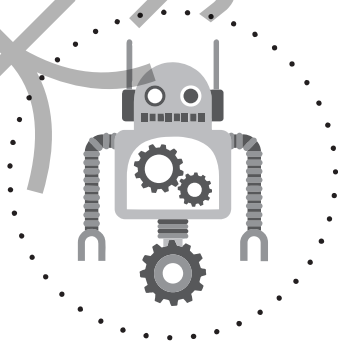


智能制造系列教材

# 机器人基础

FOUNDATION  
OF ROBOT

杨勇 谢广明 主编  
张国英 黄福 简月 副主编



清华大学出版社  
北京

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

#### 图书在版编目(CIP)数据

机器人基础/杨勇,谢广明主编. —北京:清华大学出版社,2024.1  
智能制造系列教材  
ISBN 978-7-302-65148-2

I. ①机… II. ①杨… ②谢… III. ①机器人工程—高等学校—教材 IV. ①TP24

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2024)第 019123 号

责任编辑:刘 杨  
封面设计:李召霞  
责任校对:赵丽敏  
责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市科茂嘉荣印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:8

字 数:158千字

版 次:2024年3月第1版

印 次:2024年3月第1次印刷

定 价:28.00元

产品编号:090888-01

## 智能制造系列教材编审委员会

### 主任委员

李培根 雒建斌

### 副主任委员

吴玉厚 吴波 赵海燕

### 编审委员会委员(按姓氏首字母排列)

陈雪峰	邓朝晖	董大伟	高亮
葛文庆	巩亚东	胡继云	黄洪钟
刘德顺	刘志峰	罗学科	史金飞
唐水源	王成勇	轩福贞	尹周平
袁军堂	张洁	张智海	赵德宏
郑清春	庄红权		

### 秘书

刘杨

清华大学出版社

多年前人们就感叹,人类已进入互联网时代;近些年人们又惊叹,社会步入物联网时代。牛津大学教授舍恩伯格(Viktor Mayer-Schönberger)心目中大数据时代最大的转变,就是放弃对因果关系的渴求,转而关注相关关系。人工智能则像一个幽灵徘徊在各个领域,兴奋、疑惑、不安等情绪分别蔓延在不同的业界人士中间。今天,5G的出现使得作为整个社会神经系统的互联网和物联网更加敏捷,使得宛如社会血液的数据更富有生命力,自然也使得人工智能未来能在某些局部领域扮演超级脑力的作用。于是,人们惊呼数字经济的来临,憧憬智慧城市、智慧社会的到来,人们还想象着虚拟世界与现实世界、数字世界与物理世界的融合。这真是一个令人咋舌的时代!

但如果真以为未来经济就“数字”了,以为传统工业就“夕阳”了,那可以说我们就真正迷失在“数字”里了。人类的生命及其社会活动更多地依赖物质需求,除非未来人类生命形态真的变成“数字生命”了,不用说维系生命的食物之类的物质,就连“互联”“数据”“智能”等这些满足人类高级需求的功能也得依赖物理装备。所以,人类最基本的活动便是把物质变成有用的东西——制造!无论是互联网、物联网、大数据、人工智能,还是数字经济、数字社会,都应该落脚在制造上,而且制造是其应用的最大领域。

前些年,我国把智能制造作为制造强国战略的主攻方向,即便从世界上看,也是有先见之明的。在强国战略的推动下,少数推行智能制造的企业取得了明显效益,更多企业对智能制造的需求日盛。在这样的背景下,很多学校成立了智能制造等新专业(其中有教育部的推动作用)。尽管一窝蜂地开办智能制造专业未必是一个好现象,但智能制造的相关教材对于高等院校与制造关联的专业(如机械、材料、能源动力、工业工程、计算机、控制、管理……)都是刚性需求,只是侧重点不一。

教育部高等学校机械类专业教学指导委员会(以下简称“机械教指委”)不失时机地发起编著这套智能制造系列教材。在机械教指委的推动和清华大学出版社的组织下,系列教材编委会认真思考,在2020年新型冠状病毒感染疫情正盛之时进行视频讨论,其后教材的编写和出版工作有序进行。

编写本系列教材的目的是为智能制造专业以及与制造相关的专业提供有关智能制造的学习教材,当然教材也可以作为企业相关的工程师和管理人员学习和培

训之用。系列教材包括主干教材和模块单元教材,可满足智能制造相关专业的基础课和专业课的需求。

主干教材,即《智能制造概论》《智能制造装备基础》《工业互联网基础》《数据技术基础》《制造智能技术基础》,可以使学生或工程师对智能制造有基本的认识。其中,《智能制造概论》教材给读者一个智能制造的概貌,不仅概述智能制造系统的构成,而且还详细介绍智能制造的理念、意识和思维,有利于读者领悟智能制造的真谛。其他几本教材分别论及智能制造系统的“躯干”“神经”“血液”“大脑”。对于智能制造专业的学生而言,应该尽可能必修主干课程。如此配置的主干课程教材应该是本系列教材的特点之一。

本系列教材的特点之二是配合“微课程”设计了模块单元教材。智能制造的知识体系极为庞杂,几乎所有的数字-智能技术和制造领域的新技术都和智能制造有关,不仅涉及人工智能、大数据、物联网、5G、VR/AR、机器人、增材制造(3D打印)等热门技术,而且像区块链、边缘计算、知识工程、数字孪生等前沿技术都有相应的模块单元介绍。本系列教材中的模块单元差不多成了智能制造的知识百科。学校可以基于模块单元教材开出微课程(1学分),供学生选修。

本系列教材的特点之三是模块单元教材可以根据各所学校或者专业的需要拼合成不同的课程教材,列举如下。

# 课程例 1——“智能产品开发”(3 学分),内容选自模块:

- 优化设计
- 智能工艺设计
- 绿色设计
- 可重用设计
- 多领域物理建模
- 知识工程
- 群体智能
- 工业互联网平台

# 课程例 2——“服务制造”(3 学分),内容选自模块:

- 传感与测量技术
- 工业物联网
- 移动通信
- 大数据基础
- 工业互联网平台
- 智能运维与健康管埋

# 课程例 3——“智能车间与工厂”(3 学分),内容选自模块:

- 智能工艺设计
- 智能装配工艺

- 传感与测量技术
- 智能数控
- 工业机器人
- 协作机器人
- 智能调度
- 制造执行系统(MES)
- 制造质量控制

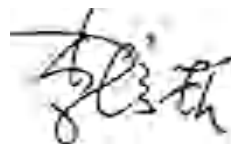
总之,模块单元教材可以组成诸多可能的课程教材,还有如“机器人及智能制造应用”“大批量定制生产”等。

此外,编委会还强调应突出知识的节点及其关联,这也是此系列教材的特点。关联不仅体现在某一课程的知识节点之间,也表现在不同课程的知识节点之间。这对于读者掌握知识要点且从整体联系上把握智能制造无疑是非常重要的。

本系列教材的编著者多为中青年教授,教材内容体现了他们对前沿技术的敏感和在一线的研发实践的经验。无论在与部分作者交流讨论的过程中,还是通过对部分文稿的浏览,笔者都感受到他们较好的理论功底和工程能力。感谢他们对这套系列教材的贡献。

衷心感谢机械教指委和清华大学出版社对此系列教材编写工作的组织和指导。感谢庄红权先生和张秋玲女士,他们卓越的组织能力、在教材出版方面的经验、对智能制造的敏锐性是这套系列教材得以顺利出版的最重要因素。

希望本系列教材在推进智能制造的过程中能够发挥“系列”的作用!



