

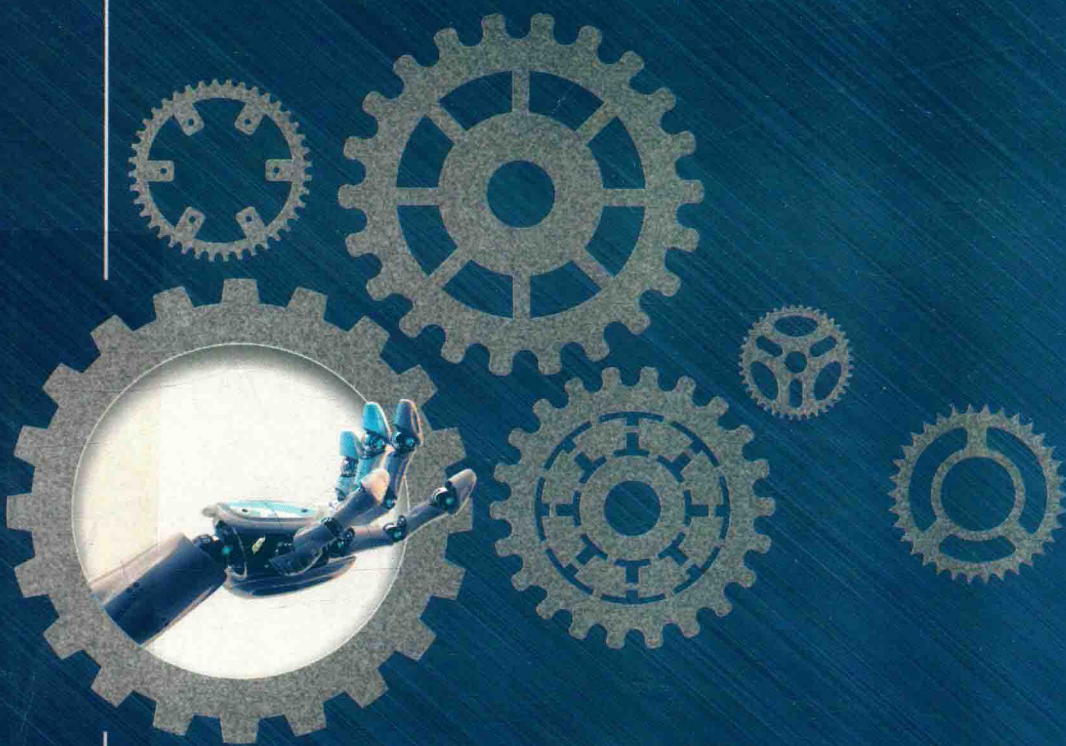
高职高专 工业机器人专业“十三五”规划教材

川崎

工业机器人

与自动化生产线

主编 詹国兵 王建华 孟宝星
主审 吉 智

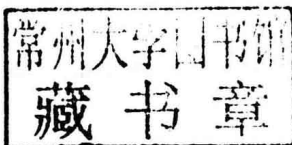


西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高职高专 工业机器人专业“十三五”规划教材

川崎工业机器人与自动化生产线

主 编 詹国兵 王建华 孟宝星
参 编 权 宁 纪海宾 邢方方
主 审 吉 智



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书以川崎 RS10N 工业机器人和天津龙洲 RB0105 实训台为例,较为系统地介绍了典型工业机器人和典型自动化生产线的操作、编程和调试等专业知识和技能。全书共分 7 个模块,43 个任务。

本书除了注重理论的系统性和完整性以外,还特别注重工程应用,力图把企业项目融入教学之中,突出体现高端职业技能、新兴职业技能、长周期职业技能、前瞻性职业技能的开发。

本书适合作为高职高专工业机器人、机电一体化、机械制造自动化和数控技术等相关专业的教学用书,同时也可供相关专业工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

川崎机器人与自动化生产线 / 詹国兵, 王建华, 孟宝星主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-5606-4922-1

I. ① 川… II. ① 詹… ② 王… ③ 孟… III. ① 工业机器人—自动生产线 IV. ① TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 093981 号

策划编辑 高 樱

责任编辑 马 静 阎 彬

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 17

字 数 405 千字

印 数 1~3000 册

定 价 36.00 元

ISBN 978-7-5606-4922-1 / TP

XDUP 5224001-1

如有印装问题可调换

前 言

在现代工业生产中，生产任务往往需要数台甚至数十台的工业机器人分工位分任务地完成，并且工业机器人与工业机器人之间存在着协同工作，即：将两台以及更多台的工业机器人连接起来组成自动化生产线，进而实现协同工作。因此，工业机器人与自动化生产线系统编程必将成为广大科技人员不可缺少的基础知识。在这个意义上，“工业机器人与自动化生产线系统”课程对培养新时代的科技人员有着重要的作用和意义。

