

# 工业机器人技术 及其典型应用研究

GONGYE JIQIREN JISHU JIQI DIANXING YINGYONG YANJIU

张 玉/著



中国原子能出版社

# 工业机器人技术 及其典型应用研究

张 玉/著

中国原子能出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

工业机器人技术及其典型应用研究 / 张玉著. --北京:中国原子能出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-5022-9278-2

I. ①工… II. ①张… III. ①工业机器人—研究  
IV. ①TP242. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 179546 号

## 内 容 简 介

随着机械、电子、控制理论与技术的快速发展,机器人的发展日新月异,其应用越来越多。本书较为全面、深入地对工业机器人的相关技术展开了讨论,注重理论联系实际,并尽量反映国内外近年来在机器人理论研究和生产应用方面的最新成果。本书主要内容包括:工业机器人的运动学和动力学、工业机器人的机械系统、工业机器人控制系统、工业机器人传感器、工业机器人驱动系统、工业机器人的编程、工业机器人的典型应用等。本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,是一本值得学习研究的著作。

### 工业机器人技术及其典型应用研究

---

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 刘东鹏 张琳

责任校对 冯莲凤

印 刷 三河市铭浩彩色印装有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 17

字 数 220 千字

版 次 2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-9278-2 定 价 68.00 元

---

网址: <http://www.aep.com.cn> E-mail: [atomep123@126.com](mailto:atomep123@126.com)

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

## 前 言

生产力的不断进步推动了科技的进步与革新,从而建立了更加合理的生产关系。

自工业革命以来,人力劳动已经逐渐被机械所取代。这种变革为人类社会创造出了巨大的财富,极大地推动了人类社会的进步。时至今日,机电一体化、机械智能化等技术应运而生。人类充分发挥主观能动性,进一步增强对机械的利用效率,使其为我们创造出了更加巨大的生产力,并在一定程度上维护了社会的和谐。

工业机器人的出现是人类在利用机械进行社会生产史上的一个里程碑。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及未来的发展方向。国外汽车行业、电子电器行业、工程机械等行业已经大量使用工业机器人自动化生产线,以保证产品质量,提高生产效率,同时避免了大量的工伤事故。

全球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,随着我国劳动力成本上涨,人口红利逐渐消失,生产方式向柔性、智能、精细转变,构建新型智能制造体系迫在眉睫,对工业机器人的需求呈现大幅增长。大力发展工业机器人产业,对于打造我国制造业新优势,推动工业转型升级,加快制造强国建设,改善人民生活水平具有深远意义。

与计算机、网络技术一样,工业机器人的广泛应用正在日益改变着人类的生产和生活方式。工业机器人的技术水平和应用程度已经成为评价一个国家自动化程度高低的重要标志之一。目前,工业机器人主要承担焊接、喷涂、搬运以及码垛等重复且劳动强度极大的工作,工作方式一般采取示教再现方式及部分离线编程方式。

本书共8章,主要内容包括工业机器人的基本认识,工业机器人的运动学和动力学,工业机器人的机械系统,工业机器人控制系统,工业机器人传感器,工业机器人驱动系统,工业机器人的编程和工业机器人的典型应用。

由于时间仓促,作者水平有限,本书难免存在错误、疏漏之处,恳请广大读者批评指正,不吝赐教。

作者

2018年3月

# 目 录

<b>第 1 章 工业机器人的基本认识</b> .....	1
1.1 工业机器人的定义及特点 .....	1
1.2 工业机器人的系统组成及技术参数 .....	4
1.3 工业机器人的发展 .....	20
1.4 机器人学的研究领域 .....	25
<b>第 2 章 工业机器人的运动学和动力学</b> .....	28
2.1 工业机器人运动学 .....	28
2.2 工业机器人动力学 .....	57
<b>第 3 章 工业机器人的机械系统</b> .....	68
3.1 机器人末端操作器 .....	68
3.2 工业机器人的手腕 .....	82
3.3 工业机器人的手臂 .....	92
3.4 工业机器人的传动机构 .....	103
3.5 工业机器人机械系统实例 .....	110
<b>第 4 章 工业机器人控制系统</b> .....	111
4.1 工业机器人控制系统概述 .....	111
4.2 工业机器人的控制方式 .....	116
4.3 YDRB3-B 工业机器人控制系统 .....	131

