普通高等教育机电类专业教材

# 机器人概论

第2版

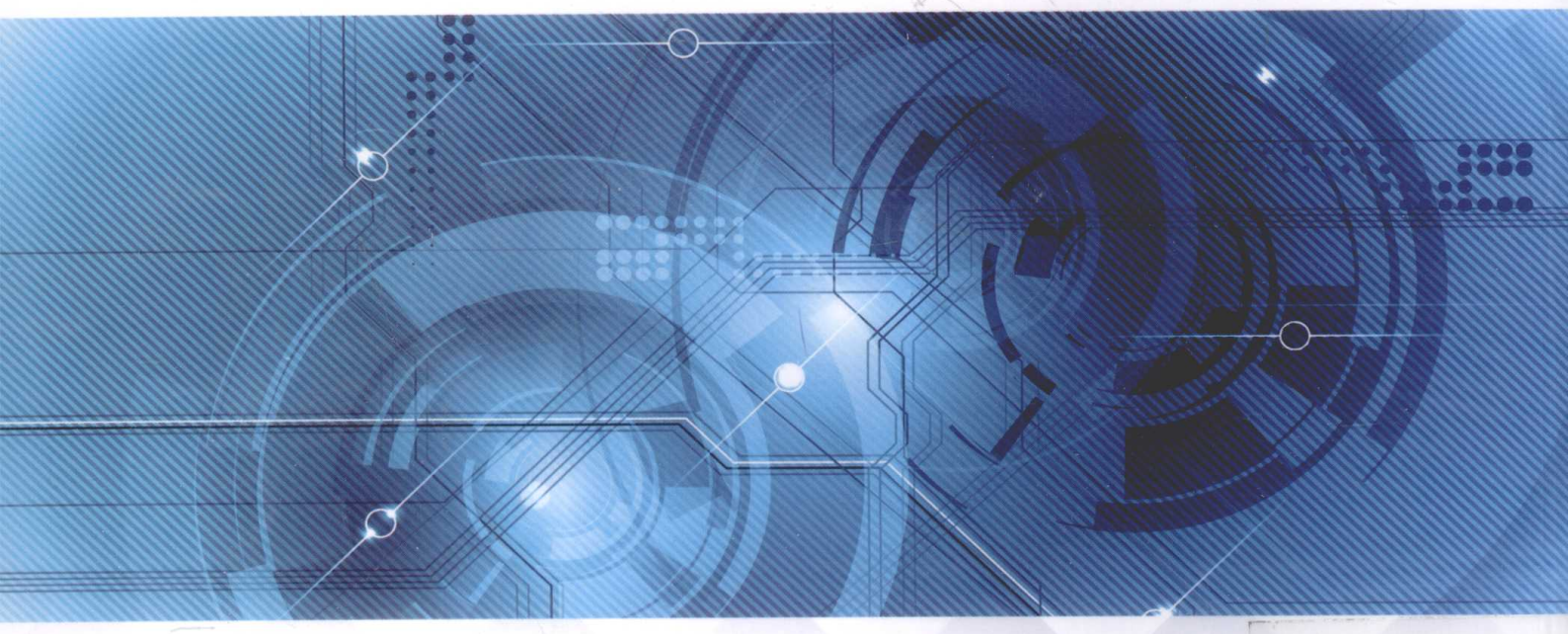
李云江　主编

★ 机器人来了，机器换人的时代来了，
学习机器人知识，掌握机器人应用，迫在眉睫！
★ 本书为您提供了必备易学的机器人基础知识，
开阔您视野的若干机器人应用实例。
★ 还为激发您研究机器人兴趣、参加机器人大赛
提供了可借鉴的思路！

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

## 本书导读

本书生动地介绍了机器人的起源、发展、分类、应用、组成、功能及应用前景，较系统地介绍了机器人技术的基础知识，并在相关章节中列举了若干机器人应用实例，如特种机器人、生物生产机器人、足球机器人、仿人机器人等，最后结合大学生的特点，介绍了机器人大赛的有关知识，比较全面地反映了国内外机器人研究和应用的最新进展。




地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88379833
读者购书热线：010-88379649
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金书网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版


机械工业出版社科普平台
科技有的聊

机械工业出版社制造业资讯
制造业那些事儿

机工教育微信服务号


上架指导 机器人技术
ISBN 978-7-111-54138-7
策划编辑◎何月秋 / 封面设计◎马精明
ISBN 978-7-111-54138-7
9 787111 541387 >
定价：45.00元

普通高等教育机电类专业教材

# 机器人概论

## 第2版

主编　李云江
参编　贾瑞昌　司文慧　何　芹　吕志杰　王忠雷
主审　樊炳辉

机械工业出版社

本书自出版以来，深受广大师生好评，共印刷5次，发行了一万多册。本书详细叙述了机器人的起源、发展、分类、应用、组成、功能及应用前景，较系统地阐述了机器人技术的基础知识，并在相关章节中列举了若干机器人应用实例，如特种机器人、生物生产机器人、足球机器人、仿生机器人等，最后结合大学生的特点，介绍了机器人大赛的有关知识，比较全面地反映了国内外机器人研究和应用的新进展。本书内容新颖、逻辑性强，既有普及性，又有一定深度，图文并茂，可读性强。

本书适合高等院校机械电子工程，自动化专业的本科生作为教材使用，也可供从事机电行业的工程技术人员使用或参考。

**图书在版编目（CIP）数据**

机器人概论/李云江主编. —2版. —北京：机械工业出版社，2016.7

普通高等教育机电类专业教材

ISBN 978-7-111-54138-7

Ⅰ.①机… Ⅱ.①李… Ⅲ.①机器人技术—高等学校—教材 Ⅳ.①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字（2016）第149264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：何月秋 责任编辑：何月秋 王彦青

责任校对：张 薇 张晓蓉 封面设计：马精明

责任印制：李 洋

北京华正印刷有限公司印刷

2016年7月第2版第1次印刷

184mm×260mm · 18.75印张 · 454千字

0001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-54138-7

定价：45.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机 工 官 网：www.cmpbook.com

机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金 书 网：www.golden-book.com

**封面无防伪标均为盗版**

# 第2版前言

《机器人概论》自出版以来，深受广大师生好评，共印刷5次，发行了一万多册。近几年我国机器人产业的发展突飞猛进，随着东莞市《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，尤其是国家出台了有关大力发展机器人的政策，全国迅速掀起了一场“机器换人”的浪潮。近几年，国际上出现了很多新型机器人产品，并快速推向市场。

为适应机器人的发展，满足高等学校机电类专业教学的需要，我们组织对《机器人概论》进行了修订。本次修订力求反映国内外机器人技术的新进展和应用状况，紧密联系实际，选材新颖。

本书第1版出版后，曾有不少专家、学者与作者联系，提出了不少宝贵的意见和建议。在此基础上，我们对本书第1版进行了适当的删改和补充，修正了原书的错误和陈旧之处，增加了近几年国内外机器人的新成果和产品，如ABB双臂机器人，同时也增加了主要工业大国的机器人国家战略和我国工业机器人产业发展模式等内容。

本书由山东建筑大学李云江任主编，并负责全书的统稿及修改。山东科技大学樊炳辉教授任主审。山东建筑大学何芹、吕志杰和王忠雷，华南农业大学贾瑞昌，山东交通学院司文慧参加了编写与修改工作。其中李云江编写了第1章、第2章的第2.1节和2.2节、第6章，贾瑞昌编写了第3章、第7章，司文慧编写了第4章，吕志杰编写了第5章，何芹编写了第2章的第2.3节、第8章，王忠雷编写了第9章。

本书在编写和修订过程中，参考并引用了大量有关机器人方面的论著、资料，有些插图来自于互联网，限于篇幅，不能在文中一一列举，在此一并对其作者致以衷心的感谢。

本书适合高等院校机械电子工程、自动化专业的本科生作教材使用，也可供从事机电行业的工程技术人员使用或参考。

由于编者水平有限，书中难免存在不足和错误之处，恳请各位专家和广大读者批评指正。

编　者

# 第1版前言

机器人技术是20世纪人类最伟大的发明之一。自从20世纪60年代初人类创造了第一台工业机器人以后，机器人就显示出它强大的生命力，机器人技术得到了迅速的发展，工业机器人已在工业发达国家的生产中得到了广泛的应用。目前，工业机器人已广泛应用于汽车及汽车零部件制造业、机械加工行业、电子电气行业、橡胶及塑料工业、食品工业、木材与家具制造业等领域中。在工业生产中，弧焊机器人、点焊机器人、装配机器人、喷漆机器人及搬运机器人等工业机器人都已被大量使用。

虽然以工业机器人起步，但随着近年来微电子技术、信息技术、计算机技术、材料技术等的迅速发展，现代机器人技术已突破了传统工业机器人的范畴，逐渐向娱乐、海空探索、军事、医疗、建筑、服务业及家庭应用等领域扩展。随着人们生活水平的提高及文化生活的日益丰富多彩，未来各种专业服务机器人和家庭用消费机器人将不断贴近人们的生活，其市场将繁荣兴旺。

目前，有关工业机器人的书很多，但有关机器人概论的书还很少。本书生动叙述了机器人技术的诞生、历史、分类、应用、组成、功能及发展前景，描述了遍布于实验室、作业现场以及人们生活周围的各种各样的机器人，从多方面详尽阐述了机器人的应用成果。全书以普及机器人知识为主，充分吸收国内外最新、最先进的前沿机器人技术，紧密联系实际、选材新颖、突出应用、图文并茂，使读者(尤其是大学生)初步掌握机器人技术，开阔视野，拓宽思路，并激发他们研究机器人的兴趣。

参加本书编写工作的有山东建筑大学李云江、何芹、吕志杰和王忠雷，华南农业大学的贾瑞昌，山东交通学院的司文慧。其中，李云江编写第1章、第2章的2.1节和2.2节、第6章，贾瑞昌编写第3章、第7章，司文慧编写第4章，吕志杰编写第5章，何芹编写第2章的2.3节、第8章，王忠雷编写第9章。全书由李云江任主编，并负责全书的统稿及修改。本书由机器人专家樊炳辉教授(山东科技大学)任主审。

在编写过程中，我们参考并引用了大量有关机器人方面的论著、资料，有些插图来自于互联网，限于篇幅，不能在文中一一列举，在此一并对其作者致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不足和错误之处，恳请各位专家和广大读者批评指正。

编　者

# 目　录


第 2 版前言

第 1 版前言

第 1 章　机器人概述 …… 1

1.1　机器人的概念和分类 …… 1

1.1.1　机器人的概念 …… 1

1.1.2　机器人的分类 …… 2

1.2　机器人发展史 …… 3

1.2.1　古代机器人 …… 3

1.2.2　现代机器人 …… 4

1.2.3　中国机器人的发展 …… 5

1.3　机器人的基本结构 …… 7

1.4　机器人与人 …… 12

1.5　机器人的研究内容 …… 13

第 2 章　机器人博览 …… 15

2.1　工业机器人 …… 15

2.1.1　概述 …… 15

2.1.2　工业机器人在工业生产中的应用 …… 15

2.1.3　工业大国的机器人国家战略 …… 22

2.1.4　工业机器人产业发展模式 …… 24

2.1.5　全球著名工业机器人新产品 …… 24

2.1.6　工业机器人的发展趋势 …… 26

2.2　特种机器人 …… 27

2.2.1　护士助手 …… 27

2.2.2　口腔修复机器人 …… 28

2.2.3　进入血管的机器人 …… 28

2.2.4　高楼擦窗和壁面清洗机器人 …… 30

2.2.5　清洗巨人 …… 31

2.2.6　汽车加油机器人 …… 32

2.2.7　康复机器人 …… 32

2.2.8　微创外科手术机器人 …… 33

2.3　军用机器人 …… 34

2.3.1　机器警察 …… 34

2.3.2　机器工兵 …… 36

2.3.3　机器保安 …… 37

2.3.4　水下机器人 …… 38

2.3.5　未来奇兵 …… 39

2.3.6　太空机器人 …… 40

第 3 章　机器人机械结构 …… 44

3.1　机器人末端执行器 …… 44

3.1.1　夹钳式取料手 …… 45

3.1.2　吸附式取料手 …… 48

3.1.3　专用末端操作器及换接器 …… 51

3.1.4　仿生多指灵巧手 …… 52

3.2　机器人手腕 …… 54

3.2.1　概述 …… 54

3.2.2　手腕的分类 …… 54

3.3　机器人手臂 …… 57

3.3.1　手臂直线运动机构 …… 57

3.3.2　手臂回转运动机构 …… 58

3.3.3　手臂俯仰运动机构 …… 59

3.3.4　手臂复合运动机构 …… 59

3.3.5　新型的蛇形机械手臂 …… 60

3.4　机器人机座 …… 61

3.4.1　固定式机器人 …… 61

3.4.2　行走式机器人 …… 61

3.5　机器人的传动 …… 65

3.5.1　移动关节导轨及转动关节轴承 …… 66

3.5.2　传动件的定位及消隙 …… 68

3.5.3　谐波传动 …… 71

3.5.4　丝杠螺母副及滚珠丝杠传动 …… 72

3.5.5　其他传动 …… 72

第 4 章 机器人控制技术 …… 74

4.1 机器人控制基础 …… 74

4.1.1 机器人控制系统的特点 …… 74

4.1.2 机器人的控制方式 …… 74

4.1.3 机器人控制系统结构和工作原理 …… 76

4.1.4 机器人单关节位置伺服控制 …… 78

4.1.5 机器人的力控制 …… 84

4.1.6 机器人智能控制 …… 87

4.2 机器人传感器 …… 91

4.2.1 机器人传感器概述 …… 91

4.2.2 内部传感器 …… 92

4.2.3 外部传感器 …… 98

4.2.4 多传感器融合 …… 109

4.3 机器人编程 …… 111

4.3.1 机器人编程系统及方式 …… 112

4.3.2 对机器人的编程要求 …… 113

4.3.3 机器人编程语言的类型 …… 114

4.3.4 动作级语言 …… 117

4.3.5 对象级语言 …… 123

第 5 章 特种机器人应用 …… 126

5.1 特种机器人应用的意义 …… 126

5.2 特种机器人系统 …… 127

5.2.1 特种机器人的共性技术 …… 127

5.2.2 基于行为的特种机器人体系结构 …… 128

5.2.3 特种机器人重点研究的科学问题 …… 128

5.3 特种机器人应用实例 …… 129

5.3.1 水下机器人 …… 129

5.3.2 地面移动机器人 …… 138

5.3.3 空中机器人(无人机) …… 147

5.3.4 空间机器人 …… 153

第 6 章 生物生产机器人 …… 159

6.1 生物生产机器人概述 …… 159

6.1.1 生物生产机器人的独特性 …… 160

6.1.2 生物生产机器人的作业对象 … 160

6.2 生物生产机器人的基本组成 … 163

6.3 生物生产机器人的应用实例 … 166

6.3.1 番茄收获机器人 …… 166

6.3.2 黄瓜收获机器人 …… 173

6.3.3 草莓收获和拣选机器人 …… 180

6.3.4 多功能机器人 …… 186

6.3.5 植物保护机器人 …… 190

6.3.6 肉品加工机器人 …… 194

第 7 章 仿生机械学 …… 196

7.1 仿生机械学定义 …… 196

7.2 仿生机械简史 …… 196

7.3 仿生机械学的研究领域 …… 197

7.4 仿生设计 …… 198

7.4.1 生物形态与工程结构 …… 198

7.4.2 生物形态与运动 …… 199

7.5 仿生机械与机器人技术、康复工程 …… 200

7.5.1 仿生机械与机器人技术 …… 200

7.5.2 仿生机器人的研究 …… 201

7.5.3 康复工程与假肢技术 …… 204

7.6 仿生机械实例 …… 210

7.6.1 仿生机器蟹 …… 210

7.6.2 水母机器人 …… 212

7.6.3 仿生机器鱼 …… 212

7.6.4 机器龙虾 …… 214

7.6.5 仿生企鹅 …… 215

7.6.6 机器苍蝇 …… 215

7.6.7 机器雨燕 …… 216

7.6.8 仿生蚱蜢跳跃机器人 …… 216

7.6.9 仿生机器人壁虎 …… 217

7.6.10 仿生快速穿越沙地机器人 …… 217

7.6.11 仿生机器蛇 …… 218

7.6.12 水面行走机器人 …… 219

7.6.13 大狗机器人 …… 220

7.6.14 猎豹机器人 …… 220

7.6.15 袋鼠机器人 …… 221

**第 8 章　机器人大赛** …… 222

8.1　梦想从机器人开始 …… 222
8.2　智能足球机器人系统概述 …… 223
8.2.1　智能足球机器人系统 …… 223
8.2.2　智能足球机器人系统的产生 … 224
8.2.3　智能足球机器人在中国的发展 …… 225
8.3　智能足球机器人系统的组成及其应用 …… 227
8.3.1　智能足球机器人系统的组成 … 227
8.3.2　智能足球机器人系统的应用 … 228
8.4　智能小型足球机器人的本体结构 …… 229
8.4.1　机械子系统 …… 229
8.4.2　控制子系统 …… 233
8.4.3　板载软件 …… 234
8.5　智能小型足球机器人系统的通信系统与电源子系统 …… 235
8.5.1　无线通信系统的组成 …… 235
8.5.2　电源子系统 …… 237
8.6　智能中型足球机器人的硬件结构 …… 240
8.6.1　硬件结构组成 …… 240
8.6.2　机械结构 …… 241
8.6.3　微处理单元 …… 247
8.7　智能中型足球机器人系统的软件结构 …… 249
8.7.1　视觉子系统 …… 249
8.7.2　通信子系统 …… 253
8.7.3　决策子系统 …… 254
8.7.4　控制子系统 …… 256

**第 9 章　前沿机器人** …… 257

9.1　仿人机器人 …… 257
9.1.1　仿人机器人的发展历史和研究现状 …… 257
9.1.2　立体视觉系统 …… 261
9.1.3　五指灵巧手 …… 267
9.1.4　二足步行机构 …… 270
9.1.5　人机交互技术 …… 273
9.1.6　仿人机器人的触觉系统 …… 276
9.1.7　仿人机器人的发展方向 …… 278
9.2　微型机器人与微操作 …… 280
9.2.1　微型机器人的概念及其发展现状 …… 280
9.2.2　微型机器人 …… 282
9.2.3　微操作机器人 …… 289

**参考文献** …… 291

# 第 1 章　机器人概述

## 1.1　机器人的概念和分类

### 1.1.1　机器人的概念

机器人技术作为20世纪人类最伟大的发明之一，自20世纪60年代初问世以来，经历了50多年的发展，已取得了显著成果。走向成熟的工业机器人以及各种用途的特种机器人的实用化，昭示着机器人技术灿烂的明天。

在科技界，科学家会给每一个科技术语一个明确的定义，但机器人的定义仍然仁者见仁，智者见智，没有一个统一的意见。其原因之一是机器人还在发展，新的机型、新的功能不断涌现，领域不断扩展。但根本原因主要是因为机器人涉及了人的概念，成为一个难以回答的哲学问题。就像机器人一词最早诞生于科幻小说之中一样，人们对机器人充满了幻想。也许正是由于机器人定义的模糊，才给了人们充分的想象和创造空间。

其实并不是人们不想给机器人一个完整的定义，自机器人诞生之日起，人们就不断地尝试着说明到底什么是机器人。但随着机器人技术的飞速发展和信息时代的到来，机器人所涵盖的内容越来越丰富，机器人的定义也不断被充实和创新。

1886年，法国作家利尔亚当在他的小说《未来夏娃》中，将外表像人的机器起名为“安德罗丁”(android)，它由四部分组成：

1）生命系统(平衡、步行、发声、身体摆动、感觉、表情、调节运动等)。

2）造型材料(关节能自由运动的金属覆盖体,称为盔甲)。

3）人造肌肉(在上述盔甲上有肉体、静脉、性别等身体的各种形态)。

4）人造皮肤(含有肤色、机理、轮廓、头发、视觉、牙齿、手爪等)。

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》。在剧本中，卡佩克把捷克语“Robota”写成了“Robot”，“Robota”是奴隶的意思。该剧预告了机器人的发展对人类社会的悲剧性影响，引起了大家的广泛关注，被当成了机器人一词的起源。在该剧中，机器人按照其主人的命令默默地工作，没有感觉和感情，以呆板的方式从事繁重的劳动。后来，罗萨姆公司取得了成功，使机器人具有了感情，导致机器人的应用部门迅速增加。在工厂和家务劳动中，机器人成了必不可少的成员。机器人发觉人类十分自私和不公正，终于造反了，机器人的体能和智能都非常优异，因此消灭了人类。但是机器人不知道如何制造它们自己，认为它们自己很快就会灭绝，所以它们开始寻找人类的幸存者，但没有结果。最后，一对感知能力优于其他机器人的男女机器人相爱了。这时机器人进化为人类，世界又起死回生了。

卡佩克提出的是机器人的安全、感知和自我繁殖问题。科学技术的进步很可能引发人类不希望出现的问题。虽然科幻世界只是一种想象，但人类社会将可能面临这种现实。

为了防止机器人伤害人类，科幻作家阿西莫夫于1940年提出了“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。

1967 年，日本召开了第一届机器人学术会议，提出了两个有代表性的定义：一是森政弘与合田周平提出的“机器人是一种具有移动性、个体性、智能性、通用性、半机械半人性、自动性、奴隶性七个特征的柔性机器”。从这一定义出发，森政弘又提出了用自动性、智能性、个体性、半机械半人性、作业性、通用性、信息性、柔性、有限性、移动性等十个特性来表示机器人的形象。另一个是加藤一郎提出的具有以下三个条件的机器称为机器人：

1）具有脑、手、脚等三要素的个体。

2）具有非接触传感器(用眼、耳接受远方信息)和接触传感器。

3）具有平衡觉和固有觉的传感器。

该定义强调了机器人应当仿人的含义，即它靠手进行作业，靠脚实现移动，由脑来完成统一指挥的作用。非接触传感器和接触传感器相当于人的五官，使机器人能够识别外界环境，而平衡觉和固有觉则是机器人感知本身状态所不可缺少的传感器。这里描述的不是工业机器人，而是自主机器人。

机器人的定义是多种多样的，其原因是它具有一定的模糊性。动物一般具有上述这些要素，所以在把机器人理解为仿人机器的同时，也可以广义地把机器人理解为仿动物的机器。

1988 年，法国的埃斯皮奥将机器人定义为：“机器人学是指设计能根据传感器信息实现预先规划好的作业系统，并将此系统的使用方法作为研究对象。”

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的，能完成各种作业的可编程操作机。”

我国科学家对机器人的定义是：“机器人是一种自动化的机器，所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能能力，如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力，是一种具有高度灵活性的自动化机器。”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、行动和交互能力的特种机器人和各种智能机器人，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。这些机器人从外观上已远远脱离了最初仿人型机器人和工业机器人所具有的形状，更加符合各种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。

原中国工程院院长宋健指出：“机器人学的进步和应用是20 世纪自动控制最有说服力的成就，是当代最高意义上的自动化。”机器人技术综合了多学科的发展成果，代表了高技术的发展前沿，它在人类生活应用领域的不断扩大正引起国际上重新认识机器人技术的作用和影响。

### 1.1.2 机器人的分类

关于机器人如何分类，国际上没有制定统一的标准，有的按负载重量分、有的按控制方式分、有的按自由度分、有的按结构分、有的按应用领域分。一般的分类方式见表 1-1。

表 1-1　机器人分类

| 分类名称 | 简要解释 |
| --- | --- |
| 操作型机器人 | 能自动控制，可重复编程，多功能，有几个自由度，可固定或运动，用于相关自动化系统中 |
| 程序控制型机器人 | 按预先要求的顺序及条件，依次控制机器人的机械动作 |
| 示教再现型机器人 | 通过引导或其他方式，教会机器人动作，输入工作程序，机器人则自动重复进行作业 |
| 数控型机器人 | 不必使机器人动作，通过数值、语言等对机器人进行示教，机器人根据示教后的信息进行作业 |
| 感觉控制型机器人 | 利用传感器获取的信息控制机器人的动作 |
| 适应控制型机器人 | 机器人能适应环境的变化，控制其自身的行动 |
| 学习控制型机器人 | 机器人能“体会”工作的经验，具有一定的学习功能，并将所“学”的经验用于工作中 |
| 智能机器人 | 以人工智能决定其行动的机器人 |

我国的机器人专家从应用环境出发，将机器人分为两大类，即工业机器人和特种机器人。所谓工业机器人就是面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人；而特种机器人则是除工业机器人之外的、用于非制造业并服务于人类的各种先进机器人，包括服务机器人、水下机器人、娱乐机器人、军用机器人、农业机器人、机器人化机器等。在特种机器人中，有些分支发展很快，有独立成体系的趋势，如服务机器人、水下机器人、军用机器人、微操作机器人等。目前，国际上有些机器人学者从应用环境出发，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。这和我国的分类基本是一致的。

## 1.2　机器人发展史

### 1.2.1　古代机器人

机器人一词的出现和世界上第一台工业机器人的问世都是近几十年的事，然而人们对机器人的幻想与追求却已有三千多年的历史。人类希望制造一种像人一样的机器，以便代替人类完成各种工作。

西周时期，我国的能工巧匠偃师就研制出了能歌善舞的伶人，这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。

公元前2世纪，亚历山大时代的古希腊人发明了最原始的机器人——自动机。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。

1800年前的汉代，大科学家张衡不仅发明了地动仪，而且发明了计里鼓车。计里鼓车每行一里，车上木人击鼓一下，每行十里击钟一下。

后汉三国时期，蜀国丞相诸葛亮成功地创造出了“木牛流马”，并用其运送军粮，支援前方战争。

1662年，日本的竹田近江利用钟表技术发明了自动机器玩偶，并在大阪的道顿堀演出。

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，最杰出的要数瑞士的钟表匠杰克·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色绘画，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一米的巨型玩具。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”，“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，一些适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。1959 年，第一台工业机器人(采用可编程序控制器、圆柱坐标机械手)在美国诞生，开创了机器人发展的新纪元。

### 1.2.2 现代机器人

现代机器人的研究始于 20 世纪中期，其技术背景是计算机和自动化的发展，以及原子能的开发利用。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，美国戴沃尔最早提出了工业机器人的概念，并申请了专利。该专利的要点是借助伺服技术控制机器人的关节，利用人手对机器人进行动作示教，机器人能实现动作的记录和再现。这就是所谓的示教再现机器人，现有的机器人差不多都采用这种控制方式。

机器人产品最早的实用机型(示教再现)是 1962 年美国 AMF 公司推出的“VERSTRAN”和 UNIMATION 公司推出的“UNIMATE”。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。

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。

1970 年，在美国召开了第一届国际工业机器人学术会议。1970 年以后，机器人的研究得到迅速广泛的普及。

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45kg。

到了1980年，工业机器人才真正在日本普及，故称该年为“机器人元年”。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。

随着计算机技术和人工智能技术的飞速发展，使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。20世纪80年代，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，这也说明了机器人所具有的创新活力。

### 1.2.3　中国机器人的发展

有人认为，应用机器人只是为了节省劳动力，而我国劳动力资源丰富，发展机器人不一定符合我国国情。其实这是一种误解。在我国，社会主义制度的优越性决定了机器人能够充分发挥其长处，它不仅能为我国的经济建设带来高度的生产力和巨大的经济效益，而且将为我国的宇宙开发、海洋开发、核能利用等新兴领域的发展作出卓越的贡献。

我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，为我国机器人学的发展打下了坚实的基础。

我国工业机器人起步于20世纪70年代初，经过三十多年的发展，大致可分为三个阶段：70年代的萌芽期，80年代的开发期，90年代的实用化期。我国于1972年开始研制工业机器人，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和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，我国机器人技术的发展得到政府的重视和支持，在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(占总需要的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、中科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、应用和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，几类专用和通用控制系统及几类关键元部件如交流、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。

在应用方面，在第二汽车厂建立了我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系列喷涂机器人和周边设备构成，已运行十几年，很好地完成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 项国标、行标。为了跟踪国外高级技术，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。

1986 年底，中共中央 24 号文件把智能机器人列为国家 863 计划自动化领域两大主题之一，代号为 512，其主要目标是“跟踪世界先进水平，研发水下机器人等极限环境下作业的特种机器人”。在国家 863 计划精心组织下，1994 年，“探索者”号研制成功，它工作深度达到 1000m，甩掉了与母船间联系的电缆，实现了从有缆向无缆的飞跃。从 1992 年 6 月起，又与俄罗斯科学院海洋技术研究所合作，以我方为主，先后研制开发出了“CR-01、CR-02”6000m 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我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。

在 20 世纪 90 年代中期，国家已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，促使我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。

我国机器人从 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。

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，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》。

2012 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。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、自动化控制设备或流水线自动化对企业进行智能技术改造，实现“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。

2013 年国际机器人联盟发布的《工业机器人对就业的积极影响》专题报告中，通过对美国、德国、日本、韩国、巴西和我国的工业机器人应用现状进行分析，指出在未来 8 年

内，机器人技术将对全球制造业就业产生积极影响，一方面，机器人产业自身不断壮大，将新生大量的就业需求；另一方面机器人应用的不断深入，引发了制造业分工细化，促进服务业创新升级，产生新的就业机会。

“十三五”期间，我国制造业将进入转型升级的关键期，与之紧密相连的机器人产业将迎来黄金发展期。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，我国服务机器人起步较晚，与国外存在较大的差距。我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，我国“服务机器人军团”不断壮大。

仿人机器人走出实验室，我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。

2005年，我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，科技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，科学技术部以国科发计(2012) 194号印发《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》。目前，我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。

## 1.3　机器人的基本结构

科学家研制机器人，实际上是仿照人类去塑造机器人，首先要使机器人具有人类的某些功能、某些行为，能够胜任人类希冀的某种任务，其最高标准应为类人型智能机器人。因此，研讨机器人的基本结构，可与人体的基本结构相对照来进行。

1. 人的基本结构

在万物众生中，人类的形貌是最完美的：整个躯体比例匀称、结构巧妙；有一个生动的面孔、能思维的头脑和灵活的四肢；在胸腹腔内有五脏六腑，组织结构极为复杂、严密，这就是万物之灵的人类。

根据人体解剖学，整个人体共分为九个系统，即：

1）由骨、骨连接和肌肉组成的运动系统。全身共有大小不同、形状各异的骨头206块，构成了骨骼，它是人体的支架；有600余块肌肉，约占人体重量的40%，它是人体运动的动力器官。

2）由消化道和消化腺组成的消化系统。其主要功能是对食物进行消化和吸收，以供给人们在生长、发育和活动中所需要的营养物质。简而言之，该系统是人体的能源供应部。

3）由呼吸道和肺组成的呼吸系统。呼吸是生命活动的重要标志，人活着就要不停地从外界吸进氧气，同时呼出二氧化碳。

4）由肾、输尿管、膀胱和尿道组成的泌尿系统，其主要功能是以尿的形式排出一些有害物质。

5）由男、女生殖器官组成的生殖系统，其主要功能是繁衍下一代。

6）由心脏、血管和淋巴系统组成的循环系统。心脏是人体的动力器官，由它有节律地跳动，推动血液在血管中循环流动，以保证机体营养的需要，维持人体新陈代谢的正常运行。

7）由脑、脊髓和周围神经组成的神经系统。它在人体内处于主导地位，由它控制和管理着人体的各种生命活动。

8）由皮肤、眼睛和耳朵(还有鼻、口)组成的感觉器官。其主要功能是接受外界刺激(信息)发生兴奋，然后由神经传导到相应的神经中枢，从而产生感觉。皮肤有温、痛、触觉的感受作用，眼睛是视觉器官，耳朵为听觉器官。另外，口腔及舌具有味觉功能，鼻子具有嗅觉功能。

9）由无管腺体组成的内分泌系统。内分泌腺没有导管，散布于人体各个部位，其主要功能是可分泌出“激素”这种极为重要的物质，对人体的代谢、生长、发育和繁殖等起着重要的调节作用。

人体的组织结构是一个非常严密、非常复杂的统一体，细胞是构成人体最基本的形态结构单位和机能单位。各系统之间互相关联、影响和依存，在神经系统统一支配下，各系统协调一致，共同完成人的生命活动和功能活动。

2. 机器人的结构

机器人的结构(见图 1-1 和图 1-2)通常由四大部分组成，即执行机构、驱动系统、控制系统和智能系统。

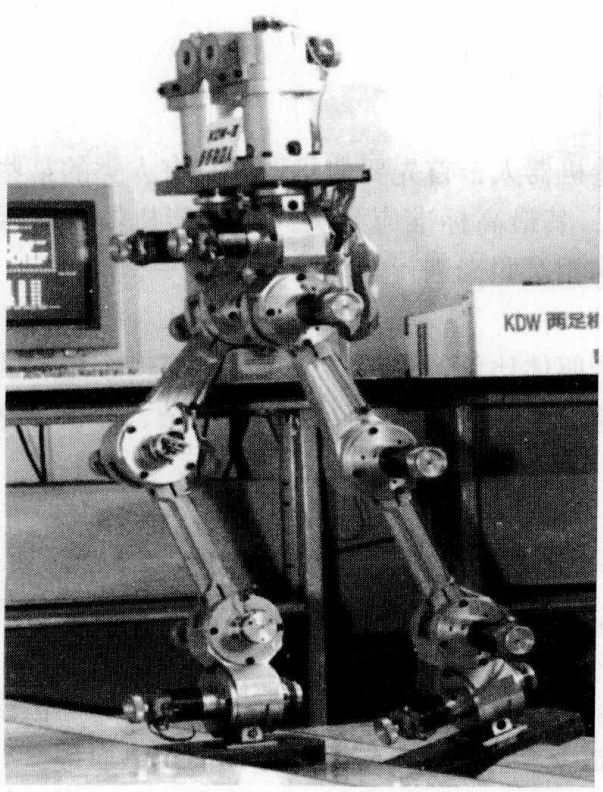



图 1-1　步行拟人机器人

图 1-2　工业机器人

（1）机器人的执行机构　众所周知，人的功能活动（劳动）分为脑力劳动和体力劳动两种，两者往往又不能截然分开。从执行器官讲，就是在大脑支配下的嘴巴和四肢。单从体力劳动来讲，可以靠脚力、肩扛，但最主要的是人的手臂，而手的动作离不开胳臂、腰身的支持与配合。手部的动作和其他部位的动作是靠肌肉收缩和张弛，并由骨骼作为杠杆支持而完成的。

从图1-1和图1-2可知，机器人的执行机构包括手部、腕部、腰部和基座，它与人身结构基本上相对应，其中基座相对于人的下肢。机器人的构造材料，至今仍是使用无生命的金属和非金属材料，用这些材料加工成各种机械零件和构件，其中有仿人形的“可动关节”。机器人的关节（相当于机构中的“运动副”）有滑动关节、回转关节、圆柱关节和球关节等类型，在何部位采用何种关节，则由要求它做何种运动而决定。机器人的关节保证了机器人各部位的可动性。

1）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；也可以是非夹持类的，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）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，一般有3个自由度，以带动手部现实必要的姿态。

3）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。

4）机器人的腰部，相当于人的躯干，是连接臂部和基座的回转部件，由于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。

5）机器人的基座，是整个机器人的支撑部件，它相当于人的两条腿，要具备足够的稳定性和刚度，有固定式和移动式两种类型。在移动式的类型中，有轮式、履带式和仿人形机器人的步行式等。

（2）机器人的驱动—传动系统　机器人的驱动—传动系统是将能源传送到执行机构的装置。其中，驱动器有电动机（直流伺服电动机、交流伺服电动机和步进电动机）、气动和液动装置（压力泵及相应控制阀、管路）；而传动机构，最常用的有谐波减速器、滚珠丝杠、链、带及齿轮等传动系统。

机器人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。液压驱动就是利用液压泵对液体加压，使其具有高压势能，然后通过分流阀（伺服阀）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。其缺点是多了一套液压系统，对液压元件要求高，否则容易造成液体渗漏，噪声较大，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，一种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出现。这种电动机可使机构简化，同时可提高控制精度。

机器人的驱动系统相当于人的消化系统和循环系统，是保证机器人运行的能量供应。

（3）机器人的控制系统　机器人的控制系统是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，是机器人的指挥系统，对其执行机构发出如何动作的命令。不同发展阶段的机器人和不同功能的机器人，所采取的控制方式和水平是不相同的，例如在工业机器人中，有点位控制和连续控制两种方式。最新和最先进的控制是智能控制技术。

（4）机器人的智能系统　所谓智能，简而言之，是指人的智慧和能力，就是人在各种复杂条件下，为了达到某一目的而能够作出正确的决断，并且成功实施。在机器人控制技术方面，科学家一直企图将人的智能引入机器人控制系统，以形成其智能控制，达到在没有人的干预下，机器人能实现自主控制的目的。

机器人智能系统由两部分组成：感知系统和分析-决策智能系统。

1）感知系统。感知系统主要靠具有感知不同信息的传感器构成，属于硬件部分，包括视觉、听觉、触觉以及味觉、嗅觉等传感器。在视觉方面，目前多是利用摄像机作为视觉传感器，它与计算机相结合，并采用电视技术，使机器人具有视觉功能，可以“看到”外界的景物，经过计算机对图像的处理，就可对机器人下达如何动作的命令。这类视觉传感器在工业机器人中多用于识别、监视和检测。

2001 年 2 月 26 日，《解放日报》报道了美国麻省理工学院（MIT）科学家布雷吉尔女士发明了一个叫“基斯梅特”的婴儿机器人，它有一个大脑袋，身体矮小，有一双大的不成比例的蓝眼睛，两只粉红色的耳朵，一张用橡胶做成的大嘴巴，具有婴儿的视力和喜、怒、哀、乐的表情，令人爱怜。它的眼睛是由两台微型电子感应摄像机构成的，最佳聚焦位置为 0.6m，与婴儿的视力大致相同。

机器人的听觉功能就是指机器人能够接受人的语音信息，经过语音识别、语音处理、语句分析和语义分析，最后做出正确对答，即所谓的“语音识别”。语音识别系统一般是由传声器、语音预处理器、计算机及专用软件所组成。

ASIMO 是本田公司开发的目前世界上最先进的类人型机器人（见图 1-3）。ASIMO 名字象征着 Advanced（新纪元）、Step in（进入）、Innovative（创新）、Mobility（移动工具）的含义。

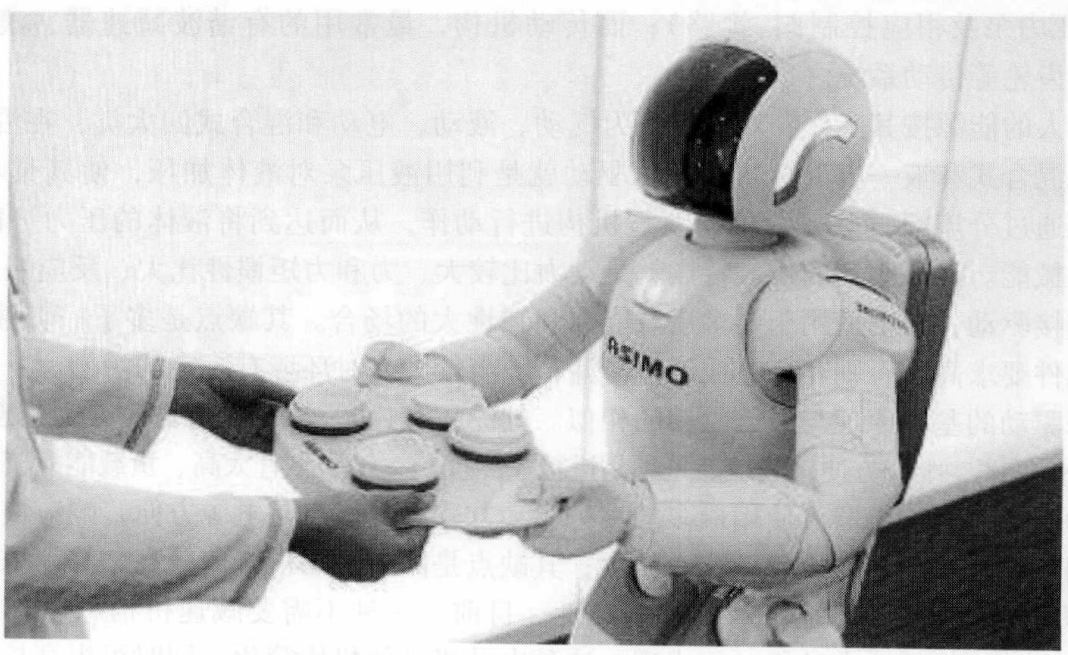



图 1-3　类人型机器人 ASIMO

本田希望能创造出一个可以在人的生活空间里自由移动、具有人一样的极高移动能力和高智能的类人型机器人，它能够在未来社会中与人们和谐共存，为人们提供服务，而ASIMO就是这个未来梦想的结晶。ASIMO可以行走自如，进行诸如“8”字形行走、上下台阶、弯腰等各项“复杂”动作；并可以随着音乐翩翩起舞，并能以每小时6km的速度奔跑；ASIMO还能与人类互动协作进行握手、猜拳等动作，似乎科幻电影中的情节变成了现实。

图1-4是哈尔滨工业大学机器人技术有限公司研制的智能迎宾导游机器人，其外形与功能已十分像人类。它的手臂、头部、眼睛、嘴巴、腰部会随着优美的乐曲，做出相应的动作，它还具有语音功能，会唱歌、讲解、背诵唐诗、致迎宾词等，可广泛应用于展馆、游乐场、酒店、宾馆、办公楼等公共场所。

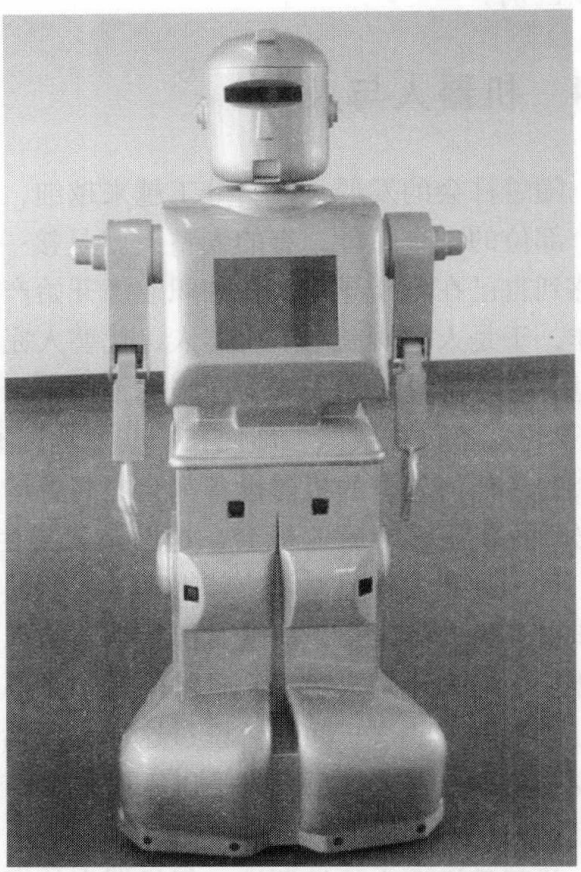


图1-4　智能迎宾导游机器人

目前，机器人的语言是一种“合成语言”，与人类的语言有很大区别。其语音尚没有节奏，没有“抑、扬、顿、挫”。

机器人的触觉传感器多为微动开关、导电橡胶或触针等，利用它对触点接触与否所形成电信号的“通”与“断”，传送到控制系统，从而实现对机器人执行机构的命令。

当要求机器人不得接触某一对象而又要实施检测时，就需要机器人安装非接触式传感器。目前，这类传感器有电磁涡流式、光学式和超声波式等类型。

当要求机器人的末端执行机构(如灵巧手)具有适度的力量，如握力、拧紧力或压力时，就需要有力学传感器。力学传感器种类较多，常用的是电阻应变式传感器。

人类的嗅觉是通过鼻黏膜感受气味的刺激，由嗅觉神经传递给大脑，再由大脑将信息与记忆的气味信息加以比较，从而判定气味的种类及来源。科学家研制出一种能辨别气味的电子装置，叫做“电子鼻”，它包括气味传感器、气味存储器和具有识别处理有关数据的计算机。其中，气味(即嗅觉)传感器就相当于人类的“鼻黏膜”。但是，一种嗅觉传感器只能对一类气味进行识别，所以，必须研制出对复合气体有识别能力的“电子鼻”。据报道，美国已研制成用20支相关的传感器和计算机相连的“电子鼻”，以计算机存储的气味记录与传感器信号加以比较判定，并可在显示器上显示。人的鼻子对气味的判定具有多种性，但因易疲劳和受病痛的影响，因此不十分可靠，而“电子鼻”胜过人类。

2）机器人的分析—决策智能系统。该系统主要是靠计算机专用或通用软件来完成，例如专家咨询系统。

目前，一些发达国家都在加紧新一代机器人的研制工作。例如日本住友公司研制出具有视觉、听觉、触觉、味觉和嗅觉5种感知功能的机器人，它内部装置了14种微处理器，有

很强的记忆功能，一次接触就可以记住人的声音和面貌。再如美国斯坦福大学研制成功的机器人警察“罗伯特警长”，当它发现窃贼时，会立即发出报警信号，并且穷追不舍，一旦抓住了窃贼，它就立即向窃贼脸上喷出麻醉气体，使之昏迷。

综上所述，与人类相比，目前机器人没有呼吸系统、生殖系统、类人的肌肉和皮肤，其余从功能方面讲，都可以互相对应起来。据机器人专家预测，未来的机器人可能会与生物人难以区别。

## 1.4 机器人与人

随着社会的发展，社会分工越来越细，尤其在现代化的大生产中，有的人每天只管拧同一个部位的一个螺母，有的人整天就是接一个线头，像电影《摩登时代》中演示的那样，人们感到自己在不断异化，各种职业病开始产生。因此，人们强烈希望用某种机器来代替自己工作，于是人们研制出了机器人，代替人完成那些枯燥、单调、危险的工作。由于机器人的问世，使一部分工人失去了原来的工作，于是有人对机器人产生了敌意。“机器人上岗，人将下岗”。不仅在我国，即使在一些发达国家如美国，也有人持这种观念。其实这种担心是多余的，任何先进的机器设备都会提高劳动生产率和产品质量，创造出更多的社会财富，也就必然提供更多的就业机会，这已被人类生产发展史所证明。任何新事物的出现都有利有弊，只不过利大于弊，很快就得到了人们的认可。例如汽车的出现，它不仅夺去了一部分人力车夫、挑夫的生意，还常常出车祸，给人类生命财产带来威胁。虽然人们看到了汽车的这些弊端，但它还是成了人们日常生活中必不可少的交通工具。英国一位著名的政治家针对关于工业机器人的这一问题，说过这样一段话：“日本机器人的数量居世界首位，而失业人口最少；英国机器人数量在发达国家中最少，而失业人口居高不下。”这也从另一个侧面说明了机器人是不会抢人饭碗的。

美国是机器人的发源地，但机器人的拥有量远远少于日本，其中部分原因就是因为美国有些工人不欢迎机器人，从而抑制了机器人的发展。日本之所以能迅速成为机器人大国，原因是多方面的，但其中很重要的一条就是当时日本劳动力短缺，政府和企业都希望发展机器人，国民也都欢迎使用机器人。由于使用了机器人，日本也尝到了甜头，它的汽车、电子工业迅速崛起，很快占领了世界市场。从现在世界工业发展的潮流看，发展机器人是一条必由之路。没有机器人，人将变为机器；有了机器人，人仍然是主人。

不论是工业机器人还是特种机器人(尤其是服务机器人)，都存在一个与人相处的问题，最重要的是不能伤害人。然而，由于某些机器人系统的不完善，在机器人使用的前期，引发了一系列意想不到的事故。

1978 年 9 月 6 日，日本广岛一家工厂的切割机器人在切钢板时，突然发生异常，将一名值班工人当做钢板操作，这是世界上第一宗机器人杀人事件。

1982 年 5 月，日本山梨县阀门加工厂的一个工人，正在调整停工状态的螺纹加工机器人时，机器人突然起动，抱住工人旋转起来，造成了悲剧。

这些触目惊心的事实，给人们使用机器人带来了心理障碍，于是有人展开了“机器人是福是祸”的讨论。面对机器人带来的威胁，日本邮政和电信部门组织了一个研究小组，对此进行研究。专家认为，机器人发生事故的原因不外乎三种：硬件系统故障、软件系统故

障和电磁波的干扰。

这种意外伤人事件是偶然也是必然的，因为任何一个新生事物的出现总有其不完善的一面。随着机器人技术的不断发展与进步，这种意外伤人事件越来越少，近几年没有再听说过类似事件的发生。正是由于机器人安全、可靠地完成了人类交给的各项任务，才使得人们使用机器人的热情越来越高。

人类已经发明了比人跑得快的、举得重的、看得远的机器，如汽车、起重机、望远镜等，它们只能成为人类的一种工具，并没有影响到人的本质。人类发明的机器或许可以分为两类：体能机器和智能机器。体能机器如汽车、飞机等，已经得到了公众的赞许，但智能机器却得到完全不同的反应。向来都自以为智商最高的人类，却在智力游戏中输掉了，于是有人惊呼，今天我们输掉了最伟大的棋手，明天我们还将输掉什么！

在科幻小说和电影电视中，机器人不外乎分为两种：一种是人类的朋友，协助正义战胜邪恶；另一种则是人类的敌人，给世界带来灾祸。

英国雷丁大学教授凯文·渥维克是控制论领域知名专家，他在《机器的征途》一书中描写了机器人对未来社会的影响。他认为50年内，机器人将拥有高于人类的智能。机器人在某些方面确实比人类强，例如速度比人快、力量比人大等，但机器人的综合智能较人类还相去甚远，还没有对人类形成任何威胁。但这是否说明人类永远能控制或战胜自己的创造物呢？现在还不得而知。这些预见从另一个角度给人们敲响了警钟，不要给自己创造敌人。克隆技术的出现，在社会上引起了很大的争议，大多数国家禁止克隆人。对于机器人还没有到这种地步，因为现在的机器人不仅未对人类构成威胁，而且给社会带来了巨大的裨益。对于一些对人类有害，如带攻击武器的军用机器人应有所选择并限制其发展，不应将生杀大权交给机器人。

随着工业化的实现、信息化的到来，创新是这个时代的原动力。文化的创新、观念的创新、科技的创新、体制的创新改变着人类的今天，并将改造人类的明天。新旧文化、新旧思想的撞击、竞争，不同学科、不同技术的交叉、渗透，必将迸发出新的精神火花，产生新的发现、发明和物质力量。机器人技术就是在这样的规律和环境中诞生和发展的。科技创新带给社会与人类的利益远远超过它的危险，机器人的发展史已经证明了这一点。机器人的应用领域不断扩大，从工业走向农业、服务业；从产业走进医院、家庭；从陆地潜入水下、飞往空间。机器人展示出巨大的能力与魅力，同时也表示了它们与人的友好与合作。

“工欲善其事，必先利其器”。人类在认识自然、改造自然、推动社会进步的过程中，不断地创造出各种各样为人类服务的工具，其中许多具有划时代的意义。作为20世纪自动化领域的重大成就，机器人已经和人类社会的生产、生活密不可分。世间万物，人力是第一资源，这是任何其他物质不能替代的。尽管人类社会本身还存在着不文明、不平等的现象，甚至还存在着战争，但是社会的进步是历史的必然，所以人类完全有理由相信，像其他许多科学技术的发明一样，机器人也应该成为人类的好助手、好朋友。

## 1.5　机器人的研究内容

机器人技术是集机械工程学、电子技术、控制工程、计算机科学、传感器技术、人工智能、仿生学等学科为一体的综合技术，是多学科科技革命的必然结果。每一套机器人都是一个知识密集和技术密集的高科技机电一体化产品。

机器人研究的基础知识有以下几个方面。

（1）空间机构学　空间机构在机器人中的应用体现在：机器人机身和臂部机构的设计、机器人手部机构设计、机器人行走机构的设计、机器人关节部机构的设计。

（2）机器人运动学　机器人的执行机构实际上是一个多刚体系统，研究要涉及的组成这一系统的各杠杆之间以及系统与对象之间的相互关系，因此需要一种有效的数学描述方法。

（3）机器人静力学　机器人与环境之间的接触会在机器人与环境之间引起相互的作用力和力矩，而机器人的输入关节转矩由各个关节的驱动装置提供，通过手臂传至手部，使力和力矩作用在环境的接触面上。这种力和力矩的输入和输出关系在机器人控制中是十分重要的。静力学主要讨论机器人手部端点力与驱动器输入力矩的关系。

（4）机器人动力学　机器人是一个复杂的动力学系统，要研究和控制这个系统，首先必须建立它的动力学方程。动力学方程是指作用于机器人各机构的力或力矩与其位置、速度、加速度关系的方程。

（5）机器人控制技术　机器人的控制技术是在传统机械系统的控制技术的基础上发展起来的，两者之间无根本的不同。但机器人控制技术也有许多特殊之处，例如它是有耦合的、非线性的多变量的控制系统；其负载、惯量、重心等随时间都可能变化，不仅要考虑运动学关系，还要考虑动力学因素；其模型为非线性而工作环境又是多变的等。其主要研究的内容有机器人控制方式和机器人控制策略。

（6）机器人传感器　人类一般具有视觉、听觉、触觉、味觉及嗅觉等5种感觉，机器人的感觉主要通过传感器来实现。根据检测对象的不同，可分为内部传感器和外部传感器。

1）内部传感器：用来检测机器人本身状态（如手臂间角度）的传感器，多为检测位置和角度的传感器。

2）外部传感器：用来检测机器人所处环境（如是什么物体、离物体的距离有多远等）及状况（如抓取的物体是否滑落）的传感器，具体有物体识别传感器、物体探伤传感器、接近觉传感器、距离传感器、力觉传感器、听觉传感器等。

（7）机器人编程语言　机器人编程语言是机器人和用户的软件接口，编程语言的功能决定了机器人的适应性和给用户的方便性。至今还没有完全公认的机器人编程语言，每个机器人制造厂都有自己的语言。

实际上，机器人编程与传统的计算机编程不同，机器人操作的对象是各类三维物体，运动在一个复杂的空间环境中，还要监视和处理传感器信息。因此，其编程语言主要有两类：面向机器人的编程语言和面向任务的编程语言。

面向机器人的编程语言的主要特点是描述机器人的动作序列，每一条语句大约相当于机器人的一个动作，主要有以下三种：

1）专用的机器人语言，如PUMA机器人的VAL语言，是专用的机器人控制语言。

2）在现有计算机语言的基础上加机器人子程序库，如美国机器人公司开发的AR-Basic和Intelledex公司的Robot Basic语言，都是建立在BASIC语言上的。

3）开发一种新的通用语言加上机器人子程序库，如IBM公司开发的AML机器人语言。

面向任务的机器人编程语言允许用户发出直接命令，以控制机器人去完成一个具体的任务，而不需要说明机器人需要采取的每一个动作的细节。如美国的RCCL机器人编程语言，就是用C语言和一组C函数来控制机器人运动的任务级机器人语言。

# 第 2 章　机器人博览

## 2.1　工业机器人

### 2.1.1　概述

工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度的机器人。它是自动执行工作的机器装置，是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器。它可以接受人类指挥，也可以按照预先编排的程序运行。现代的工业机器人还可以根据人工智能技术制定的原则纲领行动。

1954 年，美国戴沃尔最早提出了工业机器人的概念，并申请了专利。该专利的要点是借助伺服技术控制机器人的关节，利用人手对机器人进行动作示教，机器人能实现动作的记录和再现，这就是所谓的示教再现机器人。1959 年，第一台工业机器人在美国诞生，开创了机器人发展的新纪元，之后日本使工业机器人得到迅速的发展。目前，日本已成为世界上工业机器人产量和拥有量最多的国家。

20 世纪 80 年代，随着生产技术的高度自动化和集成化，工业机器人得以进一步发展，并在这个时代起着十分重要的作用。

第一代机器人一般指工业上大量使用的可编程机器人及遥控操作机。可编程机器人可根据操作人员所编程序完成一些简单重复性作业，遥控操作机的每一步动作都要靠操作人员发出。1982 年，美国通用汽车公司在装配线上为机器人装备了视觉系统，从而宣告了第二代机器人——感知机器人的问世。这代机器人带有外部传感器，可进行离线编程，能在传感系统的支持下，具有不同程度感知环境并自行修正程序的功能。第三代机器人为自治机器人，正在各国研制和发展，它不但具有感知功能，还具有一定决策和规划能力，能根据人的命令或按照所处环境自行做出决策规划动作，即按任务编程。

我国机器人研究工作起步较晚，从“七五”开始国家投入资金，对工业机器及其零部件进行攻关，完成了示教再现式工业机器人成套技术的开发和研制。1986 年，国家高技术研究发展计划开始实施，智能机器人主题跟踪世界机器人技术的前沿，已经取得了一大批科研成果，并成功地研制出了一批特种机器人。

从 20 世纪 90 年代初期起，我国的国民经济进入了实现两个根本转变时期，掀起了新一轮的经济体制改革和技术进步热潮。我国的工业机器人又在实践中迈进一大步，先后研制出了点焊、弧焊、装配、喷漆、切割、搬运、包装码垛等各种用途的工业机器人，并实施了一批机器人应用工程，形成了一批机器人产业化基地，为我国机器人产业的腾飞奠定了基础。

### 2.1.2　工业机器人在工业生产中的应用

在工业生产中，使用机器人有很多优点：

1）首先可以提高产品质量。由于机器人是按一定的程序作业，避免了人为随机差错。

2）可以提高劳动生产效率、降低成本，因为机器人可以不知疲劳地连续工作。

3）改善劳动环境，保证生产安全，减轻甚至避免有害工种（比如焊接）对工人身体的侵害，避免危险工种（比如冲压）对工人身体的伤害。

4）降低了对工种熟练程度的要求，不再要求每个操作者都是熟练工，从而解决熟练工不足的问题。

5）使生产过程通用化，有利于产品改型，如要换一种产品，只要给机器人换一个程序就行了。

1. 喷漆机器人

众所周知，多数涂料对人体是有害的，因此，喷漆一向被列为有害工种。据统计，现在我国从事喷漆工作的工人超过 30 万。由于生活水平的提高，加之独生子女为主体的就业队伍的出现，喷漆工人队伍难以为继，用机器人代替人进行喷漆势在必行，而且用机器人喷漆还具有节省漆料、提高劳动效率和产品合格率等优点。

在我国工业机器人发展历程中，喷漆机器人是比较早开发的项目之一。到目前为止，已有很多条喷漆自动生产线用于汽车等行业（见图 2-1）。

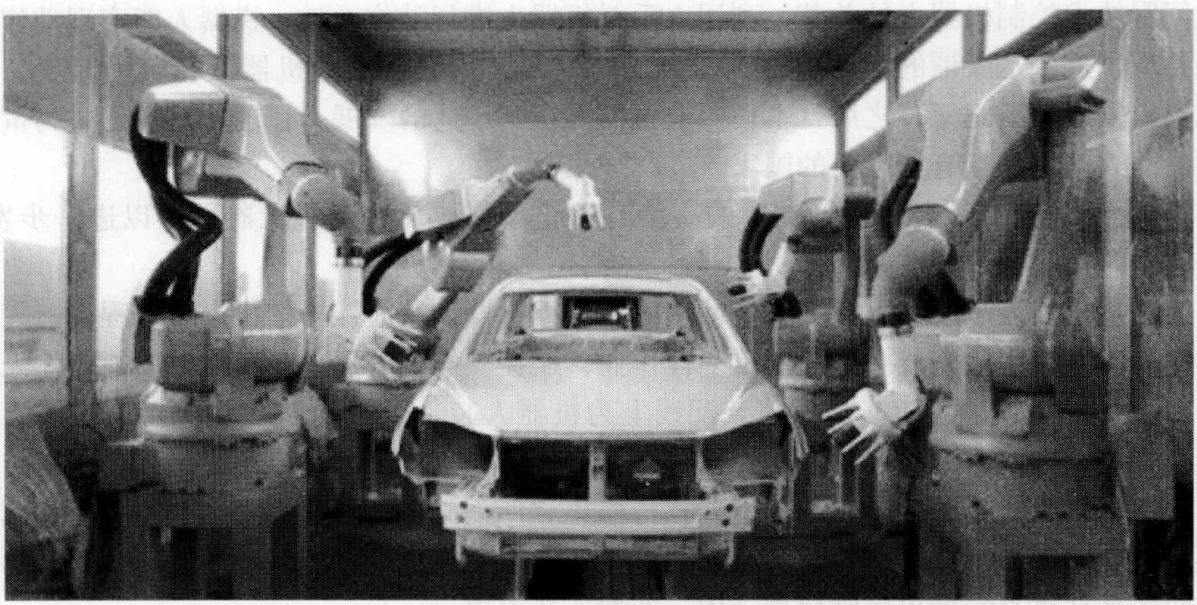


图 2-1　汽车喷漆机器人

喷漆机器人主要由机器人本体、计算机和相应的控制系统组成，液压驱动的喷漆机器人还包括液压油源，如液压泵、油箱和电动机等。这种机器人多采用 5 或 6 自由度关节式结构，手臂有较大的运动空间，并可做复杂的轨迹运动，其腕部一般有 2 ~ 3 个自由度，可灵活运动。较先进的喷漆机器人腕部采用柔性手腕，既可向各个方向弯曲，又可转动，其动作类似人的手腕，能方便地通过较小的孔伸入工件内部，喷涂其内表面。喷漆机器人一般采用液压驱动，具有动作速度快、防爆性能好等特点，可通过手把手示教或点位示教来实现示教。喷漆机器人广泛用于汽车、仪表、电器、搪瓷等工艺生产部门。

2. 焊接机器人

使用机器人进行焊接作业（见图 2-2），可以保证焊接的一致性和稳定性，克服了人为因素带来的不稳定性，提高了产品质量。由于使用机器人，工人可以远离焊接场地，减少了有

害烟尘、焊炬对工人的侵害，改善了劳动条件，同时也减轻了劳动强度。如果采用机器人工作站（见图2-3），多工位并行作业，可以提高劳动生产节拍，满足高效的要求。

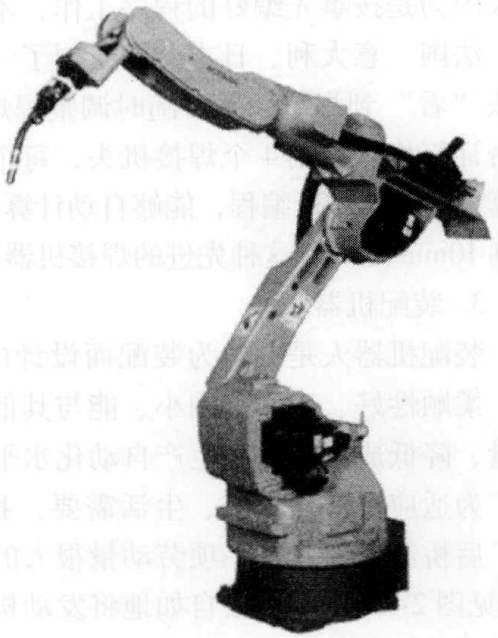


图2-2　焊接机器人

我国焊接机器人占工业机器人的比例很大，用于汽车、摩托车、工程机械（如起重机、推土机）、农业机械甚至家电生产部门。我国的大型汽车制造集团都具有很多台焊接机器人。上海汇众汽车制造有限公司将弧焊机器人工作站分别用于桑塔纳和别克轿车生产，由于系统有较完善的自动诊断功能，能自动检测机器人系统故障和焊接系统故障，并且实现了上下料工位、检测工位、焊接工位、冷却工位并行作业，不仅保证了产品质量，还大大提高了生产效率。

哈尔滨工业大学、沈阳自动化研究所和中国第一汽车集团公司（以下简称“一汽”）合作研制的HT-100A点焊机器人于1999年7月正式通过了验收。该机器人在验收前已在红旗轿车和一汽载货汽车生产线上工作了一年多，分别点焊了红旗轿车和载货汽车各4000辆。这说明我国的焊接机器人研制工作是扎实而实用的。

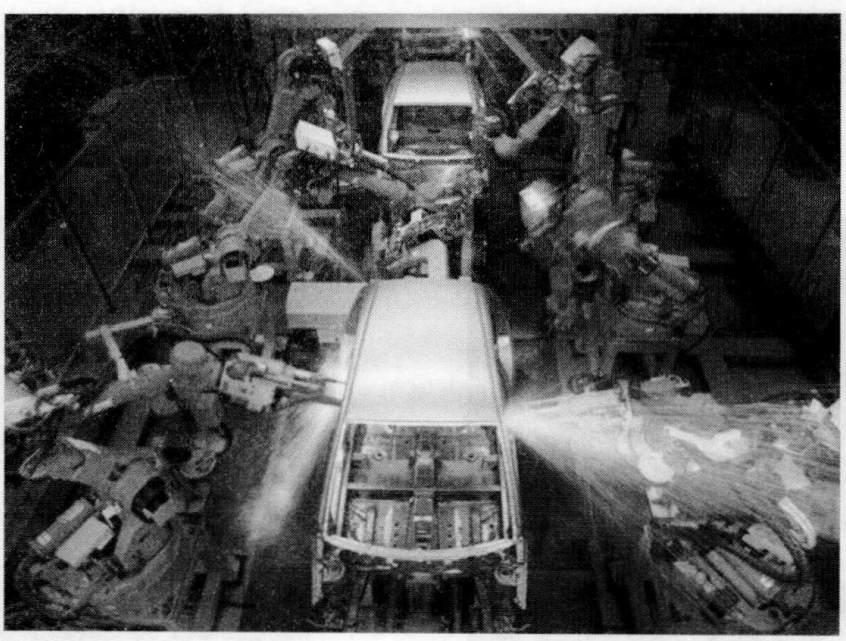


图2-3　日本生产的某焊接机器人

在国外，焊接机器人已受到大、中型甚至小型企业的重视，美国的卡特彼勒、德国的利勃海尔、宝玛格、瑞典的沃尔沃等公司均大量使用了焊接机器人；日本的雅马哈、本田、铃木等摩托车的主要结构件几乎全部采用焊接机器人作业。

焊接机器人作业精确，可以连续、不知疲劳地进行工作，但在作业中会遇到部件稍有偏位或焊缝形状有所改变的情况。人工作业时，因能看到焊缝，可以随时作出调整；而焊接机

器人因为是按事先编好的程序工作，不能很快调整，所以其使用受到限制。

法国、意大利、日本共同研制了一种叫做“Robokid”的焊接机器人，能用激光三角测量法“看”到焊缝，并可随时调整焊炬的路线，保证对准焊缝。法国人又在 Robokid 上装上一台计算机，控制 4 个焊接机头，每个机头具有 4 个自由度，这样可以进行多道焊接。利用计算机的功能进行编程，能够自动计算焊道的分布和需调整的数值，并把编程时间由数小时缩短到 10min 之内。这种先进的焊接机器人被法国人用在船舶和核反应堆压力容器的制造中。

3. 装配机器人

装配机器人是专门为装配而设计的工业机器人，与一般工业机器人比较，它具有精度高、柔顺性好、工作范围小、能与其他系统配套使用等特点。使用装配机器人可以保证产品质量、降低成本、提高生产自动化水平。

为适应现代化生产、生活需要，我国汽车工业迅猛发展，但在汽车装配中，安装发动机、后桥等大部件是一项劳动量很大的工作，甚至需要人抬肩扛。现在，使用智能装配机器人(见图 2-4)可以轻松自如地将发动机、后桥、油箱等大部件自动运输、装配到汽车上，极大地提高了生产效率，改善了劳动条件。

各种高科技产品的装配需要较高的精度和自动化程度，因此海尔哈工大机器人技术有限公司推出了多款直角坐标机器人(图 2-5 所示是其中的一个类型)，可以根据不同的使用环境分别设计为龙门式、抓取式、悬臂式或者多维框架式结构，也可以为用户量身定制各种专用机器人系统。该机器人能在三维空间里完成移载、抓取、旋转等各种复杂动作，与其他机构配合可以实现自动定位测试、三维检测、加油涂胶、码垛、喷码、搬运包装、装配、分拣等多种功能，广泛适用于汽车及汽车零部件、工业电器、电子通信、物流、家电、食品饮料、化工等各种领域。

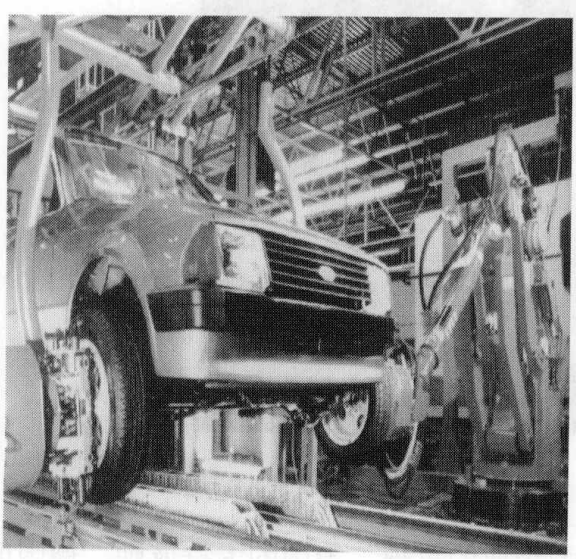


图 2-4　汽车装配机器人

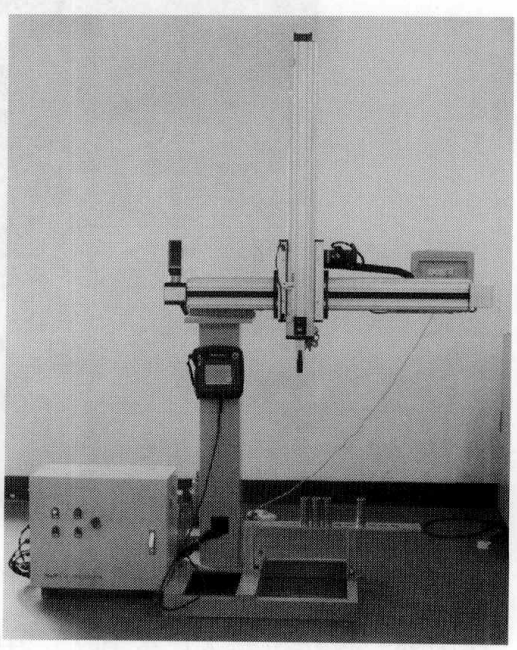


图 2-5　直角坐标机器人

4. 搬运机器人

在建筑工地、海港码头，总能看到桥式起重机的身影，应当说桥式起重机装运比工人肩

扛手抬已经进步多了，但这只是机械代替了人力，或者说桥式起重机只是机器人的雏形，它还得完全依靠人操作和控制定位等，不能自主作业。以下介绍的搬运机器人(见图2-6)则能够自主作业，并能保持很高的定位精度。

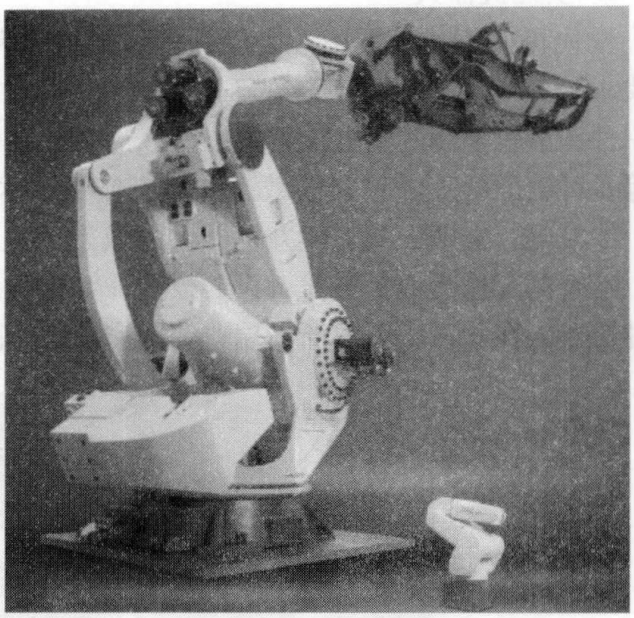


图2-6　搬运机器人

日本研制成功的某垂直关节型搬运机器人，手臂有3个关节，能上下、前后及侧向移动，即有6个自由度，每个坐标轴用交流伺服电动机控制，最大搬运重量为500kg，定位精度为0.1mm。定位是靠臂端安装的一个距离超声传感器和一个图像传感器联合完成。利用这种机器人可以搬运铁路枕木、钢轨等。同其他机器人一样，其臂端有许多备用附件，可以完成不同的搬运任务。

我国无锡威孚集团公司和南京理工大学于2001年合作开发了一种搬运机器人，其结构为六自由度、关节式、轨道控制式，原设计是针对该集团铝浇注车间搬运铝液的作业，完成从保温炉内舀取铝液倒入浇注机进行浇注。它可以同时供应8台浇注机，工作一遍的时间为6.5min，并保证舀、倒铝液时没有溅漏，最大搬运重量为100kg，工作半径为2.6m，可在±180°范围内回转。当然这种机器人还可以开发利用到其他搬运作业中去。

德国库卡公司(KUKA)推出了四款全新的码垛机器人(属于搬运机器人)，型号分别是KR 300 PA(见图2-7)、KR 470 PA、KR 700 PA和KR 1000 1300 “titan” PA。码垛机器人广泛应用于将货物搬移到货盘上(码垛)、从货盘上搬移下货物(卸码垛)以及货物的举起、码垛、包装、运送、分拣和标注。如图2-8所示是在自动化立体仓库作业的码垛机器人。

图2-7　KR 300 PA机器人

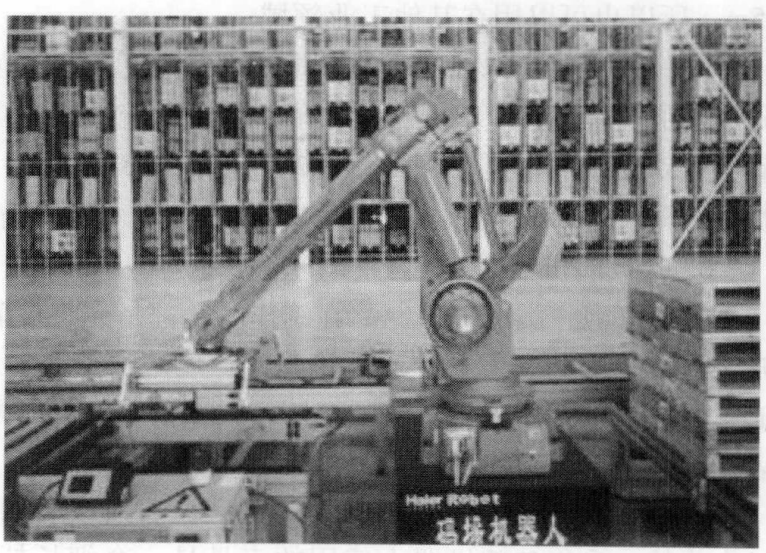



图2-8　自动化立体仓库码垛机器人

5. 喷丸机器人

现代机械工业发展中，表面处理越来越成为一个棘手的问题，因为现代化产品对表面质量要求越来越高，而手工清理不仅效率低，而且劳动量太大。因此，芬兰的钢铁巨人公司研制出一种计算机控制的喷丸机器人，可以进行如飞机机身和机翼除旧漆、运输集装箱内外表面处理等各种表面处理。喷丸的载运介质有空气、水蒸气或水，磨削介质则可以用玻璃球、塑料片、沙粒等。实践证明，喷丸机器人的效率比人工清理高出 10 倍以上，而且工人可以避开污浊、嘈杂的工作环境，操作者只要改变计算机程序，就可以轻松改变不同的清理工艺。目前，这种机器人在德国、俄罗斯、瑞典等国家销售。图 2-9 是美国康泰公司生产的喷丸机器人。

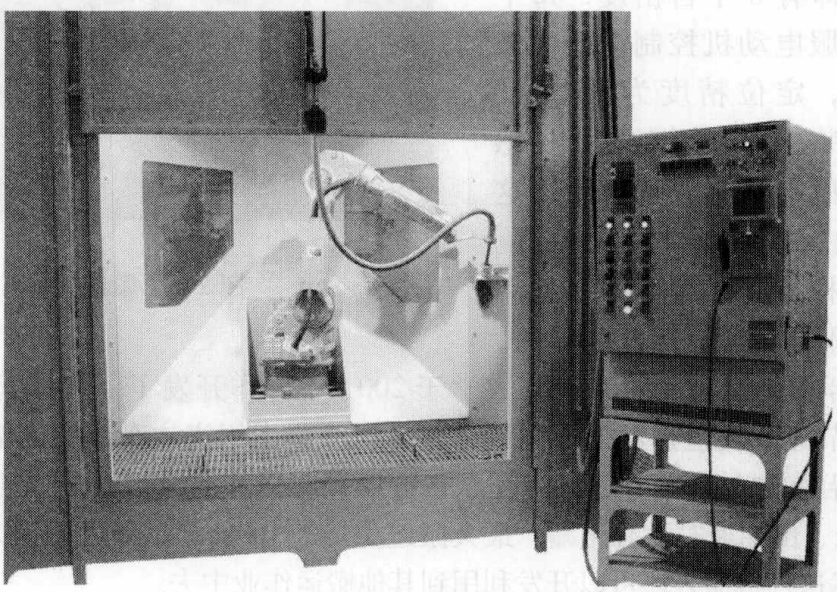


图 2-9 喷丸机器人

2005 年，韩国大宇造船和海事工程公司(DSME)研制成功“船体真空喷丸机器人”，它可以自动喷丸船体外部的表面。这项发明预计可以提高生产力，防止污染，减少工人因作业疲劳导致的肌骨骼失调，全面改进船舶建造质量。此外，由于这一喷丸机器人工作高度可达 35m，所以也可以用在其他工业领域。

以前的喷丸工作都由手工操作，是一个冗长而艰苦的过程，由砒酸引起的污染给作业人员带来了健康危害。喷丸机器人采用绞盘系统，能够自动垂直移动并且可以追踪焊接线。这个全自动设备重量仅有 30kg，移动速度为 0.8m/min，可以喷丸的宽度是 150mm，大大减少喷丸时间。每 25m 的喷丸用时为 30 ~ 60min，每艘船节约时间 10 ~ 20h。

6. 吹玻璃机器人

类似灯泡一类的玻璃制品在制作时，都是先将玻璃熔化，然后人工吹起成形的。熔化的玻璃温度高达 1100℃以上，无论是搬运还是吹制，工人不仅劳动强度很大，而且有害身体，工作的技术难度还很大。法国赛博格拉斯公司开发了两种六轴工业机器人，应用于采集(搬运)和吹制玻璃两项工作。

机器人是用标准的 FANUC M710 型机器人改装的，是在原机器人上装上不同的工具进行作业的。采集玻璃机器人使用的工具是一个细长杆件，杆头装一个难熔化材料制成的圆球。操作时，机器人把圆球插入熔化的玻璃液中，慢慢转动，熔化的玻璃就会包在圆球上，

像蘸糖葫芦一样，当蘸到足够的玻璃液时，用工业剪刀剪断与玻璃液相连处，放入模具等待加工。吹制机器人与采集玻璃机器人的不同之处是工具，它的细长杆端头装的是个夹钳，能够夹起玻璃坯料，细长杆中心有孔，工作时靠一台空气压缩机向孔内吹气，实际上是再现人工吹制的动作。

到目前，该公司开发的玻璃采集机器人已被世界各国采用，其中包括日本、巴西、中国、法国等。尽管这种机器人还不够理想，但却是世界首创，而且很实用，有着很大的发展前景。

7. 核工业中的机器人

第二次世界大战中，一颗原子弹使日本广岛一瞬间变成废墟，使得一些地区几年、几十年寸草不生，足见核武器的破坏力量，但核能也同样可以为民造福。到目前为止，世界发达国家都广泛建立和使用核电站，日本核电站发电量已占全国发电量的三分之一。我国也有著名的大亚湾核电站等。既要发展核工业，又要使人们远离核的威胁，那么开发核工业机器人，让机器人代替人去进行有关作业，就是解决这一问题的唯一途径了。

日本最早开发的这类机器人是单轨的，活动范围很窄，只能对某些核设备进行定向的巡检。后来为了扩大工作范围，又开发了履带式巡检机器人，装有摄像机、传声器和机械手，并应用了人工智能，性能得到极大提高。

近期，日本又研制出一种适用于核设施的机器人，该机器人具有高度的环境适应性和操作灵活性，由于设计预期性能要求苛刻，起名为“极限机器人”。它采用关节4脚步行方式运动，可以上下台阶、越过障碍物，甚至钻进狭窄空间；机械手上装了多个感觉传感器，能够将指头上的微小感觉传给操作者；样机长1.2m，宽0.7m，高1.73m，重量约750kg，准备用于核设施的维修。

同类型的机器人制成不同的形状、尺寸，用于深度至200m的海底石油开采；样机长3.2m、宽2.2m、高2m，可在三维方向移动。设计者还拟开发用于石油设施的灭火。

上海交通大学特种机器人研究室在国家863计划资助下，成功研发了核工业机器人样机（见图2-10）。该机器人主要用于以核工业为背景的危险、恶劣场所，特别针对核电站、核

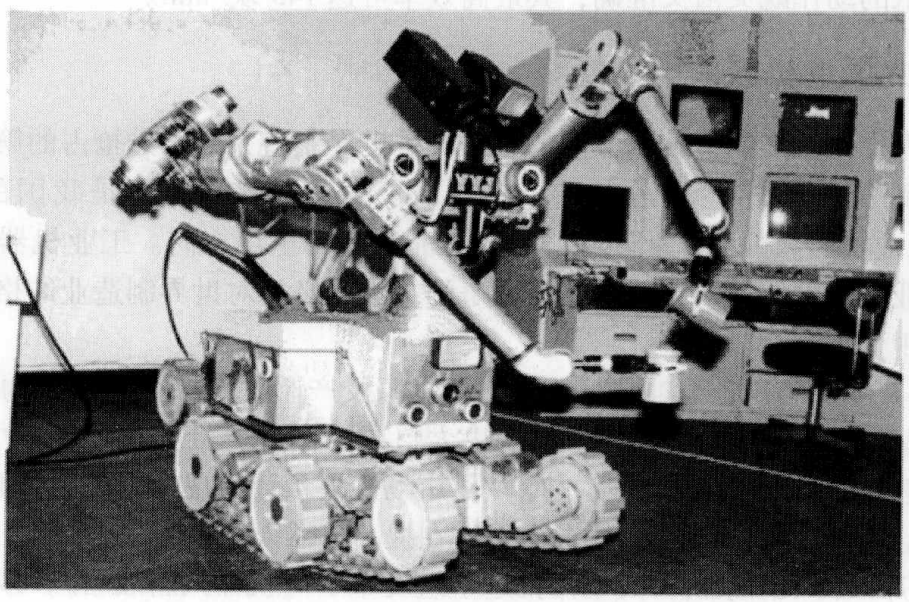


图2-10　核工业机器人样机

燃料后处理厂及三废处理厂等放射性环境现场，可以对其核设施中的设备装置进行检查、维修和简单事故处理等工作。

8. 食品工业机器人

（1）肉类加工机器人　肉食品对人们生活来说是不可缺少的，目前在一些国家里，机器人承担了肉食加工工作。国际上很重视肉类加工机器人的研究，欧盟还提供了专项奖金，英国、丹麦、德国等加紧研制。目前，已经研制成功机器人屠宰系统，用于去除内脏以后的胴体各部分的分割；丹麦的 Danish 肉类研究所建造了一套内脏去除示范系统，用于去除内脏。

机器人系统的使用提高了屠宰分割的准确性，也收到了较好的经济效益。

（2）鱼类加工机器人　日常生活中，加工鱼是很麻烦的事，一般说来鱼薄而刺多，不注意就会伤着手，而对于冰岛、希腊等产鱼国家，要大量加工鱼，这些工作不仅使人劳累，而且稍不注意还会切掉手指。为解决这个问题，欧洲信息技术战略计划确定了资助项目——鱼加工机器人。主要要求是：制造一个高速视觉导向机器人，其末端装有手臂，能准确地从传送带上抓起滑溜的鱼，迅速放到切头机上去，保证在传送带不停运转的情况下，不能漏抓、漏切一条鱼。切头机加工一条鱼的时间要求 1 ~ 2s，视觉系统还必须能区分鱼的大小，以便把鱼送到不同的加工线上。设计者的效益目标是使鱼片生产量增加 1%，目前这一系统正在试验中。

（3）糕点包装机器人　中国是礼仪之邦，逢年过节，亲戚朋友间常常送盒点心，以分享节日的快乐。当你提着一盒精美的点心去朋友家时，是否考虑到包装易碎、易坏的点心是件辛苦而细致的工作呢？瑞士的一家糕点厂从 1992 年就在生产线上安装了 8 台 Adept-One 4 轴机器人，它们的任务是：将糕点放入软包装盒，再将软包装盒放入纸箱两道工序，而且是对 7 种不同形式的糕点进行包装。其中最困难的是第一道工序，糕点放在传送带上，机器人手爪上糕点的位置必须与软包装盒中糕点应放的位置一一对应，利用摄像机对传送带上糕点的位置定位，并将数据传给机器人，机器人将传送带上的糕点逐个取下，小心翼翼地放入软包装盒中。手爪的动作既灵活又准确，其最高效率可达 145 块/min。

### 2.1.3　工业大国的机器人国家战略

工业机器人作为智能制造技术浪潮的关键，是世界制造大国争先抢占的第三次工业革命的制高点。无论是美国的“先进制造”、德国的“工业 4.0”，还是我国的“中国制造 2025”，都将工业机器人列为产业转型升级和智能制造的重点方向。工业机器人的竞争，已上升到国家产业战略的层面。工业机器人竞争的结果，必然对世界制造业的格局产生重大影响，重塑整个现代工业。

（1）日本　2014 年，日本独立行政法人新能源及产业技术综合开发机构公布了《机器人白皮书》，提议充分运用机器人技术来解决人口减少问题等社会课题。其中预测，医疗、护理等服务行业机器人将进一步普及，2020 年市场规模预计为现在的 3 倍以上，达到约 2.8 万亿日元（约合 1700 亿元人民币）。白皮书旨在提高机器人技术。

2015 年 1 月，日本国家机器人革命推进小组发布了《机器人新战略》，拟通过实施五年行动计划和六大重要举措达成三大战略目标，使日本实现机器人革命，以应对日益突出的老龄化、劳动人口减少、自然灾害频发等问题，提升日本制造业的国际竞争力，获取大数据时

代的全球化竞争优势。

（2）德国　2012年，德国推行了以“智能工厂”为中心的“工业4.0计划”，通过智能人机交互传感器，人类可借助物联网对下一代工业机器人进行远程管理。这种机器人还将具备生产间隙的“网络唤醒模式”，以解决使用中的高能耗问题，促进制造业的绿色升级。

（3）美国　2011年6月，奥巴马宣布启动《先进制造伙伴计划》，明确提出通过发展工业机器人提振美国制造业。根据计划，美国将投资28亿美元，重点开发基于移动互联技术的第三代智能机器人。

相比德国高达25%的应用比例，机器人在美国制造业中的应用相对较低，仅为11%。值得注意的是，迅速发展的智能工业机器人市场也吸引了诸多创新型企业。以谷歌为代表的美国互联网公司也开始进军机器人领域，试图融合虚拟网络能力和现实运动能力，推动机器人的智能化。2013年，谷歌强势收购多家科技公司，已初步实现在视觉系统、强度与结构、关节与手臂、人机交互、滚轮与移动装置等多个智能机器人关键领域的业务部署。

（4）韩国　2014年7月，韩国贸易工业和能源部在首尔韩国科技中心举办机器人产业政策会议，并宣布了第二个智能机器人开发五年计划，侧重于通过将技术与其他产业如制造业和服务业的融合实现扩张。

韩国政府将通过四个策略推动作为战略工业产业的机器人产业的发展：①开展机器人研究与开发，建设综合能力；②扩大各行业对机器人的需求；③构建开放的机器人产业生态系统；④公私联合投资26亿美元加快建设机器人的融合网络。

（5）欧盟　2014年6月初，欧盟正式宣布欧委会和欧洲机器人协会下属180个公司及研发机构共同启动全球最大的民用机器人研发计划“SPARC”。根据该计划，到2020年欧委会将投资7亿欧元，欧洲机器人协会将投资21亿欧元推动机器人研发。该项目将大幅推动机器人的科研、项目建设、成果转换等。

“SPARC”项目主要研发内容包括机器人在制造业、农业、健康、交通、安全和家庭等各领域的应用。欧委会预计，该计划将在欧洲创造24万人次的就业岗位，使欧洲机器人行业年产值增长至600亿欧元，占全球市场份额将提高至42%。

（6）英国　2014年7月，英国政府发布首个官方机器人战略RAS2020，并提供财政支持，确保其机器人产业能够和全球领先的国家竞争。英国政府技术战略委员会已经拨款6.85亿美元作为下一年的发展基金，其中2.57亿美元将用于发展机器人和自主系统（RAS）。英国政府希望通过RAS2020战略，使其能够在2025年获得届时估值约1200亿美元的全球机器人市场10%的份额。

（7）中国　2015年12月，国家工业和信息化部召开专题会议，审议由装备工业司组织编制的《机器人产业十三五发展规划》（以下简称“规划”）。《规划》提出今后五年中国机器人产业的主要发展方向，将重点推进工业机器人在轮胎、陶瓷等原材料行业、民爆等危险作业行业、锻造铸造等金属工业行业，以及国防军工领域的推广应用；《规划》也对服务机器人行业的发展进行了顶层设计，家庭辅助类机器人将以更高的性价比解放人类双手。

这一产业发展规划将和《中国制造2025》重点领域技术路线图（简称路线图）一起，构成未来十年我国机器人产业的发展蓝图。

### 2.1.4 工业机器人产业发展模式

在工业机器人产业化的过程中，世界形成了三种不同的发展模式，即日本模式、欧洲模式和美国模式。

日本模式是机器人制造厂商首先以开发新型机器人和批量生产优质产品为主要目标，然后由其子公司或社会上的工程公司来设计制造各行业所需要的机器人成套系统，并完成交钥匙工程。欧洲模式是机器人的生产和用户所需要的系统设计制造，全部由机器人制造厂商自己完成。美国模式则是采购与成套设计相结合。美国国内基本上不生产普通的工业机器人，企业需要时，机器人通常由工程公司进口，再自行设计、制造配套的外围设备，完成交钥匙工程。

目前中国工业机器人产业化的模式与美国接近，即本身生产的机器人较少，众多企业集中于机器人系统集成这一块。这是由于工业机器人关键零部件的核心技术主要掌握在 ABB、KUKA 等几家国际巨头手中和机器人本体生产成本过高所致。中国工程院在 2003 年 12 月完成并公开的《我国制造业焊接生产现状与发展战略研究总结报告》中认为，我国应从“美国模式”着手，在条件成熟后逐步向“日本模式”靠近。

### 2.1.5 全球著名工业机器人新产品

1. ABB YuMi 机器人

阿西布朗勃法瑞集团（简称 ABB）在世界上率先研发出了电力驱动工业机器人和工业喷涂机器人。现在，ABB 仍然是机器人市场和技术的领导者，是装机量最大的机器人制造商。作为一款人性化设计的双臂机器人，YuMi（见图 2-11）具有视觉和触觉，工人和机器人可以和谐共处，共同完成同一个任务。YuMi 的双臂灵巧，并以软性材料包裹，同时配备创新的力传感技术，可以保障工人安全。此外，安全性体现在这台机器人的各种功能之中，使其可以在开放环境中进行工作。

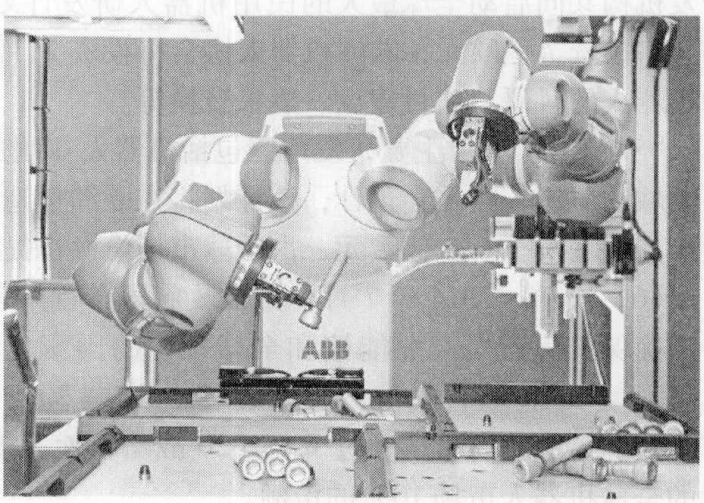



图 2-11 ABB YuMi 机器人

据悉，ABB 开发 YuMi 的最初目的是满足电子消费品行业对柔性和灵活制造的需求，但未来它也将被逐渐应用于更多的市场领域。从机械手表的精密部件到手机、平板电脑以及台式电脑零件的处理，YuMi 都能以其精确性轻松应对，甚至连穿针引线都不在话下。

YuMi 将人与机器人并肩合作变为现实，并宣告一个人机协作新时代的来临。YuMi 将会改变人类对制造和工业过程的许多固有想法，同时带来无限可能，将人类带入一个全新的工业自动化时代。

2. 库卡轻型人机协作机器人 LBRiiwa

德国库卡公司在 2014 中国国际工业博览会机器人展上，精彩展示库卡公司引领全球工

业机器人革新发展的产品及自动化解决方案，同时，在中国首次发布库卡公司第一款7轴轻型灵敏机器人 LBRiiwa（见图2-12），其开创性的产品性能和广泛的应用领域，为工业机器人的发展开启了新时代。

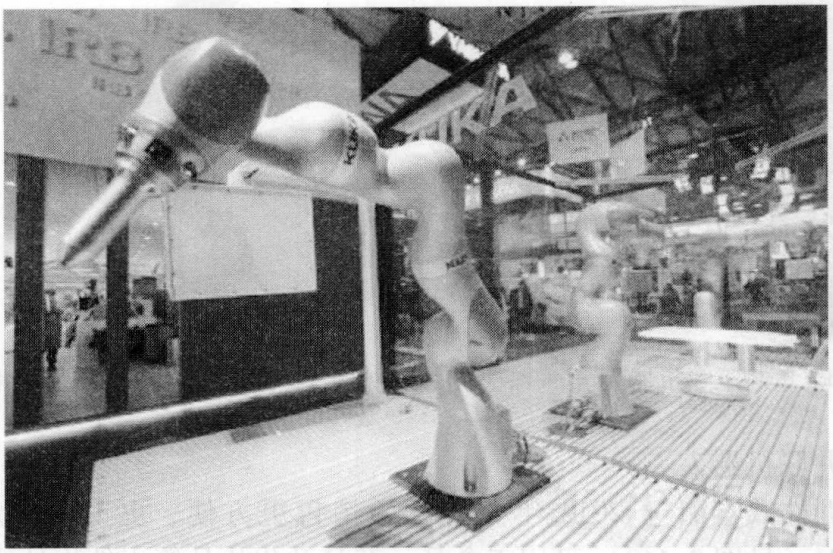


图2-12　LBRiiwa 机器人

LBRiiwa 是一款具有突破性构造的7轴机器人手臂，其极高的灵敏度、灵活度、精确度和安全性的产品特征，使它更接近人类的手臂，并能够与不同的机械系统组装到一起，特别适用于柔性、灵活度和精准度要求较高的行业，如电子、医药、精密仪器等行业，可满足更多工业生产中的操作需要。其次，轻型的机身和温和的操作，可以完美地与人协作，实现了以往人类和工业机器人前所未有的合作。2014年，在被誉为设计界“奥斯卡”的红点设计大奖上，LBRiiwa 凭借其丰富的创意、扎实的技术和开创性的设计获得了“最佳奖”的殊荣。

3. 新松500kg 重载机器人

沈阳新松机器人自动化股份有限公司在2014中国国际机器人展览会上展示了500kg 重载工业机器人（见图2-13）。新松机器人公司在介绍该产品时，称其为“国内首台自主研发的500kg 重载工业机器人”。

据了解，500kg 重载工业机器人为6自由度纯关节型机器人，工作范围可达2.5m，结构紧凑，负载能力强。可应用在各行业的重物搬运作业，尤其是重型夹具的搬运、发动机的起吊、锻造车间内重型部件的搬运、机械组件的装卸以及大重型货盘的搬运等。

4. 柯马 Racer7-1.4 机器人

2014年5月，柯马在中国昆山发布了机器人新产品 Racer7-1.4（见图2-14），有效负载7kg，最大作业范围1.4m，重复定位精度 ±0.05mm。Racer7-1.4 是同级别产品中速度最快的机器人，已广泛应用于搬运、机床上下料等工作。柯马在2015年中国国际机器人展（CIROS 2015）上推出了最新一代工业机器人 Racer3（见图2-15），有效负载3kg，工作半径630mm，重复定位精度 ±0.03mm，由高强度铝材制造而成，重量仅30kg，可便捷地安装于工作台、墙壁、天花板或倾斜面上。Racer3 的问世满足了中小型企业和国家对速度快、成本效益高的机器人自动化方案不断增长的市场需求，适用于电子行业的装配、检测和点胶等。

图2-13 500kg 重载工业机器人

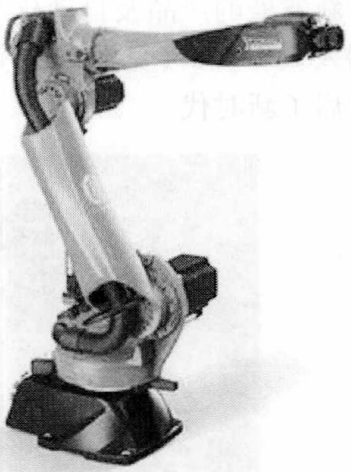


图 2-14 Racer7-1.4 机器人

5. 安川电机并联机器人

日本安川电机株式会社于 2014 年 8 月开始销售更方便、更卫生的新款并联机器人 MOTOMAN-MPP3H（见图 2-16），可用于食品、药品及化妆品等小件物品的搬运、排列及装箱等。机身内部为中空结构，将电线和软管收纳在其中，使用户省去了布置电线和软管的麻烦，而且不会让电线等妨碍机器人工作。

图 2-15 Racer3 机器人

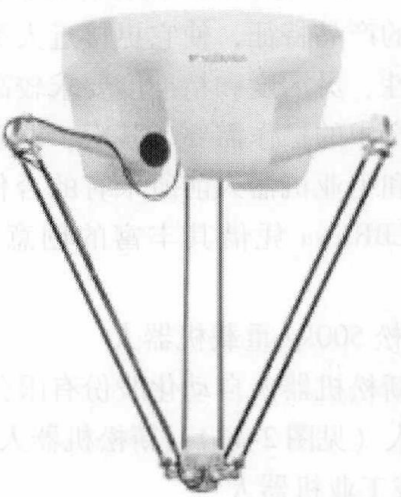


图 2-16 MOTOMAN-MPP3H 并联机器人

为了实现球接头部分的无油化，采用了“自润滑树脂”。以前必须在机器人的关节部件上涂润滑油等，以减轻部件磨耗。食品及药品等的生产线上都是采用可食用润滑油，但仍然存在因滴油等造成的卫生和品质管理方面的问题。MOTOMAN-MPP3H 采用了相对于金属部件摩擦少的自润滑树脂。不仅不需要涂润滑油，还解决了卫生和品质管理方面的问题。

### 2.1.6 工业机器人的发展趋势

机器人是先进制造技术和自动化装备的典型代表，是人造机器的“终极”形式。它涉及机械、电子、自动控制、计算机、人工智能、传感器、通信与网络等多个学科和领域，是多种高新技术发展成果的综合集成，因此它的发展与众多学科发展密切相关。当今工业机器人的发展趋势主要有：

1）工业机器人性能不断提高（高速度、高精度、高可靠性、便于操作和维修），而单机价格不断下降。

2）机械结构向模块化、可重构化发展，例如关节模块中的伺服电动机、减速器、检测系统三位一体化，由关节模块、连杆模块用重组方式构造机器人整机。

3）工业机器人控制系统向基于计算机的开放型控制器方向发展，便于标准化、网络化；器件集成度提高，控制柜日渐小巧，采用模块化结构，大大提高了系统的可靠性、易操作性和可维修性。

4）机器人中的传感器作用日益重要，除采用传统的位置、速度、加速度等传感器外，视觉、力觉、声觉、触觉等多传感器的融合技术在产品化系统中已有成熟应用。

5）机器人化机械开始兴起。

## 2.2　特种机器人

### 2.2.1　护士助手

恩格尔伯格是世界上最著名的机器人专家之一，他对创建机器人工业作出了杰出的贡献。1958年他建立了Unimation公司，并于1959年研制出了世界上第一台工业机器人。1983年，就在工业机器人销售日渐火爆的时候，恩格尔伯格和他的同事们毅然将Unimation公司卖给了西屋公司，并创建了TRC公司，开始研制服务机器人。恩格尔伯格认为，服务机器人与人们生活密切相关，服务机器人的应用将不断改善人们的生活质量，这也正是人们所追求的目标。一旦服务机器人像其他机电产品一样被人们所接受，走进千家万户，其市场将不可限量。

恩格尔伯格创建的TRC公司第一个服务机器人产品是医院用的“护士助手”机器人（见图2-17）。它于1985年开始研制，1990年开始出售，目前已在世界各国几十家医院里投入使用。由于“护士助手”机器人的市场前景看好，现已成立了“护士助手”机器人公司。

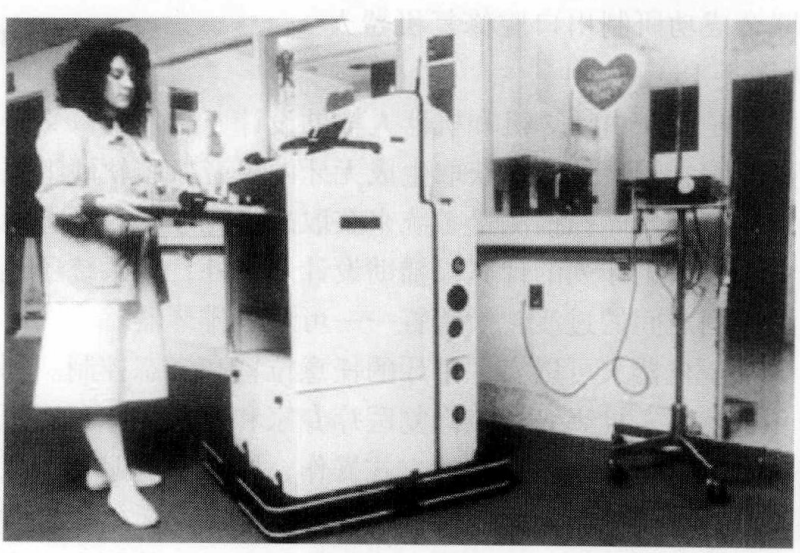


图2-17　“护士助手”机器人

“护士助手”机器人是自主式机器人，它不需要有线制导，也不需要事先计划，一旦编好程序，它随时可以完成以下各项任务：运送医疗器材和设备，为病人送饭，送病历、报表及信件，运送药品，运送试验样品及试验结果，在医院内部送邮件及包裹。

该机器人由行走部分、行驶控制器及大量的传感器组成。机器人可以在医院中自由行动，其速度为0.7m/s左右。机器人中装有医院的建筑物地图，在确定目的地后，机器人利用航线推算法自主地沿走廊导航，由结构光视觉传感器及全方位超声波传感器可以探测静止

或运动物体，并对航线进行修正。它的全方位触觉传感器保证机器人不会与人和物相碰。车轮上的编码器测量它行驶过的距离。在走廊中，机器人利用墙角确定自己的位置，而在病房等较大的空间，它可利用天花板上的反射带，通过向上观察的传感器帮助定位。需要时，它还可以开门。在多层建筑物中，它可以给载人电梯打电话，并进入电梯到所要到的楼层。紧急情况下，例如某一外科医生及其病人使用电梯时，机器人可以停下来，让开路，2min 后它重新起动继续前进。通过“护士助手”机器人上的菜单可以选择多个目的地。机器人有较大的显示屏及用户友好的音响装置，使用起来迅捷方便。

### 2.2.2 口腔修复机器人

牙齿是人类健康的保护神，拥有一口结实、完好的牙齿是身体健康的保证。然而随着年龄的增长，牙齿将会出现松动脱落。目前，世界上大多数发达国家都步入了老龄化社会，很多老人出现了全口牙齿脱落。全口牙齿脱落的症状称为无牙颌，需用全口义齿修复。人工牙列是恢复无牙颌患者咀嚼、语言功能和面部美观的关键，也是制作全口义齿的技术核心和难点。传统的全口义齿制作方式是由医生和技师根据患者的颌骨形态，靠经验用手工制作，无法满足日益增长的社会需求。北京大学口腔医院、北京理工大学等单位联合成功研制出口腔修复机器人（见图 2-18）。

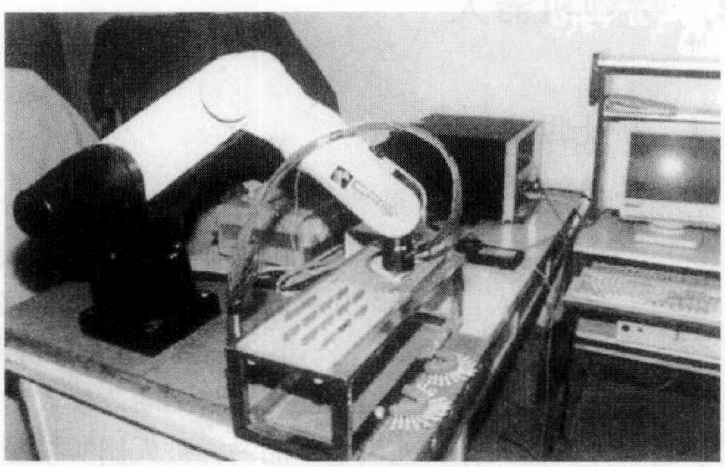


图 2-18 口腔修复机器人

这是一个由计算机和机器人辅助设计、制作全口义齿人工牙列的应用实验系统。该系统利用图像、图形技术来获取生成无牙颌患者口腔软硬组织的计算机模型，利用自行研制的非接触式三维激光扫描测量系统来获取患者无牙颌骨形态的几何参数，采用专家系统软件完成全口义齿人工牙列的计算机辅助设计。另外，该系统还包括单颗塑料人工牙与最终要完成的人工牙列之间的过渡转换装置——可调节排牙器。

基于机器人可以实现排牙的任意位置和姿态控制。利用口腔修复机器人，相当于快速培养和造就了一批高级口腔修复医疗专家和技术员。利用机器人来代替手工排牙，不但比口腔医疗专家更精确地以数字的方式操作，同时还能避免专家因疲劳、情绪、疏忽等原因造成的失误。这将使全口义齿的设计与制作既能满足无牙颌患者个体生理功能及美观需求，又能达到规范化、标准化、自动化、工业化的水平，从而大大提高了制作效率和质量。

### 2.2.3 进入血管的机器人

在美国洛杉矶市举行的一次新闻发布会上，与会者在投影屏幕上看到了这样一组镜头：2005 年的某一天，一个由直径只有 30μm 的齿轮装配成的小小机器人被植入血管里。这个小小机器人像潜水艇一样，在血液的河流中自由自在地游动着。一旦遇到血管中淤积或飘浮的胆固醇、脂肪，它们就毫不留情地扑上去，迅速将其撕烂嚼碎。同凶恶的病毒相遇时，它

们也毫不畏惧，挺身而出。可是，病毒是很狡猾的，它们眼看对方来势凶猛，往往会装出一副缩头缩尾的可怜相，好像已经投降；或者干脆一下子躺下，一动不动，似乎已经成了一具僵尸。机器人善良大度，它们大踏步地从这些已经放下武器的敌人身边走过。但是，受到优待的病毒并没有就此罢休，等机器人擦肩而过后，它们一跃而起，开始从背后恶狠狠地攻击机器人，机器人不断倒下。

不要着急，这些机器人体内有纠错程序，它们中的许多机器人在吃了一次亏之后，只要不是光荣牺牲，它们便能自动调整行为方式。于是，机器人不再老实可欺，它们见到病毒后，不管它们如何伪装，非要杀它个片甲不留。

病毒也随机应变，当它们同机器人相遇时，便拼命膨胀躯体，虚张声势，竭力装出一副凶神恶煞的模样。可是，大脑内藏有“超级勇敢”程序的机器人，英勇善战，视死如归，决心以自己的生命来捍卫人类的健康，于是机器人同病毒进行了激烈的大搏杀。病毒被不断歼灭，病毒的碎块不断渗透出血管，流入肾脏，通过尿液排出体外。于是动脉畅通无阻，人体更加健康。

上述有关超微技术的剧情，是根据科学家的设想编造出来的，但这并不是无法实现的梦想，随着微机电技术的发展，幻想正一步步变成现实。

1988 年，美国加利福尼亚大学的两位华裔科学家研制出了只有 76μm 的微电动机。

1991 年 11 月，日本电子公司的科研人员在当时最先进的“电子隧道扫描显微镜”下，用“超微针尖”将硅原子排成金字塔形的“凹棱锥体”，它只有 36 个原子那样高。这是人类首次用手工排列原子，在世界原子物理界引起轰动。

1996 年 7 月，美国哈佛大学研制成功了直径只有 7μm 的涡轮机。一张邮票上可以放置几千个这种涡轮机，只有在超高倍显微镜下才能看清楚它的外形和结构。

2010 年，美国哥伦比亚大学科学家成功研制出一种由 DNA 分子构成的“纳米蜘蛛”微型机器人(见图 2-19)，它们能够跟随 DNA 的运行轨迹自由地行走、移动、转向以及停止，并且能够自由地在二维物体的表面行走。

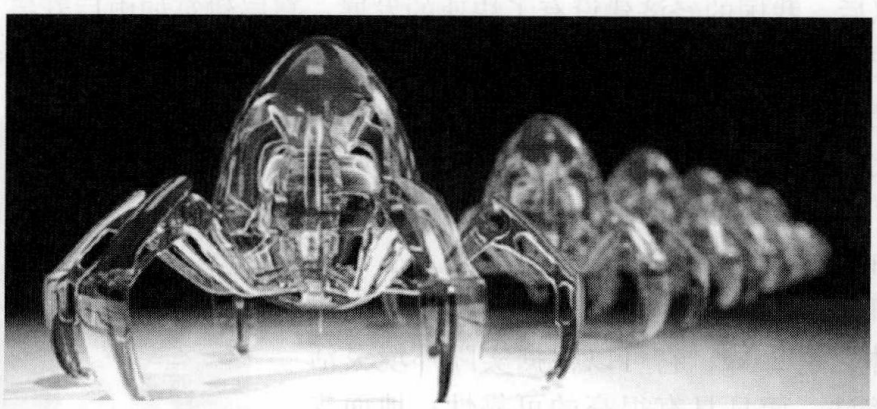


图 2-19　在二维物体表面行走的“纳米蜘蛛”微型机器人

据悉，这种“纳米蜘蛛”机器人的大小仅有 4nm，比人类头发直径的十万分之一还小。该“纳米蜘蛛”机器人的发明是对几年前“蜘蛛分子”机器人的改进与升级，其功能更加强大，不仅能够自由地在二维物体的表面行走，而且还能吞食面包碎屑。虽然以前研制出的 DNA 分子机器人也具有行走功能，但不会超过 3 步，而“纳米蜘蛛”机器人却能行走 100nm 的距离，相当于行走 50 步。

“纳米”机器人可以用于医疗事业，以帮助人类识别并杀死癌细胞，达到治疗癌症的目的；还可以帮助人们完成外科手术，清理动脉血管垃圾等。现在，科学家们已经研发出这种机器人的生产线。

现在，超微技术与人们生活的关系还不密切，这主要是因为它们还不实用。对此，美国斯坦福大学的现代超微物理学专家本杰明·金博士做了这样的描述：“未来，人们将研制出高度智能化的人造跳蚤、蜘蛛等动物。它们集超微型计算机、驱动器、传动装置、传感器、电源等于一体，成为人类十分独特而且非常得力的助手。它们将广泛应用于医疗、农业、工业、航天、军事等各个领域。除了人们津津乐道的注入血管清除毒物的功能外，在外科手术上还可用微电动机来缝合神经、微血管、眼球等；还可用它来深入人体内脏，如肾脏、心脏等做检查；将成千上万个‘跳蚤’机器人搬入农田，消灭害虫，使农业丰收，又防止了因使用农药造成的环境污染。”这位教授最后说：“与目前许多处于试验阶段的高新尖端技术一样，超微技术产品的潜在价值和用途一时还很难设想。但是可以相信，在将来的某一天，这种巧夺天工的产品会悄悄进入我们的家庭，起到种种奇妙无比的作用。”

### 2.2.4 高楼擦窗和壁面清洗机器人

随着城市的现代化，一座座高楼拔地而起。为了美观，也为了得到更好的采光效果，很多写字楼和宾馆都采用了玻璃幕墙，这就带来了玻璃窗的清洗问题。其实不仅是玻璃窗，其他材料的壁面也需要定期清洗。

长期以来，高楼大厦的外墙壁清洗都是“一桶水、一根绳、一块板”的作业方式，不仅效率低，而且易出事故。近年来，随着科学技术的发展，这种状况已有所改善。目前，国内外使用的主要方法有两种：一种是靠升降平台或吊篮搭载清洁工进行玻璃窗和壁面的清洗；另一种是用安装在楼顶的轨道及索吊系统将擦窗机对准窗户自动擦洗。采用第二种方式，要求在建筑物设计之初就将擦窗系统考虑进去，而且它无法适应阶梯状造型的壁面，这就限制了其使用。

改革开放以后，我国的经济建设有了快速的发展，高层建筑如雨后春笋，比比皆是。但由于建筑设计配套尚不规范，国内绝大多数高层建筑的清洗都采用吊篮人工完成。基于这种情况，北京航空航天大学机器人研究所发挥其技术优势，与铁道部北京铁路局科研所合作开发了一台玻璃顶棚(约3000m$^2$)清洗机器人(见图2-20)。

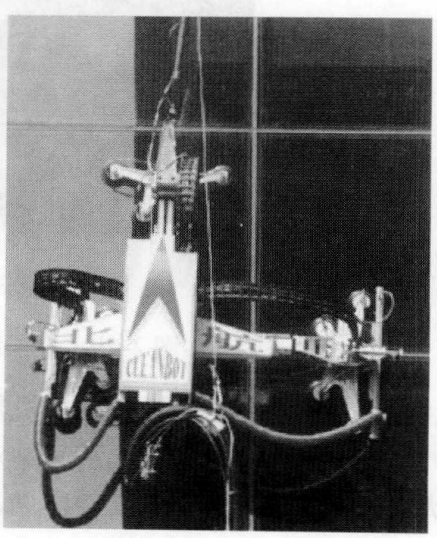


图2-20 清洗机器人

该机器人由机器人本体和地面支援机器人小车两大部分组成。机器人本体是沿着玻璃壁面爬行并完成擦洗动作的主体，重25kg，它可以根据实际环境灵活自如地行走和擦洗，而且具有很高的可靠性；地面支援机器人小车属于配套设备，在机器人工作时，负责为机器人供电、供气、供水及回收污水，它与机器人之间通过管路连接。

大楼清洗机器人是以爬壁机器人为基础开发出来的，它只是爬壁机器人的用途之一。爬壁机器人有负压吸附和磁吸附两种吸附方式，大楼擦窗机器人采用的是负压

吸附方式。磁吸附爬壁机器人(见图 2-21)也已在我国问世，并在大庆油田得到了应用。

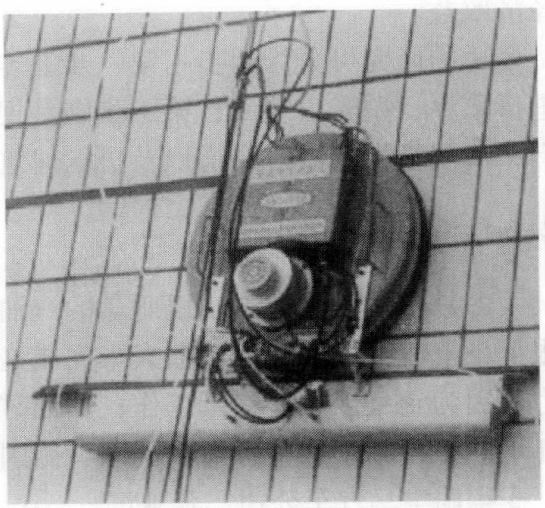


图 2-21　磁吸附爬壁机器人

## 2.2.5　清洗巨人

尽管世界各航空公司的竞争非常激烈，它们不断装备最新的客运飞机，但飞机的清洗工作还是由人拿着长把刷子，千方百计地擦去飞机上的尘土和污物，这是一项费时又费力的工作。为了在竞争中立于不败之地，德国汉莎航空公司委托普茨迈斯特公司等经过近 5 年的开发，研制成了“清洗巨人”(SKYWASH)(见图 2-22)。目前，“清洗巨人”已在德国法兰克福机场上岗工作。

“清洗巨人”是用来清洗飞机的，它的机械臂向上可伸 33m 高，向外可伸 27m 远。它可以清洗任何类型的飞机，有时甚至可以越过一架停着的飞机去清洗另一架飞机。

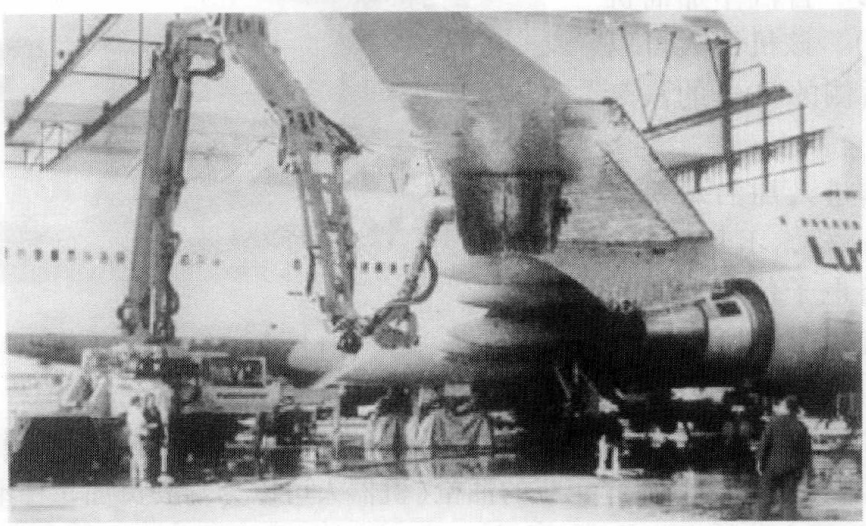


图 2-22　清洗巨人

“清洗巨人”利用两套计算机和一个机器人控制器来控制飞机的清洗。利用计算机对航空公司整个机队的飞机外形进行编程，清洗时先将飞机的机型数据输入计算机；工作时两台机器人位于飞机的两侧，在机翼与飞机头部(或尾部)的中间，利用装在旋转结构上的专用激光摄像机确定精确的工作位置。传感器得到飞机的三维轮廓，并将此信息送往计算机进行处理，计算机将机器人当前的位置与所存储的飞机数据模型进行比较，再由当前的位置计算出机器人的坐标。

机器人概略定位后，利用液压马达将支撑脚放出，使机器人站稳脚跟，然后进行精确定位，经操作人员同意，机器人开始清洗。

使用“清洗巨人”不仅减轻了工人的劳动强度，而且大大提高了工作效率。例如人工清洗一架波音 747 飞机需要 95 个工时，飞机在地面需停留 9h；而机器人清洗仅需 12 个工时，飞机在地面停留 3h。这样就大大缩短了飞机的地面停留时间，增加了飞行时间，提高

了经济效益。

今后的研究可分为两步：第一步是全面开发“清洗巨人”在飞机方面的应用，如对飞机进行除漆、抛光、喷漆；第二步则是把它作为工作平台使用，用它来清洗造船厂的窗户、大门，清洗过街天桥、隧道以及机场建筑物。

### 2.2.6 汽车加油机器人

大多数驾驶员对加油站里刺鼻的汽油味都感到头疼，而且加油时一不小心就会在手上和衣服上染上汽油，用加油机器人来完成这项工作也许是更好的选择。用加油机器人可以节省人力，因为它可以24h连续工作；加油时不会出现过满外溢现象；可以减少空气污染，保护了环境。正是基于这些考虑，美国、德国、法国等都研制出了自己的加油机器人。

受德国宝马汽车公司、奔驰汽车公司及阿拉尔石油公司的委托，德国莱斯机器人公司和弗劳恩霍夫生产技术与自动化研究所合作，耗资1500万马克，历时3年多，研制出了世界上第一台汽车加油机器人(见图2-23)。该机器人可以对油箱盖在右后侧的80%的汽车加油。

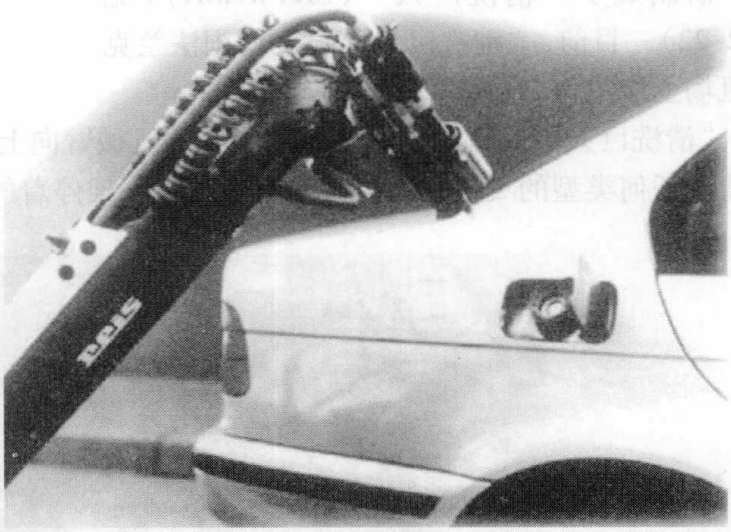


图2-23 汽车加油机器人

驾驶员开车进入加油站就像是进入冲洗间一样，不用下车，只需打开车窗将电子信用卡插入电子收款机，选择自己所需的油号和油量即可。汽车驶入停车处靠近加油岛，汽车前轮触发一个概略定位器，给出汽车的概略位置。车底装的信号发生器芯片控制着加油机器人臂，使其抓起相应的油枪(机器人可以为驾驶员加5种不同的油)。在顶盖自动打开后，机器人臂伸出，并移向汽车，通过汽车油箱盖上的一个反射标记，光学传感器对机器人臂进行精确定位。机器人臂上装有一台微型摄像机，它找到油箱盖，利用一个吸气装置将其打开，然后机器人手爪拧开加油口密封盖，插入加油软管。加完油后，机器人盖上密封盖及油箱盖。与此同时，计算机已为用户结完账。两三分钟后，下一位用户又可加油了。

### 2.2.7 康复机器人

康复机器人是工业机器人和医用机器人的结合。20世纪80年代是康复机器人研究的起步阶段，美国、英国和加拿大在康复机器人方面的研究处于世界领先地位。目前，康复机器人的研究主要集中在康复机械手、医院机器人系统、智能轮椅、假肢和康复治疗机器人等几个方面。

Handy1康复机器人是目前世界上最成功的一种低价的康复机器人系统，现在有100多名严重残疾的人经常在使用它。目前正在生产的康复机器人能完成3种功能，是由3种可以拆卸的滑动托盘来分别实现的，它们是吃饭/喝水托盘、洗脸/刮脸/刷牙托盘以及化妆托盘，

它们可以根据用户的不同要求提供。由于不同的用户要求不同，他们可能会要求增加或者去掉某种托盘，以适应他们身体残疾的情况，因而灵活地生产可更换的托盘是很重要的。

部件多了系统就复杂，因此给这种机器人研制了一种新的控制器，它是以 PC104 技术为基础的。为了将来便于改进，设计了一种新颖的输入/输出板，它可以插入 PC104 控制器。它具有以下功能：话音识别、语音合成、传感器的输入、手柄控制以及步进电动机的输入等。

可更换的组件式托盘装在 Handy1 机器人的滑车上，通过一个 16 脚的插座，从内部连接到机器人的底座中。目前，该系统可以识别 15 种不同的托盘，通过机器人关节中电位计的反馈，起动后它可以自动进行比较。

Handy1 机器人具有通话的能力，它可以在操作过程中为护理人员及用户提供有用的信息，所提供的信息可以是简单的操作指令及有益的指示，并可以用任何一种欧洲语言讲出来。这种装置可以大大提高 Handy1 机器人的能力，而且有助于突破语言的障碍。

以进食为例，在 Handy1 机器人的托盘部分装有一个光扫描系统，它使用户能够从餐盘的任何部分选择食物。简而言之，一旦系统通电，餐盘中的事物就被分配到若干格中，共有 7 束光线在餐盘的后面从左向右扫描。用户只用等到光线扫到他想吃食物的那一格的后面时，就可以按下单一的开关，起动 Handy1 机器人。机器人前进到餐盘中所选中的部分，盛出一满勺食物送到用户的嘴里。用户可以按照自己希望的速度盛取食物，这一过程可以重复进行，直到盘子空了为止。机器人上的计算机始终跟踪盘子中被选中食物的地方，并自动控制扫描系统越过空了的地方。利用托盘上的第 8 束光线，用户在吃饭时可以够得到任何地方的饮料。

Handy1 机器人的简单性以及多功能性提高了它对所有残疾人群体以及护理人员的吸引力。该系统为有特殊需求的人们提供了较大的自主性，使他们增加了融入“正常”环境中的机会。

### 2.2.8　微创外科手术机器人

2010 年国内首台微创外科手术机器人“妙手 A”系统在天津大学通过了天津市科委主持的成果鉴定(见图 2-24)。这是国内首次研制成功的具有自主知识产权的微创外科手术机器人，打破了国外同类产品的技术垄断。该技术成果填补了国内空白，在国际上处于领先水平。

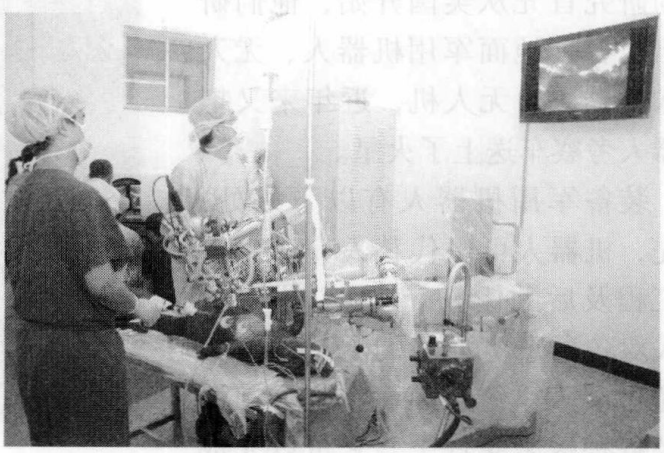


图 2-24　国内首台微创外科手术机器人“妙手 A”系统

与常规开口手术相比，微创手术在治疗效果、减轻痛苦、恢复周期、医疗成本等方面具有明显优势。机器人技术应用于微创手术，可拓展微创手术医生的操作能力，改善医生的工作模式，规范手术操作，提高手术质量，对微创手术发展具有重要意义。

国外已经研发出“达·芬奇”机器人手术系统(见图 2-25)，并逐渐成为微创外科的发展趋势。自 2000 年该系统通过美国 FDA 认证后，在普通外科、心脏外科、泌尿外科、妇产

科等领域开展了机器人手术。截至2010年3月，全球已销售该系统1482台。2006年，中国人民解放军总医院心脏外科首次引进“达·芬奇”机器人手术系统。目前，国内已有多家医院引进该系统，并进行了成功的临床应用。

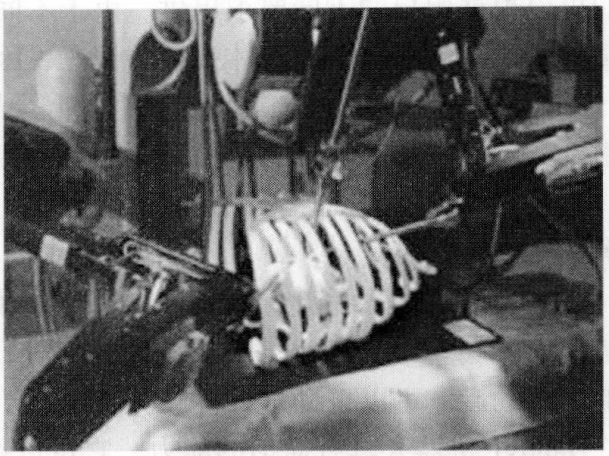


图2-25 “达·芬奇”机器人手术系统

“妙手A”系统面向腹腔微创手术，拥有多项技术创新和发明，如首次设计完成4自由度小型手术工具，可适应微创手术需求，并可完成复杂的缝合打结操作；采用多自由度丝传动技术，实现主、从操作手本体轻量化设计；基于异构空间映射模型，实现主从遥操作控制；设计机器人系统与人体软组织变形仿真环境，实现主从操作虚拟力反馈与手术规划；采用双路平面正交偏振影像分光法，研制成功微创外科手术机器人三维立体视觉系统。

## 2.3 军用机器人

历史上，高新技术大多首先出现在战场上，机器人也不例外。早在第二次世界大战期间，德国就研制并使用了扫雷及反坦克用的遥控爆破车，美国则研制出了遥控飞行器，这些都是最早的机器人武器。随着计算机技术、大规模集成电路、人工智能、传感器技术以及工业机器人的飞速发展，军用机器人的研制也备受重视。现代军用机器人的研究首先从美国开始，他们研制出了各种地面军用机器人、无人潜水机器人、无人机，近年来又把机器人考察车送上了火星。

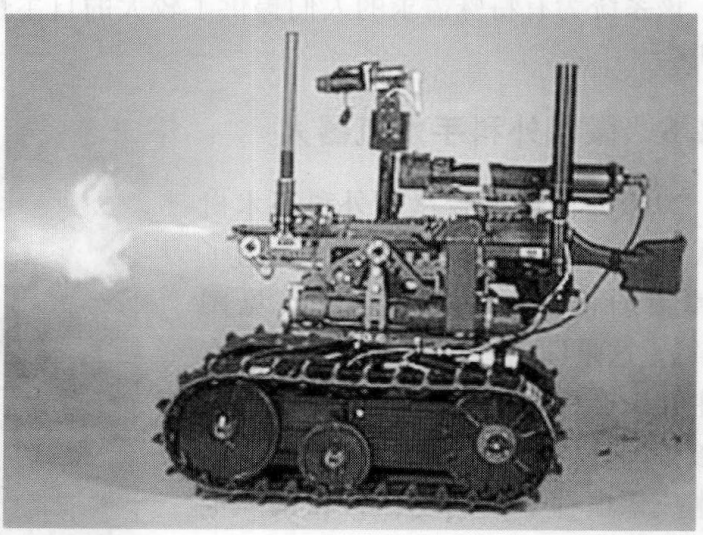


图2-26 美国“剑”式战斗机器人

装备军用机器人有以下好处：首先，机器人可以代替人完成繁重的工程及后勤任务；其次，由于机器人对各种恶劣环境的承受能力大大超过载人系统，因而在空间、海底及各种极限条件下，它可以完成许多载人系统无法完成的工作。

如图2-26所示为美国“剑”式战斗机器人。新一代的军用机器人已经趋向多功能化。

### 2.3.1 机器警察

所谓地面军用机器人是指在地面上使用的机器人系统，它们不仅在和平时期可以帮助民警排除炸弹、完成要地保安任务，而且在战时还可以代替士兵执行扫雷、侦察和攻击等各种

任务。目前，美、英、德、法、日等国均已研制出多种型号的地面军用机器人，如英国研制成功履带式“手推车”排爆机器人(见图2-27)、“土拨鼠”及“野牛”两种遥控电动排爆机器人等。“土拨鼠”机器人重35kg，在桅杆上装有两台摄像机；“野牛”机器人重210kg，可携带100kg负载。两者均采用无线电控制系统，遥控距离约1km。

