




高等院校应用型本科智能制造领域“十四五”规划教材

工业机器人基础

GONGYE JIQIREN JICHU

主 编 程涛 李媛媛 叶仁虎

 华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

高等院校应用型本科智能制造领域“十四五”规划教材

工业机器人基础

主 编 程 涛 李媛媛 叶仁虎
副主编 张玉平 陈明颖 路媛媛
潘玉荣

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书以工业机器人为研究对象,不仅系统介绍机器人学基本理论,还图文并茂地讲解工业机器人结构、传感器和应用等内容,部分章节附有习题。

全书共7章,分别为:绪论,工业机器人的结构、驱动及传动,工业机器人的运动学,工业机器人的力学特性,工业机器人传感器,工业机器人的轨迹规划与控制,工业机器人系统集成与典型应用。

本书可作为地方普通工科院校机械工程等机械类专业的教材,也适合作为广大自学者的自学用书及工程技术人员的培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人基础/程涛,李媛媛,叶仁虎主编. —武汉:华中科技大学出版社,2021.7
ISBN 978-7-5680-7262-5

I. ①工… II. ①程… ②李… ③叶… III. ①工业机器人-教材 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 124825 号

工业机器人基础
Gongye Jiqiren Jichu

程 涛 李媛媛 叶仁虎 主编

策划编辑:余伯仲

责任编辑:邓 薇

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)
武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913

邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12

字 数:312千字

版 次:2021年7月第1版第1次印刷

定 价:39.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

机器人是“中国制造 2025”重点推进的十大领域之一,是智能制造关键设备。为了推动制造业转型升级,各高校积极响应教育部的“新工科”建设,主要包括两个方面:一是办新工科专业“机器人工程”“智能制造工程”等;二是传统专业升级改造,在传统机械类专业中更加注重工业机器人课程,在专业课程教学内容中增加工业机器人的应用案例。“工业机器人”是机械类专业的必修专业课,其教材建设十分重要。

本书共分为 7 章:第 1 章绪论,介绍了机器人的起源、定义、发展历史,机器人的分类,技术指标等;第 2 章工业机器人的结构、驱动及传动,介绍了工业机器人的常见构型及其简图表达方法,机器人的驱动方式和传动机构,串联机器人和并联机器人的典型结构形式,机器人工具,机器人的行走机构,等等;第 3 章工业机器人的运动学,介绍了齐次坐标变换,运动学方程的建立,逆运动学问题的求解;第 4 章工业机器人的力学特性,介绍了机器人的雅可比矩阵、静力学特性等;第 5 章工业机器人传感器,介绍了光电编码器、视觉传感器、触觉传感器等传感器的相关知识;第 6 章工业机器人的轨迹规划与控制,介绍了机器人运动规划、运动控制、力控制等;第 7 章工业机器人系统集成与典型应用,介绍了焊接机器人、搬运机器人、工业机器人的离线编程、AGV(自动导引车)等。

本书由湖北工业大学工程技术学院程涛全面负责编写和统稿。具体编写分工如下:第 1 章由黑龙江东方学院李媛媛编写;第 2 章由武汉华夏理工学院叶仁虎和湖北工业大学工程技术学院程涛编写;第 3 章由黑龙江东方学院陈明颖和湖北工业大学工程技术学院路媛媛编写;第 4 章由湖北工业大学工程技术学院潘玉荣编写;第 5 章由武汉华夏理工学院张玉平编写;第 6 章由黑龙江东方学院李媛媛编写;第 7 章由湖北工业大学工程技术学院程涛编写。

本书在编写过程中参阅了业内许多专家学者的教材、资料和文献,在此谨致谢意。由于编者水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

编 者
2020 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 机器人的起源及定义	(1)
1.1.1 机器人的起源	(1)
1.1.2 机器人的定义	(1)
1.2 机器人的发展历程	(2)
1.3 机器人的分类	(3)
1.4 机器人系统的构成及技术参数	(6)
1.4.1 机器人系统的构成	(6)
1.4.2 机器人主要技术参数	(7)
1.5 本章小结	(11)
习题	(11)
第 2 章 工业机器人的结构、驱动及传动	(12)
2.1 工业机器人的结构形式	(12)
2.1.1 连杆与关节	(12)
2.1.2 机构简图	(13)
2.1.3 结构形式及特点	(15)
2.2 工业机器人驱动与传动部件	(18)
2.2.1 驱动方式与驱动器件	(18)
2.2.2 常见传动部件	(24)
2.3 串联机器人	(30)
2.3.1 垂直串联机器人	(30)
2.3.2 水平串联机器人	(36)
2.4 并联机器人	(37)
2.5 机器人末端执行器	(39)
2.5.1 夹持式取料手	(39)
2.5.2 吸附式取料手	(41)
2.5.3 专用工具	(43)
2.6 行走机构	(44)
2.6.1 轮式行走机构	(44)
2.6.2 履带式行走机构	(46)
2.6.3 足式行走机构	(47)
2.7 本章小结	(47)
习题	(48)
第 3 章 工业机器人的运动学	(49)
3.1 机器人的数学基础	(49)
3.1.1 直角坐标变换	(49)