2021年1月

清华大学出版社



制造业是立国之本,是打造国家竞争能力和竞争优势的主要支撑,历来受到各国政府的高度重视。而新一代人工智能与先进制造深度融合形成的智能制造技术,正在成为新一轮工业革命的核心驱动力。为抢占国际竞争的制高点,在全球产业链和价值链中占据有利位置,世界各国纷纷将智能制造的发展上升为国家战略,全球新一轮产业升级和竞争就此拉开序幕。

近年来,美国、德国、日本等制造强国纷纷提出新的国家制造业发展计划。无论是美国的“工业互联网”、德国的“工业 4.0”,还是日本的“智能制造系统”,都是根据各自国情为本国工业制定的系统性规划。作为世界制造大国,我国也把智能制造作为推进制造强国战略的主攻方向,并于 2015 年发布了《中国制造 2025》。《中国制造 2025》是我国全面推进建设制造强国的引领性文件,也是我国实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领。推进建设制造强国,加快发展先进制造业,促进产业迈向全球价值链中高端,培育若干世界级先进制造业集群,已经成为全国上下的广泛共识。可以预见,随着智能制造在全球范围内的孕育兴起,全球产业分工格局将受到新的洗礼和重塑,中国制造业也将迎来千载难逢的历史性机遇。

无论是开拓智能制造领域的科技创新,还是推动智能制造产业的持续发展,都需要高素质人才作为保障,创新人才是支撑智能制造技术发展的第一资源。高等工程教育如何在这场技术变革乃至工业革命中履行新的使命和担当,为我国制造企业转型升级培养一大批高素质专门人才,是摆在我们面前的一项重大任务和课题。我们高兴地看到,我国智能制造工程人才培养日益受到高度重视,各高校都纷纷把智能制造工程教育作为制造工程乃至机械工程教育创新发展的突破口,全面更新教育教学观念,深化知识体系和教学内容改革,推动教学方法创新,我国智能制造工程教育正在步入一个新的发展时期。

当今世界正处于以数字化、网络化、智能化为主要特征的第四次工业革命的起点,正面临百年未有之大变局。工程教育需要适应科技、产业和社会快速发展的步伐,需要有新的思维、理解和变革。新一代智能技术的发展和全球产业分工合作的新变化,必将影响几乎所有学科领域的研究工作、技术解决方案和模式创新。人工智能与学科专业的深度融合、跨学科网络以及合作模式的扁平化,甚至可能会消除某些工程领域学科专业的划分。科学、技术、经济和社会文化的深度交融,使人们

可以充分使用便捷的软件、工具、设备和系统,彻底改变或颠覆设计、制造、销售、服务和消费方式。因此,工程教育特别是机械工程教育应当更加具有前瞻性、创新性、开放性和多样性,应当更加注重与世界、社会和产业的联系,为服务我国新的“两步走”宏伟愿景做出更大贡献,为实现联合国可持续发展目标发挥关键性引领作用。

需要指出的是,关于智能制造工程人才培养模式和知识体系,社会和学界存在多种看法,许多高校都在进行积极探索,最终的共识将会在改革实践中逐步形成。我们认为,智能制造的主体是制造,赋能是靠智能,要借助数字化、网络化和智能化的力量,通过制造这一载体把物质转化成具有特定形态的产品(或服务),关键在于智能技术与制造技术的深度融合。正如李培根院士在丛书序1中所强调的,对于智能制造而言,“无论是互联网、物联网、大数据、人工智能,还是数字经济、数字社会,都应该落脚在制造上”。

经过前期大量的准备工作,经李培根院士倡议,教育部高等学校机械类专业教学指导委员会(以下简称“机械教指委”)课程建设与师资培训工作组联合清华大学出版社,策划和组织了这套面向智能制造工程教育及其他相关领域人才培养的本科教材。由李培根院士和雒建斌院士、部分机械教指委委员及主干教材主编,组成了智能制造系列教材编审委员会,协同推进系列教材的编写。

考虑到智能制造技术的特点、学科专业特色以及不同类别高校的培养需求,本套教材开创性地构建了一个“柔性”培养框架:在顶层架构上,采用“主干教材+模块单元教材”的方式,既强调了智能制造工程人才必须掌握的核心内容(以主干教材的形式呈现),又给不同高校最大程度的灵活选用空间(不同模块教材可以组合);在内容安排上,注重培养学生有关智能制造的理念、能力和思维方式,不局限于技术细节的讲述和理论知识的推导;在出版形式上,采用“纸质内容+数字内容”的方式,“数字内容”通过纸质图书中列出的二维码予以链接,扩充和强化纸质图书中的内容,给读者提供更多的知识和选择。同时,在机械教指委课程建设与师资培训指导组的指导下,本系列书编审委员会具体实施了新工科研究与实践项目,梳理了智能制造方向的知识体系和课程设计,作为规划设计整套系列教材的基础。

本系列教材凝聚了李培根院士、雒建斌院士以及所有作者的心血和智慧,是我国智能制造工程本科教育知识体系的一次系统梳理和全面总结,我谨代表机械教指委向他们致以崇高的敬意!



2021年3月

# 前言

## PREFACE

“机器人”这个词出现至今已一百余年,随着全球人工智能和智能装备产业的迅速发展,机器人被广泛应用于工业生产、日常生活、教育娱乐、海洋探测、航空航天、医疗卫生等众多领域。

机器人技术是机械、电子、控制及计算机等多个学科交叉的综合技术。机器人作为“制造业皇冠顶端的明珠”,是一个国家高端制造业水平的重要标志。《“十四五”机器人产业发展规划》提到,到2025年我国成为全球机器人技术创新策源地、高端制造集聚地和集成应用新高地。在高端智能制造大背景下,我国机器人产业正迎来高质量发展新机遇。

近年来,机器人技术快速发展,机器人机构的复杂程度也不断提升,随之也出现了很多新型的驱动方式(如智能驱动)以及不同形式的控制算法(如机器人智能控制)。在类人机器人出现之前,仿生机器人也一度成为研究热点。本书重点结合机器人产业新需求和新进展,通过理论讲解与实例解析相结合的方式,从机器人运动学基础到关节与驱动、传感与通信、运动控制与算法、串并联机器人以及仿生机器人,层层递进的顺序进行展开。好比一台正在运转的机器人摆在大家面前,让读者带着好奇心去了解掌握机器人的基本原理、基本技术和典型应用,使读者经历不断剖析、不断提问和不断探索机器人的知识循环学习提升过程。