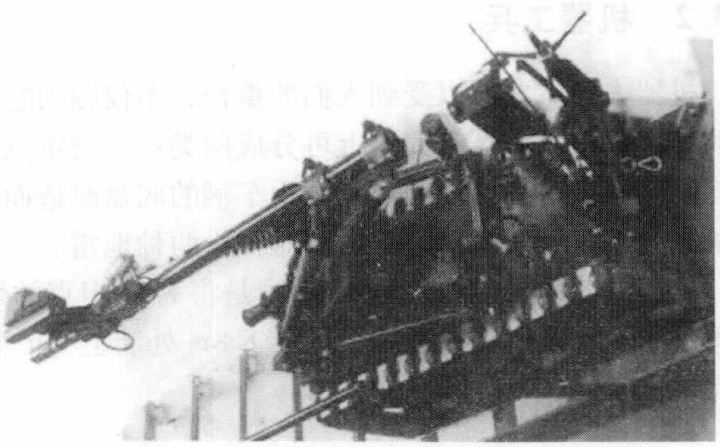


图2-27　英国的“手推车”排爆机器人

排除爆炸物机器人有轮式的及履带式的，一般体积不大，转向灵活，便于在狭窄的地方工作，操作人员可以在几百米到几千米以外通过无线电或光缆控制其活动。机器人车上一般装有多台彩色CCD摄像机，用来对爆炸物进行观察；一个多自由度机械手，用它的手爪或夹钳可将爆炸物的引信或雷管拧下来，并把爆炸物运走；车上还装有猎枪，利用激光指示器瞄准后，可把爆炸物的定时装置及引爆装置击毁；有的机器人还装有高压水枪，可以切割爆炸物。

德国Telerob公司的MV4排爆机器人如图2-28所示。我国沈阳自动化研究所研制的PXJ-2排爆机器人如图2-29所示。

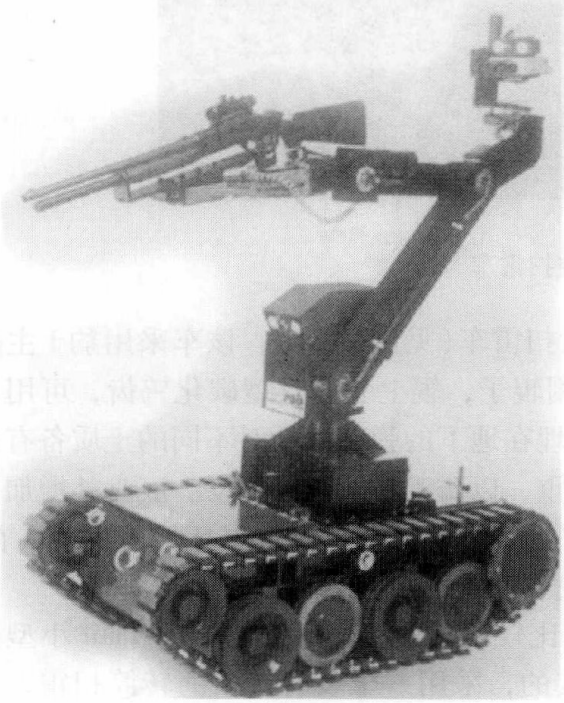


图2-28　MV4排爆机器人

图2-29　PXJ-2排爆机器人

排爆机器人不仅可以排除炸弹，还可利用它的侦察传感器监视犯罪分子的活动。如美国RST公司研制的STV机器人，它是一辆6轮遥控车，采用无线电及光缆通信。车上有一个可升高到4.5m的支架，上面装有彩色立体摄像机、昼用瞄准具、微光夜视瞄具、双耳音频

探测器、化学探测器、卫星定位系统、目标跟踪用的前视红外传感器等。该车仅需一名操作人员，遥控距离达10km。

### 2.3.2 机器工兵

机器人扫雷之所以受到人们的重视，不仅因为它扫雷速度快，更重要的是它可以避免人员的伤亡。扫雷机器人大体上可分成两类：一类重点探测及扫除反坦克地雷，另一类探测及扫除杀伤地雷。前者多用现有军用车辆的底盘改造而成，体积较大；后者多为新研制的小型车辆。当然，有的机器人也可同时扫除两种地雷。

美国的遥控扫雷车(见图2-30)是将M60坦克的炮塔去掉，在底盘上加上一个Omnitech公司研制的标准机器人系统，车前1.8m处装上10t重的扫雷钢辊制成的，主要用来清扫反坦克地雷。

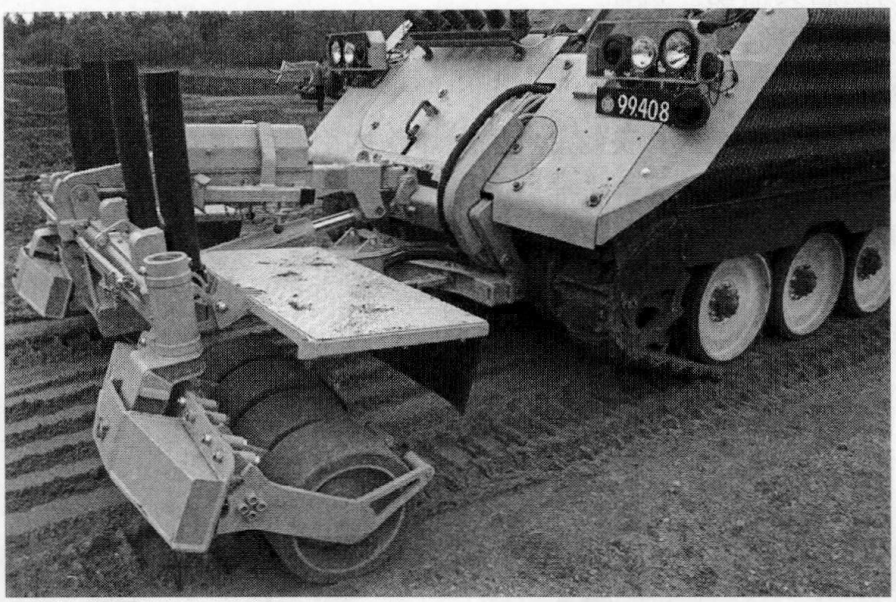



图2-30 遥控扫雷车

德国FFG车辆制造公司研制出了一款机器人扫雷车(见图2-31)，该车采用豹I主战坦克的底盘，车前装有3.6m宽、液压驱动的犁地用辊子，辊上装有重型碳化钨齿，可用来清除地表的植被、割断地雷的引爆索、挖出及摧毁埋在地下的弹药。针对不同的土质备有各种辊子，更换损坏的齿只需要几分钟。车底带有配重，以防工作时车辆摆动。底盘外增加了钢板及衬垫材料，使它可以经受住大多数类型地雷的爆炸而不会有严重损坏。该机器人在6h内的扫雷面积相当于30个有经验的工兵同期内扫雷面积的15~20倍。

一般地，专门扫除杀伤地雷的机器人体积都比较小，如美国研制的Mini-Flail小型遥控扫雷机器人。它是在Bobcat推土机的基础上改装的，采用一个装有链条的转筒扫雷，链条炸坏后很容易更换。又如一种名叫“地雷猎手/杀手”(Mine Hunter/Killer)的机器人，它是将探雷及扫雷装置集成到同一辆标准的战术车辆上。该车可在道路及开阔地上探测750多种地雷，可在60m的距离上探测直径为12~38cm的地雷。该车只需几秒钟就可确定地雷的位置，定位精度为25cm。一旦探测到地雷，30s内就可销毁它，扫雷成功率为90%，扫雷宽度为2.74m。这种机器人可在沙地、碎石地、粘土及有机土等各种地面上作业。

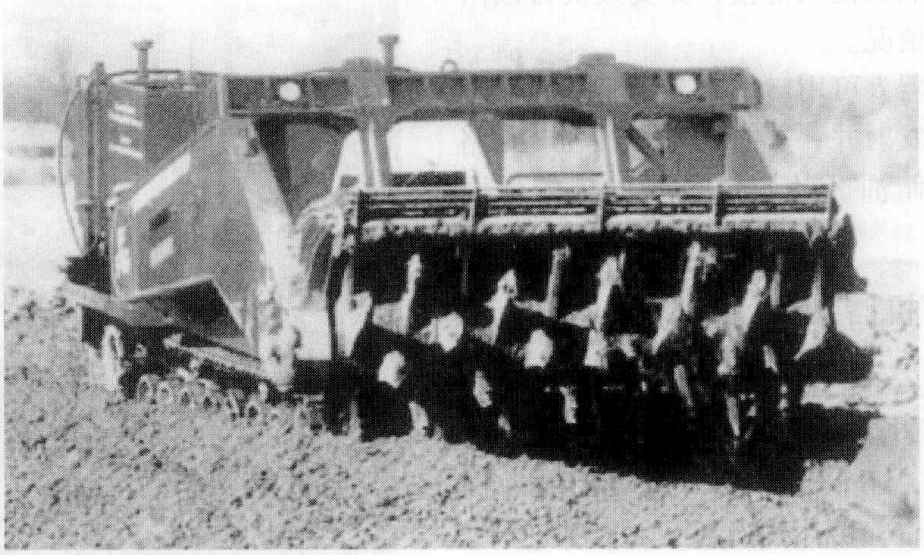


图 2-31　德国机器人扫雷车

机器人扫雷的主要困难在探雷，首先要找到地雷在哪里。现在已采用的或正在研制中的探雷技术主要有金属探测器、地面穿透雷达及红外传感器等。用这些方法探雷，往往虚警率过高，探测率很低。目前还没有哪一种单个传感器可以满足探雷的要求，于是人们就把多种传感器结合起来，以求得到更好的效果。由于探雷所需的数据来自不同的传感器，要做到准确判断，就需要复杂的传感器融合技术，而传感器融合所需要的计算量特别大。

目前，机器人探雷、扫雷的应用才刚刚开始，由于用机器人探雷及扫雷的速度快，特别是可以避免人员伤亡这一最大的优点，因此其发展前景广阔。

### 2.3.3　机器保安

在美国新泽西州的一家医药公司里，一台小车式的机器人正在公司大楼狭窄的过道中巡逻，只要发现有烟雾或距其 30m 以内有行人，它就会向指挥中心的值班人员发出警报。这是一台 SR2 室内保安机器人，是由 Cybermotion 公司研制的。

保安机器人一般可分成室内型及室外型两种，SR2 机器人属于室内型机器人，它的改进型称为 MDARS-I 机器人。MDARS-I 机器人的最低速度为 3km/h，一次充电可连续工作 8h，它可在 360°范围内发现 10m 远的物体。机器人装有探测用的微波雷达、热成像仪、音响传感器、一台 CCD 摄像机、红外照明器和旋转及倾斜平台，还有超声波传感器及导航传感器等。另外，还有一个无线局域网络转接器，方便了机器人与控制站的通信。下班后，机器人在仓库内巡逻，可发现烟、火等。此外，它还可确定所存物品的状况及位置，发现问题及时警报。

美国机器人系统技术公司研制的一种 MDARS-E 室外型机器人(见图 2-32)，可识别并绕过障碍物，若绕不过去，就停下来，并通知控制站操作人员。它的负载主要有立体摄像机、前视红外摄像机、多普勒雷达、4 线激光扫描仪、超声波传感器、微波及光缆通信网络和视频标签阅读器。导航传感器有差分 GPS 系统、陀螺仪、倾斜仪、4 轮编码器及驾驶定位传感器。

MDARS-E 机器人在值班时可自主进行监视，发现异常情况时，视频链路自动启动，控

制站记录下音响及视频警报，保安人员可以由远处观察现场情况。

室外型机器人可用于军事基地、核武器设施、洲际导弹发射井、军需仓库、机场、铁路枢纽、港口、储油区及其他重要设施的保卫工作。

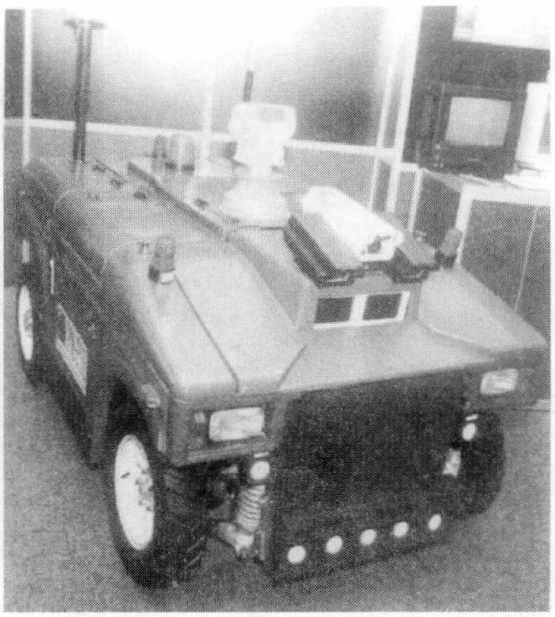


图 2-32 MDARS-E 室外型机器人

### 2.3.4 水下机器人

水下机器人又称为无人潜水器，分为遥控、半自治及自治型。水下机器人是典型的军民两用技术，不仅可用于海上资源的勘探和开发，而且在海战中也有不可替代的作用。现在，各国开发了各种用途的水下机器人，包括探雷机器人、扫雷机器人、侦察机器人等。

正像在地面上一样，海上扫雷也是一项既困难又危险的工作。要扫雷就要先发现水雷，现在主要依靠扫雷舰上的声呐，但是它的效果并不理想，而要发现沉底雷及埋在泥沙中的水雷就更加困难。

为了避免人员的伤亡，一些发达国家都依靠遥控潜水器(ROV)扫雷。目前，扫雷用遥控潜水器的潜水深度一般能达到500m左右。

美国ECA公司研制的PAP-104遥控潜水器有5代产品，它既可扫除锚雷，也可扫除沉底雷。

瑞典博福斯公司研制的“双鹰”遥控潜水器载重80kg，速度5节，可在500m深处作业。它装有360°全姿态控制系统，可在6个自由度上运动，稳定性很好。

德国STN Atlas电子公司研制出“企鹅”B3型遥控潜水器，安装有两台变速推进发动机和一台垂直发动机，速度6节，载重225kg，光缆长1000m。它装备在MJ 332扫雷舰上，在流速3节、深度200m时，其行驶距离为500m；流速较小时，行驶距离达900m。该公司正进一步改进它，使其潜水深度达到300m。

为了对付岸边的水雷，美国罗克威尔公司及IS机器人公司研制了一种名叫“水下自主行走装置(ALUV)”的机器蟹(见图2-33)。这种机器蟹可以隐藏在海浪下面，在水中行走，迅速通过岸边的浪区。当风浪太大时，它可以将脚埋入泥沙中，通过振动，甚至可将整个身子都隐藏在泥沙中。

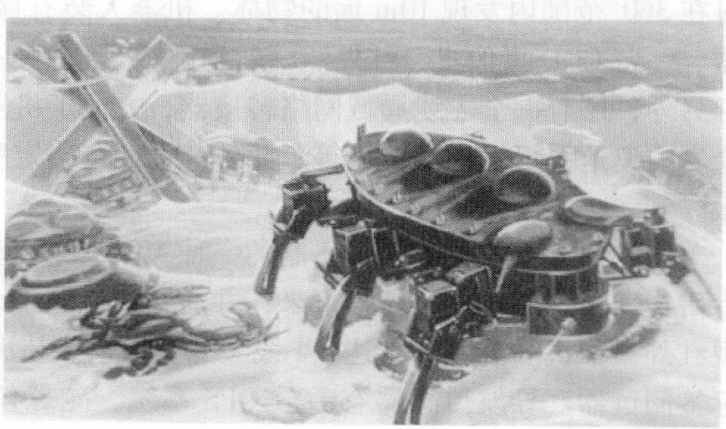


图 2-33 水下扫雷机器蟹

机器蟹长约56cm，重10.4kg，包括一个3.17kg重的压载物。为

了携带传感器，它的脚比较大，便于发现目标。当它遇到水雷时，就把它抓住，然后等待近海登陆艇上控制中心的命令。一旦收到信号，这个小东西就会自己爆炸，同时引爆水雷。技术人员还打算使机器蟹之间可以进行通信联络，从而提高扫雷的效率。

美国马萨诸塞州蓝鳍金枪鱼机器人技术公司研发制造的“蓝鳍金枪鱼—21”自主式水下航行器被称为美国海军目前最先进的水下探测器（见图2-34），身长近4.9m，直径0.5m，重750kg，最大下潜深度为4500m，最长水下行动时间为25h。被投放至海底后，“蓝鳍金枪鱼—21”将发射声呐脉冲扫描海底，脉冲将向两个方向以弧形散开。“蓝鳍金枪鱼—21”会接收到在脉冲范围内物体的反射声波，利用“声波阴影”判断物体高度并形成图像。

图2-34　“蓝鳍金枪鱼—21”航行器

“蓝鳍金枪鱼—21”不需要拖着一条沉重的4500m的电力电缆下水，只会执行预定任务，不受操作者干扰，在以人类步行速度前行的时候无法实时发回声呐图像，需要在水下工作20h后上浮，让工作人员下载、分析数据，并更换航行器电池。

### 2.3.5　未来奇兵

一架手掌大小的微型无人机（见图2-35），能像鸟一样地飞行，具有昆虫的智商，可提供10km远目标的实时图像，这就是微型无人机（MAV）。这种无人机是20世纪90年代中期才出现的，采用了顶尖的高新技术，15cm翼展的无人机很快将具有3m翼展无人机所具有的性能。微型无人机对于未来的城市作战具有重大的军事价值，在民用领域也有着广泛的用途。

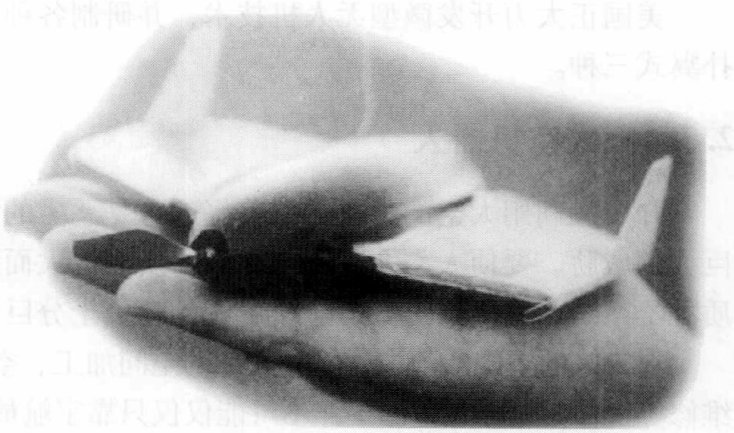


图2-35　微型无人机

所谓的微型无人机，是指翼展和长度小于15cm的无人机，也就是说，最大的大约只有飞行中的燕子那么大，小的就只有昆虫大小。微型飞行器从原理、设计到制造都不同于传统概念上的飞机，它是MEMS（微机电系统）技术集成的产物。

要想研制出如此小的无人机，面临着许多技术及工程问题。最大的困难是动力问题。在微型无人机的开发中，近期最大的困难是发动机系统及其相关的空气动力学问题，而发动机又是关键，它必须在极小的体积内产生足够的能量，并把它转变为推力，而又不增加过多的重量。由于尺寸小、速度低，微型无人机的工作环境更像是小鸟及较大昆虫的生活环境，而人们对于这种环境中的空气动力学还知之甚少，其中的许多问题都难以用普通空气动力学理论加以解释。由于微型无人机只能低速飞行，层流占主导地位，它引起较大的力及力矩，这可能要求用三维方法解释它的空气动力学。微型无人机的机翼载荷很小，几乎不存在惯性，

很容易受到不稳定气流如城市楼群中的阵风以及风雨的影响。

怎样控制微型无人机的飞行是另一个难点。首先要有一个飞行控制系统来稳定微型无人机，至少增加其自然的稳定性。这样在面临湍流或突发的阵风时，可以保持其航线，并可执行操作人员的机动命令。

为使微型无人机自主飞行，要采用重量轻、功率低的 GPS 接收机，低漂移量的微型陀螺仪和加速度计，也可以利用地理信息系统提供地形图导航。GPS 可以大大提高微型无人机的能力，但目前它在功率、天线尺寸、重量及处理能力等方面均存在不少问题，需要加以解决。另外，系统还要不受电磁波及无线电频率的干扰，要求通信电子元件的质量和功率效率极高。

一旦飞到空中，微型无人机需要保持它与操作人员之间的通信联系。由于体积、重量的限制，目前只能采用微波通信方式。尽管微波可以传输大量的数据，足够进行电视实况转播，但它却无法穿透墙壁，因而只能在视距内使用。微型无人机的尺寸限制了无线电的频率及通信距离。当微型无人机飞出视距或视线被挡住时，就需要一个空中的通信中继站，中继站可以是另一架飞机或者卫星。

要想在战场上实际应用，微型无人机还需要携带各种侦察传感器，如电视摄像机、音响及生化探测器等。这些都必须是超轻重量的微型传感器，因而部件小型化是传感器技术发展的关键。

美国正大力开发微型无人机技术，并研制各种微型无人机平台，有固定翼式、旋翼式及扑翼式三种。

### 2.3.6 太空机器人

开发和利用太空的前景无限美好，可是恶劣的空间环境给人类在太空的生存活动带来了巨大的威胁。要使人类在太空停留，需要有庞大而复杂的环境控制系统、生命保障系统、物质补给系统、救生系统等，这些系统的耗资十分巨大。

在未来的空间活动中，将有大量的空间加工、空间生产、空间装配、空间科学实验和空间维修等工作。这样大量的工作不可能仅仅只靠宇航员去完成，还必须充分利用空间机器人。

空间机器人主要从事的工作有：

（1）空间建筑与装配　一些大型的安装部件，例如无线电天线、太阳能电池、各个舱段的组装等舱外活动都离不开空间机器人，机器人将承担搬运、各构件之间的连接紧固、有毒或危险品的处理等任务。在不久的将来，人造空间站初期建造一半以上的工作都将由机器人完成。

（2）卫星和其他航天器的维护与修理　随着人类在太空活动的不断发展，人类在太空的“财产”也越来越多，其中人造卫星占了绝大多数。如果这些卫星一旦发生故障，丢弃它们后再发射新的卫星就很不经济，必须设法修理后使它们重新发挥作用。但是如果派宇航员去修理，又牵涉到舱外活动的问题，而且由于航天器在太空中是处于强烈宇宙辐射的环境之下，人根本无法执行任务，所以只能依靠机器人。空间机器人所进行的维护和修理工作有回收失灵卫星、对故障卫星进行就地修理、为空间飞行器补给物资等。

（3）空间生产和科学实验　宇宙空间为人类提供了地面上无法实现的微重力和高真空环境，利用这一环境可以生产出地面上无法或难以生产出的产品。在太空中，还可以进行地

面上不能做的科学实验。和空间装配、空间修理不同，空间生产和科学实验主要在舱内环境里进行，操作内容多半是重复性动作。在多数情况下，宇航员可以直接检查和控制。这时候的空间机器人如同工作在地面工厂里的生产线上一样。因此，可以采用的机器人多是通用型多功能机器人。

空间环境和地面环境差别很大，空间机器人工作在微重力、高真空、超低温、强辐射和照明差的环境中。因此，空间机器人与地面机器人的要求也必然不相同，有它自身的特点。首先，空间机器人的体积小，重量轻，抗干扰能力强；其次，空间机器人的智能程度比较高，功能比较全；最后，空间机器人消耗的能量要尽可能小，工作寿命要尽可能长，而且由于是工作在太空这一特殊的环境之下，对它的可靠性要求也比较高。

空间机器人在保证空间活动的安全性、提高生产效率和经济效益、扩大空间站的作用等方面都将发挥巨大的作用。

1. 月球车

到月球去定居可不是一件容易的事，首先要解决吃住的问题，没有水人类将无以生存，那么月球上的水够喝吗？自从美国航空航天局（NASA）宣布它的“月球探测者”（见图2-36）在月球上发现冰以后，人们对在月球上生活就产生了更浓厚的兴趣。

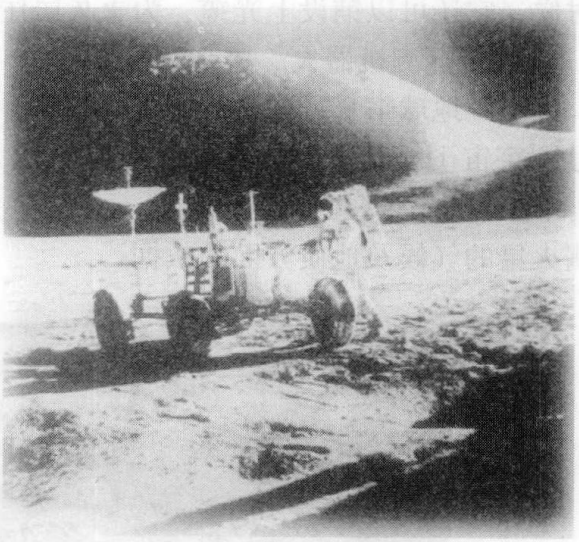


图2-36　“月球探测者”在月球

但是，在月球上开采水以前，必须解决灰尘问题。在每一次机器人执行任务时，都有一些细微灰尘污染仪器。这意味着机器人在月球上漫游将非常艰难，甚至是不可能的。赛戈维路想用一个称为“诺曼德探险者”的大型月球车（见图2-37）来取代传统的空间站，宇航员可以在车内工作。

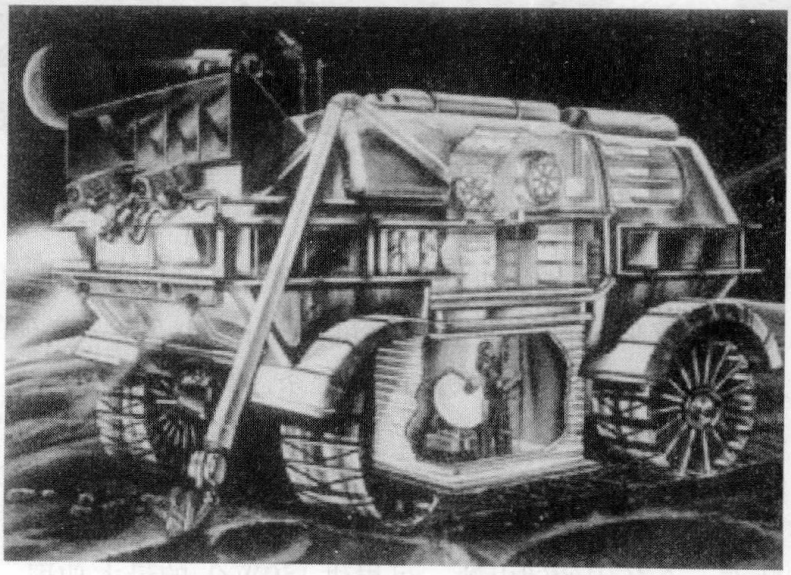


图2-37　“诺曼德探险者”月球车

“诺曼德探险者”月球车将由一个大推力火箭送到月球，并在水源丰富的地方着陆，例如靠近两极的地方。着陆后，它的机器人臂将它与一个辅助电源拖车连在一起。月球车和拖车拥有组合的燃料电池和太阳能充电系统，有足够的能源。它不仅可以行走数千千米，而且可以供6名宇航员在舒服的条件下工作生活。

“诺曼德探险者”月球车与传统的月球车的差别在于：在它的外面有一个活动罩。月球车停在着陆器边上，着陆器带着科学仪器和建筑材料包。每一个包都有一个垫子，机器人臂平整一个地方后将垫子打开，将仪器设备在垫子上放好。一切安顿好后，月球车也驶到垫子上，它的活动罩下降，与垫子形成一个临时的气密连接。当活动罩内充好空气后，乘员将仪器组装调试好。完成工作后，乘员返回月球车，并将活动罩与垫子分开，到下一个站点工作。

以后，这活动罩可以用来采集样品或维修仪器。当月球车从一个地方移动到另一个地方的时候，它还可以铺设上光缆，为永久居住提供通信装备。

2. 火星探测机器人

火星距地球1.92亿km，无线电信号由火星传到地球需要19.5min。美国发射的“探路者号”宇宙飞船经过7个月的飞行到达火星，且首次携带机器人车登上了火星，这就是“索杰纳”火星车(见图2-38)。“索杰纳”火星车的任务是对登陆器周围进行搜索，重点是探测火星的气候及地质方面的数据。

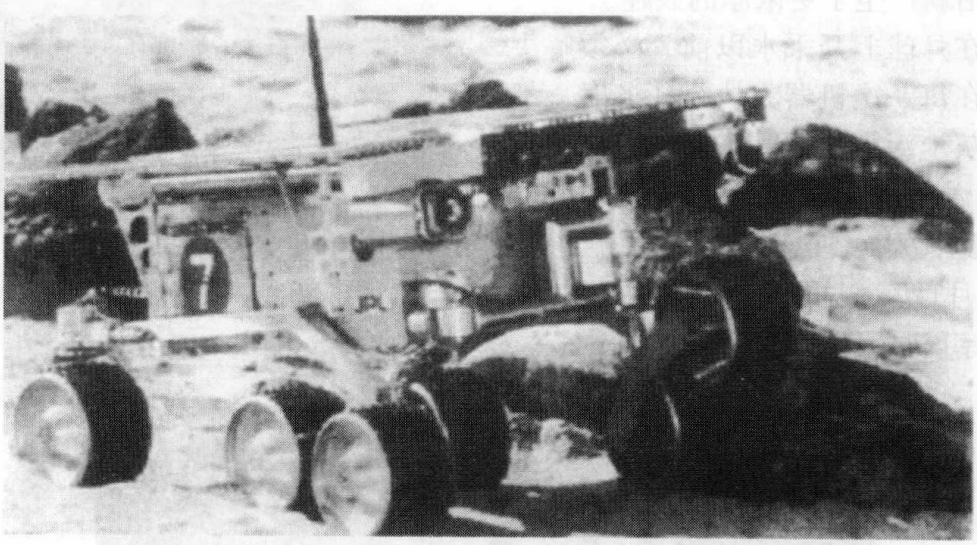


图2-38 “索杰纳”火星车

“索杰纳”火星车是一辆自主式的机器人车辆，同时又可从地面对它进行遥控。设计中的关键是它的重量，科学家们成功地使它的重量不超过11.5kg。该车的尺寸为630mm × 480mm，车轮直径为13cm，上面装有不锈钢防滑链条。机器人车有6个车轮，每个车轮均为独立悬架，其传动比为2000∶1，因而能在各种复杂的地形上行驶，特别是在软沙地上。车的前后均有独立的转向机构。正常驱动功率要求为10W时，最大速度为0.4m/s。

“索杰纳”火星车是由锗基片上的太阳能电池阵列供电的，可在16V电压下提供最大16W的功率。它还装有一个备用的锂电池，可提供150W/h的最大功率。当火星车无法由太阳能电池供电时，可由它获得能量。

“索杰纳”火星车的体积小、动作灵活，利用其条形激光器和摄像机，它可自主判断前进的道路上是否有障碍物，并作出行动决定。

“索杰纳”火星车携带的主要科学仪器为一台质子X射线分光计(APXS)，它可分析火星岩石及土壤中存在哪种元素，并提供其丰度。APXS探头装在一个机械装置上，可以从各种角度及高度上接触岩石及土壤的表面，便于选择取样位置。它所获得的数据将作为分析火星岩石成分的基础。

# 第3章　机器人机械结构

机器人机械结构的功能是实现机器人的运动机能，完成规定的各种操作，包含手臂、手腕、手爪和行走机构等部分。机器人的“身躯”一般是粗大的基座，或称机架。机器人的“手”则是多节杠杆机械——机械手，用于搬运物品、装卸材料、组装零件等；或握住不同的工具，完成不同的工作，如让机械手握住焊枪，可进行焊接；握住喷枪，可进行喷漆。使用机械手处理高温、有毒产品的时候，它比人手更能适应工作。机器人技术发展到智能化阶段，机械手也越来越灵巧了，它们已能完成握笔写字、弹奏乐器、抓起鸡蛋甚至穿针引线等精细复杂的工作。

驱动器相当于机器人的“肌肉”。根据机器人上使用的驱动器的不同，可分为三类：电动驱动器(电动机)、液压驱动器和气动驱动器。电动驱动器由电能产生动能，驱动机器人各关节动作。电动机器人能完成高速运动，具有传动机构少、成本低等优点，在现代工业生产中已基本普及；液压机器人具有精度高、反应速度快的优点；气动机器人由气动机构产生动力驱动关节运动。

传动机构用于把驱动器产生的动力传递到机器人的各个关节和动作部位，实现机器人的平稳运动。常见的传动机构有以下几种：齿轮传动、丝杠传动、传送带和链传动、流体传动和连杆传动等。

## 3.1　机器人末端执行器

用在工业上的机器人的手一般称为末端操作器，它是机器人直接用于抓取和握紧专用工具进行操作的部件。它具有模仿人手动作的功能，并安装于机器人手臂的前端。机械手能根据电脑发出的命令执行相应的动作，它不仅是一个执行命令的机构，还应该具有识别的功能，也就是“感觉”。为了使机器人手具有触觉，在手掌和手指上都装有带有弹性触点的元件；如果要感知冷暖，则还可以装上热敏元件。在各指节的连接轴上装有精巧的电位器，它能把手指的弯曲角度转换成“外形弯曲信息”。把外形弯曲信息和各指节产生的接触信息一起送入计算机，通过计算就能迅速判断机械手所抓的物体的形状和大小。

1966年，美国海军就是用装有钳形人工指的机器人“科沃”把因飞机失事掉入西班牙近海的一颗氢弹从750m深的海底捞上来。1967年，美国飞船“探测者三号”曾把一台遥控操作的机器人送上月球。它在地球上人的控制下，可以在$2m^2$左右的范围里挖掘月球表面0.4m深处的土壤样品，并且放在规定的位置；还能对样品进行初步分析，如确定土壤的硬度、重量等，从而为“阿波罗”载人飞船登月充当了开路先锋。

现在，机器人手已经具有了灵巧的指、腕、肘和肩胛关节，能灵活自如地伸缩摆动，手腕也会转动弯曲。通过手指上的传感器，还能感觉出抓握的东西的重量，可以说已经具备了人手的许多功能。由于被握工件的形状、尺寸、重量、材质及表面状态等的不同，因此工业机器人的末端操作器也是多种多样的，大致可分为以下几类：

1）夹钳式取料手。
2）吸附式取料手。
3）专用操作器及转换器。
4）仿生多指灵巧手。

### 3.1.1　夹钳式取料手

夹钳式取料手由手指(手爪)、驱动机构、传动机构及连接与支承元件组成，如图3-1所示。它通过手指的开、合实现对物体的夹持。

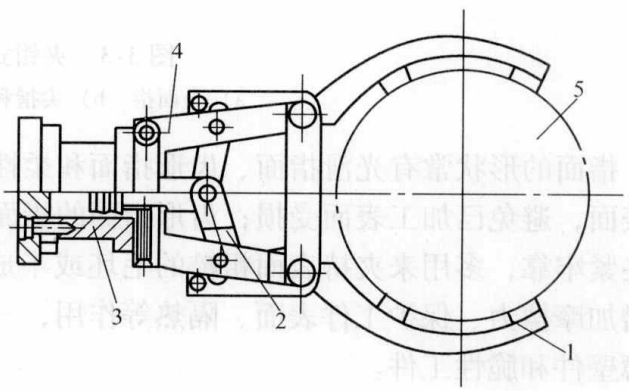



图3-1　夹钳式手部的组成
1—手指　2—传动机构　3—驱动装置
4—支架　5—工件

1. 手指

手指是直接与工件接触的部件。手部松开和夹紧工件，就是通过手指的张开与闭合来实现的。机器人的手部一般有两个手指，也有三个、四个或五个手指，其结构形式常取决于被夹持工件的形状和特性。

指端是手指上直接与工件接触的部位，其结构形状取决于工件形状。常用的手指有以下类型：

① V形指：如图3-2a所示，它适用于夹持圆柱形工件，特点是夹紧平稳可靠、夹持误差小；也可以用两个滚轮代替V形体的两个工作面，如图3-2b所示，它能快速夹持旋转中的圆柱体。图3-2c所示为可浮动的V形指，有自定位能力，与工件接触好，但浮动件是机构中的不稳定因素，在夹紧时和运动中受到的外力必须有固定支承来承受，应设计成可自锁的浮动件。

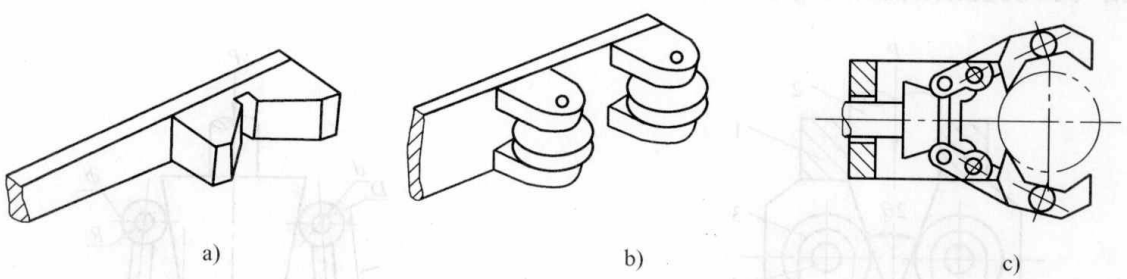



图3-2　V形指端形状
a）固定V形　b）滚柱V形　c）自定位式V形

② 平面指：如图3-3a所示，一般用于夹持方形工件(具有两个平行平面)、方形板或细小棒料。

③ 尖指和长指：如图3-3b所示，一般用于夹持小型或柔性工件；尖指用于夹持位于狭窄工作场地的细小工件，以避免和周围障碍物相碰；长指用于夹持炽热的工件，以避免热辐射对手部传动机构的影响。

④ 特形指：如图3-3c所示，用于夹持形状不规则的工件。应设计出与工件形状相适应的专用特形手指，才能夹持工件。

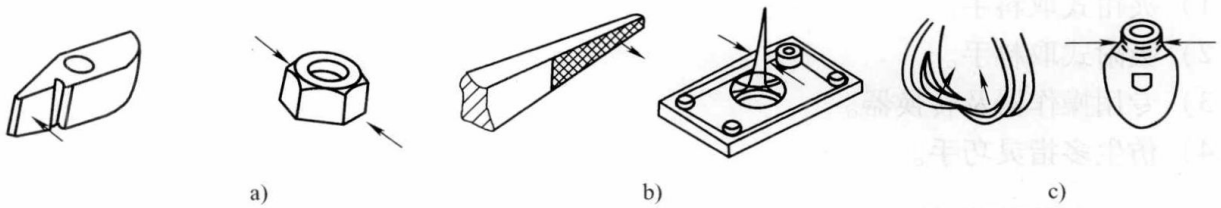



图 3-3 夹钳式手的指端

a）平面指 b）尖指和长指 c）特形指

指面的形状常有光滑指面、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；齿形指面的指面刻有齿纹，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。

2. 传动机构

传动机构是向手指传递运动和动力，以实现夹紧和松开动作的机构。该机构根据手指开合的动作特点，可分为回转型和平移型，回转型又分为单支点回转和多支点回转。根据手爪夹紧是摆动还是平动，回转型还可分为摆动回转型和平动回转型。

（1）回转型传动机构 夹钳式手部中用得较多的是回转型手部，其手指就是一对杠杆，一般再与斜楔、滑槽、连杆、齿轮、蜗轮蜗杆或螺杆等机构组成复合式杠杆传动机构，用以改变传动比和运动方向等。

图 3-4a 所示为单作用斜楔式回转型手部结构简图。斜楔向下运动，克服弹簧拉力，使杠杆手指装着滚子的一端向外撑开，从而夹紧工件；斜楔向上运动，则在弹簧拉力作用下使手指松开。手指与斜楔通过滚子接触，可以减少摩擦力，提高机械效率。有时为了简化，也可让手指与斜楔直接接触，如图 3-4b 所示。

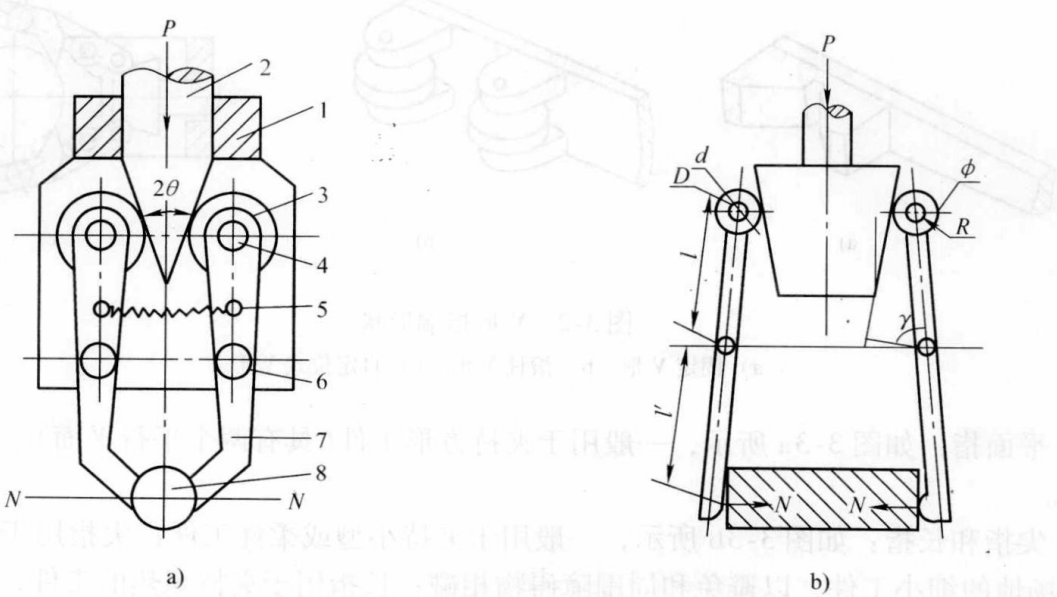



图 3-4 斜楔杠杆式手部

a）单作用斜楔式回转型手部 b）简化型斜楔式回转型手部

1—壳体 2—斜楔驱动杆 3—滚子 4—圆柱销 5—拉簧 6—铰销 7—手指 8—工件

图3-5所示为滑槽式杠杆回转型手部简图。杠杆形手指4的一端装有V形指5，另一端则开有长滑槽。驱动杆1上的圆柱销2套在滑槽内，当驱动连杆同圆柱销一起作往复运动时，即可拨动两个手指各绕其支点(铰销3)作相对回转运动，从而实现手指的夹紧与松开动作。

图3-6所示为双支点连杆式手部的简图。驱动杆2末端与连杆4由铰销3铰接，当驱动杆2作直线往复运动时，则通过连杆推动两杆手指各绕支点作回转运动，从而使得手指松开或闭合。

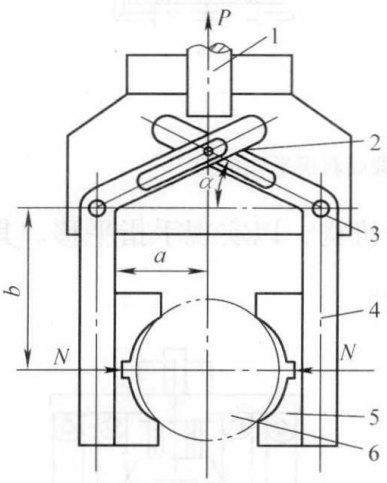



图3-5　滑槽式杠杆回转型手部
1—驱动杆　2—圆柱销　3—铰销
4—手指　5—V形指　6—工件

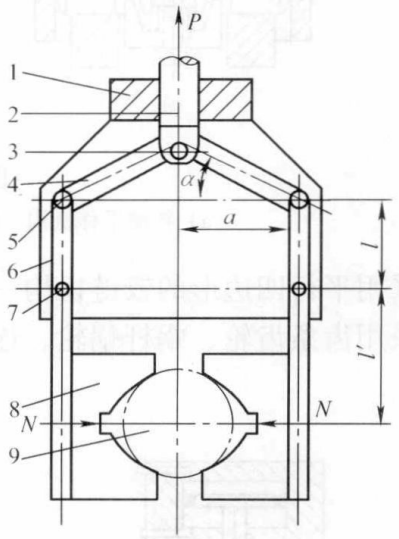



图3-6　双支点连杆式手部
1—壳体　2—驱动杆　3—铰销　4—连杆
5、7—圆柱销　6—手指　8—V形指　9—工件

图3-7所示为齿轮齿条直接传动的齿轮杠杆式手部的结构。驱动杆2末端制成双面齿条，与扇齿轮4相啮合，而扇齿轮4与手指5固连在一起，可绕支点回转。驱动力推动齿条作直线往复运动，即可带动扇齿轮回转，从而使手指松开或闭合。

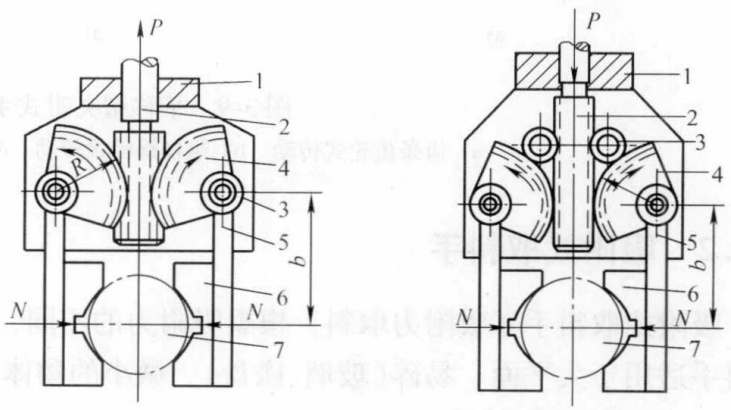



图3-7　齿轮齿条直接传动的齿轮杠杆式手部
a）齿条直接驱动扇齿轮结构　b）带有换向齿轮的驱动结构
1—壳体　2—驱动杆　3—中间齿轮　4—扇齿轮
5—手指　6—V形指　7—工件

(2) 平移型传动机构　平移型夹钳式手部是通过手指的指面作直线往复运动或平面移动来实现张开或闭合动作的，常用于夹持具有平行平面的工件。其结构较复杂，不如回转型手部应用广泛。

① 直线往复运动机构：实现直线往复运动的机构很多，常用的斜楔传动、齿条传动、螺旋传动等均可应用于手部结构。如图3-8a所示为斜楔平移机构，图3-8b为连杆杠杆平移机构，图3-8c为螺旋斜楔平移机构。它们既可是双指型的，也可是三指(或多指)型的；既可自动定心，也可非自动定心。

② 平面平行移动机构：如图3-9所示为几种平移型夹钳式手部的简图。它们的共同点

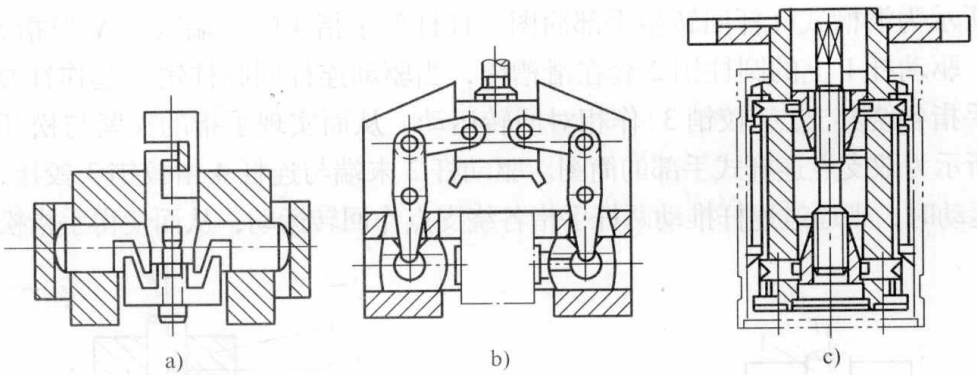



图 3-8 直线平移型手部

a）斜楔平移机构 b）连杆杠杆平移机构 c）螺旋斜楔平移机构

是：都采用平行四边形的铰链机构——双曲柄铰链四连杆机构，以实现手指平移。其差别在于分别采用齿条齿轮、蜗杆蜗轮、连杆斜滑槽的传动方法。

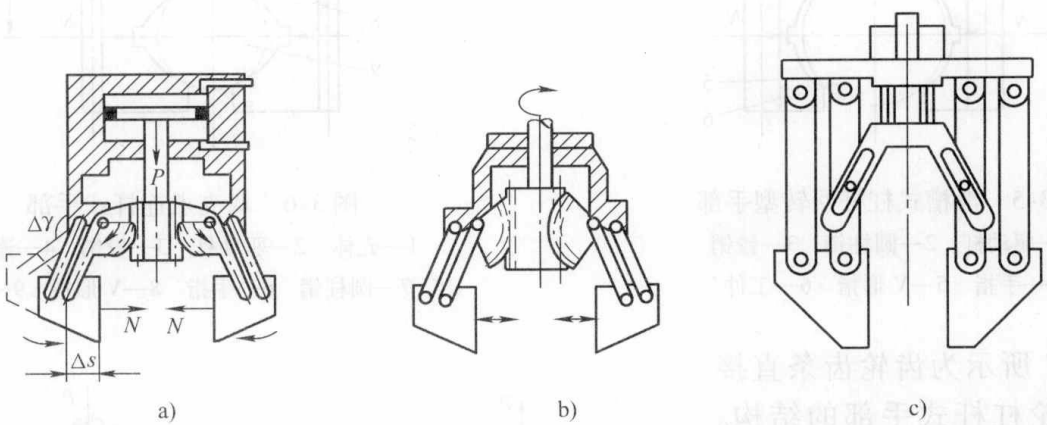



图 3-9 平移型夹钳式手部

a）齿条齿轮式传动 b）蜗杆蜗轮式传动 c）连杆斜滑槽式传动

### 3.1.2 吸附式取料手

吸附式取料手靠吸附力取料，根据吸附力的不同，可分为气吸附和磁吸附两种。吸附式取料手适用于大平面、易碎(玻璃、磁盘)、微小的物体，因此使用面较广。

1. 气吸附式取料手

气吸附式取料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，可分为真空吸附、气流负压吸附、挤压排气负压吸附等。图 3-10 所示为电子玻璃生产线，一片片巨幅玻璃从主线成型、打磨、下片，被一只只灵活的“气吸式机械手”装进了玻璃固定架。

气吸附式取料手与夹钳式取料手相比，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。

真空气吸附取料手结构原理如图 3-11 所示。其真空的产生是利用真空泵，真空度较高。其主要零件为碟形橡胶吸盘 1，通过固定环 2 安装在支承杆 4 上。支承杆 4 由螺母 5 固定在

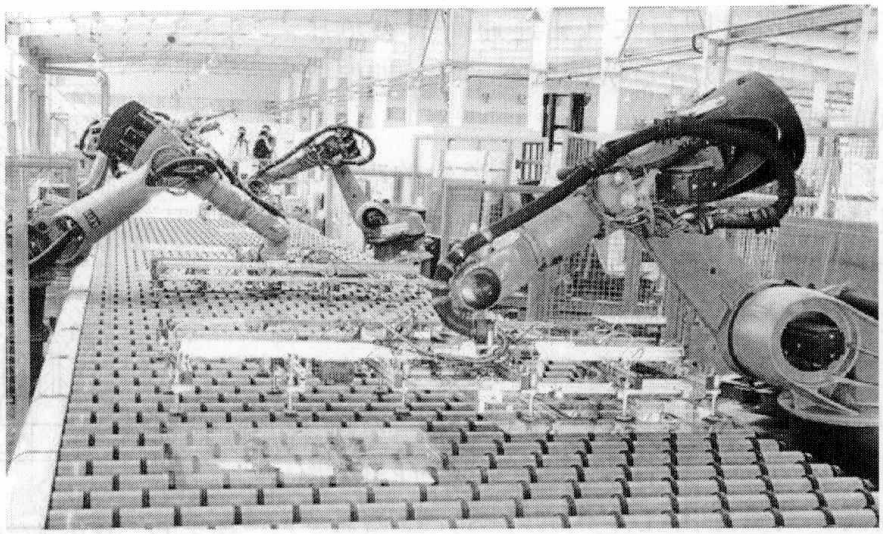


图 3-10　电子玻璃生产线

基板 6 上。取料时，碟形橡胶吸盘与物体表面接触，橡胶吸盘在边缘既起到密封作用，又起到缓冲作用；然后真空抽气，吸盘内腔形成真空，实施吸附取料。放料时，管路接通大气，失去真空，物体放下。为避免在取放料时产生撞击，有的还在支承杆上配有弹簧，起到缓冲作用。为了更好地适应物体吸附面的倾斜状况，有的在橡胶吸盘背面设计有球铰链。真空吸附取料工作可靠、吸附力大，但需要有真空系统，成本较高。

利用真空发生器产生真空，其基本的原理如图 3-12 所示。当吸盘压到被吸物后，吸盘内的空气被真空发生器或者真空泵从吸盘上的管路中抽走，使吸盘内形成真空；而吸盘外的大气压力把吸盘紧紧地压在被吸物上，使之几乎形成一个整体，可以共同运动。真空发生器利用压缩空气产生真空(负压)的真空发生器，从喷嘴中放出(喷射)压缩空气产生真空。真空发生部分是没有活动部位的单纯结构，所以使用寿命较长。

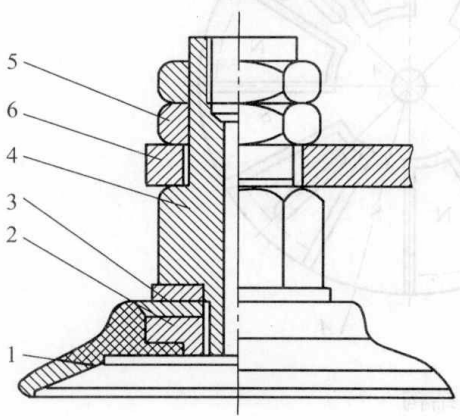



图 3-11　真空气吸附取料手

1—橡胶吸盘　2—固定环　3—垫片
4—支承杆　5—螺母　6—基板

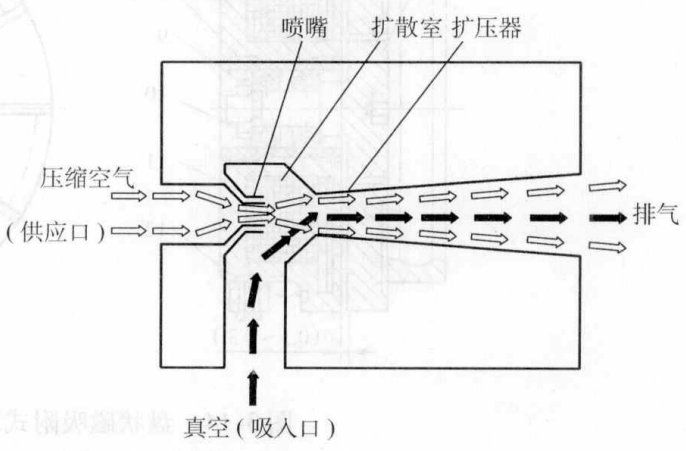



图 3-12　真空发生器基本的原理图

2. 挤压排气吸附式取料手

挤压排气吸附式取料手如图 3-13 所示。其工作原理为：取料时，吸盘压紧物体，橡胶吸盘变形，挤出腔内多余的空气，取料手上升，靠橡胶吸盘的恢复力形成负压，将物体吸住；释

放时，压下拉杆 3，使吸盘腔与大气相连通而失去负压。该取料手结构简单，但吸附力小，吸附状态不易长期保持。

3. 磁吸附式取料手

磁吸附式取料手是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，所以磁吸附式取料手的使用有一定的局限性。

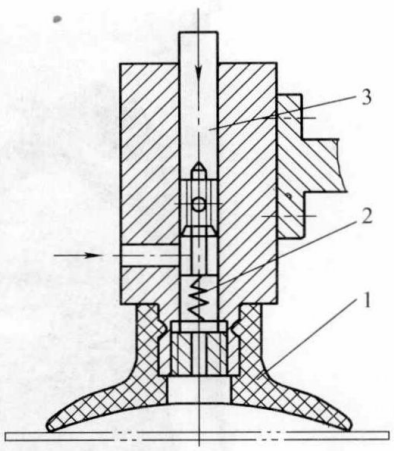



图 3-13　挤压排气吸附式取料手

1—橡胶吸盘　2—弹簧　3—拉杆

盘状磁吸附式取料手的结构图如图 3-14 所示。铁心 1 和磁盘 3 之间用黄铜焊料焊接并构成隔磁环 2，既焊为一体又将铁心和磁盘分隔，这样使铁心 1 成为内磁极，磁盘 3 成为外磁极。其磁路由壳体 6 的外圈，经磁盘 3、工件和铁心，再到壳体内圈形成闭合回路，以此吸附工件。铁心、磁盘和壳体均采用 8 ~ 10 号低碳钢制成，可减少剩磁，并在断电时不吸或少吸铁屑。盖 5 为用黄铜或铝板制成的隔磁材料，用以压住线圈 11，以防止工作过程中线圈的活动。挡圈 7、8 用以调整铁心和壳体的轴向间隙，即磁路气隙 $\delta$。在保证铁心正常转动的情况下，气隙越大，电磁吸力就会显著地减小，因此，一般取 $\delta = 0.1 \sim 0.3\text{mm}$。

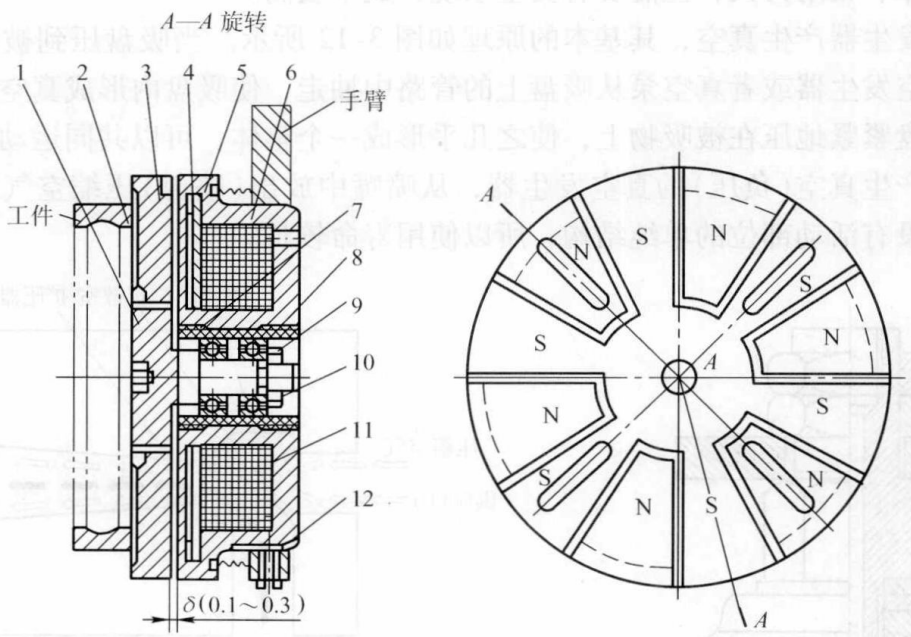



图 3-14　盘状磁吸附式取料手的结构

1—铁心　2—隔磁环　3—磁盘　4—卡环　5—盖　6—壳体

7、8—挡圈　9—螺母　10—轴承　11—线圈　12—螺钉

在机器人手臂的孔内，可作轴向微量的移动，但不能转动。铁心 1 和磁盘 3 一起装在轴承上，用以实现在不停车的情况下自动上、下料。

几种电磁式吸盘吸料的示意图如图 3-15 所示。其中，图 3-15a 为吸附滚动轴承座圈的电磁式吸盘；图 3-15b 为吸取钢板用的电磁式吸盘；图 3-15c 为吸取齿轮用的电磁式吸盘；图 3-15d为吸附多孔钢板用的电磁式吸盘。

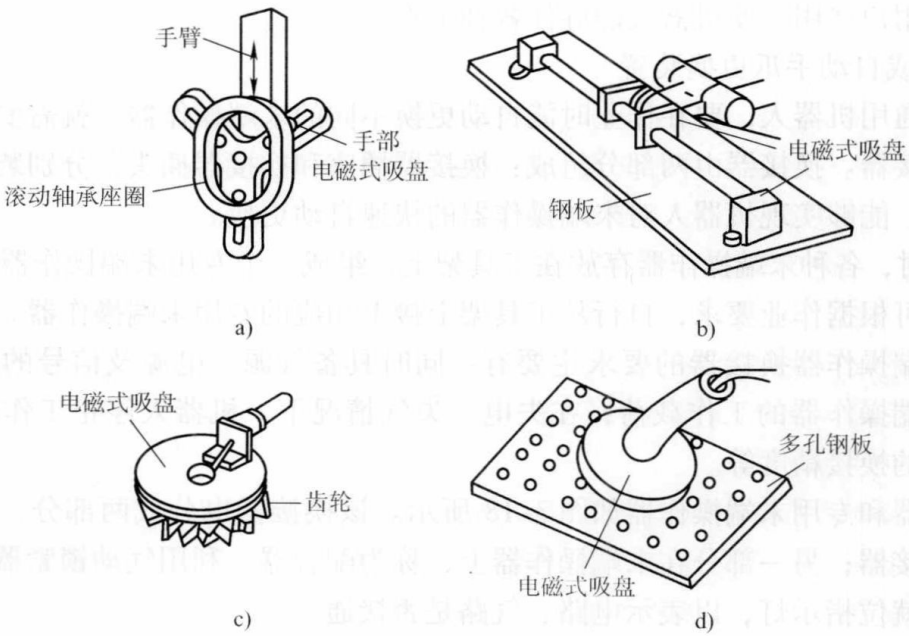



图 3-15　电磁式吸盘吸料的示意图

a）吸附滚动轴承座圈的电磁式吸盘　b）吸取钢板用的电磁式吸盘

c）吸取齿轮用的电磁式吸盘　d）吸附多孔钢板用的电磁式吸盘

### 3.1.3　专用末端操作器及换接器

1. 专用末端操作器

机器人是一种通用性很强的自动化设备，可根据作业要求，再配上各种专用的末端操作器后，就能完成各种动作。例如在通用机器人上安装焊枪，就成为一台焊接机器人；安装拧螺母机，则成为一台装配机器人。目前，有许多由专用电动、气动工具改型而成的操作器，有拧螺母机、焊枪、电磨头、电铣头、抛光头、激光切割机等，如图 3-16 所示。所形成的

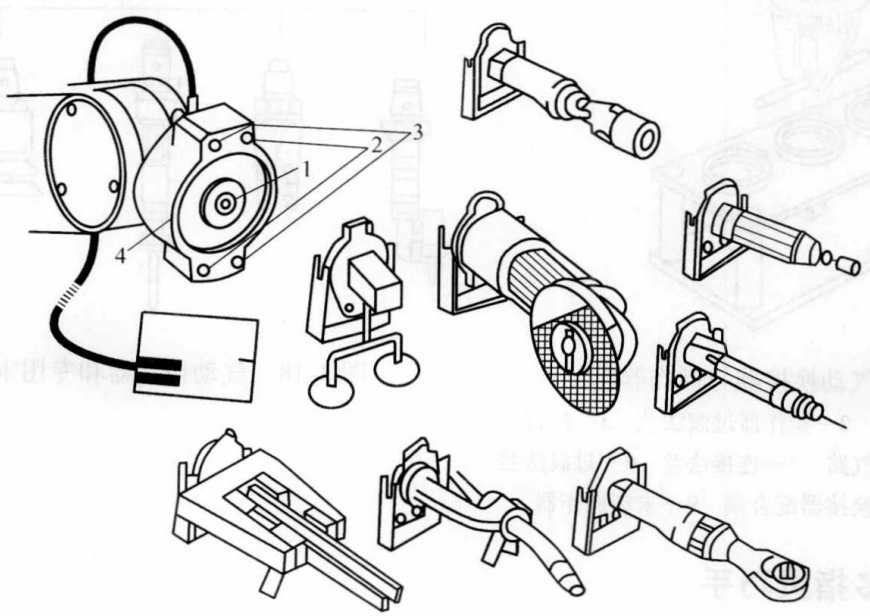



图 3-16　各种专用的末端操作器

1—气路接口　2—定位销　3—电接头　4—电磁吸盘

一整套系列供用户选用，使机器人能胜任各种工作。

2. 换接器或自动手爪更换装置

使用一台通用机器人，要在作业时能自动更换不同的末端操作器，就需要配置具有快速装卸功能的换接器。换接器由两部分组成：换接器插座和换接器插头，分别装在机器腕部和末端操作器上，能够实现机器人对末端操作器的快速自动更换。

具体实施时，各种末端操作器存放在工具架上，组成一个专用末端操作器库，如图 3-17 所示。机器人可根据作业要求，自行从工具架上接上相应的专用末端操作器。

对专用末端操作器换接器的要求主要有：同时具备气源、电源及信号的快速连接与切换；能承受末端操作器的工作载荷；在失电、失气情况下，机器人停止工作时不会自行脱离；具有一定的换接精度等。

气动换接器和专用末端操作器如图 3-18 所示。该换接器也分成两部分：一部分装在手腕上，称为换接器；另一部分在末端操作器上，称为配合器。利用气动锁紧器将两部分进行连接，并具有就位指示灯，以表示电路、气路是否接通。

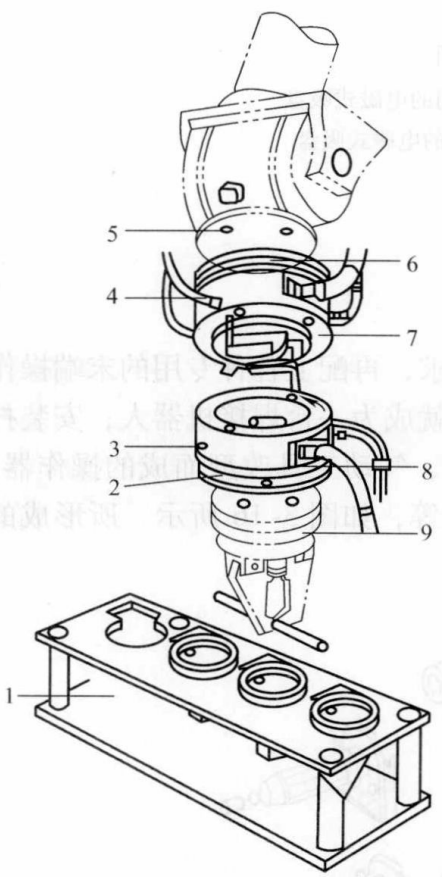



图 3-17　气动换接器与操作器库

1—末端操作器库　2—操作器过渡法兰　3—位置指示器　4—换接器气路　5—连接法兰　6—过渡法兰　7—换接器　8—换接器配合端　9—末端操作器

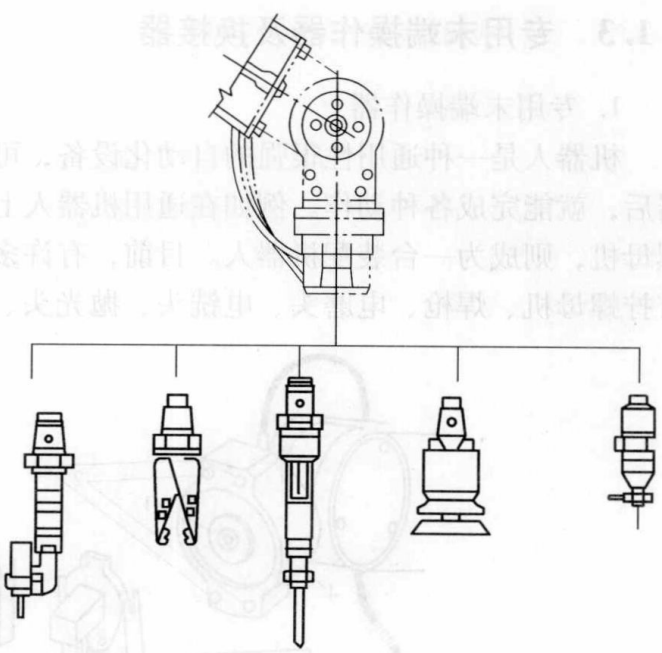


图 3-18　气动换接器和专用末端操作器

## 3.1.4　仿生多指灵巧手

简单的夹钳式取料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、动作多样的灵巧手。

1. 柔性手

为了能对不同外形的物体实施抓取，并使物体表面受力比较均匀，因此研制出了柔性手。如图3-19所示为多关节柔性手腕，手指由多个关节串联而成。手指传动部分由牵引钢丝绳及摩擦滚轮组成，每个手指由两根钢丝绳牵引，一侧为握紧，另一侧为放松。驱动源可采用电动机驱动或液压、气动元件驱动。柔性手腕可抓取凹凸不平的外形，并使物体受力较为均匀。

如图3-20所示为用柔性材料做成一端固定、一端为自由端的双管合一的柔性管状手爪。当一侧管内充气体或液体、另一侧管内抽气或抽液时，形成压力差，柔性手爪就向抽空侧弯曲。此种柔性手适用于抓取轻型、圆形物体，如玻璃器皿等。

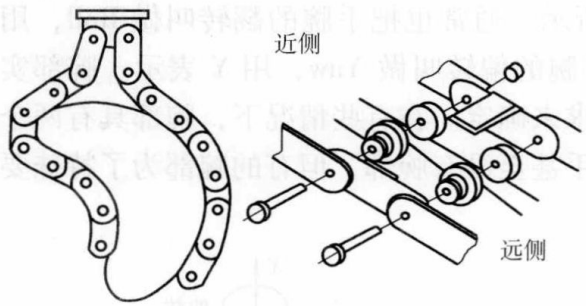



图3-19　多关节柔性手腕

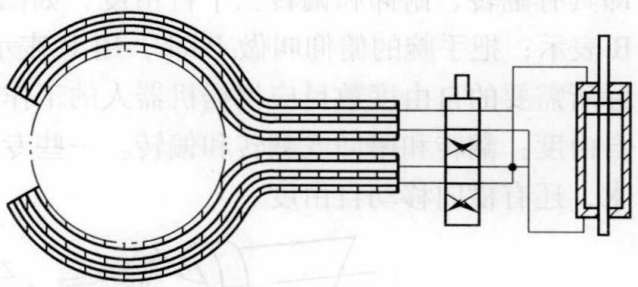
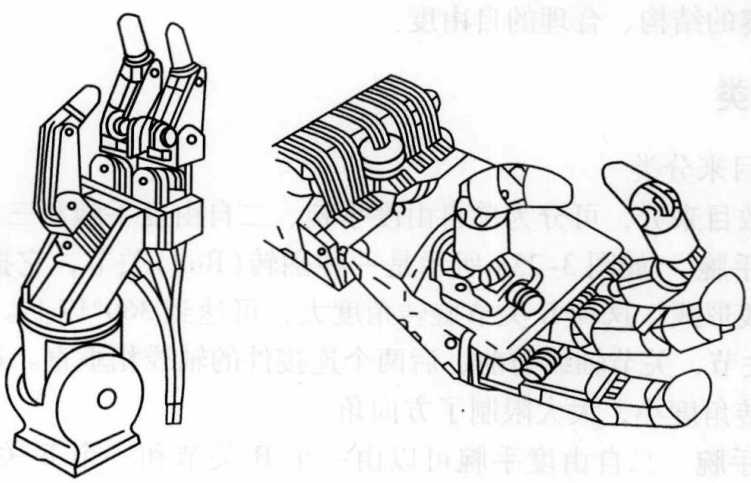


图3-20　柔性手

2. 多指灵巧手

机器人手爪和手腕最完美的形式是模仿人手的多指灵巧手。如图3-21所示，多指灵巧手有多个手指，每个手指有3个回转关节，每一个关节的自由度都是独立控制的。因此，它能模仿几乎人手指能完成的各种复杂动作，如拧螺钉、弹钢琴、作礼仪手势等动作。在手部配置触觉、力觉、视觉、温度传感器，将会使多指灵巧手达到更完美的程度。多指灵巧手的应用前景十分广泛，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。



a)　　b)

图3-21　多指灵巧手

a）三指　b）四指

## 3.2 机器人手腕

### 3.2.1 概述

机器人手腕是在机器人手臂和手爪之间用于支撑和调整手爪的部件。机器人手腕主要用来确定被抓物体的姿态，一般采用三自由度多关节机构，由旋转关节和摆动关节组成。

机器人的腕部是连接手部与臂部的部件，起支承手部的作用。工业机器人一般具有六个自由度，才能使手部(末端操作器)达到目标位置和处于期望的姿态，手腕上的自由度主要是实现所期望的姿态。

为了使手部能处于空间任意方向，要求腕部能实现对空间三个坐标轴 $X$、$Y$、$Z$ 的转动，即具有翻转、俯仰和偏转三个自由度，如图 3-22 所示。通常也把手腕的翻转叫做 Roll，用 R 表示；把手腕的俯仰叫做 Pitch，用 P 表示；把手腕的偏转叫做 Yaw，用 Y 表示。腕部实际所需要的自由度数目应根据机器人的工作性能要求来确定。在有些情况下，腕部具有两个自由度：翻转和俯仰或翻转和偏转。一些专用机械手甚至没有腕部，但有的腕部为了特殊要求，还有横向移动自由度。

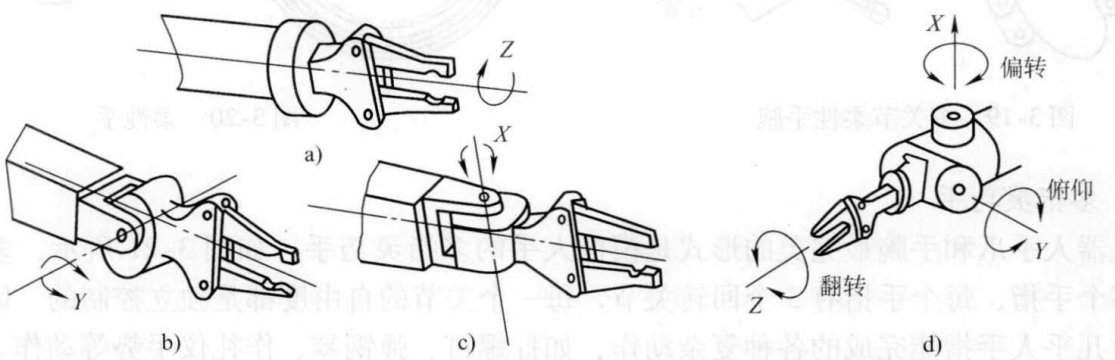



图 3-22 手腕的自由度

a) 手腕的翻转 b) 手腕的俯仰 c) 手腕的偏转 d) 腕部坐标系

因为手腕是安装在手臂的末端，所以手腕的大小和重量是手腕设计时要考虑的关键问题。希望能采用紧凑的结构、合理的自由度。

### 3.2.2 手腕的分类

1. 按自由度数目来分类

手腕按自由度数目来分，可分为单自由度手腕、二自由度手腕和三自由度手腕。

(1) 单自由度手腕 如图 3-23a 所示是一种翻转(Roll)关节，它把手臂纵轴线和手腕关节轴线构成共轴线形式，这种 R 关节旋转角度大，可达到 360°以上。图 3-23b、3-23c 是一种折曲(Bend)关节，关节轴线与前、后两个连接件的轴线相垂直。这种 B 关节因为受到结构上的干涉，旋转角度小，大大限制了方向角。

(2) 二自由度手腕 二自由度手腕可以由一个 R 关节和一个 B 关节组成 BR 手腕(见图 3-24a)，也可以由两个 B 关节组成 BB 手腕(见图 3-24b)。但是，不能由两个 R 关节组成 RR 手腕，因为两个 R 关节共轴线，所以退化了一个自由度，实际只构成了单自由度手腕(见图 3-24c)。

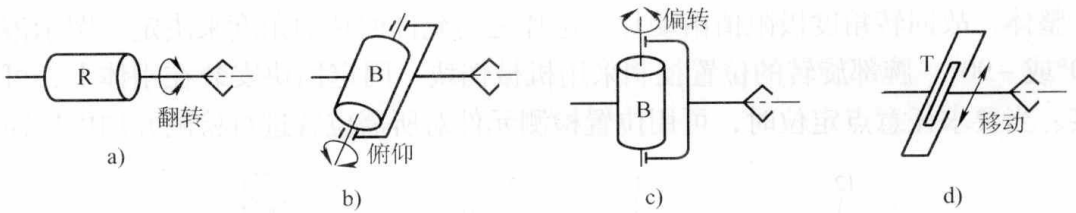



图 3-23　单自由度手腕

a）R 手腕　b）、c）B 手腕　d）T 手腕

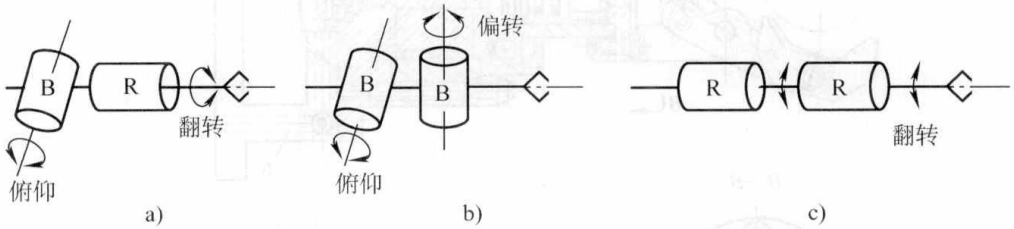



图 3-24　二自由度手腕

a）BR 手腕　b）BB 手腕　c）RR 手腕

（3）三自由度手腕　三自由度手腕可以由 B 关节和 R 关节组成许多种形式。图 3-25a 所示为通常见到的 BBR 手腕，使手部具有俯仰、偏转和翻转运动，即 RPY 运动。图 3-25b 所示为一个 B 关节和两个 R 关节组成的 BRR 手腕，为了不使自由度退化，使手部获得 RPY 运动，第一个 R 关节必须如图偏置。图 3-25c 所示为三个 R 关节组成的 RRR 手腕，它也可以实现手部 RPY 运动。图 3-25d 所示为 BBB 手腕，很明显，它已经退化为二自由度手腕，只有 PY 运动，实际上它是不采用的。此外，B 关节和 R 关节排列的次序不同，也会产生不同的效果，也产生了其他形式的三自由度手腕。为了使手腕结构紧凑，通常把两个 B 关节安装在一个十字接头上，这可大大减小 BBR 手腕的纵向尺寸。

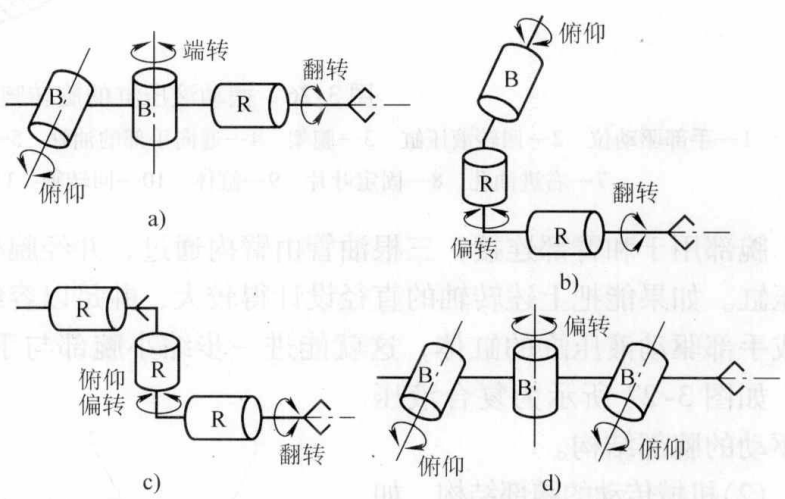



图 3-25　三自由度手腕

a）BBR 手腕　b）BRR 手腕　c）RRR 手腕　d）BBB 手腕

2. 按驱动方式分类

（1）液压(气)缸驱动的腕部结构　直接用回转液压(气)缸驱动实现腕部的回转运动，具有结构紧凑、灵巧等优点。如图 3-26 所示的腕部结构，采用回转液压缸实现腕部的旋转运动。从 *A*—*A* 剖视图可以看出，回转叶片 11 用螺钉、销钉和回转轴 10 连在一起；固定叶片 8 和缸体 9 连接。当压力油从右进油孔 7 进入液压缸右腔时，便推动 11 和 10 一起绕轴线顺时针转动；当液压油从左进油孔 5 进入左腔时，便推动转轴逆时针方向回转。由于手部和回转轴 10

连成一个整体，故回转角度极限值由动片、定片之间允许回转的角度来决定。图示液压缸可以回转 +90°或 -90°。腕部旋转的位置控制采用机械挡块。固定挡块安装在刚体上，可调挡块与手部连接。当要求任意点定位时，可用位置检测元件对所需位置进行检测并加以反馈控制。

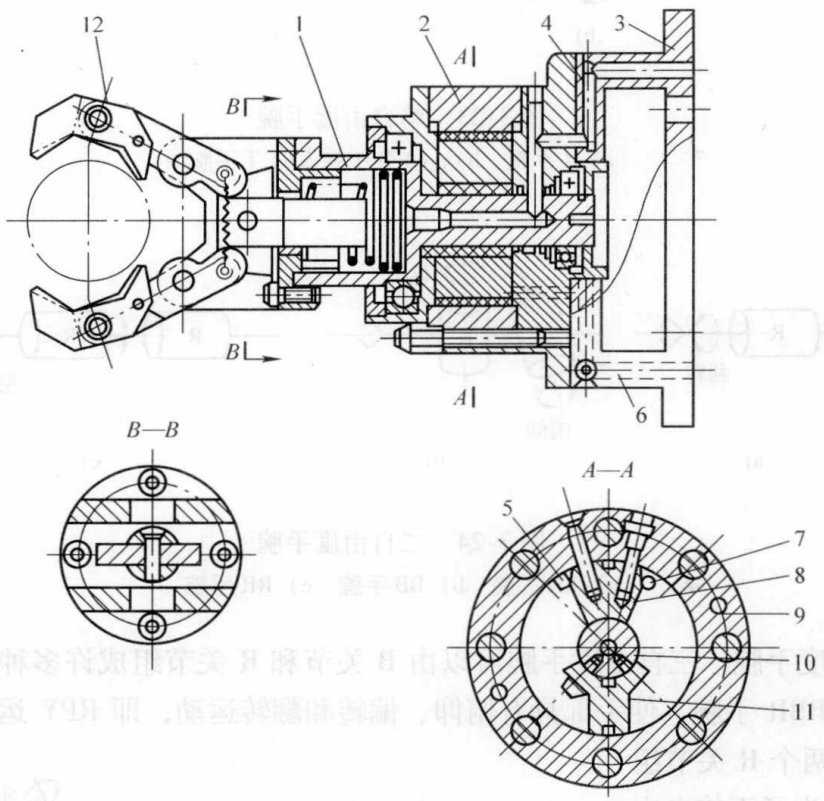



图 3-26　摆动液压缸的旋转腕图

1—手部驱动位　2—回转液压缸　3—腕架　4—通向手部的油管　5—左进油孔　6—通向摆动液压缸油管　7—右进油孔　8—固定叶片　9—缸体　10—回转轴　11—回转叶片　12—手部

腕部用于和臂部连接，三根油管由臂内通过，并经腕架分别进入回转液压缸和手部驱动液压缸。如果能把上述转轴的直径设计得较大，并足以容纳手部驱动液压缸时，则可把转轴做成手部驱动液压缸的缸体，这就能进一步缩小腕部与手部的总轴向尺寸，使结构更加紧凑。如图 3-27 所示为复合液压缸驱动的腕部结构。

(2)机械传动的腕部结构　如图 3-28所示为三自由度的机械传动腕部结构的传动图，是一个具有三根输入轴的差动轮系。腕部旋转使得附加的腕部结构紧凑、重量轻。从运动分析的角度看，这是一种比较理想的三自由度腕，这种腕部可使手的运动灵活、适应性广。目前，它已成功地用于点焊、喷漆等通用机器人上。

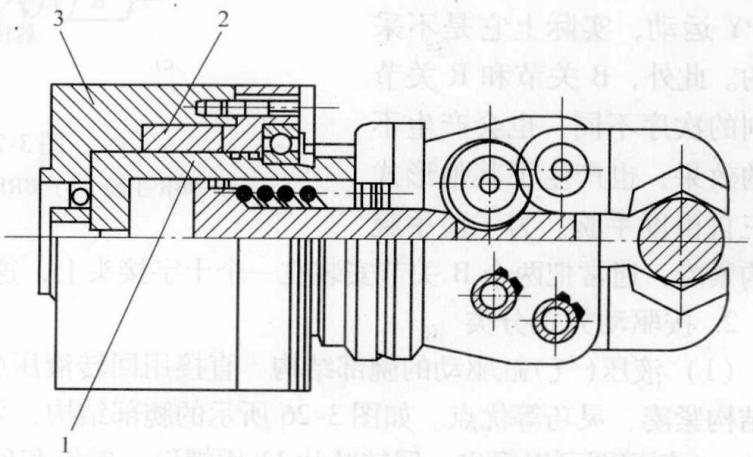



图 3-27　复合液压缸驱动的腕部结构

1—手部驱动液压缸　2—转子　3—腕部驱动液压缸

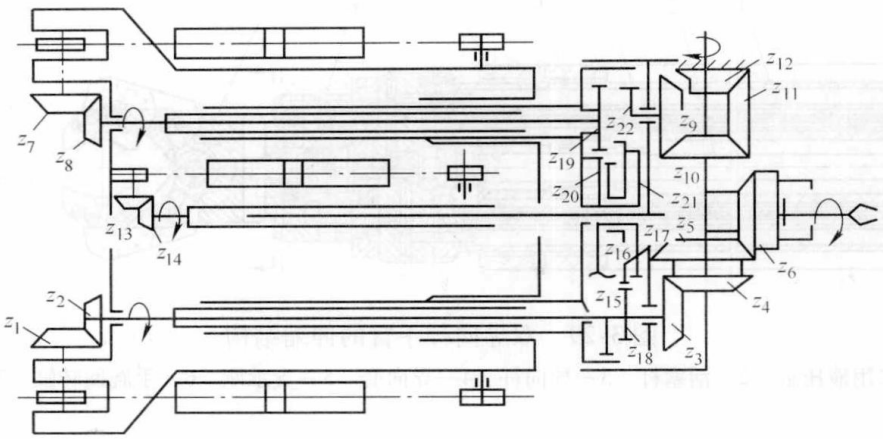



图 3-28　三自由度的机械传动腕部结构

## 3.3　机器人手臂

手臂的各种运动通常由驱动机构和各种传动机构来实现。因此，它不仅仅承受被抓取工件的重量，而且承受末端执行器、手腕和手臂自身的重量。手臂的结构、工作范围、灵活性、抓重大小(即臂力)和定位精度都直接影响机器人的工作性能，所以臂部的结构形式必须根据机器人的运动形式、抓取重量、动作自由度、运动精度等因素来确定。手臂特性如下：

1）刚度要求高。为防止臂部在运动过程中产生过大的变形，手臂的断面形状要合理选择。工字形断面弯曲刚度一般比圆断面的大；空心管的弯曲刚度和扭转刚度都比实心轴的大得多，所以常用钢管做臂杆及导向杆、用工字钢和槽钢做支承板。

2）导向性要好。为防止手臂在直线运动中沿运动轴线发生相对转动，设置导向装置，或设计方形、花键等形式的臂杆。

3）重量要轻。为提高机器人的运动速度，要尽量减小臂部运动部分的重量，以减小整个手臂对回转轴的转动惯量。

4）运动要平稳、定位精度要高。由于臂部运动速度越高，惯性力引起的定位前的冲击也就越大，运动既不平稳，定位精度也不高。因此，除了臂部设计上要力求结构紧凑、重量轻外，同时要采用一定形式的缓冲措施。

### 3.3.1　手臂直线运动机构

机器人手臂的伸缩、升降及横向(或纵向)移动均属于直线运动，而实现手臂往复直线运动的机构形式较多，常用的有活塞液压(气)缸、活塞缸和齿轮齿条机构、丝杠螺母机构及活塞缸和连杆机构等。

往复直线运动可采用液压或气压驱动的活塞液压(气)缸。由于活塞液压(气)缸的体积小、重量轻，因而在机器人手臂结构中应用比较多。双导向杆手臂的伸缩结构如图 3-29 所示。手臂和手腕是通过连接板安装在升降液压缸的上端。当双作用液压缸 1 的两腔分别通入压力油时，则推动活塞杆 2(即手臂)做往复直线移动；导向杆 3 在导向套 4 内移动，以防手臂伸缩式的转动(并兼作手腕回转缸 6 及手部 7 的夹紧液压缸用的输油管道)。由于手臂的伸缩液压缸安装在两根导向杆之间，由导向杆承受弯曲作用，活塞杆只受拉压作用，故受力简单、传动平稳、外形整齐美观、结构紧凑。

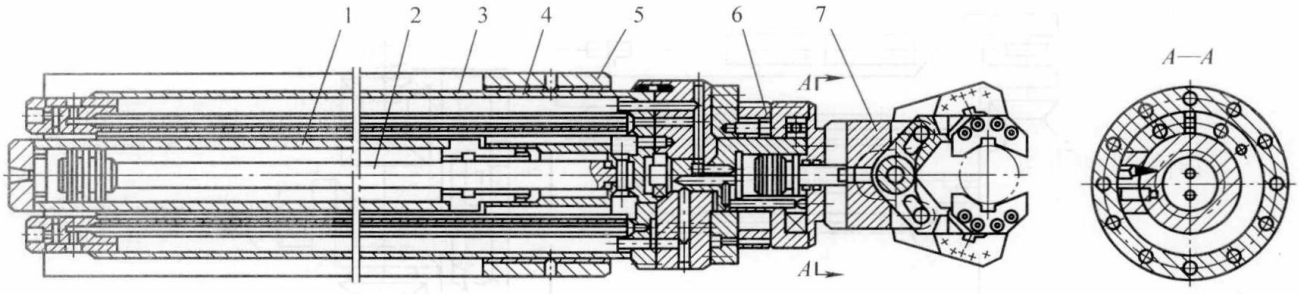



图 3-29 双导向杆手臂的伸缩结构

1—双作用液压缸 2—活塞杆 3—导向杆 4—导向套 5—支承座 6—手腕回转缸 7—手部

### 3.3.2 手臂回转运动机构

实现机器人手臂回转运动的机构形式是多种多样的，常用的有叶片式回转缸、齿轮传动机构、链轮传动机构、连杆机构。下面以齿轮传动机构中活塞缸和齿轮齿条机构为例来说明手臂的回转。齿轮齿条机构是通过齿条的往复移动，带动与手臂连接的齿轮做往复回转运动，即实现手臂的回转运动。带动齿条往复移动的活塞缸可以由压力油或压缩气体驱动。手臂升降和回转运动的结构如图 3-30 所示。活塞液压缸两腔分别进压力油，推动齿条活塞 7

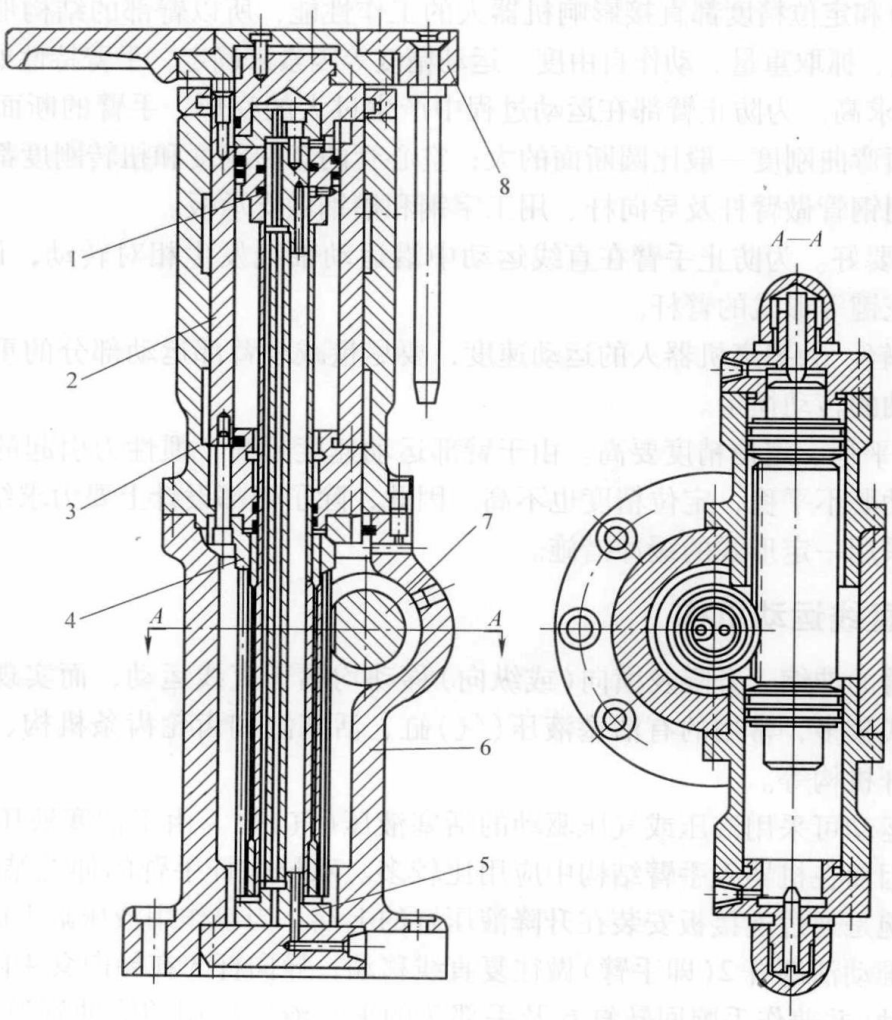



图 3-30 手臂升降和回转运动的结构

1—活塞杆 2—升降缸体 3—导向套 4—齿轮 5—连接盖 6—机座 7—齿条 8—连接板

做往复移动(见 *A*—*A* 剖面)，与齿条 7 啮合的齿轮 4 即做往复回转运动。由于齿轮 4、手臂升降缸体 2、连接板 8 均用螺钉连接成一体，连接板又与手臂固连，从而实现手臂的回转运动。升降液压缸的活塞杆通过连接盖 5 与机座 6 连接而固定不动，缸体 2 沿导向套 3 做上下移动，因升降液压缸外部装有导向套，故刚性好、传动平稳。

### 3.3.3　手臂俯仰运动机构

机器人的手臂俯仰运动一般采用活塞液压缸与连杆机构来实现。手臂的俯仰运动用的活塞缸位于手臂的下方，其活塞杆和手臂用铰链连接，缸体采用尾部耳环或中部销轴等方式与立柱连接，如图 3-31 所示。

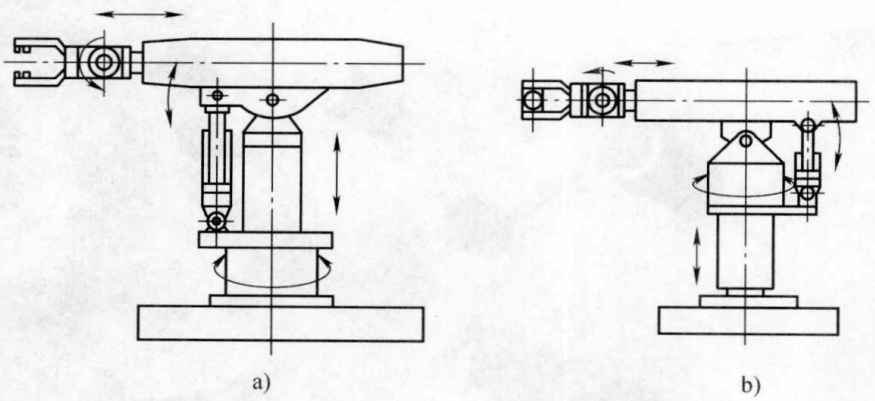



图 3-31　手臂俯仰驱动缸安装示意图

a）示意图一　b）示意图二

采用铰接活塞缸 5、7 和连杆机构，使小臂 4 相对大臂 6 和大臂 6 相对立柱 8 实现俯仰运动，其结构示意图如图 3-32 所示。

### 3.3.4　手臂复合运动机构

手臂复合运动机构多用于动作程序固定不变的专用机器人，它不仅使机器人的传动结构简单，而且可简化驱动系统和控制系统，并使机器人传动准确、工作可靠，因而在生产中应用得比较多。除手臂实现复合运动外，手腕和手臂的运动也能组成复合运动。

手臂(或手腕)的复合运动可以由动力部件(如活塞缸、回转缸、齿条活塞缸等)与常用机构(如凹槽机构、连杆机构、齿轮机构等)按照手臂的运动轨迹(即路线)或手臂和手腕的动作要求进行组合。

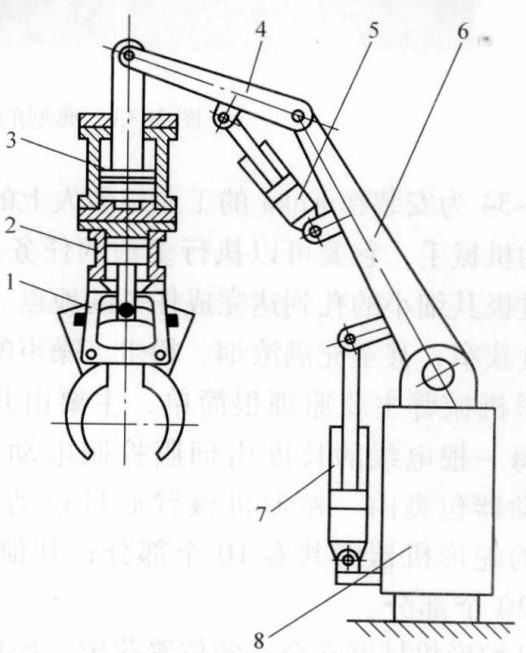



图 3-32　铰接活塞缸实现手臂俯仰的结构示意图

1—手臂　2—夹紧缸　3—升降缸　4—小臂

5、7—铰接活塞缸　6—大臂　8—立柱

### 3.3.5 新型的蛇形机械手臂

目前，普通工业机器人都能够达到0.1mm的重复精度，无论是直线运动，还是绕轴转动，甚至是复杂的曲面移动，都能够很好地完成。这一方面得益于机械加工精度的日益提高，另一方面依靠了现代化的控制技术保证了机器人定位的精确。

蛇形手臂一般具有高度柔性，可深入装配结构当中进行均匀涂层，从而增加生产率，适用于在飞机翼盒的组装探视工作及引擎组装中的深度检测等。如图3-33所示为典型的飞机装配蛇形手部。

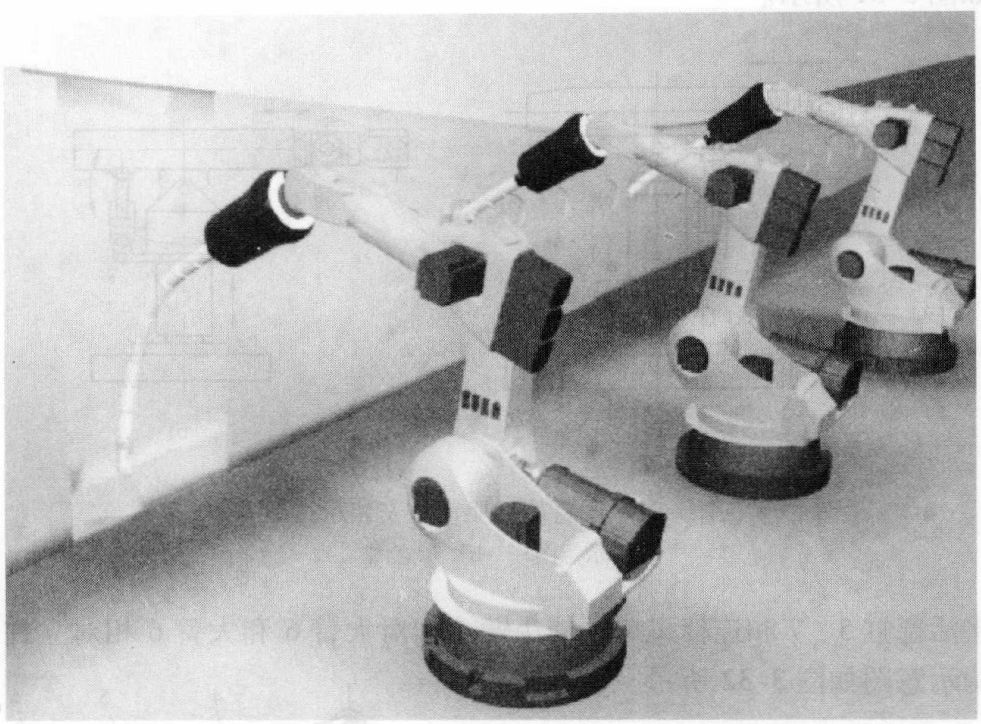


图3-33 典型的飞机装配蛇形手部

图3-34为安装在Kuka的工业机器人上的蛇形机械臂。这一想法的意图在于制造出一个混合型的机械手，它要可以执行多数的任务。而这些任务的胜任者必须能够在有限的空间中，穿过极其细小的孔到达完成任务的地点。蛇形机械臂的基本目的是减少人类在一些活动空间极度狭窄，甚至充满浓烟、粉尘、噪声的环境下工作(见图3-35)。

蛇形机械臂主要原理很简单，主要由几个段组成，每段有两个自由度，由三根电线控制。每一根电线的长度由伺服控制电动机和直线制动器决定，制动器隐藏在手臂底座的制动器包裹内。蛇形机械臂通过拉动或者延伸驱动线的长度来控制形状。用于航空运用的蛇形机器臂共有10个部分；其他用途的机械臂则没有固定，少则10个部分，多可达20个部分。

一旦蛇形机械臂在合适的位置落定，操作者就可以在“卡笛儿模式”(Cartesian mode)通过操纵杆移动手臂；它也会自动调整，通过视觉伺服系统为新任务虚位以待。重要的是，当机器手臂收缩时，这一控制程序能够自动考虑到自身的状况而进行姿态调整，因为预先设定的路径可能与实际不一致。

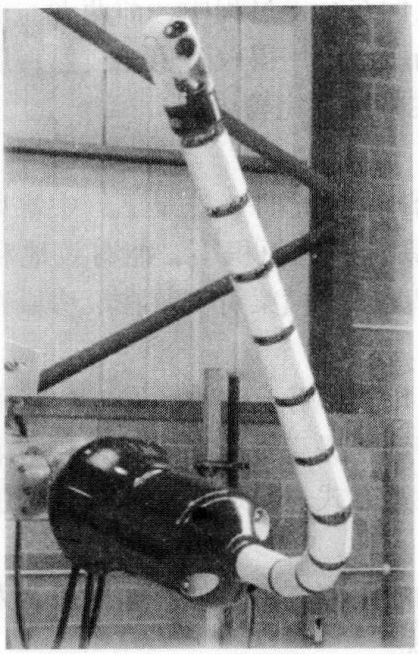


图 3-34　蛇形机械臂

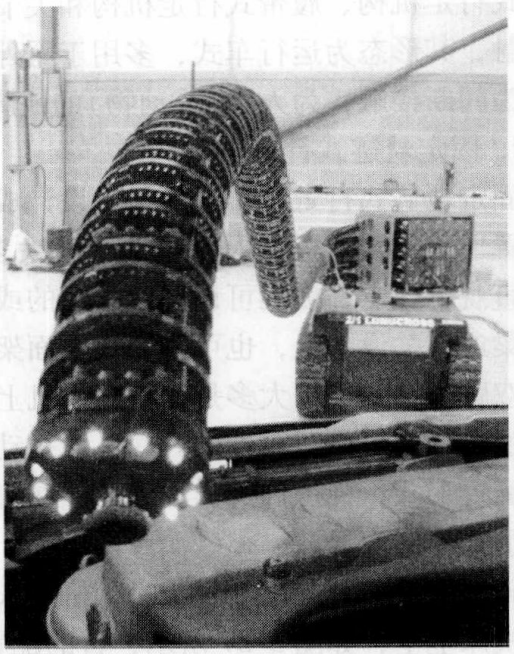


图 3-35　蛇形机械臂正在探视

## 3.4　机器人机座

机器人机座是机器人的基础部分，起支承作用，可分为固定式和移动式两种。一般工业机器人中的立柱式、机座式和屈伸式机器人大多是固定式的；但随着海洋科学、原子能工业及宇宙空间事业的发展，具有智能的可移动机器人是今后机器人的发展方向。

### 3.4.1　固定式机器人

固定式机器人的机座既可直接连接在地面基础上，也可固定在机身上。如图 3-36 所示为美国 PUMA-262 垂直多关节型机器人，其基座主要包括立柱回转(第一关节)的二级齿轮减速传动，减速箱体即为基座。

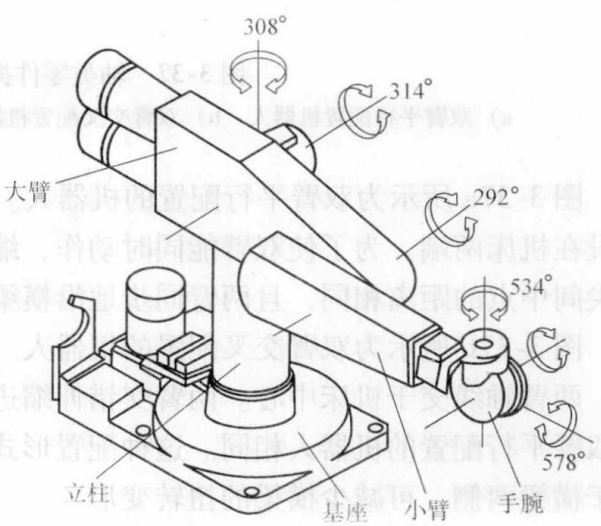



图 3-36　美国 PUMA-262 垂直多关节型机器人

### 3.4.2　行走式机器人

行走机构是行走式机器人的重要执行部件，它由行走的驱动装置、传动机构、位置检测元件、传感器电缆及管路等组成。它一方面支承机器人的机身臂和手部，因而必须具有足够的刚度和稳定性；另一方面还根据作业任务的要求，带动机器人在更广阔的空间内运动。

行走机构按其运动轨迹，可分为固定轨迹式和无固定轨迹式。固定轨迹式行走机构主要用于工业机器人，如横梁式机器人。无固定轨迹式行走机构按其行走机构的结构特点，可分

为轮式行走机构、履带式行走机构和关节式行走机构。它们在行走过程中，前两者与地面连续接触，其形态为运行车式，多用于野外、较大型作业场所，应用得较多也较成熟；后者与地面为间断接触，为人类(或动物)的腿脚式，该机构正在发展和完善中。

1. 固定轨迹式行走机构

固定轨迹式行走机器人的机身设计成横梁式，用于悬挂手臂部件，这是工厂中常见的一种配置形式。这类机器人的运动形式大多为直移式。它具有占地面积小、能有效地利用空间、直观等优点，横梁可设计成固定的或行走的。一般情况下，横梁可安装在厂房原有建筑的柱梁或有关设备上，也可专门从地面架设。

双臂悬挂式结构大多是为1台主机上、下料服务的，1个臂用于上料，另1个臂用于下料，这种形式可以减少辅助时间、缩短动作循环周期、有利于提高生产率。双臂在横梁上的具体配置形式，视工件的类型、工件在机床上的位置和夹紧方式、料道与机床间相对位置及运动形式不同而异。

轴类工件的轴向尺寸较长时，机器人上、下料时移动的距离亦将增加。这种机器人横梁架于机床上空，如图3-37所示，臂的配置也有不同的形式。

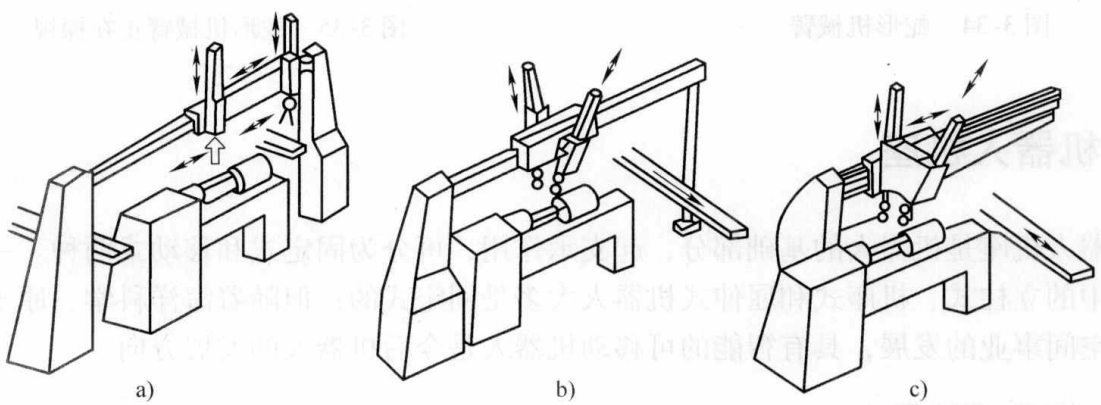



图3-37 轴类零件抓取用双臂悬挂机器人

a）双臂平行配置机器人 b）双臂交叉配置机器人 c）横梁为一悬伸梁的双臂交叉配置机器人

图3-37a所示为双臂平行配置的机器人。双臂与横梁在同一平面内，上料道与下料道分别设在机床两端。为了使双臂能同时动作，缩短辅助时间，两臂间的距离应与料道至机床两顶尖间中点的距离相同，且两臂同步地沿横梁移动。

图3-37b所示为双臂交叉配置的机器人。双臂交叉配置在横梁的两侧，并垂直于横梁轴线。两臂轴线交于机床中心。两臂交错伸缩进行上、下料，并同时沿横梁移动，移动的行程与双臂平行配置的机器人相同。这种配置形式采用同一料道，缩短了横梁长度，且由于两臂位于横梁两侧，可减少横梁的扭转变形。

图3-37c所示为横梁为一悬伸梁的双臂交叉配置的机器人。一般采用等强度铸造横梁，受力比较合理。其行程较图3-37a和3-37b所示的机器人更短些。由于结构限制，双臂必须位于横梁的同一侧。

2. 无固定轨迹式行走机构

(1) 车轮式行走机构 在相对平坦的地面上，用车轮移动方式行走是相当优越的。车轮式移动机器人如图3-38所示。

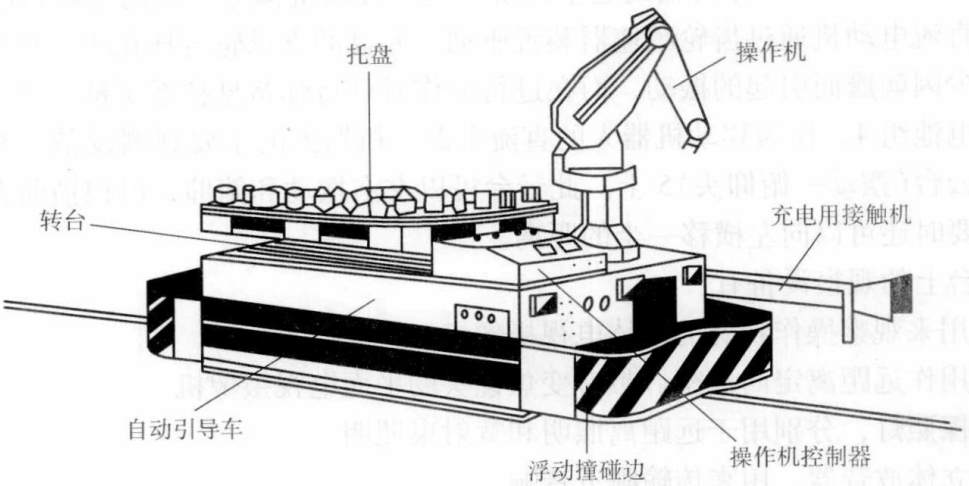



图 3-38　感应引导的车轮式移动机器人

该机器人主要由以下几个部分组成：

① 1 台车轮驱动的自动引导车，作为机器人的移动机座。

② 1 台可编程的具有 6 个自由度的机器人。

③ 转台，用于放置和运输工件的托盘。

④ 自动引导车和机器人用的单元控制器、蓄电池和辅助定位装置等。

如此配置的移动机器人可用在机床上、下料，机床间工件或工具的传送接收等。车轮式移动机器人是自动化生产由单元生产向柔性生产线乃至无人车间发展的重要设备之一。车轮式移动机构也是遥控机器人移动的一种基本方式。

（2）履带式移动机构　轮式行走机构在野外或海底工作时，遇到松软地面时可能陷车，故宜采用履带式行走机构。它是轮式移动机构的拓展，履带本身起着给车轮连续铺路的作用。

图 3-39 所示的 MF2 是典型的越野履带式移动机器人。它像一辆小型坦克车，其主要操作设备是安装在转塔上的抓重 200kg 的 6 自由度机器人手臂。在手臂的肘关节 1 处附有一个

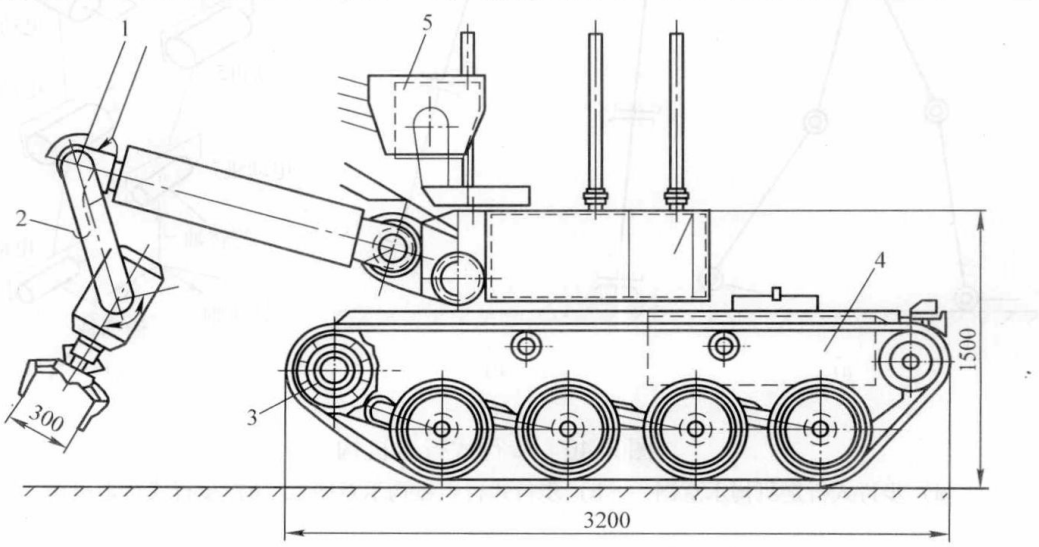



图 3-39　MF2 履带式移动机器人

1—肘关节　2—吊钩　3—驱动轮　4—蓄电池组　5—云台

承载量为400kg的吊钩2，作为辅助起重设备。履带移动机构左、右两条履带的驱动轮3位于前方，由直流电动机通过齿轮减速器装置驱动。底盘的支承轮悬挂在扭力杆上，在行驶过程中可以减少因颠簸而引起的振动，而在进行操作时可将弹簧悬挂系统锁紧以保持稳定。底盘上装有蓄电池组4，作为移动机器人的直流电源。机器人的主要观测设备大都装在一个位于转塔上的云台(摆动—俯仰头)5上。此云台可以左右摆动和俯仰，以扫描前方的半个球面的视野，必要时还可以向左横移一半的距离。

装在云台上的观察设备有：

① 2台用来观察操作状况的主体电视摄像机。

② 1台用作远距离定向观察、带有变焦镜头的平面电视摄像机。

③ 4盏探照灯，分别用于远距离照明和宽射束照明。

④ 2台立体放音器，用来传输附近音响。

⑤ 必要时，还可装上1~2架小型电影摄影机(立体摄影)或者1架16nm电影摄影机。

此外，转塔前方有1台剂量率探测器和1台环境温度探测器，用来对带有放射性的环境进行监测。

履带移动机构和轮式移动机构相比，有以下特点：

① 支承面积大，接地比压小，适合于松软或泥泞场地作业，下陷度小、滚动阻力小、通过性能较好。

② 越野机动性好，爬坡、越沟等性能均比轮式移动机构的优越。

③ 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。

同时，履带移动机构也存在结构复杂、重量大、运动惯性大、减振功能差、零件易损坏等不足。

(3) 步行式行走机构　与运行车式机构相比，步行式行走机构(见图3-40)有以下优点：

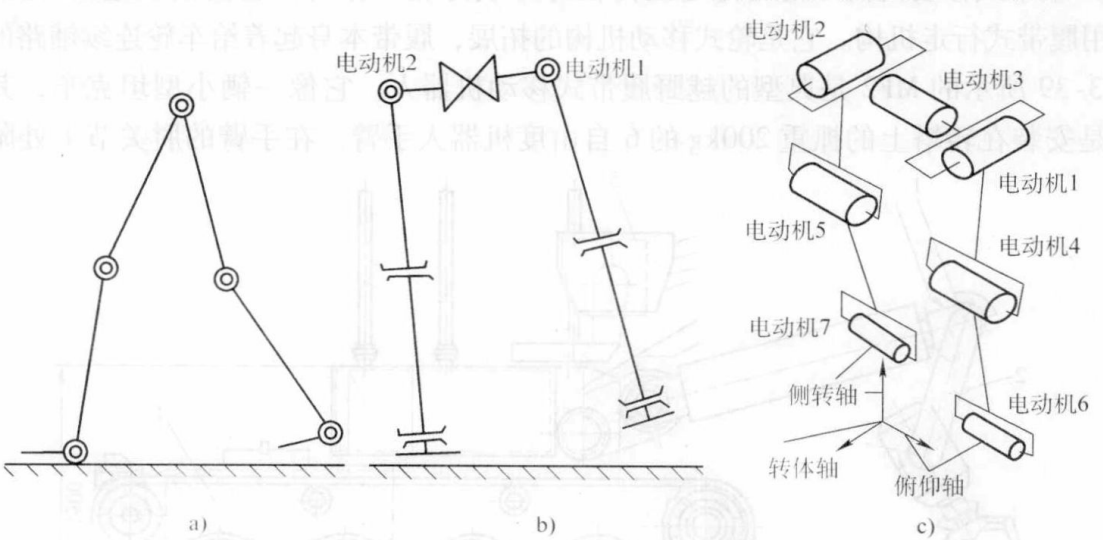



图3-40　步行式行走机构

a) 步行式行走机构示意图一　b) 步行式行走机构示意图二　c) 步行式行走机构

① 可以在高低不平的地段上行走。

② 由于脚的主动性，身体不随地面晃动。

③ 在柔软的地面上运动，效率并不显著降低。因为脚在软地行走时，地面的变形是离

散的，至多是损失踏一个坑的能量，而且脚还可以利用下沉产生推力，即脚的运动能量变成地面弹性体的位能储存；当腿前进时，这个位能又释放出来，因而可以减少步行机构动能的损失。如果设法减轻拔脚的阻力，那么步行机构就会以较高的效率向前运动了。

1）静步行和动步行。所谓静步行是指机器人在步行过程中始终满足静力学条件，即机器人重心总是落在支持于地面几只脚所围成的多边形面积内。所谓动步行是机器人在步行过程中的重心不总是落在支持于地面上的几只脚所围成的面积内，步行中有时重心落在对应的面积外。动步行恰恰利用这种重心超出面积外而向前产生倾倒的分力作为步行的动力。因此，动步行的速度比静步行的快、消耗能量小，但此时必须根据步行机器人的动停来进行控制。

2）脚数的选择。步行式行走机构脚数的选择，目前意见各异。因为这种机构不仅需要定到指定地点，而且要求站稳并进行操作。若增大脚接地的面积，则在不平的地方行动困难，所以须选3只以上的脚，但考虑到驱动系统所提供的输出功率与重量比，又不能太多地增加执行机构的重量。综合上述因素，静步行还应当以四脚式步行机构为好。因为四脚步行机构不但脚数少，而且节约总的自由度，为提高速度引入动步行也比较容易。

ASIMO(Advanced Step in Innovative Mobility)是最出色的步行机器人的代表，是日本本田公司开发的目前世界上最先进的步行机器人(见图3-41)，也是目前世界上唯一能够上、下楼梯，慢速奔跑的双足机器人。虽然其他公司也有类似的双足机器人，但是没有任何一家的产品能在步态仿真度上面能达到ASIMO的水准。ASIMO的智能也同样出色，具有语音识别功能、人脸识别功能甚至使用手势来进行交流。不仅如此，ASIMO的手臂还能够开电灯、开门、拿东西、拖盘子甚至推车(见图3-42)。

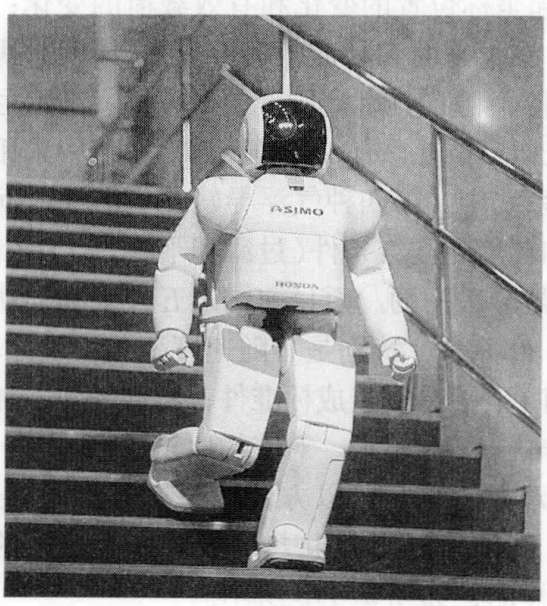



图3-41　本田公司最新型的ASIMO

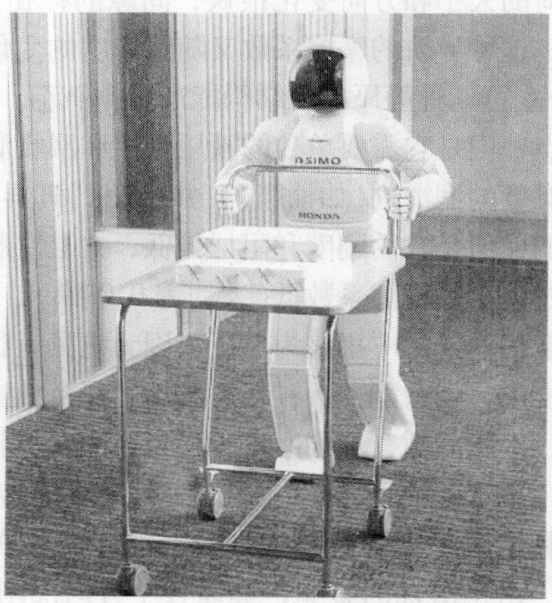



图3-42　ASIMO在推车

## 3.5　机器人的传动

如图3-43所示的工业机器人具有移动关节(关节1、3)和转动关节(关节2、4、5)两种关

节，一共5个自由度。驱动源通过传动部件来驱动这些关节，从而实现机身、手臂和手腕的运动。因此，传动部件是构成工业机器人的重要部件。用户要求机器人速度高、加速度(减速度)特性好、运动平稳、精度高、承载能力大，这在很大程度上取决于传动部件设计的合理性。所以，关节传动部件的设计是工业机器人设计的关键之一。

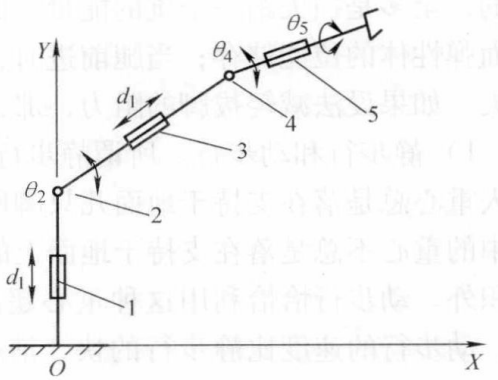



图3-43 具有移动关节和转动关节的工业机器人

1、3—移动关节 2、4、5—转动关节

### 3.5.1 移动关节导轨及转动关节轴承

1. 移动关节导轨

移动关节导轨的目的是在运动过程中保证位置精度和导向，对机器人移动关节导轨有以下几点要求：

① 间隙小或能消除间隙。

② 在垂直于运动方向上的刚度高。

③ 摩擦系数低，但不随速度变化。

④ 高阻尼。

⑤ 移动关节导轨和其辅助元件尺寸小、惯量低。

移动关节导轨有5种：普通滑动导轨、液压动压滑动导轨、液压静压滑动导轨、气浮导轨和滚动导轨。前两种具有结构简单、成本低的优点，但是它必须留有间隙以便润滑，而机器人载荷的大小和方向变化很快，间隙的存在又将会引起坐标位置的变化和有效载荷的变化；另外，这种导轨的摩擦系数又随着速度的变化而变化，在低速时容易产生爬行现象(速度时快时慢)。第三种静压导轨结构能产生预载荷，能完全消除间隙，具有高刚度、低摩擦、高阻尼等优点，但是它需要单独的液压系统和回收润滑油的机构。最近，有人在静压润滑系统中采用了高黏度的润滑剂(如油脂)，并已用到机器人的机械系统中。第四种气浮导轨是不需回收润滑油的，但是它的刚度和阻尼较低，并且对制造精度和环境的空气条件(过滤和干燥)要求较高，不过由于其摩擦系数低(大约为0.0001)，估计将来是会采用的。而目前，第五种滚动导轨在工业机器人中应用最为广泛，因为它具有很多优点：摩擦小，特别是不随速度变化；尺寸小；刚度高，承载能力大；精度和精度保持性高；润滑简单；容易制造成标准件；滚动导轨易加预载、消除间隙、增加刚度。但是，滚动导轨也存在着缺点：阻尼低、对脏物比较敏感。

图3-44a所示为包容式滚动导轨的结构，用支承座支承，可以方便地与任何平面相连。这种情况下，套筒必须是开式的，嵌入在滑枕中，既增强刚度，也方便了与其他元件的连接。由于滑枕的影响，套筒各个方向的刚度是不一样的，如图3-44b所示。

另一种工业机器人经常采用的滚动导轨如图3-45所示。在图3-45a中，滚子安装在定轴上，移动件3沿垂直立柱5移动，固定轴双滚动体2和4支承在移动件的两个凸台上，移动件沿与垂直立柱5相连的轨道1移动。在图3-45b中，导轨上的三个滚动体7沿移动体6滚动，移动体6的转动是由滚动体8限制的。

2. 转动关节轴承

球轴承是机器人和机械手结构中最常用的轴承。它能承受径向和轴向载荷，摩擦较小，

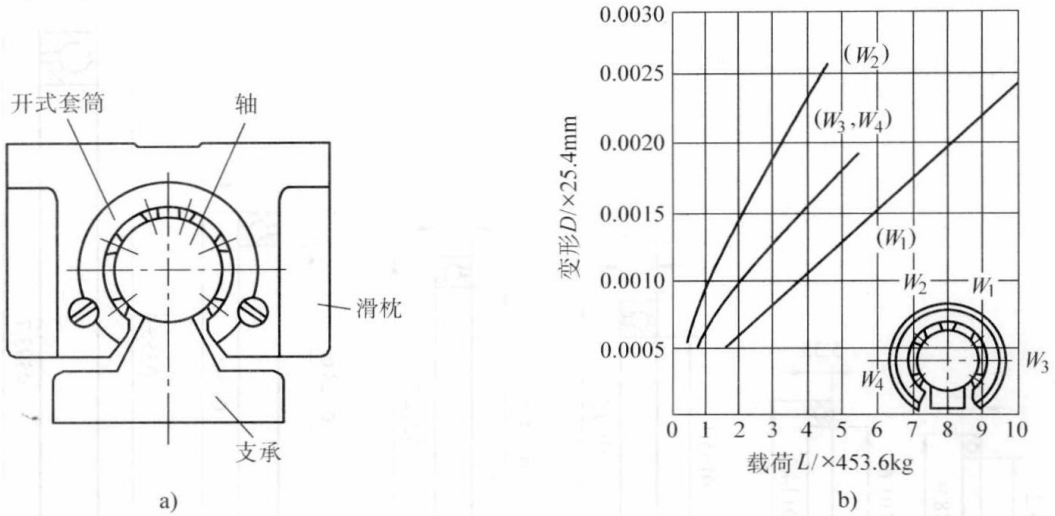



图 3-44　滚动导轨

a）开式套筒　b）开式套筒的刚度特性

对轴和轴承座的刚度不敏感。如图 3-46a 所示为普通深沟球轴承，如图 3-46b 所示为角接触球轴承。这两种轴承的每个球和滚道之间只有两点接触(一点与内滚道接触,另一点与外滚道接触)。为了预载，此种轴承必须成对使用。如图 3-46c 所示为四点接触球轴承。该轴承的滚道是尖拱式半圆，球与每个滚道两点接触，该轴承通过两内滚道之间适当的过盈量实现预紧。因此，此种轴承的优点是无间隙、能承受双向轴向载荷、尺寸小、承载能力和刚度比同样大小的一般球轴承高 1.5 倍；缺点是价格较高。

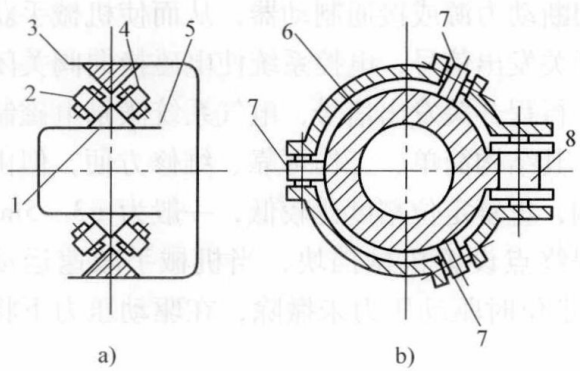



图 3-45　固定轴滚动体的滚动导轨

a）双滚动体　b）三滚动体

1—轨道　2、4—固定轴双滚动体　3—移动件

5—垂直立柱　6—移动体　7—三个滚动体　8—滚动体

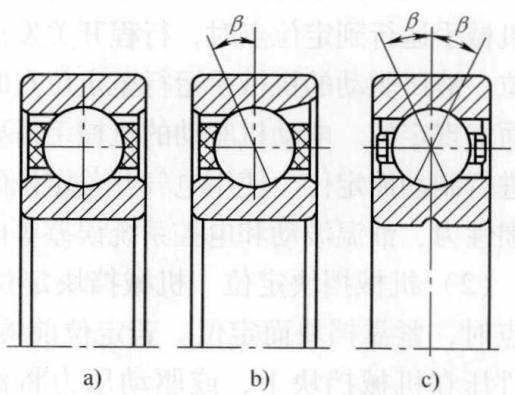



图 3-46　基本耐磨球轴承

a）普通深沟球轴承　b）角接触球轴承

c）四点接触球轴承

采用四点接触式设计以及高精度加工工艺的机器人专用轴承已经问世，这种轴承比同等轴径的常规中系列四点接触球轴承轻 25 倍。机器人专用轴承的结构尺寸和重量如图 3-47 所示，适合于 $\phi$76.2 ~ 355.6mm 的轴径，重量只有 0.07 ~ 2.79kg。

