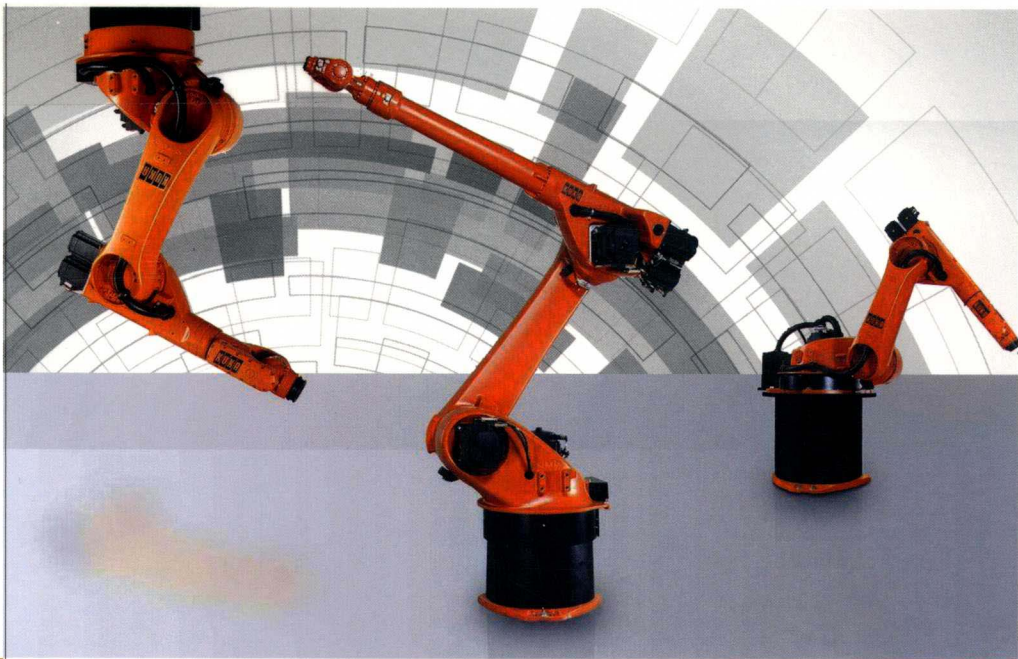


许怡赦 邓三鹏◎主编

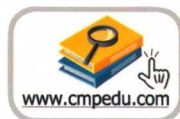


“十三五”智能制造高级应用型人才培  
养规划教材

# KUKA工业机器人 编程与操作

KUKA GONGYE JIQIREN  
BIANCHENG YU CAOZUO

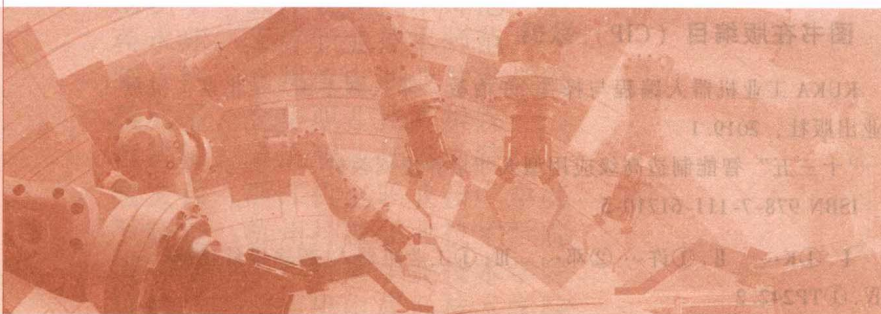
 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



附 电子 课件

“十三五”智能制造高级应用型人才培养规划教材

# KUKA工业机器人 编程与操作



主编 许怡赦 邓三鹏  
参编 唐东梅 罗建辉 梅凯 何用辉  
周宇 曾小波 许孔联

本书以北京华航唯实机器人科技股份有限公司的工业机器人实训系统为平台,基于“项目引领、任务导入”的理念安排内容,共分为 KUKA 工业机器人手动操作、KUKA 工业机器人坐标系测量、KUKA 工业机器人搬运编程与操作、KUKA 工业机器人涂胶编程与操作、基于 RobotArt KUKA 工业机器人离线编程 5 个项目,共 23 个任务。每个项目均采用实践案例讲解,兼顾了工业机器人技术基础知识和实际应用情况;每个任务均深入浅出,图文并茂,以提高学生的学习兴趣和效率。本书在介绍理论基础的同时,力求内容的实用性和实施的可操作性,突出动手能力和创新素质的培养,是一本理论与实践相结合、系统介绍 KUKA 工业机器人编程与操作的教材。

本书可作为高职高专工业机器人技术、机电一体化技术和电气自动化技术等专业的教材,也可作为各类工业机器人技术应用的培训教材,还可供从事工业机器人系统集成、工业机器人编程与操作的工程技术人员参考。

本书配有电子课件,凡使用本书作为教材的教师均可登录机械工业出版社教育服务网 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册后下载。咨询电话:010-88379375。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

KUKA 工业机器人编程与操作/许怡赦,邓三鹏主编. —北京:机械工业出版社,2019.1

“十三五”智能制造高级应用型人才培养规划教材

ISBN 978-7-111-61710-5

I. ①K… II. ①许… ②邓… III. ①工业机器人-程序设计-教材  
IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 297686 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:薛礼

责任编辑:薛礼

责任校对:肖琳 李杉 封面设计:鞠杨

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·9.5 印张·226 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-61710-5

