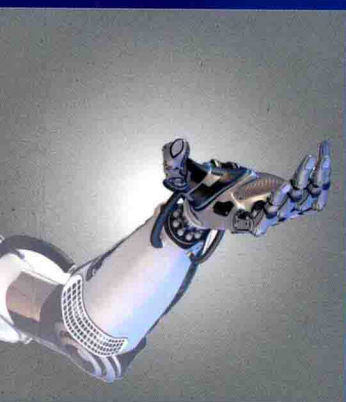


“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材



Application of Industrial Robot

工业机器人 及其应用

袁夫彩 主编

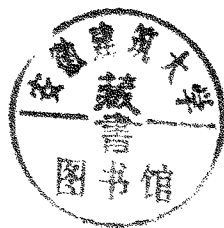


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材

工业机器人及其应用

主 编 袁夫彩
副主编 翟雪琴 王才东
主 审 刘保国



机械工业出版社

本书共八章，主要内容包括：绪论、机器人机械系统、机器人数学基础、机器人运动学、机器人动力学、机器人控制系统、机器人轨迹规划、机器人设计方法和应用及其发展。各章后备有习题，便于读者自学。

全书在系统地介绍机器人的基础理论、关键技术和应用的基础上，加强了机器人机械本体设计方法等的讲解，重点介绍机器人在机构设计、规划、控制和应用等方面近期所取得的成果，以及机器人的应用和发展。本书由浅入深，在体系上符合认知规律，注重采用新的国家标准，并结合现代机器人的新发展，融入编者近年来的教学和科研成果，具有一定的科学性和先进性。

本书可作为高等工科院校机械设计制造及其自动化专业和电气自动化专业及相关专业的教材，也可供高职高专学校、职工大学、电视大学、业余进修的学生作为教材或参考书，同时还可作为有关工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业机器人及其应用/袁夫彩主编. —北京: 机械工业出版社, 2017. 12
“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系列精品教材
ISBN 978-7-111-58485-8

I. ①工… II. ①袁… III. ①工业机器人-高等学校-教材
IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 280033 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: 余 皞 责任编辑: 余 皞 安桂芳

责任校对: 佟瑞鑫 封面设计: 张 静

责任印制: 常天培

北京京丰印刷厂印刷

2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13.25 印张·321 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-58485-8

定价: 34.00 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

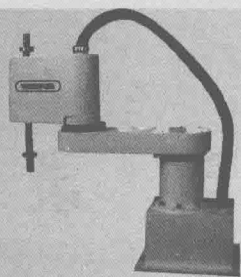
机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前言



“工业机器人及其应用”是高等工科院校机械设计制造及其自动化专业、电气自动化专业及相关专业课程体系中一门重要的课程。随着科学技术的迅猛发展，传统的机器人技术的内涵正在不断地发生变化，同时各院校课程体系改革深入展开，对外交流也日益增加，这使得本课程面临着新的挑战。为了更好地适应机械设计制造及其自动化专业、电气自动化专业的发展，以及培养人才的需要，按照专业教学指导委员会推荐的指导性教学计划要求，结合编者多年来的教学实践，参考了大量的国内外相关文献，由此编写而成本书。本书具有如下特点：

1. 在名词术语、符号代号、单位量纲等方面，全书始终贯彻执行新的国家标准。描述规范、科学统一。

2. 将工业机器人的结构设计、运动学和动力学分析、控制技术、总体设计和应用等方面的理论知识有机统一，阐述由浅入深，形成了工业机器人技术的知识体系，符合认知规律。

3. 注重对基本概念和基本知识的理解和掌握，突出原理的应用，注重工程实际问题的分析和解决，贴近实际应用。

4. 本书适应面广，既可作为本科生教材，也可作为高职高专学生教材；既适用于机械设计制造及其自动化专业、电气自动化专业的学生，也可供相关工程技术人员参考。

全书共八章，主要内容包括：绪论、机器人机械系统、机器人数学基础、机器人运动学、机器人动力学、机器人控制系统、机器人轨迹规划、机器人设计方法和应用及其发展。各章后备有习题，便于读者自学。

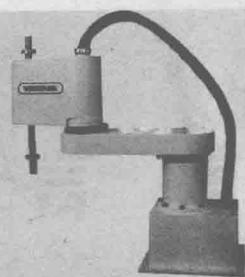
参加本书编写的有袁夫彩（第1章、第2章、第8章）、翟雪琴（第3章、第4章、第5章第1~3节）、王才东（第5章第4~9节、第6章、第7章）。本书由袁夫彩任主编，翟雪琴和王才东任副主编。全书由袁夫彩统稿。河南工业大学刘保国教授担任主审。

教材编写是一项艰巨而又细致的工作。本书的编写得到了河南工业大学、郑州轻工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学等单位有关方面的大力支持和帮助，对此表示衷心的感谢！本书参考了大量的国内外相关文献资料，凝结着众多师长、朋友和亲人的心血，在此向书中提到的，以及未一一列出的，为该书编写做出了无私帮助与支持的各位，表示最真诚的谢意！