本书依循由浅入深、理论严谨、结构合理、体例统一、文字精练、易于理解的原则，以天津龙洲 RB0105 实训台为例，系统地介绍了工业机器人及自动化生产线的基础知识，阐述了工业机器人操作与实训及柔性制造生产线编程与调试，并详细阐明了工业机器人与柔性制造生产线集成编程、调试及联调。书中注重介绍工业机器人与典型工业设备集成设计的内容，强化了各种控制技术和工程实践能力的培养，旨在使学生具备工业机器人编程和调试方面的职业素质，并养成严谨认真的职业态度，为今后从事工业机器人编程、机电设备维护、自动化生产线操作及维护、机电产品研发等工作打下坚实的基础。

本书除了注重理论的系统性和完整性以外，还特别注重工程应用，力图把企业项目融入教学之中，突出体现高端职业技能、新兴职业技能、长周期职业技能开发、前瞻性职业技能的开发。本书的显著特色是：

第一，介绍了实用有效的工业机器人及自动化生产线的基础知识，便于学生理解和掌握。

第二，内容既系统又简明，既注重理论又强调实际。本书以天津龙洲 RB0105 实训台为例介绍了工业机器人与供料检测站、模拟加工站、模拟焊接站、模拟装配站、立体仓库单元、整条生产线的集成编程与联调，内容非常接近工业生产制造现场的情况。

第三，包含了实际工程中的多种案例，便于培养学生理论联系实际、把所学理论应用于实际以解决工程问题的思维，而且部分习题同样富有实际应用价值。

第四，包括具有工程实际背景的讨论题，并给出了相应解答，以便学生更好地理解和掌握所学知识。

本书的模块一“认识工业机器人”及模块七“工业机器人外围典型工业设备”由王建华编写，模块二“认识自动化生产线”由纪海宾编写，模块三“工业机器人示教与操作”由孟宝星编写，模块四“川崎工业机器人实训”及模块五“柔性制造生产线编程与调试”由詹国兵编写，模块六“工业机器人与自动化生产线集成”由权宁编写。文献整理等工作

由邢方方完成，本书统稿由詹国兵完成，主审由吉智完成。

本书可作为高职高专相关专业的教学用书，也可供机械制造自动化、机电一体化和数控技术等相关专业参考使用。

本书在编写过程中，参考了国内外一些资料，限于篇幅，书中参考文献中只列出了其中的一部分。在此，谨向原作者及编者表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2018.1

目 录

模块一 认识工业机器人	1
任务 1.1 机器人的起源与发展	1
任务 1.2 机器人的定义与分类	3
任务 1.3 工业机器人的基本组成及技术参数	5
任务 1.4 工业机器人工作原理	7
任务 1.5 工业机器人传感技术	12
习题	25
模块二 认识自动化生产线	26
任务 2.1 认识自动化生产线起源与发展	26
任务 2.2 认识 RB0105 实训台	27
任务 2.3 RB0105 实训台工作原理	38
任务 2.4 认识自动化生产线常用传感器	40
习题	43
模块三 工业机器人示教与操作(川崎工业机器人)	44
任务 3.1 认识川崎工业机器人	44
任务 3.2 工业机器人基本操作	52
任务 3.3 工业机器人综合命令示教	53
任务 3.4 工业机器人 AS 语言基础	61
任务 3.5 工业机器人 AS 语言的程序命令	68
任务 3.6 工业机器人 AS 语言示教	76
任务 3.7 工业机器人 AS 语言在线示教	79
习题	82
模块四 川崎工业机器人实训	84
任务 4.1 工业机器人基本操作实训	85
任务 4.2 工业机器人精确定位实训	86
任务 4.3 工业机器人综合命令示教实训	87
任务 4.4 工业机器人 AS 语言示教实训(一)	89
任务 4.5 工业机器人 AS 语言示教实训(二)	91

