



Design and Application of Robotic Systems

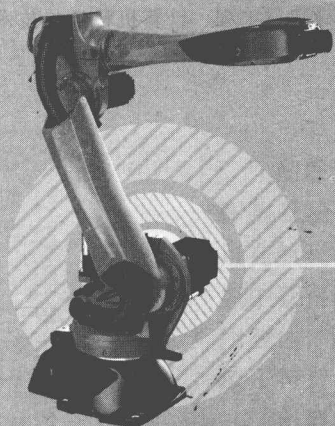
机器人系统

设计及应用

郭彤颖 安冬 主编



化学工业出版社



Design and Application of Robotic Systems

机器人系统 设计及应用



郭彤颖 安冬 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统地介绍了机器人学的基础知识和工作原理,以及设计与应用实例。全书共分8章。主要内容有机器人的定义与分类、基本组成,机器人的技术参数、移动机构和传动机构,机器人的运动学和动力学,机器人的轨迹规划,焊接、喷漆、装配、洁净与真空机器人、移动式搬运机器人等工业机器人的设计与应用,点焊、弧焊机器人工作站的设计与应用,最后介绍了具有实时显示速度、自动寻迹、避障以及可遥控行驶等功能的智能车的硬件及软件设计实例。

本书可作为科研工作者和工程技术人员的参考书,也可以作为控制科学与工程、计算机科学与技术等学科研究生或高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

机器人系统设计及应用/郭彤颖,安冬主编. —北京:
化学工业出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-122-25427-6

I. ①机… II. ①郭…②安… III. ①机器人-系统设计
②机器人-应用 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第249176号

责任编辑:韩亚南
责任校对:宋玮

文字编辑:陈喆
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:三河市万龙印装有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张9 $\frac{3}{4}$ 字数240千字 2016年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.00元

版权所有 违者必究



随着科学技术的发展和社会的进步，机器人已经走进我们的生活、影响着我们的生活。机器人不仅广泛应用于工业生产和制造业领域，而且在航天、海洋探测、危险或恶劣环境，以及日常生活和教育娱乐等领域中获得了大量应用。各种各样的机器人不但已经成为现代高科技的应用载体，而且自身也迅速发展成为一个相对独立的研究与交叉技术，形成了特有的理论研究和学术发展方向。

机器人学涉及机械工程学、电子学、控制科学、计算机科学等众多学科，是一门重要的综合性前沿学科。本书旨在为机械、电子、计算机、控制工程师和工程技术专家，以及研究生或高年级本科生提供必备的知识。在内容编排方面，注重理论与工程实际的结合、基础知识与现代技术的结合、系统设计与应用的结合。希望大家通过阅读和学习这本书，感受到从事机器人相关研究的乐趣。

本书共分8章，第1章主要讲解机器人的基础知识，包括机器人的定义与分类、机器人系统的基本组成、机器人系统的设计方法和机器人应用；第2章主要介绍机器人的技术参数、机器人的移动机构和传动机构；第3章讲解机器人的运动学；第4章介绍机器人的动力学；第5章介绍机器人轨迹规划的相关知识；第6章列举了焊接机器人、喷漆机器人、装配机器人、洁净机器人与真空机器人、移动式搬运机器人的设计与应用实例；第7章讲解机器人工作站的一般设计原则，并介绍点焊和弧焊机器人工作站的设计与应用实例；第8章以设计具有实时显示速度、自动寻迹、避障以及可遥控行驶等功能的智能车为实例，阐述了其硬件及软件设计。

本书第1、2章由郭彤颖、李征宇编写，第3、4章由郭彤颖、刘冬莉、张凤众、刘淑娟编写，第5章由郭彤颖、张辉、徐力编写，第6、7章由王海忱、郭彤颖编写，第8章由安冬、徐力辉编写。研究生刘伟、高煜晗、陈露等参与了相关章节的资料收集和整理。全书由郭彤颖、安冬统稿。

本书的编写参考了国内外学者的大量论著和资料，谨在此对其作者表示衷心的感谢，并对支持本书编写和出版的所有从业者表示衷心的感谢！

由于机器人技术一直处于不断发展之中，再加上时间仓促、编者水平有限，难以全面、完整地当前的研究前沿和热点问题一一进行探讨。书中存在不足之处，敬请读者给予批评指正。



第 1 章 绪论 / 001

1.1 机器人的定义与分类	001
1.1.1 机器人的定义	001
1.1.2 机器人的分类	002
1.2 机器人系统的基本组成	006
1.2.1 机构	006
1.2.2 驱动系统	006
1.2.3 感受系统	006
1.2.4 控制系统	009
1.2.5 人机交互系统	011
1.2.6 机器人-环境交互系统	011
1.3 机器人系统的设计方法	011
1.4 机器人的应用	012

第 2 章 机器人的技术参数和机构 / 022

2.1 机器人的技术参数	022
2.2 机器人的移动机构	024
2.2.1 车轮型移动机构	024
2.2.2 履带式移动机构	026
2.2.3 腿足式移动机构	028
2.2.4 其他形式的移动机构	028
2.3 机器人的传动机构	029
2.3.1 丝杠传动	029
2.3.2 带传动与链传动	030
2.3.3 齿轮传动机构	031
2.3.4 谐波传动机构	034
2.3.5 连杆与凸轮传动	035

