

前言

当前，机器人+制造业、机器人+农业、机器人+医疗健康、机器人+养老服务、机器人+教育、机器人+安全应急和极限环境应用等蓬勃发展，正极大改变着人们的生产和生活方式，为社会发展注入强劲动能。机器人技术作为人类20世纪最伟大的发明之一，被誉为“制造业皇冠顶端的明珠”，其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志。当前，新一轮科技革命和产业变革加速演进，新一代信息技术、生物技术、新能源、新材料等与机器人技术深度融合，机器人产业迎来升级换代、跨越发展的窗口期。面对新形势、新要求，未来一段时间，是我国机器人产业自立自强、换代跨越的战略机遇期。我们必须抢抓机遇，直面挑战，加快解决技术积累不足、产业基础薄弱、高端供给缺乏等问题，推动机器人产业迈向高端。《“十四五”机器人产业发展规划》提出，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；到2035年，我国机器人产业综合实力达到国际领先水平，机器人成为经济发展、人民生活、社会治理的重要组成。

从工厂车间的工业机器人到农业生产机器人，从家用服务机器人到抢险救援机器人，再到深空探测机器人，机器人已在生产生活中逐渐得到推广应用，对各行各业的发展起到了巨大的推动作用。然而，机器人技术毕竟发展历史不长，普通群众接触机器人的机会很少，还比较陌生，对其没有深入的了解。

本书致力于向全社会普及机器人知识，促进人们对机器人的了解，开阔视野，激发人们研究与应用机器人的热情。全书内容主要包括机器人的概念、基本组成、发展历史和种类以及组成机器人身体的各部分，并详细介绍工业机器人、服务机器人、特种机器人的各种不同类型，简要介绍国内外著名工业机器人公司等。以通俗易懂的语言和大量的图片，为读者揭开机器人的神秘面纱，通过图文并茂的事例启迪读者体会机器人对于人们生产生活的重要性。

本书作为一本科普读物，目的在于弘扬科学精神，普及科学知识，向群众宣讲科技知识、科技政策，在参与和体验科技中感受到科学世界的乐趣，在主动探索、发现的过程中获得科学的启蒙，激发大家崇尚科学、探索未知、敢于创新的热情，让“热爱科学、崇尚科学”的科普理

化学工业出版社

念深入每个人心中，为社会营造热爱科学、崇尚科学的良好氛围。

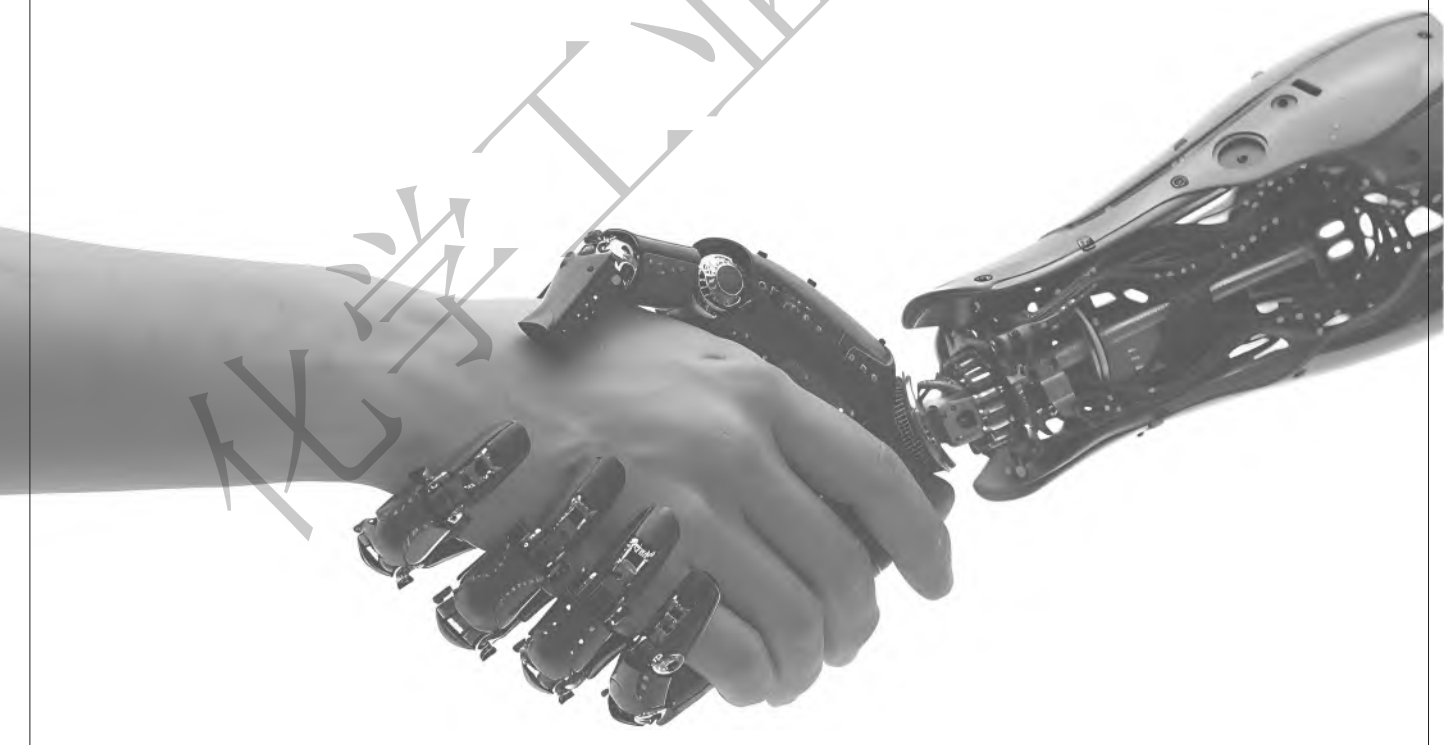
本书由河北科技大学李文忠、冯运、蔡建军合作完成，在编写过程中，得到了河北科技大学黄风山教授和张付祥教授的大力支持；在搜集写作素材过程中，得到了范昶、马子素、赵伯健、和鹏辉、李子函等同学的大力帮助。此外，还参考并引用了一些机器人方面文献资料，在此一并表示衷心感谢。机器人技术发展至今，出现的机器人种类何止千万，本书介绍的只是作者所了解的有限几种，可能会挂一漏万，不求包罗万象，只为抛转引玉。

由于作者水平有限，书中难免存在诸多不足及疏漏，恳请广大读者批评指正。

本书由河北省创新能力提升计划项目资助完成，在此致以特别感谢！

作　者

化学工业出版社



Contents



目录

第 1 章　了解机器人　001

1.1　什么是机器人　001
1.2　机器人的发展　002
1.2.1　古代机器人　002
1.2.2　现代机器人　004
1.2.3　中国机器人的发展　009
1.3　机器人的基本组成　012
1.4　机器人的分类　014
1.4.1　按应用环境分类　015
1.4.2　按移动方式分类　015
1.4.3　按使用空间分类　017
1.4.4　按发展阶段分类　017
1.4.5　按机器人机械结构分类　018

第 2 章　机器人的整体结构　019

2.1　机器人的机身及臂部　019
2.1.1　直角坐标机器人　019
2.1.2　柱面坐标机器人　020
2.1.3　球面坐标机器人　021
2.1.4　关节机器人　021
2.1.5　并联机器人　022
2.1.6　混联机器人　022
2.2　机器人的手　023
2.2.1　夹钳式机械手　023
2.2.2　吸附式机械手　024
2.2.3　专用末端操作器　026
2.2.4　仿生手　026
2.3　机器人的手腕　028
2.4　机器人的移动机构　029
2.4.1　轮式移动机构　030
2.4.2　履带式移动机构　031
2.4.3　仿生足式移动机构　033
2.4.4　水中机器人的游动机构　034
2.4.5　飞行机器人的飞行机构　034

化学工业出版社

2.4.6 复合式的移动机构 035
2.5 机器人的动力系统 035
2.5.1 电气驱动系统 036
2.5.2 液压驱动系统 038
2.5.3 气压驱动系统 038
2.5.4 新型驱动器 039
2.6 机器人的传动装置 040
2.7 机器人的感觉器官 042
2.7.1 机器人的位置位移传感器 043
2.7.2 机器人速度、角速度传感器 045
2.7.3 力觉传感器 046
2.7.4 机器人的视觉 048
2.7.5 机器人的听觉 050
2.7.6 接触觉传感器 050
2.7.7 机器人的接近觉 052
2.7.8 机器人的距离传感器 053
2.7.9 机器人姿态传感器 054
2.7.10 机器人滑觉传感器 055
2.7.11 温度传感器 056
2.7.12 机器人的嗅觉 057

第3章 工业机器人 059

3.1 焊接机器人 060
3.1.1 点焊机器人 060
3.1.2 弧焊机器人 061
3.1.3 激光焊接机器人 062
3.1.4 搅拌摩擦焊机器人 062
3.2 搬运码垛机器人 063
3.3 装配机器人 065
3.4 喷涂机器人 067
3.5 加工机器人 068
3.5.1 切割机器人 068
3.5.2 抛光打磨机器人 069
3.5.3 冲压机器人 071
3.5.4 上下料机器人 074
3.6 物流机器人 075
3.6.1 RGV 机器人 076
3.6.2 AGV 机器人 076
3.6.3 自动叉车机器人 077
3.6.4 AMR 机器人 077
3.6.5 复合机器人 078
3.6.6 四向穿梭车 078
3.6.7 料箱机器人 079
3.7 协作机器人 079
3.8 并联机器人 082
3.9 钢铁行业的机器人 087

化学工业出版社

第 4 章　服务机器人　092

4.1　农业机器人　092
4.1.1　收获机器人　093
4.1.2　喷药机器人　095
4.1.3　种植机器人　096
4.1.4　嫁接机器人　097
4.1.5　修剪机器人　098
4.1.6　除草机器人　098
4.1.7　果实分拣机器人　099
4.1.8　动物饲喂机器人　100
4.1.9　放牧机器人　101
4.1.10　其他农业机器人　101
4.2　矿业机器人　104
4.2.1　采掘机器人　104
4.2.2　井下喷浆机器人　105
4.2.3　清仓机器人　106
4.2.4　巡检机器人　107
4.2.5　其他矿用机器人　108
4.3　建筑机器人　109
4.3.1　测量与检测机器人　109
4.3.2　室内喷涂机器人　110
4.3.3　墙板安装机器人　111
4.3.4　地坪涂漆机器人　111
4.3.5　平直抹灰机器人　112
4.3.6　钢筋作业系列机器人　112
4.3.7　拆除机器人　113
4.4　医用机器人　113
4.4.1　外科手术机器人　114
4.4.2　血管机器人　114
4.4.3　康复机器人　115
4.4.4　护理机器人　116
4.4.5　医学教育机器人　117
4.5　家用服务机器人　119
4.5.1　家务机器人　119
4.5.2　养老助残机器人　121
4.5.3　娱乐机器人　122
4.5.4　家用搬运机器人　123
4.5.5　家庭厨房机器人　123
4.5.6　家用教育机器人　124
4.6　公共服务机器人　124
4.6.1　迎宾接待机器人　125
4.6.2　引导机器人　125
4.6.3　讲解机器人　126
4.6.4　送餐机器人　126

第 5 章　特种机器人　128

5.1　水下机器人　128

化学工业出版社

5.1.1 载人潜水器 128
5.1.2 遥控潜水器 130
5.1.3 自主潜水器 132
5.2 安防机器人 134
5.2.1 安检机器人 134
5.2.2 巡逻机器人 139
5.2.3 排爆机器人 141
5.2.4 管控机器人 143
5.3 危险环境作业机器人 144
5.3.1 消防机器人 144
5.3.2 应急救援机器人 147
5.3.3 海洋捕捞机器人 150
5.3.4 核工业机器人 151
5.3.5 极地科考机器人 154
5.4 军用机器人 156
5.4.1 地面武装机器人 156
5.4.2 水下军用机器人 161
5.4.3 空中军用机器人 162
5.5 深空探测机器人 168
5.5.1 月球探测机器人 169
5.5.2 火星探测机器人 171
5.5.3 其他太空探测机器人 177
第 6 章 国内外著名的工业机器人品牌和公司 180
6.1 国内工业机器人品牌和公司 180
6.1.1 新松机器人 180
6.1.2 埃斯顿机器人 182
6.1.3 埃夫特机器人 183
6.1.4 华数机器人 183
6.1.5 广数机器人 185
6.1.6 大族机器人 185
6.1.7 博实机器人 186
6.1.8 阿童木机器人 187
6.2 国外著名工业机器人公司 188
6.2.1 ABB 机器人 188
6.2.2 库卡机器人 189
6.2.3 安川机器人 190
6.2.4 发那科机器人 191
6.2.5 爱普生机器人 192
6.2.6 优傲机器人 193
6.2.7 NACHI 机器人 194
6.2.8 现代重工机器人 195
6.2.9 史陶比尔机器人 195
6.2.10 柯马机器人 196
6.2.11 川崎机器人 197
参考文献 199

化学工业出版社



第1章 了解机器人

随着科技的进步，机器人的时代到来。从工业生产到农业种植，从医疗卫生到家庭服务，从深海探测到太空探险，到处都是机器人的身影，它正成为人类非常亲密的伙伴，代替人类完成很多工作，扮演着不可或缺的角色。人类自古以来就幻想着有一种类似人的机器，能代替人类完成繁重的工作，为此，几千年来进行了无数的探索。直到现代机器人的产生，它才真正能够为人类服务，给人类带来巨大的帮助，它正对人类的生产生活的方方面面产生着影响，这是人类20世纪伟大的发明之一。

1.1 什么是机器人

对于机器人，大家脑海中立刻出现的很可能是科幻电影中那些具有人的形状、拥有高级智慧、四肢健壮、能力超强的形象，例如变形金刚、机械战警。但是，现实中远远不是这么简单。

关于什么是机器人这个问题，至今仍然没有统一的定义，在各领域存在不同的说法。其原因之一是随着机器人技术的发展，新的机型、新的功能不断涌现，应用领域不断扩展，机器人的定义也不断被充实和创新，所涵盖的内容越来越丰富。但最根本的原因还是机器人涉及了人的概念，成为一个难以回答的哲学问题。

1920年，捷克作家卡雷尔·卡佩克发表了科幻剧本《罗萨姆的万能机器人》。剧本中的主角是一种名为“robota”（捷克语“农奴”的意思）的劳作机器，外形酷似人类，“robota”在拥有了独立灵魂后消灭了人类。在剧本中，卡佩克把捷克语“robota”写成了“robot”，这个被认为是机器人专有英文名词的起源。

鉴于小说中机器人对人类的危害，为了防止机器人伤害人类，科幻作家阿西莫夫于1940年在其小说《我是机器人》中提出了著名的“机器人三原则”：

① 机器人不应伤害人类；

② 机器人应遵守人类的命令，与第一条违背的命令除外；

③ 机器人应能保护自己，与第一条相抵触者除外。

这是给机器人赋予的伦理性纲领。机器人学术界一直将这三原则作为机器人开发的准则。

化学工业出版社

我国国家标准对机器人的定义是：“具有两个或两个以上可编程的轴，以及一定程度的自主能力，可在其环境内运动以执行预定任务的执行机构”（GB/T 36530—2018）。在研究和开发未知及不确定环境下作业的机器人的过程中，人们逐步认识到，机器人技术的本质是感知、决策、行动和交互技术的结合。随着人们对机器人技术智能化本质认识的加深，机器人技术开始源源不断地向人类活动的各个领域渗透。结合这些领域的应用特点，人们发展了各式各样的具有感知、决策、行动和交互能力的智能机器人，如移动机器人、微型机器人、水下机器人、医疗机器人、军用机器人、空中机器人、娱乐机器人等。发展到现在，机器人已不仅仅是替代人类进行重复的、危险的、繁重的工作，更是可以在家庭服务、娱乐、医疗等方面给人们提供智能化的帮助。大部分机器人从外观上已远具有各种形状，更加符合不同应用领域的特殊要求，其功能和智能程度也大大增强，从而为机器人技术开辟出更加广阔的发展空间。

综上所述，有了一个大家比较认可的定义：机器人（robot）是一种能够半自主或全自主工作的智能机器，能够通过编程和自动控制来执行诸如作业或移动等任务。这包括一切模拟人类或其他动物的机械，比如机器狗、机器鱼等。甚至，有些计算机程序也被称为机器人，比如搜索引擎机器人、QQ 群管家机器人等。

1.2 机器人的发展

1.2.1 古代机器人

人类对机器人的幻想与追求已有几千年的历史，一直希望制造一种像人一样的机器，以代替人类完成各种烦琐而劳累的工作。

据《列子·汤问》记载，西周时期的能工巧匠偃师就研制出了能歌善舞的伶人，这可以说是我国最早记载的机器人。

春秋后期，我国著名的木匠鲁班在机械方面也是一位发明家。据《墨经》记载，他曾制造过一只木鸟，能在空中飞行“三日不下”，体现了我国劳动人民的聪明智慧，这可称得上是世界第一个空中机器人。

公元前 3 世纪，古希腊发明家戴达罗斯用青铜为克里特岛国王迈诺斯塑造了一个守卫宝岛的青铜卫士塔罗斯。公元前 2 世纪，亚历山大时代的古希腊人发明了一个机器人。它是以水、空气和蒸汽压力为动力的会动的雕像，可以自己开门，还可以借助蒸汽唱歌。

我国东汉时期的大科学家张衡不仅发明了地动仪，而且发明了计里鼓车。《古今注》记载：“车上为二层，皆有木人，行一里下层击鼓，行十里上层击镯（古代一种小钟）”。后汉三国时期，蜀汉丞相诸葛亮成功地创造出“木牛流马”，并用其运送军粮支援前方战争。

据《隋书》记载：隋炀帝杨广登基前就和文士柳抃是好友，登基之后，关系更好

化学工业出版社

了，总想时刻相伴。但是大半夜把柳扑召进宫总不妥当，于是杨广命工匠照柳扑的模样做了一个木偶，装上机关，木偶能坐能站，还会磕头。杨广兴致来了，就和这个木偶月下对饮欢笑。

达·芬奇在手稿中绘制了西方文明世界的第一款人形机器人，它用齿轮作为驱动装置，由此通过两个机械杆的齿轮与胸部的一个圆盘齿轮咬合，机器人的胳膊就可以挥舞，可以坐或者站立。更绝的是，再通过一个传动杆与头部相连，头部就可以转动甚至开合下颌。而一旦配备了自动鼓装置后，这个机器人甚至可以发出声音。后来，一群意大利工程师根据达·芬奇留下的草图苦苦揣摩，耗时 15 年造出了被称作“机器武士”的机器人。

1738 年，法国天才技师杰克·戴·瓦克逊发明了一只机器鸭，它会“嘎嘎”叫，会游泳和喝水，还会进食和排泄。瓦克逊的本意是想把生物的功能加以机械化而进行医学上的分析。

在当时的自动玩偶中，最杰出的是瑞士的钟表匠杰克·道罗斯和他的儿子利·路易·道罗斯创造的玩偶。他们创造的自动玩偶是利用齿轮和发条原理而制成的。1773 年，他们连续推出了自动书写玩偶、自动演奏玩偶等。它们有的拿着画笔和颜料绘画，有的拿着鹅毛蘸墨水写字，结构巧妙，服装华丽，在欧洲风靡一时。由于当时技术条件的限制，这些玩偶其实是身高 1 米左右的巨型玩具。现在保留下来的最早的机器人是瑞士努萨蒂尔历史博物馆里的少女玩偶，它制作于二百年前，两只手的十个手指可以按动风琴的琴键而弹奏音乐，并且现在还能定期演奏供参观者欣赏，展示了古代人的智慧。

19 世纪中叶，自动玩偶分为两个流派，即科学幻想派和机械制作派，并各自在文学艺术和近代技术中找到了自己的位置。1831 年，歌德发表了《浮士德》，塑造了人造人“荷蒙克鲁斯”；1870 年，霍夫曼出版了以自动玩偶为主角的作品《葛蓓莉娅》；1883 年，科洛迪的《木偶奇遇记》问世；1886 年，《未来夏娃》问世。在机械实物制造方面，摩尔于 1893 年制造了“蒸汽人”，靠蒸汽驱动双腿沿圆周走动。

进入 20 世纪后期，机器人的研究与开发得到了更多人的关心与支持，一些实用化的机器人相继问世。1927 年，美国西屋公司工程师温兹利制造了第一个机器人“电报箱”，并在纽约举行的世界博览会上展出，它是一个电动机器人，装有无线电发报机，可以回答一些问题，但该机器人不能走动。

1939 年，美国纽约世博会上展出了西屋电气公司制造的家用机器人 Elektro（图 1-1），它由电缆供电，可以行走，会说 77 个字，甚至可以抽烟。虽然离真正干家务还差得远，但它让人们对机器人的认识变得更加具体。



图 1-1　家用机器人 Elektro

化学工业出版社

1.2.2 现代机器人

现代机器人的研究始于20世纪中期，随着计算机和自动化技术的发展，以工业生产为应用场景的工业机器人开始出现。自1946年第一台数字电子计算机问世以来，计算机取得了惊人的进步，并向高速度、大容量、低价格的方向发展。一方面，大批量生产的迫切需求推动了自动化技术的进展，其结果之一便是1952年数控机床的诞生。与数控机床相关的控制、机械零件的研究，又为机器人的开发奠定了基础。另一方面，原子能实验室的恶劣环境要求某些操作机械代替人类处理放射性物质。在这一需求背景下，美国原子能委员会的阿尔贡研究所于1947年开发了遥控机械手，1948年又开发了机械式的主从机械手。