任务 4.6 工业机器人 AS 语言示教实训(三)	94
任务 4.7 工业机器人 AS 语言在线示教实训(一)	96
任务 4.8 工业机器人 AS 语言在线示教实训(二)	100
习题	103
模块五 柔性制造生产线编程与调试(天津龙洲 RB0105 实训台)	104
任务 5.1 认识典型柔性制造生产线	104
任务 5.2 总控单元编程与调试	107
任务 5.3 供料检测单元编程与调试	116
任务 5.4 模拟加工单元编程与调试	121
任务 5.5 模拟焊接单元编程与调试	127
任务 5.6 装配单元编程与调试	130
任务 5.7 立体仓库单元编程与调试	134
任务 5.8 机器人滑轨单元编程与调试	143
任务 5.9 触摸屏人机交互界面单元编程与调试	147
习题	149
模块六 工业机器人与自动化生产线集成(天津龙洲 RB0105 实训台)	150
任务 6.1 工业机器人与供料检测站集成编程与调试	150
任务 6.2 工业机器人与模拟加工站集成编程与调试	157
任务 6.3 工业机器人与模拟焊接站集成编程与调试	165
任务 6.4 工业机器人与模拟装配站集成编程与调试	176
任务 6.5 工业机器人与立体仓库单元集成编程与调试	184
任务 6.6 工业机器人与整条生产线集成编程与联调	190
习题	205
模块七 工业机器人外围典型工业设备	206
任务 7.1 工业机器人快换夹具	206
任务 7.2 工业机器人行走机构	219
任务 7.3 立体仓库出库、入库和移库功能设计	230
任务 7.4 工业机器人与数控机床集成设计	248
参考文献	266

模块一 认识工业机器人

【模块目标】

了解机器人的起源和发展；掌握工业机器人的组成、分类、工作原理和技术参数；能正确地使用工业机器人常用传感器。

◆◆◆◆ 任务 1.1 机器人的起源与发展 ◆◆◆◆

【任务目标】

了解机器人“Robot”一词的起源，掌握机器人三原则；了解机器人的发展历程，掌握机器人发展的三个阶段；了解机器人未来发展趋势。

【学习内容】

一、机器人起源与发展

1920 年，捷克作家卡雷尔·卡佩克发表了科幻剧本《洛桑的万能机器人》(Rossum's Universal Robots)。该剧本中把捷克语“Robota”写成了“Robot”，Robot 即成为机器人一词的起源。1950 年，美国作家埃萨克·阿西莫夫在他的科幻小说《I, Robot》中首次使用了“Robotics”，即“机器人学”。阿西莫夫提出了“机器人三原则”，学术界一直将这三原则作为机器人开发的准则，阿西莫夫因此被称为“机器人学之父”。机器人三原则分别为：

- (1) 机器人不应伤害人类，且在人类受到伤害时不可袖手旁观；
- (2) 机器人应遵守人类的命令，与第一条违背的命令除外；
- (3) 机器人应能保护自己，与第一条相抵触者除外。

1954 年，美国人 George C. Devol 提出了第一个工业机器人方案，该方案在 1956 年获得美国专利。1961 年，Unimation 公司(通用机械公司)成立，生产和销售了他们的第一台工业机器“Unimate”，即万能自动之意。1963 年，美国 AMF 公司研制出第一台工业机器人。1974 年，第一台计算机控制的机器人产生。1982 年，出现示教再现机器人。机器人发展历程如表 1-1 所示。

表 1-1 机器人发展历程

序号	发 展 历 程
1	我国东汉张衡发明指南车，机器人雏形
2	1961 年，美国 Unimate 公司生产和销售了第一台工业机器人“Unimate”
3	1963 年，美国 AMF 公司研制出第一台工业机器人
4	1974 年，研制出计算机控制的机器人
5	1982 年，出现示教再现机器人

20 世纪 80 年代，机器人在发达国家的工业中大量普及应用，如焊接、喷漆、搬运、装配，并向各个领域拓展，如航天、水下、排险、核工业等，机器人的感知技术得到相应的发展，产生了第二代机器人。20 世纪 90 年代，机器人技术在发达国家应用更为广泛，如军用、医疗、服务、娱乐等领域，并开始向智能型(第三代)机器人发展。

工业机器人的发展一般可以分成三代，分别是：

(1) 第一代“示教再现”机器人：通过手动或其他方式，先引导机器人动作，记录下工作程序，机器人则自动重复进行作业。

(2) 第二代感知型机器人：利用传感器获取的信息控制机器人的动作，机器人对环境有一定的适应性，如装了视觉摄像机指导机器人作业。

(3) 第三代智能机器人：机器人具有感知和理解外部环境的能力，即使环境发生变化，也能够成功地完成任务，具有自主决策、未来预测等功能。

二、机器人的发展现状及趋势

1. 小型化与微型化

就目前各国的研究现状而言，微型机器人大多还处于实验室或原型开发阶段，但可以预见，微型机器人将广泛出现。

由德国工程师莱纳尔·格茨恩发明的微型机器人，可直接由针头注射进入人体血管、尿道、胆囊或肾脏。它依靠微型磁铁驱动器前进，由医生通过遥控器指挥，既可用于疾病诊断，也可用于如动脉硬化、胆结石等管腔阻塞类疾病的治疗，还能听从医生指挥，将药物直接送达需要医治的患病器官，以取得更好的治疗效果。当这种微型机器人完成工作后，医生便可以像抽血那样用针头将它抽出来。