3.1.2 齐次坐标变换	(52)
3.2 连杆的变换矩阵	(56)
3.2.1 机器人的位姿描述	(56)
3.2.2 连杆坐标系及 D-H 参数	(57)
3.2.3 连杆坐标系间的坐标变换	(58)
3.3 机器人正运动学方程的建立及求解	(59)
3.3.1 机器人正运动学方程的建立步骤	(59)
3.3.2 机器人正运动学方程的典型例题	(61)
3.4 机器人逆运动学的求解	(63)
3.4.1 逆运动学求解的问题	(63)
3.4.2 逆运动学典型例题	(67)
3.5 本章小结	(69)
习题	(69)
第 4 章 工业机器人的力学特性	(71)
4.1 机器人的雅可比矩阵	(71)
4.1.1 微分运动	(71)
4.1.2 雅可比矩阵的定义	(73)
4.1.3 关节速度的传递	(75)
4.2 机器人的静力学特性	(77)
4.2.1 静力的传递	(77)
4.2.2 机器人力雅可比矩阵	(78)
4.2.3 关节力矩的计算	(79)
4.3 机器人动力学方程	(80)
4.3.1 拉格朗日方程	(80)
4.3.2 机器人动力学方程的建立步骤	(80)
4.3.3 二连杆机器人动力学方程	(80)
4.4 本章小结	(83)
习题	(83)
第 5 章 工业机器人传感器	(85)
5.1 机器人的传感与感知	(85)
5.1.1 机器人传感器的定义和组成	(85)
5.1.2 机器人传感器的分类	(85)
5.1.3 传感器的性能指标	(87)
5.1.4 传感器的发展动向	(89)
5.2 内部传感器	(90)
5.2.1 位置(位移)传感器	(90)
5.2.2 速度和加速度传感器	(95)
5.2.3 姿态传感器	(97)
5.3 外部传感器	(100)
5.3.1 触觉传感器	(100)
5.3.2 工业机器人的听觉	(114)

5.3.3	工业机器人的嗅觉	(115)
5.3.4	工业机器人的味觉	(116)
5.4	工业机器人视觉系统	(117)
5.4.1	视觉系统的组成	(118)
5.4.2	机器人视觉技术的应用	(119)
5.5	传感器融合	(122)
5.6	本章小结	(124)
	习题	(124)
第6章	工业机器人的轨迹规划与控制	(126)
6.1	轨迹规划	(126)
6.1.1	轨迹规划的概念及目标	(126)
6.1.2	关节轨迹的插值计算	(127)
6.1.3	笛卡儿轨迹规划	(133)
6.1.4	规划轨迹的实时生成	(138)
6.2	运动控制	(140)
6.2.1	关节空间与操作空间控制	(140)
6.2.2	单关节的控制	(141)
6.2.3	PID控制	(146)
6.3	力控制	(147)
6.3.1	柔顺运动与柔顺控制	(148)
6.3.2	主动阻力控制	(151)
6.3.3	力和位置混合控制	(154)
6.4	本章小结	(156)
	习题	(156)
第7章	工业机器人系统集成与典型应用	(158)
7.1	焊接机器人	(158)
7.1.1	点焊机器人集成工作站	(158)
7.1.2	弧焊机器人集成工作站	(163)
7.2	搬运机器人	(167)
7.2.1	搬运机器人的结构与分类	(167)
7.2.2	搬运机器人集成工作站的系统组成	(169)
7.2.3	搬运机器人应用实例	(172)
7.3	工业机器人的离线编程	(172)
7.3.1	离线编程的优点	(172)
7.3.2	离线编程系统的要求及组成	(173)
7.3.3	工业机器人离线编程软件介绍	(174)
7.4	工业AGV	(177)
7.4.1	AGV的结构组成	(177)
7.4.2	AGV的导引方式	(180)
	参考文献	(183)

第 1 章 绪 论

工业机器人是智能制造系统的关键设备,机器人技术是在机械、电子、计算机控制、人工智能等技术基础上发展起来的一门先进技术,涉及机械工程、电气工程、控制工程等学科领域。