第 3 章 机器人的运动学 / 036

3.1 位置与姿态的描述	036
3.2 坐标变换	038

3.3 齐次坐标变换	040
3.4 机器人正向运动学	044
3.4.1 正向运动方程的变换矩阵	044
3.4.2 正向运动方程的求解	047
3.5 机器人逆向运动学	051
3.5.1 逆向运动学问题的多解性与可解性	051
3.5.2 逆向运动方程的求解	052
3.6 移动机器人的运动学模型	060

第 4 章 机器人的动力学 / 063

4.1 拉格朗日法	063
4.2 机器人动力学方程	066
4.2.1 n 自由度机器人操作臂动力学方程	066
4.2.2 机器人操作臂动力学方程系数的简化	069
4.2.3 考虑非刚体效应的动力学模型	070
4.3 动力学仿真	071

第 5 章 机器人的轨迹规划 / 072

5.1 关节空间描述与直角坐标空间描述	072
5.2 轨迹规划的基本原理	073
5.3 关节空间的轨迹规划	076
5.4 直角坐标空间的轨迹规划	081

第 6 章 工业机器人的设计与应用 / 084

6.1 焊接机器人	084
6.1.1 点焊机器人	084
6.1.2 弧焊机器人	087
6.2 喷漆机器人	095
6.2.1 液压喷漆机器人	096
6.2.2 电动喷漆机器人	097
6.3 装配机器人	099
6.3.1 装配机器人的系统组成	099
6.3.2 装配机器人的常用传感器	100
6.3.3 装配机器人的多传感器信息融合系统	106
6.4 洁净机器人与真空机器人	106
6.4.1 洁净环境和真空环境	107
6.4.2 洁净机器人	107
6.4.3 真空机器人	108
6.5 移动式搬运机器人	109
6.5.1 自动导引小车系统的组成	110
6.5.2 自动导引小车的导引方式	111

第 7 章 工业机器人工作站的设计与应用 / 114

7.1 机器人的应用工程	114
7.2 机器人工作站的一般设计原则	115
7.3 点焊机器人工作站	120
7.3.1 点焊机器人工作站的基本组成	120
7.3.2 简易点焊机器人的应用	121
7.4 弧焊机器人工作站	122
7.4.1 弧焊机器人工作站的基本组成	122
7.4.2 简易弧焊机器人工作站的编程与控制	122

第 8 章 自主移动机器人应用实例 / 124

8.1 单片机基础知识	124
8.2 单片机常用开发软件	126
8.3 系统硬件设计	133
8.3.1 直流调速模块	133
8.3.2 蓝牙遥控模块	135
8.3.3 红外避障模块	136
8.3.4 摄像头循迹模块	137
8.3.5 光电测速模块	138
8.3.6 速度显示模块	139
8.4 控制方法及程序设计	140
8.4.1 串口通信程序	140
8.4.2 判断命令程序	140
8.4.3 避障程序	141
8.4.4 光电测速程序设计	142
8.4.5 循迹程序设计	143
8.4.6 路径识别方法	145
8.4.7 控制方法	146

参考文献 / 149

第1章

绪论



1.1 机器人的定义与分类

1.1.1 机器人的定义

什么是机器人呢？关于机器人的概念，真有点像盲人摸象，仁者见仁，智者见智。随着机器人技术的飞速发展和信息时代的到来，机器人所涵盖的内容越来越丰富，机器人的定义也在不断充实和创新。

1920年，捷克作家卡雷尔·凯佩克（Karel Capek）发表了科幻剧本《罗萨姆的万能机器人》。在剧本中，凯佩克把捷克语“Robota”写成了“Robot”，“Robota”是奴隶的意思。该剧预告了机器人的发展对人类社会的悲剧性影响，引起了人们的广泛关注，被当成了“机器人”一词的起源。在该剧中，机器人按照其主人的命令默默地工作，没有感觉和感情，以呆板的方式从事繁重的劳动。后来，罗萨姆公司取得了成功，使机器人具有了感情，导致机器人的应用部门迅速增加。在工厂和家务劳动中，机器人成了必不可少的成员。机器人发觉人类十分自私和不公正，终于造反了，机器人的体能和智能都非常优异，因此消灭了人类。但是机器人不知道如何制造它们自己，认为它们自己很快就会灭绝，所以它们开始寻找人类的幸存者，但没有结果。最后，一对感知能力优于其他机器人的男女机器人相爱了。这时机器人进化为人类，世界又起死回生了。

凯佩克提出的是机器人的安全、感知和自我繁殖问题。科学技术的进步很可能引发人类不希望出现的问题。虽然科幻世界只是一种想象，但人类社会将可能面临这种现实。

为了防止机器人伤害人类，1950年科幻作家阿西莫夫（Asimov）在《我是机器人》一书中提出了“机器人三原则”：

- ① 机器人必须不伤害人类，也不允许它见人类将受到伤害而袖手旁观；
- ② 机器人必须服从人类的命令，除非人类的命令与第一条相违背；
- ③ 机器人必须保护自身不受伤害，除非这与上述两条相违背。