未来，在工业领域，将会出现能进入小管道甚或裂缝，进行检测与维护的工业用微型机器人，以及各种微型传感器、微型机电产品，如掌上电视等。在军事领域，将有小如昆虫的飞行器，用于侦察敌情，以及装有自动驾驶系统，能在海底航行数年的微型潜艇等。

2. 智能化

目前智能机器人的智力最高也只相当于两三岁幼儿的智力水平。将来，高智能的机器人将越来越多，其智力水平也一定会不断提高，慢慢地达到七八岁、十几岁少年甚至青年人的智力水平。

◆◆◆◆◆ 任务 1.2 机器人的定义与分类 ◆◆◆◆◆

【任务目标】

掌握机器人的定义和分类；了解机器人的主要用途。

【学习内容】

一、机器人的定义

美国机器人协会(RIA)对机器人定义为：“机器人是用以搬运材料、零件、工具的，可编程序的多功能操作器或是通过可改变程序动作来完成各种作业的特殊机械装置。”

日本工业机器人协会(JIRA)的定义：“工业机器人是一种装备有记忆装置和末端执行器(end effector)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。”

美国国家标准局(NBS)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。”

国际标准化组织(ISO)的定义：“机器人是一种自动的、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，能够借助于可编程序操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置，以执行种种任务。”

机器人的一般定义是自动执行工作的机器装置。它既可以接受人类指挥，又可以运行预先编制的程序，还可以根据以人工智能技术制定的原则纲领行动。它的任务是协助或取代人类的工作，例如制造、建筑工作，或是危险的工作。

一般认为机器人应具有的共同点为：

- (1) 机器人的动作机构具有类似于人或其他生物的某些器官的功能。
- (2) 机器人是一种自动机械装置，可以在无人参与下(独立性)，自动完成多种操作或动作功能，即具有通用性；可以再编程，程序流程可变，即具有柔性(适应性)。
- (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。