第1章机器人基础简介,主要从机器人的正向/逆向运动学、动力学的相关概念和建模方法等进行了具体阐述,对机器人学的发展趋势进行了概要介绍。

第2章机器人机构与驱动,主要从机器人的串/并联机构、关节机构、机器人驱动以及机构与驱动的轻量化发展需求等方面进行阐述与分析。

第3章机器人的传感与通信,主要介绍了机器人位置传感、力传感、视觉传感、触觉传感以及机器人之间如何通信等,并精选了机器人视觉传感器的应用作为典型案例进行分析。

第4章机器人运动控制,主要介绍了机器人关节控制、力控制和力/运动混合控制,具体阐述了机器人的经典PID控制、变结构控制、最优控制以及智能控制等运动控制算法,并对机器人智能控制应用进行了典型案例解析。

第5章串/并联机器人,从串/并联机器人的结构组成和运动控制两方面进行了具体阐述和对比分析,并通过实例对常见串联机器人的应用进行了解析。

第6章仿生机器人,从仿生机器人的结构组成与分类、驱动与控制、材料与成型以及仿生机器人的运动、仿生机器人的传感等关键方面进行了阐述,并通过精选3个典型实例,从水下到陆地再到空中分别对仿生机器人的应用做了综合解析。

本书内容紧贴时代,知识面广,由浅入深,结构清晰,系统性强,突出应用特色,可作为高校机器人相关专业的师生的教材和学习参考书,也可以为从事机器人研发设计与创新应用的科研人员、工程技术人员提供帮助。

本书由广东技术师范大学杨勇、北京大学谢广明任主编,广东技术师范大学张国英、黄福和简月任副主编。特别感谢谢玲、曾梦圆、陈文俊、徐翔翀、李秋晨、邓春婷、罗梓泓、张国泉、梁小凤、叶雅怡等参与本书的文稿收集、整理编辑和加工完善等工作,在此表示衷心的感谢!

受经验和水平所限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正!

作者

2023年8月

# 目录

## CONTENTS

<b>第 1 章 机器人基础简介</b> .....	1
1.1 机器人运动学 .....	1
1.1.1 机器人基本运动参数 .....	1
1.1.2 机器人正向/逆向运动学建模 .....	4
1.2 机器人动力学 .....	7
1.2.1 机器人动力学模型 .....	7
1.2.2 机器人动力学仿真 .....	8
1.3 机器人学的发展趋势 .....	10
习题 .....	11
<b>第 2 章 机器人机构与驱动</b> .....	12
2.1 机器人机构简介 .....	12
2.1.1 机器人的串联机构 .....	12
2.1.2 机器人的并联机构 .....	12
2.1.3 机器人的关节机构 .....	14
2.2 机器人驱动简介 .....	14
2.2.1 机器人步进驱动 .....	15
2.2.2 机器人伺服驱动 .....	16
2.2.3 机器人液压驱动 .....	17
2.3 机器人结构与驱动装置的轻量化 .....	20
2.3.1 机器人结构轻量化 .....	21
2.3.2 机器人驱动装置轻量化 .....	21
习题 .....	21
<b>第 3 章 机器人的传感与通信</b> .....	22
3.1 机器人传感简介 .....	22
3.1.1 机器人位置传感 .....	22
3.1.2 机器人力传感 .....	27

3.1.3 机器人视觉传感 .....	28
3.1.4 机器人触觉传感 .....	30
3.2 机器人通信简介 .....	32
3.2.1 基本概念 .....	32
3.2.2 机器人通信系统 .....	36
3.2.3 机器人通信软件与编程 .....	39
3.3 机器人通信典型应用案例 .....	39
习题 .....	45
<b>第4章 机器人运动控制 .....</b>	<b>46</b>
4.1 机器人运动控制简介 .....	46
4.1.1 机器人关节控制 .....	48
4.1.2 机器人的力控制 .....	52
4.1.3 机器人的力/运动混合控制 .....	54
4.2 机器人运动控制算法 .....	55
4.2.1 经典PID控制 .....	55
4.2.2 变结构控制 .....	56
4.2.3 最优控制 .....	57
4.2.4 智能控制 .....	58
4.3 典型应用案例 .....	60
习题 .....	63
<b>第5章 串/并联机器人 .....</b>	<b>64</b>
5.1 串/并联机器人简介 .....	64
5.1.1 串联机器人的结构组成 .....	64
5.1.2 并联机器人的结构组成 .....	65
5.1.3 串/并联机器人的区别与特点 .....	68
5.2 典型应用案例 .....	69
习题 .....	77
<b>第6章 仿生机器人 .....</b>	<b>78</b>
6.1 仿生机器人简介 .....	78
6.1.1 仿生机器人体系结构 .....	78
6.1.2 仿生机器人驱动与控制 .....	80
6.1.3 仿生机器人材料 .....	83
6.2 仿生机器人运动分类 .....	88

6.2.1 爬行运动仿生机器人 .....	89
6.2.2 跳跃运动仿生机器人 .....	90
6.2.3 飞行运动仿生机器人 .....	92
6.2.4 游泳运动仿生机器人 .....	93
6.3 仿生机器人的传感 .....	95
6.3.1 光敏传感 .....	95
6.3.2 声敏传感 .....	96
6.3.3 气敏传感 .....	98
6.3.4 触觉传感 .....	99
6.4 典型应用案例：仿生机器蛇应用 .....	101
参考文献 .....	107

清华大学出版社

清华大学出版社



# 第 1 章

## 机器人基础简介

### 1.1 机器人运动学

机器人运动学涉及机器人机构中物体的运动,但运动学问题是在不考虑引起运动的力和力矩的情况下描述机械臂运动。由于机器人机构是为运动而精心设计的,所以运动学是面向机器人设计、分析、控制和仿真的基础。

机器人机构是指由关节连接的刚体所构成的系统。刚体在空间的位置和姿态统称为位姿。因此,机器人运动学描述的是位姿、速度、加速度等以及构成机构的物体位姿的高阶导数。本章重点讨论机器人运动学中的两类基本问题:

(1) 正向运动学,即给定机器人的连杆几何参数和关节变量,以此求解机器人末端执行器相对于参考坐标系的位置和姿态。

(2) 逆向运动学,即已知机器人连杆的几何参数,给定机器人末端执行器相对于参考坐标系的期望位置和姿态,以此反求机器人能够到达该位姿的各关节变量。

综上所述,正向运动学问题就是求解关节坐标的运动学参数,再用这些运动学参数求解笛卡儿坐标系下的相关参数。逆向运动学问题就是求解笛卡儿空间中末端执行器的运动学参数,这些运动参数在关节空间中是必需的。正向运动学通常用于机器人机构的设计与优化、工作空间分析以及运动控制等,而逆向运动学常用于机器人的奇异性分析和轨迹规划等。逆向运动学是高度非线性的,它与正向运动学问题相比通常是非常困难的问题。