减轻轴承重量的另一种方法是采用特殊材料。目前，正在研究采用氮化硅陶瓷材料制成球和滚道。陶瓷球的弹性模量比钢球约高 50%，但重量比钢球轻很多。

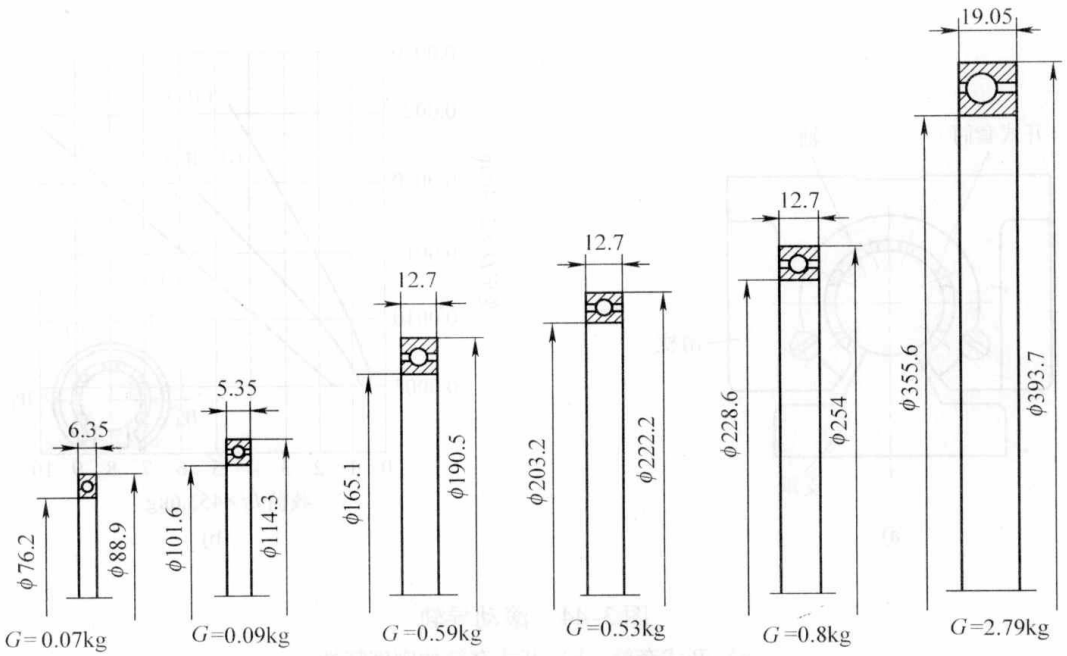



图 3-47 机器人专用轴承的结构尺寸和重量

### 3.5.2 传动件的定位及消隙

1. 传动件的定位

工业机器人的重复定位精度要求较高，设计时应根据具体要求选择适当的定位方法。目前，常用的定位方法有电气开关定位、机械挡块定位和伺服定位。

（1）电气开关定位 电气开关定位是利用电气开关(有触点或无触点)作行程检测元件，当机械手运行到定位点时，行程开关发出信号，切断动力源或接通制动器，从而使机械手获得定位。液压驱动的机械手运行至定位点时，行程开关发出信号，电控系统使电磁换向阀关闭油路而实现定位。电动机驱动的机械手需要定位时，行程开关发出信号，电气系统激励电磁制动器进行制动而定位。使用电气开关定位的机械手，其结构简单、工作可靠、维修方便，但由于受惯性力、油温波动和电控系统误差等因素的影响，重复定位精度比较低，一般为 ±3 ~5mm。

（2）机械挡块定位 机械挡块定位是在行程终点设置机械挡块，当机械手减速运动到终点时，紧靠挡块而定位。若定位前缓冲较好，定位时驱动压力未撤除，在驱动压力下将运动件压在机械挡块上，或驱动压力将活塞压靠在缸盖上就能达到较高的定位精度，最高可达 ±0.02mm。若定位时关闭驱动油路、去掉驱动压力，机械手运动件不能紧靠在机械挡块上，定位精度就会降低，其降低的程度与定位前的缓冲效果和机械手的结构刚性等因素有关。

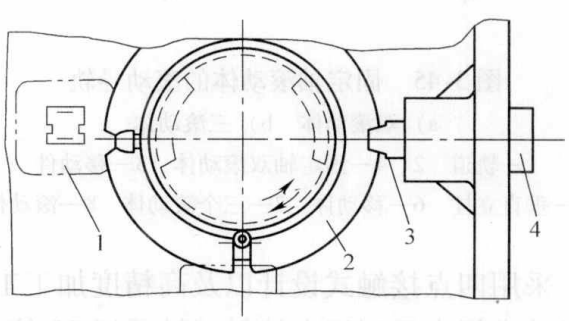



图 3-48 利用插销定位的结构

1—行程节流阀 2—定位圆盘

3—插销 4—定位液压缸

如图 3-48 所示是利用插销定位的结构。机械手运行到定位点前，由行程节流阀实现减速，达到定位点时，定位液压缸将插销推入圆盘的定位孔中实现定位。这种方法的定

位精度相当高。

（3）伺服定位系统　电气开关定位与机械挡块定位只适用于两点或多点定位，而在任意点定位时，要使用伺服定位系统。伺服系统可以输入指令控制位移的变化，从而获得良好的运动特性。它不仅适用于点位控制，而且也适用于连续轨迹控制。

开环伺服定位系统没有行程检测及反馈，是一种直接用脉冲频率变化和脉冲数控制机器人速度和位移的定位方式。这种定位方式抗干扰能力差，定位精度较低。如果需要较高的定位精度(如 ±0.2mm)，则一定要降低机器人关节轴的平均速度。

闭环伺服定位系统具有反馈环节，其抗干扰能力强、反应速度快、容易实现任意点定位。如图 3-49 所示是齿轮齿条反馈式电-液闭环伺服定位系统方框图。齿轮齿条将位移量反馈到电位器上，达到给定脉冲时，电动机及电位器触头停止运转，机械手获得准确定位。

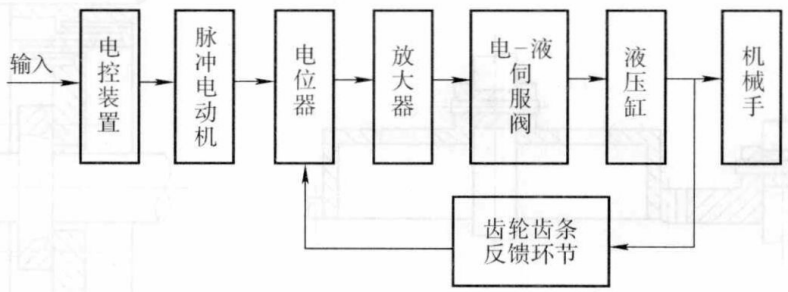



图 3-49　齿轮齿条反馈式电-液闭环伺服定位系统方框图

2. 传动件的消隙

一般传动机构存在有间隙，也叫侧隙。就齿轮传动而言，齿轮传动的侧隙是指一对齿轮中一个齿轮固定不动，另一个齿轮能够作出的最大的角位移。传动的间隙影响了机器人的重复定位精度和平稳性。对机器人控制系统来说，传动间隙会导致显著的非线性变化、振动和不稳定。传动间隙是不可避免的，其产生的主要原因有：由于制造及装配误差所产生的间隙，为适应热膨胀而特意留出的间隙。消除传动间隙的主要途径有：提高制造和装配精度，设计可调整传动间隙的机构，设置弹性补偿零件。下面介绍几种常用的适合工业机器人的传动消隙方法。

（1）消隙齿轮　如图 3-50a 所示的消隙齿轮是由具有相同齿轮参数的并只有一半齿宽的

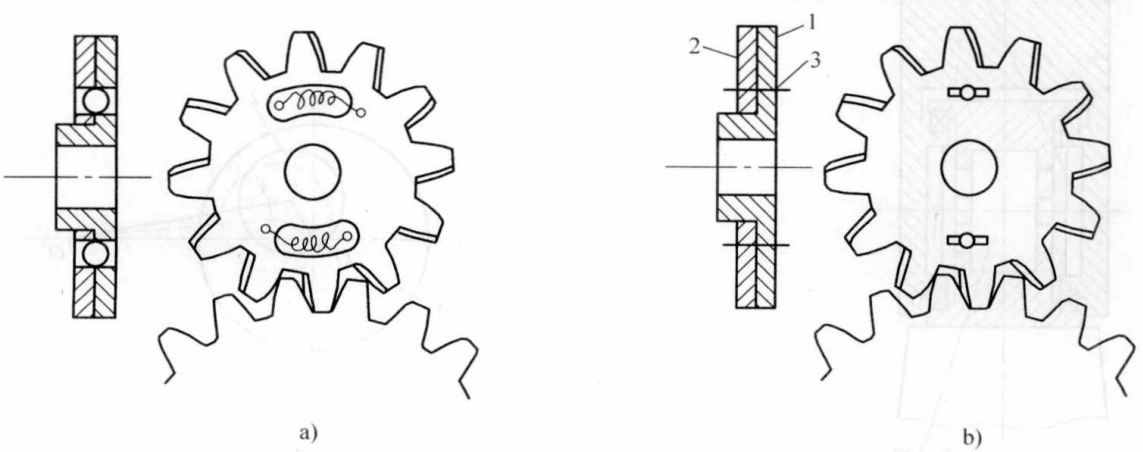



图 3-50　消隙齿轮

a）弹簧消隙　b）螺钉消隙

1、2—薄齿轮　3—螺钉

两个薄齿轮组成。利用弹簧的压力使它们与配对的齿轮两侧齿廓相接触，完全消除了齿侧间隙。如图 3-50b 所示为用螺钉 3 将两个薄齿轮 1 和 2 连接在一起，代替图 3-50a 中的弹簧，其好处是侧隙可以调整。

（2）柔性齿轮消隙　如图 3-51a 所示为一种钟罩形状的具有弹性的柔性齿轮，在装配时对它稍许加些预载，就能引起轮壳的变形，从而引起每个轮齿的双侧齿廓都能啮合，消除了侧隙。如图 3-51b 所示为采用了上述同样的原理却用不同设计形式的径向柔性齿轮，其轮壳和齿圈是刚性的，但与齿轮圈连接处具有弹性。对于给定同样的转矩载荷，为了保证无侧隙啮合，径向柔性齿轮所需要的预载力比钟罩状柔性齿轮的要小得多。

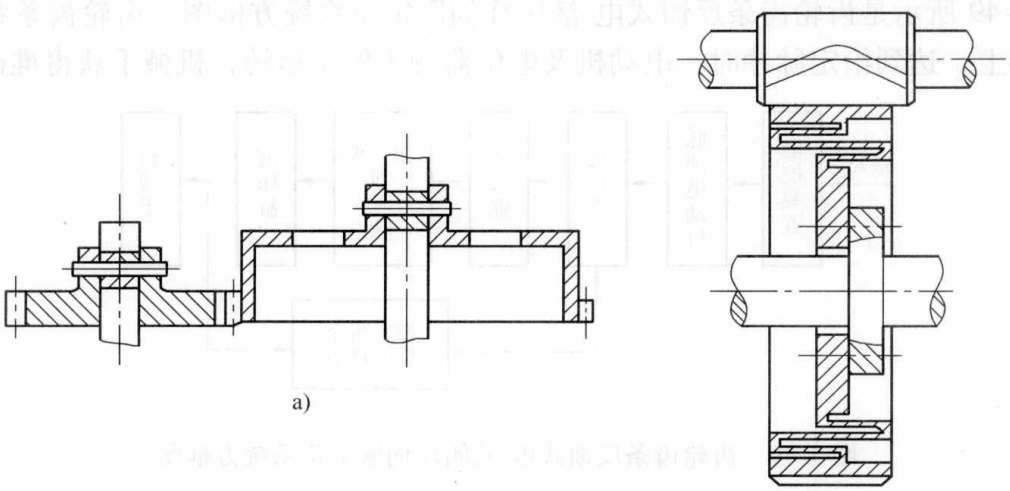



图 3-51　柔性齿轮消隙

a）钟罩状柔性齿轮　b）径向柔性齿轮

（3）对称传动消隙　一个传动系统设置两个对称的分支传动，并且其中必有一个是具有“回弹”能力的。如图 3-52 所示为双谐波传动消隙方法。电动机置于关节中间，电动机双向输出轴传动完全相同的两个谐波减速器，驱动一个手臂的运动。谐波传动中的柔轮弹性很好。

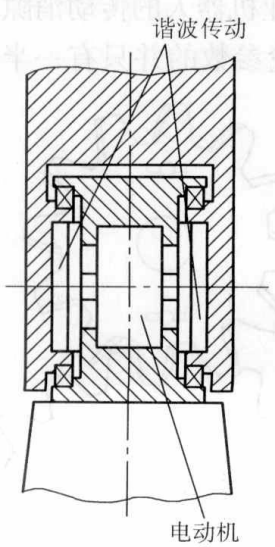



图 3-52　双谐波传动消隙方法

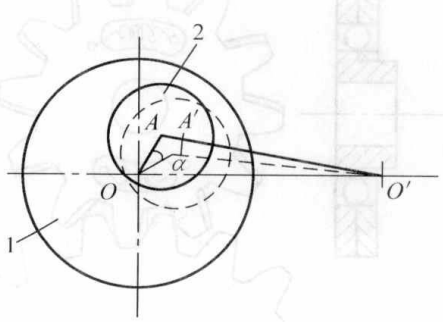



图 3-53　偏心消隙机构

1—支架　2—齿轮

（4）偏心机构消隙　如图3-53所示的偏心机构实际上是中心距调整机构。特别是齿轮磨损等原因造成传动间隙增加时，最简单的方法是调整中心距，这是在PUMA机器人腰转关节上应用的又一实例。图中，$OO'$中心距是固定的；一对齿轮中的一个齿轮装在$O'$轴上，另一个齿轮装在$A$轴上；$A$轴的轴承是偏心地装在可调的支架1上。应用调整螺钉转动支架1时，就可以改变一对齿轮啮合的中心距$AO'$的大小，达到消除间隙的目的。

（5）齿廓弹性覆层消隙　此种消隙是指齿廓表面覆有薄薄一层弹性很好的橡胶层或层压材料，相啮合的一对齿轮加以预载，可以完全消除啮合侧隙。齿轮几何学上的齿面相对滑动，在橡胶层内部发生剪切弹性流动时被吸收，因此，像铝合金甚至石墨纤维增强塑料这种非常轻而不具备良好接触和滑动品质的材料可用来作为传动齿轮的材料，大大地减少了重量和转动惯量。

### 3.5.3　谐波传动

电动机是高转速、低力矩的驱动器，在机器人中要用减速器变成低转速、高力矩的驱动器。

机器人对减速器的要求如下：

1）运动精度高、间隙小，以实现较高的重复定位精度。

2）回转速度稳定、无波动，运动副间摩擦小、效率高。

3）体积小，重量轻，传动转矩大。

减速器减速比$n$的选择应当能最大限度地利用电动机功率，即机械阻抗匹配。减速比的计算公式为

$$n=\sqrt{\frac{I_a}{I_m}}$$

式中　$I_a$——工作臂的惯性矩；

$I_m$——电动机的惯性矩（见图3-54）。

从现有的工业机器人来看，所选的电动机功率总是偏大，减速比也过大。当减速比大时，工作臂的惯性对电动机影响小，但电动机速度容易饱和；当减速比小时，工作臂运动的反作用力对电动机影响大，这需要进行机构的动力学计算。

在工业机器人中，比较合乎要求且常用的减速器是行星齿轮机构和谐波传动机构。

如图3-55所示为行星齿轮传动机构简图。行星齿轮传动尺寸小，惯量低；一级传动比大，结构紧凑；载荷分布在若干个行星齿轮上，内齿轮也具有较高的承载能力。

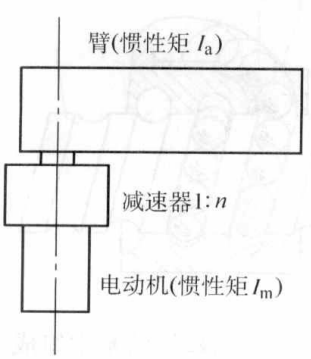



图3-54　机械阻抗匹配

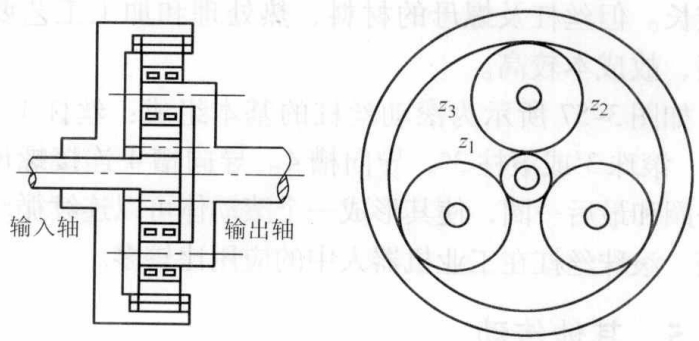



图3-55　行星齿轮传动机构简图

谐波传动在运动学上是一种具有柔性齿圈的行星传动。但是，它在机器人上的应用比行星齿轮传动更加广泛。如图 3-56 所示是谐波传动机构简图。谐波发生器 4 转动，使柔轮 6 上的柔轮齿 7 与圆形花键轮(刚轮)1 上的齿 2 相啮合。输入轴为 3，如果刚轮 1 固定，则轴 5 为输出轴；如果轴 5 固定，则 3 为输出轴。

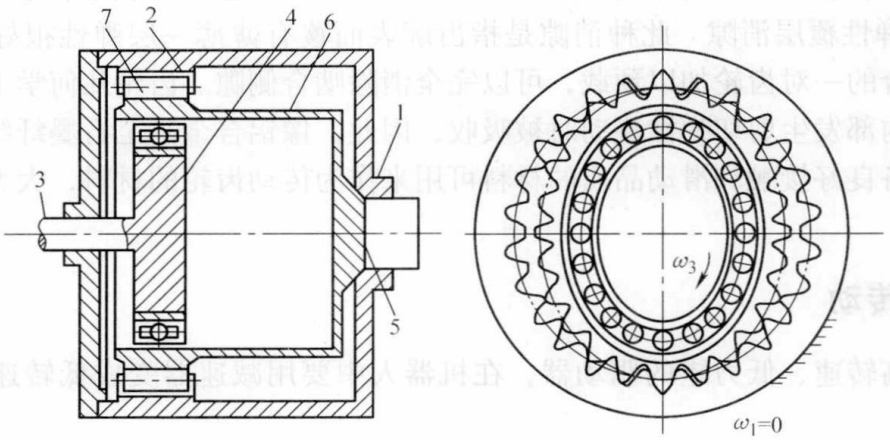



图 3-56 谐波传动机构简图

1—刚轮 2—刚轮齿 3、5—轴 4—谐波发生器 6—柔轮 7—柔轮齿

谐波传动的优点是：尺寸小、惯量低；因为误差均布在多个啮合点上，传动精度高；因为预载啮合，传动侧隙非常小；因为多齿啮合，传动具有高阻尼特性。

谐波传动的缺点是：柔轮的疲劳问题；扭转刚度低；以输入轴速度 2、4、6 倍的啮合频率产生振动；与行星传动相比，谐波传动具有较小的传动间隙和较轻的重量，但是刚度差。

谐波传动机构在机器人技术比较先进的国家已得到了广泛的应用，日本 60% 的机器人驱动装置采用了谐波传动。

### 3.5.4 丝杠螺母副及滚珠丝杠传动

丝杠螺母副传动部件是把回转运动变换为直线运动的重要传动部件。由于丝杠螺母机构是连续的面接触，传动中不会产生冲击，传动平稳、无噪声，并且能自锁。因为丝杠的螺旋升角较小，所以用较小的驱动力矩可获得较大的牵引力。但是，丝杠螺母的螺旋面之间的摩擦为滑动摩擦，故传动效率低。滚珠丝杠传动效率高，而且传动精度和定位精度均很高，在传动时灵敏度和平稳性亦很好；由于磨损小，使用寿命比较长。但丝杠及螺母的材料、热处理和加工工艺要求很高，故成本较高。

如图 3-57 所示为滚动丝杠的基本组成：丝杠 1、螺母 2、滚珠 3′或滚柱 3″、导向槽 4。导向槽 4 连接螺母的第一圈和最后一圈，使其形成一个滚动体可以连续循环的导槽。滚珠丝杠在工业机器人中的应用比较多。

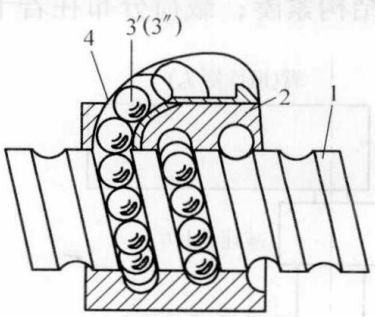



图 3-57 滚动丝杠的基本组成

1—丝杠 2—螺母 3′(或 3″)—滚珠(或滚柱) 4—导向槽

### 3.5.5 其他传动

工业机器人中常用的传动机构除谐波传动机构和丝

杠传动机构外，还有其他的传动机构。下面介绍几种常用的机构。

1）活塞缸和齿轮齿条机构。齿轮齿条机构是通过齿条的往复运动，带动与手臂连接的齿轮做往复回转运动，即实现手臂的回转运动。带动齿条往复运动的活塞缸可以由压力油或压缩空气驱动。

2）链传动、传动带传动、绳传动。它们常用在机器人采用远距离传动的场合。链传动具有高的载荷/重量比；同步传动带传动与链传动相比，其重量轻，传动均匀平稳。

# 第4章　机器人控制技术

## 4.1　机器人控制基础

### 4.1.1　机器人控制系统的特点

机器人的结构一般采用空间开链结构，其各个关节的运动是独立的，为了实现末端点的运动轨迹，需要多关节的运动协调。因此，其控制系统要比普通的控制系统复杂得多，具有以下几个特点：

1）机器人的控制与结构运动学及动力学密切相关。机器人手爪的状态可以在各种坐标下进行描述，应根据需要选择不同的参考坐标系并做适当的坐标变换；经常要求解运动学正问题和逆问题，除此之外还要考虑惯性力、外力(包括重力)、哥氏力、向心力的影响。

2）一个简单的机器人也至少有3~5个自由度，比较复杂的机器人有十几个，甚至几十个自由度。每个自由度一般包含一个伺服机构，它们必须协调起来，组成一个多变量控制系统。

3）把多个独立的伺服系统有机地协调起来，使其按照人的意志行动，甚至赋予机器人一定的“智能”，这个任务只能由计算机来完成。因此，机器人控制系统必须是一个计算机控制系统。

4）描述机器人状态和运动的数学模型是一个非线性模型，随着状态的不同和外力的变化，其参数也在变化，各变量之间还存在耦合。因此，仅仅利用位置闭环是不够的，还要利用速度甚至加速度闭环。系统中经常使用重力补偿、前馈、解耦或自适应控制等方法。

5）机器人的动作往往可以通过不同的方式和路径来完成，因此存在一个“最优”的问题。较高级的机器人可以用人工智能的方法，用计算机建立起庞大的信息库，借助信息库进行控制、决策、管理和操作。根据传感器和模式识别的方法，机器人获得对象及环境的工况，按照给定的指标要求，自动选择最佳的控制规律。

传统的自动机械是以自身的动作为重点，而工业机器人的控制系统更着重本体与操作对象的相互关系。无论以多么高的精度控制手臂，若不能夹持并操作物体到达目的位置，作为工业机器人来说，那就失去了意义，这种相互关系是首要的。

所以，机器人控制系统是一个与运动学和动力学原理密切相关的、有耦合的、非线性的多变量控制系统。由于它的特殊性，经典控制理论和现代控制理论都不能照搬使用。随着实际工作情况的不同，可以采用各种不同的控制方式，从简单的编程自动化、微处理机控制到小型计算机控制等。

### 4.1.2　机器人的控制方式

工业机器人控制方式的分类没有统一的标准。按运动坐标控制的方式来分，有关节空间运动控制、直角坐标空间运动控制；按控制系统对工作环境变化的适应程度来分，有程序控制系统、适应性控制系统、人工智能控制系统；按同时控制机器人数目的多少来分，可分为

单控系统、群控系统。除此以外，通常还按运动控制方式的不同，将机器人控制分为位置控制、速度控制、力控制(包括位置/力混合控制)三类。下面按最后一种分类方法，对工业机器人控制方式做具体分析。

1. 位置控制方式

工业机器人位置控制又分为点位控制和连续轨迹控制两类，如图4-1所示。

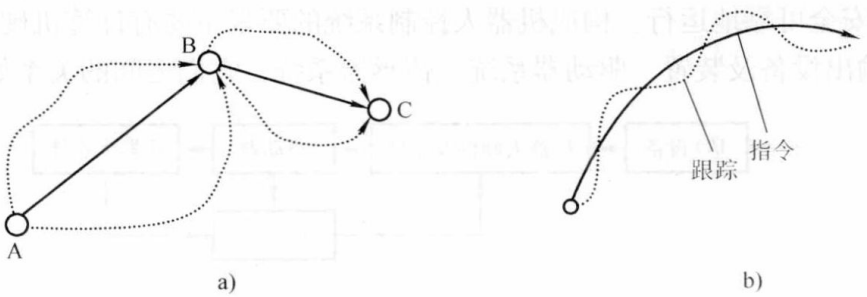



图4-1　位置控制方式

a）点位控制　b）连续轨迹控制

(1) 点位控制　这类控制的特点是仅控制离散点上工业机器人手爪或工具的位姿轨迹，要求尽快而无超调地实现相邻点之间的运动，但对相邻点之间的运动轨迹一般不做具体规定。例如在印制电路板上安插元件以及点焊、搬运和上下料等工作都属于点位式工作方式。点位控制的主要技术指标是定位精度和完成运动所需的时间。一般来说，这种方式比较简单，但是要达到2～3μm的定位精度也是相当困难的。

(2) 连续轨迹控制　这类运动控制的特点是连续控制工业机器人手爪(或工具)的位姿轨迹。在弧焊、喷漆、切割等工作中，要求机器人末端执行器按照示教的轨迹运动。其控制方式类似于控制原理中的跟踪系统，称为轨迹伺服控制。轨迹控制的技术指标是轨迹精度和平稳性。例如在弧焊、喷漆、切割等场所的工业机器人控制均属于这一类。

2. 速度控制方式

对工业机器人的运动控制来说，在位置控制的同时，有时还要进行速度控制。例如在连续轨迹控制方式的情况下，工业机器人按预定的指令，控制运动部件的速度和实行加、减速，以满足运动平稳、定位准确的要求。为了实现这一要求，机器人的行程要遵循一定的速度变化曲线，如图4-2所示。由于工业机器人是一种工作情况(行程负载)多变、惯性负载大的运动机械，要处理好快速与平稳的矛盾，必须控制起动加速和停止前的减速这两个过渡运动区段。

3. 力(力矩)控制方式

在完成装配、抓放物体等工作时，除了要准确定位之外，还要求使用适度的力或力矩进行工作，这时就要利用力(力矩)伺服方式。这种方式的控制原理与位置伺服控制原理基本相同，只不过输入量和反馈量不是位置信号，而是力(力矩)信号，因此系统中必须有力(力矩)传感器。有时也利用接近、滑动等传感功能进行自适应式控制。

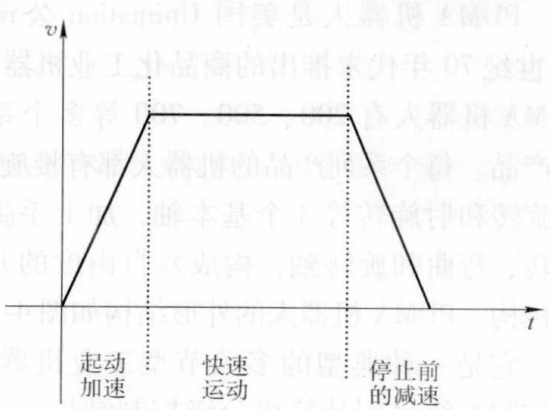



图4-2　机器人行程的速度-时间曲线

### 4.1.3 机器人控制系统结构和工作原理

一个工业机器人系统通常分为机构本体和控制系统两大部分。控制系统的主要作用是根据用户的指令对机构本体进行操作和控制，完成作业的各种动作。控制系统的性能在很大程度上决定了机器人系统的性能。一个良好的控制器要有灵活、方便的操作方式，多种形式的运动控制方式和安全可靠地运行。构成机器人控制系统的要素主要有计算机硬件系统及操作控制软件、输入/输出设备及装置、驱动器系统、传感器系统，它们之间的关系如图 4-3 所示。

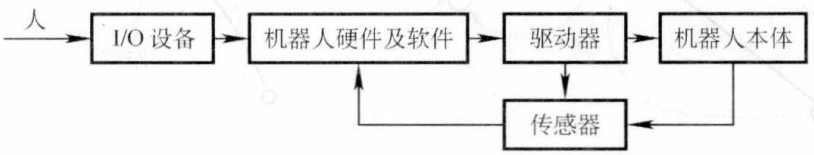



图 4-3 机器人控制系统的要素

工业机器人控制系统是机器人的重要组成部分，以完成特定的工作任务，其基本功能如下：

① 记忆功能。包括存储作业顺序、运动路径、运动方式、运动速度和与生产工艺有关的信息。

② 示教功能。包括离线编程、在线示教、间接示教，在线示教包括示教盒和导引示教两种。

③ 与外围设备联系功能。包括输入和输出接口、通信接口、网络接口、同步接口。

④ 坐标设置功能。包括关节、绝对用户自定义坐标系等。

⑤ 人机接口。包括示教盒、操作面板、显示器等。

⑥ 传感器接口。包括位置检测、视觉、触觉、力觉等。

⑦ 位置伺服功能。包括机器人多轴联动、运动控制、速度和加速度控制、动态补偿等。

⑧ 故障诊断安全保护功能。包括运行时系统状态监视、故障状态下的安全保护和故障自诊断。

下面以 PUMA-562 机器人为例，来说明机器人的控制系统的结构和工作原理。

PUMA 机器人是美国 Unimation 公司于 20 世纪 70 年代末推出的商品化工业机器人。PUMA 机器人有 200、500、700 等多个系列的产品。每个系列产品的机器人都有腰旋转、肩旋转和肘旋转等 3 个基本轴，加上手腕的回转、弯曲和旋转轴，构成六自由度的开链式机构。PUMA 机器人的外形结构如图 4-4所示。它是一种典型的多关节型工业机器人，其控制系统采用计算机分级控制结构，使用 VAL 机器人编程语言。由于 PUMA 机器人具有速度快、精度高、灵活精巧、编程控制容

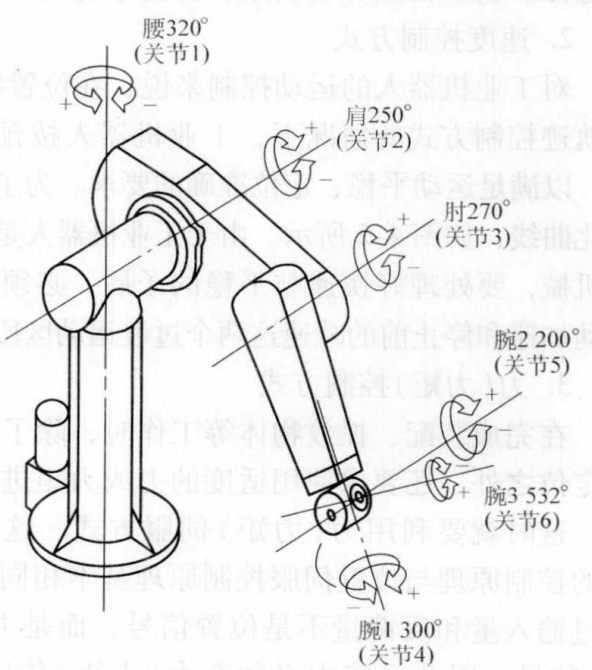



图 4-4 PUMA 机器人外形结构

易以及 VAL 语言系统功能完善等特点，它在工业生产、实验室研究中得到了广泛的应用。

PUMA-562 机器人控制器原理框图如图 4-5 所示。图中除 I/O 设备和伺服电动机外，其余各部件均安装在控制柜内。PUMA-562 机器人控制器为多 CPU 两级控制结构，上位计算机配有 64KB RAM 内存、2 块串口接口板、1 块 I/O 并行接口板、1 块与下位机通信的 A 接口板。上位计算机系统采用 Q-Bus 总线作为系统总线。

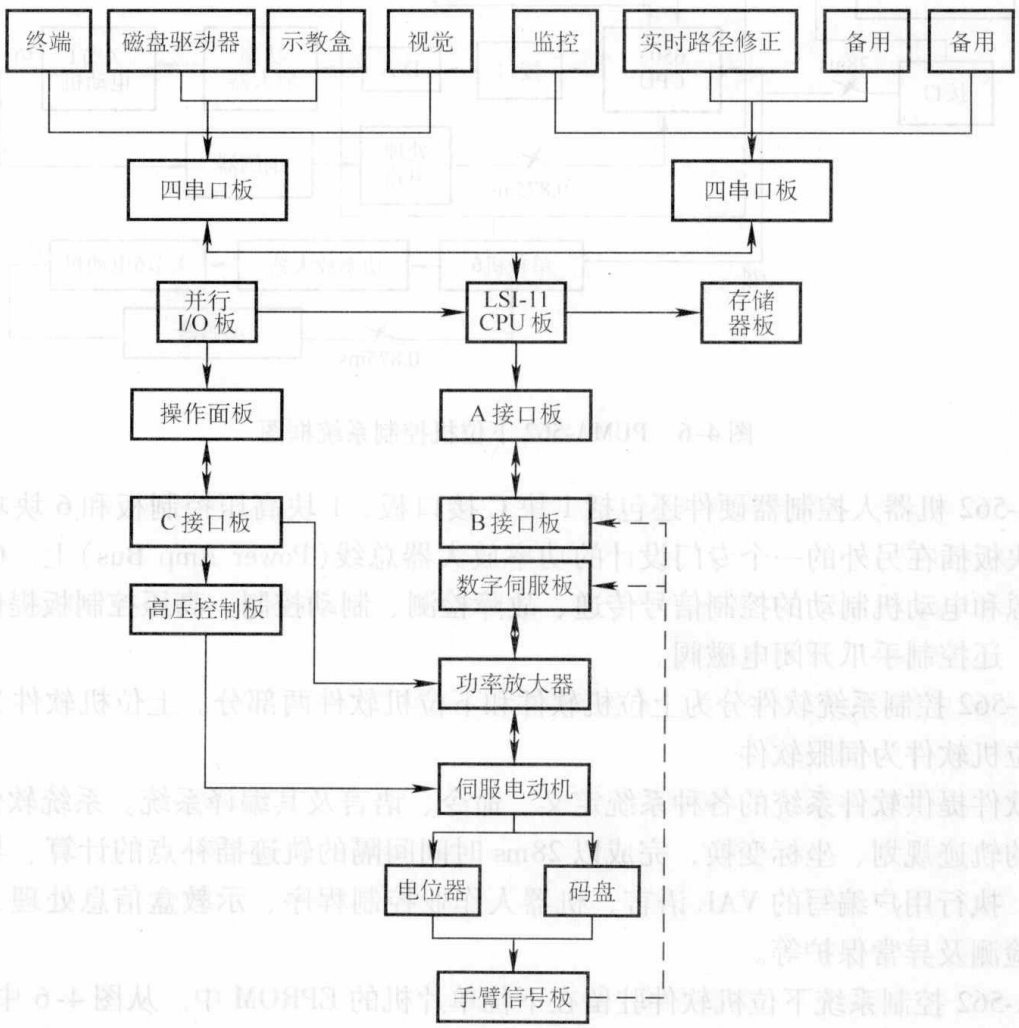



图 4-5　PUMA-562 机器人控制器原理框图

与上位机连接的 I/O 设备有 CRT 显示器和键盘、示教盒、软盘驱动器，通过串口板还可接入视觉传感器、高层监控计算机、实时路径修正控制计算机。

接口板 A、B 是上、下位机通信的桥梁。上位机经过 A、B 接口板向下位机发送命令和读取下位机信息。A 板插在上位机的 Q-Bus 总线上，B 板插在下位机的 J-Bus 总线上，A、B 接口板之间通过扁平信号电缆通信。B 板上有一个 A/D 转换器，用于读取 B 接口板传递的各关节电位器信息，电位器用于各关节绝对位置的定位。

PUMA-562 下位机控制系统框图如图 4-6 所示。下位计算机系统由 6 块以 6503CPU 为核心的单板机组成，每块板负责一个关节的驱动，构成 6 个独立的数字伺服控制回路。下位机及 B 接口板、手臂信号板插在专门设计的 J-Bus 总线上。下位机的每块单板机上都有一个 D/A 转换器，其输出分别接到 6 块功率放大器板的输入端。功率放大器输出与 6 台直流伺服电动机相接，用于检测位置的光电码盘与电动机同轴旋转，6 路码盘反馈信号经手臂信号接

口板滤波处理后，由 J-Bus 通道送往各数字伺服板。用于检测各关节绝对位置的电位器滑动臂是装在齿轮轴上。电位器信号经由手臂信号板 J-Bus 通道，被送往 B 接口板。

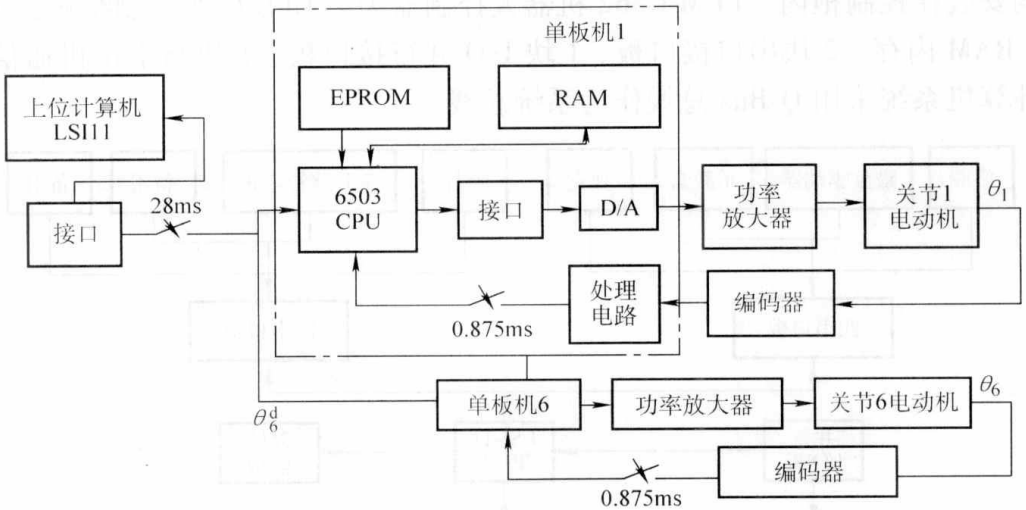



图 4-6 PUMA-562 下位机控制系统框图

PUMA-562 机器人控制器硬件还包括 1 块 C 接口板、1 块高压控制板和 6 块功率放大器板，这几块板插在另外的一个专门设计的功率放大器总线(Power Amp Bus)上。C 接口板用于手臂电源和电动机制动的控制信号传递、故障检测、制动控制。高压控制板提供电动机所需的电压，还控制手爪开闭电磁阀。

PUMA-562 控制系统软件分为上位机软件和下位机软件两部分。上位机软件为系统编程软件，下位机软件为伺服软件。

系统软件提供软件系统的各种系统定义、命令、语言及其编译系统。系统软件针对各种运动形式的轨迹规划、坐标变换，完成以 28ms 时间间隔的轨迹插补点的计算、与下位机的信息交换、执行用户编写的 VAL 语言、机器人作业控制程序、示教盒信息处理、机器人标定、故障检测及异常保护等。

PUMA-562 控制系统下位机软件驻留在下位单片机的 EPROM 中。从图 4-6 中可以看到，下位机的关节控制器是各自独立的，即各单片机之间没有信息交换。上位机每隔 28ms 向 6 块单板机发送轨迹设定点信息，6503 微处理器计算关节误差，以 0.875ms 的周期伺服控制各关节的运动。

和一般工业机器人一样，PUMA 机器人采用了独立关节的 PID 伺服控制。由于机器人的非线性特点，即惯性力、关节间的耦连及重力均与机器人的位姿(或位姿和速度)有关，都是变化的，但伺服系统的反馈系数是确定不变的，因此这种控制方法难以保证在高速、变速或变载荷情况下的精度。

### 4.1.4 机器人单关节位置伺服控制

大部分机器人的控制系统像 PUMA 机器人一样，分为上位机和下位机。从运动控制的角度看，上位机作运动规划，并将手部的运动转化成各关节的运动，按控制周期传给下位机；下位机进行运动的插补运算及对关节进行伺服控制，所以常用多轴运动控制器作为机器人的关节控制器。多轴运动控制器的各轴伺服控制也是独立的，每个轴对应一个关节。这种

控制方法并没有考虑实际机器人各关节的耦合作用，因此对于高速运动、变载荷控制的伺服性能也不会太好。实际上，可以对单关节机器人作控制设计，对于多关节、高速变载荷的情况，可以在单关节控制的基础上作补偿。

控制器设计的目的是使控制系统具有良好的伺服性能。机器人伺服系统主要由驱动器、减速器及传动机构、力传感器、角度(位置)传感器、角速度(速度)传感器和计算机组成。其中，传感器可以提供机器人各个臂的位置、运动速度或力的大小信息，将它们与给定的位置、速度或力相比较，则可以得出误差信息。计算机及其接口电路用于采集数据和提供控制量，各种控制算法是由软件完成的。驱动器是系统的控制对象，传动机构及机器人的手臂则是驱动器的负载。目前应用最多的是直流电动机驱动和交流电动机驱动。

1. 工业机器人对关节驱动电动机的要求

机器人电动伺服驱动系统是利用各种电动机产生的力矩和力，直接或间接地驱动机器人本体，以获得机器人的各种运动的执行机构。

对工业机器人关节驱动的电动机，要求有最大功率重量比和转矩惯量比、高起动转矩、低惯量和较宽广且平滑的调速范围。特别是像机器人末端执行器(手爪)，应采用体积、重量尽可能小的电动机。尤其是要求快速响应时，伺服电动机必须具有较高的可靠性和稳定性，并且具有较大的短时过载能力。这是伺服电动机在工业机器人中应用的先决条件。

机器人对关节驱动电动机的主要要求归纳如下：

① 快速性。电动机从获得指令信号到完成指令所要求的工作状态的时间应短。响应指令信号的时间越短，电伺服系统的灵敏性越高，快速响应性能越好。一般是以伺服电动机的机电时间常数的大小来说明伺服电动机快速响应的性能的好坏。

② 起动转矩惯量比大。在驱动负载的情况下，要求机器人的伺服电动机的起动转矩大、转动惯量小。

③ 控制特性的连续性和直线性。随着控制信号的变化，电动机的转速能连续变化，有时还需转速与控制信号成正比或近似成正比。

④ 调速范围宽。能使用于1:1000～1:10000的调速范围。

⑤ 体积小、重量小、轴向尺寸短。

⑥ 能经受得起苛刻的运行条件，可进行十分频繁的正、反向和加、减速运行，并能在短时间内承受过载。

2. 工业机器人驱动所采用的电动机

目前，由于高起动转矩、大转矩、低惯量的交、直流伺服电动机在工业机器人中得到广泛应用，一般负载为100kg以下的工业机器人大多采用电伺服驱动系统。所采用的关节驱动电动机主要是交流伺服电动机、直流伺服电动机、直接驱动电动机和步进电动机。其中，交流伺服电动机、直流伺服电动机、直接驱动电动机(DD)均采用位置闭环控制，一般应用于高精度、高速度的机器人驱动系统中；步进电动机驱动系统多应用于对精度、速度要求不高的小型简易机器人开环系统中。交流伺服电动机由于采用电子换向，无换向火花，在易燃易爆环境中得到了广泛的使用。机器人关节驱动电动机的功率范围一般为0.1～10kW。在工业机器人驱动系统中，所采用的电动机可细分为以下几种：

① 交流伺服电动机。包括同步型交流伺服电动机等。

② 直流伺服电动机。包括小惯量永磁直流伺服电动机、印制绕组直流伺服电动机、大

惯量永磁直流伺服电动机、空心杯电枢直流伺服电动机。

③ 步进电动机。包括永磁感应步进电动机。

机器人驱动系统要求传动系统间隙小、刚度大、输出转矩高以及减速比大，常用的减速机构有以下几种：

① RV 减速机构。

② 谐波减速机构。

③ 摆线针轮减速机构。

④ 行星齿轮减速机构。

⑤ 无侧隙减速机构。

⑥ 蜗轮减速机构。

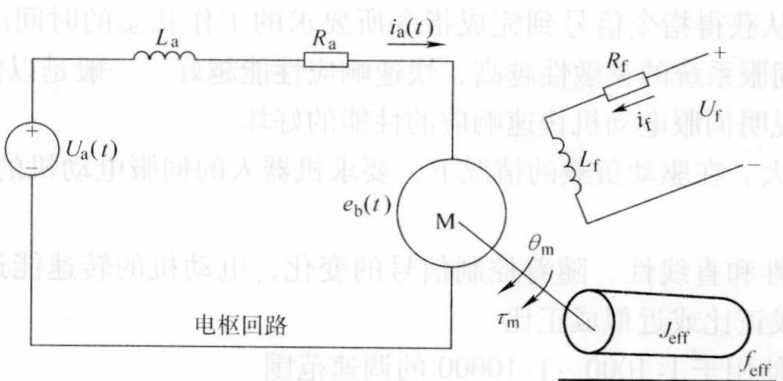
⑦ 滚珠丝杠机构。

⑧ 金属带/齿形减速机构。

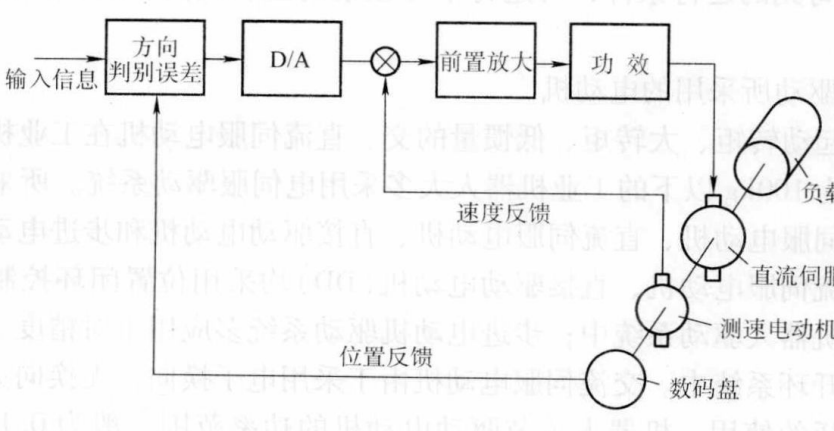
⑨ 球减速机构。

下面以直流伺服电机驱动为例，介绍机器人单关节伺服控制系统。

如图 4-7 所示为驱动单关节的电枢控制直流电动机的等效电路，如图 4-8 所示为机械传动系统图。两图中符号含义如下：$U_a$为电枢电压，$U_f$为激磁电压，$L_a$为电枢电感，$L_f$为激磁绕组电感，$R_a$为电枢电阻，$R_f$为激磁电阻，$i_a$为电枢电流，$i_f$为激磁电流，$e_b$为反电势，$\tau_m$




a)




b)

图 4-7 直流电动机驱动

a）电枢绕组等效电路 b）原理图

为电动机输出力矩，$\theta_m$为电动机轴角位移，$\theta_L$为负载轴角位移，$J_m$为折合到电动机轴的惯性矩，$J_L$为折合到负载轴的负载惯性矩，$f_m$为折合到电动机轴的粘性摩擦系数，$f_L$为折合到负载轴的粘性摩擦系数，$z_m$为电动机齿轮齿数，$z_L$为负载齿轮齿数。

从以上所列参数可以得出：

① 从电动机轴到负载轴的传动比：

$$n=\frac{z_m}{z_L} \tag{4-1}$$

② 折合到电动机轴上的总的等效惯性矩$J_{eff}$和等效摩擦系数$f_{eff}$：

$$J_{eff}=J_m+n^2J_L \tag{4-2}$$

$$f_{eff}=f_m+n^2f_L \tag{4-3}$$

由图4-7和图4-8可以看出，单关节控制系统是一个典型的机电一体化系统，其机械部分的模型由电动机轴上的力矩平衡方程描述。

③ 电动机电枢绕组内的电压平衡方程：

$$U_a(t)=R_ai_a(t)+L\frac{\mathrm{d}i_a(t)}{\mathrm{d}t}+e_b(t) \tag{4-4}$$

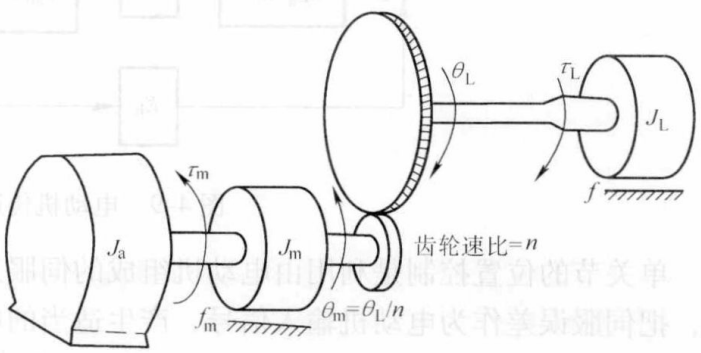



图4-8　机械传动系统

④ 力矩平衡方程：

$$\tau_m(t)=J_{eff}\ddot{\theta}_m+f_{eff}\dot{\theta}_m \tag{4-5}$$

⑤ 耦合关系。

机械部分和电气部分的耦合包括两个方面：一方面是电气对机械的作用，表现在由于电动机轴上产生的力矩随电枢电流线性变化；另一方面是机械对电气的作用，表现在电动机的反电动势与电动机的角速度成正比，即

$$\tau_m(t)=K_ai_a(t) \tag{4-6}$$

$$e_b(t)=K_b\dot{\theta}_m(t) \tag{4-7}$$

式中　$K_a$——电动机电流—力矩比例常数；

$K_b$——感应电势系数。

对式(4-4)～式(4-7)进行拉普拉斯变换，得：

$$\begin{aligned}I_a(s)&=\frac{U_a(s)-U_b(s)}{R_a+sL_a}\\ T_m(s)&=s^2J_{eff}\theta_m(s)+sf_{eff}\theta_m(s)\\ T_m(s)&=K_aI_a(s)\\ E_b(s)&=sK_b\theta_m(s)\end{aligned} \tag{4-8}$$

重新组合式(4-8)中各方程，得到从电枢电压到电动机轴角位移的传递函数：

$$\frac{\theta_m(s)}{U_a(s)}=\frac{K_a}{s[s^2J_{eff}L_a+(L_af_{eff}+R_aJ_{eff})s+R_af_{eff}+K_aK_b]} \tag{4-9}$$

由于电动机的电气时间常数大大小于其机械时间常数，故可以忽略电枢的电感 $L_a$ 的作用。上面方程简化为

$$\frac{\theta_m(s)}{U_a(s)}=\frac{K_a}{s(sR_aJ_{eff}+R_af_{eff}+K_aK_b)} \tag{4-10}$$

由于控制系统的输出是关节角位移 $\theta_L(s)$，它与电枢电压 $U_a(s)$ 之间的传递关系为：

$$\frac{\theta_L(s)}{U_a(s)}=\frac{nK_a}{s(sR_aJ_{eff}+R_af_{eff}+K_aK_b)} \tag{4-11}$$

这一方程代表了直流电动机所加电压与关节角位移之间的传递函数。系统的框图如图 4-9 所示。

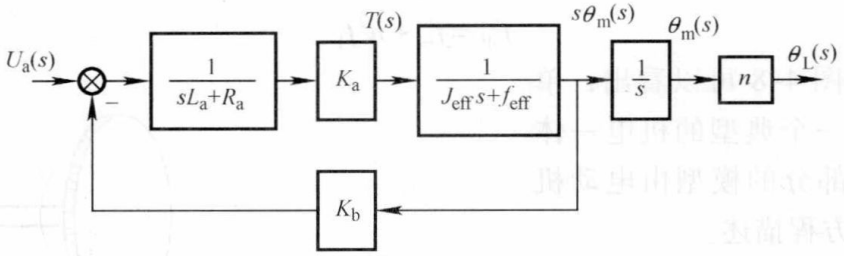



图 4-9　电动机传递函数

单关节的位置控制是利用由电动机组成的伺服系统使关节的实际角位移跟踪预期的角位移，把伺服误差作为电动机输入信号，产生适当的电压，即

$$U_a(t)=\frac{K_pe(t)}{n}=\frac{K_p[\theta_L^d(t)-\theta_L(t)]}{n} \tag{4-12}$$

式中　$K_p$——位置反馈增益(V/rad)；

$e(t)=\theta_L^d(t)-\theta_L(t)$——系统误差；

$n$——传动比。

实际上“单位负反馈”把单关节机器人系统从开环系统转变为闭环，如图 4-10 所示。关节角度的实际值可用光电编码器或电位器测出。

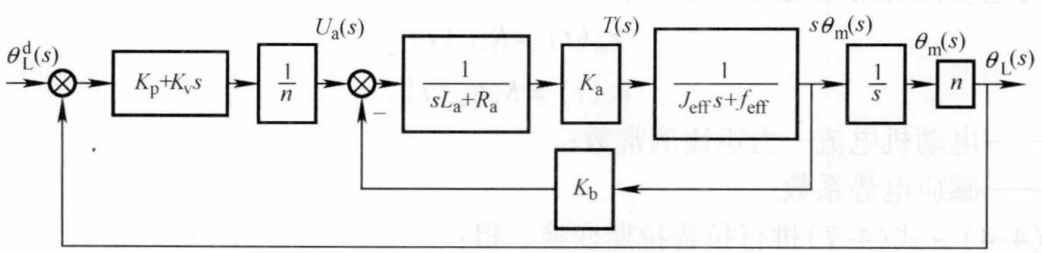



图 4-10　单关节反馈控制

对式(4-12)进行拉普拉斯变换，得：

$$U_a(s)=\frac{K_pE(s)}{n}=\frac{K_p[\theta_L^d(t)-\theta_L(t)]}{n} \tag{4-13}$$

将式(4-13)代入式(4-11)中，得出由误差驱动信号 $E(s)$ 与实际位移 $\theta_L(s)$ 之间的开环传递函数：

$$G_P(s)=\frac{\theta_L(s)}{E(s)}=\frac{K_aK_p}{s(sR_aJ_{eff}+R_af_{eff}+K_aK_b)} \tag{4-14}$$

由此可以得出系统的闭环传递函数，它表示实际角位移 $\theta_L(s)$ 与预期角位移 $\theta_L^d(s)$ 之间的关系：

$$\frac{\theta_L(s)}{\theta_L^d(s)}=\frac{\dfrac{K_aK_p}{R_aJ_{eff}}}{s^2+\dfrac{s(R_aJ_{eff}+K_aK_b)}{R_aJ_{eff}}+\dfrac{K_aK_p}{R_aJ_{eff}}} \tag{4-15}$$

式(4-15)表明了单关节机器人的比例控制器是一个二阶系统。当系统参数均为正时，系统总是稳定的。为了改善系统的动态性能，减少静态误差，可以加大位置反馈增益 $K_p$ 和增加阻尼，再引入位置误差的导数(角速度)作为反馈信号。关节角速度常用测速电动机测出，也可用两次采样周期内的位移数据来近似表示。加上位置反馈和速度反馈之后，关节电动机上所加的电压与位移误差和速度误差成正比，即

$$U_a(t)=\frac{K_pe(t)+K_v\dot{e}(t)}{n}=\frac{K_p[\theta_L^d(t)-\theta_L(t)]+K_v[\dot{\theta}_L^d(t)-\dot{\theta}_L(t)]}{n} \tag{4-16}$$

式中　$K_v$——速度反馈增益；

$n$——传动比。

对式(4-16)进行拉普拉斯变换，再把 $U_a(s)$ 代入式(4-10)中，可得误差驱动信号 $E(s)$ 与实际位移之间的传递函数：

$$G_{pd}(s)=\frac{\theta_L(s)}{E(s)}=\frac{K_aK_vs+K_aK_p}{s(sR_aJ_{eff}+R_af_{eff}+K_aK_b)} \tag{4-17}$$

由此可得出表示实际角位移 $\theta_L(s)$ 与预期角位移 $\theta_L^d(s)$ 之间的闭环传递函数：

$$\frac{\theta_L(s)}{\theta_L^d(s)}=\frac{K_aK_vs+K_aK_p}{s^2R_aJ_{eff}+s(R_af_{eff}+K_aK_b+K_aK_v)+K_aK_p} \tag{4-18}$$

显然，当 $K_v=0$ 时，式(4-18)变为式(4-15)。

式(4-18)所代表的是一个二阶系统，它具有一个有限零点 $s=-K_p/K_v$，位于 $s$ 平面的左半平面。系统可能有大的超调量和较长的稳定时间，随零点的位置而定。如图4-11所示为操作臂控制系统受到扰动 $D(s)$ 的影响的反馈控制框图。这些扰动是由重力负载和连杆的离心力引起的。由于这些扰动，电动机轴输出力矩的一部分被用于克服各种扰动力矩。由式(4-8)得出：

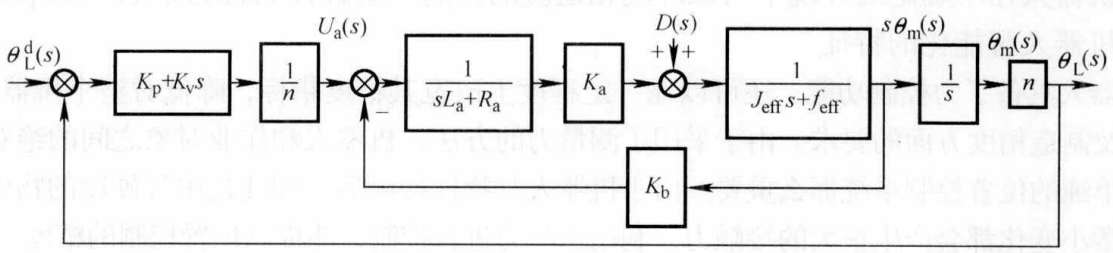



图4-11　操作臂控制系统受到扰动 $D(s)$ 的影响的反馈控制框图

$$T_{mn}(s)=s^2J_{eff}\theta_m(s)+sf_{eff}\theta_m(s)+D(s) \tag{4-19}$$

式中　$D(s)$——扰动的拉普拉斯变换。

只有扰动作用下，系统输出角位移的拉氏变换为

$$\theta_L(s)=\frac{-nR_aD(s)}{s^2R_aJ_{eff}+s(R_af_{eff}+K_aK_b+K_aK_v)+K_aK_p} \tag{4-20}$$

根据式(4-18)和式(4-20)，运用叠加原理，从这两种输入可以得出关节的实际位移：

$$\theta_{\mathrm{L}}(s)=\frac{-nR_{\mathrm{a}}D(s)+(K_{\mathrm{a}}K_{\mathrm{v}}s+K_{\mathrm{a}}K_{\mathrm{p}})\theta_{\mathrm{L}}^{\mathrm{d}}(s)}{s^2R_{\mathrm{a}}J_{\mathrm{eff}}+s(R_{\mathrm{a}}J_{\mathrm{eff}}+K_{\mathrm{a}}K_{\mathrm{b}}+K_{\mathrm{a}}K_{\mathrm{v}})+K_{\mathrm{a}}K_{\mathrm{p}}} \tag{4-21}$$

最重要的是上述闭环系统的特性，尤其是在阶跃输入和斜坡输入产生的系统稳态误差和位置与速度反馈增益的极限。

### 4.1.5 机器人的力控制

目前，用于喷漆、搬运、点焊等操作的工业机器人只具有简单的轨迹控制。轨迹控制适用于机器人的末端执行器在空间沿某一规定的路径运动，并且在运动过程中不与任何外界物体接触。对于执行擦玻璃、转动曲柄、拧螺钉、研磨、打毛刺、装配零件等作业的机器人，其末端执行器与环境之间存在力的作用，且环境中的各种因素不确定，此时仅使用轨迹控制就不能满足要求。执行这些任务时，必须让机器人末端执行器沿着预定的轨迹运动，同时提供必要的力，使它能克服环境中的阻力或符合工作环境的要求。为了在位置控制系统中能对力进行控制，需要设计一套十分精密的控制装置，同时必须掌握确切的位置参数和环境刚度参数。要制造出这样高精度的机器人，只有放弃对机器人的尺寸、重量方面的追求，并且要付出很高的造价。而采用对机器人末端执行器上的接触力直接进行控制的方法，可以容易地解决此类问题。

以擦玻璃为例，如果机器人手爪抓着一块很大很软的海绵，并且知道玻璃的精确位置，那么通过控制手爪相对于玻璃的位置可以完成擦玻璃作业；但如果作业是用刮刀刮去玻璃表面上的油漆，而且玻璃表面空间位置不准确，或者手爪的位置误差比较大，由于存在沿垂直玻璃表面的误差，作业执行的结果不是刮刀接触不到玻璃就是刮刀把玻璃打碎。因此，根据玻璃位置来控制擦玻璃机器人是行不通的。比较好的方法是控制工具与玻璃之间的接触力，这样即便是工作环境(如玻璃)位置不准确时，也能保持工具与玻璃正确接触。相应地，机器人不但要有轨迹控制的功能，而且要有力控制的功能。

机器人具备了力控制功能后，能胜任更复杂的操作任务，如完成零件装配等复杂作业。如果在机械手上安装力传感器，机器人控制器就能够检测出机械手与环境的接触状态，可以进行使机器人在不确定的环境下与该环境相适应的控制。这种控制称为柔顺(Compliance)控制，是机器人智能化的特征。

机器人具备了力控制功能，还可以在一定程度上放宽其精度指标，降低对整个机器人体积、重量以及制造精度方面的要求。由于采用了测量力的方法，机器人和作业对象之间的绝对位置误差不像单纯的位置控制系统那么重要。由于机器人与物体接触后，即便是中等硬度的物体，相对位置的微小变化都会产生很大的接触力，利用这些力进行控制，能提高位置控制的精度。

1. 力控制基本概念

机器人运动学和动力学并没有讨论机器人与环境接触时的关系，但由于力只有在两个物体接触时才产生，因此机器人的力控制是将环境考虑在内的控制问题，也是在环境约束条件下的控制问题。

机器人在执行任务时，一般受到两种约束：一种是自然约束，它是指机器人手爪(或工具)与环境接触时，环境的几何特性构成对作业的约束；另一种是人为约束，它是人为给定的约束，用来描述机器人预期的运动或施加的力。

自然约束是在某种特定的接触情况下自然发生的约束，与机器人的运动轨迹无关。例如当机器人手部与固定刚性表面接触时，不能自由穿过这个表面，称为自然位置约束；若这个表面是光滑的，则不能对手爪施加沿表面切线方向的力，称为自然力约束。一般可将接触表面定义为一个广义曲面，沿曲面法线方向定义自然位置约束，沿切线方向定义自然力约束。

人为约束与自然约束一起规定出希望的运动或作用力，每当指定一个需要的位置轨迹或力时，就要定义一组人为约束条件。人为约束也定义在广义曲面的法线和切线方向上，但人为力约束在法线方向上，人为位置约束在切线方向上，以保证与自然约束相容。

图4-12表示出了旋转曲柄和拧螺丝两种作业的自然约束和人为约束。在图4-12a中，约束坐标系建立在曲柄上，随曲柄一起运动，规定 $C_x$ 方向总是指向曲柄的轴心。当机器人手爪紧握曲柄的手把摇着曲柄转动时，手把可以绕自身的轴心转动。在图4-12b中，约束坐标系建在螺丝刀顶端，在工作时随螺丝刀一起转动。为了不让螺丝刀从螺钉槽中滑出，在方向 $C_y$ 的力为零，作为约束条件之一。在约束坐标系中，某个自由度若有自然位置约束，则在该自由度上就应规定人为力约束，反之亦然。为适应位置和力的约束，在约束坐标系中的任何给定自由度都要受控制。机器人的位置约束用手爪在约束坐标系中的速度分量 $[v_x \quad v_y \quad v_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$ 表示，力约束则用在约束坐标系中的力/力矩分量 $[f_x \quad f_y \quad f_z \quad \tau_x \quad \tau_y \quad \tau_z]^T$ 表示。

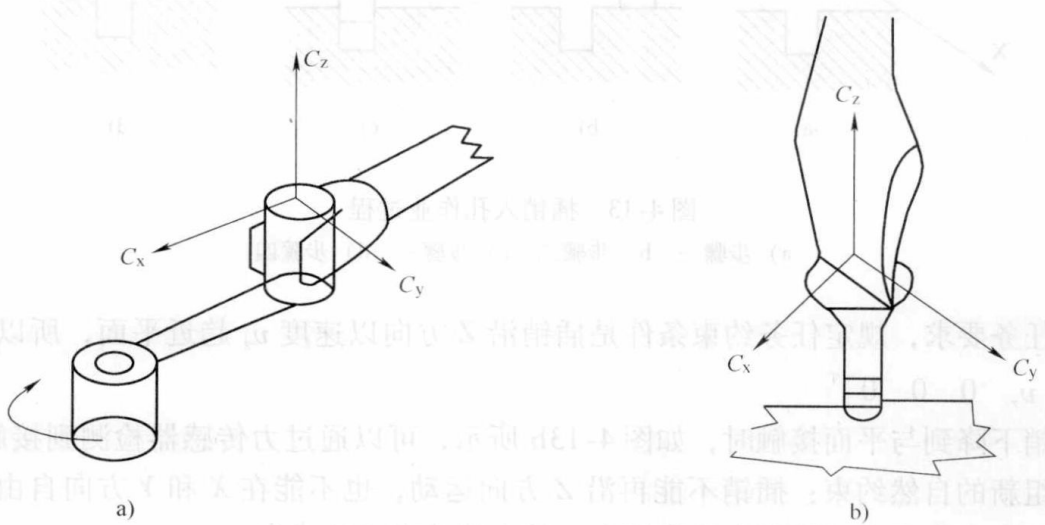



图4-12　两种作业的自然约束和人为约束

a）旋转曲柄　b）拧螺钉

在图4-12a中，自然约束：$v_x=0$　$v_z=0$　$\omega_x=0$　$\omega_y=0$　$f_y=0$　$\tau_z=0$

人为约束：$v_y=0$　$\omega_z=\alpha_1$　$f_x=0$　$f_z=0$　$\tau_x=0$　$\tau_y=0$

在图4-12b中，自然约束：$v_x=0$　$\omega_x=0$　$\omega_y=0$　$v_z=0$　$f_y=0$　$\tau_z=0$

人为约束：$v_y=0$　$\omega_x=\alpha_2$　$f_x=0$　$f_z=\alpha_3$　$\tau_x=0$　$\tau_y=0$

可见，自然约束和人为约束把机器人的运动分成两组正交的集合，在控制时，必须根据不同的规则对这两组集合进行控制。

2. 控制策略

对于机器人旋转曲柄和拧螺钉这样的任务，在整个工作过程中，自然约束和人为约束保持不变；但在比较复杂的情况下，如机器人执行装配作业时，需要把一个复杂的任务分成若干个子任务，对每个子任务规定约束坐标系和相应的人为约束，各子任务的人为约束组成一

个约束序列，按照这个序列实现预期的任务。在执行作业过程中，必须能够检测出机器人与环境接触状态的变化，以便为机器人跟踪环境(用自然约束描述)提供信息。根据自然约束的变化，调用人为约束条件，实施与自然约束和人为约束相适应的控制。

图 4-13 表示将一个插销插入孔中的装配过程：首先把插销放在孔的左侧平面上，然后在平面上平移滑动，直到掉入孔中，再将插销向下插入孔底。上述每个动作定义为一个子任务，然后分别给出自然约束和人为约束，根据检测出的自然约束条件变化的信息，调用人为约束条件。

将约束坐标系建在插销上，在插销从空中向下落的过程中，插销与环境不接触，其运动不受任何约束，因此自然约束为 $F=0$。

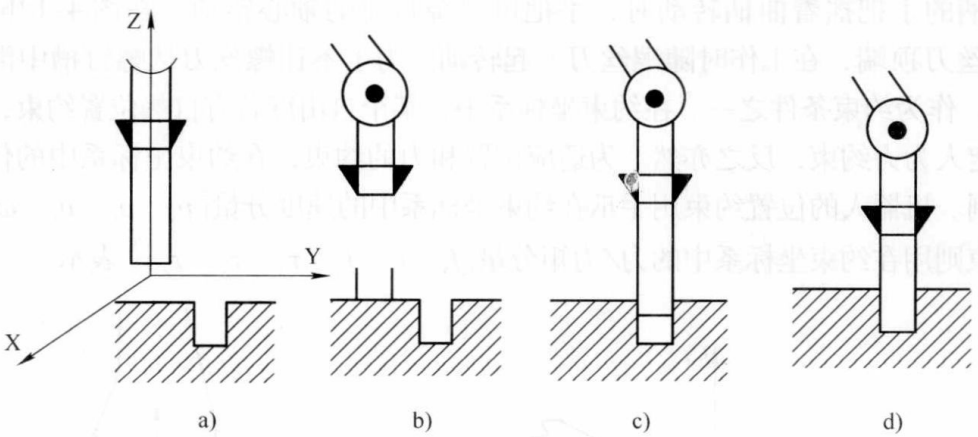



图 4-13 插销入孔作业过程

a) 步骤一 b) 步骤二 c) 步骤三 d) 步骤四

根据任务要求，规定任务约束条件是插销沿 Z 方向以速度 $v_z$ 趋近平面，所以人为约束为 $[0 \quad 0 \quad v_z \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$

当插销下降到与平面接触时，如图 4-13b 所示，可以通过力传感器检测到接触的发生，生成了一组新的自然约束：插销不能再沿 $Z$ 方向运动，也不能在 $X$ 和 $Y$ 方向自由转动，同时在其他 3 个自由度上不能自由地作用力，其自然约束表达式为

$$v_z=0, \quad \omega_x=0, \quad \omega_y=0, \quad f_x=0, \quad f_y=0, \quad \tau_z=0$$

在此条件下，人为约束的规定应满足插销在平面上沿 $Y$ 方向以速度 $v_h$ 滑动，并在 $Z$ 方向施加较小的力 $f_i$ 保持插销与平面接触，所以人为约束表达式为

$$v_x=0, \quad v_y=v_h, \quad \omega_x=0_x, \quad f_z=f_i, \quad \tau_x=0, \quad \tau_y=0$$

当检测到沿 $Z$ 方向的速度，表明插销进入了孔中，如图 4-13c 所示，说明自然约束又发生了变化。必须改变人为约束条件，即以速度 $v_{in}$ 把插销插入孔中，这时的自然约束为

$$v_x=0, \quad v_y=0, \quad \omega_x=0, \quad \omega_y=0, \quad f_z=0, \quad \tau_z=0$$

相应的人为约束为

$$v_z=v_{in}, \quad \omega_z=0, \quad f_x=0, \quad f_y=0, \quad \tau_x=0, \quad \tau_y=0$$

从以上过程可以看出：自然约束的变化是依据检测到的信息来确认的，而这些被检测的信息多数是不受控制的位置或力的变化量。例如插销从接近到接触，被控制量是位置，而用来确定是否达到接触状态的被检测量是不受控制的力；手部的位置控制是沿着有自然力约束

的方向，而手部的力控制则是沿着有自然位置约束的方向。

3. 柔顺拉制

所谓柔顺是指机器人对外界环境变化适应的能力。机器人与外界环境接触时，即使外界环境发生了变化(如零件位置或尺寸的变化)，机器人仍然能够与环境保持预定的接触力，这就是机器人的柔顺能力。为了使机器人具有一定的柔顺能力，需要对机器人进行柔顺控制。柔顺控制的本质是力和位置的混合控制。

实现柔顺控制的方法有两类：一类是力和位置混合控制，另一类是阻抗控制。

所谓力和位置混合控制，是指机器人末端执行器在某个方向受到约束时，同时进行不受约束方向的位置控制和受约束方向的力控制的控制方法。其特点是力和位置是独立控制的，控制规律是以关节坐标给出的。

阻抗控制，顾名思义，就是控制力和位移之间的动力学关系，使机器人末端呈现需要的刚性和阻尼。阻抗控制不是直接控制期望的力和位置，而是通过控制力和位置之间的动态关系来实现柔顺控制。这种动态关系类似于电路中阻抗的概念，因而称为阻抗控制。任一自由度上的机械阻抗是该自由度上的动态力增量与由它引起的动态位移增量之比。机械阻抗是个非线性动态系数，表示机械动力学系统在任一自由度上的动刚度。

### 4.1.6　机器人智能控制

1. 机器人智能控制系统概述

机器人的智能经历了从无到有、从低级到高级，并随着科学技术的进步而不断深入发展。随着计算机技术、网络技术、人工智能、新材料和 MEMS 技术的发展，机器人的智能化、网络化、微型化的发展趋势凸显出来。新出现的各种智能机器人主要有以下几类。

(1) 网络机器人　网络技术的发展拓宽了智能机器人的应用范围。利用网络和通信技术，可以对机器人进行远程控制和操作，代替人在遥远的地方工作。利用网络机器人，外科专家可以在异地为患者实施疑难手术。2000 年，身在美国纽约的外科医生雅克·马雷斯科成功地用机器人为躺在法国东北部城市的一位女患者做了胆囊摘除手术，这就是一个网络机器人成功应用的范例。在国内，北京航空航天大学、清华大学和海军总医院共同开发的通控操作远程医用机器人系统，可以在异地为患者实施开颅手术。

(2) 微型机器人　日本东京工业大学的一名教授对微型和超微型机构的尺寸作了一个基本的定义：机构尺寸在 1 ~ 100mm 的为小型机构，10μm ~ 1mm 的为微型机构，10μm 以下的为超微型机构。微型机器人的发展依赖于微加工工艺、微传感器、微驱动器和微结构四个支柱。现已研制出直径20μm、长 150μm 的铰链连杆和200μm ×200μm 的滑块结构以及微型的齿轮、曲柄、弹簧等。贝尔实验室已开发出一种直径为 400μm 的齿轮。

美国 IBM 公司瑞士苏黎世实验室与瑞士巴塞尔大学的科学家正在研究利用 DNA(脱氧核糖核酸)的结构特性为微型机器人提供动力的新方法。利用这一方法，科学家可能制造出不用电池的新一代微型机器人。

(3) 高智能机器人　美国著名的科普作家阿西莫夫曾设想机器人具有这样的数学天赋："能像小学生背乘法口诀一样来心算三重积分，做张量分析题如同吃点心一样轻巧。" 1997 年，IBM 公司开发的名为"深蓝"的 RS/6000sP 超级计算机打败了国际象棋之王——卡斯帕罗夫，显示了大型计算机的威力。"深蓝"重达 1.4t，有 32 个节点，每个节点有 8 块专

门为进行国际象棋对弈设计的处理器，平均运算速度为每秒200万步。机器人需要处理和存储的信息量大，要求计算机的实时处理速度快。如果将“深蓝”这样的计算机体积缩小到相当小，就可以直接放入机器人的脑袋里。有了硬件支持以及人工智能的突破，更高智能的机器人一定会出现。

（4）变结构机器人　智能机器人工作环境千变万化，科学家梦想着机器人能像人和动物一样运动。例如像蛇一样爬行，像人一样用两条腿行走。日本在仿人形机器人上取得了很大的进步，但是机器人的行走速度慢，对地面的要求很高。真正达到像人一样行走的水平，道路仍然漫长。

2. 机器人智能控制的特点及控制系统的基本结构

智能机器人的控制技术包含智能控制技术、电子电路技术、计算机技术、多传感器信息融合技术、先进制造技术、网络技术等技术，是一个相当广泛的多学科交叉的研究领域。

人类生活对高度智能化机器人的需求，使得基于经典优化方法的控制策略已经远远不能满足智能机器人技术发展的需要。寻找具有柔顺性和智能性的控制策略，已成为智能机器人研究中最迫切的问题之一。实际上，机器人系统一般是由若干子系统和反馈回路组成的复杂多变量非线性系统，其系统模型是非常复杂的，具体可概括为三个方面。

（1）模型的不确定性　传统的控制是基于模型的控制。这里所说的模型既包括控制对象也包括干扰的模型。对于传统控制，通常认为模型是已知的，或者是经过辨识可以得到的，而智能控制的研究对象通常存在严重的不确定性。

（2）系统的高度非线性　在传统的控制理论中，线性控制理论比较成熟。对于具有高度非线性的控制对象，虽然也有一些非线性的控制方法可利用，但是总的说来，非线性控制理论还是很不成熟的，而且有些方法也过于复杂。机器人是一个典型的非线性对象，机器人的控制是一个比较复杂和困难的问题，智能控制方法可能是一种解决这个问题的出路。

（3）控制任务的复杂性　在传统的控制系统中，控制的任务或者要求输出量为定值（调节系统），或者要求输出量跟随期望的运动轨迹（跟随系统），因此控制任务的要求比较单一。对于智能控制系统，其任务要求往往比较复杂。例如在智能机器人系统中，它要求系统对一个复杂的任务具有自行规划和决策的能力、有自动躲避障碍运动到期望目标位置的能力等。对于这些复杂的任务要求，就不能只依靠常规的控制方法来解决。

智能机器控制系统的典型结构如图4-14所示。在该系统中，广义对象包括通常意义下的控制对象和所处的外部环境。对于智能机器人系统，机器人手臂、被操作物体及其所处环境统称为广义对象。传感器则包括关节位置传感器、力传感器，或者还可能包括触觉传感器、滑觉传感器或视觉传感器等。感知信息处理将传感器得到的原始信息加以处理，例如视觉信息需要经过很复杂的处理后才能获得有用的信息。认知部分主要用来接收和储存各种信息、知识、经验和数据，并对它们进行分析、解释，做出行动的决策，送给规划和控制部

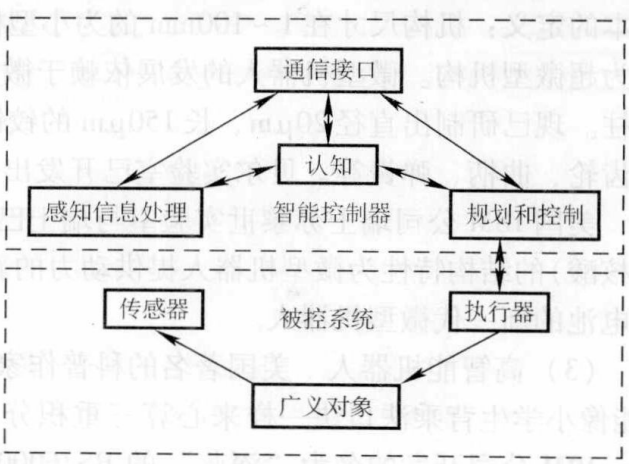



图4-14　智能机器控制系统的典型结构

分。通信接口除建立人机之间的联系外，也建立系统中各模块之间的联系。规划和控制是整个系统的核心，它根据给定的任务要求、反馈的信息以及经验知识，进行自动搜索、推理决策、动作规划，最终产生具体的控制作用，经执行部件作用于控制对象。对于不同用途的智能控制系统，以上各部分的形式和功能可能存在较大的差异。

G. N. 萨里迪斯提出了智能控制系统的分层递阶的智能控制结构形式，如图 4-15 所示。其中，执行级一般需要比较准确的模型，以实现具有一定精度要求的拧制任务；协调级用来协调执行级的动作，它不需要精确的模型，但需要学习功能，以便在再现的控制环境中改善性能，并能接受上一级的模糊指令和符号语句；组织级将操作员的自然语言翻译成机器语言，组织决策、规定任务，并直接干涉低层的操作。在执行级中，识别的功能在于获得不确定的参数值或监督系统参数的变化；在协调级中，识别的功能在于根据执行级送来的测量数据和组织级送来的指令产生出合适的协调作用；在组织级中，识别的功能在于翻译定性的命令和其他的输入。该分层递阶的智能控制系统具有两个明显的特点：

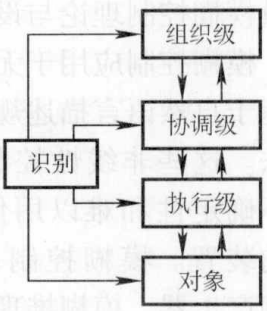



图 4-15　分层递阶的智能控制结构

① 对控制来讲，自上而下控制的精度越来越高。

② 对识别来讲，自下而上的信息回馈越来越粗略，相应的智能程度越来越高。

这种分层递阶的结构形式已成功地应用于机器人的智能控制。

3. 机器人智能控制理论概述

根据智能机器人的任务分解，在面向设备的基础级可以采用常规的自动控制技术，如 PID 控制、前馈控制等。在协调级和组织级，存在不确定性，控制模型往往无法建立或建立的模型不够精确，无法取得良好的控制效果。因此，需要采用智能控制方法，如神经网络控制、模糊控制、专家控制以及集成智能控制。

（1）神经网络控制　基于人工神经网络的控制称为神经网络控制。神经网络控制采用仿生学的观点与方法来研究人脑和智能系统的高级信息处理。神经网络控制器模仿人的形象思维，将输入和输出映射成控制信号。一旦模型建立后，在输入状态信息不完备的情况下，也能快速作出响应，进行模式识别。神经网络控制不需要数学建模，这对于智能机器人的控制来说，是十分理想的。但神经网络控制存在自学习的问题，即当环境发生变化，原来的映射关系不再适用时，需要重新训练网络。

（2）模糊控制　1965 年，美国著名控制论学者 L. A. Zadeh 首次提出一种完全不同于传统数学与控制理论的模糊集合理论，把信息科学推进到人工智能的新方向。基于模糊逻辑理论的控制方法称为模糊控制。1986 年，世界上第一块基于模糊逻辑的人工智能芯片在著名的贝尔实验室研制成功。事实表明，模糊理论具有强大的生命力和广阔的应用前景。模糊理论之所以能在信息时代获得如此迅速的发展，是由于它为信息革命提供了一种新的富有魅力的数学工具与手段，具有以下优点：

① 模糊理论给出了一种表现自然语义的理论和方法，使自然语言能够转化成机器可以“理解”和接受的东西，提高了机器的灵活性。

② 模糊理论给出了模糊逻辑和近似推理的理论和方法，用简单的软、硬件可以使机器更“聪明”、智能化程度更高。模糊洗衣机、模糊冰箱等家电产品的面世充分证明了这点。

③ 模糊理论的应用面广。模糊控制能够将人的控制经验及推理过程纳入到自动控制策略中。在经典模糊控制方面取得一大批有实际意义成果的同时，人们开始重视经典模糊控制系统稳态性能的改善、模糊集成控制、模糊自适应控制、专家模糊控制、神经模糊控制与多变量模糊控制理论与设计方法的研究。

模糊控制应用于无法建立数学模型或难以建立数学模型的场合。模糊控制提供了一种实现基于自然语言描述规则的控制规律的新机制，同时也提供了一种改进非线性控制器的替代方法。这些非线性控制器一般用于控制含有不确定性和难以用传统非线性理论来处理的装置。模糊控制单元由模糊规则库、模糊产生器、模糊推理机和模糊消除器4个功能模块组成，其基本功能结构如图4-16所示。模糊规则库用于存储系统的基于语言变量的控制规则和系统参数，模糊产生器模块实现对系统变量论域的模糊划分和对清晰输入值的模糊化处理，模糊推理机是一种输入空间到输出空间的非线性映射关系，模糊消除器模块将推论出的控制作用转化为清晰的输出值，用于控制外部设备。在模糊控制器中，推理规则的形式为

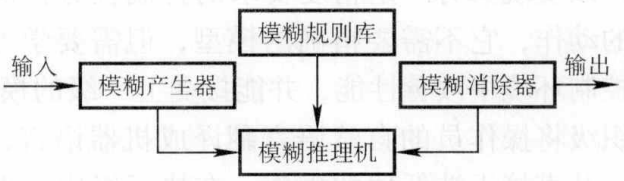



图4-16 模糊控制单元的基本功能结构

IF <控制状态 A> THEN <控制作用 B>

(3) 模糊神经控制 神经网络的输入/输出映射关系表现为一种权值矩阵，不容易被理解，模糊系统具有自然语言的表达能力。模糊神经控制系统是神经网络技术与模糊逻辑控制技术相结合的产物，是基于神经网络的模糊控制方法。常规的模糊神经控制方法是指用一个神经网络实现常规模糊控制器的功能，根据神经网络实现的模糊逻辑控制功能范围，大致可分为两种：一种是由神经网络实现模糊控制规则及模糊推理，另一种则由神经网络实现全部模糊逻辑控制的功能。前者是一种局部网络化的结构，后者是一种全网络化的结构。局部网络化结构的常规模糊神经控制器如图4-17所示。在定义了偏差、偏差变化率和控制作用三个语言变量的语言值及其隶属函数，并建立了模糊控制规则之后，就可以把这些规则转换为神经网络的一组输入/输出样本。采用BP学习算法训练神经网络，调整网络权值，使得网络实现这组样本所对应的输入/输出映射。这样，网络就记忆了模糊控制规则。在线运行时，控制器根据实际输入的误差 $e$ 和误差变化率 $e_c$，用通常的模糊化处理方法转化为相应的模糊子集 $E$ 和 $E_c$，神经网络进行推理，得到控制作用 $U$，控制器内用通常的解模糊方法得到精确的控制作用，输出给被控对象。

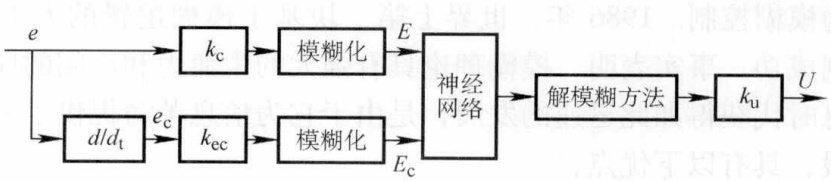



图4-17 局部网络化结构的常规模糊神经控制器

在图4-17中，神经网络实现了常规模糊神经控制器的模糊规则库及其推理功能，而模糊化、解模糊等功能仍由常规的模糊处理来实现。

## 4.2　机器人传感器

### 4.2.1　机器人传感器概述

传感技术是先进机器人的三大要素(感知、决策和动作)之一，工业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。通常根据用途的不同，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。

内部传感器就是测量机器人自身状态的功能元件，具体检测的对象有关节的线位移、角位移等几何量，速度、角速度、加速度等运动量，还有倾斜角和振动等物理量。内部传感器常用于控制系统中，用于反馈元件，检测机器人自身的状态参数，如关节运动的位移、速度、加速度、力和力矩等。

外部传感器则主要用于测量机器人周边环境参数，通常跟机器人的目标识别、作业安全等因素有关。从机器人系统的观点来看，外部传感器的信号一般用于规划决策层。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、接近觉传感器、力传感器和触觉传感器四种。如图4-18所示为工业机器人传感器的分类。

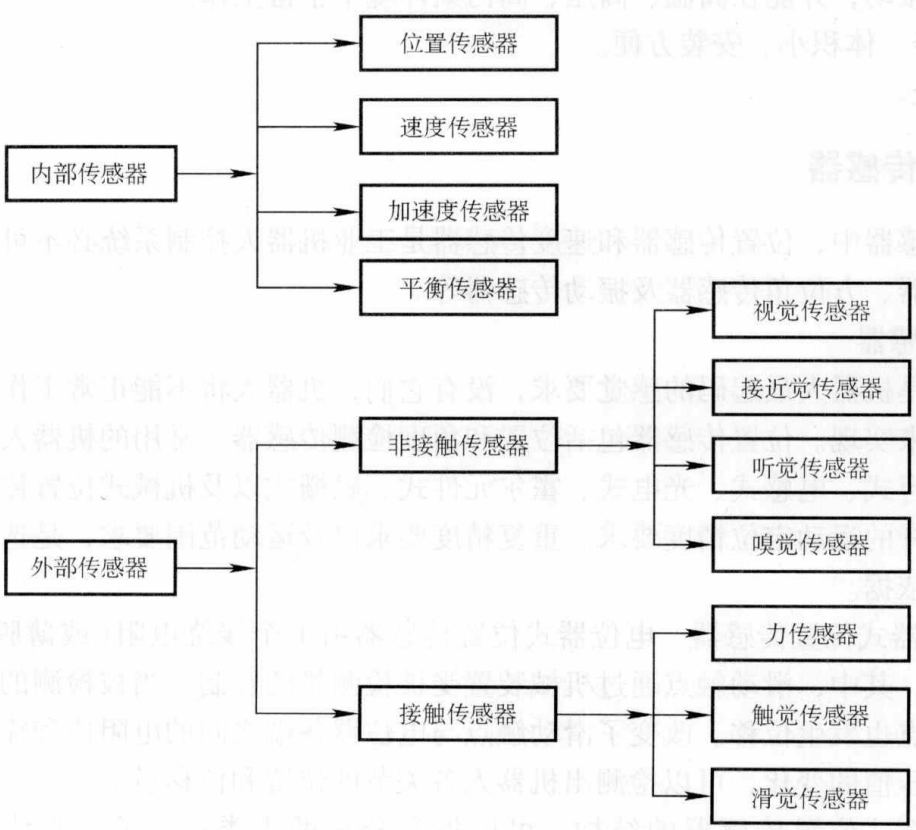



图4-18　工业机器人传感器的分类

选择机器人传感器完全取决于机器人的工作需要和应用特点，对机器人感觉系统的要求是选择机器人传感器的基本依据。机器人也和人一样，必须要收集周围环境的大量信息才能

更有效地工作，例如在捡拾物体的时候，他们需要知道该物体是否已经被捡到，否则下一步工作无法进行。当机器人手臂在空间运动时，必须要避开各种障碍物，并以一定的速度接近工作对象。机器人所要处理的工作对象的重量很大，有时候容易破碎，有时候温度很高，机器人对这些特征都要识别并作出相应的决策，才能更好地完成任务。

以机器人弧焊加工为例，机器人弧焊是在被焊接件上沿需要的路线(焊缝)把被焊接件连接在一起。假如机器人没有感觉能力，不能自行观察焊接，那么只能在机器人预先编程时精确地输入焊接位置来工作。实际工作中焊接不允许有误差，这样，机器人的运行轨迹就不允许有误差，否则焊缝会出现误焊，这些要求有时很难达到。因此，人们在弧焊机器人上装备较为先进的焊缝自动跟踪系统，一旦机器人偏离实际工件的焊缝，焊缝跟踪系统将反馈偏离信息。机器人允许被焊接工件及其焊缝存在一定的误差，机器人的运动轨迹精度也不需要太高。

机器人对传感器的一般性要求如下：

1）精度高、重复性好。机器人是否能够准确无误地正常工作，往往取决于其所用传感器的测量精度。

2）稳定性和可靠性好。保证机器人能够长期、稳定、可靠地工作，尽可能避免在工作中出现故障。

3）抗干扰能力强。工业机器人的工作环境往往比较恶劣，其所用传感器应能承受一定的电磁干扰、振动，并能在高温、高压、高污染环境中正常工作。

4）重量轻、体积小、安装方便。

5）价格低。

### 4.2.2 内部传感器

在内部传感器中，位置传感器和速度传感器是工业机器人控制系统必不可少的，并辅助有倾斜角传感器、方位角传感器及振动传感器等。

1. 位置传感器

位置感觉是机器人最起码的感觉要求，没有它们，机器人将不能正常工作。它们可以通过多种传感器来实现。位置传感器包括位置和角度检测传感器。常用的机器人位置传感器有电位器式、电容式、电感式、光电式、霍尔元件式、磁栅式以及机械式位置传感器等。机器人各关节和连杆的运动定位精度要求、重复精度要求以及运动范围要求，是选择机器人位置传感器的基本依据。

(1) 电位器式位置传感器　电位器式位置传感器由 1 个线绕电阻(或薄膜电阻)和 1 个滑动触点组成。其中，滑动触点通过机械装置受被检测量的控制。当被检测的位置量发生变化时，滑动触点也发生位移。改变了滑动触点与电位器各端之间的电阻值和输出电压值，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。

按照电位器式位置传感器的结构，可以把它分成两大类：一类是直线型电位器(见图 4-19)，另一类是旋转型电位器(见图 4-20)。直线型电位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电位器式传感器的输入/输出关系的非线性。

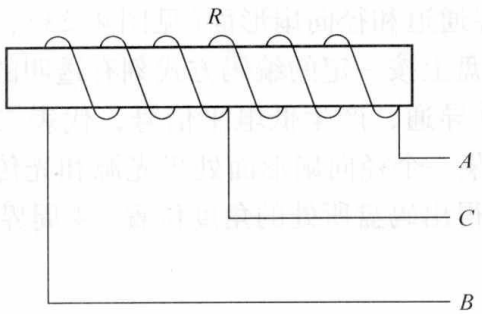



图 4-19　直线型电位器

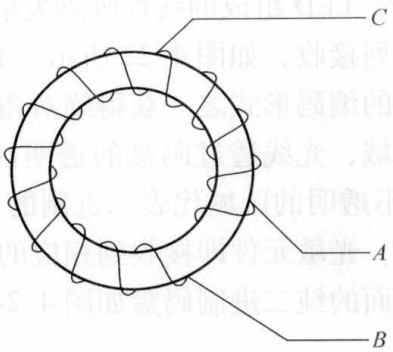



图 4-20　旋转型电位器

图 4-21 是一个位置传感器的实例，在载有物体的工作台下面有与电阻接触的触头。当工作台左、右移动时，触头也随之运动，从而改变了与电阻接触的位置，检测的是以电阻中心为基准位置的移动距离。假设输入电压为 $E$，最大移动距离(从电阻中心到一端的长度)为 $L$，滑动触头从中心向左端移动了 $x$，电路输出电压为

$$e = \frac{L + x}{2L}E$$

因此，可得移动距离为

$$x = \frac{L(2e - E)}{E} \tag{4-22}$$

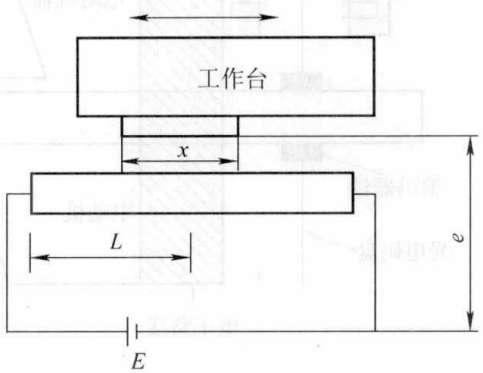



图 4-21　位置传感器的实例

旋转型电位器的电阻元件是呈圆弧状的，滑动触点也只能在电阻元件上做圆周运动。旋转型电位器有单圈电位器和多圈电位器两种。由于滑动触点等的限制，单圈电位器的工作范围只能小于 360°，分辨率也有一定的限制。对于大多数应用情况来说，这并不会妨碍它的使用。假如需要更高的分辨率和更大的工作范围，可以选用多圈电位器。

电位器式位置传感器具有很多优点，如输入/输出特性可以是线性的，输出信号选择范围大，不会因为失电而破坏其已感觉到的信息；当电源因故断开时，电位器的滑动触点将保持原来的位置不变；另外还具有性能稳定、结构简单、尺寸小、重量轻、精度高等优点。电位器式位置传感器的主要缺点是容易磨损，由于滑动触点和电阻器表面的磨损，使电位器的可靠性和寿命受到一定的影响。因此，电位器式位置传感器在机器人上的应用受到了极大的限制，近年来随着光电编码器价格的降低而逐渐被淘汰。

(2) 光电编码器　光电编码器是一种应用广泛的位置传感器，其分辨率完全能满足机器人的技术要求。这种非接触型位置传感器可分为绝对型光电编码器和相对型光电编码器。前者只要电源加到用这种传感器的机电系统中，光电编码器就能给出实际的线性或旋转位置。因此，用绝对型光电编码器装备的机器人的关节不要求校准，只要一通电，控制器就知道实际的关节位置；相对型光电编码器只能提供某基准点对应的位置信息。所以，用相对型光电编码器的机器人在获得真实位置信息以前，必须首先完成校准程序。

1) 绝对型光电编码器。绝对型光电编码器通常由 3 个主要元件构成：多路(或通道)光源(如发光二极管)、光敏元件和光电码盘。

$N$ 个 LED 组成的线性阵列发射的光与盘成直角，并有盘反面对应的光敏晶体管构成的线性阵列接收，如图 4-22 所示。光电码盘分为周界通道和径向扇形面(见图 4-23)，利用几种可能的编码形式之一获得绝对角度信息。这种码盘上按一定的编码方式刻有透明的和不透明的区域，光线透过码盘的透明区域，使光敏元件导通，产生低电平信号，代表二进制的“0”；不透明的区域代表二进制的“1”。因此，当某一个径向扇形面处于光源和光传感器的位置时，光敏元件即接收到相应的光信号，相应的得出码盘所处的角度位置。4 周界通道 16 个扇形面的纯二进制码盘如图 4-24b 所示。

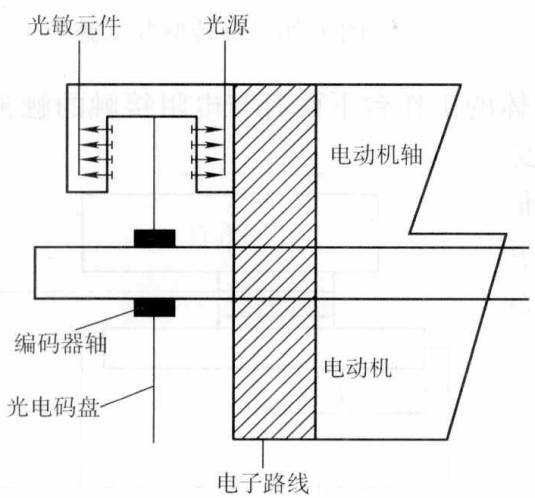



图 4-22　电动机上的绝对型编码器图

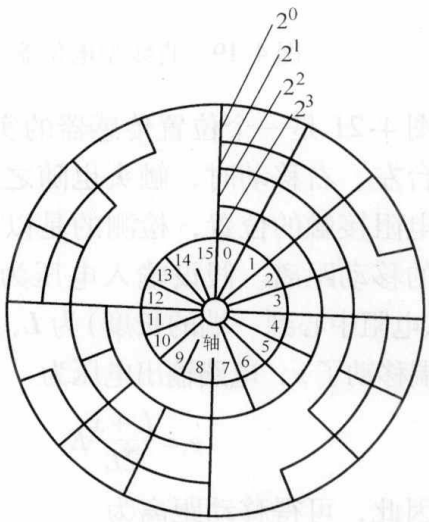



图 4-23　绝对型编码器码盘

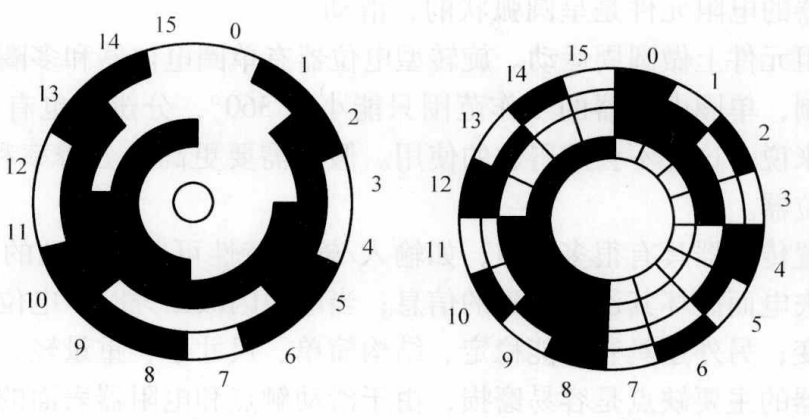



图 4-24　绝对码盘结构

a) 基于格雷码的绝对码盘　b) 基于二进制码的绝对码盘

采用二进制码盘，在两个码段交替过程中，有可能由于电刷位置安装不准，一些电刷越过分界线，而另一些尚未越过，这些会产生非单值性误差。为减小这种误差，改进的方法是采用格雷码码盘，如图 4-24a 所示。其特点是相邻两数的代码中只有一位数发生改变，故把误差控制在一个数码以内，即误差最多不超过 1(见表 4-1)。

编码器的分辨率通常由圆弧道数(比特数)$n$ 来确定。分辨率为 $360°/2^n$，例如 12bit 编码器的分辨率为 $360°/2^{12}$，格雷码盘的圆弧道数一般为 8 ~ 12，高精度的达到 14。

表 4-1　对应于十进制 0～15 的格雷码和二进制码

| 十进制 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 格雷码 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 二进制 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |

2）相对型光电编码器。与绝对型光电编码器一样，相对型光电编码器也是由前述 3 个主要元件构成，所不同的是后者的光源只有一路或两路，光电码盘一般只刻有一圈或两圈透明和不透明区域。当光透过码盘时，光敏元件导通，产生低电平信号，代表二进制的“0”；不透明的区域代表二进制的“1”。因此，这种编码器只能通过计算脉冲个数来得到输入轴所转过的相对角度。由于相对型光电编码器的码盘加工相对容易，因此其成本比绝对型编码器的低，而分辨率比绝对型编码器的高。然而，只有使机器人首先完成校准操作以后，才能获得绝对位置信息。通常，这不是很大的缺点，因为这样的操作一般只有在加上电源后才能完成。若在操作过程中电源意外地消失，由于相对型编码器没有“记忆”功能，故必须再次完成校准。

与之相对的，绝对型编码器产生供每种轴用的独立的和单值的码字。它不像相对型编码器，每个读数都与前面的读数无关。当系统电源中断时，绝对型编码器记录发生中断的地点，当电源恢复时把记录情况通知系统。采用绝对型编码器的机器人，即使电源中断导致旋转部件的位置移动，校准仍保持。

（3）旋转变压器　旋转变压器是一种输出电压随转角变化的检测装置，是用来测量角位移的。其基本结构与交流绕线式异步电动机相似，由定子和转子组成。如图 4-25 所示，定子相当于变压器的初级，有两组在空间位置上互相垂直的励磁绕组；转子相当于变压器的次级，仅有一个绕组。当定子绕组通交流电流时，转子绕组中便有感应电动势产生。感应电动势的大小等于两定子绕组单独作用时所产生的感应电动势矢量和。

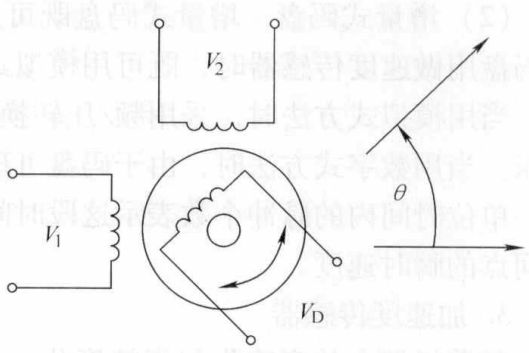



图 4-25　旋转变压器原理图

假设分别在两个定子绕组中加频率 $\omega$ 相同、幅值 $V_m$ 相等、面相位相差 90°的交流励磁电压 $V_1 = V_m\cos\omega t$ 和 $V_2 = V_m\sin\omega t$ 时，可以证明，转子输出感应电动势 $V_o$ 仅与转子的转角 $\theta$ 有关，即

$$V_o = K_1 V_m \sin(\omega t + \theta)$$

式中　$K_1$——转子、定子间的匝数比。

旋转变压器是一种交流励磁型的角度检测器，检测精度较高。在使用时，可以把旋转变压器转子与工业机器人的关节轴连接，用鉴相器测出转子感应电动势 $V_o$ 的相位，从而就可以确定关节轴旋转的角度。

（4）激光干涉式编码器　中国科学院长春光学精密机械研究所利用光学衍射光干涉技

术取代传统几何光提取位移信息技术，研制出国内最高水平的高密度光栅盘，刻线密度达到380线/mm。光学干涉系统被集成于 $\phi$45mm × $\phi$10mm 空间内，并以光学对径相加工技术消除码盘偏心。1994年研制成的 $\phi$58mm 带有光学倍频的编码器，无电细分的原始角分辨率达到162000P/R，即优于 $2^n$。高速电处理技术的应用，使响应频率提高到1000kHz。绝对零位信息提取的创新技术使定位精度大大提高，全周最大累积误差7.8″。该编码器可用于高精度DD机器人，将我国机器人位置传感器的制造技术进入世界先进水平行列。

2. 速度传感器

速度传感器是机器人的内部传感器之一，用来确定关节的运动速度，常用的有模拟式和数字式两类。

（1）测速发电机　测速发电机是常用的一种模拟式速度传感器，它是一种小型永磁式直流发电机（见图4-26）。其工作原理是：当励磁磁通恒定时，其输出电压和转子转速成正比，即

$$U = Kn \tag{4-23}$$

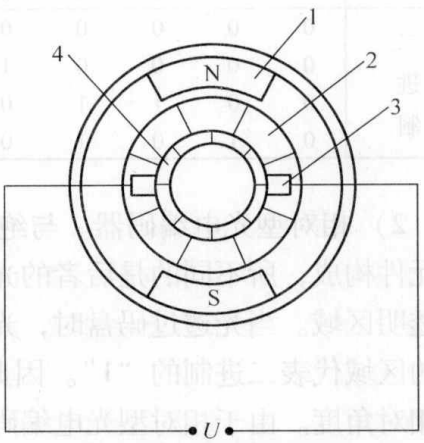



图4-26　测速发电机

1—永久磁铁　2—转子线圈

3—线圈　4—整流子

式中　$U$——测速发电机的输出电压；

$n$——测速发电机的转速；

$K$——比例系数。

当有负载时，电枢绕组流过电流，由于电枢反应而使输出电压降低；若负载较大，或测量过程中负载变化，则破坏了线性特性而产生误差，故在使用中应使负载尽可能小而且性质不变。当测速发电机与驱动电动机同轴连接时，便可得出驱动电动机的瞬时速度。

（2）增量式码盘　增量式码盘既可用做位置传感器，也可用做速度传感器。当把增量式码盘用做速度传感器时，既可用模拟式方法，也可用数字式方法。

当用模拟式方法时，采用频/压转换器，把码盘的脉冲频率转换成与转速成正比的模拟电压。当用数字式方法时，由于码盘可理解成一个数字式元件，它的脉冲个数代表了位置，而一单位时间内的脉冲个数表示这段时间里的平均速度。当时间段足够小时，便可代表某个时间点的瞬时速度。

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。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，并把它反馈到杆件底部的驱动器上；也可把加速度传感器安装在机器人手爪上，将测得的加速度进行数值积分，并加到反馈环节中，以改善机器人的性能。下面简单介绍两种加速度传感器。

（1）应变片加速度传感器　Ni-Cu 或 Ni-Cr 等金属电阻应变片加速度传感器是一个由板簧支撑重锤所构成的振动系统，如图4-27所示。板簧上、下两面分别贴两个应变片。应变片受振动产生应变，其电阻值的变化通过电桥电路的输出电压被检测出来。除了金属电阻外，Si 或 Ge 半导体压阻元件也可用于加速度传感器。半导体应变片的应变系数比金属电阻应变片的高50～100倍，灵敏度很高，但温度特性差，需要加补偿电阻。

（2）伺服加速度传感器　伺服加速度传感器检测出与振动系统重锤位移成正比的电流，

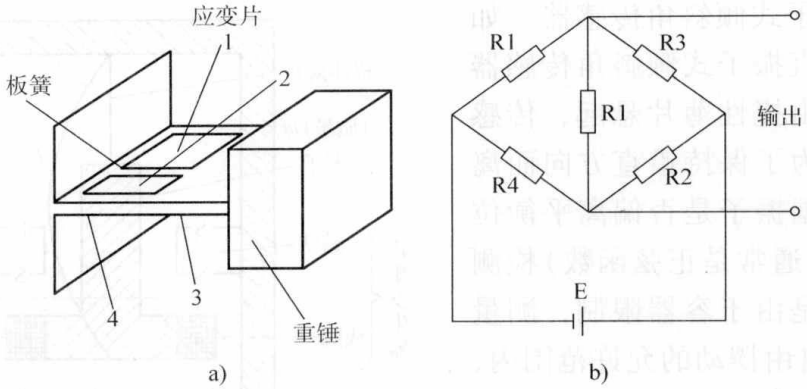



图4-27　应变片加速度传感器

a）结构图　b）电路图

1、2、3、4—应变片

把电流反馈到恒定磁场中的线圈，使重锤返回到原来的零位移状态。根据右手定则，得

$$F = ma = Ki \tag{4-24}$$

式中　$K$——比例系数，可以根据检测的电流 $i$ 求出加速度。

4. 倾斜角传感器

倾斜角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，下面只介绍常见的两种方式。

（1）液体式倾斜角传感器　液体式倾斜角传感器分为气泡位移式、电解液式、电容式和磁流体式等，下面仅介绍其中的气泡位移式倾斜角传感器。图4-28表示气泡位移式倾斜角传感器的结构及测量原理。半球状容器内封入含有气泡的液体，对准LED发出的光。容器下面分成4部分，分别安装4个光电二极管，用以接收投射光。液体和气泡的透光率不同。液体在光电二极管上投影的位置，随传感器倾斜角度而变化。因此，通过计算对角的光电二极管感光量的差值，可测量出二维倾斜角。该传感器测量范围为20°左右，分辨率可达0.001°。

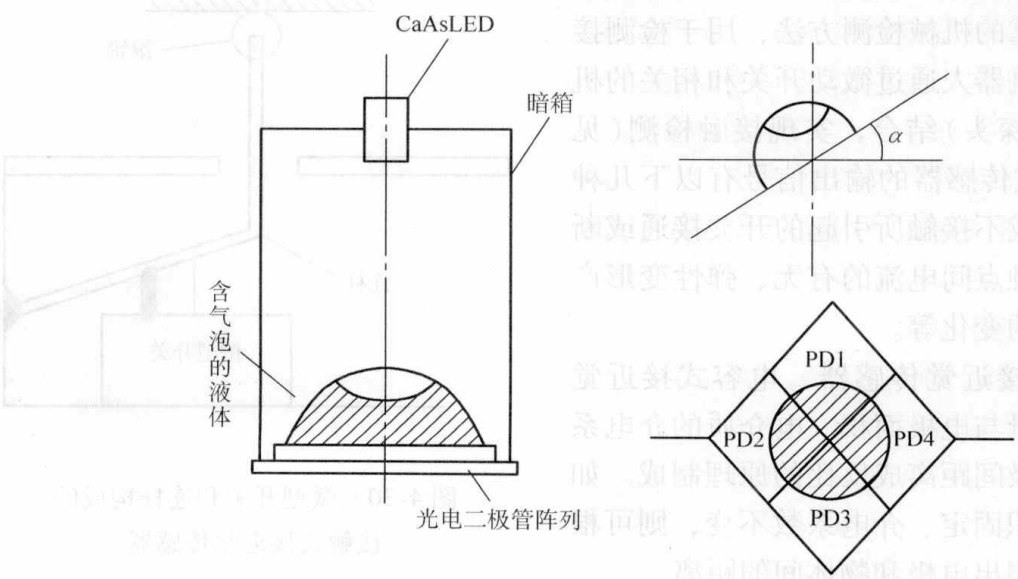



图4-28　气泡位移式倾斜角传感器的结构及测量原理

a）结构　b）测量原理

（2）垂直振子式倾斜角传感器　如图4-29所示是垂直振子式倾斜角传感器的原理图。振子由挠性薄片悬起，传感器倾斜时，振子为了保持铅直方向而离开平衡位置。根据振子是否偏离平衡位置及位移角函数（通常是正弦函数）检测出倾斜角度，但是由于容器限制，测量范围只能在振子自由摆动的允许范围内，不能检测过大的倾斜角度。

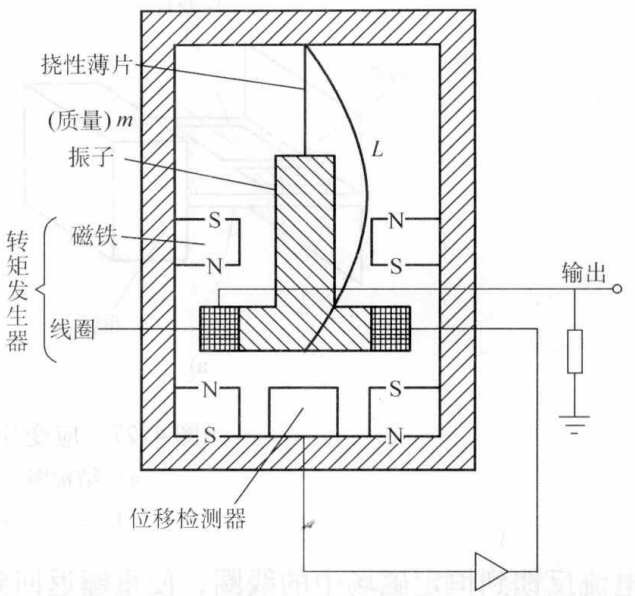



图 4-29　垂直振子式倾斜角传感器

## 4.2.3　外部传感器

1. 接近觉传感器

接近觉是一种粗略的距离感觉，接近觉传感器的主要作用是在接触对象之前获得必要的信息，用来探测在一定距离范围内是否有物体接近。接近觉传感器可以在近距离范围内，获取执行器和对象物体间的空间相对关系信息。它的作用包括：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。

接近觉传感器分为接触式和非接触式。接触式采用机械结构方式实现；非接触式根据检测原理不同，可分为机械式、电容式、感应式、气压式、超声波式等。在设计和制造工业机器人时，还应考虑周围的环境条件及空间限制，选择合适于目标的接近觉传感器，以满足所要求的性能。接近觉传感器一般用非接触式测量元件，如霍尔效应传感器、电磁式接近开关和光学接近觉传感器等。

（1）接触式接近觉传感器　接触式接近觉传感器采用最可靠的机械检测方法，用于检测接触和确定位置。机器人通过微动开关和相关的机械装置（如探针、探头）结合，实现接触检测（见图4-30）。接触式传感器的输出信号有以下几种形式：物体接触或不接触所引起的开关接通或断开、检测物体与触点间电流的有无、弹性变形产生的应变片电阻的变化等。

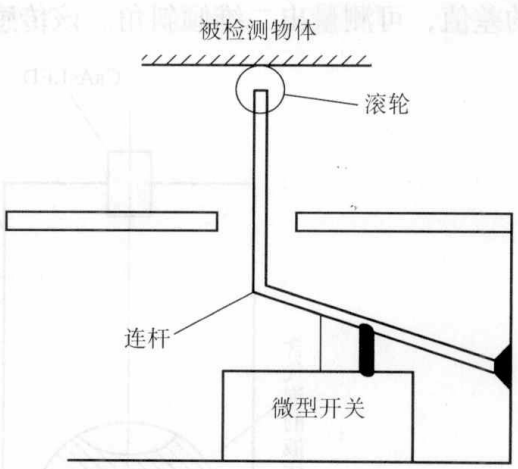



图 4-30　微型开关和连杆构成的接触式接近觉传感器

（2）电容式接近觉传感器　电容式接近觉传感器利用电容量与电极面积、电介质的介电系数成正比，与电极间距离成反比的原理制成。如果相对电极的面积固定、介电系数不变，则可根据电容的变化检测出电极和物体间的距离。

（3）感应式接近觉传感器　感应式接近觉传感器主要有三种类型，包括电磁感应传感器、霍尔效应传感器和电涡流传感器。它仅对金属材料起作用，应用于近距离、小范围的检测，通常仅有零点几毫米。钢铁等强磁性被测物体和气隙磁阻引起的线圈感抗产生变化，就可

测出被测物体的距离。电涡流传感器主要应用于检测金属材料制成的对象物体，它是利用一个导体在交变电磁场的作用下产生涡流的原理，从而引起励磁线圈输入电流的变化来测量距离。

（4）气压式接近觉传感器　流体传感器把气体或液体的流束喷向物体表面，通过测量压力、流量变化来确定物体的有无或测量物体的距离。这种传感器的喷嘴不受磁场、电场、光线的影响，对环境的适应性很强，可用于压力工程、焊接、零件组装、搬运中的零件计数和确认等。如图4-31所示为接近觉气流传感器的结构原理图。

（5）超声波式接近觉传感器　人能听到的声波频率在20～20000Hz之间，超声波的频率为20kHz以上，人耳听不到。声波的频率越高，方向性越好，能够实现定向传播。利用超声波的这种特性，可实现距离检测。超声波的工作原理是根据发射脉冲和接收脉冲的时间间隔推算出到物体表面的距离。如图4-32所示为超声波式接近觉传感器的结构示意图。这种方法是最常用的一种，特别适合于不能使用光学方法的环境中；但其缺点是波束较宽，其分辨力严重受到环境因素的影响和限制。因此，超声波式接近觉传感器主要用于导航、避障等。

如图4-32所示为一种典型的超声波接近觉传感器的结构，基本元件是电声变换器。这种变换器通常是压电陶瓷型变换器，树脂层用来保护变换器不受潮湿、灰尘以及其他环境因素的影响，同时也起声阻抗阻匹配器的作用。由于同一变换器通常既用于发射又用于接收，因此被检测物体距离很小时，需要使声能很快衰减。使用消声器和消除变换器与壳体的耦合，可以达到这一目的；壳体设计应当能形成一狭窄的声束，以实现有效的能量传送和信号定向。

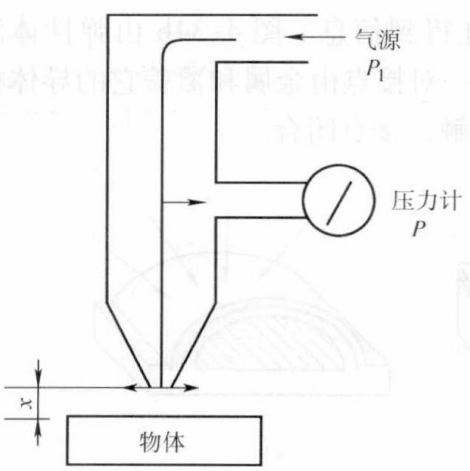



图4-31　接近觉气流传感器

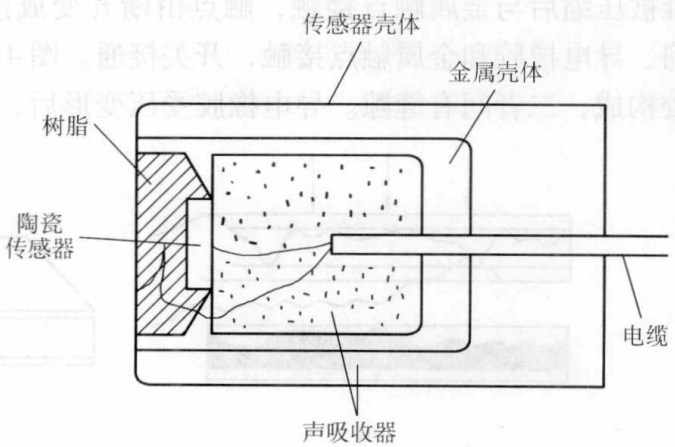



图4-32　超声波式接近觉传感器的结构示意图

2. 触觉传感器

触觉传感器是机器人与环境直接作用的检测和感知。简单地说，触觉就是机械手与对象接触面上的力感觉，是检测冲击、压迫等机械刺激的综合感觉，一般包括接触觉、压觉、滑觉及力觉等感觉。接触传感器可以用来进行机械手抓取，可以感知物体的形状、软硬。

（1）接触觉传感器　接触觉传感器是指装于机器人手爪上的、以判断是否接触物体为基本特征的测量传感器。根据接触觉传感器的输出，机器人可以感受和搜索对象物，感受手爪与对象物之间的相对位置和姿态，并修正手爪的操作状态。采用分布密度比较高的接触觉传感器，还可以判断对象物的大致几何形状。

1）机械式接触觉传感器。利用触点的接通、断开获取信息，通常采用微动开关来识别，但由于结构关系，无法高密度列阵。接触觉传感器的输出是开关方式的二值量信息，因

而，微动开关、光电开关等器件可作为最简单的接触觉传感器，用以感受对象物的存在与否，如图 4-33 所示。

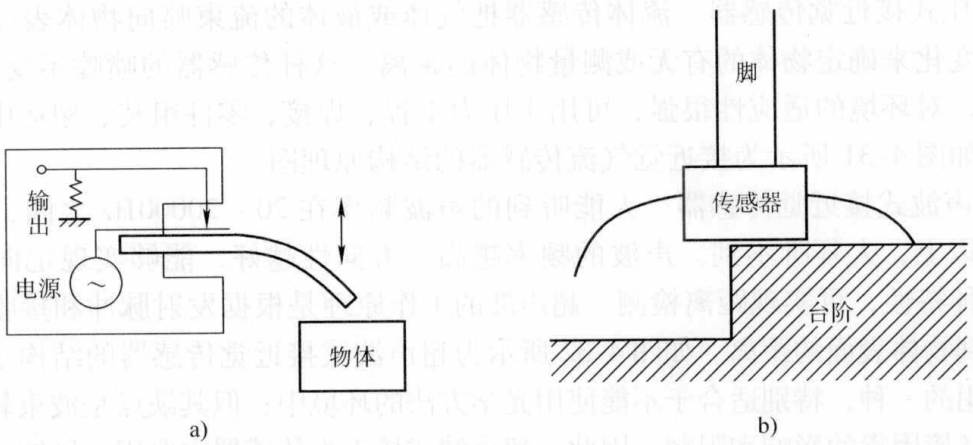



图 4-33 机械式接触觉传感器

a）机构 b）应用

2）弹性式接触觉传感器。为了减轻重量、缩小体积，并检测轻微的碰撞，还设计了各种弹性式接触觉传感器，如图 4-34 所示。这类传感器都由弹性元件、导电触点和绝缘体构成。图 4-34a 由导电性石墨化纤维、氨基甲酸乙酯泡沫、印制电路板和金属触点构成。碳纤维被压缩后与金属触点接触，触点由断开变成接通，由此得到信息。图 4-34b 由弹性体海绵、导电橡胶和金属触点接触，开关接通。图 4-34c 中的一对接点由金属和覆盖它的导体橡胶构成，二者间有缝隙。导电橡胶受压变形后，与金属接触，接点闭合。

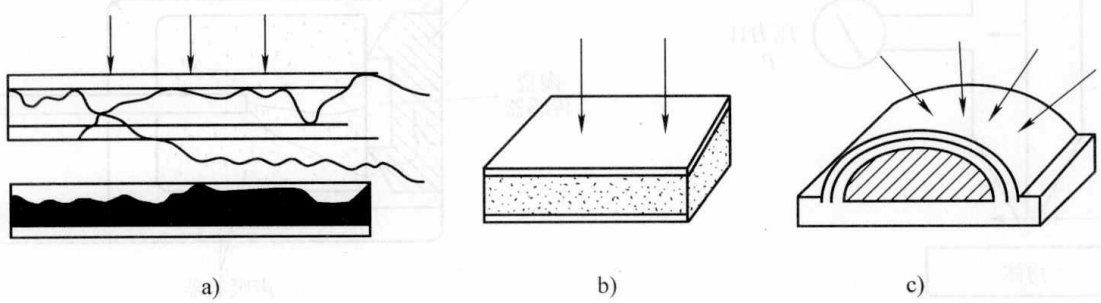



图 4-34 弹性式接触觉传感器

a）形式一 b）形式二 c）形式三

3）光纤式接触觉传感器。这种传感器包括由一束光纤构成的光缆和一个可变形的反射表面，光通过光纤维束投射到可变形的反射材料上，反射光按相反方向通过光纤束返回。如果反射表面是平的，则通过每条光束所返回的光的强度是相同的；如果反射表面因与物体接触受力而变形，则反射的光强度不同。用高速光扫描技术进行处理，即可得到反射表面的受力情况。

（2）压觉传感器　压觉传感器检测传感器表面上受到的作用力，它由弹性体及检测弹性体位移的敏感元件或感压电阻构成。通常，用弹簧、海绵等材料制作弹性体，用电位器、光电元件、霍尔元件制作位移检测机构。如图 4-35 所示是用弹簧和电位器制成的弹簧式压觉传感器。在这个传感器中，用弹簧支撑的平板作为机械手的物体夹持面。在平板上加负载时，平板发生位移，该位移量由电位器检测。如果已知弹簧的刚性系数，则可根据位移的输出求出力的大小。

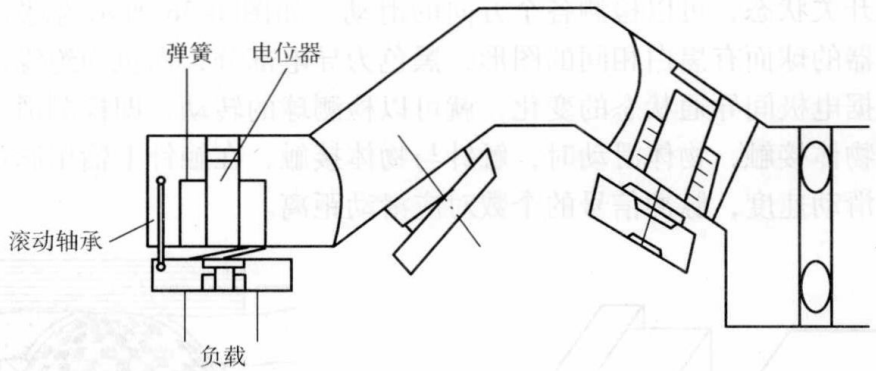



图 4-35　弹簧式压觉传感器

采用感压电阻的传感器有多种设计方案，目前主要方向是开发高分辨率、密集型的、能检测面上各点压力的分布式传感器。在各种研制方案中，采用导电橡胶的最多，其次是用光和磁阻元件。

采用导电橡胶的压觉传感器如图 4-36 所示。在硅中渗入铝粉或碳粉等导电粉末，硬化后就制成硅橡胶。根据渗入粉末比例的不同，硅橡胶会成为低电阻的导体，或者成为电阻随外力变化的感应电阻件。前者一般称为导电橡胶，后者称为感压导电橡胶。导电橡胶用作接触觉传感器，而电阻变化的橡胶在压觉传感器中使用，如图 4-36 所示。分布式传感器同时使用这两种特性的硅橡胶。

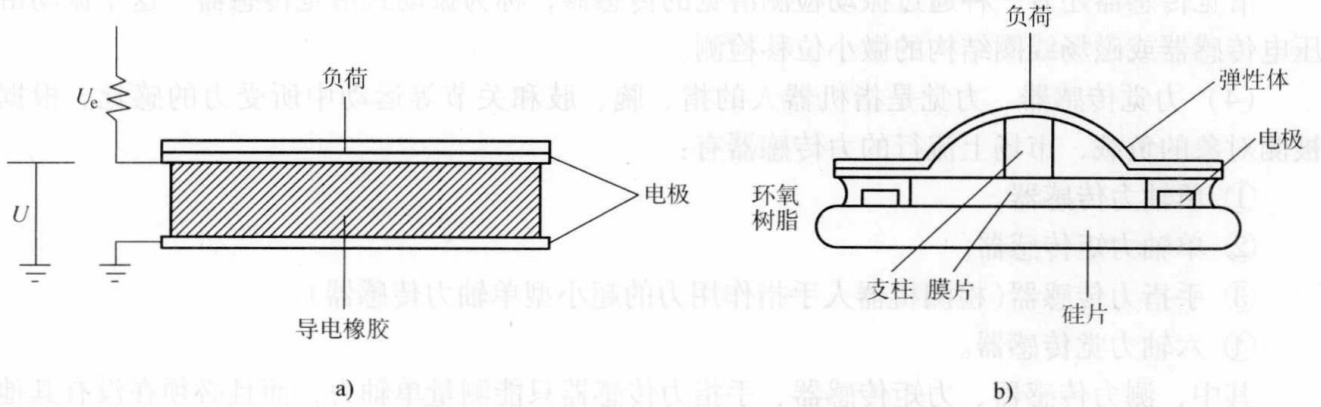



图 4-36　导电橡胶压觉传感器

a）感压导电橡胶压觉传感器　b）压阻式压觉传感器

（3）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夹持力的给定值。夹持力不够，物体会从手爪中滑脱；夹持力过大，有可能引起被夹持物体的损坏。在不损害物体的前提下，实现可靠夹持功能的传感器称为滑觉传感器。滑觉传感器有滚轮式、球式和振动式三种。

如图 4-37 所示为滚轮式滑觉传感器的典型结构。物体在传感器表面上滑动时，和滚轮相接触，把滑动变成转动。滚轮侧头安装在弹簧板支承上，滚轮表面突出夹持面约 1mm，一旦物体在手爪中出现滑动，滚轮产生相应的角位移，装在滚轮中间的光电码盘发出反馈信号，控制系统立即调整夹持力阻止滑动。

若用球代替滚轮，传感器的球面凹凸不平，球转动时碰撞一个触针，使导电圆盘振动，

从而可知接点的开关状态，可以检测各个方向的滑动。如图 4-38 所示为球式滑觉传感器的典型结构。传感器的球面有黑白相间的图形，黑色为导电部分，白色为绝缘部分，两个电极和球面接触，根据电极间导通状态的变化，就可以检测球的转动，即检测滑觉。传感器表面伸出的触针能和物体接触，物体滑动时，触针与物体接触，在触针上输出脉冲信号。脉冲信号的频率反映了滑动速度，脉冲信号的个数对应滑动距离。

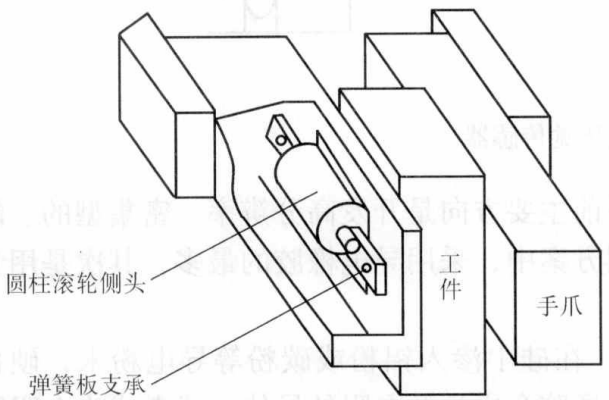



图 4-37　滚轮式滑觉传感器

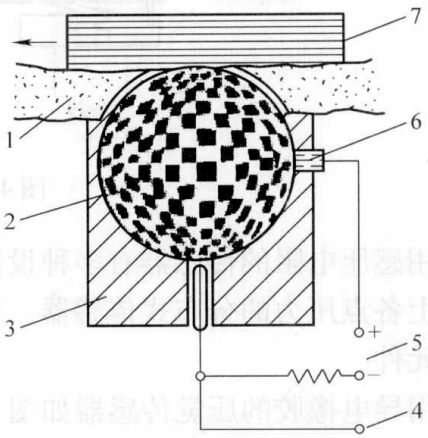



图 4-38　球式滑觉传感器

1—软表层　2—金属球　3—绝缘体　4—输出电势
5—电源　6—触针　7—滑动物体

滑觉传感器还有一种通过振动检测滑觉的传感器，称为振动式滑觉传感器。这个振动由压电传感器或磁场线圈结构的微小位移检测。

（4）力觉传感器　力觉是指机器人的指、腕、肢和关节等运动中所受力的感觉。根据被测对象的负载，市场上流行的力传感器有：

① 单轴力传感器。

② 单轴力矩传感器。

③ 手指力传感器（检测机器人手指作用力的超小型单轴力传感器）。

④ 六轴力觉传感器。

其中，测力传感器、力矩传感器、手指力传感器只能测量单轴力，而且必须在没有其他负载分量作用的条件下。因此，除了手指传感器之外，其他几种都不适用于机器人。但有人通过巧妙地安装轴承，仅在机器人驱动电动机力矩起作用的部位安装力矩传感器来测量力矩，对机器人进行控制。

机器人的力控制主要控制作用于机器人手爪的任意方向的负载分量，因此需要六轴力觉传感器。在机器人研制中，常常在结构部件的某一部位贴上应变片，校准其输出和负载的关系后，把它当做多轴力传感器使用，但是往往忽视了其他负载分量的影响。力控制本来就比位置或速度控制难，由于上述测量上的原因，实现力控制就更困难了。为了使负载测量结果准确可信，使用六轴力觉传感器较好。

如图 4-39 所示为一种典型的手腕力觉传感器的结构原理示意图。这种传感器做成十字形状，四个工作梁的横断面都为正方形，每根梁的一端与圆柱形外壳连接在一起，另一端固定在手腕轴上。在每根梁的四个表面上选取测量敏感点，粘贴半导体应变片，并将每根工作梁相对表面上的两块应变片以差动方式与电位计电路连接。在外力作用下，电位计的输出电