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者予以指正。

编者

目 录



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 机器人的发展	1
1.2 机器人的定义、特征、结构和技术参数	3
1.3 机器人的分类	5
1.4 机器人涉及的相关理论及技术	8
1.5 课程学习导引	8
1.6 本章小结	9
习题	9
第 2 章 机器人机械系统	10
2.1 机器人的机座	10
2.2 机器人末端操作器	14
2.3 机器人手腕	27
2.4 机器人手臂	32
2.5 机器人的驱动与传动	37
2.6 本章小结	42
习题	42
第 3 章 机器人数学基础	43
3.1 机器人位置和姿态的表示	43
3.2 齐次坐标与动系的位姿表示	45
3.3 齐次坐标变换	48
3.4 变换矩阵的逆变换	56
3.5 本章小结	60
习题	60
第 4 章 机器人运动学	61
4.1 机器人运动学方程的建立	61
4.2 机器人运动学方程的分析	66
4.3 典型机器人运动学方程的建立及分析	79
4.4 机器人雅可比矩阵的建立及分析	88
4.5 本章小结	101
习题	101
第 5 章 机器人动力学	103
5.1 连杆的速度和加速度分析	103
5.2 机器人静力学分析	109

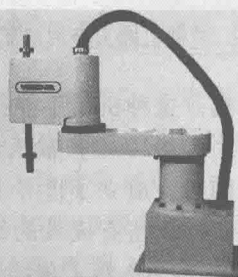
5.3 牛顿—欧拉递推动力学方程	111
5.4 关节空间和操作空间动力学	116
5.5 动力学性能指标	117
5.6 动力学优化设计	119
5.7 拉格朗日动力学	123
5.8 操作臂的动力学建模和仿真	124
5.9 本章小结	127
习题	127

第 6 章 机器人控制系统	128
6.1 概述	128
6.2 机器人信息检测装置	130
6.3 机器人运动控制系统	138
6.4 机器人运动控制系统实例分析	142
6.5 控制方式	147
6.6 单关节线性模型和控制	148
6.7 本章小结	156
习题	157

第 7 章 机器人轨迹规划	158
7.1 机器人轨迹规划的分析	158
7.2 关节运动轨迹的插值	162
7.3 笛卡儿空间规划方法	170
7.4 四元数与直线轨迹规划	173
7.5 轨迹的实时生成	177
7.6 基于动力学模型的轨迹规划	177
7.7 本章小结	178
习题	178

第 8 章 机器人设计方法和应用及其发展	180
8.1 机器人一般设计原则、步骤和方法	180
8.2 工业机器人系统设计	184
8.3 特种机器人系统设计	186
8.4 机器人的应用	192
8.5 机器人的发展趋势	200
8.6 机器人与人类社会	202
8.7 本章小结	203
习题	203
参考文献	204

第 1 章



绪 论

本章主要介绍机器人的由来、定义、分类、结构特点和国内外的发展情况，分析机器人涉及的相关理论及技术。通过本章的学习，希望读者对机器人有一个初步的认识。

1.1 机器人的发展

机器人涉及了机械工程、电子技术、计算机技术、自动控制理论及人工智能等多学科知识，代表了机电一体化的新成就，是当代科学技术发展较活跃的领域之一。“机器人”一词虽出现得较晚，但这一概念在人类的想象中却早已出现。研制和使用机器人是人们多年的梦想，这体现了人类重塑自身、了解自我的一种强烈愿望。

自古以来，有不少学者和杰出工匠都曾研制出具有人类特点或具有模拟动物特征的机器人雏形。在中国，西周时期的能工巧匠偃师就研制出了能歌善舞的伶人，这是我国较早的涉及机器人概念的文字记载；春秋后期，著名的木匠鲁班曾制造过一只木鸟，能在空中飞行“三日而不下”。

“机器人”（Robot）一词，是 1920 年由捷克剧作家卡雷尔·卡佩克（Karel Capek）在他的讽刺剧本“罗莎姆的万能机器人”中首先提出的。剧中描述了一个与人类相似，但能不知疲倦工作的机器奴仆（Robot）。从那时起，“Robot”一词就被沿用下来，中文译成机器人。

1942 年美国科幻作家阿西莫夫（Isaac Asimov），在他的科幻小说《我，机器人》中提出了“机器人三原则”：①机器人不能危害人类，不能眼看人类受伤害而袖手旁观；②机器人必须服从于人类，除非违背第一条原则；③机器人应该能够保护自身不受伤害，除非违背第一条和第二条原则。虽然这三条原则，只是科幻小说里的创造，但后来成为学术界默认的机器人研发准则，因为它给机器人赋予了伦理观。

现代机器人出现于 20 世纪中期，当时数字计算机已经出现，电子技术也有了长足的发展，在产业领域出现了受计算机控制的可编程的数控机床，与机器人技术相关的控制技术和机械加工技术也已有了一定的基础。另外，从主观方面来看，人类需要开发机器人，替代人去从事一些恶劣环境下的作业。正是在这一背景下，机器人技术的研究与应用得到了快速发展。下面列举一些现代机器人工业史上的标志性事件，以展示机器人的发展历程。