#### 1.1.1 机器人基本运动参数

##### 1. 自由度(degrees of freedom)

自由度是机器人的一个重要基本参数,即机器人所具有的独立坐标轴运动的数目是指机器人操作机在空间运动中所需的变量数,通常表示机器人动作的灵活程度。其应包括 3 个转动自由度和 3 个移动自由度,不应包括手爪(末端执行器)

的开合自由度。通常来说,在三维空间中描述一个物体的位姿(位姿是指位置和姿态)需要6个自由度。但是,由于工业机器人的自由度是根据其具体用途而设计的,所以其既允许小于6个自由度,也允许大于6个自由度。目前常见的机器人一般具有4~6个自由度。

## 2. 精度(precision)

精度是机器人的一个重要性能参数,常见的精度指定位精度和重复定位精度。定位精度是指机器人手部实际到达位置与期望位置之间的差距。重复定位精度是指机器人重复定位其手部于同一目标位置的能力,可以用数学上位置误差的离散程度统计量,即“标准偏差”来表示。工业机器人由于要做一些如机械加工之类需要精准定位的工作,因此定位精度这个参数对其而言是非常重要的。

## 3. 工作范围(operating range)

工作范围是指机器人手臂末端或手腕中心所能到达的所有点的集合,也被称为工作区域。因为末端操作器的尺寸和形状是多种多样的,为了真实反映机器人本身的特征参数,所以这里的工作范围是指不安装末端操作器时的区域。工作范围的形状和大小对机器人而言是十分重要的,机器人在执行作业时可能会因为工作范围的形状和大小导致存在手部不能到达的作业死区(dead zone),进而使其不能完成任务。

## 4. 速度(velocity)和加速度(acceleration)

速度和加速度是表明机器人运动特性的主要指标,其直接影响工业机器人的工作效率,对工作任务的完成情况有至关重要的作用。在设计机器人时,通常需要提供主要运动自由度的最大稳定速度,但在实际应用中,单纯考虑最大稳定速度是不够的。这是由于驱动器输出功率是有限的,从启动到最大稳定速度或从最大稳定速度到停止都需要一定的时间。因此,需增加有关加速度的内容。

## 5. 承载能力(bearing capacity)

承载能力是指机器人在指定的工作范围内的任何位姿上所能承受的最大质量。承载能力不仅取决于负载的质量,而且与机器人运行速度和加速度的大小与方向有关。另外,承载能力这一技术指标是针对高速运行状态的,这个指标如果定得不严谨有可能会发生危险,造成不必要的损失。

## 6. 位置和姿态的表示

为了描述机器人本身各个连杆之间、机器人和被操作对象之间的运动关系,通常将它们都视为刚体,并研究这些刚体之间的运动关系。在空间上,刚体运动学可以被看作针对物体位姿的不同表示方法的对比研究。平移和旋转被合称为刚体的偏移。

表达一个物体的位姿总是需要以其他的物体作参照,故它可被表示为一个坐标系相对于另一个坐标系的位姿。类似地,刚体的偏移可被表示为两个坐标系之间的偏移,其中,可以将一个刚体看作是运动的,而将另一个刚体看作是固定的,固定的坐标系也被称为参考坐标系,简称坐标系。

## 1) 位置的描述(位置矢量与坐标平移)

在直角坐标系 $\{A\}$ 中,可用 $(3 \times 1)$ 的位置矢量 ${}^A\mathbf{P}$ 将空间内任一点 $P$ 的位置表示为

$${}^A\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

其中: $p_x, p_y, p_z$ 是点 $P$ 的三个位置坐标分量。 ${}^A\mathbf{P}$ 的上标 $A$ 代表参考坐标系 $\{A\}$ ,此处称 ${}^A\mathbf{P}$ 为位置矢量,见图 1-1。

如果用由 4 个数组成的 $(4 \times 1)$ 列阵表示三维空间直角坐标系 $\{A\}$ 中的点 $P$ ,则该列阵被称为三维空间点 $P$ 的齐次坐标,如下:

$${}^A\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

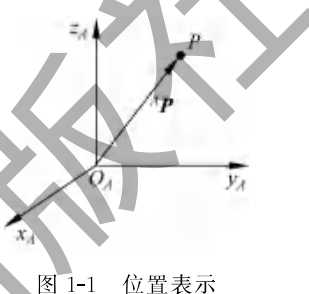


图 1-1 位置表示

齐次坐标并不是唯一的,当列阵的每一项分别乘以一个非零因子 $\omega$ 时,即

$${}^A\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

其中: $a = \omega p_x$ ;  $b = \omega p_y$ ;  $c = \omega p_z$ 。该列阵也可以表示 $P$ 点。

## 2) 方位的描述(旋转矩阵与坐标旋转)

研究机器人的运动与操作,不仅要表示空间中某个点的位置,还需要表示物体的方位。物体的方位可由某个固连于该物体的坐标系来描述。为了规定空间某刚体 $B$ 的方位,可设另一直角坐标系 $\{B\}$ 与该刚体固连,用坐标系 $\{B\}$ 的三个单位主矢量 $\mathbf{x}_B, \mathbf{y}_B, \mathbf{z}_B$ 相对于参考坐标系 $\{A\}$ 的方向余弦组成的 $(3 \times 3)$ 矩阵

$$\begin{aligned} {}^A\mathbf{R}_B &= [{}^A\mathbf{x}_B \quad {}^A\mathbf{y}_B \quad {}^A\mathbf{z}_B] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_B) & \cos(\mathbf{x}_A, \mathbf{y}_B) & \cos(\mathbf{x}_A, \mathbf{z}_B) \\ \cos(\mathbf{y}_A, \mathbf{x}_B) & \cos(\mathbf{y}_A, \mathbf{y}_B) & \cos(\mathbf{y}_A, \mathbf{z}_B) \\ \cos(\mathbf{z}_A, \mathbf{x}_B) & \cos(\mathbf{z}_A, \mathbf{y}_B) & \cos(\mathbf{z}_A, \mathbf{z}_B) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1-4)$$

来表示刚体 $B$ 相对于坐标系 $\{A\}$ 的方位。此时 ${}^A\mathbf{R}_B$ 被称为旋转矩阵。在式(1-4)中,上标 $A$ 代表参考坐标系 $\{A\}$ ,下标 $B$ 代表被描述的坐标系 $\{B\}$ 。 ${}^A\mathbf{R}_B$ 共有 9 个元

素,但只有 3 个元素是独立的,这是因为 ${}^A_B\mathbf{R}$ 的 3 个列矢量都是单位矢量且两两相互垂直,故它的 9 个元素将满足 6 个约束条件(正交条件)如下:

$${}^A\mathbf{x}_B \cdot {}^A\mathbf{x}_B = {}^A\mathbf{y}_B \cdot {}^A\mathbf{y}_B = {}^A\mathbf{z}_B \cdot {}^A\mathbf{z}_B = 1 \quad (1-5)$$

$${}^A\mathbf{x}_B \cdot {}^A\mathbf{y}_B = {}^A\mathbf{y}_B \cdot {}^A\mathbf{z}_B = {}^A\mathbf{z}_B \cdot {}^A\mathbf{x}_B = 0 \quad (1-6)$$