压将正比于该对应变片敏感方向上力的大小，然后再利用传感器的特征数据(标定传感器上取得)，可将电位计的输出换算成相对于参考坐标系的6个力分量的大小。

20世纪70年代中期，美国斯坦福大学利用应变计研制出了一种机器人用的六维力和力矩传感器。如图4-40所示，它利用一段直径为75mm的铝管巧妙地加工而成，具有8个窄长的弹性梁，每一个梁的颈部开有小槽，以使颈部只传递力，转矩作用很小，梁的另一头两侧贴有应变片(一片用于温度补偿)。假设用 $P_{x+}$、$P_{x-}$、$P_{y+}$、$P_{y-}$、$Q_{x+}$、$Q_{x-}$、$Q_{y+}$、$Q_{y-}$ 表示如图4-40所示8根应变梁的变形信号输出，则六维力(力矩)可表示为

$$F_x = k_1(P_{y+} + P_{y-})$$

$$F_y = k_2(P_{x+} + P_{x-})$$

$$F_z = k_3(Q_{x+} + Q_{x-} + Q_{y+} + Q_{y-})$$

$$M_x = k_4(Q_{y+} - Q_{y-})$$

$$M_y = k_5(Q_{x+} - Q_{x-})$$

$$M_z = k_6(P_{x+} - P_{x-} + P_{y+} - P_{y-})$$

式中　$k_1$，$k_2$，$k_3$，$k_4$，$k_5$，$k_6$——结构系数，由试验测定。

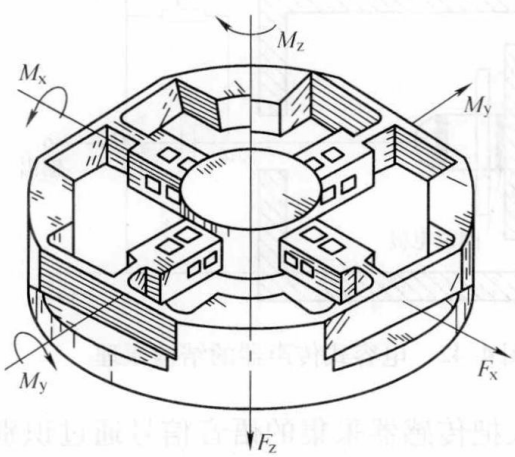



图4-39　十字手腕力觉传感器的结构原理示意图

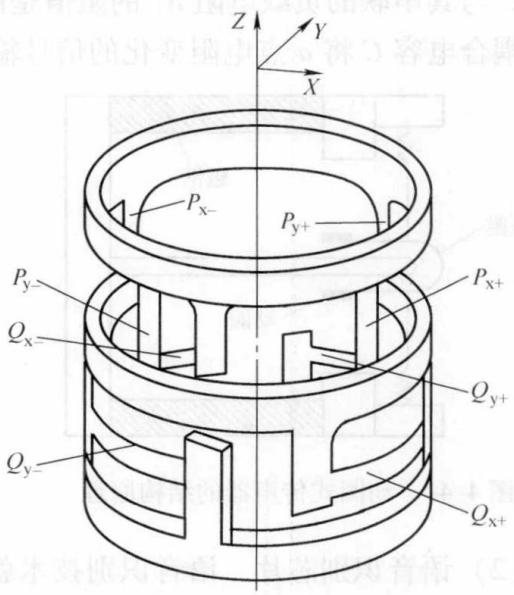



图4-40　一种机器人用的六维力和力矩传感器

该传感器为直接输出型力传感器，不需要再做运算，并能进行温度自动补偿。其主要缺点是维间有一定耦合，传感器弹性梁的加工难度大，且传感器刚性较差。

六维力传感器是机器人最重要的外部传感器之一，该传感器能同时获取包括3个力和3个力矩在内的全部信息，因而被广泛用于力/位置控制、轴孔配合、轮廓跟踪及双机器人协调等先进机器人控制之中，已成为保障机器人操作安全与完善作业能力方面不可缺少的重要工具。20世纪80年代，仅美国、日本等国家的少数公司有产品且价格昂贵。以中国科学院合肥智能机械研究所为首，联合东方大学和哈尔滨工业大学开展研究，在解决了传感器结构设计与加工、多维力信息处理等关键技术后，产品样机的主要技术指标达到国外同期先进产品水平，制定了我国第一部六维力传感器产品企业标准并通过国家认证。

3. 听觉传感器

人用语言指挥工业机器人比用键盘指挥工业机器人更方便，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。要实现该想法，需要听觉传感器及语言识别系统。

（1）听觉传感器　听觉传感器的功能将声信号转换为电信号，通常也称传声器。常用的听觉传感器有动圈式传感器、电容式传感器。

① 动圈式传声器。如图 4-41 所示为动圈式传声器的结构原理。传声器的振膜非常轻、薄，可随声音振动。动圈同振膜粘在一起，可随振膜的振动而运动。动圈浮在磁隙的磁场中，当动圈在磁场中运动时，动圈中可产生感应电动势。此电动势与振膜和频率相对应，因而动圈输出的电信号与声音的强弱、频率的高低相对应。通过此过程，这种传声器就将声音转换成了音频电信号输出。

② 电容式传声器。如图 4-42 所示为电容式传声器的结构原理，由固定电极和振膜构成一个电容，$U_p$ 经过电阻 $R_L$ 将一个极化电压加到电容的固定电极上。当声音传入时，振膜可随时间发生振动，此时振膜与固定电极间电容量也随声音而发生变化，此电容的阻抗也随之变化；与其串联的负载电阻 $R_L$ 的阻值是固定的，电容的阻抗变化就表现为 $a$ 点电位的变化。经过耦合电容 $C$ 将 $a$ 点电阻变化的信号输入到前置放大器 $A$，经放大后输出音频信号。

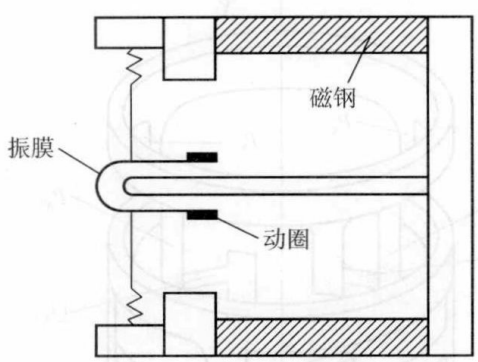



图 4-41　动圈式传声器的结构原理

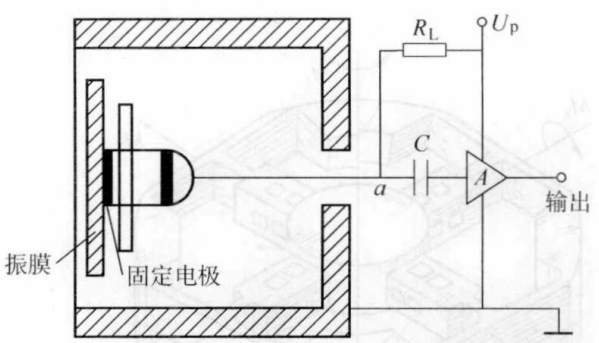



图 4-42　电容式传声器的结构原理

（2）语音识别芯片　语音识别技术就是让机器人把传感器采集的语音信号通过识别和理解过程，转变为相应的文本或命令的高级技术。计算机语音识别过程与人对语音识别处理过程基本上是一致的。目前，主流的语音识别技术是基于统计模式识别的基本理论，一个完整的语音识别系统可大致分为三个部分。

① 语音特征提取。其目的是从语音波形中提取随时间变化的语音特征序列。声学特征的提取与选择是语音识别的一个重要环节。声学特征的提取是一个信息大幅度压缩的过程，目的是使模式划分器能更好地划分。由于语音信号的时变特性，特征提取必须在一小段语音信号上进行，也即进行短时分析。

② 识别算法。声学模型是识别系统的底层模型，并且是语音识别系统中最关键的一部分。声学模型通常由获取的语音特征通过训练产生，目的是为每一个发音建立发音模板。在识别时，将未知的语音特征同声学模型（模式）进行匹配与比较，计算未知语音的特征矢量序列和每个发音模板之间的距离。声学模型的设计和语言发音的特点密切相关。声学模型单元大小（字发音模型、半音节模型或音素模型）对语音训练数据量大小、系统识别率以及灵活性有较大影响。

③ 语义理解。计算机对识别结果进行语法、语义分析，明白语言的意义，以便作出相应的反应，通常是通过语言模型来实现。

4. 视觉传感器

人类从外界获得的信息大多数是由眼睛得到的。人类视觉细胞的数量是听觉细胞的三千多倍，是皮肤感觉细胞的100多倍。如果要赋予机器人较高级的智能，机器人必须通过视觉系统更多的获取周围世界的信息。如图4-43～图4-45所示是机器人视觉的几种典型应用。

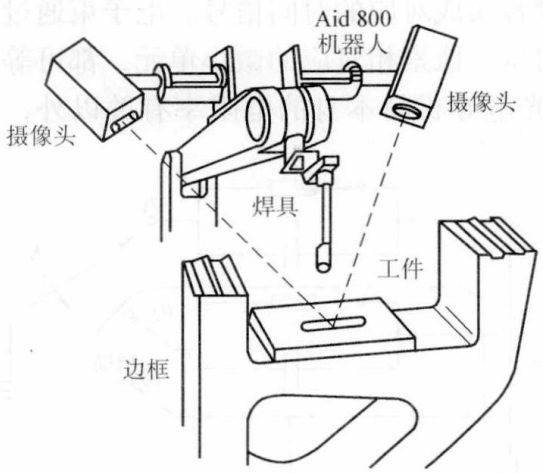



图4-43　焊接机器人用视觉系统进行作业定位

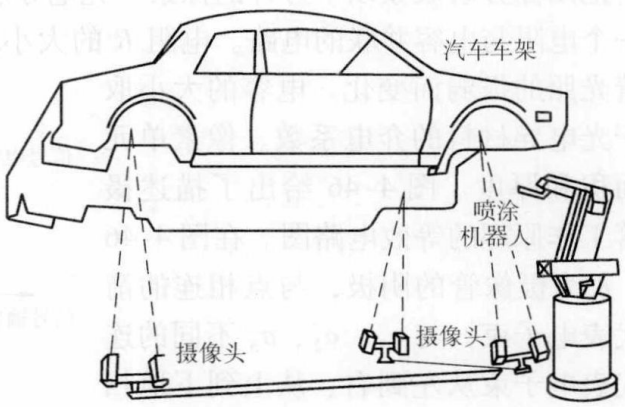



图4-44　视觉系统导引机器人进行喷涂作业

人的视觉通常是识别环境对象的位置坐标、物体之间的相对位置、物体的形状颜色等，由于生活空间是三维的，机器人的视觉必须能理解三维空间的信息，即机器人的视觉与文字识别或者图像识别是有区别的，需要进行三维图像的处理。因为视觉传感器只能得到二维图像，从不同角度上看同一物体，得到的图像也不同；光源的位置不同，得到的图像的明暗程度与分布也不同；实际的物体可能不重叠，但是从某一角度上看却能得到重叠的图像。人们采取了很多措施来解决这个问题，并且为了减轻视觉系统的负担，尽可能地改善外部环境条件，加强视觉系统本身的功能和使用较好的方法进行信息处理。

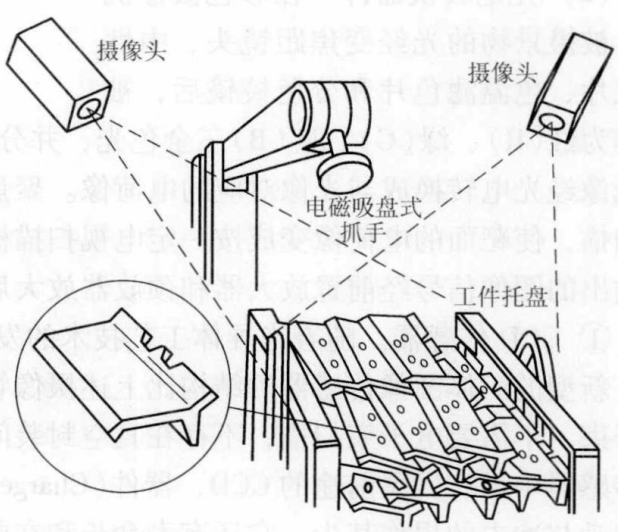



图4-45　搬运机器人用视觉系统导引电磁吸盘抓取工件

（1）视频摄像头　视频摄像头（电视摄像机）是一种广泛使用的景物和图像输入设备，它能将景物、图片等光学信号转变为电视信号或图像数据，主要有黑白摄像机和彩色摄像机两种。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。它的好处是处理数据量小、处理速度快。电视摄像管是将光学图像转变为电视图像信号的器件，是摄像机的关键部件。它利用光电效应，把器件成像面上的

空间二维景物光像转变成以时间为序的一维图像信号。它具有将光信号转变为电信号的光电转换功能和将空间信息转变为时间信息的功能。

摄像管由密封在玻璃罩内的光电靶和电子枪组成，被摄的景物经过摄像机镜头在光电层表面成像，靶面各个不同的点随着照度的不同激励出数目不同的光电子，从而产生数值不同的光电导，进而产生高低不同的电位起伏，形成与光像对应的电位图像。

由电子枪射出的电子束在偏转系统形成的电场或磁场的作用下，从左到右同时又从上到下地对靶面进行扫描，将按空间位置分布的电位图像转换成对应的时间信号。电子束通过扫描，把图像分解成数以十万计的像素。光电导层上与每一像素相对应的微小单元，都可等效为一个电阻与电容并联的电路。电阻 $R$ 的大小除与光电导材料本身的电阻率有关以外，还随着光照的强弱而变化。电容的大小取决于光电导材料的介电系数、像素单元的面积和厚度。图 4-46 给出了描述摄像管工作原理的等效电路图。在图 4-46 中，$K$ 为摄像管的阴极，与点相连的箭头代表电子束，与 $a_1$、$a_2$、$a_3$ 不同的连接代表电子束从左到右、从上到下地扫描过程，电压 $E$ 经负载电阻 $R_L$ 加到信号电极上。

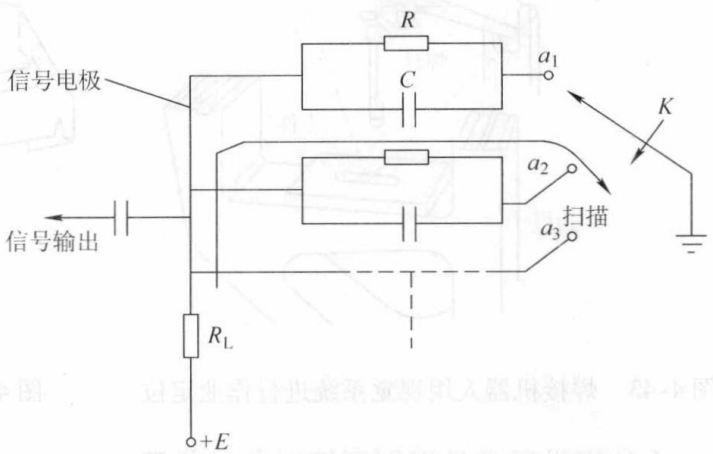



图 4-46 摄像管工作原理的等效电路图

（2）光电转换器件 在彩色摄像机中，被摄景物的光经变焦距镜头、中性滤色片、色温滤色片和分色棱镜后，被分解为红(R)、绿(G)、蓝(B)三全色光，并分别在摄像管 R、G、B 的靶面上成像，靶面上的光像经光电转换成与光像对应的电荷像。聚焦和偏转系统使管内的电子束产生良好的聚焦和扫描，使靶面的电荷像变成按一定电视扫描标准的、随时间变化的三基色图像信号。摄像管输出的图像信号经前置放大器和预放器放大后，送到视频处理电路。

① CCD 传感器。随着半导体工艺技术的发展，各种类型的固体图像传感器已经研制成功。新型的固体图像传感器的结构比上述摄像管要简单，因为它不需要热离子的阴极来产生电子束，不需要电子束扫描，不存在真空封装问题，对外界磁场的屏蔽要求也很低。固体图像传感器中最有发展前途的 CCD，器件(Charge Couple Device，电荷耦合器件)与摄像管相比，受振动与冲击的损伤甚少，它还有寿命长和在弱光下灵敏度高的优点。由于它是一块简单的硅片，故与摄像管相比，它不需要预热，而且体积小、重量轻、造价低，不受滞后(移动亮度引起的光斑或拖影)及由强光或电子束轰击引起的光敏表面损伤的影响。因此，CCD 传感器成了把环境信息作为图像加以输入的最通用的传感器。

CCD 传感器是半导体传感器，数毫米的方形芯片上二维配置了多个光电转换元件。这种芯片很小，可设计、制造出手指大小的超小型摄像装置，可用在检查管子内部的系统上。

对 CCD 平面进行二维扫描，取出作为电信号的模拟电压，再进行空间取样(用某一频率采样)，把表示采样点的灰度的电压值量化(其值称为浓度值)，或将表示彩色图像的三基色的电压值量化，并实行二值数字化处理，便得到了数字化的图像数据。

数字化了的数据存储在作为机器人大脑的计算机内的二维阵列处理器内。假定表示图像

灰度的函数为$f$，则$f$表示浓淡图像，阵列的$i$行$j$列的元件值表示为$f(i,j)$。对图像处理算法进行编程时，$f$可看作阵列名。若用彩色摄像机，也可得到彩色图像。这时，函数$f$的值可以看做是红、绿、蓝三组值$(r,g,b)$，也可看作得到三个阵列$r$、$g$、$b$。

当高清晰度输入图面大的对象时，可使用线型传感器。线型传感器是由多个元件一维配置的传感器，像复印机那样的移动传感器，或者像传真机那样移动对象可得到二维的信息。

② MOS图像传感器。MOS图像传感器又称为自扫描光电二极管阵列，由光电二极管和MOS场效应管成对地排列在硅衬底上，构成MOS图像传感器。通过选择水平扫描线和垂直扫描线来确定像素的位置，使两个扫描线的交点上的场效应管导通，然后从与之成对的光电二极管取出像素信息。扫描是分时按顺序进行的。

（3）PSD传感器　PSD是光束照射到一维的线和二维的平面时，检测光照射位置的传感器。如图4-47所示，PSD是把硅半导体以P型和N型的电阻层形式构造成层状结构。光照射到PSD上，生成电子空穴对，从而在P型和N型电阻层上安装的电极接通的连续电路上流过电流。检测此时的电流，就可以计算出光的照射位置。

一维的PSD的工作原理如图4-47所示。

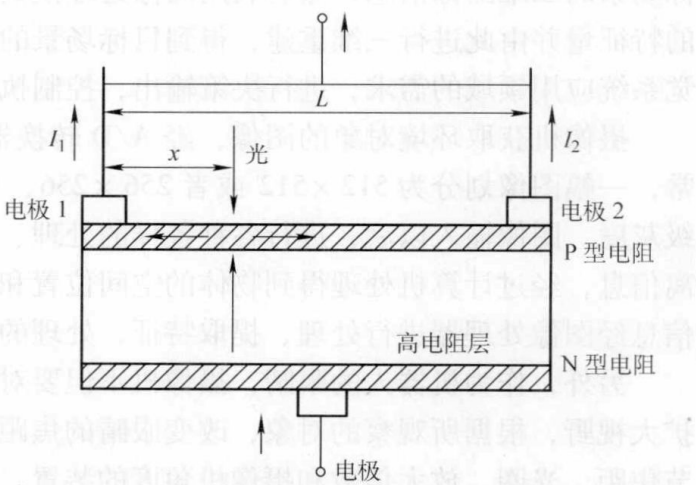



图4-47　PSD工作原理图

在P型电阻层相距$L$的两端装设两个电极，假定光照射在距原点的左端电极1的$x$处。这时流过电路的电流被分流，假定流过电极1和2的电流为$I_1$和$I_2$。在P型电阻层上，流到两电极的电流是总电流分流出来的，且按光照点到两电极的距离分流，故可以用下式计算出光的照射位置

$$x=\frac{L}{1+\dfrac{I_1}{I_2}} \tag{4-25}$$

（4）形状识别传感器　对于不透明的物体用CCD摄像机拍摄穿透光，可得到物体的轮廓图像。如果形状有特征，用轮廓可以识别物体，例如用手印的轮廓图像就可以鉴别每个人。对于这种有特征的形状，当使用一股的照明光拍摄其反射光图像时，是很难检测其形状的，这时利用轮廓图像就容易识别。

在一般的图像输入系统中，由CCD摄像机输出的电压将由A/D转换器量化成8bit的浓度值，并生成相应的图像，用软件进行二值化可得到轮廓图像。如果有比较器，就可以用简单的电路构成二值化电路，既可以直接把模拟的输出电压进行二值化，也可以把A/D变换后的数字二值化。如果把这个二值(多为0和1)的变化部分输出，就可构成高速检测形状的传感器。

（5）工业机器人视觉系统

1）工业机器人视觉系统的基本原理。工业机器人视觉系统的基本原理和人的视觉系统相似，机器人视觉系统通过图像和距离等传感器获取环境对象的图像、颜色和距离等信息，然后传递给图像处理器，利用计算机从二维的图像中理解和构造出三维世界的真实模型。如

图 4-48 所示为机器人视觉系统的原理框图。

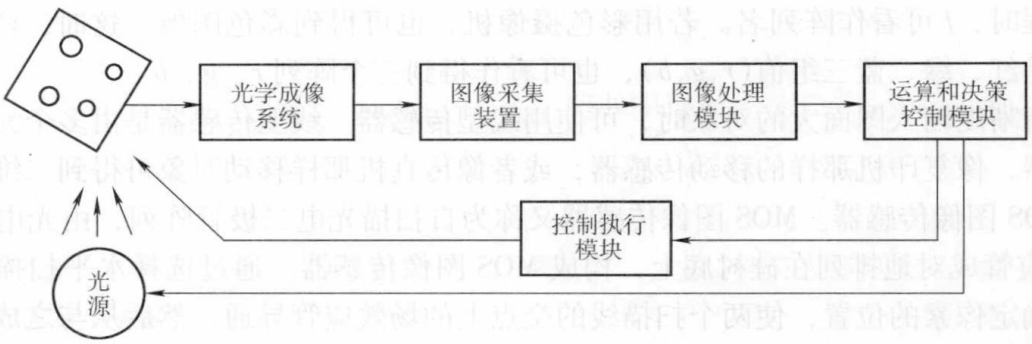



图 4-48 机器人视觉系统的原理框图

首先通过光学成像系统(一般用 CCD 摄像机)摄取目标场景，通过图像采集装置获取目标场景的二维图像信息，然后利用图像处理模块对二维图像信息进行图像处理，提取图像中的特征量并由此进行三维重建，得到目标场景的三维信息；根据计算出的三维信息，结合视觉系统应用领域的需求，进行决策输出，控制执行模块，实现特定的功能。

摄像机获取环境对象的图像，经 A/D 转换器转换成数字量，从而变成数字化图形。通常，一幅图像划分为 512 ×512 或者 256 ×256，各点亮度用 8 位二进制表示，即可表示 256 级灰度。图像输入以后，进行各种各样的处理、识别以及理解，另外通过距离测定器得到距离信息，经过计算机处理得到物体的空间位置和方位，通过彩色滤光片得到颜色信息。上述信息经图像处理器进行处理、提取特征，处理的结果再输出到机器人，以控制它进行动作。

另外，作为机器人的眼睛，摄像机不但要对所得到的图像进行静止处理，而且要积极地扩大视野，根据所观察的对象，改变眼睛的焦距和光圈。因此，机器人视觉系统还应具有调节焦距、光圈、放大倍数和摄像机角度的装置。

2）利用视觉识别抓取工件的工业机器人系统。如图 4-49 所示是美国通用汽车公司研究的一种在制造装置中安装的，且能在噪声环境下操作的机器人视觉系统，称为 Consight-I 型系统。该系统为了从零件的外形获得准确、稳定的识别信息，巧妙地设置照明光，从倾斜方向向传送带发送两条窄条缝隙光，用安装在传送带上方的固态线性传感器摄取其图像，而且预先把两条缝隙光调整到刚好在传送带上重合的位置。这样，当传送带上没有零件时，缝隙光合成了一条

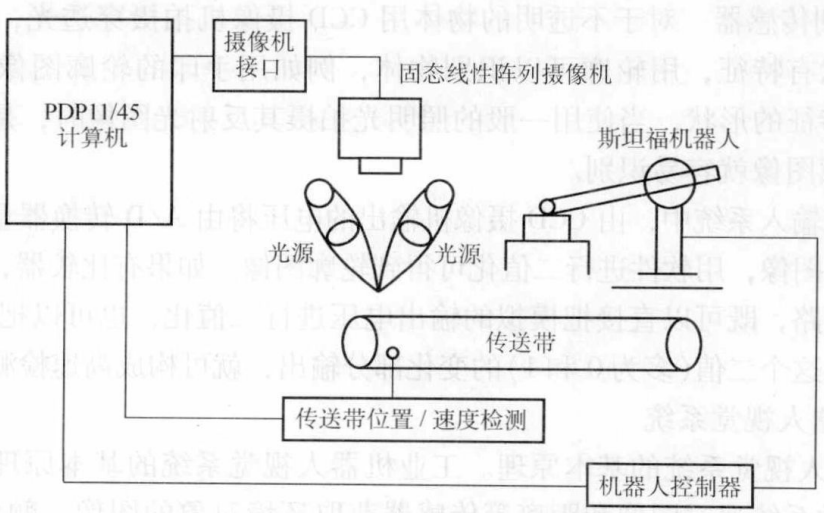



图 4-49 Consight-I 型系统结构

直线；当零件随传送带通过时，缝隙光变成两条线，其分开的距离同零件的厚度成正比。由于光线的分离之处正好就是零件的边界，所以利用零件在传感器下通过的时间，就可以取出准确的边界信息。主计算机可处理装在机器人工作位置上方的固态线性阵列摄像机所检测的工件，有关传送带速度的数据也送到计算机中处理。当工件从视觉系统位置移动到机器人位置时，计算机利用视觉和速度数据确定工件的位置、取向和形状，并把这种信息经接口送到机器人控制器。根据这种信息，工件仍在传送带上移动时，机器人便能成功地接近和拾取工件。

### 4.2.4　多传感器融合

1. 多传感器融合技术

系统中使用的传感器种类和数量越来越多，每种传感器都有一定的使用条件和感知范围，并且又能给出环境或对象的部分或整个侧面的信息。为了有效地利用这些传感器信息，需要采用某种形式对传感器信息进行综合、融合处理，不同类型信息的多种形式的处理系统就是传感器融合。

传感器融合技术涉及神经网络、知识工程、模糊理论、检测和控制领域的新理论和新方法。传感器的融合类型有多种，现举两个例子。

① 竞争性的。在传感器检测同一环境或同一物体的同一性质时，传感器提供的数据可能是一致的，也可以是矛盾的。如有矛盾，就需要系统裁决。裁决的方法有多种，如加权平均法、决策法等。在一个导航系统中，车辆位置的确定可以通过计算法定位系统（利用速度、方向等记录数据进行计算）或路标（如交叉路口、人行道等参照物）观察来确定。若路标观测成功，则用路标观测的结果，并对计算法的值进行修正，否则利用计算法所得的结果。

② 互补性的。传感器提供不同形式的数据，例如识别三维物体的任务，就说明类型的融合。利用彩色摄像机和激光测距仪确定一段阶梯道路，彩色摄像机提供图像（如颜色、特征），而激光测距仪提供距离信息，两者融合即可得到三维信息。

目前，要使多传感器信息融合体系化尚有困难，而且缺乏理论依据。多传感器融合的理想目标应是人类的感觉、识别、控制体系，但由于对后者尚无一个明确的工程学的阐述，所以机器人传感器融合体系要具备什么样的功能尚是一个模糊的概念。相信随着机器人智能水平的提高，多传感器融合理论和技术将会逐步完善和系统化。

2. 多传感器融合应用实例

下面介绍日本东海大学研制的营救机器人手爪传感系统。

（1）营救机器人的系统结构　营救机器人的系统结构如图4-50所示，传感器控制系统的5个功能模块如下：

① 机器人手臂模块。为避免伤害到人的身体，模块采用小功率的五自由度工业机器人，机器人臂是具有直流电动机和编码器的伺服系统。

② 机器人手爪模块。手爪具有

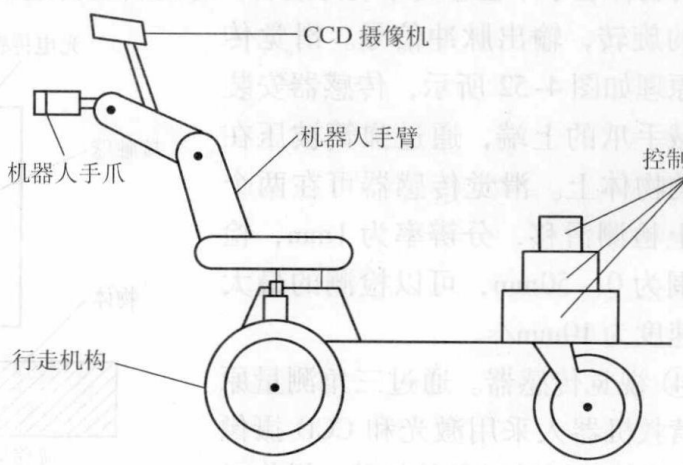



图4-50　营救机器人的系统结构

两个关节的平面型手指，用来抓住人的手臂，手爪具有自适应抓取的功能。

③ 传感器与信息处理模块。机器人手爪具有3种传感器：阵列式触觉传感器、六维力/力矩传感器和滑觉传感器，还有两个用于远距离测量和监控的视觉传感器——CCD摄像机。

④ 运动机构模块。机构为四轮结构，其中两个由电动机驱动。

⑤ 系统控制模块。系统控制模块使用了两台计算机，1台用于机器人控制，另1台用于传感器信息融合处理。

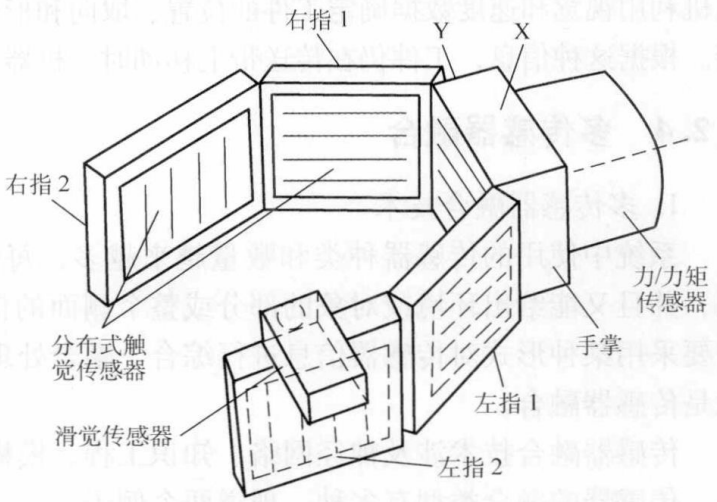



图4-51 营救机器人手爪及其传感器分布

（2）手爪传感器 营救机器人手爪及其传感器分布如图4-51所示，在手爪上集成了力/力矩传感器、触觉阵列传感器和滑觉传感器。

① 分布式触觉传感器。作为机器人的手指，首先，分布式(阵列)触觉传感器检测接触压力及其分布。营救机器人手爪采用压力敏感橡胶和条状胶片电极构成的触觉阵列传感器，用来控制处理不规则物体的夹持力。条状胶片电极只用一面，共有16根，8根作为地线，其余8根作为信号线，这样在每个手指部位可以检测连续接触电压。为了检测一个平面的平衡压力，这种线传感器在第一个指节上沿纵向布置，而在第二个指节上沿横向布置。在手掌底部内表面也布置了条状触觉传感器阵列。

接触力首先转换为导电橡胶的电阻，通过测量电压降检测接触力。所有电极数据通过I/O接口送往处理器。

② 力/力矩传感器。力/力矩传感器为B. L. Autotec Ine. 公司生产的谐振梁应变传感器，测力范围为0～98N，测力矩范围为0～9.8N·m，通过串口连接到计算机。传感器坐标系中，沿手的方向为$Z$向，夹持方向为$Y$向，$X$向为$Y$、$Z$的法线方向。

③ 滑觉传感器。“滑”指被抓取得物体在手中的位移，滑觉传感器为球式滑觉传感器。当夹持的物体在手中位移时带动球旋转。球的转动传递给带有狭缝的转盘，采用光电传感器检测转盘的旋转，输出脉冲信号。滑觉传感器原理如图4-52所示，传感器安装在机械手爪的上端，通过弹簧被压在夹持的物体上。滑觉传感器可在两个方向上检测滑移，分辨率为1mm，检测范围为0～50mm，可以检测的最大滑移速度为10mm/s。

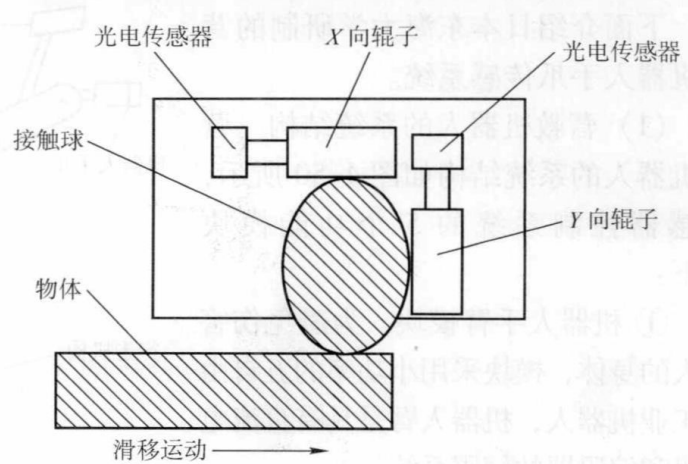



图4-52 滑觉传感器原理

④ 视觉传感器。通过三角测量原理，营救机器人采用激光和CCD摄像机定位来测量援助对象的位移，操作者也可以通过手臂上的CCD摄像机来监

测援助对象的状况。

（3）多传感器手爪数据融合系统　多传感器手爪数据融合系统分为机器人手爪稳定抓取模块、状态识别模块、控制模块和反馈控制模块。

① 机器人手爪稳定抓取模块。抓取状态的判断依据于分布式触觉传感器的数据。通过得到的每个触觉传感器的输出计算出总的夹持力，利用平均压力计算每个触觉传感器的不同输出量，从而得到稳定抓取的判断条件。

② 状态识别模块。从传感器的数据中提取营救工作的4个基本特征量——腕部力矩的变化量、夹持力的变化量、滑动量和抓取位置的变化量，通过这些特征量来判断机器人手爪操作时对人体的可能伤害程度。营救机器人危险操作程度的状态识别特征量，通过上述4个特征量分别乘以其权重系数之和得到。

③ 控制模块。机器人手爪抓住人的手臂后，按预先设定的策略进行控制。机器人运动的调节控制依靠稳定抓取判断模块中的2个特征量和识别模块中的4个特征量及If-then规则进行判断，并按以上6个特征量的差异来区分不同的优先级。第一优先级控制是抓取姿态的控制，通过调整腕部角度的大小来进行控制。第二优先级控制是抓取力控制，可通过调节抓取力的大小来进行控制。第三优先级控制是运动轨迹控制，确定是进行小调整还是进行大的轨迹变化。如果这些指标进行机器人运动调节时互相矛盾，则按指标的优先级决定下一步的控制操作。通过调节控制，每个特征量会达到稳定的状态，从而使机器人的营救工作的执行处于安全状态，不会伤害人体。

④ 反馈控制模块。首先检查所有传感器的数据，如果某一传感器的数据超出了正常值，意味着正在接受求援的人处于危险的状态，机器人停止操作，不进行更高一级的处理。通常，机器人会被命令停止工作，并在纠正危险状态后，重新操作。

机器人传感器是传感技术的重要组成部分，与大量使用的工业检测传感器相比，对所获取的传感信息种类和智能化处理的要求更高。一方面，无论是研究还是产业化，均需有多种学科专门技术和先进的工艺装备作为支撑；另一方面，目前机器人产业对传感器的需求不大，使形成机器人传感器产业的经济可行性尚不完备。因此，机器人传感器产业化的问题就需另辟蹊径。利用研究所获取的技术成果，辐射和转换面向其他应用领域，研制适合工业、交通、体育、医学等多种行业使用的检测和传感装置，如六维测力平台、触觉指纹传感器就是良好的开端。

从研究方向上，除不断改善传感器的精度、可靠性和降低成本等努力外，今后的热点可能会随着机器人技术向微型化、智能化方向发展以及应用工业领域从工业结构环境拓展至深海、空间和其他人类难以进入的非结构环境，使机器人传感技术的研究与微电子机械系统、虚拟现实技术有更密切的联系。同时，对传感信息的高速处理和完善的静、动态标定测试技术也将会成为机器人传感器发展的关键技术。

## 4.3　机器人编程

机器人的主要特点之一是其通用性，使机器人具有可编程能力是实现这一特点的重要手段。机器人编程必然涉及机器人语言。机器人语言是使用符号来描述机器人动作的方法，它通过对机器人动作的描述，使机器人按照编程者的意图进行各种操作。机器人语言的产生和发展是与机器人技术的发展以及计算机编程语言的发展紧密相关的。编程系统的核心问题是

操作运动控制问题。

### 4.3.1 机器人编程系统及方式

机器人编程是机器人运动和控制问题的结合点，也是机器人系统最关键的问题之一。当前实用的工业机器人常为离线编程或示教，在调试阶段可以通过示教控制盒对编译好的程序一步一步地执行，调试成功后可投入正式运行。机器人语言系统如图 4-53 所示。

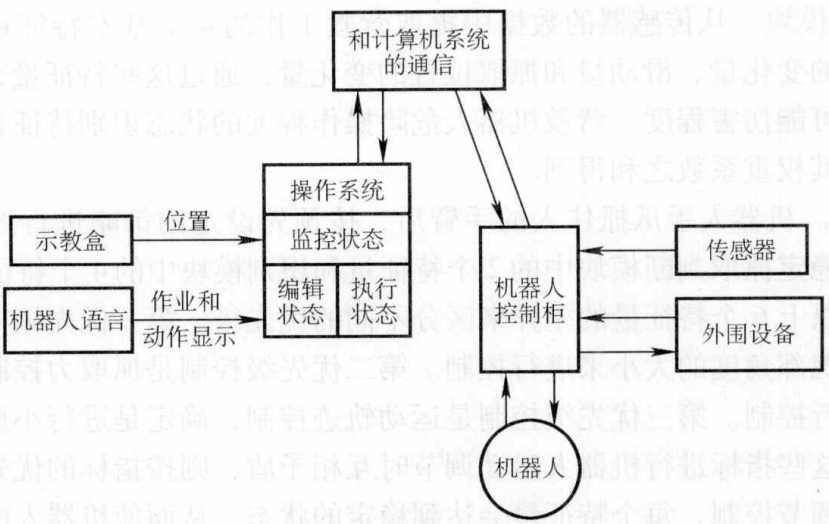



图 4-53 机器人语言系统

机器人语言操作系统包括 3 个基本的操作状态：监控状态、编辑状态、执行状态。

（1）监控状态 用来进行整个系统的监督控制。在监控状态，操作者可以用示教盒定义机器人在空间中的位置，设置机器人的运动速度、存储和调出程序等。

（2）编辑状态 提供操作者编制程序或编辑程序。尽管不同语言的编辑操作不同，但一般都包括写入指令、修改或删去指令以及插入指令等。

（3）执行状态 用来执行机器人程序。在执行状态，机器人执行程序的每一条指令。所执行的程序都是经调试过的，不允许执行有错误的程序。

和计算机编程语言类似，机器人语言程序可以编译。把机器人源程序转换成机器码，以便机器人控制柜能直接读取和执行，编译后的程序运行速度将大大加快。

根据机器人不同的工作要求，需要不同的编程。编程能力与编程方式有很大的关系，编程方式决定着机器人的适应性和作业能力。随着计算机在工业上的广泛应用，工业机器人的计算机编程变得日益重要。国内外尚未制定统一的机器人控制代码标准，所以编程语言也是多种多样的，目前工业机器人的编程方式有以下几种。

1. 顺序控制的编程

在顺序控制的机器中，所有的控制都是由机械的或者电气的顺序控制器来实现，一般没有程序设计的要求。顺序控制的灵活性小，这是因为所有的工作过程都已编好，由机械挡块，或其他确定的办法所控制。大量的自动机都是在顺序控制下操作的，这种方法的主要优点是成本低、易于控制和操作。

2. 示教方式编程

目前，大多数工业机器人都具有采用示教方式来编程的功能。示教方式编程一般可分为手把手示教编程和示教盒示教编程两种方式。

（1）手把手示教编程　手把手示教编程方式主要用于喷漆、弧焊等要求实现连续轨迹控制的工业机器人示教编程中。具体的方法是人工利用示教手柄引导末端执行器经过所要求的位置，同时由传感器检测出工业机器人各关节处的坐标值，并由控制系统记录、存储下这些数据信息。实际工作中，工业机器人的控制系统会重复再现示教过的轨迹和操作技能。

手把手示教编程也能实现点位控制，与CP控制不同的是它只记录各轨迹程序移动的两端点位置，轨迹的运动速度则按各轨迹程序段对应的功能数据输入。

（2）示教盒示教编程　示教盒示教编程方式是人工利用示教盒上所具有的各种功能的按钮来驱动工业机器人的各关节轴，按作业所需要的顺序单轴运动或多关节协调运动，从而完成位置和功能的示教编程。示教盒示教一般用于大型机器人或危险条件作业下的机器人示教。

示教盒通常是一个带有微处理器的、可随意移动的小键盘，内部ROM中固化有键盘扫描和分析程序。其功能键一般具有回零、示教方式、自动方式和参数方式等。

示教编程控制由于具有编程方便、装置简单等优点，在工业机器人的初期得到较多的应用。但是，由于功能编辑比较困难、难使用传感器、难以表现沿轨迹运动时的条件分支、缺乏记录动作的文件和资料、难以积累有关的信息资源、对实际的机器人进行示教时要占用机器人、示教人员要熟练等缺点的限制，促使人们又开发了许多新的控制方式和装置，以使工业机器人能更好更快地完成作业任务。

3. 脱机编程或预编程

脱机编程和预编程的含义相同，它是指用机器人程序语言预先用示教的方法编程。脱机编程有以下几个方面的优点：

1）编程时可以不使用机器人，可腾出机器人去做其他工作。

2）可预先优化操作方案和运行周期。

3）以前完成的过程或子程序可结合到待编的程序中去。

4）可用传感器探测外部信息，从而使机器人作出相应的响应。这种响应使机器人可以在自适应的方式下工作。

5）控制功能中，可以包含现有的计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)的信息。

6）可以用预先运行程序来模拟实际运动，从而不会出现危险，以在屏幕上模拟机器人运动来辅助编程。

7）对不同的工作目的，只需替换一部分待定的程序。

在非自适应系统中，没有外界环境的反馈，仅有的输入是各关节传感器的测量值，从而可以使用简单的程序设计手段。

### 4.3.2　对机器人的编程要求

1. 能够建立世界模型(World Model)

在进行机器人编程时，需要一种描述物体在三维空间内运动的方式，所以需要给机器人及其相关物体建立一个基础坐标系。这个坐标系与大地相连，也称“世界坐标系”。机器人工作时，为了方便起见，也建立其他坐标系，同时建立这些坐标系与基础坐标系的变换关系。机器人编程系统应具有在各种坐标系下描述物体位姿的能力和建模能力。

2. 能够描述机器人的作业

机器人作业的描述与其环境模型密切相关，编程语言水平决定了描述水平。现有的机器人语言需要给出作业顺序，由语法和词法定义输入语句，并由它描述整个作业。例如装配作

业可描述为世界模型的一系列状态，这些状态可用工作空间内所有物体的位姿给定，这些位姿也可利用物体间的空间关系来说明。

3. 能够描述机器人的运动

描述机器人需要进行的运动是机器人编程语言的基本功能之一。用户能够运用语言中的运动语句与路径规划器链接，允许用户规定路径上的点及目标点，决定是否采用点插补运动或笛卡儿直线运动。用户还可以控制运动速度或运动持续时间。

4. 允许用户规定执行流程

同一般的计算机编程语言一样，机器人编程系统允许用户规定执行流程，包括试验和转移、循环、调用子程序以至中断等。

通常需要用某种传感器来监控不同的过程。然后，通过中断或登记通信，机器人系统能够反应由传感器检测到的一些事件。有些机器人语言提供规定这种事件的监控器。

5. 有良好的编程环境

如同任何计算机一样，一个好的编程环境有助于提高程序员的工作效率。大多数机器人编程语言含有中断功能，以便能够在程序开发和调试过程中每次只执行一条单独语句。根据机器人编程的特点，其支撑软件应具有下列功能：

1）在线修改和立即重新启动。机器人作业需要复杂的动作和较长的执行时间，在失败后从头开始运行程序并不总是可行的。因此，支撑软件必须有在线修改程序和随时重新启动的能力。

2）传感器的输出和程序追踪。机器人和环境之间的实时相互作用常常不能重复，因此，支撑软件应能随着程序追踪记录传感器输出值。

3）仿真。可在没有机器人和工作环境的情况下测试程序，因此可有效地进行不同程序的模拟调试。

6. 需要人机接口和综合传感信号

在编程和作业过程中，应便于人与机器人之间进行信息交换，从而可以在运动出现故障时能及时处理；在控制器设置紧急安全开关，以确保安全。而且，随着作业环境和作业内容复杂程度的增加，需要有功能强大的人机接口。

机器人语言的一个极其重要的部分是与传感器的相互作用。语言系统应能提供一般的决策结构，如“if…then…else”“case…”“until…”和“while…do…”等，以便根据传感器的信息来控制程序的流程。

### 4.3.3 机器人编程语言的类型

机器人编程语言是一种程序描述语言，它能十分简洁地描述工作环境和机器人的动作，能把复杂的操作内容通过尽可能简单的程序来实现。机器人编程语言也和一般的程序语言一样，应当具有结构简明、概念统一、容易扩展等特点。从实际应用的角度来看，很多情况下都是操作者实时地操纵机器人工作，因此，机器人编程语言还应当简单易学，并且有良好的对话性。高水平的机器人编程语言还能够做出并应用目标物体和环境的几何模型。在工作进行过程中，几何模型又是不断变化的，因此性能优越的机器人语言会极大地减少编程的困难。

从描述操作命令的角度来看，机器人编程语言的水平可以分为以下三种。

1. 动作级

动作级语言以机器人末端执行器的动作为中心来描述各种操作，要在程序中说明每个动作。这是一种最基本的描述方式，通常由使机械手末端从一个位置到另一个位置的一系列命令组成。

动作级语言的每一个命令(指令)对应机器人的一个动作，如可以定义机器人的运动序列(MOVE)，基本语句形式为

MOVE TO(destination)

动作级语言的代表是VAL语言，它的语句比较简单，易于编程。动作级语言的缺点是不能进行复杂的数学运算，不能接受复杂的传感器信息，仅能接受传感器的开关信号，并且和其他计算机的通信能力很差。VAL语言不提供浮点数或字符串，而且子程序不含自变量。

动作级编程又可分为关节级编程和终端执行器编程两种。

(1) 关节级编程　关节级编程程序给出机器人各关节位移的时间序列。当示教时，常通过示教盒上的操作键进行，有时需要机器人的某个关节进行操作。

(2) 终端执行器级编程　终端执行器级编程是一种在作业空间内各种设定好的坐标系里编程的编程方法。在特定的坐标系内，编程应在程序段的开始予以说明，系统软件将按说明的坐标系对下面的程序进行编译。

终端执行器级编程程序给出机器人终端执行器的位姿和辅助机能的时间序列，包括力觉、触觉、视觉等机能以及作业用量、作业工具的选定等。指令由系统软件解释执行。这类语言有的还具有并行功能。其基本特点是：

① 各关节的求逆变换由系统软件支持进行。

② 数据实时处理且导前于执行阶段。

③ 使用方便，占内存较少。

④ 指令语句有运动指令语言、运算指令语句、输入/输出和管理语句等。

2. 对象级

对象级语言解决了动作级语言的不足，它是以描述被操作物体之间的关系(常为位置关系)为中心的语言。使用这种语言时，必须明确地描述操作对象之间的关系和机器人与操作对象之间的关系，它特别适用于组装作业。对象级语言具有以下特点：

(1) 运动控制　具有与动作级语言类似的功能。

(2) 处理传感器信息　可以接受比开关信号复杂的传感器信号，并可利用传感器信号进行控制、监督以及修改和更新环境模型。

(3) 通信和数字运算　能方便地和计算机的数据文件进行通信，数字计算功能强，可以进行浮点计算。

(4) 具有很好的扩展性　用户可以根据实际需要，扩展语言的功能，如增加指令等。

作业对象级编程语言以近似自然语言的方式描述作业对象的状态变化。指令语句是复合语句结构，用表达式记述作业对象的位姿时序数据及作业用量、作业对象承受的力、力矩等时序数据。

将这种语言编制的程序输入编译系统后，编译系统将利用有关环境、机器人几何尺寸、终端执行器、作业对象、工具等的知识库和数据库对操作过程进行仿真，并解决以下几个问题：

① 根据作业对象的几何形状确定抓取位姿。

② 各种感受信息的获取及综合应用。

③ 作业空间内各种事物状态的实时感受及其处理。

④ 障碍回避。

⑤ 和其他机器人及附属设备之间的通信与协调。

3. 任务级

任务级语言是比较高级的机器人语言，允许使用者对工作任务所要求达到的目标直接下命令，而不需要规定机器人所做的每一个动作的细节。只要按某种原则给出最初的环境模型和最终工作状态，机器人可自动进行推理、计算，最后自动生成机器人的动作。任务级语言的概念类似于人工智能中程序自动生成的概念。任务级机器人编程系统能够自动执行许多规划任务。

例如当发出“抓起螺杆”的命令时，该系统必须规划出一条避免与周围障碍物发生碰撞的机械手运动路径，自动选择一个好的螺杆抓取位置，并把螺杆抓起。与此相反，对于前两种机器人编程语言，所有这些选择都需要由程序员进行。因此，任务级系统软件必须能把指定的工作任务翻译为执行该任务的程序。显然，任务及语言的构成是十分复杂的，它必须具有人工智能的推理系统和大型知识库。这种语言现在仍处于基础研究阶段，还有许多问题没有解决。

到现在为止，已经有多种机器人语言问世，有的是研究室里的实验语言，有的是实用的机器人语言。前者中比较有名的有美国斯坦福大学开发的 AL 语言、IBM 公司开发的 AUTOPASS 语言、英国爱丁堡大学开发的 RAPT 语言等；后者中比较有名的有由 AL 语言演变而来的 VAL 语言、日本九州大学开发的 IML 语言、IBM 公司开发的 AML 语言等。详细的机器人语言见表 4-2。

**表 4-2 国外主要的机器人语言**

| 序号 | 语言名称 | 国家 | 研究单位 | 简要说明 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | AL | 美国 | Stanford AI Lab. | 机器人动作级对象物描述 |
| 2 | AUTOPASS | 美国 | IBM Watson Research Lab. | 组装机器人用语言 |
| 3 | LAMA-S | 美国 | MIT | 高级机器人语言 |
| 4 | VAL | 美国 | Unimation | PUMA 机器人(采用 MC6800 和 LSI-11 两级微型机)语言 |
| 5 | RAIL | 美国 | AUTOMATIC 公司 | 用视觉传感器检查零件用的机器人语言 |
| 6 | WAVE | 美国 | Stanford AI Lab. | 操作器控制符号语言 |
| 7 | DIAL | 美国 | Charles stark draper Lab. | 具有 Rcc 柔顺性手腕控制的特殊指令 |
| 8 | RPL | 美国 | Stanford RI Int. | 可与 Unimation 机器人操作程序结合，预先定义子程序库 |
| 9 | TEACH | 美国 | Bendix Corporation | 适于两臂协调动作，和 VAL 同样是使用范围广的语言 |
| 10 | MCL | 美国 | McDonnell Douglas Corporation | 编程机器人、NC 机床传感器、摄像机及其控制的计算机综合制造用语言 |

（续）

| 序号 | 语言名称 | 国家 | 研究单位 | 简要说明 |
|---|---|---|---|---|
| 11 | INDA | 美国、英国 | SRI international and Philips | 相当于 RTL/2 编程语言的子集，处理系统使用方便 |
| 12 | RAPT | 英国 | University of Edinurgh | 类似 NC 语言 APT(用 DEC20. LSI11/2 微型机) |
| 13 | LM | 法国 | AI Group of IMAG | 类似 PASCAI，数据定义类似 AL。用于装配机器人(用 LSI11/3 微型机) |
| 14 | ROBEX | 德国 | Machine Tool Lab. TH Archen | 具有与高级 NC 语言 EXAPT 相似结构的脱机编程语言 |
| 15 | SIGLA | 意大利 | Olivetti | SIGMA 机器人语言 |
| 16 | MAL | 意大利 | Milan Polytechnic | 两臂机器人装配语言，其特征是方便、易于编程 |
| 17 | SERF | 日本 | 三协精机 | SKILAM 装配机器人(用 Z-80 微型机) |
| 18 | PLAW | 日本 | 小松制作所 | Rw 系列弧焊机器人 |
| 19 | IML | 日本 | 九州大学 | 动作级机器人语言 |

### 4.3.4　动作级语言

1. AL 语言系统

1974 年由美国斯坦福大学开发的 AL 语言，是功能比较完善的动作级机器人语言，它还兼有对象级语言的某些特征，适合于装配作业的描述。AL 语言原设计是用于具有传感器信息反馈的多台机器人并行或协调控制的编程。该语言具有高级语言 ALGQL 和 PASCAL 的特点，可以编译成机器语言在实时控制机上执行，还具有实时编程语言的同步操作、条件操作等结构，同时支持现场建模。

(1) AL 语言的基本语法　程序的开始和结尾分别以 BEGIN 和 END(或 COBEGIN 和 COEND)为标记。

一个 AL 程序由包含了描述机器人执行作业的一系列语句组成，各语句之间用“;”隔开。

程序中的变量名以英文字母开头，由字母、数字和横线“_”组成的字符串，如 Puma _ base、BEAR、Bolt、大小写字母具有同等意义。但变量必须在使用前说明其数据类型。

变量可以用赋位语句进行赋值，变量与数值表达式用“←”符号来连接。当执行赋值语句时，先计算表达式的值，然后将该值赋值给左边的变量。

AL 程序中用“{}”括起来的内容，只起注释作用，不影响程序的执行。

(2) 基本数据类型　AL 语言基本数据类型有标量( SCALAR )、矢量(VECTOR)、旋转(ROT)、坐标系(FRAME)和变换(TRANS)等。

1) 标量(SCALAR)。它是 AL 语言最基本的数据形式。标量型的变量可以进行加、减、乘、除和指数五种运算，也可进行三角函数、自然对数(LOG)的运算。运算的优先级别与一般计算机语言一致。AL 中的标量可以表示时间(TIME)、距离(DISTANCE)、角度(ANGLE)、力(FORCE)或者它们的组合，还能处理这些变量的量纲。

AL 中有几个预先定义的标量。例如：

SCALAR PI; {PI = 3.14159}

SCALAR true,false {true = 1,false = 0}

2）矢量(VECTOR)。AL 语言中的矢量 VECTOR 与数学中的矢量具有相似的意义，而且具有相同的运算。利用函数 VECTOR 可以由三个标量表达式来构造矢量，例如 VECTOR (0.6123,0.6123,0.5)。但需注意，三个标量表达式必须具有相同的量纲。

同样，AL 中也有预先定义的矢量：

VECTOR xhat,yhat,zhat,nilvect; {矢量说明}

其值为

xhat←VECTOR(1,0,0);

yhat←VECTOR(0,1,0);

zhat←VECTOR(0,0,1);

nilvect←VECTOR(0,0,0)。

3）旋转(ROT)。旋转型变量用来描述某坐标轴的旋转或绕某轴的旋转，以表示姿态。任何旋转型变量可表示为 ROT 函数，带有两个参数：一个是代表旋转轴的简单向量，另一个是旋转角度。旋转的方向按右手规则进行。

nilrot 是 AL 语言中预先已说明的旋转，定义为

nilrot←ROT(zhat,0 * deg)

4）坐标系(FRAME)。FRAME 型坐标系变量用来建立坐标系，以描述作业空间中对象物体的姿态和位置，变量的值表示物体的固联坐标系与作业空间的参考坐标系之间的相对位置关系和姿态关系。作业空间的参考坐标系在 AL 语言中已预先用 Station 定义。作业空间中，任何一坐标系可通过调用函数 FRAME 来构成。该函数有两个参数：一个表示姿态的旋转，另一个表示位置的向量。

对于如图 4-54 所示机器人插螺钉的作业，要确定作业环境。首先要建立坐标系，设参考坐标系 Station 位于工作台面上；还建立机器人基座坐标系 Base、立柱坐标系 Beam 和料槽坐标系 Feeder，这些用 AL 语言写出为

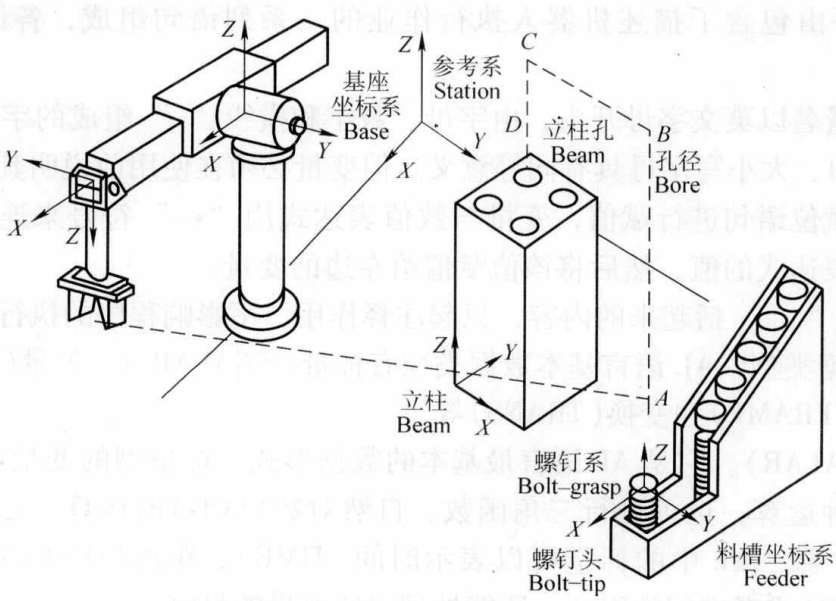



图 4-54 机器人插螺钉作业

FRAME Base,Beam,Feeder;　{坐标系变量说明}

接着要确定各坐标系的关系，基座坐标系即 Base 坐标系与参考坐标系的关系用 AL 语言表示：

Base←FRAME(nilrot,VECTOR(20,0,15) * inches);

该语句表明把参考坐标系原点移至(20,0,15)英寸处，不用旋转就得 Base 坐标系。同理，Beam、Feeder 坐标系与参考坐标系的关系为

Beam←FRAME(ROT(Z,90 * deg),VECTOR(20,15,0) * inches);

Feeder←FRAME(nilrot,VECTOR(25,40,0) * inches);

对于在某个坐标系中描述的向量，可以利用“WRT”操作符，以“向量 WRT 坐标系”的形式来表示。例如 zhat WRT Feeder，表示在参考坐标系中构造一个与 Feeder 坐标系中的 zhat 指向一致的向量。

5）变换(TRANS)。TRANS 型变量用来进行坐标变换，与 FRAME 一样仅有旋转和向量两个参数。在执行时，先相对于作业空间的基座坐标系旋转，然后对向量参数相加，进行平移操作。

AL 语言中有一个预先说明的变换 niltrans，定义为：

niltrans←TRANS(nilrot,nilvect);

有了上述介绍的几种数据类型，特别是 FRAME 和 TRANS，就可以方便地描述作业环境和作业对象。

现在再就如图 4-54 所示的情况，描述特征坐标系和各个坐标系之间的关系。可以通过各个坐标系右乘一个 TRANS 来建立起各坐标系之间的关系：

E←Base * TRANS(ROT(X,180 * deg),VECTOR(15,0,0.5) * inches);

该语句表明：由 Base 坐标系先绕 X 轴旋转 180°，然后再将原点平移到距旋转后的 Base 坐标系中(15,0,0.5)处的地方，就得 E 坐标系。同理

Bolt _ tip←Feeder * TRANS(nilrot,nilvect);

Bolt _ grasp←Bolt _ tip * TRANS(nilrot,VECTOR(0,0,5) * inches);

Beam _ bore←Beam * TRANS(nilrot,VECTOR(2,12,20) * inches);

（3）主要语句及其功能　MOVE 语句用来表示机器人由初始位置和姿态到目标位置和姿态的运动。在 AL 中，定义了 barm 为蓝色机械手，yarm 为黄色机械手。为了保证两台机械手在不使用时能处于平衡状态，AL 语言定义了相应的停放位置 bpark 和 ypark。

假定机械手在任意位置，可把它运动到停放位置，所用的语句是：

MOVE barm TObpark;

如果要求在 4s 内把机械手位移到停放位置，所用指令是：

MOVE barm TObpark WITH DURATION = 4 * seconds;

符号“⊗”可用在语句中，表示当前位置，如：

MOVE barm TO ⊗-2 * zhat * inches;

该指令表示机械手从当前位置向下移动 2in。由此可以看出，基本的 MOVE 语句具有以下形式：

MOVE <机械手> TO <目的地> <修饰子句>;

例如：

MOVE barm TO <destination> VIA f1 f2 f3 表示机械手经过中间点 f1、f2、f3 移动到目标

坐标系 < destination > 。

MOVE barm TO block WITH APPROACH = 3 * zhat * inches 表示把机械手移动到在 Z 轴方向上离 block 3in 的地方；如果 DEPARTURE 代替 APPROACH，则表示离开 block。关于接近/退避点，可以用设定坐标系的一个矢量来表示，如：

WITH APPROACH = < 表达式 > ;

WITH DEPARTURE = < 表达式 > ;

(4) AL 程序设计举例　例如用 AL 语言编制机器人把螺栓插入其中一个孔里的作业(见图 4-54)。这个作业需要把机器人移至料斗上方 *A* 点，抓取螺栓，经过 *B* 点、*C* 点再把它移至导板孔上方 *D* 点(见图 4-54)，并把螺栓插入其中一个孔里。

编制这个程序所采取的步骤是：

1) 定义机座、导板、料斗、导板孔、螺栓柄等的位置和姿态。

2) 把装配作业划分为一系列动作，如移动机器人、抓取物体和完成插入等。

3) 加入传感器，以发现异常情况和监视装配作业的过程。

4) 重复步骤 1) ~3)，调试改进程序。

按照上面的步骤，编制的程序如下：

```
BEGIN insertion
{数据类型说明}
FRAME Beam,Base,Feeder;
FRAME Bolt _ grasp,Bolt _ tip,beam _ bore;
FRAME A,B,C,D;
{设置变量}
Bolt _ diameter←1 * inches;
Bolt _ height←5 * inches;
tries←0;
grasped←false;
{定义机座坐标系}
Beam←FRAME(Rot(z,90 * deg),VECTOR(20,15,0) * inches);
Feeder←FRAME(nilrot,VECTOR(25,40,0) * inches);
Base←FRAME(nilrot,VECTOR(20,0,15) * inches);
{定义特征坐标系}
Bolt _ tip←Feeder * TRANS(nilrot,nilvect);
Bolt _ grasp←Bolt _ tip * TRANS(nilrot,VECTOR(0,0,5) * inches);
Beam _ bore←Beam * TRANS(nilrot,VECTOR(2,12,20) * inches);
{定义经过的点坐标系}
A←Feeder * TRANS(nilrot,VECTOR(0,0,5) * inches);
B←Feeder * TRANS(nilrot,VECTOR(0,0,8) * inches);
C←Beam _ bore * TRANS(nilrot,VECTOR(0,0,5) * inches);
D←Beam _ bore * TRANS(nilrot,Bolt _ height * Z);
{张开手爪}
```

```
OPEN bhand TO Bolt _ diameter + 1 * inches;
{使手准确定位于螺栓上方}
MOVE barm TO Bolt _ grasp VIA A
WITH APPROACH = - Z WRT Feeder;
{试着抓取螺栓}
DO
CLOSE bhand TO 0.9 * Bolt _ diameter;
IF bhand < Bolt _ diameter THEN BEGIN;
{抓取螺栓失败,再试一次}
OPEN bhand TO bolt _ diameter + 1 * inches;
MOVE barm TO⊗ - 1 * Z * inches;
END ELSE grasped→true;
tries←tries + 1;
UNTIL grasped OR(tries > 3);
{如果尝试3次未能抓取螺栓,则取消这一动作}
IF NOT grasped THEN ABORT;{抓取螺栓失败}
{将手臂经过A运动到B位置}
MOVE barm TO B VIA A
WITH DEPARTURE = Z WRT Feeder;
{将手臂运动经过C到D位置}
MOVE barm TO D VIA C
WITH APPROACH = - Z WRT beam _ bore;
{检验是否有孔}
MOVE barm TO⊗ - 0.1 * Z * inches ON FORCE (Z) > 10 * ounce
DO ABORT;{无孔}
{进入柔顺性插入}
MOVE barm TO beam _ bore DIRECTLY
WITH FORCE(z) = - 10 * ounce;
WITH FORCE(x) = 0 * ounce;
WITH FORCE(y) = 0 * ounce;
WITH DURATION = 5 * seconds;
END insertion
```

2. LUNA 语言及其特征

LUNA 语言是日本 SONY 公司开发用于控制 SRX 系列 SCARA 平面关节型机器人的一种特有的语言。LUNA 语言具有与 BASIC 相似的语法，它是在 BASIC 语言基础上开发出来的，且增加了能描述 SRX 系列机器人特有的功能语句。该语言简单易学，是一种着眼于末端操作器动作的动作级语言。

（1）语言概要　LUNA 语言使用的数据类型有标量(整数或实数)、由 4 个标量组成的矢量，它用直角坐标系来描述机器人和目标物体的位姿，使人易于理解，而且坐标系与机器人的结构无关。LUNA 语言的命令以指令形式给出，由解释程序来解释。指令又可以分为由

系统提供的基本指令和由使用者用基本指令定义的用户指令，详见表4-3。

**表4-3 LUNA语言指令表**

| 分 类 | 指令形式 | 含 义 |
|---|---|---|
| 扫描机器人动作的命令 | DO… | 机器人执行单行DO语句 |
| | In(ON/OFF) | 输入开/关I1～I16 |
| | Ln(ON/OFF) | 输出开/关L1～L16 |
| | Pn(m) | 运动到达点Pn(m)，n：0～9、m：0～255 |
| | VEL(n) | 设置运动速度(n:1%～100%) |
| | DLY(t) | 设置等待时间(t:0.01～327.67s) |
| | OVT(t) | 设置超限时间（t:0.1～25.5s） |
| | FOS(n) | 加速执行移动指令之后的指令 |
| | ACC(n) | 设置加速时间（n:1～10） |
| | LINE | 线性插补 |
| | CIRCLE | 圆弧插补 |
| | SHIFT | 在4条轴上提供同步的关联动作 |
| 程序控制用命令 | GO | 程序无条件转移到指定的语句号 |
| | STOP | 暂停 |
| | CALL | 调用子程序 |
| | RET | 子程序返回 |
| | IF…THEN | 条件转移 |
| | FOR…TO | 循环指令 |
| | STEP | 循环步长 |
| | NEXT | 循环终止 |
| | END | 程序结束 |
| 点数据命令 | Pn(m) | 设置点数据 |
| | OFFSET | 移动坐标轴 |
| | RESET | 清除OFFSET |
| | LIMIT | 设置点数的极限误差 |
| | PSHIFT | 位移点序号 |
| | RIGHT | 设置右手坐标系 |
| | LEFT | 设置左手坐标系 |

（2）往返操作的描述　在机器人的操作中，很多基本动作都是有规律的往返动作。例如机器人末端执行器由*A*点移动到*B*点和*C*点(见图4-55)，用LUNA语言来编制程序为

```
IO DO PA PB PC
   GO 10
```

可见，用LUNA语言可以极为简便地编制动作程序。

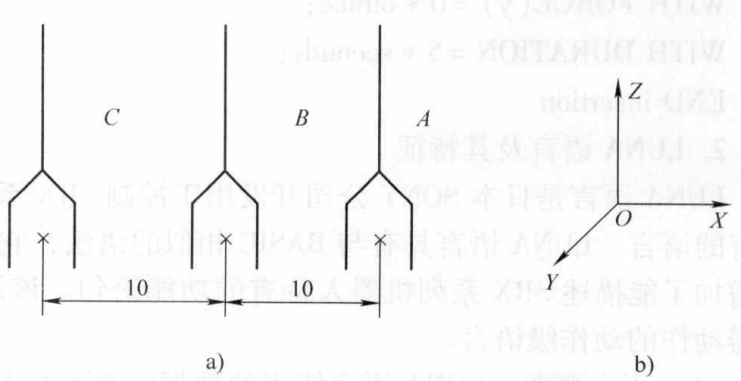



图4-55　末端执行器平移

a）平移示意图　b）坐标系

### 4.3.5　对象级语言

1. AUTOPASS 语言及其特征

靠对象物状态的变化给出大概的描述，把机器人的工作程序化语言称为对象级语言。AUTOPASS、LUMA、RAPT 等都属于这一级语言。AUTOPASS 是 IBM 公司下属的一个研究所提出来的机器人语言，它像给人的组装说明书一样，是针对所描述机器人操作的语言。程序把工作的全部规划分解成放置部件、插入部件等宏功能状态变化指令来描述。AUTOPASS 的编译是用称作环境模型的数据库，边模拟工作执行时环境的变化边决定详细动作，作出对机器人的工作指令和数据。AUTOPASS 的指令分成以下 4 组：

1）状态变更语句：PLACE、INSERT、EXTRACT、LIFT、LOWER、SLIDE、PUSH、ORIENT、TURN、GRASP、RELEASE、MOVE。

2）工具语句：OPERATE、CLUMP、LOAP、UNLOAD、FETCH、REPLACE、SWITCH、LOCK、UNLOCK。

3）紧固语句：ATTACH、DRIVE-IN、RIVET、FASTEN、UNFASTEN。

4）其他语句：VERIFY、OPEN-STATE-OF、CLOSED-STATE-OF、NAME、END。

例如对于 PLACE 的描述语法为

PLACE < object > < preposition phrase > < object >

< grasping phrase > < final condition phrase >

< constraint phrase > < then hold >

其中，< object > 是对象名；< preposition phrase > 表示 ON 或 IN 那样的对象物间的关系；< grasping phrase > 是提供对象物的位置和姿态、抓取方式等；< constraint phrase > 是末端操作器的位置、方向、力、时间、速度、加速度等约束条件的描述选择；< then hold > 是指令机器人保持现有位置。下面是 AUTOPASS 程序示例。从中可以看出，这种程序的描述易懂，但是在技术上仍有很多问题没有解决。

1）OPERATE nutfeeder WITH car-ret-tab-nut AT fixture. nest。

2）PLACE bracket IN fixture SUCH THAT bracket. bottom。

3）PLACE interlock ON bracket RUCH THAT Interlock. hole IS ALIGNED WITH bracket. top。

4）DRIVE IN car-ret-intlk-stud INTO car-ret-tab-nut AT interlock. hole。

SUCH THAT TORQUE is EQ12. 0 IN-LBS USING-air-driver ATTACHING bracket AND interlock。

5）NAME bracket interlock car-ret-intlk-stud car-ret-tab-nut ASSEMBLY support-bracket。

2. RAPT 语言及其特征

RAPT 语言是英国爱丁堡大学开发的实验用机器人语言，它的语法基础来源于著名的数控语言 APT。

RAPT 语言可以详细地描述对象物的状态和各对象物之间的关系，能指定一些动作来实现各种结合关系，还能自动计算出机器人手臂为了实现操作的动作参数。由此可见，RAPT 语言是一种典型的对象级语言。

RAPT 语言中，对象物可以用一些特定的面来描述，这些特定的面是由平面、直线、

点等基本元素定义的。如果物体上有孔或突起物，那么在描述对象物时要明确说明，此外还要说明各个组成面之间的关系(平行、相交)及两个对象物之间的关系。如果能给出基准坐标系、对象物坐标系、各组成面坐标系的定义及各坐标系之间的变换公式，则 RAPT 语言能够自动计算出使对象物结合起来所必需的动作参数，这是 RAPT 语言的一大特征。

为了简便起见，讨论的物体只限于平面、圆孔和圆柱，操作内容只限于把两个物体装配起来。假设要组装的部件都是由数控机床加工出来的，具有某种通用性，部件可以由下面这种程序块来描述：

BODY/ < 部件名 > ;

< 定义部件的说明 >

TERBODY;

其中，部件名采用数控机床的 APT 语言中使用的符号；说明部分可以用 APT 语言来说明，也可以用平面、轴、孔、点、线、圆等部件的特征来说明。

平面的描述有下面两种：

FACE/ < 线 > , < 方向 > ;

FACE/HORIZONTAL < $Z$ 轴的坐标值 > , < 方向 > 。

其中，第一种形式用于描述与 $Z$ 轴平行的平面，< 线 > 是由 2 个 < 点 > 定义的，也可以用 1 个 < 点 > 和与某个 < 线 > 平行或垂直的关系来定义，而 < 点 > 则用 $(x,y,z)$ 坐标值给出；< 方向 > 是指平面的法线方向，法线方向总是指向物体外部。描述法线方向的符号有 XLARGE、XSMALL 和 YSMALL。例如 XLARGE 表示在含有 < 线 > 并与 $XY$ 平面垂直的平面中，取其法线矢量在 $X$ 轴上的分量与 $X$ 轴正方向一致的平面，那么给定一个 < 线 > 和一个法线矢量，就可以确定一个平面。第二种形式用来描述与 $Z$ 轴垂直的平面与 $Z$ 轴相交点的坐标值，其法线矢量的方向用 ZLARGE 或 ZSMALL 来表示。

轴和孔也有类似的描述：

SHAFT 或 HOLE/ < 圆 > , < 方向 > ;

SHAFT 或 HOLE/AXIS < 线 > , RADIUS < 数 > , < 方向 > ;

前者用一个圆或轴线方向给定，< 圆 > 的定义方法为

CIRCLE/CENTER < 点 > , RADIUS < 数 > ;

其中，< 点 > 为圆心坐标，RADIUS < 数 > 表示半径值。例如：

C1 = CIRCLE/CENTER, P5, RADIUS, R

式中，C1 表示一个圆，其圆心在 P5 处，半径为 R。

HOLE/ < 圆 > , < 方向 > ;

表示一个轴线与 $Z$ 轴平行的圆孔，圆孔的大小与位置由 < 圆 > 指定，其外向方向由 < 方向 > 指定(ZLARGE 或 ZSMALL)。

与 $Z$ 轴垂直的孔则用下述语句表示：

HOLE/AXIS < 线 > , RADIUS < 数 > , < 方向 > ;

孔的轴线由 < 线 > 指定，半径由 < 数 > 指定，外向方向由 < 方向 > 指定(XLARGE、XSMALL、YLARGE 或 YSMALL)。

由上面一些基本元素可以定义部件，并给它起个名字。部件一旦被定义，它就和基本元

素一样，可以独立地或与其他元素结合，再定义新的部件。被定义的部件，只要改变其数值，便可以描述同类型的、不同尺寸的部件。因此，这种定义方法具有通用性，在软件中称为可扩展性。

例如一个具有两个孔的立方体(见图4-56)，可以用下面的程序来定义：

```
BLOCK = MARCO/BXYZR;
BODY/B;
P1 = POINT/0,0,0;定义6个点
P2 = POINT/X,0,0;
P3 = POINT/0,Y,0;
P4 = POINT/0,0,Z;
P5 = POINT/X/4,Y/2,0;
P6 = POINT/X - X/4,Y/2,0;
C1  = CIRCLE/CENTER,P5,RADIUS,R;定义两个圆
C2 = CIRCLE/CENTER,P6,RADIUS,R;
L1 = LINE/P1,P2;定义4条直线
L2  = LINE/P1,P3;
L3 =  LINE/P3,PARALLEL,L1;
L4 =  LINE/P2,PARALLEL,L2;
BACK1 = FACE/L2,XSMALL;定义背面
BOT1 = FACE/HORIZONTAL,0,ZSMALL;定义底面
TOP1 = FACE/HORIZONTAL,Z,ZLARGE;定义顶面
RSIDE1  = FACE/L1,YSMALL;定义右面
LSIDE1 = FACE/L3,YLARGE;定义顶面
HOLE1 = HOLE/C1,ZLARGE;定义左孔
HOLE2 = HOLE/C2,ZLARGE;定义右孔
TERBOD
RERMAC
```

程序中，BLOCK代表部件类型，它有5个参数。其中，B为部件代号，X、Y、Z分别为空间坐标值，R为孔半径。这里取立方体的一个顶点P1为坐标原点，两孔半径相同。因此，X、Y、Z也表示立方体的3个边长。只要代入适当的参数，这个程序就可以当做一个指令被调用。例如如图4-56所示的两个立方体，可用下面语句来描述：

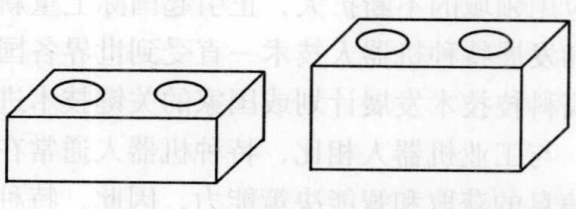



图4-56　尺寸不同的两个同类部件

a）部件一　b）部件二

```
CALL/BLOCK,B = B1,X = 6,Y = 7,Z = 2,R = 0.5;
CALL/BLOCK,B = B2,X = 6,Y = 7,Z = 6,R = 0.5。
```

显然，这种定义部件的方法简单、通用，它使语言具有良好的可扩充性。

# 第 5 章　特种机器人应用

## 5.1　特种机器人应用的意义

机器人技术虽然以工业机器人起步，但随着近年来微电子技术、信息技术、计算机技术、材料技术等的迅速发展，现代机器人技术已突破了传统工业机器人的范畴，逐渐转向对应用于特殊环境中的特种机器人技术的研究。

目前，国际上对非制造领域机器人(我国称为特种机器人)的研究和开发非常活跃。特种机器人技术主要是指非制造业中的各种先进机器人及其相关技术。特种机器人是替代人在危险、恶劣环境下作业必不可少的工具，可以辅助完成人类无法完成的工作，如空间与深海作业、精密操作、管道内作业等。在军事领域，由美国地面自主车辆(ALV)计划发展的军用机器人已经研制成功；在宇航领域，“月球车”、“火星探测器”等空间机器人历来都是人类探索其他星球的开路先锋；在制造领域，大量无人搬运车(AGV)、物流自动化系统与各种工业机器人融为一体，发挥着重要作用；在能源领域，机器蛇、喷浆机器人等被广泛应用于核电厂、煤矿井下工作，产生了较大的经济效益；在农林方面，各种水果采摘机器人、嫁接机器人、伐根机器人、播种机器人、温室灌溉机器人等已经形成了产值达上百亿美元的新兴产业；在服务行业，特种机器人已经担当起了楼道、地铁清洁工、医护助理、导盲、礼仪接待等许多工作；在娱乐方面，各种音乐机器人、舞蹈机器人等应运而生，极大丰富了人们的文化生活；在防灾救援领域，各种灭火机器人、蛇形机器人、废墟搜救机器人等正在保卫着人们的生命安全；在反恐防暴领域，侦察机器人、排爆机器人等保护着人类安全；在医疗领域，各种智能药丸、口腔修复机器人、血管机器人、遥控操作手术机器人等保障着人类的健康。特种机器人已经渗透到人类生产、生活的各个方面。

特种机器人技术综合了多学科的发展成果，代表了高科技技术的前沿发展。它在人类生活应用领域的不断扩大，正引起国际上重新认识机器人技术的作用和影响。正因为如此，研究和发展特种机器人技术一直受到世界各国的重视，许多国家都把特种机器人技术列入本国的高科技技术发展计划或国家的关键技术进行研究和开发。

与工业机器人相比，特种机器人通常在非结构性环境下自主工作，且更多地依赖于对环境信息的获取和智能决策能力，因此，特种机器人更强调感知、思维和复杂行动能力；从外观上，特种机器人也远远脱离了最初工业机器人所具有的形状。特种机器人融合了更多学科的知识，如机构学、控制工程、计算机科学、人工智能、微电子学、光学、传感技术、材料科学、仿生学等，因此，特种机器人研究不仅能促进本学科的发展，还可带动其他学科的进步。特种机器人的研究特别强调智能性和对环境的适应性，使其具有更广阔的应用领域。

21 世纪是特种机器人迅速发展的时代，其应用领域及产品市场将是不可预测的，其巨大的发展潜力将会对人类生活及社会经济发展产生巨大的推动作用。同时，特种机器人也是 21 世纪自动化科学与技术的集中体现，是最高意义上的自动化，是当今国际自动化技术发

展的重要方向。特种机器人的研究必将促进自动化科学与技术的发展。

## 5.2　特种机器人系统

特种机器人主要有3种控制方式：人机遥控方式、自主控制方式和遥控自主混合方式。由于环境的非结构化和动态的特点，遥控自主混合方式成为比较广泛的控制方式，也是一种比较可靠和设计上可行的控制方式。

特种机器人大都工作在非结构性环境中，在现在及可以预见的将来，人机遥控加上局部自治仍将是一种主要的控制方式。操作者和机器人可能在同一环境中，也可能分布在两处。分布在两处时，其联系的通信时间在空间及海中可能长达分的数量级，而其工作环境在大多数的情形下又是未知的。感知、规划、行动和交互技术是特种机器人的共性技术。

### 5.2.1　特种机器人的共性技术

特种机器人各种各样，在每类特种机器人中都有一些关键技术，但特种机器人仍存在以下共性技术。

（1）遥控及监控技术　机器人高水平的半自治功能；多机器人和操作者之间的协调控制；通过网络建立大范围内的机器人遥控系统；对有时延的环境，克服时延所造成的控制上的困难；通过事先对可能出现的情况及对策的详细研究，进行局部自治控制等。

（2）人机接口　在包括虚拟环境的人机接口方面的研究工作非常活跃，开发出了各式各样的输入和输出装置，如三维鼠标、数据手套、快门眼镜、头盔等；各种具有更好性能的临场感方法相继被提出来，如具有类似人的大小的手、臂和双眼视觉系统等。利用临境技术建立机器人工作环境，让操作者身临其境地进行操作。目前，在利用多种传感器的实时信息动态实时地建立环境模型方面，有很多问题有待研究。

（3）传感器和信息融合技术　只有借助于大量的智能传感器的帮助，特种机器人才能够为遥控者提供环境参数，才能在需要的时候实现在动态环境中的自主控制。随着传感器系统的复杂化，如何有效地进行传感信息的分析利用也是特种机器人设计的一个重点内容。

（4）导航和定位问题　大部分工业机器人不存在机器人本体的导航和定位问题，但是对于大部分特种机器人而言，导航和定位功能是实现最终功能的一个基础。目前，常用的特种机器人导航定位技术主要有轨道导航定位、光学导航定位、感应导航定位、而新型智能导航定位技术将给特种机器人的发展带来新的突破。

（5）机器智能　特种机器人大多对其智能程度有更高的期望，满足其在未知或部分未知环境中自主作业的需要。特种机器人的智能可以体现在其工作的各个方面，包括对环境的感知、信息的处理、行为决策、与人的协调和自学习等。传统的符号推理系统、模糊逻辑、神经网络、遗传算法等都是人们在实现人工智能方面的努力。这方面的研究还远没有达到人类期望的目标。

（6）虚拟机器人技术　许多特种机器人在用于空间、水下、地面、地下、农业和食品加工、消防和救援、医疗和护理、休闲和娱乐等时，遥控不失为一个主要手段。基于多传感器、多媒体和虚拟现实、临场感的虚拟遥控操作与人机交互，成为需要共同发展的一项技术。

（7）机器人网络协作　现代网络技术的发展促进了人对机器人异地控制的进步。同时，

随着功能要求和环境复杂程度的提高，多机器人协同完成特定任务成为一种可行的技术。机器人网络协作研究主要包括网络接口技术与装置、众多信息组的压缩与解压方法及传输方法的研究。

（8）多智能体协调控制技术　包括用于实现决策和操作自主的多智能体组成的群体行为控制技术。微型和微小机器人技术包括微机构、微传感器及相应的微系统集成技术等。软机器人技术主要研究在未来众多的人与机器人共存的环境中，机器人对人的安全保护性技术。仿人与仿生技术包括机构、传感控制和系统技术。

### 5.2.2 基于行为的特种机器人体系结构

对于特种机器人的体系结构，布鲁克斯(Brooks)提出的包容体系结构是最有名的基于行为的控制体系结构。在基于行为的控制系统中，直接从传感器的感知数据计算得出特种机器人的动作，系统由一组并行运行的行为组成，每个行为知道如何对环境中的事件和状态做出反应。每个行为只需接收检测到的事件和状态所需要的传感器数据，并推算出相应的响应，从而将传感器数据处理减到最少。此外，每个行为直接向执行机构发送命令，在任一时刻通过协调行为选择控制特种机器人所需要的行为来执行任务。这种类型的控制系统最明显的优点是在环境空间中运行时，能够及时地对环境中不可预测的事件做出反应。基于行为体系结构的一个重要特点是只需少量的内存和简单的表示。它没有世界模型，系统模块之间信息流的表示也很简单。因为没有表示之间复杂的变换，也不需要刷新复杂的模型，这些特点有利于提高系统的快速反应性。

在布鲁克斯提出的包容体系结构中，由一组相互发送信息的小模块建立一个控制层。每个模块是一个具有扩张的寄存器和定时器的有限状态机。多个模块协作生成一个行为，每个具有高水平的层定义一类更为复杂的特定行为。控制层可以检查来自低水平层的数据，并将数据输入低水平层，抑制正常的数据流。“包容体系结构”这个名称就来自一个控制层包容低水平层任务的特性。

基于行为的体系结构和传统的机器人体系结构不同，后者在规划和执行动作之前包括复杂的环境模型，而前者的动作在传感器的数据到达后能够迅速地被执行。基于行为的体系结构不同于传统方法的另一个重要方面是：一个行为体系结构有一个分层排序的动作规则流程(见图5-1)，然而传统的体系结构有一个单一的“感知—动作”处理流程。动作规则定义为以传感器数据和世界模型信息为基础的决策规则。决策规则集和传感器信息处理并行计算和推理。连接感知和动作的规则称为行为，根据行为的重要程度对它们进行分层排序。

包容体系能够通过不断地增加层来建立复杂的控制系统，只要第一层即最底层已经完成，控制系统就能正常工作，且模块之间传送信息的表示非常简单。在基于行为体系结构的控制系统编程的行为语言中，在行为之间没有共享的数据结构，而且保持信息的寄存器通常不超过8位数据宽度，甚至在一些具体的实现中每个数据位都被使用。因为不需要表示之间的复杂交换，没有执行耗时的模型更新和基于模型的规划运算，增强了系统的快速反应性。

### 5.2.3 特种机器人重点研究的科学问题

针对21世纪发展特种机器人技术的战略性需求，结合国际机器人与自动化学科的前沿

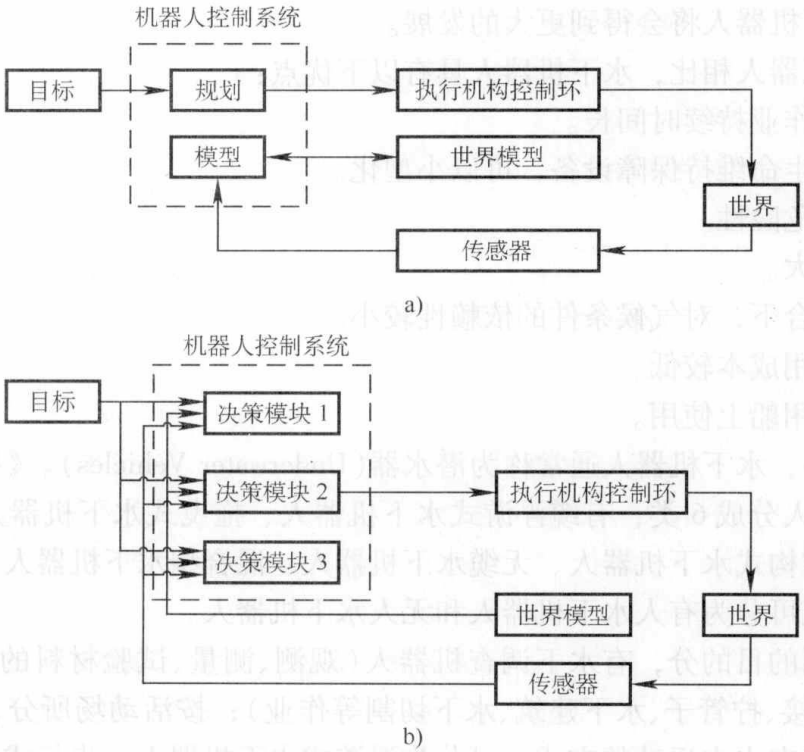



图5-1　传统的和基于行为的特种机器人控制体系结构

a）传统方法　b）行为方法

发展，有以下重点研究的科学问题：

1）特种机器人学中的拟人智能技术研究。

2）未知环境信息获取、理解和控制的新机制、新理论。

3）复杂环境中的机器人自主工作新方法与新理论。

4）机器人精确自定位新手段与新技术。

5）生态机器人学研究，即研究生态学原理在特种机器人设计中的应用。

6）仿人机器人运动学、动力学控制新方法。

7）特种机器人的人机交互问题研究，包括监控技术、通信技术和远程操作技术。

## 5.3　特种机器人应用实例

### 5.3.1　水下机器人

水下机器人诞生于20世纪50年代初，由于所涉及的新技术在当时还不够成熟，同时电子设备的故障率高、通信的匹配以及起吊回收等问题也未能很好解决，因此发展不快，没有受到人们的重视。到了20世纪60年代，国际上兴起两大开发技术，即宇宙开发技术和海洋开发技术，促使远距离操纵型机器人得到了很快的发展。在近几十年，由于海洋开发与军事上的需要，同时水下机器人本体所需的各种材料及技术问题也已得到了较好的解决，因而水下机器人得到了很大发展，开发出了一批能工作在不同深度，并进行多种作业的机器人。这些水下机器人可用于石油开采、海底矿藏调查、救捞作业、管道铺设和检查、电缆铺设和检

查、海上养殖、江河水库的大坝检查及军事等领域。随着开发海洋的需要及技术的进步，适应各种需要的水下机器人将会得到更大的发展。

与载人水下机器人相比，水下机器人具有以下优点：

1）水下连续作业持续时间长。

2）由于无需生命维持保障设备，可以小型化。

3）对人没有危险性。

4）机动性较大。

5）在许多场合下，对气候条件的依赖性较小。

6）制造和使用成本较低。

7）能在非专用船上使用。

在海洋工程界，水下机器人通常称为潜水器(Underwater Vehicles)。《机器人学国际百科全书》将水下机器人分成6类，有缆浮游式水下机器人、拖曳式水下机器人、海底爬行式水下机器人、附着结构式水下机器人、无缆水下机器人、混合型水下机器人。

水下机器人也可分为有人水下机器人和无人水下机器人。

此外，按使用的目的分，有水下调查机器人(观测、测量、试验材料的收集等)和水下作业机器人(水下焊接、拧管子、水下建筑、水下切割等作业)；按活动场所分，有海底机器人和水中机器人。按其在水中运动的方式，可分为浮游式水下机器人、步行式机器人、移动式水下机器人。

大多数水下机器人都是浮游式的，具有较大的机动性，但要求它具有近似中性的浮力，因此设计时应把机器人各系统元部件重量最小的标准作为主要条件，并需要对机器人接受的试样和物体重量的变化进行补偿。

目前，步行式水下机器人还没有达到实用的程度，尚处于研制阶段。其优点是在复杂的海底地形条件下有较好的通行能力和机动性，并具有较高的稳定性；缺点是在海底移动时，会使水层和海底严重扰动。

移动式水下机器人可以采用履带式和车轮式行进机构，但其通行能力和机动性比步行式机器人要差些，会更严重地引起海底水层和泥土扰动。

按供电方式可分为有缆水下机器人和无缆水下机器人。有缆水下机器人有一动力电缆作为供电通道，供电不受限制，可长期在水下工作，并具有十分可靠的通信通道，但电缆在水下会受到水动力干扰，且电缆长度有限，因而作业空间受到限制。无缆水下机器人装有机载电源，一般是蓄电池，由于没有电缆，活动空间大，并可沿任意给定轨迹运动。

随着近年来对海洋的考察和开发，水下机器人应用广泛，发展之迅速出乎人们的意料。可以预计，人类研究和开发海洋所投入的技术力量，将与发展宇航事业的技术力量并驾齐驱。用新技术装备起来的水下机器人将在其中起决定作用，它将广泛用于海洋科学考察、水下工程(包括探矿、采矿)、打捞救助和军事活动等作业。

目前，得到广泛应用的主要有拖曳式、有缆式(ROV)和无缆自治式(AUV)水下机器人。水下机器人从1974年建造的20多套，到1991年开发出大、中、小不同潜深，有、无缆，功能各异，用于军民方面的总数已超过一万套，足见其发展之迅猛，应用之广泛。

1934年，美国研制出下潜934m的载人水下机器人；1953年，又研制出无人有缆遥控水下机器人。其后的发展大致经历了三个阶段。

（1）第一阶段　1953～1974年为第一阶段，主要进行水下机器人的研制和早期开发工作，先后研制出20多个水下机器人。

（2）第二阶段　1975～1985年是遥控水下机器人大发展时期。随着海洋石油和天然气开发的需要，推动了水下机器人理论和应用的研究，水下机器人的数量和种类都有显著的增长。载人水下机器人和无人遥控水下机器人（包括有缆遥控水下机器人、水底爬行水下机器人、拖航水下机器人、无缆水下机器人）在海洋调查、海洋石油开发、救捞等方面发挥了较大的作用。

（3）第三阶段　1985年后，水下机器人进入一个新的发展时期。20世纪80年代以来，中国也开展了水下机器人的研究和开发，研制出“海人”1号（HR-1）水下机器人，并成功地进行了水下试验。

1. 水下机器人结构

水下机器人由3个主要系统组成：执行系统、传感系统和计算机控制系统。

执行系统包括机器人主动作用于周围介质的各种装置，如在水中运动的装置、作业执行装置——机械手、岩心采样器和水样采样器等。

水下机器人的传感系统是用来搜集有关外界和系统工作全面信息的“感觉器官”。通过机器人这种传感系统，在与周围环境进行信息交互的过程中，便可建立外部世界的内部模型。

水下机器人的计算机控制系统是处理和分析内部和外部各种信息的设备综合系统，根据这些信息形成对执行系统的控制功能。水下机器人在工作时，不管其独立性如何，都必须与操作者保持通信联系。

（1）水下机器人载体外形特点和形状的选择　水下机器人的大小各不相同，最小的只有几千克，最大的则有几十吨（用于海底管线和通信电缆埋设的爬行式水下机器人）。大多数水下机器人具有长方体外形的开放式金属框架，框架大多采用铝型材，如图5-2所示。这种框架可以起围护、支承和保护水下机器人部件（推进器、接线盒、摄像机、照明灯等）的作用。框架的构件通常采用矩形型材，以便于安装。与开放式金属框架不同的另一种结构形式是载体框架完全用玻璃纤维或金属蒙皮所包围组成流线体，这种水下机器人载体有鱼雷形（见图5-3）、盘形或球形。

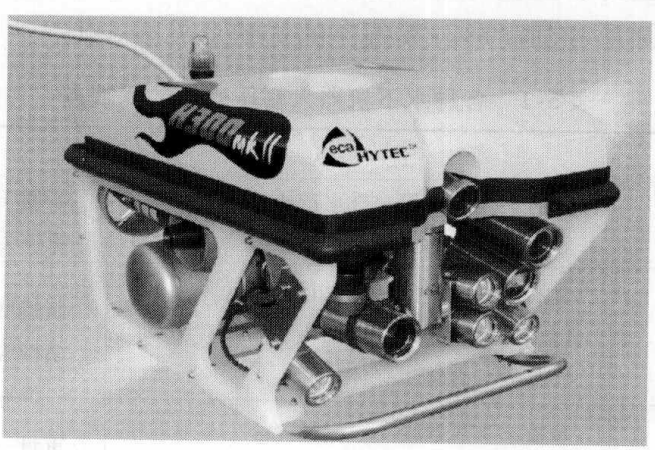


图5-2　框架式外形水下机器人

（2）推进模式　除个别水下机器人采用喷水推进外，大多浮游式水下机器人采用螺旋桨推进（见图5-4）。一般在螺旋桨外还加导管，以保证在高滑脱情况下提高推力。推进器驱动方式一般有电动机驱动和液压驱动两种，小型有缆式水下机器人和无缆自治式水下机器人多采用电动机驱动，大功率、作业型水下机器人推进器通常采用液压驱动。水下机器人要实现水下空间的6自由度运动，即3个平移运动（推进、升沉、横移）和3个回转运动（转首、纵倾、横摇）。

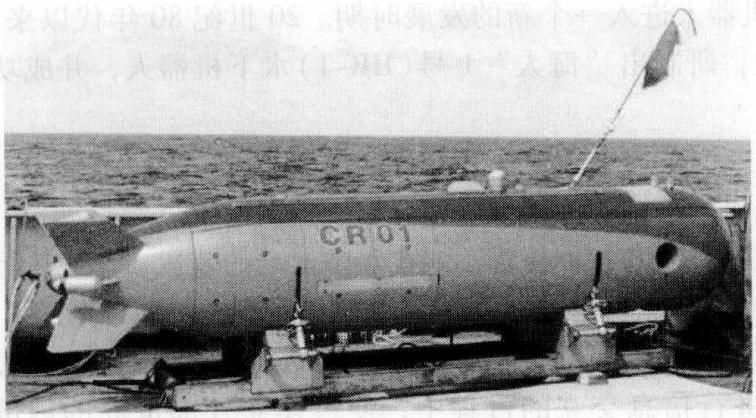



图5-3　鱼雷形水下机器人

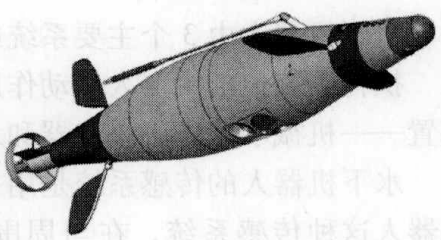


图5-4　采用螺旋桨推进的水下机器人

（3）密封及耐压壳体结构　水下机器人密闭容器如电子舱通常采用常压封装，相对于环境压力的密封通常采用O形圈密封。与陆地密封条件不同的是水下密封为外压密封，在设计中要特殊考虑。压力补偿技术是水下机器人常用的耐压密封技术。水下机器人设备（如液压系统、分线盒）内部充满介质（液压油、变压器油、硅脂等），另设一个带有弹簧的补偿器与设备舱体用一个管路连接。补偿器的外部与水连通，内部压力始终高于外部压力，可使水下容器的密封和耐压变得简单可靠，且重量轻。

浮游式水下机器人采用浮力材料来为载体提供浮力，以保证水下的灵活运动。浮力材料通常采用高分子复合材料（树脂发泡或玻璃微珠）。浮力材料要求密度小、耐压强度高、变形小、吸水率小。

考虑到流体运动的阻力、重量与排水量的比例等因素，水下机器人耐压壳体的形状大致有以下几种：球形、椭圆形和圆筒形。其各自的优缺点见表5-1。

**表5-1　各种水下机器人耐压壳体的优缺点**

| 耐压壳体形状 | 优　点 | 缺　点 |
| --- | --- | --- |
| 球形 | 具有最佳的重量—排水量比<br>容易进行应力分析而且较正确 | 不便于内部布置<br>流体运动阻力大 |
| 椭圆形 | 具有较好的重量—排水量比<br>能较好地利用内部空间<br>容易安装客体贯穿体 | 制造费用高<br>结构应力分析较困难 |
| 圆筒形 | 最容易加工制造<br>内部空间利用率最高<br>流体运动阻力小 | 重量—排水量比值最高<br>内部需要用加强肋加强 |

由于在遥控水下机器人中需要放置摄像仪器及其传动装置、深度计、罗盘、电路板等仪器，并综合考虑流体阻力等因素，选取圆筒形的耐压壳体作为整体的结构最为合理。为了加强在水下的抗压能力，在轴向和径向均有数道加强肋。耐压壳体材料有金属和非金属两类。

（4）水下机器人观测、照明布置　主要是摄像仪器及照明设备的布置。摄像是整个设备的核心，是作业人员获取信息与控制水下机器人的重要依据。照明是辅助摄像的设备，照明质量的好坏直接影响摄像的质量，因此采用发光强度高、穿透能力强的卤素灯作为高质量摄像的保障。

摄像装置一般放在整个装置的最前端，这样放置的理由有两个：一是便于观察，能够及时对勘探现场进行实时控制；二是便于整体结构的平衡，由于推进电动机在整个装置的尾部，需要有一定的重力使其在水中平衡。

2. 水下机器人的驱动

（1）电力　目前，自治水下机器人通常采用铅酸或银铅充电电池，水下机器人的水下作业时间只有几小时，不能满足长时间连续航行的要求。锂钴二氧化物、铝锌氧化物和铅氢过氧化物为新型的充电电池，其能量密度为银锌电池的3～10倍。使用这种新型电池，能使自治水下机器人的作业时间达48h，因而是候选能源系统。

目前，燃料电池和热功发电机可供自治水下机器人作业数天，通过不断的研制，有望为自治水下机器人提供数周作业时间所需的能源，是自治水下机器人比较理想的能源系统。

电力应用虽然在水下环境中有缺点，但大多数的现代水下机器人都是靠电力或液压系统推进驱动的。蓄电池是载人水下机器人和无人无缆水下机器人的主要动力源，而带缆水下机器人则由水面电源供电。大部分无人水下机器人的动力源都使用铅酸、镍铬或银锌电池。

（2）电动机　尽管在水下普通电动机的使用受到限制，但采取一定的保护措施，经过改装或专门的设计，电动机仍广泛应用于水下机器人。事实上，绝大多数水下机器人（载人的或无人的，带缆的或无缆的）推进都是以电动机作为动力源的。电动机与推进装置的连接可以直接通过回转轴，也可以间接通过液压泵、磁性连接轴等。

可供选择的电动机电流形式有直流和交流两种。一般地，大多数以蓄电池组为电源的自治水下机器人采用直流电动机。

置于舷外海水中的推进（推力）器用的电动机有三种基本形式：敞开式、压力补偿式和封闭式。

（3）水下机器人的动力系统　水下机器人的电能供给方法，在很大程度上取决于水下机器人的类型。

目前，水下机器人有以下三种供电方式：独立的机载电源、通过电缆远程供电、综合供电。

1）独立的机载电源用于无缆水下装置，有时也用于拖曳式水下装置。通常都采用蓄电池（酸性电池、银锌电池、碱性电池）作电源。

2）通过电缆远程供电用于拖曳式和遥控式水下作业装置，一般都是沿电缆的动力芯线将电能输送给水下作业装置。根据电缆的长度选择母船供给的电压值。通常采用交流电源，经过变压、整流再送到水下机器人里。

3）采用综合供电方式时，母船通过同轴电缆与水下机器人联系。在母船和水下机器人

之间，直接靠近机器人处，安装有一个特殊的动力锚。通过这种装置，可完成下述动作：在海底定点、消除海面波浪对水下机器人的影响、消除主电缆对水下机器人的影响。此外，还可以在动力锚上安装蓄电池或者其他所需功率的电源，这样可以大大减少电缆传输的电功率。

3. 水下机器人的导航与定位系统

水面船舶的导航发展成一门独立的学科，但是这种导航是二维导航，或称为平面导航。军用潜艇的出现，并没有从根本上改变这种平面导航的概念。这是因为目前潜艇的活动深度不大，最大也只有500m，这实际上只活动在海洋容积的2%之内。由于水下机器人征服了所有的海洋深度，可以活动在任何海域，因此水下机器人的导航是一种三维的立体导航。

由于目前的水下机器人活动大多依赖于母船，同时受水下机器人自身尺寸和重量的限制，因此可以把水下机器人的导航分为水面导航和水下导航两部分。前者通常由水面母船来完成，即确定母船相对于地球坐标的位置，而后者则往往是相对于水面母船而言，将母船作为一个水面方位点来确定水下机器人的水下相对位置。水下机器人的水下导航概念又大致可以分解为大面积搜索和小面积定位两个方面。

对于深海导航，几种常规导航方法基本上都不理想。电磁波在海水中的衰减十分迅速，10kHz的电磁波每米衰减达3dB，这使所有无线电导航和雷达都无法在深海使用。因此，通常水下机器人有效的定位方法是航位推算法和声学方法。

航位推算法是根据已知的航位以及水下机器人的航向、速度、时间和漂移来推算出新的航位。它是根据水中某些静止的固定目标来进行推算的，它的推算需要测得水下机器人的航向和速度。由于目前水下机器人测定航向的装置主要是方向陀螺和电罗经，而且测定速度的仪器有较大的误差，并受到水流等因素的影响，所以航位的推算不可能非常精确，实际上这是一种近似的方法，如有可能，应随时加以修正。为了在海底精确导航，最好的方法是以海底作为基准面来测量航速。实现这点的最简单而经济的方法是拖轮里程表法。另外，多普勒声呐是目前水下机器人最有效的一种测速方法。如图5-5所示为水下机器人用的多普勒导航声呐原理图。

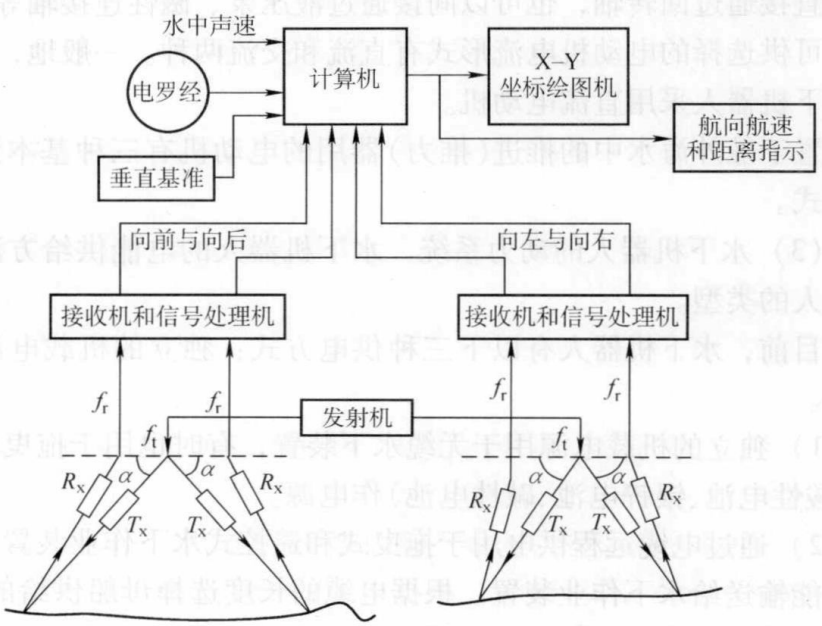



图5-5 水下机器人用的多普勒导航声呐原理图

水下机器人的导航定位最常见的是利用水声设备来完成。过去作战潜艇用的“主动式声呐”，可以利用目标的反射来确定它相对于主动式声呐的方位和距离。由于水下机器人实际上是一只金属的耐压球，因此它是一个很好的声波反射器。如果利用

母船上安装的“主动式声呐”，也可以测到水下机器人的相对位置，并对水下机器人进行跟踪。这种“主动式声呐”中性能比较好的都往往由军事部门控制，所以这种系统并没有在水下机器人导航上获得更多的应用。

短基线系统是确定水下机器人相对于辅助母船位置的最精确的系统。在精确水面定位系统的配合下，该系统可提供相当精确的地理坐标和很高的再现性。短基线系统的原理如图5-6所示。

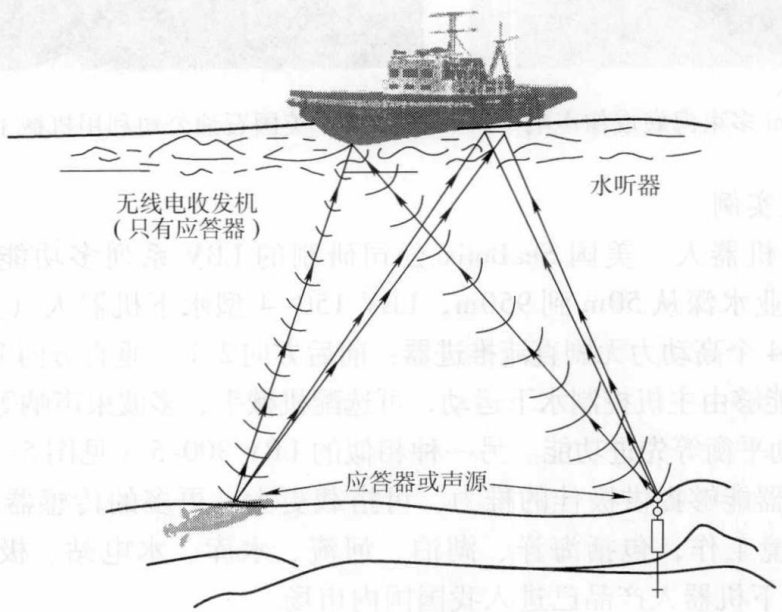



图5-6　短基线系统的原理

4. 终端导航装备

水下机器人执行各种各样的任务，必须要以某种方式去触及目标。在这之前，水下机器人的导航系统只能把水下机器人引导到目标附近，而这两者之间还需要有一个桥梁，这就是终端导航。水下机器人目前最常用的终端导航设备是声成像声呐、水下电视和带水下照明的观察窗。如图5-7所示为英国Tritech公司推出的Gemini多束海底成像声呐。

5. 水下机器人的作业执行系统

近年来，随着海洋事业的发展，水下机器人得到了广泛的应用。但水下机器人本身仅是一种运载工具，如进行水下作业，则必须携带水下作业工具。可以说，水下作业系统是水下机器人工作系统的核心，没有它，水下机器人充其量只是个观察台架而已。因此，水下机器人的作业系统从20世纪50年代末期第一次应用于CURV-1水下机器人时起，便与水下机器人一起得以迅速发展。特别是近10年来军事方面的用途和海洋石油开发，进一步促进了作业系统的发展。携带水下作业系统使水下机器人扩大了使用范围，增强了实用性。现有水下机器人的作业系统包括1～2个多功能遥控机械手和各种水下作业工具包。如英国石油公司利用机械手切割海底石油管，用以堵住海平面下1000多米深处的漏油管道，如图5-8所示。

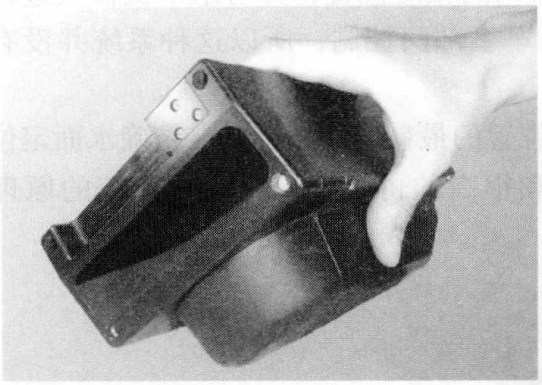


图 5-7 Gemini 多束海底成像声呐

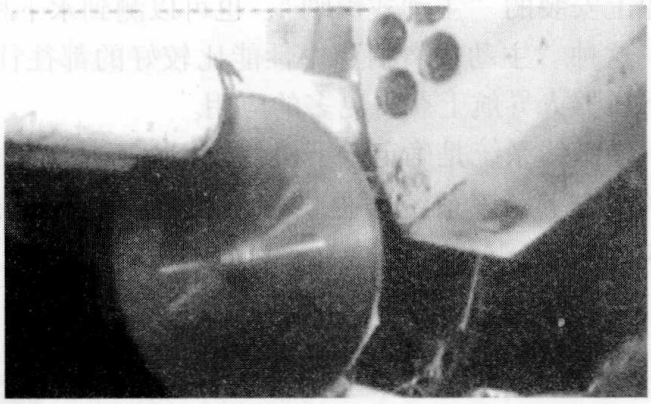


图 5-8 英国石油公司利用机械手切割海底石油管

6. 水下机器人实例

（1）国外水下机器人 美国 SeaBotix 公司研制的 LBV 系列多功能小型水下机器人，包括 9 个型号，作业水深从 50m 到 950m，LBV 150-4 型水下机器人（见图 5-9）最大工作水深 150m，具有 4 个高动力无刷直流推进器：前后方向 2 个、垂直方向 1 个、横向 1 个，水下部分仅重 11kg，能够由主机控制水下运动，可选配机械手、多波束声呐等，并且具有自动定向、自动定深、自动平衡等先进功能。另一种相似的 LBV 300-5（见图 5-10）最大工作水深 300m，双垂直推进器能够提供极佳的推力，可搭载更大、更多的传感器。该系列水下机器人能在各种水下环境工作，包括海洋、湖泊、河流、水库、水电站、极地等。目前，SeaBotix 公司的多个水下机器人产品已进入我国国内市场。

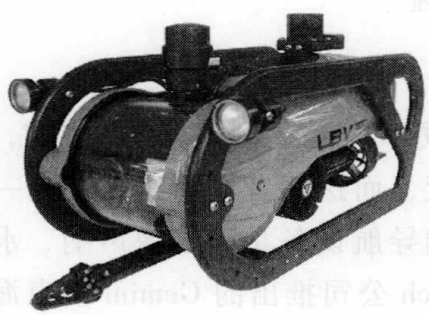


图 5-9 LBV 150-4 型有缆式水下机器人

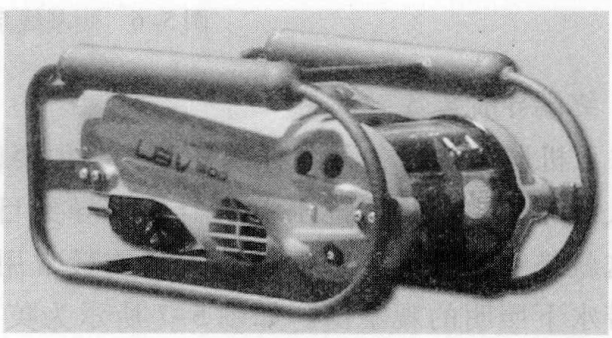


图 5-10 LBV 300-5 型有缆式水下机器人

日本研制的 MARCAS-2500 型履带式海底行走机器人（见图 5-11）可在水下 2500m 的海域实施各种作业：埋设或挖出电缆上的障碍物、探测海底电缆的故障点、切断或回收海底电缆、勘测海底等。

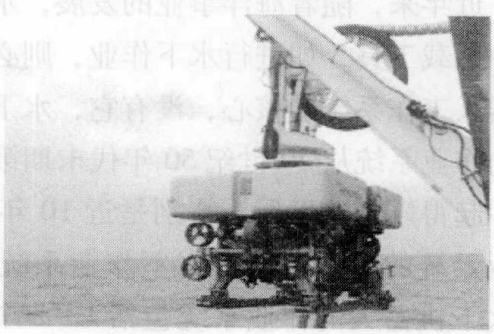


图 5-11 MARCAS-2500 型海底行走机器人

（2）中国水下机器人 我国从 20 世纪 70 年代开始较大规模地开展水下机器人研制工作，先后研制成功以援潜救生为主的 7103 艇（有缆有人）、Ⅰ型救生艇（有缆有人）、QSZ 单人常压水下机器人（有缆有人）、8A4 遥控水下机器人（有缆无

人)和军民两用的 HR-01 遥控水下机器人、RECON IV 遥控水下机器人及 CR-01 自治水下机器人(见图 5-12)等，使我国水下机器人研制达到国际先进水平。

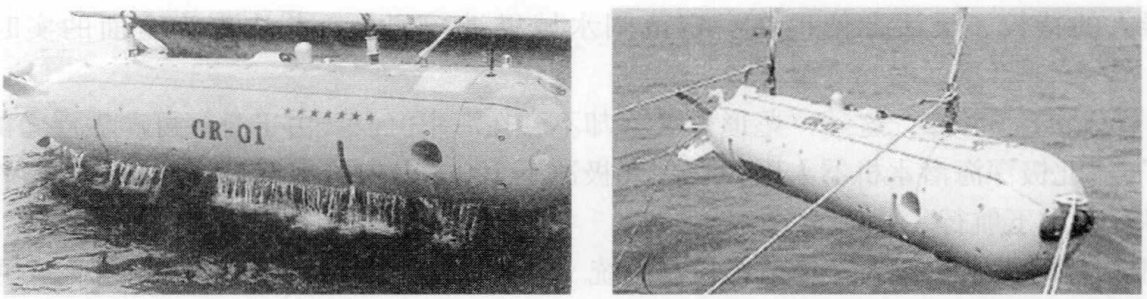



图 5-12　CR-01 自治水下机器人

作为我国 863 计划重大专项，由中国船舶重工集团公司 702 研究所研制成功的 7000m 水下机器人长 8m、高 3.4m、宽 3m，如图 5-13 所示。该水下机器人由特殊的钛合金材料制成，在 7000m 的深海能承受 710t 的重压；运用了当前世界上最先进的高新技术，实现载体性能和作业要求的一体化；与世界上现有的载人水下机器人相比，具有 7000m 的最大工作深度和悬停定位能力，可到达世界 99.8% 的海底。

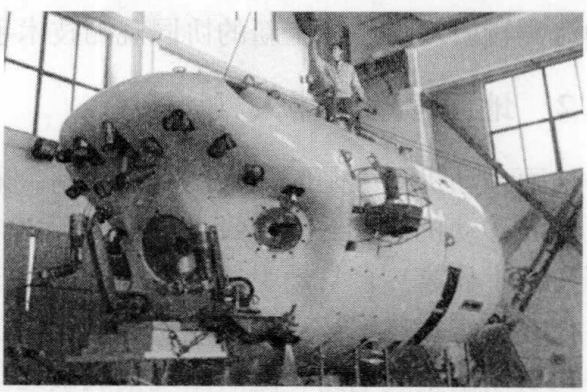


图 5-13　7000m 水下机器人

沈阳自动化研究所在国内首次提出深海潜水机器人(ARV)概念。深海潜水机器人是一种集自治水下机器人(AUV)和遥控水下机器人(ROV)技术特点于一身的新概念水下机器人(见图 5-14)。它具有开放式、模块化、可重构的体系结构和多种控制方式(自主/半自主/遥控)，自带能源并携带光纤微缆，既可以通过预编程方式自主作业(AUV 模式)，进行大范围的水下调查，也可以遥控操作(ROV 模式)，进行小范围精确调查和作业。深海潜水机器人参加了国家第三次北极科学考察(见图 5-15)。

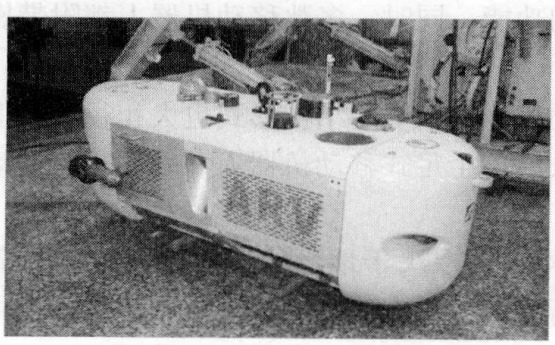


图 5-14　北极深海潜水机器人

图 5-15　深海潜水机器人参加第三次北极科学考察

“北极深海潜水机器人”自带能源，可通过微光缆与水面支持系统相连接。由于采用了“鱼雷体”和“框架体”相结合的流线式外形，它不仅可以发挥“框架体”遥控水下机器人的优势，在海中悬停并进行定点精确观测，也可以发挥“鱼雷体”自主水下机器人的特长，灵活方便地在一定范围水域里进行测量，获取更为全面的实时观测数据。

尽管体重达350kg，这一“彪形大汉”却不会在海中沉没。由于身穿可产生浮力的木质“外衣”，“北极深海潜水机器人”可以在北极冰下100m以内的水域悬停，并可进行作业半径达3km的水下航行。

“北极深海潜水机器人”由航行控制系统、导航系统、推进系统等构成，是一个可以搭载科学考察所需要的冰下声学、光学等测量仪器的水下运动平台，以获取冰底形态、海冰厚度及不同深度的海水盐度、温度等水文参数。

由于北极地区海况特殊，同步获取冰下多种观测数据较为困难，专门针对北极海况设计制造的“北极深海潜水机器人”将把现有的点线式冰下观测手段提升至三维立体模式，从而为海洋科研提供一种全新的协同观测技术手段。

### 5.3.2 地面移动机器人

地面移动机器人是脱离人的直接控制，采用遥控、自主或半自主等方式在地面运动的物体。地面移动机器人的研究最早可追溯到20世纪50年代初，美国Barrett Electronics公司研究开发出世界第一台自动引导车辆系统。由于当时电子领域尚处于晶体管时代，该车功能有限，仅在特定小范围运动，目的是提高运输自动化水平。到了20世纪60、70年代，美国仙童公司研制出集成电路，随后出现集成微处理器，为控制电路小型化奠定了硬件基础。到了20世纪80年代，国外掀起了智能机器人研究热潮，其中具有广阔应用前景和军事价值的移动机器人受到西方各国的普遍关注。日本和美国在移动机器人的发展中处于领先水平。时至今日，各种类型的地面移动机器人纷纷研制出来，其应用范围涉及民用、工业、警用、军用等领域。

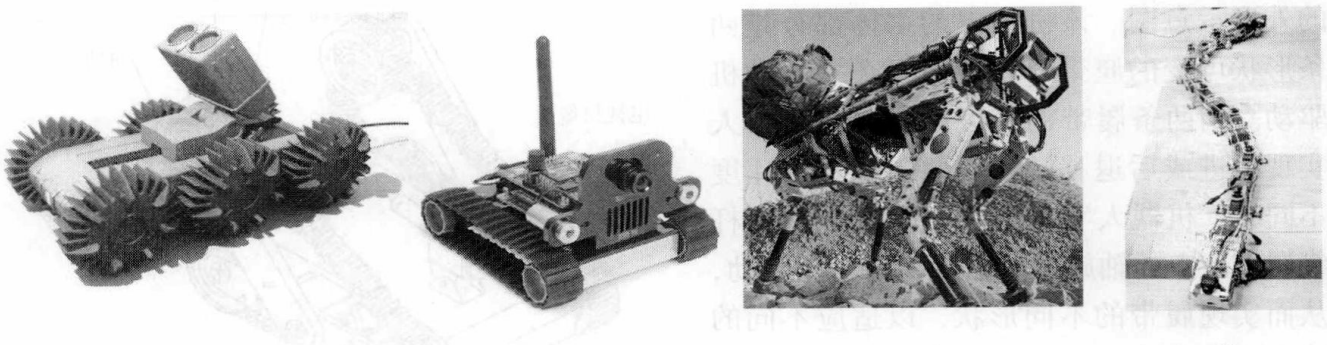
1. 地面移动机器人的概念、结构形式

在移动机器人系统不断应用的过程中，设计者给出了基于移动机器人系统特征的描述性定义：一般认为，移动机器人是一个集环境感知、动态决策与规划、行为控制与执行等多种功能于一体的移动平台。如今，移动机器人正向第三代智能机器人方向发展，因此在功能描述上又增加了逻辑思维、学习、判断和自主决策的功能。同时，多数移动机器人都附带操作手臂，从而使其在外形和功能上更具备了仿生性。

针对不同的应用领域、不同的操作需要，移动机器人系统的结构形式也大相径庭，但基本上可以分为轮式移动机器人、履带式移动机器人、仿生足式移动机器人和蠕动爬行移动机器人几种结构形式，如图5-16所示。

在轮式地面移动机器人中，车轮的形状或结构形式取决于地面的性质和车辆的承载能力。在轨道上运行的多采用实心钢轮，室外路面行驶的采用充气轮胎，室内平坦地面上可采用实心轮胎。车轮形状如图5-17所示。

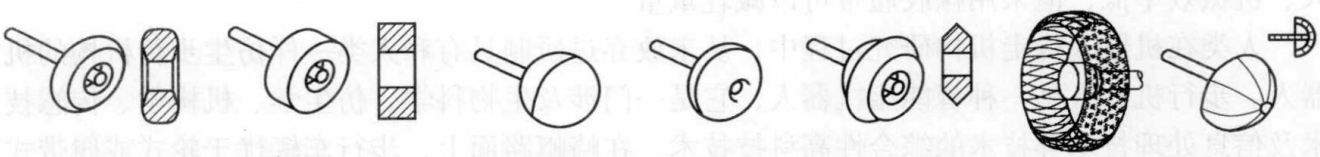
轮式底盘优点是结构简单、重量轻、轮式滚动摩擦阻力小、机械效率高，适合在较平坦的地面上行驶；缺点是轮子与地面的附着力不如履带式底盘，因而越野性能不如履带式底



a)　　b)　　c)　　d)

图 5-16　地面移动机器人结构形式

a）轮式　b）履带式　c）仿生足式　d）蛇形



a)　b)　c)　d)　e)　f)　g)

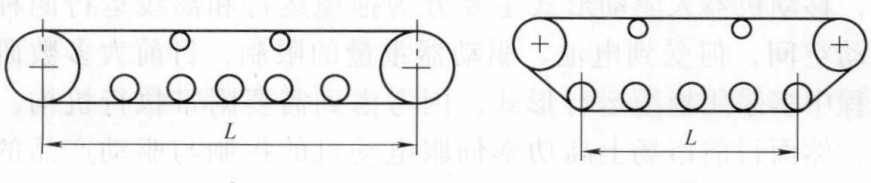
图 5-17　地面移动机器人常见车轮形状

a）形状一　b）形状二　c）形状三　d）形状四　e）形状五　f）形状六　g）形状七

盘，特别是爬楼梯、过台阶时就比较困难。但近期轮式底盘用得越来越多，因为采用宽式轮胎后，其越野性能提高，一般野外场地都能通过，而履带式底盘因机器人车体小，越野能力总不能和大型履带车辆相比，反而不如轮式底盘方便。

履带式移动机器人适合在未加工的天然路面上行走，它是轮式移动机器人的拓展，履带本身起着给车轮连续铺路的作用。履带式移动机器人和轮式移动机器人相比，具有诸多优点，例如支承面积大、接地比压小、适合于松软或泥泞场地作业、下陷度小、滚动阻力小、通过性能较好；越野机动性好，爬坡、越沟等性能均优于轮式移动机器人；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。

履带式移动机器人的常见履带形状如图 5-18 所示。




a)　　b)

图 5-18　履带式移动机器人的常见履带形状

a）形状一　b）形状二

根据实际使用场合的要求，履带也有采取其他形状的，如形状可变履带。所谓形状可变履带，是指该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5-19所示为一种形状可变履带机器人的外形示意图。该机器人的主体部分是两条形状可变的履带，分别由两个主电动机驱动。当两条履带的速度相同时，机器人实现前进或后退移动；当两条履带的速度不同时，机器人实现转向运动；当主臂杆绕履带架上的轴旋转时，带动行星轮转动，从而实现履带的不同形状，以适应不同的运动和作业环境。

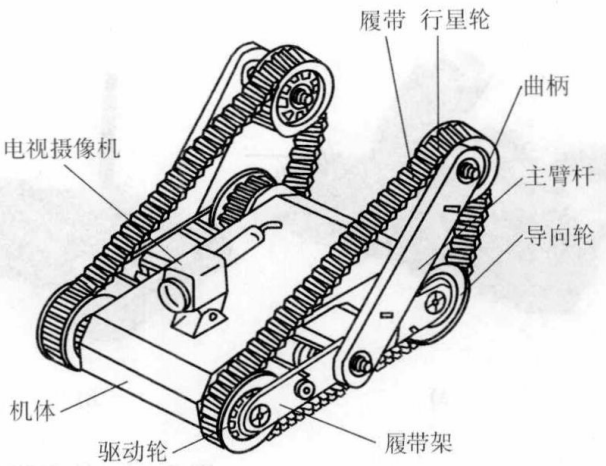



图5-19 形状可变履带机器人的外形示意图

履带式机器人优点是越野能力强，可以爬楼梯、越过壕沟、跨门槛等各种障碍物；缺点是结构复杂、重量大、摩擦阻力大、机械效率低，但采用橡胶履带可以减轻重量。

人类在机器人行走机构研究过程中，从未放弃过研制具有和人类一样仿生步行机构的机器人。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技术的综合性高科技技术。在崎岖路面上，步行车辆优于轮式或履带式车辆。腿式系统有很大的优越性：较好的机动性，崎岖路面上乘坐的舒适性，对地形的适应能力强。所以，这类机器人在军事运输、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。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。

仿生足式移动机器人与轮式移动机器人相比较，最大的优点就是仿生足式移动机器人对行走路面的要求很低，它可以跨越障碍物，走过沙地、沼泽等特殊路面，用于工程探险勘测、防爆、军事侦察等人类无法完成的或危险的工作。

2. 地面机器人关键技术

地面移动机器人系统一般包括机构环节、驱动控制环节、全局反馈环节。其中，高性能驱动控制器、多传感器数据融合、运动学动力学求解理论等已成为地面移动机器人系统的研究热点。

（1）离线驱动控制　目前，移动机器人的驱动控制多采用液压驱动和电动机驱动两种动力源。电动机由于其控制方便、易于实现关节驱动、噪声小等优点，已日益成为主流。从能源供给角度，移动机器人驱动形式主要分为拖缆运行和离线运行两种。离线驱动控制具有更大的能动空间，但受到电池、驱动器重量的限制，目前大多数研究人员在研制移动机器人的过程中多采用拖缆运行形式。因考虑到需要附带执行机构，移动机器人一般设计功率较大，然而目前市场上高功率伺服电动机的控制与驱动产品的体积、重量均较大，且价格不菲，这大大限制了移动机器人的负载空间。因此，实现离线驱动控制存在两个关键问题：

1）研制功重比高的动力源。

2）研制小型、大功率、集成化的新型电动机驱动控制单元。

在解决动力源方面，研究人员一般采用聚合物锂离子动力电池，取得了一定成效。在驱动控制单元方面，随着数字信号处理（DSP）技术以及系统级芯片（System On Chip，SOC）和系

统级封装(System In Package,SIP)的发展，将复杂的机器人运动控制算法与单电动机控制算法融为一体，将多个驱动芯片挂靠在同一控制微处理器上，同时将多个这样的单元以总线的形式互连，从而构成集成化的控制系统是研究中采用的主要思路。

(2) 多传感器数据融合技术　在简单的结构化环境中，自动控制技术辅以一定的传感器已足以实现机器人的自动导航控制。当需要在非结构化环境中运行时，设计者就需要考虑从不同的传感器中融合必要的信息。

在早期，多数的数据融合算法是以信度函数(Dempster- Shafer)证据推理为基础的，Waltz 和 Buede 曾把 D-S 证据推理应用到一些军事指挥和武器控制系统。目前，贝叶斯估计则是数据融合的主要技术基础。贝叶斯估计是统计学中一个重要的组成部分，基本的贝叶斯估计一般只能对相同特征的信息进行融合，因此一般都是与其他技术手段结合起来应用。卡尔曼滤波由于是无偏最优估计，并且计算速度比较快，成为常与贝叶斯估计联合使用的主要方法。Alonzo Kelly 曾采用三维状态空间的卡尔曼滤波来进行移动机器人的导航；神经网络具有并行特性和对噪声以及其他因素影响的鲁棒性，也被应用于目标识别和自主导航系统中，但由于存在样本空间和节点数量的问题，尚不能应用于复杂的系统中；小波理论在多传感器数据融合领域的应用也正在展开，目前应用比较多的领域是图像分析，因此其可以看作数据融合过程中用低层处理的手段。数据融合技术还处于一个体系繁复、概念和方法都不统一的初级阶段。数据融合技术需要经历从一个简单的算法到影响系统结构体系的发展过程，建立一种完整的多传感器数据融合理论是研究的主要目标。

