



上海出版资金项目
Shanghai Publishing Funds



创新应用型数字交互规划教材
机械工程

INDUSTRIAL
ROBOTIC TECHNOLOGY

工业机器人技术

荆学东·主编



上海科学技术出版社

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位



上海出版基金项目
Shanghai Publishing Funds



创新应用型数字交互规划教材
机械工程

工业机器人技术

荆学东·主编



上海科学技术出版社

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

内 容 提 要

本书是面向工业机器人技术现场应用的教材,包括机器人技术基础知识和工业机器人技术应用两部分。基础知识包括第1~5章,内容涉及机器人的运动学、动力学、控制技术,以及机器人末端执行器设计,构成相对完整的工业机器人技术知识体系,是研究和应用机器人技术解决实际问题的基础。应用部分包括第6~10章,主要在工业机器人应用所涉及的关键技术基础上,突出应用工业机器人技术解决工程实际问题的方法。本书邀请长期从事工业机器人应用开发的企业技术人员参与工程案例的撰写,指导学生应用总线技术以及PLC技术,将机器人与生产系统相集成,从而完成既定目标。教材力争做到入门内容浅显易懂,利用实例和实验将与工业机器人相关的知识点有机串联起来。本书依托增强现实(AR)技术,将视频等数字资源与纸质教材交互,为读者带来更丰富有效的阅读体验。本书还在出版社网站(www.sstp.cn)“课件/配套资源”栏目提供免费电子教学资源,供读者参考。

本书可作为高等院校机器人技术相关专业本科生和研究生教材,也可为学习和掌握工业机器人技术及应用的工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人技术 / 荆学东主编. —上海:上海科学技术出版社,2018.7

创新应用型数字交互规划教材. 机械工程

ISBN 978-7-5478-3892-1

I. ①工… II. ①荆… III. ①工业机器人—教材
IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 007821 号

工业机器人技术

荆学东 主编

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码200235 www.sstp.cn)

常熟市兴达印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 16.25

字数: 390千字

2018年7月第1版 2018年7月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-3892-1/TH·74

定价: 59.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

编审委员会

主任 李郝林 陈关龙

副主任 钱 炜

委员 (以姓氏笔画为序)

王小静 李峥嵘 张慧敏 陈 浩

陈军华 徐 洋 惠 虎

顾问 曹自强

编写委员会

(以姓氏笔画为序)

丁晓红 马淑梅 王岩松 朱文峰

任 彬 李 晏 李郝林 李蓓智

吴 清 张东民 张而耕 孟 焯

荆学东 黄迪山

支持单位

(按首字拼音排序)

德玛吉森精机公司

东华大学

ETA(Engineering Technology Associates, Inc.)中国分公司

华东理工大学

库卡机器人(上海)有限公司

雷尼绍(上海)贸易有限公司

青岛海尔模具有限公司

瑞士奇石乐(中国)有限公司

上海大学

上海电气集团上海锅炉厂有限公司

上海电气集团上海机床厂有限公司

上海高罗输送装备有限公司技术中心

上海工程技术大学

上海理工大学

上海麦迅惯性航仪技术有限公司

上海麦迅机床工具技术有限公司

上海师范大学

上海应用技术大学

上海紫江集团

上汽大众汽车有限公司

同济大学

西门子工业软件(上海)研发中心

浙江大学

中国航天科技集团公司上海航天设备制造总厂

丛书序

在“中国制造 2025”国家战略指引下,在“深化教育领域综合改革,加快现代职业教育体系建设,深化产教融合、校企合作,培养高素质劳动者和技能型人才”的形势下,我国高教人才培养领域也正在经历又一重大改革,制造强国建设对工程科技人才培养提出了新的要求,需要更多的高素质应用型人才,同时随着人才培养与互联网技术的深度融合,尽早推出适合创新应用型人才模式的出版项目势在必行。