1954年，美国人乔治·德沃尔（George Devol）制造出世界上第一台可编程的机器人（即世界上第一台真正的机器人），并注册了专利。这种机器人能按照不同的程序从事不同的工作，因此具有通用性和灵活性。1959年，乔治·德沃尔和美国发明家约瑟夫·恩格尔伯格（Joseph Engelberger）制造出世界上第一台工业机器人“Unimate”（汉语音译名为“尤尼梅特”）（图1-2）。这个机器人外形像坦克炮塔，在方形底座上有一个大机械臂，大机械臂可绕立轴在基座上转动，绕横轴在基座上俯仰，大机械臂上又伸出一个小机械臂，它相对大机械臂可以伸出或缩回。小机械臂前端有一个手腕，可绕小机械臂转动，进行俯仰和侧摇摆。腕前端是手，用于抓取物体。这个机器人的功能和人的手臂功能相似。“Unimate”机器人是一种球坐标机器人，它由5个关节串联组成，通过液压驱动，可完成近200种示教再现动作。第一台工业机器人的诞生，开创了机器人发展的新纪元。

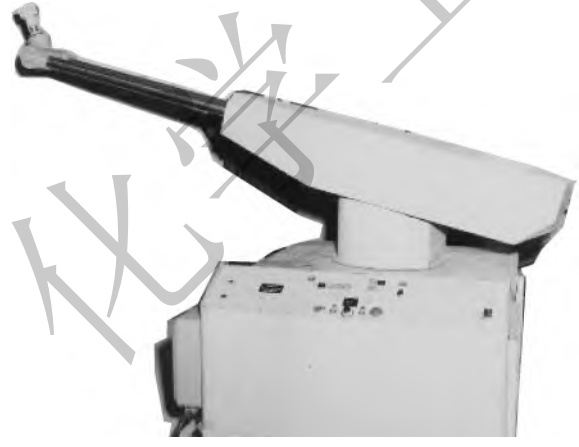


图1-2 世界上第一台工业机器人“Unimate”

1961年，“Unimate”正式在通用公司完成安装，辅助汽车生产，用于将铸造的汽车门把手等热的铸件放入冷却池中，从而将工人从恶劣的工作环境中解放出来。“Unimate”看似笨重的矩形机身，巨大的底座上连接着一根机械臂的外观与人们想象中的“机器人”实在差得太多。这台工业机器人的诞生似乎就在告诉大家：机器人并不一定要长得像人。

随后，世界上第一家机器人制造工厂——Unimation公司成立。由于恩格尔伯格对工业机器人的研发和宣传，他也被称为“工业机器人之父”。

1962年，美国机械与铸造公司（American Machine and Foundry，AMF）生产出“Versatran”（意思是万能搬运）（图1-3），这是第一台圆柱坐标机器人，用于机器之间的物料搬运，机器人手臂可以沿垂直方向升降，绕立轴回转，也可以沿半径方向伸缩，

化学工业出版社

手臂前端为手爪。同一年，6 台“Versatran”搬运机器人被应用于美国坎顿（Canton）的福特汽车制造厂。该机器人也与“Unimate”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和机器人研究的热潮。

因此，一般认为“Unimate”和“Versatran”机器人是世界上最早的工业机器人。这些工业机器人的控制方式与数控机床大致相似，但外形特征迥异，主要由类似人的手和臂组成。



图 1-3　“Versatran”工业机器人

最初的工业机器人构造相对比较简单，所完成的功能也只是捡拾汽车零件并放置到传送带上等简单的任务，对其他的作业环境并没有交互的能力，只是按照预定的基本程序精确地完成同一重复动作。“Unimate”的应用虽然是简单的重复操作，但展示了工业机械化的美好前景，也为工业机器人的蓬勃发展拉开了序幕。自此，在工业生产领域，很多繁重、重复或者毫无意义的流程性作业就可以由工业机器人来代替人类完成。

20 世纪 60 年代，工业机器人发展迎来黎明期，机器人的功能得到了进一步的发展。传感器的应用提高了机器人的可操作性，包括恩斯特采用的触觉传感器；托莫维奇和博尼在世界上最早的“灵巧手”上用到了压力传感器；麦卡锡对机器人加入视觉传感系统，并帮助麻省理工学院推出了世界上第一个机器人系统。此外，利用声呐系统、光电管等技术，工业机器人可以通过环境识别来校正自己的准确位置。

自 20 世纪 60 年代中期开始，美国麻省理工学院、斯坦福大学、英国爱丁堡大学等陆续成立了机器人实验室。美国兴起研究第二代带传感器的、“有感觉”的机器人，并向人工智能进发。

1965 年，麻省理工学院的 Robots 演示了第一个具有视觉传感器的、能识别与定位简单积木的机器人系统。1967 年，日本成立了人工手研究会（现改名为仿生机构研究会），同年召开了日本首届机器人学术会。

1968 年，美国斯坦福研究所研发成功机器人 Shakey（图 1-4），它带有视觉传感器，能根据人的指令发现并抓取积木，具有类似人在某种功能的感觉，比如力觉、触觉、听觉，来判断力的大小和滑动的情况。不过控制它的计算机有一个房间那么大。Shakey 可以算是世界第一台智能机器人，拉开了第三代机器人研发的序幕。

1969 年，日本早稻田大学加藤一郎实验室研发出第一台以双脚走路的机器人。加藤一郎长期致力于研究仿人机器人，被誉为“仿人机器人之父”。日本专家一向以研发仿人机器人和娱乐机器人的技术见长，后来更进一步，催生出本田公司的 ASIMO 机器人和索尼公司的 QRIO 机器人。

1973 年，辛辛那提·米拉克隆公司的理查德·豪恩制造了第一台由小型计算机控制的工业机器人，它是由液压驱动，能提升的有效负载达 45 千克。

20 世纪 70 年代末，由美国 Unimation 公司推出的 PUMA 系列机器人，为多关节、

化学工业出版社



图 1-4 机器人 Shakey

全电动、多 CPU 二级计算机控制，有专用 VAL（value action language）语言和视觉、力觉传感器，这标志着工业机器人技术已经完全成熟。PUMA 至今仍然工作在工厂第一线。

到了 1980 年，工业机器人才真正在日本普及，随后，工业机器人在日本得到了巨大发展，日本也因此而赢得了“机器人王国”的美称。20 世纪 80 年代，随着制造业的发展，机器人进入了普及期，使工业机器人在发达国家走向普及，并向高速、高精度、轻量化、成套系列化和智能化发展，以满足多品种、小批量的需要。

1984 年，恩格尔伯格又研制出机器人 Helpmate，这种机器人能在医院里为病人送饭、送药、送邮件。同年，他还预言：“我要让机器人擦地板、做饭，出去帮我洗车、检查安全”。

随着工业机器人的日益发展，1987 年，国际标准化组织对工业机器人进行了定义：“工业机器人是一种具有自动控制的操作和移动功能，能完成各种作业的可编程操作机。”

1989 年，由麻省理工学院的研究人员制造的六足机器人 Genghis（成吉思汗）（图 1-5），被认为是现代历史上最重要的机器人之一。它有 12 个伺服电机和 22 个传感器，可以穿越多岩石的地形。其不仅体积小，材料便宜，而且缩短了未来空间机器人的生产时间和设计成本。

到了 20 世纪 90 年代，随着计算机技术、智能技术的进步和发展，第二代具有一定感觉功能的机器人已经实用化并开始推广，具有视觉、触觉、高灵巧手指、能行走的第三代智能机器人相继出现并开始走向应用。

1998 年，丹麦乐高公司推出机器人（Mind-storms）套件，让机器人制造变得与搭积木一样，相对简单又能任意拼装，使机器人开始走入个人世界。

1999 年，日本索尼公司推出第一代机器狗——爱宝（AIBO），它能够自由地在房间里走动，并且能够对有限的一组命令做出反应，从此娱乐机器人开始迈进普通家庭。



图 1-5 六足机器人 Genghis

2002 年，美国 iRobot 公司推出了吸尘器机器人 Roomba，它能避开障碍，自动设计行进路线，还能在电量不足时自动驶向充电座。Roomba 是目前世界上销量最大、最

化学工业出版社

商业化的家用机器人。

2005 年，波士顿动力公司与福斯特米勒（Foster Miller）、喷气推进实验室和哈佛大学合作研发了一款四足机器狗——波士顿动力狗，或称“BigDog（大狗）”（图 1-6）。BigDog 使用四条腿进行运动，可以在难以通行的复杂地形移动穿越，其身体上有 50 个传感器。BigDog 被称为“世界上最雄心勃勃的腿式机器人”，它可以携带 150 千克负重，以 6.4 千米/时的速度，与士兵一起、在 35 度的斜坡上穿越崎岖的地形。

2011 年，IBM 研发的人工智能系统——沃森机器人参加美国著名智力问答竞赛节目《危险边缘》，使用自然语言来回答问题，最终打败了最高奖金得主布拉德·鲁特尔和连胜纪录保持者肯·詹宁斯。经过各种训练学习，沃森开始涉足医疗健康、教育、金融、保险、市场营销、人力资源等多个领域。

2014 年 6 月 7 日，俄罗斯机器人“尤金·古斯特曼”首次通过图灵测试，成为世界首个通过该测试的人工智能机器人。

2015 年，在加利福尼亚州大学伯克利分校的一个实验室里，人形机器人 Brett 教会自己做儿童拼图游戏（图 1-7），如把钉子塞进不同形状的洞里。Brett 机器人利用基于神经网络深度学习算法，以试错方式主动学习。例如，对于组装玩具，机器人会不停尝试，直至它清楚组装的原理。理论上，这机器人不需要再依赖人工更新，而是提供足够时间让它学习即可。



图 1-6　四足机器狗波士顿动力狗

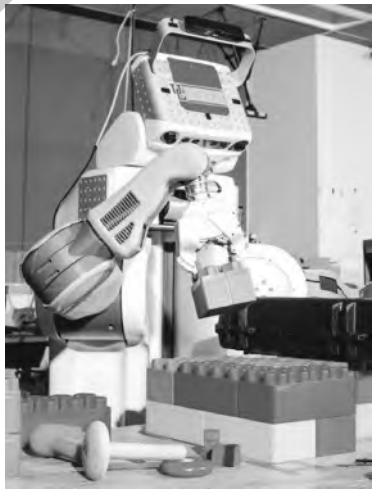


图 1-7　人形机器人 Brett

2016 年 3 月，阿尔法狗（AlphaGo）打败围棋世界冠军、职业九段棋手李世石，成为第一个战胜人类围棋世界冠军的人工智能机器人。2017 年 5 月，AlphaGo 再次战胜围棋世界冠军柯洁。AlphaGo 象征着计算机技术已进入人工智能的新信息技术时代，证明了机器可以模仿人脑神经网络的学习、判断和决策能力。

2017 年 6 月 7 日，在中国，高考机器人“AI-MATHS”严格按照断网、断库、小样本训练的类人智能答题条件首次成功通过高考测试，这也标志着中国占领了推理智能战略高地，是中国人工智能技术的里程碑。

2017 年 10 月，由汉森机器人公司（Hanson Robotics）制造的机器人索菲亚（Sophia）获得沙特阿拉伯公民身份，成为第一个获得国家公民身份的机器人。次月，联合国开发署将“创新大赛冠军”颁发给索菲亚。索菲亚的人工智能是基于云的，可以进行深入的学习，它可以识别和复制各种各样的人类面部表情。

2019 年，麻省理工学院推出 Cheetah（猎豹）机器人，它具有四条有力的腿，可以在不平坦的地面上小跑，速度大约是普通人步行速度的 2 倍，它的体重只有 20 磅（1 磅＝0.45 千克），当它被踢倒在地时，能通过手肘快速摆动撑地，很快重新站起，最令人印象深刻的是，它能够以站姿进行 360 度的后空翻。

2021 年，据《科技日报》报道，美国的研究团队创造了一种有史以来首次可以自我繁殖的异形机器人（Xenobots 3.0），《美国国家科学院院刊》发表了这一研究结果。

2022 年 9 月，美国康奈尔大学的研究人员在 100～250 微米大小的太阳能机器人上安装了电子“大脑”，这个机器人比蚂蚁头还小，这样它们就可以在不受外部控制的情况下自主行走。这项创新为新一代微型设备奠定了基础，这些设备可以跟踪细菌、嗅出化学物质、摧毁污染物、进行显微手术并清除动脉中的斑块。该研究成果发表在 2022 年 9 月 21 日的《科学·机器人》杂志上。

2023 年 7 月，联合国在瑞士日内瓦召开了“人工智能向善（AI for Good）”全球峰会，峰会期间举办了全球首个由机器人主导和参加的新闻发布会。9 位人形机器人站在台前，自如地与记者互动，讨论了关于人工智能技术的未来、发展方向、监管问题以及如何建立人机之间的信任。这不仅是对技术问题的回答，更是一次震撼的展示，在人工智能技术的加持下，机器人不再是单纯地执行预定程序的机械设备，而是具有了自主学习和决策能力的智能机器人。

近几年，人工智能技术成为风口，人形机器人终于有了“大脑”，又“火”了起来。据高盛公司预测，到 2035 年，人形机器人市场或将达到 1540 亿美元，成为继智能驾驶电动汽车后的又一 AI 落地场景。

在特斯拉的股东大会上，马斯克提出了一个大胆的设想：“一个自然人或许都需要拥有两个人形机器人。未来，全球的人形机器人数量有望达到 100 亿～200 亿个。”

2021 年 8 月，马斯克在特斯拉的人工智能开放日上首次提及制造“擎天柱”人形机器人的计划。短短一年后，Optimus（擎天柱）的原型机已经在接下来的 AI Day 中亮相。特斯拉展示了它在汽车工厂进行搬运、浇植物、移动金属棒的视频。如图 1-8 所示为特斯拉公司的人形机器人。

2023 年，美国亚利桑那州立大学（ASU）的科学家研制出了世界上第一个能像人类一样出汗、颤抖和呼吸的户外行走机器人模型，这一测试机器人名为“ANDI”。

微软尝试将 OpenAI 研发的 ChatGPT 应用于机器人领域，让机器人更加拟人化；在 2023 年年初，挪威人形机器人公司 1X Technologies 也宣布在 OpenAI 领投的 A2 轮融资中筹集了 2350 万美元；中国小米公司早在 2022 年 8 月便亮相了 CyberOne（铁大）首款全尺寸人形仿生机器人（图 1-9），到 2023 年又投资 5000 万元人民币，成立机器人公司。

化学工业出版社

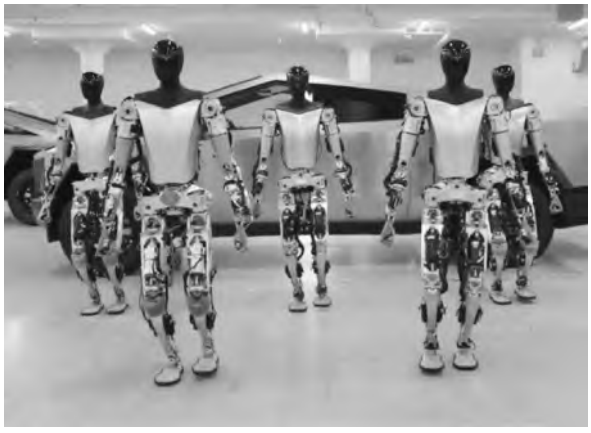


图 1-8　特斯拉公司的人形机器人



图 1-9　小米公司的“铁大”人形机器人

未来，在同赛道产品上不同品牌的影响与消费者需求市场下，人形机器人将不再是科幻作品中的幻想产物，而将服务于人类社会的方方面面，与人们生活紧密交织。

随着计算机技术和人工智能技术的飞速发展，机器人在功能和技术层次上有了很大的提高，移动机器人及机器人的视觉和触觉等技术就是典型的代表。由于这些技术的发展，推动了机器人概念的延伸，将具有感觉、思考、决策和动作能力的系统称为智能机器人，这是一个概括的、含义广泛的概念。这一概念不但指导了机器人技术的研究和应用，而且赋予了机器人技术向深广发展的巨大空间。水下机器人、空间机器人、空中机器人、地面机器人、微小型机器人等各种用途的机器人相继问世，许多梦想变成了现实。机器人的技术（如传感技术、智能技术、控制技术等）扩散和渗透到各个领域，形成了各式各样的新机器——机器人化机器。当前，与信息技术的交互和融合产生了“软件机器人”“网络机器人”的名称，这也说明机器人所具有的创新活力。

1.2.3　中国机器人的发展

机器人为中国的经济建设带来了高度发展的生产力和巨大的经济效益，而且将为中国的宇宙开发、海洋开发、核能利用等新兴领域的发展做出卓越的贡献。

中国机器人学研究起步较晚，但进步较快，已经在工业机器人、特种机器人和智能机器人等各个方面有了明显的成就，为中国机器人学的发展打下了坚实的基础。

20 世纪 70 年代是机器人发展的萌芽期，随后是 80 年代的开发期和 90 年代的快速发展时期。1972 年，中国科学院沈阳自动化研究所开始了机器人的研究工作。1985 年 12 月，中国第一台水下机器人“海人一号”首航成功，开创了机器人研制的新纪元。1997 年，南开大学机器人与信息自动化研究所研制出中国第一台用于生物实验的微操作机器人系统。

中国最先开始的是工业机器人的研究，20 世纪 70 年代初，上海、天津、吉林、哈尔滨、广州和昆明等地方的十几个研究单位及院校分别开发了固定程序、结合式、液压伺服型机器人，并开始了机构学（包括步行机构）、计算机控制和应用技术的研究，这

些机器人大约有1/3用于生产。在该技术的推动下，随着改革开放方针的实施，中国机器人技术的发展得到政府的重视和支持，20世纪80年代中期，国家组织了对工业机器人需求的行业调研，结果表明，对第二代工业机器人的需求主要集中于汽车行业（占总需求的60%～70%）。在众多专家的建议和规划下，于“七五”期间，由当时的机电部主持，中央各部委、中国科学院及地方十几所科研院所和大学参加，国家投入相当的资金，进行了工业机器人基础技术、基础元器件、几类工业机器人整机及应用工程的开发研究，完成了示教再现式工业机器人成套技术（包括机械手，控制系统、驱动传动单元，测试系统的设计、制造、应用，以及小批量生产的工艺技术等）的开发，研制出喷涂、弧焊、点焊和搬运等作业机器人整机，以及几类专用和通用控制系统和关键元部件，如交流、直流伺服电动机驱动单元机器人专用薄壁轴承、谐波传动系统、焊接电源和变压器等，并在生产中经过实用考核，其主要性能指标达到20世纪80年代初国际同类产品的水平，且形成小批量生产能力。

应用方面，在第二汽车制造厂建立了中国第一条采用国产机器人的生产线——东风系列驾驶室多品种混流机器人喷涂生产线。该线由七台国产PJ系列喷涂机器人和PM系列喷涂机器人及周边设备构成，很好地完成了喷涂东风系列驾驶室的生产任务，成为国产机器人应用的一个窗口；此外，还建立了几个弧焊和点焊机器人工作站。与此同时，还研制了几种SCARA型装配机器人样机，并进行了试应用。

在基础技术研究方面，解剖了国外十余种先进的机型，并进行了机构学、控制编程、驱动传动方式、检测等基础理论与技术的系统研究，开发出具有国际先进水平的测量系统，编制了我国工业机器人标准体系和12项国家标准、行业标准。20世纪80年代在国家高级技术计划中，安排了智能机器人的研究开发，包括水下无缆机器人、高功能装配机器人和各类特种机器人。

1994年11月，中国科学院沈阳自动化所等单位研制成功中国第一台无缆水下机器人“探索者”号，它的工作深度达到1000米，甩掉了与母船间联系的电缆，实现了从有缆向无缆的飞跃。它的的研制成功，标志着我国水下机器人技术走向成熟。

从1992年6月起，以我方为主，又与俄罗斯科学院海洋技术研究所合作，先后研制开发出了“CR-01”“CR-02”6000米无缆自治水下机器人，为我国深海资源的调查开发提供了先进装备。2008年，水下机器人首次用于中国第三次北极科考冰下试验，获取了海冰厚度、冰底形态等大量第一手科研资料。1995年中国科学院沈阳自动化所研制成功的6000米无缆自治水下机器人，是我国“863计划”中的重中之重项目，获得1997年国家十大科技进展之一。2005年4月，中国科学院沈阳自动化研究所又研制成功星球探测机器人。2006年，中国又研制成功世界最大潜深载人潜水器“海极一号”，7000米的工作潜深，可以达到世界99.8%的海底。

20世纪90年代中期，中国选择以焊接机器人的工程应用为重点进行开发研究，从而迅速掌握焊接机器人应用工程成套开发技术、关键设备制造、工程配套、现场运行等技术。

20世纪90年代后期是实现国产机器人的商品化、为产业化奠定基础的时期。国内一些机器人专家认为：应继续开发和完善喷涂、点焊、弧焊、搬运等机器人系统应用成

化学工业出版社

套技术，完成“交钥匙工程”；在掌握机器人开发技术和应用技术的基础上，进一步开拓市场，扩大应用领域，从汽车制造业逐渐扩展到其他制造业并渗透到非制造业领域，开发第二代工业机器人及各类适合我国国情的经济型机器人，以满足不同行业多层次的需求；开展机器人柔性装配系统的研究，充分发挥工业机器人在 CIMS（计算机集成制造系统）中的核心技术作用。在此过程中，嫁接国外技术，促进国际合作，促使中国工业机器人得到进一步发展，为 21 世纪机器人产业奠定了更坚实的基础。

中国机器人从 2000 年开始进入产业化阶段，国家积极支持机器人产业化基地的建设，已形成了以新松机器人自动化股份有限公司为代表的多个机器人产业化公司。

2012 年年底，在浙江、江苏的传统制造企业中逐渐兴起了“机器换人”，众多企业纷纷引进现代化、自动化的装备进行技术的改造升级。2013 年 4 月，由中国机械工业联合会牵头组建了中国机器人产业联盟。联盟包括国内机器人科技和产业的百余家成员单位，以产业链为依托，以创新资源整合、优势互补、协同共进、互利共赢的合作模式，构建促进产业实现健康有序发展的服务平台。2013 年 12 月，工业和信息化部发布了《关于推进工业机器人产业发展的指导意见》。

2014 年，随着“东莞一号”《关于大力发展机器人智能装备产业打造有全球影响力的先进制造基地的意见》文件及各项扶持政策的出台，“机器换人”在珠三角的制造业重镇——东莞轰轰烈烈地开展，并在全国掀起了一场“机器换人”的浪潮。“机器换人”是以“现代化、自动化”的装备提升传统产业，利用机器人、自动控制设备或流水线自动化对企业进行智能技术改造，达到“减员、增效、提质、保安全”的目的，并成为工业企业转型升级的必然选择。