(3) 运动学动力学理论　目前，制约足式移动机器人广泛应用的主要问题是其稳定性问题。作为一种步行机械，足式移动机器人不仅是多链结构，而且具有时变的运动拓扑，此外还是冗余驱动系统，其运动学及动力学理论比起工业用固定基座式机器人要复杂得多。迄今为止，仍然缺乏足式移动机器人爬行运动学的系统研究，特别是很少有将该机器人视为一整体运动链的运动学研究成果发表。该机器人在进行快速移动、慢速移动、停止、转弯等一系列姿态变换过程中，其平稳性及运动的连续性要求是很高的，必须时刻保持最佳的运动姿态。因此，利用并串联机器人技术的研究来达到多种运动姿态的实现和调整，就成为足式移动机器人的关键技术之一。

3. 地面移动机器人实例

(1) 地面侦察机器人　地面侦察机器人是军用机器人中发展最早、应用最广泛的一类机器人，也是从军事领域转到警用领域应用最广泛、最成熟的类型。它们往往被要求工作在诸如丘陵、山地、丛林等开阔地形的野外环境中，所以必须具有比较强的地形适应能力及通过能力。

1) 轻型地面侦察机器人。背包机器人由美国著名的 IRobot 军用及特种机器人公司开发，其大小跟一只鞋盒差不多，高度不足 20cm，自身重量 18kg，如图 5-20 所示。该机器人装备了远距离光学和红外摄像机，还可以接装延长杆、安装摄像头，以得到更高的观察点。此外，也可加装传声器、声波定位仪、红外线传感器、罗盘、激光扫描仪、微波雷达等传感设备。

背包机器人的可变形履带结构及模块化的设计都成为移动机器人设计中的经典，很多国内外研究单位和公司都参照背包机器人的样式开发了类似平台。背包机器人目前有 3 种型号：侦察型、探险型和处理爆炸装置型，如图 5-21 所示。

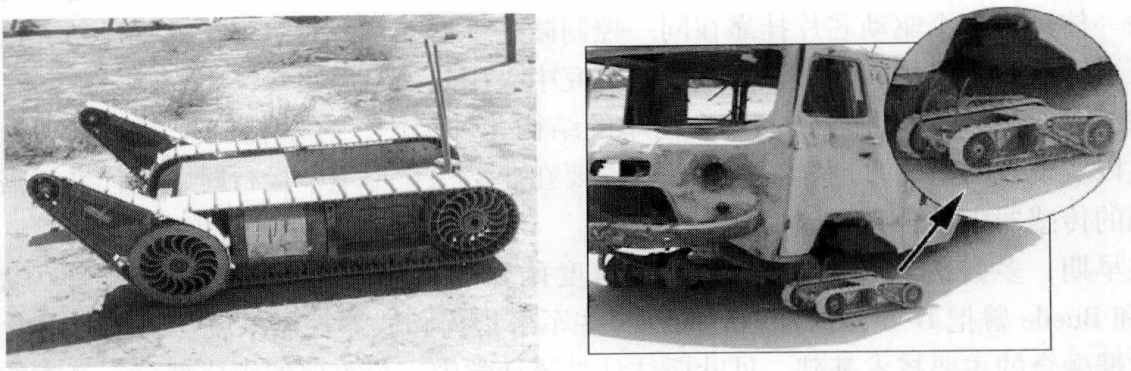
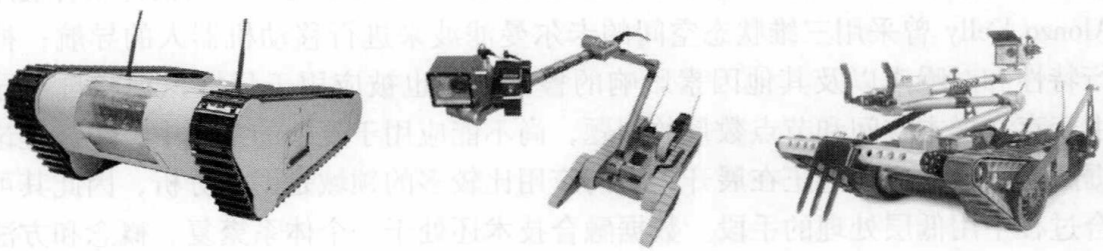


图 5-20 背包机器人



a) b) c)

图 5-21 背包机器人

a）侦察型 b）探险型 c）处理爆炸装置型

对应不同的应用环境，背包机器人所独有的支臂结构是其具有较强越野能力的基础。在面对较高障碍时，前支臂可以充当一个杠杆的角色，将机器人整体长度延长，并且可以将机器人撑起，以越过障碍，如图 5-22 所示。

IRobot 公司及美国国防高级研究计划局在背包机器人的基础上，又开始了下一代小型无人操作陆地机器人(Small Unmanned Ground Vehicle,SUGV)的研究，如图 5-23 所示。新机器人更加小型化，具有更轻的重量，但是保持了原有的机动性和通过能力。

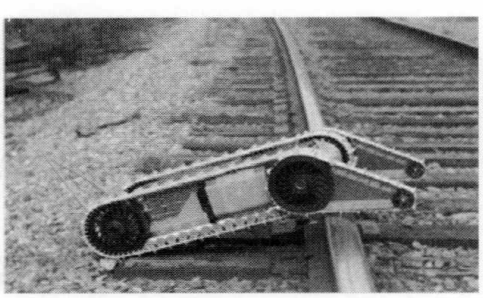


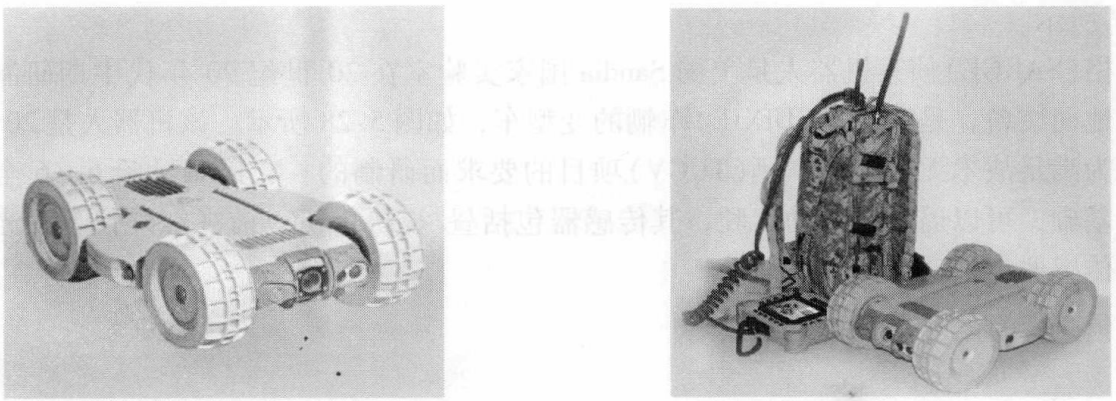
图 5-22 背包机器人越障

图 5-23 小型无人操作陆地机器人

2）布控式地面侦察机器人。“龙行者”(Dragon Runner)机器人是一种微小型四轮地面侦察机器人，由美国宾夕法尼亚州匹兹堡的卡内基·梅隆大学机器人技术研究所联合美国弗吉尼亚海军研究实验室共同研制。它实际上是一种新型的便携式地面传感器，通过建立侦察、监测、搜索及目标信息获取的传感器网络，来提供视野之外的现场情况信息。

“龙行者”机器人由地面移动传感器小车、操作控制器和用户界面组成，包括音频、视

频和运动传感器，具有全天候目标搜集功能，整个系统重 7.45kg。其中，地面移动传感器小车的外形尺寸为 39.4cm × 28.6cm × 12.7cm，如图 5-24 所示。其中，图 5-24a 为“龙行者”机器人小车，图 5-24b 为整个系统组成。



a)　　b)

图 5-24　“龙行者”机器人的地面移动传感器小车及整个机器人系统组成

a）Dragon Runner 机器人的地面移动传感器小车　b）整个机器人系统组成

3）安检机器人。安检机器人综合排爆、侦察、检测等功能，在各种军事基地、仓库、机场、公交、港口及大型活动场所中大显身手，如图 5-25 所示。

2003 年，具有室外安全检查功能的欧弗洛(OFRO)地面侦察机器人投入使用。它由德国 ROBOWATCH 公司研制，长 104cm，宽 70cm，高 140cm，重 54kg，负载 20kg，爬坡角度 30°，工作时间 12h，最大移动速度 0.7m/s。该机器人拥有一个红外摄像机、一个 CCD 摄像机和一个传声器，可以在白天、夜间进行不间断侦察，如图 5-26 所示。

图 5-25　安检机器人

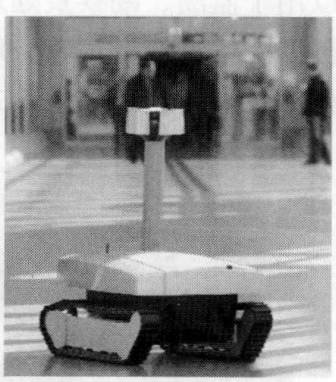


图 5-26　欧弗洛机器人

4）地面武装侦察车辆。“徘徊者”(PROWLER)侦察机器人是美国机器人防务系统公司设计的首辆“真正”的军用机器人车。PROWLER 是英文 Programmable Robot Observer with Logical Enemy Response 的缩略语，意即具有逻辑响应能力的可编程机器人观察车。该车作

为一种全地形轮式车辆，主要用于执行重要区域边界上的巡逻任务。

该机器人采用一种6×6轮式全地形车辆，用柴油机作为动力，装在车辆后部，能在最高速度27km/h的情况下载重907kg。它采用低压轮胎，具有轮式车辆的优点，车速高、造价低，且维修较少，6个车轮均采用液压闭锁装置和制动防滑系统，行程为250km，如图5-27所示。

萨格(SARGE)侦察机器人是美国Sandia国家实验室在20世纪90年代中期研制的监视与侦察地面装备，是迪克斯(DIXIE)车辆的变型车，如图5-28所示。该机器人是20世纪90年代初为满足战术无人地面车辆(TUGV)项目的要求而研制的。它以雅马哈6×6全地形车平台为基础，可以遥控或手动驾驶，其传感器包括昼/夜摄像机、前视红外仪、激光测距仪和声音传感器组件。

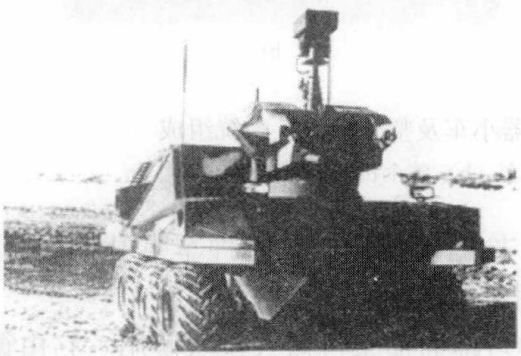


图5-27 “徘徊者”侦察机器人

图5-28 萨格侦察机器人

(2) 排爆机器人 排爆机器人(Explosive Disposal Robot)是专门用于搜索、探测、处理各种爆炸危险品的机器人。目前，排爆机器人移动载体主要有履带式、轮式以及两者的组合等几种方式。

1) MR-5型排爆机器人。MR-5型新一代排爆机器人(EODR)具有卓越的灵巧性与敏捷度，可以用于监测、勘察及处理危险品(如土制爆炸品、危险性化学品、放射线物质)等。

该机器人备有6个车轮、1套活动履带，必要时可将履带装上，用于跨越崎岖不平的地形和楼梯等各种障碍，如图5-29所示。MR-5型排爆机器人基于最新机械和计算机科技，由

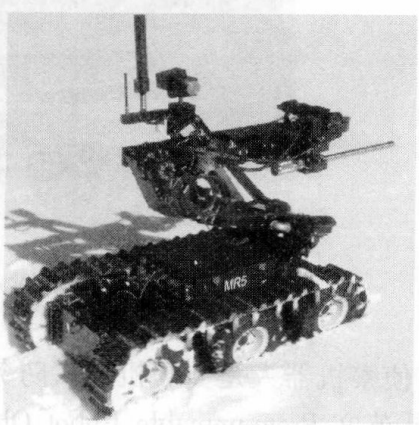


图5-29 MR-5型排爆机器人

1个坚固耐用的平台、1个灵巧的机械臂、10个操作控制台和多种操作工具及配件所组成。MR-5型排爆机器人的特点是具有可快速移动的履带，前后均有可快速移动、与关节相连的车轮。这种结构使其行走于楼梯间及斜坡时更加稳定。

MR-5型排爆机器人不是一个能够自动发现并消灭目标的自动机器人，它需要由人来控制。MR-5型排爆机器人身上的摄像装置可将周围图像传输给操控者。操控者一旦发现图像中有目标出现，就会按动按钮，收到指令后，机器人便会消灭目标，从而保护操控者避免受到伤害。MR-5型排爆机器人也可以在门上钻孔，然后将摄像头探进门内观察室内的情况。

2）安德罗斯(Andros)排爆机器人。安德罗斯机器人可用于小型随机爆炸物的处理，其中，F6A型采用活节式履带(见图5-30)，能够跨越各种障碍，在复杂的地形上行走。其速度为0~5.6km/h、无级可调；完全伸展时的最大抓取重量为11kg；配有3个低照度CCD摄像机；可配置X射线机组件(实时X射线检查或静态图片)、放射/化学物品探测器、霰弹枪等；可用于排爆、核放射及生化场所的检查及清理，处理有毒、有害物品及机场保安等。

3）国产“灵蜥”排爆机器人。“灵蜥”排爆机器人是在国家863计划支持下，先后研制出A型、B型、H型、HW型等，具有探测及排爆多种作业功能。它由履带复合移动部分、多功能作业机械手、机械控制部分及有线(无线)图像数据传输部分组成。

“灵蜥”系列排爆机器人具有极强的地面适应能力，可以在不同路面下前后左右移动和原地转弯；在爬坡、爬楼梯、越障碍时，机器人采用履带移动方式；在平整人工地面时，机器人采用轮子移动方式，充分发挥了两者的优点；而且可以根据使用要求装备爆炸物销毁器、连发霰弹枪、催泪弹等，完成相应的特种功能。

该机器人具有一只4自由度机械手(可根据需求增加1个伸缩自由度)，最大伸展时抓取重量为8kg，作业的最大高度达到2m，如图5-31所示。另外，该机器人装有两台摄像机，用于观察环境和控制作业；照明系统采用硅晶体作为照明材料，体积小、重量轻、功耗低、亮度高，安全可靠。

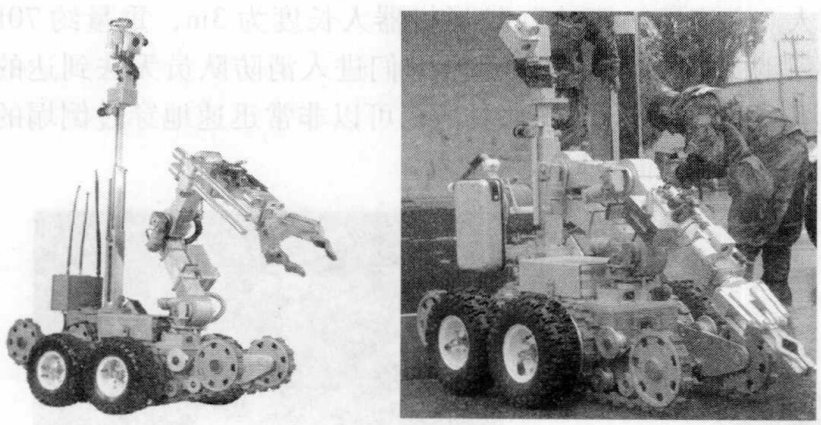


图5-30　安德罗斯F6A型排爆机器人

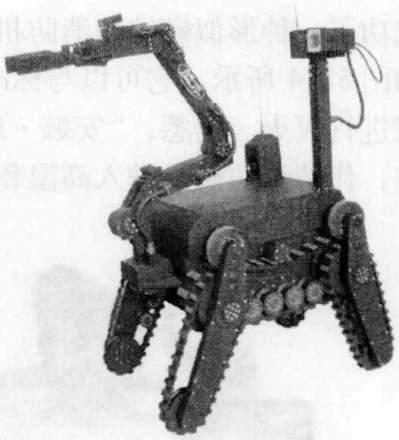


图5-31　“灵蜥”排爆机器人

(3) 消防机器人　消防机器人作为特种消防设备，可代替消防队员接近火场，实施有效的灭火救援、化学检验和火场侦察。它的应用将提高消防部队扑灭特大恶性火灾的实战能力，对减少国家财产损失和人员伤亡产生重要的作用。

1）LUF60灭火水雾机器人。德国研发的履带式遥控LUF60灭火水雾机器人

(见图5-32)，集排烟、稀释、冷却等功能于一体，可在300m距离内进行遥控操作，主要用于隧道、地下仓库等封闭环境内的抢险救援。

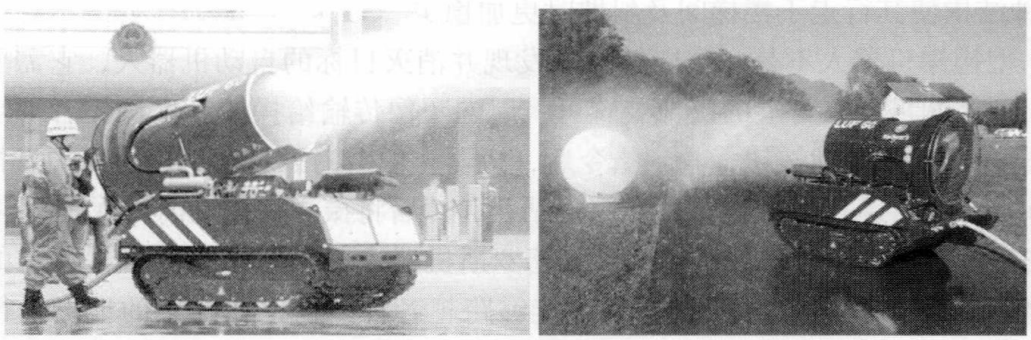


图5-32 LUF60灭火水雾机器人

这台灭火水雾机器人共有360个喷嘴，从这些喷嘴中喷出的水雾射程可达到60m，喷雾的覆盖面积相当于普通水枪的3~5倍。在处理危险化学品事故时，它比普通水枪喷出的水柱具有更好的稀释和冷却效果，同时还能有效减少用水量和水渍损失。

“陆虎60雪炮车”消防工具可用排风机迅速排出隧道、地下建筑中的浓烟，1h可以排出25万$m^3$的浓烟。灭火时，还可以用喷嘴喷出水雾或泡沫。该机器人长2.316m、宽1.346m，速度可达40km/h，最远遥控距离为300m，配备的履带底盘可以保证机器人爬上大约30°斜角的楼梯或斜坡。同时，它还可以越过一些障碍物和沟渠进入火场。

2）FFR-1消防机器人。美国InRob Tech公司生产的FFR-1消防机器人，在高温环境中具有顽强的生命力，它的冷却系统可以在6000℃的高温环境下使机器人保持在600℃。该机器人长162cm、宽114cm、高380cm，重940kg。它由无线控制，自带推进电池，有两个CCD视频摄像机；行驶速度为3~4km/h，可爬坡30°斜角，能跨越障碍物高度为20cm，如图5-33所示。

3）“安娜·康达”蛇形机器人。挪威SINTEF研究基金会的波尔·利尔杰贝克等人研制成功了一种形似蟒蛇的消防机器人。“安娜·康达”蛇形机器人长度为3m，重量约70kg，如图5-34所示。它可以与标准的消防水龙带相接，并牵着它们进入消防队员无法到达的区域进行灭火。据悉，“安娜·康达”机器人的行动非常灵活，可以非常迅速地穿过倒塌的墙壁，代替消防队员进入高温和充满有毒气体的危险火灾现场。

图5-33 FFR-1消防机器人

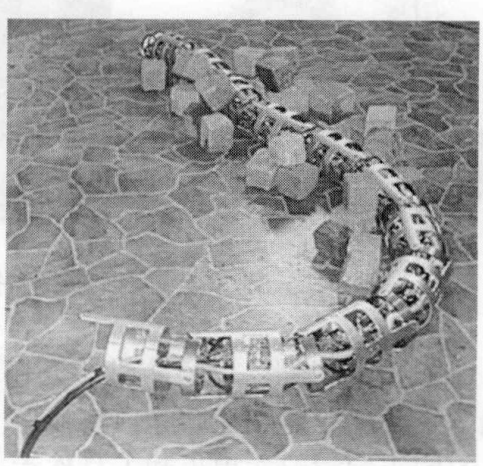


图5-34 “安娜·康达”蛇形机器人

该机器人的能量供给方式也非常奇特，它能够直接从消防水龙带中获取前进的动力。“安娜·康达”机器人全身共安装有20个靠水驱动的液压传动装置。由于每一个传动装置的开关都由计算机进行精确控制，因此机器人能够像蛇一样灵活地移动。

在使用过程中，消防队员可对“安娜·康达”机器人实施远距离遥控，并能通过设置在机器人前端的摄像机及时了解火情。该机器人内部安装有大量电子传感器，因此具备了一定的独立活动能力。在使用过程中，先由控制人员标出需要到达的具体地点，然后机器人将根据障碍物所处的位置，自主决定行进路线。

这种蛇形机器人的功率非常强大，不但可沿楼梯爬行，而且还能抬起一部小汽车。此外，由于其外壳非常坚固，它还能砸穿墙壁。该机器人可以在隧洞事故中发挥重要作用，既可以用于灭火，也可向被困人员运送呼吸面罩等救援物品。

4）消防救援机器人。消防救援机器人的研究开发及应用，日本最为领先，其次是美国、英国和俄罗斯等国家。日本的救护机器人于1994年第一次投入使用，机器人能够将受伤人员转移到安全地带。机器人长4m、宽1.74m、高1.89m，重3860kg。它装有橡胶履带，最高速度为4km/h；有信息收集装置，如电视摄像机、易燃气体检测仪、超声波探测器等；具有两只机械手，最大抓举重量为90kg。该机器人可将受伤人员举起送到救护平台上，如图5-35所示。

日本Tmsuk机器人公司新研制成功T-53 Enryu救援机器人。这个2.8m高、3t重的救援机器人的两个机械臂能搬运沉重的物体，可由一人操作，也可遥控作业，如图5-36所示。

图5-35　日本救护机器人

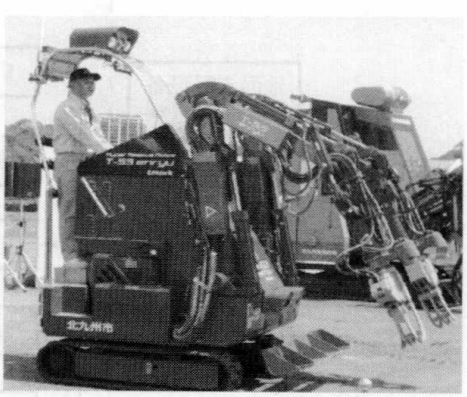


图5-36　T-53 Enryu救援机器人

### 5.3.3　空中机器人(无人机)

无人机(UAV)是最新一代无人驾驶飞机的简称。近年来，在军用机器人家族中，无人机是科研活动最活跃、技术进步最大、研究及采购经费投入最多、实战经验最丰富的领域。80多年来，世界无人机的发展基本上是以美国为主线向前推进的，无论是从无人机的技术水平还是种类和数量来看，美国均居世界首位。

1990年，美国佐治亚理工大学罗伯特·迈克森教授提出了空中机器人(Aerial Robotics)的概念。他认为，无人机本质上是各种能在空中自主飞行的飞行器，它本身就是一种特殊的机器人。和地面机器人相比，它会飞，却不具人形；而与无人飞机相比，它又和机器人一样，有自己的眼和脑，能自主控制自己的行动。所以，空中机器人是指具有较高自主水平，

能够在空中自主飞行并执行任务的飞行器，包括固定翼无人飞行器、旋翼无人飞行器和无人飞艇等。空中机器人可以在地面站的监控下自主完成多种飞行任务，在搜索救援、环境检测、交通监察、空中拍摄和电力巡查等领域有广泛的用途。空中机器人拓展了无人机的概念，在一定意义上可将其看做是无人机的别称。

空中机器人是一项系统工程，涉及航空理论、计算机、控制、电子、机械、材料和系统工程等多个学科。在具体的问题中，又涉及飞行器的设计与制作、控制系统和算法的设计、传感器应用与融合、导航制导、数据通信、图像识别和信号处理等多方面的知识。

1. 无人机的系统组成及特点

无人机是具有自主程序控制、可进行无线遥控飞行的空中飞行器，可与遥控人员协作完成半自主控制，也可在无人驾驶、控制的状态下自主操作。无人机设计灵巧、空间利用率高、可重复使用，实际用途十分广泛。

（1）无人机系统组成　无人机主要包括飞机机体、飞控系统、数据链系统、发射回收系统、电源系统等。飞控系统又称为飞行管理与控制系统，相当于无人机系统的“心脏”部分，对无人机的稳定性、数据传输的可靠性、精确度、实时性等都有重要影响，对其飞行性能起决定性的作用；数据链系统可以保证对遥控指令的准确传输，以及无人机接收、发送信息的实时性和可靠性，以保证信息反馈的及时有效性和顺利、准确地完成任务；发射回收系统保证无人机顺利升空以达到安全的高度和速度飞行，并在执行完任务后安全回落到地面。无人机系统的组成框图如图 5-37 所示。

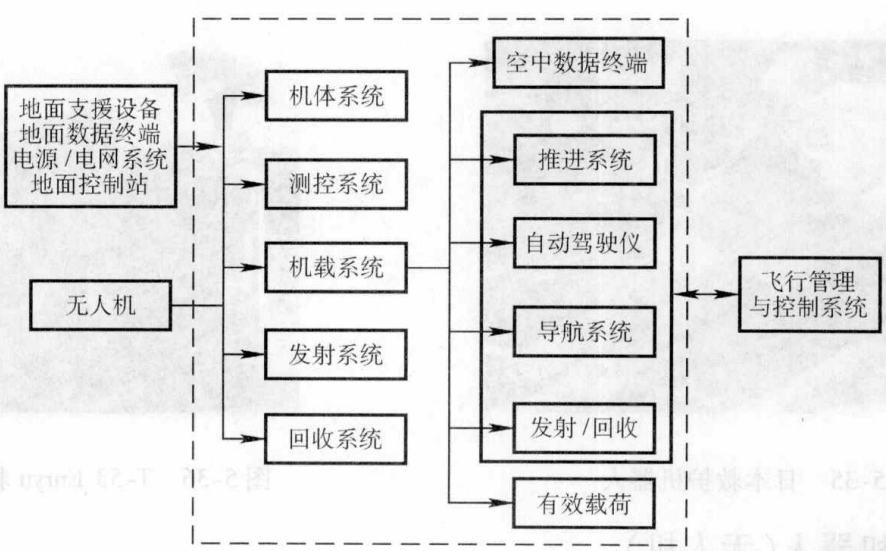



图 5-37　无人机系统的组成框图

（2）无人机系统特点

1）机体灵活性好，体积小、重量轻。由于无人机的设计不用考虑驾驶员的部分，机身可以设计得很小，同时使用较轻的材料以减轻机身重量，提高生存能力和飞行速度。

2）可担负多载荷任务并进行远距离、长时间续航。与相同体积和重量的有人机相比，无人机有更多的空间和载重量来承载燃料、武器和设备等，提高了工作效率，延长了续航时间；同时，不用考虑飞行员自身的承受极限和飞行加速度的影响，可执行更复杂的飞行任务。

3）隐身性能好，生存能力强，费用低廉。与载重量相当的有人机相比，无人机造型小巧，机体灵活，可采用雷达反射特征不敏感的材料制造，以达到较好的隐身效果，从而躲避探测。目前，大部分中小型无人机的价格已降至有人机的1/10左右，而小型无人机更是价格低廉。

4）安全系数高，自主控制能力强。无人机最大的特点就是机上无人驾驶，使其可以担负许多有人机无法执行的特殊、危险且艰巨的任务，如核污染区的勘测、生化危险区的工作以及新武器试验等，既扩大了执行任务范围，又减少了不必要的人员伤亡，增强了安全可靠性。无人机具有极强的自主控制能力，可以在地面站的操作人员控制下进行遥控飞行，也可根据预编程序进行自主控制飞行，同时能与指挥中心进行实时通信。

2. 无人机关键技术

（1）隐身技术　隐身技术的应用对提高无人机的生存能力具有至关重要的作用。无人机主要通过对机身表面材料的改进和对机体构造的设计来降低雷达信号的反射。通常，无人机机体表面采用降低反射雷达信号波能量的复合材料构造或使用雷达吸波材料。雷达散射断面积(Radar Cross-Section，RCS)越小，目标向雷达接收方散射电磁波的能力就越弱，目标的生存性能就越好。同时，无人机也尽量采用减小电磁波反射的机身构造，即在机身各部分的连接处进行光滑处理，避免形成角度增强反射，并在凹口处采取相应的隐身措施。

（2）飞控技术　飞控技术包括传感技术、导航定位技术、飞行控制规律设计等。随着任务的不同，如侦察、运输等，无人机控制规律各不相同，尤其是一机多用时，无人机的控制任务也要随之改变，这就对飞行控制提出了更高要求，飞行控制规律的设计成为难点。飞行控制规律是解决无人机的核心系统与已建立的对象模型及各传感器间匹配的控制规律。目前，多模型的方法是处理不确定问题的重要方法，多模型的自适应控制技术是比较适合的。将设计模型与在线识别和决策相结合，可根据情况的变化自主地在已建立的模型上集中选择适合当前工作状态的模型及与之匹配的控制器，形成实时的、具有高鲁棒性的控制系统，降低决策和控制的复杂程度，使总体性能达到最佳。

（3）动力技术　由于无人机具有承载任务多、续航时间长的特点，在无人机飞行过程中就需要有较好的动力推动技术和低油耗、高可靠性的发动机。当前，无人机使用的发动机主要有活塞式、涡轮式、转子式、太阳能式发动机等。其中，太阳能式发动机能有效利用能源，满足无人机的长滞空需要，前景广阔。

（4）数据链技术　无人机要实现智能的自主控制飞行，最关键的技术是数据链传输的安全和可靠技术。宽带、大数据量的传输是无人机的发展趋势和必然要求。目前，无人机主要采用$K_u/K_a$波段、C/X波段和L波段进行通信。

（5）发射、回收技术　发射系统按其发射点位置来分，主要包括陆(或雪、冰)上发射、水(舰)上发射和空中发射。陆上发射根据发射方式可分为发射架发射、起落架起飞、滑跑车起飞和垂直起飞等。空中发射主要是指母机投放，即由母机运载到空中指定位置后进行点火投放，以提高无人机的使用寿命，降低伤亡率，但对母机的设计要求较高，同时应用的环境较受限制。

回收按回收地点可分为空中回收、陆上回收、水上或舰上回收；按回收方式可分为自主降落回收和遥控降落回收；按回收系统可分为回收网回收、伞降回收、滑跑降落回收(起落

架回收)等。其中，自主降落回收要求在飞机控制系统中加入返航、降落、定位等程序，设计复杂但操作使用简单，应用较广泛。

(6) 自主加油技术　自主加油能力的研究工作已经取得重大进展。加油过程中，无人机靠近加油机，使用不同传感器将输油管插入加油机油箱当中。无人机利用新开发的光学探针，成功探测到加油机锥套的位置。

3. 无人机实例

(1) 固定翼无人侦察机　美国“捕食者”无人侦察机是实用型合成孔径雷达的无人侦察机。该机最大速度为240km/h，活动半径为925km，装备有先进的电/红外传感器、可见光摄像机2台，红外摄像机1台，激光测距仪1台，作用距离10km，外形如图5-38所示。其主要特点是：续航时间长，可达24h以上；操作简单，便于运输，维修性好；隐身效果好，雷达反射断面积仅为$1m^2$，加上雷达波材料后，其信号特征可减少到$0.1m^2$，体积小、声音小；侦察范围较大，分辨率高。主要不足是侦察效率受气象和能见度影响大，数据传输技术有待改进，只能传送静止图像。

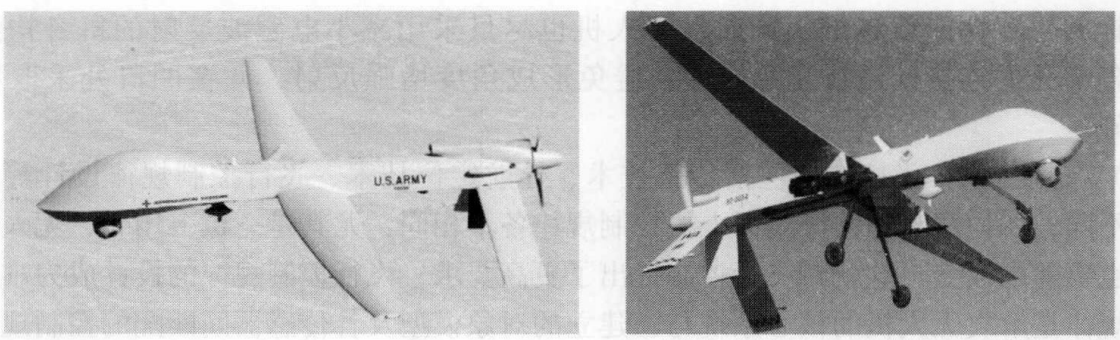



图5-38　美国“捕食者”无人侦察机

美国“全球鹰”无人机是一种高空高速长航时无人侦察机，主要用于大范围的连续侦察与监视，如图5-39所示。该机长13.4m，翼展35.5m，最大起飞重量为11610kg，最大载油量为6577kg，有效载荷为900kg。它有一台涡扇发动机置于机身上方，最大飞行速度为740km/h，巡航速度为635km/h，航程为26000km，续航时间为42h。机上载有合成孔径雷达、电视摄像机、红外探测器三种侦察设备，以及防御性电子对抗装备和数字通信设备。

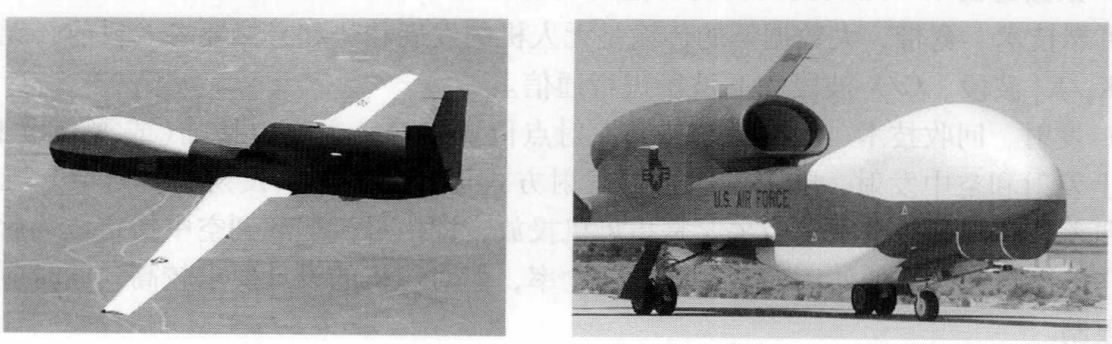
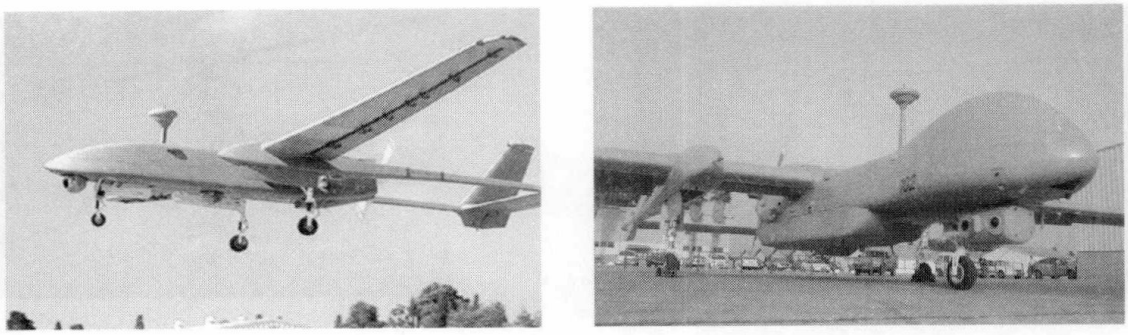



图5-39　美国“全球鹰”无人侦察机

以色列“苍鹭”无人机(见图5-40)的翼展为16.6m，每次升空均能以225km/h的速度在9000m高空持续飞行30h，“苍鹭”无人机侦察精度超过了以往的其他侦察机，它能分辨出地面上的人。



a)　　b)

图5-40　以色列“苍鹭”无人机
a)“苍鹭-1”型　b)“苍鹭-2”型

“不死鸟”无人机(见图5-41)是由英国马可尼公司研制的一种中程无人侦察机。机体全部采用复合材料，具有模块式结构，推进式机翼和尾梁，可置换的机翼、垂尾翼尖等。该机的隐身性能好，具有较高的生存力，易于维修和运输；最大使用高度为2440m，侦察半径为60km，在1000m高度下视场达800km，装备有先进的红外传感器、合成孔径雷达和电子战系统。

中国“翔龙”无人侦察机(见图5-42)全长14.33m，翼展24.86m，机高5.413m，正常起飞时重量为6800kg，任务载荷为600kg，机体寿命暂定为2500飞行小时。该机巡航高度为18000~20000m，巡航速度大于700km/h；侦察半径为2000~2500km，续航时间最大为10h，起飞滑跑距离为350m，着陆滑跑距离500m。

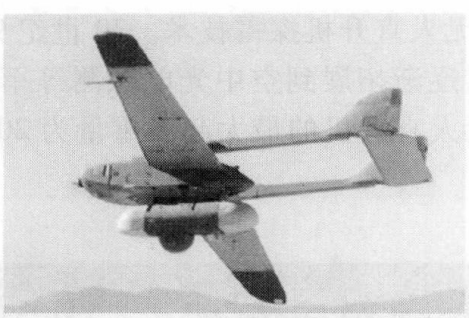


图5-41　英国“不死鸟”无人侦察机

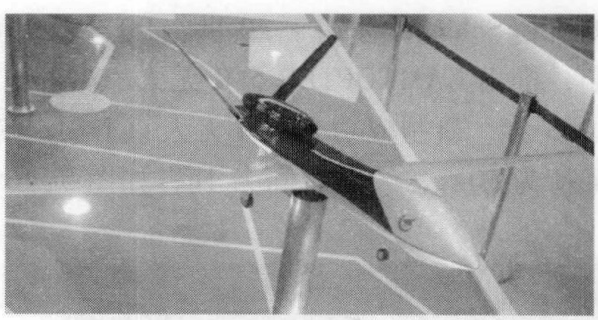


图5-42　中国“翔龙”无人侦察机

(2) 旋翼无人直升机　与固定翼无人机相比，旋翼无人直升机可垂直起降、空中悬停，朝任意方向飞行，其起飞着陆场地小，不必配备像固定翼无人机那样复杂、大体积的发射回收系统。旋翼无人直升机大致可分成三类：常规单旋翼式、共轴反转双旋翼式、非常规双旋翼式。

RQ-8A“火力侦察兵”无人直升机是美国诺思罗普·格鲁门公司瑞恩航空中心研制的下一代舰载垂直起降战术无人直升机(VTUAV)，用于执行侦查和瞄准任务，如

图 5-43 所示。RQ-8B 无人直升机采用四桨叶，其续航及载荷能力较 RQ-8A 型无人直升机都有很大的提高，加装了光电/红外传感器、合成孔径雷达以及激光测距仪等，如图 5-44 所示。

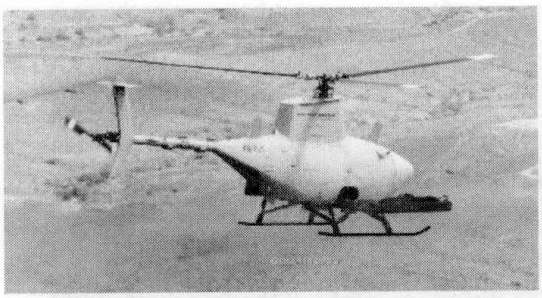


图 5-43 RQ-8A 无人直升机

图 5-44 RQ-8B 无人直升机

1989 年，日本雅马哈公司发售了世界上第一种产业用 R-50 无人直升机；1997 年，发售了性能极大改善的 RMAX 无人直升机，厂家型号为 L15；2002 年，发售了性能进一步提高的 RMAX TypeⅡG 无人直升机，它具有更强的操作性和稳定性。这些直升机主要用于农业领域。

雅马哈公司自主飞行产业用 RMAX G1 无人直升机如图 5-45 所示，它采用 YACS(姿态控制装置)和 RTK-DGPS(差分 GPS)系统作为控制核心，能够按照预先设定的程序自动飞行，进行很多手控操作无法完成的飞行动作和任务；可在目视范围以外进行远距离飞行，准确地飞行到指定位置完成任务并可自动返航；系统具有很高的稳定性和安全性。根据需要，该直升机可搭载不同的任务设备，如 CCD 摄像机、红外摄像机、激光扫描装置等，配合多种应用软件，完成多种全方位的监视及测量任务。RMAX G1 无人直升机的旋翼直径为 3m，最大起飞重量为 88kg，有效载荷为 30kg，飞行速度为 20km/h，续航时间为 1h。

奥地利 Schiebel 公司于 20 世纪 90 年代开始研究无人直升机探雷技术。20 世纪 90 年代中期，推出 CAMCOPTER 5.0 无人直升机，从探雷逐渐拓展到空中光电探测等军事用途。2003 年，研制成功 S-100 无人直升机。S-100 无人直升机的最大起飞重量为 200kg，任务载荷为 50kg，续航时间为 4h，如图 5-46 所示。

图 5-45 RMAX G1 无人直升机

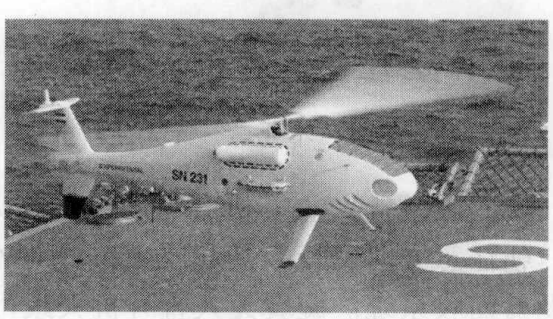



图 5-46 Schiebel 公司的 S-100 无人直升机

加拿大的“海上哨兵”CL-327 无人直升机是目前世界上唯一一种已经批量生产的舰

载垂直起降无人直升机，如图5-47所示。它由CL-227无人直升机改进而来，采用双旋翼结构和花生形机体，由上部动力组件、中部旋翼组件和下部有效载荷组件组成。与CL-227无人直升机不同的是，CL-327无人直升机增大了旋翼直径(达到4m)，改进了传动系统，并加大了载荷舱，最大起飞重量达350kg。

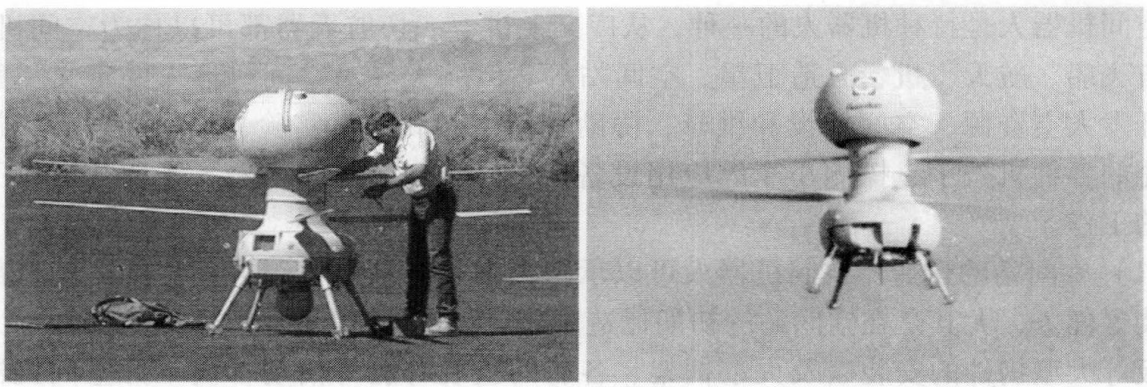


图5-47　CL-327无人直升机

CL-327无人直升机的最大特点是不用火箭发射及回收网回收，可在护卫舰上起降。目前，它的飞行高度已超过5500m，巡航速度达到180km/h，续航时间为6h，有效载荷达到了100kg，数据传输系统采用定向天线，传输距离达到了180km。另外，其侦察传感器采用前视红外传感器，还装了一部识别器。

KA-137无人直升机是俄罗斯研制的一种多用途无人直升机，KA-137无人直升机可携带最大80kg的有效载荷，主要用于生态监测、油气管道监测、森林防火、辐射和生化侦察、自然灾害监测、公安边防巡逻、渔场保护等。其机体形状为球形，并采用四腿起落架。

KA-137无人直升机的机体分成上、下两个独立的部分，上半部分装载发动机、燃油及控制系统；下半部分放置有效载荷和各种传感器，如图5-48所示。该机装有一套自动飞行的数字控制系统，机载惯性卫星导航系统确保它能够完成许多复杂的自动飞行任务。KA-137无人直升机的特点如下：可完全自主飞行；可舰船操作，机体防腐蚀，电磁屏蔽；可装载电视摄像机、红外摄像机、便携式雷达和无线电发射机；可重组多任务传感器，卫星导航，数字自动驾驶仪，自动导航在60m的精度之内；可防高强度辐射。

图5-48　俄罗斯KA-137无人直升机

## 5.3.4　空间机器人

自古以来，人类便对神秘的宇宙充满着遐想。但是，由于太空环境具有微重力、高真空、温差大、强辐射、照明差等特点，就目前的技术水平来看，宇航员在空间的作业具有较大的危险性，而且耗资也非常巨大。随着空间技术的应用和发展以及空间机器人

技术的日益完善，机器人化是实现空间使命安全、低消耗的有效途径。美国国家航空航天局(NASA)指出，到2004年，已超过50%的在轨和行星表面工作通过空间机器人实现。因此，充分发展和利用作为特种机器人技术重要分支的空间机器人，在21世纪人类和平探测和利用太空方面有着广泛而深远的意义。

1. 空间机器人的用途

空间机器人是特种机器人的一种，从广义上讲，一切航天器都可以称为空间机器人，如宇宙飞船、航天飞机、人造卫星、空间站等。但航天界对空间机器人的定义一般是指用于开发太空资源、空间建设和维修、协助空间生产和科学实验、星际探索等，带有一定智能的各种机械手、探测小车等应用设备。具体来说，空间机器人主要从事以下几个方面的工作。

(1) 空间站的建造　空间机器人可以承担大型空间站中各组成部件的运输及部件间的组装等任务，尤其是在空间站的初期建造阶段，如图5-49所示。无线电天线、太阳电池帆板等大型构件的安装以及大型框架、各舱的组装等舱外活动都离不开空间机器人的协助，如国际空间站(ISS,International Space Station)的建设就离不开空间机器人的密切合作。美国航空航天局(NASA)、欧洲航天局以及俄罗斯、日本、加拿大、巴西等国的航天部门都参加了ISS计划，并不断开发相应的空间机器人，以适应ISS的不同建设阶段。

(2) 航天器的维护和修理　随着空间活动的不断发展，人类在太空的财产越来越多，其中大多数是人造卫星。这些卫星发生故障后，如果直接丢弃将造成很大的浪费，必须设法修理后重新发挥它们的作用。由于强烈的宇宙辐射可能危害宇航员的生命，所以只能依靠空间机器人完成这类维修任务，如图5-50所示。空间机器人所进行的维修工作主要包括以下两个方面。

1) 回收失灵的卫星。空间机器人将出现故障的卫星从其轨道上带回空间站进行修理，然后再用助推火箭或其他方式将修复后的卫星送回轨道。

2) 对故障进行就地修理。有些航天器不能带回空间站进行修理，因为在修理时可能引起爆炸、造成污染或者是航天器体积太大等，这就需要对它们进行就地修理。让宇航员去完成这些修理工作既危险又不经济，而用空间机器人则既保证了安全性又提高了经济效益。

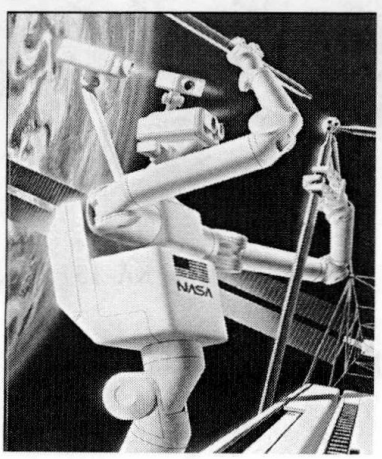



图5-49　建造空间站

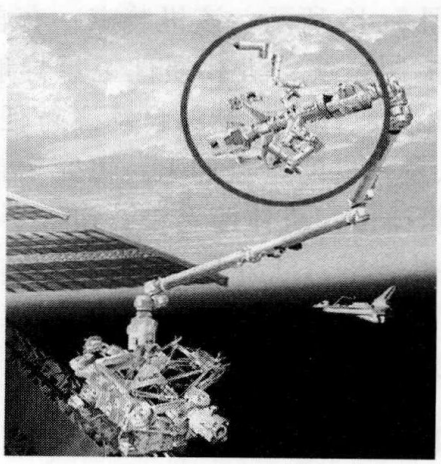


图5-50　人造卫星的维护与修理

(3) 空间生产和科学实验　宇宙空间为人类提供了地面上无法实现的微重力和高真空

环境，利用这一环境可以生产出地面上难以生产或不能生产的产品，进行地面上不能做的科学实验，例如可以在空间提纯药品，为人类制造治疗疑难病症的救命药。在太空制造的某些药品比在地面上制造的同类药品纯度高5倍，提纯速度快4~8倍。如图5-51所示为欧洲航天局哥伦布舱内部结构。在太空实验室可以进行微重力条件下的生物学、物理、化学及其他学科的研究，如在太空重力条件下生长出的蛋白质比地面条件下更纯净等。如图5-52所示为经过太空改良的南瓜。

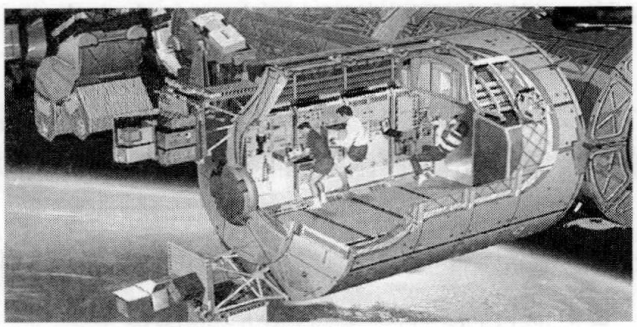


图5-51　欧洲航天局哥伦布舱

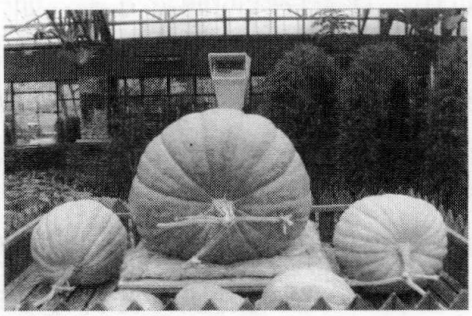


图5-52　太空南瓜

（4）星球探测　早在1983年，苏联航天时代的先驱者齐奥尔科夫斯基就曾预言“地球是人类的摇篮，但人类不会永远生活在摇篮里”。为了寻求能源和生存空间，人类将首先冲出大气层进行小心翼翼的探索，再大胆地去利用整个太阳系的宇宙空间。因此，走出地球，探索未来的太空世界，为人类长期的发展寻找新的资源，寻找宇宙中可能存在的人类知音成为航天活动的一个重要目标。空间机器人作为探索其他星球的先行者，可以代替人类对未知星球进行先期勘查，观察星球的气候变化、土壤化学组成、地形地貌等，甚至可以建立机器人前哨基地，进行长期探测，为人类登陆做好准备。

在“阿波罗”计划中，美国就曾多次派遣空间机器人登陆月球，进行实地考察，获得丰富的月球数据之后才有宇航员的成功登陆。1997年，美国国家航空航天局发射的“探路者号”宇宙飞船携带“索杰纳”空间机器人登上火星，开创了星际探索的新纪元。欧洲航天局在2003年实施了“火星快车”（Mars Express）计划。美国国家航空航天局也在2003年发射两个漫游者机器人“勇气号”和“机遇号”到火星进行考察。因此，空间机器人在人类开发和利用空间过程中起着巨大的作用。如图5-53所示为苏联的月球车1号，如图5-54所示为美国的“阿波罗”月球车。

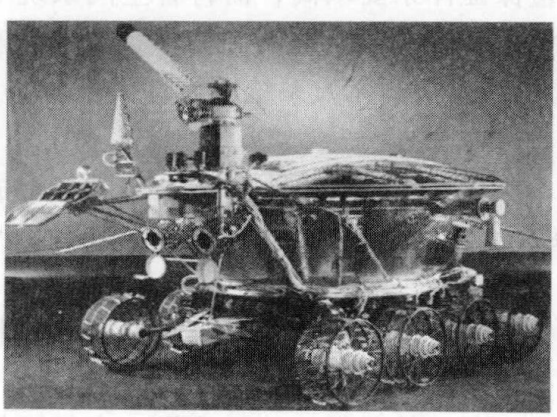


图5-53　苏联的月球车1号

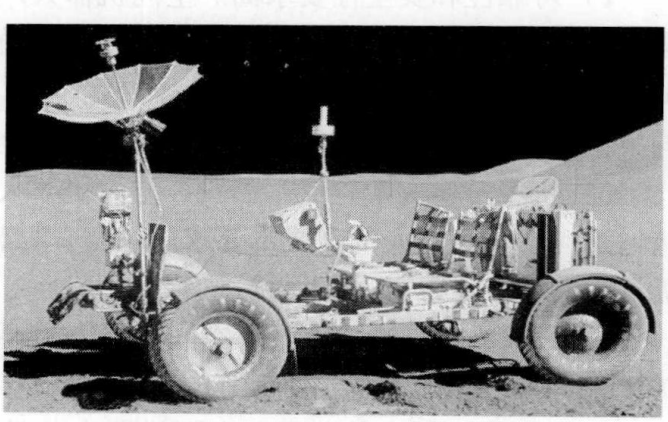


图5-54　美国的“阿波罗”月球车

2. 空间军用机器人的特点和分类

(1) 空间环境对空间机器人设计的要求　空间机器人因其工作环境的特殊性，其设计要求在很多方面与特种机器人的其他分支，如地面机器人、水下机器人、飞行机器人等有很大不同。

1) 高真空对空间机器人设计的要求。空间的真空度高，在近地轨道(LEO)空间的压力为3～10Pa，而在同步轨道(GEQ)空间的压力为5～10Pa。这样的高真空只有特殊挑选的材料才可用，且需特殊的润滑方式，如干润滑等；更适宜无刷直流电动机进行电交换；一些特定的传感原理失效，如超声波探测等。

2) 微重力或无重力对空间机器人设计的要求。微重力的环境要求所有的物体都需固定，动力学效应改变，加速度平滑，运动速度极低，起动平滑，机器人关节脆弱，传动效率要求极高。

3) 极强辐射对空间机器人设计的要求。在空间站内的辐射总剂量为104Gy/a，并存在质子和重粒子。强辐射使得材料寿命缩短，电子器件需要保护及特殊的硬化技术。

4) 距离遥远对空间机器人设计的要求。空间机器人离地面控制站的距离遥远，传输控制指令的通信将发生延迟(称为时延)，随空间机器人离地球的远近不同，延迟时间也不相同。地球低轨道卫星服务的通信延迟时间为4～20s，地球低轨道舱内作业的通信延迟时间为10～20s，月球勘探的通信延迟时间为4～8s，火星距地球1.92亿km，无线电信号由火星传到地球需要19.5min。通信延迟包括遥控指令的延迟和遥测信号的延迟，主要由光传播速度造成。时延对空间机器人最大的影响是使连续遥控操作闭环反馈控制系统变得不稳定(在指令反馈控制系统中，由于指令发送的间断性，所以时延不会造成闭环系统的不稳定)。同时在存在时延的情况下，即使操作者完成简单工作，也需要比无时延情况下长得多的时间，这是由于操作者为避免系统不稳定，必须采取“运动—等待”的阶段工作方式。

5) 真空温差大对空间机器人设计的要求。在热真空环境下不能利用对流散热，空间站内部的温差为-120～600℃，在月球环境中的温差为-230～1300℃，在火星环境中的温差为-130～200℃。在这样的温差环境中工作的空间机器人，需要多层隔热、带热管的散热器、分布式电加热器、放射性同位素加热单元等技术。

除了以上空间环境对空间机器人设计所提出的要求外，空间机器人还具有以下特点：

1) 可靠性和安全性要求高。空间机器人产品质量保证体系要求高，需符合空间系统工程学标准，有内在的、独立于软件和操作程序的安全设计，需非确定性控制方法，要求内嵌分析器，产品容错性好，重要部件要有冗余度。空间机器人中的无人系统可靠性大于80%，与人协作系统可靠性大于95%。

2) 机载重量有限且成本昂贵。空间机器人的成本大于每千克20000美元，有的甚至成倍增加。空间机器人的高成本要求应用复合材料的超轻结构设计，有明显弹性的细薄设计，需极高的机载重量/机器人重量比等。

3) 机载电源和能量有限。空间机器人需要耗电极低的、高效率电子元器件，计算机相关配置有限，如处理器、内存等的限制。

(2) 空间机器人的分类　空间机器人分类的依据不同，其分类方法也不同。空间机器人通常可以按照以下的方法来划分。

1）根据空间机器人所处的位置来划分

① 低轨道空间机器人：离地面300～500km高的地球旋转轨道。

② 静止轨道空间机器人：离地面约36000km高的静止卫星用轨道。

③ 月球空间机器人：在月球表面进行勘探工作。

④ 行星空间机器人：主要指对火星、金星、木星等行星进行探测。

2）根据航天飞机舱内外来划分

① 舱内活动机器人。

② 舱外活动机器人。

3）根据人的操纵位置来划分

① 地上操纵机器人：从地面站控制操作。

② 舱内操纵机器人：从航天飞机内部通过直视或操作台进行控制操作。

③ 舱外操纵机器人：舱外控制操作。

4）根据功能和形式来划分

① 自由飞行空间机器人。

② 机器人卫星。

③ 空间实验用机器人。

④ 火星勘探机器人。

⑤ 行星勘探机器人。

5）根据空间机器人的应用来划分

① 卫星服务空间机器人。

② 空间站服务空间机器人。

③ 实验性空间机器人。

④ 行星表面探测空间机器人。

6）根据控制方式来划分

① 主从式遥控机械手。

② 遥控机器人。

③ 自主机器人。

3. 空间机器人实例

（1）火星车　美国国家航空航天局的JPL实验室多年来一直从事空间机器人系统和智能手爪的研究，并执行遥控机器人技术计划。JPL实验室研制了闻名世界的“索杰纳”火星车(见图2-31)。美国国家航空航天局在2003年发射了“勇气号”和“机遇号”火星探测空间机器人(见图5-55)。两个孪生的空间机器人(结构完全相同)的主要任务是寻找和定性大量的岩石和土壤，那些岩石和土壤可能隐藏着火星过去水的活动线索。

美国的“好奇(Curiosity)号”火星车如图5-56所示。它比“勇气号”和“机遇号”的目标更加远大，尽管它比后者更重、更加复杂，但是它的速度可以达到90m/h。“好奇号”火星车的工作时间有望持续至少一个火星年，即686天，其中包括火星冬季，并要运行多达20km。

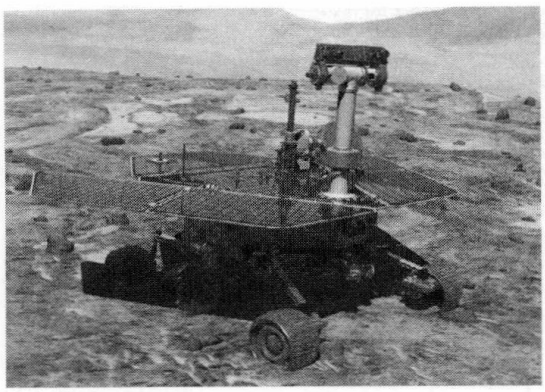


图 5-55 “勇气号”火星探测空间机器人

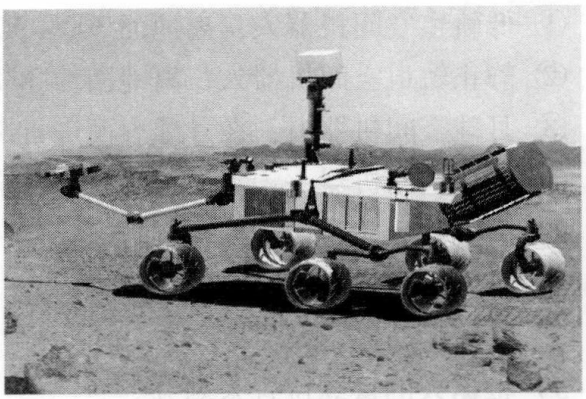


图 5-56 “好奇号”火星车

(2) 加拿大臂 2 号 “加拿大臂 2 号”机器人系统在空间站日常维护和修理中起着相当关键的作用，如图 5-57 所示。依靠这只手臂，空间站上的设备及补给可以顺利地从一处转移到另一处。此外，当宇航员进行舱外作业，如修理及更换各种空间站设备时，也都离不开它的帮助。

(3) 欧洲空间机器人 欧洲太空局各国相继成立空间机器人研究机构，如德国的 DFVLR 公司、法国的 MATRA ESP ACE 公司、意大利的 TECNO SPAZIO 公司等，这些公司专门从事机器人的研究工作。德国于 1993 年由“哥伦比亚号”航天飞机携带发射升空的罗泰克斯(ROTEX)空间机器人是世界上第一个远距离遥控空间机器人。罗泰克斯机器人装有一只具有力传感器、光学敏感器的智能手爪，它成功地完成以下试验：空间站的构造、替换空间站上的可更换零件、捕捉自由浮游卫星。罗泰克斯空间机器人采用两种遥控方式，一种是近距离遥控方式，宇航员在舱内遥控搭载在飞行器上的机械手；另一种是操作员在地面通过监控台进行远距离遥控，同时利用图形预显示技术成功地解决了时间延迟问题。罗泰克斯空间机器人还利用虚拟现实技术，为操作员提供良好的人机接口。预计 2018 年发射升空的欧洲火星车(ExoMars)探测器，计划前往火星寻找过去或现在的生命迹象，如图 5-58 所示。

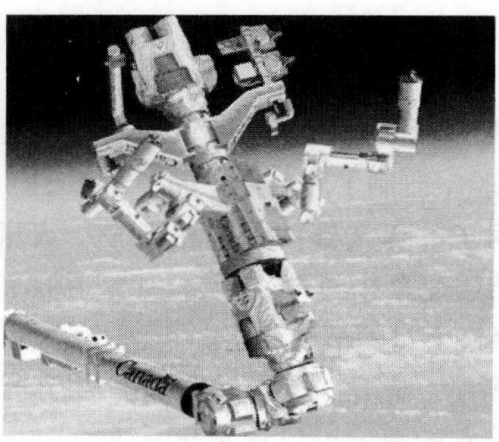


图 5-57 “加拿大臂 2 号”机器人

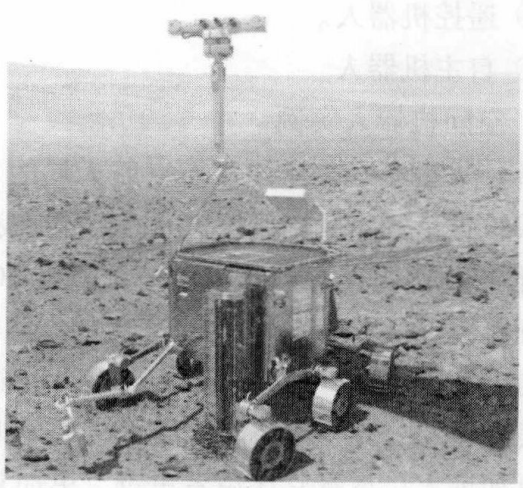


图 5-58 欧洲火星车探测器

# 第6章　生物生产机器人

## 6.1　生物生产机器人概述

生物生产是指利用生物所具有的各种机能作为生产媒体，制造出人类生存所必需的食物和其他原料而进行的人类活动。它包括植物生产（作物、果树、树木、海藻等）、动物生产（家禽、鱼类、野生或实验动物等）和微生物生产。生物生产的要素包括：生物代谢的必要物质，如营养、空气、水等；生物生长的必要条件，如温度、湿度等环境因素；物质转移、环境维持等的必要能量，进行生产的必要物质和情报等。

生物生产系统是生物生产的各个要素以及它的外部环境所构成的系统，它构成了物质和能源的可再生系统，即闭环系统。

美国机器人工业协会将工业机器人定义为“一种用于搬运材料、部件、工具或其他特种装置的可重复编程的多功能的操作机”。日本和欧洲对工业机器人的定义与此相似。但是，对于生物生产机器人，至今还没有很明确的定义。因此，关于“什么是生物生产机器人”仍然是一个正在讨论的话题。但在多数情况下，在生物生产系统中，如果一台机器明显类似于一个工业机器人，或者它拥有具有多个程序的操纵器，就可以称作是生物生产机器人。

在生物生产领域中，有很多无人操作的机械系统，例如无人驾驶拖拉机、联合收割机（见图6-1）、移植机以及自驱动机器等，它们在传感系统控制下可以自行在田间行走。同样在植物工厂，许多种植、间苗、施肥、收获及包装等过程都发展成为无人操作的自动化机械系统；许多谷物干燥机、水稻磨粉机和剥壳去皮机在一定的智能化水平下都可以实现全自动作业。

图6-1　无人驾驶联合收割机

这些不同的机械系统，不管是否有操作者，都可以在其传感系统和控制系统的控制下实现自身控制，进而可以拥有与人相似的知觉和智能。因此，这些机械系统也是广义上的机器人。

生物生产系统远比工业生产系统复杂，并且世界发达国家的农业生产逐步向现代化农业迈进，农业机械化水平越来越高。农业装备逐步从人和机械调节向自动控制方向发展，即向无人化、智能化的机器人迈进，其原因如下：

1）虽然有很多农业作业已经实现了机械化，但仍然存在不少危险的、劳动强度大的和单调乏味的作业不适合人去做，需要一定的与人一样的智能机器人去完成，如喷药作业。

2）许多国家的农业劳动力正以令人担忧的速度下降，从当前趋势来看，相比于其他许多产业，农业对年轻一代的吸引力较小，这表明在不远的将来，农业人力资源的供应量将会继续下降。生物生产机器人的发展，尤其是具有专家知识的机器人，能够完成一些农业的专门作业。

3）要使农业生产持续下去，农村劳动力的缺乏必将导致劳动力成本的提高，急需大量的农业机械或自动机械加入到农业生产中。

4）市场对农产品质量的要求已成为生物生产的一个重要因素。目前，农产品质量的评估主要是靠人来判断的，尽管人类在感官和推理上的能力不能完全被机器所替代，但人工评价的稳定性和一致性是不可靠的，势必需要由机器人来解决感官问题。

### 6.1.1 生物生产机器人的独特性

一般来说，工业机器人擅长处理那些物理特性具有规律性且静止不动的对象，但生物生产机器人需要处理处于生长状态的生物体。处于生长状态的植物和动物的属性是动态变化的，生物生产机器人常需适应作业对象的个别变化特性。在生物生产的很多情况下，耕作方法的改进可以提高产品品质和产量，改善劳动者和机器的作业环境；基因工程和其他技术也促进了产品状态的改善。在生物生产中，用机器人来替代人类劳动时，采用一定的系统方法而不是单纯地让机器人仿效常规的人力劳动方式来完成任务是很重要的，这种系统方法将会给操作方式的改善带来良机，而这在以前是不明显的。将机器人技术融入生物生产的潜力是无限的，这样的结合往往需要众多不同学科的专业技术知识来有效地发掘它的潜力。

虽然有些田间和温室作业的机器人已经应用了智能系统和传感器来进行作业，但大部分现有的生物生产机器人仍然需要人的监督指导。在可控环境下作业的机器人可以达到相当高的自动化水平，操作人员和一些生物生产机器人的相互协作是未来的发展方向。在不久的将来，在人的监督下利用机器人能够完成相对简单和单调的工作，但在一些超出机器人能力的复杂作业中，仍然需要人工来完成。

### 6.1.2 生物生产机器人的作业对象

在生物生产系统中，机器人大都是自动处理工作对象。因此，在机器人的设计中，工作对象及其生长过程起着非常重要的作用。生物生产机器人的工作对象涉及植物、动物、微生物和农产品，目前研究比较多的是植物的切除、收获和分类，剪毛、挤奶以及农产品的分级与包装。与传统工业机器人的作业对象和过程相比，生物生产机器人要操纵一个大小、形状、颜色和表面特征多种多样并且变化无常的主体。此外，生物生产机器人可能处在一个非

常小的结构环境中，作业受到一定的限制。

植物、动物和食品的形态几乎是无限的，每年都有新品种出现，例如植物有果树、蔬菜、花卉、谷物、杂草等。另外，还有植物组织结构、愈合组织、细胞体胚芽等，所有这些都有独特的和变化的特性，即使是在同样的环境下，同样品种的植物在颜色、形状和大小方面也不一样。各种生长变化阶段的特性，例如在成熟和结实期，也是重点关注的问题。这些都需要开发相应的感应机构来满足需要。

1. 生物体的特性

生物对象的特性(见表6-1)可以用多种方法来描述，基本生物特性包括大小、形状、重量、密度和表面组织，在开发生物生产的机械系统时，通常被作为首选指标。机器视觉技术已经发展到对形态特性进行测定，例如形状、大小的测量。对一个植物的形状的测量，看起来好像很复杂，但它常有一些规律性的特性。例如番茄的叶序有相对的顺序，一个花簇和一片叶子之间的角度大约为90°；同样，对于黄瓜，两片相邻叶子之间的角度大约为144°。茎枝尽管看起来是无序的，但也存在一些规则。这些信息可以作为智能的一部分，来指导机器人用机器视觉辨别植物的形状。

**表6-1　生物对象的物理特性**

| 特　性 | 特　征 | 特　性 | 特　征 |
|---|---|---|---|
| 基本物理特性 | 形状、大小、重量、密度、表观 | 声学特性 | 振动特性、波传播特性 |
| 动态特性 | 剪切阻力、摩擦阻力、弹性、黏性 | 电学特性 | 电阻、电容、静电特性 |
| 光学特性 | 反射率、透射率 | | |

工作对象的动态特性对于确定机器人的工作过程非常重要。一般来说，生物对象相对于工业机器人的工作对象来讲，比较柔软，且更易受到损伤。作用在对象表面的摩擦阻力，对于确定由机器人所产生的抓紧和举起的力是很重要的；切割阻力在正确分开对象时，也是要考虑的因素；当一个机器人对动物进行操作时，更应该仔细，从而不让动物感觉不舒服；生物对象的伸缩性特点可以确定机器人处理对象的极限值。

生物对象存在一定的光学特性，图6-2表明植物体的一部分在近紫外线、可视线和近红外线区域的典型光谱反射能力。众所周知，植物需要在自然光中摄取一定范围的光进行光合作用(400～700nm波段，大部分是红光和蓝光)，并且大部分的叶子反射出绿色的光。从图6-2可以观测到，有叶绿素的植物体的光吸收段为670nm。果实和花的颜色取决于植物品种，一些花在紫外线区段的反射波段高达300nm，由此可以推断出一些昆虫的视觉感应能力在紫外线范围内，可以将花与植物的其他部分区分开，从而采到花蜜和花粉。

在近红外线区域，水在970nm、1170nm、1450nm、1950nm波长处有许多可吸收带，植物的所有部分在这个区域比在可视区域有更高的反射能力。对叶子和花瓣进行多个层次测定，花瓣和叶子的吸收波长分别是970nm和1170nm，从而在近红外线区域，可以利用这些波长将它们与植物的其他部位分开。

由于生物体含有水和组织，可以采用声波和振动特性来反应部分特征，特征的变化主要取决于主体的成熟度和重量。例如对象的电阻和电容量会随着主体重量的变化而变化。

大多数的生物体都是有生命的，已经收获的水果吸进氧气，呼出二氧化碳和乙烯。可以采用生物感觉的方法，通过测定植物或果实的呼吸活动来判断对象的内部状态。

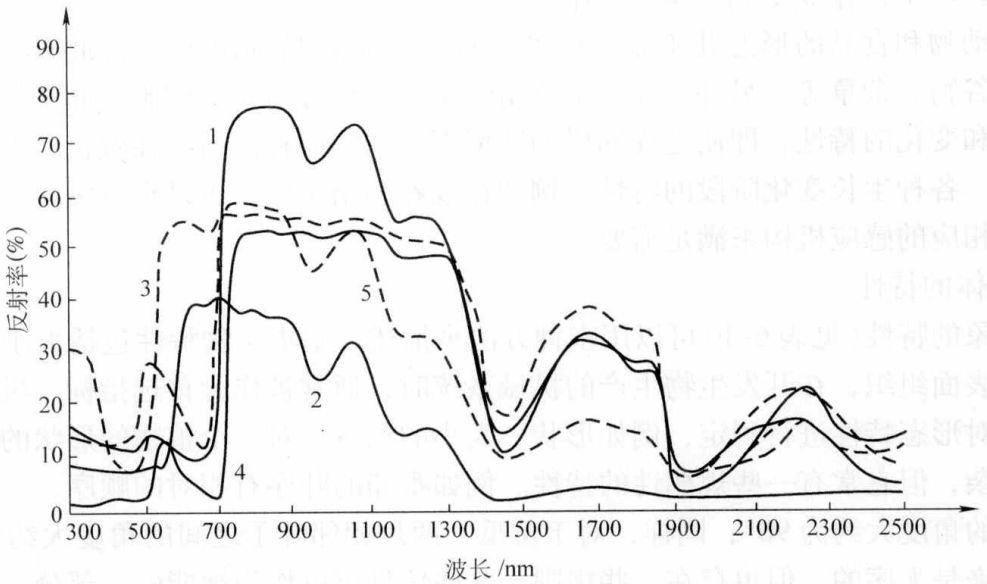



图 6-2 植物的典型反射光谱

1—果实 1(黄瓜、茄子、苹果、桃、梨、橘子、柿子等)

2—果实 2(番茄、葡萄、草莓、胡椒等) 3—花(番茄、黄瓜) 4—叶 5—茎

生物生产机器人的作业对象与传统的工业制造机器人是不同的，因而有必要开发生物生产机器人，以适合生物对象的特殊特性。

2. 生物生产机器人的特征

要使生物生产机器人适合生物体的特征，生物生产机器人的组成和性能就可能与工业机器人不一样。第一，生物体的属性是各种各样且多变的，因而生物生产机器人在处理生物体时必须是灵活的、多功能的。在大多数情况下，当末端执行器与生物体相接触时，柔性处理是必要的。第二，在识别周围环境时，常希望机器人具有一定程度的智能。第三，机器人常在非结构化的、苛刻的和变化的环境下作业。第四，除了那些传统机器人所具备的安全装置之外，当生物生产机器人与操作人员一起作业时，可能还需要一些特殊的安全装置。第五，为使机器人能获得潜在的使用者的认可，它的操作界面必须简单、容易掌握，而且必须有较好的经济效益。

3. 对生物生产机器人的期望

虽然从 20 世纪 70 年代开始，生物生产机器人进行研发，并且取得了可喜的成果，但由于生物生产的多样性，这个领域至今仍被认为是一片热土。

生物生产机器人能弥补季节性劳动力不足和人员安排的困难，降低作业成本。机器人有每天工作多于 8h 的能力，一些机器人还能一天不间断地工作 24h。由于机器人能在任何时间段工作，很多生产系统就可利用这一优点降低非高峰期的使用率。一方面，机器人可用于替代工人完成危险的、脏的作业；另一方面，机器人也适应于对人工出入有较高要求的无菌环境的工作，如许多生物技术。

根据作业的要求，机器人通常安装很多传感器来感知各个方面的信息，对信息进行处理、分析和做出判断，可以执行和完成比人工更精确和更连贯的测量，特别是在像播种、收获和嫁接等单一作业方面，能达到高质量和高一致性，具有较高的市场价值。传感技术采用信号传输信息，对人体没有伤害，并且计算速度和精度高于人类，最后通过微处理器再传递

给机器人执行任务。

农业生产的发展随着农业装备技术的提升而提升，农业机械装备提高了农业的生产效率，提高了农业生产抗御自然灾害的能力，形成了新的机械化农业生产系统。同样随着生物生产机器人的发展，生物生产系统中也相应地会产生适应机器人作业的生产系统。

如某个地区的地形包括平原、丘陵、流域、小山、温室和植物工厂，平原地区适宜种植水稻、小麦和其他谷物，高质量的果树应种植在阳光充沛和排水通畅的丘陵，蘑菇适宜遮阴和高湿度条件，温室和植物工厂内可以种植各种蔬菜和花卉。由于各种作物的生产季节不同，在机器人的使用中采用全球定位系统，进行统一的管理和调配，形成新的生产系统，可提高作业质量和生产率。

生物生产机器人是集工程、生物、社会科学于一体的综合体，它利用许多工程原理和技术来设计生物生产机器人的部件，主要包括机械学、电子学、机器视觉、模糊控制、人工智能和神经网络等。生物生产机器人的研发主要是处理植物、动物、食品和其他生物对象，因此需要对生物科学进行适当的关注和理解。生物生产机器人还要考虑相关的社会科学，如经济学、管理学、市场学和公共接受程度等(见图6-3)。

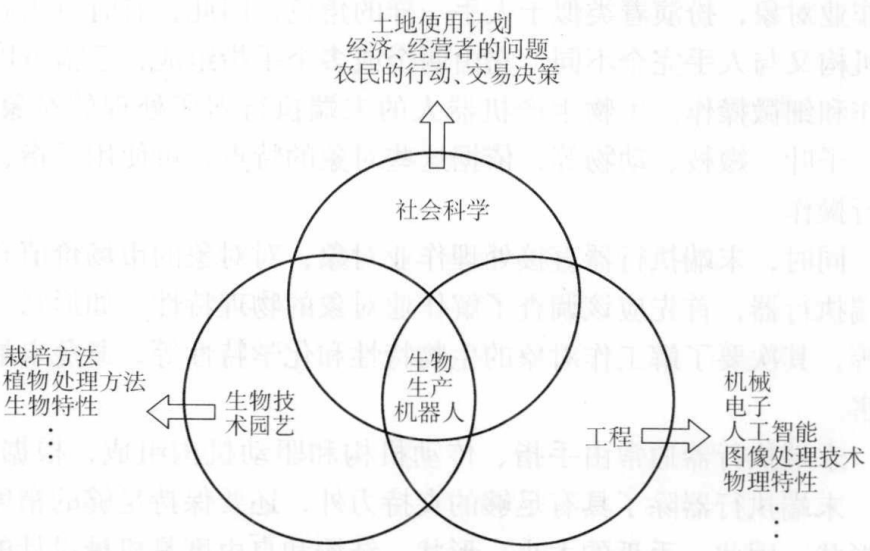



图6-3　生物生产机器人的位置

## 6.2　生物生产机器人的基本组成

生物生产机器人(见图6-4)主要包括机械手、末端执行器、传感器、移动机构、控制机构和执行机构六部分。

1. 机械手

生物生产系统包含的作物种类、种植模式、生长特点等多种多样，对于不同的作物、不同的种植模式，需要设计不同的机械手进行作业，而对于有些作物，传统的种植模式不能适应机器人的作业要求，需要在保证其正常生长的情况下加以改

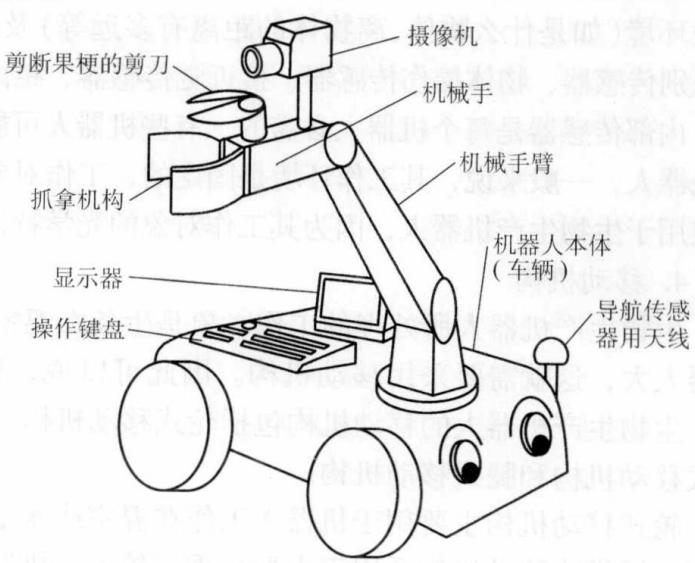



图6-4　一种生物生产机器人

进。因此，日本学者提出了作物培养系统，作物在经过了培养系统培养后，更适合机器人进行作业，进而提高生产率和产品质量。例如为了防止高湿度造成的危害，番茄种在田垄的垂直面上，葡萄种在与人身高相近的水平棚架上。

在封闭结构的生物生产系统中，作业结构固定，进行播种、秧苗移栽、嫁接、挤奶、喷药等作业时，要求机械手能够适应这有限的空间。因此，机械手要有合适的自由度。

生物生产系统的作业对象是多样的，在设计开发机械手时，不仅要考虑作业对象，还要考虑环境条件和其他作业系统。

2. 末端执行器

机器人的末端执行器是安装在机械手前端并直接与作业对象接触的部分。由于它直接接触作业对象，扮演着类似于人手一样的角色，因此，有时也叫做机器人的手或手爪。但是它的机构又与人手完全不同，它由两个或多个手指组成，手指可以“开”与“合”，实现抓取动作和细微操作。生物生产机器人的末端执行器所处理的对象是多种多样的，如果实、秧苗、子叶、嫩枝、动物等，依据这些对象的特点，可使用手指、吸引垫、针、喷嘴、刀片等进行操作。

同时，末端执行器直接处理作业对象，对对象的市场价值有潜在的影响。因此，要开发末端执行器，首先应该调查了解作业对象的物理特性，如形状、大小、外部组织结构、柔软度等，其次要了解工作对象的生物特性和化学特性等，避免末端执行器在作业时对对象造成伤害。

末端执行器通常由手指、传动机构和驱动机构组成，根据抓取对象和工作条件进行设计。末端执行器除了具有足够的夹持力外，还要保持足够的精度，手指应能顺应被抓取对象的形状。因此，手爪的大小、形状、结构和自由度是机械设计的要点，还要根据作业对象的大小、形状、位姿等几何条件，以及重量、硬度、表面质量等物理条件来综合考虑，同时还要考虑手爪与被抓物体接触后产生的约束和自由度等问题。

3. 传感器

机器人传感器按用途分为内部和外部传感器两大类。内部传感器主要用来检测机器人本身状态(如手臂间角度)，多为检测位置和角度的传感器；外部传感器主要用来检测机器人所处环境(如是什么物体,离物体的距离有多远等)及状况(如抓取的物体是否滑落)，包括物体识别传感器、物体探伤传感器、接近觉传感器、距离传感器、力觉传感器、听觉传感器等。

内部传感器是每个机器人必需的，有些机器人可能不需要外部传感器。不需要外部传感器的机器人，一般来说，其工作环境是固定的，工作对象也是标准化和统一化的。外部传感器广泛应用于生物生产机器人，因为其工作对象的光学特性、形态特性和环境条件特殊且多变。

4. 移动机构

生物生产机器人所处理的工作对象是生长在温室或露地的植物，它的作业空间要比工业机器人大，这就需要采用移动机构。因此可以说，移动机构增加了生物生产机器人的自由度。生物生产机器人的移动机构包括轮式移动机构、轨道式移动机构、履带式移动机构、龙门式移动机构和腿式移动机构。

轮式移动机构主要用于机器人工作在温室或露地的两个田垄之间，它的结构简单且易被采用。履带式移动机构适用于大型且重量较大的机器人，并且适用于崎岖不平的路面。轨道式移动机构主要用于既定路径，且容易实现对移动装置的控制。

移动机构将机器人从一个地方移到另一个地方，机器人一般在移动机构暂停时进行工作，但也可在移动机构移动时工作。当机器人在移动机构上工作时，移动的机械手使机器人的重心变化，移动机构应通过保持机器人的稳定性，使机器人底座的倾斜程度最小。当移动机构移动到地面上时，应测量或补偿轮胎和土壤之间的滑动。有些移动机构上必须安装感知系统，以确定其在田间的位置和路径。

5. 控制机构

机器人由计算机通过一个接口进行控制。计算机中最重要的是中央处理器(CPU)，许多其他单元与 CPU 一起工作，如存储器、外部集成电路、输入/输出端口。这些元件通过地址总线、数据总线和控制总线与 CPU 相连，从而 CPU 能发送和接收数据。

6. 执行机构

执行机构就是按照电信号的指令，将电动、液压和气压等各种能量转换成旋转运动、直线运动等机械能的机构。

机器人的组成(机械手、末端执行器和移动装置)都与执行机构相关联。用于机器人的执行机构需要满足以下条件：

1）能够承受反复起动、停止、正反转等操作。

2）加速性和分辨率好。

3）小型、轻便、刚度好。

4）可靠性、维护性好。

生物生产机器人多在野外作业，所以执行机构除满足上述条件外，还应适应外界环境的变化，如风沙、阴天等。此外，对于自走式机器人，还要具有一定的安全性，执行机构的驱动力不能太高，其动力源主要有发动机、蓄电池及电缆供电；对于温室内作业的机器人，不能排出废气而影响作物的生长，多采用蓄电池及电缆供电的方式。

执行机构主要分为三类：电动执行机构、液压执行机构和气动执行机构。

电动执行机构主要由电力驱动，因而比较容易控制且结构紧凑。如今，直流伺服电动机、交流伺服电动机和步进电动机广泛应用于生物生产机器人。伺服电动机由闭环系统控制，而步进电动机则由开环系统控制，步进电动机的转角与发动机驱动器的脉冲数成正比。

此外，形状记忆合金有时也会用作机器人末端执行器的执行机构。形状记忆合金具有小型、轻便的优点，可用于生物生产机器人。这种执行机构是通过电流加热，然后通过低温或其他方法冷却来获得运动。但是，这种执行机构的位移和输出功率不大，因而它的反应速度也比其他执行机构慢。

液压执行机构是将液能转换成机械能，输出功率大，能使机器人处理重物。液压缸和液压马达可以进行直线和旋转运动。机器人采用这种执行机构，需要液压泵、泵的动力供应系统、油箱和安全阀等，当然连接执行机构和设备的管道也是必不可少的。

气动执行机构是将压缩空气的能量转变为机械能的机构，可以实现往复运动、摆动、旋转运动或夹持动作。气动执行机构的优点是便于处理简单、轻便的物体。它将空气压力能转换成机械能，但很难实现对机械手、末端执行器或气动泵、管道和阀门等设备的精确定位。气动执行机构可分为气缸、气压马达和摆动马达三类。与液压执行机构相比，气动执行机构适合小型、轻便的物体。

## 6.3 生物生产机器人的应用实例

### 6.3.1 番茄收获机器人

机器人在进入生物生产系统领域的早期，是从果实收获开始的，但由于果实多种多样、环境复杂等因素，收获机器人至今仍是研究的热点。番茄是人们常见的蔬菜，其果实呈红色，与绿色的背景相差大，用彩色摄像机就可以辨认。

1. 栽培方式

设施农业中的番茄通常种植在垄上，番茄呈垂直生长，果实暴露在外侧，有部分叶子的遮挡。传统栽培和高架栽培的番茄果实与果梗的连接方式(见图6-5)不同，可以采用不同的采摘方式。传统栽培中在果梗处有结点，通过折断或强力拉扯都可使果实脱落。

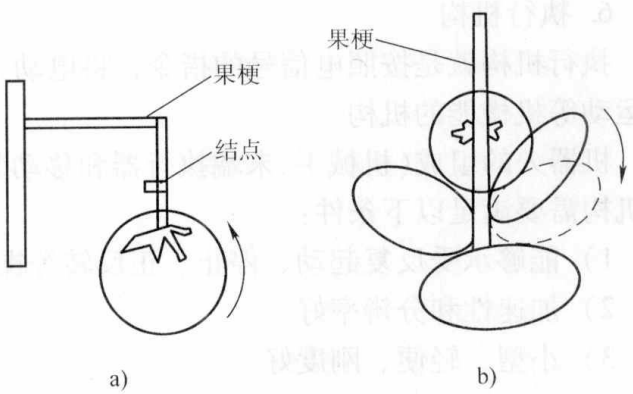



图6-5 果实摘取方式

a) 传统栽培方式 b) 高架栽培方式

2. 龙门式5自由度番茄收获机器人

日本农林水产省农业研究中心根据地块的大小，在田埂上分别铺上铁轨，将龙门车架横跨在田地上方，沿铁轨移动。收获机器人安装在龙门车架上进行收获。

(1) 机械手和末端执行器(见图6-6) 该机器人属关节型机器人，在手腕的法兰盘处，安装了拥有视觉部和刀具部的末端执行器，采用半圆环状的刀片收获果实。

(2) 视觉系统 该收获机器人的末端执行器上安装有小型电视摄像机和中心波长为680nm、半值幅为10nm的光波过滤器，与闪光灯组成视觉系统。果实位置的检测方法如下：

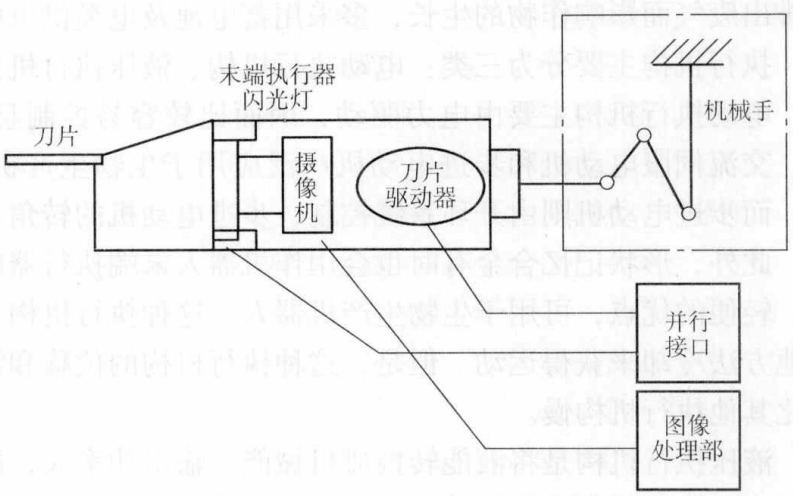



图6-6 龙门式5自由度收获机器人的机械手和末端执行器

① 从输入的图像数据中计算出果实图像的重心，沿着重心的方向，机械手向最近的果实移动。

② 采用三角测量法，通过机械手移动时，各关节的移动量测定机械手到果实之间的大概距离。

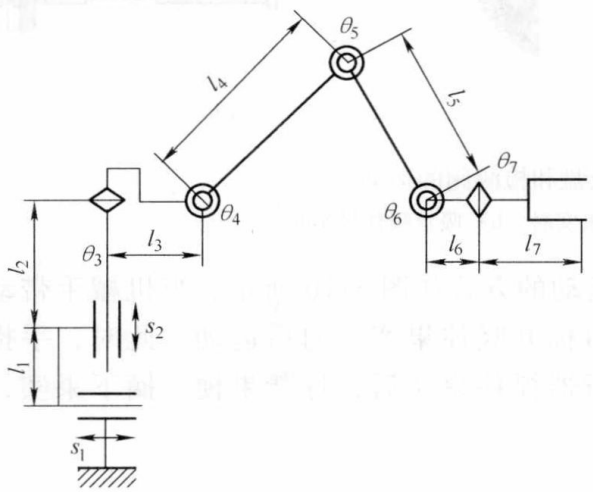
③ 以这个距离信息为基础，使末端执行器接近所要摘的番茄。

④ 以番茄的直径为收获条件，判断图像中的番茄直径是否达到或超过某值，若满足条件就将其摘下。

3. 7 自由度番茄收获机器人

日本根据番茄传统的栽培模式，研究了5 自由度的番茄收获机器人，但实际收获效果不是很理想。在此基础上，又研制了7 自由度的番茄收获机器人。

（1）机械手　将5 自由度关节型机械手安装在上下、前后能够移动的直动关节座上，既可以摘取高处的果实，又可以从下向上接近果实，形成7 自由度机械手(见图6-7)。这种机械手适合传统生产方式的番茄收获。




$l_1$ =0mm　　$s_1$ = 0～200mm
$l_2$ =400mm　　$s_2$ = 0～300mm
$l_3$ =120mm　　$\theta_3$ = −150°～150°
$l_4$ =250mm　　$\theta_4$ = −30°～100°
$l_5$ =200mm　　$\theta_5$ = −120°～0°
$l_6$ =65mm　　$\theta_6$ = −110°～110°
$l_7$ =275mm　　$\theta_7$ = −180°～180°

图6-7　7 自由度机械手

（2）末端执行器　末端执行器(见图6-8)由1 个吸盘和2 个手指组成，吸盘在手爪的中间。10mm 厚的吸盘首先吸住果实，防止果实受伤。手指的长度、宽度和厚度分别为155mm、45mm 和10mm，手指的抓取力可以在0～33. 3N 之间进行调节，吸盘由直流电动机和齿轮驱动，速度可以达到38mm/s。

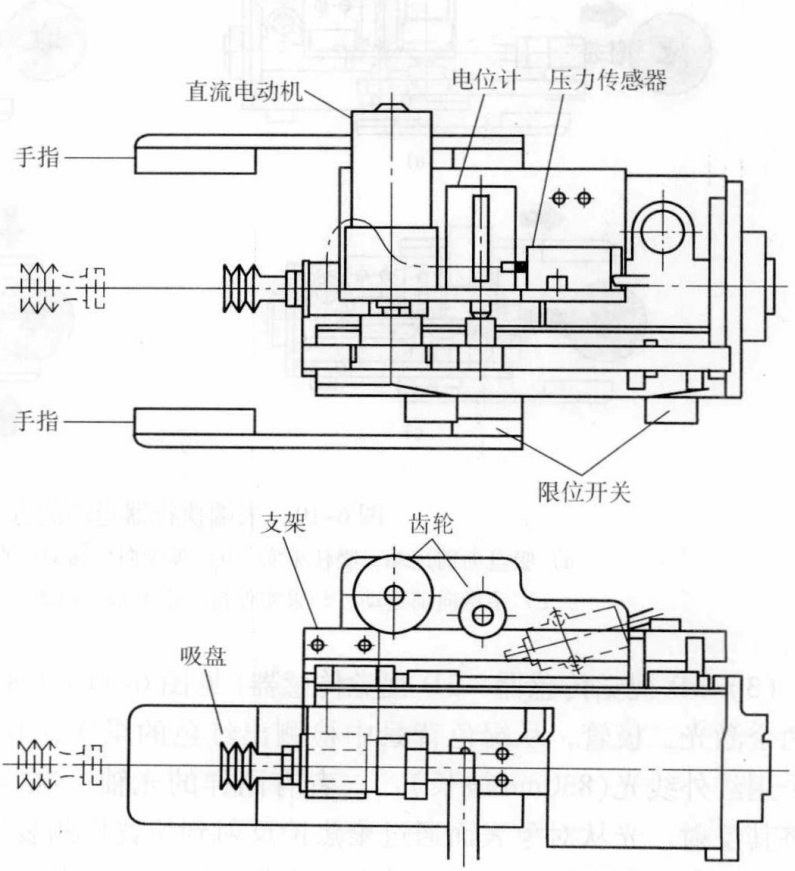



图6-8　末端执行器

1）吸盘的运动。吸盘的后面连接一个检测阀，真空泵产生一定的真空压力，使吸盘吸住果实，吸力为0～10N。压力传感器与检测阀相连，通过管路检测空气压力。检测阀位于吸盘和真空泵之间，通过空气的流动检测出

气体压力。当吸盘没有吸住果实时，空气从吸盘通过检测阀流向真空泵；当吸盘吸住果实时，气流停止流动，检测阀关闭，此时，吸盘内的气体小于真空泵的气压(见图 6-9)。

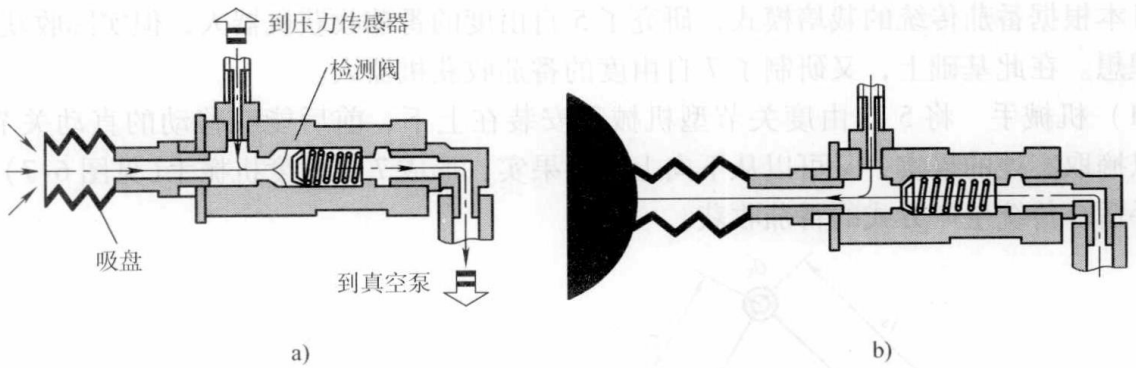



图 6-9　吸盘和检测阀的运动

a）吸盘没有吸住果实时　b）吸盘吸住果实时

2）末端执行器的运动。末端执行器运动的方式如图 6-10 所示。当机械手带动末端执行器接近目标时，吸盘首先伸出，接近目标并吸住果实，向后运动。此时，手指以与吸盘相同的速度伸出，夹住果实；末端执行器抓住果实后，拧断果梗，摘下果实，将果实放在盘中。

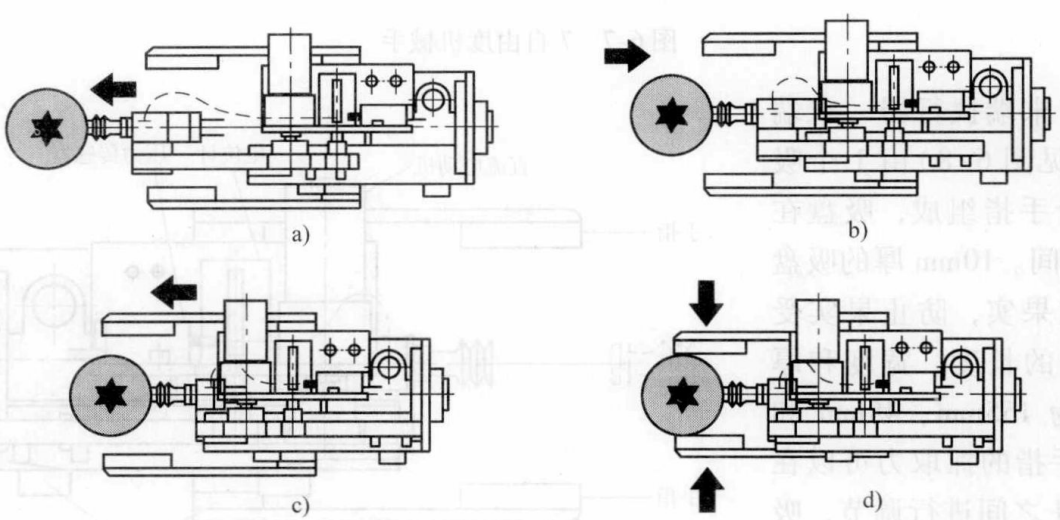



图 6-10　末端执行器运动的方式

a）吸盘向前运动，吸住果实　b）吸盘向后移动，直到压力达到极限点

c）手指向前运动，与果实保持一定的垂直距离　d）手指抓住果实

(3) 3D 视觉传感器　3D 视觉传感器(见图 6-11)用来检测对象的三维形态。该传感器有两个激光二极管，从绿色背景中检测出红色的果实，其中一个用红光(670nm 波长)，另一个用红外线光(830nm 波长)，二者有同样的光轴。这些光被以不同频率发射，由一面镜子将其反射。光从对象表面通过聚焦镜反射到位置检测装置，位置检测装置有两个极，反射回来的光点位置不同，两个极的电流比就不同，由这些电流的比就可以计算出对象的距离。对象在垂直方向上可通过两个镜子完成扫描，两个镜子分别由步进电动机驱动，在水平方向

上的运动可通过架子的旋转来完成，由此获得对象的三维图像(见图6-12)。

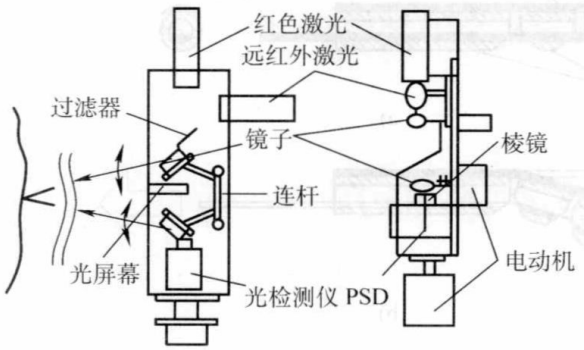



图6-11　3D视觉传感器

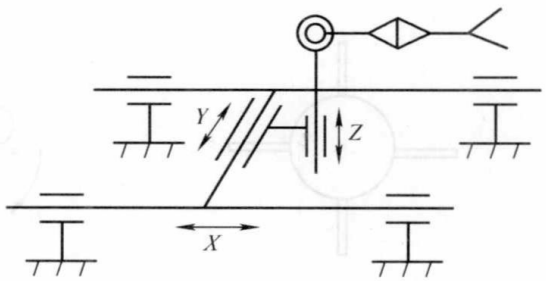



图6-12　5自由度直角坐标式机械手

4. 高架栽培番茄采摘机械手

(1) 机械手　在单串高架番茄生产系统中，果实垂落在垂直面上，果实周围的障碍物少，可采用如图6-12所示5自由度直角坐标式机械手进行采摘，控制简单，定位精度高。

(2) 手爪　采用一种带有吸盘的手爪(见图6-13)，手爪有4个具有弹性的手指和1个吸盘，没有切刀。4个手指均匀分布在吸盘的周围(见图6-14)，相对两个手指的距离为60mm。每个手指有4个关节(见图6-15)，关节是由橡胶制造的，橡胶关节固定在一个支架上。一条缆绳固定在关节的内侧，可以拉动关节。每个手指的外径、厚度和长度分别为10mm、2mm和60mm。当缆绳不用力时，手指张开；当缆绳受力拉紧后，带动关节弯曲，形成不同的弯曲角度，从而使手爪形成不同的内部容积，适合收获不同形状的果实。

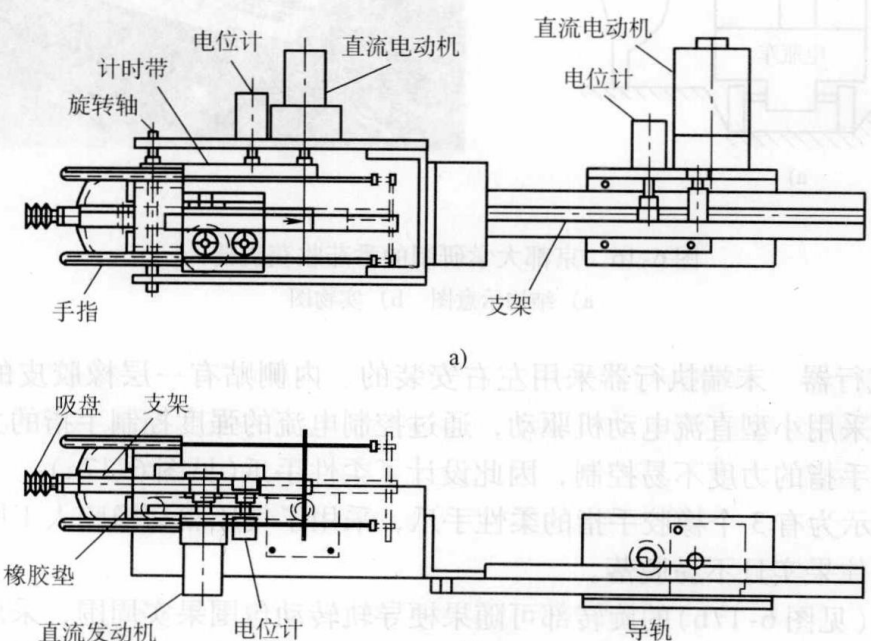



图6-13　手爪

a) 俯视图　b) 主视图

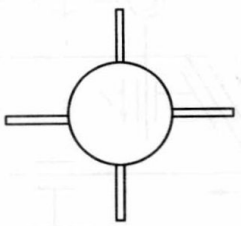


图 6-14 手指的分布

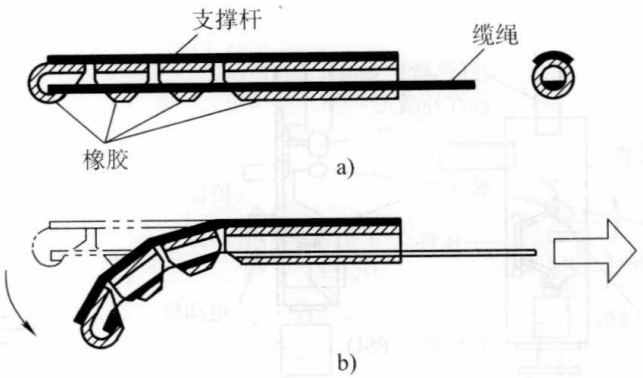
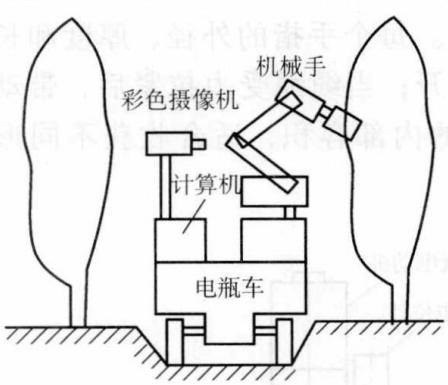



图 6-15 单个手指的结构
a）运动前 b）运动后

5. 日本京都大学研制的番茄收获机器人

日本京都大学针对番茄的垄作栽培研制了番茄收获机器人(见图 6-16)，主要包括电瓶车、5 自由度关节型机械手、末端执行器、摄像机和微型计算机。电瓶车靠微型计算机控制行走和停止，摄像机检测出果实的位置后，机械手和末端执行器进行收获。



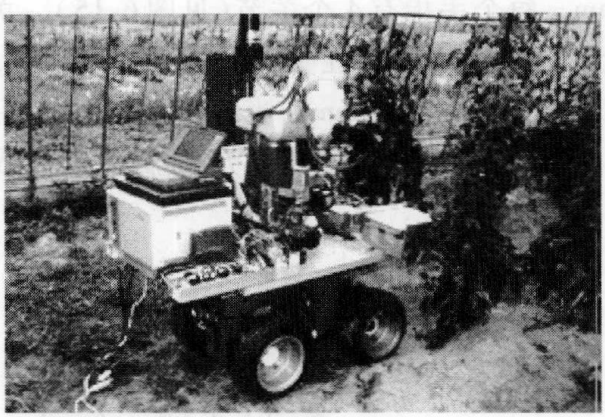




图 6-16 京都大学研制的番茄收获机器人
a）结构示意图 b）实物图

(1) 末端执行器 末端执行器采用左右安装的、内侧贴有一层橡胶皮的弯曲手指，手指的张开和闭合采用小型直流电动机驱动，通过控制电流的强度控制手指的力度，并通过拉扯摘下果实。但手指的力度不易控制，因此设计了柔性手爪(见图 6-17a)。

图 6-17a 所示为有 3 个橡胶手指的柔性手爪，采用了气压驱动橡胶人工肌肉作为执行机构，能柔性地抓住果实且不易脱落。

旋转式手爪(见图 6-17b)的旋转部可随果梗导轨转动包围果实周围，采用直流电动机控制旋转部，使果实大体能滑进旋转部的中间位置，来收获果实。该手爪能够有效地修正机械手的误差，利用果梗导轨将果实滑落手爪的内侧，通过旋转，果梗沿导轨滑到 $A$ 处，靠旋转转矩折断果梗的结点摘取果实。若这个旋转转矩不能摘取果实，则同一电动机驱动切枝刀片切断果梗，使果实脱落。

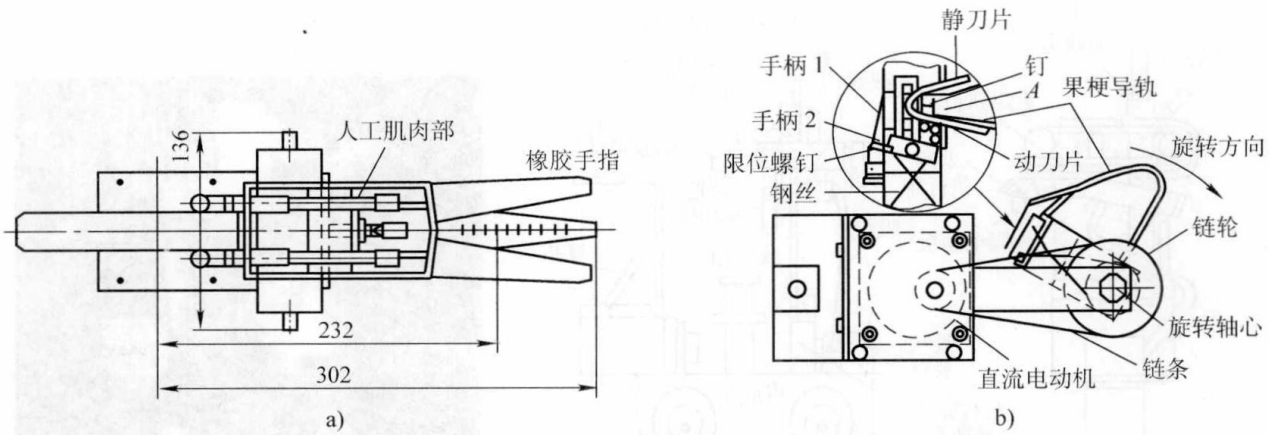



图6-17　手爪结构

a）柔性手爪　b）旋转式手爪

（2）收获作业　番茄收获机器人的收获流程如图6-18所示。电瓶车移动时，机械手处于易移动、不碰到周围作物的状态。电瓶车停止后，摄像机输入图像，利用两眼立体视觉器检测红色果实的位置，将此位置变换成机械手坐标系的位置，判断是否在收获范围内。若可以收获，判断是否在此位置收获第1个果实。若是，此位置为第1个点，则转$C$处计算摘果实要通过的第2点坐标，然后机械手通过第2点靠近并拧断果梗。计算第2点到第1点的坐标距离，手腕向下倾斜，手指张开，将果实放入收集筐中。

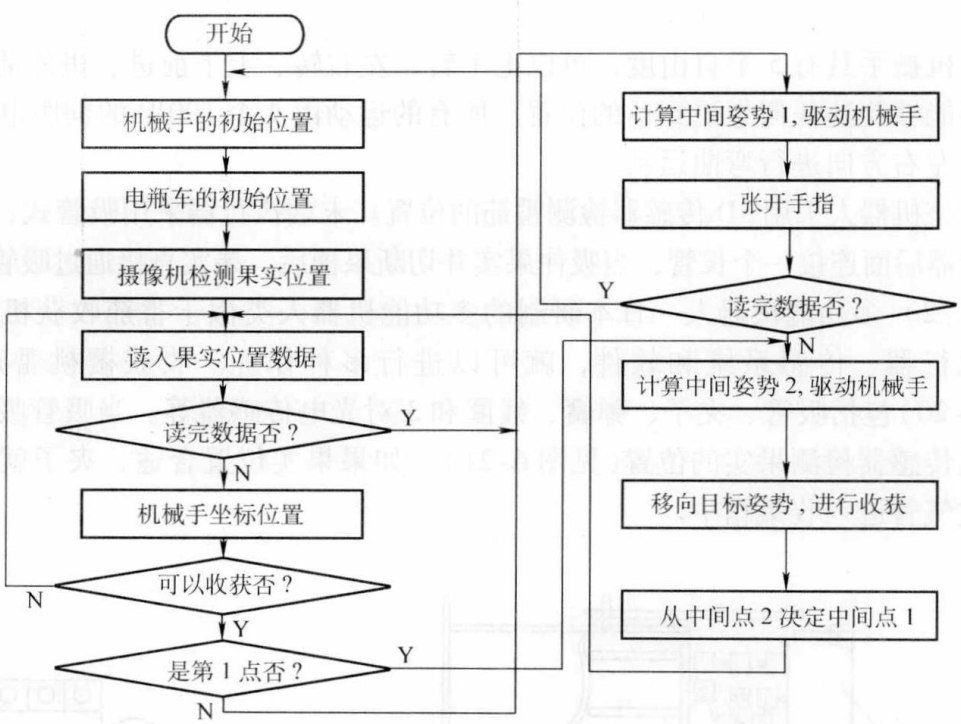



图6-18　番茄收获流程图

6. 樱桃番茄收获机器人

樱桃番茄是最近几年新开发的一种新产品，一个果柄上可以结多个果实，并且有的果实已经成熟，而有的未成熟，因此，收获时需要进行选择。此外，收获时必须带有果梗，才能拥有较高的商品价值。

（1）极坐标收获机器人　极坐标樱桃番茄收获机器人（见图6-19）可以进行选择性收获，机器人主要包括小电瓶车、一个机械手、末端执行器、3D视觉传感器和控制系统。

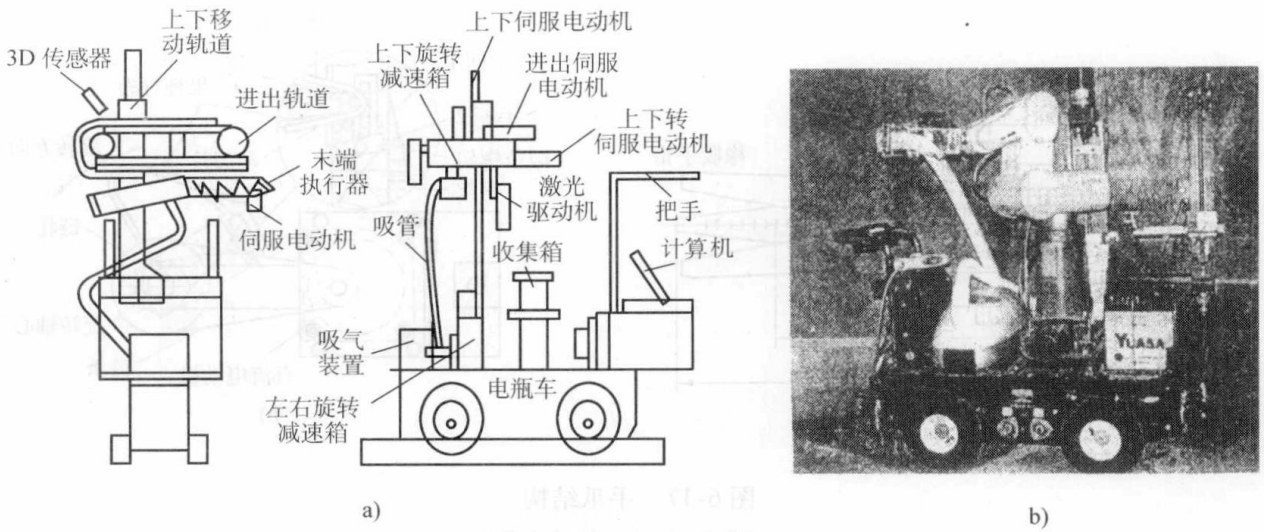



图 6-19 樱桃番茄收获机器人
a）结构示意图 b）实物图

机械手具有 5 个自由度，可以上下转、左右转、上下前进、里外前进和弯曲，使末端执行器能够到达任何想要到达的位置。所有的运动由 4 个 100W 的伺服电动机驱动，机械手可以在左右方向进行弯曲运动。

该机器人采用 3D 传感器检测番茄的位置。末端执行器采用吸管式，可以吸住果实。末端执行器后面连接一个长管，当吸住果实并切断果梗后，果实直接通过吸管内部输送到收集箱。

（2）多功能机器人 日本研制的多功能机器人类似于番茄收获机器人，只要更换其末端执行器、传感系统和软件，就可以进行多种作业。收获樱桃番茄的末端执行器（见图 6-20）包括吸管、夹子、弹簧、线圈和 3 对光电传感器等。当吸管吸住果实后，通过 3 对光电传感器检测果实的位置（见图 6-21）。如果果实位置合适，夹子就将果梗剪断，将果实通过气管进入收集箱中。

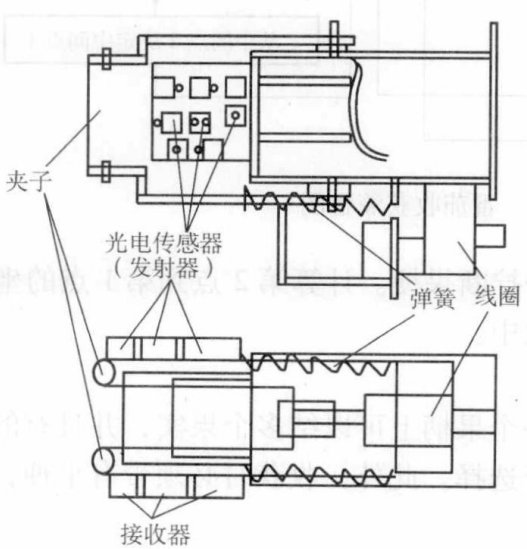



图 6-20 收获樱桃番茄的末端执行器

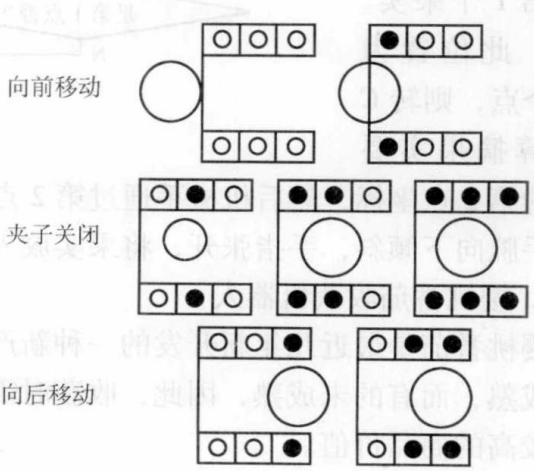



图 6-21 光电传感器检测果实的位置

该机器人采用彩色摄像机，分辨率510(H)×490(V)，摄像机在水平和垂直方向上移动，可得到果实的两个图像。将彩色图像转换为灰度图像，从而获得果实。

机器人在收获时(见图6-22)，首先获得果实的立体图像，经过与R、G、B信号相比，进行筛选、降低噪声、二值化处理等，得到果实的数量，同样也得到果梗的位置。果实的三维位置可以通过$X$和$Z$的二维坐标以及$Y$坐标来确定，$Y$坐标代表摄像机与果实的距离或深度。判定果实的可接近程度后，末端执行器首先移向果串中左上方的果实，其位置是用$X$和$Z$来确定，$Y$值是果串的中心位置距离。如果接触不到果实，末端执行器沿$Y$方向向前移动50mm再收获。

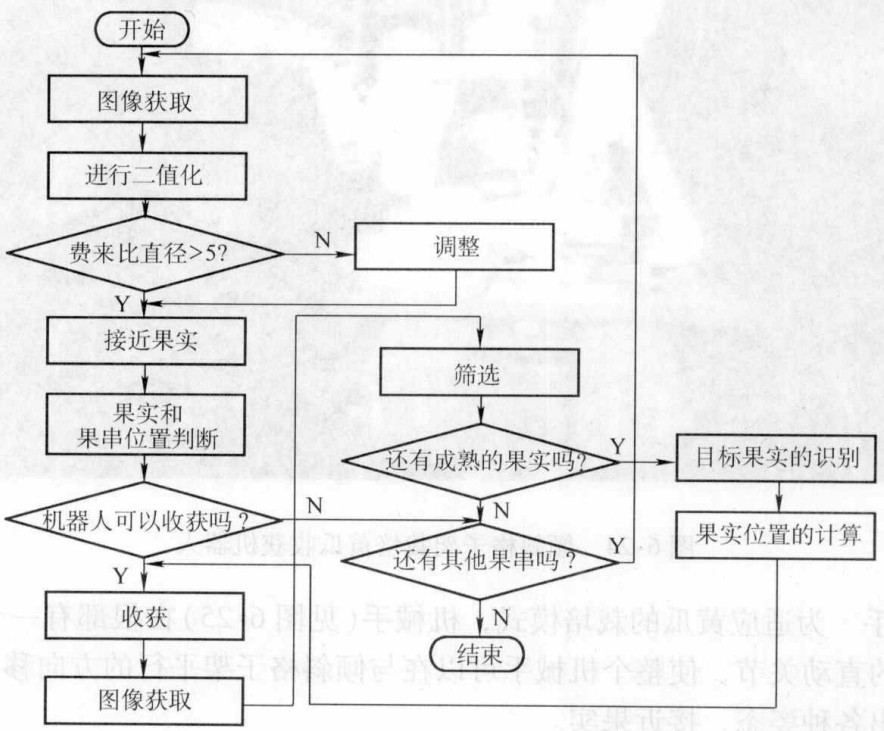



图6-22　樱桃番茄收获机器人的作业流程图

## 6.3.2　黄瓜收获机器人

黄瓜是常见的蔬菜，设施农业中的种植面积非常大，并且生长快，成熟后易肥大、收获最佳期短、果实不定期成熟。因此，急需黄瓜收获机器人。

1. 栽培方式

设施栽培中常见的黄瓜栽培方式是将黄瓜用细绳垂直向上牵引生长，果实与叶子茎秆混杂在一起，大的叶子经常遮住黄瓜，不利于人工或机器人收获。日本开发了新型的栽培方式——倾斜格子架式培养系统(见图6-23)，黄瓜和茎叶分开，使机器人容易检测出黄瓜的位置，完成收获。倾斜格子架与水平面所成夹角越小，果实与茎叶的分离程度将越明显，但当果实越接近地面时，作业空间越小，越不利于机器人收获。因此，倾斜格子

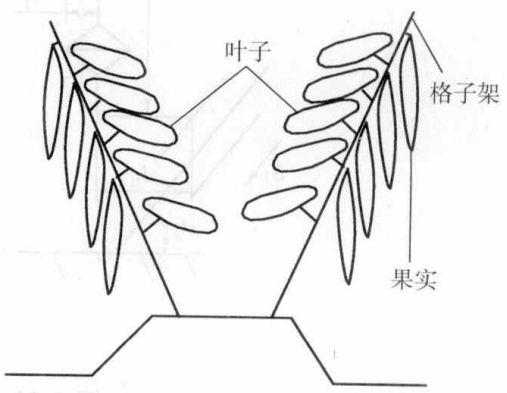



图6-23　黄瓜的倾斜格子架培养系统

架要有一个适宜的角度。

2. 倾斜格子架栽培黄瓜收获机器人

日本根据黄瓜的倾斜格子架栽培，研制出了黄瓜收获机器人(见图 6-24)，包括机械手、末端执行器、视觉系统和移动机构。

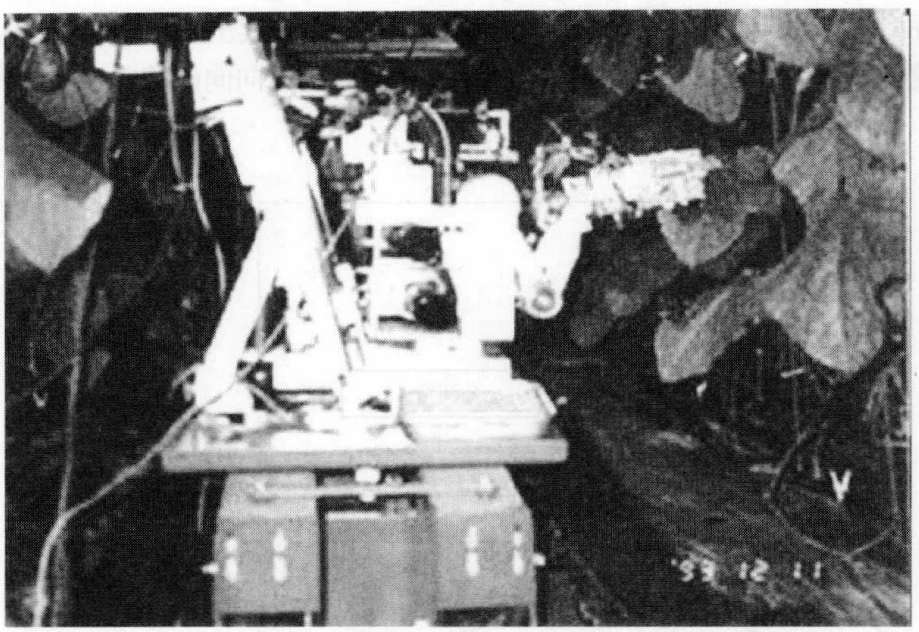


图 6-24 倾斜格子架栽培黄瓜收获机器人

(1) 机械手 为适应黄瓜的栽培模式，机械手(见图 6-25)在根部有一个与黄瓜倾斜格子架角度相同的直动关节，使整个机械手可以在与倾斜格子架平行的方向移动，另外 5 个旋转关节可以做出各种姿态，接近果实。

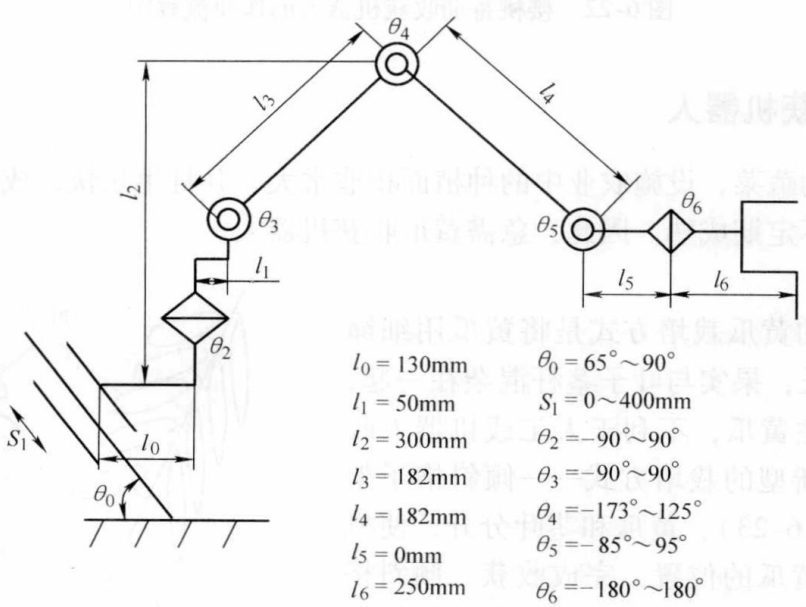



图 6-25 黄瓜收获机器人的机械手

（2）末端执行器　成熟的黄瓜遍身带刺，并且在顶部带有黄花，这些刺和黄花是衡量黄瓜质量好坏的标准之一。因此收获时，必须尽量减少对黄瓜表面的损伤，要轻柔地抓住并切断果梗。

该机器人的末端执行器(见图6-26)包括1个手爪、1个检测器和1个剪刀。手指先用6N的力在离果实顶部3cm的位置抓住果实，然后检测器和剪刀向上滑动，并且保持检测器与果实一直接触，直到电位计检测到果实与果梗之间的连接点，完成检测，安装在检测器下方的切刀用12N的力将果梗切断。

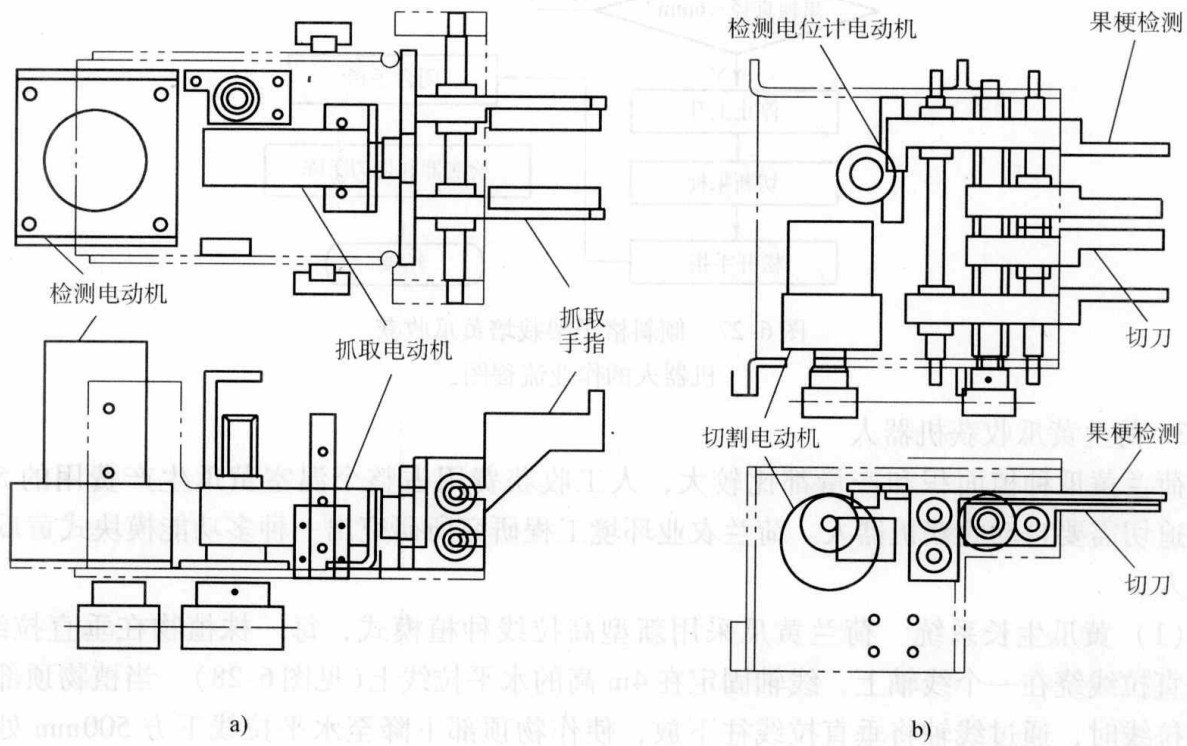



图6-26　黄瓜收获机器人的末端执行器
a）手爪部分　b）检测和切刀部分

（3）视觉系统　由于黄瓜果实与茎叶的颜色相似，该机器人采用远红外传感器检测黄瓜的距离，并利用黄瓜与茎叶不同的光反射波长进行检测。这里采用带有550nm和850nm过滤器的黑白摄像机，利用两个不同的过滤器得到两个图像，按下述公式计算

$$R=\frac{850\text{nm 的灰度值}}{550\text{nm 的灰度值}+850\text{nm 的灰度值}}$$

由于果实在850nm的反射强，使果实图像的灰度值增大，而其他对象在850nm的反射比较弱，这样可以很容易区分有阴影果实的阈值。通过比较两个果实的$R$值，就可以判断哪个果实的距离更近。

（4）作业流程　该收获机器人收获流程框图如图6-27所示。机器人采用三维视觉传感器，获取果实的位置。张开手爪抓住果实，检测和切断机构上升，直至检测出果梗的位置，判断出果梗的直径是否小于6mm。若小于6mm，检测机构停止上升，切断机构闭合，切断果梗，把持机构闭合，检测切断机构下降，结束作业。若果梗直径大于6mm，重新检测果梗的位置。