这三条原则，给机器人社会赋以新的伦理性。至今，它仍会为机器人研究人员、设计制造厂家和用户提供了十分有意义的指导方针。

1967年日本召开的第一届机器人学术会议上，人们提出了两个有代表性的定义。一是森政弘与合田周平提出的：“机器人是一种具有移动性、个体性、智能性、通用性、半机械半人性、自动性、奴隶性等7个特征的柔性机器”。从这一定义出发，森政弘又提出了用自动性、智能性、个体性、半机械半人性、作业性、通用性、信息性、柔性、有限性、移动性等10个特性来表示机器人的形象；另一个是加藤一郎提出的，具有如下3个条件的机器可以称为机器人：

- ① 具有脑、手、脚等三要素的个体；
- ② 具有非接触传感器（用眼、耳接受远方信息）和接触传感器；
- ③ 具有平衡觉和固有觉的传感器。

该定义强调了机器人应当具有仿人的特点，即它靠手进行作业，靠脚实现移动，由脑来完成统一指挥的任务。非接触传感器和接触传感器相当于人的五官，使机器人能够识别外界环境，而平衡觉和固有觉则是机器人感知本身状态所不可缺少的传感器。

美国机器人工业协会给出的定义是：机器人是一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置，通过可编程动作来执行各种任务，并具有编程能力的多功能操作机。

日本工业机器人协会给出的定义是：机器人是一种带有记忆装置和末端执行器的、能够通过自动化的动作而代替人类劳动的通用机器。

国际标准化组织对机器人的定义是：机器人是一种能够通过编程和自动控制来执行诸如作业或移动等任务的机器。

我国科学家对机器人的定义是：机器人是一种自动化的机器，所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能能力，如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力，是一种具有高度灵活性的自动化机器。

随着人们对机器人技术智能化本质认识的加深，机器人技术开始源源不断地向人类活动的各个领域渗透。结合这些领域的应用特点，人们发展了各式各样的具有感知、决策、行动和交互能力的特种机器人和各种智能机器人。现在虽然还没有一个严格而准确的机器人定义，但是我们对机器人的本质做些把握：机器人是自动执行工作的机器装置。它既可以接受人类指挥，又可以运行预先编排的程序，也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。它是高级整合控制论、机械电子、计算机、材料和仿生学的产物，在工业、医学、农业、服务业、建筑业甚至军事等领域中均有重要用途。

1.1.2 机器人的分类

关于机器人的分类，国际上没有制定统一的标准，从不同的角度可以有不同的分类。

(1) 按照机器人的发展阶段分类

① 第一代机器人：示教再现型机器人。1947年，为了搬运和处理核燃料，美国橡树岭国家实验室研发了世界上第一台遥控的机器人。1962年美国又研制成功PUMA通用示教再现型机器人，这种机器人通过一个计算机，来控制一个多自由度的机械，通过示教存储程序和信，工作时把信息读取出来，然后发出指令，这样机器人可以重复地根据人当时示教的结果，再现出这种动作。比方说汽车的点焊机器人，它只要把这个点焊的过程示教完以后，它总是重复这样一种工作。

② 第二代机器人：感觉型机器人。示教再现型机器人对于外界的环境没有感知，这个操作力的大小，这个工件存在不存在，焊接的好与坏，它并不知道，因此，在20世纪70年代后期，人们开始研究第二代机器人，叫感觉型机器人，这种机器人拥有类似人在某种功能

的感觉,如力觉、触觉、滑觉、视觉、听觉等,它能够通过感觉来感受和识别工件的形状、大小、颜色。

③ 第三代机器人:智能型机器人。20世纪90年代以来发明的机器人。这种机器人带有多种传感器,可以进行复杂的逻辑推理、判断及决策,在变化的内部状态与外部环境中,自主决定自身的行为。

(2) 按照控制方式分类

① 操作型机器人:能自动控制,可重复编程,多功能,有几个自由度,可固定或运动,用于相关自动化系统中。

② 程控型机器人:按预先要求的顺序及条件,依次控制机器人的机械动作。

③ 示教再现型机器人:通过引导或其他方式,先教会机器人动作,输入工作程序,机器人则自动重复进行作业。

④ 数控型机器人:不必使机器人动作,通过数值、语言等对机器人进行示教,机器人根据示教后的信息进行作业。

⑤ 感觉控制型机器人:利用传感器获取的信息控制机器人的动作。

⑥ 适应控制型机器人:机器人能适应环境的变化,控制其自身的行动。

⑦ 学习控制型机器人:机器人能“体会”工作的经验,具有一定的学习功能,并将所“学”的经验用于工作中。

⑧ 智能机器人:以人工智能决定其行动的机器人。

(3) 从应用环境角度分类

目前,国际上的机器人学者,从应用环境出发将机器人分为两类:制造环境下的工业机器人和非制造环境下的服务与仿人型机器人。

我国的机器人专家从应用环境出发,将机器人也分为两大类,即工业机器人和特种机器人。这和国际上的分类是一致的。工业机器人是指面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人。特种机器人则是除工业机器人之外的、用于非制造业并服务于人类的各种先进机器人,包括:服务机器人、水下机器人、娱乐机器人、军用机器人、农业机器人等。在特种机器人中,有些分支发展很快,有独立成体系的趋势,如服务机器人、水下机器人、军用机器人、微操作机器人等。