“十三五”期间，中国制造业进入转型升级的关键期，与之紧密相连的机器人产业迎来了黄金发展期。机器人产业作为《中国制造 2025》划定的十大重点发展领域，发展前景被外界普遍看好。

相对于已经成熟的工业机器人，中国服务机器人起步较晚，与国外存在较大的差距。中国服务机器人的研究始于 20 世纪 90 年代中后期。近年来，在国家“863 计划”的支持下，中国“服务机器人军团”不断壮大。

仿人机器人走出实验室，中国成为继日本之后投入实际展示应用的第二个国家；烹饪机器人实现小规模量产，它能做出五十多种美味菜肴，烹饪水平不低于专业厨师；中医按摩机器人、机器人护理床、智能轮椅等各种助老助残服务机器人相继问世，并积极推进服务机器人的产业化进程；国内的大型玩具企业正在和科研院所合作，研发高端玩具机器人产品，企业的积极参与将推动以高端玩具为代表的教育娱乐机器人的产业化进程。

人形机器人具备 AI＋高端制造双属性，有望开拓高端制造新模式、新业态，提升中国科技和制造综合实力。长期来看，在中国人口红利减退、劳动力成本上升、各行业加速推进人工替代的时代背景下，人形机器人必定不会仅局限于一个特定领域，而是应用于制造业、社会服务、家庭服务、养老等的众多场景，相比传统机器人具备对综合性任务的兼容度。

2005 年，中国服务机器人市场开始初具规模。同年，发展服务机器人被列为国家“863 计划”先进制造与自动化技术领域重点项目。2006 年，发展智能服务机器人被列

入《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》。2008 年，中华人民共和国科学技术部将北京四季青模范敬老院和上海徐家汇福利院列为服务机器人应用示范区。2012 年 4 月，中华人民共和国科学技术部印发《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》[国科发计（2012）194 号]。目前，中国的服务机器人主要有吸尘器机器人，教育、娱乐、保安机器人，智能轮椅机器人，智能穿戴机器人，智能玩具机器人，同时还有一批为服务机器人提供核心控制器、传感器和驱动器功能部件的企业。

2020 年，中国机器人产业营业收入首次突破 1000 亿元。“十三五”期间，工业机器人产量从 7.2 万套增长到 21.2 万套，年均增长 31%。从技术和产品上看，精密减速器、高性能伺服驱动系统、智能控制器、智能一体化关节等关键技术和部件加快突破、创新成果不断涌现，整机性能大幅提升、功能越加丰富，产品质量日益优化，行业应用也在深入拓展。例如，工业机器人已在汽车、电子、冶金、轻工、石化、医药等 52 个行业大类、143 个行业中被广泛应用。

2021 年 12 月颁布的《“十四五”机器人产业发展规划》明确提出了中国机器人产业发展的路线图：到 2025 年，中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；整机综合指标达到国际先进水平，关键零部件性能和可靠性达到国际同类产品水平；机器人产业营业收入年均增速超过 20%；形成一批具有国际竞争力的领军企业及一大批创新能力强、成长性好的专精特新“小巨人”企业，建成 3～5 个有国际影响力的产业集群；制造业机器人密度实现翻番；到 2035 年，中国机器人产业综合实力达到国际领先水平。

1.3 机器人的基本组成

机器人的外形多种多样、千差万别，有的像人，有的却并不具有人的模样，但其组成却与人很相似。机器人是一个复杂的系统，包括三大部分和六个子系统，其中三大部分指机械部分、传感部分和控制部分，六个子系统是指执行系统、驱动系统、感受系统、控制系统、人机交互系统和机器人-环境交互系统，如图 1-10 所示。

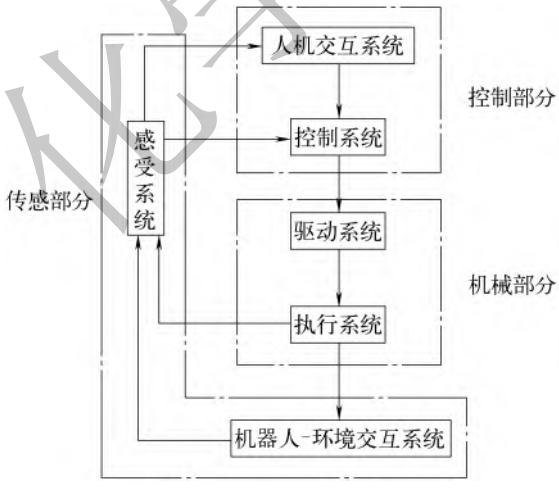


图 1-10 机器人的组成

(1) 执行系统

执行系统包括手部、腕部、手臂、腰部、基座和各关节，以及发声装置，它与人类身体结构基本上相对应，是机器人的基本组成部分。执行系统是机器人实现其功能的物质条件。

机器人的基座是整个机器人的支

撑部件，它相对于人的躯干，要具备足够的稳定性和刚度。若基座具备移动机构，则构成行走机器人，这个移动机构就相当于人的腿脚，机器人靠它来走路。移动机构有轮式、履带式和仿人形机器人的步行式等。若基座不具备移动机构，则称为固定式机器人，又称机械臂。许多工业机器人都是固定式机器人。

机器人的腰部是连接臂部和基座的回转部件，利用它的回转运动和臂部的平面运动，就可以使腕部做空间运动。

机器人的臂部相当于人的胳膊，下连手腕，上接腰身（人的胳膊上接肩膀），一般由小臂和大臂组成，通常是带动腕部做平面运动。

机器人的腕部相当于人的手腕，它上与臂部相连，下与手部相接，以带动手部实现必要的姿态。

机器人的手部，又称末端执行机构，它是工业机器人和多数服务型机器人直接从事工作的部分。根据工作性质（机器人的类型），其手部可以设计成夹持型的夹爪，用以夹持东西；也可以是某种工具，如焊枪、喷嘴等；还可以是非夹持类的，如真空吸盘、电磁吸盘等。在仿人形机器人中，手部可能是仿人形多指手。

(2) 驱动系统

驱动系统包括驱动器和传动机构，是为了使机器人运行起来给各个关节安置的装置，并将能源传送到执行机构。

机器人所用的能源按其工作介质，可分为气动、液动、电动和混合式四大类，在混合式中，有气-电混合式和液-电混合式。驱动系统既可以是液压传动、气动传动、电动传动其中的一种，或是把它们结合起来应用的综合系统，可以是直接驱动或者是通过机械传动装置进行的间接驱动。

其中，驱动器有电机（直流伺服电动机、交流伺服电动机和步进电动机等）、气动和液动装置（压力泵、气缸、液压缸、液压马达及相应控制阀、管路）；而传动机构，最常用的有谐波减速器、行星减速器、滚珠丝杠、链传动、同步带传动及齿轮传动等传动系统。

液压驱动就是利用液压泵产生高压液体，然后通过控制阀由液压缸推动执行机构进行动作，从而达到将液体的压力势能转换成做功的机械能。液压驱动的最大特点就是动力比较大、力和力矩惯性比大、反应快，比较容易实现直接驱动，特别适用于要求承载能力和惯性大的场合。其缺点是对液压元件要求高，否则容易造成液体渗漏，对环境有一定的污染。

气压驱动的基本原理与液压驱动的相似。其优点是工作介质（空气）来源方便、动作迅速、结构简单、造价低廉、维修方便，其缺点是不易进行速度控制、气压不宜太高、负载能力较低等。

电动驱动是当前机器人使用最多的一种驱动方式，其优点是电源方便，响应快，信息传递、检测、处理都很方便，驱动能力较大；其缺点是因为电动机转速较高，必须采用减速机构将其转速降低，从而增加了结构的复杂性。目前，不需要减速机构可以直接用于驱动、具有大转矩的低速电动机已经开始出现，这样可使机构简化，同时可提高控制精度。

化学工业出版社

(3) 感受系统

感受系统相当于人的眼、鼻、耳、皮肤等感觉器官，实时检测机器人的运动及受力情况、作业对象及外界环境等方面的信息，根据需要反馈给控制系统，对执行系统进行调整，以保证机器人的动作符合预定的要求，甚至使机器人具有某种“感觉”，向智能化发展。感受系统由多种传感器组成，包括能感知力、压觉、触觉等的接触型传感器和感知图像、声音、距离等的非接触型传感器，用以获取受力大小、图像、温度、声音等身体内部和外部环境的状态信息。传感器包括摄像机、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、行程开关等。

由于智能传感器的使用，使机器人的机动性、适应性和智能化水平得以提高。虽然人类的感受系统对感知外部世界信息是极其灵敏的，但对于一些特殊的信息，传感器比人类的感受系统更准，使得机器人比人类在某些方面更具有优势。

(4) 控制系统

控制系统是机器人的指挥系统，由控制计算机及相应的控制软件和伺服控制器组成，它相当于人的神经系统，控制计算机即相当机器人的“大脑”。控制系统根据机器人的作业指令程序或者从传感器反馈回来的信号，对各种信息进行分析、加工、处理并发出指令，控制机器人的执行系统去完成规定的动作。控制系统的分析决策功能主要靠计算机专用或通用软件来完成。

(5) 人机交互系统

人机交互系统的作用是实现操作人员对机器人的控制并与机器人进行联系。例如，计算机的标准终端、指令控制台、信息显示板、危险信号报警器等。该系统可以分为两大类，即指令给定装置和信息显示装置。

(6) 机器人-环境交互系统

机器人-环境交互系统的作用是实现机器人与外部环境中的设备相互联系和协调。可以将机器人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，也可以将多台机器人、多台机床或设备、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。

1.4 机器人的分类

关于机器人如何分类，国际上并没有统一的标准，有的按负载重量分，有的按控制方式分，有的按移动方式分，有的按结构分，有的按应用环境分等。

化学工业出版社

1.4.1 按应用环境分类

中国的机器人专家按机器人的应用环境分类，将机器人分为工业机器人、服务机器人和特种机器人三大类。

工业机器人就是在工业制造领域中应用的机器人，主要包括焊接机器人，装配机器人，搬运码垛机器人，喷涂机器人，AGV 小车、分拣、包装等物流机器人，面向电子产品、汽车零部件等领域的协作机器人，机械制造中的并联机器人等。

服务机器人主要是指在农业、建筑业、医疗、服务业等领域应用的机器人，包括幼苗移栽、除草、施肥、修剪、果实采摘、分选，以及用于畜禽养殖的喂料、巡检、消毒处理等农业机器人，采掘、喷浆、巡检、重载辅助运输等矿业机器人，用于建筑部件智能化生产、测量、钢筋加工、混凝土浇筑、楼面墙面装饰装修等建筑机器人，进行手术、护理、康复、配送等工作的医疗康复机器人，家务、教育、养老助残、娱乐和安监等家用服务机器人，讲解导引、餐饮、配送等公共服务机器人。

特种机器人主要是指在某些特殊环境中应用的机器人，主要包括水下探测、打捞、深海矿产资源开发等水下机器人，安保巡逻、缉私安检、反恐防暴、治安管控等安防机器人，消防、应急救援、核工业操作等危险环境作业的机器人，战场运输、侦察等军用机器人，月球、火星探测器等太空探测机器人等。

目前，国际上有些机器人学者从应用环境出发，仅将机器人分为两类：制造环境下的工业机器人和非制造环境下的服务与仿人型机器人。

1.4.2 按移动方式分类

(1) 固定式

固定式机器人不能移动，只有机械臂可以完成动作，大部分工业机器人属于固定式，它们主要被安装在工厂车间内进行工作，有的安装在地基上，有的安装在横梁上，如图 1-11 所示。



(a) 台座式　　(b) 悬吊式

图 1-11　固定式机器人

化学工业出版社

(2) 移动式

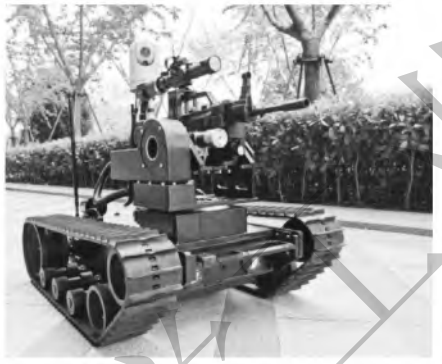
移动式机器人可以自主运动，按它们的移动方式，有足腿式、轮式、履带式、蠕动式、浮游式、飞行式、潜游式、喷射式、穿戴式、复合式等形式，如图 1-12 所示。



(a) 足腿式



(b) 轮式



(c) 履带式



(d) 蠕动式



(e) 飞行式



(f) 潜游式

图 1-12　移动式机器人

① 足腿式机器人有两足的、四足的、六足的，以及更多足的形式。

化学工业出版社

② 轮式机器人类似常见的车辆，有两轮的、三轮的、四轮的、六轮的，以及多轮的。

③ 浮游式机器人在水面行进，有螺旋桨推进式、喷气式、喷水式等。

④ 飞行式机器人在空中运动，有旋翼无人机类直升飞行式，有固定翼无人机类滑行式，还有像鸟类和昆虫一类扑翼飞行式。

⑤ 潜游式机器人在水面下行进，有推进器潜游式、尾翼潜游式、拖曳潜游式等。

1.4.3　按使用空间分类

按机器人的使用空间可以分为：地面/地下机器人、水面/水下机器人、空中机器人、空间机器人、其他使用空间机器人。

① 地面/地下机器人包括室内地面机器人和室外地面机器人、井下机器人以及其他地下机器人。

② 水面/水下机器人包括江河湖泊水面机器人、海洋水面机器人、浅水机器人、深水机器人以及其他水下机器人。

③ 空中机器人包括中低空机器人、高空机器人和其他空中机器人。

④ 空间机器人包括空间站机器人、星球探测机器人和其他空间机器人。

1.4.4　按发展阶段分类

(1) 第一代机器人：示教再现型机器人

1962 年美国研制成功 PUMA 通用示教再现型机器人，这种机器人通过计算机来控制一个多自由度的机械，通过示教存储程序和信息，工作时把信息读取出来，然后发出指令，这样机器人可以重复地根据人当时示教的结果，再现出这种动作。比如汽车的点焊机器人，只要把这个点焊的过程示教完以后，就总是重复这样一种工作。

(2) 第二代机器人：感觉型机器人

示教再现型机器人对于外界的环境没有感知，它不会知道操作力的大小、工件存在不存在、焊接的好与坏，因此，在 20 世纪 70 年代后期，人们开始研究第二代机器人，即感觉型机器人。这种机器人拥有类似人体的某种感觉，如力觉、触觉、视觉、滑觉、听觉等，它能够感受和识别工件的形状、大小、颜色等。

(3) 第三代机器人：智能型机器人

这是 20 世纪 90 年代以来发明的机器人，这种机器人带有多种传感器，可以进行复杂的逻辑推理、判断及决策，在变化的内部状态与外部环境中，自主决定自身的行为。

化学工业出版社

1.4.5 按机器人机械结构分类

(1) 垂直关节型机器人

它的机械结构类似于人的手臂，具有多个关节，包括四轴、五轴、六轴关节机器人及其他垂直关节机器人。如图 1-11（a）所示即为一种垂直关节机器人。

(2) 平面关节型机器人

即 SCARA 机器人，由两个平行关节组成，可以在选定的平面上运动，旋转轴垂直定位，安装在手臂上的末端执行器垂直移动，包括单臂 SCARA 机器人、双臂 SCARA 机器人及其他平面关节型机器人。如图 1-13 所示为单臂 SCARA 机器人。

(3) 直角坐标型机器人

也称为直线机器人，有矩形、悬臂式和龙门式等结构，包括三自由度、四自由度、五自由度等。如图 1-14 所示为龙门式直角坐标型机器人。



图 1-13 单臂 SCARA 机器人



图 1-14 龙门式直角坐标型机器人

(4) 并联机器人

由动平台、定平台和它们之间的多条支链组成，末端操作器安装在动平台上，包括平面并联机器人、球面并联机器人、空间并联机器人和其他并联机器人。如图 1-11（b）所示即为一种并联机器人。

(5) 其他机械结构型机器人

包括车辆式、穿戴式、爬行式、混联式等多种。

化学工业出版社



第 2 章 机器人的整体结构

机器人种类很多，要完成的工作也各不相同。有的不需要手臂、手的动作，如巡检机器人；有的不需要移动机构，如工厂车间里的固定式工业机器人。因此，机器人的身体结构根据功能需要而有所差异，但大体上还是与人类的身体结构类似，一般包括与人类身体相对应的几部分，比如机身（也称底座）、手臂（包括大臂和小臂）、手腕和手部（末端执行器）、移动机构、感觉器官等。机身主要起支撑作用，是机器人的基础部分。固定式机器人的机身直接固定在地面上或平台上，如果是可移动的机器人，机身就安装在移动机构上。机身、手臂、手腕通过不同的关节连接在一起，手臂和手腕都能够做不同的运动，最终带着手完成一定的动作。

机器人都有不同的运动，对应不同的自由度。自由度是指机器人所具有的独立运动的数目，但不包括手的开合自由度。自由度反映了机器人动作灵活程度的参数，包括转动自由度和移动自由度。一般情况下，机器人的一个自由度对应一个关节，所以自由度与关节的概念是等同的。自由度越多，机器人就越灵活，但需要的驱动机构越多；结构越复杂，控制难度也越大，所以机器人的自由度要根据其用途设计，一般为 3～6 个。

2.1 机器人的机身及臂部

机器人按机身及臂部的机械结构可分为串联机器人、并联机器人和混联机器人。串联机器人就像一个手臂，由机座、大臂、小臂、手等各部分一节一节通过关节连在一起。而并联机器人是一个封闭结构，就像在一个机座上伸出多条手臂，然后手臂末端又连在一起，由多条手臂共同控制一个末端完成动作。

串联机器人研究得较为成熟，具有结构简单、成本低、控制简单、运动空间大等优点，已成功应用于很多领域，如各种机床、装配车间等，许多工业机器人都是串联机器人。串联机器人按结构特征来分，通常可以分为直角坐标机器人、柱面坐标机器人、球面坐标机器人（又称极坐标机器人）、多关节机器人等。

2.1.1 直角坐标机器人

直角坐标机器人是具有三个移动自由度的多用途机器人（图 2-1），包括悬臂式、天

化学工业出版社

车式和龙门式。该机器人在空间坐标系中有三个相互垂直的移动，其操作空间为长方体，手部可以实现到达操作空间内任意一点的可控的运动轨迹。

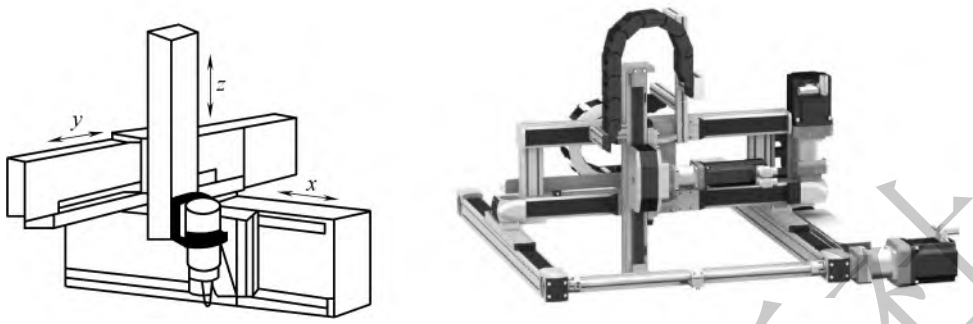


图 2-1　直角坐标机器人

直角坐标机器人的特点是直线运动、控制简单、具有高的可靠性和精度，可长期在恶劣的环境中工作，便于操作维修；缺点是运动速度较慢、灵活性较差、自身占据空间较大。直角坐标机器人可以非常方便地用于各种自动化生产线中，可以完成诸如焊接、搬运、码垛、上下料、包装、检测、探伤、分类、装配、贴标、喷码、打码、喷涂等一系列工作。

2.1.2　柱面坐标机器人

柱面坐标机器人是指能够形成圆柱坐标系的机器人，如图 2-2 所示，其结构主要由一个旋转机座形成的转动关节和垂直升降、水平伸缩的两个移动关节构成。柱面坐标机器人具有空间结构小、工作范围大、末端执行器速度快、控制简单、运动灵活等优点；缺点是必须有手臂前后方向的移动空间，空间利用率低。

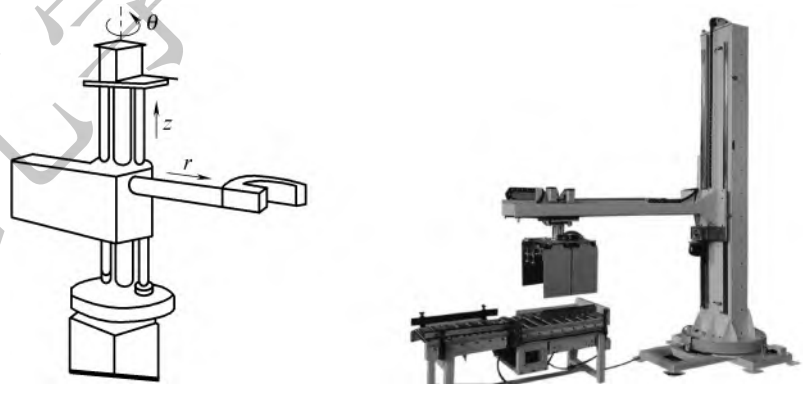


图 2-2　柱面坐标机器人

柱面坐标机器人主要用于重物的装卸、搬运等工作。最早的“Versatran”机器人就是一种典型的柱面坐标机器人。

化学工业出版社

2.1.3 球面坐标机器人

球面坐标机器人如图 2-3 所示，一般由两个回转关节和一个移动关节构成。它具有三个自由度，即一个绕手臂支承底座垂直轴的转动和一个手臂在铅垂面内的摆动，以及一个沿手臂的伸缩移动。这种机器人运动所形成的轨迹表面是半球面，所以称为球面坐标机器人。球面坐标机器人占用空间小、工作范围大、操作灵活，但运动学模型较复杂，难以控制。美国 Unimation 公司的“Unimation”机器人就是球面坐标机器人的代表。