定价:30.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

# “十三五”智能制造高级应用型人才 培养规划教材 编审委员会

- 主任委员：**孙立宁 苏州大学机电工程学院院长  
陈晓明 全国机械职业教育教学指导委员会主任
- 副主任委员：**曹根基 全国机械职业教育教学指导委员会智能制造技术专业教学指导委员会主任  
苗德华 天津职业技术师范大学原副校长  
邓三鹏 天津职业技术师范大学机器人及智能装备研究所所长
- 秘书长：**邓三鹏 天津职业技术师范大学
- 秘书**
- 委员：**薛礼 权利红 王 铎  
(排名不分先后)
- 杜志江 哈尔滨工业大学  
禹鑫焱 浙江工业大学  
陈国栋 苏州大学  
祁宇明 天津职业技术师范大学  
刘朝华 天津职业技术师范大学  
蒋永翔 天津职业技术师范大学  
陈小艳 常州机电职业技术学院  
戴欣平 金华职业技术学院  
范进楨 宁波职业技术学院  
金文兵 浙江机电职业技术学院  
罗晓晔 杭州科技职业技术学院  
周 华 广州番禺职业技术学院  
许怡赦 湖南机电职业技术学院  
龙威林 天津现代职业技术学院  
高月辉 天津现代职业技术学院  
高 强 天津渤海职业技术学院  
张永飞 天津职业大学  
魏东坡 山东华宇工学院  
柏占伟 重庆工程职业技术学院  
谢光辉 重庆电子工程职业学院  
周 宇 武汉船舶职业技术学院  
何用辉 福建信息职业技术学院  
张云龙 包头轻工职业技术学院  
张 廷 呼伦贝尔职业技术学院  
于风雨 扎兰屯职业技术学院  
吕世霞 北京电子科技职业学院  
梅江平 天津市机器人产业协会秘书长  
王振华 江苏汇博机器人技术股份有限公司总经理  
周旺发 天津博诺机器人技术有限公司总经理  
曾 辉 埃夫特智能装备股份有限公司副总经理

# 序

制造业是实体经济的主体，是推动经济发展、改善人民生活、参与国际竞争和保障国家安全的根本所在。纵观世界强国的崛起，都是以强大的制造业为支撑的。在虚拟经济蓬勃发展的今天，世界各国仍然高度重视制造业的发展。制造业始终是国家富强、民族振兴的坚强保障。

当前，新一轮科技革命和产业变革在全球范围内蓬勃兴起，创新资源快速流动，产业格局深度调整，我国制造业迎来“由大变强”的难得机遇。实现制造强国的战略目标，关键在人才。在全球新一轮科技革命和产业变革中，世界各国纷纷将发展制造业作为抢占未来竞争制高点的重要战略，把人才作为实施制造业发展战略的重要支撑，加大人力资本投资，改革创新教育与培训体系。当前，我国经济发展进入新时代，制造业发展面临着资源环境约束不断强化、人口红利逐渐消失等多重因素的影响，人才是第一资源的重要性更加凸显。


《中国制造 2025》第一次从国家战略层面描绘建设制造强国的宏伟蓝图，并把人才作为建设制造强国的根本，对人才发展提出了新的更高要求。提高制造业创新能力，迫切要求培养具有创新思维和创新能力的拔尖人才、领军人才；强化工业基础能力，迫切要求加快培养掌握共性技术和关键工艺的专业人才；信息化与工业化深度融合，迫切要求全面增强从业人员的信息技术运用能力；发展服务型制造业，迫切要求培养更多复合型人才进入新业态、新领域；发展绿色制造，迫切要求普及绿色技能和绿色文化；打造“中国品牌”“中国质量”，迫切要求提升全员质量意识和素养等。

哈尔滨工业大学在 20 世纪 80 年代研制出我国第一台弧焊机器人和第一台点焊机器人，30 多年来为我国培养了大量的机器人人才；苏州大学在产学研一体化发展方面成果显著；天津职业技术师范大学从 2010 年开始培养机器人职教师资，秉承“动手动脑，全面发展”的办学理念，进行了多项教学改革，建成了机器人多功能实验实训基地，并开展了对外培训和鉴定工作。这套规划教材是结合这些院校人才培养特色以及智能制造类专业特点，以“理论先进，注重实践，操作性强，学以致用”为原则精选教材内容，依据在机器人、数控机床的教学、科研、竞赛和成果转化等方面的丰富经验编写而成的。其中有些书已经出版，具有较高的质量，未出版的讲义在教学和培训中经过多次使用和修改，亦收到了很好的效果。

我们深信，这套丛书的出版发行和广泛使用，不仅有利于加强各兄弟院校在教学改革方面的交流与合作，而且对智能制造类专业人才培养质量的提高也会起到积极的促进作用。

当然，由于智能制造技术发展非常迅速，编者掌握材料有限，本套丛书还需要在今后的改革实践中获得进一步检验、修改、锤炼和完善，殷切期望同行专家及读者们不吝赐教，多加指正，并提出建议。

苏州大学教授、博导  
教育部长江学者特聘教授  
国家杰出青年基金获得者  
国家万人计划领军人才  
机器人技术与系统国家重点实验室副主任  
国家科技部重点领域创新团队带头人  
江苏省先进机器人技术重点实验室主任



2018 年 1 月 6 日

# Preface 前言

随着“中国制造 2025”战略的实施，各省市智能制造战略的相继落地，工业机器人应用得到了广泛的推广。行业研究数据显示，2013 年，我国市场工业机器人销量接近 4 万台，2015 年达到 7 万台，2016 年达到 9 万台；目前我国正在服役的机器人占全球总数的 10%，到 2020 年，我国工业机器人装机量将达到 100 万台。同时，人才短缺也成了工业机器人产业发展的瓶颈，目前国内工业机器人应用人才缺口将近 10 万人，到 2020 年，工业机器人操作维护、系统安装调试以及系统集成等应用型人才需求量将达到 20 万人左右。正是基于工业机器人产业对人才的迫切需求，中、高职院校纷纷开设了工业机器人技术专业，或在其他相关专业，如机电一体化技术、智能控制技术以及电气自动化技术等专业开设了工业机器人技术相关课程。

本书旨在培养学生在工业机器人安装、调试、维护等应用方面的技能，强调以学生操作为主，同时穿插了工业机器人技术基础的有关知识点，力求做到实践与理论相结合，突出实践能力的培养。KUKA 工业机器人作为机器人品牌四大家族之一，在国内具有较高的市场占有率，本书以 KUKA 工业机器人为例，结合工业机器人综合实训系统，从 KUKA 工业机器人手动操作、KUKA 工业机器人坐标系测量、KUKA 工业机器人搬运编程与操作、KUKA 工业机器人涂胶编程与操作、基于 RobotArt KUKA 工业机器人离线编程五个项目讲述 KUKA 工业机器人编程与操作，按照“项目引领、任务导入”的理念组织内容，力求由易到难，深入浅出，实操性强。