<b>第 5 章 工业机器人传感器</b>	133
5.1 感觉与传感器概述	133
5.2 应用在关节的传感器	135
5.3 应用在手部的传感器	144
5.4 多传感器的融合及应用	157
<b>第 6 章 工业机器人驱动系统</b>	163
6.1 概述	163
6.2 液压驱动系统	165
6.3 气压驱动系统	174
6.4 电气驱动系统	180
6.5 新型驱动器	186
6.6 工业机器人驱动系统结构实例	191
<b>第 7 章 工业机器人的编程</b>	193
7.1 工业机器人的编程方式	193
7.2 机器人编程语言的基本要求和类别	195
7.3 几种工业机器人语言介绍	196
7.4 工业机器人的编程过程	199
7.5 示教编程与再现	204
<b>第 8 章 工业机器人的典型应用</b>	224
8.1 焊接机器人	224
8.2 搬运机器人	236
8.3 码垛机器人	242
8.4 喷涂机器人	247
8.5 装配机器人	255
<b>参考文献</b>	262



# 第 1 章 工业机器人的基本认识

近年来,“机器人”再度受到极大关注。

电视、电影中出现的机器人通常拥有超强的能力、超高的智能,人类将会对与机器人共同生活习以为常。同时,还有一些一直以来在工厂里默默无闻地工作着的工业机器人,也被赋予代表未来制造业发展水平的时代含义。

随着科学技术的进步,人类的体力劳动已逐渐被各种机械所取代。工业机器人作为第三次工业革命的重要切入点,即将改变现有工业生产的模式,提升工业生产的效率。

目前,工业机器人技术的应用非常广泛,上至宇宙开发,下到海洋探索,各行各业都离不开机器人的开发和应用。工业机器人的应用程度是衡量一个国家工业自动化水平的重要标志。

## 1.1 工业机器人的定义及特点

### 1.1.1 工业机器人的定义

1920年,捷克剧作家卡雷尔·卡佩克发表了科幻剧本《罗萨姆的万能机器人》,他在剧本中首次提出了“robot”这个词,并且把robot描绘成像人一样的机器,不知疲倦地工作。自此以后,不仅robot这个词广泛地流行,而且设计制造robot的活动也异常风



行。日本研究人员依据自身理解将 robot 翻译成日文“机器人”，中文也采用了这个词，这种翻译结果至今持续影响着很多人对 robot 的理解和研究方向的选择<sup>①</sup>。

初期人们一般的理解，机器人是具有一些类似人的功能的机械电子装置或者自动化装置，它仍然是个机器，特点是具有感知功能、执行功能、可编程功能。随着人工智能技术的发展，作为人造的机器或者机械电子装置，机器人演变成了能够自主感知环境、自主逻辑判断、自主控制执行和自主学习的机器，甚至是具有自我情感意识的机器。

与生物进化的历程相比，机器人在不同领域的出色表现以及人性化的快速发展引起了一些人的担心，人们担心机器人的智能化是否会超越人类，甚至危害或统治人类。例如，1978年9月6日，日本广岛一间工厂的切割机器人在切割钢板时，突然将一名值班工人当作钢板，切成肉片，这一惨案成为世界上第一宗机器人杀人事件。南非试验的机器人火炮曾突然将炮口转向无辜的人群，引起了军事科研人员的恐慌。人们有理由怀疑，随着科技的发展和机器人功能的日益强大，它们可能会对人类造成威胁。