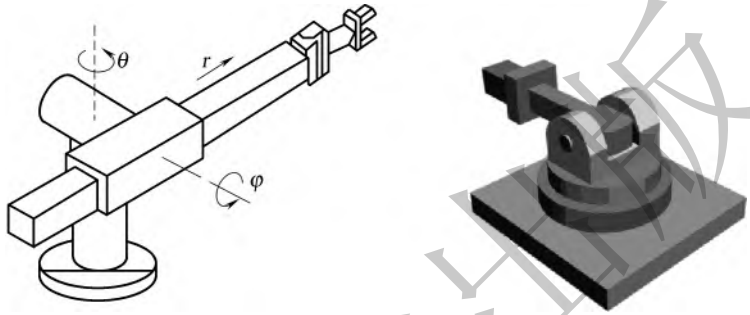


图 2-3　球面坐标机器人

2.1.4 关节机器人

关节机器人也称关节手臂机器人或关节机械手臂，是当今工业领域中应用最为广泛的一种机器人，也是最类似人的一种机器人结构。多关节机器人按照关节的构型不同，又可分为垂直多关节机器人和水平多关节机器人。

垂直多关节机器人主要由机座和多关节臂组成，模拟人的手臂功能，由垂直于地面的腰部旋转轴，带动大臂旋转的肩部旋转轴，带动小臂旋转的肘部旋转轴，以及小臂前端的手腕等组成，如图 2-4 所示为垂直多关节机器人的不同结构形式，动作空间近似一个球体。目前常见的关节臂数是 3～6 个。某品牌六关节臂机器人如图 2-5 所示。这类机器人由多个旋转和摆动关节组成，其结构紧凑，工作空间大，工作时能绕过机座周围的一些障碍物，对装配、喷涂、焊接等多种作业都有良好的适应性，且适合电机驱动，关节密封、防尘比较容易。

水平多关节机器人也称为 SCARA（selective compliance assembly robot arm）机器人，如图 2-6 所示。SCARA 机器人一般具有四个轴，即四个运动自由度，它的第一至三轴是转动运动，第四轴是直线移动，并且第三轴和第四轴可以根据工作需要的不同，制造成多种不同的形态。

SCARA 机器人的作业空间与占地面积比很大，使用起来方便；在垂直升降方向刚性好，尤其适合平面装配作业，广泛应用于电子产品工业、汽车工业、塑料工业、药品工业和食品工业等领域，用以完成搬取、装配、喷涂和焊接等操作。

化学工业出版社

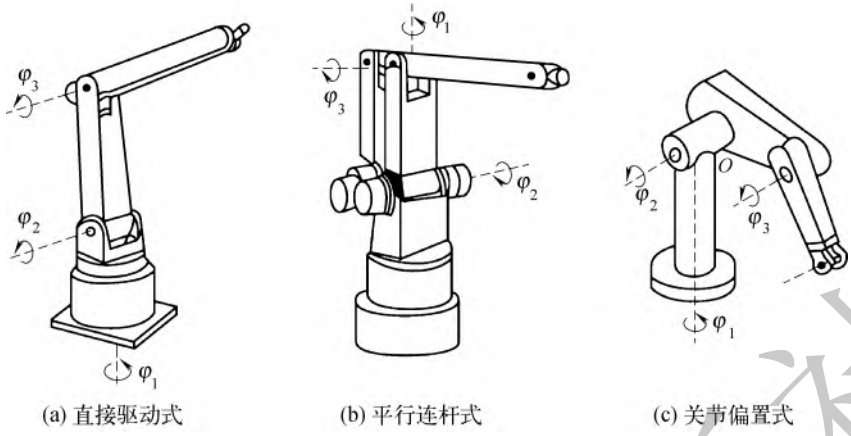


图 2-4　垂直多关节机器人的不同结构形式



图 2-5　某品牌六关节臂机器人

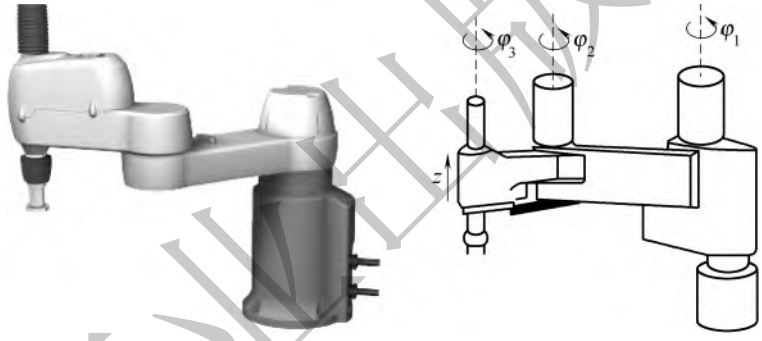


图 2-6　水平多关节机器人

2.1.5　并联机器人

并联机器人是近些年来发展起来的一种新型机器人，固定机座和运动平台之间至少由两根活动连杆连接，末端执行器安装在运动平台上，具有两个或以上的自由度，以并联方式驱动。如图 2-7 所示为并联机器人。和串联机器人相比，并联机器人具有以下特点：①驱动装置可置于定平台上或接近定平台的位置，运动部分重量轻，速度快，动态响应好；②结构紧凑，刚度高，承载能力大；③无累积误差，运动精度较高；④具有较好的各向同性；⑤工作空间较小。

并联机器人广泛应用于装配、搬运、上下料、分拣、打磨等需要高刚度、高精度或者大载荷而无须很大工作空间的场合。

2.1.6　混联机器人

混联机器人则相当于在并联机器人的动平台前端再通过不同自由度的手腕连接一个手，这样在一定的操作空间内手部既拥有多方向灵活的操作，又能保证高速高精度的特性，如图 2-8 所示。

化学工业出版社

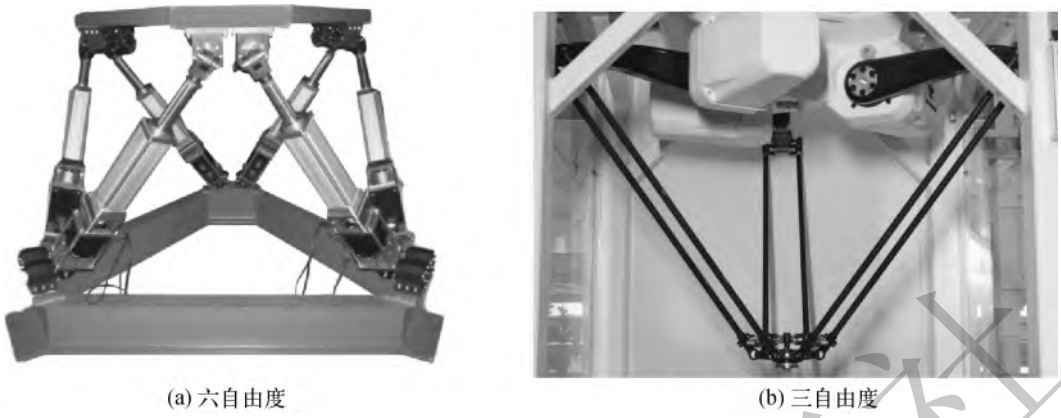


图 2-7　并联机器人

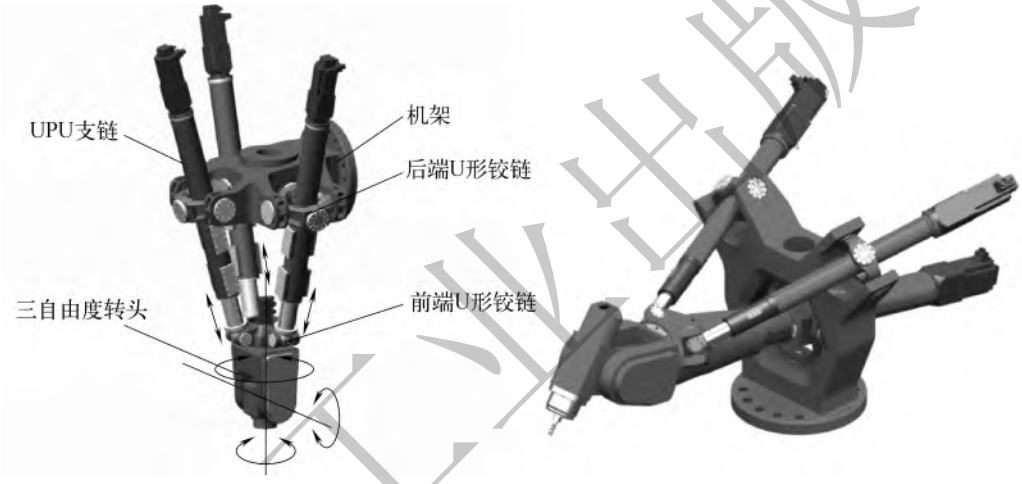


图 2-8　混联机器人

2.2　机器人的手

机器人要实现一定的功能，比如抓取一个物体，则需根据机器人控制系统发出的命令，通过机器人的手去完成抓取动作。对于不同功能的机器人，需要手完成的动作不一样，因此手的形状和结构也千差万别。在工业机器人上一般称作机械手，又称作末端操作器。现在，机器人的手已经具有像人手一样灵巧的手指，能灵活自如地抓取物品。通过手指上的传感器还能感觉出抓握的物体的重量，已经具备了人手的许多功能。

2.2.1　夹钳式机械手

夹钳式机械手由手指（手爪）、传动机构、驱动机构及支架等组成，如图 2-9 所示。

化学工业出版社

它通过手指的开合实现对物体的夹持。一般有两根手指，也有三根、四根或五根手指，手指端是直接与物体接触的部位，其结构形状取决于被抓取物体的形状和特性，有光滑指面、齿形指面和柔性指面等。光滑指面平整光滑，用来夹持已加工表面，避免已加工表面受损；齿形指面的表面刻有齿纹，可增加夹持工件的摩擦力，以确保夹紧牢靠，多用来夹持表面粗糙的毛坯或半成品；柔性指面内镶橡胶、泡沫、石棉等物，有增加摩擦力、保护工件表面、隔热等作用，一般用于夹持已加工表面、炽热件，也适于夹持薄壁件和脆性工件。

传动机构是将驱动机构的运动和动力向手指传递，以实现夹紧和松开动作的机构。根据驱动机构的不同，可以有电动夹爪和气动夹爪之分。

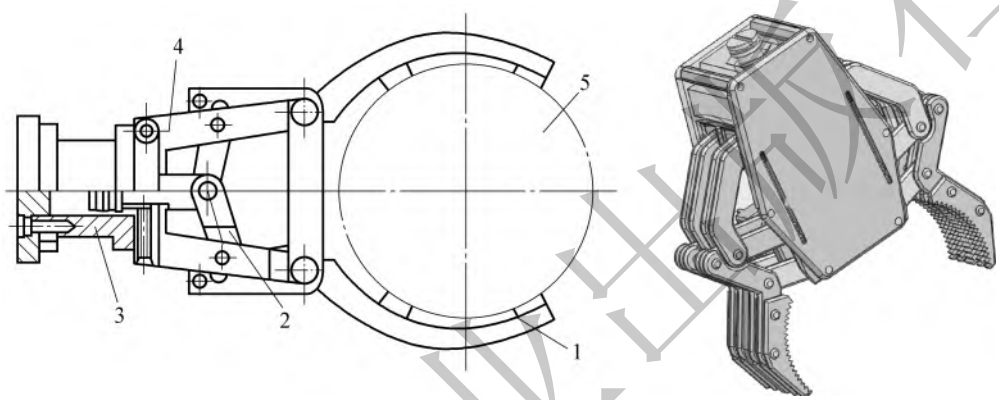


图 2-9　夹钳式机械手部的基本组成

1—手指；2—传动机构；3—驱动机构；4—支架；5—物体

2.2.2　吸附式机械手

吸附式机械手靠吸附力取料，根据吸附力的不同，可分为气吸附和磁吸附两种，适用于大的较光滑平面、易碎物体（玻璃、磁盘）等，因此使用面较广。

(1) 气吸附式机械手

气吸附式机械手是利用吸盘内的压力和大气压之间的压力差而工作的，按形成压力差的方法，可分为抽真空式吸盘、气流负压式吸盘、挤压排气负压式吸盘等。吸盘工作面一般由橡胶、聚氨酯等柔软材料制成。气吸附式机械手与夹钳式机械手相比，具有结构简单、重量轻、吸附力分布均匀等优点，对于薄片状物体的搬运更具有优越性（如板材、纸张、玻璃等物体）。它广泛应用于非金属材料或不可有剩磁的材料的吸附，但要求物体表面较平整光滑，无孔、无凹槽。

图 2-10 中四个圆盘即为吸盘，正在吸取玻璃进行搬运。

① 抽真空式吸盘使用真空泵抽真空，使吸盘内持续产生负压，这种吸盘比其他形式吸盘的吸力大。抽真空式吸盘如图 2-11 所示，其主要部件为碟形橡胶吸盘。取料时，碟形橡胶吸盘与物体表面接触，吸盘的边缘既起到密封作用，又起到缓冲作用；然后真

化学工业出版社

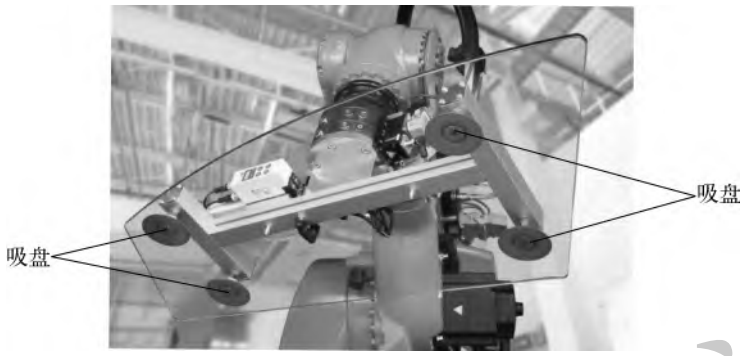


图 2-10　吸盘

空泵抽气，碟形橡胶吸盘内腔形成真空，吸附取料。放料时，管路接通大气，失去真空，物体放下。抽真空式吸盘工作可靠、吸附力大，但需要有一套抽真空系统，成本较高。

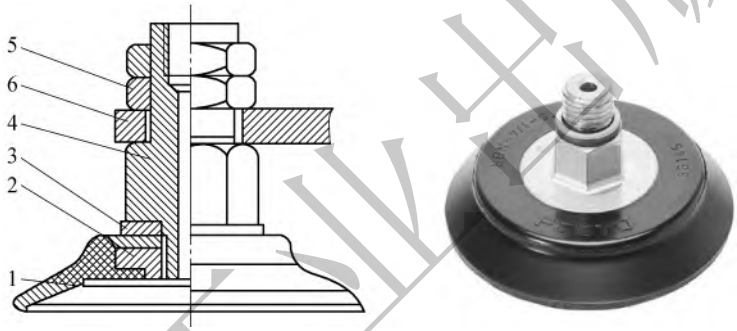


图 2-11　抽真空式吸盘

1—碟形橡胶吸盘；2—固定环；3—垫片；4—支撑杆；5—螺母；6—基板

② 气流负压式吸盘。气流负压式吸盘与抽真空式吸盘类似，区别仅是产生真空的方式不同，它是由真空发生器利用压缩空气产生真空（负压）的。当吸盘压到被吸物后，吸盘内的空气被真空发生器从吸盘上的管路中抽走，使吸盘内形成真空，吸附物体。这种吸盘借助压缩空气和真空发生器，无须专用真空泵。由于工厂一般都配有空压机站或空压机，比较容易获得空压，不需要专为机器人配置真空泵，所以气流负压吸盘在工厂内使用方便，成本较低。

③ 挤压式吸盘在压向工件表面时，将吸盘内的空气挤出；松开时，压力去除，吸盘恢复弹性变形使吸盘内腔形成负压，将工件牢牢吸住，即可进行工件搬运；到达目标位置后，用碰撞力或电磁力使压盖动作，破坏吸盘腔内的负压，释放工件。

(2) 磁吸附式机械手

如图 2-12 所示，磁吸附式机械手（电磁吸盘）利用电磁铁通电后产生的电磁吸力取料，因此只能对铁磁物体起作用，但是对某些不允许有剩磁的零件禁止使用，所以磁吸附式机械手的使用有一定的局限性。

化学工业出版社

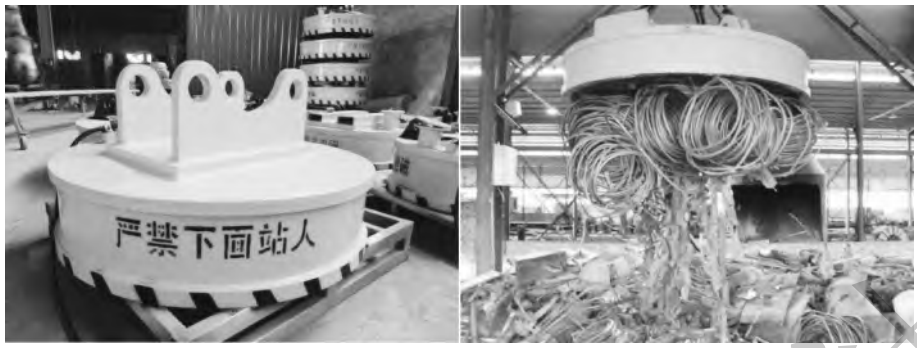


图 2-12　电磁吸盘

2.2.3　专用末端操作器

对于工业机器人这种通用性很强的自动化设备，可根据作业要求，配上各种专用的末端操作器，就能完成各种工作。例如在通用机器人手臂末端安装焊枪，就成为一台焊接机器人；安装喷枪，则成为一台喷涂机器人。目前，有许多由专用电动、气动工具改型而成的操作器，如焊枪、喷枪、电动扳手、电磨头、抛光头、激光切割机等。所形成的一整套机器人可供用户选用，使机器人能胜任各种工作。

2.2.4　仿生手

简单的夹钳式机械手不能适应物体外形变化，不能使物体表面承受比较均匀的夹持力，因此无法对复杂形状、不同材质的物体实施夹持和操作。为了提高机器人手爪和手腕的操作能力、灵活性和快速反应能力，使机器人能像人手那样进行各种复杂的作业，如装配作业、维修作业、设备操作以及机器人模特的礼仪手势等，就必须有一个运动灵活、动作多样、具有柔性的灵巧手。

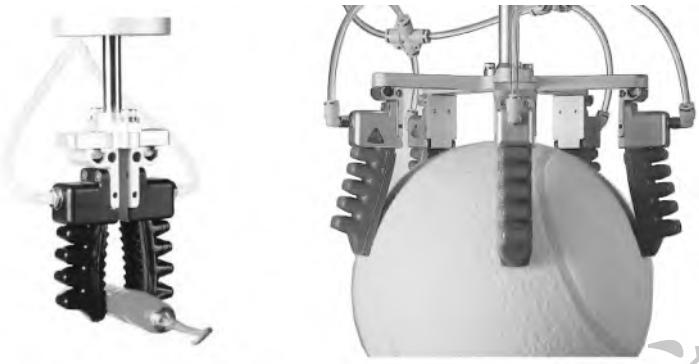
(1) 柔性手爪

柔性手爪的手指由软材料制成，在控制外力作用下，柔性手爪就发生弯曲变形，以适应物体的不同外形，并使物体表面受力比较均匀。柔性手爪有两根或多根手指，如图 2-13 所示，适用于抓取轻型、易碎物体，如玻璃器皿、水果等。

(2) 多指灵巧手

机器人手最完美的形式是模仿人手的多指灵巧手，它从结构和功能上参考人手，最普遍的手指数目为三到五个，各手指具有三个回转关节。在通常情况下，灵巧手只需要三根三自由度的手指即可完成大多数任务。在手部配置触觉、力觉、视觉、温度传感器，使多指灵巧手达到更完美的程度。多指灵巧手能模仿几乎人手指能完成的各种复杂动作，拥有像人手一样灵活的操作能力，能够灵活操作对象，如拧螺钉、弹钢琴、做礼仪

化学工业出版社



(a) 两根手指　　(b) 多根手指

图 2-13　柔性手爪

手势等动作，满足多种工作需求，应用前景十分广泛，也可在各种极限环境下完成人无法实现的操作，如核工业领域、宇宙空间作业，在高温、高压、高真空环境下作业等。

如图 2-14（a）所示为哈尔滨工业大学机器人研究所与德国宇航中心合作开发的具有多种传感功能的机器人灵巧手。该机器人灵巧手有 4 根手指，有 13 个活动部位，由 600 多个机械零件组成，表面的电子元器件有 1600 多个，整体质量 1.8 千克。它可以弹钢琴、抓握水瓶、摆手势等。

如图 2-14（b）所示为腾讯 Robotics X 实验室 2023 年发布的自研机器人灵巧手 TRX-Hand，能做很多细活。它拥有 3 根手指、8 个可独立控制的关节，可轻松拿捏不同形状尺寸物体，实现抛接等高动态的难度动作。其最大持续指尖力可达 15 牛，最大关节速度 1 秒能够转动 600 度，既快又有力。柔性驱动的指尖设计也有效提升了手指的抗冲击能力，让“手”更加可靠。



(a)　　(b)

图 2-14　多指灵巧手

Shadow 灵巧手由英国 Shadow robot 公司研制，有 24 个自由度的灵活程度，具备关节位置、指尖触觉等传感器。机器人手的主要材料是聚甲醛塑料、铝。Shadow 手主体的外形尺寸很小，驱动部分及电气部分位于前臂内，采用的是绳索传动方式。它可以完成拧灯泡、刷油漆、抓苹果等动作，还能解魔方，如图 2-15 所示。



图 2-15　Shadow 灵巧手解魔方

2.3　机器人的手腕

机器人的手腕是连接手臂部和手部的部分，有独立的自由度，其作用主要是改变和调整手部在空间的方位，以保证机器人手部能够完成复杂的姿态，从而使手爪中所握持的工具或工件取得某一指定的姿态。

