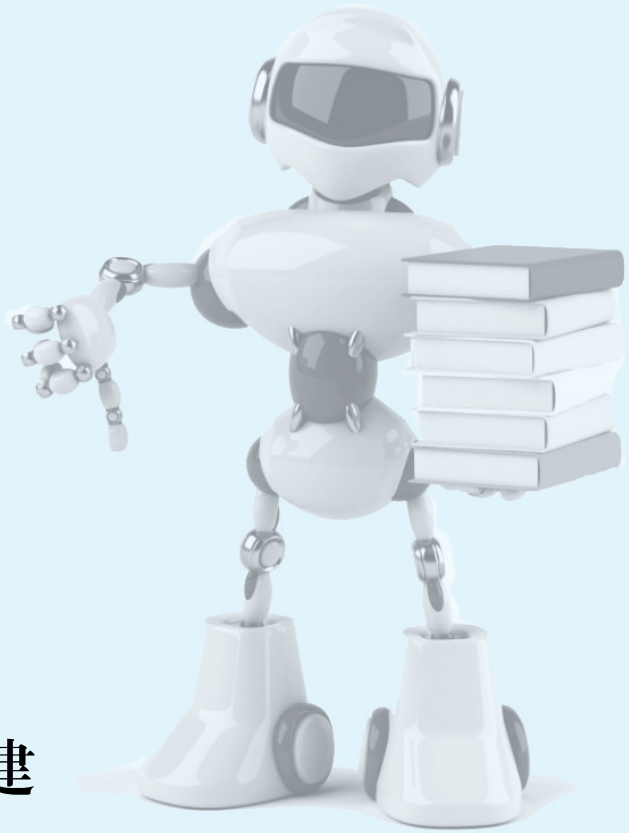
（4）增加制造过程的柔性。

（5）减少材料浪费。

（6）控制和加快库存的周转。

（7）降低生产成本。

（8）消除危险和恶劣的工作岗位。



项目二
工业机器人的基础构建

项目概述

工业机器人由操作机（机械本体）、控制器、伺服驱动系统和检测传感装置构成，是一种仿人操作、自动控制、可重复编程、能在三维空间完成各种作业的机电一体化自动化生产设备。特别适合于多品种、大批量的柔性生产。它对稳定、提高产品质量，提高生产效率，改善劳动条件和产品的快速更新换代起着十分重要的作用。

本项目主要对工业机器人的基本组成、技术参数、坐标、机构表示方式以及工业机器人的控制系统进行介绍，使大家对工业机器人的结构、运行方式等有一定的知识储备。

学习目标

◉ 认知目标

1. 了解工业机器人的基本组成。
2. 了解工业机器人的技术参数。
3. 掌握工业机器人的坐标。
4. 了解工业机器人的机构表示方式。
5. 掌握工业机器人的控制系统。

◉ 能力目标

1. 能够掌握工业机器人的坐标判断。
2. 能够掌握工业机器人的控制系统分析。

任务一　工业机器人的基本组成

工业机器人由三大部分、六个子系统组成。

1. 工业机器人的三大部分

三大部分是机械部分、感受部分和控制部分。

（1）机械部分

机械部分是机器人的血肉组成部分，也就是我们常说的机器人本体部分，机械部分主要分为驱动系统和机械结构系统。

（2）感受部分

感受部分就好比人类的五官，为机器人工作提供感觉，帮助机器人工作过程更加精确，感受部分主要分为感知系统和机器人-环境交互系统。

（3）控制部分

控制部分相当于机器人的大脑部分，可以直接或者通过人工对机器人的动作进行控制。控制部分主要分为人-机交互系统和控制系统。根据机器人三部分的具体选择，可给出某个工业机器人的全称，如计算机控制具有视觉功能全电动关节机器人。但一般很少使用全称，就以机械部分的某些结构来命名，这样计算机控制具有视觉功能全电动关节机器人就简称为关节型机器人，也可以直接使用厂家给出的机器人名称，如×××机器人等。

2. 工业机器人的六个子系统



工业机器人的六个子系统

六个子系统是驱动系统、机械结构系统、感知系统、机器人-环境交互系统、人-机交互系统以及控制系统。图 2-1 所示为工业机器人系统组成及相互关系。

（1）驱动系统

要使机器人运行起来，需要给各个关节即每个运动自由度安装传动装置，这就是驱动系统。驱

动系统可以是液压、气动或电动的，也可以是把它们结合起来应用的综合系统，还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。

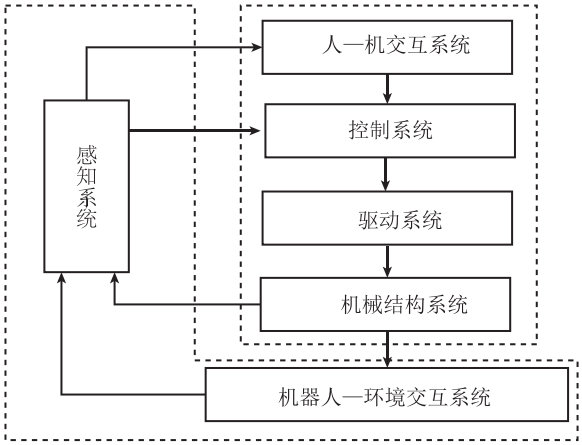


图 2-1　工业机器人系统组成框

（2）机械结构系统

工业机器人的机械结构系统是工业机器人为完成各种运动的机械部件。系统由骨骼（杆件）和连接它们的关节（运动副）构成，具有多个自由度，主要包括手部、腕部、臂部、机身等部件。