二、机器人的分类

机器人的种类很多，可以按驱动形式、用途、结构和智能水平等分类。

1. 按驱动形式分类

- (1) 气压驱动机器人。
- (2) 液压驱动机器人。
- (3) 电驱动机器人。

目前，电驱动是机器人的主流形式，电驱动又分为直流伺服驱动和交流伺服驱动等。

2. 按用途分类

- (1) 工业机器人：工业场合应用的机器人，如弧焊机器人、点焊机器人、搬运机器人、

装配机器人、喷涂机器人、雕刻机器人、打磨机器人等。

(2) 特种机器人：特殊场合应用的机器人，如空间机器人、水下机器人、军用机器人、服务机器人、医疗机器人、排险救灾机器人和教学机器人等。

工业机器人和特种机器人的主要用途如图 1-1 和图 1-2 所示。

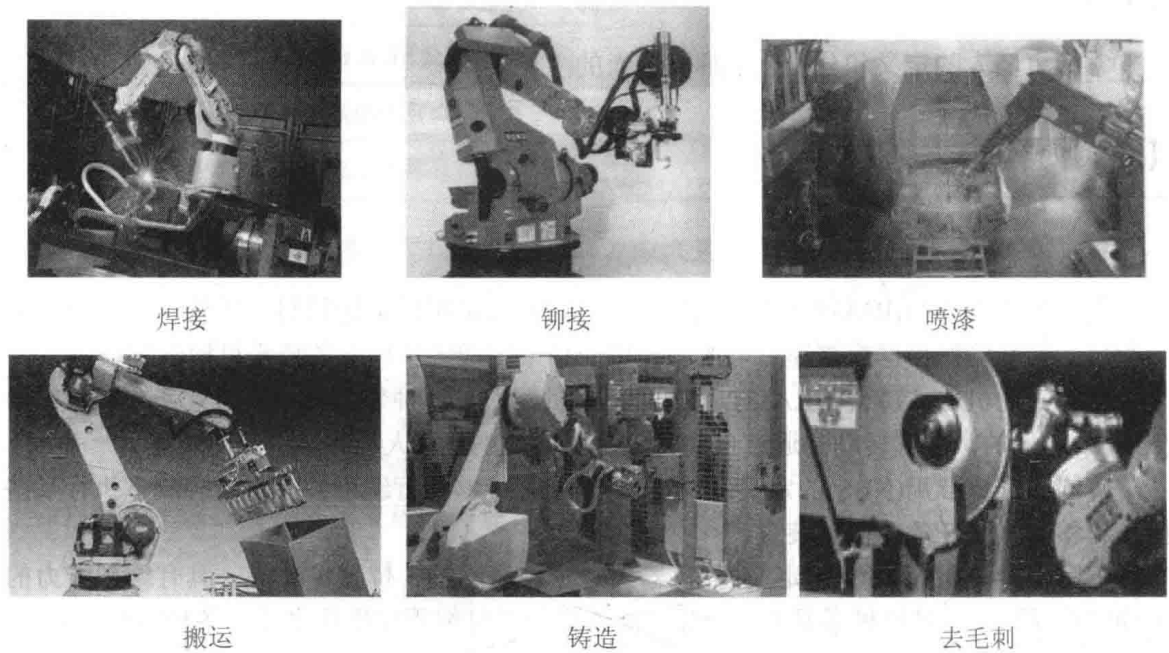


图 1-1 工业机器人主要用途

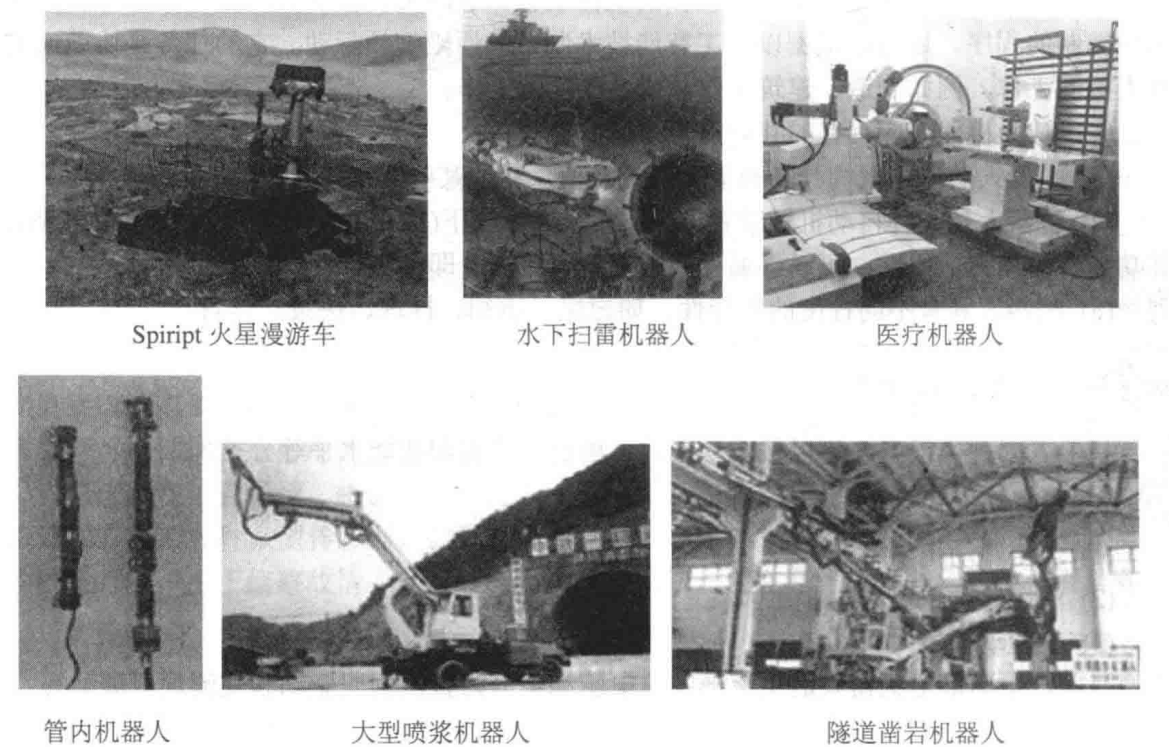


图 1-2 特种机器人主要用途

◆◆◆◆◆ 任务 1.3 工业机器人的基本组成及技术参数 ◆◆◆◆◆

【任务目标】

掌握工业机器人的定义、基本组成和外观组成；掌握工业机器人的技术参数及其含义；理解 RS10N 川崎机器人的主要技术参数。

【学习内容】

一、我国工业机器人定义

根据最新国家标准 GB/T12643—2013，工业机器人定义为：工业机器人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，用于完成各种作业。

工业机器人不同于机械手。工业机器人具有独立的控制系统，可以通过编程实现动作程序的变化，而机械手只能完成简单的搬运、抓取及上下料工作，它一般作为自动机或自动线上的附属装置，工作程序固定不变。