例如，用机器人的手部夹持一个螺钉对准螺孔拧入，首先必须使螺钉前端到达螺孔入口位置，然后必须使螺钉的轴线对准螺孔的轴线，使轴线相重合拧入，这就需要调整螺钉的方位角。前者即为手部的位置，后者即为手部的姿态。

腕部一般可以做绕空间三个坐标轴 X、Y、Z 的三个转动，即摆动、俯仰和回转，具有三个自由度，如图 2-16 所示。

① 偏转：使手腕绕与臂垂直的垂直轴 X 旋转，如图 2-16（a）所示。

② 俯仰：使手腕绕与臂垂直的水平轴 Y 旋转，如图 2-16（b）所示。

③ 翻转：使手腕绕自身的轴线 Z 旋转，如图 2-16（c）所示。

腕部自由度的组合方式多种多样，根据具体工作需要而定。一些专用机械手甚至没有腕部，但有的机械手腕部为了特殊要求还有额外的横向移动的自由度。腕部按自由度数量可分为单自由度腕部、两自由度腕部和三自由度腕部，三自由度腕部能使手部获得空间任意姿态。

多数机器人将腕部结构的驱动装置安排在小臂上，以减轻手腕部分的重量，当运动传入腕部后再分别实现各个动作。

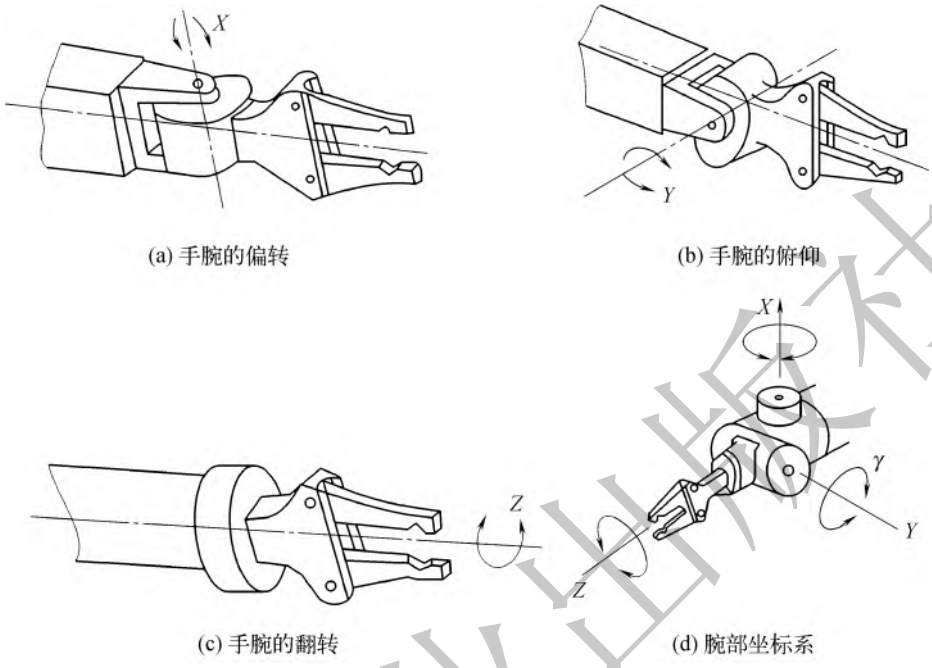
一般来说，在用机器人进行精密装配作业中，当被装配零件不一致，工件定位夹具的定位精度不能满足装配要求时，会导致装配困难。这就要求在装配动作时手腕具有柔顺性。柔顺装配技术有两种：主动柔顺装配和被动柔顺装配。

(1) 主动柔顺装配

主动柔顺是利用传感器反馈的信息来控制手爪的运动，以补偿其位姿误差，实现边

化学工业出版社

校正边装配。如在手爪上安装视觉传感器、力传感器等检测元件，这种柔顺装配称为主动柔顺装配，价格较贵。



(a) 手腕的偏转　(b) 手腕的俯仰　(c) 手腕的翻转　(d) 腕部坐标系

图 2-16　机器人手腕的运动

(2) 被动柔顺装配

被动柔顺是利用不带动力的机构来控制手爪的运动，以补偿其位置误差。在需要被动柔顺装配的机器人结构里，一般是在腕部配置一个角度可调的柔顺环节，以满足柔顺装配的需要。这种柔顺装配技术称为被动柔顺装配。被动柔顺装配腕部结构比较简单，价格比较便宜，装配速度快。被动柔顺装配要求装配件要有倾角，允许的校正补偿量受到倾角的限制，轴孔间隙不能太小。采用被动柔顺装配技术的机器人腕部称为机器人的柔顺腕部，如图 2-17 所示。

2.4　机器人的移动机构

机器人的移动机构对应于人类的腿脚，或鸟类的翅膀，或鱼的鳍。

按机器人的运动方式，一般有轮式、履带式、仿生足式、蠕动爬行式、飞行式、浮游式和混合式等移动机构。一般在室内的机器人，比如家用机器人或工厂车间移动的机器人，多采用轮式移动机构；室外的机器人为适应野外环境，多采用越野轮式或履带式移动机构。一些仿生机器人，通常模仿某种生物的运动方式而采用相应的移动机构。其中，轮式移动机构效率最高，但适应地形能力相对较差；而腿式移动机构适应地形能力强，但其效率最低。

化学工业出版社

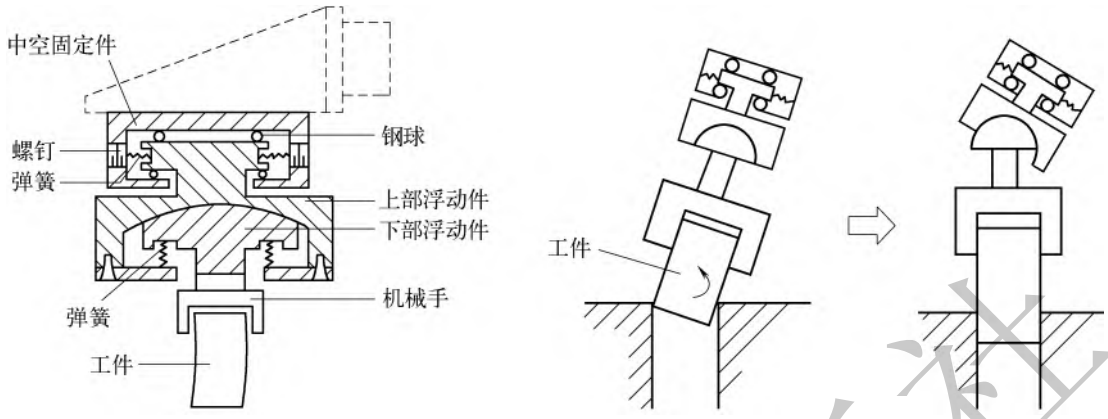


图 2-17　柔顺腕部

2.4.1　轮式移动机构

轮式移动机构通常有两轮式、三轮式、四轮式、六轮式以及多轮式之分，如图 2-18 所示。它们或有驱动轮和自位轮，或有驱动轮和转向机构，用来转弯。

轮式行走机器人是机器人中应用最多的一种类型，在相对平坦的地面上，用车轮移动方式行走是相当优越的。轮式移动机构的优点是结构简单、重量轻、轮子滚动摩擦阻力小、机械效率高，适合在较平坦的地面上行驶；缺点是翻越障碍性能不好，不能爬楼梯。

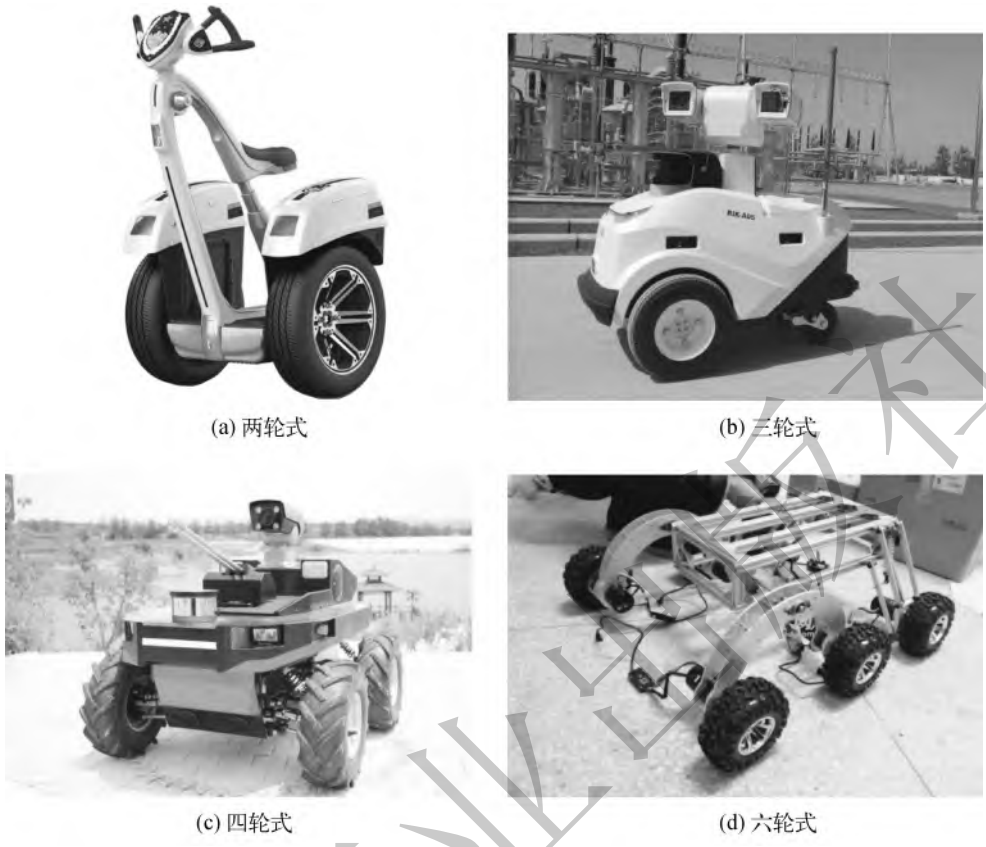
车轮的形状或结构形式取决于地面的性质及车辆的承载能力。常见的轮子就是汽车上用的充气橡胶轮胎或实心橡胶轮胎，适用于平坦道路，也可以在野外使用，具有一定的越野爬坡能力。而在一些特殊的场合，为了提高适应地形能力，车轮则需要由特殊结构、特殊材料制造，比如月球探测车和火星探测车的车轮，如图 2-19 所示。

在一些室内平坦硬地面上工作的机器人，还常使用麦克纳姆轮（Mecanum wheel）和全向轮（omni wheel）作为机器人的移动机构，如图 2-20 所示。

麦克纳姆轮与全向轮的共同点在于它们都由轮毂和小辊子两大部分组成。轮毂是整个轮子的主体支架，小辊子则是均匀安装在轮毂周边上的多个鼓状物。全向轮有两列小辊子，它们在圆周上互相错开，轮毂轴与辊子转轴相互垂直。由于辊子的作用，全向轮除了可以前后滚动外，也可以左右滚动。

麦克纳姆轮是瑞典麦克纳姆公司的专利。麦克纳姆轮的辊子在轮缘周围斜向分布，轮毂轴与辊子转轴呈 45°角，根据辊子的不同倾斜方向，分为左旋轮和右旋轮两种对称的结构。由于倾斜小辊子的作用，轮子可以横向滑移。当轮子绕着固定的轮心轴转动时，各个小辊子的包络线为圆柱面，所以该轮能够连续地向前滚动。麦克纳姆轮一般是四个一组使用，两个左旋轮，两个右旋轮，左旋轮和右旋轮对称安装。麦克纳姆轮可以像传统轮子一样，安装在相互平行的轴上。基于麦克纳姆轮技术的全方位运动，机器人可以实现前行、横移、斜行、旋转及其组合等运动方式。非常适合转运空间有限、作业

化学工业出版社



(a) 两轮式　　(b) 三轮式

(c) 四轮式　　(d) 六轮式

图 2-18　轮式行走机器人

通道狭窄的环境，在提高工作效率、增加空间利用率以及降低人力成本方面具有明显的效果。

而若想使用全向轮完成类似的功能，几个轮毂轴要按圆周方向均匀布置，之间必须是 60 度、90 度或 120 度等角度，对于这样的角度，生产和制造都比较麻烦。

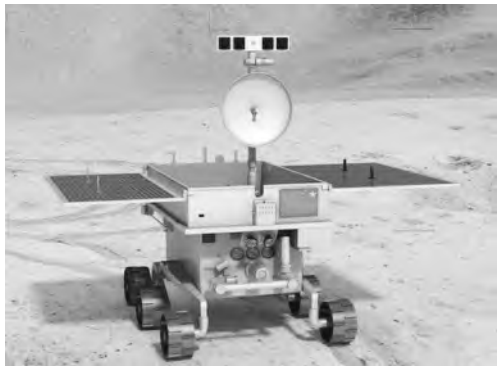
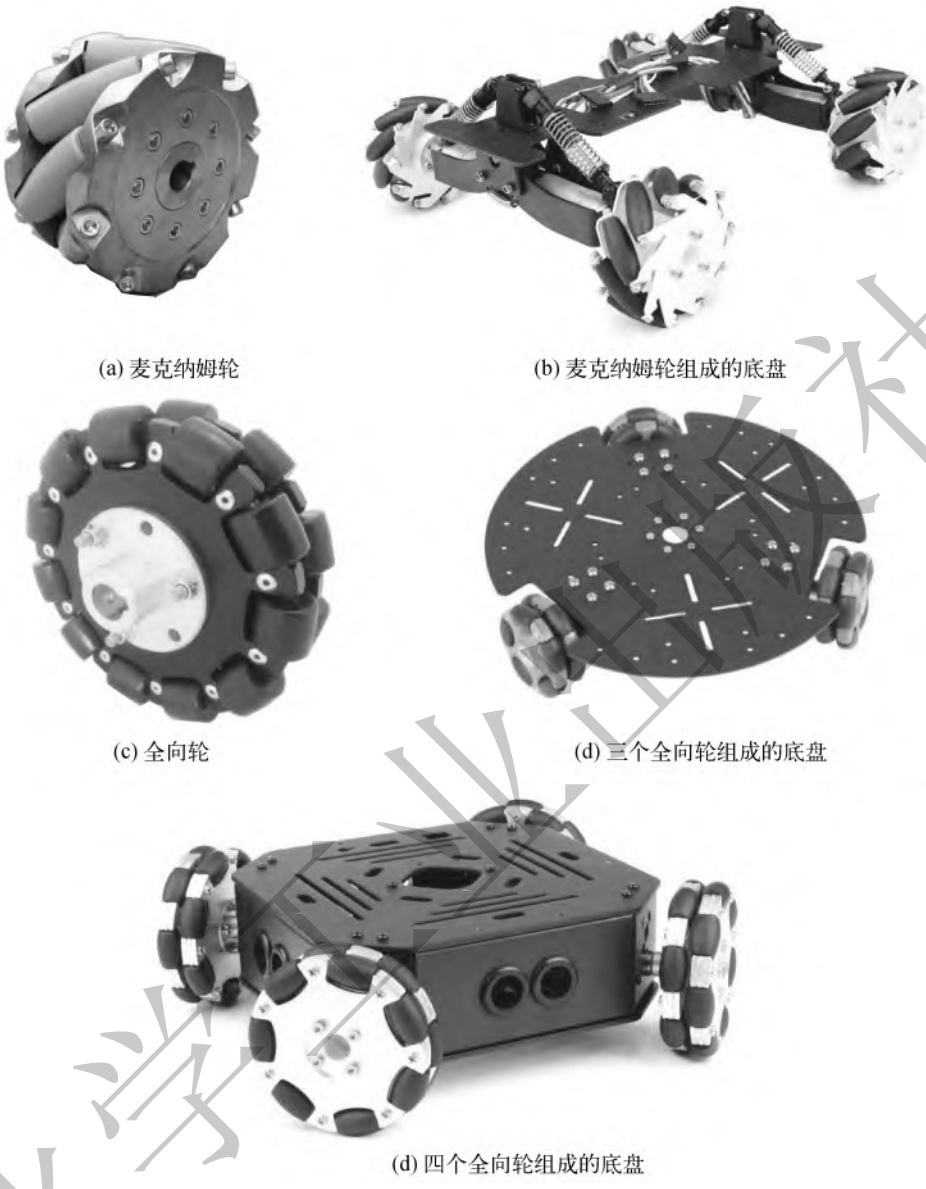


图 2-19　月球探测车的车轮

2.4.2　履带式移动机构

履带式移动机构最常见的是用于坦克上，它适合在未平整的自然地面上行驶，履带可以看成连续为轮子铺的路。履带式移动机构与轮式相比：支承面积大，接地比压小，适合松软或泥泞的野外进行作业，下陷度小，滚动阻力小；越野机动性好，爬坡、越沟等性能均优于轮式移动机构；履带支承面上有履齿，不易打滑，牵引附着性能好，有利于发挥较大的牵引力。但是履带式移动机构结构比较复杂，重量大，运动惯性大，减振性能差。

履带按材质可以分为橡胶履带和钢制履带。通常履带式移动机构是由两条履带平行



(a) 麦克纳姆轮　(b) 麦克纳姆轮组成的底盘

(c) 全向轮　(d) 三个全向轮组成的底盘

(d) 四个全向轮组成的底盘

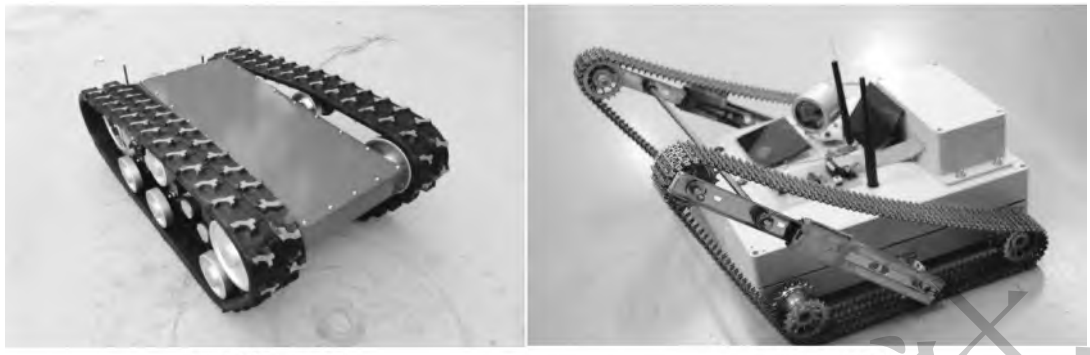
图 2-20　麦克纳姆轮与全向轮

布置构成的［图 2-21（a)］，分别由两个动力源驱动；当两条履带的速度相同时，机器人前进或后退移动；当两条履带的速度不同时，机器人实现转向运动。

根据实际使用场合的要求，履带也有采取其他形状的。形状可变履带是指机器人所用履带的外形可以根据地形条件和作业要求进行适当变化。如图 2-21（b）所示，该机器人的主体部分是两条形状可变的履带。当主臂杆绕履带架上的轴旋转时，履带变为三角形，能够轻松通过台阶、楼梯等障碍，在保证机体尺寸小巧的条件下实现了卓越的越障性能，具备近似全地形的移动能力，解决了传统移动平台小则越障能力有限，大则使用场景受限的矛盾。

位置可变履带机器人是指履带相对于车体的位置可以发生变化的履带式机器人。如

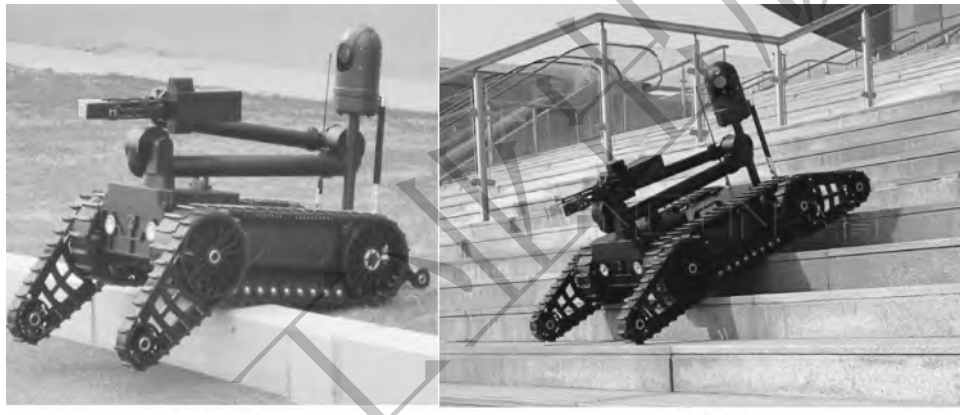
化学工业出版社



(a) 传统履带形式　　(b) 可变形履带

图 2-21　履带式移动机构

图 2-22 所示为摆臂履带机器人，副履带能够在摆臂带动下绕车体的水平轴线转动，从而改变机器人的整体构形，提高攀爬斜坡和越障能力。



(a) 双摇臂　　(b) 四摇臂

图 2-22　摆臂履带机器人

2.4.3　仿生足式移动机构

仿生足式移动机构即步行机构，是模仿人类或多足动物步行的移动方式。仿生足式移动机构有很好的机动性，对崎岖路面具有很好的适应能力，可以跨越障碍物，走过沙地、沼泽等特殊路面。在崎岖路面上，步行机器人优于轮式或履带式机器人。所以，这类机器人在工程探险勘测、防爆、军事运输侦察、海底探测、矿山开采、星球探测、残疾人的轮椅、教育及娱乐等众多行业有非常广阔的应用前景。步行机器人是一种智能型机器人，它是一门涉及生物科学、仿生学、机构学、传感技术及信息处理技术等的综合性高科技技术。多足步行机器人技术一直是国内外机器人领域的研究热点之一。

如图 2-23 所示为仿生足式移动机构的几种形式，一般有两足式、四足式、六足式和多足式等。足的数目越多，承载能力越强，但运动速度越慢。两足式和四足式步行机构最为常见，它具有很好的适应性和灵活性，最接近人类和动物。