1）手部。手部又称为末端执行器或夹持器，是工业机器人对目标直接进行操作的部分，在手部可安装专用的工具，如焊枪、喷枪、电钻、电动螺钉（母）拧紧器等。

2）腕部。腕部是连接手部和臂部的部分，主要功能是调整手部的姿态和方位。

3）臂部。臂部用以连接机身和腕部，是支撑腕部和手部的部件，由动力关节和连杆组成。用以承受工件或工具的负荷，改变工件或工具的空间位置，并将它们送至预定位置。

4）机身。机身是机器人的支撑部分，有固定式和移动式两种。每一大件都需要若干自由度构成一个多自由度的机械系统。若机身具备行走机构便构成行走机器人；若机身不具备行走及腰转机构，则构成单臂机器人。手臂一般由上臂、下臂和手腕组成。末端执行器是直接装在手腕上的重要部件，它可以是二手指或多个手指的手爪。

（3）感知系统

感知系统由内部传感器和外部传感器组成，其作用是获取机器人内部和外部环境信息，并把这些信息反馈给控制系统。内部状态传感器用于检测各个关节的位置、速度等变量，为闭环伺服控制系统提供反馈信息。外部传感器用于检测机器人与周围环境之间的一些状态变量，如距离、接近程度和接触情况等，用于引导机器人，便于其识别物体并做出相应处理。外部传感器一方面使机器人更准确地获取周围环境情况，另一方面也能起到误差矫正的作用。

（4）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、装配单元等。也可以是多台机器人、多台机床设备或者多个零件存储装置集成为一个能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、指令控制台、信息显示板、危险信号警报器、示教盒等。简单来说，该系统可以分为两大部

分：指令给定系统和信息显示装置。

（6）控制系统

控制系统的任务是根据机器人的作业指令从传感器获取反馈信号，控制机器人的执行机构，使其完成规定的运动和功能。如果机器人不具备信息反馈特征，则该控制系统称为开环控制系统；如果机器人具备信息反馈特征，则该控制系统称为闭环控制系统。该部分主要由计算机硬件和软件组成。软件主要由人—机交互系统和控制算法等组成。

一套完整的工业机器人包括机器人本体、系统软件、控制柜、外围机械设备、CCD 视觉、夹具/抓手、外围设备 PLC 控制柜、示教器/示教盒，如图 2-2 所示。

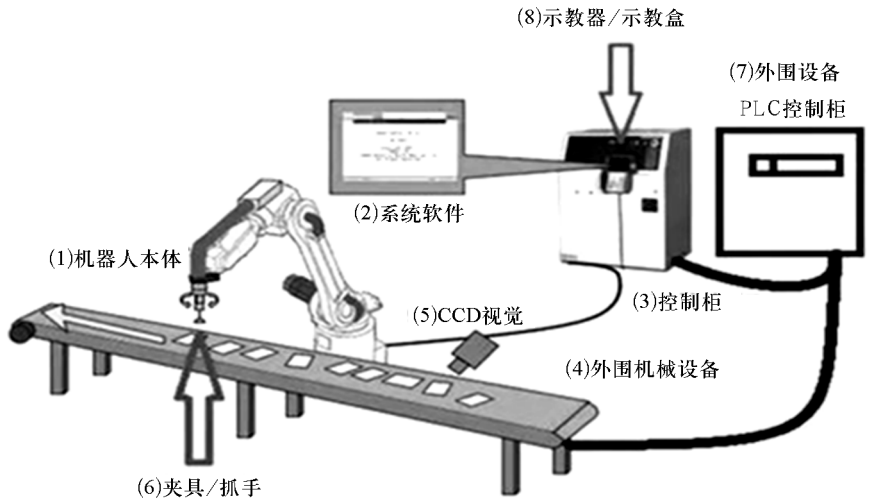


图 2-2　完整工业机器人的构成

扫一扫
工业机器人的技术参数

任务二　工业机器人的技术参数

工业机器人的种类、用途以及用户要求都不尽相同，但工业机器人的主要技术参数应包括以下几个：自由度、驱动方式、控制方式、定位精度和重复定位精度、工作范围、最大工作速度和承载能力。

1. 自由度

自由度（Degree of Freedom）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。机器人的一个自由度对应一个关节，所以自由度与关节的概念是相等的。自由度是表示机器人动作灵活程度的参数，自由度越多就越灵活，但结构也越复杂，控制难度越大，所以机器人的自由度要根据其用途设计，一般在 3～6 个。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个目标位置。

