

“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
现代机械工程系精品教材  
普通高等教育新工科机器人工程系列教材



Fundamentals of Robotics

# 机器人机构学基础

朱大昌 张春良 吴文强 © 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  
普通高等教育新工科机器人工程系列教材

# 机器人机构学基础

主 编 朱大昌 张春良 吴文强  
副主编 张 铁 苏 发 龙迎春 朱劲松  
参 编 陈首彦 赵志甲 欧阳海滨 马 鸽  
罗 欣 黎文博

机械工业出版社

本书全面介绍了机器人机构学基础理论知识。全书共7章。第1章介绍了必要的基础知识,如机器人的发展历史、机器人系统的组成、机器人机械结构、控制系统、机器人学研究前沿等。第2章和第3章分析了机器人的运动学,包括坐标系的建立、坐标变换、连杆参数和坐标系的建立、机器人运动学等。第4章分析了雅可比矩阵与速度运动学。第5章介绍了机器人动力学建模方法。第6章介绍了机器人在关节空间和操作空间的路径和轨迹规划。第7章介绍了MATLAB中机器人工具箱的应用。

本书可作为高等院校机器人工程、机械设计制造及自动化、自动化及计算机等专业本科教材或教学参考书,也可供从事机器人机构学领域的工程人员或研究人员参考。

本书配有PPT电子课件,免费提供给选用本书作为教材的授课教师。需要者请登录机械工业出版社教育服务网([www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com))注册下载。

#### 图书在版编目(CIP)数据

机器人机构学基础/朱大昌,张春良,吴文强主编. —北京:机械工业出版社,2020.4

“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 普通高等教育新工科机器人工程系列教材

ISBN 978-7-111-65060-7

I. ①机… II. ①朱…②张…③吴… III. ①机器人机构-高等学校-教材 IV. ①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第042521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:刘涛 责任编辑:刘涛 李乐 余皞

责任校对:张薇 封面设计:张静

责任印制:张博

北京铭成印刷有限公司印刷

2020年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·435千字

标准书号:ISBN 978-7-111-65060-7

定价:49.80元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

机工教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前 言

2013年12月,工业和信息化部出台的《关于推进工业机器人产业发展的指导意见》(工信部装〔2013〕511号)明确指出,到2020年,形成较为完善的工业机器人产业体系,培育35家具有国际竞争力的龙头企业和810个配套产业集群。2016年3月,工业和信息化部、国家发展改革委、财政部联合印发的《机器人产业发展规划(2016—2020)》(工信部联规〔2016〕109号)提出,加强人才队伍建设,组织实施机器人产业人才培养计划,加强大专院校机器人相关专业学科建设。

为加快机器人相关专业高层次人才培养,教育部近年增设了“机器人工程”专业。至今,有150多所高校的“机器人工程”本科新专业获教育部备案。本书面向新工科背景下的机器人工程专业及学科建设对专业人才培养的需求,阐释机器人机构学基础理论和技术,为机器人工程及相关专业的本科生和研究生,以及机器人研发人员提供系统性、基础性的知识。

本书主要讲解机器人运动中的数学计算,主要包括空间描述、运动学、轨迹规划。全书共7章,分为三部分:机器人机构学基础理论、运动学/动力学、机器人路径和轨迹规划。第一部分基础理论包括第1、2章,介绍机器人系统的组成、机器人位姿描述和齐次变换等内容。第二部分运动学/动力学包括第3章至第5章,系统介绍连杆参数与连杆坐标系,操作臂正、逆运动学,速度运动学,微分运动,雅可比矩阵,操作臂静力学,操作臂动力学等。操作臂动力学建模部分,采取微元的思想,系统介绍从微观领域向宏观领域的动力学方程推导方法。第三部分路径和轨迹规划,即第6章,系统介绍关节空间的轨迹规划方法、操作空间的轨迹规划方法等。基于理论知识讲解的基础上,第7章从实用角度介绍了MATLAB中的机器人工具箱应用。部分机器人工具箱的操作命令及算法程序实例在附录中给出。结合MATLAB中的机器人工具箱和机器人运动学/动力学建模算法程序实例,读者可以更为深入地了解机器人系统建模与仿真。

本书的特点是理论深度适当,易读易懂,理论和应用技术结合紧密。有关螺旋理论的内容可作为拓宽学生知识面的教学内容。

本书由广州大学朱大昌、张春良、吴文强任主编,编写分工如下:第1、2章由朱大昌、广州航海学院苏发共同编写,第3章由朱大昌、韶关学院龙迎春共同编写,第4、5章由朱大昌、吴文强共同编写,第6章由朱大昌、华南理工大学张铁共同编写,第7章由张春良、陈首彦、上海英特尔亚太研发有限公司朱劲松共同编写。附录A和附录B由广州大学赵志甲、欧阳海滨、马鸽共同编写,附录C算法编程示例由深圳众为兴科技股份有限公司罗欣和黎文博提供。

本书是广州大学优秀教材出版资助项目。

感谢深圳众为兴科技股份有限公司和上海英特尔亚太研发有限公司为本书提供的参考资料和案例资料,以及对本书编写给予的极大帮助。

机器人机构学是机器人工程专业的核心基础理论,涉及的内容范围较广泛。由于编者学术水平和实践经验有限,书中难免会有疏漏和谬误,欢迎读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 机器人概述	1
1.2 机器人机械结构	4
1.3 机器人控制系统	13
1.4 机器人的应用与发展	30
1.5 机器人学研究前沿介绍	41
习题	45
第 2 章 机器人位姿描述和齐次变换	46
2.1 机器人坐标系定义	46
2.2 位姿描述和坐标变换	48
2.3 齐次坐标和齐次变换	53
2.4 位姿变换	55
2.5 其他姿态描述	66
习题	69
第 3 章 操作臂运动学	72
3.1 自由度与约束	72
3.2 连杆参数与连杆坐标系	85
3.3 连杆变换和运动学方程	89
3.4 操作臂运动学方程实例	92
3.5 操作臂逆运动学	104
3.6 操作臂逆运动学实例	111
习题	118
第 4 章 速度运动学与雅可比矩阵	122
4.1 速度变换矩阵	122
4.2 微分运动与微分变换	130
4.3 速度雅可比矩阵	136
4.4 速度雅可比矩阵实例	143
4.5 逆雅可比矩阵和奇异性	146
习题	152
第 5 章 操作臂的力雅可比矩阵与动力学	154
5.1 操作臂力雅可比与静力计算	155
5.2 操作臂拉格朗日动力学	159