化学工业出版社



(a) 两足式　(b) 四足式　(c) 六足式

图 2-23　仿生足式移动机构的几种形式

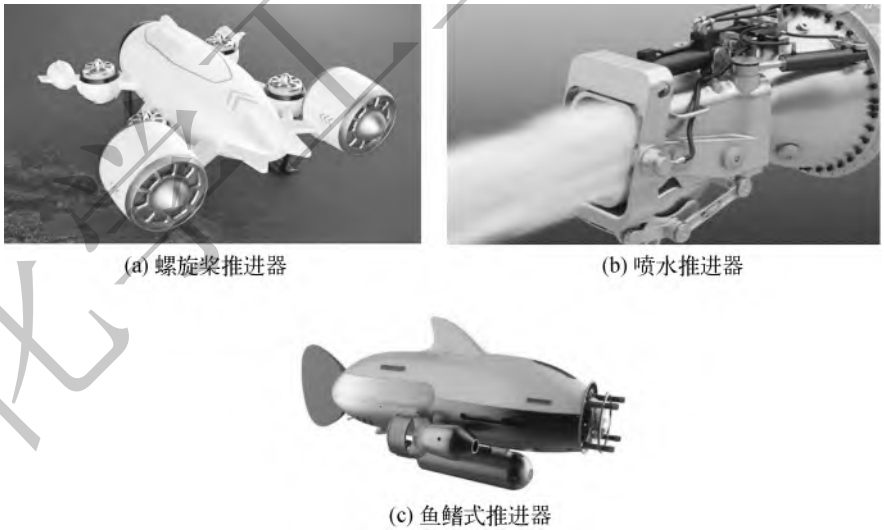
2.4.4　水中机器人的游动机构

水面/下机器人需要靠推进器运动，有螺旋桨推进器、喷水推进器和鱼鳍式摆动推进器等，如图 2-24 所示。另外，在水底移动的机器人也可以采用轮式、履带式移动机构，以及步行式移动机构。

螺旋桨推进器通过叶片的旋转将水向后推出，获得向前的动力。

喷水推进器是利用喷射水流产生的反作用力驱动前进的一种推进器。由水泵、管道、吸口和喷口等组成，并能通过喷水口改变水流的喷射方向来改变运动方向，效率比螺旋桨低，但操纵性能好，特别是对于泥沙底的浅水航道，喷水推进器具有良好的适应性。

鱼鳍式推进器通过鱼鳍状拨片的摆动拨水产生向前的动力。



(a) 螺旋桨推进器　(b) 喷水推进器

(c) 鱼鳍式推进器

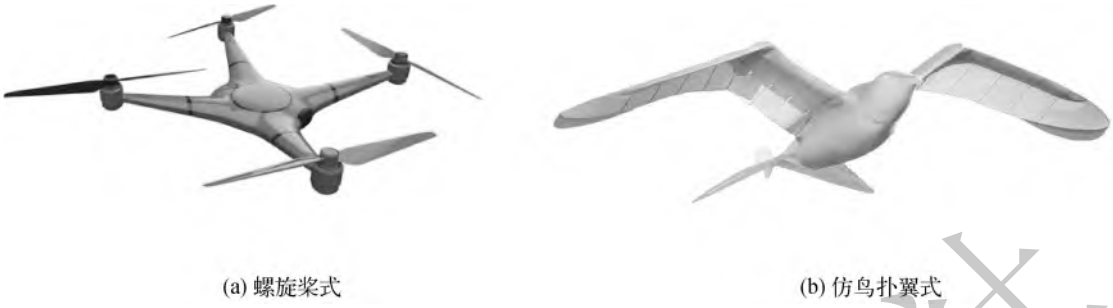
图 2-24　水下/中机器人的游动机构

2.4.5　飞行机器人的飞行机构

飞行机器人，如无人机的飞行主要靠螺旋桨产生的动力；还有一种仿鸟或昆虫的扑翼

化学工业出版社

无人机，是靠像鸟类翅膀一样的翼上下扇动，产生浮力和前进的动力，如图 2-25 所示。



(a) 螺旋桨式　　(b) 仿鸟扑翼式

图 2-25　飞行机器人的飞行机构

2.4.6　复合式的移动机构

为了适应更加复杂的地形，人们研究出复合式的地面移动机构，综合了几种不同移动机构的长处，具有更优异的移动性能。

美国国防高级研究计划局（DARPA）研究出了 GXV-T（ground X-vehicle technology，地面 X 车辆技术）“自适应可变形车轮”，这种车轮可以让车辆在轮式和履带式之间实现 2 秒快速切换以适应各种地形，如图 2-26 所示。



图 2-26　轮履复合式

轮腿式机器人（wheel-legged robot）是近年来机器人研究的前沿领域。每个轮子分别与它的腿部连接，运动过程中，轮子和与之连接的腿部都一起运动，兼具两者能力，轮式结构移动快、效率高，而腿部能力让机器人适应不平地面、完成跳跃台阶等动作，如图 2-27 所示。

2.5　机器人的动力系统

机器人所用的能量主要来源于电力、内燃机动力、太阳能，甚至核动力。采用电力的机器人，比如在车间固定安装的工业机器人，就直接用车间的电力系统；如果是移动的机器人，则需要采用移动电源，比如锂电池、铅酸电池等。采用内燃机作为动力的机

化学工业出版社



(a) ANYmal四足轮腿机器人　　(b) 腾讯轮腿式机器人Ollie

图 2-27　轮腿式机器人

器人一般是移动机器人，需要在机器人上安置一台内燃机，就像传统的汽车一样。而驱动系统将这些能源转换为机器人运动的能量，并将能量传送到各个运动机构，从而使机器人运行起来。

驱动系统是机器人结构中的重要部分，包括驱动装置和传动装置。驱动装置在机器人中的作用相当于人体的肌肉，是运动的动力来源。驱动装置必须有足够大的功率对运动机构进行驱动，同时要求必须轻便、经济、精确、灵敏、可靠且便于维护。

根据驱动系统工作介质不同，可分为电气驱动、液压驱动、气压驱动和新型混合式驱动四大类。机器人的运动机构可以由液压传动、气动传动、电动传动等驱动器直接驱动，但往往为了有合适的运动速度和运动形式，需要通过同步带、链、齿轮、丝杠等机械传动装置间接驱动运动机构。

为了精确控制机器人的运动位置、方位、状态，机器人采用伺服驱动系统，其控制系统根据传感器的反馈信号，调节驱动系统输出的力矩、速度和位置，并将实际值和预定值加以比较，依照它们的差别来调节，使所处的状态到达或接近预定值。

2.5.1 电气驱动系统

机器人电气驱动系统是利用各种电机产生的力矩和力，直接或间接地驱动机器人的执行机构以获得各种运动。电气驱动是机器人中使用最多的一种驱动方式，其特点是电源方便、响应快、驱动力较大，信号检测、传动、处理方便，并可采用多种灵活的控制方案。目前，由于高启动转矩、大转矩、低惯量的交、直流伺服电机在工业机器人中得到广泛应用，一般负载 1000 牛以下的工业机器人大多采用电伺服驱动系统。所采用的驱动电机主要是交流伺服电机、直流伺服电机和步进电机。

由于电机转速快，通常须采用减速机构（如谐波传动、RV 摆线针轮传动、齿轮传动等），使其结构比较复杂。目前，有些机器人已开始采用无减速机构的大转矩、低转速电机进行直接驱动（DD），这既可使机构简化，又可提高控制精度。

(1) 步进电机

步进电机（图 2-28）是将电脉冲信号变换为相应的角位移或直线位移的部件，它的

角位移和线位移量与脉冲数成正比，转速或线速度与脉冲频率成正比。在负载能力的范围内，这些关系不因电源电压、负载大小、环境条件的波动而变化，误差不长期积累，步进电机驱动系统可以在较宽的范围内，通过改变脉冲频率来调速，实现快速启动、正反转制动。但由于其存在过载能力差、调速范围相对较小、低速运动有脉动、不平衡等缺点，故一般只应用于小型或简易型机器人中。常用的有永磁式步进电机、反应式步进电机及混合式步进电机。

(2) 伺服电机

伺服电机（图 2-29）是指带有反馈的直流电机、交流电机、步进电机，是一种能够根据外部反馈信号来调整输出的电机，通过控制器与传感器之间的精密协作，实现运动精确控制。伺服电机控制精度高、响应速度快，在机器人领域起着至关重要的作用，是实现精确位置控制及运动控制的核心部件。伺服电机主要由电机本体、传感器、控制器等部件组成。其中，电机本体采用某种类型的电机结构，如直流电机、交流电机等；传感器负责实时检测电机的运动状态和位置信息；控制器根据传感器反馈的信息，对电机进行精确控制，实现所需的位置、速度和力的控制。



图 2-28　步进电机



图 2-29　伺服电机

直流伺服电机分为有刷电机和无刷电机。有刷电机成本低、结构简单、启动转矩大、调速范围宽、控制容易，但需要维护（换碳刷），会产生电磁干扰，因此它常用于低成本的普通工业和民用场合。无刷电机体积小、重量轻、出力大、效率高、响应快、转速高、噪声低、运行温度低、寿命长、转动平滑、容易实现智能化，但控制复杂，电机免维护，可用于各种环境。

交流伺服电机也是无刷电机，分为同步电机和异步电机，运动控制中一般都用同步电机，它的功率范围大，最高转动速度低，且随着功率增大而快速降低。交流伺服电机结构简单、制造方便、价格低廉、坚固耐用、惯量小、易于提高系统的快速性，适用于高速、大力矩工作状态，运行可靠、很少需要维护，可用于恶劣环境等。交流伺服电机由于采用电子换向，无换向火花，故在易燃易爆环境中得到了广泛的使用。机器人关节驱动电机的功率范围般为 0.1～10 千瓦。交流伺服电机、直流伺服电机均采用位置闭环控制，一般用于高精度、高速度的机器人驱动系统中。

化学工业出版社

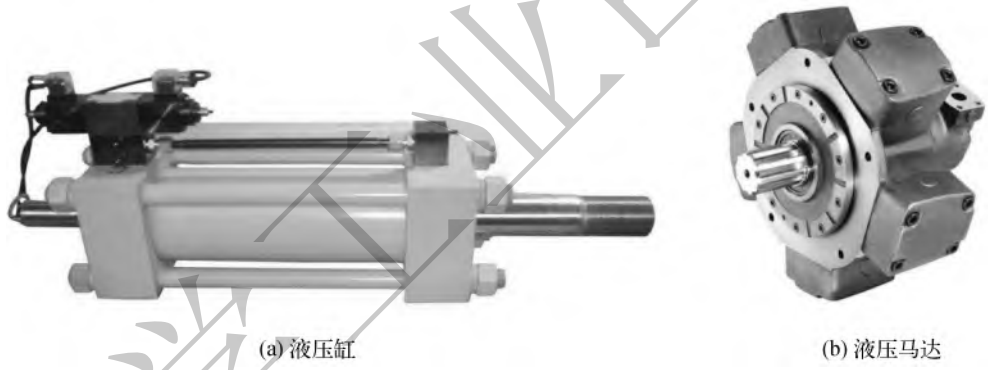
2.5.2 液压驱动系统

在机器人的发展过程中，液压驱动是较早被采用的驱动方式。世界上首先问世的商品化机器人“Unimate”就是液压机器人。

液压系统由液压源（油泵）、驱动器（各种液压缸、液压马达，如图 2-30 所示）、伺服阀、传感器和控制器等组成，通过这些元器件的组合，组成伺服控制系统，液压源产生一定的压力，通过伺服阀控制液体的压力和流量，从而由驱动器带动执行机构工作。

液压缸的推杆做直线运动，可以直接推动机械手臂伸缩运动；液压马达类似电机，由液压驱动输出轴转动，可以带动机器人手臂关节做回转运动。

液压驱动的特点是输出力和功率更大、力或力矩惯量比大，动作平稳、耐冲击、响应快速、防爆性好，易于实现直接驱动等。故适于在承载能力大、惯量大、防爆环境条件下使用，常用于大型机器人关节的驱动。但效率比电驱动要低，而且液压元件要求有较高的制造精度和密封性能，液压系统液体泄漏会对环境和设备造成污染，工作噪声较高，对机器人的体积和重量有一定的要求。



(a) 液压缸　　(b) 液压马达

图 2-30　液压驱动器

2.5.3 气压驱动系统

气压驱动系统通过压缩气体的压力来驱动机器人的运动和操作。这种驱动方式的优点是气源方便、动作迅速、结构简单、造价较低、维修方便、具有缓冲作用；缺点是空气具有可压缩性，致使工作速度的稳定性较差，刚度差，难以进行速度控制，所以多用于精度不高的点位控制机器人，因气源压力不可太高，故此类机器人适宜抓举力要求较小的场合。

气压驱动系统主要由气源装置（空气压缩机）、执行元器件（气缸、气动马达）、控制元器件及辅助元器件 4 部分组成。

气压驱动系统的运动方式与液压驱动类似。

化学工业出版社

2.5.4 新型驱动器

随着机器人技术的不断发展，出现了一些利用新的原理工作的驱动器，如压电驱动器、静电驱动器、人工肌肉驱动器、形状记忆合金驱动器、磁致伸缩驱动器、超声波电机、光驱动器等。

压电驱动器是利用压电材料的逆压电效应，将电能转变为机械能或机械运动，实现微量位移的执行装置。压电材料具有易于微型化、控制方便、低压驱动、对环境影响小以及无电磁干扰等很多优点。

超声波电机是 20 世纪 80 年代中期发展起来的一种全新概念的新型驱动装置，它利用压电材料的逆压电效应，将电能转换为弹性体的超声振动，并将摩擦传动转换成运动体的回转或直线运动。该种电机具有转速低、转矩大，可实现直接驱动；动作响应快、控制性能好、结构紧凑、体积小、噪声小、断电自锁等优点，它与传统电磁式电机最显著的差别是无磁且不受磁场的影响。它的缺点是摩擦损耗大、效率低，只有 10%～40%，输出功率小，目前实际应用的只有 10 瓦左右，寿命短，只有 1000～5000 小时，不适合连续工作。

形状记忆合金是一种特殊的合金，即使产生变形，但当加热到某一适当温度时，它就能恢复到变形前的形状。利用这种技术的驱动器即为形状记忆合金驱动器。它具有位移较大、功率质量比高、变位迅速、方向自由的特点。形状记忆合金驱动器可做成非常简单的形式，在工作时不存在外摩擦，因此工作时无任何噪声，不会产生磨粒，没有任何污染，这对微型化也是非常有利的。特别适用于小负载、高速度、高精度的机器人装配作业，以及显微镜内样品移动装置、反应堆驱动装置、医用内窥镜、人工心脏、探测器、保护器等产品上。

某些磁性体的外部一旦加上磁场则其外形尺寸就会发生变化，利用这种现象制作的驱动器称为磁致伸缩驱动器。1972 年，Clark 等首先发现在室温下 Laves 相稀土-铁化合物 RFe_2（R 代表稀土元素）的磁致伸缩是 Fe、Ni 等传统磁致伸缩材料的 100 倍，这种材料称为超磁致伸缩材料。超磁致伸缩材料具有伸缩效应变大、响应速度快、输出力大等特点。

人工肌肉驱动器为骨架-腱-肌肉的生物运动方式，是为了使机器人手臂能完成比较柔顺的作业任务，实现骨骼-肌肉的部分功能而研制的驱动装置。现在已经研制出多种不同类型的人工肌肉，例如利用机械化学物质的高分子凝胶、形状记忆合金制作的人工肌肉，应用最多的还是气动人工肌肉。

气动人工肌肉是一种拉伸型气动执行元器件，当通入压缩空气时，能像人类的肌肉那样，产生很强的收缩力，所以称为气动人工肌肉。其结构简单、紧凑，在小型、轻质的机械手开发中具有突出优势；它的高度柔性使其在机器人柔顺性方面很有应用潜力；它安装简便、不需要复杂的机构及精度要求，甚至可以沿弯角安装；无滑动部件，动作平滑，响应快，可实现极慢速的、更接近于自然生物的运动；同时，它还具备价格低廉、输出力/自重比高、节能、自缓冲、自阻尼、防尘、抗污染等优点，所以在灵巧手

化学工业出版社

的设计中采用了气动人工肌肉驱动的方式。

如图 2-31 所示为英国 Shadow 公司生产的 Mckibhen 型气动人工肌肉示意，其传动方式采用人工腱传动。所有手指都由柔索驱动，而人工肌肉则固定于前臂上，柔索穿过手掌与人工肌肉相连，驱动手腕动作的人工肌肉固定于大臂上。

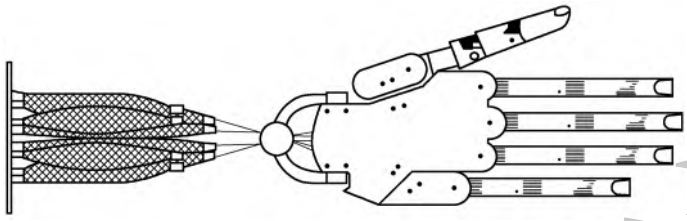


图 2-31　美国 Shadow 公司生产的 Mckibben 型气动人工肌肉示意

2.6　机器人的传动装置

在机器人的驱动中，如果用转速高的电机驱动机械臂低速转动，就要用到减速装置。另外，如果要用旋转的电机实现机械臂的直线运动，则要用到将旋转变换为直线运动的装置，比如齿轮齿条、丝杠传动装置等，如图 2-32 所示。

在机器人中，减速装置是连接机器人动力源和执行机构的中间装置，是保证机器人实现到达目标位置的精确度的核心部件。通过合理地选用减速装置，可精确地将机器人动力源转速降到机器人所需要的速度。与通用减速装置相比，应用于机器人关节处的减速装置具有体积小、功率大、重量轻和易于控制等特点。

目前应用于机器人的减速装置产品主要有三类，分别是谐波减速器、RV 减速器和摆线针轮减速器，关节机器人主要采用谐波减速器和 RV 减速器。在关节机器人中，由于 RV 减速器具有更高的刚度和回转精度，一般将 RV 减速器放置在机座、大臂、肩部等重负载的位置，而将谐波减速器放置在小臂、腕部或手部等轻负载的位置。

(1) 机器人的谐波减速器

谐波减速器是利用行星轮传动原理发展起来的一种新型减速器，如图 2-32（a）所示，是依靠柔性零件产生弹性机械波来传递动力和运动的一种行星轮传动。谐波减速器由固定的内齿刚轮、柔轮和使柔轮发生径向变形的波发生器三个基本构件组成。它具有结构简单、体积小、重量轻、传动比范围大、传动精度高、承载能力大、传动效率高、运动平稳、无冲击、噪声小等优点，在机器人领域得到了广泛应用。

(2) 机器人的 RV 减速器

RV 减速器由一个行星齿轮减速器的前级和一个摆线针轮减速器的后级组成，RV 减速器具有结构紧凑，传动比大，以及在一定条件下具有自锁功能的传动机械，体积小、重量轻、扭转刚度大、传动比范围大、寿命长、精度保持稳定、效率高、传动平稳

化学工业出版社

等优点，在机器人领域占有主导地位，如图 2-32（b）所示。RV 减速器与谐波减速器相比，具有较高的疲劳强度、刚度和寿命，而且回差精度稳定，不像谐波减速器那样随着使用时间增长，运动精度显著降低，因此世界上许多高精度机器人的传动装置多采用 RV 减速器。



(a) 谐波减速器　　(b) RV减速器

(c) 同步带传动　　(d) 滚珠丝杠传动

图 2-32　机器人常用的传动装置

(3) 丝杠传动机构

丝杠传动机构的作用是把电机的转动转变为直线运动，主要有滑动丝杠、滚珠丝杠等。机器人传动用的丝杠具有结构紧凑、间隙小和传动效率高等特点。滑动丝杠与螺母之间是滑动摩擦，传动中不会产生冲击，传动平稳，无噪声，能自锁，可以用较小的驱动转矩获得较大的牵引力，但是传动效率低。滚珠丝杠与螺母之间有滚珠，是滚动摩擦，传动效率高，而且传动精度和定位精度都很高，传动时灵敏度和平稳性也很好，由于磨损小，滚珠丝杠的使用寿命比较长，但成本较高。机械臂的伸缩、升降等很多地方都用到了丝杠传动机构。

(4) 同步带传动

同步带的传动面上有与带轮啮合的齿，因此同步带传动时无滑动，初始张力小，被动轴的轴承不易过载。因无滑动，它除了用作动力传动外，还适用于定位。同步带传动

化学工业出版社

属于低惯性传动，适合在电机和高速比减速器之间使用。

(5) 绳传动

绳传动广泛应用于机器人的手爪开合传动，特别适合有限行程的运动传递。绳传动的主要优点是钢丝绳强度大，各方向上的柔性好，尺寸小，预载后能消除传动间隙。绳传动的主要缺点是不加预载时存在传动间隙；因为绳索的蠕变和索夹的松弛，使传动不稳定；多层缠绕后，在内层绳索及支承中损耗能量，效率低。

(6) 钢带传动

钢带传动与绳传动结构类似，它的优点是传动比精确，传动件重量轻，惯量小，传动参数稳定，柔性好，不需要润滑，强度高，钢带末端紧固在驱动轮和被驱动轮上，因此，摩擦力不是传动的重要因素。钢带传动适合有限行程的传动。

2.7 机器人的感觉器官

机器人感知系统担任着神经系统的角色，将机器人各种内部状态信息和环境信息从信号转变为机器人自身或者机器人之间能够理解和应用的数据、信息甚至知识，它与机器人控制系统和决策系统组成机器人的核心。机器人是通过传感器获取各种信息的，传感器相当于人的眼睛、鼻子等感觉器官。传感器及其信息处理系统，是构成机器人智能的重要部分，它为机器人智能作业提供决策依据。机器人工作的稳定性和可靠性依赖于机器人对工作环境的感知和自主的适应能力，因此需要高性能传感器及各传感器之间协调工作。