教科书是人才培养过程中受教育者获得系统知识、进行学习的主要材料和载体,教材在提高人才培养质量中起着基础性作用。目前市场上专业知识领域的教材建设,普遍存在建设主体是高校,而缺乏企业参与编写的问题,致使专业教学教材内容陈旧,无法反映行业技术的新发展。本套教材的出版是深化教学改革,践行产教融合、校企合作的一次尝试,尤其是吸收了较多长期活跃在教学和企业技术一线的专业技术人员参与教材编写,有助于改善在传统机械工程向智能制造转变的过程中,“机械工程”这一专业传统教科书中内容陈旧、无法适应技术和行业发展需要的问题。

另外,传统教科书形式单一,一般形式为纸媒或者是纸媒配光盘的形式。互联网技术的发展,为教材的数字化资源建设提供了新手段。本丛书利用增强现实(AR)技术,将诸如智能制造虚拟场景、实验实训操作视频、机械工程材料性能及智能机器人技术演示动画、国内外名企案例展示等在传统媒体形态中无法或很少涉及的数字资源,与纸质产品交互,为读者带来更丰富有效的体验,不失为一种增强教学效果、提高人才培养的有效途径。

本套教材是在上海市机械专业教学指导委员会和上海市机械工程学会先进制造技术专业委员会的牵头、指导下,立足国内相关领域产学研发展的整体情况,来自上海交通大学、上海理工大学、同济大学、上海大学、上海应用技术大学、上海工程技术大学等近 10 所院校制造业学科的专家学者,以及来自江浙沪制造业名企及部分国际制造业名企的专家和工程师等一并参与的内容创作。本套创新教材的推出,是智能制造专业人才培养的融合出版创新探索,一方面体现和保持了人才培养的创新性,促使受教育者学会思考、与社会融为一体;另一方面也凸显了新闻出版、文化发展对于人才培养的价值和必要性。

中国工程院院士

丛书前言

进入 21 世纪以来,在全球新一轮科技革命和产业变革中,世界各国纷纷将发展制造业作为抢占未来竞争制高点的重要战略,把人才作为实施制造业发展战略的重要支撑,改革创新教育与培训体系。我国深入实施人才强国战略,并加快从教育大国向教育强国、从人力资源大国向人力资源强国迈进。

《中国制造 2025》是国务院于 2015 年部署的全面推进实施制造强国战略文件,实现“中国制造 2025”的宏伟目标是一个复杂的系统工程,但是最重要的是创新型人才培养。当前随着先进制造业的迅猛发展,迫切需要一大批具有坚实基础理论和专业技能的制造业高素质人才,这些都对现代工程教育提出了新的要求。经济发展方式转变、产业结构转型升级急需应用技术类创新型、复合型人才。借鉴国外尤其是德国等制造业发达国家人才培养模式,校企合作人才培养成为学校培养高素质高技能人才的一种有效途径,同时借助于互联网技术,尽早推出适合创新应用型人才模式的出版项目势在必行。

为此,在充分调研的基础上,根据机械工程的专业和行业特点,在上海市机械专业教学指导委员会和上海市机械工程学会先进制造技术专业委员会的牵头、指导下,上海科学技术出版社组织成立教材编审委员会和编写委员会,联络国内本科院校及一些国内外大型名企等支持单位,搭建校企交流平台,启动了“创新应用型数字交互规划教材 | 机械工程”的组织编写工作。本套教材编写特色如下:

1. 创新模式、多维教学。教材依托增强现实(AR)技术,尽可能多地融入数字资源内容(如动画、视频、模型等),突破传统教材模式,创新内容和形式,帮助学生提高学习兴趣,突出教学交互效果,促进学习方式的变革,进行智能制造领域的融合出版创新探索。

2. 行业融合、校企合作。与传统教材主要由任课教师编写不同,本套教材突破性地引入企业参与编写,校企联合,突出应用实践特色,旨在推进高校与行业企业联合培养人才模式改革,创新教学模式,以期达到与应用型人才培养目标的高度契合。

3. 教师、专家共同参与。主要参与创作人员是活跃在教学和企业技术一线的人员,并充分吸取专家意见,突出专业特色和应用特色。在内容编写上实行主编负责下的民主集中制,按照应用型人才培养的具体要求确定教材内容和形式,促进教材与人才培养目标和质量的接轨。

4. 优化实践环节。本套教材以上海地区院校为主,并立足江浙沪地区产业发展的整体情况。参与企业整体发展情况在全国行业中处于技术水平比较领先的位置。增加、植入这些企业中当下的生产工艺、操作流程、技术方案等,可以确保教材在内容上具有技术先进、工艺领