5.3	操作臂牛顿-欧拉动力学 .....	168
5.4	操作臂动力学模型实例 .....	172
5.5	操作空间动力学方程求解 .....	178
5.6	动力学模型的典型性质 .....	180
	习题 .....	186
第 6 章	路径和轨迹规划 .....	188
6.1	概述 .....	189
6.2	关节空间的轨迹规划方法 .....	192
6.3	操作空间轨迹规划 .....	202
	习题 .....	207
第 7 章	机器人机构学与 MATLAB 机器人工具箱 .....	210
7.1	MATLAB 中机器人工具箱的下载与安装 .....	210
7.2	操作臂位姿变换 .....	212
7.3	操作臂运动学 .....	220
7.4	操作臂动力学 .....	235
7.5	运动轨迹规划 .....	239
附录	.....	244
附录 A	线性代数 .....	244
附录 B	机器人工具箱 .....	251
附录 C	算法程序实例 .....	258
参考文献	.....	276

# 1

## 第 1 章

### 绪论

机器人学 (Robotics) 是对一类能代替人类完成体力活动和决策的机器所包含的机构组成原理、控制、视觉、传感与通信等交叉技术领域开展研究的学科。因此, 机器人学是一门涉及机械、控制、计算机、电子通信等领域的交叉学科。本书侧重于机器人机构的基本原理, 包括机器人机构学、运动学、动力学、轨迹规划等。

本章主要介绍机器人学所涉及的共性基础理论及先进机器人学 (Advanced Robotics) 中的多学科交叉融合所带来的发展趋势与应用前景。并以机器人核心技术为主线, 介绍了机器人机构组成原理、传感器、控制体系与控制方法、机器人应用与发展现状以及相关专业领域的研究热点。

#### 1.1 机器人概述

多少世纪以来, 人类坚持不懈地寻求自己的替身, 这些替身可以在各种情况下模仿人类与周围环境进行互动。哲学、经济学、社会学以及科学定律等是激发并维持这种研究热情的几大动因。

##### 1.1.1 机器人发展历程

普罗米修斯用黏土造人、赫费斯托斯铸造青铜奴隶巨人泰拉斯的传说, 说明古希腊神话深受幻想已久的制造与人类自身功能相似的机器和装置的影响。我国早在很久之前就有关于机器人的传说。据《列子·汤问》记载, 公元前 900 多年的西周时期, 有一位巧匠偃师, 造出了“千变万化, 惟意所适”的机器人。据考证, 618 年至 907 年间, 四川能工巧匠杨行廉制作的能走会动的“木僧”、江苏神匠马待封制作的“酒山”等都是早期的机器人。在我国广为流传的诸葛亮制作的木牛流马, 是一种能够负载奔走于崎岖山路的移动机器人。在国外, 1768 年至 1774 年间, 瑞士钟表匠德罗斯父子制造了三种拟人机器人: 写字偶人、绘图偶人、弹风琴偶人。

“机器人”一词最早由捷克作家卡雷尔·恰佩克 (Karel Capek) 在 1920 年创作的剧本《罗素姆万能机器人》(Rossum's Universal Robots) 中首次引入, robot 这个词在捷克语中是工作的意思。从此以后, 机器人这个词被广泛应用到各种机械设备中, 如水下机器人、服务机器人、焊接机器人等。基本上任何具备自主操作能力的东西 (通常是在计算机控制下) 都可被称作是机器人。在本书中, “机器人”一词特指工业机器人, 即由计算机控制的工业

操作臂。

“机器人学”这一概念在1950年由科幻小说作家艾萨克·阿西莫夫(Isaac Asimov)提出。他将机器人设想为徒有人类外形而完全不具备人类情感的机器,其行为完全听从于一个“正电子”大脑,该大脑由人类输入的程序控制,使机器人的行为能够遵从一定的伦理规则。阿西莫夫还提出了“机器人三原则”。后来,人们不断对机器人三原则进行补充、修正和发展,最终形成了以下机器人原则:

第一原则:机器人不得伤害人类,也不能坐视人类受到伤害而无所作为。

第二原则:机器人必须服从人类的命令,但不得违背第一原则。

第三原则:机器人必须保护自己,但不得违背第一原则和第二原则。

第四原则:机器人必须执行内置程序赋予的职能,但不得违反高阶原则。

繁殖原则:机器人不得参与机器人的设计和制造,除非新机器人行为符合机器人原则。

基于这些原则形成的行为规则后来成为机器人设计的规范,并成为工程师或技术专家设计制造产品的隐性规则。从工程角度而言,机器人是一个复杂的通用装置,所涉及的技术领域涵盖了力学、电气科学、自动控制、数字和计算机科学等。美国机器人学会(Robot Institute of America, RIA)给出了机器人的定义:机器人是一个可重复编程的多功能操纵器,为了执行不同的任务,通过不同的程序驱动可以用于移动材料、工具或者专业化装置。

20世纪60年代,恩格尔伯格(Engelberger)所制造的通用机械手成为第一个现代工业机器人,它是机器人市场中第一款机器人。因此,恩格尔伯格被称为机器人之父。这个机器人共有4个自由度,外形有点像坦克,基座上有一个大操作臂,大臂可绕轴在基座上转动,大臂上伸出一个操作臂,它相对大臂可以伸出或缩回。小臂顶部有一个手腕,可绕小臂转动。这个机器人的功能和人手臂功能相似,手腕前侧是手,即机器人末端操作器。此后,恩格尔伯格和德沃尔(Devol)成立了Unimation公司,兴办了世界上第一家机器人制造工厂,第一批工业机器人被称为“UNIMATE”,意思是“万能自动”。