工业机器人按臂部的运动形式分为四种。直角坐标型的臂部可沿三个直角坐标移动;圆柱坐标型的臂部可作升降、回转和伸缩动作;球坐标型的臂部能回转、俯仰和伸缩;关节型的臂部有多个转动关节。

工业机器人按执行机构运动的控制机能,又可分点位型和连续轨迹型。点位型只控制执行机构由一点到另一点的准确定位,适用于机床上下料、点焊和一般搬运、装卸等作业;连续轨迹型可控制执行机构按给定轨迹运动,适用于连续焊接和涂装等作业。

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RS-232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(示教操纵盒),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

人称为示教再现型工业机器人。

(4) 按照机器人的运动形式分类

① 直角坐标型机器人 这种机器人的外形轮廓与数控镗铣床或三坐标测量机相似，如图 1-1 所示。3 个关节都是移动关节，关节轴线相互垂直，相当于笛卡儿坐标系的 x 、 y 和 z 轴。它主要用于生产设备的上下料，也可用于高精度的装卸和检测作业。这种形式主要特点如下。

- 结构简单，直观，刚度高。多做成大型龙门式或框架式机器人。
- 3 个关节的运动相互独立，没有耦合，运动学求解简单，不产生奇异状态。采用直线滚动导轨后，速度和定位精度高。
- 工件的装卸、夹具的安装等受到立柱、横梁等构件的限制。
- 容易编程和控制，控制方式与数控机床类似。
- 导轨面防护比较困难。移动部件的惯量比较大，增加了驱动装置的尺寸和能量消耗，操作灵活性较差。

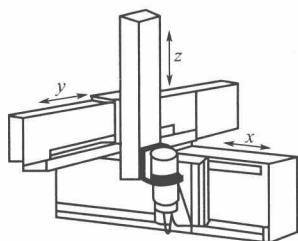


图 1-1 直角坐标型机器人

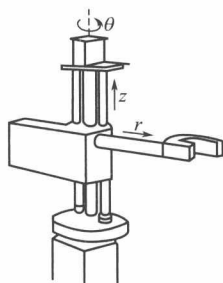


图 1-2 圆柱坐标型机器人

② 圆柱坐标型机器人 如图 1-2 所示，这种机器人以 θ 、 z 和 r 为参数构成坐标系。手腕参考点的位置可表示为 $P=f(\theta, z, r)$ 。其中， r 是手臂的径向长度， θ 是手臂绕水平轴的角位移， z 是在垂直轴上的高度。如果 r 不变，操作臂的运动将形成一个圆柱表面，空间定位比较直观。操作臂收回后，其后端可能与工作空间内的其他物体相碰，移动关节不易防护。

③ 球（极）坐标型机器人 如图 1-3 所示，腕部参考点运动所形成的最大轨迹表面是半径为 r 的球面的一部分，以 θ 、 φ 、 r 为坐标，任意点可表示为 $P=f(\theta, \varphi, r)$ 。这类机器人占地面积小，工作空间较大，移动关节不易防护。

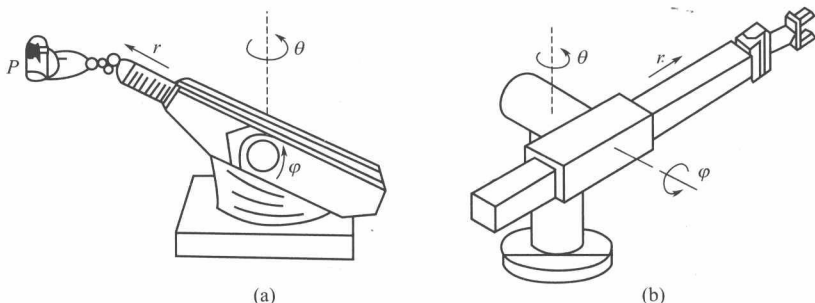


图 1-3 球(极)坐标型机器人

④ 平面双关节型机器人 (selective compliance assembly robot arm, SCARA) 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，另一个关节是移动关节，

用于完成末端件垂直于平面的运动。手腕参考点的位置是由两旋转关节的角位移 φ_1 、 φ_2 和移动关节的位移 z 决定的, 即 $P = f(\varphi_1, \varphi_2, z)$, 如图 1-4 所示。这类机器人结构轻便、响应快。例如 Adept I 型 SCARA 机器人的运动速度可达 10m/s, 比一般关节式机器人快数倍。它最适用于平面定位, 而在垂直方向进行装配的作业。