2. 驱动方式

驱动方式主要指的是关节执行器的动力源形式，一般有液压驱动、气压驱动和电机驱动。液压驱动的优点：具有较大推力或转矩；工作平稳，位置精确；力、速度、方向容易实现自动控制；使用寿命长。其缺点是温度相关危险性高；易泄漏，造价高；供油要求严格。气压驱动的优点：容易达到高速；运行环境要求低；价格低廉；有较高的安全性、柔软性。其缺点是结构要求大；平稳性差，难以实现精确控制；零件易损耗；有噪声污染。电机驱动是现代工业机器人的一种主流驱动方式。电机分为直流伺服电机、交流伺服电机、步进电机和直线电机四大类。直流伺服电机和交流伺服电机采用闭环控制，一般用于高精度、高速度的机器人驱动；步进电机用于精度和速度要求不高的场合，采用开环控制；直线电机及其驱动控制系统在技术上已日趋成熟，已具有传统传动装置无法比拟的优越性能，例如适应非常高速和非常低速应用、高加速度，高精度，无空回、磨损小、结构简单、无须减速机和齿轮丝杠联轴器等。由于并联机器人中有大量的直线驱动需求，因此直线电机在并联机器人领域已经得到了广泛应用。

3. 控制方式

机器人的控制方式也被称为控制轴的方式，主要是用来控制机器人运动轨迹，一般来说，控制方式有两种：一种是伺服控制，所谓伺服控制指对物体运动的位置、速度及加速度等变化量的有效控制；另一种是非伺服控制。

4. 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。定位精度是指机器人末端执行器的实际位置与目标位置之间的偏差，由机械误差、控制算法与系统分辨率等部分组成。重复定位精度是指在同一环境、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，其位置的分散情况，是关于精度的统计数据。因重复定位精度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—再现工业机器人水平的重要指标。

5. 作业范围

作业范围是机器人运动时手臂末端或手腕中心所能到达的所有点的集合，也称为工作区域。由于末端执行器的形状和尺寸是多种多样的，为真实反映机器人的特征参数，因此作业范围是指不安装末端执行器时的工作区域。作业范围的大小不仅与机器人各连杆的尺寸有关，而且与机器人的总体结构形式有关。作业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存在手部不能到达的盲区（dead zone）而不能完成任务。

6. 最大工作速度

生产机器人的厂家不同，其所指的最大工作速度也不同，有的厂家指工业机器人主要自由度上最大的稳定速度，有的厂家指手臂末端最大的合成速度，对此通常都会在技术参数中加以说明。最大工作速度越高，其工作效率就越高。但是，工作速度就要花费更多的时间加速或减速，或者对工业机器人的最大加速率或最大减速率的要求就更高。

7. 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，而且与机器人运行的速度和加速度的大小和方向有关。为保证安全，将承载能力这一技术指标确定为高速运行时的承载能力。通常，承载能力不仅指负载质量，也包括机器人末端执行器的质量。

任务三　工业机器人的坐标

从一个称为原点的固定点通过轴定义平面或空间。机器人目标和位置通过沿坐标系轴的测量来定位。机器人使用若干坐标系，每一坐标系都适用于特定类型的微动控制或编程。

如图 2-3 所示为空间直角坐标系，x 轴为横轴，y 轴为纵轴，z 轴为竖轴，O 点为坐标原点。通过每两个坐标轴的平面叫作坐标平面，分别称为 xOy 平面、yOz 平面、zOx 平面。图 2-4 所示为右手直角坐标系，以右手握住 z 轴，当右手的四指从正向 x 轴以 $\frac{\pi}{2}$ 角度转向正向 y 轴时，大拇指的指向就是 z 轴的正向，这样的三条坐标轴就组成了一个空间直角坐标系，点 O 叫坐标原点。