20世纪70年代,随着计算机、现代控制、传感技术、人工智能技术的发展,机器人得到了迅速发展。1979年,Unimation公司推出了PUMA机器人,它有6个自由度、全电动驱动、多CPU控制,可配置视觉、触觉、力觉传感器,是当时一种非常先进的工业机器人。现在的工业机器人结构基本上都是以此为基础的。但是,这一时期的机器人属于“示教再现”型机器人,即只具有记忆、存储能力,仅能按相应的程序重复作业,对周围环境基本没有感知与反馈控制能力。这种机器人被称作第一代机器人。

进入20世纪80年代,随着传感技术以及信息处理技术的发展,出现了第二代机器人,即具有感知能力的机器人。它能够获得作业环境和作业对象的部分信息,并进行一定的实时处理,引导机器人进行作业。第二代机器人现已成熟并进入了实用化,以工业机器人为主要代表,在汽车、飞机、电子、通信等工业生产中发挥了重要作用。

第三代机器人是目前正在研究与发展的“智能机器人”,以达·芬奇“内窥镜手术器械控制系统”手术机器人和iRobot扫地机器人等为代表,在医疗、康复、家庭服务等领域得到了成功应用。随着人工智能理论与技术的发展,第三代机器人具有比第二代机器人更加完善的环境感知能力,而且还具有逻辑思维、判断、学习、推理和决策能力,可根据作业要求与环境信息进行自主工作。以Bigdog、仿生机器人Atlas等为代表的智能机器人系统,可提升人类的生活质量,并能够在复杂危险的环境中代替人类进行作业。

### 1.1.2 机器人系统组成

机器人作为一种典型的机电一体化系统，集机械工程、电气工程、系统设计工程、计算机工程、自动控制理论、传感器技术、人工智能、仿生学等众多学科于一体。其中，机械工程用来设计机械零部件、操作臂、末端执行器（夹具），也负责机器人的运动学、动力学和控制系统建模分析等；电气工程主要负责机器人的驱动器、传感器、动力源和控制系统的实现等；系统设计工程负责机器人的感知和控制算法；计算机工程负责机器人的逻辑、智能、通信和联网。

机器人系统（Robotic system）是一个复杂系统，其功能由多个子系统来实现，一般具备机械本体、控制系统、传感器、驱动器四个组成部分，如图 1-1 所示。为对本体进行精确控制，传感器应提供机器人本体或其所处环境的信息，控制系统依据控制程序产生指令信号，通过控制各关节运动坐标的驱动器，使各臂杆端点按照要求的轨迹、速度和加速度，以一定的姿态达到空间指定位置。驱动器将控制系统输出的信号转换成大功率的信号，以驱动执行器工作。

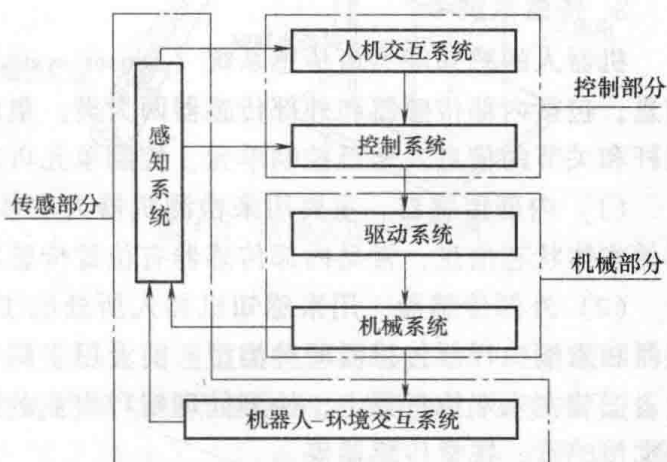


图 1-1 机器人系统结构图

#### 1. 机械系统

机器人系统最基本的组成部分是机械系统。机械系统（Mechanical system）通常是由一套运动装置（轮系、履带、机械腿）和操作装置 [操作臂、末端执行器（夹具）、人工手] 构成。典型工业机器人的机械本体多采用关节式机械结构，一般具有 6 个自由度，其中 3 个用来确定末端执行器的位置，另外 3 个则用来确定末端执行装置的方向（姿态）。操作臂上的末端执行装置可以根据操作需要换成焊枪、吸盘、扳手等作业工具。

#### 2. 驱动系统

驱动系统是机器人的动力系统，可提供作用于机械上的动力，使机器人实现移动和操作行为。因此，驱动系统使机器人的机械组件具有运动能力。驱动系统一般由驱动装置和传动装置两部分组成。

（1）驱动装置 依据驱动方式的不同，驱动装置可以分为电动、液压、气动三种类型。一般而言，对于高精度机器人多采用电动，如交流伺服驱动；对于重载低速机器人多采用液压驱动；对精度要求不高、又要满足快速的场合则采用气动方式。驱动装置（液压缸、气缸、电动机）可以与操作机直接相连，也可以通过传动装置与操作机相连。

1) 液压缸结构相对紧凑，能产生足够的力来驱动关节而无须减速系统，且液压系统的位置控制原理相对直观，因此早期工业机器人以及现代大型机器人一般采用液压系统驱动，液压系统主要存在泄漏、摩擦等不足之处。

2) 气缸具有液压的各种优点，而且由于泄漏出的是气体而不是液体，所以比液压干净。然而，由于气体的可压缩性以及密封造成的高摩擦，使得气压驱动器很难实现精确

控制。

3) 电动机是操作臂上最常用的驱动。尽管它们不具有液压或气动那么好的功率-重量比特性,但电动机的可控性好而且接口简单,所以广泛用于中小型操作臂上。现在的工业机器人主要采用交流伺服电动机作为驱动器。

(2) 传动装置 如果驱动器能够产生足够的力和力矩,那么可以把驱动器放在所驱动关节上或者其附近。然而,很多驱动器转速高、转矩低,所以需要安装减速系统。很多时候是把减速系统与传动系统的功能集成在一起。