因此,旋转矩阵 ${}^A_B\mathbf{R}$ 是正交的,并且满足条件

$${}^A_B\mathbf{R}^{-1} = {}^A_B\mathbf{R}^T; \quad |{}^A_B\mathbf{R}| = 1 \quad (1-7)$$

其中:上标 T 表示转置;“| |”为行列式符号。

绕  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴旋转 $\theta$  角的旋转矩阵分别为

$$\mathbf{R}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

$$\mathbf{R}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1-9)$$

$$\mathbf{R}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-10)$$

### 3) 刚体位姿的描述

机器人的每一个连杆均可被视为一个刚体,若给定了刚体上某一点的位置和该刚体在空间中的姿态,且这个刚体在空间上是唯一确定的,则可用唯一一个位姿矩阵对其进行描述。

前面已经讨论了采用位置矢量来描述空间点的位置,并用旋转矩阵描述物体的方位的方法。为了完全描述刚体  $B$  在空间的位姿,通常可将刚体  $B$  与某一坐标系 $\{B\}$ 固连。 $\{B\}$ 坐标系的原点一般可选在刚体的特征点上,如质心或者对称中心等。相对参考坐标系 $\{A\}$ ,坐标系 $\{B\}$ 的原点位置和坐标轴的方位分别由位置矢量 ${}^A_B\mathbf{P}$ ( $\{B\}$ 相对于 $\{A\}$ 的平移矢量)和旋转矩阵 ${}^A_B\mathbf{R}$ 来描述。这样就可以用如下( $4 \times 4$ )的位姿矩阵来描述刚体  $B$  的位姿

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} {}^A_B\mathbf{R} & {}^A_B\mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1-11)$$

当该矩阵仅表示位置时,式(1-11)中的旋转矩阵 ${}^A_B\mathbf{R} = \mathbf{I}$ (单位矩阵);当仅表示方位时,式(1-11)中的位置矢量 ${}^A_B\mathbf{P} = \mathbf{0}$ 。

## 1.1.2 机器人正向/逆向运动学建模

正向运动学就是在已知关节变量的情况下求末端位姿,逆向运动学则是已知末端位姿的情况下反求关节变量。两个概念所解决的问题不一样,正向运动学就

是本来的顺序,因为关节变量才有的末端位姿,这是常规的思维方式。但在实际机器人的工作过程中更多情况是需要让机器人完成一个动作,即已知末端的情况,需反求各个关节变量,所以需用到机器人的逆向运动学,也即求关节变量的方法。

机器人运动学方程求解方法:

(1) 代数法。通过逐次在运动学方程式的两边同时乘上一个齐次变换的逆矩阵,达到分离变量的目的。

(2) 几何法。通过几何图形求解角度值,求解过程中利用正弦定理、余弦定理、反正切函数等求解角度。

机器人运动学模型是基于坐标变换求得的。为机器人正向运动学建模通常使用 D-H 法。

D-H 法是由 Denavit 和 Hartenberg 于 1955 年提出的一种通用的机器人运动建模方法,是建立机器人各个关节间的齐次变换矩阵的通用方法。其规则简单且严格定义了每个坐标系的坐标轴,并对连杆和关节定义了 4 个参数,即  $a_{i-1}$ 、 $\alpha_{i-1}$ 、 $d_i$ 、 $\theta_i$ ,用来描述连杆之间的运动关系,这些参数简称为 D-H 参数。

可以将机器人看作是由一系列连杆通过关节串联而成的运动链。连杆能保持两端的关节轴线具有固定的几何关系,其特征由  $a_{i-1}$  和  $\alpha_{i-1}$  两个参数进行描述。如图 1-2 所示, $a_{i-1}$  为连杆长度,表示轴  $i-1$  和轴  $i$  的公垂线长度。 $\alpha_{i-1}$  为连杆转角,表示轴  $i-1$  和轴  $i$  在垂直于  $a_{i-1}$  的平面内夹角。

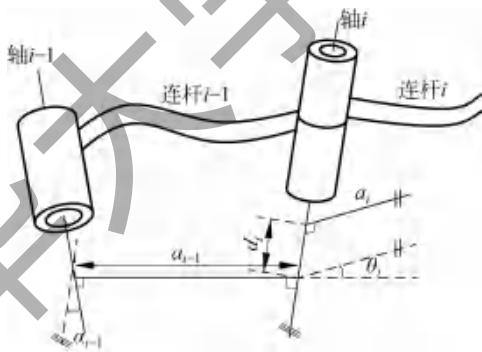


图 1-2 机器人的连杆参数

相邻两个连杆  $i-1$  和连杆  $i$  之间有一个公共的关节轴  $i$ ,连杆连接由  $d_i$  和  $\theta_i$  两个参数进行描述。 $d_i$  为连杆偏距,表示公垂线  $a_{i-1}$  和公垂线  $a_i$  沿公共轴线关节轴  $i$  方向的距离。 $\theta_i$  为关节角,表示公垂线  $a_{i-1}$  的延长线和公垂线  $a_i$  绕公共轴线关节轴  $i$  旋转的夹角。当关节为移动关节时, $d_i$  为关节变量。当关节为转动关节时, $\theta_i$  为关节变量。

在研究机器人连杆之间的位置关系时,首先需要在机器人的每个连杆上分别建立一个连杆坐标系,然后描述这些坐标系之间的关系。此时通常从机器人的固定基座开始对连杆进行编号,固定基座可记为连杆 0,第一个可动连杆为连杆 1,机器

人末端的连杆为连杆  $n$ , 以此类推。相应地, 与连杆  $n$  固连的坐标系记为坐标系  $\{N\}$ 。

对此可以设计详细的坐标系, 建立步骤如下:

(1) 找出各关节轴, 并标出这些轴线的延长线。在下面的步骤(2)~步骤(5)中, 仅考虑两个相邻的轴线(关节轴  $i$  和  $i+1$ )。

(2) 找出关节轴  $i$  和  $i+1$  之间的公垂线或关节轴  $i$  和  $i+1$  的交点, 以关节轴  $i$  和  $i+1$  的交点或者公垂线与关节轴  $i$  的交点作为连杆坐标系  $\{i\}$  的原点。

(3) 规定  $Z_i$  轴沿关节轴  $i$  的指向。

(4) 规定  $X_i$  轴沿公垂线从关节轴  $i$  到关节轴  $i+1$ , 如果关节轴  $i$  和关节轴  $i+1$  相交, 则规定  $X_i$  轴垂直于关节轴  $i$  和关节轴  $i+1$  所在的平面。

(5) 按照右手定则确定  $Y_i$  轴。

(6) 当第一个关节变量为 0 时, 规定坐标系  $\{0\}$  和坐标系  $\{1\}$  重合。对于坐标系  $\{N\}$ , 其原点和  $X_n$  的方向可以任意选取, 但是选取时通常尽量使连杆参数为 0。