1954 年，美国人戴沃尔（G. C. Devol）获得了世界上第一台可编程的机械手的注册专

利。这种机械手能按照一定的程序从事工作，因此具有通用性和灵活性。

1959年，戴沃尔与美国发明家英格伯格联手制造出具有实用价值的第一台工业机器人。随后，成立了世界上第一家机器人制造工厂——“Unimation”公司。由于英格伯格对工业机器人富有成效的研发和宣传，他被称为“工业机器人之父”。

1962年，美国AMF公司生产出万能搬运（Versatran）机器人，与Unimation公司生产的万能伙伴（Unimate）机器人一样成为真正商业化的工业机器人，并出口到世界各国，掀起了全世界对机器人的热潮。

1967年，日本川崎重工公司和丰田公司分别从美国购买了工业机器人Unimate和Versatran的生产许可证，日本从此开始了对机器人的研究和制造。20世纪60年代后期，喷涂弧焊机器人问世并逐步开始应用于工业生产。

1979年，美国Unimation公司推出通用工业机器人PUMA，如图1-1所示。这标志着工业机器人技术已经基本成熟。PUMA至今仍然工作在生产第一线，许多机器人技术的研究都以该机器人为模型和对象。

1979年，日本山梨大学牧野洋发明了平面关节型SCARA机器人，如图1-2所示。在此后的装配作业中得到了广泛应用。

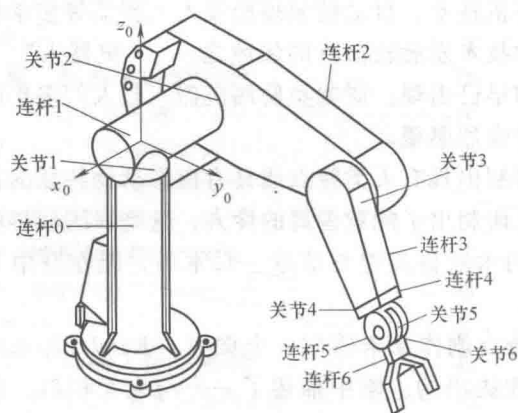


图 1-1 PUMA 机器人示意图

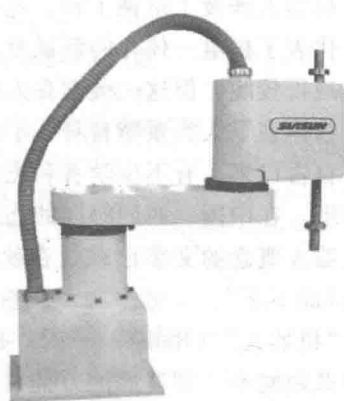


图 1-2 SCARA 机器人示意图

1980年，日本定为机器人普及元年，赢得了“机器人王国”的美称。

1996年，日本本田公司推出仿人型机器人P2，使双足行走机器人的研究达到了一个新的水平。随后许多国际著名企业争相研制代表自己公司形象的仿人型机器人，以展示公司的科研实力。

1998年，丹麦Lego公司推出机器人（Mind-storms）套件，使机器人制造变得跟搭积木一样，相对简单又能任意拼装，使机器人开始走入个人家庭世界。

1999年，日本索尼公司推出机器狗——爱宝（AIBO），当即销售一空，从此娱乐机器人成为目前机器人迈进普通家庭的途径之一。

2002年，美国iRobot公司推出了吸尘器机器人Roomba，是目前世界上销量较大、极具商业化的家用机器人。

2006年，微软公司推出Microsoft Robotics Studio，机器人模块化、平台统一化的趋势越来越明显。比尔·盖茨预言，家用机器人很快将席卷全球。

中国的机器人技术起步较晚,从20世纪70年代初才开始。我国在“七五”计划中把机器人列入国家重点科研规划内容;在“863”计划的支持下,机器人基础理论与技术研究全面展开。我国第一个机器人研究示范工程于1986年在沈阳建立。目前我国已基本掌握了机器人的设计制造技术、控制系统硬件和软件设计技术、运动学和轨迹规划技术,生产了机器人关键元器件,开发出了喷涂、弧焊、点焊、装配和搬运等机器人。截至2007年年底,已有130多台(套)喷涂机器人在20余家企业的近30条自动喷涂生产线(站)上获得规模应用。弧焊机器人已应用在汽车制造厂的焊装线上。20世纪90年代中期,我国6000m以浅的深水作业水下机器人试验成功。以后的近10年中,在步行机器人、精密装配机器人和多自由度关节机器人等国际前沿领域,我国逐步缩小了与世界先进水平的差距。

2012年6月,在马里亚纳海沟,我国的“蛟龙”号载人潜水器(水下机器人)完成了7000m级海试任务,首次到达7000m深的海底开展作业和科学研究试验;也是在2012年6月,我国天宫一号与神舟九号载人交会对接成功,标志着我国载人航天工程的一个重大突破。这些表明,我国在水下机器人和空间机器人等领域已经达到了世界先进水平。

1.2 机器人的定义、特征、结构和技术参数

1.2.1 机器人的定义和特征

虽然机器人问世已有几十年,但目前关于机器人仍然没有一个统一、严格、准确的科学定义。其原因之一是机器人还在发展,新的机型不断涌现,机器人可实现的功能不断增多;而根本原因则是机器人涉及了人的概念,这就使什么是机器人成为一个难以回答的哲学问题。就像“机器人”一词最早诞生于科幻小说中一样,人们对机器人充满了幻想。也许正是目前机器人定义的模糊性,才给予了人们充分的想象和创造的空间。