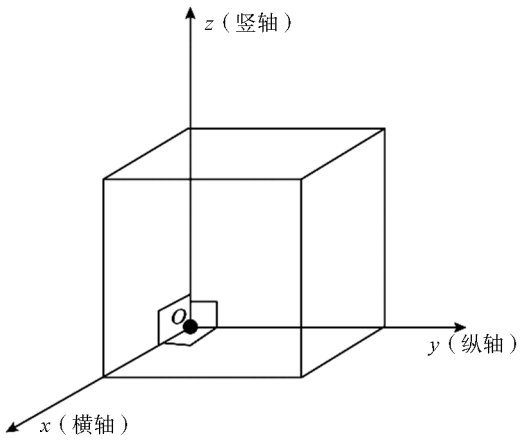


图 2-3　空间直角坐标系

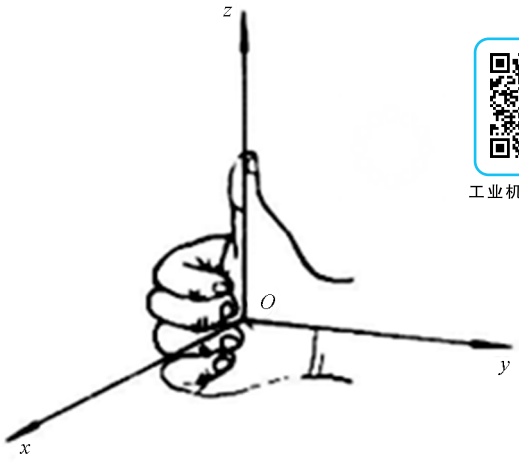


图 2-4　右手直角坐标系

扫一扫
工业机器人的坐标

工业机器人有五种坐标系，即大地坐标系、基坐标系、工件坐标系、工具坐标系和用户坐标系。下面以 ABB 机器人为例分别进行介绍。

1. 大地坐标系

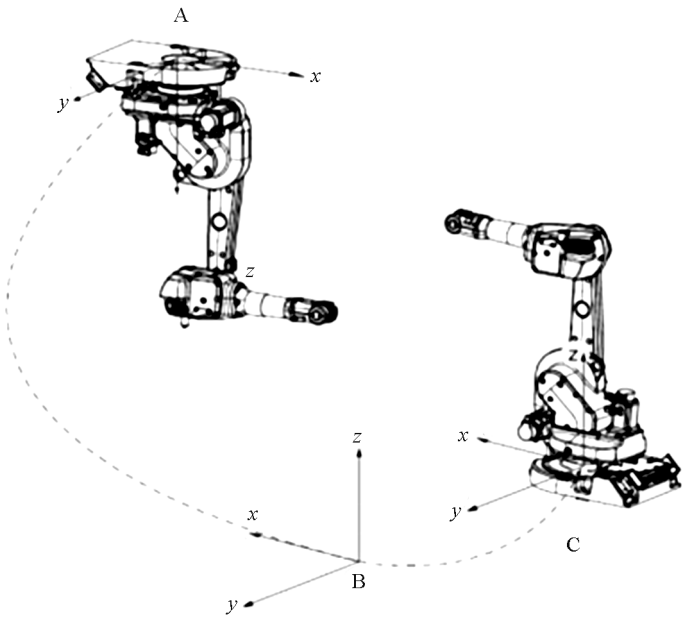
大地坐标系可定义机器人单元，所有其他的坐标系均与大地坐标系直接或间接相关。图 2-5B、图 2-7A、图 2-9B 所示为大地坐标系，它适用于微动控制，一般移动以及处理具有若干机器人或外轴移动机器人的工作站和工作单元。大地坐标系在工作单元或工作站中的固定位置有其相应的零点。这有助于处理若干个机器人或由外轴移动的机器人。在默认情况下，大地坐标系与基坐标系是一致的。

2. 基坐标系

基坐标系位于机器人基座，如图 2-5A、C，图 2-6，图 2-7C 所示。它是机器人从一个位置移动到另一个位置的坐标系。

基坐标系在机器人基座中有相应的零点，这使固定安装的机器人的移动具有可预测性。因此，它对于将机器人从一个位置移动到另一个位置很有帮助。对机器人编程来说，其他如工件坐标系等坐标系通常是最佳选择。在正常配置的机器人系统中，当人站在机器人的前方并在基坐标系中微动控制，将控制杆拉向自己一方时，机器人将沿 x 轴移动；向两侧移动控制杆时，机器人将沿 y 轴移

动。扭动控制杆，机器人将沿 z 轴移动。



A—机器人倒基坐标系；B—大地坐标系；C—机器人正基坐标系。

图 2-5　大地坐标系

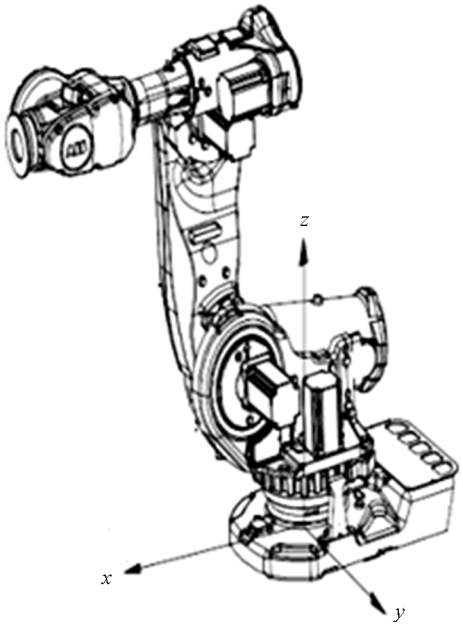
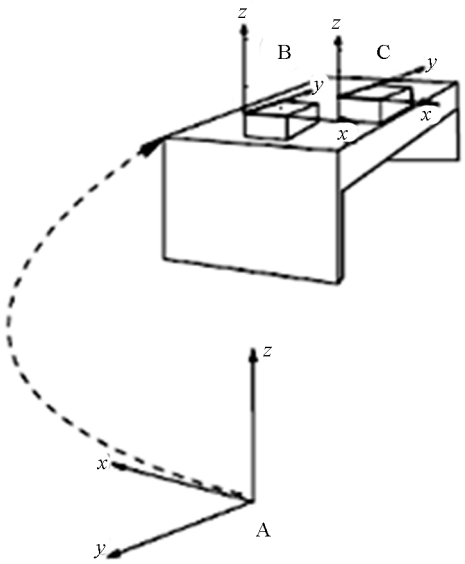


图 2-6　基坐标系



A—大地坐标系；B—工件坐标系；C—工件坐标系。

图 2-7　工件坐标系

3. 工件坐标系

工件坐标系与工件相关，通常是最适于对机器人进行编程的坐标系，如图 2-7B、C 和图 2-9E 所示。工件坐标系由工件原点与坐标轴方位构成。使用了工件坐标系的指令中，坐标数据是相对工件坐标系的位置，一旦工件坐标系移动，相关轨迹点相对大地同步移动。通过重新定义工件，可使一个程序适合多台机器人。如果系统中含有外部轴或多台机器人，必须定义工件坐标系。如果工作点