先、案例新颖的特色,将在同类教材中起到一定的引领作用。

5. 与国际工程教育认证接轨。增设与国际工程教育认证接轨的“学习成果达成要求”,即本套教材在每章开始,明确说明本章教学内容对学生应达成的能力要求。

本套教材“创新、数字交互、应用、规划”的特色,对避免培养目标脱离实际的现象将起到较好作用。

丛书编委会先后于上海交通大学、上海理工大学召开5次研讨会,分别开展了选题论证、选题启动、大纲审定、统稿定稿、出版统筹等工作。目前确定先行出版10种专业基础课程教材,具体包括《机械工程测试技术基础》《机械装备结构设计》《机械制造技术基础》《互换性与技术测量》《机械CAD/CAM》《工业机器人技术》《机械工程材料》《机械动力学》《液压与气动技术》《机电传动与控制》。教材编审委员会主要由参加编写的高校教学负责人、教学指导委员会专家和行业学会专家组成,亦吸收了多家国际名企如瑞士奇石乐(中国)有限公司和江浙沪地区大型企业的参与。

本丛书项目拟于2017年12月底前完成全部纸质教材与数字交互的融合出版。该套教材在内容和形式上进行了创新性的尝试,希望高校师生和广大读者不吝指正。

上海市机械专业教学指导委员会

前 言

工业机器人的应用,就是要解决机器人与外围设备以及生产系统相集成的问题。为了帮助读者了解和初步掌握这一过程,本书包括工业机器人基础知识和工业机器人应用两部分内容。

第1章主要介绍工业机器人的组成、技术指标以及应用工业机器人解决工程实际问题所面临的基本任务。第2~5章属于机器人基础知识部分,其相关内容是研究机器人技术和应用工业机器人解决工程问题的基础。学习这些内容要求具备高等数学、线性代数、理论力学、材料力学、机械原理、机械设计等课程的基础知识。

如何控制机器人末端执行器精确地完成装配、焊接、码垛、喷涂等作业?这可以通过机器人示教或者编程来精确控制工具坐标系相对于机器人基坐标系的位置和姿态变化来实现。机器人的连杆一般做空间运动,为了研究空间物体运动,引入了位姿矩阵,再引入能确定物体从一个位置和姿态到达另外一个位置和姿态的刚体运动(变换)矩阵,这是第2章首先要学习的内容。由于空间物体的运动可以在不同的坐标系中描述,需要引入坐标系变换,这实际上是线性代数中的“基变换”,其本质是矩阵运算,这些内容也将在第2章学习。该章还阐述了刚体变换矩阵“左乘”和“右乘”对应的刚体变换,从而为学习第3章“机器人运动学方程”奠定基础。

机器人是由一个个构件(连杆)通过关节连接起来而形成的一个运动链。在机器人的每个连杆上建立所谓的D-H坐标系,利用D-H矩阵描述相邻连杆之间的位置和姿态关系,之后把所有的D-H矩阵组合起来(位姿矩阵右乘),就得到机器人末端连杆相对于机器人基座的位置和姿态,这就是机器人运动学方程。这是本书第3章将要学习的内容,其本质是第2章内容“刚体变换矩阵右乘”的延伸和具体应用。利用机器人运动学方程,可以研究机器人的正向和逆向运动学问题。该章还将学习如何建立机器人末端执行器坐标系、机器人基坐标系、工作台坐标系(世界坐标系)和工件坐标系之间的准确关系。

第4章将学习机器人的逆向运动学问题,即在给定机器人末端执行器位姿的前提下,如何确定机器人每个关节的运动。

机器人工作时,末端执行器线速度和角速度与每个关节运动的关系就是机器人速度雅可比矩阵。另外,机器人末端的输出力与机器人每个关节输出力的关系就是力雅可比矩阵。这些内容将在第5章学习。当然,学习这些内容需要掌握高等数学中的导数、向量叉积、反对称矩阵以及矩阵导数的概念;同时,也需要掌握理论力学中的绝对运动、相对运动和牵连运动之间的关系。