传动装置通常有齿轮传动、链传动、谐波齿轮传动、螺旋传动、带传动等几种类型。

### 3. 传感系统

机器人的感知能力由传感系统 (Sensor system) 实现,可用于检测和收集内外环境状况信息,包括内部传感器和外部传感器两大类。集成在机器人中的传感器通过通信协议将每个连杆和关节的信息发送至控制单元,控制单元再决定机器人的运动状况。

(1) 内部传感器 主要用来检测机器人本体的状态,可以为机器人的运动控制提供必要的本体状态信息,常见内部传感器有位置传感器、速度传感器等。

(2) 外部传感器 用来感知机器人所处的工作环境或工作状态信息,又可分为环境传感器和末端执行器传感器两种类型。前者用于识别物体、检测物体与机器人的距离等信息,后者安装在末端执行器上,检测处理精巧作业的感觉信息。常见的外部传感器有力传感器、触觉传感器、视觉传感器等。

### 4. 控制系统

由感知到行为是由控制系统 (Control system) 实现的,控制系统能够在机器人自身及其环境因素约束下,根据任务规划技术设定的目标来指挥动作的执行。控制系统负责对指令信息、内外环境信息进行处理,并依据设定的模型和控制程序做出决策,产生相应的控制信号,通过驱动器驱动执行机构的各个关节按所需的顺序,沿确定的位置或轨迹运动,从而完成特定的作业。由此可见,控制器或控制单元有3个作用:①信息作用,即收集和处理由机器人传感器所提供的信息;②决策作用,即规划机器人机构的几何运动;③通信作用,即组织机器人及其环境之间的信息。

从控制系统的构成看,有开环控制系统和闭环控制系统之分;从控制方式看有程序控制系统、适应性控制系统和智能控制系统之分。

## 1.2 机器人机械结构

机器人四大系统组成中,机械结构是最基础的部分。机械结构的类型、布局、传动方式、驱动方式直接影响机器人的性能。由连杆、关节和其他结构零部件所构成的机器人主体称之为操作臂。当一个操作臂上装有传感器、夹具和控制系统时,该操作臂就变成了一个机器人。

### 1.2.1 连杆与运动副

机器人机械结构的基本元素为连杆和关节。连杆是机械系统中能够进行独立运动的单元体,机器人中的连杆多为刚性。两个连杆既保持接触又有相对运动的活动连接称之为关节,

又称运动副或铰链，运动副决定了两相邻连杆之间的连接关系。若多个连杆通过运动副以串联的形式连接成首尾不封闭的机构，称为串联机构；若多个连杆连接成首尾封闭的机构则称为并联机构。

### 1. 连杆

机械系统中能够进行独立运动的单元体称为构件，机器人中的构件多为刚性连杆，如图 1-2 所示。

机器人连杆是一刚性构件，连杆与连杆之间通过运动副（关节）连接可产生相对运动。

### 2. 运动副

运动副又称关节，它决定了两相邻连杆之间的连接关系。刚体在三维空间有 6 个运动自由度，运动副通过不同形式对刚体运动进行约束。

通常把运动副分为两类：高副和低副。两连杆之间通过面接触相对运动时，接触面的压强低，这样的运动副称为低副；连杆之间通过线接触或点接触相对运动时，接触面的压强高，则称为高副。19 世纪末期，Reuleaux 发现并描述了 6 种运动低副：旋转（转动）副、移动副、螺旋副、圆柱副、平面副和球面副，如图 1-3 所示。其中，旋转副、移动副和螺旋副具有 1 个自由度；圆柱副具有 2 个自由度；平面副和球面副具有 3 个自由度。机器人的关节只选用低副，其中最常用的低副是旋转副和移动副。