的位置数据是手动输入的，可以方便地从图纸上确定数值。一般默认工件坐标系与机器人基坐标重合。对机器人进行编程时就是在工件坐标系中创建目标和路径。在重新定位工作站中的工件时，只需更改工件坐标系的位置，所有路径将即刻随之更新，因为整个工件可连同其路径一起移动，所以允许操作以外轴或传送导轨移动的工件。

4. 工具坐标系

工具坐标系定义机器人到达预设目标时所使用工具的位置。工具坐标系（图 2-8）由工具中心点（TCP）与坐标轴方位构成，运动时 TCP 会严格按程序指定路径和速度运动。所有机器人在手腕处都有一个预定义工具坐标系，默认工具中心点位于 6 轴中心。程序中支持多个工具，可根据当前工作状态进行变换，比如焊接程序可以定义多个工具对应不同的杆伸长度。工具被更换之后，重新定义工具即可直接运行程序。

5. 用户坐标系

用户坐标系（图 2-9A）在表示持有其他坐标系的设备（如工件）时非常有用。用户坐标系可用于表示固定装置、工作台等设备。这就在相关坐标系中提供了一个额外级别，有助于处理持有工件或其他坐标系的处理设备。

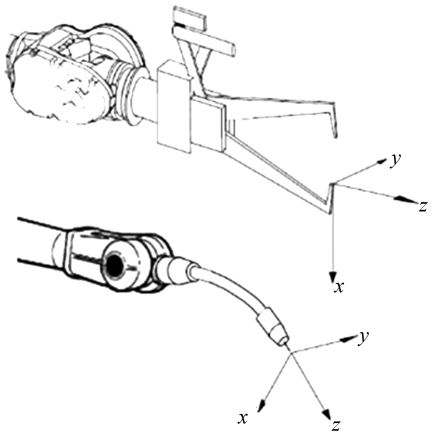
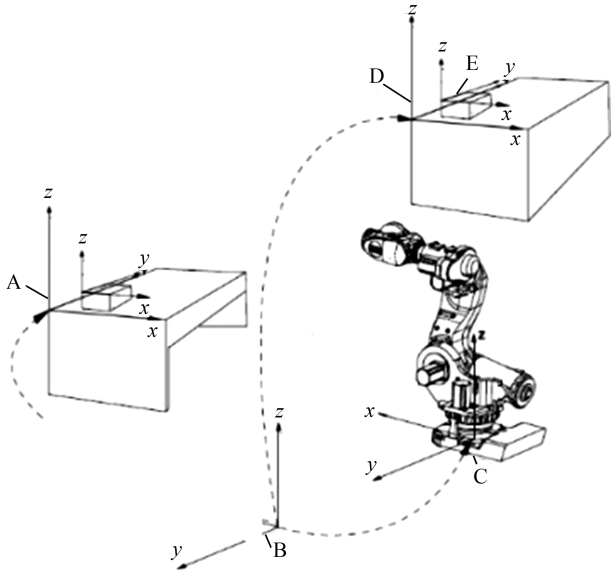


图 2-8　工具坐标系



A—用户坐标系；B—大地坐标系；C—基坐标系；
D—移动用户坐标系；E—工件坐标系。

图 2-9　用户坐标系

任务四　工业机器人的机构表示方式

工业机器人的结构是一个空间开链机构，各个关节的运动是独立的，工业机器人的本体结构由机体结构和机械传动系统组成，它也是机器人的支承基础和执行机构。

一、工业机器人的本体基本结构



工业机器人的本体基本结构

工业机器人的本体基本结构包括传动部件、机身及行走机构、臂部、腕部和手部五部分，如图 2-10 所示，其中，腕部构成姿态机构，大臂、腰部和机座构成位置机构。它有六个关节，如图 2-11 所示，关节就是工业机器人的运动副。