1.1 机器人的起源及定义

1.1.1 机器人的起源

创造出一种像人一样的机器,替代人完成繁重、枯燥、危险、困难的工作,一直是人类的梦想。

从久远的传说和文献中能够发现机器人的影子。在我国,西周时期(公元前 1066—前 771 年),流传着巧匠偃师献给周穆王一个自制艺伎(歌舞机器人)的故事;东汉时期(公元 25—220 年),张衡发明的司南车能够自动指向。在国外,公元前 3 世纪,古希腊发明家代达罗斯用青铜为克里特岛国王迈诺斯塑造了一个守卫塞岛的青铜卫士塔罗斯;公元前 2 世纪的一本书中描写过一个机械化剧院,类似机器人的角色在宫廷仪式上进行舞蹈和列队表演;传说古希腊人赫伦设计制作了由各种铅锤、滑轮、车轮等构成的自动人偶,可出色地完成表演。

近代之后,人类发明的各种机械工具和动力机器,协助、代替人类从事各种体力劳动,为人类开发机器人这一梦想装上了翅膀。各种自动机器、动力机和动力系统的问世,使机器人开始由幻想时期转入自动机械时期,许多机械式控制的机器人应运而生。比如,1768—1774 年间,瑞士钟表名匠德罗斯父子三人,设计制造出 3 个像真人一样大小的机器人——写字偶人、绘图偶人和弹风琴偶人。

20 世纪初期,越来越多的科幻作品中设想了机器人应用场景。但是,随着科技的发展,机器人也越来越接近现实,机器人与人类社会如何共处却让人们不安起来。美国著名科学幻想小说家阿西莫夫于 1942 年在他的小说《我,机器人》中,提出了“机器人三定律”:

- (1) 机器人必须不危害人类,也不允许它眼看人类受害而袖手旁观;
- (2) 机器人必须绝对服从于人类,除非这种服从有害于人类;
- (3) 机器人必须保护自身不受伤害,除非为了保护人类或者是人类命令它做出牺牲。

“机器人三定律”,设想了人类给予机器人的限制,使机器人概念通俗化,更易为人类社会所接受。这三条定律也是机器人研究人员、设计制造厂家和用户研发运用机器人的准则。

1920 年,捷克斯洛伐克剧作家卡雷尔·卡佩克在科幻情节剧《罗萨姆的万能机器人》中,描述了一个与人类相似,不知疲倦地一直工作的机器奴仆——Robot(捷克斯洛伐克语。英语为 Robot,汉语译为机器人)。这也是机器人这一名称的来源。

1.1.2 机器人的定义

机器人技术不断发展,产品越来越多样,不同国家的学术群体给“机器人”这一名词的定

义尚未统一,本书列举国际上几个目前广为接受的定义。

(1) 英国简明牛津字典的定义。机器人是“貌似人的自动机,具有智力的和顺从于人的但不具人格的机器”。

(2) 美国机器人工业协会(RIA)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(manipulator)”。

(3) 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”。

(4) 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”。

(5) 《中国大百科全书》的定义。工业机器人是“能灵活地完成特定的操作和运动任务,并可再编程序的多功能操作器”。另外,《中国大百科全书》对机械手的定义为:一种模拟人手操作的自动机械,它可按固定程序抓取、搬运物件或操持工具完成某些特定操作。

上述各种定义有共同之处,即认为机器人:① 像人或人的上肢,并能模仿人的动作;② 具有智力或感觉与识别能力;③ 是人造的机器或机械电子装置。

1.2 机器人的发展历程

1954年,美国人乔治·德沃尔制造了世界上第一台可编程的机械手,并于1961年发表了该项机器人专利。

1962年,美国万能自动化(Unimation)公司的第一台机器人 Unimate 在美国通用汽车公司(GM)投入使用,这标志着第一代机器人的诞生。万能自动化公司的英格伯格对工业机器人的研发和宣传使他被称为“工业机器人之父”。

1962年,美国 AMF 生产的“万能搬运”(Verstran)机器人也正式商业化运营,并出口到世界各国。

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 Verstran 的生产许可证,日本也开始了机器人的研究和制造。

1968年,美国斯坦福国际咨询研究所(SRI)研制了移动式智能机器人夏凯(Shakey)和辛辛那提·米拉克龙(Cincinnati Milacron)。

1969年,日本早稻田大学加藤一郎实验室研发出双足步行的机器人。日本专家在仿人步行机器人方面开展了较多的研究,后来本田公司的 ASIMO 机器人、P2 机器人和索尼公司的 QRIO 机器人都是卓越的研究成果。

1979年,美国 Unimation 公司推出通用工业机器人 PUMA(programmable universal machine for assembly),这标志着工业机器人技术已经成熟。许多学者和教科书都很重视 PUMA 机器人模型。

1979年,日本山梨大学牧野洋发明了平面多关节型机器人 SCARA(selective compliance assembly robot arm),这种机器人在电子产品装配作业中得到广泛应用。