本书由许怡赦、邓三鹏任主编。编写分工为：湖南网络工程职业技术学院许孔联编写项目一，湖南理工职业技术学院曾小波编写项目二，湖南机电职业技术学院许怡赦、唐东梅和梅凯编写项目三，福建信息职业技术学院何用辉和武汉船舶职业技术学院周宇编写项目四，天津职业技术师范大学邓三鹏、湖南机电职业技术学院罗建辉编写项目五。

本书在编写过程中得到了北京华航唯实机器人科技股份有限公司的大力支持和帮助，在此深表谢意。

本书是编者近几年实践教学过程的总结，主要内容取自教学讲义。由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者不吝赐教，批评指正，联系邮箱：yishexu@163.com。

编者

# Contents 目录

序  
前言

<b>1</b>	项目一 KUKA 工业机器人	
	手动操作 .....	1
	任务一 轴坐标系下 KUKA 工业 机器人手动操作 .....	18
	任务二 世界坐标系下 KUKA 工业 机器人手动操作 .....	20
	任务三 工具坐标系下 KUKA 工业 机器人手动操作 .....	23
	任务四 基坐标系下 KUKA 工业 机器人手动操作 .....	26
	任务五 用外部固定工具手动操作 KUKA 工业机器人 .....	28
	练习与思考题 .....	32
<b>2</b>	项目二 KUKA 工业机器人	
	坐标系测量 .....	34
	任务一 工具坐标系测量 .....	57
	任务二 基坐标系测量 .....	61
	任务三 固定工具测量 .....	63
	任务四 机器人引导的工件坐标系 测量 .....	66
	练习与思考题 .....	69
<b>3</b>	项目三 KUKA 工业机器人搬运	
	编程与操作 .....	71
	任务一 运动规划和制订程序 流程图 .....	74
	任务二 示教前准备 .....	76
	任务三 新建程序 .....	76
	任务四 示教编程 .....	77
	任务五 运行搬运程序 .....	83
	任务六 循环搬运 .....	84
	练习与思考题 .....	86
<b>4</b>	项目四 KUKA 工业机器人	
	涂胶编程与操作 .....	87
	任务一 三角形和圆形运动 .....	95
	任务二 3D 轮廓的精确定位运动 和逼近运动 .....	102
	任务三 采用样条组的轨迹轮廓 编程 .....	112
	任务四 主程序对子程序调用 .....	118
	任务五 以外部的轨迹轮廓运动 编程 .....	120
	练习与思考题 .....	126
<b>5</b>	项目五 基于 RobotArt KUKA	
	工业机器人离线 编程 .....	127
	任务一 使用三维球进行零件 装配 .....	132
	任务二 气缸六面离线轨迹编程 .....	134
	任务三 生产流水线动画设计 .....	137
	练习与思考题 .....	141
	参考文献 .....	143

# 项目一

## KUKA 工业机器人手动操作

工业机器人集成了机械、电子、计算机、自动控制、传感器和人工智能等学科的先进技术，是一种应用于现代制造业的重要自动化装备，可在生产线及恶劣的环境中替代人进行工作，在保障人身安全、改善劳动环境、减轻劳动强度、提高产品质量和劳动生产率、降低生产成本等方面具有十分重要的意义。

### 学习目标

- 1) 了解工业机器人的定义和发展历史，工业机器人的组成和技术参数，工业机器人的分类，以及工业机器人在工业领域中的应用。
- 2) 了解 KUKA 工业机器人的组成、运动形式、工作空间、控制柜和示教器等的内容。
- 3) 掌握工业机器人坐标系和示教器的相关操作。
- 4) 能安全起动工业机器人，并按照安全操作规程来操作机器人。
- 5) 能完成轴坐标系、世界坐标系、工具坐标系和基坐标系下 KUKA 工业机器人的手动操作。

### 项目描述

本项目主要内容：工业机器人基础理论知识，包括工业机器人的定义和历史，工业机器人的组成、技术参数和分类，工业机器人的应用和展望；KUKA 工业机器人的组成和运动形式，KUKA 工业机器人示教器，手动操作机器人在轴坐标系、世界坐标系、工具坐标系和基坐标系下运动等内容，为下一步工业机器人操作和示教编程做好技术储备。

### 知识准备

#### 一、工业机器人认知

##### 1. 工业机器人的定义

机器人的英文单词是“Robot”，最早的含义是像奴隶那样进行劳动的机器。由于受到影视宣传和科幻小说的影响，人们往往把机器人想象成外貌与人相似的机器和电子装置。但现实并非如此，机器人中一个特别重要的分支——机器人与人的外貌毫无相似之处，在工业应用领域中，它通常被称为“机械手”。

随着时代发展，世界各国的科学家从不同角度给出了工业机器人的定义。

1) 美国机器工业协会（RIA）对工业机器人的定义：工业机器人是一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置的，通过可编程序动作来执行各种任务并具有编程能力的多功能机械手。

2) 国际标准化组织（ISO）对工业机器人的定义：工业机器人是一种能自动控制、可



重复编程、多功能、多自由度的操作机，能搬运材料、工件或操持工具来完成各种作业。其中，ISO 8373: 2012 给出了更具体的解释：工业机器人有自动控制与再编程、多用途功能，机器人操作机有三个或三个以上的可编程轴，在工业机器人自动化应用中，机器人的底座可固定也可移动。

3) 日本工业机器人协会 (JIRA) 对工业机器人的定义：工业机器人是一种带有存储器件和末端操作器的通用机械，它能够通过自动化的动作替代人类劳动。

4) 我国对工业机器人的定义：工业机器人是一种具备一些与人或者生物相似的智能能力和高度灵活性的自动化机器。

基于上述对工业机器人的描述，本书对工业机器人的定义：工业机器人即面向工业领域的机器人，是一种能在人的控制下智能工作，并能完美替代人力在生产线上工作的多关节机械手或多自由度的机器装置。更通俗地讲，工业机器人就是一种拟人手臂、手腕和手指动作的机械电子装置，在人的控制下，它可把任一物件或工具按空间位置姿态的要求进行移动，从而完成某一工业生产任务。