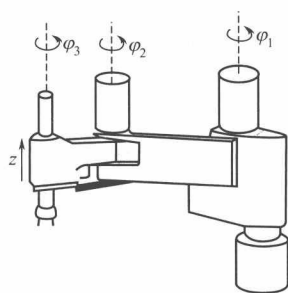


图 1-4 SCARA 机器人

⑤ 关节型机器人 这类机器人由 2 个肩关节和 1 个肘关节进行定位, 由 2 个或 3 个腕关节进行定向。其中, 一个肩关节绕铅直轴旋转, 另一个肩关节实现俯仰, 这两个肩关节轴线正交, 肘关节平行于第二个肩关节轴线, 如图 1-5 所示。这种构形动作灵活, 工作空间大, 在作业空间内手臂的干涉最小, 结构紧凑, 占地面积小, 关节上相对运动部位容易密封防尘。这类机器人运动学较复杂, 运动学反解困难, 确定末端件执行器的位姿不直观, 进行控制时, 计算量比较大。

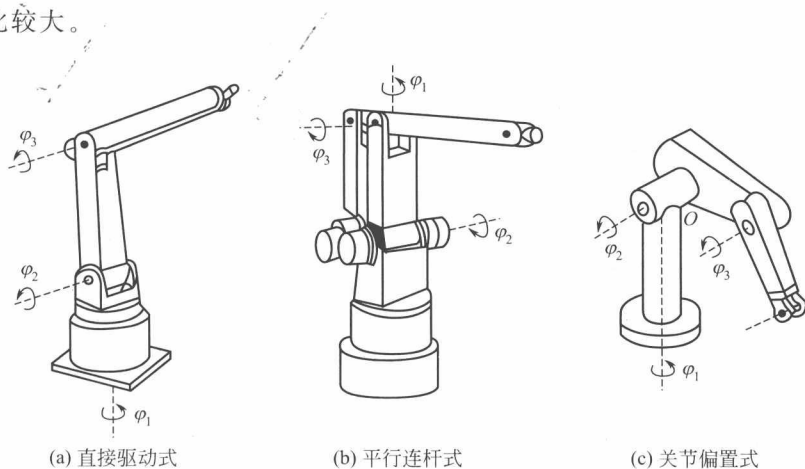


图 1-5 关节式机器人

(5) 按照机器人移动性来分类

可分为半移动式机器人(机器人整体固定在某个位置, 只有部分可以运动, 例如机械手)和移动机器人。

随着机器人的不断发展, 人们发现固定于某一位置操作的机器人并不能完全满足各方面的需要。因此, 20 世纪 80 年代后期, 许多国家有计划地开展了移动机器人技术的研究。所谓的移动机器人, 就是一种具有高度自主规划、自行组织、自适应能力, 适合于在复杂的非结构化环境中工作的机器人, 它融合了计算机技术、信息技术、通信技术、微电子技术和机器人技术等。移动机器人具有移动功能, 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, 比一般机器人有更大的机动性、灵活性。

(6) 按照机器人的移动方式来分类

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。

(7) 按照机器人的功能和用途来分类

可分为医疗机器人、军用机器人、海洋机器人、助残机器人、清洁机器人和管道检测机

机器人等。

(8) 按照机器人的作业空间分类

可分为陆地室内移动机器人、陆地室外移动机器人、水下机器人、无人飞机和空间机器人等。

1.2 机器人系统的基本组成

如图 1-6 所示，机器人由机械部分、控制部分、传感部分三大部分组成。这三大部分主要包括机构（机械结构系统）、感受系统、驱动系统、控制系统、人机交互系统、机器人-环境交互系统六个子系统。如果用人来比喻机器人的组成的话，那么控制系统相当于人的“大脑”，感知系统相当于人的“视觉与感觉器官”，驱动系统相当于人的“肌肉”，执行机构相当于人的“身躯和四肢”。整个机器人运动功能的实现，是通过人机交互系统，采用工程的方法控制实现的。

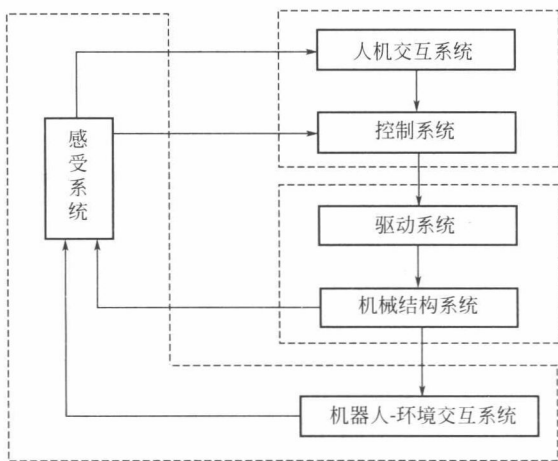


图 1-6 机器人系统组成

1.2.1 机构

机器人的机构由传动部件和机械构件组成。机械构件由机身、手臂、末端操作器三大件组成。每一大件都有若干自由度，构成一个多自由度的机械系统。若基座具备移动机构，则构成移动机器人；若基座不具备移动及腰转机构，则构成单机器人臂。手臂一般由上臂、下臂和手腕组成。末端执行器是直接装在水腕上的一个重要部件，它可以是两手指或多手指的手爪，也可以是焊枪、喷漆枪等作业工具。