工业机器人技术应用部分包括第6~10章。为了使工业机器人能够完成作业任务,需要对其进行运动规划,包括路径规划和运动轨迹规划,这是第6章需要学习的内容。如何让机器人实现既定的轨迹,这可以通过编程来完成,因此需要学习工业机器人的编程语言,这是第7章的学习内容,该章还介绍了市场上主流工业机器人的编程语言。

机器人要投入应用必须有末端执行器,即“手爪”,因此第8章将首先学习末端执行器的设计方法;此外,末端执行器的工作对象需要定位,为此需要设计工装和夹具,这也是第8章将要学习的内容。工业机器人要在现场得以应用,必须与相关的外围设备相集成,形成机器人工作站。如何配置机器人工作站,通过什么样的技术手段能够实现系统集成,这是第9章工业机器人系统集成将要学习的内容。机器人的典型应用案例将在第10章给出,作为本书相关内容的具体应用。

本书依托增强现实(AR)技术,将视频等数字资源与纸质教材交互,为读者和用户带来更丰富有效的阅读体验,具体使用方法参见目录前“本书配套数字交互资源使用说明”。另外,教材按其主要内容编制了各章课件,并为每章内容附“学习延伸及文献导读”,强化内容理解及拓展文献链接,以及为第6章式(6-41)(p131)提供相关计算结果,均在上海科学技术出版社网站(www.sstp.cn)“课件/配套资源”栏目公布,欢迎读者浏览、下载。

本书具体编写分工如下:第1~7章、第9章由上海应用技术大学荆学东编写;第8章由荆学东和上海师范大学王乐慧共同编写;第10章由库卡机器人(上海)有限公司于进杰、顾俊和林杨胜蓝共同编写。感谢库卡机器人(上海)有限公司为本书提供了机器人技术参数、工程案例和部分图片;感谢ABB(中国)有限公司上海分公司为本书提供机器人技术参数和部分图片。


本书可以作为高等院校机器人技术相关专业本科生和研究生的教材,也可为学习和掌握工业机器人技术及应用的工程技术人员提供参考。

编者

本书配套数字交互资源使用说明

针对本书配套数字资源的使用方式和资源分布,特做说明如下:

1. 用户(或读者)可持安卓移动设备(系统要求安卓 4.0 及以上),打开移动端扫码软件(不包括微信),扫描教材封底二维码,下载安装本书配套 APP,即可阅读识别、交互使用。

2. 插图图题等相对应内容处有加“”标识的,提供视频等数字资源,可进行识别、交互。具体扫描对象位置和数字资源对应关系参见下表。

扫描对象位置	数字资源类型	数字资源名称
图 1-1	视频	库卡机器人结构
图 1-3	视频	工业机器人关键技术
表 1-4	视频	机器人性能指标检测
图 1-10	视频	机器人装配作业
图 6-1	视频	维他产线机器人-码垛
图 6-22	视频	机器人轨迹规划
图 7-1	视频	机器人示教盘
图 8-24	视频	机器人焊接
图 9-8	视频	机器人搬运

目 录

第1章 绪论	1
1.1 工业机器人简介	1
1.2 工业机器人的组成、分类及关键技术	2
1.3 工业机器人的主要技术指标	7
1.4 机器人编程语言	9
1.5 研究和应用机器人技术须具备的基础知识	9
1.6 工业机器人的应用	11
1.7 应用工业机器人解决工程问题面临的基本任务	14
第2章 刚体运动描述、坐标变换及坐标系变换	16
2.1 质点的运动描述	16
2.2 刚体运动描述	17
第3章 工业机器人正向运动学及与作业相关的坐标系的建立	42
3.1 机器人常用运动副及机器人机构	42
3.2 机器人连杆及相对运动描述——D-H 矩阵	44
3.3 机器人运动学方程	48
3.4 与机器人作业相关的坐标系建立及坐标系标定	56
第4章 工业机器人逆向运动学及坐标系标定	62
4.1 工业机器人逆向运动学	62
4.2 机器人逆向运动学求解实例	66
4.3 机器人坐标系的标定	73