从工业机器人的定义中不难发现，工业机器人有以下四个显著特点：

1) 仿人功能。工业机器人通过各种传感器感知工作环境，具有自适应能力。在功能上模仿人的手臂、手腕、手指等部位达到工业自动化的目的。

2) 可编程。工业机器人作为柔性制造系统的重要组成部分，可编程功能是其适应工作环境能力的一种体现。

3) 通用性。工业机器人一般分为通用与专用两类。通用工业机器人只要更换不同的末端执行器就能完成不同的工业生产任务。

4) 良好的环境交互性。智能工业机器人在无人干预的条件下，对工作环境有自适应控制能力和自我规划能力。

## 2. 工业机器人的发展历史

自 20 世纪 50 年代末诞生以来，工业机器人的研究、开发及应用走过了 60 多年的历程，经历了起步期、快速发展期和智能化期。1954 年，美国人戴沃尔 (Devol) 制造出世界上第一台可编程机械手，并首次提出了“示教再现机器人”的概念，即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，由机器人实现动作的记录和再现。在此基础上，1956 年，戴沃尔与被誉“工业机器人之父”的美国发明家英格伯格 (Engelberger) 创建了世界上第一个机器人公司——Unimation (Universal Automation) 公司，并于 1959 年联手设计出第一台工业机器人——尤尼梅特 (Unimate) 机器人，如图 1-1 所示。英格伯格负责设计机器人的“手”“脚”和“身体”，即机器人的机械部分和完成操作部分；戴沃尔负责设计机器人的“头脑”“神经系统”和“肌肉系统”，即机器人的控制装置和驱动装置。Unimate 是一台用于压铸的五轴液压驱动机器人，手臂的控制由一台计算机完成。它采用了分离式固体数控元件，并装有存储信息的磁鼓，能够记忆完成 180 个工作步骤。1961 年，Unimation 公司生产的世界上第一台工业机器人在美国特伦顿 (新泽西州首府) 的通用汽车公司安装运行。与此同时，美国另一家机器人制造公司——AMF 公司于 1962 年制造出了世界上第一台圆柱坐标型工业机器人——沃尔萨特兰 (Versatran)，它主要用于机器之间的物料运送。1967 年，Unimate 机器人安装运行于瑞典工厂，这是在欧洲安装运行的第一台工业机器人。1969 年，通用汽车公司在其洛兹敦装配厂安装了首台点焊机器人，大大提高了生

产率。同年，挪威 Trallfa 公司提供了第一个商业化应用的喷漆机器人，日本川崎重工公司成功开发了日本第一台工业机器人——Kawasaki-Unimate2000。

虽然工业机器人是一种新颖而有效的制造工具，但到了 20 世纪 60 年代，利用传感器反馈增强机器人柔性的趋势就已经很明显了。20 世纪 60 年代末，传感器技术得到了飞速的发展，工业机器人迎来了进一步发展的良好契机。1973 年，博尔斯（Boles）和保罗（Paul）在斯坦福使用视觉和力反馈，表演了与 PDP-10 计算机相连并由计算机控制的“斯坦福”机械手，用于装配自动水泵。1973 年，德国库卡（KUKA）公司将其使用的 Unimate 机器人研发改造成世界上第一

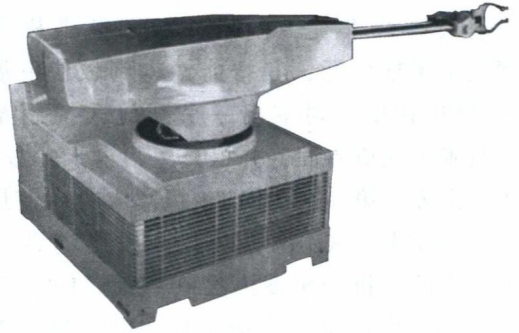


图 1-1 尤尼梅特（Unimate）机器人

一台机电驱动的六轴工业机器人——Famulus 机器人，如图 1-2 所示。1973 年，日本日立（Hitachi）公司开发出在混凝土桩行业使用的自动螺栓连接机器人，这是第一台安装有动态视觉传感器的工业机器人。它在移动的同时能够识别浇注模具上螺栓的位置，并且与浇注模具的移动同步，完成螺栓拧紧和拧松工作。1974 年，美国辛辛那提·米拉克龙（Cincinnati Milacron）公司的理查德·霍恩（Richard Hohn）开发出第一台由小型计算机控制的工业机器人，命名为 T3，从此第一台小型计算机控制的工业机器人走向市场。1974 年日本川崎重工公司将用于制造川崎摩托车框架的 Unimate 点焊机器人改造成弧焊机器人；同年，川崎还开发出世界上首款带精密插入控制功能的机器人，命名为“Hi-T-Hand”，该机器人还具备触摸和力学感应功能，其手腕灵活并带有有力反馈控制系统，因此它可以插入一个约  $10\mu\text{m}$  间隙的机械零件。1974 年，瑞典通用电机公司（ASEA，ABB 公司的前身）开发出世界上第一台全电力驱动、由微处理器控制的工业机器人——IRB 6，它主要应用于工件的取放和物料的搬运。1975 年，意大利 Olivetti 公司开发出直角坐标机器人——西格玛（SIGMA），它是一个应用于组装领域的工业机器人。1975 年，日本日立公司开发出第一台基于传感器的弧焊机器人，命名为“Mr. AROS”。与此同时，IBM 公司的威尔（Will）和格罗斯曼（Grossman）研制出一个带有触觉和力觉传感器的、由计算机控制的机械手，可以完成有 20 个零件的打字机的机械装配工作。1978 年，日本山梨大学的牧野洋（Hiroshi Makino）发明了选择顺应性装配机器人手臂（Selective Compliance Assembly Robot Arm, SCARA），世界上第一台 SCARA 工业机器人诞生；德国徠斯（Reis）机器人公司开发了世界首款拥有独立控制系统的六轴机器人——RE15；美国 Unimation 公司推出通用工业机器人（Programmable Universal Machine for Assembly, PUMA），应用于通用汽车装配线，这标志着工业机器人技术已经完全成熟。1979 年，日本不二越株式会社（Nachi）研制出世界上第一台电动机驱动的机器人，这台电动机驱动的点焊机器人开创了电力驱动机器人的新纪元，从此告别了液压驱动机器人的时代。1981 年，美国卡内基-梅隆大学的金出武雄（Takeo Kanade）设计开发出世界上第一个直接驱动机器人手臂；美国 PaR Systems 公司推出第一台龙门式工业机器人。1984 年，美国 Adept Technology 公司开发出第一台直接驱动的选择顺应性装配机器人手臂——AdeptOne，显著提高了机器人合成速度及定位精度。1984 年，瑞典 ABB 公司生产出当时速度最快的装