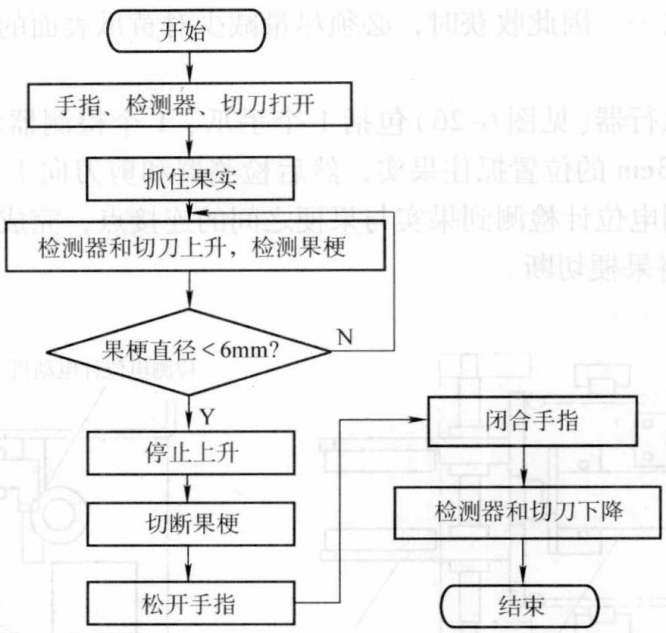



图 6-27 倾斜格子架栽培黄瓜收获机器人的作业流程图

3. 荷兰黄瓜收获机器人

荷兰黄瓜种植面积和产量都比较大，人工收获费用占整个温室黄瓜生产费用的 50%，因此迫切需要自动收获机器人。荷兰农业环境工程研究所研究出一种多功能模块式黄瓜收获机器人。

（1）黄瓜生长系统 荷兰黄瓜采用新型高拉线种植模式，每一株植物在垂直拉线上，该垂直拉线绕在一个线轴上，线轴固定在 4m 高的水平拉线上（见图 6-28）。当植物顶部到达水平拉线时，通过线轴将垂直拉线往下放，使作物顶部下降至水平拉线下方 500mm 处。在降低植物高度之前，应将植物底部的叶子摘掉。

（2）自走式黄瓜收获机器人 自走式黄瓜收获机器人（见图 6-29）由 4 部分组成：行走车、机械手、视觉系统和末端执行器。

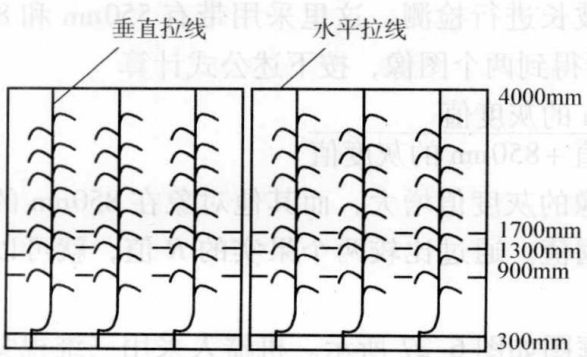



图 6-28 新型高拉线黄瓜种植模式

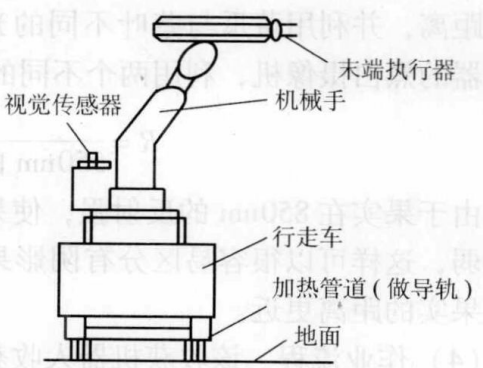



图 6-29 自走式黄瓜收获机器人

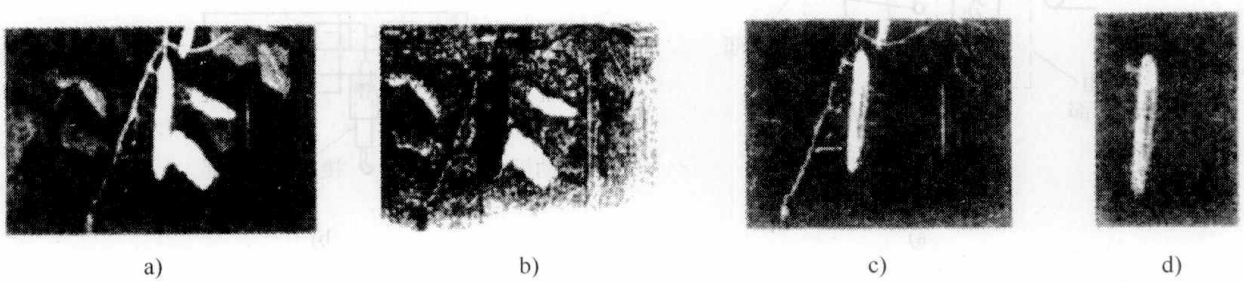
机器人行走车主要用于机械手和末端执行器的定位，通过视觉系统的信号控制机器人的行走、机械手的动作、末端执行器的抓取和切割动作。机器人的行走速度为 0.8m/s，每前

进0.7m就停下来进行收获作业。

该机械手有7自由度，主体采用三菱(Mitsubishi)RV-E2型6自由度机械手，在此基础上增加了一个直动关节，使RV-E2型机械手可以沿着行走方向往复运动。

视觉系统由两台摄像机和图像处理系统组成。在采用机器人收获时，能对作业区域内的黄瓜进行探测，评价果实的成熟程度，找出果实的精确位置。

黄瓜的果实与叶子的颜色相近，通过对黄瓜果实与叶子的反射性及含水率的大量研究得知，可采用近红外线(NIR)探测出黄瓜果实。黄瓜的图像处理系统包括两台数字式摄像机、滤光片、透镜、反射镜和棱镜，可以将果实同周围背景物区分开，从而辨认出果实并探测出其位置(见图6-30)。



a)　b)　c)　d)

图6-30　不同处理条件下的黄瓜图像

a）经过处理的黄瓜图像　b）采用干涉过滤后的黄瓜灰度图

c）运用阈值移出果实背景物的一些信号　d）除掉周围背景物，只保留果实

黄瓜在植物上方的分布是随机的，不定期成熟，因此在收获前必须探测出每一根黄瓜的位置及成熟程度。在清晰条件下(收获前摘掉叶子)，通过测量黄瓜的直径和长度，并依据其体积估算果实的成熟度。

在末端执行器上安装了一个手指大小的微型摄像机，用于快速和精确定位。为了精确测定在切割装置两个电极之间的果梗的位置，还采用了一个局部传感器，可以在0.3m范围内测量果实位置。

末端执行器由手爪和切割器两部分组成。手爪的力度适中，既保证果实在机械手快速运动过程中不掉落，又不损伤黄瓜果实的外表面。切割器采用电极切割法，产生高温(大约1000℃)将果梗烧断，形成一个封闭的疤口(火烧)，可以减少果实水分的流失，减慢果实的熟化程度。

机器人的采摘过程分4步进行：找到果实果梗精确的切割位置；将果梗放到切割器的两个电极之间；抓取果实；切割果梗。该机器人的作业速度为每根黄瓜10s。

4. 日本东京大学研制的黄瓜收获机器人手爪

日本研制的黄瓜收获机器人的另一种手爪（见图6-31a)，包括夹钳部(见图6-31b)、传感器和刀片部(见图6-31c)和自由旋转部(见图6-31d)。夹钳部由电动机、传感器、手指和微型开关组成，手指内侧是橡胶层，避免伤害果实。传感器和刀片部包括电动机、夹杆、刀片、刀片限位开关和果梗检测开关，实现对果梗的检测和切断。自由旋转部包括电动机、轴、滑动轴承、导向轴、支杆，可以调整夹杆的滑动。作业过程是：手爪内部的接触传感器检测出黄瓜，夹钳部用约70N的力夹住黄瓜身部，传感器和刀片部的夹杆用约3N的力夹住

黄瓜头部；夹杆由自由旋转部驱动，可以沿黄瓜长度方向上下滑动，也可以前后、左右转动，夹杆沿黄瓜轴向滑动，可以检测出黄瓜的直径。当黄瓜的直径突然变小时，就确定是黄瓜蒂部，微型开关检测出其精确位置，刀片切断黄瓜果梗。

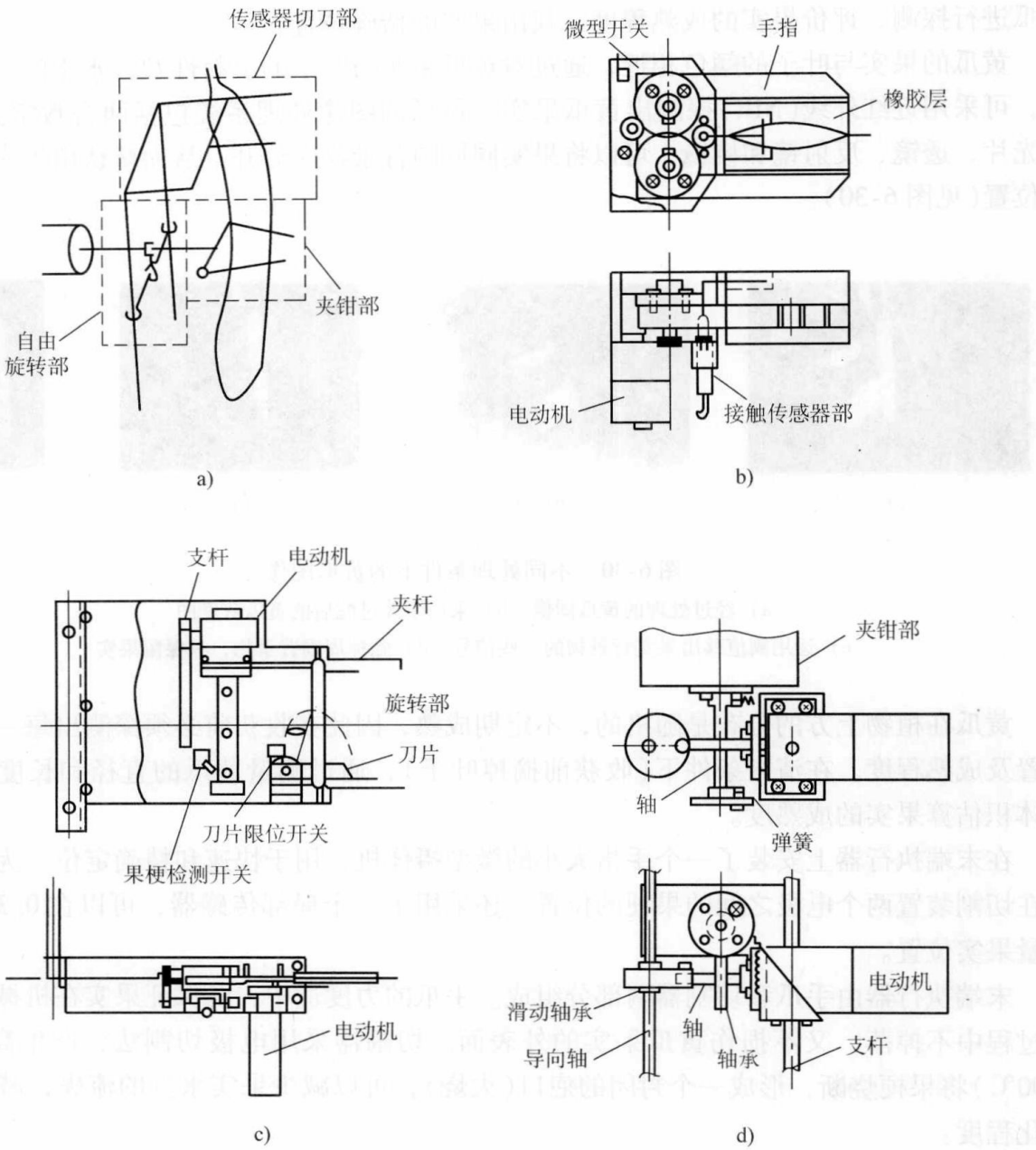



图 6-31 日本研制的黄瓜收获机器人手爪

a）手爪构成 b）夹钳部 c）传感器和刀片部 d）自由旋转部

5. 黄瓜的等级级别

为提高黄瓜的商品价值，有必要对黄瓜进行分级。黄瓜属于长形瓜类，人工分级时主要以瓜的均匀性、长度、直径等作为评价指标。日本经济农业协同联合会制订出了黄瓜的等级标准，黄瓜的品质等级分为 A、B、C 级 3 个等级：A 级形状匀称，弯度不超过 1.5cm，色泽和鲜度品质良好，无病虫害；B 级形状较为均匀，弯度不超过 3cm，鲜度品质良好，无病虫害；C 级畸形，弯度超过 3cm，过熟，有疤痕。黄瓜的等级按质量分为 2L、L、M 和 S，

重量分别为130g、110g、95g和80g左右。

等级判别硬件装置(见图6-32)包括CCD摄像机、图像采集卡、计算机、日光灯型的照明装置和监视器。

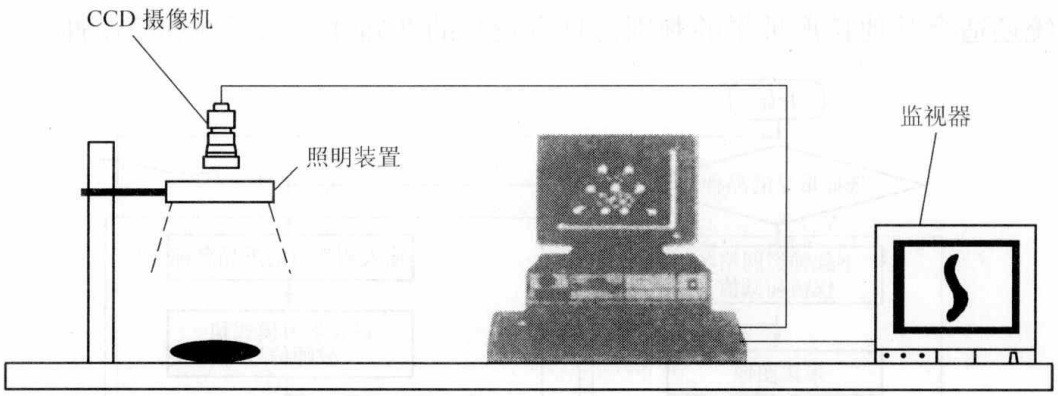



图6-32　黄瓜等级判别装置

根据黄瓜特征(见图6-33)的二值图像，提取粗细、长度和弯曲度3个方面的参数。瓜果根部到顶部的距离为$H$，从根部开始分别在$0.1H$、$0.25H$、$0.5H$、$0.75H$和$0.9H$相应的位置，找出果实的中心点$A$、$B$、$C$、$D$和$E$，连接各点得到$l_1$、$l_2$、$l_3$和$l_4$。再从根部开始，在$0.2H$、$0.3H$、$0.7H$、$0.8H$的位置分别作$l_1$、$l_2$、$l_3$和$l_4$的垂线，检出果实的宽度$W_1$、$W_2$、$W_3$和$W_4$。$C$点的宽度$W$按水平方向检出，点$A$和$E$之间的距离定义为$L$。由此可得出定义形状特征的函数：

$$F_1=\frac{W_1}{W};\ F_2=\frac{W_2}{W};\ F_3=\frac{W_3}{W};\ F_4=\frac{W_4}{W};\ F_5=\frac{L}{l_1+l_2+l_3+l_4};\ F_6=\frac{W}{l_1+l_2+l_3+l_4}$$

式中　$F_1 \sim F_4$——果实均匀性的特征参数；

$F_5$——果实的弯曲特征参数；

$F_6$——果实的粗细特征参数。

黄瓜的形状特征采用前向多层神经网络(见图6-34)进行判断。神经网络包括输入层、隐含层和输出层，输入层为与6个参数相对应的6个输入单元，输出层为2个输出单元(用于表示3种等级状态$A$、$B$、$C$)，隐含层的单元数要根据训练状况决定。

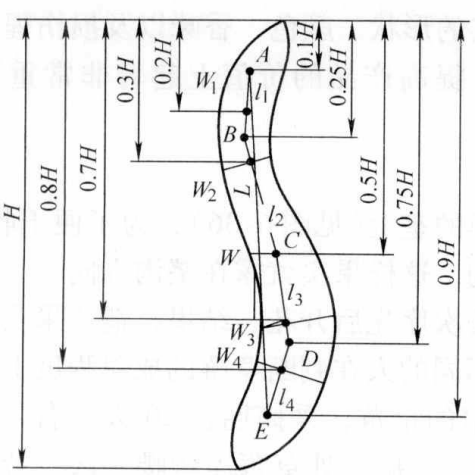



图6-33　黄瓜形状特征的提取

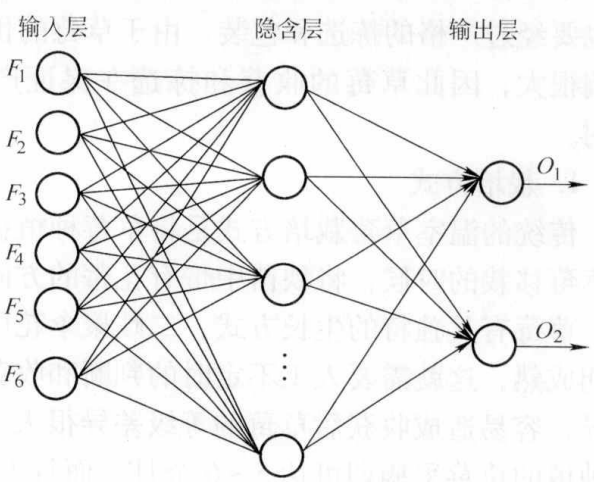



图6-34　神经网络结构

长形瓜果等级判别程序(见图 6-35)从功能上可分为学习部分和判别部分。学习部分包括图像处理、特征抽出和网络训练；判别部分包括图像处理、特征抽出、特征判断和结果显示。通过计算机上的屏幕和键盘，以人机对话的方式引导挑选机器人进行学习训练或挑选判别状态。

该系统还适合其他长形瓜果的判别，具有较高的准确性、通用性和简便性。

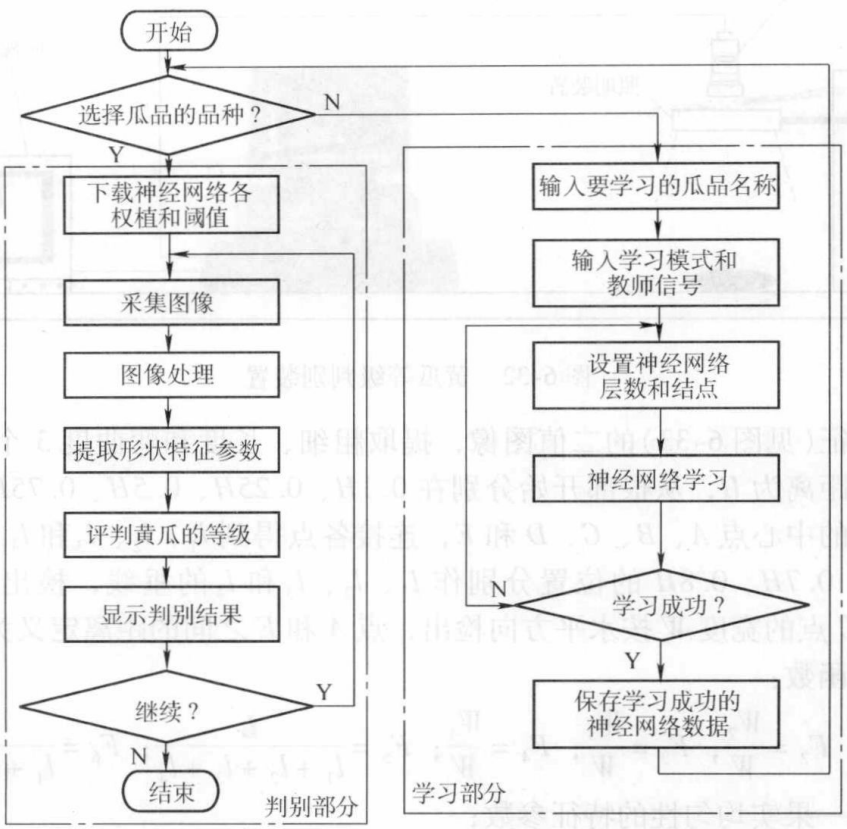



图 6-35 长形瓜果等级判别程序框图

## 6.3.3 草莓收获和拣选机器人

草莓作为高级营养水果，深受广大消费者的青睐。和其他水果、蔬菜一样，草莓在上市前也要经过严格的拣选和包装。由于草莓的价格受果实的形状、颜色、香味以及损伤程度的影响很大，因此草莓的收获和拣选在保证产地信誉、提高产品的价值上起着非常重要的作用。

1. 栽培方式

传统的温室草莓栽培方式是将草莓种植在盖有地膜的垄上(见图 6-36)，为了便于收获，在草莓移栽的时候，将秧苗中带有花蒂的方向朝向垄沟，这样果实就露在垄沟方向。

草莓有其独特的生长方式，二歧聚伞花序使草莓按次序先后开花、结果，造成果实的不定期成熟，这就需要人工不定时的判断和收获。由于不同的人在判断草莓的成熟程度上存在差异，容易造成收获后草莓的等级差异很大。露地栽培的草莓，采摘期达 20 天左右，而温室种植的草莓采摘期可达 5 ~ 6 个月。而且人工收获时，每摘一处草莓需弯腰一次，劳动强度非常大。

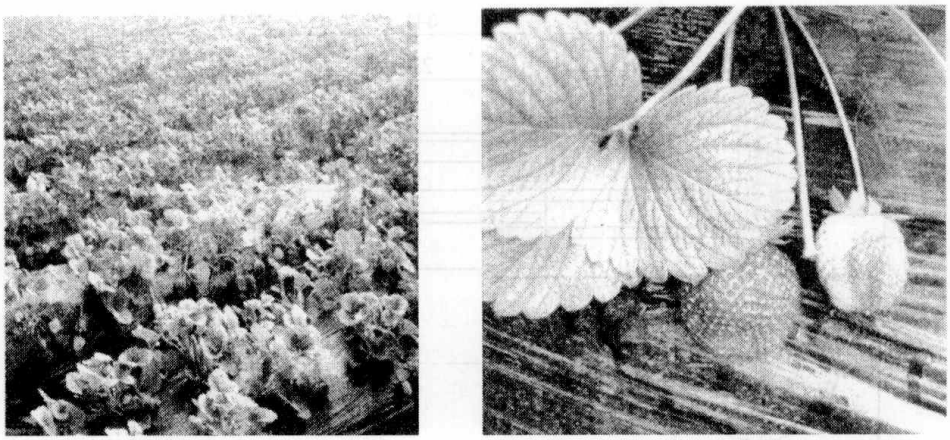


图 6-36　传统的温室草莓栽培方式

2. 露地生长草莓收获机器人

日本冈山大学研究出的龙门式草莓收获机器人，龙门架设在草莓生长区域的两侧(见图 6-37)，采用轮式机构移动。机械手设置在龙门架顶部，可以根据草莓的高度上下伸缩运动，末端执行器采用吸引式手爪，从草莓的上方确定二维坐标位置，进行采摘。

3. 高架栽培草莓收获机器人

日本冈山大学为了研制草莓收获机器人，首先对草莓的栽培方式进行了改进，将草莓种植在高架上(见图 6-38)，果实垂下来。机器人在高架下有足够的活动空间，并且机器人的收获作业不受叶子的干扰。

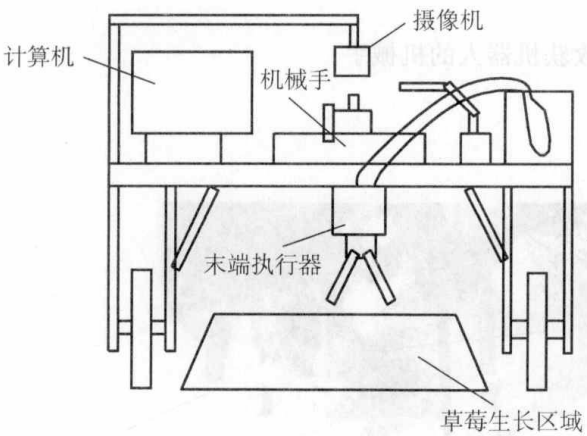



图 6-37　露地生长草莓收获机器人

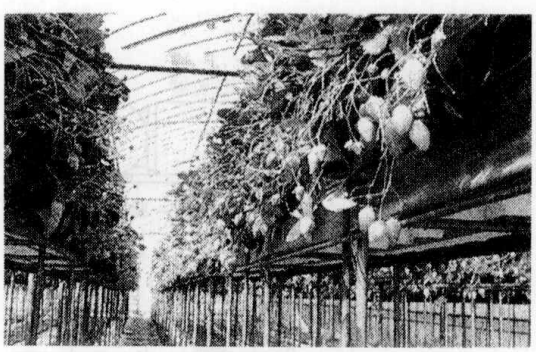


图 6-38　草莓高架栽培

(1) 机械手　高架栽培的草莓因障碍少，采用 5 自由度极坐标机械手(见图 6-39)，用彩色摄像机识别成熟果实，视觉传感器采用与樱桃番茄相同的算法。

(2) 末端执行器　草莓收获的末端执行器(见图 6-40)与樱桃番茄的相似，依靠真空吸管首先吸住果实，3 对光电中断器检测果实的位置。当果实处于适当位置时，手腕转动将果梗送入切断处，弹簧和螺线管驱动刀片切断果梗。

4. 草莓拣选机器人

草莓的形状复杂，一般的水果分选原则，如形状、大小、圆度、弯曲度以及长度比等，

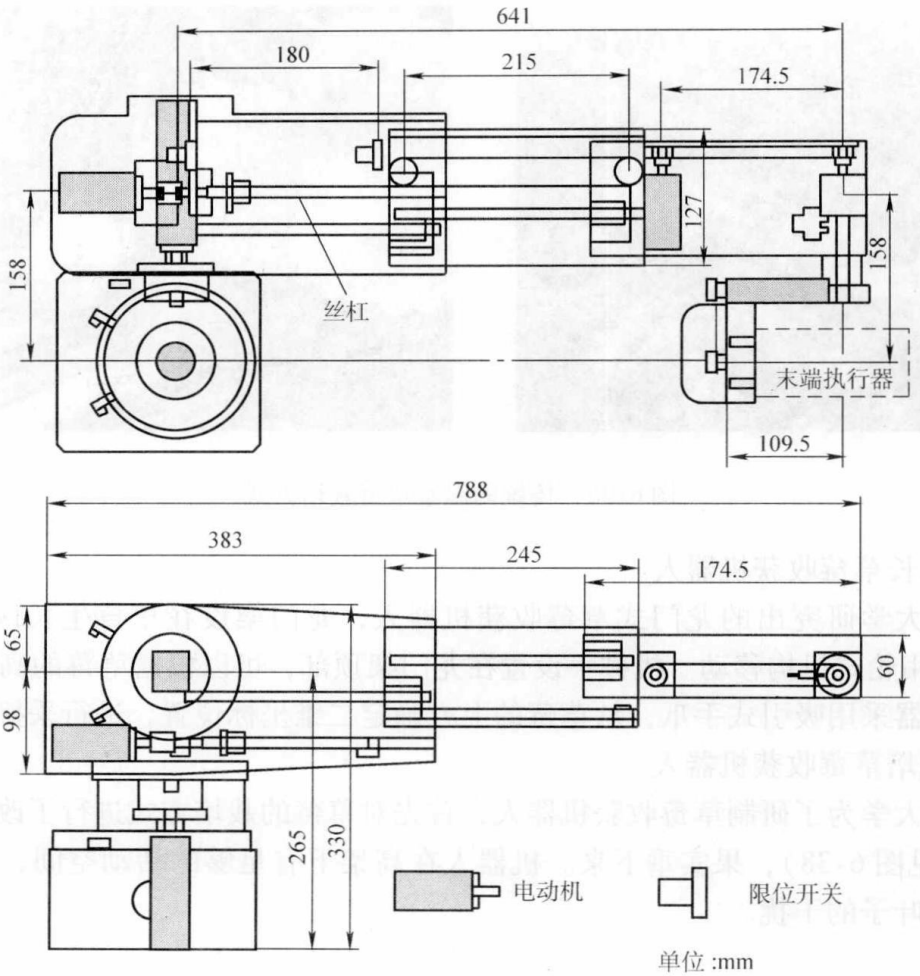



图 6-39 高架栽培草莓收获机器人的机械手

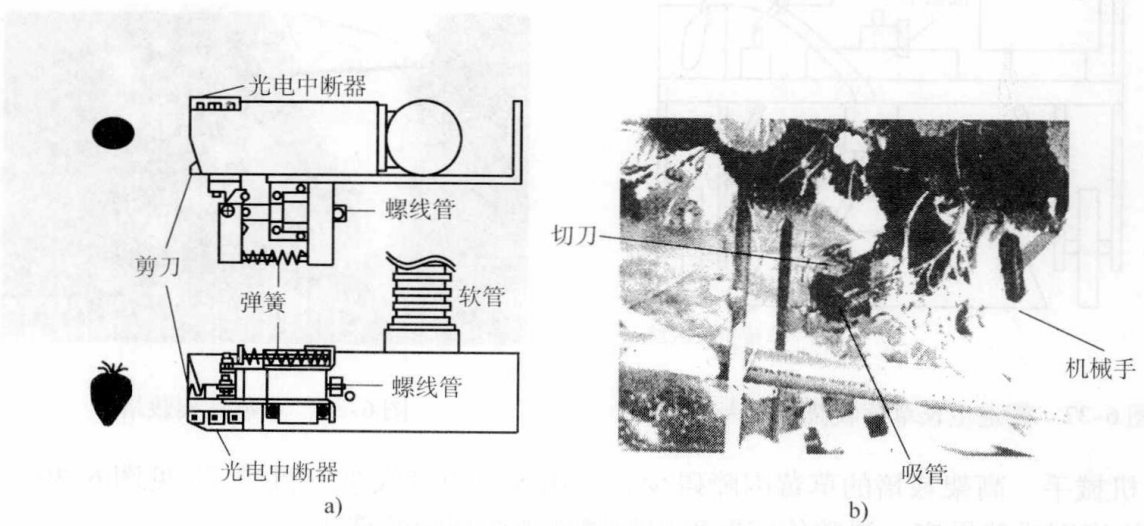



图 6-40 高架栽培草莓收获机器人的末端执行器

a）机构示意图 b）实物图

很难用到草莓上。

（1）草莓的拣选标准 日本的草莓根据规定的规格标准（见图 6-41）按颜色、形状及大

小进行拣选分类、包装之后才可上市流通。一般地，收获后的草莓可按着色程度分为8分、7分、6分和5分，形状可分为A、B和C等，大小可分为2L、L、M、S和2S级。

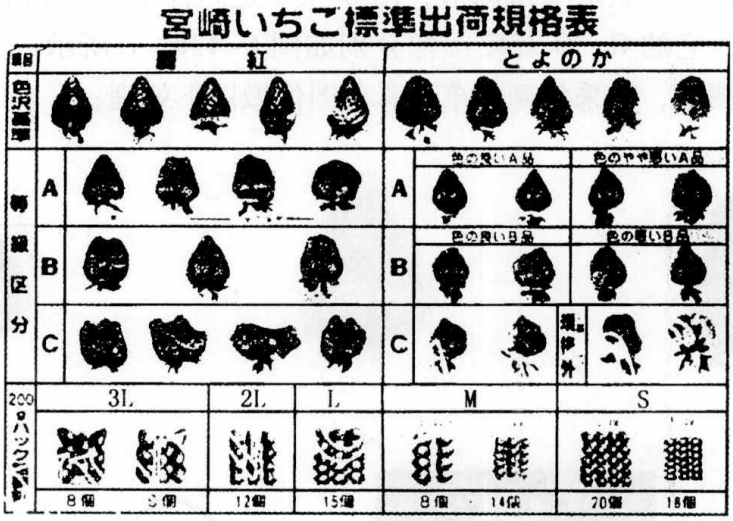



图6-41　日本草莓的规格标准

（2）草莓拣选机器人的原理　草莓拣选机器人的系统（见图6-42）包括传送带、控制器1和控制器2、空气压缩机、CCD摄像机、照明系统、计算机和图像处理系统。

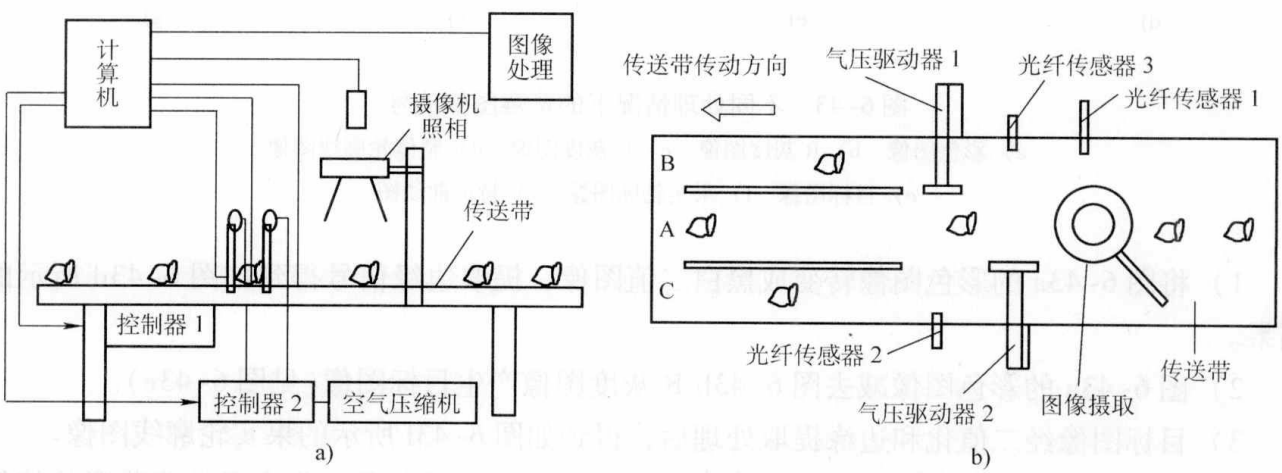



图6-42　草莓拣选机器人的系统图

a）主视图　b）俯视图

工作过程为：

① 传送带把草莓传送到摄像机下。

② 光纤传感器1检测草莓的到位信号，计算机通过图样采集卡采入从摄像机上得到的草莓彩色图像。

③ 计算机对采入的图像进行处理，抽出形状特征值进行判断，然后输出控制信号到控制器。

④ 当草莓被判定为A级时，不给气压驱动器1、2供气，草莓自行进入A道；若草莓被定为B级，则给气压驱动器2供气，将草莓推入B道；若草莓被定为C级，则给气压驱动器1供气，将草莓推入C道。

（3）草莓形状特征的提取　专业人员在拣选草莓时，很容易根据果实部分的形状特征

来判断其等级，但对于任意放置在传送带上的草莓，计算机采集到的草莓图像的方位是不定的。因此，拣选机器人首先找出草莓的外形轮廓，再对轮廓进行计算，确定形状特征值。

系统采用彩色图像技术获取草莓图形，图 6-43a 是图像卡采集到的在监视器上以 RGB 彩色模型显示的图像，它的 R、G 灰度图像分别如图 6-43b、c 所示。为了得到如图 6-43g 所示的草莓形状特征图像，对采集到的草莓彩色图像做以下处理：

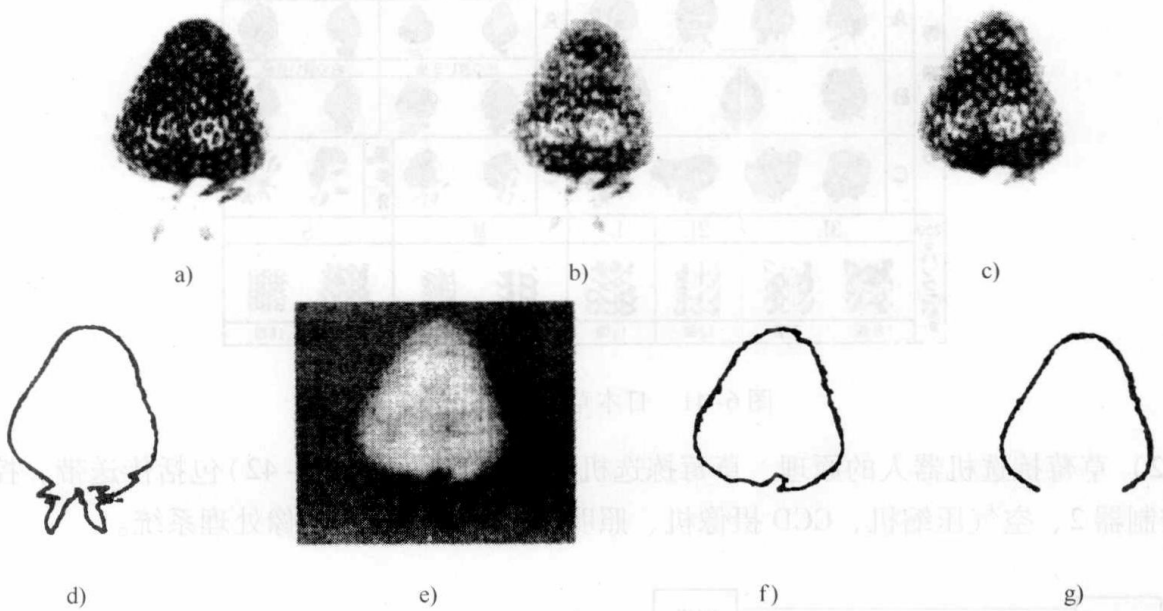



图 6-43　不同处理情况下的草莓图像信号

a）彩色图像　b）R 灰度图像　c）G 灰度图像　d）整体轮廓线图像

e）目标图像　f）果实轮廓图像　g）特征曲线图

1）将图 6-43a 的彩色图像转变成黑白二值图像，提取边缘信号得到如图 6-43d 所示的结果。

2）图 6-43a 的彩色图像减去图 6-43b R 灰度图像产生目标图像(见图 6-43e)。

3）目标图像经二值化和边缘提取处理后，得到如图 6-43f 所示的果实轮廓线图像。

4）最后把图 6-43d 和图 6-43f 进行逻辑与运算后，得到呈现开曲线形的草莓形状特征图像(见图 6-43g)。

由此就可以在图 6-43g 的基础上，抽出草莓的形状特征参数：

1）对呈现曲线状的形状特征图像(见图 6-44)，用 3×3 窗口(见图 6-45)检出曲线的两端点 $A$ 和 $B$。

2）以 $A$、$B$ 为两端点作一条直线，并在此直线的中心点 $O$ 作一条垂直线，与曲线相交于 $C$ 点。

3）以 $CO$ 线为基线，从 $O$ 点起按 $\pm 2n\pi/32(n=1,2,3,4)$ 的角度向外作射线。

4）这些射线与形状特征曲线相交点分别是 $L_1$、$L_2$、$L_3$、$L_4$、$R_1$、$R_2$、$R_3$ 和 $R_4$。

5）根据 $K_1 = OL_1/OC$、$K_2 = OL_2/OC$、$K_3 = OL_3/OC$、$K_4 = OL_4/OC$、$K_5 = OR_1/OC$、$K_6 = OR_2/OC$、$K_7 = OR_3/OC$、$K_8 = OR_4/OC$ 可产生一组形状特征参数。

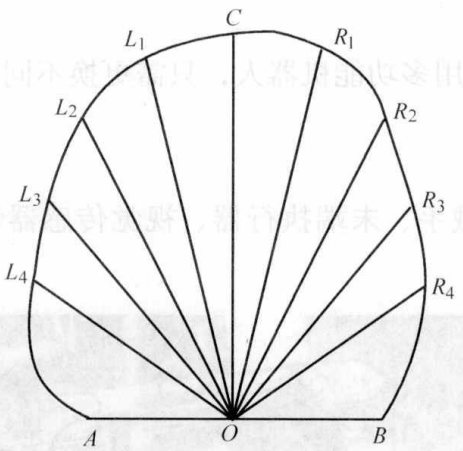



图 6-44　草莓的形状特征图像

| | | |
|---|---|---|
| $A_{i-1,\ j-1}$ | $A_{i-1,\ j}$ | $A_{i-1,\ j+1}$ |
| $A_{i,\ j-1}$ | $A_{i,\ j}$ | $A_{i,\ j+1}$ |
| $A_{i+1,\ j-1}$ | $A_{i+1,\ j}$ | $A_{i+1,\ j+1}$ |

图 6-45　3×3 检测窗口

（4）基于神经网络的判别　采用神经网络结构（见图 6-34），输入层为草莓形状的 8 个特征值，隐含层的层数根据训练状况而定；输出层为 2 个，分别控制两个气压驱动器。

（5）流程控制　草莓拣选机器人系统（见图 6-46）包括训练部分和判断部分，训练部分的内容包括图像处理、特征抽出和网络训练，判断部分的内容包括图像处理、特征抽出和判断以及草莓移动控制。程序启动后，通过计算机的屏幕和键盘，以人机对话的形式引导机器人进入学习训练和拣选判断状态。

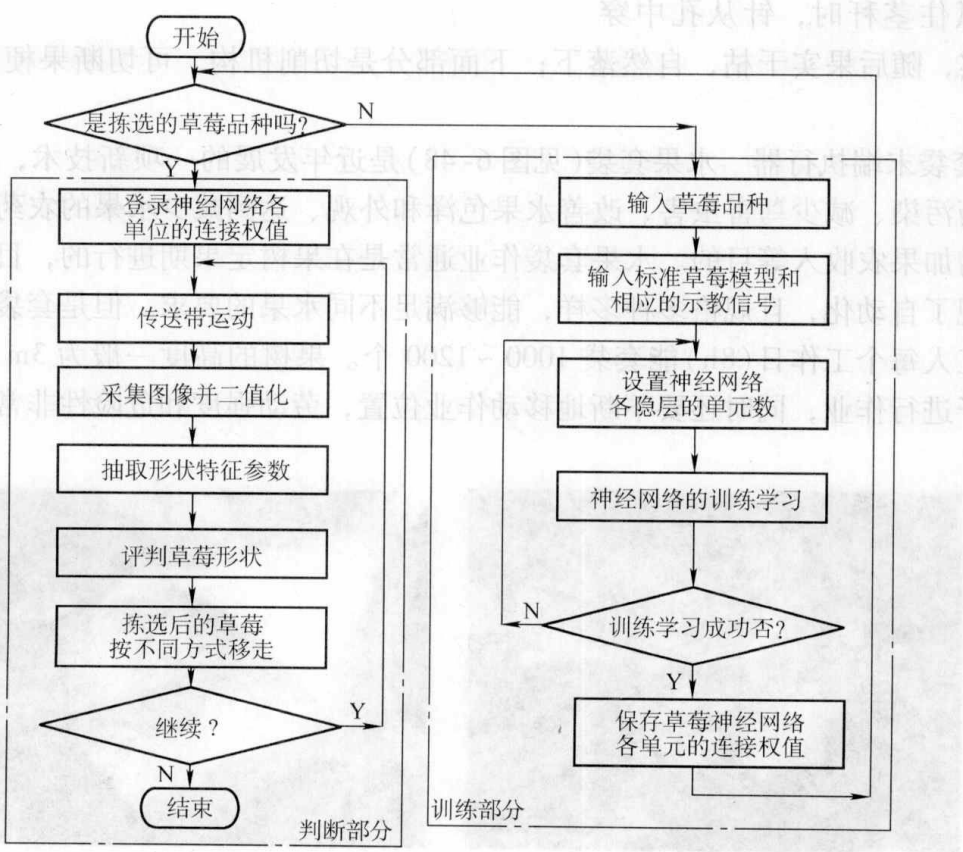



图 6-46　草莓拣选机器人系统

### 6.3.4 多功能机器人

对于相同对象或作业空间相近的作业，可以采用多功能机器人，只需更换不同的末端执行器、视觉系统和控制系统就可以完成作业。

1. 葡萄多功能生产机器人

日本研制的葡萄多功能生产机器人，包括机械手、末端执行器、视觉传感器和移动机构，只要更换手爪就可以完成多种作业。

（1）葡萄蔬果末端执行器　为了使果串长得更大一些，提高果串的商品价格，有必要将果串中的劣果去掉。蔬果作业耗时长、劳动强度大、效率低，因此，日本研制了葡萄蔬果末端执行器(见图6-47)。

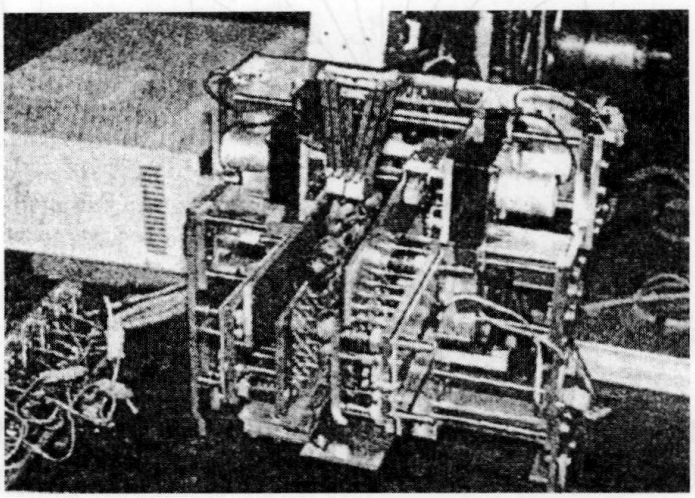


图6-47　葡萄蔬果末端执行器

葡萄蔬果末端执行器包括3个部分：上面部分分为两个带有橡胶的平行盘，盘子平行张开和闭合，交替前进和后退，在主干上压迫和扭掉果实；中间部分包括1个带有针的圆盘、弹簧和1个多孔盘，当中间部分抓住茎秆时，针从孔中穿出刺穿果实，随后果实干枯，自然落下；下面部分是切削机构，可切断果梗以规范果串的长度。

（2）套袋末端执行器　水果套袋(见图6-48)是近年发展的一项新技术，主要是为减少水果的农药污染、减少鸟害虫害、改善水果色泽和外观、达到减少水果的农药残留、提高水果等级、增加果农收入等目的。水果套袋作业通常是在果树定果期进行的，目前，果袋的生产已经实现了自动化，且规格多种多样，能够满足不同水果的要求。但是套袋作业仍依靠人工，每个工人每个工作日(8h)能套袋1000～1200个。果树的高度一般为3m左右，人工需要借助梯子进行作业，同时还要不断地移动作业位置，劳动强度和危险性非常大。

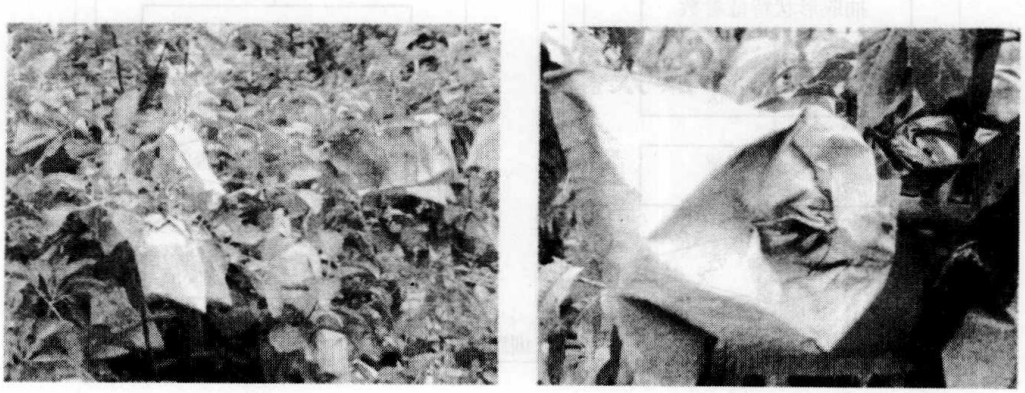


图6-48　水果套袋

日本研制的葡萄套袋末端执行器(见图6-49)采用电动机驱动，由1个可以上下移动将果袋逐个送给手指的果袋喂入器和2个可以平行张开的手指组成，与之配套的果袋上端有两个相向的弹簧。当果袋由果袋喂入器和手指携带时，弹簧处于拉紧状态，果袋张开；当果袋喂入器将果袋送给手指后，套袋末端执行器从下端接近目标果实，直到将一个果实倒进果袋后，手指松开，在弹簧的作用下将果袋固定在果梗上。

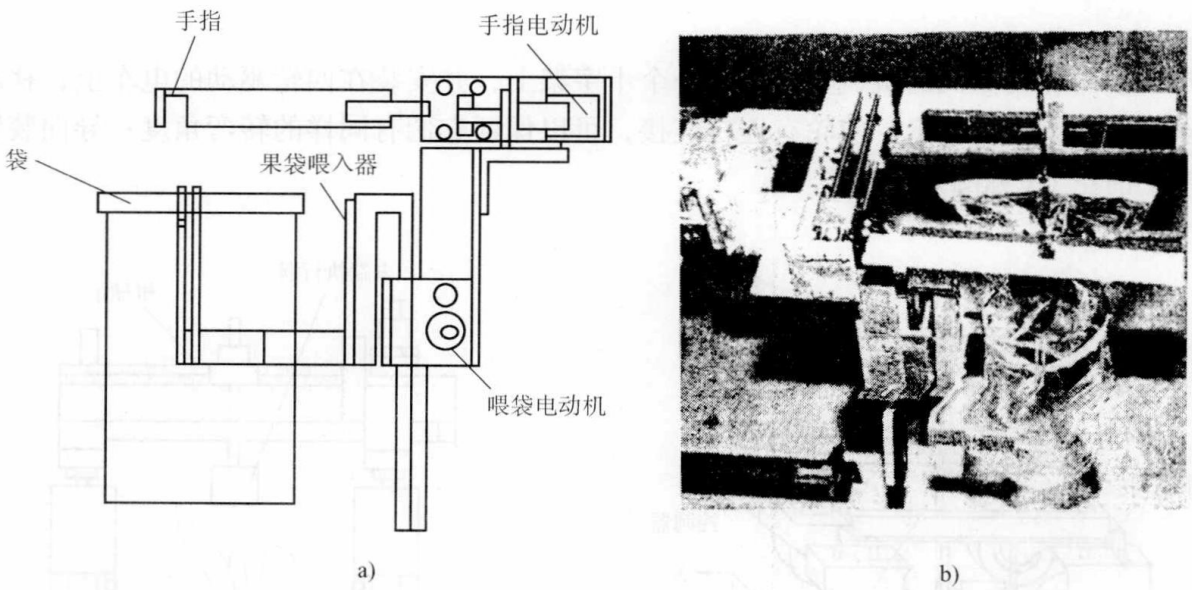



图6-49　葡萄套袋末端执行器

a）示意图　b）实物图

(3) 喷洒机器人　人工喷洒化肥，不仅需要穿保护服以防受侵害，而且均匀性差、化肥的利用率低、污染环境、造成浪费，因此需要采用机器人喷洒。

喷洒机器人(见图6-50)由手爪、机械手、安装在机械手上的远红外线传感器、向喷嘴提供药液的泵和控制液体流动的电磁阀组成。控制系统控制机械手的移动，使其始终在葡萄架下运动。通过远红外线传感器的检测，使喷嘴和葡萄架保持一定的距离。

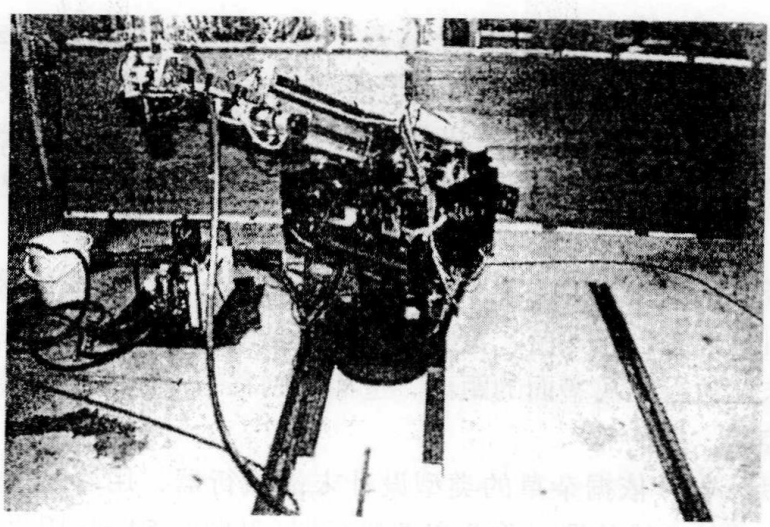


图6-50　喷洒机器人

2. 蔬菜多功能机器人

多数蔬菜作业是具有选择性的，目前仍采用人工进行作业。日本开发了一个叶菜类多功能机器人(见图 6-51)，可以进行移栽、杂草控制和收获，适合于各种叶菜。多数叶菜类蔬菜生长在垄上，作业高度为 0 ~ 35cm。

蔬菜多功能机器人由直角坐标系机械手、移动机构、末端执行器、传感系统和控制系统组成。末端执行器和传感器可以根据作业类型和蔬菜类型进行更换。整个系统由交流电动机控制。

叶菜多功能机器人的机械手固定在一个十字架上，并安装在四轮驱动的电车上；移动机构可以在两个垄沟内行走，前轮有连杆连接，可以保证它们有同样的转弯角度；导向装置安装在两个前轮上(见图 6-52)。

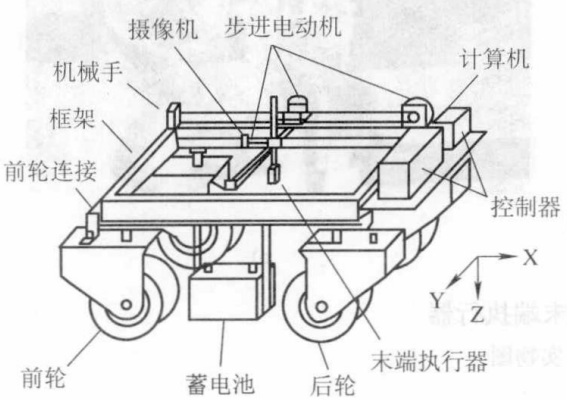



图 6-51 蔬菜多功能机器人

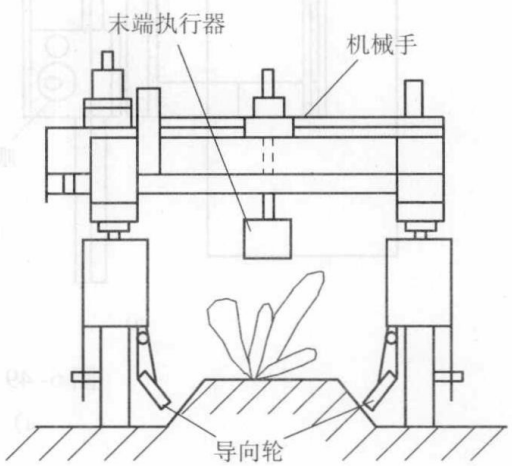



图 6-52 机器人在田间作业

直角坐标系机械手采用 3 自由度。由于机械手不需要太多的能量，可以采用步进电动机驱动，每个轴的平均速度分别为 $X$ 轴为 0.6m/s，$Y$ 轴为 0.5m/s，$Z$ 轴为 0.2m/s。

(1) 移栽末端执行器　该机器人的移栽末端执行器适合于蔬菜的塞子苗，如甘蓝、生菜等。

移栽末端执行器(见图 6-53)包括两个移栽手指、挖穴铲、直流电动机、电线圈和通过光缆与检测器连接的光敏传感器。移栽手指通过电线圈的控制，可以在 20mm 的距离内开闭。秧苗推杆安装在手指上，在这些机构的前侧，安装了一个有直流电动机驱动的挖穴铲。当秧苗从穴盘中取出并去除土壤后，末端执行器随机械手向前移动 40mm，打一个孔。

光敏传感器安装在末端执行器上，控制挖穴铲的深度。一个光纤传感器用于检测秧苗是否存在，若穴盘中目标位置没有秧苗，传感器关闭，末端执行器移向下一个位置；另一个光纤传感器用来检测末端执行器离垄面的距离，进而控制移栽深度。这些传感器的开与关由反射光的发光亮度来控制。

(2) 除草末端执行器　依据杂草的类型设计末端执行器，用彩色摄像机获得彩色图像进行处理，并得到杂草的三维位置。除草末端执行器(见图 6-54)是用直径为 4cm 的螺旋形切刀切除杂草，作业深度 20 ~ 30mm，足以挖取草根。

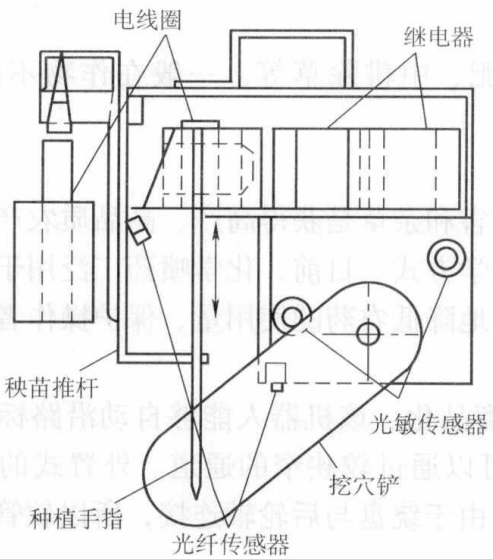



图 6-53　移栽末端执行器

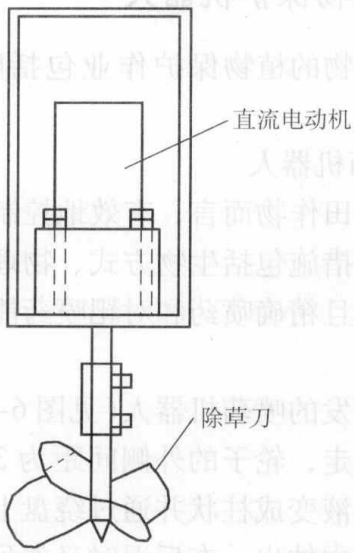



图 6-54　除草末端执行器

摄像机的离地高度为460mm，视觉范围为325mm×244mm（$X$ 方向×$Y$ 方向），可以获得杂草的图像，通过进行二值化处理得到 G 值。但是由于杂草与作物的颜色相同，很难用彩色信息进行分辨。在有移栽作业的作物中，移栽前，杂草基本上被除草剂杀死；移栽后，杂草比作物小。基于这一点，可以采取下列方法进行辨别：

首先，相对于 R 和 B 值，获取较大的 G 值，也可以获得作物的二值化处理。如果二值化的值在水平或垂直方向小于 8 像素或大于 80 像素，就可以判断是干扰或是作物，其他就是杂草的信息。

也可以用立体摄像机获取杂草的三维位置，在原始图像的输入点处获得一个立体图像，在离原始图像水平方向 50mm 的位置再获得一个立体图像，这样就可以用同一个摄像机获得立体图像。

在生菜地里进行杂草控制的实验，旋转切片的深度为 20～30mm。采用人工和除草机器人进行对比：人工在移栽后，10 天后就出现了杂草，并且每 14 天就要进行除草；而用机器人除草，杂草出现的概率大约是人工除草的 6 倍。

（3）收获末端执行器　叶菜包括大白菜等，种植密度高，收获困难，收获作业量占整个生长过程作业的 60%。因此，需要研究省力的收获机械。

叶菜收获末端执行器（见图 6-55）包括收获部分和蔬菜把持部分，15W 的直流电动机驱动 4 把收获刀和 2 个把持手指。这种机构适合在较软的地里作业。

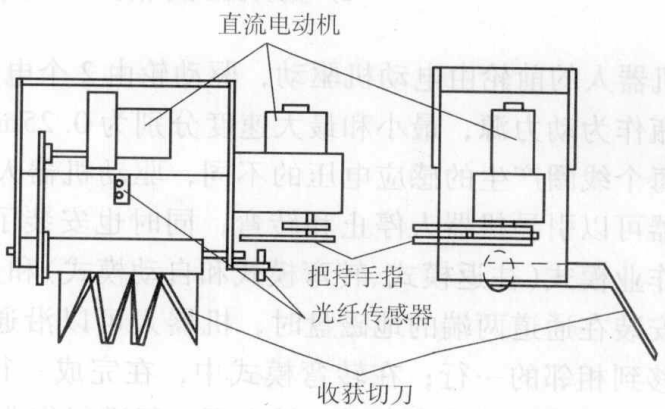



图 6-55　叶菜收获末端执行器

### 6.3.5 植物保护机器人

大田作物的植物保护作业包括喷药、施肥、中耕除草等，一般在作物不同的生长期进行。

1. 喷药机器人

对于农田作物而言，有效地控制病害、虫害和杂草是获得高产、高品质农产品的重要保障，采取的措施包括生物方式、物理方式和化学方式。目前，化学喷药广泛用于大田的作物生产中，并且精确喷药和对靶喷药能最大限度地降低农药的使用量、保护操作者和保护生态环境。

日本开发的喷药机器人(见图 6-56)已经商品化。该机器人能够自动沿路标和架设在地边的缆绳行走，轮子的外侧间距为 320mm，可以通过较狭窄的通道。外置式的喷嘴能够将有压力的药液变成柱状并通过绕盘上的软管，由于绕盘与后轮轴连接，所以软管在机器人前进时从绕盘中抽出，在后退时又卷到绕盘上。

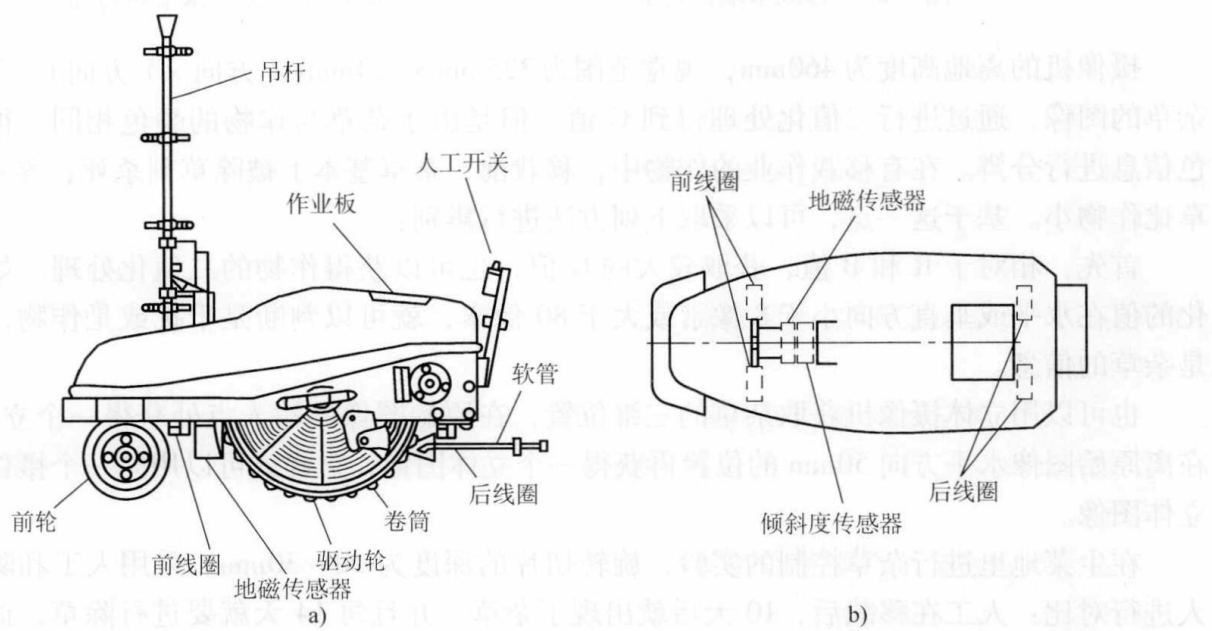



图 6-56 喷药机器人

a) 喷药机器人的结构 b) 喷药机器人的原理图

机器人的前轮由电动机驱动，驱动轮由 2 个电动机以不同的速度分别驱动，分别用 2 个电瓶作为动力源，最小和最大速度分别为 0.25m/s 和 0.5m/s。电缆上检测地磁的线圈通过每个线圈产生的感应电压的不同，驱动机器人沿电缆行走 。此外，检测路标的地磁传感器可以引导机器人停止和转弯，同时也安装了倾斜度传感器。机器人可以选择 3 个自动作业模式(往返模式、转弯模式和自动模式)和人工操作。在往返模式中，当传感器检测到安装在通道两端的地磁盘时，机器人可以沿通道自动前进和后退，人工将机器人从一行移到相邻的一行；在转弯模式中，在完成一行的喷药作业后，机器人在地头移动到下一垄，当检测到地磁盘时，转入下一行进行作业；自动模式适合宽的通道和没有垄的长距离移动。

2. 施肥机器人

大田作物的施肥机包括厩肥喷洒机、石灰撒布机、撒布机、尿液喷洒机和肥浆喷洒机。在水稻田的施肥作业中，人工在恶劣的地面和窄空间进行作业，非常艰苦，劳动强度大。

日本研制的施肥机器人(见图6-57)可以沿着水稻行自动行走，进行肥料深施，离地间隙为0.52mm，以汽油机为动力。

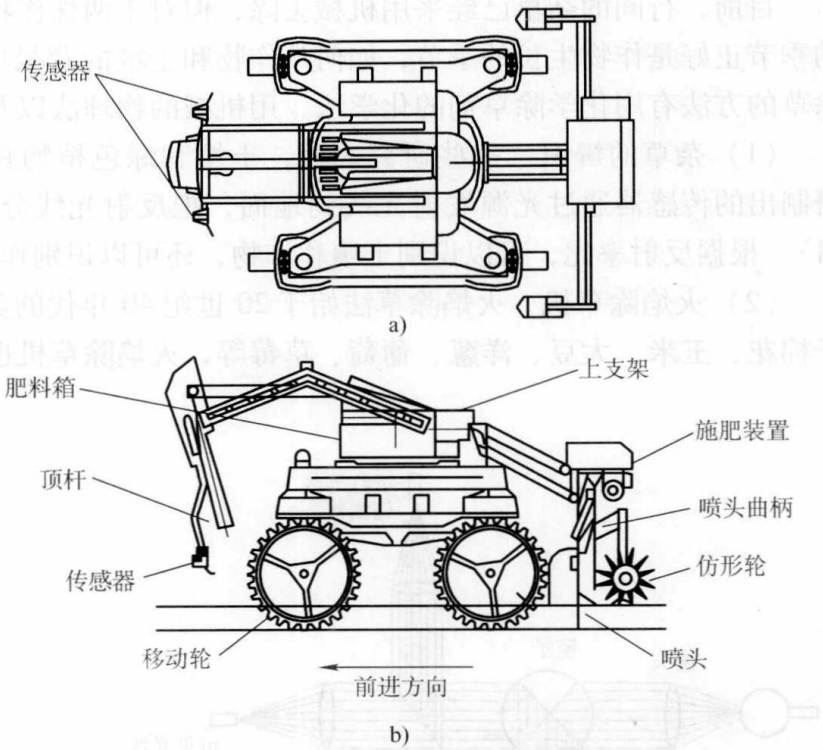



图6-57　施肥机器人

a）俯视图　b）主视图

机器人有一个可以水平移动的转向支架和四轮驱动系统。每个轮子分别由不同的液压控制系统驱动，因此机器人不仅可以前进，还可以在小范围内侧向滑动。机器人安装了接触传感器和光传感器，光传感器由发射器和接收器组成，两个传感器可以检测作物行。用于支撑机器人机体的顶杆安装在转向支架的最前端，当轮子被提升后，可以支撑机体。

施肥装置包括1个泵、1个电动机和安装在支架前端的喷嘴。当机器人前进时，受压的肥料被注射到离地面15cm的地下。

机器人通过接触传感器可以沿作物行进行行走，并保证施肥的深度。液压控制系统通过仿形轮检测出对地高度，进而调整施肥装置的高度。松软水田中，由于车轮的打滑容易使单位面积的施肥量发生变化，所以通过仿形轮的转数检测出车辆的行走速度和距离，确保施肥量和施肥压力泵的转速。

通过机架前端的接触传感器和光传感器来检测地头。一般地，水稻的插秧行通常与田埂平行，但地头的秧苗与中央的秧苗垂直。因此在地头，由于行距比株距大，接触传感器与水稻行的接触周期就会增大。与此同时，当机器人行走时，发射器发射的光要穿过作物行才能到达反射器，发射的光被作物行中断，机器人就会在地头停止作业。

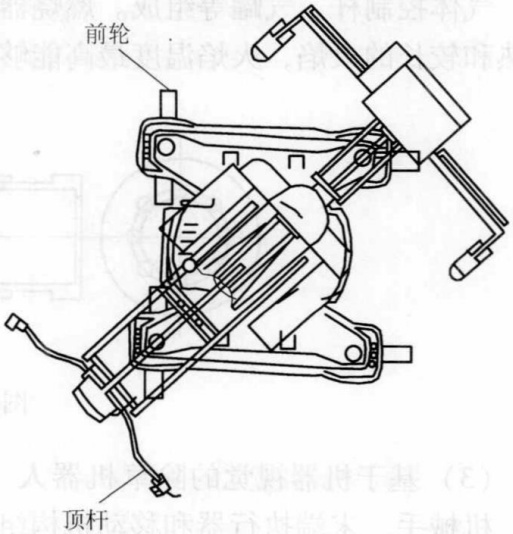



图6-58　正在旋转的机器人

地头转弯时，通过液压机构将顶杆下降到地面(见图6-58)，顶起车体前轮部分，使前轮转向90°；然后升起顶杆，同时将转向支架旋转180°，使顶杆转到车体的后方；再将顶杆触地，

顶起车体后轮部分，使后轮转向90°。这样，各个车轮都处于横向状态，以此姿态可以横向移动。由于转向支架调换了前后位置，正好使机器人后退进行施肥作业。

3. 除草机器人

目前，行间的杂草已经采用机械去除，但对于两株作物之间的杂草，还很难去除。除草的季节正好是作物生长的季节，如何从作物和土壤的背景中辨认出杂草是非常关键的问题。除草的方法有用化学除草剂的化学法、用机械的物理法以及用激光或火焰法。

（1）杂草的辨识　一些研究表明，土壤和绿色植物具有不同的分光反射特性，因此，研制出的传感器通过光源发射光线到地面，把反射光线分离成可见光线(V)和近红外光线(I)。根据反射率比，可以识别土壤和作物，还可以识别作物和小杂草(见图6-59)。

（2）火焰除草机　火焰除草法始于20世纪40年代的美国，到20世纪60年代，已经用于棉花、玉米、大豆、洋葱、葡萄、草莓等，火焰除草机也相继问世。

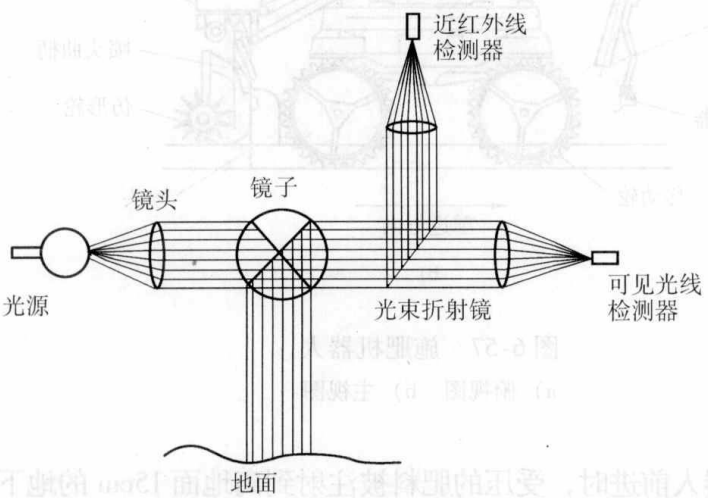



图6-59　红外线传感器的简图

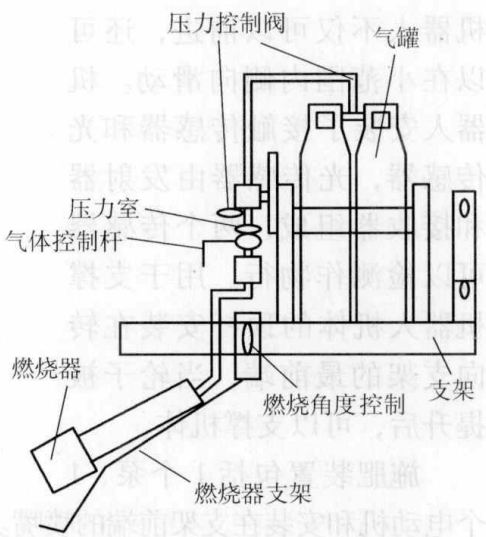



图6-60　火焰除草机

韩国研制的火焰除草机(见图6-60)由燃烧器、燃烧角度控制、燃烧器支架、压力控制阀、气体控制杆、气罐等组成。燃烧器采用枪形(见图6-61)，喷嘴直径1.0mm，可以喷射较热和较长的火焰，火焰温度最高能够超过840℃。

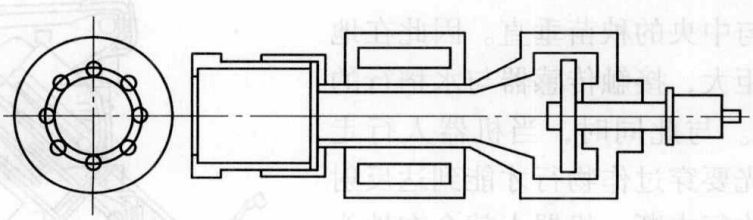


图6-61　枪形燃烧器

（3）基于机器视觉的除草机器人　基于机器视觉的除草机器人(见图6-62)由视觉系统、机械手、末端执行器和移动机构组成。

除草机器人的视觉系统包括初级视觉系统和第二级视觉系统。

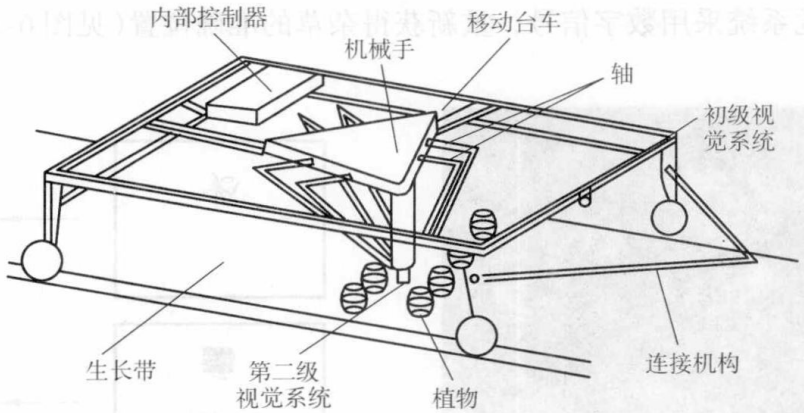



图 6-62　除草机器人结构示意图

初级视觉系统的功能是在行车移动的过程中，对杂草进行检测。该系统的核心机构为一个设置在机器人移动轨道中间的彩色摄像机，摄像机在 800ms 内就可以拍摄一张照片，可以实现实时检测。该系统可以实现图像获取、图像处理和将图像传输到第二级视觉系统。

第二级视觉系统的功能是要确定杂草和提供杂草的准确位置，以便修正除草机构的位置。该系统安装在机械手上，包括内置精确处理单元的单色摄像机、能够对准初级视觉系统检测的一个杂草辨别机。根据整体控制的要求，第二级视觉系统要在土壤背景的条件下抓取杂草的图像，确定其位置，与初级视觉系统的数值进行比较，最终将杂草的精确位置传递给控制系统，驱动末端执行器进行除草。

区分杂草和作物的颜色空间选择 RGB 空间，如图 6-63 所示是获取的原始图像，经过图像分割获取到如图 6-64 所示的图像，由此可以获得面积、周长和杂草的中心点(见图 6-65)。小于内置阈值的目标是噪声，可以消除；大于内置阈值的目标是作物，余下的是杂草，将其中心位置传送到控制系统和第二级视觉系统中。这些值的获取是在离线的情况下进行的。

图 6-63　杂草和作物的原始照片

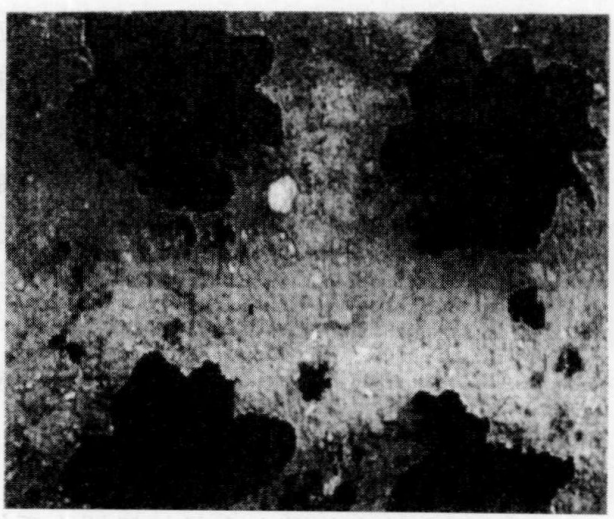


图 6-64　杂草和作物的图像分割

控制系统移动机器人到初级视觉系统提供的杂草的初始位置，末端执行器距离杂草30cm。第二级视觉系统采用数字信号，重新获得杂草的准确位置(见图6-66)。

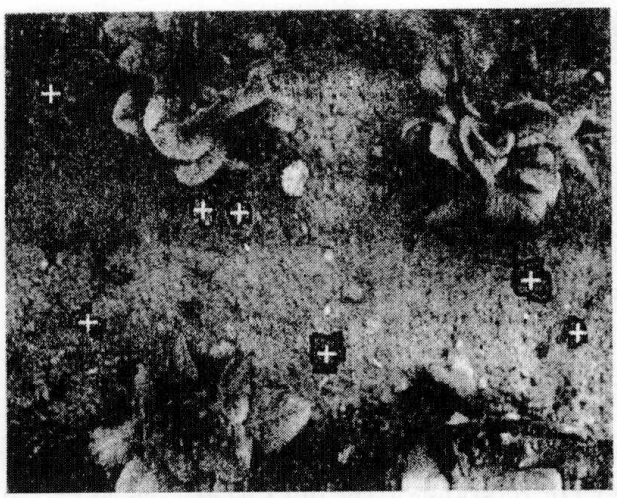


图6-65 杂草的确定结果

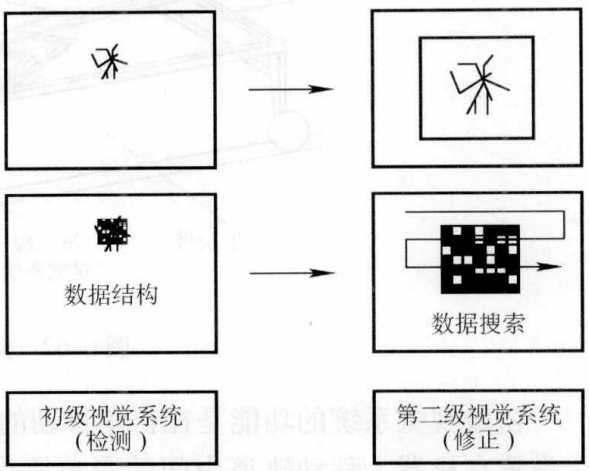



图6-66 第二级视觉系统提供的杂草数字信号

机器人的机械机构包括机械手和一个由拖拉机牵引的移动台车。机械手有一个固定在台车上的三角形铁板，每个边分别固定两根轴，共同驱动末端执行器的上、下运动。移动台车在拖拉机的牵引下，可以跟随移动，并采用多种传感器检测台车的运动，及时对目标进行修正。

其末端执行器类似蔬菜多功能除草机器人的末端执行器，在这里不再叙述。

### 6.3.6 肉品加工机器人

1. 猪畜体肢解

众所周知，肉品加工劳动量大，对工人来说有一定的危险性。与许多生物目标相类似，胴体的尺寸和形状在一个很大的范围内变动。人们希望在多数的屠宰场里，生产线能够处理16~100kg重的畜体。同一畜体的不同部位，肉的性质是不一样的。原料力学性质的标准工程定义可能还没有准备用于肉品切割过程的设计中。许多其他的因素，例如破坏阻力、柔软性、硬度、热反应以及表面结构也导致机器设计的复杂化。

由澳大利亚农业部研制的猪畜体的肢解机器有一个测量和控制装置。该装置的输出信号提供了每一个畜体的数据，从而进行切割位置的控制。因为高速切断锯对脂肪、鸡肉和骨架都有很好的切割能力，因此用它们来把每一个畜体预先切割成八块。切断锯有自动清洗功能，从而改善了卫生状况，使切割表面很干净。支架包含有4组2个自由度的支持夹，当胴体从空架轨道上取下后，就用它来从后面支撑畜体。这个机器对于冷藏畜体效果很好，但是不适合冷冻的畜体。

2. 牛前髀的去骨

一种用于从牛前髀上去骨的机器人系统被研制出来(Purnell 等,1990 年)。由于前髀肉一般用于加工成碎肉制品，因此，切割表面的感官质量不是关键的。机器人前髀去骨系统必须包括前髀夹持装置、机器视觉系统、系统监控计算机、切割设备、机器人操纵器以及机器人

控制器。

前髀夹持装置为一个展开的导杆系统。气动锤可以伸展到前髀胸腔，插到脊骨和胸骨之间，并能把畜体拖到平板处。机器人去骨过程不同于手工切割，它选用装有动力装置的线形往复式割刀。刀的设计是为了使它的切割参数可调，包括往复速度、行程长度、刀片外形等。用预切割实验来研究切割参数的效果，可以发现，与切割瘦肉相比，切割骨头的单位力大约需要增加10倍。同时，肉品的温度也发现很关键。英国的肉类工业倾向于用2～5℃作为最理想的切割温度。

3. 禽类产品的处理

一个典型的禽类加工厂包括禽接受、宰杀、去内脏、冷却、分割、包装等几个区域，包装过程通常是劳动强度最大的活动。Khodabandehloo(1990年)描述了一种机器人系统，它用于将鸡块包装在安排好的干净的盘子里。其研究的主要内容包括末端执行器、机器视觉能力以及机器人系统的整合。

末端执行器负责鸡块的抓取和放置，它包括两个部分：1个平行的开放机构和1双手指(和开放机构相连,并由它驱动)。手指有两种类型：一种是带有角度的盘形手指，它的上端部分是垂直的，下端部分弯向另一个手指。在上端和下端部分之间试用了三种不同的角度(30°、60°和90°)，结果发现，30°最有效。另外一种手指类型是气动手指，由25mm直径的实验试管制成，其一端用螺旋弹簧限制。在可变的气体压力下，手指弯向受限制的一端成各种角度。气动手指易于清洁，适合食品使用，然而其花费高出角度盘形手指许多倍。

Khodabandehloo(1990年)提出了一个概念性的机器人项目组，进行新鲜鸡块的定重和定价(FWFP)包装。在FWFP过程中，一定数量、特殊类型的鸡块被包装起来，达到最小的重量需求。两种情况可能导致花费的增加：超重包装以及过分超重包装需要的重新包装。对工人来说，保证FWFP包装中最小的重量是一个很大的挑战，因此设计了机器人系统，它使用鸡块的电子储存称重信息进行包装过程的优化。

McMurray等(1995年)建立了一种适用于家禽肉处理的机器人系统。它包括一个智能结合带控制器(IIBM)、由可伸缩的波纹手指组成的操作手、控制系统和用于在传送带上检测和定位家禽的跟踪系统。IIBM将传料带和一个3自由度的机器人控制器结合在一起。控制器有两个笛卡儿运动(一个是垂直于带的水平运动,一个是竖直运动)和一个平行于带平面的循环运动。手爪作为末端执行器和IIBM相连，它是由一个水平的圆盘和与圆盘相连的4个竖直的手指组成。每一个手指包括橡胶伸缩管，它的一边带有细条。当用气体充压时，迫使每个手指向鸡块等抓取物弯曲。

在佐治亚工业研究所的生产研究中心，建立了一种机器人系统的模型。机器人能够寻找并拿取鸡腿和无骨胸脯肉，系统的成功率接近90%，而且大多数的偏差是由于操作手在操作打滑和变形的鸡肉时造成的。

# 第7章　仿生机械学

随着机械仿生在仿生学中的快速发展，逐渐形成了一个专门研究仿生机械的学科，称为仿生机械学。它是20世纪60年代末期由生物力学、医学、机械工程、控制论和电子技术等学科相互渗透、结合而成的一门边缘学科。通过研究、模拟生物系统的信息处理、运动机能以及系统控制，并通过机械工程方法论将其实用化，从而应用于医学、国防、电子、工业等相关领域，可产生巨大的经济效益。

## 7.1　仿生机械学定义

仿生机械(Bio-simulation Machinery)是模仿生物的形态、结构和控制原理，设计制造出的功能更集中、效率更高并具有生物特征的机械。仿生机械学研究的主要领域有生物力学、控制体和机器人。生物力学研究生命的力学现象和规律，包括生物体材料力学、生物体机械力学和生物体流体力学；控制体是根据从生物了解到的知识建造的、用人脑控制的工程技术系统，如肌电假手等；机器人则是用计算机控制的工程技术系统。仿生机械学是以力学或机械学作为基础的，综合生物学、医学及工程学的一门边缘学科，它既把工程技术应用于医学、生物学，又把医学、生物学的知识应用于工程技术。它包含着对生物现象进行力学研究，对生物的运动、动作进行工程分析，并把这些成果根据社会的要求付之实用化。

## 7.2　仿生机械简史

模仿生物形态结构创造机械的技术有悠久的历史。15世纪，意大利的列奥纳多·达芬奇认为人类可以模仿鸟类飞行，并绘制了扑翼机图。到19世纪，各种自然科学有了较大的发展，人们利用空气动力学原理，制成了几种不同类型的单翼机和双翼滑翔机。1903年，美国的莱特兄弟发明了飞机。然而，在很长一段时间内，人们对于生物与机器之间到底有什么共同之处还缺乏认识，因而只限于形体上的模仿。直到20世纪中叶，由于原子能利用、航天、海洋开发和军事技术的需要，迫切要求机械装置应具有适应性和高度的可靠性，而以往的各种机械装置远远不能满足要求，寻找一条全新的技术发展途径和设计理论就成了首要任务。随着近代生物学的发展，人们发现生物在能量转换、控制调节、信息处理、辨别方位、导航和探测等方面有着以往技术所不可比拟的长处；同时，在自然科学中又出现了“控制论”理论，它是研究机器和生物体中控制和通信的科学。控制论是沟通技术系统和生物系统工作原理之间的桥梁，它奠定了机器与生物可以类比的理论基础。1960年9月，在美国召开了第一届仿生学讨论会，并提出了“生物原型是新技术的关键”的论题，从而确立了仿生学学科，以后又形成了许多仿生学的分支学科。1960年，由美国机械工程学会主办，召开了生物力学学术讨论会。1970年，日本人工手研究会主办召开了第一届生物机构讨论会，从而确立了生物力学和生物机构学两个学科，并在这个基础上形成了仿生机械学。

## 7.3　仿生机械学的研究领域

仿生机械学研究的主要领域有生物力学、控制体和机器人，生物力学研究生命的力学现象和规律，控制体和机器人是根据从生物了解到的知识建造的工程技术系统。其中，用人脑控制的称为控制体(如肌电假手、装具)，用计算机控制的称为机器人。仿生机械学的主要研究课题有拟人型机械手、步行机、假肢以及模仿鸟类、昆虫和鱼类等生物的各种机械。

1）拟人型机械手。从外形和功能上看，各种动物的前肢虽然不尽相同，但它们的内部构造却基本一致。两栖类、爬行类、鸟类和哺乳类动物的前肢骨骼都是由肱骨、前臂骨、腕骨和指骨组成的。人的上肢具有较高的操作性、灵活性和适应性，机械手正朝着与人上肢功能接近的方向发展。人的一个上肢有32块骨骼，由50多条肌肉驱动，由肩关节、肘关节、腕关节构成27个空间自由度。肩关节和肘关节构成4个自由度，以确定手心的位置；腕关节有3个自由度，以确定手心的姿态。手由肩、肘、腕确定位置和姿态后，为了掌握物体作各种精巧、复杂的动作，还要靠多关节的五指和柔软的手掌。手指由26块骨骼构成20个自由度，因此手指可作各种精巧操作。在这么多自由度的协调配合下，肌肉在瞬间运动下可发出很大的力量，最大出力与自重之比远较人类制造的任何机器都高得多。肌肉的控制机构具有多重自动控制机构和安全机构，从脑部来的指令可以到达手的各个部分。从工程技术上实现这样的机能特征和信息处理系统是很困难的，一般研制的多关节机械手还只限7个自由度的手臂和1个自由度的手爪，也有人在研究5指手爪。此外，还有模仿象鼻子等机能的柔性机械手，其特点是具有较高的自适应能力。中国科学院长春光学精密机械研究所于1983年研制成功了由微型计算机控制的7个自由度的拟人型机械手。

2）步行机。为了提高移动机械对环境的适应性，扩大人类在海底、北极、矿区、星球和沼泽等崎岖不平地面的活动空间，需要研究模拟生物的步行机构。动物的运动多是通过多关节足来实现的。因此，动物足的形态、机能、运动和肢体稳定控制等是研究步行机的关键。人和鸟类是两足，青蛙、乌龟、犬、马是四足，昆虫是六足，而蟹和蜘蛛是八足，蜈蚣是多足。足的个数直接影响肢体的稳定。六足以上的动物着地至少用三足，由于肢体重心通过足的三点构成平面，静态是稳定的；四足动物慢走时，三足同时着地、快跑时两足着地，靠驱体随机姿态稳定调节；两足动物在步行时，对左右而言是一点着地，是不稳定系统，所以控制很困难。一些国家研制了两足、三足、四足、六足、八足的步行机械。日本早稻田大学于1973年研制成WABOT-1的WL-5号两足步行机，东京工业大学于1972年研制成机械蛇模型，中国科学院长春光学精密机械研究所于1981年研制出四足、六足步行机模型。

3）假肢。分为上肢假肢和下肢假肢。上肢比下肢精巧灵活，结构也较复杂，一般要求假手的外形、构造与人手相近。随着电子技术、生物医学工程的发展，假手已由装饰假手、机械牵引假手发展到肌电假手。肌电假手是大脑通过脊髓和神经系统向有关肌肉发出一组生物电脉冲，利用装在手臂皮肤表面的电极接受指令而驱动假手运动。这种假手受人的意志控制，能实现多功能的、与人手相似的动作。中国清华大学已于1983年研制出肌电假手。

下肢的主要功能在于负重走路，既要有稳定性，又要有适应性和灵活性。下肢包括髋关节、膝关节、踝关节和足部各小关节，它在结构上要比较坚实、稳定，以适合下肢生理功能

的需要。身体的重量经髋关节和股骨头传到双脚。膝关节保证大腿和小腿之间具有一定的相对运动，以保证人体的稳定。美国还进行了在人体外侧安装机械骨骼即所谓“蟹壳”的研究，人的手足动作信息由机械检出后，再来驱动机械骨骼。通过机械骨骼来承受外部力量，可使人的力量增大许多倍，即借助机械可扩大人的机能和对外界的适应性。

4）模仿鸟类、昆虫和鱼类等生物的各种机械。模仿鸟类、昆虫和鱼类的形态构造特点，研制各种适宜在空中、水下活动的机械技术系统，也是仿生机械的内容。自然界能飞的动物种类接近全部动物的3/4，其中占主要地位的有600多种鸟类和35万多种昆虫。这些飞行动物为人类改进飞机性能和制造新型飞行器提供了天然的设计原型。鸟类和昆虫的某些特殊机能，如蚊蝇和蜜蜂等昆虫灵活机动的陡然起飞、翻转翅翼的高频振动、光面悬垂和空中定息等，都是现代飞机所做不到的。蜻蜓不仅飞得快，而且飞得高，飞得远，是因为它有柔软单薄的翅膀，飞行速度可达50km/h。蜻蜓翅膀上的翅痣具有消除飞行中翅膀颤动的特点。根据这个特点，在飞机设计中将飞机类似部分加厚，以克服机翼的颤动现象。此外，沙漠蝗、金色鹬的节能飞行等，都是飞行器设计中可以借鉴的。根据蝙蝠喉头发出的超声波可在空中导航和它对空中食物定位的原理，人类发明了雷达。根据苍蝇、蜻蜓的复眼原理，人类发明了复印机和印刷机的复眼透镜。根据响尾蛇的颊窝能感觉到0.001℃的温度变化的原理，人类发明了跟踪追击的响尾蛇导弹。人类还利用蛙跳的原理设计了蛤蟆夯，模仿警犬的高灵敏嗅觉制成了用于侦缉的“电子警犬”。

鲸、海豚和各种鱼类经过亿万年的进化，形成了适应于水中的多姿体形，包括适应于快速航行的纺锤形、适应于水底缓慢运动的平扁形、适应于穿入泥土或石洞间的圆筒形。脊鳍阔大的剑鱼速度可达110km/h，并能在几秒之内就可达到全速，这是现代快艇所不及的。鱼类除了有适于航行的形体外，同时还有特殊的推进和沉浮机能。人类根据水生动物尾鳍摆动式推进系统的生物力学原理，设计出一种摆动板推进系统。它不仅可以使船只十分灵活地转弯和避开障碍，还可以顺利地通过浅水域或沙洲而不搁浅。僧帽水母用感觉细胞控制浮鳔内的气体使身体沉浮，金枪鱼靠控制体内一种生理化学反应而沉浮。人类根据这些原理研制成潜水艇的沉浮系统。乌贼的体型虽然和鱼不太相同，但运动器官十分完善，它靠收缩腹肌把外套膜中的水从喷嘴迅速射出，借此推进身体前进。人类根据这个原理设计出喷水船。人类还模仿海豚皮肤可减少水阻的特点，制成了“人工海豚皮”。

## 7.4 仿生设计

### 7.4.1 生物形态与工程结构

经过了亿万年的进化，生物的形态是最优的。形形色色的生物结构中，有许多巧妙利用力学原理的实例。从静力学的角度出发，研究生物形体结构对人类工程设计产生的影响。

自然界有许多高大的树木，其挺直的树干不但支撑着本身的重量，而且还能抵抗大风及强烈的地震。这除了得益于它的粗大树干外，还靠其庞大根系的支持。一些巨大的建筑物便模仿大树的形态来进行设计，把高楼大厦建立在牢固可靠的地基上。

植物的果实担负着延续种族的任务，亿万年的进化使其果实多呈圆形。圆的外形使它们在较小的空间占用最大的体积来储存营养，同时使它们对外界的压力如风力等有较大的抵抗

力。如花生、核桃等还有着坚硬的外壳，可以保护里面相对娇嫩的果仁。

同样的，动物也具有对自然力的适应性，如蛋壳、乌龟壳和贝壳等，都巧妙利用了一定的力学原理。如果你握住一个鸡蛋，即使加力挤压，也很难把它弄破。原来蛋壳的拱形结构与其表面的弹性膜一起构成了预应力结构，在工程上称为薄壳结构。自然界中巧妙的薄壳结构具有各种不同形状的弯曲表面，不仅外形美观，还能够承受相当大的压力。在建筑工程上，人们已广泛采用这种结构，如大楼的圆形屋顶、模仿贝类制造的商场顶盖等。

动物界中，辛勤的蜜蜂被称为昆虫世界里的建筑工程师。它们用蜂蜡建筑极规则的等边六角形蜂巢，无论从美观和实用角度来考虑，都是十分完美的。它不仅以最少的材料获得了最大的利用空间，而且还以单薄的结构获得了最大的强度。

在蜂巢的启发下，人们仿制出了建筑上用的蜂窝结构材料，具有重量轻、强度和刚度大、绝热和隔音性能良好的优点。同时，这一结构的应用已远远超出建筑界，它已应用于飞机的机翼、宇宙航天的火箭甚至于人类日常的现代化生活家具中。

### 7.4.2　生物形态与运动

现代的各种交通工具，如汽车、飞机、舰船等，均需要一定的工作条件，若在崇山峻岭或沼泽中则无法工作。但自然界中有各种各样的动物，在长期残酷的生存斗争中，它们的运动器官和体形都进化得特别适合在某种恶劣环境下运动，并有着惊人的速度。

昆虫是动物界中跳跃的能手，许多昆虫的后腿特别发达，跳跃的本领异常高超。就目前研究所知，叩头虫和蚤类分别为动物界跳跃的冠、亚军获得者，它们的跳跃高度一般为其体长的几十倍，而且无须助跑，就会产生极高的加速度。而集跑、跳、飞于一体的全能冠军，则非蝗虫莫属。它有着异常灵活、机动的运动能力，给农作物带来巨大灾害。但若抛开这一点，单独研究其运动形态，则会给人们以很大的启迪。如果研究出了它的运动奥秘，则对目前飞机的改进有很大的促进意义，倘若离开了跑道，喷气式巨型飞机是无法起飞的，但蝗虫完全用不着这些。

动物界中的跳跃能手还有羚羊和袋鼠，这在非洲及澳大利亚的大草原上是非常著名的。带轮的汽车在沙漠上行走时会异常困难，但羚羊和袋鼠却是如鱼得水，它们是依靠其强有力的后肢在沙漠上跳跃前进的。现在已研制出一种“跳跃机”，在坎坷不平的田野或沙漠地区均可通行无阻。它没有轮子，是靠四条腿有节奏的相互协调的起落来前进的。

但是世界上还有许多地方，即使你拥有强壮有力的腿也是无法行进的，如南北极的茫茫雪原、杂草丛生的泥泞的沼泽地区等。漫步在南极茫茫雪原的绅士——企鹅，给了人类以极大的启示。它们在紧急情况时，可以以30km/h的速度飞跑，这是因为经过两千多万年的进化，企鹅的运动器官已变得非常适宜于雪地运行。它只要扑倒在地，把肚子贴在雪的表面上，蹬动双脚滑雪，便可飞速向前。受它的启发，人们已研制出一种越野汽车，可在雪地与泥泞地带快速前进，速度可达50km/h。

人类在水上航行的历史十分悠久，但活动能力却非常有限，远远不如人类在空中飞行和陆地上行走所取得的成就。许多鱼类的航速可轻而易举地超过目前世界上最先进的舰艇，其原因也是来自于大自然无所不在的进化演变，是亿万年来鱼类为了适应水中生活，便于追逐食物和逃避敌害的进化结果。

首先，鱼类的航行速度得益于其理想的流线形体形。这种体形使得它们受到摩擦阻力和

形状阻力的共同作用尽可能地减小。另外，人们还发现，鱼在水中运动时，由于尾部的摆动，产生一种弯曲波，使鱼的运动速度大大提高。另外，有些鱼的身体表面还附有一种黏液，这种黏液也能降低鱼在水中运动的摩擦阻力。

目前，有许多新型船只是按照鲸和海豚的体形轮廓及其身体各部比例而建造的，其航速大大提高。另外，最新的研究成果表明，海豚之所以游得快，不仅仅是因为其流线形体形，还由于其特殊的皮肤构造。海豚的皮肤可分为三层：第一层是光滑柔软的表皮层；第二层是白色的真皮层，它生有无数的乳头状、中空的突起物，且伸向黑色的表皮里面；第三层是很厚的脂肪层，很有弹性。由于这种构造，使海豚在水中游泳时，皮肤能顺从水的压力而波动，阻力小，摩擦力也小，其航速就快。人们模仿海豚的皮肤构造，用橡胶制成人造海豚皮——片流膜，并装在潜水艇上，使湍流减少了50%，大大提高了潜水艇航行的速度。

随着航空知识和对飞行生物有关知识的增加，人们在长期的飞行实践中，对飞机的机身、机翼和发动机进行了不断的改进，并取得了较高水平。目前，超音速飞机的时速已达到3600多千米，它已经接近声音传播速度的3倍；军用歼击机已能飞到30000m以上的高空，爬升的速度也能达到200m/s；军用轰炸机的航程可达14000km以上。飞机载重能力也有了较大提高，大型运输机虽然自重已达250t以上，还可以运载80多吨物资。尽管如此，动物在千万年的自然淘汰和进化过程中所掌握的飞行本领仍值得人类学习和借鉴。现代飞机的起飞和降落都需要很长的跑道，即使是直升机，也要像篮球场一样大小的空地作为起飞和降落的基础，但飞行动物均不需任何空地和跑道，能在刹那间腾空而起远走高飞。

目前，飞机的燃料消耗非常大，但鸟类在长途飞行中却能充分利用空气的浮力，有时滑翔，有时振翅飞行，非常节省动力。因此，对飞行生物飞行本领的研究还需要仿生学家作出进一步的努力，从它们身上可以发现一些尚未被人类掌握的空气动力学规律，这对于研制及改进飞机是非常有益的。

## 7.5 仿生机械与机器人技术、康复工程

### 7.5.1 仿生机械与机器人技术

仿生机器人是仿生机械学中的一个最典型的应用实例，其发展现状基本上代表了仿生机械学的发展水平。日本和美国在仿生机器人的研究领域起步早、发展快，取得了较好的成果，例如，日本东京大学在1972年研究出世界上第一个蛇形机器人，速度可达40cm/s；日本本田技术研究所于1996年研制出世界上第一台仿人步行机器人，可行走、转弯、上下楼梯和跨越一定高度的障碍；美国卡内基梅隆大学于1999年研制的仿袋鼠机器人采用纤维合成物作为弓腿，被动跳跃时的能量仅损失20%～30%，最大奔跑速度超过1m/s。

我国对仿生机器人的研究始于20世纪90年代，经过十多年的研究，在仿生机器人方面也取得了很多成果，研制出了相关的机器人样机，而且有些仿生机器人在某些方面达到了国外先进水平。例如，北京理工大学于2002年研制出拟人机器人，具有自律性，可实现独立行走和太极拳等表演功能；北京航空航天大学和中国科学院自动化所于2004年研制出我国第一条可用于实际用途的仿生机器鱼，其身长1.23m，采用GPS导航，最高时速可达1.5m/s，能在水下持续工作2～3h；南京航空航天大学于2004年研制出我国第一架能在空中悬浮飞

行的空中仿生机器人——扑翼飞行器；哈尔滨工业大学于2001年研制的仿人多指灵巧手具有12个自由度和96个传感器，可完成战场探雷、排雷以及检修核工业设备等危险作业。

### 7.5.2　仿生机器人的研究

1. 运动机理仿生

运动机理仿生是仿生机器人研发的前提，而进行运动机理仿生的关键在于对运动机理的建模。在具体研究过程中，应首先根据研究对象的具体技术需求，有选择地研究某些生物的结构与运动机理；然后借助于高速摄影或录像设备，结合解剖学、生理学和力学等学科的相关知识，建立所需运动的生物模型，并在此基础上进行数学分析和抽象，提取出内部的关联函数，建立仿生数学模型；最后利用各种机械、电子、化学等方法与手段，根据抽象出的数学模型加工出仿生的软、硬件模型。

生物原型是仿生机器人的研究基础，软、硬件模型则是仿生机器人的研究目的，而数学模型则是两者之间必不可少的桥梁。只有借助于数学模型，才能从本质上深刻地认识生物的运动机理，从而不仅模仿自然界中已经存在的两足、四足、六足以及多足行走方式，同时还可以创造出自然界中所不存在的一足、三足等行走模式以及足式与轮式配合运动等。

（1）无肢生物爬行仿生　无肢运动是一种不同于传统的轮式或有足行走的独特的运动方式。目前，所实现的无肢运动主要是仿蛇机器人，它具有结构合理、控制灵活、性能可靠、可扩展性强等优点。美国的蛇形机器人则代表了当今世界的先进水平。2000年10月美国开发了一种由简单的、低自由度组件组成的、高柔性的、高冗余性的蛇形机器人，其外形类似眼镜蛇，长而细，能够收缩、侧行、跳过低障碍物，这是以轮子为基础的火星车无法做到的。我国第一台蛇形机器人在2001年由国防科技大学研制成功，长1.2m，直径6cm，重1.8kg，可蜿蜒前进、后退、拐弯和加速。其最大前进速度20m/min，换上“蛇皮”可在水中游动，可根据头部的视频监视器传回的图像发出具体的控制指令。

（2）两足生物行走仿生　两足行走是步行方式中自动化程度最高、最复杂的动态系统。世界上第一台两足步行机器人是日本在1971年试制的Wap3，最大步幅15mm，周期45s。但直到1996年，日本本田技术研究所才制造出世界上第一台仿人步行机器人P2。1997年，本田推出P3行走机器人，2000年推出ASIMO行走机器人，索尼也相继推出机器人SDR23X和SDR24X。本田公司的P2行走机器人高1.82m，体重210kg，能够行走，转弯，上、下楼梯和跨越15cm高、15cm长的障碍。P2行走机器人的改进型P3行走机器人身高1.6m，体重130kg，与人类更加接近。而ASIMO行走机器人身高1.2m，体重43kg，可实时预测以后动作，并且以事先移动重心来改变步行的形式，可连续地从直行改为转弯，可实现螃蟹的行走模式，可在斜坡上行走、单足站立。索尼的SDR24X行走机器人身高58cm，体重6.5kg，在水平、平坦路面上最快每分钟行走20m，在不平坦地面上最快每分钟行走6m。SDR24X行走机器人可以在10mm凹凸的路面上以及接近10°的斜坡上行走而不会跌倒，并能顺着挤压、牵引等外力作用做出适当的姿势防止跌倒，在跌倒后也可自己站起来；还可以通过CCD相机来识别障碍，并自行设计避障路线前进。

（3）四足等多足生物行走仿生　与两足步行机器人相比，四足、六足等多足机器人静态稳定性好，又容易实现动态步行，因而特别受到包括中国在内的近二十多个国家的学者的青睐。日本Tmsuk公司开发的四足机器人首次实现了可移动重心的行走方式。

（4）跳跃运动仿生 跳跃运动仿生主要是模仿袋鼠和青蛙。美国卡内基·梅隆大学研制出了模仿袋鼠的弓腿跳跃机器人，重2.5kg，腿长25cm，重0.75kg，采用1000N·m/g的单向玻璃纤维合成物做弓腿，被动跳越时能量损失只有20%～30%，最高奔跑速度略高于1m/s。日本Tamiya公司开发了一种袋鼠机器人，全长18cm，低速时借助前后腿步行，高速时借助后腿和尾部保持平衡，可通过改变尾部转向。明尼苏达大学的微型机器人可跳跃、滚动，可登楼梯，跳过小的障碍，两个独立的轮子可帮助机器人在需要时滚到一定的位置。美国太空总署和加州理工大学研制的机械青蛙重约1.3kg，有一条腿，装有弹弓，一跃达1.8m，可自行前进及修正路线，适合执行行星、彗星及小行星的探索任务。

（5）地下生物运动仿生 江西南方冶金学院袁胜发等人模仿蚯蚓研制了气动潜地机器人。它由冲击钻头和一系列充气气囊节环构成，潜行深度10m，速度5m/min，配以先进的无线测控系统，具有较好的柔软性和导向性，能在大部分土壤里潜行，但还不能穿透坚硬的岩石。

（6）水中生物运动（游泳）仿生 海洋动物的推进方式具有高效率、低噪声、高速度、高机动性等优点，成为人们研制新型高速、低噪声、机动灵活的柔体潜水器的模仿对象。其突出的代表有美国麻省理工学院的机器金枪鱼和日本的鱼形机器人。机器金枪鱼由振动的金属箔驱动外壳的变形，模仿金枪鱼摆动推进。继机器金枪鱼之后，他们还研制出机器梭子鱼和一种涡流控制的无人驾驶水下机器人。日本东海大学的机器鱼利用人工前鳍来达到前进及转弯等相关动作，相对于机器金枪鱼而言摆动较小。北京航空航天大学的机器鱼重800g，在水中的最大速度为0.6m/s，能耗效率为70%～90%。上海交通大学模仿水蛭节状结构研制出了水下蠕虫机器人。

（7）空中生物运动（飞行）仿生 目前，对飞行运动进行仿生研究的国家主要是美国，剑桥大学和多伦多大学也在开展相关方面的研究工作。加州大学伯克利分校制造了机器人苍蝇，翼展3cm，重量300mg，依靠3套不同的复杂机械装置来进行拍打翅膀、旋转操作，每秒振翅200次。佐治亚州理工学院与剑桥大学合作研制了类似飞蛾的昆虫机器人Entomopter，体宽1cm，每秒振翅30次，靠化学“肌肉”驱动。

2. 控制机理仿生

控制机理仿生是仿生机器人研发的基础。要适应复杂多变的工作环境，仿生机器人必须具备强大的导航、定位、控制等能力；要实现多个机器人间的无隙配合，仿生机器人必须具备良好的群体协调控制能力；要解决复杂的任务，完成自身的协调、完善以及进化，仿生机器人必须具备精确的、开放的系统控制能力。如何设计核心控制模块与网络，以完成自适应、群控制、类进化等一系列问题，已经成为仿生机器人研发过程中的首要难题。

自主控制系统主要用于在未知环境中，系统的有限人为介入或根本无人介入操作的情况下。它应具有与人类相似的感知功能和完善的信息结构，以便能处理知识学习，并能与基于知识的控制系统进行通信。嵌套式分组控制系统有助于知识的组织、基于知识的感知与控制的实现。

自主控制系统作为人类操作者的替代者，可用于许多对人类操作者有危害的场合下，还可以用于比人类操作者性能更高的智能系统中。假设自主控制系统参与有目标的行为之中，而问题又可以分解为子问题或子任务等。当然，智能控制的所有阶段都可以在自主控制系统中被完成。非常一般的自主控制系统的结构包括传感器、感知、知识库、通过外界闭合的控

制和驱动回路，通过通信连接与外部联系起来。这种通信联系用来指定或修正任务，接收事先考察的结果，启动、中止或修正所需要的自主控制系统动作，还可以提供将几个自主控制系统单元作为一个整体的通信。处理冗余、空间约束和加权约束特性以及实时运行都是非常重要的特性。

3. 信息感知仿生

信息感知仿生是仿生机器人研发的核心。为了适应未知的工作环境，代替人完成危险、单调和困难的工作任务，机器人必须具备包括视觉、听觉、嗅觉、接近觉、触觉、力觉等多种感觉在内的强大的感知能力。单纯地感测信号并不复杂，重要的是理解信号所包含的有价值的信息。因此，必须全面运用各时域、频域的分析方法和智能处理工具，充分融合各传感器的信息，相互补充，才能从复杂的环境噪声中迅速地提取出所关心的正确的敏感信息，并克服信息冗余与冲突，提高反应的迅速性和确保决策的科学性。

实现机器人的信息感知，就必须依靠仿生系统感知器。仿生系统感知器(传感器)分为内部感知器和外部感知器。所谓内部感知器是完成仿生系统运动所必需的那些传感器，如位置、速度传感器等，它们是构成系统不可缺少的基本元件；外部感知器取决于仿生系统所要完成的任务。常用的外部传感器有力觉传感器、触觉传感器、接近觉传感器、视觉传感器等。对于需要与环境有接触的作业，如抓取、装配等就需要有力(腕力)觉传感器；对于需要在狭窄的空间作业，又不碰上其他运动物体，需要有接近觉传感器。一方面，人类有相当强的对外感受能力，尽管有时人的动作并不十分准确，但人可以依靠自己的感觉反馈来调整或补偿自己动作的误差，从而能够完成各种简单的或复杂的工作任务。由此可见，感觉能力能够补偿动作精度的不足。另一方面，人们的工作对象有时是很复杂的，例如当人抓取一个物体时，尽管物体的大小和软硬程度通常不一样，但人能依靠自己的感觉能力用恰当的夹持力抓起这个物体，并且不会损坏它。因此，有了感觉能力，才能适应工作对象的复杂需要，才能有效地完成工作任务。过去，由于仿生系统(机器人)没有感觉能力，唯一的办法就是提高它的动作精度，并限制工作对象不能很复杂。但是，动作精度的提高受各个方面的限制，不可能无限制地提高；并且工作对象有时也是很难加以限制。因此，要使仿生系统具有更好的任务适应性，使其具有感知能力是十分重要的。

仿生系统需要的最重要的感觉能力可分为以下几类：

1）简单触觉：确定工作对象是否存在。

2）复合触觉；确定工作对象是否存在以及它的尺寸和形状。

3）简单力觉：沿一个方向测量力。

4）复合力觉：沿一个以上方向测量力。

5）接近觉：工作对象的非接触检测。

6）简单视觉：孔、边、摄角等的检测。

7）复合视觉：识别工作对象的形状等。

除了上述能力外，仿生系统(机器人)有时还需要具有温度、压力、滑动量、化学性质等感觉能力。

仿生系统对传感器的一般要求是：

1）精度高、重复性好。传感器的精度往往直接影响仿生系统(机器人)的工作质量，机器人系统能否准确无误地工作取决于传感器的测量精度。

2）稳定性好、可靠性高。机器人传感器的稳定性和可靠性是保证机器人能够长期稳定工作的必要条件。机器人经常是在无人看管的条件下代替人工进行操作，万一它在工作中出现事故，轻者影响工作的正常进行，重者造成严重的事故。

3）抗干扰能力强。机器人传感器的工作环境往往比较恶劣，因此需要传感器能够承受强电磁干扰、强振动，并能够在一定的高温、高压、高污染环境下正常工作。

4）重量轻、体积小、安装方便可靠。对于安装在机器人手臂等运动部件上的传感器，重量要轻，否则会加大运动部件的惯性，影响机器人的运动性能。对于工作空间受到某种限制的机器人，对体积和安装方向的要求也是必不可少的。

4. 能量代谢仿生

能量代谢仿生是仿生机器人研发的关键。生物的能量转换效率最高可达100%，肌肉把化学能转变为机械能的效率也接近50%，这远远超过了目前使用的各种工程机械；另外，肌肉还可自我维护、长期使用。因此，要缩短能量转换过程，提高能量转换效率，建立易于维护的代谢系统，就必须重新回到生物原型，研究模仿生物直接把化学能转换成机械能的能量转换过程。

5. 材料合成仿生

材料合成仿生是仿生机器人研发的重要部分。许多仿生材料具有无机材料所不可比拟的特性，如良好的生物相容性和力学相容性，并且生物合成材料时技能高超、方法简单，所以，其研究目的一方面在于学习生物的合成材料方法，生产出高性能的材料；另一方面是为了制造有机元器件。因此，仿生机器人的建立与最终实现并不仅仅依赖于机、电、液、光等无机元器件，还应结合和利用仿生材料所制造的有机元器件。

### 7.5.3 康复工程与假肢技术

传统的医学和医疗工程总是把危及人体生命的内科或外科急病作为诊断与治疗的重点，但是社会上还有成千上万患有无法治疗的功能障碍的残疾人。据联合国卫生组织的估计，全世界残疾人约有4.5亿，占总人口的10%。我国的残疾人数根据全国残疾人抽样调查推算约有5164万人，其中，听力语言残疾约1770万人，智力残疾约1017万人，肢体残疾约755万人，视力残疾约755万人，精神残疾约194万人，综合残疾约673万人。

原来，对患有肢体等骨骼运动系统功能障碍以及视觉、听觉等感觉系统功能障碍的康复，主要是通过疗养和训练等途径来开发自身残存的功能，以促使其自立，谋求回归社会。后来，特别是在第二次世界大战以后，随着控制论的发展，促进了人—机系统的结合，开始了用器械装置来代替补偿人体失去的运动和感觉功能的研究。近些年来，这些研究与超大规模集成电路、半导体传感器等现代机械电子技术相结合，有了很大发展，从而形成了一门新兴的边缘学科——康复工程学。

一般来说，应用工程技术来帮助残疾人代偿已失去的功能，大致可划分为两个范畴：一个是属于系统工程的范畴，它是通过改变或重新建立新的生活环境条件，使有功能障碍的患者得到适应和方便；另一个就是属于康复工程的范畴，它是通过综合应用精密机械、现代控制和信息处理等技术来设计高性能的器械，并确立机器和人之间的信息传递手段，起到代偿功能的作用。特别是由于高级自动化课题中机器人技术的发展，开拓了机器人在康复工程领域中应用的广阔前景，将给残疾人带来更多的福音。

根据对功能障碍代偿的目的不同，可把代偿器械分为两大类：一类是直接安装于人体上进行代偿失去功能的器械，如各种假肢、辅助装具等；另一类是装设于人体外且构成独立系统的、起间接代偿功能的器械，如各种环境控制装置、医疗机械手、机器人、移动机械等。但是，不论是哪一种代偿器械，都要使残疾人自身能够进行操作，所以器械的动作指令必须利用残疾人残存的机能。目前，可实际有效利用的残存机能大致有以下三种：

1）人体的机械运动位移。如利用身体某一部分运动所产生的动作位移和部分肌肉收缩所产生的膨起位移等，这是一种基本的方法。

2）人体的肌肉表面动作电位。肌肉电位是人体的一种生物电，利用这种生物电作为控制信号源已有较大的发展。

3）呼气压力、声音信号等。虽然采用声音作为输入信号尚处于开发阶段，但它已成为一种新的发展方向，是研究医疗机器人的一个重要课题。

1. 直接代偿的器械

直接代偿的器械如假手、假足等，都是直接安装于人体上，用来代偿失去的功能。它们设计的出发点是尽可能地采用与人体一样的形状、功能和动作方式。此外，便于携带也是研制这种器械的一个共同问题。因此，运动自由度的配置、结构的轻量和小型化、操作方便、可靠性高都是研制这些器械的主要问题。

对于假手来说，根据空间机构学的分析，为了满足残疾人必要的日常生活动作的要求，除了手指外，全臂假手的自由度必须有6～7个，即肩部3个自由度、肘部1个自由度、前臂3个自由度。但是，对于这么多的自由度数，是不可能都利用残疾人残存的机能来进行控制，而必须采用独立的控制系统。所以，应用微型计算机控制，已成为全臂电动假手研制的一个主要方向。

如图7-1所示为日本开发的一种全臂电动假手的研究系统。可以看出，该系统包括有声音识别，集成化的数字控制方式的微型电子计算机，精密机械设计，整体机械部分的制造，轻型、高强度材料的开发，小型、轻量微型电动机的研制及电动机转速的数字控制方式的开发等跨越广阔领域技术的高度利用。这个系统与工业机器人的差别在于，它是依靠残疾人本身进行人工操作，而且是一边通过本身视觉进行位置感觉反馈，一边控制假手进行动作。

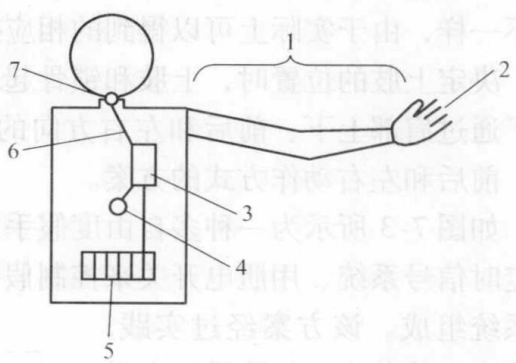



图7-1　全臂电动假手的研究系统

1—7自由度电动假手　2—手臂套筒
3—微型计算机　4—肌电控制　5—电源
6—人臂和假手的运动分析　7—声音控制

显然，多自由度与轻量化的要求是相互制约的。通常，假手动力装置和减速机构部分的重量要占到总重量的50%～60%。因此，研制小型、高效、大输出的驱动装置是开发全臂电动假手的一个关键问题。

在控制方式中，能够按照人的意志来控制假手是一种最理想的方案。这时，控制信号源的取出可能有三种途径：直接把人的中枢神经系统中的指令取出来、把通过运动神经系统的信号取出来、把运动神经系统的脉冲到达肌肉所产生的肌电位取出来。目前，采用第三种方法的研究，即肌电控制的假手占据主导地位。

现在，利用前臂残存的肌肉上由于手指屈伸运动所产生的肌电位来控制具有手指开闭的前臂假手，在实际应用中已经取得成功，如图 7-2 所示。当假手空载作张开动作时，电动机输入通过行星减速器 1、齿形联轴节 6、双向超越离合器 7 和锥齿轮 3 输出，实现快速传动；而当假手闭合开始捏取物体时，由于负载的作用，使双向超越离合器 7 脱开、单向超越离合器 8 接合，于是电动机输入通过行星减速器 1、行星减速器 2、单向超越离合器 8 和锥齿轮 3 输出，实现慢速增力传动。这两种输出的变换是靠负载的变化而自动进行的，所以该假手具有良好的机械性能。

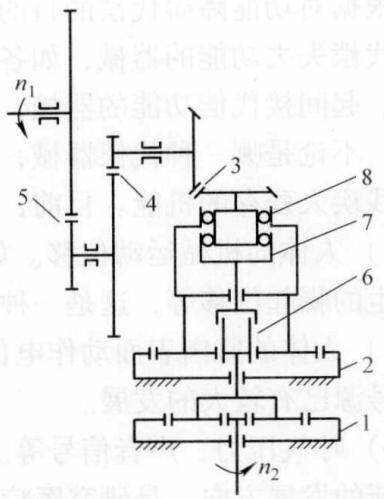



图 7-2 肌电位控制前臂假手传动系统

1、2—行星减速器 3—锥齿轮 4、5—传动齿轮 6—齿形联轴节 7—双向超越离合器 8—单向超越离合器

但是，随着假手自由度数的增多，残疾人相对应部位的肌电控制信号源就不能满足。所以，尽管已对多自由度动力假手作了多次研究开发，然而可供实用的还很少。在构成多自由度动力假手的控制系统上，最值得注意的问题是要研制出对使用者不需通过特别学习训练就能操作假手的系统。目前，已试验出一种利用残疾人存在的幻肢感觉来进行手部控制的方式。该方式是在残端的适当部位上安装多组电极，则对应于几种不同的幻肢手部的运动，可产生不同的肌电图像，通过肌电信号处理及图像识别方法，把这几种图像分离，便可用来进行控制。

总之，由于大部分手部动作是依靠前臂的肌肉及其肌腱来进行的，所以前臂的肌电中包含着手部动作的大部分信息，可以按照人的意志来控制前臂假手。但是，在全臂假手中情况则不一样，由于实际上可以得到的相应控制信息极少，所以不能采用上述方法。不过有人认为，决定上肢的位置时，上肢和锁骨起着协调作用，可以把上肢看作为锁骨的延伸物，并研究了通过肩部上下、前后和左右方向的动作在有关肌肉上所产生的肌电位，来控制手部上下、前后和左右动作方式的方案。

如图 7-3 所示为一种多自由度假手肌电信号系统，它由用电刺激作为选择假手动作类型的定时信号系统、用肌电开关来控制假手动作方向的多自由度假手（上臂、肩假手）的控制信号系统组成。该方案经过实践，具有实用价值（日本早稻田大学研制）。

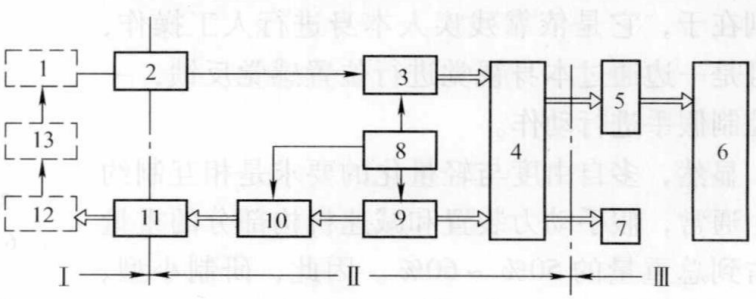



图 7-3 多自由度假手肌电信号系统组成

1—肌电 2—表面电极 3—肌电开关 4—动作方面决定 5—假手控制 6—多自由度假手 7—监控器 8—刺激定时控制 9—动作方向切换 10、12—电刺激 11—刺激电极 13—判断

为了研制出具有实用化的多自由度上臂假手，日本东京电机大学开发了一种简易型电动假手及电路（见图 7-4）。该假手是利用残疾人的上肢残端操作接触传感器的方法来实现手指开闭、腕部旋转和肘部屈伸三种运动，效果良好。

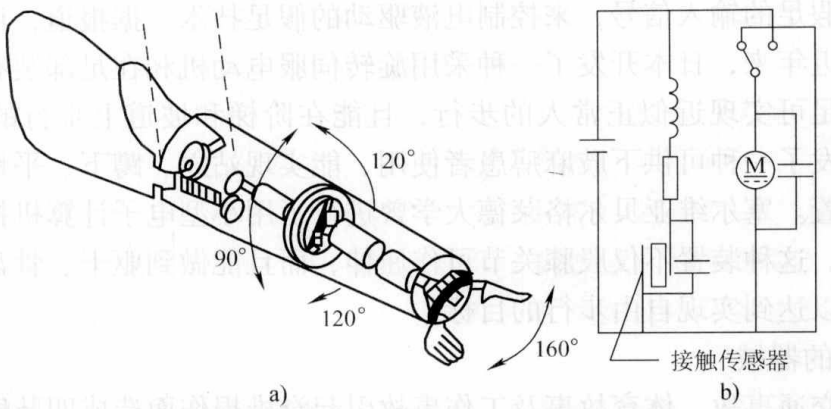



图7-4　简易型电动假手及电路

a）简易型电动假手　b）电路

研制儿童用假手和成人用多关节假手是假肢发展的一个方向。瑞士与英国已具有制造儿童假手的丰富经验。多关节假手即所谓适应手，它不仅在外表装饰上，而且在手的抓取自由度上，都完全仿照人的手进行设计。

人体的感觉反馈自动调节机能非常高级，而以前的假手都采用开环控制方式，只能代替残疾者丧失的机械功能方面，缺乏对恢复感觉功能研究的注意，故使用起来仍不很方便。因此，使假手具有感觉反馈是提高其功能的一个重要的课题。这样，将使假手不仅可以随意运动，而且可能有反射运动，成为一个较高级的自动调节系统。感觉反馈有机械式和电子式两种，目前比较有前途的一种是采用电刺激的方法。它是把来自压觉传感器的信号转换成为电脉冲，并使用表面电极对皮肤进行电刺激，从而获得感觉反馈。

除了采用人体肌电作为控制信号外，有的还在进行更高级的脑电控制研究。据资料报道，美国一大学研制成一个由思想支配、可做七种动作的假臂。这种假臂是通过贴置在大脑部位的表面电极所拾取的脑电信号，并传给装在假臂里的微型电子计算机来控制动作的。

上述利用生物电来操纵机械进行动作的方式，称为生物电控制，这种控制方式是仿生学研究的一项重要内容，它不仅对康复医学而且对宇宙开发和国防军事都有着积极的意义。

假足技术的研究也已引起很大的重视。与假手比较，其主要特点是用于步行，所以不必要有如假手那样多的自由度；但是其在一瞬间要支撑人体全部的重量，所以要求有充分的稳定性。

目前，假足发展的趋势概括起来，有以下几点：应用积木式系统、构造轻型化、佩戴舒适和外形美观、关节结构功能的改进。若从控制的观点来说，现在主要是进行单支假足的研究，可分两大类：一种是非动力控制的、利用被动的机构（机械的、液压的或气动的）来实现步态的方式；一种是采用动力控制的方式，以达到改善步态，实现上阶梯、爬坡等复杂的动作。

近代的假足多采用连杆机构组成“骨骼”。为了减轻重量，采用高强度铝合金管作为支承负荷的结构，并通过它把必要的关节和脚用接头结合在一起。接受腔一般由铸模树脂制造，而假足的外表装饰由泡沫塑料组成。

在非动力控制的假足中，关键的问题是研制出性能优良的膝关节机构。目前的趋势是采用具有制动系统的膝关节取代以前所用的固定式膝关节，以使假足在游离状态时具有优美的步态和在站立时具有稳定自锁的功能。

在动力控制假足技术的研究方面，已有不少学者从运动学和动力学的角度，对人体双足步行的平衡协调及稳定支持问题进行了模拟实验研究。国外已开发了一种利用来自另一条健

全腿的信息作为假足的输入信号，来控制电液驱动的假足技术。据报道，该假足技术已达到实用化的要求。近年来，日本开发了一种采用旋转伺服电动机和在足部装有信息传感器的动力假足。这种假足可实现近似正常人的步行，且能在阶梯和坡道上步行的同时改变步行速度；此外，还开发了一种可供下肢麻痹患者使用、能实现站立、蹲下、平地步行及升降阶梯等动作的动力装置。塞尔维亚贝尔格莱德大学曾进行了用小型电子计算机控制的躯干、下肢电动装置的研制。这种装置不仅股膝关节可作屈伸，而且能做到躯干、骨盘旋转、倾斜等人体正常的动作，以达到实现自由步行的目标。

2. 间接代偿的器械

当前，由于交通事故、体育故事及工伤事故引起脊椎损伤而造成四肢瘫痪或行动不自由的患者日益增多，所以，间接代偿器械的研究在许多国家中都受到很大的重视。在这项技术中，主要问题是选择操纵方式。由于患有高位截瘫的病人只能利用一些残存的机能来作为动作指令，所以需要使用一些专门的传感器。

对于这种器械，通常安装使用电动式轮椅车装具，有的还开发了在电动轮椅车上固定有机械手的器具。患者通过头部、颈部的动作，或前额部位的肌电，或眼珠运动，甚至是利用脑电波作为指令来操作。这种研究已在许多国家积极开展。为了给手、足有重度障碍的患者在日常生活方面提供全面帮助，近年来，在国外研究开发了一种环境控制装置系统。该装置由传感器、显示器和本体等组成。利用残疾人的身体动作，通过传感器和本体，一边用显示器进行确认，一边操作电视机等连接机器，如图 7-5 所示。

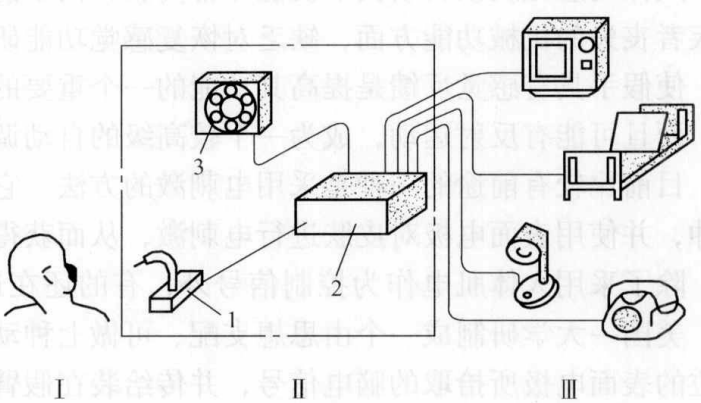



图 7-5 环境控制装置系统

Ⅰ—患者 Ⅱ—环境控制装置 Ⅲ—连接机器

1—传感器 2—环境控制装置本体 3—显示器

通常，最普遍采用的是呼吸气压控制的开关控制系统。但是，由于这种装置受到输入信号数目的限制，所以在选择控制对象机器时，必须依靠循环来选择控制对象，这样既花费时间又需对控制对象机器作限制。为了弥补这些缺点，近年来正在积极开发用声音输入、微型计算机控制的环境控制装置。该装置可按随机抽样选择输入信号，从而能控制范围广阔的对象机器。它把特定的说话者离散的声音语句与已事先学习的声音图谱作对照从而进行识别，识别时作为对照用的声音图谱，是由预先作三次发音所得的图谱平均化后存储在随机存取的存储器中。正在开发的系统可识别 100 个甚至是更多的语句。目前在国外，这种用微处理器组成的环境控制装置已由几家公司做成商品。

有关资料表明，应用这种环境控制装置技术，可使患者远程操纵电灯、收音机、电视机、机械手以及操作电动轮椅车和电动打字机等，为四肢瘫痪患者服务提出了一种新想法，促进了医用护理机器人的研究和发展。

移动机械的开发也已十分活跃，特别是研制了适用于下肢麻痹、四肢瘫痪、大脑性麻痹、脊椎裂、多发性硬化症、肌营养不良、小儿麻痹症、风湿性疾病、老年病以及不能行走的残疾

人的各种型号的轮椅。目前，已生产出一种起立轮椅，该轮椅结构简单，残疾人无需他人协助，可由自身的肌力操纵或用外部电力驱动起立机构，使自己从座位上慢慢地起立或返回到座位上，能随心所欲地停留在任意高度上，操作自如。这种轮椅可自行移动，使残疾人获得更大的自理能力，扩大了他们的活动范围及寻找职业和重新受训的机会，而且可帮助他们随时随地进行起立锻炼，有益于他们的健康。电动轮椅的发展也日益增长，并趋于多功能化，例如通过操纵可使轮子转动90°、实现轮椅的横向移动、座位可以自动升降、座位靠背可以从垂直位置向后倾斜15°左右等，从而大大提高了残疾人恢复正常生活的可能性。