为了防止机器人伤害人类，科幻作家阿西莫夫于1940年提出了“机器人三原则”，即著名的“阿西莫夫的机器人定律”。

① 机器人不得伤害人类，或看到人类受到伤害而袖手旁观。

② 在不违反第一定律的前提下，机器人必须绝对服从人类给予的任何命令。

③ 在不违反第一定律和第二定律的前提下，机器人必须尽力保护自己。

这是给机器人赋予的伦理性纲领，机器人学术界一直将这三原则作为机器人开发的准则。但是作者认为：①实际情况是该理想无法得到遵守，21世纪以来以美国为首的发达国家积极推动空中战斗无人机、地面无战斗平台、水中无人攻击舰艇，从海陆空

---

<sup>①</sup> 王喜文. 工业机器人 2.0: 智能制造时代的主力军[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

各个层面全面突破了这一伦理底线,因此目前停留在担心层面已经没有意义,有远见的人们要大力发展和提高对机器人技术的掌控能力,唯有不断创新才能保证人类自身的安全。②目前与其说大家担心机器人的潜在威胁,还不如说大家担心的是其中的人工智能技术,包括科学家霍金在内的人其实是对人类能否驾驭人工智能技术缺乏信心,因此真正需要审慎的是人工智能技术的发展与运用。

根据目前的技术进展和研究理解,智能机器人是能够自主感知环境、自主逻辑判断、自主控制执行和自主学习的机器,服务于直接和间接掌控智能机器人技术的人群,即使未来可能被赋予一定的自我意识和情感意识,可以自我复制、自我修复,它仍然只能活动在不断进化、不断创新的人类影子中,脱离人类控制实现自我进化仍然是难以想象的事情。

我国对工业机器人的定义:工业机器人是一种能自动定位,可重复编程的多功能、多自由度的操作机;它可以搬运材料、零件或夹持工具,用以完成各种作业;它可以受人类指挥,也可以按照预先编排的程序运行,现代的工业机器人还可以根据人工智能技术制定的原则纲领行动。

### 1.1.2 工业机器人的特点

#### 1. 可重复编程

工业机器人具有智力或具有感觉与识别能力,可根据其工作环境的变化进行再编程,以适应不同作业环境和动作的需要。

#### 2. 拟人化

工业机器人在机械结构上有很多与人相似的部分,比如手爪、手腕、手臂等,这些结构都是通过电脑程序来控制的,能像人一样使用工具。

### 3. 通用性

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,针对不同的作业任务可通过更换工业机器人手部(也称末端操作器,如手爪或工具等)来实现。

### 4. 机电一体化

第三代智能机器人不仅具有获取外部环境信息的各种传感器,而且还具有记忆能力、语言理解能力、图像识别能力、推理判断能力等人工智能,这些功能基于微电子技术和计算机技术的应用。工业机器人与自动化成套技术紧密结合,并融合了多项技术,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,技术综合性强。

综上所述,工业机器人有四大特征,把工业机器人应用于人类的工作和生活等各方面,将给人类工作、生活带来许多方便,因此,可以看出工业机器人具有以下四个方面的优点:

- ①减少劳动力费用,减少材料浪费,降低生产成本。
- ②增加制造过程的柔性,控制和加快库存的周转。
- ③提高生产率,改进产品质量。
- ④消除了危险和恶劣工作环境的劳动岗位,保障安全生产。