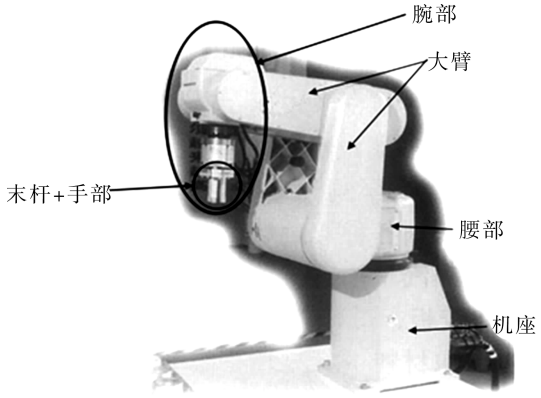


图 2-10　工业机器人本体基本结构

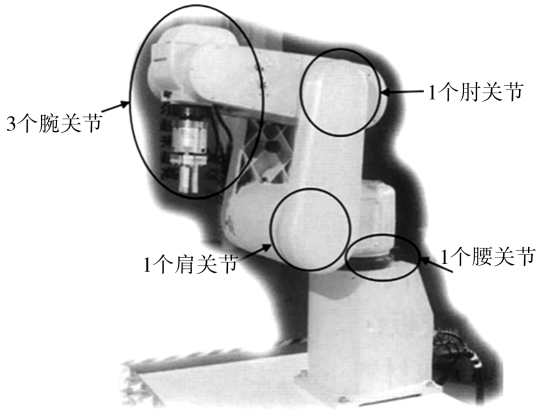


图 2-11　工业机器人的关节

工业机器人本体基本结构的主要特点有以下几个。

（1）开式运动链：结构刚度不高。

（2）相对机架：独立驱动器，运动灵活。

（3）扭矩变化非常复杂：对刚度、间隙和运动精度都有较高的要求。

（4）动力学参数（力、刚度、动态性能）都是随位姿的变化而变化：易发生振动或出现其他不稳定现象。

工业机器人本体基本结构的要求有以下几个。

（1）自重小：改善机器人操作的动态性能。

（2）静动态刚度高：提高定位精度和跟踪精度；增加机械系统设计的灵活性；减小定位时的超调量稳定时间，降低对控制系统的要求和系统造价。

（3）固有频率高：避开机器人的工作频率，有利于系统的稳定。

二、工业机器人机身及臂部结构

1. 机器人机身结构的基本形式和特点

机身又称为立柱，机身要安装在机座上，机座往往与机身做成一体，它们的结构一般由机器人总体设计确定。既可以是固定式的，也可以是行走式的。机身是支承臂部的部件，起连接、支承和传动的作用。机身常有 1～3 个自由度，通常具有回转、升降、回转与升降、回转与俯仰、回转与升降以及俯仰共 5 种运动，采用哪一种自由度形式应根据工业机器人的总体设计来定。如圆柱坐标式机器人把回转与升降两个自由度归属于机身；球坐标式机器人把回转与俯仰两个自由度归属于机身；关节坐标式机器人把回转自由度归属于机身；直角坐标式机器人有时把升降（z 轴），有时把水平移

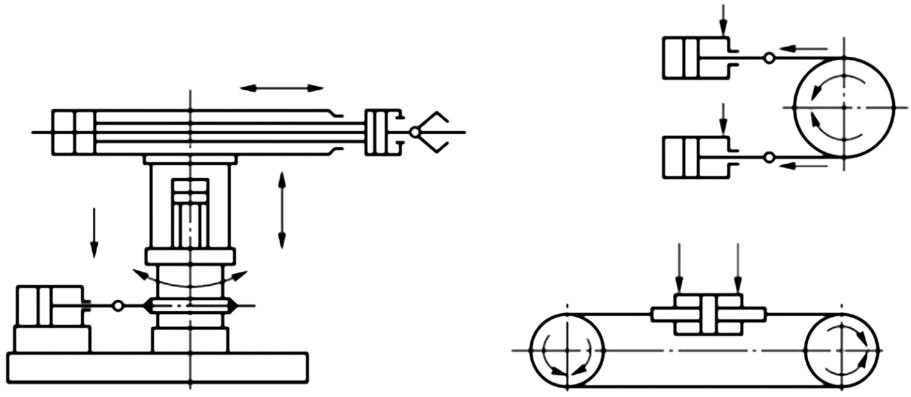
动（x 轴）一个自由度归属于机身。下面简单介绍回转与升降机身和回转与俯仰机身。

（1）回转与升降机身

1）回转运动采用摆动泊缸驱动，升降泊缸在下，回转油缸在上，因摆动缸安置在升降活塞杆的上方，故活塞杆的尺寸要大一些。

2）回转运动采用摆动泊缸驱动，回转油缸在下，升降油缸在上，则回转油缸的驱动力矩要大一些。

3）链轮传动机构，链条链轮传动是将链条的直线运动变为链轮的回转运动，它的回转角度可大于360°，图 2-12（a）所示为工业机器人采用单杆活塞气缸驱动链条链轮传动机构，以实现机身的回转运动（详见 K 向视图），图 2-12（b）为用双杆活塞气缸驱动链条链轮回转的方式。



（a）单杆活塞气缸驱动链条传动机构　　（b）双单杆活塞气缸驱动链条传动机构

图 2-12　链条链轮传动实现机身回转的原理图

（2）回转与俯仰机身

机器人手臂的俯仰运动，一般是采用活塞油（气）缸与连杆机构来实现的。手臂俯仰运动用的活塞缸位于手臂的下方，其活塞杆和手臂用铰链连接，缸体采用尾部耳环或中部销轴等方式与立柱连接，如图 2-13 所示。除此之外，还有的采用无杆活塞缸驱动齿条齿轮或四连杆机构实现手臂的俯仰运动。

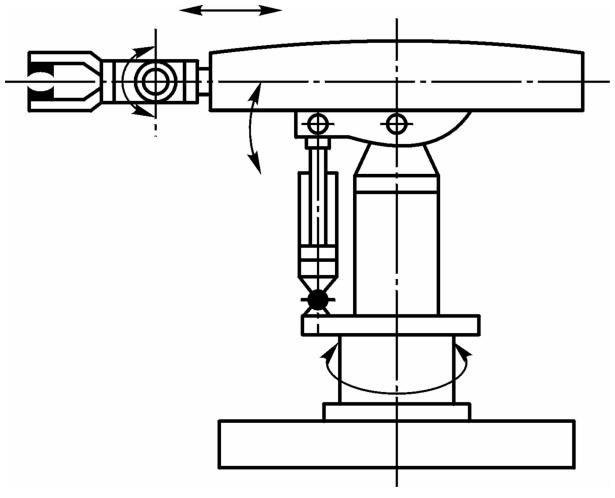


图 2-13　工业机器人的回转与俯仰机身

（3）机身驱动力（力矩）计算

1）垂直升降运动驱动力的计算。做垂直运动时，除克服摩擦力 F_m 之外，还要克服机身自身运动部件的重力和其承受的手臂、手腕、手部、工件等总重力 W 以及升降运动的全部总惯性力 F_g，其驱动力 F_q 按式（2-1）计算：