二、工业机器人基本组成

工业机器人是机械、电子、控制、计算机、传感器、人工智能等多学科技术的有机结合。从控制观点来看，机器人系统可以分成四大部分：执行机构、驱动装置、控制系统、感知反馈系统，如图 1-3 所示。

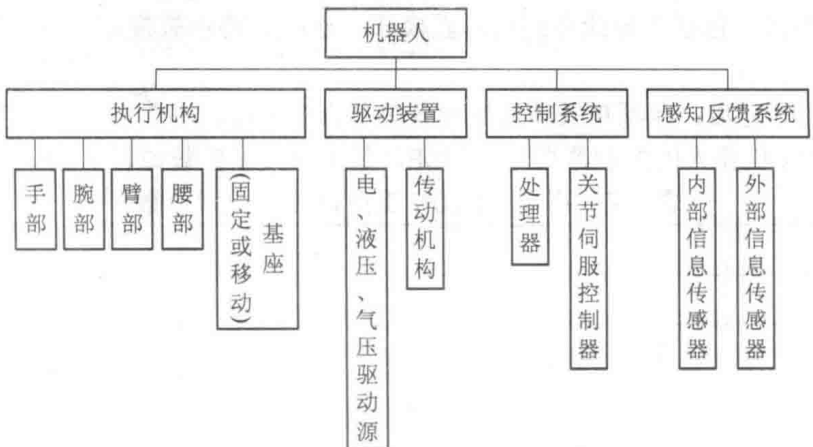


图 1-3 机器人的具体组成部分

- (1) 执行机构：包括手部、腕部、臂部、腰部和基座等，相当于人的肢体。
- (2) 驱动装置：包括电、液压、气压驱动源及传动机构等，相当于人的肌肉、筋络。
- (3) 控制系统：包括处理器及关节伺服控制器等，进行任务及信息处理，并给出控制信号，相当于人的大脑和小脑。

(4) 感知反馈系统：包括内部信息传感器(用于检测位置、速度等信息)、外部信息传感器(用于检测机器人所处的环境信息)，相当于人的感官和神经。

从外观看，工业机器人主要由机器人本体、控制器、示教器三大部件组成，如图 1-4 所示。

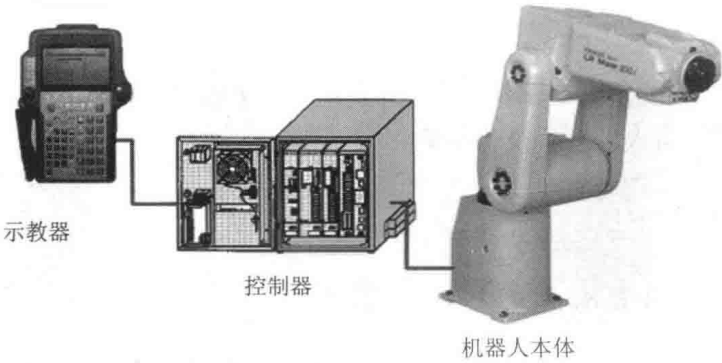


图 1-4 机器人的外观结构

三、工业机器人技术参数

(1) 自由度数：衡量机器人适应性和灵活性的重要指标，一般等于机器人的关节数。机器人所需要的自由度数取决于其作业任务。

(2) 负荷能力：机器人在满足其他性能要求的前提下，能够承载的负荷重量。

(3) 工作空间：机器人在其工作区域内可以达到的所有点的集合。它是机器人关节长度和其构型的函数。

(4) 精度：机器人到达指定点的精确程度。它与机器人驱动器的分辨率及反馈装置有关。

(5) 重复定位精度：机器人重复到达同样位置的精确程度。它不仅与机器人驱动器的分辨率及反馈装置有关，还与传动机构的精度及机器人的动态性能有关。

(6) 控制模式：包括引导或点到点示教模式、连续轨迹示教模式、软件编程模式和自主模式。

(7) 最大工作速度：包括单关节速度和各关节合成速度。

川崎 RS10N 机器人的控制器型号：E20F，其主要技术参数如表 1-2 所示。

表 1-2 川崎 RS10N 工业机器人技术参数

类 型	多关节式坐标式机器人		
运动自由度	6		
运动范围 和 最大速度	JT	运动范围	最大速度
	1	±180°	250° /s
	2	+145° ~ -105°	250° /s
	3	+150° ~ -163°	215° /s
	4	±270°	365° /s
	5	±145°	380° /s
	6	±360°	700° /s

续表

最大负载	10 kg		
手腕负载能力	JT	力矩	惯性矩
	4	22.0 N · m	0.7 kg · m ²
	5	22.0 N · m	0.7 kg · m ²
	6	10.0 N · m	0.2 kg · m ²
重复定位精度	±0.04 mm		
质量	150 kg		
噪音等级	< 70 dB		