传感技术是先进机器人的三大要素（感知、决策和动作）之一，机器人根据完成的任务不同，配置的传感器类型和规格也不同。

传感器是一种测量物体的物理量变化（如位移、力、加速度、温度等），并将这些变化转换成电信号（如电压、电流等）的检测部件或装置，通常由敏感元件、转换元件、转换电路和辅助电源等组成。其中，敏感元件的基本功能是将某种不易测量的物理量转换为易于测量的物理量；转换元件的功能是将敏感元件输出的物理量转换成电量；转换电路的功能是将敏感元件产生的不易测量的小信号进行变换放大，使传感器输出的信号能够由机器人系统处理。

通常根据用途不同，机器人传感器可以分为两大类：用于检测机器人自身状态的内部传感器和用于检测机器人相关环境参数的外部传感器。

内部传感器常用于检测机器人自身的状态参数，如关节的位移、速度、加速度、力和力矩，还有倾斜角和振动等物理量等。

外部传感器则主要用于检测机器人周边环境情况及工作状况，通常与机器人的目标识别、作业安全等因素有关。外部传感器可分为接触传感器和非接触传感器，通常包括视觉传感器、听觉传感器、嗅觉传感器、接近觉传感器、距离传感器、触觉传感器、力

化学工业出版社

传感器和温度传感器等。如图 2-33 所示为机器人传感器的分类。

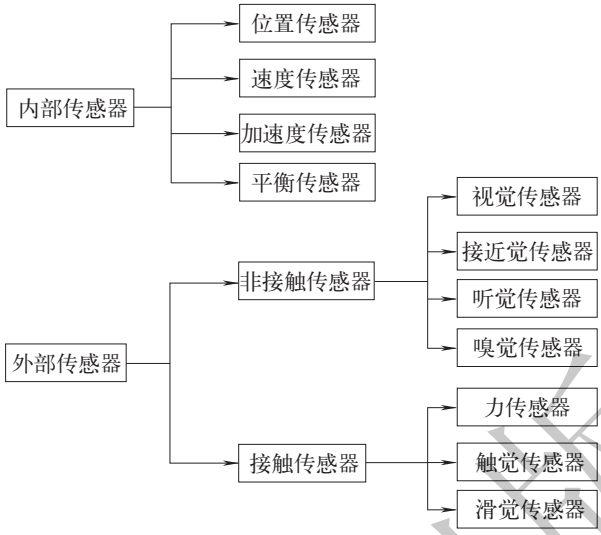


图 2-33　机器人传感器的分类类

2.7.1　机器人的位置位移传感器

机器人的位置位移传感器可分为两类。

① 检测规定的位置，常用 ON/OFF 两个状态值。这种方法用于检测机器人的起始原点、终点位置或某个确定的位置。常用的检测元件有微型开关、光电开关等。规定的位移量或力作用在微型开关的可动部分上，开关的电气触点断开（常闭）或接通（常开）并向控制回路发出动作信号。

② 测量可变位置和角度（即测量机器人关节线位移和角位移）的传感器，是机器人位置反馈控制中必不可少的元器件。常用的有电位器、旋转变压器、编码器等。其中编码器既可以检测直线位移，又可以检测角位移。

(1) 光电开关

光电开关是由 LED 光源和光敏二极管或光敏晶体管等光敏元件，相隔一定距离而构成的透光式开关。光电开关的特点是非接触检测，精度可达到 0.5 毫米左右。

① 漫反射式光电开关。漫反射式光电开关是一种集发射器和接收器于一体的传感器，当有被检测物体经过时，将光电开关发射器发射的足够量的光线反射到接收器，于是光电开关就产生了开关信号。当被检测物体的表面光亮或其反光率极高时，漫反射式光电开关是首选的检测模式。

② 镜反射式光电开关。镜反射式光电开关也是集发射器与接收器于一体，光电开关发射器发出的光线经过反射镜，反射回接收器，当被检测物体经过且完全阻断光线时，光电开关就产生检测开关信号。

③ 对射式光电开关。对射式光电开关包含在结构上相互分离且光轴相对放置的发

化学工业出版社

射器和接收器，发射器发出的光线直接进入接收器。当被检测物体经过发射器和接收器之间且阻断光线时，光电开关就产生开关信号。当检测不透明物体时，对射式光电开关是最可靠的检测模式。

④ 槽式光电开关。槽式光电开关通常是标准的 U 形结构，其发射器和接收器分别位于 U 形槽的两边，并形成光轴。当被检测物体经过 U 形槽且阻断光轴时，光电开关就产生检测到的开关量信号。槽式光电开关比较安全可靠，适合检测高速变化、分辨透明与半透明物体。

(2) 电位器式位移传感器

电位器式位移传感器由一个绕线电阻（或薄膜电阻）和一个滑动触点组成。滑动触点通过机械装置受被检测量的控制，当被检测量的位置发生变化时，滑动触点也发生位移，从而改变滑动触点与电位器各端之间的电阻值和输出电压值，传感器根据这种输出电压值的变化，可以检测出机器人各关节的位置和位移量。

按照传感器的结构不同，电位器式位移传感器可分为直线型电位器式位移传感器和旋转型电位器式位移传感器，如图 2-34 所示。

直线型电位器式位移传感器主要用于检测直线位移，其电阻器采用直线型螺线管或直线型碳膜电阻，滑动触点也只能沿电阻的轴线方向做直线运动。直线型电位器式位移传感器的工作范围和分辨率受电阻器长度的限制，绕线电阻、电阻丝本身的不均匀性会造成传感器的输入、输出关系的非线性。

旋转型电位器式位移传感器的电阻元件呈圆弧状，滑动触点在电阻元件上做圆周运动。由于滑动触点等的限制，传感器的工作范围只能小于 360 度。机器人关节轴与传感器的旋转轴相连，根据测量的输出电压数值，即可计算出关节对应的旋转角。

电位器式位移传感器具有性能稳定、结构简单、使用方便、尺寸小、重量轻等优点，主要缺点是容易磨损，可靠性和寿命受到一定的影响。



图 2-34　电位器式位移传感器

(3) 光电编码器

光电编码器是集光、机、电技术于一体的数字化传感器，它利用光电转换原理将旋转信息转换为电信息，并以数字代码输出，可以高精度地测量转角或直线位移。光电编码器具有

化学工业出版社

测量范围大、检测精度高、价格便宜等优点，在机器人的位置检测领域得到了广泛的应用，一般把该传感器装在机器人各关节的转轴上，用来测量各关节转过的角度。

光电编码器分为绝对式和增量式两种类型。

① 绝对式光电编码器是一种直接编码式的测量元件，主要由多路光源、光敏元件和编码盘组成。它可以直接把被测转角或位移转化成相应的代码，指示的是绝对位置而无绝对误差，在电源切断时不会失去位置信息，但其结构复杂、价格昂贵，且不易做到高精度和高分辨率。

② 增量式光电编码器主要由光源、编码盘、检测光栅、光电检测器件和转换电路组成。它能够以数字形式测量出转轴相对于某一基准位置的瞬间角位置，此外还能测出转轴的转速和转向。

如图 2-35 所示为光电式增量编码器的结构。在圆盘上有规则地刻有透光和不透光的线条，在圆盘两侧，安放发光元件和光敏元件。光电编码器的光源最常用的是自身有聚光效果的发光二极管。当光电码盘随工作轴一起转动时，光线透过光电码盘和光栅板狭缝，形成忽明忽暗的光信号。光敏元件把此光信号转换成电脉冲信号，通过信号处理电路后，向数控系统输出脉冲信号，也可由数码管直接显示位移量。

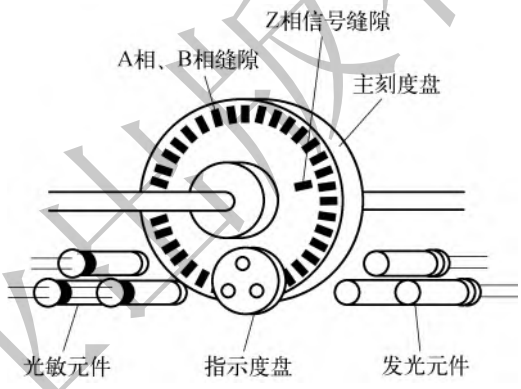


图 2-35　光电式增量编码器的结构图

增量式光电编码器的构造简单，易于实现；机械平均寿命长，可达到几万小时；分辨率高；抗干扰能力较强，可靠性较高；信号传输距离较长，但是无法直接读出转动轴的绝对位置信息。增量式光电编码器应用更为广泛，特别是在高分辨率和大量程角速率/位移测量系统中更具有优越性。

2.7.2　机器人速度、角速度传感器

(1) 编码器

编码器既可用作位置传感器，也可用作速度传感器。如果用编码器测量位移，那么就没有必要再单独使用速度传感器。对任意给定的角位移，编码器将产生确定数量的脉冲信号，通过统计指定时间内脉冲信号的数量，就能计算出相应的角速度。单位时间越短，得到的速度值就越准确，越接近实际的瞬时速度。但是，如果编码器的转动很缓慢，则测得的速度可能会变得不准确。

(2) 测速发电机

测速发电机是一种用于检测机械转速的电磁装置，它能把机械转速变换为电压信号，其输出电压与输入的转速成正比，其实质是一种微型发电机，可以作为测速、校正

化学工业出版社

和解算元件，广泛应用于机器人的关节速度测量中。

(3) 加速度传感器

随着机器人的高速化和高精度化，由机械运动部分刚性不足所引起的振动问题需要限制。从测量振动的目的出发，加速度传感器日趋受到重视，主要有应变片加速度传感器、伺服加速度传感器。可在机器人的各杆件上安装加速度传感器来测量振动加速度，并把它反馈到杆件的驱动器上；也可把加速度传感器安装在机器人手爪上，将测得的加速度加到反馈环节中，以改善机器人的性能。

2.7.3 力觉传感器

力觉是指机器人的指、腕和关节等运动中所受力或力矩的感知，用于感知夹持物体的状态，校正由于手臂等变形所引起的运动误差，保护机器人及零件不会损坏。机器人力觉传感器经常装于机器人关节处，通过检测弹性体变形来间接测量所受力，是机器人获得实际操作时的大部分力信息的装置，它直接影响着机器人的力控制性能。机器人在进行装配、搬运、研磨等作业时需要对工作力或力矩进行控制。例如在拧紧螺钉过程中需要有确定的拧紧力矩；搬运时，机器人手爪对工件需要有合理的握紧力，握力太小不足以搬动工件，太大则会损坏工件。

力觉传感器根据力的检测方式不同，可分为应变片式（检测应变或应力）、压电元件式及差动变压器式、电容位移计式等。其中，应变片式压力传感器最普遍，商品化的力传感器大多是这一种。应变片式力觉传感器的元件大多使用半导体应变片。将这种应变片安装于弹性结构的被检测处，就可以直接地或通过计算机检测具有多维的力和力矩。

(1) 应变片

应变片的电阻值与其受力产生的形变成正比，而形变本身又与施加的力成正比。于是，通过测量应变片的电阻，就可以确定施加力的大小。应变片常用于测量末端执行器和机器人腕部的作用力。例如，IBM7565 机器人的手爪端部就装有一组应变片，通过它们可测定手爪的作用力。控制器得到力的大小，并对此做出相应的反应。

(2) 多维力传感器

多维力传感器指的是一种能够同时测量两个方向以上力及力矩分量的力传感器，六维力/力矩传感器是多维力传感器最完整的形式，即能够同时测量三维空间的三个力分量和三个力矩分量的传感器，广泛使用的多维力传感器就是这种传感器，它是智能机器人实现力觉的关键零部件。

除了六维力传感器，还有二、三、四、五维的多维力传感器，每一种传感器都可能包含有多种组合形式。

这些多维力传感器可以广泛应用于机器人的末端执行器、关节、底盘等部位，使机

化学工业出版社

器人能够感知到自身的姿态、负载、摩擦、碰撞等信息，以及与环境和人类的接触、抓取、操作等信息。通过多维力传感器，机器人可以实现多种复杂的力控制策略，如阻抗控制、自适应控制、滑模控制等，以及多种高级的力觉功能，如力觉反馈、力觉融合、力觉学习等。这些功能可以使机器人在不确定的环境中完成各种精细的操作，如打磨、装配、拧紧、切割、碰撞检测、缝合等，以及与人类进行友好的交互，如握手、拥抱、按摩等。

三维力传感器能同时检测三维空间的三个力信息，控制系统通过它不但能检测和控制机器人手抓取物体的握力，而且可以检测抓取物体的重量，以及在抓取操作过程中是否有滑动、振动等。用于机器人手指的三维指力传感器有侧装和顶装式两种，侧装式三维力指力传感器一般用于二指的机器人夹持器，顶装式三维指力传感器一般用于机器人多指灵巧手。

六维力传感器（图 2-36）是利用弹性元件的变形来测量力和力矩，弹性元件是六维力传感器的核心部件，它的形状、尺寸、材料和布局决定了六维力传感器的性能。根据弹性元件的形状可以分为圆盘式、环形式、平行四边形式、六棱柱式等；根据检测元件的类型可以分为应变片式、压电式、光纤式、霍尔式等；根据应用场合可以分为工业型、医疗型、教育型、娱乐型等。广泛应用于精密装配、自动磨削、轮廓跟踪、双手协调、零力示教等作业中，在航空、航天及机械加工、汽车等行业中有广泛的应用。



图 2-36　六维力传感器

六维力传感器的尺寸和重量都需要不断减小，以适应机器人的小型化和轻量化的趋势，以及机器人的各个部位的安装空间和负载限制。这就需要采用更紧凑的布局、更轻便的材料、更微型的检测元件、更集成的电路等手段，来缩小六维力传感器的体积和重量。

按传感器安装部位来说，力觉传感器可分为腕力传感器、关节力传感器、握力传感器、脚力传感器、手指力传感器等。

腕力传感器安装于腕关节处测量三个方向的力（力矩），目前常用六维力觉传感器，使用最广泛的是电阻应变片式，按其弹性体结构形式可分为筒式和十字形两种。其中筒式具有结构简单、弹性梁利用率高、灵敏度高的特点；而十字形的传感器结构简单、坐标建立容易，但加工精度高。腕力传感器两端通过法兰盘分别与机器人腕部和手爪相连接。当机械手夹住工件进行操作时，通过腕力传感器可以输出三维（力和力矩）分量反

化学工业出版社

馈给机器人控制系统，以控制或调节机械手的运动，完成所要求的作业。由于腕力传感器既是测量的载体，又是传递力的环节，所以腕力传感器的结构一般为弹性结构梁，通过测量弹性体的变形得到 3 个方向的力（力矩）。

手指力传感器，一般通过应变片或压阻敏感元件测量多维力而产生输出信号，常用于小范围作业，如灵巧手抓鸡蛋等实验，精度高、可靠性好，渐渐成为力控制研究的一个重要方向，但多指协调复杂。

两足步行机器人在人类生活的环境中应用较为方便，但不稳定，控制较复杂。为了解步行时的状态，需要在脚部安装各种传感器，其中脚力传感器是与外界接触的传感器，对步行控制来说是相当重要的。马斯克展示的 Optimus Gen2 人形机器人，在步行速度上相比前一代提升 30%，除单腿实现瑜伽动作之外，还能平稳实现 90 度深蹲。Optimus Gen2 人形机器人实现稳态行走的背后，除了减速器的作用外，显然与其足部增加六维力传感器有关，让机器人在脚步反馈方面有了稳步提升。

2.7.4 机器人的视觉

人类从外界获得的图像信息大多数是由眼睛得到的。人的眼睛是由含有感光细胞的视网膜和作为附属结构的折光射统等部分组成的，适宜的刺激波长是 370～740 纳米的电磁波。在这个可见光谱的范围内，人脑通过接收处理来自视网膜的传入信息，可以看清视野内发光物体或反光物体的轮廓、形状、颜色、大小、远近和表面细节等情况。

机器人视觉可为机器人的动作控制提供视觉反馈；利用视觉信息跟踪路径，检测障碍物以及识别路标或环境，以确定机器人所在方位，为移动式机器人的视觉导航；代替或帮助人工对质量控制、安全检查进行所需要的视觉检验，广泛应用于电子、汽车、机械等工业部门和医学、军事领域。将近 80%的工业视觉系统主要用在检测方面，包括用于提高生产效率、控制生产过程中的产品质量、采集产品数据等。

机器人视觉硬件主要包括图像获取和视觉处理分析、输出或显示三部分，而图像获取部分由照明系统、视觉传感器、模拟-数字转换器和帧存储器等组成。图像获取设备包括工业相机、立体相机、摄像机等；图像处理设备包括相应的计算机软件和硬件系统。机器人通过视觉传感器获取环境的二维图像，并通过视觉处理器进行分析和解释，进而转换为符号，让机器人能够辨识物体，并确定其位置。目前的视觉技术已经能够识别人的手势和面部表情，即人机界面的功能也可以实现。

视觉传感器是利用光学元件和成像装置获取外部环境图像信息的仪器，主要功能是获取足够的机器视觉系统要处理的最原始图像，是整个机器视觉系统信息的直接来源，主要由图像传感器组成，有时还要配以光投射器及其他辅助设备。图像传感器主要使用激光扫描器、电荷耦合器件（charge coupled device，CCD）互补金属氧化物半导体（complementary metal oxide semiconductor，CMOS）。

客观世界中三维物体经由视觉传感器转变为二维的平面图像，再经图像处理，输出该物体的图像。通常机器人判断物体位置和形状需要两类信息，即距离信息和明暗信息，还有色彩信息。机器人视觉系统对光线的依赖性很大，往往需要好的照明条件，以

化学工业出版社

便使物体所形成的图像最为清晰，因此还需要一定的灯光照明。

视频摄像头（TV 摄像机）是一种广泛使用的图像输入设备，如图 2-37 所示。它能将景物、图片等光学信号通过光电器件转换成电信号或图像数据，主要由摄影镜头、摄像管或其他光电转换器、放大器和扫描电路等组成，有黑白电视摄像机和彩色电视摄像机两种。目前，彩色电视摄像机虽然已经很普遍，价钱也不太贵，但在工业视觉系统中却还常常选用黑白电视摄像机，主要原因是系统只需要具有一定灰度的图像，经过处理后变成二值图像，再进行匹配和识别，具有处理数据量小、处理速度快的优点。



图 2-37　视频摄像头

工业相机又俗称工业摄像机，如图 2-38 所示，相比于传统的民用相机（摄像机）而言，它具有高的图像稳定性、高传输能力和高抗干扰能力等，市面上工业相机大多是基于 CCD 或 CMOS 芯片的相机。



图 2-38　海康工业相机

CCD 是一种半导体器件，是目前机器视觉最为常用的图像传感器。它集光电转换及电荷存储、电荷转移、信号读取于一体，是典型的固体成像器件。CCD 的特点是以电荷作为信号，而不同于其他器件是以电流或者电压为信号，它能够将光线变为电荷并将电荷存储及转移，也可将存储的电荷取出使电压发生变化。这类成像器件通过光电转换形成电荷包，而后在驱动脉冲的作用下转移、放大输出图像信号。典型的 CCD 相机由光学镜头、时序及同步信号发生器、垂直驱动器、模拟/数字信号处理电路组成。CCD 具有无滞后、低电压工作、低功耗等优点，以其构成的相机具有体积小、重量轻、不受磁场影响、具有抗震动和撞击的特性而被广泛应用。

CMOS 图像传感器的开发最早出现在 20 世纪 70 年代初，90 年代初期，随着超大

化学工业出版社

规模集成电路（VLSI）制造工艺技术的发展，CMOS 图像传感器得到迅速发展。CMOS 图像传感器将光敏元阵列、图像信号放大器、信号读取电路、模数转换电路、图像信号处理器及控制器集成在一块芯片上，还具有局部像素的编程随机访问的优点。CMOS 图像传感器以其良好的集成性、低功耗、高速传输和宽动态范围等特点在高分辨率和高速场合得到广泛的应用。

2.7.5 机器人的听觉

人用语言指挥机器人比用键盘指挥更方便，因此需要听觉传感器对人发出的各种声音进行检测，然后通过语言识别系统识别出命令、执行命令。例如，小爱同学、Siri 等智能助手，它们可以识别并执行我们的语音指令，让我们享受到语音交互的便捷。要实现该想法需要听觉传感器及语音识别系统。

听觉传感器的功能是将声音信号转换为电信号，通常也称传声器、麦克风、话筒。常用的听觉传感器有动圈式传感器、电容式传感器，这就是机器人的“耳朵”。机器人“听到声音”，就是将声音转换成电信号，然后经过对电信号的处理，获得声音包含的信息。

机器人如何模拟人类的听觉功能？这主要依赖声音识别技术，也就是为了将声音信号转化为机器可以理解的代码，机器人要通过语音识别芯片对传感器采集的语音信号进行识别和理解，转变为相应的文本或代码。这种技术需要处理大量的数据，通过复杂的算法来识别和解析声音信息。

机器人如何模仿人类的说话功能？它们需要拥有一个强大的语音合成系统，将文字信息转化为语音。正如我们可以说出丰富多彩的语言，优秀的语音合成系统也可以生成接近真实人类语音的输出。例如，谷歌的语音合成技术，可以生成流畅、自然的语音，让我们与机器人之间的交流更加畅快。

听觉系统的另一个功能是要定位（或定向）声音的来源，这就需要机器人听觉系统通过麦克风阵列模拟“人耳”来实现。“定位（或定向）”的本质是为了从声音信号中获得目标的位置（或方向）信息，就需要 2 个以上配置在空间不同位置的声音传感器构成阵列，对于声源定位，该传感器阵列便是麦克风阵列。应用于机器人听觉的麦克风阵列有两种模式：“双耳”模式，即“双耳系统”，模仿人类的听觉系统；“多耳”模式，尽可能使用更多的麦克风构成阵列。

2.7.6 接触觉传感器

接触觉传感器是用于判断机器人（主要指手脚）是否接触到外界物体或测量被接触物体特征的传感器，检测与对象是否接触，接触的位置，确定对象位置，感知物体的形状、软硬，进行速度控制、保障安全。

接触觉传感器有微动开关式、导电橡胶式、含碳海绵式、碳素纤维式、气动复位式等类型。

化学工业出版社

(1) 微动开关式

它由弹簧和触头构成。触头接触外界物体后离开基板，造成信号通路断开，从而测到与外界物体的接触。这种常闭式（未接触时一直接通）微动开关的优点是使用方便，结构简单；缺点是易产生机械振荡，触头易氧化。