按照上述步骤建立的坐标系如图 1-3 所示, 可以定义连杆参数如下:

$a_{i-1}$ ——沿  $X_{i-1}$  轴, 从  $Z_{i-1}$  移动到  $Z_i$  的距离;

$\alpha_{i-1}$ ——绕  $X_{i-1}$  轴, 从  $Z_{i-1}$  旋转到  $Z_i$  的角度;

$d_i$ ——沿  $Z_i$  轴, 从  $X_{i-1}$  移动到  $X_i$  的距离;

$\theta_i$ ——绕  $Z_i$  轴, 从  $X_{i-1}$  旋转到  $X_i$  的角度。

当然, 由于  $Z_i$  轴和  $X_i$  轴的指向均有两种选择, 所以按照上述方法建立的连杆坐标系并不是唯一的。

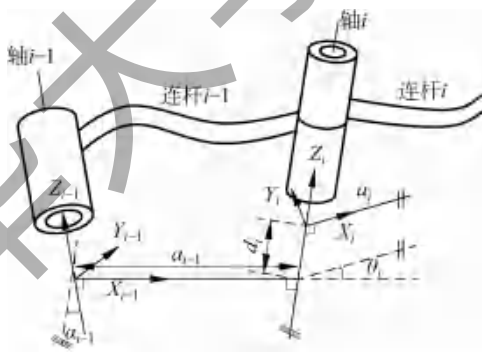


图 1-3 机器人连杆坐标系的建立

建立好了连杆的坐标系, 根据坐标系的建立步骤和 D-H 参数, 为了推导机器人坐标系  $\{i\}$  相对于坐标系  $\{i-1\}$  的齐次变换矩阵, 可以将坐标系  $\{i-1\}$  到坐标系  $\{i\}$  的变换过程分解为以下步骤:

(1) 将坐标系  $\{i-1\}$  绕  $X_{i-1}$  轴旋转  $\alpha_{i-1}$  角, 使  $Z_{i-1}$  轴与  $Z_i$  轴平行;

(2) 将坐标系  $\{i-1\}$  沿当前  $X_{i-1}$  轴平移距离  $a_{i-1}$ , 使  $Z_{i-1}$  轴与  $Z_i$  轴重合;

(3) 将坐标系  $\{i-1\}$  绕当前  $Z_i$  轴旋转  $\theta_i$  角, 使  $X_{i-1}$  轴与  $X_i$  轴平行;

(4) 沿  $Z_i$  轴平移距离  $d_i$ , 使坐标系  $\{i-1\}$  与坐标系  $\{i\}$  完全重合。

以上每一步变换可以分别写出一个齐次变换矩阵,由于变换是相对于动坐标系的,所以将4个变换矩阵依次右乘可以得到坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的齐次变换矩阵:

$${}^{i-1}T = \text{Rot}(X, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(a_{i-1}, 0, 0) \text{Rot}(Z, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \quad (1-12)$$

坐标变换总体思想:首先给每个关节指定坐标系,然后确定从一个关节到下一个关节进行变化的步骤,这体现在两个相邻参考坐标系之间的变化。将所有变化结合起来,用这些连杆变换矩阵连乘就可以计算出坐标系 $\{N\}$ 相对于坐标系 $\{0\}$ 的变换矩阵:

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \cdots {}^{N-1}T_N \quad (1-13)$$

## 1.2 机器人动力学

动力学分析是进行机器人动态特性研究和系统运动控制的基础,其主要研究机器人运动对力和力矩的响应,从这一点来说,运动学是每一个动力学系统的组成部分。机器人是一个非线性的、复杂的动力学系统,其动力学问题的求解比较困难,也需要较长的运算时间。因此,简化求解过程、优化动力学在线计算时间是一个长期受关注的研究课题。

与机器人的运动学类似,机器人的动力学也存在两个基本问题,即:

(1) 机器人动力学正向问题:已知机器人各关节所需的驱动力或力矩,求解其各关节的位移、速度和加速度。从控制的角度讲,正向问题用于运动的动态仿真。

(2) 机器人动力学逆向问题:已知各关节的位移、速度和加速度(已知关节空间的轨迹或末端执行器在笛卡儿空间的轨迹已确定),求解机器人各关节所需的驱动力或力矩。

### 1.2.1 机器人动力学模型

动力学的建模方法主要有三种:牛顿-欧拉方程法、拉格朗日方程法和虚功原理法。

牛顿-欧拉方程法主要根据牛顿方程和欧拉方程对机构的质量、惯性张量、力、力矩和加速度进行描述,适用于一般机器人的动力学分析,在这一法则中必须计算出每个支链和运动平台的运动方程,因此不可避免地会产生大量的方程,这直接导致了计算效率的低下;虚功原理法是基于理论力学中虚功原理的一种动力学建模方法,其通过推导空间内各机构速度和加速度与驱动副速度和加速度的映射关系来建立系统的动力学方程,虽然其格式统一、计算快速,但在处理受完整理想约束的力学平衡问题时坐标系的选择往往有条件限制;拉格朗日方程法是基于最省力法则建立的,以紧凑的解析形式给出运动方程式,该式包含惯性矩阵、离心力与哥氏力矩阵、重力向量,系统、直观且便于理解。下面着重介绍拉格朗日方程法。

拉格朗日方法最初由保守系中的积分汉密尔顿法则推导而来,该法则的内容是:系统从时间  $t_1$  到  $t_2$  的运动为线积分  $I = \int_{t_1}^{t_2} L dt$ ,其中,  $L = K - P$ ,动能  $K$  与势能  $P$  之间的差为运动路径的最小值。此处可以合理地将线积分  $I$  看作运动中的“功”。因为移动系统的动能是位置和速度的标量函数,所以机器人系统的总动能可以为:  $K = K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q}$ ,二次型中所有系数都是  $n$  阶增广正定对称矩阵  $M(q)$ ,其被称为机器人的惯性矩阵,而保守势能的仅仅是位置的标量函数  $P = P(q)$ ,线积分中的标量函数  $L$  变为  $L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - P(q)$ ,其被称为给定系统的拉格朗日算子。

根据数学中著名的变分法,使保守力无动力系统  $I$  最小的拉格朗日运动方程为

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0 \quad (1-14)$$

这是一个以向量形式表示的齐次方程式,也就是说式中的每一项都是具有相同维度的向量场,同时局部坐标系  $q \in \mathbf{R}^n$ 。现在,如果一个外部力/力矩向量  $\tau \in \mathbf{R}^n$  作用在系统上,则拉格朗日方程就变为非齐次的:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (1-15)$$

式中:  $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$  表示具有完整理想约束的  $n$  自由度并联机构的广义坐标;  $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$  为广义力/力矩向量;  $L$  为拉格朗日算子,表达式为  $L = E_k - E_p$ 。  $E_k$  为系统的总动能,  $E_p$  为系统的总势能。根据复合函数的链式求导法则,并考虑机构的  $E_p$  中不包含  $\dot{q}$  项,式(1-15)可展开为