## 1.2 工业机器人的系统组成及技术参数

### 1.2.1 工业机器人的系统组成

工业机器人系统由三大部分六个子系统组成。三大部分是

机械部分、传感部分、控制部分,六个子系统是驱动系统、机械结构系统、感受系统、机器人—环境交互系统、人机交互系统、控制系统,如图 1-1 所示。

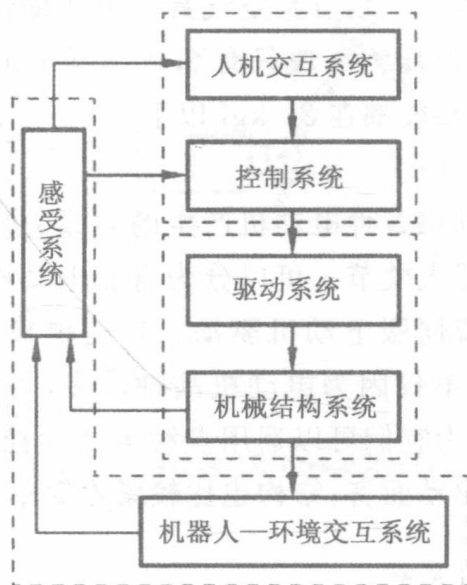


图 1-1 工业机器人的基本组成

## 1. 驱动系统

驱动系统的作用是提供机器人各部位、各关节动作的原动力。

### (1) 液压驱动方式

液压传动的机器人具有比较大的抓举能力,可高达上百千克力,因为液压的压强比较高,一般油压选用  $0.7 \text{ kgf/mm}^2$  左右 ( $1 \text{ kgf}=9.80665 \text{ N}$ )。液压系统介质的可压缩性小,液压传动式机器人结构紧凑、传动平稳、动作灵敏,可以得到较高的位置精度。另外,液压系统采用油液作介质,具有防锈性和自润滑性能,可以提高使用寿命。但对密封要求较高,制造精度要求较高,并且油液的黏度随温度变化而变化,不宜在高温或低温的环境中工作。还需要一整套液压元件,如油箱、油滤、散热器、减压阀等。

### (2) 气压驱动方式

气压传动的机器人以压缩空气来驱动执行机构,优点是空气来源方便,压缩空气黏度小,容易达到高速,气动元件工作压力低,结构简单、成本低。缺点是空气具有可压缩性,导致工作速度的稳定性较差,气源压力一般只有  $0.06 \text{ kgf/mm}^2$  左右,因此机器人的抓举力较小,一般都在  $20 \text{ kgf}$  以下。

### (3) 电气驱动方式

电气驱动是利用各种电动机产生的力或力矩,直接或经过减速机构去驱动机器人关节。可以分为直流电动机驱动、直流无刷电动机驱动和交流伺服电动机驱动。目前越来越多的机器人采用电气驱动方式,不仅因为电动机品种较多,为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的控制方式。相对于液压驱动和气压驱动而言,结构也比较紧凑简单。

## 2. 机械结构系统

工业机器人的机械结构系统由机身、手臂、末端操作器三大部分组成,如图 1-2 所示。每一部分都有若干自由度,构成一个多自由度的机械系统。大部分工业机器人为关节型机器人,关节型机器人的机械臂是由若干个机械关节连接在一起的集合体。例如,典型的六关节工业机器人,由机座、腰部、大臂、肘部、小臂、腕部和手部构成。

①机座。机座是机器人的支承部分,内部安装有机器人的执行机构和驱动装置。

②腰部。腰部是连接机器人机座和大臂的中间支承部分。工作时,腰部可以通过关节 1 在机座上转动。

③臂部。六关节机器人的臂部一般由大臂和小臂构成,大臂通过关节 2 与腰部相连,小臂通过肘关节 3 与大臂相连。工作时,大、小臂各自通过关节电动机转动,实现移动或转动。