配机器人——IRB 1000。1985 年，德国库卡（KUKA）公司开发出一款新的 Z 形机器人手臂，该 Z 形机器人手臂具有三个平移运动和三个旋转运动共六个自由度，可大大节省制造工厂的场地空间。

进入到 20 世纪 90 年代以后，工业机器人的应用领域越来越广泛，其智能性得到较快发展。1992 年，瑞典 ABB 公司推出一个开放式控制系统——S4，改善了人机界面，并提升了机器人的技术性能；同年，世界上第一台 DELTA 机器人投入使用。1996 年，德国库卡（KUKA）公司开发出世界上第一台基于个人计算机的机器人控制系统。1998 年，瑞典 ABB 公司开发出世界上速度最快的采摘机器人——灵手（FlexPicke）机器人。1998 年，瑞士 Güdel 公司开发出“roboLoop”系统，这是当时世界上唯一的弧形轨道龙门吊和传输系统。1999 年，德国徠斯（Reis）机器人公司在机器人手臂内引入集成激光束指导系统，从而使机器人能够使用激光在高动态工况下没有碰撞地完成操作。2002 年，德国徠斯（Reis）机器人公司使工人和机器人之间实现了直接互动。2003 年，德国库卡（KUKA）公司开发出第一台娱乐机器人——Robocoaster。2004 年，日本安川（Motoman）机器人公司开发出改进的机器人控制系统——NX100，它能够同步控制四台机器人、最多可控制 38 轴。2006 年，意大利柯马（Comau）公司推出了第一款无线示教器（Wireless Teach Pendant, WiTP）。2007 年，日本安川（Motoman）机器人公司推出了当时世界上最快的弧焊机器人（图 1-3）；德国库卡（KUKA）公司推出了大载荷重型机器人。2008 年，日本发那科（FANUC）公司推出了大载荷重型机器人——M-2000iA。2009 年，瑞典 ABB 公司推出了当时世界上最小的多用途工业机器人——IRB120。2010 年，德国库卡（KUKA）公司推出了一系列新的货架式机器人——Quantec；日本发那科（FANUC）公司推出了学习控制机器人（Learning Control Robot）——R-2000iB。2011 年，第一台仿人型机器人进入太空。之后，工业机器人行业开始向智能化的发展方向快速迈进。

尽管工业机器人的发展历史并不长，但随着工业机器人发展的深度和广度增加，以及机器人智能水平的提高，工业机器人已在众多领域得到了应用。工业机器人领域正在向智能化、模块化和系统化的方向发展，具有广阔的市场前景。

### 3. 工业机器人的组成

工业机器人由机器人、作业对象及环境共同构成，其中包括机械系统、驱动系统、控制系统和感知系统四大部分。它们之间的关系如图 1-4 所示。

从图 1-4 中可以看出，工业机器人是一个典型的机电一体化系统。其工作原理为：控制系统发出动作指令，控制驱动系统工作；驱动系统带动机械系统运动，使末端操作器达到空间某一位置实现某一姿态，完成一定的作业任务；末端

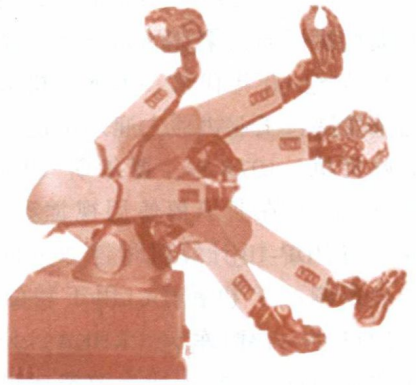


图 1-2 Famulus 机器人

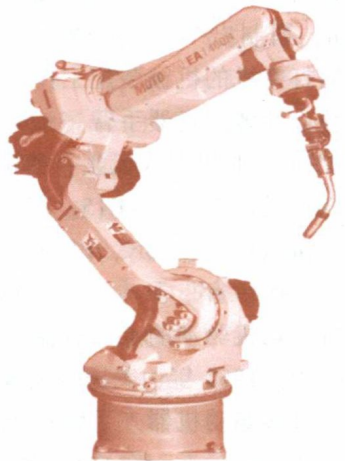


图 1-3 弧焊机器人

操作器在空间的实时位姿由感知系统反馈给控制系统，控制系统把实际位姿与目标位姿相比较，发出下一个动作指令；如此循环，直至完成作业任务为止。

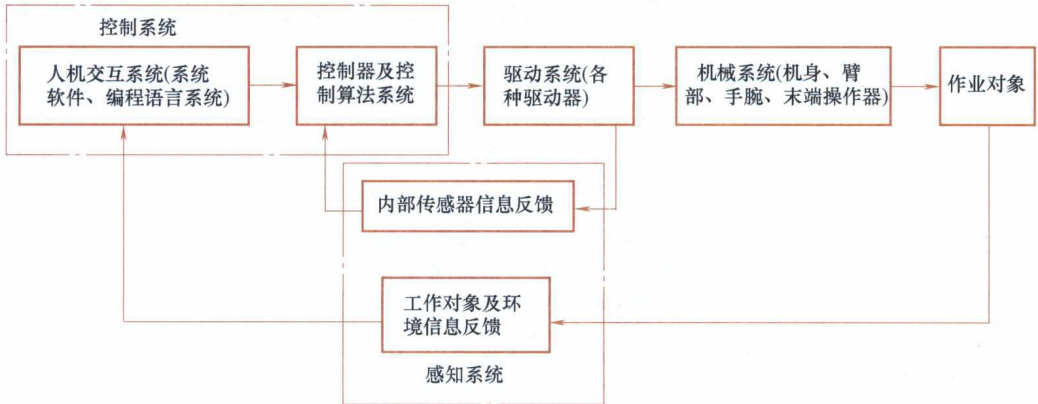


图 1-4 机器人系统组成

(1) 机械系统 工业机器人的机械系统包括机身、手臂、手腕、末端操作器和行走机构（不一定有），如图 1-5 所示。每一部分都有若干个自由度，构成一个多自由度的机械系统。若基座具备行走机构，则构成行走机器人；若基座不具备行走及腰转机构，则构成单机器人臂。手臂一般由上臂、下臂和手腕组成。末端操作器是直接装在手腕上的一个重要部件，它可以是两手指或多手指的手爪，也可以是喷漆枪、焊枪等作业工具。工业机器人机械系统的作用相当于人的身体。