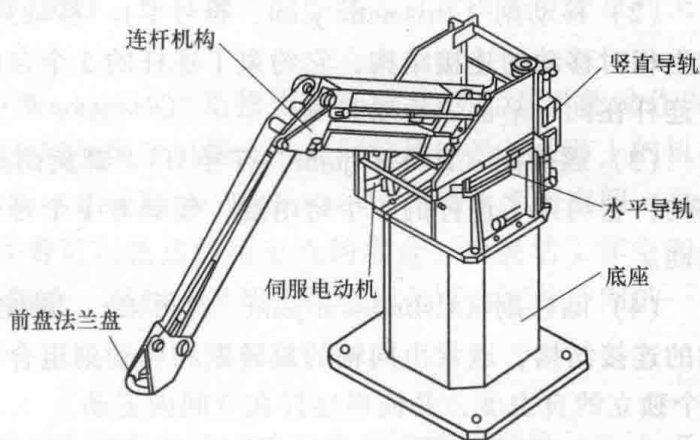


图 1-2 机器人连杆示意图

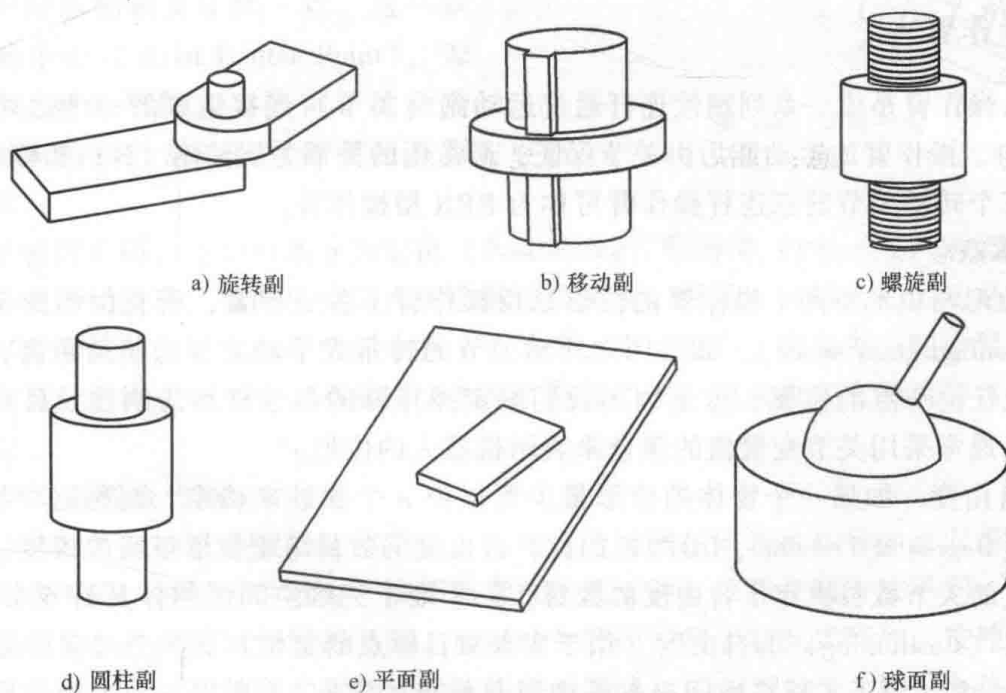


图 1-3 六种 Reuleaux 运动低副

(1) 旋转副 (Revolute joint, 符号 R) 也称为转动副，是一种使两个连杆仅发生相对转动的连接结构，它约束了连杆的 5 个自由度，仅具有 1 个转动自由度，并使得两个连杆在

同一平面内运动。常用的胡克铰 (Universal joint, 符号 U) 是一种特殊的低副机构, 它是由 2 个轴线正交的旋转副连接而成的, 具有 2 个相对转动的自由度, 约束了刚体的其他 4 个运动, 可使得两个连杆在空间内运动。

(2) 移动副 (Prismatic joint, 符号 P) 移动副也称为平动副, 是一种能使两个连杆仅发生相对移动的连接结构, 它约束了连杆的 5 个自由度, 仅具有 1 个移动自由度, 并使得两个连杆在同一平面内运动。

(3) 螺旋副 (Helical joint, 符号 H) 螺旋副是一种能使两个连杆发生螺旋运动的连接结构, 它约束了连杆的 5 个自由度, 仅具有 1 个自由度, 并使得两个连杆在空间某一范围内运动。

(4) 圆柱副 (Cylindrical joint, 符号 C) 圆柱副是一种能使两连杆发生同轴转动和移动的连接结构, 通常由同轴的旋转副和移动副组合而成, 它约束了连杆的 4 个自由度, 具有 2 个独立的自由度, 并使得连杆在空间内运动。

(5) 平面副 (Planar joint, 符号 E) 平面副是一种允许两连杆在平面内任意移动和转动的连接结构, 可以看成由 2 个独立的移动副和 1 个旋转副组成。它约束了连杆的 3 个自由度, 只允许两个连杆在平面内运动。由于缺乏物理结构与之相对应, 它在工程中并不常用。

(6) 球面副 (Spherical joint, 符号 S) 球面副是一种能使两个连杆在三维空间内绕同一点做任意相对转动的运动副, 可以看成由轴线汇交于一点的 3 个旋转副组成。它约束了刚体的三维移动, 具有 3 个自由度。

运动副还可以有其他不同的分类方式, 如根据运动副在机构运动过程中的作用可分为主动副 [或称积极副 (Active joint)、驱动副 (Actuated joint)] 和被动副 (Passive joint)。根据运动副的结构组成还可分为简单副 (Simple joint) 和复杂副 (Complex joint)。

## 1.2.2 操作臂

机器人操作臂是由一系列刚性连杆通过运动副 (关节) 连接组成的一个运动链 (Kinematic chain)。操作臂的运动能力由关节保证, 最常用的关节为旋转副 (R) 和移动副 (P)。一个带有三个转动关节的三连杆操作臂可称为 RRR 型操作臂。

### 1. 基本概念

(1) 位形与位形空间 操作臂的位形是指操作臂上各点位置, 所有位形的集合称为位形空间 (Configuration space)。如果已知转动关节的转角或平动关节的移动距离, 就可以推断操作臂上任何一点的位置, 这是因为我们假定操作臂的各连杆均为刚性, 且底座是固定的。所以, 通常采用关节变量值的集合来表示机器人的位形。

(2) 自由度 如果一个物体的位形最少可以由  $n$  个参数来确定, 则称这个物体具有  $n$  个自由度 (Degree of Freedom, DOF)。因此, 自由度的数目等于位形空间的维度。对于一个操作臂, 它的关节数目决定了自由度的数目。一个处于三维空间的物体具有 6 个自由度: 3 个对应位置 (Positioning) 的自由度 (用于实现对目标点的定位) 和 3 个对应姿态 (Orientation) 的自由度 (用于实现在空间坐标系中对目标点的定向)。所以, 一个操作臂通常最少具有 6 个独立的自由度。如果自由度小于 6, 操作臂将无法以任意姿态到达工作空间中的每一点。如果系统可用的自由度超过任务中的变量个数, 则从运动学角度而言, 操作臂是冗余 (Redundant) 的。但冗余机器人可在实现预定轨迹的前提下, 具有最佳的灵活性和避障能

力。一般称自由度大于6的操作臂为运动学冗余 (Kinematically Redundant) 操作臂。

(3) 状态空间 位形是对操作臂几何结构的瞬时描述, 与动态响应无关。而操作臂的状态 (State) 是指这样一组变量: 根据操作臂的动力学描述及未来输入, 确定操作臂未来的时域响应。状态空间是所有可能的状态的集合。所以操作臂的状态可以由关节变量和关节速度来确定。

(4) 工作空间 操作臂的工作空间 (Workspace) 是指当操作臂执行所有可能动作时, 其末端执行器扫过的总体空间体积。工作空间受限于机器人的几何结构以及各关节上的机械限位。工作空间一般可以分为可达工作空间 (Reachable Workspace) 和灵活工作空间 (Dexterous Workspace)。可达工作空间是指操作臂可以抵达的所有点的集合, 而灵活工作空间是指操作臂可以以任意姿态抵达的所有点的集合。显然, 灵活工作空间是可达工作空间的一个子集。

## 2. 手腕和末端执行器

(1) 末端执行器 安装在运动链最后一个连杆上的元件被称为末端执行器 (End-effector), 用于完成机器人特定的工作要求。最简单的末端执行器就是夹具 (手爪), 它通常只有两个动作: 张开和闭合, 可以满足物料搬运、抓取简单工具的要求, 但达不到其他诸如焊接、装配、研磨等任务的需求。因此特殊用途末端执行器、根据任务进行快速更换的夹具设计方法, 以及仿人手的研发成为该技术领域的研究热点。