$$P_q = F_m + F_g \pm W \tag{2-1}$$

式中 F_m ——各支承处的摩擦力（N）；

F_g ——启动时总惯性力（N）；

W ——运动部件的总重力（N）；

$\pm$ ——上升时为正，下降时为负。

2）回转运动驱动力矩的计算。回转运动驱动力矩只包括两项，即回转部件的摩擦总力矩及机身自身运动部件和其携带的手臂、手腕、手部、工件等的总惯性力矩，驱动力矩按式（2-2）计算：

$$M_q = M_m + M_g \tag{2-2}$$

式中 M_m ——总摩擦阻力矩（N·m）；

M_g ——各回转运动部件总惯性力矩（N·m）。

$$M_g = J_0 \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \tag{2-3}$$

式中 $\Delta\omega$ ——在升速或制动过程中角速度增量（1/s）；

Δt ——回转运动升速过程或制动过程的时间（s）；

J_0 ——全部回转零部件对机身回转轴的转动惯量（kg·m^2）。

如果零件外廓尺寸不大，重心到回转轴线距离又远时，一般可按质点计算它对回转轴线的转动惯量。

3）升降立柱下降不卡死（不自锁）的条件计算。偏重力矩是指臂部全部零部件与工件的总质量对机身立柱轴的静力矩。当手臂悬伸为最大行程时，其偏重力矩为最大，因此偏重力矩应按悬伸最大行程、最大抓重时进行计算。各零部件的质量可根据其结构形状、材料密度进行粗略计算，由于大多数零件采用对称形状的结构，其中心位置就在几何截面的几何中心上，根据静力学原理可求出手臂总质量的中心位置距机身立柱轴的距离，也称作偏重力臂，如图 2-14 所示，其大小按式（2-4）计算：

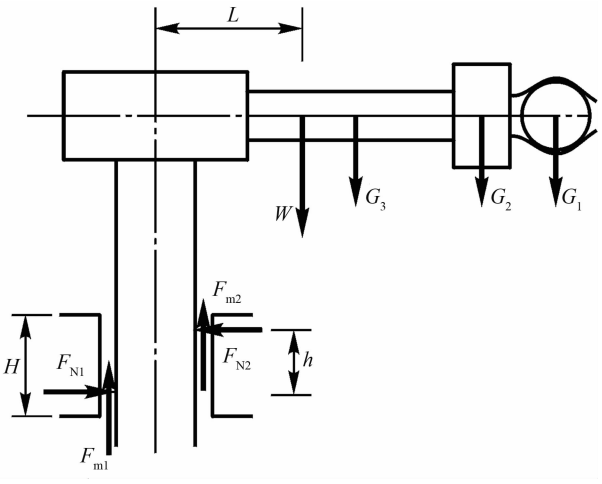


图 2-14　手臂的偏重力矩

$$L = \frac{\sum (G_i L_i)}{\sum G_i} \tag{2-4}$$

式中 G_i ——零部件及工作的质量（kg）；

L_i ——零部件及工件等的重心分别到机身立柱轴的距离（m）。

手臂在总质量的作用下有一偏重力矩，而立柱支承导套产生阻止手臂倾斜的力矩，偏重力矩对

升降运动的灵活性有很大影响，如果偏重力矩过大，支承导套与立杆之间摩擦力就过大，会产生“卡住”现象。如果依靠自重下降，可能立柱被卡死在导套内而不能做下降运动的现象称为“自锁”。因此，必须根据偏重力矩的大小决定立杆导套的长短。要使升降立柱在导套内下降自由，臂部总质量（W）必须大于导套与立柱之间的摩擦力 F_{m1} 及 F_{m2}，因此，升降立柱靠自重下降而不至卡死的条件为

$$W > F_{m1} + F_{m2} = 2N_1 f = 2\frac{L}{h}Wf \tag{2-5}$$

化简后得

$$h > 2fL \tag{2-6}$$

式中　h ——导套的长度（m）；

f ——导套与立柱之间的摩擦系数（$f=0.015\sim0.1$，一般取较大值）；

L ——偏重力矩（N·m）。

假如立柱升降都是依靠驱动力进行的，则不存在立柱自锁（卡死）条件。

2. 机器人臂部结构的基本形式和特点

工业机器人的臂部一般具有 2～3 个自由度，即伸缩、回转或俯仰。臂部支承腕部和手部，并带动它们在空间运动。在工作中直接承受腕、手和工件的静、动载荷，自身运动又较多，故受力复杂。臂部的结构形式必须根据机器人的运动形式、抓取质量、动作自由度、运动精度等因素来确定，同时要考虑到手臂的受力情况、油（气）缸及导向装置的布置、内部管路与手腕的连接形式等因素。机器人臂部的特点有刚度要求高，导向性好，质量轻，运动平稳及定位精度高。