1984年,英格伯格再次推出机器人 Helpmate,这种机器人能在医院里为病人送饭、送药、送邮件。

1999年,日本索尼公司推出机器人狗爱宝(Aibo),当即销售一空,从此娱乐机器人进入普通家庭。

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

2009年,丹麦优傲机器人公司推出的轻量化 UR5 系列工业机器人,具有轻便灵活、易编程、无须安全围栏、可与人协作等特点,是一款六轴串联的新型机器人产品。

我国对工业机器人的研究起步较晚。20世纪80年代,我国在“七五”计划中把机器人列入国家重点科研规划内容,在国家863计划的支持下,开展了机器人基础理论与基础元器件的研究。1986年,我国在沈阳建立了第一个机器人研究示范工程。目前,我国已基本掌握了工业机器人的设计与制造技术、控制系统硬件和软件设计技术、运动学理论、轨迹规划技术等。但是,我国的工业机器人产业的整体水平与世界先进水平还有一定的差距,关键核心技术还需充实,高性能交流伺服电机、精密减速器、控制器等关键核心器件仍然被进口产品占据了较大市场。国际工业机器人领域的“四大家族”——德国 KUKA、瑞士 ABB、日本 FANUC、日本 Yaskawa,占据着我国市场的60%~70%份额。

在中央领导人的关怀及国家相关政策的支持下,自主品牌机器人的发展已经上升至国家战略层面。“十四五”规划明确提出:深入实施制造强国战略、推动制造业优化升级,深入实施智能制造和绿色制造工程,推动制造业高端化智能化绿色化,培育先进制造业集群,推动机器人等产业创新发展。中国机器人产业借助中国制造的转型升级,迎来爆发式增长,诞生了广州数控、广东拓斯达、上海新时达、沈阳新松、安徽埃夫特等一批国产工业机器人品牌企业,武汉也有华中数控、奋进智能机器人等工业机器人企业。

1.3 机器人的分类

机器人的分类方法很多,从不同的角度理解机器人,就有不同的分类方法。一般是按特征、性能等来分类。

1. 按机器人的发展程度分类

机器人在发展过程中,随着机械结构、控制系统和信息技术的发展经历了从低级到高级的发展过程。工业机器人作为机器人的一种形式,可按照从低级到高级的发展程度进行分类。

1) 示教再现型机器人

示教再现工业机器人也是第一代机器人,已进入商品化、实用化。所谓示教,即由人指导机器人运动的轨迹、停留点位、停留时间等。然后,机器人依照教给它的行为、动作顺序和速度重复运动,即所谓的再现。示教可由操作员手把手地进行。例如,操作人员抓住机器人上的喷枪把喷涂时要走的位置走一遍,机器人记住了这一连串运动,然后在机器人工作时便自动重复这些运动,从而完成给定的喷涂工作。这种方式是手把手示教。但是,现在使用比较普遍的示教方式是通过控制面板完成的,即操作人员利用控制面板上的开关或键盘控制机器人一步一步地运动,机器人自动记录下每一步,然后重复。

2) 感知型机器人

感知型机器人是第二代机器人,指装配有一定的传感装置,能获取作业环境、操作对象的简单信息,通过计算机处理、分析,能作出简单的推理,对动作进行反馈的机器人,通常称为低

级智能机器人。

这样的技术正越来越多地被应用,例如焊缝跟踪技术。在机器人焊接的过程中,一般通过编程或示教方式先给出机器人的运动曲线,然后机器人携带焊枪按照这个曲线进行焊接。这就要求工件的一致性要好,也就是说工件被焊接的位置必须十分准确,否则,机器人行走的曲线和工件上的实际焊缝位置将产生偏差。在实际生产过程中,由于受热或其他原因,被焊工件易发生变形,因此,跟踪所要焊的焊缝是十分重要的。焊缝跟踪技术通过机器人上传感器感知焊缝位置,再通过反馈控制,机器人自动跟踪焊缝,从而对示教或编程的位置进行修正。即使实际焊缝相对于原始设定的位置有变化,机器人仍然可以很好地完成焊接工作。

3) 智能机器人

智能机器人是第三代机器人,具有高度适应性。它具有多种感知功能,可进行复杂的逻辑思维、判断决策,在作业环境中独立行动。

智能机器人至少要具备以下3个要素:一是感觉要素,用来认识周围的环境状态;二是运动要素,对外界做出反应性动作;三是思考要素,根据感觉要素所得到的信息,思考采用什么样的动作。

感觉要素包括能感知视觉和距离等信息的非接触型传感器,以及能感知力、压觉、触觉等的接触型传感器。这些要素实质上相当于人的眼、鼻、耳等器官,可以利用诸如摄像机、图像传感器、超声波传感器、激光器、导电橡胶、压电元件、气动元件、行程开关和光电传感器等机电元器件来实现其功能。