(2) 手腕 在操作臂和末端执行器之间的运动链中的关节被称为手腕 (Wrist), 手腕关节几乎全都是转动关节。在操作臂设计中越来越普遍地使用球形手腕, 其中手腕的三个旋转轴相交于同一点, 这一点被称为手腕中心 (Wrist Center Point), 如图 1-4 所示。球形手腕大大简化了运动分析, 可以对末端执行器的位置和姿态进行有效的解耦。

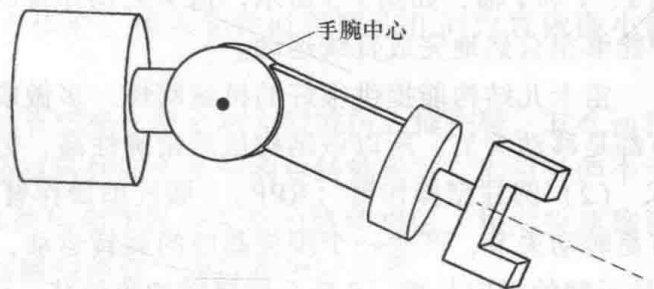


图 1-4 球形手腕

根据功能的不同, 运动可划分为定位 (Positioning) 和指向 (Pointing) 两类。通常定位功能由操作臂运动实现, 指向功能由机械手腕运动实现。可见, 机器人的运动是由手臂和手腕的运动组合而成的。通常操作臂部分有3个关节, 用以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个关节轴线相交, 用来改变末端执行器的姿态, 称为定向机构。

## 3. 常见串联式操作臂

操作臂的任务是满足手腕的定位需求, 进而由手腕满足末端执行器的定向需求。操作臂按照驱动方式不同, 可以分为电力、液压或者气动式三种; 按照控制方法不同, 可以分为伺服和非伺服两种; 按照应用领域的不同, 可以分为装配式和非装配式两种; 按照几何结构的不同, 可以分为串联式和并联式两种。对于串联机器人 (开链机构), 每一个移动关节或转动关节都为机械结构提供一个自由度。移动关节可以实现两个连杆之间的相对平移, 而转动关节可以实现两个连杆之间的相对转动。对于并联机器人 (闭链机构), 由于闭环所带来的约束, 自由度要少于关节数。

串联式操作臂的 3 个关节连接 3 个连杆，形成定位机构。3 个关节的种类决定了串联机器人不同的工作空间形式：常见的有笛卡儿型、圆柱型、球坐标型、SCARA 型和关节型等几种典型类型，见表 1-1。

表 1-1 机器人工作空间的典型类型

机器人工作空间的类型	关节 1	关节 2	关节 3	旋转关节数
笛卡儿(直角坐标)型	P	P	P	0
圆柱型	R	P	P	1
球坐标型	R	R	P	2
SCARA 型	R	R	P	2
关节(拟人)型	R	R	R	3

根据国际机器人联合会 (International Federation of Robotics, IFR) 的最新报告，截至 2017 年，全世界安装的机器人操作臂中，78% 为关节型，18% 为笛卡儿型，4% 为圆柱型及 SCARA 型。

(1) 笛卡儿型操作臂 (PPP) 笛卡儿型操作臂，也称为直角坐标型操作臂，它的外形轮廓与数控镗铣床相似，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，如图 1-5 所示。笛卡儿操作臂的运动描述是所有机器人中最简单的，在空间中能够很自然地完成直线运动。

笛卡儿结构能提供很好的机械刚性，多做成大型龙门式或框架式机器人。由于所有的关节都是移动关节，所以该结构虽然精确性高，但是灵活性差。

(2) 圆柱型操作臂 (RPP) 圆柱型操作臂与笛卡儿型操作臂的区别在于，其第一个关节是转动关节，产生一个围绕基座的旋转运动，如图 1-6 所示。它以  $r$ 、 $\theta$  和  $z$  为坐标，其中  $r$  是手臂的径向长度， $\theta$  是手臂绕轴的角位移， $z$  是手臂在垂直轴上的高度。如果  $r$  不变，手臂的运动将形成一个圆柱表面，空间定位比较直观。手臂收回后，其后端可能与工作空间内的其他物体发生碰撞，移动副不易防护。

圆柱型结构提供了良好的机械刚性，其腕部的定位精度有所降低，而水平方向的动作能力有所提高。

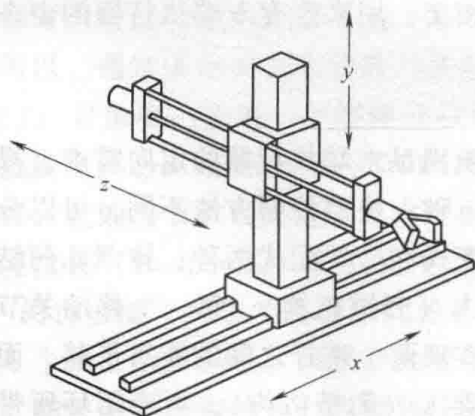


图 1-5 笛卡儿型操作臂

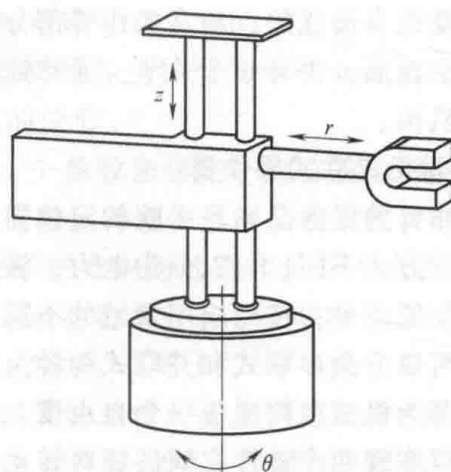


图 1-6 圆柱型操作臂

(3) 球坐标型操作臂 (RRP) 球坐标型操作臂与圆柱型操作臂的不同点在于, 其第二个移动关节被转动关节所代替, 如图 1-7 所示。当工作任务用球坐标系描述时, 其每一个自由度对应笛卡儿空间变量。球坐标型操作臂的机械刚性比上述两种类型要差, 而其机械结构更复杂。径向操作能力较强, 但腕部的定位精度较低。