目前大多数国家倾向于美国机器人工业协会(RIA)给出的定义:机器人是一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置,通过可编程序动作来执行各种任务,并具有编程能力的多功能机械手。这个定义实际上表述的是工业机器人。

日本工业机器人协会(JIRA)给出的定义: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。

我国学者对机器人的定义是: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、规划、动作和协同等能力,是一种具有高度灵活性的自动化机器。

通常,机器人应该具有以下三大特征:

(1) 拟生物功能 机器人是模仿人或其他生物动作的机器,能像人那样使用工具。因此,数控机床和汽车不是机器人。

(2) 可编程 机器人具有智力或具有感觉与识别能力,可随工作环境变化的需要而再编程。一般的电动玩具没有感觉和识别能力,不能再编程,因此不能称为真正的机器人。

(3) 通用性 一般机器人在执行不同作业任务时,具有较好的通用性。例如,通过更换机器人手部末端操作器(手爪或工具等),便可执行不同的作业任务。

1.2.2 机器人的结构

机器人系统是由机器人、作业对象、环境和任务等组成的。其中包括机器人机械系统、驱动系统、控制系统和检测系统等，它们之间的关系如图 1-3 所示。由图可见，机器人通过人机交互系统接收作业任务，控制系统发出控制命令；驱动系统接收命令后驱动机械系统执行任务，从而改变作业对象；检测系统可以感知机器人内部及外部信息，将检测的信息与给定的信息进行比较，从而修正控制信号，保证机器人的正确作业。

(1) 控制系统 该系统的任务是根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环节，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。该控制系统部分主要由控制系统硬件和软件组成。软件主要由人与机器人进行联系的人机交互系统和控制算法等组成。该控制系统部分的作用相当于人的大脑。

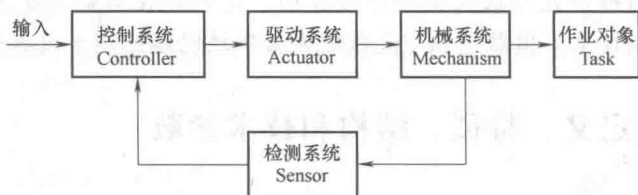


图 1-3 机器人系统结构示意图

(2) 驱动系统 主要指驱动机械系统动作的动力装置。根据驱动源的不同，驱动可分为电气、液压和气压等驱动方式，以及把它们结合起来应用的综合驱动系统。该部分的作用相当于人的肌肉。

(3) 机械系统 该系统一般包括机身、臂部、手腕、末端操作器（也称为手部）和行走机构等部分，每一部分都有若干自由度，构成一个多自由度的机械系统。若机器人具备行走机构，则构成行走机器人；若机器人不具备行走机构，则构成固定式机器人。末端操作器是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，也可以是喷涂枪、焊枪等作业工具。机械系统的作用相当于人的身体（骨骼、手、臂和腿等）。

(4) 检测系统 该系统由内部传感器和外部传感器等组成，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关节的位置、速度等信息。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信息，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，赋予机器人一定的智能。该部分的作用相当于人的五官。

1.2.3 机器人的技术参数

技术参数是机器人制造商在产品供货时所提供的技术数据，反映了机器人可胜任的工作、具有的操作性能等情况，是选择、设计、应用机器人时必须考虑的数据。机器人的主要技术参数一般有自由度、定位精度、重复定位精度、工作空间、承载能力及最大工作速度等。

(1) 自由度 机器人自由度是指其所具有的独立运动的数目，一般不包括末端操作器的开合自由度。机器人的一个自由度通常对应一个关节的独立运动。自由度是表示机器人动

作灵活程度的参数,自由度越多机器人就越灵活,但结构也就越复杂,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个之间。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,可方便机器人躲避障碍物和改善机器人的动力性能。人类的手臂(大臂、小臂和手腕)共有7个自由度,一个人的一只手5个手指共有24个自由度,所以工作起来很灵巧,可回避障碍物,并可从不同方向到达同一个目的点。

(2) 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环境、条件、目标动作和命令等相同的条件下,机器人连续重复运动若干次时,其位置的分散情况。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指标作为衡量示教一再现实机器人水平的重要指标。

(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腕中心点所能达到的所有点的集合,也称为工作区域。由于末端操作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,故工作空间是指不安装末端操作器时的工作区域。工作空间的大小不仅与机器人各连杆的尺寸有关,而且与机器人的总体结构形式有关。工作空间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作业死区而不能完成任务。

(4) 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,通常都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,工作速度越高就要花费较多的时间加速或减速,或者对机器人的最大加速率或最大减速率的要求更高。

(5) 承载能力 承载能力是指机器人在工作范围内的任意位姿上,所能承受的最大载荷。承载能力不仅取决于负载的大小,而且与机器人运行的速度和加速度有关。为保证安全起见,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载荷,而且包括机器人末端操作器的重力。