第5章 工业机器人的速度、静力分析和动力学	83
5.1 位置向量对时间的导数——质点速度	83
5.2 向量叉积的计算方法以及自由向量对时间的导数	84
5.3 刚体运动的线速度和角速度	87
5.4 机器人速度雅可比矩阵和连杆之间的速度传递	90
5.5 连杆上的静力及其传递	100
5.6 机器人力雅可比矩阵及其作用	103
5.7 机器人动力学	104
第6章 工业机器人运动轨迹规划	115
6.1 工业机器人轨迹规划概述	115
6.2 插补方式与轨迹控制	118
6.3 机器人轨迹插值计算	119
6.4 轨迹规划的实施过程	132
6.5 基于动力学的机器人轨迹规划	134
第7章 机器人编程语言	136
7.1 机器人编程语言的基本功能	136
7.2 工业机器人编程语言的分类	137
7.3 主流工业机器人编程语言及其分类	138
7.4 通用离线编程语言	142
第8章 工业机器人末端执行器以及工装和夹具设计	145
8.1 机器人末端执行器的类型	145
8.2 机器人夹持式和吸附式末端执行器的设计方法	146
8.3 专用末端执行器的选配	156
8.4 机器人作业工装设计	157
8.5 机器人作业夹具设计	159
8.6 机器人焊接工装和夹具设计	167
8.7 机器人喷涂工装和夹具设计	170
8.8 机器人搬运工装和夹具设计	171
8.9 机器人装配工装和夹具设计	172
8.10 机器人激光加工工装和夹具设计	172
8.11 机器人光整加工工装和夹具设计	175
8.12 机器人测量和检测工装与夹具设计	175

第9章 工业机器人与外围设备及生产系统的集成	177
9.1 工业机器人与外围设备及生产系统相集成的基本问题	178
9.2 工业机器人与外围设备相集成的技术途径	210
9.3 机器人与外围设备相集成的工作流程	226
第10章 工业机器人应用实例	231
10.1 作业要求	231
10.2 副车架生产工艺流程	232
10.3 机器人工作站总体布置方案	233
10.4 产能和设备开动率以及机器人工作站生产节拍	234
10.5 弧焊机器人选型及外围设备配置	234
10.6 作业工序	236
10.7 用户界面及应用程序	237
后记	243

绪 论

◎ 学习成果达成要求

学生应达成的能力要求包括:

1. 了解工业机器人的概念,了解机器人的结构组成、分类及关键技术。
2. 熟悉工业机器人的关键技术指标。
3. 了解工业机器人编程语言的作用和工业机器人的主要应用领域。
4. 熟悉应用机器人解决工程问题面临的基本任务。

《《《

机器人的出现,既是科幻作家梦想的实现,也是科学家和工程技术人员的执着追求、灵感和智慧的结晶,揭示了技术“服务于人类”,同时也在“向人类学习”的过程中不断进步这一客观规律。最初的机器人外形上更像“机器”,动作比较“机械”,而当今的机器人在外形和功能上越来越接近“人”。这是机器人技术发展的脉络。机器人首先是机器,离不开运动和控制,因而,机器人技术离不开伺服驱动和控制技术的支撑,也伴随着不同时期新技术的发展而发展,特别是计算机技术和信息技术对机器人向智能化发展起到了关键作用。机器人技术不是一种单一的技术,它涉及机械工程、电气工程、计算机科学与工程学科以及高等数学、工程数学和工程力学等。在研究和应用工业机器人技术解决工程问题时,掌握这些学科的基础知识是需要的。

1.1 工业机器人简介

按照国际标准化组织(ISO)的定义:机器人是一种具有多功能、可编程的操作机,用于搬运材料、零件和工具等;或者是为了执行不同的任务而具有运动可改变或可编程(控制)的专门系统。

机器人按照用途可以分为工业机器人和服务机器人两大类。工业机器人是面向工业生产领域的机器人,主要指机械手。本质上工业机器人是一种安装有记忆装置和末端执行装置,能够完成各种运动来代替人类劳动的通用机器。