1.2.2 驱动系统

驱动系统是向机械结构系统提供动力的装置。驱动系统的驱动方式主要有：电气驱动、液压驱动、气压驱动及新型驱动。

电气驱动是目前使用最多的一种驱动方式，其特点是无环境污染、运动精度高、电源取用方便，响应快，驱动力大，信号检测、传递、处理方便，并可以采用多种灵活的控制方式，驱动电机一般采用步进电机、直流伺服电机、交流伺服电机，也有采用直接驱动电机的。

液压驱动可以获得很大的抓取能力，传动平稳，结构紧凑，防爆性好，动作也较灵敏，但对密封性要求高，不宜在高、低温现场工作。

气压驱动的机器人结构简单，动作迅速，空气来源方便，价格低，但由于空气可压缩而使工作速度稳定性差，抓取力小。

随着应用材料科学的发展，一些新型材料开始应用于机器人的驱动，如形状记忆合金驱动、压电效应驱动、人工肌肉及光驱动等。

1.2.3 感受系统

它由内部传感器模块和外部传感器模块组成，获取内部和外部环境中有用的信息。内部

传感器用来检测机器人的自身状态（内部信息），如关节的运动状态等。外部传感器用来感知外部世界，检测作业对象与作业环境的状态（外部信息），如视觉、听觉、触觉等。智能传感器的使用提高了机器人的机动性、适应性和智能化水平。人类的感受系统对感知外部世界信息是极其巧妙的，然而对于一些特殊的信息，传感器比人类的感受系统更有效。

(1) 机器人对传感器的要求

① 基本性能要求

a. 精度高。精度定义为传感器的输出值与期望值的接近程度。对于给定输入，传感器有一个期望输出，而精度则与传感器的输出和该期望值的接近程度有关。机器人传感器的精度直接影响机器人的工作质量。用于检测和控制机器人运动的传感器是控制机器人定位精度的基础。机器人是否能够准确无误地正常工作，往往取决于传感器的测量精度。

b. 重复性好。对同样的输入，如果对传感器的输出进行多次测量，那么每次输出都可能不一样。重复精度反映了传感器多次输出之间的变化程度。通常，如果进行足够次数的测量，那么就可以确定一个范围，它能包括所有在标称值周围的测量结果，那么这个范围就定义为重复精度。通常重复精度比精度更重要，在多数情况下，不准确性是由系统误差导致的，因为它们可以预测和测量，所以可以进行修正和补偿。重复性误差通常是随机的，不容易补偿。

c. 稳定性好，可靠性高。机器人传感器的稳定性和可靠性是保证机器人能够长期稳定可靠地工作的必要条件。机器人经常是在无人照管的条件下代替人来操作，如果它在工作中出现故障，轻者影响生产的正常进行，重者造成严重事故。

d. 抗干扰能力强。机器人传感器的工作环境比较恶劣，它应当能够承受强电磁干扰、强振动，并能够在一定的高温、高压、高污染环境正常工作。

e. 质量小、体积小、安装方便可靠。对于安装在机器人操作臂等运动部件上的传感器，质量要小，否则会加大运动部件的惯性，减少总的有效载荷，影响机器人的运动性能。对于工作空间受到某种限制的机器人，对体积和安装方向的要求也是必不可少的。例如，关节位移传感器必须与关节的设计相适应，并能与机器人中的其他部件一起移动，但关节周围可利用的空间可能会受到限制。另外，体积庞大的传感器可能会限制关节的运动范围。因此，确保给关节传感器留下足够大的空间非常重要。

f. 价格适当。传感器的价格是需要考虑的重要因素，尤其在一台机器需要使用多个传感器时更是如此。然而价格必须与其他设计要求相平衡，例如可靠性、传感器数据的重要性、精度和寿命等。

g. 输出类型（数字式或模拟式）的选择。根据不同的应用，传感器的输出可以是数字量也可以是模拟量，它们可以直接使用，也可能必须对其进行转换后才能使用。例如，电位器的输出是模拟量，而编码器的输出则是数字量。如果编码器连同微处理器一起使用，其输出可直接传输至处理器的输入端，而电位器的输出则必须利用模数转换器（ADC）转变成数字信号。哪种输出类型比较合适必须结合其他要求进行折中考虑。

h. 接口匹配。传感器必须能与其他设备相连接，如微处理器和控制器。倘若传感器与其他设备的接口不匹配或两者之间需要其他的额外电路，那么需要解决传感器与设备间的接口问题。

② 工作任务要求 现代工业中，机器人被用于执行各种加工任务，其中比较常见的加工任务有物料搬运、装配、喷漆、焊接、检验等。不同的加工任务对机器人提出不同的感觉

要求。

多数搬运机器人目前尚不具有感觉能力，它们只能在指定的位置上拾取确定的零件。而且，在机器人拾取零件以前，除了需要给机器人定位以外，还需要采用某种辅助设备或工艺措施，把被拾取的零件准确定位和定向，这就使得加工工序或设备更加复杂。如果搬运机器人具有视觉、触觉和力觉等感觉能力，就会改善这种状况。视觉系统用于被拾取零件的粗定位，使机器人能够根据需要，寻找应该拾取的零件，并确定该零件的大致位置。触觉传感器用于感知被拾取零件的存在、确定该零件的准确位置，以及确定该零件的方向。触觉传感器有助于机器人更加可靠地拾取零件。力觉传感器主要用于控制搬运机器人的夹持力，防止机器人手爪损坏被抓取的零件。