1.3 机器人的分类

机器人的分类方法很多,下面依据几个有代表性的分类方法列举机器人的分类。

1. 按照应用类型分类

机器人按应用类型可分为工业机器人、极限作业机器人和娱乐机器人。

(1) 工业机器人 是指用于工业领域的机器人,如搬运、焊接、装配、喷涂和检查等机器人。

(2) 极限作业机器人 主要是指在人们难以进入的核电站、海底和宇宙空间等进行作业的机器人。

(3) 娱乐机器人 主要是指用于娱乐的机器人。包括弹奏乐器的机器人、舞蹈机器人和玩具机器人等(具有某种程度的通用性)。

2. 按机器人发展的程度分类

按照从低级到高级的发展程度来分,机器人一般可分为以下几类。

(1) 第一代机器人 是指只能以“示教一再现实”方式工作的机器人。

(2) 第二代机器人 带有一些可感知环境的检测装置,可通过反馈控制,使其在一定程度上适应变化的环境。

(3) 第三代机器人 属于智能机器人。它具有多种感知功能,可进行复杂的逻辑推理、判断及决策,可在作业环境中独立行动,具有发现问题,并能自主地解决问题的能力。这类机器人具有高度的适应性和自治能力。

(4) 第四代机器人 为情感型机器人。它具有人类式的情感。具有情感是机器人发展的较高层次,也是机器人科学家的梦想。

3. 按照控制方式分类

机器人按控制方式可分为操作机器人、程序机器人、示教再现机器人、智能机器人和综合机器人。

(1) 操作机器人 操作机器人的典型代表是在核电站处理放射性物质时远距离进行操作的机器人。在这种场合,相当于人手操纵的部分称为主动机械手,而从动机械手基本上与主动机械手类似,只是从动机械手要比主动机械手大一些,作业时的力量也更大。

(2) 程序机器人 程序机器人按预先给定的程序、条件和位置进行作业,目前大部分机器人都采用这种控制方式工作。

(3) 示教再现机器人 示教再现机器人与盒式磁带的录放一样,将所教的操作过程自动记录在软盘、磁带等存储器中,当需要再现操作时,可重复所教过的动作过程。示教方法有手把手示教、有线示教和无线示教。

(4) 智能机器人 智能机器人不仅可以进行预先设定的动作,还可以按照工作环境的变化改变动作。

(5) 综合机器人 综合机器人是由操作机器人、示教再现机器人、智能机器人组合而成的机器人,如火星探测机器人。

4. 按机器人关节连接布置形式分类

按机器人关节连接布置的形式,机器人可分为串联机器人和并联机器人两类。

串联机器人的杆件和关节是采用串联方式进行连接(开链式)的,并联机器人的杆件和关节是采用并联方式进行连接(闭链式)的。

并联机器人是指运动平台和基座间至少由两根活动连杆连接,具有两个或两个以上自由度闭环机构的机器人。并联机器人具有刚度和精度高、响应速度快、结构简单等特点,其不足之处在于工作空间小和控制较复杂。并联机器人广泛用于产品包装、飞行员训练模拟及外科手术设备的精确定位等。

5. 按照机器人坐标形式分类

通常将机器人机身、臂部、手腕和末端操作器(如手爪)称为机器人的操作臂,它由一系列的连杆通过关节顺序串联而成。关节决定两相邻连杆副之间的连接关系,也称为运动副。机器人最常用的两种关节是移动关节(Prismatic joint)和转动关节(Revolute joint),通常用P表示移动关节,用R表示转动关节。

机器人要完成任一空间作业,通常需要6个自由度。机器人的运动由臂部和手腕的运动组合而成。通常臂部有3个关节,用于改变手腕参考点的位置,称为定位机构;手腕部分也有3个关节,通常这3个关节的轴线相互垂直相交,用来改变末端操作器的姿态,称为定向机构。整个操作臂可以看成是由定位机构连接定向机构组成的。

机器人操作臂的关节通常为单自由度主动运动副，即每一个关节均由一个驱动器驱动。

机器人臂部3个关节的种类决定了操作臂工作空间的形式。按照臂部关节沿坐标轴的运动形式，即按移动和转动的不同组合，可将机器人分为直角坐标型、圆柱坐标型、球（极）坐标型、关节坐标型和平面关节型五种类型。机器人的结构形式由用途决定，即由所完成工作的性质选取。

(1) 直角坐标型机器人 直角坐标型机器人的外形与数控镗铣床和三坐标测量机相似，如图1-4a所示。其中3个关节都是移动关节（3P），关节轴线之间相互垂直，相当于笛卡儿坐标系的 X 轴、 Y 轴和 Z 轴。其优点是刚度好。大多做成大型龙门式或框架式结构，位置精度高、运动学求解简单、控制无耦合；但其结构较庞大、动作范围小、灵活性差，并且占地面积较大。因其稳定性好，适用于大负载搬运作业。

(2) 圆柱坐标型机器人 圆柱坐标型机器人具有2个移动关节（2P）和1个转动关节（1R），工作范围为圆柱形状，如图1-4b所示。其特点为位置精度高、运动直观、控制方便、结构简单、占地面积小和价格低廉，因此应用广泛；但其不易抓取靠近立柱或地面上的物体。