对于运动要素,智能机器人需要有一个无轨道型的移动机构,以适应诸如平地、台阶、墙壁、楼梯和坡道等不同的地理环境。可以借助轮子、履带、支脚、吸盘、气垫等移动机构来完成其功能。在运动过程中要对移动机构进行实时控制,这种控制不仅要有位置控制,而且还要有力的控制、位置与力的混合控制、伸缩率控制等。

智能机器人的思考要素是3个要素中的关键要素,也是人们要赋予智能机器人必备的要素。思考要素包括判断、逻辑分析、理解和决策等方面的智力活动。这些智力活动实质上是一个信息处理过程,而计算机则是完成这个处理过程的主要手段。

智能机器人具有高度的适应性和自治能力,这也是人们努力使机器人不断完善的目标。经过科学家多年来不懈的研究,已经出现了很多各具特点的智能机器人。但是,在已应用的智能机器人中,机器人的自适应技术仍十分有限,该技术是机器人今后发展的方向。

4) 仿生机器人

仿生机器人是第四代机器人,它具有高级生命形态和特征,可以在未知的非结构化环境下自主高效完成复杂任务,甚至能够识别情感、具备人的情感。具有人类的感知和情感是机器人发展的较高层次,也是科幻作品和科学家的一种设想。

2. 按负载能力和工作空间分类

工业机器人的负载能力和工作空间(也称作业范围、作业空间、工作范围)是其重要的指标之一。机器人按照负载能力和工作空间可分为5类。

1) 超大型机器人

超大型机器人(见图1-1)的负载能力为500 kg以上,最大工作范围可达3.2 m以上,大多为搬运机器人及码垛机器人。

2) 大型机器人

大型机器人(见图 1-2)的负载能力为 100~500 kg,最大工作范围为 2.6 m 左右,主要包括点焊机器人及搬运、码垛机器人。



图 1-1 KUKA KR 1000 titan 重载机器人(负载 1000 kg)



图 1-2 FANUC R-2000iB/170CF 机器人
(负载 170 kg)

3) 中型机器人

中型机器人(见图 1-3)的负载能力为 10~100 kg,最大工作范围为 2 m 左右,主要包括点焊机器人、浇铸机器人和搬运机器人。

4) 小型机器人

小型机器人(见图 1-4)的负载能力为 1~10 kg,最大工作范围为 1.6 m 左右,主要包括弧焊机器人、点胶机器人和装配机器人。



图 1-3 FANUC M-710iC/50H 机器人
(负载 50 kg)



图 1-4 FANUC LR Mate 200iD 机器人
(负载 7 kg)

5) 超小型机器人

超小型机器人的负载能力为 1 kg 以下,最大工作范围为 1 m 左右,包括洁净环境机器人、装配机器人和精密操作机器人。

3. 按机器人关节连接布置形式分类

按机器人关节的连接布置形式,机器人可分成串联机器人和并联机器人。

串联机器人的臂部是通过连杆和关节的串联实现的,属于开链式结构。

并联机器人分成定平台和动平台,定平台是基座,动平台上安装机器人手部和工具;定平

台和动平台之间至少由两根活动连杆连接,而这些连杆之间属于并联关系。并联机器人属于闭链式结构。

4. 按机器人的用途分类

1) 产业用机器人

按照服务产业的不同,产业用机器人又可分为工业机器人、农业机器人、林业机器人、医疗机器人等。本书主要涉及工业机器人的理论和应用,但其他产业用机器人也可以运用工业机器人的相关技术。

2) 特种用途机器人

特种用途机器人是指替代人类从事高危环境和在特殊工况下工作的机器人,主要包括军事应用机器人、水下机器人、消防机器人等。

3) 服务型机器人

服务型机器人是用于生活场景的机器人,包括娱乐机器人、教育机器人、安保机器人、扫地机器人等。

1.4 机器人系统的构成及技术参数

1.4.1 机器人系统的构成

1886年法国作家维里耶德利尔·亚当在他的小说《未来的夏娃》中将外表像人的机器起名为“安德罗丁”(Android),它由以下四部分组成:

- (1) 生命系统。具有平衡、步行、发声、摆动身体、感觉、表情呈现、调节运动等功能。
- (2) 造型解质。关节能自由运动的金属覆盖体,一种盔甲。
- (3) 人造肌肉。在上述盔甲上有肌肉、静脉、性别特征等人体的基本形态。
- (4) 人造皮肤。包括肤色、肌理、轮廓、头发、视觉、牙齿、手爪等。

机器人的工作原理是一个比较复杂的问题。简单地说,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。通常所说的工业机器人(操作机),实质上是一个拟人手臂的空间机构。不同类型的机器人,其机械、电气和控制结构千差万别,但是作为一个机器人系统,通常由三部分六个子系统组成,如图1-5所示。这三部分是机械部分、传感部分、控制部分;六个子系统是驱动系统、机械系统、感知系统、人机交互系统、机器人-环境交互系统、控制系统等。