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q} + \frac{\partial E_p}{\partial q} = \tau \quad (1-16)$$

### 1.2.2 机器人动力学仿真

以 2R1T(两转一移)三自由度并联机构为例(见图 1-4),其各项参数如表 1-1 所示。



图 1-4 并联手腕样机图

表 1-1 机构的样机参数表

参 数	数 值
动、定平台半径 $r/\text{mm}$	20
主、从动杆等效长度 $l/\text{mm}$	100
动平台质量 $m_m/\text{kg}$	$7.862 \times 10^{-3}$



续表

参 数	数 值
主动杆质量 $m_a/\text{kg}$	$2.4709 \times 10^{-2}$
从动杆质量 $m_s/\text{kg}$	$2.8243 \times 10^{-2}$

以下将选取机构的单自由度平移、单自由度旋转以及复合运动等三种典型运动情况,利用 ADAMS 动力学仿真软件分别对每种运动情形进行逆动力学计算与仿真:

(1) 单自由度平移,即沿  $\overrightarrow{O_B O_D}$  方向作纯平移运动。此时可定义动平台的运动轨迹为

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \\ z = 80.19\cos(\pi t/6) + 183.2\sin(\pi t/6) \end{cases}, \quad t \in [0,1] \quad (1-17)$$

单自由度平移时各参数( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ )的仿真值与其计算值的对比如图 1-5 所示。

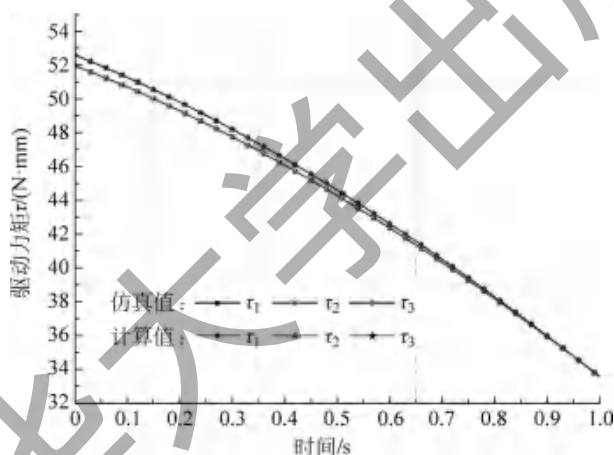


图 1-5 单自由度平移时各参数( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ )的仿真值与其计算值的对比

(2) 单自由度旋转,如固定关节  $S_1, S_2$ , 让  $S_3$  自由运动。此时可定义动平台的运动轨迹为

$$\begin{cases} x = 9.875t^2 + 29.05t - 0.1055 \\ y = 0 \\ z = -13.16t^2 + 33.9t + 80 \end{cases}, \quad t \in [0,1] \quad (1-18)$$

单自由度旋转时各参数( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ )的仿真值与其计算值的对比如图 1-6 所示。

(3) 复合运动(旋转的同时进行平移运动)。此时可定义动平台的运动轨迹为

$$\begin{cases} x = -13.63t^2 - 25.99t + 0.4965 \\ y = 16.29t^2 + 11.37t + 0.08299, \quad t \in [0,1] \\ z = -30.81t^2 + 101.6t + 79.65 \end{cases} \quad (1-19)$$

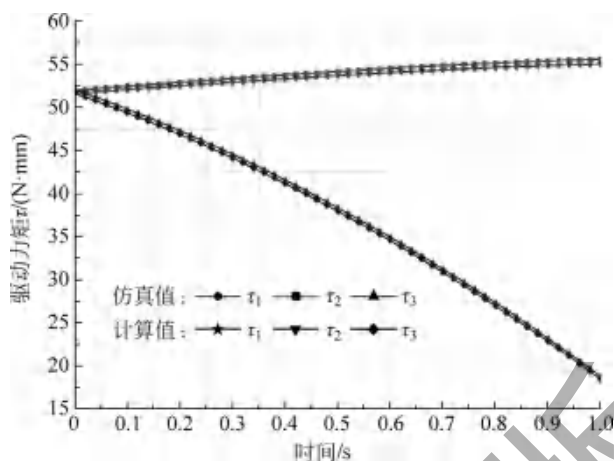


图 1-6 单自由度旋转时各参数( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ )的仿真值与其计算值的对比

复合运动时各参数( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ )的仿真值与其计算值的对比如图 1-7 所示。

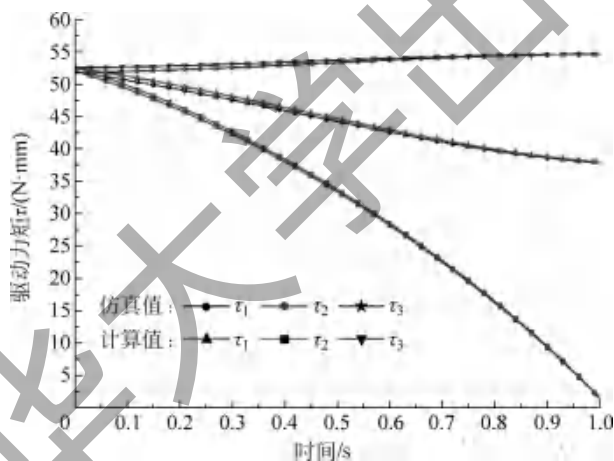


图 1-7 复合运动时各参数( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ )的仿真值与其计算值的对比

### 1.3 机器人学的发展趋势

机器人是最典型的机电一体数字化装备,其技术附加值较高,应用范围较广,作为先进制造业的支撑技术和信息化社会的新兴产业,机器人将对未来生产和社会发展起到越来越重要的作用。同时,作为智能化工厂的重要组成部分,机器人的未来发展前景广阔,尤其是在以中国为代表的亚洲市场,机器人正处于爆发式增长阶段,正处于相关技术发展的黄金时期。

工业机器人领域有如下几个值得关注的发展趋势:

(1) 机器人不断朝着高速度、高精度、高可靠性等方向发展,随着大规模的推广价格正不断下降。

(2) 机械结构模块化,如关节模块中的伺服电动机、减速机、检测系统等,为其子模块的三位一体化。国外已有模块化的装配机器人产品问世。同时,机器人的控制系统也向着基于PC的开放型控制器方向发展,趋向于标准化、网络化。

(3) 传感器作用突出。机器人本身大量采用位置、速度、加速度等传感器,并越来越多地集成用于辅助视觉、力、声觉、温度的传感器,其感知能力越来越强。

机器人传感技术是实现机器人智能化的关键技术之一。在工业自动化领域,机器需要传感器提供必要的信息,以正确地执行相关的操作。目前,机器人已经开始应用大量的传感器以提高其适应能力,除了机器人自身内部的位置、速度、加速度传感器外,还可以辅助大量的外部传感器,如视觉、力、触觉、安全、跟踪等传感器。