(2) 导电橡胶式

它以导电橡胶为敏感元件，当触头接触外界物体受压后，压迫导电橡胶，使它的电阻发生改变，从而使流经导电橡胶的电流发生变化。这种传感器的缺点是：由于导电橡胶的材料配方存在差异，出现的漂移和滞后特性也不一致，优点是具有柔性。

(3) 含碳海绵式

它在基板上装有由海绵构成的弹性体，在海绵中按阵列布以含碳海绵。接触物体受压后，含碳海绵的电阻减小，测量流经含碳海绵电流的大小，可确定受压程度。这种传感器也可用作压觉传感器。优点是结构简单，弹性好，使用方便，缺点是碳素分布的均匀性直接影响测量结果，受压后恢复能力较差。

(4) 碳素纤维式

以碳素纤维为上表层，下表层为基板，中间装以氨基甲酸酯和金属电极。接触外界物体时，碳素纤维受压与电极接触导电。它的特点是柔性好，可装于机械手臂曲面处，但滞后较大。

(5) 气动复位式

它有柔性绝缘表面，受压时变形，脱离接触时则由压缩空气作为复位的动力。与外界物体接触时，其内部的弹性圆泡（被铜箔）与下部触点接触而导电。它的特点是柔性好，可靠性高，但需要压缩空气源。

简单的接触觉传感器以阵列形式排列组合成触觉传感器，它以特定次序向控制器发送接触和形状信息。

接触觉传感器可以提供的物体的信息如图 2-39 所示。当触觉传感器与物体接触时，依据物体的形状和尺寸，不同的接触觉传感器将以不同的次序对接触做出不同的反应，控制器就利用这些信息来确定物体的大小和形状。

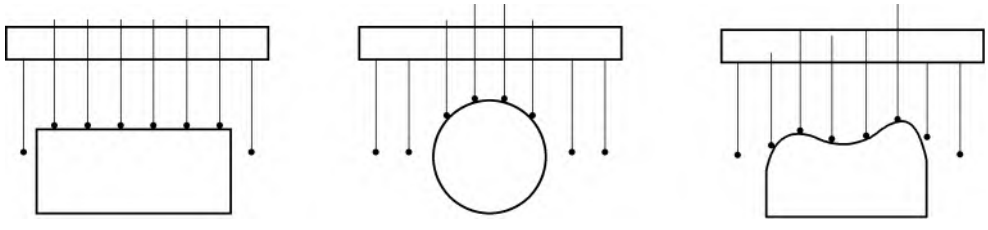


图 2-39　接触觉传感器可提供的物体信息

化学工业出版社

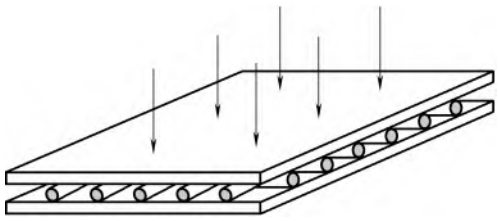


图 2-40　类皮肤触觉传感器

类皮肤连续触觉传感器的功能与人的皮肤类似，需要采用传感器阵列实现，它们被嵌在两层聚合物之间，彼此用绝缘网格隔离，如图 2-40 所示。当有力作用在聚合物上时，力就会被传给周围的一些传感器，这些传感器会产生与所受力成正比的信号。对于分辨率要求较低的场合，使用这些传感器会产生令人满意的效果。

2.7.7　机器人的接近觉

接近觉是一种粗略的距离感觉。接近觉传感器用来测量相距对象物体或障碍物的距离、对象物体的表面性质等。接近觉传感器可以探测在几毫米至几十厘米内的近距离范围内，在接触对象之前机器人和对象物体间的空间相对关系信息。它的作用包括：判断在一定距离范围内是否有物体接近，确保安全、防止物体的接近或碰撞；确认物体的存在；检测物体的姿态和位置；测量物体的状态，进而制定操作规划和行动规划。

接近觉传感器一般用非接触式测量元件，有许多不同的类型，如电磁式、涡流式、霍尔效应式、光学式、超声波式、电感式和电容式等。在设计和制造机器人时，还应考虑周围的环境条件及空间限制，选择适合于目标的接近觉传感器，以满足所要求的性能。

(1) 电磁式接近觉传感器

如图 2-41 所示为电磁式接近觉传感器的结构。加有高频信号的励磁线圈产生的高频电磁场作用于金属板，在其中产生涡流，该涡流反作用于线圈。传感器接近金属板时检测线圈的输出会发生变化。

(2) 光学接近觉传感器

光学接近觉传感器由用作发射器的光源和接收器两部分组成。发射器则通常是发光二极管，接收器通常是光敏晶体管，能够感知光线的有无，两者结合就形成了一个光传感器。对于接近觉传感器，物体处在传感器作用范围内时，发射器发出的光才能被接收器接收，否则接收器就接收不到光线，也就不能产生信号。

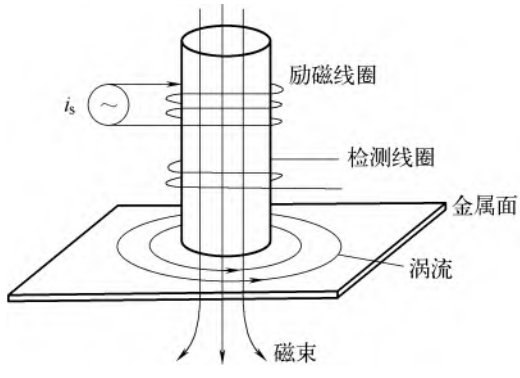


图 2-41　电磁式接近觉传感器的结构

(3) 超声波接近觉传感器

在这种传感器中，超声波发射器能够间断地发出高频声波（通常在 200kHz 范围

内）。超声波传感器有两种工作模式，即对置模式和回波模式。在对置模式中，接收器放置在发射器对面，而在回波模式中，接收器放置在发射器旁边或与发射器集成在一起，负责接收反射回来的声波。如果接收器在其工作范围内（对置模式）或声波被靠近传感器的物体表面反射（回波模式），则接收器就会检测出声波，并产生相应信号，否则接收器就检测不到声波，也就没有信号。

(4) 感应式接近觉传感器

感应式接近觉传感器用于检测金属表面。这种传感器其实就是一个带有铁氧体磁心、振荡器-检测器和固态开关的线圈，当金属物体出现在传感器附近时，振荡器的振幅会很小，检测器检测到这一变化后，断开固态开关。当物体离开传感器的作用范围时，固态开关又会接通。

(5) 电容式接近觉传感器

电容式接近觉传感器利用电容量的变化产生接近觉，利用电容极板距离的变化产生电容的变化，可检测出与被接近物的距离。电容式接近觉传感器具有对物体的颜色、构造和表面都不敏感，且实时性好的优点。

(6) 涡流接近觉传感器

当导体放置在变化的磁场中时，内部就会产生涡流。涡流传感器具有两个线圈，第一组线圈产生作为参考用的变化磁通，在有导电材料接近时，其中将会感应出涡流，感应出的涡流又会产生与第一组线圈反向的磁通使总的磁通减少。总磁通的变化与导电材料的接近程度成正比，它可由第二组线圈检测出来。涡流传感器不仅能检测是否有导电材料，而且能够对材料的空隙、裂缝、厚度等进行非破坏性检测。

(7) 霍尔式接近觉传感器

当磁性物体移近霍尔开关时，开关检测面上的霍尔元件因产生霍尔效应而使开关内部电路状态发生变化，由此识别附近有磁性物体存在，进而控制开关的通或断。这种接近开关的检测对象必须是磁性物体。霍尔开关具有无触电、低功耗、长使用寿命、响应频率高等特点，内部采用环氧树脂封灌成一体化，所以能在各类恶劣环境下可靠地工作。

2.7.8 机器人的距离传感器

与接近觉传感器不同，测距仪用于测量较长的距离，它可以探测障碍物或物体表面的形状，并且用于向机器人系统提供早期信息。测距仪一般是基于可见光、红外光、激光和超声波的。

(1) 超声波测距仪

超声波测距的原理是利用超声波在空气中的传播速度为已知，测量声波在发射后遇

化学工业出版社

到障碍物反射回来的时间，根据发射和接收的时间差计算出发射点到障碍物的实际距离。超声波系统结构坚固、简单、廉价并且能耗低，可以很容易地用于摄像机调焦、运动探测报警、机器人导航和测距。它的缺点是分辨率和最大工作距离受到限制，其中对分辨率的限制来自声波的波长、传输介质中的温度和传播速度的不一致；对最大距离的限制来自介质对超声波能量的吸收。目前，超声波设备的频率范围在 20kHz～2GHz 之间。

(2) 红外测距传感器

红外测距传感器利用红外信号遇到障碍物距离不同、反射强度也不同的原理，进行障碍物远近的检测。红外测距传感器具有一对红外信号发射与接收二极管，发射管发射特定频率的红外信号，接收管接收这种频率的红外信号；当红外的检测方向遇到障碍物时，红外信号反射回来被接收管接收，经过处理之后，通过数字传感器接口传到机器人主机，机器人即可利用红外的返回信号来识别周围环境的变化。受器件特性的影响，一般的红外光电开关抗干扰性差，受环境光影响较大，并且探测物体的颜色、表面光滑程度不同，反射回的红外线强弱也会有所不同。

(3) 激光测距仪

激光测距仪是利用调制激光的某个参数实现对目标的距离测量的仪器。

按照测距方法分为相位法测距仪和脉冲法测距仪。相位法激光测距仪是利用检测发射光和反射光在空间中传播时发生的相位差来检测距离的。脉冲式激光测距仪是在工作时向目标射出一束或一序列短暂的脉冲激光束，由光电元件接收目标反射的激光束，计时器测定激光束从发射到接收的时间，计算出从观测者到目标的距离。激光测距仪重量轻、体积小、操作简单、速度快而准确，其误差仅为其他光学测距仪的五分之一到数百分之一。当发射的激光束功率足够时，测程可达 40 千米以上，激光测距仪可昼夜作业，但空间中有对激光吸收率较高的物质时，其测距的距离和精度会下降。

2.7.9 机器人姿态传感器

姿态传感器是用来检测机器人与地面相对关系的传感器，当机器人被限制在工厂的地面时，则没有必要安装这种传感器，如大部分工业机器人。但当机器人脱离了这个限制，并且能够进行自由移动（如移动机器人），安装姿态传感器就成为必要的了。倾斜角姿态传感器测量重力的方向，应用于机械手末端执行器或移动机器人的姿态控制中。根据测量原理，倾斜角传感器分为液体式、垂直振子式和陀螺式。

典型的姿态传感器是陀螺仪。它利用高速旋的转子在旋转过程中旋转轴所指的方向保持不变的特性，来精确确定物体的方位。转子通过万向接头安装在机器人上。如图 2-42 所示为速率陀螺仪的原理。机器人围绕着输入轴以一定角速度转动时，与输入轴正交的输出轴仅转过一定的角度。在速率陀螺仪中，加装了弹簧。卸掉这个弹簧后的陀螺仪称为速率积分陀螺仪，此时输出轴以一定角速度旋转，且此角速度与围绕输入轴

化学工业出版社

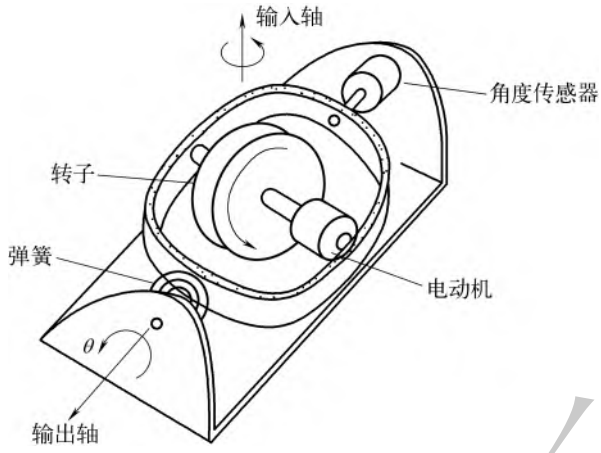


图 2-42　速率陀螺仪的原理

的旋转角速度成正比。

姿态传感器设置在机器人的躯干部分，它用来检测移动中的姿态和方位变化，保持机器人的正确姿态，并且实现指令要求的方位。

除此之外，还有气体速率陀螺仪、光陀螺仪，前者利用了姿态变化时，气流也发生变化这一现象；后者则利用当环路状光径相对于惯性空间旋转时，沿这种光径传播的光，会因向右旋转而呈现速度变化的现象。

2.7.10　机器人滑觉传感器

机器人在抓取不知属性的物体时，其自身应能确定最佳握紧力的给定值，防止打滑。当握紧力不够时，要检测被握紧物体的滑动，利用该检测信号，在不损害物体的前提下，考虑最可靠的夹持方法。滑觉检测的是垂直握持面方向物体的位移，实现此功能的传感器称为滑觉传感器。

滑觉传感器有滚动式和球式，还有一种通过振动检测滑觉的传感器。物体在传感器表面上滑动时，和滚轮或环相接触，把滑动变成转动。

滚动式滑觉传感器中，滑动物体引起滚轮滚动，用磁铁和静止的磁头，或用光传感器进行检测，这种传感器只能检测到一个方向的滑动；球式传感器用球代替滚轮，可以检测各个方向的滑动；振动式滑觉传感器表面伸出的触针能和物体接触，物体滚动时，触针与物体接触而产生振动，这个振动由压点传感器或磁场线圈结构的微小位移计检测。

(1) 光纤滑觉传感器

在光纤滑觉传感系统中，利用滑球的微小转动来进行切向滑觉的转换，在滑球中心嵌入一个平面反射镜。光纤探头由中心的发射光纤和对称布设的四根光信号接收光纤组成。光纤滑觉传感器的结构如图 2-43 所示。传感器壳体中开有一个球冠形槽，可使滑球在其中滑动，滑球的一小部分露出并与乳胶膜相接触，滑动物体通过乳胶膜与滑球发

化学工业出版社

生相互作用。滑球中心平面与一个内嵌平面反射镜的刚性圆板固接。该圆板通过八个仪表弹簧与传感器壳体相连，构成了该滑觉传感器的弹性恢复系统。

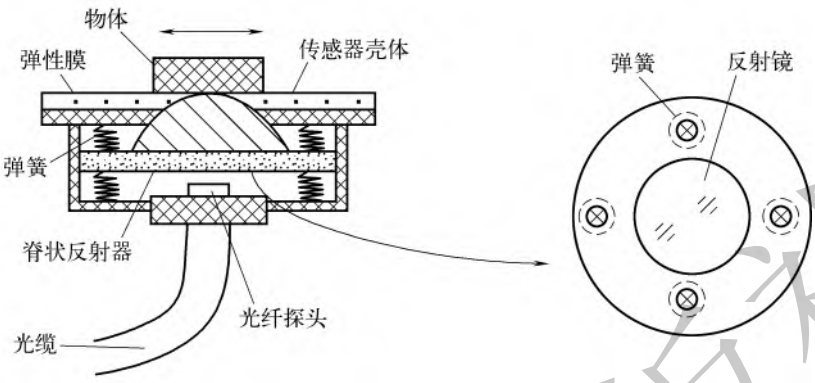


图 2-43　光纤滑觉传感器的结构

(2) 机器人专用滑觉传感器

如图 2-44 所示是一种球形机器人专用滑觉传感器。它由一个金属球和触针组成，金属球表面分别间隔地排列着许多导电和绝缘小格。触针头很细，每次只能触及一个格。当工件滑动时，金属球也随之转动，在触针上输出脉冲信号。脉冲信号的频率反映了滑移速度，脉冲信号的数量对应滑移的距离。接触器触头面积小于球面上露出的导体面积，它不仅可做得很小，而且可检测灵敏度。球与握持的物体相接触，无论滑动方向如何，只要球一转动，传感器就会产生脉冲输出。由于该球体在冲击力作用下不转动，因此抗干扰能力强。

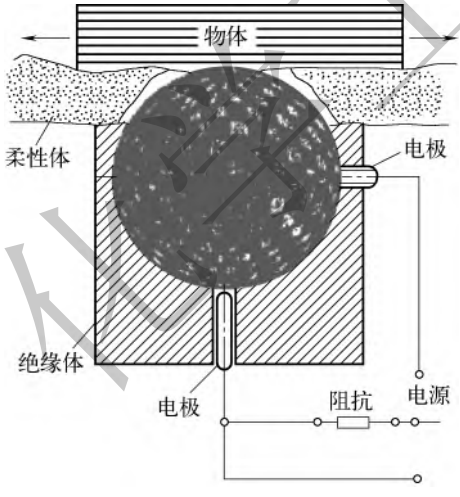


图 2-44　一种球形机器人专用滑觉传感器

2.7.11　温度传感器

温度传感器有接触式和非接触式两种。常用的接触式温度传感器为热电阻、热电偶、半导体温度传感器。热电阻的阻值随温度变化而发生变化，热电偶能够产生一个与温度变化成正比的小电压，半导体温度传感器具有温度敏感的电压与电流特性，用于监测温度的变化。

非接触式温度传感器的敏感元件与被测对象互不接触，可用于测量运动物体、小目标和热容量小或温度变化迅速（瞬变）对象的表面温度，也可用于测量温度场的温度分布。最常用的非接触式测温为辐射测温法。在自然界中，任何物体的温度如果超过绝对零度都会不断地向周围空间发出红外辐射能量。因此，通过对物体自身辐射的红外能量的测量，便能准确地测定它的表面温度。随着红外技术的发展，辐射测温逐渐由可见光向红外线

机械工业出版社

扩展，常温至 700 摄氏度都可测量，且分辨率很高。非接触式温度传感器主要有红外测温传感器、红外热成像仪。

红外测温传感器用于测量某点的温度，只能显示物体表面某一小区域或某一点的温度值。红外热成像仪则可以同时测量物体表面各点温度的高低。

红外热成像仪通过对物体的红外辐射探测，将实际探测到的热量进行精确的量化，将物体发出的不可见红外能量实时转变为可见的热图像。热图像上面的不同颜色代表被测物体的不同温度。通过查看屏幕上热图像显示的图像色彩，可以观察到被测目标的整体温度分布状况，研究目标的发热情况，因此能够准确识别正在发热的疑似故障区域，从而做出判断。

2.7.12　机器人的嗅觉

嗅觉是五种基础感知之一，机器人的嗅觉是人形机器人环境感知的重要一环。机器人的嗅觉在环境监测、安全监控、危险环境、医疗卫生等领域中具有广阔的应用前景，可以实现在环境监测场景下对烟雾、多种气体浓度等数据进行采集、判定；在安全监控场景下识别有特殊气味的化学危险品；在危险环境如火灾、煤矿场景下识别危险气体；在医疗卫生领域识别有害物质及人体生病时气味等。

日本于 2006 年开发的护理机器人 RI-MAN，美国为海军的舰载自主消防机器人项目开发的人形机器人 SAFFiR，以及在日本国际机器人展亮相的由川崎重工研发的救援人形机器人均用到机器人的嗅觉技术。

我国已经研制成功了一种嗅敏仪，不仅能嗅出丙酮、氯仿等四十多种气体，还能够嗅出人闻不出来但可以导致人死亡的一氧化碳。这种嗅敏仪有一个由二氧化锡、氯化钯等物质烧结而成的探头（相当于鼻黏膜），当它遇到某些种类气体的时候，它的电阻就发生变化，这样就可以通过电子线路做出相应的显示，用光或者用声音报警。同时，用这种嗅敏仪还可以查出埋在地下的管道漏气的位置。现在利用各种原理制成的气体自动分析仪已经有很多种类，广泛应用于检测毒气、分析宇宙飞船座舱里的气体成分、监察环境等方面。这些气体分析仪，原理和显示都与电现象有关，所以人们把它称为电子鼻。把电子鼻和计算机组合起来，就可以做成机器人的嗅觉系统。

目前，机器人嗅觉主要采用气体传感器或直接购买商用的电子鼻产品进行气味识别。电子鼻也是基于气体传感器的气味识别仪器，主要包含气体传感器阵列和提供系统内分析软件模型的算法。

气体传感器是一种能够感受气体体积分数的变化并将其转变为电信号的换能器，可用于探测在一定区域范围内是否存在特定气体，和/或连续测量气体成分浓度。气体传感器根据工作原理分为直接测量敏感材料电学性能变化的电学型气体传感器和间接测量气体种类与浓度的光学型气体传感器。

电学型气体传感器包括半导体型、电化学型、催化燃烧型。半导体型气体传感器主要根据半导体敏感材料与气体发生反应，导致敏感材料的电子发生得失，从而改变气敏材料的电学性能，通过检测其电学性能的变化即可准确地检测气体，由于其制作简单、

化学工业出版社

操作简洁、成本低廉、易于微型化装配等特点而受到了广泛的关注，但其响应为广谱响应模式，导致其选择性不高。电化学气体传感器是将测量对象气体在电极处氧化或还原形成电流，通过检测电流的大小即可确定气体浓度，具有响应准确度高、一致性好的特点，但其寿命较短。催化燃烧式气体传感器是利用可燃气体催化燃烧产生热效应的原理实现响应，主要用于检测可燃性气体。

光学型气体传感器主要是红外气体传感器。红外气体传感器是一种基于不同气体分子的近红外光谱选择吸收特性，利用气体浓度与吸收强度关系来检测气体组分并确定其浓度的气体传感装置。该类型的传感器不需要与待测气体直接接触，适用于一些特种环境中的测试，如高污染环境、文物保护等。

作为人工嗅觉的核心元件，气体传感器已经过多年发展。随着物联网、微纳加工技术与人工智能技术的发展，利用气体传感器阵列与人工智能算法构建的人工嗅觉技术在更多的领域中发挥重要作用，实现气体传感器从“功能实现”再到“性能提升”再到“智能化”的发展路线。积极探索气体传感器的新原理、新材料、新机制和新器件，对全面提升人工嗅觉性能、拓展人工嗅觉使用范围具有重要的科学意义和实用价值。

化学工业出版社