1. 机械系统

机械系统是由关节连在一起的许多机械连杆组成的集合体,形成开环运动学链系。连杆类似于人类的小臂、大臂等。关节通常又分为转动关节和移动关节,移动关节允许连杆作直线移动,转动关节仅允许连杆之间发生旋转运动。由关节-连杆结构所构成的机械结构一般有3个主要部件,即臂、腕和手,它们可在规定的范围内运动。

2. 驱动系统

驱动系统是使各种机械部件产生运动的装置。常规的驱动系统有气压、液压或电气驱动系统,它们可以直接与臂、腕或手上的机械连杆或关节连接在一起,也可以使用齿轮、带、链条等机械传动机构间接驱动。

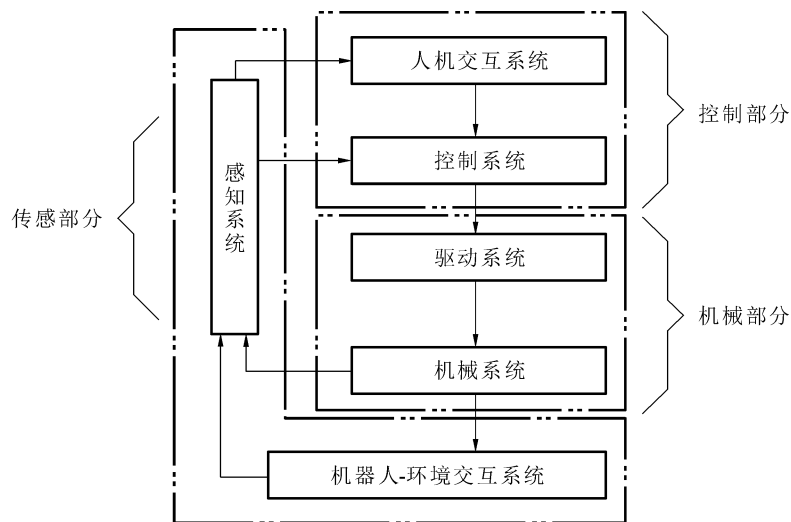


图 1-5 机器人的基本构成

3. 感知系统

感知系统由一个或多个传感器组成,用来获取内部和外部环境中的有用信息,通过这些信息确定机械部件各部分的运行轨迹、速度、位置和外部环境状态,使机械部件的各部分按预定程序或者工作需要进行动作。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。

4. 控制系统

控制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支配机器人的执行机构去完成规定的运动和功能。若机器人不具备信息反馈特征,则为开环控制系统;若机器人具备信息反馈特征,则为闭环控制系统。根据控制原理,控制系统又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,控制系统还可分为方位控制系统和轨迹控制系统等。

5. 机器人-环境交互系统

机器人-环境交互系统是实现工业机器人与外部环境中的设备相互联系和协调的系统。工业机器人可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、多台机床或设备及多个零件存储装置等集成为一个执行复杂任务的功能单元。

6. 人机交互系统

人机交互系统是使操作人员参与机器人控制并与机器人进行联系的装置,例如计算机的标准终端、指令控制台、信息显示板及危险信号报警器等。归纳起来,人机交互系统可分为两大类:指令给定装置和信息显示装置。

1.4.2 机器人主要技术参数

不同应用场景的机器人,其技术参数也不同。一般来说,机器人的技术参数主要包括自由度、工作范围、工作速度、定位精度与重复定位精度、承载能力等。

1. 自由度

自由度(degree of freedom, DOF)是指机器人本体所具有的独立的坐标轴运动的数目,需要注意的是末端操作器的运动不属于机器人本体的自由度。串联机器人的一个自由度对应一个关节,所以自由度数量就是关节数量。自由度越多,机器人就越灵活,但机器人需要控制的关节数越多,控制也就越复杂。所以选择多少个自由度需要根据机器人用途来确定,比如码垛机器人对手部姿态要求简单,一般是4~5个自由度,而喷涂机器人喷枪要跟随着喷涂对象表面弧度变化,一般是6个自由度。

大于6个自由度称为冗余自由度。具有冗余自由度的机器人灵活性更大,有利于机器人躲避障碍物和改善机器人的动力性能。例如,人类的手臂包括肩关节、大臂、肘关节、小臂、腕关节,共有7个自由度,所以十分灵巧。

2. 工作空间

机器人本体的工作空间指的是手腕末端法兰盘中心点所能到达的所有点的集合,末端工具的形状、尺寸是多种多样的,所以机器人本体厂商一般仅给出机器人本体的工作空间。图1-6所示为MOTOMAN SV3X机器人的工作空间。