图 1-5 工业机器人的机械系统结构

(2) 驱动系统 驱动系统主要是指驱动机械系统动作的驱动装置。根据驱动源的不同，机器人常用的驱动方式主要有电气驱动、液压驱动和气压驱动三种基本类型，它们的特点对比见表 1-1。目前，除了个别运动精度不高、重负载或者有防暴要求的机器人采用液压、气压驱动外，工业机器人大部分都采用电气驱动，而其中交流伺服电动机应用最广，且驱动器布置大都采用一个关节一个驱动器。

表 1-1 三种驱动方式的特点对比

驱动方式	对比项						
	特点	输出力	控制性能	维修使用	结构体积	使用范围	制造成本
电气驱动		输出力较大或较小	容易与 CPU 连接,控制性能好,响应快,可精确定位,但控制系统复杂	维修、使用较为复杂	需要减速装置,体积较小	高性能、运动轨迹要求严格的机器人	成本较高

(续)

对比项 特点 驱动方式	输出力	控制性能	维修使用	结构体积	使用范围	制造成本
液压驱动	压力高,可获得很大的输出力	油液不可压缩,压力、流量均容易控制,可无极调速,反应灵敏,可实现连续轨迹控制	维修方便,液体对温度变化敏感,油液泄漏易着火	在输出力相同的情况下,体积比气压驱动方式小	中、小型及重型机器人	液压原件成本较高,油路比较复杂
气压驱动	气体压力小,输出力较小,如果需要输出力较大的力,则结构尺寸过大	可高速运行,冲击较严重,精确定位困难。气体压缩性大,阻尼效果差,低速不易控制,不易与 CPU 连接	维修简单,能在高温、粉尘等恶劣环境中使用,气体泄漏无影响	体积较大	中、小型机器人	结构简单,工作介质来源方便,成本低

(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的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。外部状态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处理。感知系统的作用相当于人的五官。

(4) 控制系统 控制系统的任务是依据机器人的作业指令程序以及从传感器反馈回来的信号控制机器人执行机构,使其完成规定的运动和功能。该部分包括人机交互装置(图 1-6)和控制软件。人机交互装置是操作人员与机器人进行交互的装置,如示教盒;控制软件则指控制算法。控制系统的作用相当于人的大脑。



图 1-6 人机交互装置示教盒

#### 4. 工业机器人的技术参数

工业机器人的技术参数是各工业机器人制造商在产品供货时所提供的技术数据,也是工业机器人性能的主要表现,是设计、应用机器人必须考虑的方面。工业机器人的主要技术参数有自由度、精度、工作空间、最大工作速度和工作载荷等。

(1) 自由度 机器人自由度是指机器人所具有的独立坐标轴运动的数目,不包括末端操作器的开合自由度。机器人的一个自由度对应一个关节(允许机器人手臂各零件之间发生相对运动的机构),所以机器人的自由度数等于关节数目。自由度是表征机器人动作灵活程度的参数,自由度越高越灵活。从运动学的观点看,在完成某一特定作业时具有多余自由

度的机器人称为冗余自由度机器人。冗余自由度增加了机器人的灵活性，但也增加了机械结构的复杂性和控制难度。所以，机器人的自由度要根据实际用途设计，一般为 3~6 个自由度。图 1-7 所示为 PUMA560 六自由度工业机器人。

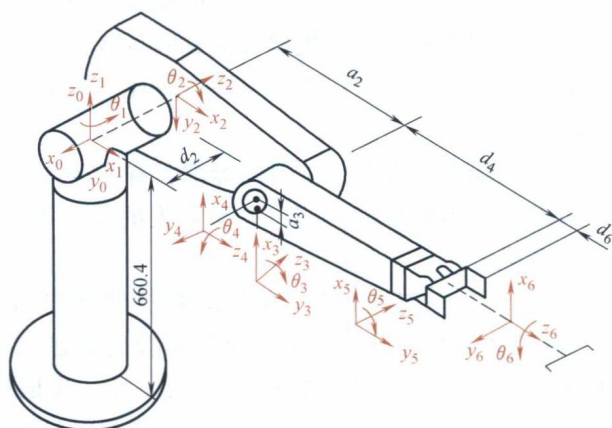


图 1-7 PUMA560 六自由度工业机器人

(2) 精度 工业机器人的精度包括定位精度和重复定位精度。定位精度是指机器人末端操作器的实际位置与目标位置之间的偏差，由机械误差、控制算法误差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，其末端操作器到达同一目标位置的能力，是关于精度的统计数据（可以用标准偏差来表示）。由于重复定位精度不受工作载荷变化的影响，所以重复定位精度通常用作衡量示教再现方式工业机器人性能的重要指标。

(3) 工作空间 工作空间表示机器人的工作范围，它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。由于末端操作器的尺寸和形状多种多样，为了真实反映机器人的特征参数，所以工作空间是指不安装末端操作器的工作区域。工作空间的大小不仅与机器人各连杆的尺寸有关，还与机器人的总体结构形式有关。

工作空间的大小和形状十分重要，机器人在执行具体作业时可能会因为存在手部不能达到的作业死区而不能完成任务。图 1-8 所示为 MOTOMAN SV3 机器人的工作空间。

(4) 最大工作速度 速度是机器人运动特性的主要指标。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，但通常都会会在技术参数中加以说明。最大工作速度越高，工作效率越高；但是，工作速度越高，允许的极限加速度就越小，则加减速的时间