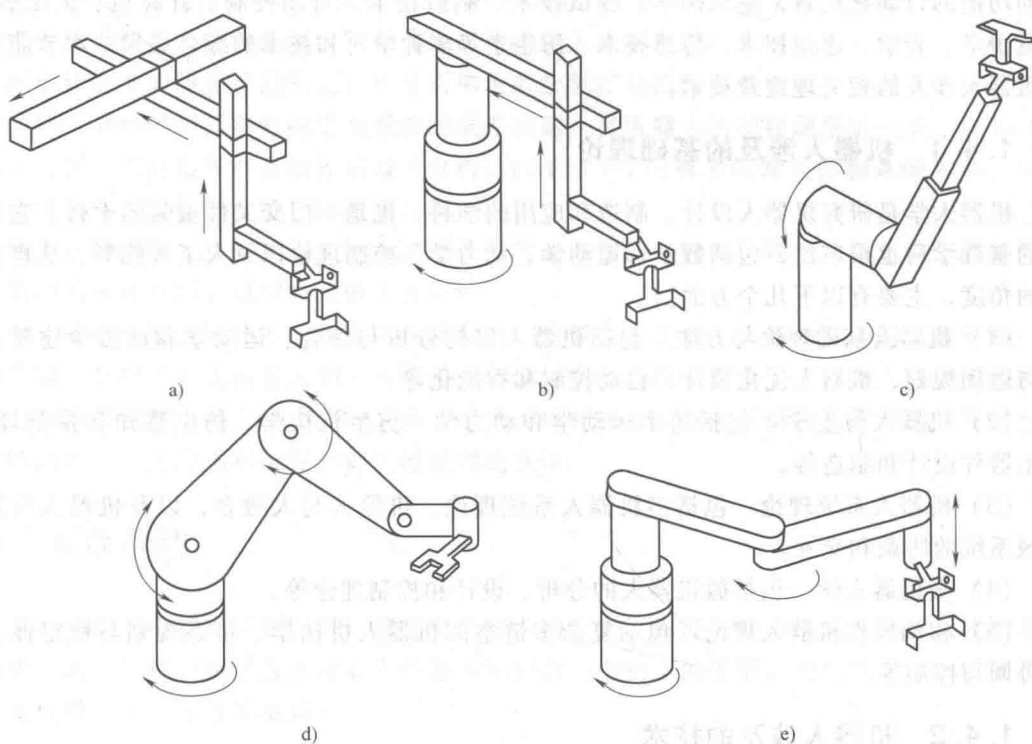


图1-4 机器人按坐标形式分类示意图

a) 直角坐标型 b) 圆柱坐标型 c) 球（极）坐标型 d) 关节坐标型 e) 平面关节型

(3) 球（极）坐标型机器人 球（极）坐标型机器人具有1个移动关节（1P）和2个转动关节（2R），工作范围为球体形状，如图1-4c所示。其优点是结构紧凑、动作灵活、占地面积小，但其结构复杂、定位精度低、运动直观性差。

(4) 关节坐标型机器人 关节坐标型机器人由立柱、大臂和小臂组成。其具有拟人的机械结构，即大臂与立柱构成肩关节，大臂与小臂构成肘关节。具有3个转动关节（3R），

(5) 平面关节型机器人 该机器人有 3 个转动关节, 其轴线相互平行, 可在平面内进行定位和定向; 该机器人还有 1 个移动关节, 用于完成手爪在垂直于平面方向的运动, 如图 1-4e 所示。手腕中心的位置由 2 个转动关节及 1 个移动关节来决定, 手爪的方向由转动关节的角度来决定。该类机器人的特点是在垂直平面内具有很好的刚度, 在水平面内具有较好的柔顺性, 动作灵活、速度快、定位精度高。该机器人较适宜于平面定位, 在垂直方向进行装配, 所以又称为装配机器人。

(1) 机器人基础理论与方法 包括机器人机构分析与综合、运动学和动力学建模、作业与运动规划、机器人优化设计、自动控制和智能化等。

(3) 机器人系统理论 包括多机器人系统理论、机器人与人融合, 以及机器人与其他机械系统的协调和交互。

(5) 移动操作机器人理论 包括复杂多链空间机器人机构学、步态规划与稳定性、多链协调与控制等。

机器人同时也是一门实践性很强的学科,所涉及的技术主要有机器人结构设计与制造技术、操作和执行技术、驱动和控制技术、检测和感知技术、机器人智能技术、试验和评价技术、人机交互和融合技术、通信技术等。

第1章为绪论,介绍机器人及其技术的发展、定义、特征、结构、技术参数和分类,以及机器人涉及的主要理论和技术等内容。

第2章为机器人机械系统。该章主要介绍机器人的机座、手部、腕部、臂部、驱动和传动机构等的工作原理、结构特点和设计要求。通过本章的学习,能够了解和掌握机器人的机械系统一般结构、工作原理和设计要点。

第3章为机器人数学基础。该章首先介绍关于位置、姿态和齐次坐标的概念,然后介绍平移和旋转的定义,以及平移和旋转的相关知识;还介绍了齐次变换矩阵,给出了齐次变换矩阵的相关定义。

第4章为机器人运动学。该章介绍几种典型机器人的正逆运动方程建立及分析;还介绍机器人的雅可比矩阵的建立,包括速度雅可比矩阵和力雅可比矩阵;同时对机器人奇异点和奇异位形进行分析和研究。