◆◆◆◆◆ 任务 1.4 工业机器人工作原理 ◆◆◆◆◆

【任务目标】

掌握工业机器人的工作原理；了解简化两关节机器人的建模及独立 PD 迭代学习轨迹跟踪控制的原理。

【学习内容】

一、工业机器人工作原理

工业机器人的工作原理就是模仿人的各种肢体动作、思维方式和控制决策能力。从控制的角度，机器人可以通过以下四种方式来达到这一目标。

1. “示教再现”方式

通过“示教盒”或“手把手”两种方式教机械手如何动作，控制器将示教过程记忆下来，然后机器人就按照记忆周而复始地重复示教动作，如喷涂机器人。

“示教再现”方式是一种基本的工作方式，分为示教—存储—再现三步进行。

- (1) 示教：方式有两种，即直接示教——“手把手”和间接示教——“示教盒控制”。
- (2) 存储：保存示教信息，包括顺序信息、位置信息和时间信息。
顺序信息：各种动作单元(包括机械手和外围设备)按动作先后顺序的设定、检测等。
位置信息：作业之间各点的坐标值，包括手爪在该点上的姿态，通常总称为位姿(POSE)。
时间信息：各顺序动作所需时间，即机器人完成各个动作的速度。
- (3) 再现：根据需要，读出存储的示教信息向机器人发出重复动作的命令。

2. “可编程控制”方式

工作人员事先根据机器人的工作任务和运动轨迹编制控制程序，然后将控制程序输入机器人的控制器，启动控制程序，机器人就按照程序所规定的动作一步一步地去完成，如

果任务变更，只要修改或重新编写控制程序即可，非常灵活方便。
 大多数工业机器人都是按照以上两种方式工作的。

3. “遥控”方式

由人用有线或无线遥控器控制机器人在人难以到达或危险的场所完成某项任务，如防爆排险机器人、军用机器人、在有核辐射和化学污染环境工作的机器人等。

4. “自主控制”方式

此方式是机器人控制中最高级、最复杂的控制方式，它要求机器人在复杂的非结构化环境中具有识别环境和自主决策能力，也就是要具有人的某些智能行为。

工业机器人控制的目的是使被控对象产生控制者所期望的行为方式。如图 1-5 所示，研究人员搭建被控对象模型，实现输出跟随输入的变化。

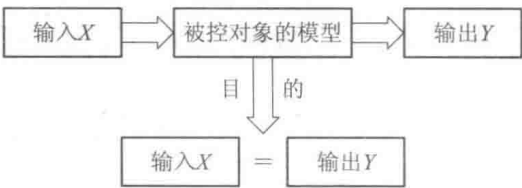


图 1-5 机器人的控制原理

二、案例：两关节机器人的 PD 迭代控制

1. 两关节机器人的动力学模型

以两关节机器人为例，在简化机器人驱动器的执行元件和减速器后，两关节机器人模型如图 1-6 所示。

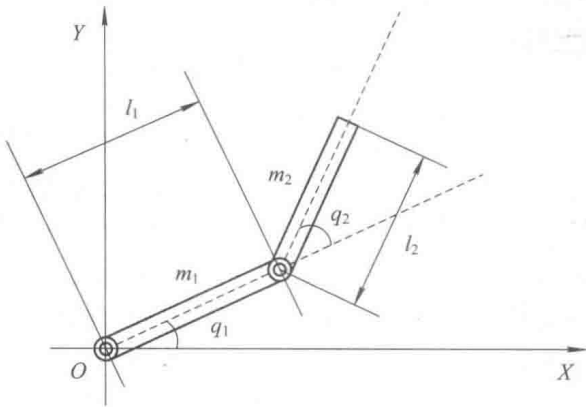


图 1-6 简化两关节机器人模型

两关节机器人的动态性能可由二阶非线性微分方程描述：

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) = \tau - \tau_d \tag{1-1}$$

式中， $q \in \mathbf{R}^n$ 为关节角位移量， $M(q) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为机器人的惯性量矩阵， $C(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^n$ 为离心力

和哥氏力项, $G(q) \in \mathbf{R}^n$ 为重力项, $F(\dot{q}) \in \mathbf{R}^n$ 表示摩擦力矩, $\tau \in \mathbf{R}^n$ 为控制力矩, $\tau_d \in \mathbf{R}^n$ 为外加扰动。