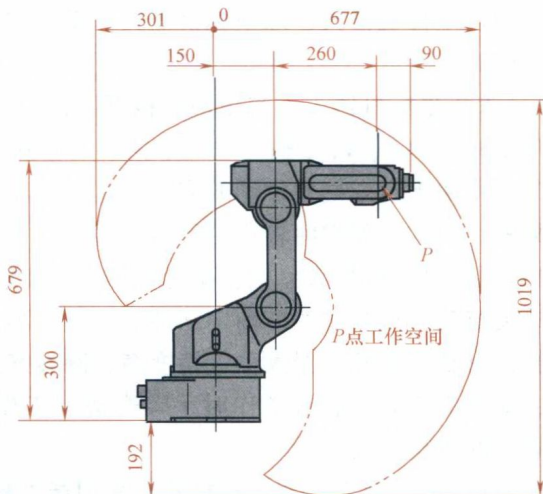


图 1-8 MOTOMAN SV3 机器人的工作空间

也会越长，或者对工业机器人的最大加速率或最大减速率的要求越高。

(5) 工作载荷 工作载荷是指机器人在工作空间内的任何位置上所能承受的最大质量。工作载荷能力不仅与负载的质量有关，还与机器人运行的速度和加速度的大小和方向有关。为了安全起见，工作载荷这一技术指标是指高速运行时的承载能力。通常，载荷能力不仅指负载，而且包括了机器人末端控制器的质量。机器人的有效负载大小不仅受到驱动器功率的限制，还受到杆件材料极限应力的限制，所以它又与环境条件、运动参数有关。

## 5. 工业机器人的分类

关于工业机器人的分类，国际上没有制定统一的标准，有的按工作负载分，有的按控制方式分，有的按结构分，有的按应用领域分。这里按机器人的技术等级、结构坐标系特点、用途及负荷工作范围等进行分类。

(1) 按机器人的技术等级分类 按照机器人的技术等级可以将工业机器人分为三类。

1) 示教再现机器人。这类机器人能够按照人们预先示教的轨迹、行为、顺序和速度重复作业。操作人员利用示教器上的开关或按键控制机器人一步一步地运动，机器人自动记录，然后重复。例如应用于汽车行业的点焊机器人，只要把点焊的过程示教完毕，机器人总是重复这样一种工作，它对外界环境没有感知，操作力大小，工件是否存在，焊接效果好与坏，机器人并不知道。目前，在工业现场应用的机器人大多属于这一类。

2) 感知机器人。模拟人的某种感觉，如力觉、触觉、滑觉、视觉和听觉等，有了各种各样的感觉后，机器人在进行实际工作时可以通过感觉功能去感知环境与自身的状况，形成本身与环境的协调。例如，第二代焊接机器人采用焊缝跟踪技术，通过传感器感知焊缝的位置，再通过反馈控制，机器人自动跟踪焊缝，从而对示教位置进行修正，即使实际焊缝位置相对于原始设定的位置有变化，机器人也能很好地完成焊接工作。

3) 智能机器人。智能机器人是能发现问题，并且能自主解决问题的机器人。从理论上来说，智能机器人是一种带有思维能力的机器人，能根据给定的任务自主地设定完成工作的流程，并不需要人在此流程中进行干预。但是，智能机器人目前的发展还是相对的，只是局部符合这种智能的概念和含义。

(2) 按结构坐标系特点分类 按结构坐标系特点，工业机器人通常可分为直角坐标机器人、圆柱坐标机器人、球坐标机器人、垂直多关节坐标机器人和平面多关节坐标机器人，如图 1-9 所示。

1) 直角坐标机器人。直角坐标机器人由三个滑动关节组成，关节轴线相互垂直，相当于直角坐标系的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴。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。这种机器人结构简单，稳定性好，定位精度高，空间轨迹易解；但其工作空间较小，灵活性差，且占地面积较大。它适合用于大负载搬运。

2) 圆柱坐标机器人。圆柱坐标机器人由旋转基座、垂直移动轴和水平移动轴构成，两个滑动关节和一个旋转关节确定部件的位置，再加一个旋转关节来确定部件的姿态，工作空间为圆柱形状。这种机器人位置精度高，刚性好，运动直观，控制简单；但它不能到达靠近立柱或地面的空间，后臂工作时手臂会碰到工作空间内的其他物体。Versatran 机器人是该类机器人的典型代表。

3) 球坐标机器人。球坐标机器人采用球坐标系，一个滑动关节和两个旋转关节确定部件的位置，再用一个附加的旋转关节确定部件的姿态，工作空间为球缺形状。这种机器人结

构紧凑，动作灵活，占地面积小，工作空间大；但结构复杂，难于控制，定位精度低，运动直观性差。Unimate 机器人是该类机器人的典型代表。

4) 垂直多关节坐标机器人。垂直多关节坐标机器人由立柱、大臂和小臂组成，具有拟人的机械结构，大臂与立柱构成肩关节，大臂与小臂构成肘关节。一个转动关节和两个俯仰关节确定部件的位置和姿态。工作空间为球缺形状。这种机器人工作空间大，动作灵活，可自由实现三维空间的各种姿势，能抓取靠近机身的物体；但运动直观性差，结构刚度较低，动作的绝对精度较低。

5) 平面多关节坐标机器人。这种机器人可看作是垂直多关节坐标机器人的特例，它只有平行的肩关节和肘关节，关节轴线共面。它有三个转动关节，其轴线相互平行，可在平面内进行定位和定向。其还有一个移动关节，用于完成手爪在垂直于平面的运动。平面多关节坐标机器人在垂直平面内具有很好的刚度，在水平面内具有较好的柔性，动作灵活，速度快，定位精度高。