第5章为机器人动力学。该章主要介绍机器人的静力学问题、动力学问题,以及动力学建模和仿真。为了建立机器人动力学方程,首先讨论机器人运动的瞬时状态,对其进行速度分析和加速度分析,研究连杆的受力状态,然后利用达朗贝尔等原理,解决动力学分析问题。

第6章为机器人控制系统。该章首先介绍机器人控制系统的一般形式和特点,分析机器人控制中较基本的位置控制问题;从分析单关节位置控制的传递函数入手,建立了单关节位置控制器,分析控制器参数确定及系统的误差问题;在机器人运动控制系统一节,以LM629控制卡为例,对机器人的运动控制做了分析;以基于PC的教学机器人控制系统为例,介绍了该教学机器人实验平台的总体控制方案。

第7章为机器人轨迹规划。该章讲述关于轨迹规划的一般性问题,并且对关节轨迹规划的插值和笛卡儿空间的规划方法做了介绍。

第8章为机器人设计方法和应用及其发展。该章主要介绍了机器人设计的一般原则、方法和步骤,分析了工业机器人和特种机器人的设计实例。简要地介绍了机器人的应用和发展现状,分析了机器人与人类之间的关系。本章的目的在于使读者对机器人的应用和发展有一个整体的认识,为应用和研究机器人提供理论支撑。

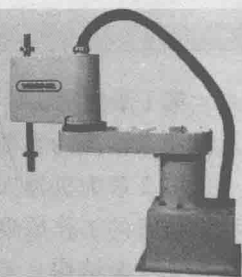
1.6 本章小结

本章介绍了机器人发展历程,阐述了机器人的定义、特征、结构组成、分类及技术参数等问题,其目的在于使读者对机器人的基本知识有一个初步的了解,为后续学习、应用和研究机器人打下一个良好的基础。

习 题

- 1-1 简述机器人的发展现状。
- 1-2 机器人设计的三原则是什么?
- 1-3 机器人按应用类型来分,可分为哪几类?机器人的技术参数主要有哪些?

第 2 章



机器人机械系统

机器人的机械系统是机器人的支承基础和执行机构，主要包括末端操作器（手部）1、腕部2、臂部3、腰部4和机座5等，如图2-1所示。其机械系统是机器人设计的重要内容之一。使用要求是机器人机械系统设计的出发点，优质、高效和低成本是其设计追求的目标。

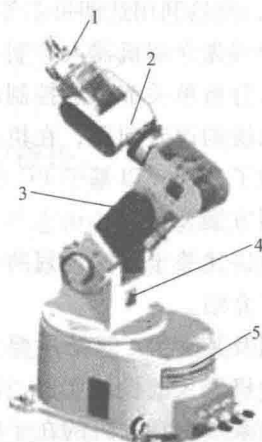


图 2-1 工业机器人结构示意图

1—末端操作器（手部） 2—腕部
3—臂部 4—腰部 5—机座

本章主要介绍机器人的机座、末端操作器（手部）、腕部、臂部、驱动和传动机构等的工作原理、结构特点和设计要求。通过本章的学习，使读者能够了解和掌握机器人的机械系统一般结构、工作原理和设计要点。

2.1 机器人的机座

2.1.1 概述

机器人的机座，可以分为固定式和行走式两种。一般的机器人机座大多是固定式的，还有一部分是移动式的。随着科学技术发展的需要，具有一定智能的可移动的行走式机器人将是今后机器人发展的方向之一，并将得到广泛地应用。

根据机器人的行走环境，可将机器人所具备的移动机能分为以下几类：①地面移动机

能；②水中移动机能；③空中移动机能；④地中移动机能等。本节主要介绍具有地面行走机能的行走机构。根据地面行走机构的特点可以将其分为车轮式、履带式和步行式三种行走机构，它们在行走过程中，前两者与地面连续接触，且形态为运行车式，后者为间断接触，形态为类人或动物的腿脚式。

2.1.2 车轮式行走机构

车轮式行走机构具有运动平稳、能耗小，以及容易控制移动速度和方向等优点，因此得到普遍的应用。目前应用较广的主要是三轮式和四轮式行走机构。

三轮式行走机构具有一定的稳定性，其设计难点是移动方向的控制。典型车轮的配置方法是一个前轮和两个后轮，由前轮作为操纵舵来改变方向，后轮（或前轮）驱动；另一种配置方法是，用后面两轮独立驱动，前轮仅起支承作用，并靠两后轮的转速差来改变运动方向。图 2-2 所示为三轮式行走和转弯机构示意图，图 2-2a 所示为由一个驱动轮和转向机构来转弯，图 2-2b 所示为由两个驱动轮转速差来转弯。

四轮式行走机构也是一种应用较广的移动方式，其优点是承重量大、稳定性好，四个轮子要求同时着地。图 2-3 所示为四轮式行走和转弯机构示意图。图 2-3a、b 所示是两个驱动轮和两个自位轮的机构；图 2-3c 所示是和汽车类型相同的移动机构，为了转向，采用四连杆机构，回转中心大致在后轮车轴的延长线上；图 2-3d 所示可以独立地进行左右转向，因而可以提高回转精度；图 2-3e 所示为全部轮子都可以进行转向，能够减小转弯半径。