此外，随着机器人技术的发展，步行式轮椅也得到了发展。这种轮椅打破了上述轮椅只能跑平地的局限，能在较为复杂的道路上行驶，跨越障碍、会上楼梯，为残疾人在公共场所的活动提供了更多的便利。据报道，1985年，日本研制成一台专为残疾人上楼梯而设计的轮椅。该轮椅为履带式步行装置，通过四个电动机驱动，操纵灵活。

人的80%的感觉信息要来自于眼睛，所以当人双目失明后，对工作和生活都会带来极大的不便。为了解决盲人的行动问题，采用的辅助手段大致有三种：手杖、导盲犬和电子机械装置。迄今为止，利用机器作为辅助步行的装置中，激光手杖和超声波眼镜是比较有效的两种步助器具。众所周知，激光手杖是在盲人手杖上安装有三个不同方向的激光发射器和接收器，接收器可以判断三个不同方向是否有障碍存在；而超声波眼镜与“蝙蝠眼”的原理相似，它能发射和接收超声波，然后传给计算机，从而判断出声音的方向和远近。由于超声波对不同障碍物的反射是不同的，所以对于经过专门训练的病人，还能使他辨别若干物体的种类。

近年来，英国和美国正在人体进行人工眼的探索研究。它是在人大脑的视觉区中埋藏电极，该电极与人体外的光线接收器相连。当有某种图像光信号时，电极就刺激大脑视觉中枢，从而产生相应图像。但是，目前这种人工眼还只能识别简单的图形和字母，离实用还很远。

日本机械技术研究所从1977年开始，进行了以导盲犬为目标模型，开发步行引导技术的计划。这种机械称为导盲犬机器人，它是作为超声波眼镜等装置和人工眼的中间阶段的研究，即为解决辅助盲人行动问题的一种过渡手段，如图7-6所示。导盲犬机器人的基本工作原理是通过机器对障碍物识别信息的处理机能来移动机器；而盲人则根据逐次接收到的有关障碍物信息的反馈，在某种程度上选择取舍，并决定自己的行动。这种导盲犬机器人的功能大致包括有三种：能按照盲人的指令，引导盲人前进、左弯或右弯等动作；当检测到有障碍物的场合，能不服从盲人的命令而停车，并通知盲人；能进行人机之间的信息传递，具有位移和速度协调控制功能，当盲人离开对应机器轨迹规定的安全区域时，可通过电刺激来引导盲人。这种技术的研究是应用机器人工程和人—机系统技术进行的、为辅助盲人步行的基

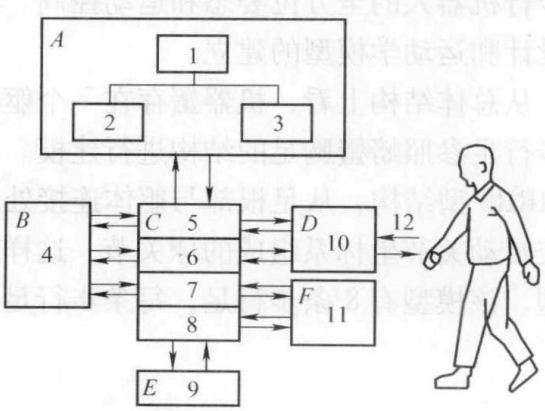



图7-6　导盲犬机器人系统

*A*—移动用知识数据区　*B*—外界传感器系统
*C*—中枢系统　*D*—通信系统　*E*—效果图系统
*F*—内部传感器系统
1—推理机构　2—数据　3—规则　4—环境信息
5—环境信息管理　6—规划　7—引导　8—操纵
9—移动机构　10—命令理解、引导信息提示
11—位置、方向、速度　12—超声波

础研究，目前已成功地进行了静磁环境的模拟试验。实际上，这项技术不仅可用作盲人的步行引导手段，而且可广泛地作为厂内搬运机械移动的引导技术。

## 7.6 仿生机械实例

### 7.6.1 仿生机器蟹

仿生机器蟹的外形和功能以三疣梭子为生物原型，共有 8 只步行足，每只步行足有 3 个驱动关节，共有 24 个驱动关节，由 24 台伺服电动机驱动，形成 24 个自由度。仿生机器蟹模拟海蟹的多种步态，能够实现灵活的前行、侧行、左右转弯、后退等 14 个动作。步行足配有 16 只力传感器，来感知外部环境，检测足尖落地和步行足是否碰到障碍物等信息，为步行足的路径规划提供信息。系统的硬件构架采用嵌入式结构，以 ARM 系统、DSP 芯片作为仿生机器蟹的核心控制器，完成复杂运动的规划和协调任务的运算。该系统采用红外线遥感、力传感器、视觉传感器等，运用多传感器信息融合技术实时辨别外界环境，使机器蟹具有较高的智能性，能够实现在沙滩、平地、草地等环境中前进、后退、左右侧行及任意位置、任意角度、任意方向的转弯等。机器蟹利用红外线遥感控制，具有一定的越障能力和爬坡能力。

该机器蟹每套执行机构有 3 个自由度，即该机器蟹总共有 24 个自由度。这么多的自由度对机器蟹的机构设计、运动学分析、实时控制、动作协调、步态分析等提出了严峻的挑战，但同时也是当代机器人研究的一个重点。螃蟹模型是一种具有冗余自由度的复杂多环并联结构，其自由度大于 6。在实际设计中，只需满足模型自由度数大于等于 6，就可以实现对步行机器人的全方位姿态和运动控制。将螃蟹抽象模型进一步简化，以便于实际样机的分析设计和运动学模型的建立。

从总体结构上看，机器蟹存在一个躯体的中心构件和多个步行足的开链分支机构，每一条步行足参照螃蟹胸足的结构进行建模。步行足模型经简化后，成为类似 3 关节串联操作臂的 RRRS 型结构，从足根部与躯体连接处起计，包括 3 个转动关节和 1 个位于足尖的由 3 个正交转动关节坐标系组成的球关节，这样就得到了如图 7-7 所示的仿生机器蟹步行足系结构模型。该模型有 8 条步行足，每条步行足有 3 个轴线呈空间分布的转动关节。

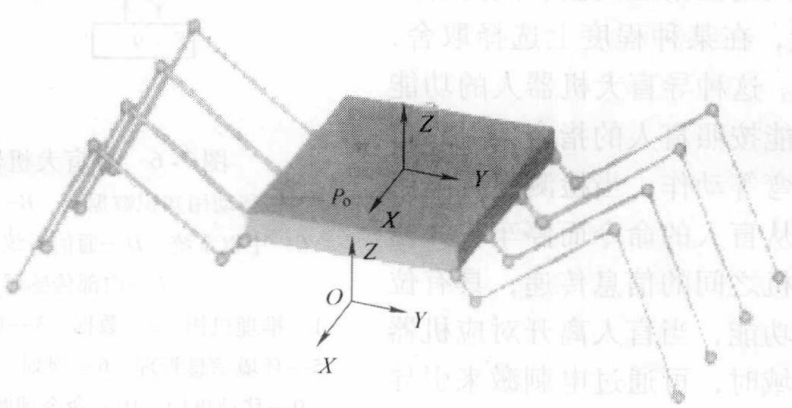



图 7-7 仿生机器蟹步行足系结构模型

考虑到机器蟹实际可能的结构，对该模型的描述作适当的简化和假设：各条步行足的结构及参数相同，且于躯体坐标系的平面对称分布，安装高度完全一致，而且初步假设躯体为扁平矩形结构。

三关节式步行足的结构如图7-8所示，每条步行足从躯体连接处开始，分为基节、腿节、胫节。设机体与各腿的连接点为$O_i(i=1,2,\cdots,8)$，坐标系为$O_{xyz}$，$X$轴过$O_i$垂直于机体平面且方向向上，$Y$轴同机体前进方向(考虑纵向爬行时为向前)，$Z$轴由右手法则确定。

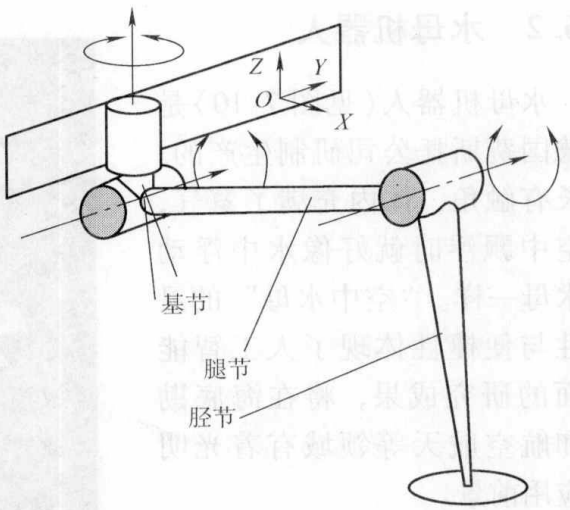



图7-8　三关节式步行足的结构简图

该多足机器蟹通过直流减速电动机和传动带轮，分别作为动力装置和传动装置来对足部进行驱动。每条腿由3个电动机和1个副传动带轮装置组成。整个机械传动装置如图7-9所示。

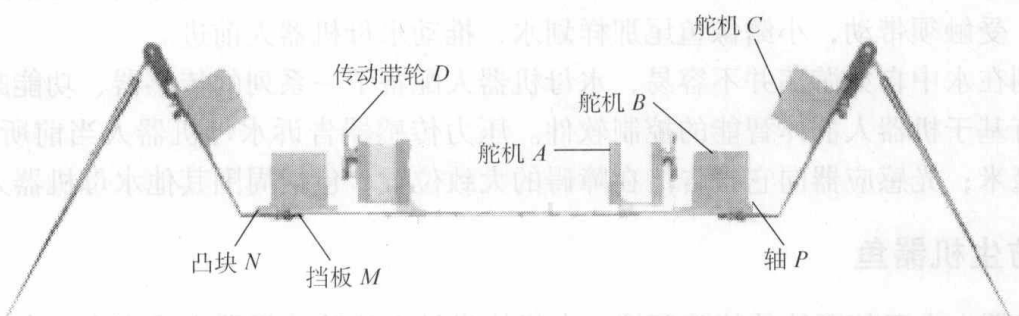



图7-9　机械传动装置示意图

机械传动装置的驱动过程主要涉及以下方面：

(1) 驱动方式　根据对螃蟹的观察，其大臂根部关节具有水平、铅垂两个方向的自由度，因此在机器蟹主体板身上交错地放上两组减速电动机，分别控制机器蟹大臂两个方向的自由度。其中，舵机$A$、$C$控制足部在铅垂面内的运动，舵机$B$控制足部在水平面内的运动。

(2) 传动方式　舵机$A$、$C$通过传动带轮的传动，同时控制足部的复合运动。$D$为与舵机固结的传动带轮，传动带固定在传动带轮的一侧，绕过下端的定滑轮。当$A$转动时，绷紧的传动带带动固定在它上面的挡板$M$一起转动，同时舵机$B$的右端突出部分$N$与$M$相接触($M$压在$N$上)并随其一起运动；舵机$B$左端转轴固定在主体板身上，于是舵机$B$形成了绕轴$P$转动的杠杆机构，在铅垂面内运动。一方面，由于舵机传动轴作180°往复运动，通过计算可得足部在铅垂面内摆动幅度可达33°，符合越障要求；另一方面，舵机$B$的传动轴直接固定在足部，因此直接带动足部在水平面内运动。

膝部关节的运动较为简单，其驱动、传动同时由舵机$C$完成，且只有在水平面内的1个自由度。

### 7.6.2 水母机器人

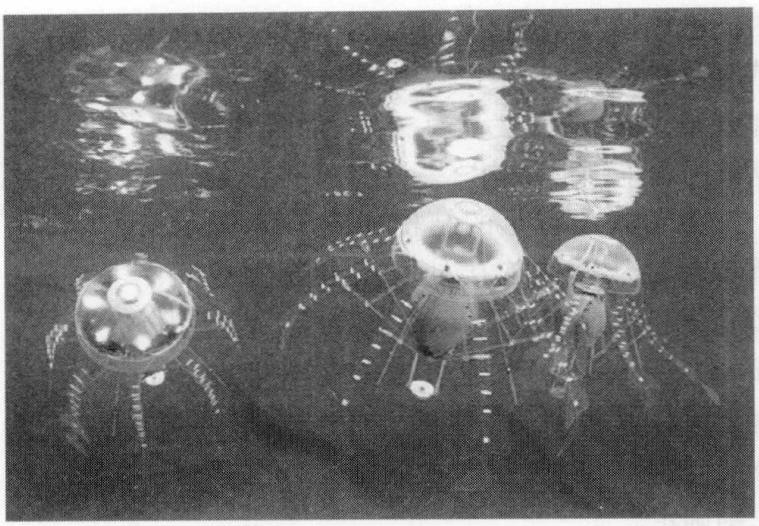


图 7-10 水母机器人

水母机器人(见图 7-10)是由德国费斯托公司研制生产的。它长有触角，体内充满了氦气，在空中飘浮时就好像水中浮动的水母一样。“空中水母”的灵活性与便捷性体现了人工智能方面的研究成果，将在海底勘探和航空航天等领域有着光明的应用前景。

水母机器人的球形身体是个用激光烧结制成的密封舱。它长着 8 根触须，这些仿生触须的构造取材于对鱼鳍功能的剖析。每根触须包含软硬适度的“主心骨”，骨外面连着柔性的表面，表面分成两个腔，压力可以分别调整，使整个触须向某个方向弯曲。每根触须的顶端都有小鳍。受触须带动，小鳍像鱼尾那样划水，推动水母机器人前进。

要做到在水中自如游荡并不容易，水母机器人配备了一系列的传感器、功能颇强的通信系统，还有基于机器人群体智能的控制软件。压力传感器告诉水母机器人当前所处的深度，精确到几毫米；光感应器向它报告潜在障碍的大致位置，包括周围其他水母机器人在哪里。

### 7.6.3 仿生机器鱼

水下机器人由于其所处的特殊环境，在机构设计上比陆地机器人难度大，在水下深度控制、深水压力、电路绝缘处理及防漏、驱动原理、周围模糊环境的识别等诸多方面的设计均需考虑。以往的水下机器人采用的都是鱼雷状的外形，用涡轮机驱动，具有坚硬的外壳以抵抗水压，但由于传统的操纵与推进装置的体积大、重量大、效率低、噪声大和机动性差等问题，一直限制了微小型无人水下探测器和自主式水下机器人的发展。鱼类在水下的行进速度很快，金枪鱼速度可达 105km/h，而人类最快的潜艇速度只有 84km/h，所以鱼的综合能力是人类目前所使用的传统推进和控制装置所无法比拟的。鱼类的推进方式已成为人们研制新型高速、低噪声、机动灵活的柔体潜水器模仿的对象。仿鱼推进器效率可达到 70% ~90%，比螺旋桨推进器高得多，有效地解决了噪声问题。

仿生机器鱼是模仿鱼类游动的推动机理，通过机械、电子机构或功能材料(形状记忆合金、人造肌肉等)来模拟鱼类的游动推进动作，在水中利用身体、尾鳍或胸鳍的摆动产生推进波，并作用于身体产生向前推力，从而实现运动的水下航行器。近年来，全球范围内研究人员正在研制外形和活动像水下生物的新型机器人，这些模仿自然生物的机器人比普通机器人更具有效探测性。

机器金枪鱼(见图 7-11)是麻省理工学院在机器鱼研制方面取得的最新成果。这个新原型拥有柔软的身体，体内只装有 1 台发动机以及 6 个移动部件，使其能够在更大程度上模拟真实鱼的移动。

由于身体完全由一整块柔软的聚合体材料制成，避免了水破坏脆弱内部零件的可能性。虽然仿真程度极高，但人们决不会将这款机器人误认为真正的金枪鱼。真正的金枪鱼每秒游动距离最远可达到身长的10倍，而机器金枪鱼的成绩却只有1个身长。

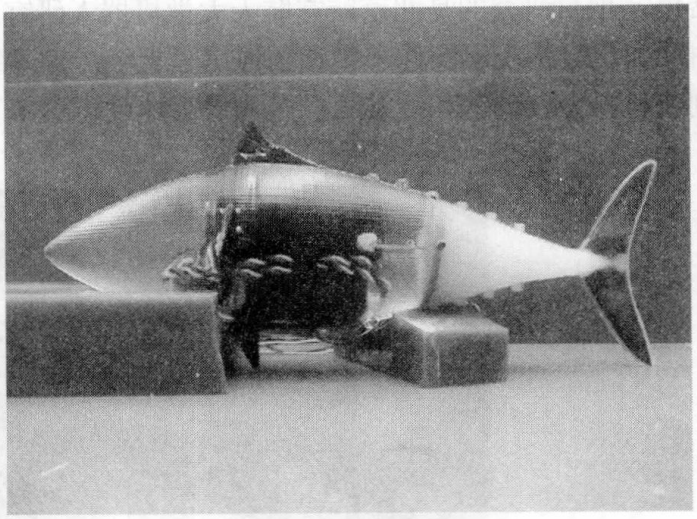


图7-11　机器金枪鱼

英国巴斯大学最新研制的一种水下机器人——“Gymnobot”（见图7-12），从外形上和游动姿势上都非常像鱼类，据称该设计的原型是亚马逊河宝刀鱼(knifefish)。

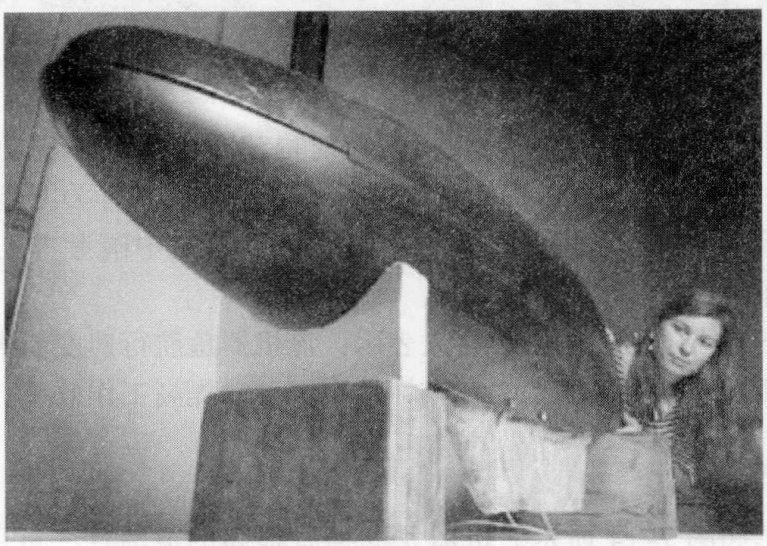


图7-12　水下机器人“Gymnobot”

英国巴斯大学的设计者说：“这款类似淡水鱼的机器人，其肌肉组织是它的推进器，其腹部安装一个鳍片，鳍片波浪形摆动，可推动机器鱼前进。”

为了使机器鱼具有空间容纳照相机和其他电子仪器，研究人员从亚马逊河的宝刀鱼身体上获得了灵感——宝刀鱼身体保持“僵硬”状态，也能够在水中感应到电流。依据这种特性，研究人员设计的“Gymnobot”采用重量轻、像刀片一般的“鱼鳍”，使机器人身体保持刚性状态下，通过“鱼鳍”作为推动器在水中穿行。

研究人员希望这款机器人能够用于研究靠近海岸的海洋生物，它的推进器能够排除多数沉淀物，从而不致被海草所缠绕。

中国第一条实际应用的仿生机器鱼——SPC-Ⅱ仿生机器鱼(见图7-13)已于2004年研制成功。技术人员可通过一个手掌大小的遥控器和一台计算机，对身长1.23m、通体色泽亮黑、外形逼真的机器鱼发号各种指令。水间的机器鱼自由灵活地穿波逐浪、载沉载浮，如果不是头部上方一个显眼的白色圆顶GPS导航天线，和水中的鱼难以区分。负责“SPC-Ⅱ仿生

机器鱼”项目研究的是北京航空航天大学机器人研究所和中国科学院自动化研究所。这条机器鱼由动力推进系统、图像采集和图像信号无线传输系统、计算机指挥控制平台三部分组成，主要制造材料为玻璃钢和纤维板。它的最高速度可达1.5m/s，能够在水下连续工作2~3h。

图7-13 SPC-Ⅱ仿生机器鱼

2004年8月，科学家曾使用这条仿生机器鱼对福建东山海域郑成功古战舰遗址进行了水下考古探测试验。机器鱼对4000m$^2$的水域进行了摄像考察，有关图像即时传送到水面指挥部。在两天的实验中，机器鱼累计在水中工作约6h。这是中国考古工作者首次利用机器人辅助水下考古工作。

国家博物馆水下考古学研究中心负责人表示，该机器鱼航行速度能满足水下考古探测要求，操作简便、灵活性好，对环境扰动和破坏性小，可以提高工作效率、降低潜水员风险。

### 7.6.4 机器龙虾

机器龙虾的外形如图7-14所示。机器龙虾拥有很高的灵活性，可用于探测水下矿藏。就像真龙虾一样，这种小型机器龙虾也长着能够感知障碍物的触须，8条腿允许它们朝着任意一个方向移动，爪子和尾巴则帮助它们在湍急的水流以及其他环境下保持身体稳定性。

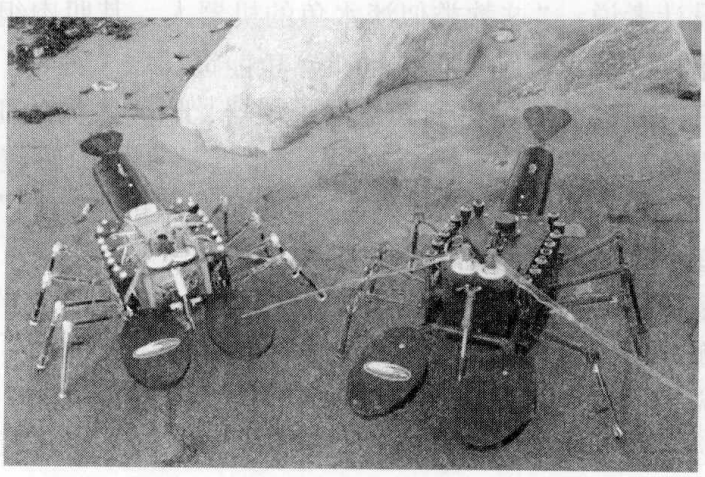


图7-14 机器龙虾

20世纪90年代末，美国的科学家们就开始对能够在极端环境下生存的昆虫、甲壳类动物和某些海洋动物进行研究，分析这些生物如何适应环境，然后利用仿生学方法，采用人工合成材料仿制出有机材料。目前，除研制成功的仿真龙虾外，仿真金枪鱼、仿真蝎子、仿真苍蝇、仿真蟑螂等也在研制之中。这些仿生机器一旦研制成功，既可代替人进入危险地带为士兵预警，也可在倒塌的建筑里寻找被困的人。

这只仿真龙虾由一种特制的防水电池提供动力，它头部的两根长须是一种灵敏度极高的防水天线，几只脚上都装配有防水传感器，它的大脑则是一台超微型计算机。它能够像真龙虾一样适应不规则的海底，在不同的深度敏捷地行动，并且可以灵巧地应付汹涌的波涛和变化的海流，躲避各式各样的海底礁石。这类机器动物的初步实地试验已经完成。一旦真的投入实战，它们就可以对一些人员很难接近的区域进行侦察，发现目标会自动向指挥所报告，也可通过一种自动摧毁装置把目标消灭。

### 7.6.5　仿生企鹅

这种仿生企鹅(见图7-15)通过其特殊的鳍，可在水中像真实企鹅一样游动；另一种体形稍大的充满氦气的仿生企鹅也可在空中“漂游”。这些仿生企鹅在德国汉农沃·梅塞(Hannover Messe)贸易展览会上展出。这两种仿生企鹅都携带着由柏林EvoLogics研制的3D声呐系统，该系统能够监控企鹅的周围环境，避免与水池壁或其他仿生企鹅相碰撞。

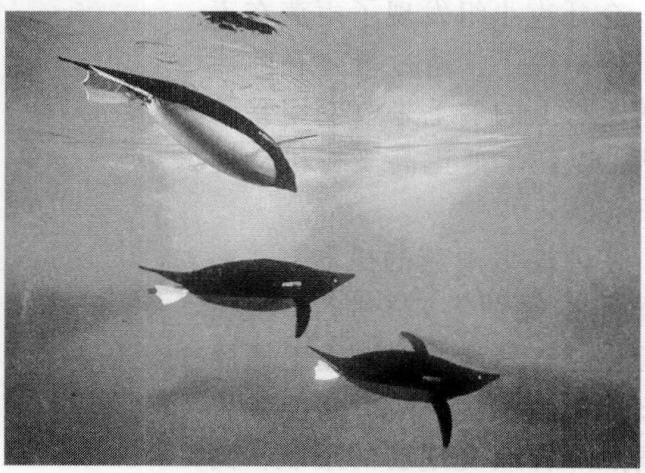


图7-15　仿生企鹅

有关科学家称，仿生企鹅能够像活企鹅那样轻微灵活地旋转身体，这得益于柔软的玻璃纤维棒可以控制它们的头部。这些纤维棒排列在仿生企鹅的头部一侧，其身体内部的发动机能够灵活地旋转仿生企鹅的脖子至任何方向，并引导它们在水中游动。这两款新研制的仿生企鹅借助秘密武器——类似鱼鳍的三角形仿生结构，可以在天上飞和水里游，而且头部和身体都活动自如。德国研究人员表示，之所以模仿企鹅的造型，是因为它的流线设计可以最大限度地减少阻力、节省能耗。

### 7.6.6　机器苍蝇

哈佛大学研制出了一款体型小巧的机器苍蝇(见图7-16)，可用于隐蔽地侦察有毒物质。目前，首只机器苍蝇原型机已经制造完毕，重量只有60mg，翼展不超过3cm。

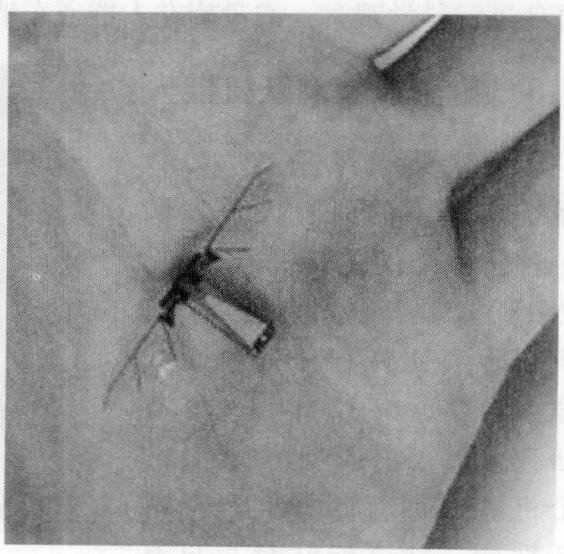


图7-16　机器苍蝇

为了让机器苍蝇看起来更像是真正的苍蝇，研究人员在研制过程中还用到了激光加工技术。借助激光加工技术，科学家们成功制造出了极其纤薄的碳纤维薄片。通过将这些碳纤维薄片进行连接，研究人员成功地将各种功能组件连接在了一起。

此外，为了让机器苍蝇身上的某些部分可以运动起来，专家们还运用了一些在电场作用下可以改变形状的高分子化合物。虽然此前也曾有科学家成功研制出过可模仿昆虫的机器人，但拥有两只翅膀的机器人还是首次问世，尤其是后者的小巧身形还可以使它像真正的苍蝇那样飞行。

不过，目前机器苍蝇的运动情况还非常有限。研究人员制造研制配套的遥控器，以便控制机器人向各个不同的方向飞行。

与此同时，专家们还在为机器苍蝇研制专用“食物”，现在它只能依靠外部能源供电。科学家们表示，机器苍蝇上安装有一组微型锂聚合物电池，可持续运行5min时间。

### 7.6.7 机器雨燕

仑廷克小组发现了雨燕在不同飞行条件下，通过折叠和前后移动翅膀上的羽毛来改变翅膀的形状，以便迅速提高飞行机动性和灵活性。

一种模拟雨燕的机器鸟——机器雨燕(见图7-17)进行首次飞行后，证实其可变形的羽毛翅膀的飞翔能力不同凡响。它能像普通雨燕那样改变翅膀的形状，高速灵活地飞行。

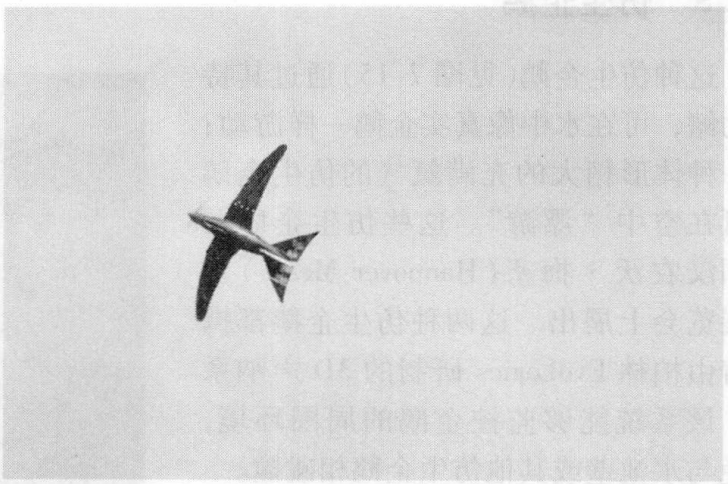


图7-17 机器雨燕

机器雨燕翼展达51cm，重量不超过80g，携带3个微型摄像机，可以让它成为翱翔天空的空中间谍。此外，其电子马达可以驱动它跟随真鸟群飞行20min，在不打扰野鸟的情况下对野鸟进行科学观察；或盘旋在人群或车辆上方，执行对地侦察。

### 7.6.8 仿生蚱蜢跳跃机器人

瑞士洛桑联邦理工学院智能系统实验室的研究人员发明了一种仿生蚱蜢跳跃机器人(见图7-18)。就身长和体重而言，其跳跃距离比现存任何跳跃式机器人都要远出10倍以上。有关研究人员表示：“我们设计的这个机器人拥有同蚱蜢一样的跳跃性能。沙漠蚱蜢身长只有3cm，可是它的跳跃距离长达

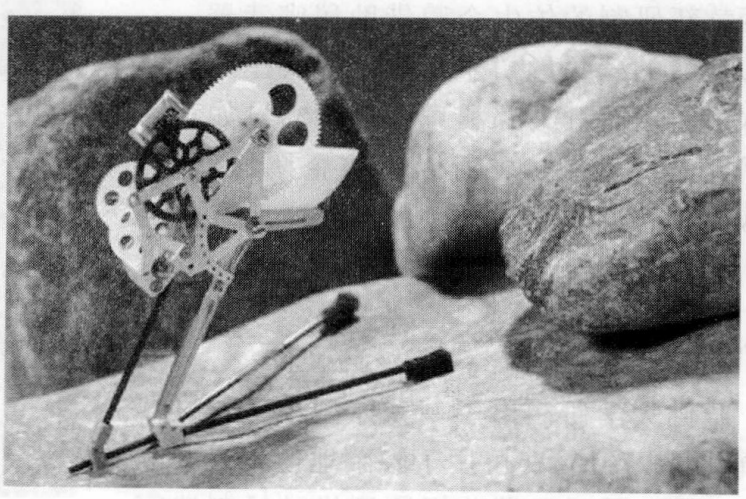


图7-18 仿生蚱蜢跳跃机器人

1m。为了设计出跳跃性能如此好的机器人，我们对蚱蜢进行了仔细分析，并应用了同样的生物力学设计原理。”

这款机器人运用了类似跳蚤、蚱蜢、草蜢和青蛙的机制来储存能量，依靠一个微型电池和电动机给两个弹簧充能。这两个弹簧可以迅速释放能量，实现强有力的跳跃和超迅速的加速，每充电3s就可以进行高达320次跳跃。洛桑联邦理工学院的有关研究人员说：“这种跳跃式的仿生形态非常特别，因为它使得微型机器人能够行走通过多种类型的越野地形，这是其他任何行走机器人或轮式机器人所无法做到的。这些微型跳跃式机器人可以装配太阳能电池，实现跳跃间的反复充电，从而可被大量用来多方探索地球或其他行星上的偏远地区。”

仿生蚱蜢跳跃机器人是完全模仿蚱蜢后腿生理跳跃功能，机器人利用四杆机构对其进行模拟还原，以确保跳跃时能获得良好的力学特性。这款机器人的设计制作为研究跳跃类机器人的能量存储、弹跳力学、机构仿生、自动控制提供了一个实验载体，为研制低功耗、高效率、机动性好的跳跃机器人提供了基础平台。应用这种机器昆虫，可以在战场上进行侦察、运送物品，或在其他星球进行探路等任务。

### 7.6.9　仿生机器人壁虎

仿生机器人壁虎“神行者”(见图7-19)作为一种体积小、行动灵活的新型智能机器人，有可能在不久的将来广泛应用于搜索、救援、反恐以及科学实验和科学考察。机器人壁虎能在各种建筑物的墙面、地下和墙缝中垂直上下迅速攀爬，或者在天花板下倒挂行走；对光滑的玻璃、粗糙或者粘有粉尘的墙面以及各种金属材料表面都能够适应；能够自动辨识障碍物并规避绕行，动作灵活逼真；其灵活性和运动速度可媲美自然界的壁虎。

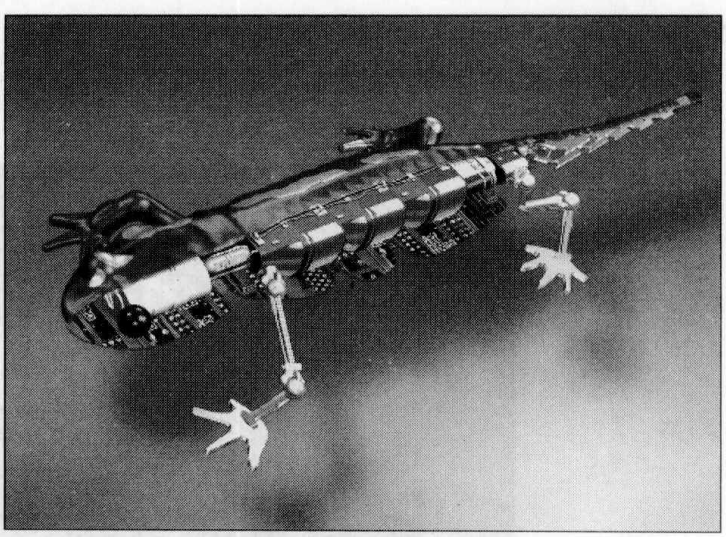


图7-19　仿生机器人壁虎“神行者”

### 7.6.10　仿生快速穿越沙地机器人

对于大多数车辆而言，一旦陷入沙地便无计可施，只有等待救援。美国科学家利用仿生学原理研制出一种机器人，可通过模仿沙漠动物的移动技巧，快速、安全地穿越松散的地形。

穿越松软沙地时，机动车高速行驶的后果往往是陷入“沙沼”无法自拔，其主要原因在于车辆的重量使得松散的沙地在轮胎下方塌陷。美国宇航局火星探测器等也受同样问题困扰：如果它们的“肢体”在结构松软的表面前进得过快，探测器便有下陷的危险；而慢速行驶，则会让它们在穿越这种地带时浪费太多时间。

佐治亚理工学院的研究小组找到了一个折中的方法。他们注意到，沙漠中生活的蜥蜴和

蟑螂等动物在穿越沙漠时有独特的方法：它们的四肢在与沙地接触过程中运动非常缓慢，而在四肢腾空至再次触地之前的运动则非常迅速。这使得这些动物能够在松散的沙漠中安全快速前行。研究人员据此设计了一个名为SandBot(见图 7-20,图 7-21)的“六肢”机器人。在围绕轮轴旋转的同时，机器人的3只“小爪”会在沙地上缓慢运动，而另外3只“小爪”在触地之前，则会在空气中快速转动。经过一年试验，SandBot 机器人最终在穿越一片由罂粟种子仿制的“沙漠”时，速度达到了 0.3m/s，这至少是美宇航局火星探测器行进速度的 15 倍。

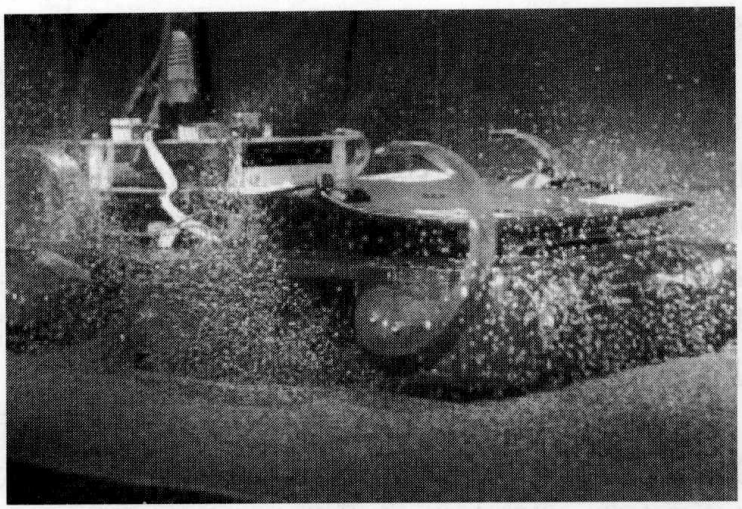


图 7-20 机器人 SandBot 正在沙地里“飞奔”

研究人员表示，他们下一步打算在安装了轮子和其他附加物的机器人身上使用这项技术。

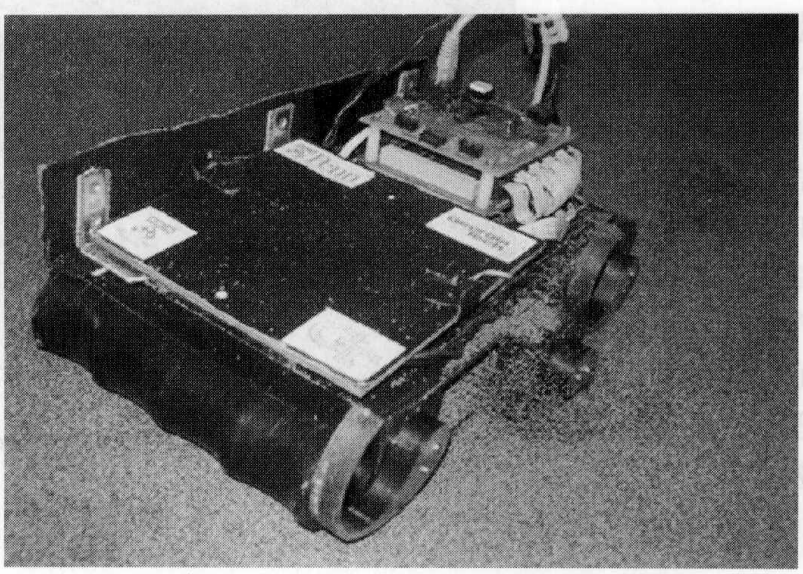


图 7-21 “六肢”机器人 SandBot

## 7.6.11 仿生机器蛇

机器蛇是一种新型的仿生机器人，与传统的轮式或两足步行式机器人不同的是，它实现了像蛇一样的“无肢运动”，这是机器人运动方式的一个突破。它具有结构合理、控制灵活、性能可靠、可扩展性强等优点，在许多领域具有广泛的应用前景，如在有辐射、有粉尘、有毒及战场环境下执行侦察任务；在地震、塌方及火灾后的废墟中找寻伤员；在狭小和危险条件下探测和疏通管道；为人们在实验室里研究数学、力学、控制理论和人工智能等提

供实验平台。

以色列的这款机器蛇(见图7-22)长约2m，其外观和动作与真蛇别无二致，因此能够方便地用来进行军事伪装。它能通过穿越洞穴、隧道、裂缝和建筑物秘密地到达目的地，同时发送图片和声音给操作者，操作者通过一台由计算机控制的装置接收其发回的信息。

更值得一提的是，机器蛇拥有完美的弯曲“关节”，这使得它易于通过狭小的空间，并且在遇到障碍物时可以拱起身子，跃过障碍物进行拍摄工作。除了军事目的，机器蛇还可以发挥其灵活性，来帮助寻找被埋在倒塌建筑物下的受难者。

中国研制的这条长1.2m、直径0.06m、重1.8kg的机器蛇(见图7-23)，能像蛇一样扭动身躯在地上或草丛中自主地运动，可前进、后退、拐弯和加速，其最快运动速度可达20m/min。头部是机器蛇的控制中心，安装有视频监视器，在其运动过程中可将前方景象实时传输到后方的计算机中。科研人员根据实时传输的图像观察运动前方的情景，向机器蛇发出各种遥控指令。这条机器蛇披上“蛇皮”外衣后，还能像蛇一样在水中游泳。

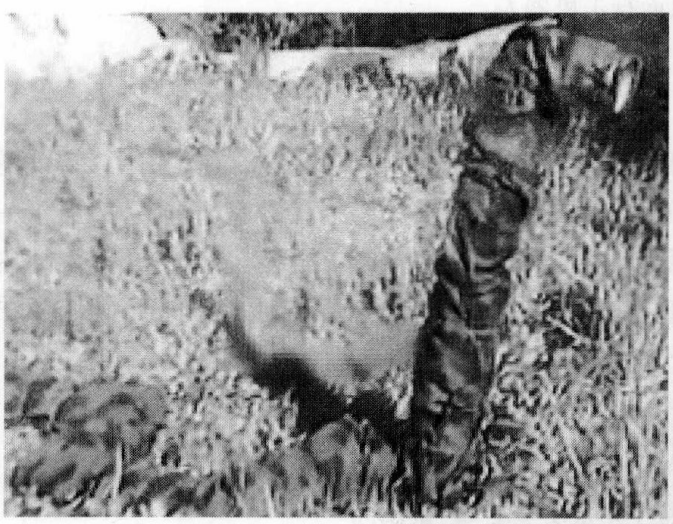


图7-22　仿生机器蛇(以色列研制)

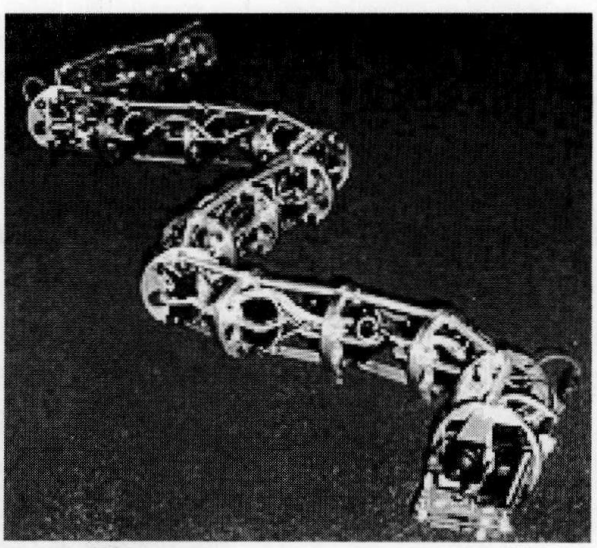


图7-23　仿生机器蛇(中国研制)

### 7.6.12　水面行走机器人

经研究发现，昆虫之所以能够在水面上迅速行走，是靠水下微小漩涡形成的推力，而并非是像过去人们想象的那样完全依靠水的表面张力。受到自然界昆虫能在水面行走的启发，来自卡内基·梅隆大学的迈汀·斯廷教授在美国麻省理工学院(MIT)科学家的协助下，带领科研人员研制出首个具备水面行走能力的微型机器人(见图7-24)。这种机器人在外形上看起来，与人们所熟知的水面掠行虫或水上蚤非常相似。

该掠水机器人主体是一个大小仅0.5in的碳塑纤维质地的箱式躯干，身上8条2in长的细腿由钢丝做成，表层上还涂抹了一层防水塑料涂层，外形上酷似一只水蜘蛛。该机器人体内并未安装计算机装置，也没有携带任何传感器或电池。机器人体内的“肌肉”系统则由三台电镀板式压电传动器组成，电能由外接电源线提供。

该掠水机器人能够真正站立在水面之上，而不仅仅是漂浮状态；在运动过程中，有两条金属腿以划桨方式摆动，可以推动机器人在水面上向前、向后轻轻掠过。

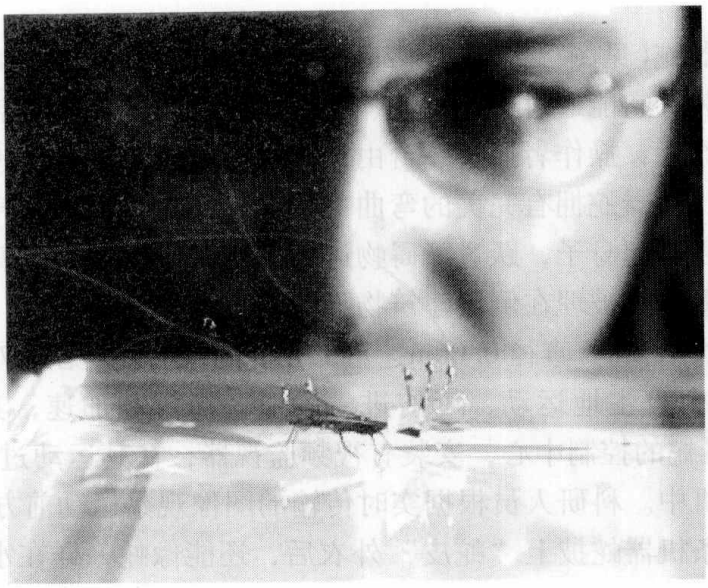


图 7-24 水面行走机器人

### 7.6.13 大狗机器人

波士顿动力工程公司在仿生机器人方面的表现令人瞩目，大狗机器人（见图 7-25）的出世至今震撼人心。大狗机器人长 1m，高 70cm，重 75kg，从外形上看，它基本上相当于一条真正的大狗。四条腿完全模仿动物的四肢设计，内部安装特制的减振装置。该机器人的内部安装有一台计算机，可根据环境的变化调整行进姿态。大量的传感器则能够保障操作人员实时地跟踪大狗机器人的位置并监测其系统状况。

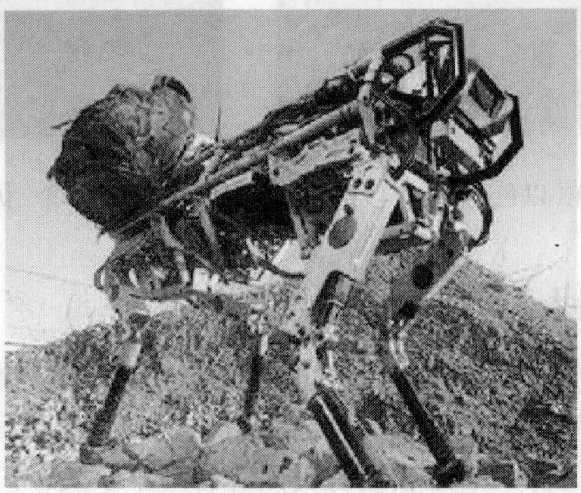


图 7-25 大狗机器人

大狗机器人的行进速度可达 7km/h，能够攀越 35°的斜坡，可携带重量超过 150kg 的武器和其他物资。大狗机器人可以自行沿着预先设定的简单路线行进，也可以进行远程控制。

### 7.6.14 猎豹机器人

波士顿动力工程公司和麻省理工学院均成功研制了猎豹机器人。波士顿动力工程公司研制的猎豹机器人（见图 7-26）通过背后铰链关节的运动，改变运动的步长和步频来实现机

器人速度的改变。该机器人高2ft，长3ft，具有灵活的脊椎和铰接式头部，能够冲刺、急转弯，并能突然急刹停止，时速可达45.5km，研究人员计划它未来能超过动物猎豹的速度。麻省理工学院仿生机器人实验室研究人员通过有限元分析，设计了肌腱结构足部，并在两个肌腱之间加入了弹簧，从而增加了柔顺性。因此麻省理工学院的猎豹机器人（见图7-27）具有十分出色的弹跳及越障能力。通过对关节处驱动电动机的改装以及尾巴的加入，使得猎豹机器人拥有高速奔跑的能力和良好的平衡性。目前，该机器人的时速可达48km。

图7-26　波士顿动力工程公司的猎豹机器人

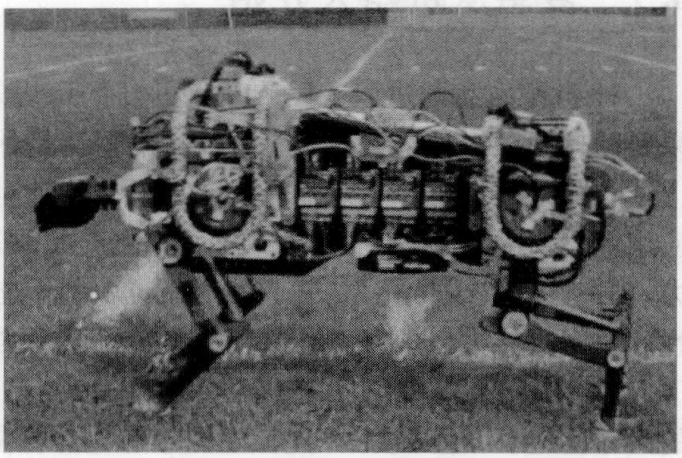


图7-27　麻省理工学院的猎豹机器人

### 7.6.15　袋鼠机器人

2014年3月，德国费斯托公司对外宣布，已成功研制出一款袋鼠机器人（见图7-28），该机器人身高超过1m，体重约7kg，每次实现的跳跃动作约为40cm高、80cm长的范围内。该机器人的腿部“肌腱”是一种压缩空气贮存器，可以帮助它精确平稳地奔跑或着地。在压缩空气的推力作用下，可实现向上、向前的跳跃动作。腿向后蹬，袋鼠机器人就能够前进，在空中的时候，又会收回到前方。该机器人每完成一次跳跃动作，其爪部便会储存空气能量以继续下一次的跳跃动作。为了支持这系列动作的持续，研发人员在袋鼠机器人两只触地的支撑脚上安装了固定的弹簧装置，以此来模仿真实袋鼠动物脚上的两根蹄筋，为一次又一次的跳跃动作起到缓和作用。为了使机器人跳跃时在半空中能够保持一定的稳定性，在其身体后部安装了一根尾巴，帮助其保持机体平衡。

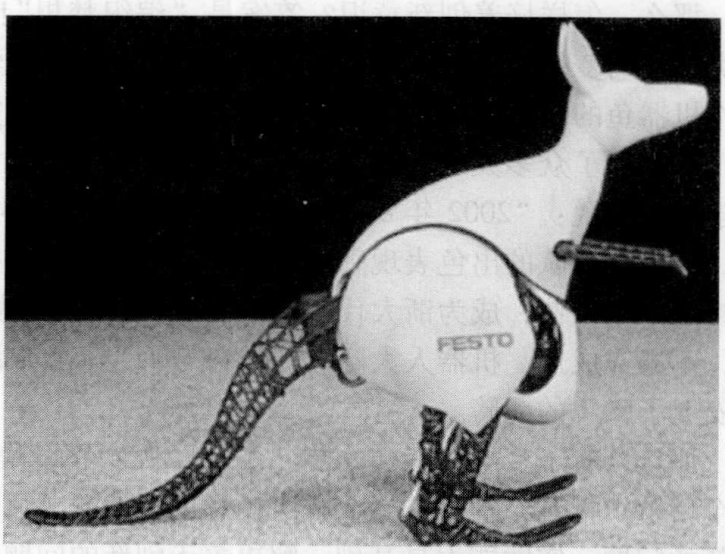



图7-28　袋鼠机器人

# 第 8 章　机器人大赛

## 8.1　梦想从机器人开始

21 世纪，我国进入了民族复兴的新的历史时期，素质教育成为新世纪的教育国策。如果要问，我国大学生素质教育最期待的目标是什么？答案肯定是“创新能力”。

北京师范大学心理系曾做过一次调查，针对中英青少年的 7 项创造性能力（创造性物体应用能力、创造性问题提出能力、创造性产品改进能力、创造性想象能力、创造性问题解决能力、创造性实验设计能力、创造性产品技术制作能力）进行测试比较。结果中国学生只在创造性问题解决能力（即通常所说的解题能力）方面强于对方，其余均低于对方。

2005 年 7 月，钱学森曾向温家宝总理说：“我要补充一个教育问题，培养具有创新能力的人才问题。”他又说：“现在中国没有完全发展起来，一个重要原因就是没有一所大学能够按照培养科学技术发明创造人才的模式去办学，没有自己独特的创新的东西，老是‘冒’不出杰出人才。这是很大的问题。”

创新能力无疑是个体素质中的一个核心品质，是素质教育的灵魂，是创新意识、精神和品质的最终体现。显然，我们的大学生在这方面距离社会的期待尚远。

那么，怎样培养创新意识？答案是“编织梦想”！远的，众所周知，飞机始于人类模仿鸟类翱翔的梦想；近的，如北京航空航天大学的一位学生，儿时面对鱼缸里的热带鱼萌发出制作机器鱼的梦想，结果成长为对水下机器人颇有研究的博士生。机器人大赛也是一个造梦工厂，吸引了众多大学生投身到寻梦的创新活动中。2005 年，参加机器人大赛的一位浙江大学的队员说：“2002 年 8 月接到高考录取通知书时，正好电视台在播放大学生机器人比赛，浙大代表队的出色表现感动了我。于是，我带着机器人的梦想踏入校园，蓄志三年，今天终于如愿以偿，成为浙大代表的一名队员。”有了梦，才有兴趣，才有好奇心，才求新图变，不墨守成规。机器人大赛有一个口号：“让思维沸腾起来!”这正是梦想给大学生的思维安上了腾飞的翅膀。

那么，有了梦想，怎样才能“圆梦”呢？答案是“圆梦要靠实践”！创新活动主要包括三个环节：批判精神是先导，解决锐意创新的问题；创新情感和创新精神是动力，解决敢于创新的问题；实践能力是基础，解决善于创新的问题。最后一个环节至关重要。中国的青少年不乏聪明才智，不乏创新的冲动，最欠缺的是实践。如果说梦靠遐想，那么圆梦则是靠双手打造出来的，是实实在在的过程。

机器人大赛恰恰是一个为大学生圆梦量身定做的、开放的、生动活泼的实践舞台。在这个舞台上，他们如鱼得水，得以淋漓尽致的展露情感、才华和价值观。机器人比赛寓教于乐，寓教于赛，再经过电视节目制作展现于人，实现了媒体与科普、媒体与教育的珠联璧合，丰富了大学生素质教育的模式，有利于提高全民族的科学素养。经过比赛的洗礼，大学生们可以充分品尝到科技攻关的艰辛、享受到创造的快乐、体验到成功的喜悦，创新能力将

得到空前的提升。这些体验将伴随他们终身，沉淀为他们的精神财富。

为了推动机器人技术的发展，培养学生创新能力，在全世界范围内相继出现了一系列的机器人竞赛，如亚太大学生机器人大赛。这项赛事于2002年由亚洲太平洋地区广播电视联盟(ABU)倡导，每年举办一届，比赛主要面对大学生，特别是工科院校的学生，根据规则自己动手制作机器人，通过协作完成竞赛。

目前，国际上最具影响的机器人足球赛主要是国际机器人足球赛(FIRA)和机器人足球世界杯(Robot World Cup Soccer Games,RoboCup)。这两大比赛都有严格的比赛规则，融趣味性、观赏性、科普性为一体，为更多大学生参与国际性的科技活动提供了良好的平台。

在中国，大学生机器人大赛虽然举办时间很短，但已经深深扎根于大学校园的土壤上，镌刻在大学生们的梦中，成为大学生们的科技盛会。我们有理由期待，经过长年的努力，大学生机器人大赛一定能成为大学生素质教育和我国科学普及领域的一朵奇葩，为我国科技事业造就一大批创新人才。

## 8.2　智能足球机器人系统概述

### 8.2.1　智能足球机器人系统

智能足球机器人属机器人的一个分支，顾名思义，就是制造和训练机器人代替人类或与人类进行足球比赛。通过这种方式，来提高人工智能、机器人等相关领域的研究水平，如图像采集、图像处理、图像识别、知识工程、专家系统、决策系统、轨迹规划、自组织与自学习理论、多智能体协调、机器人学、机电一体化、无线通信、精密仪器、实时数字信号处理、自动控制、数据融合等。

智能足球机器人大赛是将人们喜爱的足球运动和人工智能领域多智能系统结合的产物。据有关专家预言，智能足球机器人比赛的最终目标是实现2050年左右的人机大战，即在“可比”的条件下，智能足球机器人冠军队和当时的人类世界冠军队进行比赛，并要赢得比赛。这是从事智能足球机器人事业的科技工作者所面临的十分艰巨的挑战。如果50年后智能足球机器人冠军队真能战胜当时的人类世界冠军，将充分表明人类的科学技术综合能力有了质的飞跃。

智能足球机器人大赛是由实物足球机器人或仿真足球机器人参加的比赛，其比赛规则参照国际足联制定的人类足球比赛规则，并就智能足球机器人的一些特点作了相应的修改。实物足球机器人队的研制涉及计算机、自动控制、传感与感知融合、无线通信、精密机械和仿生材料等众多学科的前沿研究与综合集成；仿真足球机器人赛在标准软件平台上进行，平台设计充分体现了控制、通信、传感和人体机能等方面的实际限制，使仿真球队程序易于转化为实物球队的控制软件。仿真足球机器人的研究重点是球队的高级功能，包括动态不确定环境中的多主体合作、实时推理—规划—决策、机器学习和策略获取等当前人工智能的热点问题。概括地说，智能足球机器人系统是以体育竞赛为载体的前沿科研竞争和高科技对抗，是培养信息一体化科技人才的重要手段，同时也是展示高科技进展的生动窗口和促进科技成果实用化和产业化的新途径。

### 8.2.2 智能足球机器人系统的产生

在人工智能与机器人学的历史上，1997 年将作为一个转折点被记住。在 1997 年 5 月，IBM 的“深蓝”击败了人类国际象棋世界冠军，人工智能界 40 年的挑战终于取得了成功。在 1997 年 7 月 4 日，美国的“探路者”在火星成功登陆，第一个自治机器人系统 Sojourner 释放在火星的表面上。与此同时，机器人足球世界杯赛(以下简称“机器人世界杯赛”)也朝着开发能够战胜人类世界杯冠军队的智能足球机器人队走出了第一步。

智能足球机器人的最初想法由加拿大不列颠哥伦比亚大学的艾伦·马克沃斯(Alan Mackworth)教授于 1992 年提出。日本学者迅速对这一想法进行了系统的调研和可行性分析。1993 年 6 月，日本的一些研究工作者决定创办一项机器人比赛，暂时命名为机器人世界杯赛 J 联赛(J 联赛是当时刚创办的日本足球职业联赛的名字)。然而在一个月之内，他们就接到了绝大部分是日本以外的研究工作者的反应，要求将比赛扩展成一个国际性的联合项目。因此，他们就将这个项目改名为机器人足球世界杯赛。

与此同时，一些研究人员开始将机器人足球作为研究课题。隶属于日本政府的电子技术实验室(ETL)的松原仁以足球机器人为背景，展开多主体系统的研究，并已经开始开发一个专用的足球比赛模拟器。这个模拟器后来成为机器人世界杯赛的正式足球比赛仿真平台。从此，智能足球机器人迅速成长为国际人工智能和机器人学研究的一个重要主题和方向。

1993 年 9 月，机器人世界杯赛第一次发表公告，并草拟了规则。于是，在很多会议和研讨会上进行了关于组织和技术问题的讨论，包括 AAAI-94(美国人工智能联合会会议)、JSAI(日本人工智能学会)研讨会以及其他机器人界的会议。同时，松原仁在 ETL 的小组宣布了仿真比赛的初始版本(LISP 版本)，这是为进行多主体系统研究而开发的第一个足球领域的开放系统仿真平台，后来又通过 Web 发布了 1.0 版本的仿真比赛平台(C++版本)。这个仿真比赛平台的第一次公开演示是在国际人工智能会议(IJCAI-95)上。

1995 年 8 月，在加拿大蒙特利尔召开的国际人工智能会议(IJCAI-95)上发表了公告，将在名古屋与 IJCAI-97 联合举办首届机器人世界杯赛及会议。同时，为了发现组织大型机器人世界杯赛有关的潜在问题，决定先举办机器人世界杯热身赛(Pre-RoboCup-96)。做出这个决定是为了留出两年的准备和开发时间，这样研究小组就可以开始开发机器人和仿真的球队，同时也能有时间筹集研究经费。

1996 年 11 月 4~8 日，在大阪的国际智能机器人与系统会议上举行了机器人世界杯热身赛。有 8 支球队参加了仿真比赛，并展示了参加中型组比赛的真正的机器人。虽然规模不大，但这是第一次将足球比赛用于促进研究与教育的比赛。

1997 年，在国际最权威的人工智能系列学术大会——第十五届国际人工智能联合大会(IJCAI-97)上，智能足球机器人被正式列为人工智能的一项挑战。第一次正式的机器人世界杯赛和会议取得巨大成功。比赛仅设了机器人组和仿真组两个组别，来自美国、欧洲、澳大利亚、日本等 40 多支机器人球队参加，5000 多名观众观看了比赛。从此，机器人世界杯赛作为机器人学和人工智能研究领域的最重要的活动之一蓬勃发展起来。

智能足球机器人比赛涉及人工智能、机器人学、通信、传感、精密机械和仿生材料等诸多领域的前沿研究和技术集成，实际上是高技术的对抗赛。除了国际机器人世界杯赛联合会

之外，还有一些较有影响的国际组织，其中较大的一个就是国际机器人足球赛。该组织总部设在韩国大田，现有成员国30多个，每年举办一次国际性比赛。国际机器人足球赛和机器人世界杯赛的主要区别之一是采用不同的技术规范：国际机器人足球赛(FIRA)允许一支球队采用传统的集中控制方式，相当于一支球队的全部队员受一个大脑控制；而机器人世界杯赛要求必须采用分布式控制方式，相当于每个队员都有自己的大脑，因而是一个独立的“主体”。智能足球机器人赛从一个侧面反映了一个国家信息与自动化领域基础研究和高技术发展的水平。

机器人世界杯赛及学术大会(The Robot World Cup Soccer Games and Conferences)是国际上级别最高、规模最大、影响最广泛的智能足球机器人赛事和学术会议，每年举办一次。

### 8.2.3　智能足球机器人在中国的发展

机器人世界杯赛最重要的目的是检验信息自动化前沿研究，特别是多主题系统研究的最新成果，交流新思想和新进展，从而更好地推动基础研究、应用基础研究及其成果转化。通过竞赛，各种不同的新思想、新原理和新技术可以得到客观评价。因而，机器人世界杯赛和学术大会受到了世界各国，特别是美、日、德等发达国家的高度重视。我国在这一方向上起步较晚，因此更需要奋起直追。

2001年6月26日，中国自动化学会机器人竞赛工作委员会成立大会在清华大学召开。该委员会将负责统一协调、组织全国的机器人竞赛活动，863计划还提供了专项基金予以资助，标志着我国机器人竞赛事业进入了一个崭新阶段。我国计算机、自动化和机器人领域的多位著名专家参加了大会并发表讲话。该委员会为中国科学技术协会和中国自动化学会的组成部分，其宗旨是通过机器人比赛(主要包括机器人世界杯赛和国际机器人足球赛)，让更多的人尤其是青少年了解机器人、喜爱机器人，普及现代科学知识，为我国的机器人事业培养更多的优秀人才，推动自动化与机器人技术的发展与创新，从而为我国的快速、持续发展贡献力量。

中国高校组建的第一支智能足球机器人队是东北大学的牛牛队，该队于1997年组建，1999年首次代表中国参加在巴西举行的国际机器人足球赛系列的国际大赛。

组建中国第一支智能足球机器人队的是中国科技大学的仿真2D蓝鹰队。2000年，该队参加了在澳大利亚墨尔本举办的机器人世界杯赛，是首支代表中国参赛的智能足球机器人队。

2001年，清华大学风神队第一次参加在美国西雅图举办的机器人世界杯赛，夺得仿真2D组世界冠军，为中国高校在世界赛场上夺得首个冠军。

此后，中国高校纷纷进入世界大赛，并有多个高校多次获得世界冠军。截至2008年，中国参加世界杯赛的高校有清华大学、中国科技大学、浙江大学、国防科技大学、上海交通大学、北京大学、东南大学、上海大学、大连理工大学、北京理工大学、厦门大学、同济大学、中南大学、华南理工大学、南京邮电大学、合肥工业大学等。以下为中国举办的各届机器人赛事。

中国机器人大赛是在中国自动化学会机器人竞赛工作委员会主持下的全国最高级别的机器人赛事，包括了机器人世界杯赛所有赛事及国际机器人足球赛赛事，另外还加上中国本土特色的一些比赛，如机器人游北京(中国)、机器人武术擂台赛、水下机器人比赛等。

1999 年，在重庆首次比赛，当时只进行了机器人世界杯赛仿真组 2D 的比赛，参赛高校为中国科技大学、清华大学等队。

2000 年，在合肥比赛，也只进行了机器人世界杯赛仿真组 2D 的比赛，参赛高校为中国科技大学、清华大学等队，为数不多。

2001 年，在昆明比赛，仍只进行了机器人世界杯赛仿真组 2D 的比赛，上海大学、北京理工大学、浙江大学、国防科技大学等队伍第一次参赛。

2002 年，在上海比赛，进行了机器人世界杯赛仿真组 2D 的比赛，参赛高校的数量迅速增加。小型足球机器人组的比赛则只有中国科技大学与东北大学参加。

2003 年，在北京比赛，这是中国机器人大赛迅速发展的一年，比赛项目迅速增加，包括机器人世界杯赛仿真组 2D、小型组及中型足球机器人组的比赛等。机器人世界杯赛小型组参赛队伍达 12 支，包括清华大学、中国科技大学、上海大学、浙江大学、北京交通大学、国防科技大学、河北工业大学、空军航空学院等队。

2004 年，在广州比赛，比赛项目进一步增加，包括机器人世界杯赛仿真组 2D、小型组及中型足球机器人(1VS1,2VS2)的比赛，以及舞蹈机器人、类人机器人表演赛等。

2005 年，在江苏常州比赛，比赛项目进一步增加，包括机器人世界杯赛仿真组 2D、仿真组 3D、小型组及中型足球机器人(1VS1,2VS2)的比赛，以及舞蹈机器人、类人机器人、索尼四腿机器人等。

2006 年，在江苏常州比赛(China Open)，这是中国第一次举行机器人世界杯公开赛(以后每年举行公开赛)，比赛项目与国际比赛项目同步。国外队伍如美国卡内基·梅隆大学的小型机器人组等前来比赛，中央电视台也在 10 月 7 日第一次进行了一个下午的直播。

2007 年，在济南比赛(China Open)，比赛项目增加了机器人世界杯赛家庭组，与国际比赛项目保持一致，但部分项目的比赛规则略有修改(略滞后于国际比赛规则,而在中国具有优势的项目如机器人世界杯赛仿真组 2D、仿真组 3D、小型组等规则完全等同于国际比赛规则)。

2008 年，在广东中山比赛(China Open)，比赛项目的设置及比赛规则与国际规则一致。中国机器人大赛的步调及水平与发达国家同步发展。

2009 年 12 月，由中国自动化学会机器人竞赛工作委员会、机器人世界杯赛中国委员会、科技部高技术研究发展中心主办的 2009 中国机器人大赛暨机器人世界杯赛公开赛在上海大学举办，本次大赛由上海广茂达伙伴机器人有限公司与上海大学共同承办，来自全国 20 多个省，60 多所知名高校及港澳的青少年选手参加了本次盛会。在机器人世界杯赛比赛中，技术含量最高、参赛队伍最多、竞争最为激烈的中型组足球机器人比赛中，广茂达AS-RO机器人代表温州职业学院和天津工业大学联合组成的奋进者队参赛，表现十分出色，9 场比赛失一球，进 70 多球，以全胜的惊人成绩，斩获中型组桂冠。AS-RO 机器人于 2010 年代表中国参加在新加坡举行的机器人世界杯赛。

2010 年，中国机器人大赛暨机器人世界杯赛公开赛在我国内蒙古鄂尔多斯康巴什新区举行，参赛情况盛况空前，参赛队伍远超于往届，达到 1021 支队，参赛大学 171 所，参赛人员接近 3000 人，参赛赛种 65 项。由此看出，机器人运动在国内的影响日渐扩大，机器人热潮开始兴起。

## 8.3　智能足球机器人系统的组成及其应用

### 8.3.1　智能足球机器人系统的组成

智能足球机器人系统由摄像机实时采集场地的图像，输入信息采集与处理计算机，图像识别程序实时识别出场上的敌我双方机器人和球的位置及方向后，将这些信息传送到决策与控制计算机。决策程序根据场上态势，实时做出相应的反应，通过计算得出场上本方每一个智能足球机器人应该的运动规划和运动方式，并转化成智能足球机器人的各个轮速，然后通过无线通信系统将指令发送给场上的智能足球机器人。智能足球机器人作为整个系统的执行机构，在接收到命令后，由车载的电动机控制电路控制电动机运转。智能足球机器人的执行结果又通过摄像机的采集，反馈回信息采集与处理计算机，从而完成一个图像闭环回路，系统进入下一个循环。

智能足球机器人系统从功能上可以分为4个子系统：视觉子系统、决策子系统、机器人本体子系统(包括机械子系统和控制子系统)和无线通信子系统(无线通信收发)。

1. 视觉子系统

智能足球机器人系统的视觉子系统是整个系统的信息获取的主要部分，其任务是实时采集、处理并辨识赛场上的图像，得到场上10个(假设是5VS5智能足球机器人系统)智能足球机器人和球的有关数据，并将这些数据提供给决策子系统。

对于智能足球机器人系统，视觉子系统是决定系统总体性能的关键因素。比赛过程中，有关环境的所有信息都是通过视觉子系统获取的，因此，视觉子系统性能优良的智能足球机器人系统就把握了比赛取胜的先机。在智能足球机器人系统比赛中，视觉子系统应用的场景是一个已知的结构化环境，而且所有要识别的目标都使用规范化的色标加以标识，但是10个智能足球机器人是在不停地高速运动中，且对处理的速度、准确度和可靠性有很高的要求。所以，视觉子系统对上位机(主控决策计算机)的判断有着至关重要的影响。

智能足球机器人系统的视觉子系统要处理的主要信息是颜色信息，而光照条件的变化引起的失真、采集图像中的噪声干扰以及摄像头产生的桶形失真，都要求视觉子系统必须具有相当的鲁棒性。

2. 决策子系统

决策子系统上接视觉系统，下接通信系统，是智能足球机器人系统的中心枢纽。它的载体是一台计算机，其决策功能由计算机内运行的决策程序实现。复杂的比赛采取的策略会大不相同，所以战略战术的研究便成为决策系统的中心任务。决策系统的好坏直接影响到比赛的成败。

设计智能足球机器人系统的决策子系统时，主要考虑以下问题：

1）决策系统应能适应复杂的环境，为进一步决策提供良好的背景数据基础。

2）决策的目的就是取得比赛的胜利，它应该能适应并击败对方。因此，策略库应该具有开放性和可扩充性。

3）决策必须满足实时性需求，能在较短的时间内完成决策过程。

4）处理好决策系统与视觉、通信系统的接口。

3. 机器人本体子系统

智能足球机器人的机器人本体子系统从功能上主要分为机械子系统与控制子系统。机械子系统包括动力机构、控球机构、击球机构等；控制子系统一般由电源模块、电动机驱动电路、无线通信模块、DSP 控制器、IR(红外)传感器、击球机构控制电路和升压电路以及带球机构控制电路组成。

4. 无线通信子系统

智能足球机器人的无线通信子系统是连接场外主机和智能足球机器人，以及智能足球机器人之间的纽带。完整的无线通信系统可以分为 4 个部分：计算机主机中的通信程序、无线数据发射器、无线数据接收器、智能足球机器人控制器中的通信程序。其中，主机中的通信程序嵌入在决策子系统中，无线数据发射器和接收器的通信程序安装在智能足球机器人上。通常认为，无线通信子系统是由无线数据发射器和无线数据接收器两部分组成。

### 8.3.2 智能足球机器人系统的应用

由于机器人世界杯赛中涉及的许多研究领域都是目前研究与应用中遇到的关键问题，因此可以很容易地将机器人世界杯赛的一些研究成果转化到实际的应用中。下面介绍几个最典型的应用。

1. 搜索与救援

搜索与救援领域有以下一些特点：

1）在执行搜索与救援任务时，一般是分成几个小分队，而每个小分队往往只能得到部分信息，而且有时还是错误的信息。

2）环境是动态改变的，往往很难做出准确的判断。

3）有时任务是在敌对环境中执行，随时都有可能会有敌人。

4）几个小分队之间需要有很好的协作。

5）在不同的情况下，有时需要改变任务的优先级，随时调整策略。

6）需要满足一些约束条件，如将被救者拉出来，同时又不能伤害他们。

这些特点与机器人世界杯赛有一定的相似，因此，机器人世界杯赛中的研究成果就可以应用于这个领域。事实上，有一个专门的机器人世界杯营救组(RoboCup- Rescue)项目负责解决这方面的问题。

2. 太空探险

在太空探险时，一般都需要有自治的系统，能够根据环境的变化做出自己的判断，而不需要研究人员直接控制。在探险过程中，可能会有一些运动的阻碍物，必须要能够主动地进行躲避。另外，在遇到某些特定情形时，也会要求改变任务的优先级，调整策略，以获得最佳效果。

3. 办公室机器人系统

办公室机器人系统用于在办公室中完成一些日常事务，一般包括收集废弃物、清理办公室、传递某些文件或小件物品等。由于办公室的环境具有一定的复杂性，而且由于经常有人员走动，或者是办公室重新布置了，使这个环境也具有动态性。另外，由于每个机器人都只能有办公室的部分信息，为了更好地完成任务，他们必须进行有效的协作。从这些可以看出，这又是一个类似机器人世界杯赛的领域，当然可以采用一些机器人世界杯赛中的技术。

4. 其他多智能体系统

机器人世界杯赛中的一个球队可以认为就是一个多智能体系统，而且是一个比较典型的多智能体系统。它具备了多智能体系统的许多特点，因此，机器人世界杯赛中的研究成果可以应用到许多多智能体系统中。其实，上面的三个例子就是三个不同方面的多智能体系统，从中可以看出机器人世界杯赛技术的普遍性。除了这些例子外，还有许多可以应用机器人世界杯赛技术的领域，如空战模式、虚拟现实、虚拟企业等。

## 8.4　智能小型足球机器人的本体结构

机器人世界杯赛分仿真组、小型组、中型组、索尼四腿组等。智能小型足球机器人系统的研究重点是依靠集成中央处理系统，使多智能体在动态环境中自主协调控制。比赛在6.1m×4.7m(不包括外圈各0.3m的小型足球机器人活动区域)的绿色地毯场地上进行，采用橘黄色的高尔夫球作为比赛用球(简称为“小球”)，比赛双方各由5个小型足球机器人组成。小型足球机器人的直径不超过180mm，高度不超过150mm。小型足球机器人可以拥有控球、击球、挑球装置，可以和赛场外的主计算机进行无线通信。有两台彩色摄像机固定在场地上方4m高的横梁上，并与主计算机相连，可以观察整个比赛场地情况，主计算机根据赛场情况，决定每个小型足球机器人的动作。比赛规则与一般人类足球比赛相似，有点球、任意球、门球、犯规、红黄牌等，上、下半场各15min，中场休息5min。

智能小型足球机器人的本体结构主要包括机械子系统和控制子系统。

### 8.4.1　机械子系统

1. 机械结构总体要求

智能小型足球机器人的机械结构由以下几部分组成：小型足球机器人底盘、行走结构、控球结构、击球结构、电源装置、外罩等机械结构，通信、CPU、控制电路板等电路结构，以及传感器、色标板等辅助结构。

底盘部分为直径≤175mm的圆盘，圆盘上均匀布置4个(可以为3个或2个)行走结构；轮子方向与边平行，前两侧电动机水平布置，后面的电动机高于前面的两个电动机，轮子采用全向轮(如果是二轮结构,则不能用全向轮)；前端布置控球结构，前中部为击球结构，后面两侧安装电池盒，外罩安装在下半部位。

小型足球机器人外形可以选择圆形或多边形，主要作用是提供一个支撑的平台。这个平台要考虑很多，例如行走、转弯、控球、击球等机械结构，电池、控制、通信电路板以及外罩与小型足球机器人的装配位置关系等。机械结构的主要原则是以系统惯性最小作为系统总体指标，要求转动灵活，同时兼顾装拆方便、加工工艺、美观等。

1) 智能小型足球机器人的最大形体尺寸为：高≤150mm，机器人能够放进直径为180mm的圆筒中。机器人最大直线运行速度大于2.5m/s，最小加速度大于2.5m/s$^2$，轮子直径约为45~50mm。比赛场地铺毛毯，地面摩擦系数约为0.40~0.70。

2) 小型足球机器人要求总体重量轻、重心低，尽量处在机器人对称轴线上，运动系统灵活、可靠，系统转动惯量小，连接部件牢固、防松，整体刚性好，具备良好的抗撞击能力。

3）小型足球机器人结构要考虑接插件连接方便，更换电池方便，运动中电池要防止松动或撞击其他部件，电源开关、系统设置开关应放在便于操作的位置。

4）小型足球机器人运动结构采用3个轮子按等边三角形布置，或4个轮子按间隔90°布置；驱动电动机的安装位置要高度对称，转动特性保持一致；作直线移动时，小型足球机器人要求能够达到高直线度轨迹运行。

5）击球结构：击球初速度不小于5.0m/s，击杆行程约为15mm。其中，击杆加速行程为5mm，击球行程为10mm；击球结构采用直流电动机驱动，由击杆和齿轮齿条传动组成；击杆回收时间小于1s；击杆具有导向、行程定位、缓冲和自锁结构；击杆前方安装击球板，增大击球面；击杆两侧留有测球传感器通光孔等。

6）控球结构：控球结构采用上、下两个对滚的圆柱辊子组成，辊子的外表面使用摩擦系数较大的海绵型材料制造，辊子与球表面的接触点在规则允许下力求吸力最大，辊子直径约15～16mm，转速可达3500～4000r/min，辊子线速度大于3.0m/s。电动机与辊子之间用圆形带传动或齿轮传动，最大球心直线速度不小于1.0m/s。

7）轮子结构：小型足球机器人的轮子结构有单排或双排轮结构的全向轮，由4个鼓形辊子组成。辊子绕自身轴线转动，或采用大轮套小轮的方式。

8）位置传感器位置：位置传感器为6～8个，前、后主运动方向各1个，两个运动前方各1个，安装高度距地面约60mm，保证接收到相关的信号；击球方向采用左、右各1～2个（中间位置被击杆占用），距地面高度约28mm；在击杆和辊子的缝隙之间，水平间距约30mm。

9）外罩部分：外罩用1～2mm厚度的铝合金弯制或采用ABS材料，上部采用聚氨酯材料制作，顶部平整，便于贴色标。机器人外廓全部为黑色，各项功能设计成模块结构，便于安装调试和维修。

10）机器人底盘：所有零部件全部安装在底盘上，底盘要求有足够的刚度和强度，同时重量尽可能轻，多余部分采用挖空设计。要注意螺钉联接的可靠性和定位面的设计加工精度。

11）电池盒：电池侧放在小型足球机器人的后半部的两侧，便于更换电池。

2. 四轮结构的行走结构

小型足球机器人左、右轮由对称的直流伺服电动机（含512线编码器）、减速结构和轮子组成。前方左、右两个电动机轴与轮子轴在同一水平面上，中心距为24mm；后方左、右两个电动机轴在轮子轴的上方位置，这样可以避免前、后电动机在空间上的位置干扰。采用全向轮子结构，是在圆形大轮的圆周上密布12个小滚动轮子，轮子可以沿周向和轴向两个方向滚动。采用这样的结构能使小型足球机器人转动更加灵活，但是软件控制会相对复杂一些。具体参数如下：

驱动电动机：Fualhuber2342/6V/12W/7000rpm/16mN·m；电动机效率：81%；最大外形尺寸：$\phi$23×55mm；轮子直径：$\phi$45mm；总重量：2.0kg；总效率$\eta=60\%$；模数$m=0.5$；齿轮：$Z_1=20$，$Z_2=32$，$\alpha_1=13$mm，$Z_3=20$，$Z_4=52$，$\alpha_2=18$mm，$\alpha=24$mm；总传动比：$i=i_1\times i_2=1.6\times2.6=4.16$；轮子转速：1683r/min；轮子线速度：$v=3.96$m/s。小型足球机器人最大直线移动速度：$v=1.98\sim3.43$m/s，电动机驱动转矩：39.94mN·m，轮子摩擦力：1.775N，摩擦系数：$f=0.362$，加速度：1.77～3.07m/s$^2$。

四轮全向移动的机械结构如图8-1所示。

3. 击球、控球及挑球结构

如图8-2所示为一种击球结构的示意图，也有的机器人采用如图8-3所示的击球或挑球结构。该类击球或挑球结构的特点是通过凸轮的旋转积蓄弹簧的弹力势能，再经过瞬时的释放，经由旋转杆的力的放大作用传递到球上，实现击球或挑球的功能。每当凸轮转动一个行程，顶杆从凸轮的最高点落回到凸轮的最低点，踢(挑)球杆撞击小球一次，可实现一次踢(挑)球的动作。该装置最大的优点是：可以根据电动机的功率来确定球被击发时的动能，并且在动力足够的情况下可以实现挑“高”球，越过对方机器人“人墙”直接进球。

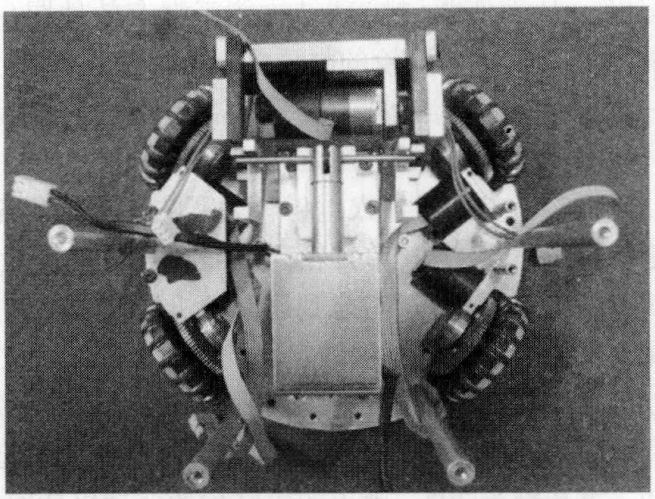


图8-1　小型足球机器人的四轮全向移动的机械结构

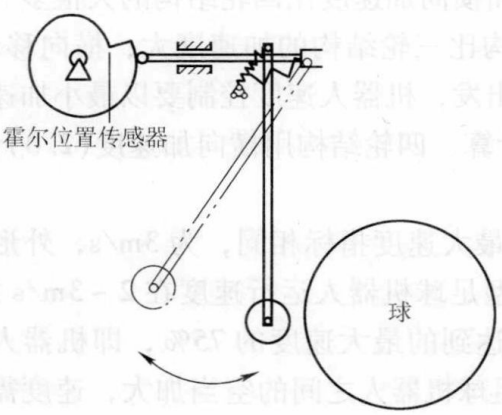



图8-2　击球(挑球)结构示意图

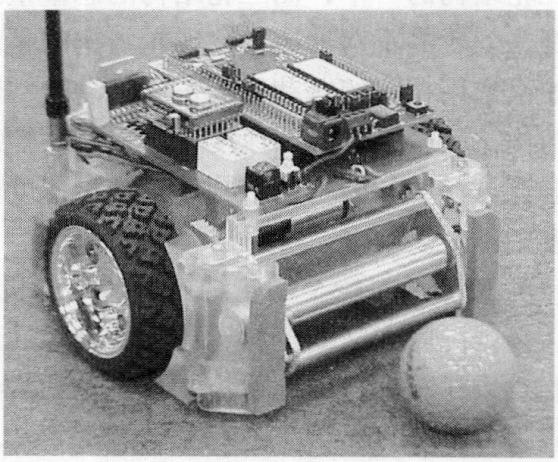


图8-3　装有击球(挑球)机构的机器人

击球结构常见的还有直线运动结构、电磁击球结构等。图8-4为直线运动的击球结构。电磁击球结构如图8-1所示，中间的一块为电磁铁，由电磁铁的瞬间运动带动击球杆向前运动产生击球效果。可以通过调节脉冲宽度实现击球力量的控制。

控球结构如图8-5所示，由传动带通过控球电动机带动摩擦棒转动，以使球能动态地被

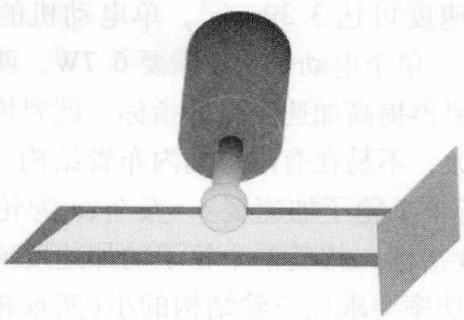


图8-4　直线运动击球结构

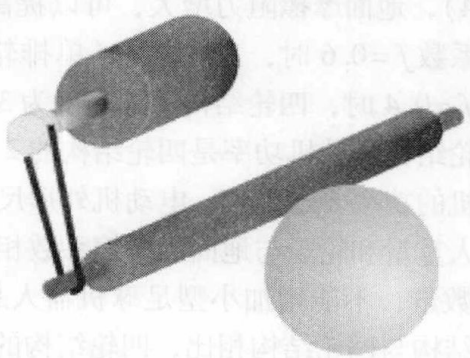


图8-5　小型足球机器人的控球装置示意图

“吸住”，从而使踢(挑)球结构能正常有效地踢(挑)球，帮助球队传球、开球、配合、点球及射门等。其中，滚轮的材质需要有较大的摩擦力。此处不用齿轮而用传动带传动，是考虑到一旦发生摩擦棒与小球卡死，会影响到控球电动机的安全，而使用传动带就可以避免。

4. 小型足球机器人各结构比较

以下参考参加机器人世界杯大赛的参赛队在各自设计小型足球机器人时提供的数据，得出二轮结构、三轮结构(单排轮)、四轮结构(单排轮)、三轮结构(双排轮)的比较。在最大正向移动速度为3m/s时，考虑到以电动机最大输出转矩为准，经过减速和效率转换后，电动机施加在轮子上的最大力矩被限定，此时轮子与地面之间的摩擦力为运行时的最大值，也是电动机可以传给机器人轮子的最大驱动力。三轮和四轮结构在求解正向和横向最大驱动力合力时不同。正向移动时，三轮结构只有前面两个电动机起驱动作用；而四轮结构的四个电动机全用于驱动，夹角都为30°，由于四轮结构的电动机功率为三轮结构的一半，所以正向总驱动功率相等(12.47W)。横向移动时，三轮结构的后面电动机全用上，总功率利用率为两个电动机($P+2P\cos60°=14.4$W)；四轮结构的四个电动机全用上，总功率利用率也为两个电动机($4P\cos60°=7.2$W)，所以三轮结构的横向加速度比四轮结构的大。综上所述，若四轮结构的电动机功率为三轮结构的一半，而三轮结构的总重量又可以比四轮结构的稍小，此时三轮结构比四轮结构好，三轮的正向加速度比四轮结构的稍大点，而横向加速度比四轮结构的大很多。

如果选用相同的电动机，正向移动时，四轮结构比三轮结构的加速度大；横向移动时，四轮结构比三轮结构的加速度稍小点。从控制角度出发，机器人速度控制要以最小加速度作为控制计算参数，即三轮结构用正向加速度(2.0)计算、四轮结构用横向加速度(2.0)计算，二者差别不大。

(1) 速度　二轮至四轮结构小型足球机器人的最大速度指标相同，为3m/s，外形尺寸相同。根据国际强队的资料，比赛场地尺寸适合小型足球机器人运行速度在2~3m/s之间，其控制效果比较好，但此可控制速度为机器人所能达到的最大速度的75%，即机器人最大速度应为2.7~4.0m/s。随着比赛场地扩大，小型足球机器人之间的空当加大，速度需要提高。究竟提高多少合适，需要控制系统和图像系统的配合。

(2) 加速度　小型足球机器人加速度，国际队伍指标为大于2m/s$^2$，部分强队指标为5m/s$^2$。加速度指标原则上越大越好，机器人应在0.6s内能够把速度从0提到最大值，行程小于1m。但加速度指标受地面摩擦系数和电动机驱动力矩与功率的影响，在保证速度指标的前提下，传动比基本固定(一般电动机转速为8000~10000r/min,效率为70%,总效率约为50%，传动比为4~5)，力矩放大倍数有限。增大摩擦系数(暂不考虑如何实现,地面与轮子的摩擦系数不足0.4)，地面摩擦阻力增大，可以提高加速度指标，但需要电动机功率相应增大。例如地面摩擦系数$f=0.6$时，三轮结构(单排轮)的加速度可达3.39m/s$^2$，单电动机的功率需要13.38W；$f=0.4$时，四轮结构的加速度为3.40m/s$^2$，单个电动机功率需要6.7W。两者效果相同，但三轮结构电动机功率是四轮结构的2倍。如果再提高加速度设计指标，就要增大摩擦系数，电动机的功率要求更大，电动机外形尺寸也加大，不易在有限空间内布置结构。由于小型足球机器人重量和轮子与地面的摩擦系数相对稳定(单个轮子加速度$a=fg/n$,$n$为轮子个数)，增加轮子数量，不能增加小型足球机器人总加速度指标，相反单个轮子的加速度值减小。

三轮结构与四轮结构相比，四轮结构的电动机功率要求比三轮结构的小(实现相同的设计指标)，电动机外形尺寸可以小点。由于采用四轮结构，在规定的空间内，四轮结构的电动机

尺寸必须比三轮结构的小才能安装，关键是电动机长度受限制，三轮结构的电动机尺寸允许 $\phi$26×58mm，四轮结构的电动机尺寸允许 $\phi$26×45mm。在这样的电动机尺寸限制范围内，三轮结构的电动机可选到12~20W，而四轮结构的电动机可选功率不大于6W。实际中，四轮结构使用8W以上的电动机，三轮结构使用12W以上的电动机才比较符合设计要求。

（3）轮子结构　国际队伍绝大多数采用全向轮，有的使用双排轮，有的使用多辊子单排轮。双排轮轴向尺寸大，转动平稳，与地面接触点在轴向变化，导致回转半径变化，占用的电动机长度约11mm，小型足球机器人中间位置空间紧张，辊子与地面之间的摩擦系数提高不易；单排轮轴向尺寸较小，转动不平稳，回转半径稳定，给小型足球机器人中间位置留出空间(布置击球结构方便)，辊子与地面之间摩擦系数可以提高。葡萄牙队的方案是把小辊子做成很密、很薄的金属片，金属片与地毯之间如同履带的效果，其摩擦力很大，若能够进一步提高电动机驱动功率，其加速度值就能有很大提高，但这种结构制造难度较大。即使使用小橡胶辊子，单排轮比双排轮的摩擦系数也要大，尺寸也合理些。

（4）控制部分　电动机数量增多，控制电路(主要是电动机大功率驱动部分)也有增加，总电动机功率没有明显增加。三轮结构中每个电动机的功率比四轮结构中的大，但是码盘数量增加、硬件增多、成本也高、CPU处理码盘信号能力不够(能够处理二路码盘信号)、计数器数量需要外扩、电路稳定性和可靠性有所下降、程序运行时间及硬件资源分配也复杂。目前，硬件、软件电路中采用了一些非正常手段处理通信、电动机控制和码盘信号处理等问题，经常出现CPU死机现象。

总之，四轮足球机器人由于4只轮子着地，运行比三轮要稳定，三轮足球机器人的后轮在拖动时有点摆动；四轮足球机器人的每个电动机功率比三轮足球机器人的小，如果有合适的电动机和尺寸，四轮结构在正向运行时加速度比三轮结构的大，起动更快。从满足小型足球机器人运动性能要求看，三轮结构和四轮结构没有差别，四轮结构所达到的性能，三轮结构同样可以达到，其控制原理相同；从电动机功率利用率看，三轮结构和四轮结构效果一样，都没有全部利用电动机的全能。

## 8.4.2　控制子系统

为了使智能小型机器人具备高度的机动性和灵活性，能够快速实现前进、后退、转角、停车等基本动作，采用专门用于电动机控制的数字信号处理芯片TMS320LF2407A。其运算速度是平常的数字信号处理元件无法比拟的，即使在很复杂的控制中，采样周期也可以很小，控制效果更接近连续控制，可以实时地完成许多移动机器人的复杂控制算法(如模糊控制)等。智能小型足球机器人的控制总体结构如图8-6所示。

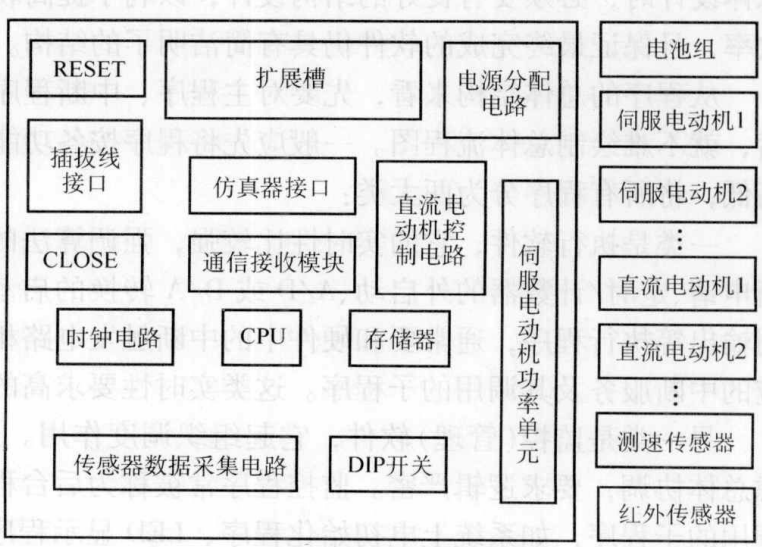



图8-6　控制总体结构图

智能小型足球机器人的击球子系统包括两大部分：击球结构和红外测球结构。其中，击球结构在接收到击球指令后驱动电磁铁击球，而红外测球结构则用来检测球是否在智能小型足球机器人的控制下，以避免空踢和误踢现象发生。击球结构采用了电磁铁，它的优点是力量大、动作频率高、机械结构相对简单、比较好的电磁铁击球结构可以让球获得 10m/s 以上的速度，缺点是要用 100V 以上的电压来驱动，才能获得击球的效果。电压越高，击球效果越好，但小型机器人上的电压一般不超过 12V。要获得更高的电压，就需要专门的升压电路。

### 8.4.3 板载软件

为了使计算机控制系统的各种硬件设备能够正常运行，有效地实现足球机器人各个环节的实时控制和管理，除了要设计合理的硬件电路，还必须要有高质量的软件支持。这和一台好的计算机需要好的操作系统来支持一样。因此，用汇编语言编写的实时通信及控制系统的应用程序，在整个足球机器人系统设计中占有非常重要的地位。

智能小型足球机器人的各项功能的实现最终是靠应用程序驱动硬件电路来完成的。应用程序设计得好坏，将直接决定整个系统的运行质量和效率。因此，在应用软件设计之前，首先应了解应用软件设计的基本要求，主要包括以下三点：

（1）实时性　电动机控制都是快速地实时控制，所以它的软件必须是实时性控制软件。所谓“实时性”，是指计算机必须在一定的时间限制内完成一系列的软件处理过程，例如对电动机的被控参数（如转速、电流、电压等）的反馈信号进行采样、计算和逻辑判断，按规定的控制算法进行数值计算，输出控制信号以及对突然出现的故障报警和处理等。

（2）可靠性　软件的可靠性是指软件在运行过程中避免发生故障的能力，还有一旦发生故障后的解脱和排除故障的能力。因此，为了提高软件的可靠性，软件设计时应当对各种可能引起软件运行故障的意外情况加以考虑，并事先设定这些意外情况出现时的应对措施。

（3）易修改性　一个好的完整的软件，都不是一次设计和调试完成的，常常是边设计边调试，经过逐次修改和不断完善，最终才满足所要求的功能和特性。因此，软件在一开始总体设计时，必须要有良好的结构设计，以利于提高软件在反复调试、修改和补充过程中的效率，且保证最终完成的软件仍具有简洁明了的结构。

从程序的总体结构来看，先要对主程序、中断程序和子程序作大致的分工。分工确定以后，就不难绘制总体流程图。一般应先将程序按各功能模块一一列出，然后按实时性要求的高低，将所有程序分为两大类：

一类是执行软件，它的实时性比较强，强调算法的效率，而且与硬件配合有关（如外中断申请、定时/计数器的外启动、A/D 或 D/A 转换的启动等）。例如定时系统、控制运算、控制输出等执行程序，通常要和硬件中的中断触发电路相配合，这些执行软件常常就构成了相应的中断服务及其调用的子程序。这类实时性要求高的程序又称为前台程序。

另一类是监控（管理）软件，它起组织调度作用。这类程序对实时性要求不高，主要考虑总体协调，要求逻辑严密。监控程序常被称为后台程序，一般就是指软件中的主程序及其调用的子程序，如系统上电初始化程序、LED 显示程序等。

执行软件（前台）和监控（后台）软件之间一般通过中断和中断返回的形式进行切换。

智能小型足球机器人软件系统主要由主控制板软件和运动控制板软件组成。

## 8.5　智能小型足球机器人系统的通信系统与电源子系统

智能小型足球机器人系统的通信系统结构(见图8-7)主要分为以下几个部分：

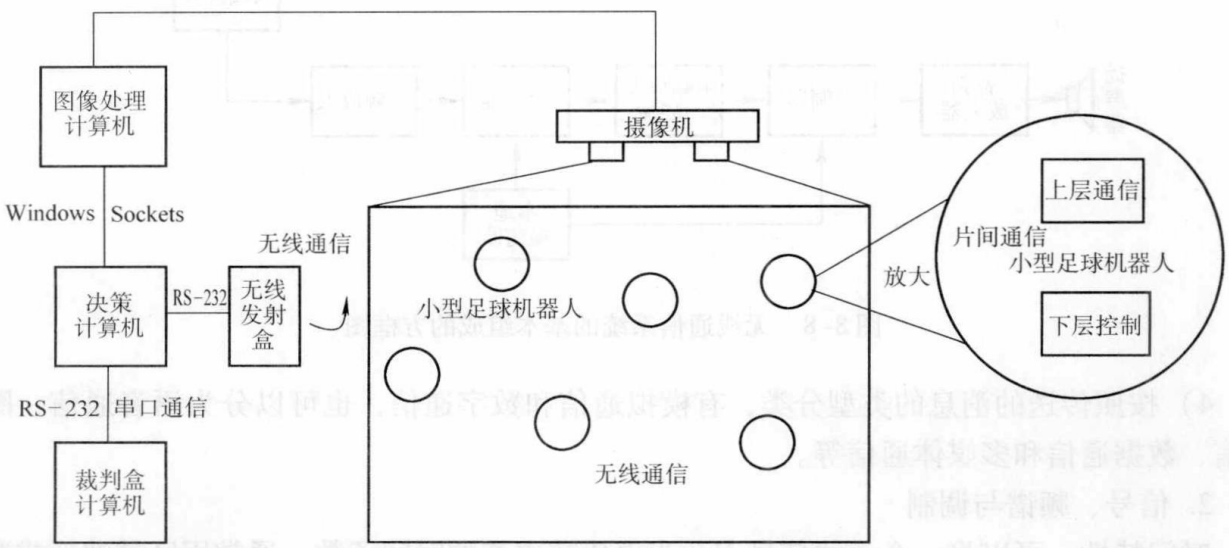



图8-7　智能小型足球机器人系统的通信示意图

1）图像处理计算机与决策计算机之间一般采用Windows Sockets。

2）裁判盒计算机与决策计算机之间规定使用RS-232串口通信。

3）决策计算机与无线发射盒之间一般采用RS-232串口通信。

4）无线发射盒与机器人之间一般采用无线通信模式，可以使用无线局域网。

5）机器人内部的CPU，采用片内通信机制。

智能小型足球机器人系统的供电电源要求合理安排能量需求与比赛时间的关系，尽量使用可充电池组，并需要选择或制作合适的充电器。

### 8.5.1　无线通信系统的组成

无线通信(或称无线电通信)的类型很多，可以根据传输方法、频率范围、用途等分类。不同的无线通信系统，其设备组成和复杂程度虽然有较大差异，但它们的基本组成不变。图8-8是无线通信系统的基本组成的方框图。

1. 无线通信系统的类型

按照无线通信系统中关键部分的不同特性，有以下一些类型：

1）按照工作频段或传输手段分类，有中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信和卫星通信等。所谓工作频率，主要指发射与接收的射频(RF)频率。射频实际上就是“高频”的广义语，它是指适合无线电发射和传播的频率。无线通信的一个发展方向就是开辟更高的频段。

2）按照通信方式来分类，主要有(全)双工、半双工和单工方式。

3）按照调制方式的不同来划分，有调幅、调频、调相以及混合调制等。

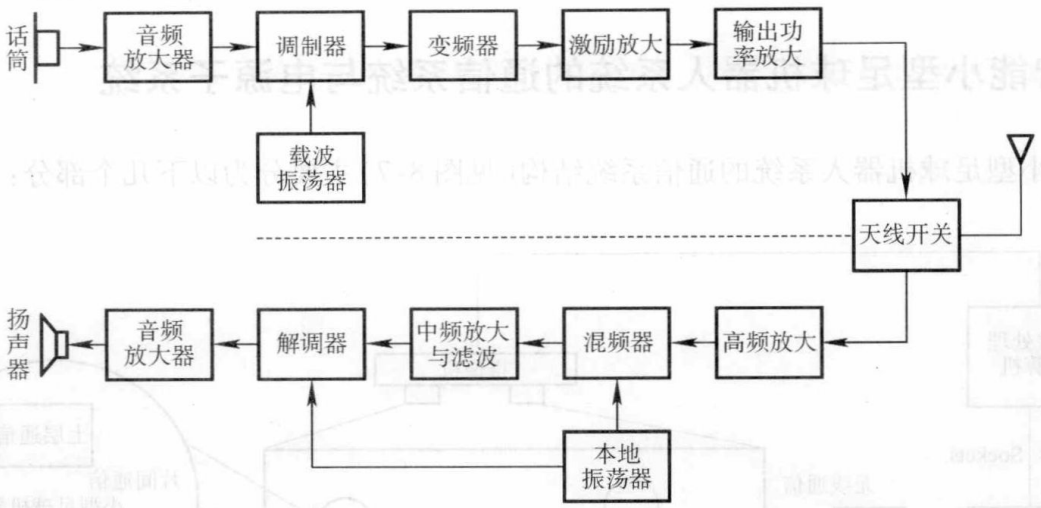



图 8-8 无线通信系统的基本组成的方框图

4）按照传送的消息的类型分类，有模拟通信和数字通信，也可以分为语音通信、图像通信、数据通信和多媒体通信等。

2. 信号、频谱与调制

时间特性：可以将一个无线信号表示为电压或电流的时间函数，通常用区域波形或数字表达式描述。

频谱特性：频谱特性包含幅频特性和相频特性两部分，它们分别反映信号各个频率分量的振幅和相位的分布情况。

频率特性：任何信号都有一定的频率或波长。智能足球机器人系统中的频率特性就是无线信号的频率或波长。

传播特性：传播特性指的是无线信号的传播方式、传播距离、传播特点等。

调制特性：无线信号传播一般都要采用高频的一个重要原因就是高频适合于天线辐射和无线传播。所谓调制，就是用调制信号去控制高频载波的参数，使载波信号的某一个或几个参数按照调制信号的规律变化。通过不同的调制方法，可以在一个码元上负载多个比特信息。

在数字信道中，比特率是数字信号的传输速率，它用单位时间内传输的二进制代码的有效位(bit)数来表示，其单位为每秒比特数[bit/s(bps)]、每秒千比特数(kbps)或每秒兆比特数(Mbps)来表示(此处,k 和 M 分别为 1000 和 1000 000,而不是涉及计算机存储器容量时的 1024 和 1 0485 76)。波特率指数据信号对载波的调制速率，它用单位时间内载波调制状态的改变次数来表示，其单位为波特(Baud)。波特率与比特率的关系为：比特率 = 波特率 × 单个调制状态对应的二进制位数。

显然，两相调制(单个调制状态对应一个二进制位)的比特率等于波特率，四相调制(单个调制状态对应两个二进制位)的比特率为波特率的两倍，八相调制(单个调制状态对应三个二进制位)的比特率为波特率的三倍，依此类推。

在无线电通信和广播中，需要传送由语言、音乐、文字、图像等转换成的电信号。由于这些信号频率比较低，根据电磁理论，低频信号不能直接以电磁波的形式有效地从天线上发

射出去。因此，在发送端须采用调制的方式，将低频信号加到高频信号之上，然后将这种带有低频信号的高频信号发射出去；在接收端则把带有这种低频信号的高频信号接收下来，经过频率变换和相应的解调方式“检出”原来的低频信号，从而达到通信和广播的目的。

要把低频信号“加到”高频振荡上去，可由低频信号去控制高频等幅振荡的某一参数(振幅、频率或相位)来达到。这种用低频信号去控制高频振荡，使其具有低频信号特征的过程称为调制。其中，低频信号称为调制信号或调制波，被控制的高频等幅振荡称为被调信号或载波，经过调制后的高频信号称为已调波。

根据低频信号所控制高频信号参数的不同，有不同的调制方式。以调制信号去控制载波的振幅，使载波的振幅按调制信号的规律变化，这种调制称为振幅调制，简称调幅。以调制信号去控制载波的频率，使载波的频率按调制信号的规律变化，则称频率调制，简称调频。同理，使载波的相位按调制信号的规律变化，则称调相控制，简称调相。

上述的调幅、调频和调相属于连续调制，此外，还有脉冲调制、近代数字通信中发展起来的所谓脉冲编码调制等。但是，使用最早、应用较广的是振幅调制方式。这种方式尽管效率较低，抗干扰性能较差，但它占用的频带窄、电路简单，所以，现在的中短波广播仍广泛采用调幅制。

调制不仅使低频信号得到了有效的传输，还可以使不同电台具有不同的载波频率，从而使各电台相互区别。

### 8.5.2　电源子系统

1. 机器人常用电池

电池是能将化学能、内能、光能等形式的能直接转化为电能的装置。最早的电池可以追溯到两百年以前，意大利物理学家伏打发明的伏打电池，它使人们第一次获得了比较稳定而持续的电流，具有划时代的意义。在伏打电池的原理和研发精神的指引下，人们通过不断努力，开发了一代一代的新型电池。从人们普遍使用的干电池到新型的太阳电池、锂聚合物电池(Li-polymer)和燃料电池等，不仅在电池容量、体积、使用方便程度等方面有很大突破，更重要的是在这些新型电池的研发过程中，渗透着人们强烈的绿色环保意识，电池的开发、发展正以绿色环保作为重要的指导精神。

在化学电池中，根据能否用充电方式恢复电池存储电能的特性，可以分为一次电池(也称原电池)和二次电池(又名蓄电池,俗称可充电电池)两大类。由于需要重复使用，机器人上通常采用二次电池。智能小型足球机器人由于体积、尺寸、重量的限制，对其采用的电源有各种严格要求。例如移动机器人通常不能采取电缆供电的方式(除一些管道机器人、水下机器人外)，必须采用电池或内燃机供电；相对于汽车等应用，要求电池体积小、重量轻、能量密度大；并且要求在各种振动、冲击条件下接近或者达到汽车电池的安全性、可靠性。

由于电池技术发展的限制，当前任何电池和电动机系统都很难达到内燃机的能量密度及续航时间。因此，对机器人系统的电源管理技术也提出了更高的要求。通常，一台尺寸在0.5m×0.5m×0.5m左右、重30～50kg的移动机器人总功耗约为50～200W(用于室外复杂地形的机器人可达到200～400W)，而200Wh(瓦特小时)的电池重量可达3～5kg。因此，在没有任何电源管理技术的情况下，要维持机器人连续3～5小时运行，就需要600～1000Wh的电池，重达10～25kg。

智能小型足球机器人的耗电量会随着采用的部件不同而有所不同。例如一个采用8个舵机的四腿机器狗，其运动时大约需要2A的电流，即功率为10W左右；一个带有机械臂、4个电动机驱动的全向移动挖掘机，大约需要4A的电流，即功率20W左右。

2. 干电池

到目前为止，已经约有100多种干电池。常见的有普通锌-锰干电池、碱性锌-锰干电池、镁-锰干电池、锌-空气电池、锌-氧化汞电池、锌-氧化银电池、锂-锰电池等。

对于使用最多的锌-锰干电池来说，按照结构的不同，又可分为糊式锌-锰干电池、纸板式锌-锰干电池、薄膜式锌-锰干电池、氯化锌-锰干电池、碱性锌-锰干电池、四极并联锌-锰干电池、叠层式锌-锰干电池等。

由于干电池属于一次性使用，成本相对较高；并且不管是普通的锌-锰电池还是碱性电池，其内阻比较大(通常在0.5~10Ω级别)，当负载较大时，电压下降很厉害，无法实现大电流连续工作。因此，干电池不是机器人系统的理想电源。

3. 铅酸蓄电池

铅酸蓄电池是一种具有一百多年应用历史的蓄电池。蓄电池连接外部电路放电时，稀硫酸即会与阴、阳极板上的活性物质产生反应生成新化合物：硫酸铅。经由放电，硫酸成分从电解液中释出，放电越久，硫酸浓度越稀薄。所消耗的成分与放电量成比例，只要测得电解液中的硫酸浓度，亦即测其比重，即可得知放电量或残余电量。

充电时，由于放电时在阳极板、阴极板上所产生的硫酸铅会被分解还原成硫酸、铅及过铅，因此电池内电解液的浓度逐渐增加，并逐渐回复到放电前的浓度。这种变化显示出蓄电池中性物质已还原到可以再度供电的状态。当两极的硫酸铅被还原成原来的活性物质时，即充电结束。

铅酸蓄电池最大的特点是价格较低、支持20℃以上的大电流放电(20℃意味着10Ah的电池可以200A的放电电流)、对过充电的耐受强、技术成熟、可靠性相对较高、没有记忆效应、电控制容易，但寿命较低(充电、放电循环通常不超过500次)、重量大、维护较困难，是一种优点和缺点都很突出的电池。为了解决电解液需要补充、维护困难的问题，人们开发了免维护铅酸蓄电池。

免维护蓄电池的工作原理与普通铅蓄电池的相同。放电时，正极板上的二氧化铅和负极板上的海绵状铅与电解液内的硫酸反应生成硫酸铅和水，硫酸铅沉淀在正、负极板上，而水则留在电解液内；充电时，正、负极板上的硫酸铅又分别还原成二氧化铅和海绵状铅。

由于铅酸电池本身的特点，智能足球机器人不可能采用铅酸电池作为电源。

4. 锂离子/锂聚合物动力电池

常见的锂离子电池主要是锂-亚硫酸氯电池。此系列电池具有很多优点，例如单元标称电压达3.6~3.7V，其在常温中以等电流密度放电时，放电曲线极为平坦，整个放电过程中电压平稳。另外，在-40°时，这类电池的电容量还可以维持在常温容量的50%左右，远超过镍氢电池，具有极为优良的低温操作性能。再加上其年自放电率约为2%左右，所以一次充电后储存寿命可长达10年以上。

锂离子电池具有重量轻、容量大、无记忆效应等优点，因而得到了普遍应用。现在的许多数码设备都采用了锂离子电池作电源，尽管其价格相对来说比较昂贵。锂离子电池与镍氢

电池相比，重量轻30%～40%，能量比却高出60%。正因为如此，锂离子电池的生产和销售量正逐渐超过镍氢电池。锂离子电池的能量密度很高，它的容量是同重量的镍氢电池的1.5～2倍，充放电次数可达500次以上。此外，锂离子电池具有不含有毒物质等优点，也是它广泛应用的重要原因。

但是锂离子电池并非完美，它依然面临其他一些影响使用寿命和安全性的因素。

首先是其安全性。相对于铅酸蓄电池、镍氢电池等具备较强的抗过充、过放电能力的电池，锂离子电池的充电和放电必须严格小心。一方面，锂离子电池具有严格的放电低限电压，通常为2.5V，如果低于此电压继续放电，将严重影响电池的容量，甚至对电池造成不可恢复的损坏；另一方面，电池单元的充电截止电压必须限制在4.2V左右，如果过充，锂离子电池将会过热、漏气甚至发生猛烈的爆炸。因此，通常在使用锂离子电池组的时候，必须配备专门的过充电、过放电保护电路。

其次是价格。锂离子电池价格较高，并且需要配备保护电路，因此相同能量的锂离子电池的价格是免维护铅酸蓄电池的10倍以上。

为了解决这些问题，最近出现了锂聚合物电池。其本质同样是锂离子电池，但在电解质、电极板等主要构造中至少有一项或一项以上使用高分子材料的电池系统。

新一代的聚合物锂离子电池在聚合物化的程度上已经很高，所以形状上可做到很薄(最薄0.5mm)、任意面积化和任意形状化，大大提高了电池造型设计的灵活性。同时，聚合物锂离子电池的单位能量比目前的一般锂离子电池提高了50%，其容量、充放电特性、安全性、工作温度范围、循环寿命与环保性能等方面都较锂离子电池有大幅度的提高。

高分子聚合物锂离子电池相对液体锂离子电池而言，具有较好的耐充放电特性，因此对外加保护IC电路方面的要求可以适当放宽。此外在充电方面，聚合物锂离子电池可以利用IC定电流充电，与锂离子二次电池所采用的恒流-恒压(Constant Current-Constant Voltage，CCCV)充电方式所需的时间比较起来，可以缩短充电等待时间。

由于单个锂电池最高电压4.2V，两个串联电压8.4V，因此不符合智能小型足球机器人的电源要求，无法直接选用锂电池作为智能小型足球机器人的电源。

5. 镍镉/镍氢电池

镍镉电池是最早应用于手机、笔记本电脑等设备的电池种类，它具有良好的大电流放电特性、耐过充放电能力强、维护简单等优势。但其最致命的缺点是：在充放电过程中如果处理不当，会出现严重的“记忆效应”，使得电池容量和使用寿命大大缩短。所谓“记忆效应”，就是电池在充电前，电池的电量没有被完全放尽，久而久之将会引起电池容量的降低；在电池充放电的过程中(放电较为明显)，会在电池极板上产生微小气泡，日积月累，这些气泡减少了电池极板的面积，也间接影响了电池的容量。此外，镉是有毒金属，因而镍镉电池不利于环境的保护，废弃后必须严格地回收。众多的缺点使得镍镉电池已应用得越来越少。但在诸如电动航空模型、电动玩具车等需要大电流放电的场合，镍镉电池因其大电流放电能力和高可靠性、维护简单，仍被广泛采用。

镍氢电池是早期的镍镉电池的替代产品，不再使用有毒的镉，可以消除重金属元素对环境带来的污染问题。它使用氧化镍作为阳极，用吸收了氢的金属合金作为阴极，由于此合金可吸收高达本身体积100倍的氢，储存能力极强。另外，它具有同镍镉电池的1.2V电压，及自身放电特性，可在一小时内再充电，内阻较低，一般可进行500次以上的充放电循环。

镍氢电池具有较大的能量密度比，这意味着可以在不增加设备额外重量的情况下，使用镍氢电池代替镍镉电池能有效地延长设备的工作时间，同时镍氢电池在电学特性方面与镍镉电池基本相似，在实际应用时完全可以替代镍镉电池，而不需要对设备进行任何改造。镍氢电池的另一个优点是：大大减小了镍镉电池中存在的“记忆效应”。

镍氢电池较耐过充电和过放电，具有较高的比能量，是镍镉电池比能量的1.5倍，循环寿命也比镍镉电池长，通常可达600～800次。但镍氢电池的大电流放电能力不如铅酸蓄电池和镍镉电池，通常能达到5～6C，尤其是电池组串联较多的时候，例如20个电池单元串联，其放电能力被限制在2～3C。

由此可知，镍氢电池是智能小型足球机器人系统比较理想的电源。

## 8.6 智能中型足球机器人的硬件结构

从智能中型足球机器人的产生、发展和设计要求可以看出，智能中型足球机器人是为了模拟人在足球场上进行足球比赛。它的功能就是能够在足球场上自主地进行足球比赛，输入比赛场上的实时图像信息，其中包括机器人在球场上看到球场标识白线、球门的位置、球的位置、本队机器人和对方机器人的位置等，而输出则是智能中型足球机器人的行为动作，如移动跑位、找球、带球、踢球等。比赛场上的实时图像信息由上位机也就是计算机来完成，而输出的动作是由智能中型足球机器人的硬件结构来完成的。

下面介绍上海大学开发的中型足球机器人的硬件结构组成、机械结构和微处理单元。

### 8.6.1 硬件结构组成

一个完整的智能中型足球机器人就像一个正常的人，它是由若干个组成部分共同协调工作的有机体。同时，它应该具有视觉感知和思考决策的能力，并且能根据最终决策做出相应的运动。

如图8-9所示，一个完整的智能中型足球机器人应该至少具有以下几个部分：

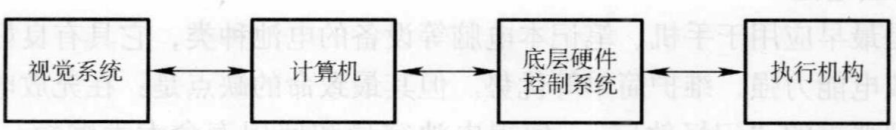



图8-9 智能中型足球机器人硬件结构

1）视觉系统：采集实时的图像或视频信息。大多数队伍采用的是摄像机加全景镜结构。

2）计算机：对视觉系统采集到的信息进行处理，然后转化为决策指令。完成这部分功能的称为上位机，可以采用各类便携式计算机或嵌入式集成处理器。

3）底层硬件控制系统：将上位机发送的决策指令转化为运动控制信息，直接控制机械结构完成移动、踢球等任务。底层控制由微处理器（MCU）、数字信号处理器（DSP）、FPGA/CPLD芯片以及电动机驱动系统等外围电路来完成。

4）执行机构：由机械部分构成，完成智能中型足球机器人的移动、踢球等任务。

虽然硬件结构完成的基本功能都一样，但在具体的实现形式上，不同队伍的智能中型足球机器人有不同的特点，性能上也有很大的区别。下面以上海大学 Legends 队为例，介绍智能中型足球机器人的硬件结构组成。

由上海大学 Legends 团队开发的智能中型足球机器人的硬件结构包括 4 个子系统：视觉系统、决策系统、运动控制系统和通信系统。视觉系统由一个工业摄像机来采集图像信息，这些信息通过 IEEE 1394 接口传递给便携式计算机。决策系统运行在计算机上，它通过解析实时图像来获取球场信息，并据此做出实时决策。这些决策信息通过 USB 线传给运动控制系统，最后由运动控制系统直接控制伺服电动机、汽缸等部件做出相应的动作。通信系统使用计算机上的无线网卡来实现和服务器的无线通信，用 IEEE1394 和 USB 接口等来实现智能中型足球机器人各子系统的通信。

## 8.6.2　机械结构

根据智能中型足球机器人的功能要求，虽然其外形各不相同，但其机械结构无非是由以下几部分组成：移动平台、踢球机构和带球机构。

1. 移动平台

智能中型足球机器人要在足球场上完成找球、带球、射门等动作，而其基础就是智能中型足球机器人的自主移动。让智能中型足球机器人采取怎样的移动方式来完成这个任务呢？最有效的方法是采用多轮驱动。根据运动原理的不同，又可以分为差动运动和全向运动两种方式。

（1）差动运动方式　传统的轮式机器人就像汽车一样，一般采用差动运动方式，在平面这是一种非常完整的约束。差动运动轮系是由两个轴线平行的驱动轮以及一个或多个从动轮组成。通过控制两个驱动轮达到一定的速度，就可得到差动运动的效果（见图 8-10）。

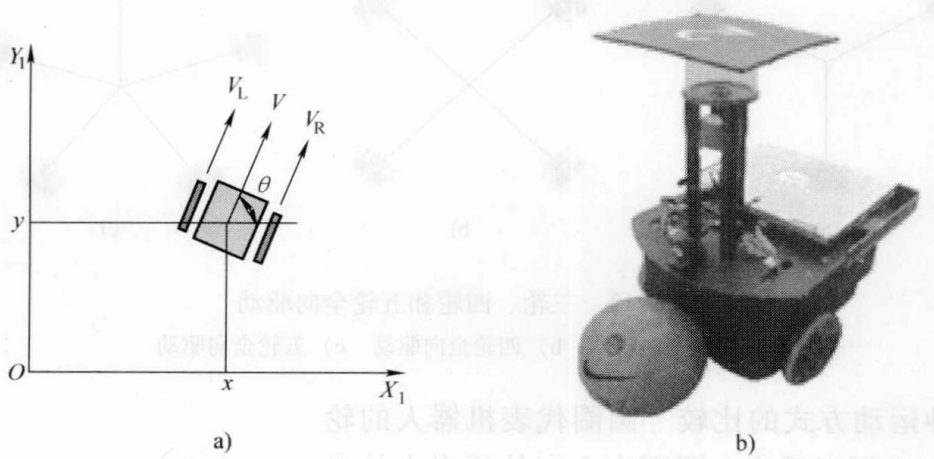



图 8-10　差动方式与差动运动足球机器人

a）差动方式　b）差动运动足球机器人

例如当两个驱动轮具有相同的速度时，就能使得机器人进行直线运动。当一个驱动轮的速度为零、另一个驱动轮速度不为零时，机器人就会绕前一驱动轮与地面的接触点作旋转运动；当两驱动轮速度出现其他情况时，机器人的运动将会是以上两种运动的合成。

（2）全向移动方式　工业上有全方位的工业品传输系统和工厂全方位自动引导车，它们是全向运动方式。与传统的差动运动相比，这是一种比较先进的运动方式。这种运动方式被吸入智能中型足球机器人中，发展成了全向移动平台。三轮组合全向移动平台如图 8-11 所示。

全向运动方式是一种可以在平面内获得任意运动方向的运动方式，可以完全控制机器人在平面运动的三个自由度(两个水平运动分量和一个自身姿态旋转分量)。具有全向运动能力的运动系统使机器人可以直接向任意方向作直线运动，而不需要提前作旋转运动，并且这种轮系可以满足一边作直线运动一边旋转的要求，达到终状态所需要的任意姿态角。全向驱动平台可由三轮、四轮或五轮组成(见图 8-12)。

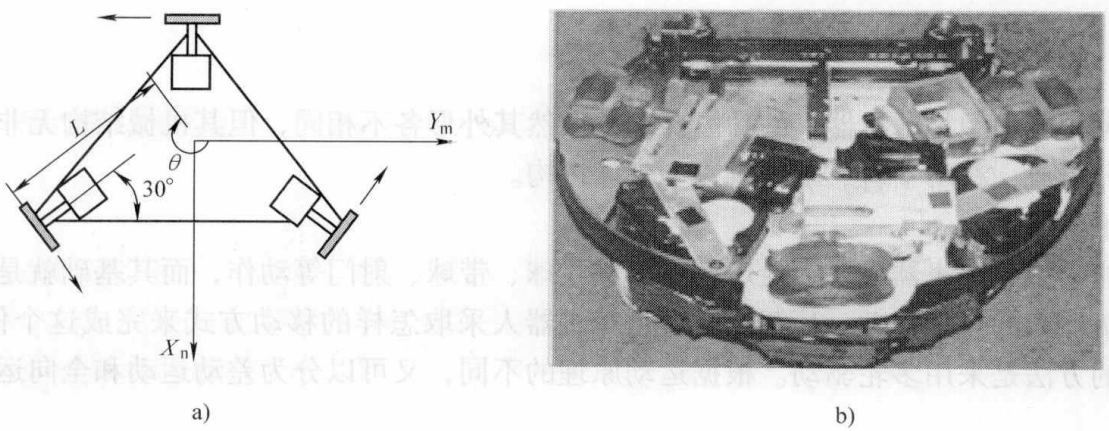



图 8-11　三轮组合全向驱动平台

a）示意图　b）实物图

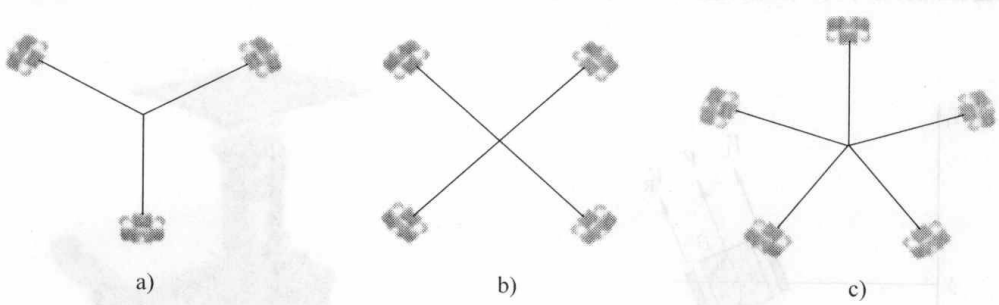



图 8-12　三轮、四轮和五轮全向驱动

a）三轮全向驱动　b）四轮全向驱动　c）五轮全向驱动

（3）两种运动方式的比较　圆圈代表机器人的轮廓，从图 8-13 中可以看出，圆圈中心向外所引出的连线表示机器人当前的姿态正方向。考虑机器人完成由 $A$ 点出发，运动到处于它侧向的 $B$ 点，并且仍然恢复先前的姿态角的任务，对于差动机器人来说，机器人必须首先在原地顺时针旋转 90°，然后才能向 $B$ 点运动，到达 $B$ 点之后，再原地逆时针旋转 90°。机器人完成这样一系列动作之后，才能达到要求。而对于全向机器人来说，

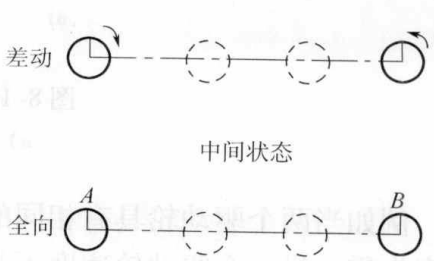



图 8-13　差动方式与全向方式的运动比较

无论它现处何种状态，都可以直接向 $B$ 点运动，在完成任务的任一时间段内都可以调整自己的姿态角。

鉴于全向轮优异的动力学和运动学性能，如果将其应用于出现激烈对抗的机器人足球比赛中去，机器人将会更容易地跟踪预定的运动轨迹，在运动的过程中达到所要求的任一姿态。可以看出，足球机器人的运动方式从差动运动到全向运动的创新，极大地提高了机器人在诸如找球、带球、射门等状态中的灵活性和进攻性，使机器人在赛场上更具竞争力。目前，国内外强队的中型足球机器人普遍采用全向移动方式，只有极少数的中型足球机器人仍采用差动运动方式。

2. 踢球机构

对于一个智能中型足球机器人而言，其移动平台的确非常重要。但是，如果没有好的踢球机构，机器人就好像一个强壮的运动员却缺一只脚，纵使力气再足，也只能一拐一拐地把一个球推进门框。由此可见，智能中型足球机器人的踢球机构是非常重要的。一个好的踢球机构，将使智能中型足球机器人的攻击力增加许多倍。因此，踢球机构的不断发展与创新是智能中型足球机器人发展的一个重要组成部分，踢球机构的创新设计非常重要。

（1）电动机弹簧式　为了把足球踢进球门，人们最容易想到的就是利用弹簧先压缩然后释放，将球推进球门。实际使用时，电动机弹簧储能释放式踢球机构用电动机张紧弹簧来实现储能，要踢球时释放弹簧，带动踢球端面。这种机构大多数踢出的球力量很大，但速度难以控制，延时比较大，且电动机工作效率极低。电动机弹簧式踢球机构的实例如图 8-14 和图 8-15 所示，电动机工作状态如图 8-16 所示。

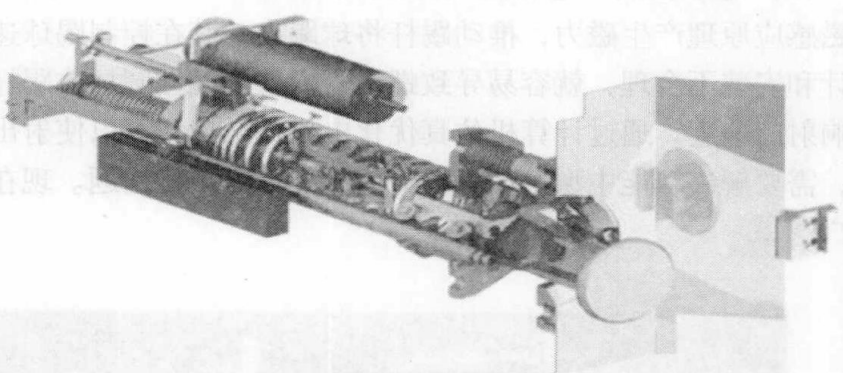


图 8-14　荷兰某足球机器人队电动机弹簧式踢球机构

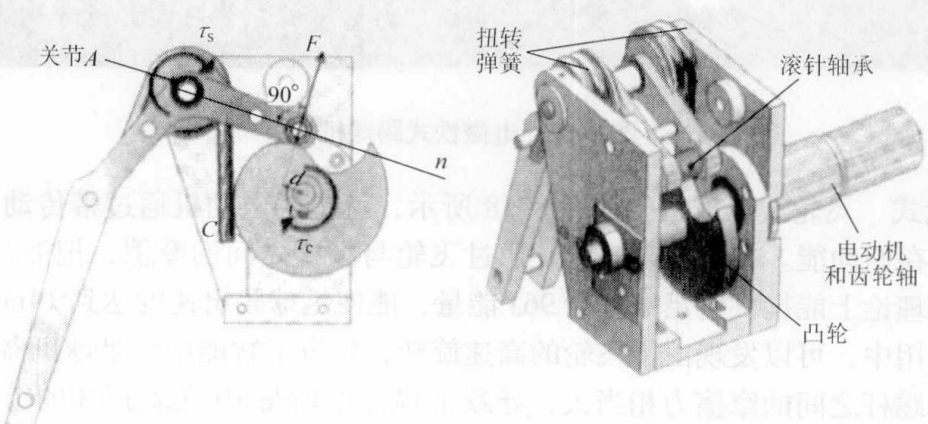



图 8-15　日本某足球机器人队的电动机弹簧式踢球系统

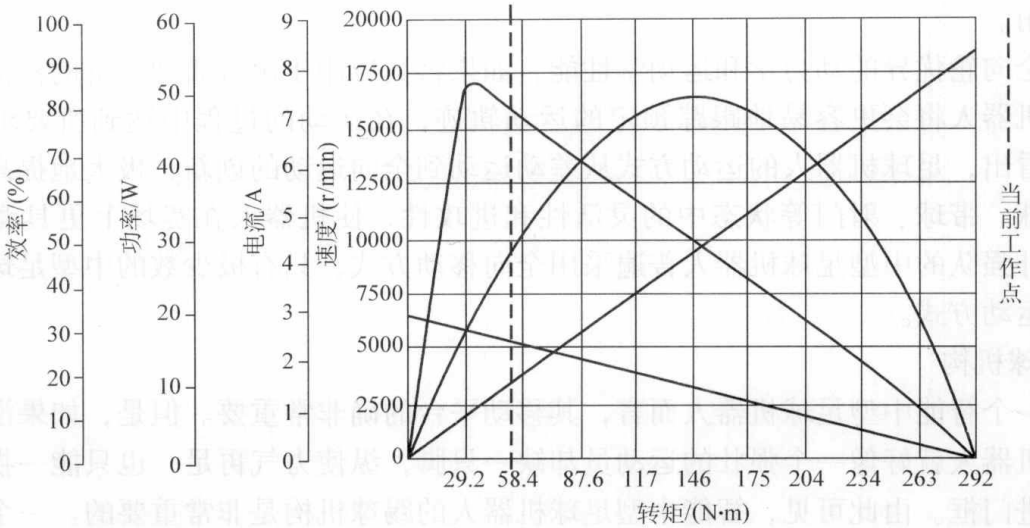



图 8-16 电动机弹簧式踢球机构的电动机工作状态

（2）电磁铁式 电磁铁式踢球机构如图 8-17 所示，就是利用通电螺线管上加电，利用电磁感应原理产生磁力，推动踢杆将球踢出。其在控制踢球速度方面的灵活性高，但是如果设计和安装不合理，就容易导致螺线管内壁与磁性圆柱体踢杆之间存在很大的摩擦力，从而影响射门速度。通过计算机仿真优化电磁铁结构，可以使射出的球速达到 12m/s。实际应用时，需要解决智能中型足球机器人内部的电磁干扰问题。现在，电磁铁式踢球机构的使用最为广泛。