自 1961 年 Unimation 公司生产出世界上第一台工业机器人以来,工业机器人的发展已有近 60 年的历史,其间主要经历了四个典型阶段:20 世纪 50—60 年代,工业机器人萌芽阶段,液压伺服驱动技术日臻成熟;70—80 年代,液压伺服驱动的工业机器人在汽车制造业开始批量应用;90 年代至 21 世纪初,电气伺服驱动技术发展成熟,工业机器人应用快速增长;21 世纪 10 年代,信息技术和网络技术引领机器人技术,工业机器人进入普及及智能化时代。

在上述过程中,先后有示教机器人、感觉机器人和智能机器人三代工业机器人出现。工业

机器人技术的发展和應用一直依赖于伺服驱动技术、伺服控制技术和传感器技术的发展。工业机器人发展从2轴到6轴、从重量级到轻量级,驱动方式从液压驱动到电机驱动,应用领域从汽车工业到其他行业,工业机器人新的功能和应用领域不断增加。目前有110多万台工业机器人在世界各地的工厂投入运行。

机器人作为一种具有高度柔性的自动化设备,广泛应用于制造业的各个领域,它对提高生产线的柔性具有特别重要的意义。工业机器人及其自动化成套设备的拥有数量和水平是衡量一个国家制造业综合实力的重要标志之一。

目前工业机器人的产业链也日臻完善。产业链的上游是机器人制造商,下游是机器人系统集成商。然而只有机器人本身是无法完成任何具体工作的,需要将机器人与外围设备集成之后才能为终端客户所用。系统集成商为终端客户提供解决方案,负责工业机器人的系统集成和应用程序开发。在我国,机器人系统集成商一般购买商用机器人整机,然后根据不同行业或客户的需求,制订出符合生产需求的整体解决方案。

1.2 工业机器人的组成、分类及关键技术

1.2.1 工业机器人的组成

工业机器人一般由控制柜、机器人本体、示教盘和编程器组成。机器人本体是机器人机械系统的总称,它包括机体结构和机械传动系统,一般包括传动部件、机身及行走机构、臂部、腕部和手部五个部分。

典型的工业机器人本体具体结构如图1-1所示。

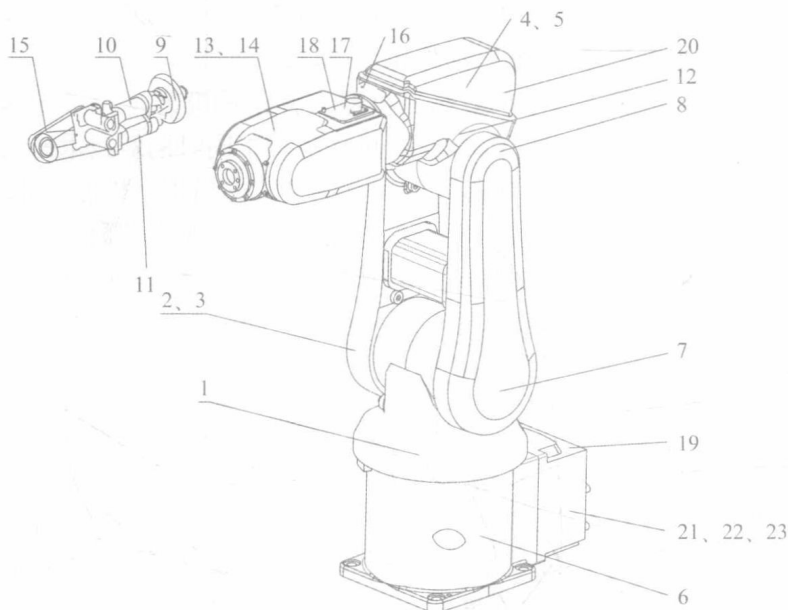


图 1-1 工业机器人本体结构

- 1—腰部伺服电机(轴1);2—肩部伺服电机(轴2);3—支撑轴承;4—肘部伺服电机(轴3);5—支撑轴承(轴3);
6—腰部减速器(一般为RV减速器);7—肩部减速器(一般为RV减速器);8—肘部减速器(一般为RV减速器);
9—手腕轴4伺服电机总成;10—手腕轴5伺服电机总成;11—手腕轴6伺服电机总成;
12—手腕轴4减速器(一般为谐波减速器);13—手腕轴5旋转接头总成;14—手腕轴6旋转接头总成;
15—手腕传动带组;16—阀组总成;17—手腕I/O接口;18—手腕总线接口;19—电缆组;
20—仪表盘;21—旋转变压器数字转换器(RDC);22—I/O模块;23—接线端子