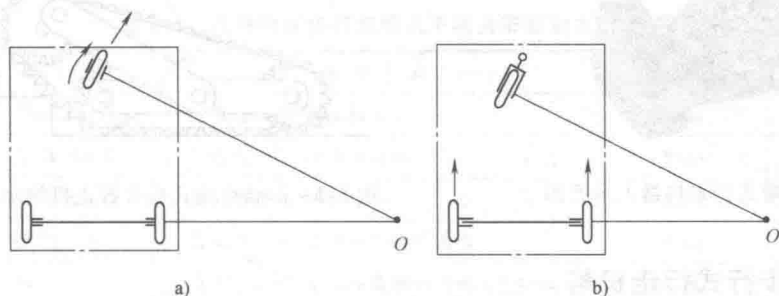


图 2-2 三轮式行走和转弯机构示意图

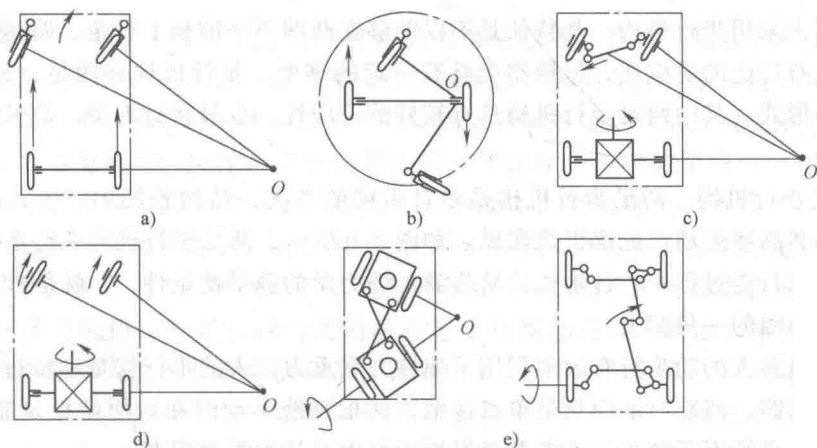


图 2-3 四轮式行走和转弯机构示意图

- a) 两个驱动轮和两个自位轮 b) 两个驱动轮和两个自位轮 c) 一个驱动系统和转向轮
d) 一个驱动系统和两个转向轮 e) 全部轮都装有转向机构

在四轮式行走机构中,自位轮沿回转轴线回转,直到转到转弯方向为止,这期间驱动轮产生滑动,因而很难求出正确的移动量。另外,在用转向机构改变运动方向时,缺点是在静止状态下会产生较大的阻力。

2.1.3 履带式行走机构

履带式行走机器人如图 2-4 所示。它不仅可以在凸凹不平的地面上行走,而且可以跨越障碍物,能爬一定的台阶等。

类似于坦克式的履带式机器人,由于没有自位轮,没有转向机构,要转弯只能靠左右两个履带的速度差,所以不仅在横向,而且在前进方向也会产生滑动,转弯阻力大,不能准确地确定回转半径等。

形状可变式履带行走机构如图 2-5 所示。该履带形状可以适应台阶形状而改变,比一般履带式机器人的动作更为灵活。

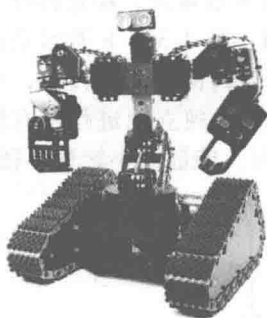


图 2-4 履带式行走机器人示意图

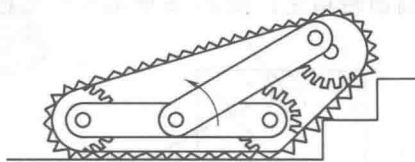


图 2-5 形状可变式履带行走机构示意图

2.1.4 步行式行走机构

类似于人或动物那样,利用脚部关节机构,用步行方式,实现移动的机械,称为步行机构。步行机器人采用步行机构,其特征是不仅能够在凸凹不平的地面上行走、跨越沟壑、上下台阶,而且具有广泛的适应性,但控制上具有一定的难度。步行机构有两足、三足、四足、六足和八足等形式,其中两足步行机构具有较好的适应性,也最接近人类,故又称为类人双足行走机构。

(1) 两足步行机构 两足步行机构是多自由度的系统,结构较简单,但其静、动行走性能及稳定性和高速运动性能都很难实现。如图 2-6 所示,两足步行机器人行走机构是一空间连杆机构。在行走过程中,行走机构始终满足静力学的静平衡条件,也就是机器人的重心始终落在支持地面的一只脚上。

两足步行机器人的动步行有效地利用了惯性力和重力。人的步行就是动步行,动步行的典型例子是踩高跷。高跷与地面只是单点接触,两根高跷不动时在地面站稳是非常困难的,要想原地停留,必须不断踏步,不能总是保持步行中的某种瞬间姿态。

从国内外研究的较为成熟的两足步行机器人来看,几乎所有的两足步行机器人腿部都选择 6 自由度的方式(见图 2-7),其分配方式为:髋关节 3 个自由度、膝关节 1 个自由度、