(4) 虚拟现实技术已成熟运用在仿真、离线编程、远程监控等领域,更是可以借自动语音应答(IVR)技术让操作者在身临其境的虚拟环境下远程操作与控制机器人。

多媒体和虚拟现实(virtual reality,VR)技术是新近研究的智能技术,它是一种将事件的现实性从时间和空间上进行分解后重新组合的技术。这一技术包括三维计算机图形学技术、多功能传感器的交互接口技术以及高清晰度的显示技术。虚拟现实技术可应用于遥控机器人和临场感通信等。

(5) 人机协作。近年来工业机器人在人机协作方面取得了突破性进展,机器人会更柔性化,工业机器人与人的协作非常重要,因此,出现了“协作机器人”。

协作机器人拥有两个特点:一个是机器与人的互动,互相合作;另一个是机器人的编程和维护非常方便。这种在协作方向较为优越的新型机器人能够真正和人类员工一起并肩工作,执行任务更加提质增效。从安全防护网走出来的协作机器人在克服了自身的安全隐患,证明自己可以与人并肩工作后,等待它们的是更加多样化的工作任务和工作环境。

## 习题

1. 利用拉格朗日方程法,建立一平面二连杆机械臂的动力学模型。
2. 结合个人的理解,总结一下机器人学的发展趋势。

## 第 2 章

# 机器人机构与驱动

### 2.1 机器人机构简介

机构有着明确的定义,其是由原动件和机架组成的,具有确定运动的运动链。研究机构的学科被称为机构学,是机械原理的重要分支。根据机构中各构件的相对运动是在二维平面内还是在三维空间中,可将机构分为平面机构和空间机构两大类。机构决定了机器人的结构类型,绝大部分机器人属于空间机构,少部分属于平面机构。

这里重点讨论三大类机器人机构:串联机构、并联机构和关节机构。

#### 2.1.1 机器人的串联机构

串联机构(serial mechanism, SM)是从基座开始由连杆和关节顺序连接而构成的开式链机构。串联机构常用一串运动副符号来表示,如 RCCC。这组符号反映了其空间机构的主要特点,它给出了从输入到输出所有运动副的个数及对应的符号,每一位符号都表示一个连接机架和输入杆的运动副,如 R 为转动副,后面三个 C 均为圆柱副。

典型的串联机器人机构包括例子有六自由度工业机器人、四自由度码垛机器人等,如图 2-1 所示。

#### 2.1.2 机器人的并联机构

并联机构(parallel mechanism, PM)是动平台和静平台通过至少两条独立的运动链相连接,具有两个或两个以上自由度且以并联方式驱动的一种闭链机构。从机构学的角度出发,只要是多自由度的,驱动器分配在不同环路上的并联多环机构都可以称为并联机构。

并联机器人(parallel robot),顾名思义就是采用并联机构的机器人。典型的

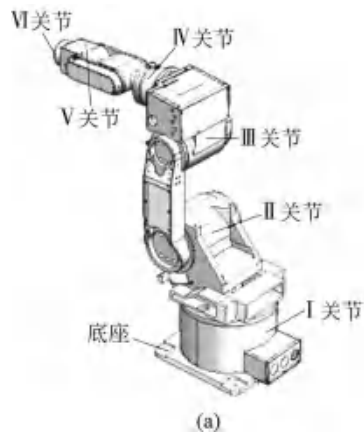


图 2-1 典型串联机器人

(a) 六自由度工业机器人；(b) 四自由度码垛机器人

并联机器人机构包括六自由度 Stewart 机构、四自由度 Delta 机构等，如图 2-2 所示。



(a)

(b)

图 2-2 典型并联机器人机构

(a) 六自由度 Stewart 机构；(b) 四自由度 Delta 机构

在表示并联机构时，可以将其每条分支中支链的基本副数和数字链连接起来，如 6-5-4 表示有 3 条分支，每条分支中支链的基本副数分别为 6、5、4。如果并联机构的分支链是对称结构形式，则可将其简化为下面的表示方法：6-SPS 并联机构（如图 2-2 中的 Stewart 机构），表示该机构由 6 个支链连接运动和固定平台，其各分支结构是对称的，并且每一个分支都是由球副-移动副-球副构成的。该表示法中机构名称开头的数字表示其机构的分支数，后面的字母表示其分支链的结构。若并联机构上、下平台有不同数目的球铰，则其可用两位数字表示，如 3/6-SPS 机构，表示上平台是三角形，有 3 个球副，下平台是六边形，有 6 个球副。

### 2.1.3 机器人的关节机构

关节是机器人连杆接合部位形成的运动副。对大多数机器人而言,关节只能是旋转式或者移动式的,相应地,这两种关节分别被定义为旋转关节和移动关节。根据结构的不同,可将旋转关节分为柱面式关节、球面式关节,将移动关节分为平面式关节、棱柱式关节、螺旋式关节。

关节机器人也称关节手臂机器人或关节机械手臂,是当今工业领域中最常见的工业机器人之一,广泛应用于诸多工业领域的机械自动化作业。比如,在自动装配、喷漆、搬运、焊接等工作中,都得到了实际的应用,大大提高了制造业的智能化水平。

关节机器人可根据其构造与工作性质进行分类,按照关节机器人的构造可将其分为以下几类:

(1) 五轴或六轴关节机器人,如图 2-3(a)所示:拥有五个或六个旋转轴,类似于人类的手臂。

(2) 托盘关节机器人,如图 2-3(b)所示:拥有两个或四个旋转轴,以机械抓手的定位来锁紧装置。

(3) 平面关节机器人 SCARA,如图 2-3(c)所示:由三个互相平行的旋转轴和一个线性轴组成。

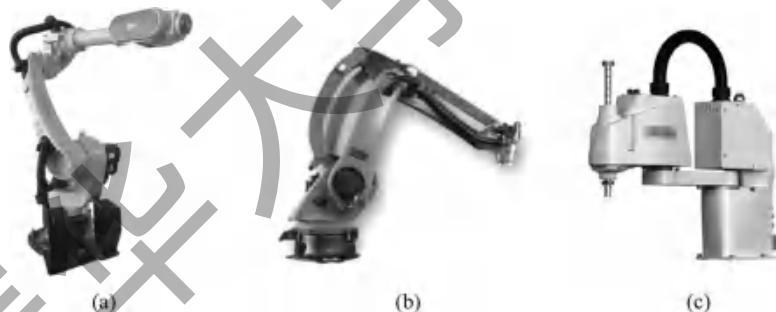


图 2-3 关节机器人

(a) 六轴关节机器人; (b) 托盘关节机器人; (c) 平面关节机器人 SCARA

此外,还可以按照关节机器人的工作性质分类,如搬运机器人、点焊机器人、弧焊机器人、喷漆机器人、激光切割机器人等。

## 2.2 机器人驱动简介

机器人连杆的运动来自机器人关节驱动机构。一个机器人关节驱动机构至少应包括三个组成部分:关节、驱动装置和传动装置。