1.2.2 工业机器人的分类

工业机器人按坐标形式分为直角坐标机器人、圆柱坐标机器人、球坐标机器人和关节机器人,如图1-2所示。

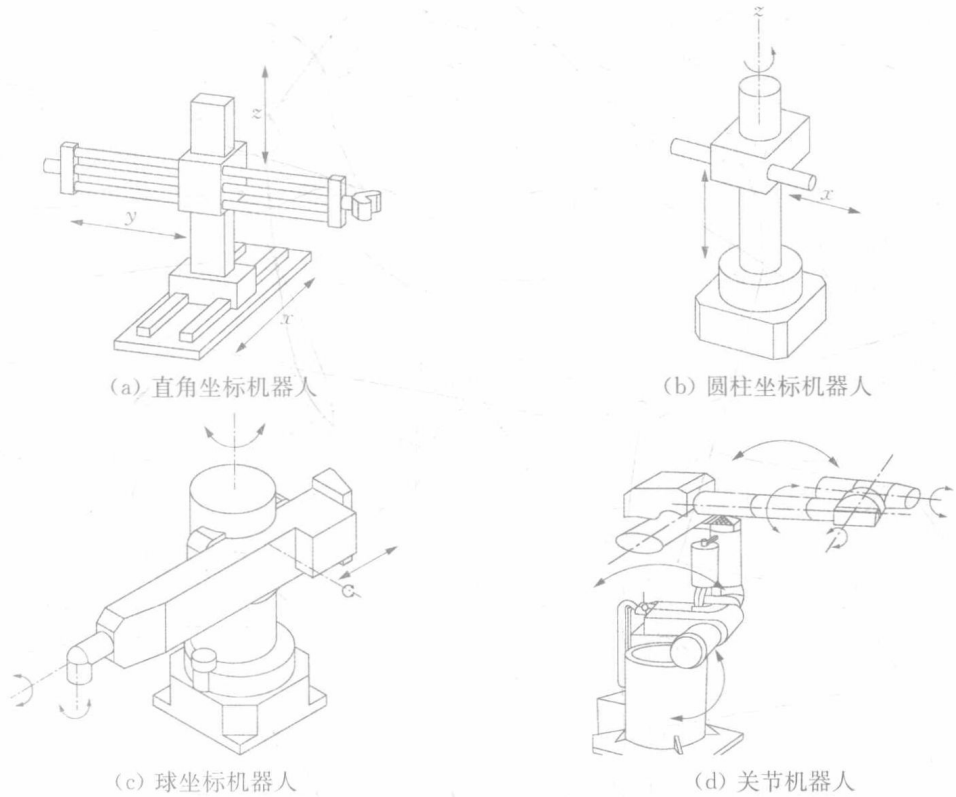


图1-2 工业机器人的坐标形式

不同坐标形式工业机器人的特点及应用见表1-1。

表1-1 不同坐标形式工业机器人的特点及应用

坐标形式	作业空间		惯性	定位精度	定向特征	结构特点	应用情况	特点及应用范围
	大小	形状						
直角坐标	较小	立方体	较大	容易控制	好	简单	较多	机器人末端宜做直线运动,适用于长方体作业空间
圆柱坐标	较大	空间柱体	较大	容易控制	较好	较简单	较多	机器人末端易做圆弧形轨迹运动,适用于圆弧形及圆柱体作业空间,能改变工件一个轴向的方位,不宜做直线运动
球坐标	大	扇形截面旋转体	较小	不易控制	差	较复杂	较少	能改变工件两个轴向的方位,适用于扇形截面的回转体作业空间,不宜做直线运动
关节型	大	球体	较小	不易控制	差	复杂	较多	臂能折叠,并传送工件到任意方向,宜做复杂动作,能改变工件三个轴向的方位
复合坐标	大	柱体	较大	不易控制	差	较复杂	较少	能扩大作业范围,并具有相关运动坐标形式的部分特点,适用于多工位的移动式作业