Stanford 机器人就属于这一类, 这类机器人占地面积小, 工作空间较大, 移动关节不易防护。

(4) 选择顺应性装配型操作臂 (RRP) 选择顺应性装配 (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly, SCARA) 型操作臂顾名思义, 它专门从事装配操作。虽然 SCARA 机器人具有 RRP 结构, 但它与球坐标型操作臂在外观和应用范围方面都有很大不同。球坐标型操作臂的运动轴是相互垂直的, 而在 SCARA 型操作臂中, 两个转动关节和一个移动关节通过特别的布置, 使得所有的运动轴都是平行的, 如图 1-8 所示。这种结构的机械特点在于结构轻便, 响应快。例如 Adept 1 型 SCARA 机器人运动速度可达  $10\text{m/s}$ , 比一般关节式机器人速度快数倍。

SCARA 机器人在  $x$ 、 $y$  方向上具有良好的顺应性, 在  $z$  方向上具有良好的刚度, 能够带来垂直方向装载的高度稳定性和水平方向装载的灵活性, 此特性特别适合于装配工作。例如抓取元件时沿水平方向定位, 沿竖直方向插入作业, 插入元件时可顺应孔的位置做微小调整, 适合于“上下”安装的装配作业。

(5) 关节 (拟人) 型操作臂 (RRR) 关节型操作臂也称为肘或仿人操作臂。其几何构型由三个转动关节实现, 第一个关节的旋转轴与另外两个关节的旋转轴垂直, 而另外两个关节的旋转轴是平行的, 如图 1-9 所示。由于其结构和功能与人类的胳膊相似, 相对应地称第二个关节为肩关节, 第三个关节由于连接了胳膊和前臂, 所以称为肘关节。

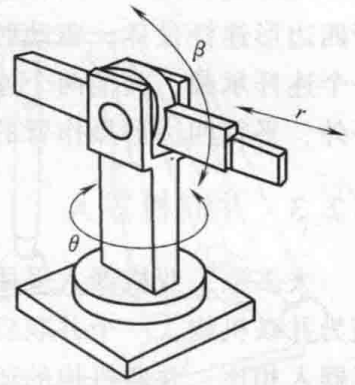


图 1-7 球坐标型操作臂

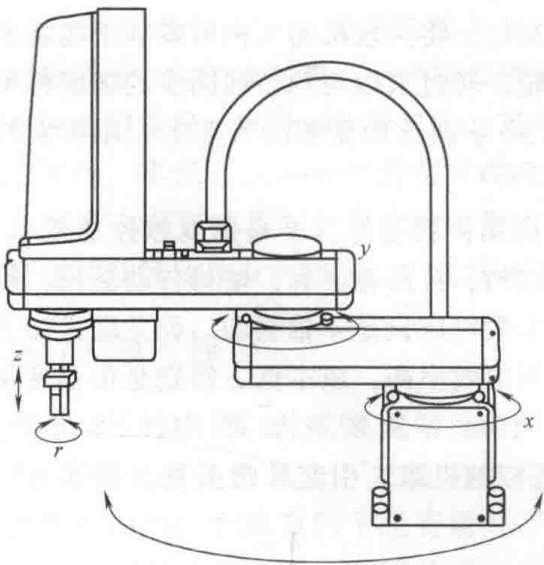


图 1-8 SCARA 型操作臂

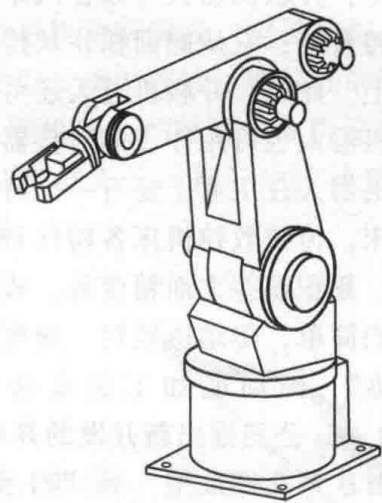


图 1-9 关节 (拟人) 型操作臂

关节型操作臂动作灵活、工作空间大, 在作业空间内手臂的干涉小, 结构紧凑, 关节上运动部位容易密封防尘。其缺点是运动学求解复杂, 确定末端执行器的位姿不直观。

ABB 公司的 IRB1400 机器人就是一个六自由度的关节型操作臂。IRB1400 机器人采用平行四边形连杆设计, 驱动肘关节的电动机安装在第一个连杆处。由于电动机的重量主要由第一个连杆承载, 其他两个连杆可以制作得更为轻便, 因而也降低了对电动机驱动力的要求。另外, 平行四边形操作臂的动力学比肘关节操作臂要简单, 因而更加容易控制。

### 1.2.3 并联机器人

大多数工业机器人采用了开链机构, 但也有部分采用的是闭链机构。闭链机构的典型代表为并联机构, 一个并联机构由两个或多个运动链将其底座和末端执行器连接起来。与串联机器人相比, 并联机构的闭式运动链可以极大提高结构刚度, 因而精度更高。但并联机器人关节的活动范围受限, 工作空间较小。同时, 并联构型及自由度分析比串联机构要复杂得多。

#### 1. 并联机器人的特点

并联机器人 (Parallel Mechanism, PM), 是由动平台和定平台通过至少两个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机械臂。与串联机器人相比较, 并联机器人具有以下特点:

- 1) 无累积误差, 精度较高。
- 2) 驱动装置可配置于定平台上或接近定平台的位置, 运动部分重量轻, 速度高, 动态响应好。
- 3) 结构紧凑, 刚度高, 承载能力大。
- 4) 完全对称的并联机构具有较好的各向同性。
- 5) 工作空间较小。
- 6) 串联机器人正解容易, 反解难; 并联机器人反解容易, 正解难。