装配机器人对传感器的要求类似于搬运机器人，也需要视觉、触觉和力觉等感觉能力。通常，装配机器人对工作位置的要求更高。现在，越来越多的机器人正进入装配工作领域，主要任务是销、轴、螺钉和螺栓等装配工作。为了使被装配的零件获得对应的装配位置，采用视觉系统选择合适的装配零件，并对它们进行粗定位，机器人触觉系统能够自动校正装配位置。

喷漆机器人一般需要采用两种类型的传感系统：一种主要用于位置（或速度）的检测；另一种用于工作对象的识别。用于位置检测的传感器，包括光电开关、测速码盘、超声波测距传感器、气动式安全保护器等。待漆工件进入喷漆机器人的工作范围时，光电开关立即接通，通知正常的喷漆工作要求。超声波测距传感器一方面可以用于检测待漆工件的到来，另一方面用来监视机器人及其周围设备的相对位置变化，以避免发生相互碰撞。一旦机器人末端执行器与周围物体发生碰撞，气动式安全保护器会自动切断机器人的动力源，以减少不必要的损失。现代生产经常采用多品种混合加工的柔性生产方式，喷漆机器人系统必须同时对不同种类的工件进行喷漆加工，要求喷漆机器人具备零件识别功能。为此，当待漆工件进入喷漆作业区时，机器人需要识别该工件的类型，然后从存储器中取出相应的加工程序进行喷漆。用于这项任务的传感器，包括阵列触觉传感器系统和机器人视觉系统。由于制造水平的限制，阵列式触觉传感系统只能识别那些形状比较简单的工件，较复杂工件的识别则需要采用视觉系统。

焊接机器人包括点焊机器人和弧焊机器人两类。这两类机器人都需要用位置传感器和速度传感器进行控制。位置传感器主要是采用光电式增量码盘，也可以采用较精密的电位器。根据现在的制造水平，光电式增量码盘具有较高的检测精度和较高的可靠性，但价格昂贵。速度传感器目前主要采用测速发电机，其中交流测速发电机的线性度比较高，且正向与反向输出特性比较对称，比直流测速发电机更适合于弧焊机器人使用。为了检测点焊机器人与待焊工件的接近情况，控制点焊机器人的运动速度，点焊机器人还需要装备接近度传感器。如前所述，弧焊机器人对传感器有一个特殊要求，需要采用传感器使焊枪沿焊缝自动定位，并且自动跟踪焊缝，目前完成这一功能的常见传感器有触觉传感器、位置传感器和视觉传感器。

环境感知能力是移动机器人除了移动之外最基本的一种能力，感知能力的高低直接决定了一个移动机器人的智能性，而感知能力是由感知系统决定的。移动机器人的感知系统相当于人的五官和神经系统，是机器人获取外部环境信息及进行内部反馈控制的工具，它是移动机器人最重要的部分之一。移动机器人的感知系统通常由多种传感器组成，这些传感器处于连接外部环境 with 移动机器人的接口位置，是机器人获取信息的窗口。机器人用这些传感器采

集各种信息，然后采取适当的方法，将多个传感器获取的环境信息加以综合处理，控制机器人进行智能作业。

(2) 机器人传感器的种类

机器人根据所完成任务的不同，配置的传感器类型和规格也不尽相同，一般分为内部传感器和外部传感器。表 1-1 和表 1-2 列出了机器人内传感器和外传感器的基本形式。

所谓内传感器，就是测量机器人自身状态的功能元件，具体检测的对象有关节的线位移、角位移等几何量，速度、角速度、加速度等运动量，还有倾斜角、方位角、振动等物理量，即主要用来采集来自机器人内部的信息。而所谓的外传感器则主要用来采集机器人和外部环境以及工作对象之间相互作用的信息。内传感器常在控制系统中，用作反馈元件，检测机器人自身的状态参数，如关节运动的位置、速度、加速度等；外传感器主要用来测量机器人周边环境参数，通常跟机器人的目标识别、作业安全等因素有关，如视觉传感器，它既可以用来识别工作对象，也可以用来检测障碍物。从机器人系统的观点来看，外传感器的信号一般用于规划决策层，也有一些外传感器的信号被底层的伺服控制层所利用。

内传感器和外传感器是根据传感器在系统中的作用来划分的，某些传感器既可作为内传感器使用，又可以当作外传感器使用。例如力传感器，用于末端执行器或操作臂的自重补偿时，是内传感器；用于测量操作对象或障碍物的反作用力时，是外传感器。