④手腕。手腕包括手部和腕部,是连接小臂和末端执行器的部分,主要用于改变末端执行器的空间位姿,联合机器人的所有

关节实现机器人预期的动作和状态。

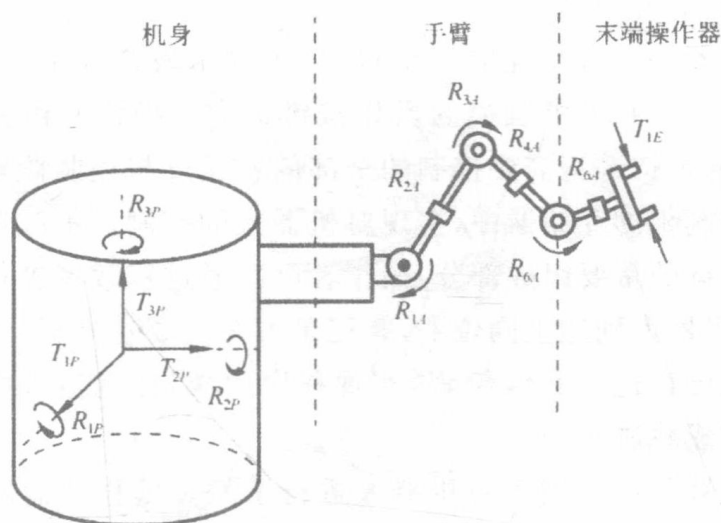


图 1-2 工业机器人机械结构基本组成

### 3. 传感系统

传感系统是工业机器人中比较重要的系统,机械手的所有信息(例如,各连杆的瞬时速度、位置和计算度信息)都需要通过传感器传递给机器人的控制器,产生控制信号。信息传递的方式有两种,可以连续进行,也可以在预定动作结束时再进行下一个信息的传递。

### 4. 机器人—环境交互系统

工业机器人—环境交互系统是实现机器人与外部环境中的设备相互联系和协调的系统。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。当然,也可以是多台机器人、多台机床或设备、多个零件存储装置等集成的一个去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与机器人进行交互的装置,可分

为两大类:指令给定装置,如示教盒、触摸屏等;信息显示装置,如显示器等。

示教器是人机交互的一个接口,也称示教盒或示教编程器,主要由液晶屏和可供触摸的操作按键组成。操作时由控制者手持设备,通过按键将需要控制的全部信息通过与控制器连接的电缆送入控制柜的存储器中,实现对机器人的控制。示教器是机器人控制系统的重要组成部分,操作者可以通过示教器进行手动示教,控制机器人到达不同位姿,并记录各个位姿点坐标;也可以利用机器人语言进行在线编程,实现程序回放,让机器人按编写好的程序完成轨迹运动。

示教器上设有用于对机器人进行示教和编程所需的操作键和按钮。一般情况下,不同机器人厂商示教器外观各不相同,但一般都包含中央的液晶显示区、功能按键区、急停按钮和出入线口。

## 6. 控制系统

控制系统是构成工业机器人的神经中枢,由计算机硬件、软件和一些专用电路、控制器、驱动器等构成。工作时,根据编写的指令以及传感信息控制机器人本体完成一定的动作或路径,主要用于处理机器人工作的全部信息。

为实现对机器人的控制,除计算机硬件系统外,还必须有相应的软件控制系统。通过软件控制系统的支持,可以方便地建立、编辑机器人控制程序。目前,世界各大机器人公司都有自己完善的软件控制系统。如图 1-3 所示为一个典型的工业机器人系统。