（1）手臂的常用结构

1）手臂直线运动机构。机器人手臂的伸缩、横向移动均属于直线运动。实现手臂往复直线运动的机构形式比较多，常用的有活塞油（气）缸、齿轮齿条机构、丝杠螺母机构以及连杆机构等。由于活塞油（气）缸的体积小、质量轻，因此在机器人的手臂结构中应用比较多。

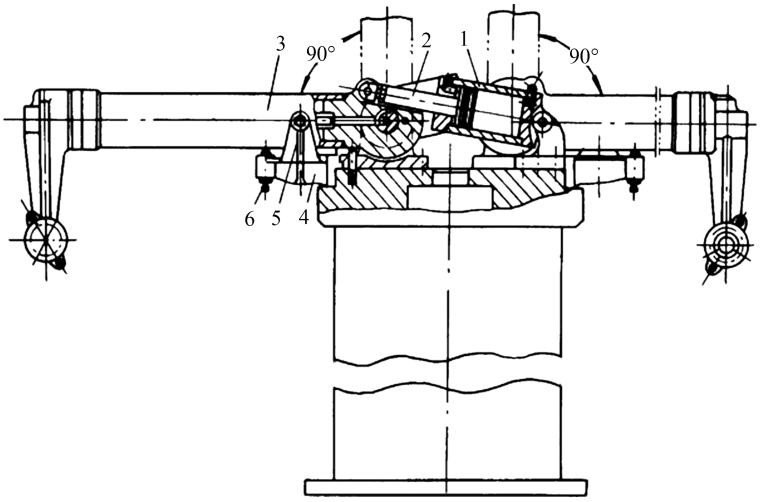
2）手臂回转运动机构。实现机器人手臂回转运动的机构形式是多种多样的，常用的有叶片式回转缸、齿轮传动机构、链轮传动机构、活塞缸和连杆机构等。图 2-15 所示为采用活塞缸和连杆机构的一种双臂机器人手臂的结构图。手臂的上下摆动由铰接活塞由缸和连杆机构来实现。当活塞油缸 1 的两腔通压力油时，通过连杆 2 带动曲柄 3（即手臂）绕轴心 O 做 90°的上下摆动（如双点划线所示位置）。手臂下摆到水平位置时，其水平和侧向的定位由支承架 4 上的定位螺钉 6 和 5 来调节。此手臂结构具有传动结构简单、紧凑和轻巧等特点。

（2）臂部运动驱动力计算

计算臂部运动驱动力（包括力矩）时，要把臂部所受的全部负荷考虑进去。机器人工作时，臂部所受的负荷主要有惯性力、摩擦力和重力等。

1）臂部水平伸缩运动驱动力的计算。臂部做水平伸缩运动时，首先要克服摩擦阻力，包括油（气）缸与活塞之间的摩擦阻力及导向杆与支承滑套之间的摩擦阻力等，还要克服启动过程中的惯性力。驱动力按式（2-7）计算：

$$P_q = F_m + F_g \tag{2-7}$$



1—铰接活塞油缸；2—连杆（活塞杆）；3—手臂（曲柄）；4—支承架；5、6—定位螺钉。

图 2-15　双臂机器人的手臂结构

式中　F_m ——各支承处的摩擦阻力（N）；

F_g ——启动过程中的惯性力（N）。

其中

$$F_g = Ma$$

M ——手臂伸缩部件的总质量（kg）；

a ——启动过程中的平均加速度（m/s^2）。

2）臂部回转运动驱动力矩的计算。臂部回转运动驱动力矩应根据启动时产生的惯性力矩与回转部件支承处的摩擦力矩来计算。由于升速过程一般不是等加速运动，因此最大驱动力矩要比理论平均值大一些，一般取平均的 1.3 倍。驱动力矩按式（2-8）计算：

$$M_q = 1.3 \times (M_m + M_g) \tag{2-8}$$

式中　M_m ——各支承处的总摩擦力矩（N·m）；

M_g ——启动时惯性力矩（N·m）。

对于活塞、导向套筒和油（气）缸等的转动惯量都要做详细计算，因为这些零件的质量较大或回转半径较大，对总的计算结果影响也较大；对于小零件则可作为质点计算其转动惯量，对其质心转动惯量则忽略不计。对于形状复杂的零件，可划分为几个简单的零件分别进行计算，其中有的部分可当作质点计算。各种几何截面和几何形体的转动惯量可查阅力学手册或其他有关手册。

三、工业机器人腕部结构

工业机器人的腕部是连接手部与臂部的部件，起支承手部的作用。机器人一般具有六个自由度才能使手部（末端操作器）达到目标位置和处于期望的姿态，手腕上的自由度主要是实现所期望的姿态。

为了使手部能处于空间任意方向，要求腕部能实现对空间三个坐标轴 X、Y、Z 的转动，即具有翻转、俯仰和偏转三个自由度，如图 2-16 所示。通常也把手腕的翻转叫作 Roll，用 R 表示；把手腕的俯仰叫作 Pitch，用 P 表示，把手腕的偏转叫作 Yaw，用 Y 表示。

腕部实际所需要的自由度数目应根据机器人的工作性能要求来确定。在有些情况下，腕部具有两个