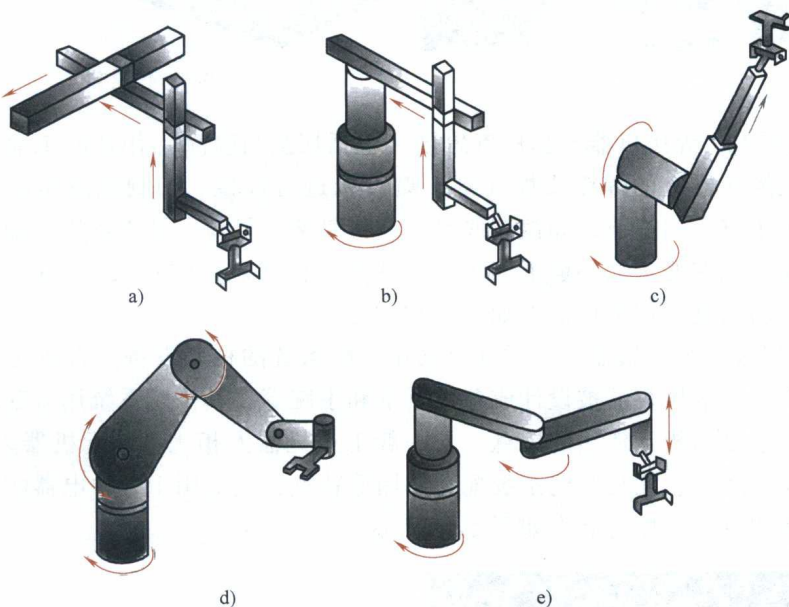


图 1-9 工业机器人几种坐标形式

a) 直角坐标型 b) 圆柱坐标型 c) 球坐标型 d) 垂直多关节坐标型 e) 平面多关节坐标型

### (3) 按用途分类

1) 搬运机器人。搬运机器人是可以进行自动化搬运作业的工业机器人。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工件的搬运工作，把人类从繁重的体力劳动中解放出来。目前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。搬运机器人如图 1-10 所示。

2) 码垛机器人。码垛机器人是从事码垛作业的工业机器人，即将已装入容器的物体按要求排列码放在托盘、栈板（木质、塑胶）上，进行自动堆码。码垛机器人可以集成在任



何生产线中，可广泛应用于纸箱、塑料箱、瓶类、袋类、桶装、膜包产品及灌装产品等的码垛。机器人代替人工搬运、码垛，能迅速提高企业的生产率和产量，同时能减少人工搬运造成的错误。机器人码垛可全天候作业，由此每年能节约大量的人力成本。码垛机器人如图 1-11 所示。

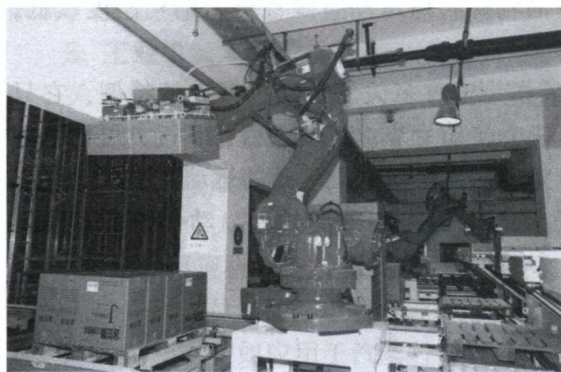


图 1-10 搬运机器人

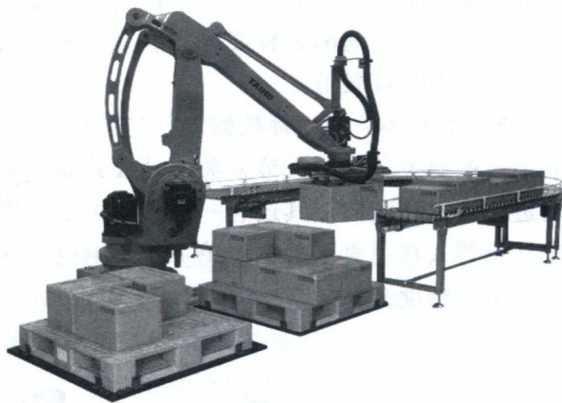


图 1-11 码垛机器人

3) 焊接机器人。焊接机器人是从事焊接（包括切割与喷涂）作业的工业机器人，它们通过安装有末端操作器上的焊钳或焊（割、喷）枪进行焊接、切割或热喷涂。焊接机器人目前已广泛应用于汽车制造业，如汽车底盘、座椅骨架、导轨、消声器以及液力变矩器等的焊接。焊接机器人能在恶劣的环境下连续工作并能提供稳定的焊接质量，提高了工作效率，减轻了工人的劳动强度。焊接机器人如图 1-12 所示。

4) 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。为适应不同的装配对象，装配机器人的末端执行器被设计成各种手爪和手腕等，其传感系统用来获取装配机器人与环境和装配对象之间相互作用的信息。与一般工业机器人相比，装配机器人具有精度高、柔顺性好、工作空间小、能与其他系统配套使用等特点，主要用于各种电器的制造行业及流水线产品的组装作业。装配机器人如图 1-13 所示。

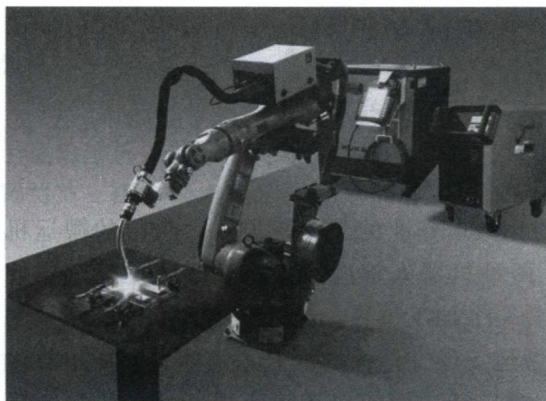


图 1-12 焊接机器人

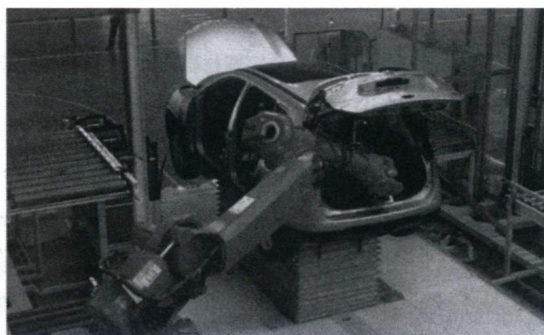


图 1-13 装配机器人

5) 喷涂机器人。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，1969 年由挪威 Trallfa 公司（后并入 ABB 公司）发明。喷漆机器人主要由机器人