### 1.2.2 工业机器人的技术参数

#### 1. 自由度

描述物体相对于坐标系进行独立运动的数目称为自由度。



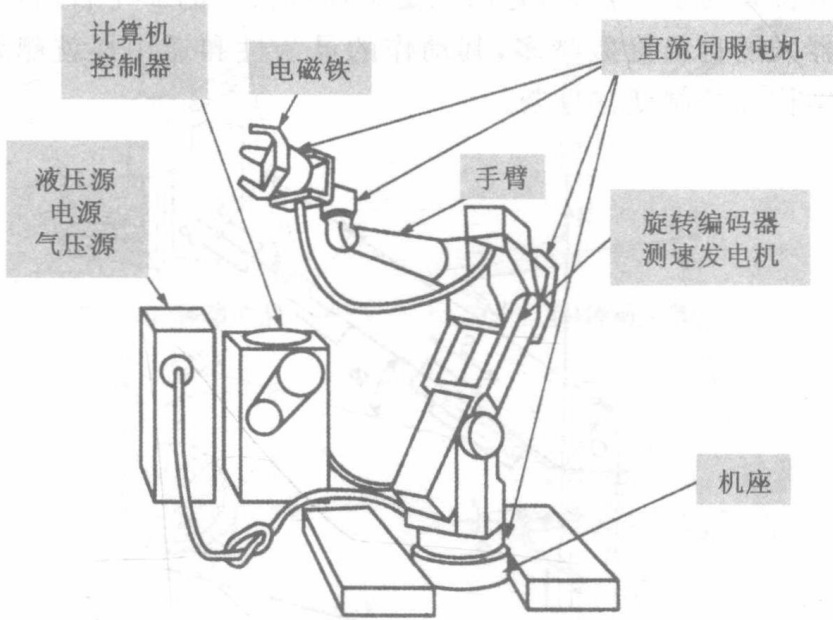


图 1-3 工业机器人系统

物体在三维空间有 6 个自由度,如图 1-4 所示。

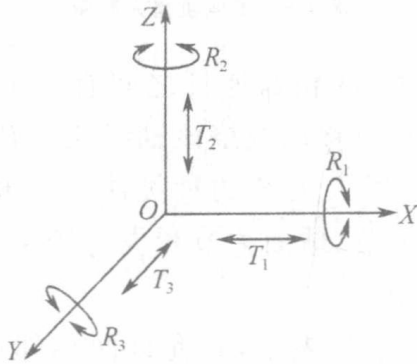


图 1-4 刚体三维空间自由度

机器人的自由度是指描述一个机器人本体(不含末端执行器)相对于基坐标系(机器人坐标系)进行独立运动参数的数目,它是表示机器人动作灵活程度的参数。如图 1-5 所示为由国家标准中规定的运动功能图形符号构成的工业机器人简图,其手腕具有回转角为  $\theta_2$  的一个独立运动,手臂具有回转运动  $\theta_1$ 、俯仰运动  $\Phi$  和伸缩运动 S 三个独立运动。这 4 个独立变化参数确定了手

部中心位置与手部姿态,它们就是工业机器人的4个自由度。工业机器人的自由度数越多,其动作的灵活性和通用性就越好,但是其结构和控制就越复杂。

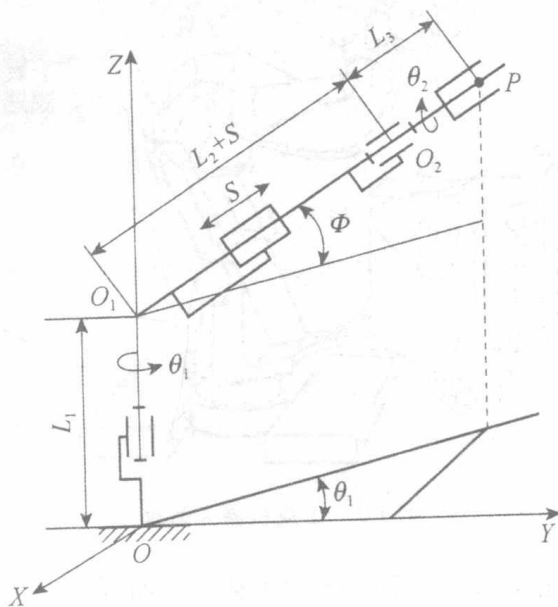


图 1-5 工业机器人简图

在机器人机构中,两相邻连杆之间有一个公共的轴线,两杆之间允许沿该轴线相对移动或绕该轴线相对转动,构成一个运动副,也称为关节。机器人关节的种类决定了机器人的运动自由度,移动关节、转动关节、球面关节和虎克铰关节是机器人机构中经常使用的关节类型。

**移动关节:**用字母 P 表示,它允许两相邻连杆沿关节轴线做相对移动,这种关节具有 1 个自由度,如图 1-6(a)所示。

**转动关节:**用字母 R 表示,它允许两相邻连杆绕关节轴线做相对转动,这种关节具有 1 个自由度,如图 1-6(b)所示。

**球面关节:**用字母 S 表示,它允许两连杆之间有三个独立的相对转动,这种关节具有 3 个自由度,如图 1-6(c)所示。

**虎克铰关节(扭转关节):**用字母 T 表示,它允许两连杆之间有两个相对转动,这种关节具有 2 个自由度,如图 1-6(d)所示。