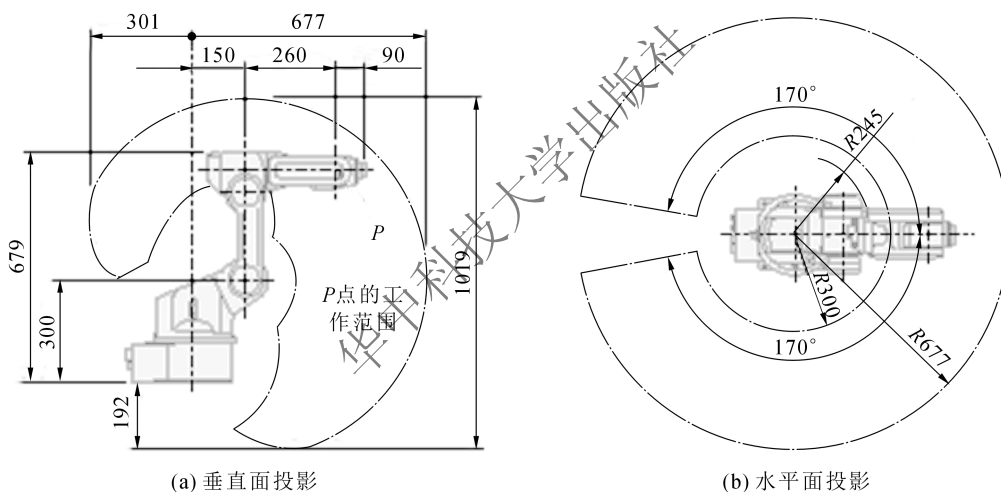


图 1-6 MOTOMAN SV3X 机器人的工作空间

工作空间的形状和大小与机器人总体结构形状、机器人各个连杆长度、各个关节的角度范围有关。关节式机器人的工作空间近似一个球。因为关节转动副受结构限制,一般不能整圈转动,所以实际上机器人不能获得整个球体,如图1-7所示。

被工作空间包围的不能到达的点,一般称为作业死区,若执行任务时目标点处于作业死区,机器人将不能完成任务。工作空间分为灵活工作空间和非灵活工作空间。在工作空间内的点,机器人末端能够以任意姿态指向该点,则称这些点构成的工作空间为灵活工作空间;在工作空间内的有些点,机器人不能以任意姿态到达,这些点构成的是非灵活工作空间。下面通过一个简单例子说明。

【例 1.1】 三自由度平面关节机器人如图1-8所示。设机器人杆件1、2、3的长度分别为 l_1 、 l_2 、 h ,假定 $l_1 > l_2 + h$,且 $l_2 > h$ 。试分析其工作空间特点。

解 2、3关节的角度分别处于 0° 、 180° ,可组成四种情况。若关节1旋转,四种不同半径得到四个不同的圆。圆 C_1 ,半径 $R_1 = l_1 + l_2 + h$;圆 C_2 ,半径 $R_2 = l_1 + l_2 - h$;圆 C_3 ,半径 $R_3 =$