表 1-1 机器人内部传感器的基本形式

检测内容	传感器的工作方式和种类
位置传感器	电位器、旋转变压器、码盘
速度传感器	测速发电机、码盘
加速度传感器	应变片式、伺服式、压电式、电动式
倾斜角传感器	液体式、垂直振子式
方位传感器	陀螺仪、地磁传感器

表 1-2 机器人外部传感器的基本形式

检测内容	传感器的工作方式和种类
视觉传感器	二维、三维、深度
触觉传感器	位移、压力、速度
压觉传感器	单点式、高密度集成、分布式
滑觉传感器	点接触式、线接触式、面接触式
力(力矩)传感器	应变式、压电式
接近觉传感器	空气式、电磁式、电容式、光学式、声波式
距离传感器	超声波、激光、红外传感器
听觉传感器	语音、声音传感器
嗅觉传感器	气体识别传感器
温度传感器	热电偶、热敏电阻、红外线、IC 温度传感器

1.2.4 控制系统

控制系统的任务是根据机器人的作业指令以及从传感器反馈回来的信号，支配机器人的

执行机构去完成规定的运动和功能。如果机器人不具备信息反馈特征，则为开环控制系统；具备信息反馈特征，则为闭环控制系统。根据控制原理可分为程序控制系统、适应性控制系统和人工智能控制系统。根据控制运动的形式可分为点位控制和连续轨迹控制。

对于一个具有高度智能的机器人，它的控制系统实际上包含了“任务规划”“动作规划”“轨迹规划”和基于模型的“伺服控制”等多个层次，如图 1-7 所示。机器人首先要通过人机接口获取操作者的指令，指令的形式可以是人的自然语言，或者是由人发出的专用的指令语言，也可以是通过示教工具输入的示教指令，或者键盘输入的机器人指令语言以及计算机程序指令。机器人其次要对控制命令进行解释理解，把操作者的命令分解为机器人可以实现的“任务”，这是任务规划。然后机器人针对各个任务进行动作分解，这是动作规划。为了实现机器人的一系列动作，应该对机器人每个关节的运动进行设计，即机器人的轨迹规划。最底层是关节运动的伺服控制。

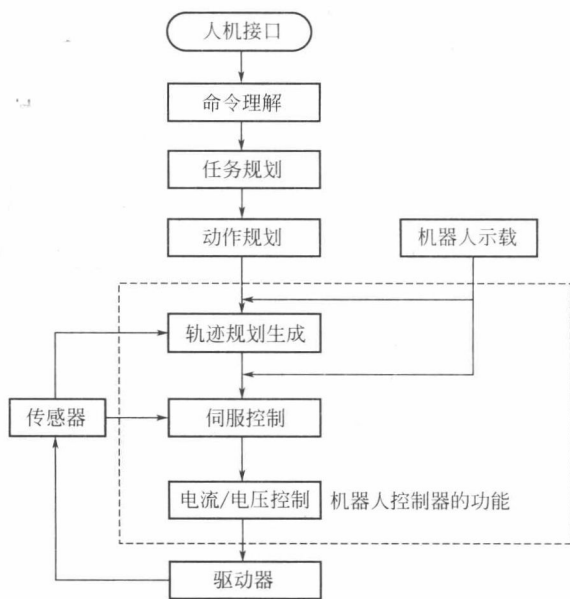


图 1-7 机器人控制系统的组成及功能

(1) 工业机器人控制系统的主要功能

实际应用的工业机器人，其控制系统并不一定都具有上述所有组成及功能。大部分工业机器人的“任务规划”和“动作规划”是由操作人员完成的，有的甚至连“轨迹规划”也要由人工编程来实现。一般的工业机器人，设计者已经完成轨迹规划的工作，因此操作者只要为机器人设定动作和任务即可。由于工业机器人的任务通常比较专一，为这样的机器人设计任务，对用户来说并不是件困难的事情。工业机器人控制系统的主要功能有以下几种。

① 机器人示教。所谓机器人示教指的是，为了让机器人完成某项作业，把完成该项作业内容的实现方法对机器人进行示教。随着机器人完成的作业内容复杂程度的提高，如果还是采用示教再现方式对机器人进行示教已经不能满足要求了。目前一般都使用机器人语言对机器人进行作业内容的示教。作业内容包括让机器人产生应有的动作，也包括机器人与周边装置的控制和通信等方面的内容。

② 轨迹生成。为了控制机器人在被示教的作业点之间按照机器人语言所描述的指定轨迹运动，必须计算配置在机器人各关节处电机的控制量。

③ 伺服控制。把从轨迹生成部分输出的控制量作为指令值，再把这个指令值与位置和速度等传感器来的信号进行比较，用比较后的指令值控制电机转动，其中应用了软伺服。软伺服的输出是控制电机的速度指令值，或者是电流指令值。在软伺服中，对位置与速度的控制是同时进行的，而且大多数情况下是输出电流指令值。对电流指令值进行控制，本质是进行电机力矩的控制，这种控制方式的优点很多。

④ 电流控制。电流控制模块接收从伺服系统来的电流指令，监视流经电机的电流大小，采用 PWM 方式（脉冲宽度调制方式，pulse width modulation）对电机进行控制。