如果忽略摩擦力矩 $F(\dot{q})$, 式(1-1)可以写成

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - \tau_d \quad (1-2)$$

令 $x_1 = q$, $x_2 = \dot{q}$, 则式(1-2)可以写成

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = M^{-1}(x_1)((\tau - \tau_d) - C(x_1, x_2)x_2 - G(x_1)) \end{cases} \quad (1-3)$$

已知 $x = (x_1, x_2)'$, 令控制力矩输入 $u = \tau$, 外加扰动 $u_d = \tau_d$, $y = x$, 则

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ M^{-1}(x_1)(-C(x_1, x_2)x_2 - G(x_1)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(x_1) \end{bmatrix} (u - u_d) \\ y = x \end{cases} \quad (1-4)$$

令

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ M^{-1}(x_1)(-C(x_1, x_2)x_2 - G(x_1)) \end{bmatrix}$$

$$B(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(x_1) \end{bmatrix}$$

则式(1-4)可以写成状态方程形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + B(x)(u - u_d) \\ y = x \end{cases} \quad (1-5)$$

两关节机器人的二阶非线性微分方程式(1-1)各项表示为

$$\begin{cases} M(q) = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + m_2(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos q_2) + I_1 + I_2 & m_2(l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos q_2) + l_2 \\ m_2(l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos q_2) + l_2 & m_2 l_{c2}^2 + I_2 \end{bmatrix} \\ C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} h\dot{q}_2 & h\dot{q}_1 + h\dot{q}_2 \\ -h\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \\ G(q) = \begin{bmatrix} (m_1 l_{c1} + m_2 l_1)g \cos q_1 + m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2) \\ m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \\ \tau_d = \begin{bmatrix} 0.3 \sin t \\ 0.1(1 - e^{-t}) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1-6)$$

机器人各项参数已知，如表 1-3 所示，将表中数据代入式(1-6)，得到简化二关节机器人的动力学模型。

表 1-3 简化二关节机器人各项参数

关节号	$g / (\text{m/s}^2)$	m_i / kg	l_i / m	I_{ci} / m	$I_i / (\text{kgm}^2)$
1	9.81	10	1	0.5	0.83
2	9.81	5	0.5	0.25	0.3

2. 迭代学习控制

迭代学习控制(Iterative Learning Control, ILC)是智能控制中具有严格数学描述的一个分支。迭代学习控制方法适合于具有重复运动性质的被控对象，其目标是通过反复地迭代修正达到某种控制目的，实现有限时间上的完全跟踪任务。迭代学习控制采用“在重复中学习”的学习策略，具有记忆和修正功能。通过对被控系统进行控制尝试，以输出轨迹与给定轨迹的偏差来修正不理想的控制信号，产生新的控制信号，从而使得系统的跟踪性能得以提高。

迭代学习控制可分为开环学习和闭环学习。

开环迭代学习控制的方法是：第 $k+1$ 次的控制等于第 k 次控制再加上第 k 次输出误差的校正项，即

$$u_{k+1}(t) = L(u_k(t), e_k(t)) \tag{1-7}$$

式中， L 为线性或非线性算子。

闭环迭代学习控制的方法是：第 $k+1$ 次的控制等于第 k 次控制再加上第 $k+1$ 次输出误差的校正项，即

$$u_{k+1}(t) = L(u_k(t), e_{k+1}(t)) \tag{1-8}$$

式中， L 为线性或非线性算子。

开环迭代学习控制只是利用了系统前次运行的信息，而闭环迭代学习控制则在利用系统当前运行信息改善控制性能的同时，舍弃了系统前次运行的信息。总体来说，闭环迭代学习控制的性能要优于开环迭代学习控制。在机器人控制方面，为保证系统的稳定大多采用闭环迭代学习控制方式。

常用的迭代学习控制为 PID 和 PD 迭代学习控制方法，控制率分别为

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K_p(q_d(t) - q_{k+1}(t)) + K_d(\dot{q}_d(t) - \dot{q}_{k+1}(t)) + K_i \int_0^t [q_d(\tau) - q_{k+1}(\tau)] d\tau \tag{1-9}$$

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K_p(q_d(t) - q_{k+1}(t)) + K_d(\dot{q}_d(t) - \dot{q}_{k+1}(t)) \tag{1-10}$$

仿真定义的期望曲线(即两个关节的角位移期望运行轨迹和角速度期望运行速度)分别为

$$\mathbf{q}_d = \begin{bmatrix} q_{d1}(t) \\ q_{d2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(3t) \\ \cos(3t) \end{bmatrix} \tag{1-11}$$

$$\dot{\mathbf{q}}_d = \begin{bmatrix} \dot{q}_{d1}(t) \\ \dot{q}_{d2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3\cos(3t) \\ -3\sin(3t) \end{bmatrix} \tag{1-12}$$