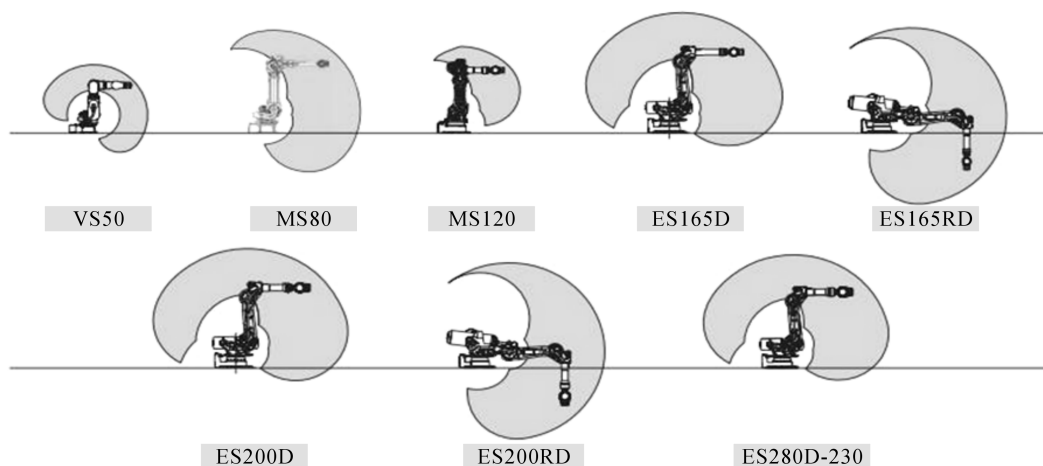


图 1-7 不同结构尺寸的机器人的工作空间示意图

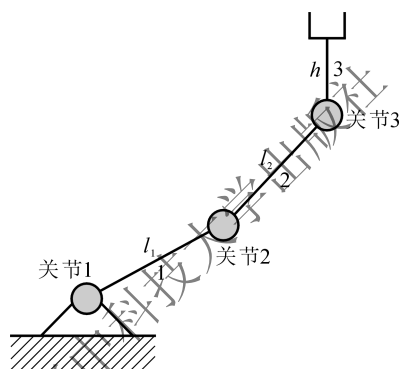


图 1-8 三自由度平面关节机器人示意图

$l_1 - l_2 + h$; 圆 C_4 , 半径 $R_4 = l_1 - (l_2 + h)$ 。

- (1) 圆 C_1 和圆 C_4 所围成的环形区域为总工作空间。
- (2) 圆 C_2 和圆 C_3 围成的区域在平面内可认为是灵活工作空间。
- (3) 末杆 h 越长, C_1 越大, C_4 越小, 工作空间越大, 但相应的灵活工作空间则由于 C_2 的增大和 C_3 的减小而越小。
- (4) 工作空间受关节的转角限制, 也跟每段杆的长度有关。

3. 最大工作速度

最大工作速度指的是在各轴联动情况下, 机器人手腕中心所能达到的最大线速度。这在生产中是影响生产效率的重要指标。机器人手腕中心的运动速度与各个关节转速有关。

机器人编程时根据工作需要设定工作速度。首先考虑生产节拍(即机器人完成工作内容所需时间), 确定各动作的运动速度; 然后还要考虑工艺动作要求、惯性和行程大小、定位和精度要求等。

机器人使用说明书中一般提供了主要运动自由度的最大稳定速度, 但在实际应用中仅考虑最大稳定速度是不够的。这是因为运动循环包括加速度启动、等速运行和减速制动三个过程。如果最大稳定速度高, 允许的极限加速度小, 则加、减速的时间就会长一些, 即有效速度就要低一些; 反之, 如果最大稳定速度低, 允许的极限加速度大, 则加、减速的时间就会短一

些,这有利于有效速度的提高。但是,如果加速或减速过快,则有可能引起定位超调或振荡加剧,从而使得到达目标位置后需要等待振荡衰减的时间增加,也可能使有效速度反而降低。而且,过大的加、减速度会导致惯性力加大,影响动作的平稳和精度。所以,在考虑机器人运动特性时,除了要注意最大稳定速度外,还应注意其最大允许的加、减速度。

4. 定位精度与重复定位精度

定位精度指的是实际位置与目标位置的差异,描述定位的正确性。

重复定位精度描述重复定位于同一目标的能力,是一个统计值的平均值。机器人不可能每次都能准确到达同一点,但应该在以该点为圆心的一个圆形范围内。该圆的半径是由一系列重复动作确定的,这个半径值即重复定位精度。

两者的区别如图 1-9 所示。

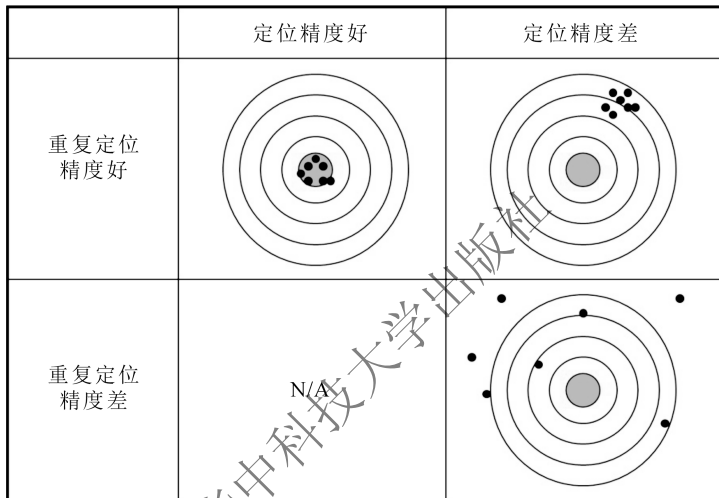


图 1-9 定位精度与重复定位精度的好与差


重复定位精度比定位精度更为重要,这个误差是可以预测的,可以通过编程予以校正。机器人的精度一般用定位精度和重复定位精度来度量。工业机器人具有定位精度低、重复定位精度高的特点。例如 ABB IRB140:定位精度为 ± 0.2 mm,重复定位精度为 ± 0.05 mm。

5. 承载能力

承载能力指机器人在作业空间内的任何位置上以任意姿态能承受的最大质量。承载能力需要保证在承载质量后,机器人具有速度和加速度的前提下精度不降低。在考察机器人的承载能力时,不仅要考虑承载产品的质量,也要考虑包含末端执行器的质量。

MOTOMAN SV3 工业机器人的技术参数如表 1-1 所示。

表 1-1 MOTOMAN SV3 工业机器人的技术参数

	机械结构	垂直多关节型
	自由度	6
	载荷质量	3 kg
	重复定位精度	± 0.03 mm
	本体质量	30 kg