由于串联、并联机器人在结构上和性能特点上的对偶关系, 两者在应用上不是替代作用而是互补关系, 且并联机器人有它的特殊应用领域。

工业上, 并联机器人可以在汽车总装线上安装车轮。将并联机器人横向安装于能绕垂直线回转的转台上, 它从侧面抓住从传送链送来的车轮, 转过来以与总装线同步的速度将车轮装到车体上。此外, 并联机器人还可以倒装在具有  $x$ 、 $y$  两方向受控的天车上, 用作大件装配。并联机器人也可用作飞船对接器的对接机构。

并联机器人在工业上还有一个特别突出的重要应用, 就是作为 5 自由度数控加工中心, 即并联机床。传统数控机床各构件是串联的, 悬臂结构, 且层叠嵌套, 使得传动链长, 传动系统复杂, 累积误差大而精度低, 成本昂贵, 至今多数机床只是 4 轴联动。而并联式加工中心结构特别简单, 传动链极短, 刚度大、质量轻, 切削效率高, 成本低, 特别是很容易实现“5 轴联动”, 因而能加工更复杂的三维曲面。1994 年美国芝加哥 IMTS 博览会上, Giddings&Lewis 公司推出新开发的并联 VARIAX “虚拟轴机床”引起广泛关注, 被称为“本世纪机床首次革命性改型”和“21 世纪的机床”。

#### 2. 典型并联机器人

Stewart 平台 (图 1-10) 和 Delta 机构 (图 1-11) 是两种常见的并联机构。通过构型的演变, 可以在 Stewart 平台和 Delta 机构的基础上衍生出多种不同构型的并联机器人。

(1) Stewart 平台 Stewart 并联机器人由上部的动平台, 下部的静平台和连接动、静平

台的6个完全相同结构的支链所组成。每个支链均由一个移动关节（移动副）驱动，工业上重载情况下常用液压缸来驱动，每个支链分别通过两个球型关节（球面副）与上、下两个平台相连接。动平台的位置和姿态由6个直线液压缸（驱动器）的行程长度所决定。这种操作臂将手臂的3个自由度和手腕的3个自由度集成在一起。由于载荷由6个支链共同承担，具有刚度高的特点，但动平台的运动范围有限。这种 Stewart 平台型并联机器人运动学反解特别简单，而运动学正解十分复杂，有时还不具备封闭的形式。目前，Stewart 平台型并联机器人已经在航空、航天、海底作业、地下开采、制造装配等行业有着广泛的应用。

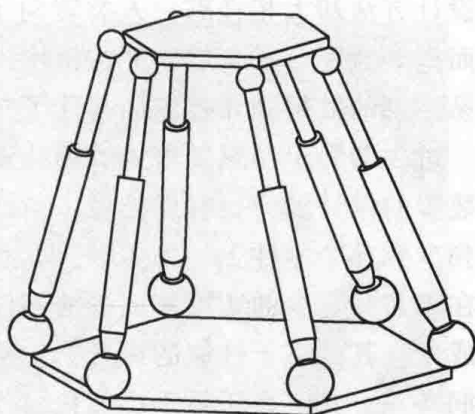


图 1-10 Stewart 并联机构

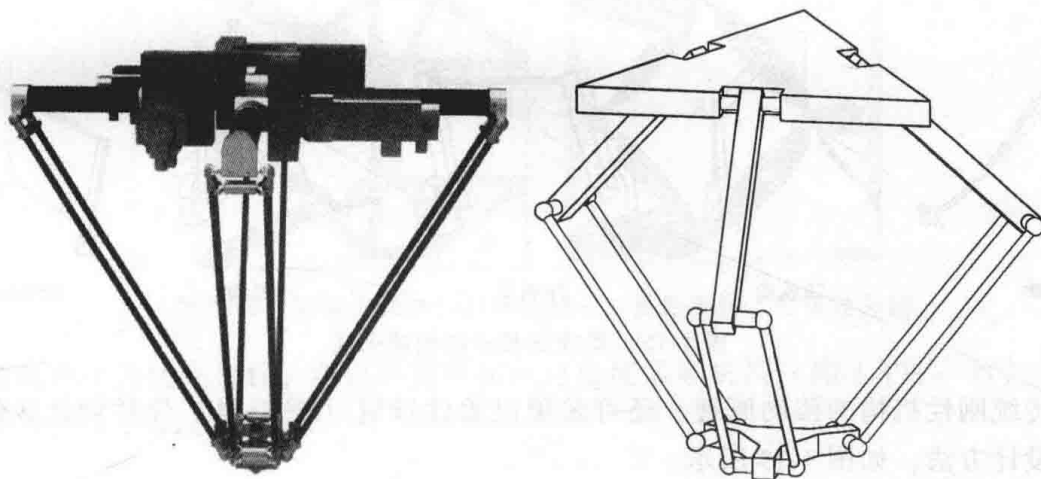


图 1-11 Delta 机构

(2) Delta 机构 Delta 并联机器人由上部的静平台与下部的动平台及3个结构完全对称的支链所组成。每个支链都由一个定长杆和一个平行四边形机构所组成，定长杆与上面的静平台用转动副连接，平行四边形机构与动平台及定长杆均以转动副连接，这三处的转动副轴线相互平行。不同于 Stewart 平台型并联机器人，Delta 并联机器人的驱动电动机安装在静平台上，因而3个支链具有非常小的质量，使得 Delta 并联机器人运动部分的转动惯量很小，适于高速和高精度作业的要求，广泛应用于轻工业生产线上。

#### 1.2.4 柔顺机构

除了上述的串联、并联机械结构之外，还有一种可以实现微米/纳米尺度超精密加工、定位的机构组成形式——柔顺机构。柔顺机构的一个典型例子是有着几千年历史的弓箭，如图 1-12 所示。利用弓臂的柔性存储能量，并利用能量的瞬间释放将箭射出去。早期的飞行器也采用了柔顺机构，例如莱特兄弟利用机翼的翘曲实现对早期飞行器的控制。



大自然能够实现这样的设计源于其设计方法，而人类使用图 1-12 早期的柔顺机构构型