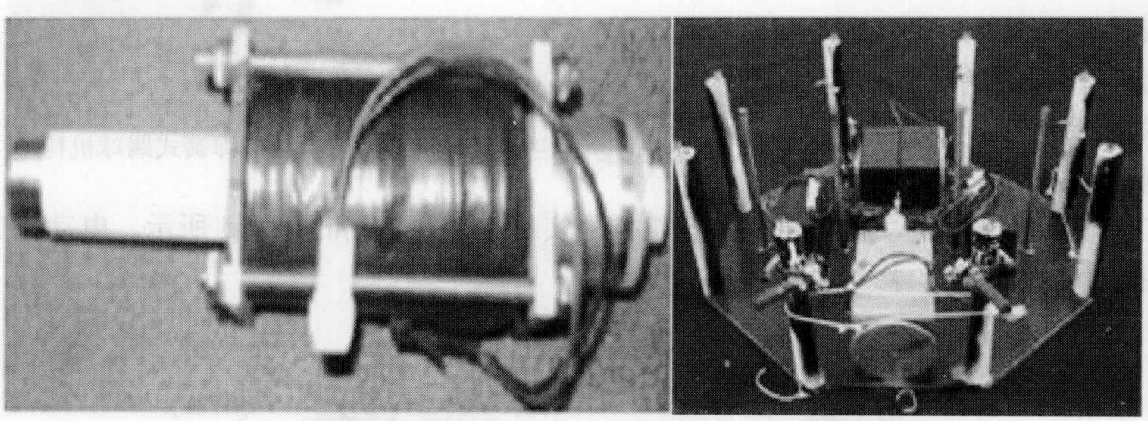


图 8-17 电磁铁式踢球机构

（3）飞轮式 飞轮式踢球机构如图 8-18 所示，就是用电动机通过带传动，带动飞轮进行高速旋转，存储动能。在需要射门时，通过飞轮与踢杆之间的摩擦，把能量传递给足球，将球踢出。其理论上能提供给足球至少 96J 能量，能使足球踢出速度达到 14m/s。

在实际使用中，可以发现由于飞轮的高速旋转，导致了智能中型足球机器人车身的连续振动。飞轮与踢杆之间的摩擦力相当大，导致了踢杆平均踢 10 次就损坏的结果，致使智能中型足球机器人可能无法顺利地完成一场比赛。故此种踢球机构在国内外使用极少。上海大学在 2006 年的中国机器人大赛中使用此种踢球机构，但之后便放弃了。

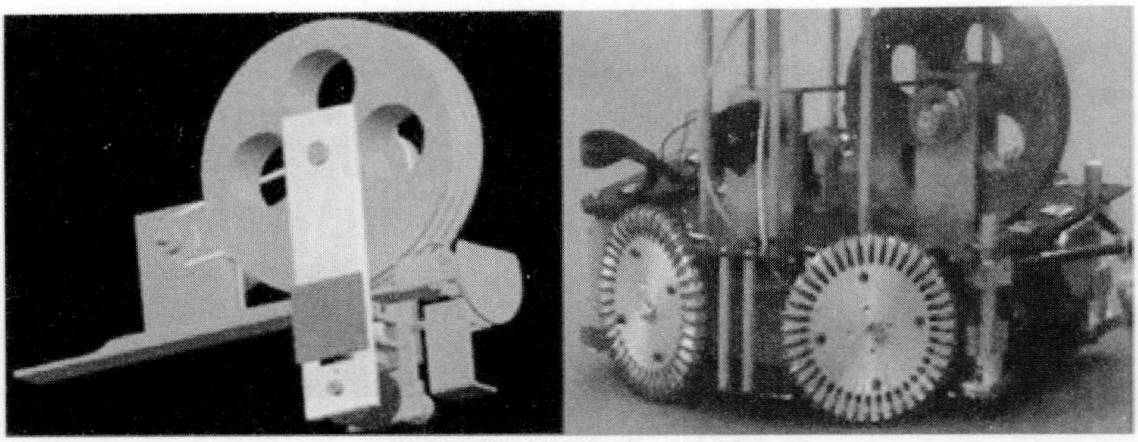


图 8-18　飞轮式踢球机构

（4）汽缸式　汽缸式踢球机构如图 8-19 所示，是以汽缸为执行元件的气动踢球系统。通过阀控制向汽缸通气的时间或气压，来实现对汽缸中活塞运动速度的控制。其控制精度较好，能达到比赛的要求。虽然机器人需携带占一定空间、预先充气的储气罐，但在实际使用中，一个充到 1.6MPa 压力的 1.5L 储气罐的气压足够踢完一场比赛，并且 1.5L 储气罐的体积并不占很大空间。目前在国际上，应用汽缸式踢球机构的机器人以德国 Brainstormers-Tribots 和日本 EIGEN 为代表。在国内，上海大学在 2007 年首次使用了汽缸式踢球机构，之后上海交通大学在 2008 年也开始采用了这种机构。

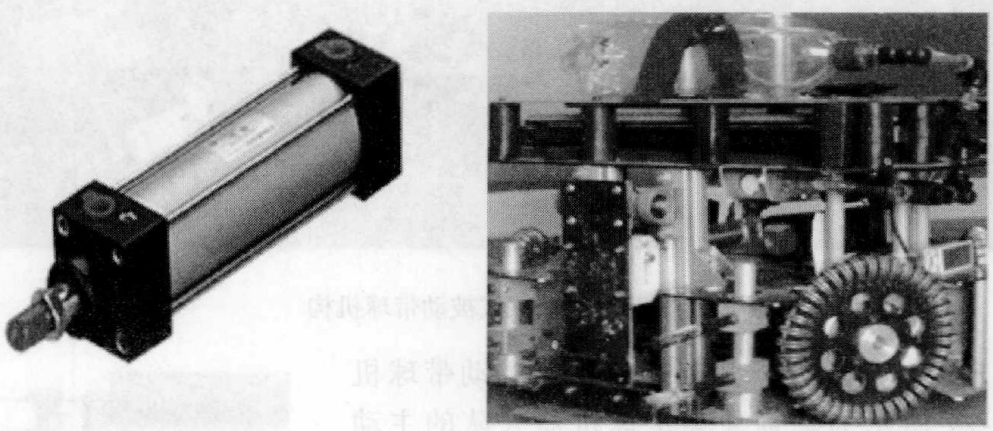


图 8-19　汽缸式踢球机构

可以看出，汽缸式踢球机构是一套比较合理的踢球机构，但在使用中存在耗气量与足球射程的矛盾，要将足球踢得远，选择汽缸口径就要相对大些，机器人携带的气就要多些。

（5）气动肌腱式　气动肌腱是一种新型的拉伸型执行元件，是 2000 年由 FESTO 公司设计推出的新概念气动元件。它不是一根普通的橡胶管，而是一个能量转换装置，如同人类的肌肉那样能产生很强的收缩力。它以崭新的设计构思，突破了气动驱动器做功必须由气体介质（流体）推动活塞这一传统概念。

气动肌腱式踢球机构如图 8-20 所示，是以气动肌腱作为执行元件的气动踢球机构。气动肌腱与同直径的汽缸相比，能提供其 10 倍的力，且执行速度快、重量轻、耗气量少。通过电气比例阀调节气动系统的压力值，来实现踢球速度的控制。此种踢球机构比较新颖，但目前使用很少，值得进行深入研究和使用。

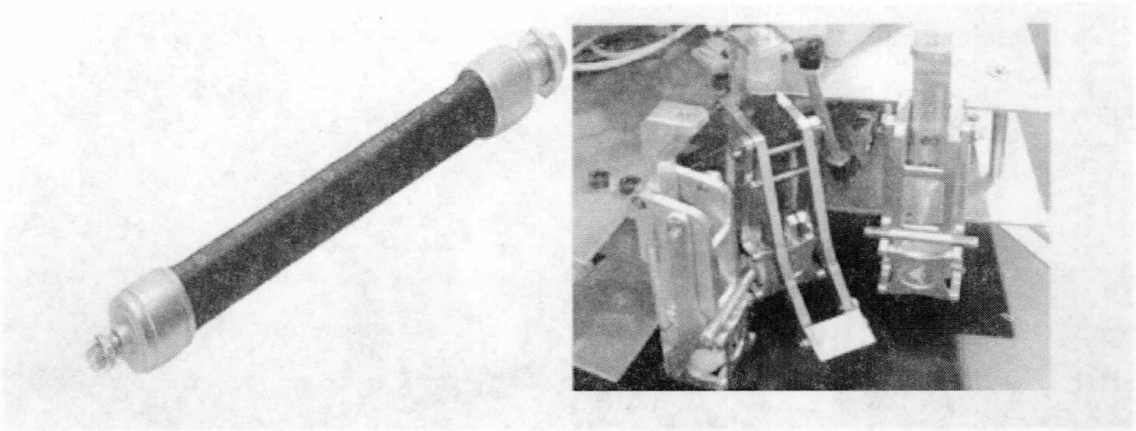


图 8-20 气动肌腱式踢球机构

3. 带球机构

智能中型足球机器人为了实现带球功能，就必须拥有带球机构。智能中型足球机器人拥有一个好的带球机构，就好比一名拥有出色盘带技术的足球运动员，可以带球长驱直入，攻击对方球门。目前，最普遍采用的是摩擦式被动带球机构，如图 8-21 所示。但由于此机构对球的控制是被动的，故带不住球、带丢球现象的出现概率比较大。

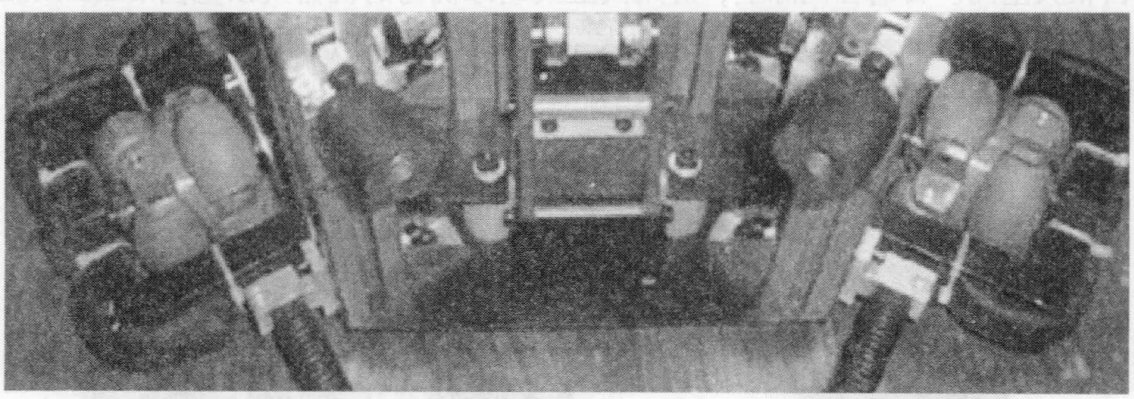


图 8-21 摩擦式被动带球机构

除了被动带球机构，近几年还出现了主动带球机构。如图 8-22 所示为葡萄牙某足球机器人队的主动带球机构。该机构使用一个电动机带动一个小轮转动，靠小轮与足球之间的摩擦力带住足球，其电动机转速可以进行调节。

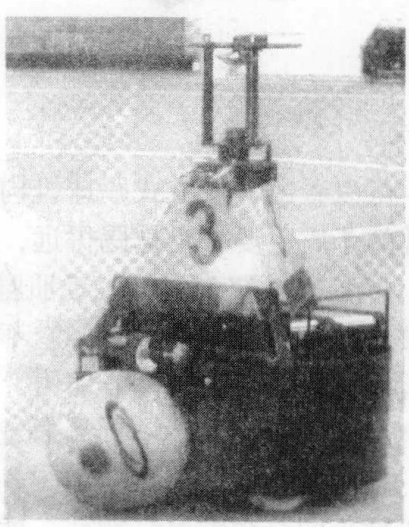


图 8-22 葡萄牙某足球机器人队的主动带球机构

除了上述的主动带球机构外，还有另一种主动带球机构，如图 8-23 和图 8-24 所示。该类机构采用了两个电动机分别驱动两个小轮进行转动，靠两个小轮与足球之间的摩擦力带住足球。两个小轮的力可以不同，从而实现差动工作。相对于上一种主动带球机构，这种主动带球机构可以将足球带得更稳。目前在世界范围内，荷兰 Tech United 队的主动带球机构做得最为出色(见图 8-23)；在国内，国防科技大学的

主动带球机构做得最有特色(见图 8-24)。

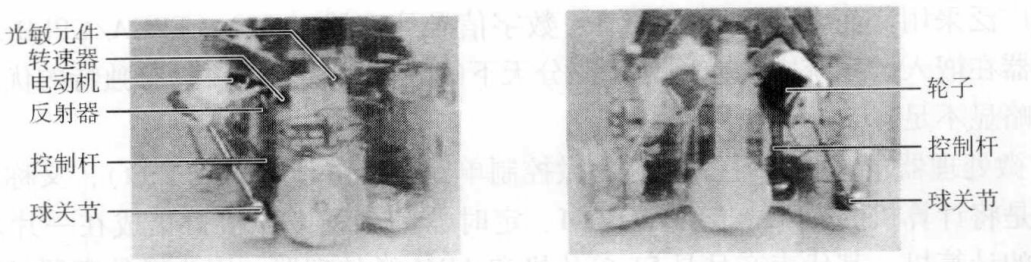



图 8-23　荷兰 Tech United 队的主动带球装置

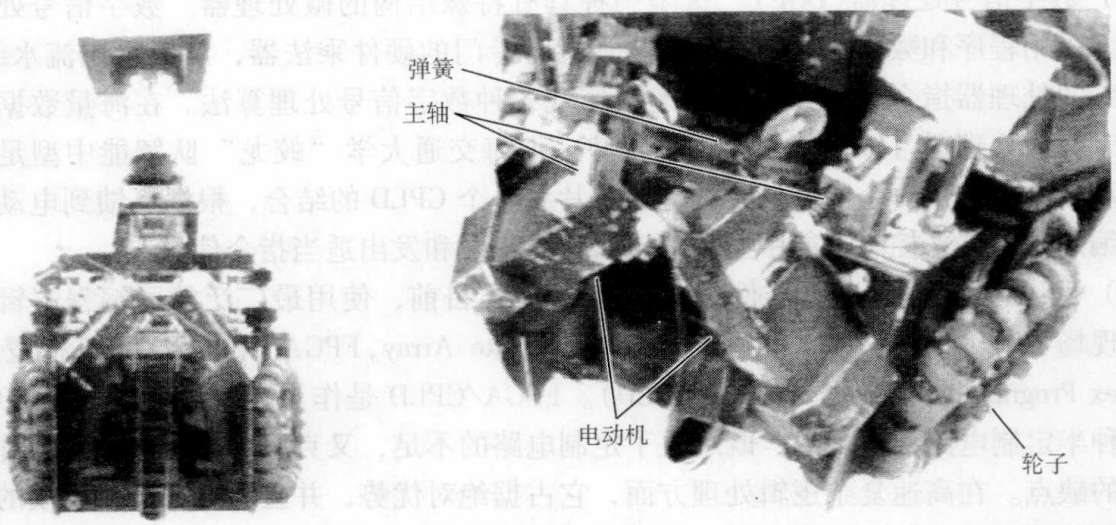



图 8-24　国防科技大学研制的主动带球装置

### 8.6.3　微处理单元

一个智能中型足球机器人就好比一个足球运动员，决策的战术意图最终要通过智能中型足球机器人本体来实现。所以，智能中型足球机器人本体的性能好坏，对比赛的胜负起着举足轻重的作用。智能中型足球机器人的足球比赛是一个高速、高对抗的比赛，比赛环境恶劣，干扰来自各个方面，如电动机产生磁场会影响智能中型足球机器人，猛烈的撞击也会对电动机和电动机驱动产生影响。这对智能中型机器人本体的稳定性、运动性和底层硬件电路控制系统的设计都提出了更高的要求，而这些又主要由底层的微处理器和外围驱动电路来决定，外围驱动电路又由微分处理器来发送控制信息。因此，微处理器在底层控制系统中起着核心作用。

1. 常用微处理器

微处理器在智能中型足球机器人中起着承上启下的作用。对上需要与决策上位机建立实时信息交互，根据决策上位机发出的指令实现智能中型足球机器人的运作；对下需要对智能中型机器人的各种执行机构进行控制。可以说，微处理器起着决策上位机与执行机构之间的桥梁与纽带的作用。微处理器的基本任务是：与决策上位机保持数据通信，并将决策上位机发出的指令转为对智能中型足球机器人电动机驱动、传感器以及踢球机构的控制信号，实现

智能中型足球机器人在场地上的移动和踢球等动作。

由于嵌入式系统具有高性能、小体积、低功耗等特点，在智能中型足球机器人底层的控制上已被广泛采用。而微处理器(MCU)、数字信号处理器(DSP)、FPGA/CPLD 芯片三种嵌入式处理器在嵌入式系统中的应用处于三分天下的局面，它们各自具有独特的优势，但在某些方面又略显不足。

(1) 微处理器(MCU) 中文全称为微控制单元(Micro Controller Unit)，又称单片微型计算机。它是将计算机的 CPU、RAM、ROM、定时器和多种 I/O 接口集成在一片芯片上，形成芯片级的计算机。其代表产品是 51 单片机和 ARM 微处理器。因为微处理器具有丰富的软件系统支持，目前在控制领域占据领先地位。伊朗 MRI 队的智能中型足球机器人底层微控制器采用的是 PIC 单片机，他们在 2008 年苏州机器人世界杯比赛中获得技术挑战赛的冠军。

(2) 数字信号处理器(DSP) 这是一种具有特殊结构的微处理器。数字信号处理器芯片的内部采用程序和数据分开的哈佛结构，具有专门的硬件乘法器，广泛采用流水线操作，提供特殊的处理器指令，可以用来快速地实现各种数字信号处理算法。在海量数据处理方面，数字信号处理器可以尽情发挥它的优势。上海交通大学“蛟龙”队智能中型足球机器人的运动控制用的是一个数字信号处理器芯片和一个 CPLD 的结合，根据反馈到电动机驱动器上的编码器数据来控制智能中型足球机器人的速度和发出适当指令信号。

(3) 可编程门阵列/逻辑器件(FPGA/CPLD) 目前，使用最广泛的可编程逻辑器件有两类：现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)和复杂可编程逻辑器件(Complex Programmable Logic Device, CPLD)。FPGA/CPLD 是作为专用集成电路(ASIC)领域中的一种半定制电路而出现的，既解决了定制电路的不足，又克服了原有可编程器件门电路数有限的缺点。在高速复杂逻辑处理方面，它占据绝对优势，并且凭借其超大规模的单芯片容量和硬电路的高速并行运算能力，在信号处理方面也显示出很大优势。德国 Tribots 队的智能中型足球机器人的底层主控单元就是采用现场可编程门阵列作为主控芯片，上海大学 Legends 队的智能中型足球机器人也采用了复杂可编程逻辑器件。

2. 基于现场可编程门阵列的可编程片上系统(System On Programmable Chip, SOPC)介绍

随着多媒体、网络化、移动化的发展，过去利用印制板技术和 IC 芯片来实现的系统，由于芯片之间延迟过长、电压较高、体积较大等因素，使其无法满足市场对整机系统越来越高的性能要求。正是在市场需求和集成电路技术发展的双重作用下，出现了将整个电子系统集成到单个芯片上的技术，即片上系统(System On Chip, SOC)。所谓片上系统技术，是一种高度集成化、固件化的系统集成技术。使用片上系统技术设计系统的核心思想，就是要把整个应用电子系统全部集成在一个芯片中，除了那些无法集成的外部电路或机械部分以外，其他所有的系统电路全部集成在一起。片上系统是以嵌入式系统为核心，集软件、硬件于一体，并追求产品系统最大包容的集成器件，是目前嵌入式应用领域的热门话题。

在传统的应用电子系统设计中，需要根据设计要求对整个系统进行综合，即要根据设计要求的功能，寻找相应的集成电路；再根据设计要求的技术指标设计所选电路的连接方式和参数。这种设计的结果是一个以功能集成电路为基础、器件分布式的应用电子系统结构。设计结果能否满足设计要求不仅取决于电路芯片的技术参数，而且与整个系统 PCB 板图的电磁兼容特性有关。对于片上系统来说，应用电子系统的设计也是根据功能和参数要求设计系统，但与传统方法有着本质的差别。片上系统不是以功能电路为基础的分布式系统综合技

术，而是以功能IP为基础的系统固件和电路综合技术。首先，功能的实现不再针对功能电路进行综合，而是针对系统整体固件的实现进行电路综合，也就是利用IP技术对系统整体进行电路综合。其次，电路设计的最终结果与IP功能模块和固件特性有关，而与PCB上电路分块的方式和连线技术基本无关，从而使设计结果的电磁兼容特性得到极大的提高。换句话说，就是所设计的结果十分接近理想设计目标。基于专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit,ASIC)的片上系统具有设计周期长、改版投资大、灵活性差等缺陷，制约着它的应用范围。可编程逻辑器件随着微电子制造工艺的发展，取得了长足的进步。这种器件在早期只能存储少量数据，完成简单的逻辑功能。随着工艺技术的发展，超大规模的、高速、低功耗的新型现场可编程门阵列不断推出，新一代的现场可编程门阵列已集成了中央处理器或数字处理器内核，实现了在一片现场可编程门阵列上进行软件、硬件协同设计。因此，现场可编程门阵列已经可以部分实现片上系统。

正是由于SOC/FPGA的诸多优势，现场可编程门阵列已经在机器人控制领域得到了广泛的应用。通过现场可编程门阵列厂家提供的丰富的IP核，可设计出各种各样的控制系统模块，而模块化非常有利于机器人控制器开放特性的实现。现场可编程门阵列能够将大量逻辑功能集成于单芯片中，节省资源、设计灵活、可靠程度高，而且系统结构极为紧凑。虽然现场可编程门阵列在逻辑实现上具有无与伦比的优势，但是运算能力低于DSP。在现场可编程门阵列中嵌入Nios Ⅱ软核处理器则弥补了这一缺陷。

Nios Ⅱ是Altera公司于2004年推出的业界第一款为可编程逻辑优化的可配置处理器。它主要是利用Altera公司最新的Nios Ⅱ软核处理器技术，通过将包括16位或32位高性能处理器在内的多种应用模块嵌入一个通用的现场可编程门阵列器件内，实现了一个完全可重置的嵌入式系统，即可编程片上系统(System On Programmable Chip,SOPC)方案。该嵌入处理器是由以精简指令集计算机(Reduced Instruction Set Computer,RISC)为基础的，可配置、可裁减的软核处理器，结合丰富的外部设备、专用指令和硬件加速单元创建的专用片上可编程系统。处理器具有32位指令集和32位数据通道，通过配置可以得到很广泛的应用。

智能中型足球机器人底层控制系统由处理器单元、存储单元、通信单元、运动控制单元、电动机驱动单元、踢球控制单元以及其他辅助单元组成。采用可编程片上系统技术对控制器各个功能模块进行组织，不但解决了微处理器结构做一处修改就要对整个现场可编程门阵列系统重新规划的问题，而且实现了底层控制系统存在的结构设计复杂、功能变化多、实时性要求高等要求。

## 8.7　智能中型足球机器人系统的软件结构

智能中型足球机器人软件结构可以分为视觉子系统、通信子系统、决策子系统和运动控制子系统4个部分。

### 8.7.1　视觉子系统

1. 视觉系统的硬件配置

(1) 全景视觉系统　足球机器人的摄像机是最重要的传感器，它的重要性就相当于眼睛对于人。在机器人世界杯赛中型组比赛中，机器人普遍采用全景视觉系统。它由一个摄像

机和一个反射镜组成。反射镜装在机器人顶部，镜面向下，摄像机朝上正对着反射镜。摄像机得到的是带有畸变的俯视图，显示了机器人周围360°的情况。这和人不一样，因为人通常不能看到身后，除非把头转过去。

（2）多摄像头的视觉系统　全景视觉系统的目标识别有其缺陷，特别是对球的识别。根据机器人世界杯赛中型组的比赛规则，机器人的高度不能高于80cm，因此从全景镜中就不能识别到高于80cm的物体。而在智能中型足球机器人比赛中，常常会有挑起的球高于机器人的情况。为了解决这个问题，很多参赛队提出了一些方案。例如中国国防科技大学的“猎豹”机器人上装有两个视觉系统：一个全向视觉系统和一个廉价的网络摄像头加装广角镜头构成的前向视觉系统；荷兰 Tech United 队使用一个工业智能摄像机作为前向摄像机，主要实现球的辅助识别与定位作用。当球速达到10m/s时，一个工作于25fps(帧每秒)的全景摄像机是不能完成这个识别任务的，荷兰队使用的摄像机是高速的工业摄像机系统，可以工作在高达200fps的环境中；要处理200fps、640×480分辨率的实时图像，如果由计算机来完成，无论对于传输还是处理都是极难实现的，荷兰队选用 The Vision Components VC4458 摄像机(最高242fps、640×480分辨率)，具有板载处理能力，所有的图像处理和识别都在智能摄像机内部完成，摄像机和主机通信的内容只有球的位置和球速。

（3）全景镜曲线　目前，全景视觉机器人中广泛使用的全景镜面主要是双曲线镜面，通过摄像机采集到的图像具有全景水平视角，使机器人能够获取全景图像。该类全景镜面数学模型简单，但得到的图像存在严重的失真，尤其距离机器人远处的图像畸变很大，直接造成识别场上标志线或球等目标的困难。

通过使用组合全景镜面，可以克服现有全景镜面得到的图像失真严重的缺点。组合全景镜面的第一段曲线保证了在一定距离范围内水平场地上的点和图像上的像素点具有指数函数关系；第二段曲线是一段圆弧，保证了在距离较远处能够看到一定高度的物体。这种构造的镜面能够很大程度地减小图像失真的情况。

2. 自定位

（1）自定位的意义　机器人自定位是移动机器人的重要技能，是自动导航的基础。设想在室内，机器人不知道自己的位置，而它又不具备识别障碍的能力，在移动的过程中就会撞到墙壁，因为不知道自己的位置意味着不知道墙壁有多远。定位的前提是要获得已知的地图，优秀的机器人可以通过传感器获得周围的几何形状，构建地图，然后使用定位算法得到自己的位置，进而可以规划路径进行导航了。

足球机器人自主选择路径就是自动导航。足球场就相当于一个室内环境，球场的边界就相当于墙壁。定位需要已知的地图，场地是规则详细规定的(已知的)，这样场地模型就是地图。

在足球比赛中，如果机器人没有定位技术，就不能保证机器人不冲出场地，尽管比赛可以勉强进行，机器人可以识别球，朝球运动并抓住球，继而识别出球门，带球向球门进攻，但是这样的机器人是不可能实现高级技能的。例如当球离开机器人太远，所有己方机器人都没有识别到球，这时，一种较好的做法是机器人迅速移动，遍历场地上的每个角落。如果没有自定位功能，机器人连搜寻方向都不能确定，只能随机设定运动方向，这样就难以保证不冲出场地了；如果有了自定位功能，机器人知道自己在哪里，就可以避免离边界近的方向移动。如果场地上有一些机器人把球门完全遮挡住了，没有自定位功能的机器人由于看不见球

门，立刻就失去了目标，导致进攻失败；如果机器人具有自定位功能，它就能够根据自己的位置和球场模型(地图)推知球门的位置，即使不能看见球门，也可以绕过这些障碍，向球门进攻。事实上，如果定位精度足够高，机器人并不需要识别球门，这也是比赛规则取消两个球门一黄一蓝的规定的技术前提。上述两例都是利用了自定位进行导航(自定位是导航的前提)。

对于移动机器人，自定位把导航变为可能，并且在足球机器人这个特定环境中，对机器视觉还有很多至关重要的帮助。在识别球时，如果识别球的算法是基于色块的识别方法，就极易被场外相同颜色的物体干扰，但如果机器人知道自己的位置，就可以判断出这个目标在场外，进而判定它不是球(即使是球,判定它不是球对比赛没有影响)。这些对信息提取的改进都是利用了自定位结果。

对于足球机器人的协作来说，机器人的自定位也有至关重要的意义。机器人队员的视野有限，而且识别能力不强(不能将队友和对手加以区别,把它们都作为障碍)，无法像人类一样，观察出队友和对手的位置，并进行战术配合。当每个机器人都能自定位时，就可以把自己的位置发给队友，信息共享，形成一个数据库，反映出场上形势，机器人就可根据场上形势进行协作。

(2) 自定位的研究背景　机器人自定位这个课题是机器人领域的热门，人们已经取得了一些研究成果。其中一个普遍使用的方法是利用 Monte Carlo 方法进行定位，也称粒子滤波定位算法。该算法的核心是计算机器人位置的概率分布。初始化时，通常先把机器人的位置认为是在场地中均匀分布的，然后根据不断接收到的传感器信息，调整概率分布，最后达到收敛。当机器人在某个位置概率接近1，这样就定位成功了。之所以说这是粒子滤波，是因为它在计算概率密度函数时，把连续量离散化了，实际计算的是概率，不是概率密度。

在足球机器人中，普遍使用的传感器是摄像机、里程计、电子罗盘。根据各自提取的信息，可以有很多具体的做法。例如在摄像机获得的信息中，可以提取球门作为定位的主要依据进行概率计算，也有用场地白线作为主要依据的。选取信息的好坏直接影响了定位的精度。使用场地白线的定位方法，能够获得比使用球门的方法高很多的精度。目前，由于规则规定球门取消一黄一篮的配置，识别球门变得异常困难，就不能使用球门定位了。里程计的作用是快速跟踪，因为机器人如果知道自己刚才在哪里，并且知道自己的位移，叠加就产生了目前的位置，但是由于里程计有累计性误差，所以每隔一定的时间要依靠图像消除累积误差。电子罗盘能用来克服场地对称性给定位造成的麻烦，因为场地是对称的，仅根据白线，机器人只能判断出自己在两个相互对称的位置上，而不能确切地知道到底是哪个位置。用了电子罗盘，机器人就能确定准确的位置。

除了 Monte Carlo 算法，还有 Markov 定位方法、误差下降算法、Matrix 算法、特征检测法等。Matrix 算法比其他算法的效率更高，但是它容易陷入局部极小点。该算法由 Felix von Hundelshausen 开发并使用在足球机器人上。

(3) 自定位算法的实现　定位的目标是取得机器人在全局坐标系的坐标和机器人的方向$(x,y,\theta)$。其中，$x$ 和 $y$ 是坐标值，$\theta$ 是机器人的正方向，一共三个量。

机器人上一共配有两个传感器，即摄像机和电子罗盘。其中，摄像机获得的信息为自定位的主要依据。

定位分两种情况，第一种情况是机器人不知道自己在前一帧的位置(前一刻)，例如在

利用第一帧图像定位时，机器人不知道刚才在哪里，因为程序才刚刚开始。这种情况的定位是很困难的，被称为重新定位，因为这主要发生在前一帧定位失败的情况下，需要耗费大量CPU资源。

重新定位的方法是一个遍历的过程，方法如下：分别在$x$、$y$、$\theta$三个量的定义域内每隔一定的步进取一个值，对于任意一组$(x,y,\theta)$值(位置)，假设机器人处在这个位置上，把白线点转化成全局坐标下的白线点，然后计算匹配误差。针对不同的$(x,y,\theta)$，可以得到不同的匹配误差。取匹配最小的误差，它所对应的位置就最有可能是机器人的位置。这个过程实质上是遍历场上每个可能的位置和方向，取匹配得最好的组合。但是这个遍历过程是一个离散过程，离散的程度取决于步进的长度。如果步进过长，离散程度就高，得到的匹配误差常常很大；如果步进过小，匹配的次数就会过多，造成占用CPU资源过大。当取得了一个最小匹配误差时，并不代表定位成功了，因为这个定位结果只是非常粗略的，有时还不一定正确，需要使用Matrix算法使得匹配更精确。Matrix算法实际上是一个由粗到细的过程，它的输入是粗略的定位结果$(x,y,\theta)$，输出则是准确的定位结果。假设输入的是定位粗略的结果$(x,y,\theta)$，然后使用迭代算法，迭代直到匹配误差小于某个阈值或者迭代次数超过某个允许的最大迭代次数时停止。具体算法如下：

$$x(i+1)=x(i)+k\cdot F(i)$$
$$y(i+1)=y(i)+k\cdot F(i)$$
$$\theta(i+1)=\theta(i)+k\cdot F(i)$$

对于因匹配误差小于某个阈值而结束算法的情况，定位是成功的，此时输出的$(x,y,\theta)$就是准确的定位结果；对于因迭代次数超过允许的最大迭代次数而结束算法的情况，定位失败，输出的$(x,y,\theta)$应当丢弃。在重新定位时，不直接使用Matrix算法，而是先选择匹配误差最小的组合$(x,y,\theta)$交给Matrix算法，这是因为Matrix算法容易陷入局部极小点，如果把任意的$(x,y,\theta)$组合交给Matrix算法，算法常常迭代到超过允许的最大次数也不能使匹配误差降到最小。重新定位需要遍历机器人可能的位置，每遍历一个位置就需要计算一次匹配误差，故需要消耗大量CPU资源(使用英特尔奔腾M740 1.73GHz处理器在18m×12m的场地上重新定位一次,需要40ms左右)。

定位的第二种情况是：机器人前一帧定位成功，要依靠当前的一帧图像进行定位，这时的定位问题实际上是一个跟踪问题。在一个以3m/s速度移动、获得图像的频率是25fps的机器人来说，两帧之间的运动的距离大约是0.12m。在绝大多数情况下，机器人以低于3m/s的速度运行，所以两帧之间的运动距离一般小于0.12m。因为上次的位置和现在的位置十分靠近，可以直接把上一帧图像的定位结果作为输入，交给Matrix算法算出现在的位置。这种情况下的定位是非常迅速的，每定义一帧需要的时间小于1ms。

由于球场是对称的，所以使用白线点和模型匹配，会得到一对匹配误差很小的点，例如$(x,y,\theta)$和$(-x,-y,-\theta)$，这两个定位结果是关于原点对称的。使用Matrix算法只能看到其中的一个位置，到底算法收敛到哪个位置取决于输入值，但这个定位结果并不一定真是机器人的位置。系统使用罗盘获得当前机器人的角度，如果该角度和$\theta$更接近(相比于$-\theta$)，就选择$(x,y,\theta)$，否则就选择$(-x,-y,-\theta)$。从中可以看出，系统对于罗盘的精度要求并不高，罗盘误差的范围在90°以内都是允许的，但要保证有较快的刷新频率。

### 8.7.2　通信子系统

1. 比赛规则

机器人世界杯赛中型组机器人的比赛规则决定了智能中型足球机器人要使用无线通信。在机器人世界杯赛中型组比赛中(见图 8-25)，有两个裁判在赛场上主持裁决工作，一个是场地上的主裁判，另一个是副裁判。主裁判的工作是根据规则判定每个机器人的行为是否犯规，以及发出开球、暂停、进球有效等指令。这些指令是以哨声和话语发出的，但是场上的机器人并不能直接了解他指令的意图，这就需要副裁判。副裁判的工作就是操作场边的一台裁判计算机，这台计算机和双方的服务器计算机相连，其上安装有裁判盒(Referee Box)程序，这个程序的作用就是向双方的服务计算机发送裁判指令(开始 Stop、停止 Start、边线球 Throw in 等)。

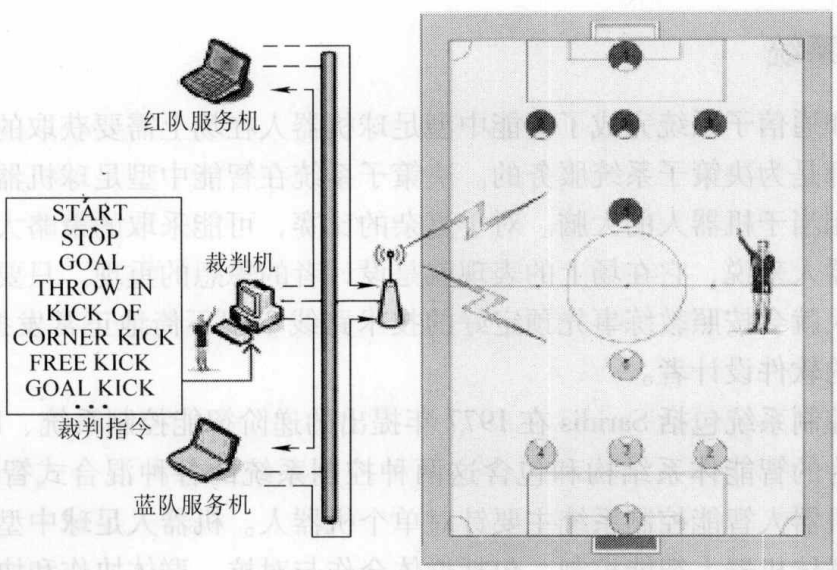



图 8-25　机器人世界杯赛中型组比赛示意图

2. 服务机程序与机器人程序

双方的服务计算机上通常运行一个服务机程序，这个程序主要有两个作用：一是将裁判盒发出的裁判指令实时可靠地发送给场上的机器人；二是实时监视场上机器人的状态，主要包括自定位的信息和识别球的信息。

场地上的每个机器人之间也可以通信，这些通信不仅包括自定位信息和球位置信息，还包括球的识别率和球相对自己的一个相对位置信息。

这里要注意的一点是，服务机和机器人在网络拓扑结构上属于同一子网，服务机只是在比赛中起到看似“服务器”的功能，并不是网络意义上的服务器。服务机和机器人是通过一个路由器连接的，路由器和机器人计算机是通过无线网络 IEEE 802.11b/g 完成信息互联，采用无线连接；路由器和服务机是通过有线连接。事先需要给每台机器人分配一个 IP 地址，而且服务器的地址必须是固定不变的。

下面主要从智能中型足球机器人自身的角度，来介绍这两个通信子系统。

(1) 机器人和服务机的通信　机器人在场上通过视觉等传感器能够做到自定位和球识

别，但是在比赛时或者调试的时候并不能直接知道机器人是否定位成功或者识别到球，定位是否正确以及球识别是否准确。如果要时时去打开看机器人内部的计算机，势必会很麻烦以及很耗时，另外特别是针对视觉检测为基础的智能中型足球机器人，人为地接近会混乱其视野，造成某些颜色信息的丢失或者是干扰(如人穿着一件鲜红的衣服或遮挡部分场地白线)，从而不可避免地测不准。因此，可以利用无线通信远程地检测这些信息。为了实现这一通信，机器人要实时地发送各种信息给服务机，但是并不一定每一帧都发送，这样会有不必要的数据通信量。因为发生的数据只是用来监视，不妨选择隔几帧(如 5 帧)发送一次。这种通信的协议通常是自定的。

(2) 机器人之间的通信　机器人之间的通信和机器人与服务机之间的通信内容相似，但是意义不同。机器人之间的通信是为了实现信息共享，并且在这个信息共享的基础上实现一些基本的操作优先与协作。这种信息共享是实时的，即每一帧都要共享这些信息，是非常有意义的。

### 8.7.3 决策子系统

视觉子系统和通信子系统完成了智能中型足球机器人在场上需要获取的所有信息的收集工作，这些工作都是为决策子系统服务的。决策子系统在智能中型足球机器人系统中处于非常重要的地位，相当于机器人的大脑。对于复杂的比赛，可能采取的策略大不相同；而对于智能中型足球机器人来说，它在场上的表现就是设计者的思想的重现。只要视力正常、腿脚灵便，这些机器人就会按照教练事先预定好的技术路线不偏不倚地正常发挥。而这个教练，就是决策子系统的软件设计者。

常用的智能控制系统包括 Saridis 在 1977 年提出的递阶智能控制系统、R. Brooks 在 1986 年提出的基于行为的智能体系结构和包含这两种控制系统的各种混合式智能控制系统。但是，目前的各种机器人智能控制系统主要针对单个机器人。机器人足球中型组为分布式多机器人系统，涉及群体机器人智能控制，包括群体合作与对抗、群体协作和协调、多机器人角色分配等。在机器人足球赛中，不同队伍的机器人群体之间的关系是对抗的。在不同场次的比赛中，不同队伍的比赛风格不同、战术不同、单个机器人智能程度不同，机器人群体需要根据不同的对抗对象调整自身的智能系统。

决策子系统的很多特点是和人类足球的相同的，是对人类足球的一种模仿。通过分析足球机器人的行为本质，类比人类的足球或者其他运动的模式，我们不妨再将决策子系统做一个更细致的划分。针对智能中型足球机器人，决策子系统可以划分为能力层面和意识层面。

所谓能力，就是一个机器人解决特定问题的技能，这种技能是简单的、特定的，并且它的实现是可靠的；所谓意识，就是机器人根据当前的形势做出的宏观的、总体的判断，这个判断会驱使机器人调用它的各种能力来达到最终目标。简单地看待这两个层面的关系，就好比一个人在街上走，他想去商店买东西，这是他的意识；而在路上会有行人，他不能撞到行人，也不能撞到树木房子，他还要保持身体的平衡，这些都是能力。这些能力的集合完成他意识所要达到的目标。意识决定做什么，能力决定怎么做。

1. 决策能力

智能中型足球机器人和其他足球机器人一样，要面对一些基本的问题，例如看到了球，如何去抓球、如何带球、在场上移动怎样能绕过障碍等。这些将被归为能力层面要解决的问

题。可以想象，这些是作为一个足球运动员的最基本的素质。在人类足球中，这些能力甚至被归为身体素质，如果没有这些能力，就不是一个合格的足球运动员。

下面主要介绍三个基本能力：抢球、避障、带球避障。

抢球，就是看到球去之后过去抢。在这里只考虑如何去抢球，无需考虑什么时候去抢或者是否去抢球。抢球需要的信息有球的相对位置信息、球的速度。

避障，顾名思义就是避开障碍物。在球场上，机器人的周围有各种障碍物，如队友机器人、对方机器人甚至人类裁判等，并且这些障碍物的位置常常是不断变化的。机器人在场上移动，首要的原则是不能与这些障碍物发生碰撞，更高的要求是能在这样一个动态的障碍环境中找到一个最优的路径到达目标地点，甚至能够在带球的情况下绕过障碍物，完成带球突破这一技术目标。现在假定障碍物的位置信息存放在一个表中，这一工作在视觉子系统中已经完成，并且已知条件是机器人自己在全局的位置，以及目标点在全局的位置。避障所做的工作就是找到一条最优的路径到达目标位置。避障也称为路径规划。

在机器人世界杯赛中型组机器人中，和小型组机器人最大的不同是不能获取到全局的障碍物信息。很多参赛队都只能做局部的路径规划，即只规划能看到的这一部分路径，那些障碍物后面的看不到的部分不做规划。目前最常用的方法是人工势场法路径规划。

带球避障是对避障算法的改进，完成带球到达目标点这一动作。带球避障需要做以下假定：假定已经抢到球、有全局定位、有障碍物的位置信息表以及带球的目标点。要同时满足这四个条件，才会启发带球避障程序运行。

带球避障和移动避障在算法上没有本质区别，都是使用人工势场法计算出每一帧的将来速度。但是因为是带球，两者有以下区别：首先，带球的时候球已经和机器人在一起，可以看作是一个整体，视觉检测必然会每一帧都检测到球，球不再是需要规避的对象，因此不用将球加入障碍物信息表；其次，因为球和机器人是连为一体的，但是当速度发生变化时，球可能会带丢，我们希望的是让机器人“抱”着球前进，就是机器人围绕球，以球为中心旋转，而不是以机器人自身为中心选择。在常规的避障算法输出速度之后，要将以机器人为中心的旋转角速度换算成以球为中心的线速度叠加在原来的 X 方向速度上。

2. 决策的意识层

机器人足球要完成的两个最基本的任务是进攻与防守，这两个任务的直接体现是在决策子系统的意识层面。这一层面设计的基本原则是：考虑场上每一种状况，针对这些状况，预先设计机器人的解决策略。可以说，解决策略是设计者大脑思维模式的再现，从本质上看，解决这些问题的不是机器人，而是设计者。因此，需要穷尽每一种可能性，设计出相互无冲突的解决策略。

机器人的合作可分为隐式合作和显式合作(见图 8-26)。隐式合作主要是体现在场上所有的机器人维护一个共同

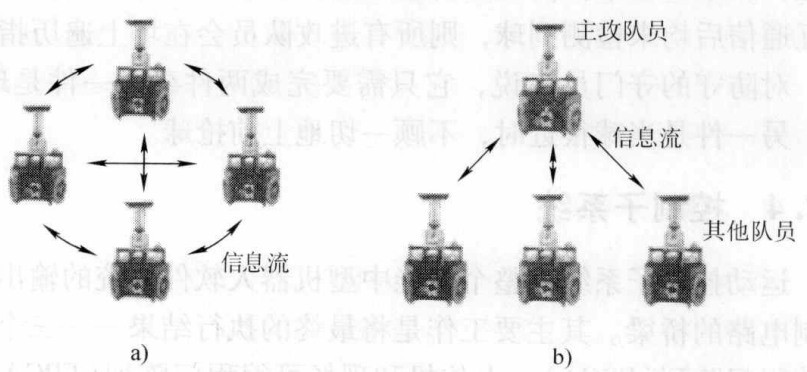



图 8-26　隐式合作和显式合作

a）隐式合作　b）显式合作

的世界模型，通过利用世界模型的信息来实现配合。以防守动作为例，场上的所有队员根据共享的世界模型中自身的位置、其他队员的动作和离球的距离来决定自己的防守动作。隐式合作中，各机器人的地位平等。显式合作是指合作机器人之间通过直接通信实现合作，它由合作的发起者(称为主控者)发起。主控者根据需要，选择并通知一个或者多个队友共同完成战术合作。战术完成后，合作自然解除。

这两种合作都是常用的手段。国防科技大学使用的是完全显式的合作，上海大学 Legends 中型组使用的是完全隐式的合作。

下面分别从进攻和防守方面来介绍一种简单的设计模式。先做这样一个假定，全队只有两种队员，纯粹的进攻球员和纯粹的防守球员。每个球员在场上有一个基本位置，这个基本为是事先设定好的，类似于人类足球中的阵形。这在智能中型机器人足球中体现为一系列点的全局坐标。

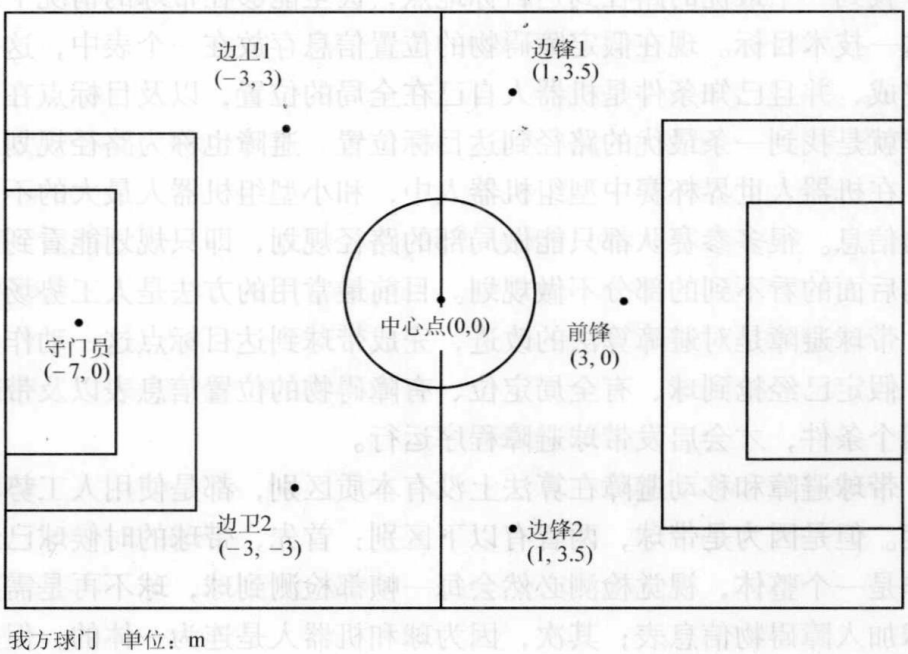



图 8-27 一种阵形的基本坐标图

如图 8-27 所示为一种阵形的基本坐标图。在图中有守门员、边卫、边锋、前锋，但不要被这些名字所迷惑，从行为上来说，只有守门员是纯粹的防守球员，其他的都是纯粹的进攻球员。它们的名字不同，仅仅是因为基本位置不同而根据约定俗成称呼的。也就是说，进攻球员的本质是一样的，它们在场上的不同表现只是因为位置的差异造成的。

进攻球员有 5 名，当其中 1 名进攻球员拿到球进攻时，另外 4 名会判断自己相对于球的位置，如果比较近，则指定位置策应；如果比较远，则回到基本位置待命。如果场上机器人相互通信后均未检测到球，则所有进攻队员会在场上遍历指定的点寻找球。

对防守的守门员来说，它只需要完成两件事：一件是球比较远时，最大限度地挡住球门；另一件是当球很近时，不顾一切地上前抢球。

### 8.7.4 控制子系统

运动控制子系统是整个智能中型机器人软件系统的输出端，也是连接上位机和底层运动控制电路的桥梁。其主要工作是将最终的执行结果——三个轮子的轮速和射门信号发给现场可编程门阵列(FPGA)。上位机和现场可编程门阵列(FPGA)之间的通信是通过 USB 接口或者 RS-232 串口实现的。

# 第9章　前沿机器人

经过几十年的发展，机器人技术取得了举世瞩目的成就。目前，对于机器人的研究主要向两个方向发展：一是研究仿人机器人，让机器人更具人形，具有更强的智能和功能；二是微型化，让机器人可以做更多人类难以完成的细致、微小的工作。本章主要介绍仿人机器人和微型机器人发展历史、研究现状、关键技术及未来的发展趋势。

## 9.1　仿人机器人

仿人机器人是一种外观与人相似，具有移动功能、感知功能、操作功能、学习能力、自治能力、联想记忆、情感交流的智能机器人。它具有灵活的行走机构，可以随时走到需要的地方，包括一些对普通人来说不易到达的角落，完成人指定或预先设置的工作。仿人机器人具有人类的外观，可以适应人类的生活和工作环境。例如，在机械制造、化工生产、核电维修、包装运输、设备安装等工业生产领域，以及在军事战斗、医疗手术、科学教育、办公事务、家务劳动等社会生活领域中，代替或者帮助人类完成各种工作，并且可以在许多方面扩展人的能力。

仿人机器人集机械、材料、电子、计算机、自动化等多门学科于一体，技术含量高、研究和开发难度大。它是一个国家高技术实力和发展水平的重要标志。仿人机器人也是少有的高阶、非线性、非完整约束的多自由度系统，是一个研究各种新理论和新方法的非常理想的实验平台；同时，它也可以有力地推进政治、社会、军事领域的变革，并且促进工业、农业、商业、服务等行业的发展。因此，世界各发达国家都不惜投入巨资进行研究与开发。目前，日本和美国等许多发达国家的科学家都在仿人机器人的研究与开发方面做了大量的工作，并取得了突破性的进展。仿人机器人已经对人类社会产生了巨大的影响。

### 9.1.1　仿人机器人的发展历史和研究现状

仿人机器人的研究开始于20世纪60年代末，至今已有四十多年的历史。如今，仿人机器人已经成为机器人技术领域里的主要研究方向之一。

1968年，美国通用电气公司的研究人员试制了一台名叫Rig的操纵型二足步行机构，从而揭开了仿人机器人研究的序幕。1973年，日本的加藤一郎从工程角度研制出世界上第一台真正意义上的仿人机器人WABOT-1，如图9-1所示。WABOT-1可用日语与人交流，实现静态行走，并可依据命令移动身体去抓取物体。1984年，加藤实验室又研制出了采用踝关节力矩控制的WL-10RD型仿人机器人，如图9-2所示。该机器人实现了步幅40cm，每步1.5s的平稳动态步行。1986年，加藤实验室再次研制成功了WL-12(R)型步行机器人，该机器人通过躯体运动来补偿下肢的任意运动，在躯体的平衡作用下，实现了步行周期1.3s，步幅30cm的平地动态步行。

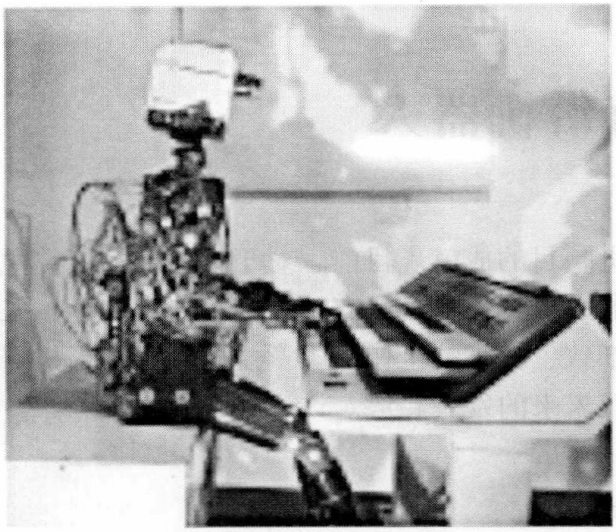


图 9-1 WABOT-1 仿人机器人

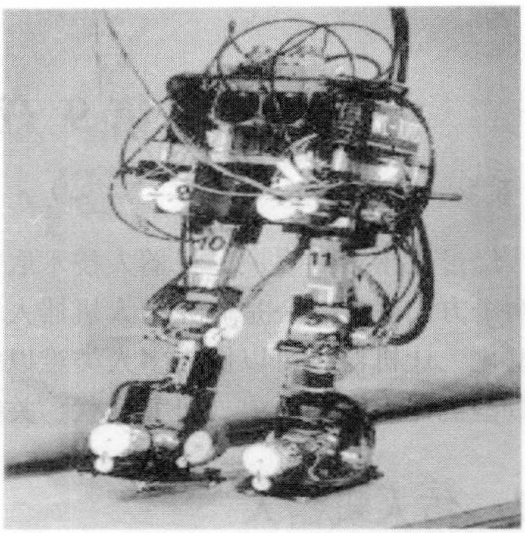


图 9-2 WL-10RD 型仿人机器人

日本还有许多著名的大公司如本田、索尼、松下电工、富士通、川琦重工、法那科、日立等也正在从事仿人机器人的研究与开发，并取得了突破性的成就。本田公司从 1986 年至今，已经推出了 3 种 P 系列仿人机器人。P1 是本田公司最初研制的步行机器人，主要是对二足步行机器人进行基础性的研究工作。P2 是 1996 年 12 月推出的步行机器人，相对于 P1 而言，P2 更加类人化。P2 的问世将二足步行机器人的研究推向了高潮，使本田公司在此领域里处于世界绝对领先地位。1997 年 12 月，本田公司又推出了 P3，如图 9-3 所示。P3 使用了新型的镁材料，实现了小型轻量化。2000 年 11 月，本田公司又推出了新型双脚步行机器人 ASIMO，如图 9-4 所示。ASIMO 与 P3 相比，其形体更容易适应人类的生活空间，通过提高双脚步行技术，其步态更接近人类的步行方式。ASIMO 使用个人计算机和便携式设备控制步行方向、关节及手的动作，二足步行采用了新开发的技术，可以更加自由地步行。P3 和 ASIMO 的推出，将仿人机器人的研究工作推上了一个新的台阶，使仿人机器人的研制和生产正式走向实用化、工程化和市场化。

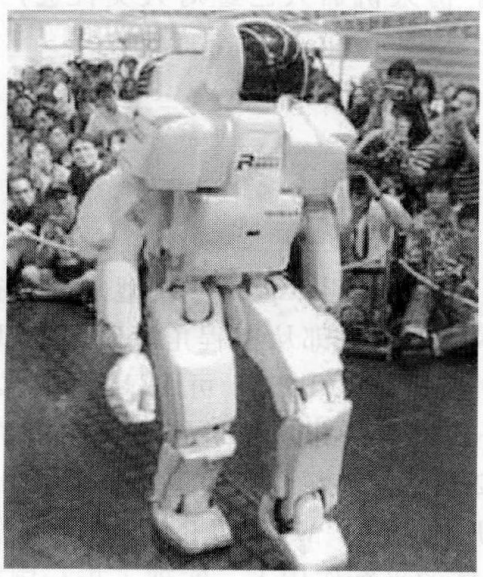


图 9-3 P3 仿人机器人

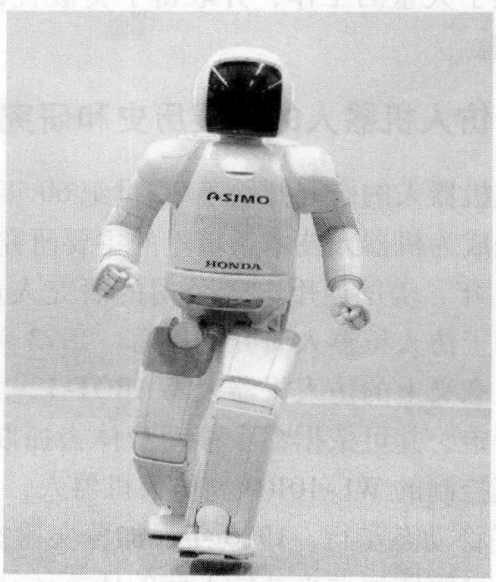



图 9-4 ASIMO 仿人机器人

索尼公司于2000年11月也推出了娱乐型仿人机器人SDR-3X，如图9-5所示。它可以按照音乐节拍翩翩起舞，并且进行较高速度的自律运动。SDR-3X还配备有声音识别和图像识别功能。索尼公司于2003年11月又推出世界上首台会跑的仿人机器人QRIO，如图9-6所示，实现了搭载控制系统和电源系统的跑动。QRIO共配置24个驱动装置，通过两个64位RISC微处理器对它们进行实时控制。

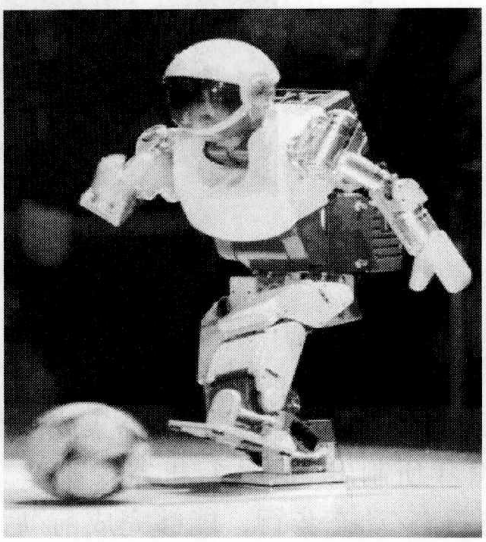


图9-5　SDR-3X仿人机器人

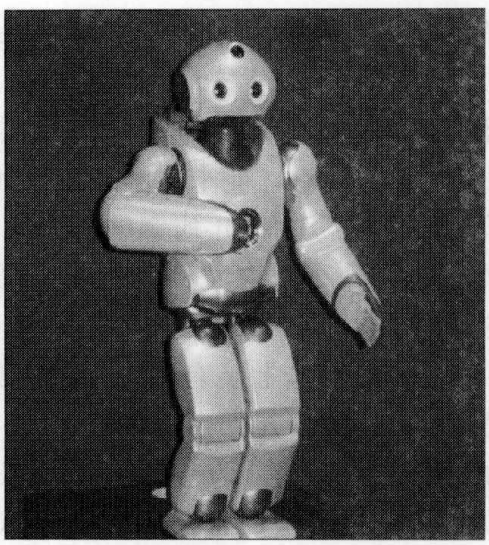


图9-6　QRIO仿人机器人

1990年，美国俄亥俄州大学提出用神经网络来实现双足步行机器人的动态步行，并在SD-1型二足步行机器人中得以实现。麻省理工学院在Spring Turkey和Spring Flamingo仿人机器人的控制中提出了虚模型控制策略。从本质上说，虚模型控制实际上是一种运动控制语言，即假想将诸如弹簧振子、阻尼器等元件固连在仿人机器人的系统中，用来产生假想的驱动力矩。采用虚模型控制，可以有效地避免繁琐的机器人逆运动学和动力学的计算。美国麻省理工学院开发的Cog机器人只有上身，没有下肢，主要作为研究机器人的头脑智能、认知与感知、手臂的灵活性及柔顺性等的平台，如图9-7所示。美国佛罗里达大学的机器智能实验室开发了仿人机器人Pneuman，作为人工认知、自然语言处理、轨迹规划、自动导航、人与机器人交互的研究平台。Sabourin等在无参考轨迹的条件下，使用数学方程的分析方法来描述和预测仿人机器人Rabbit的运动，仅仅通过控制施加在二足步行机器人摆动腿髋部的力矩脉冲，实现了主动行走和被动行走交替进行的连续过程。2005年4月20日，二足步行机器人Rabbit向世人展示了它的奔跑能力。

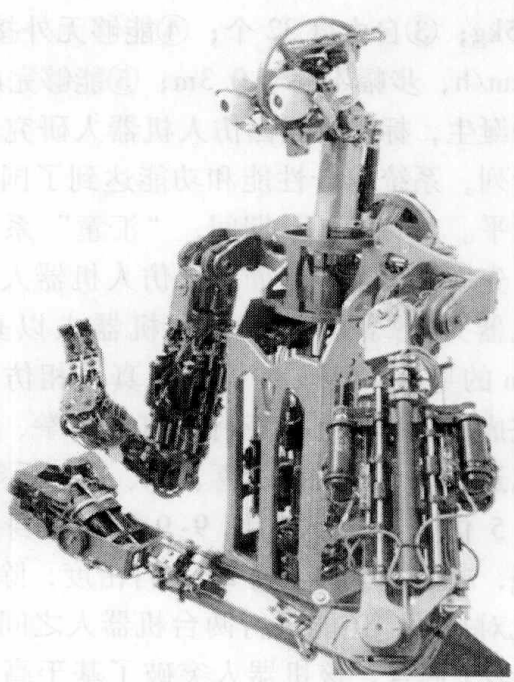


图9-7　麻省理工学院设计的Cog仿人机器人

相比国外而言，我国从20世纪80年代中期才开始研究双足步行机器人。国防科技大学在1988～1995年间，先后研制成功平面型六自由度双足机器人KDW-Ⅰ、空间运动型机器人KDW-Ⅱ和KDW-Ⅲ。KDW-Ⅲ下肢有12个自由度，最大步距为40cm，步速为4s/步，可实现前进/后退和上/下台阶的静/动态步行和转弯运动。2000年11月29日，国防科技大学又研制出我国第一台类人型双足步行机器人“先行者”（见图9-8），高1.4m，重量20kg，可实现前进/后退、左/右侧行、左/右转弯和手臂前后摆动等各种基本步态，行走频率为2步/s，能平地静态步行和动态步行。

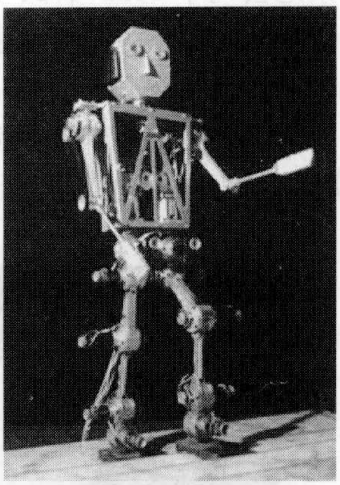


图9-8 “先行者”仿人机器人

上海交通大学于1999年研制的仿人形机器人SFHR，腿部和手臂分别有12个自由度和10个自由度，身上有2个自由度，共24个自由度，实现了周期3.5s、步长10cm的步行运动。该机器人本体上装有两个单轴陀螺和一个三轴倾斜计，用于检测机器人的姿态信息，并配备了富士通公司的主动视觉系统，是研究通用机器人学、多传感器集成以及控制算法良好的试验平台。哈尔滨工业大学于1985～2000年研制出二足步行机器人HIT-Ⅰ、HIT-Ⅱ和HIT-Ⅲ。其中，HIT-Ⅲ实现了步距200mm的静态/动态步行，能够完成前/后、侧行、转弯、上下台阶及上斜坡等动作。

北京理工大学及其合作单位在“十五”期间两次承担了863计划重点项目，自主创新设计、研制出“汇童”1型和“汇童”2型仿人机器人，“汇童”仿人机器人具有视觉、语音对话、力觉、平衡觉等功能。“汇童”1仿人机器人的技术指标是：①身高1.65m；②体重65kg；③自由度32个；④能够无外接电缆行走，工作时间不小于20min，最快速度超过1.2km/h，步幅不小于0.3m；⑤能够完成机器人太极拳和刀术动作表演。“汇童”仿人机器人的诞生，标志着我国仿人机器人研究已经跨入世界先进行列，系统综合性能和功能达到了国内领先、国际先进水平。“十一五”期间，“汇童”系列机器人继续发展，先后推出了“汇童”4仿人机器人和“汇童”5仿人机器人。“汇童”4仿人机器人以真人为蓝本，其1.7m的身高、65kg的体重与真人相仿，该机器人不仅可完成自主行走、打招呼、打太极拳、跳舞等动作，还可以逼真呈现人类面部喜、怒、哀、乐等表情动作。“汇童”5仿人机器人如图9-9所示，身高1.62m，体重63kg，略显瘦小，全身32个自由度，除了能进行乒乓球人机对打外，还能进行两台机器人之间的对打，可进行200多个回合。该机器人突破了基于高速视觉的灵巧动作控制、全身协调自主反应等关键技术，采用自主研发的核心部件。

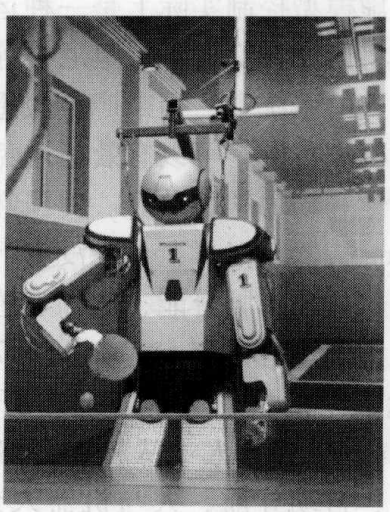


图9-9 “汇童”5仿人机器人

在2016年中央电视台春节联欢晚会歌手孙楠演唱《心中的英雄》时，540个机器人同时登台表演，博得了全场观众的喝彩。在机器人阵营拼出“冲向巅峰”四个大字时，把气

氛推向了高潮。该机器人是阿尔法家族的一代产品 Alpha 1S（见图 9-10），来自深圳优必选科技有限公司。Alpha 1S 属于双足的仿人形机器人，拥有 16 个“自由活动”的关节，所以模仿起人类的骨骼肢体动作来活灵活现。从 Alpha 1S 的外观设计到核心部件，都属于原创，处于国内领先水平，并获得了多项专利。在国际的服务型人形智能机器人领域，Alpha 1S 也能媲美甚至超越国外其他同类型机器人，不仅在国内备受关注，在海外市场也享有不错的知名度，在美国 CES 消费电子展、德国纽伦堡玩具展、日本 IREX 展等国际知名展会上，都曾引起过广泛关注。

Alpha 2（见图 9-11）在 2016 年元宵晚会上以“小红”“小蓝”的角色与主持人互动，并以对话式衔接串场花海、花船、闹元宵、猜灯谜、舞狮子、舞麒麟等所有元宵节目，成了与观众共同展开一番元宵晚会体验传统之旅的可爱伙伴。Alpha 2 的关节增至 20 个，模拟人类动作犹如瑜伽大师一样灵活，在智能化程度上也更胜一筹。

图 9-10　Alpha 1S 仿人机器人

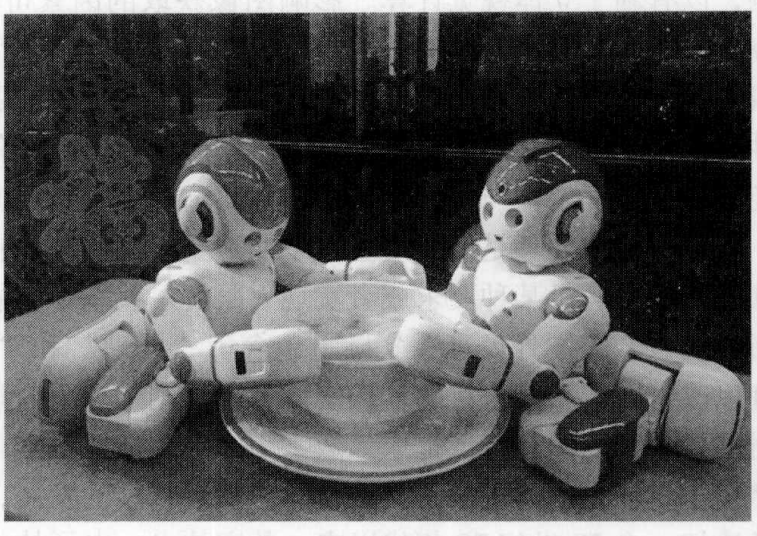


图 9-11　Alpha 2 仿人机器人

尽管仿人机器人的研究取得了巨大的成就，但是，目前仿人机器人距离人们的期望仍然很远，仿人机器人的研究还有巨大的潜力。下面将按照眼、手、足、交互和触觉的顺序分别介绍仿人机器人各个重要组成部分的研究成果、基本原理和关键技术问题。

### 9.1.2　立体视觉系统

视觉是人类感知外界信息的重要途径，人类感知到的 80% 以上的外界信息是通过视觉得到的，人类通过眼睛和大脑来获取、处理和理解信息。周围环境的物体在可见光的照射下，在人类的视网膜上形成图像，由感光细胞转换成神经脉冲信号，经过神经纤维传入大脑皮层进行处理和理解。因此，视觉不仅是对光信号感受，还包括对视觉信息的获取、传输、处理、储存与理解的全过程。机器视觉是通过计算机技术对人类视觉信息处理的一种探索和模拟，目的是实现对三维物体的描述、识别和理解。机器视觉的研究目的是使计算机具有通过二维图像认知三维环境的能力。这种能力将不仅使机器能够感知三维环境中物体的几何信息，包括它的形状、位置、姿态、运动等，而且能够对它们进行描述、存储、识别与理解。因此，一般来说，机器视觉的输入是某种形式的一幅或多幅图像序列，输出则是对图像中物体的符号描述或解释。

仿人机器人视觉是机器人获取外界信息、自律控制、与人交互的重要手段。由于仿人机器人具有独特的功能和优异的自律性，因而其视觉的研究在各发达国家中引起了很大的热情，其中以与人的双眼生理结构和工作机理相类似的立体视觉为代表。下面介绍立体视觉的处理过程、立体视觉系统的组成和工作原理，并通过人脸识别的例子说明立体视觉的工作过程。

1. 立体视觉的处理过程

（1）立体图像获取　立体图像获取的方式很多，主要取决于应用的场合和目的。为了研究人类视觉的立体融合机制，一般采用由计算机产生的随机点立体图像。例如在航空测量领域，通常是利用飞行器携带的高性能摄像机沿航向有序列地摄取图像；再如在显微立体分析中，通过旋转扫描电镜的样品台，同样可获得物体的立体图像。在获取立体图像时，不但要满足应用要求，而且要考虑视点差异、光照条件、摄像机性能以及物体特点等因素的影响，以有利于立体视觉计算。影响图像获取的因素可归纳为物体范围、摄像时间（同时、相隔很长时间）、摄像时的自然光照条件（太阳光、阴影情况）、视场范围、解像度、两个摄像机的相对位置、摄像机的性能等。由于立体视觉系统是以同一个物体的两幅图像的同时对应性为基础，因而必须保证两个摄像机获取图像以及图像采集卡获取两路视频信号的同步性，还有处理过程中帧与帧之间的对应性。这些主要是通过合理设计硬件和编写软件来实现。

数字图像处理是信号处理科学的重要组成部分，它对所采集的数字图像进行某些处理和加工，使之满足某种要求或者实现人眼的一些基本功能，例如获得图像特征等。因此，通常所说的“数字图像处理”实际上包含了“处理”和“分析”两层意思。狭义的数字图像处理以改善图像质量为目的；数字图像分析则是为了获取定量的统计结果或数字等有关信息，对图像进行识别和特征提取。数字图像处理涉及数学理论、模式识别、人工智能、信息论等多个学科，是一门多学科交叉技术。随着社会的发展，人类对于图像信息质量改善的要求日益迫切。自 20 世纪 70 年代以来，数字技术、电子技术和计算机技术的迅猛发展，为数字图像处理技术提供了先进的技术手段。随着各种基本理论的进展和完善，数字图像处理技术在遥感、通信、自动化、国防、生物医学等领域得到了广泛的应用，特别是由于其丰富的信息含量、高度的灵活性、出色的智能化、牢固的可靠性，使得计算机图像处理技术在各种检测识别控制系统中有广泛的应用前景。

（2）摄像机标定　摄像机标定是为了确定摄像机的位置、属性参数和建立成像模型，以便确定空间坐标系中物体点同它在图像平面上像点之间的对应关系。目前，摄像机标定的方法可以分为两类：一类是直接检测或者估计摄像机的位置、光轴方向、焦距等参数，利用传统的几何投影变换，通过立体视觉成像技术建立双目或多目视觉系统模型；另一类是最小二乘拟合方法。该方法利用摄像机本身作为一个测量部件，通过传统的几何投影变换原理，将原来有明确物理意义的系统参数转换成数个没有明确物理意义的参数；利用一组世界坐标和图像坐标精确已知的数个图像点，确定摄像机各个参数，以获得图像坐标系与世界坐标系间的转换关系，得到三维空间点映射为二维图像点的变换矩阵。

空间物体表面某个点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系是由摄像机成像的几何模型决定的，这些几何模型参数就是摄像机参数。在大多数条件下，这些参数必须通过试验与计算才能得到，这个过程被称为摄像机标定。标定过程就是确定摄像机的几何和光学参数，以及摄像机相对于世界坐标系的方位。精确标定摄像机内外参数，不仅可以直接

提高测量精度，而且可以为后继的立体图像匹配与三维重建奠定良好的基础。摄像机标定是机器视觉领域里从二维图像提取三维空间信息必不可少的步骤。

建立一个有效的摄像机模型，除了能够精确地恢复空间物体的三维信息以外，还有利于解决立体匹配问题。对于理想的平行视点模型，由于其基线与图像扫描线重合或平行，因此可以大大地降低后续立体匹配的复杂性。对于一般的存在旋转和位移的普通模型成像系统，可以通过投影变换等手段得到理想模型。

（3）特征提取　特征提取是为了得到立体匹配赖以进行的图像特征。图像特征是指图像中可以用作标志的属性。它有多种形式，可以大致地分为统计特征和视觉特征两类。统计特征是指一些人为特征，需要通过变换才能得到，如图像的直方图、矩、频谱等；视觉特征是指人的视觉可直接感受到的自然特征，如区域的亮度、纹理、轮廓等。根据图像特征的尺寸，可以将特征分为点状特征、线状特征和区域特征等。一般来讲，大尺度特征含有较丰富的图像信息、在图像中的数目较少、易于得到快速的匹配，但是它们的定位精度差、特征提取与描述困难；而小尺度特征数目较多，其所含的信息较少，因而在匹配时需要较强的约束准则和匹配策略，以克服歧义匹配和运算效率。良好的匹配特征应具有可区分性、不变性、稳定性、唯一性以及有效地解决歧义匹配的能力。目前，对于图像特征问题还没有一种普遍适用的理论。一般的实际应用系统都是针对特定的应用而进行相应的特征提取，只有这样才能为立体匹配提供有效的特征，提高系统的性能。

（4）立体匹配　立体匹配是立体视觉中最重要也是最困难的问题。当空间三维场景被投影为二维图像时，同一物体在不同视点下的图像会有很大的不同，而且场景中的诸多因素，如光照条件、物体几何形状和物理特性、噪声干扰和畸变以及摄像机特性等都被综合成单一图像中的灰度值。因此，要准确地对包含了如此多的不利因素的图像进行无歧义的匹配，显然是十分困难的。对于任何一种立体匹配方法，其有效性有赖于三个问题的解决，即选择正确的匹配特征、寻找特征间的本质属性以及建立能正确匹配所选特征的稳定算法。立体匹配研究都是围绕着这三个方面进行，并且已经提出了大量各具特色的匹配方法，但是由于立体匹配涉及的问题太多，至今仍未得到很好的解决。特别是在复杂场景中，如何提高算法的去歧义匹配和抗干扰能力、降低实现的复杂程度和计算量，都需要进行更深入的探索和研究。

（5）三维重建　已知双目立体成像模型和匹配视差后，三维距离的恢复是很容易的。影响距离测量精度的因素主要有摄像机标定误差、数字量化效应、特征检测与匹配定位精度等。一般来讲，立体视觉检测的测量精度与立体匹配定位精度成正比，与摄像机间的基线长度成反比。例如，增大基线长度可以有效地改善测量精度，同时也会加大图像间的差异、增加立体匹配的困难。因此，设计一个精确的立体视觉系统，必须综合考虑各方面因素，保证各个环节都具有较高的精度。例如，Behrooz 和 Blostein 等人对确定空间位置坐标点时的误差来源，以及图像量化效应对于立体测量精度的影响进行了详细分析；Gem 则对序列图像中的噪声影响提出了模型估计和唯一性结果的论证。

2. 立体视觉系统的组成

立体视觉系统的研究目标是简化人类复杂的视觉反馈系统，建立起仿人机器人的两眼协调运动数学模型和控制方法，使仿人机器人的两眼也能和人类的两眼一样实现协调运动、前庭动眼反射、滑动性眼球运动、辐辏运动等视觉机能，并且在各种环境中能自律和有效地完成三维重构、目标识别、追踪定位、运动检测、手眼协调、障碍避免、步行规划等作业。

在立体视觉系统中，目标检测主要用于在立体图像中快速而精确地提取各种特征点的图像坐标，将各种特征进行准确的立体匹配，并利用摄像机标定的结果恢复各特征点的三维坐标，最终控制摄像机准确地追踪目标；而在目标识别这一环节，图像处理主要用于在背景中找到了目标之后，进一步地提取目标特征，再与目标数据库中的特征进行匹配，最终得出识别结果。立体视觉系统对数字图像处理部分的速度和精度都有较高的要求。数字图像处理通常要求计算量大、所需时间长，其实时性和精度与图像特征的选取和图像处理的方法有很大关系。针对立体视觉系统的特点，结合实际情况，灵活应用多种数字图像处理方法，如动态阈值、相似度计算、图像的边缘提取、图像分割、高斯滤波等，力求快速、准确地完成数字图像处理。实验证明，在整个过程中，数字图像处理是极其重要和关键的一步，对整个系统的目标检测以及识别结果的精确度和实时性起着决定性的作用。在对数字图像处理进行优化后，目标检测、追踪和识别的精度和实时性都可以提高一倍以上。

立体视觉系统的硬件组成如图 9-12 所示，它包括以下三个部分：

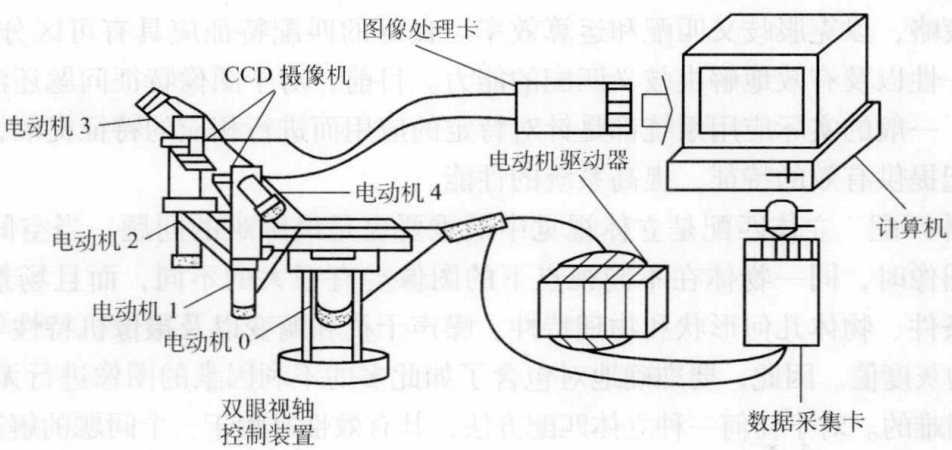



图 9-12　立体视觉系统的硬件组成

1）图像采集部分，由两台 CCD 摄像机和一块高速图像采集板组成。随着半导体工艺技术的发展，各种类型的固体图像传感器进入市场。其中，与摄像管相比，最有发展前途的 CCD 器件由于仅是一块简单的硅片，受振动和冲击的损伤较少，不需要预热，而且其体积小、重量轻、造价低、寿命长、在弱光下灵敏度高、不受滞后(移动亮度引起的光斑或拖影)的影响。由于上述的众多优点，使得 CCD 特别适合应用在机器人视觉系统中，无论是可行走机器人，还是“眼在手上”的机械手视觉引导系统。图 9-12 中的两个 CS5620BDP 型 CCD 色彩摄像机(日本东芝公司产品)的图像平面为 768 × 576 像素，MATROX-Meteor2/4 型图像采集板可以将模拟视频信号滤波并且完成 A/D 转换后，直接通过 PCI 总线传入计算机内存，传送速度为 25 帧/s，实时性好。两个 CCD 摄像机的间距设定为 75mm，从眼球到颈部旋转轴之间的距离为 85mm，以期和人的情形相一致。

2）数据采集部分，包括一块 AD7202 型数据采集卡，它将计算机计算出来的控制量输出到直流伺服电动机驱动器，以控制五个直流伺服电动机，同时将五个直流伺服电动机光电编码器的反馈信号输入计算机。AD7202 数据采集卡是基于 PCI 总线的数据采集卡，可直接插在计算机内的任一个 PCI 插槽中，构成数据采集和处理系统。AD7202 数据采集卡上装有 12 位的 A/D 转换器和 D/A 转换器，提供了 8 双/16 单的模拟输入通道和 32 路 I/O 数字量通

道；支持软件查询方式和中断方式，两种方式的传输率均可达到100KB/s；PCI 总线宽度32位，同步工作频率可达到33MHz，最高传输率为132MB/s。

3）硬件控制设备，由一台计算机、五个 R4322-76792A 型直流伺服电动机、一个直流伺服电动机驱动器构成。所有计算均在计算机上完成，计算机采用华硕 P4C800 主板、P4 2.0 GHz CPU、256M RAM、80G 硬盘。五个 R4322-76792A 型直流伺服电动机具有体积小、高速、噪声极低、带脉冲发生器的特点，它们用于控制立体视觉系统的左、右 CCD 摄像机，可以上、下、左、右运动，同时整个系统也可以像人的颈部一样做旋转运动(5 个自由度)。电动机0、电动机1、电动机2 的运动分别代表颈部的旋转运动、左眼的水平运动和右眼的水平运动，电动机3 和电动机4 分别代表左眼和右眼的俯仰运动。

3. 立体视觉的工作原理

立体视觉系统的工作原理如图 9-13 所示。假设摄像机标定工作已经离线完成，两个 CCD 摄像机首先获取立体图像，图像采集板将视频信号初步处理后，通过 PCI 总线直接传入计算机内存，计算机进行图像处理和计算工作。五个伺服电动机(电动机0～4)各带有一个光电编码器，编码器发出的脉冲通过数据采集卡进入计算机，构成闭环控制回路。从 CCD 摄像机获得的图像经过图像处理，检测出目标在图像平面的当前位置，进而计算出其相对于两个摄像机所在的空间位置，然后通过两眼运动控制算法确定各伺服电动机的参考输入，最后使用 PID 控制算法控制各个电动机到达指定角度位置，以使目标图像始终位于两个 CCD 摄像机图像平面的中心，实现对移动目标的实时和动态跟踪。

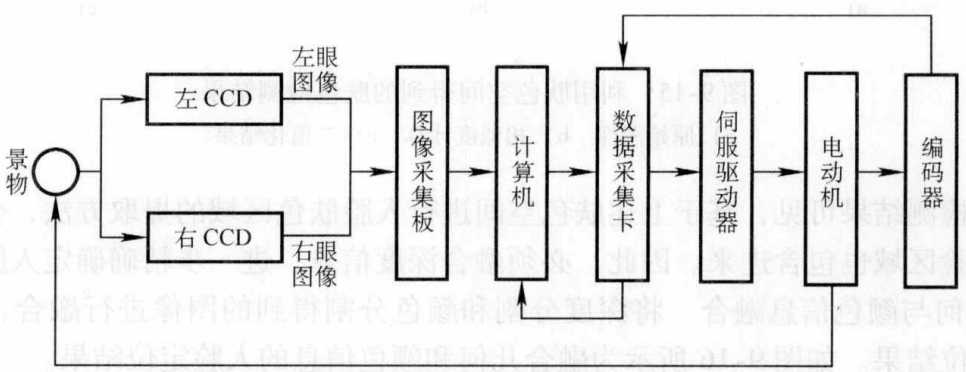



图 9-13　立体视觉系统工作原理

4. 立体视觉系统实例

（1）深度分割　通过立体视觉系统获得的图形，经过立体匹配、深度提炼得到图像所对应的深度图以后，下一步便可以根据与摄像机的距离进行深度分割。只要能足够精确地估计物体与摄像机的距离，即使物体间具有相似的颜色和纹理特性，深度分割也可以将特定深度范围内的物体分割出来。这种技术特别适用于将目标物体从复杂背景中分离出来。如图 9-14所示为使用这种技术将人头从含有复杂背景的图像中分离出来，显示了深度分割提取前景的效果。

（2）颜色分割　在对图像进行提取深度图运算的同时，肤色区域的提取也可同时进行。通过分析色彩图像的色彩因素，得到关于色度与彩色坐标系的关系，建立相应的便于检测肤色的坐标变换方法，提取出类似肤色的区域。如图 9-15 所示是利用肤色空间得到的肤色检

图 9-14 深度分割提取前景的效果

a）原始图像 b）提取前景结果

图 9-15 利用肤色空间得到的肤色检测结果

a）原始图像 b）相似度计算 c）二值化结果

测结果。由检测结果可见，基于上述肤色空间进行人脸肤色区域的提取方法，会将与人肤色相似的非人脸区域也包含进来。因此，必须融合深度信息，进一步精确确定人脸位置。

（3）几何与颜色信息融合 将深度分割和颜色分割得到的图像进行融合，就可获得准确的人脸定位结果。如图 9-16 所示为融合几何和颜色信息的人脸定位结果。

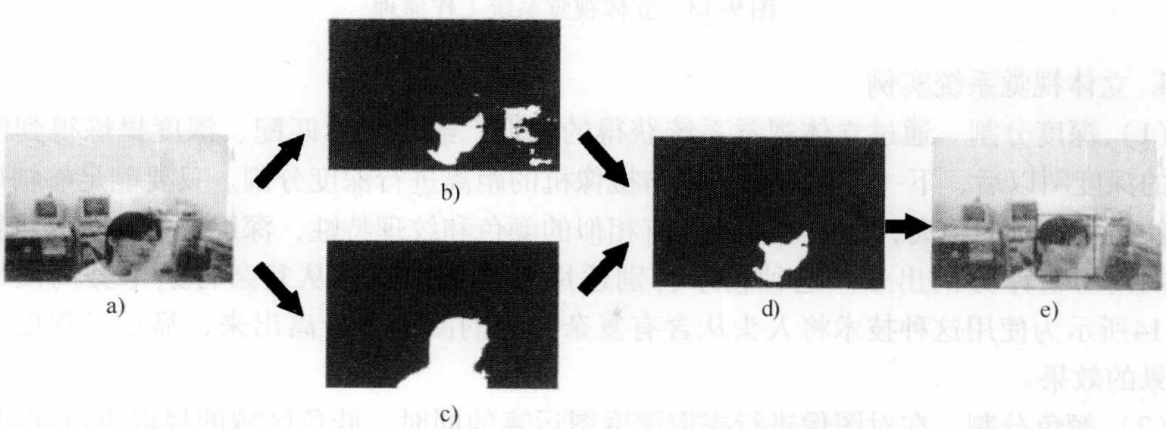



图 9-16 融合几何和颜色信息的人脸

a）原始图像 b）区域分割 c）深度分割 d）信息融合 e）搜索结果

### 9.1.3　五指灵巧手

手是人获得认知的重要渠道，是人完成灵巧操作的最重要的器官。从机器人这一概念提出之日起，人们便把其想象成能够像人一样具有高度的智能，能够完成各种复杂的操作。目前，在日本和欧美等发达国家的工厂中，工业机械手已经被广泛地用来代替工人完成各类简单和重复性的工作。这些工业机械手基本上是限定在特定的环境中完成单一的操作，而对于一些在繁重、危险、恶劣、极限或一般的环境下需要人手才能完成的复杂作业，例如捏、夹、推、拉、插、按、剪、切、敲、打、撕、贴、牵、拽、磨、削、刨、搓等，普通的工业机械手则显得无能为力。由于和人手一样带有五个手指和手掌，并且分布触觉技能，五指灵巧手具有极强的功能和很高的通用性，它完全可以代替或者帮助人类在各种场合下灵巧地完成各类复杂的作业。

1. 五指灵巧手设计的关键技术

通过对人手结构的研究，结合国内外多指灵巧手研究成果的分析，五指灵巧手的设计从宏观来看，首先应该有以下几个技术要点。

（1）手指的模块化设计　从人手结构来看，人手的五指互相独立、互相协作。因此，设计五指灵巧手时，五指可以独立设计。除了拇指，其余四指结构大致相同。它们的第3、4关节相互咬合一起运动；基本节都在手掌内，几乎不产生运动，所以设计时可以针对某一指重点展开，其他指头可以在其基础上做尺寸上的调整。这样的设计符合模块化的思想，既方便设计、装配与维护，又有利于设计质量的提高。对于人手来说，拇指是最灵活的，其每一个关节都能独立地运动，设计也较其他四指复杂。这些设计思想在NTU和Gifu HandⅡ的设计中都得以不同程度的体现。

（2）传感器设计　在机器人的设计中，传感器设计始终占有很大的比重。对于人手来说，与外界接触主要是通过触觉来完成的。触觉对于手的意义如同视觉对于眼，所以触觉传感器成为五指灵巧手的核心部件，而触觉传感器的设计也成了至关重要的部分。除了触觉传感器，力传感器的设计也很重要。

（3）控制系统研究　控制系统由放置在手外通过键控发展到嵌入手内部的压缩尺寸的微型控制，这将使五指灵巧手的尺寸和重量达到人手的水平。目前认为，设计五指灵巧手的控制算法是通过与人手的交互，使五指灵巧手获得灵巧操作所需的知识和技能，但是这不同于主从型机械手。主从型机械手是从手（机械手）接收引导手（一般是人手）的动作信号，并根据接收到的信号产生相应的反应动作；而五指灵巧手的研究则体现了更高的智能，该类型的手具有较强的自学习、自适应能力，通过反复的训练，还具有自主决策能力。所以，设计神经网络将成为控制算法设计的关键。

（4）结构优化　为了五指灵巧手高灵巧度的需要，有必要对多指灵巧手的结构进行深入的分析，并采用优化设计方法，设计出结构上最优化的五指灵巧手，为其实用化和其他方面的研究提供最理想的结构。对于多指灵巧手的结构优化设计，必须对以下十个方面进行优化分析或设计：

① 手指关节运动形式。

② 手指数目。

③ 手掌结构。

④ 手指结构形式(关节的数目及相对姿态)。
⑤ 各关节运动的驱动方式及传动方式。
⑥ 各关节的断面结构形式。
⑦ 手的材料(包括表面材料,即皮肤)。
⑧ 传感器设计及布局。
⑨ 各手指之间的相对位置及姿态。
⑩ 各关节的长度及可旋转关节的旋转角度范围。

对于五指形灵巧手的研究,上述十个问题大致分为四类:②和④是无需考虑的问题,⑤、⑦和⑧是需要专门研究的,①、③和⑥是需通过测试优化的,⑨和⑩则可以通过建立合适的优化算法来实现。

(5) 材料研究 机器人的发展始终是与材料科学的研究密切相关的。从五指灵巧手来看,无论是各个部件的制造还是手外层覆盖的皮肤,都对材料的要求十分苛刻。材料选择的优劣直接关系到五指灵巧手的重量、灵巧度、耐用性和制造难度等多个方面。例如在 Gifu Hand Ⅱ中,钛合金的应用对于增加关节间耐磨性能、减少由于摩擦带来的齿轮隙的增大作用明显。新的高硬度、低密度材料的应用对于减轻手的重量、增加手指的硬度、提高耐磨性等都会产生良性影响,因此,材料的研究同样至关重要。

2. 五指灵巧手的应用实例

20 世纪 80 年代末以来,在原有多指灵巧机械手研究的基础之上,五指灵巧手的研究逐渐开展起来,涌现出了一些比较优秀的成果。例如 1987 年,前南斯拉夫 Venkataraman 等研制的贝尔格莱德 USC 灵巧手;1996 年,中国台湾省的台湾大学研制的 NTU 五指灵巧手;日本 Gifu 大学 Haruhisa Kawasaki 等已经研制和正在研制的 Gifu 系列手,现已经完成 Gifu Hand Ⅰ和 Gifu Hand Ⅱ的设计,如图 9-17 所示。USC 手是五指灵巧手研究的早期成果,它设计简单、机构精简,堪称经典。现在,五指灵巧手研究追求结构精简,控制系统的复杂度较低和 USC 手不无关系。该手的 5 个手指仅有 4 个电动机作为动力部件,其中两个电动机驱动拇指,另外两个驱动其他 4 指。每个手指有 3 个平行的轴关节,却只有 1 个自由度,所以它仅仅能完成简单的灵巧抓取而不能执行复杂的灵巧操作。此外,英国 Shadow 机器人公司在 2003 年设计的五指灵巧手,无论是外观还是结构,都达到相当高的仿人程度。2005 年,该公司又将五指灵巧手做了改进,如图 9-18所示。

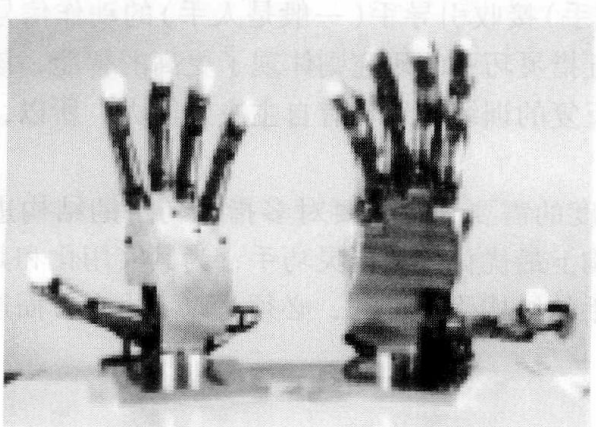


图 9-17 Gifu Hand Ⅰ和 Gifu Hand Ⅱ五指灵巧手

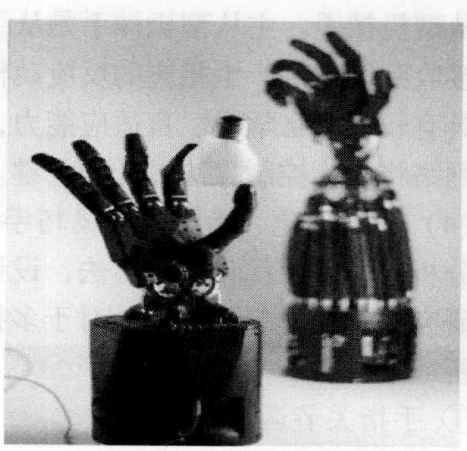


图 9-18 Shadow 公司开发的五指灵巧手

20世纪60年代后期，国内一些著名的高等院校和研究机构，例如北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学、中国科学院、北京工业大学、华南理工大学等都相继展开了五指灵巧手的研究。北京航空航天大学机器人研究所先后研制了BH-1、BH-2、BH-3、BH-4等四种型号的灵巧手，如图9-19所示。哈尔滨工业大学于2001年研制成功了我国第一个具有多种感知功能的DLRHIT多指灵巧手，并且与德国宇航中心合作，于2003年研制成功了尺寸更小、集成化程度更高的新型五指灵巧手，如图9-20所示。

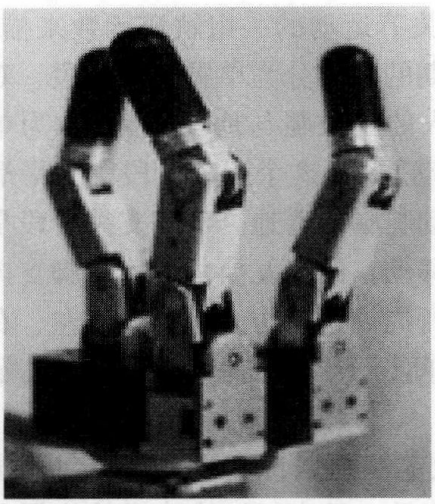


图9-19　北航BH-4灵巧手

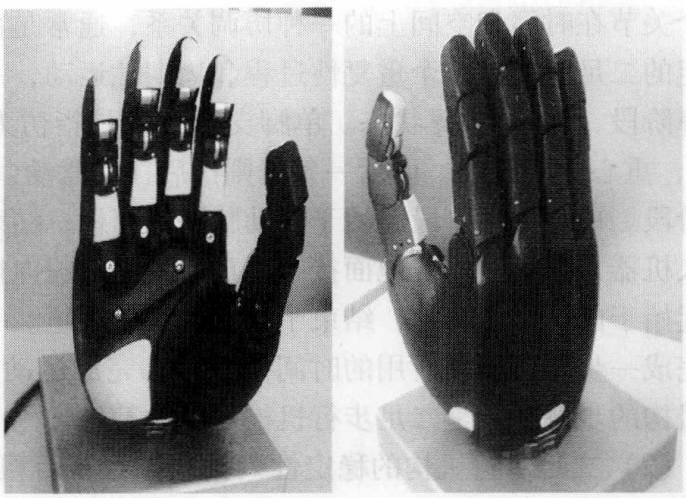


图9-20　DLRHIT灵巧手

3. 五指灵巧手的发展趋势

当然，五指灵巧手研发中需要研究的课题还很多，许多实际的问题还有待在研究中发现、解决。随着仿人机器人的发展，研发五指灵巧手具有重要的理论和实践意义。机器人学的发展方向始终是高度仿人形。对于机械手来说，尽管二指就可以实现简单的夹、捏操作，三指形的手可以完成二维物体的封闭抓取，四指形手就可以实现三维物体的灵巧操作，而且少一个指头可能在设计和实现上都比较容易，但是高度仿人手始终是最高目标。所谓的高度仿人手，不仅仅是机械手所能完成的操作复杂性，接近人的水平，而且其外形也要接近人手。这对机械设计、控制系统设计、传感器设计都提出了更高的要求。

1）双手协作。事实上，大多数的工具操作需要双手协作以简化操作，例如人用剪刀时，往往需要一只手操作剪刀、另一只手握住待操作的物体，而且人通过双手协作，使得手的作用得以更大的发挥，完成更多的复杂操作。举操作就是双手协作以更好地发挥手的作用的实例。所以在五指灵巧手设计时，就应需要考虑双手的协作，这样不仅能简化某些操作，还可能扩大手的作用。要实现双手协作问题，双手必须能够即时通信，所以设计一套完美的通信系统对于双手的协作效能会起到至关重要的作用。有关设计已经做了这方面的努力，例如Gifu HandⅡ就设计了左、右两只手，但是并未实现双手操作。

2）手-腕-前臂一体化设计。从整体、系统的观点来看，人的各个器官，尤其是相邻器官关联较强，相互起到辅助、补充作用。对于手来说，腕和前臂就对其起到了很大的辅助作用，而且五指灵巧手的成功设计最终是要与腕和前臂连接起来的，尤其是五指灵巧手与手腕需要大量的信号传递，所以手-腕-前臂一体化设计可能会简化手与腕连接的复杂程度，进而

提高手的灵巧性。

### 9.1.4 二足步行机构

二足步行机构是仿人机器人的重要组成部分，也是设计非常困难的部分。下面主要介绍二足步行机构的建模、控制、分类及目前二足步行机构设计存在的问题。

1. 二足步行机构的建模

（1）二足步行机构的步态分析　二足步行的步态是指仿人机器人在步行过程中，它的各个关节在时序和空间上的一种协调关系，通常是由各个关节运动的一组轨迹函数来描述。稳定的二足步行是一个重复性过程和周期性运动，一个周期的运动分为单脚支撑阶段、双脚支撑阶段、脚-地碰撞状态。单脚支撑阶段是指仿人机器人的一条腿与地面接触(称为单撑腿)，重心落在该腿，而后一条腿则由后往前摆动(称为摆动腿)，这个运动阶段称为平滑动态阶段。单腿支撑阶段起始于摆动腿脚尖离地，结束于摆动腿脚跟着地。双脚支撑阶段是指仿人机器人的两腿均与地面接触，重心由支撑腿向摆动腿移动，两腿互换角色。双脚支撑阶段起始于前脚脚跟着地，结束于摆动腿脚尖离地。一个步行周期是指仿人机器人的左、右脚各完成一步行走运动所用的时间，是单脚完成运动所用时间(即单步周期)的两倍。二足步行机构的步态分析是二足步行机构建模的基础。

（2）二足步行机构的稳定性判据　二足步行机构的稳定性判据，一般采用前南斯拉夫学者 Vukobratovic 和 Juricic 提出的零力矩点判据(ZMP)。它是二足步行机构建模的依据和稳定步行的判据。零力矩点判据的存在是以二足步行机构的动态平衡为前提的，即二足步行机构的动态平衡满足以下两个前提条件：

$$\sum M_x = 0,\quad \sum M_y = 0$$

即仿人机器人所受的力矩之和在水平面上的 ZMP 达到平衡。

（3）二足步行机构模型建立　二足步行发生在地面上，受地面状况的影响。仿人机器人是一个受环境单边约束的系统，它只能被动地接受地面反作用力的作用。如图 9-21 所示

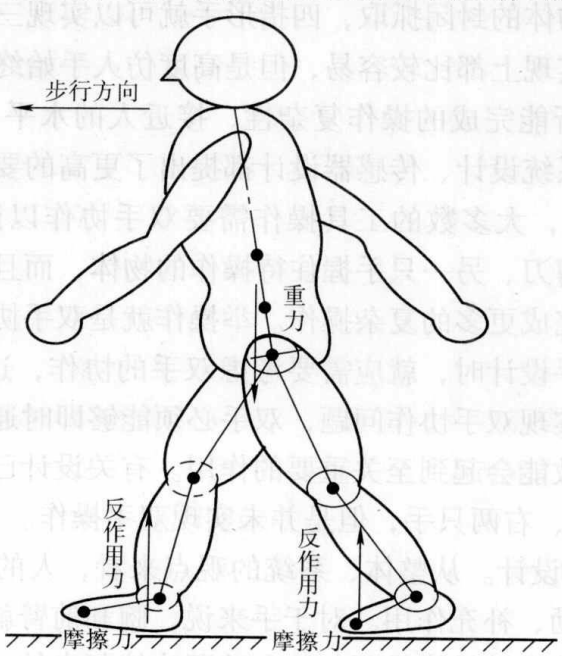



图 9-21　仿人机器人模型

是一个仿人机器人模型，可以看到，它的二足步行运动是地面反作用力、摩擦力、重力等多个力作用产生的。它需要通过传感器获取各种力的大小、方向以及地面的粗糙程度、是否有障碍物等，然后通过控制器驱动仿人机器人运动，实现二足步行，如图9-22所示。

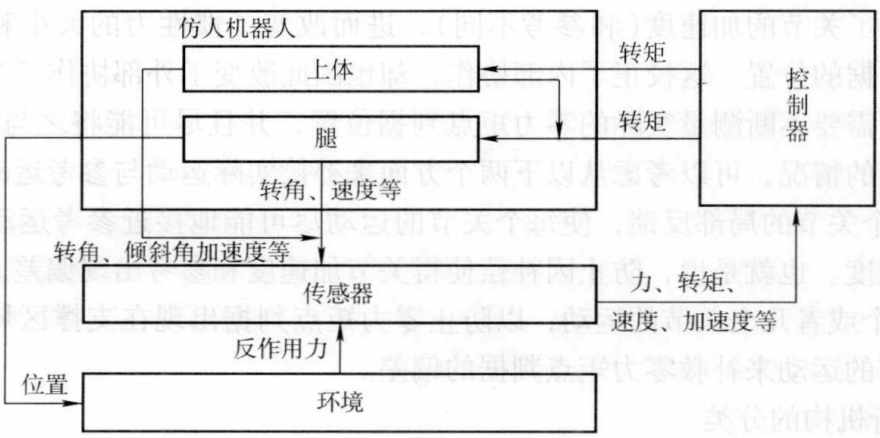



图9-22　二足步行模型

2. 二足步行机构控制

在现实条件下，仿人机器人步行运动的实现总是伴随有干扰，实际运动和参考运动之间总会存在偏差，关节轨迹和参考轨迹的偏差会导致零力矩点判据与其参考之间的偏差。当零力矩点判据非常接近于支撑区域边缘的时候，仿人机器人就会失去平衡，开始沿角的边缘转动或倾倒下去。所以，二足步行的控制任务就是要保证所有驱动的关节都接近其参考轨迹，同时始终维持动态平衡。

为了更好地理解二足步行的控制问题，需要考察三种典型的步行情况。在这三种步行情况下，都假设仿人机器人在初始状态下按照参考运动运行，然后受到了干扰的作用。

（1）外部干扰力度较小　这时，尽管理想的运动状态与参考运动吻合的运动受到干扰，同样零力矩点判据的位置也被改变了，但是零力矩点判据仍然在完全的支撑区域内。可以采用适当的控制方法，使仿人机器人恢复到参考运动状态。

（2）外部干扰力强度中等　这种情况下，干扰同样使步行偏离了参考轨迹，也增大了零力矩点判据与其参考位置的偏差。为了维持动态平衡，仿人机器人需要采取更加有效的手段，例如摆动手臂以保证零力矩点判据仍然在安全的支撑区域，从而使仿人机器人的运动逐渐回到参考轨迹上。

（3）外部干扰力强度很大　此时会出现没有驱动的自由度，整个仿人机器人开始出现绕支撑脚边缘发生转动的趋势。在这种情况下，试图减小关节轨迹和参考轨迹之间的偏差，并且使仿人机器人回到参考运动的努力都是没有意义的，因为仿人机器人已经失去了平衡。因此，保持或者重建动态平衡成了最大的问题，不再考虑关节和参考运动之间的关系。这时，仿人机器人不得不放弃理想的运动状态，采取一些紧急措施，例如朝着摔倒的方向向前迈一大步，防止摔倒，然后再通过接连几步的调整，逐渐地回到参考运动上来。

在上述三种情况下，二足步行的控制要能够减小实际仿人机器人运动与其参考运动之间的偏差，同时保持动态平衡。因此在第二种，尤其是第三种情况下，首要任务就是阻止仿人

机器人摔倒。

事实上，小强度干扰非常普遍，使得二足步行的控制问题通常集中于这个方面。在小强度干扰下，控制的任务是使每一个关节的偏差最小化，并使仿人机器人的运动接近参考运动，实际的零力矩点判据趋近于参考零力矩点判据。然而，补偿动作也给关节带来了负面影响，那就是改变了关节的加速度(和参考不同)，进而改变了惯性力的大小和方向，再就是影响零力矩点判据的位置。这校正了内部协作，却也因此改变了外部协作。为了阻止无驱动自由度的出现，需要不断测量实际的零力矩点判据位置，并且尽可能将之与参考轨迹接近。对于小强度干扰的情况，可以考虑从以下两个方面来补偿实际运动与参考运动之间的偏差：

① 利用每个关节的局部反馈，使每个关节的运动尽可能地接近参考运动，不过需要特别注意补偿的强度。也就是说，防止因补偿使得关节加速度和参考出现偏差。

② 联合一个或者几个关节的运动，以防止零力矩点判据出现在支撑区域的边缘，可以牺牲某一个关节的运动来补救零力矩点判据的偏差。

3. 二足步行机构的分类

根据控制方法(步态生成和步行控制)的不同，可以将现有的仿人机器人二足步行分类如下。

(1) 静态步行　预先规划关节轨迹和零力矩点判据轨迹(规划完成的轨迹称为参考轨迹)，并将参考轨迹应用于二足步行机构，使仿人机器人按照设计好的轨迹步行。对于运动过程中不可避免的误差，这类方法是通过控制各个驱动关节，将误差降至最小；并且尽可能使零力矩点判据维持在脚-地接触的支撑多边形内，以防止仿人机器人摔倒。这种方法很明显就是为了步行而步行，更大的意义应该在于验证二足步行机构的合理性。当大干扰出现时，兼顾腿的轨迹和零力矩点判据轨迹就很困难了。

(2) 动态步行　动态步行尚无统一的说法。为了使仿人机器人能够更加适应环境，根据“地面”反馈的信息和仿人机器人的中心等参数来实时地规划关节运动轨迹，从而使仿人机器人在未知环境中稳定行走的二足步行都属于动态步行。和静态步行一样，动态步行也需要规划，不同之处是动态步行规划是规划完成既定的功能动作，例如双腿的动作，而其他关节动作则是实时生成的。本节研究的二足步行属于动态步行的范畴。

(3) 基于生物特征的步行　这类步行的代表是 RunBot。该类步行结构非常简单，由一个模拟人类的神经控制反射的程序来控制。因此，这类步行没有用很多的传感器，而且其传感器只做两件事：第一是判断何时肢端碰到了地面，第二是何时需要迈出另一条腿。从步态的生成角度来看，基于生物特征的步行也是一种动态步行，只是它的步态完全根据环境和自身的物理特征生成。加入了机器学习功能的 RunBot 使得仿人机器人可以在环境中学习，使步行越来越稳定，越来越快。

目前，二足步行机构的研究主要集中于上述第二类动态步行。根据对二足步行机构动力学知识的依赖程度，步态的生成分别采用基于零力矩点判据的方法和基于倒置摆模型的方法。基于零力矩点判据的方法需要二足步行机构动力学的精确知识，包括各部分重量、质心位置、连杆的转动惯量等；基于倒置摆模型的方法更多地依靠反馈，因为控制器很少需要知道仿人机器人的结构。由于基于零力矩点判据的方法能够精确地按照参考轨迹生成步态，而基于倒置摆的方法则需要较少的仿人机器人知识，所以也出现了将两种方法结合起来生成步态的方法。

4. 二足步行机构的主要问题

根据以上对二足步行机构的分析不难发现，虽然导致二足步行机构的研究进展缓慢的原因很多，但是不外乎以下四点：

（1）仿人机器人自身的不稳定性　在无电动机驱动力的条件下，仿人机器人根本无法维持其直立姿态；而在有电动机驱动力的条件下，只有仿人机器人的中心在地面的投影落在脚底（远离脚的边缘），同时零力矩点判据落在支持多边形区域内，仿人机器人才有望维持稳定步行，否则，仿人机器人无法维持步行的趋势，自然会摔倒。

（2）二足步行机构是一个非线性的混合系统　目前，很多研究把仿人机器人建模为倒置摆模型，也有一些研究把它与振动阻尼器比较。诚然，二足步行机构受地面约束，摆动腿前后运动进而带动身体摆动的现象非常类似于倒置摆；同时，二足步行机构在落脚时与振动阻尼器相似。但是，二足步行机构与它们根本的区别在于，它与地面的接触是不受约束的，即它可以根据需要选择落脚点。这表明二足步行机构不是一个简单的线性系统，而是一个复杂的混合系统。有的研究把它视为互补松弛系统。

（3）系统受到来自地面条件的约束　步行离不开地面这一事实，使得对稳定步行的研究变得更加复杂。在地面的动力学特征未知的情况下，实现仿人机器人的稳定步行变得非常困难。

（4）对人类步行的原理尚未完全理解　尽管目前研究认为，人类步行是由脊髓的中枢模式发生器（Central Pattern Generator，CPG）控制的，但是这种把步行看作是由中枢模式发生器控制的观点也是建立在把步行机构简化为像范德波尔方程（Vander Pol Equation）一样具有很多约束条件的非线性系统。

从上述四点讨论不难看出，二足步行机构的研究具有很高的难度，并且有很大的研究空间。二足步行机构的控制实际上包括运动规划和动态步行控制两部分。实现二足步行，首先要规划参考运动。由于步行过程中，干扰不可避免和脚-地碰撞周期性的发生，故需要通过采用合适的控制方法，调节驱动装置的转角，使仿人机器人的运动轨迹尽可能地收敛到参考运动上来。

### 9.1.5　人机交互技术

自从机器人走进人们的工作和生活以来，人们为机器人发展了各种类型的交互设备和交互方法，用于与人的沟通。仿人机器人发明的目的是更好地为人类服务，因此仿人机器人需要有效地与人进行沟通和交流。从最初的工业机器人完全地按照人类的指令进行工作，到现在的具有较高智能的仿人机器人自主地融入人们的工作和生活，甚至其最终目标是成为人类的伙伴，与人类共存，仿人机器人的交互功能和技术始终是机器人发展中的重点。由于仿人机器人的交互技术涉及的范围很广，因此本节只对仿人机器人的关键交互技术进行分析和研究。

1. 人机交互技术的发展

在机器人学中，人机交互是指人与机器人之间的信息交流（Human- Robot Interaction，HRI）。人与仿人机器人进行交互的通道包括语言、视觉、超声波、红外线等，交互的方式比较自然，倾向于人与人的交互方式。与传统的人与计算机的交互方式（Human- Computer

Interaction,HCI)不同，人机交互一般具有复杂、动态的控制系统，具有一定的自治性和认知性，并且在动态的真实环境下运行。

从人与仿人机器人交互的历史来看，人机交互是随着仿人机器人的不断发展而发展的。随着机器人从工业机器人发展到智能机器人以及更复杂的仿人机器人，也伴随着人与计算机交互技术的发展，人机交互也在不断进步。人机交互最初的人机界面是从机械手远程操作的形式开始的，它拥有复杂的机械装置，但是缺少感知和推理能力。通过一个单向的通信电路，人们可以通过一个手持操纵器来操纵机器人，因此它可以看作是人类身体的延伸和扩展。在工业领域，可以通过将已经编好的控制程序存储到工业机器人中，以指导机器人执行特定的动作。这时的人机交互比较原始，机器人缺乏必要的智能，只能机械地接受人类的指令。

20 世纪 60 年代，监督控制被引入遥控机器人的直接操纵中。于是，机器人被赋予了一定的自治性，它可以自动地控制自身的一些操作。操作员可以发出一些高层次的命令，而机器人可以将其分解为一系列的低层次的基本操作并执行，这样大大减轻了操作员的工作负担。还有一种共享控制的形式，即机器人控制自身的一个或者几个自由度，而操作员控制其余的动作。共享控制分给了机器人一定的自治性，机器人可以对分配的这些方面拥有自主权利，自动地做出决策。目前，要想达到机器人的完全自治还比较困难，这种半自治的交互方式是研究的重点。外国科学家相继推出半自治的人机交互系统，例如德国卡尔斯鲁厄大学研究的机器人系统，可以通过语言、头部姿态和手势指点进行交流；日本 Keio 大学提出一种人机交互主动界面——语音对话系统，它的特点是机器人不仅可以接受用户的显示输入(如语音命令等)，而且可以从用户的隐式输入(如表情、语气、语调等)判断声音的方向以及用户的距离和位置；Bischoff 设计了一个具有人类特点的交互系统，它以自然语言为主，可以通过手势、触觉以及机器人肌肉运动感觉等与人类进行交流。国内在人机交互系统的研究上也取得了较大的成就，例如中科院研制的仿人机器人就有语音识别和语音控制功能；上海交通大学将手势识别系统应用到仿人机器人中。

总的来说，人机交互系统的理论和实践研究已经取得了很大的发展，但是仿人机器人不再面向简单的给定任务，而是面向与复杂环境的交互，强调智能和个性化的情感表达。在与复杂环境的交互过程中，仿人机器人不仅要具有与人类相似的“看”“听”“说”能力，而且要具有一定的智能和情感能力，同时还要能够从交互过程中进行学习，以提高自身的交互能力。因此，目前对于满足仿人机器人要求的、具有较高智能水平和自治性要求的交互系统仍缺乏足够的研究。下面介绍两种新的应用到仿人机器人的人机交互系统：选择性感知系统和智能感知系统。

2. 选择性感知系统

仿人机器人拥有由较多的传感器组成的复杂感觉系统，具有更多的类似人类的技能，需要处理大量来自环境和自身的感知信息。对大量环境信息的实时性处理和快速响应成为仿人机器人研究和发展的一个难点。因此，研究实现高效率的感知策略和方法，赋予机器人更有效、更强的感知环境的能力，成为一项很迫切、很有意义的任务。

为了解决上述问题，可以从两个方面入手：一方面提高仿人机器人的计算能力，采用具有更强大处理能力的硬件设备，但是受到目前硬件发展水平的限制；另一方面是提高感知信息的处理效率，将有限的计算能力集中到需要的感知信息处理上。选择性感知方法的主要思

想是通过选择和处理与任务或者兴趣有关的部分环境信息，过滤掉大量无关信息。选择性感知是生物界的一个普遍现象，也是解决海量信息选择和过滤的一种有效方法，为处理大量的感知信息提供了思路。目前，许多研究人员对选择性感知方法进行了研究，取得了令人满意的成果。其中，基于选择性注意的感知方法日益受到重视。

基于选择性注意机制的感知方法的总体结构大致可以分为注意机制和支撑系统两个部分，如图9-23所示。注意机制部分包括注意控制、注意窗口、过滤器以及联想记忆等。注意控制部分在整个感知处理过程中起到了集成和管理的作用，它规划调度模型中各种不同的组件执行完成任务，并在需要时调用支撑系统，以辅助任务的执行。注意控制部分首先获得要执行的任务或者意图，经过分析得到与任务相关的知识，指导注意窗口序列的生成，通过联想记忆实现指定的任务或意图。同时，注意控制部分通过过滤器，过滤掉与任务无关的感知信息和已经被识别的分析信息，减少大量的处理成本。支撑系统主要由传感器管理、信息融合功能和知识库等部分组成，它们为感知过程提供必要的支持。

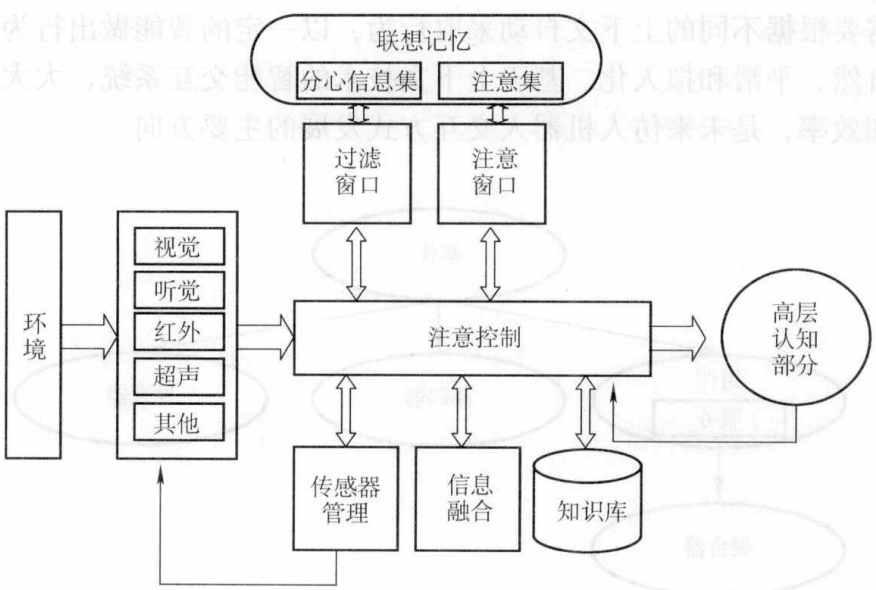



图9-23　基于选择性注意机制的感知方法架构

3. 智能交互系统

近年来，随着仿人机器人技术的不断发展，要求机器人不仅能够被动的从环境中接受信息，而且还要具有一定的行为决策和主动改变环境的能力，这就对其智能性和交互的自然性提出了较高的要求。对于交互对象来说，在识别出该用户之后，能够根据用户的偏好、习惯、当前的意图以及以前的交互历史等信息，提供个性化和前摄性的服务，并尽可能少地显示要求用户输入的信息，以避免频繁的中断交互过程，使得交互更自然和流畅。这就要求系统能够充分利用上下文信息进行计算，用上下文感知技术来实现最优化和智能化的人机交互服务。上下文的参与能够极大地提高仿人机器人的主动性和智能性。

上下文感知是指系统自动地对上下文、上下文变化以及上下文历史信息进行感知和利用，智能判断用户行为及目的，并据此做出决策，从而自动地提供相应的响应或服务，人性化调整人与系统交互的方式和内容。上下文感知包含上下文获取、上下文转换和表达、上下文的使用、上下文的存储和管理等一系列过程。上下文感知系统可以实现一定程度的无干扰

计算，即在用户和智能系统的交互过程中，利用获得的各种动态上下文信息，经过处理、抽象，可最大限度地自动执行用户任务和进行交互行为。这样可以减少用户对计算过程的干预和频繁的输入，用户只需关心自己感兴趣的信息就可以了。

上下文感知应用的一个关键要点就是上下文信息的处理和提供，而实现上下文的有效提供的一个重点是针对上下文信息的要求和不同领域的应用要求，研究上下文信息处理的过程，以及合理的、有效的信息提供框架支持。如今，有许多研究项目已经初步研究了这方面的问题。Dey 提出的 Context Tookit(CTK)采用基于组件的抽象开发技术来封装和抽象上下文信息的获取、表示和管理，用功能组件集合来表示上下文信息空间的实体对象及其相互关系。例如它把传感器抽象成组件，把人、地点或某个实体对象抽象成聚合器，它的组件结构图如图 9-24 所示。获得了上下文信息之后，智能系统可以自动地对上下文、上下文变化以及上下文历史进行感知和应用，并据此做出决策，从而自动提供相应的响应和服务，这一过程称为上下文感知计算。在人与仿人机器人的交互中，上下文感知计算的一个目的是获取和利用上下文信息，以提供适合特定的人、地点、时间等的服务。仿人机器人在准确识别上下文的基础上，需要根据不同的上下文自动采取行为，以一定的智能做出行为决策，使得人机交互过程显得自然、平滑和拟人化。基于上下文技术的智能交互系统，大大提高了感知系统的智能性和感知效率，是未来仿人机器人交互方式发展的主要方向。

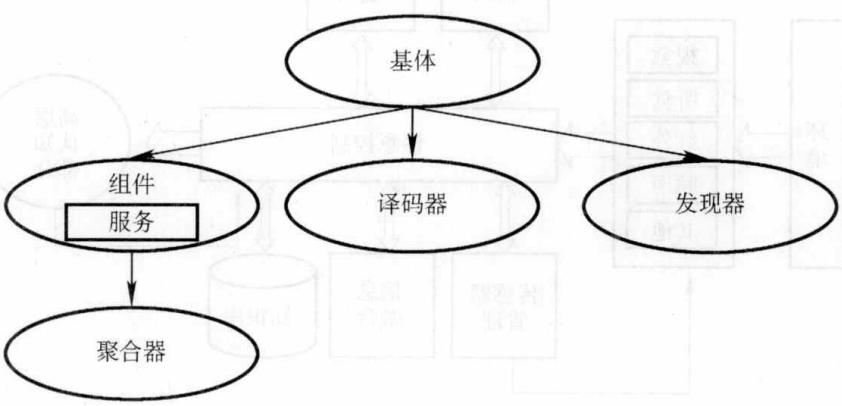



图 9-24　CTK 的组件结构图

### 9.1.6　仿人机器人的触觉系统

触觉是机器人感知外部信息的重要手段，而柔性触觉传感器技术对于未来智能机器人的发展至关重要。所谓“柔性”是指触觉传感器的物理特性具有类似于人类皮肤一样的特性，可以覆盖在任意的载体表面测量受力信息，从而感知目标对象的性质特征。“机器人柔性敏感皮肤”已成为智能机器人触觉传感器技术领域的一个研究热点。

从 20 世纪 80 年代开始，世界各国开始投入较大的人力、财力、物力对机器人触觉传感器进行较为系统的研究。最早研制触觉敏感皮肤的是美国 MSI 公司，该敏感皮肤应用在工业机器人手臂上。印度的研究者根据压电陶瓷材料的压电效应制作了一种压电式触觉传感器。2003 年，美国伊利诺斯州大学的 Engel J 等人研究了用聚酞亚胺和金属薄膜应变计的柔性触觉传感器皮肤。2005 年，美国航空航天局研制出一种机器人非接触式的敏感皮肤。2002 年，南京航空航天大学自动化学院研究人员采用光波导原理设计出能检测三维力的触

觉传感器。重庆大学光电技术与系统实验室也研制了一种压电式四维力触觉传感器。除此之外，中科院合肥智能机械研究所、中国科学技术大学、合肥工业大学等都对触觉传感器进行了深入研究。

1. 触觉系统敏感材料的选择

功能敏感材料是传感器之本，科研人员不断研究各种新的敏感材料和新的敏感机理来模仿触觉，新材料的研究涉及的种类繁多，如基于压阻式、压电式、电容式、磁敏式、光电式和超声式等各种敏感材料。敏感材料的早期研究主要集中在对聚偏二氟乙烯聚合物的压电柔性材料上，目前主要集中在基于柔软、韧性好的压敏导电橡胶和薄膜电容器上。2006 年，Lee H K 等人利用聚二甲基硅氧烷制作了一种电容式触觉传感器；2008 年，加拿大的 Cannata C 研制了一种基于电容式柔性触觉阵列传感器。国内重庆大学的秦岚等人利用导电橡胶做成大面积的电阻式阵列传感器；合肥工业大学的黄英等人利用导电橡胶做成了三维触觉传感器；昆明理工大学的付朝阳等人对力敏导电橡胶进行了理论研究。尽管如此，由于受导电机理、“敏感材料”制备工艺等因素的制约，导电橡胶触觉传感器的研究基本处于理论研究和试验阶段。

2. 传感器结构设计与解耦算法研究

传感器的性能与敏感单元的结构设计有着直接的联系，在整个传感器系统的设计中，传感器的结构设计尤为重要。日本东京大学的 Shimojo M 等人基于力敏导电橡胶设计了一种整体性结构的新型柔性触觉传感器，该结构只能检测单维压力；中科院智能机械研究所的沈春山提出一种网状结构三维阵列触觉传感器设计思想；中国科学技术大学的徐菲基于柔性力敏导电橡胶设计了一种具有整体多层网状结构的三维阵列触觉传感器，使得研究的触觉传感器能够在具有“类皮肤”柔性的同时实现三维力检测功能。以上各传感器结构设计的建模和理论分析过程大多基于敏感材料的理想特性，与实际应用有较大差距，传感器结构设计仍存在许多待解决的关键问题。

具有整体性结构的触觉传感器，无法明确地分隔成彼此独立的阵列单元，由于橡胶材料的高弹性，任何一点的受力均会影响到其他所有节点，因此受力点之间存在复杂耦合现象。有效的解耦算法能实时准确地求解实际复杂阵列传感器的压阻数学模型，解耦算法也是触觉传感器研究的重要内容。国内外研究人员采用多种方法实现传感器解耦和多维力信息获取。虽然目前关于解耦算法的研究有很多，但都无法精确解决三维柔性触觉阵列传感器的解耦，选择适用于柔性材料特性的触觉阵列传感器的解耦算法，根据解耦算法结果对结构进行优化仍是需要解决的关键问题。

3. 信号获取电路设计与传感器标定

三维柔性触觉传感器采集系统能够直接获得由于力的加载而使柔性触觉传感器产生弹性形变进而使得柔性触觉传感器的阻值变化而产生的电压信号，并能对获取的信息进行实时显示。柔性触觉传感器无论采用何种材料制作，理论分析基于的理想特性与实际特性都有一定的差距，因此，需要对柔性触觉传感器进行实际的标定，通过标定试验发现理论与实际的误差并分析原因，对传感器结构和模型进一步修正完善。目前，国内外的标定方法一般采用砝码加载式，中科院合肥智能所机器人传感器实验室设计了一种砝码加载式的六维力传感器标定系统。为了更加准确、方便、快速地对柔性三维力触觉传感器进行标定，标定平台需进一步改进，标定方法需进一步完善，使其具备高度的智能化和自动化，提高传感器的测力

精度。

### 9.1.7 仿人机器人的发展方向

仿人机器人是许多技术的综合与集成。但是，由于受到计算机技术、控制技术、电子技术、通信技术、传感器技术、人工智能、数学建模、机构学、材料学、仿生学等相关科学发展的制约，仿人机器人至今仍处于实验室研制阶段，尤其是二足行走机构的速度、稳定性和自适应能力仍不十分理想。只有在走稳走好之后再加上手臂等执行机构，才能称为真正的仿人机器人。当然，仿人机器人不能仅仅局限于这些，还应能仿人的视觉、触觉、语言、行为、情感等功能。目前，本田公司的P3仿人机器人虽然已经走向市场化，但是它的功能还很有限，离实际意义上的仿人机器人还有相当的一段距离。所以，仿人机器人给科研工作者提供了广阔的研究空间，提出了一个又一个新的挑战，同时也促进了许多相关学科的发展，导致了一些新理论和新方法的出现。目前，越来越多的学者投入到这一新兴的前沿学科里来。

根据仿人机器人目前的发展现状，可以对未来仿人机器人的研究方向和发展趋势作以下预测。

（1）本体结构的改进　仿人机器人是一个多关节和具有冗余自由度的复杂系统。如何实现预期功能而且又使结构最优化是一个很值得研究的问题。一个功能齐全的仿人机器人必须要有一个结构紧凑和配置合理的机械本体，ASIMO就是一个典型的例子。本田公司推出的P系列1、2、3型仿人机器人本体框架采用了镁铝合金材料，ASIMO采用了锰合金。在研制过程中，应该考虑采用更先进的材料，进一步减小本体重量，提高零件的制造精度和装配精度。关于驱动方案的选择，目前普遍采用电动机驱动，经减速器减速后驱动机器人关节。也有一些研究者在研制人造肌肉，通过空气气囊的充气和排气带动关节动作。

（2）运动学和动力学求解理论和方法的发展　一个理想的步态规划对于仿人机器人行走的稳定性是非常有益的。由于仿人机器人的高阶、强耦合和非线性，使得仿人机器人的运动学和动力学的精确求解非常困难，而且也没有十分理想的理论或方法来求解逆运动学的解析解，只有外加一些限制条件，如能量消耗最小、峰值力矩最小等来求出运动学和动力学的近似解。这样往往导致仿人机器人的规划运动与实际运动有较大的出入。所以要得到理想的运动规划，必须在运动学和动力学的求解方法上有重大的突破。现在，有的学者提出了一些方法，如神经网络、遗传算法、模糊逻辑、混沌学等，这些方法和程序允许在计算过程中出现不精确和部分精确的计算过程。正是这些特点，使得软件计算能够得到传统计算方法所不能得到的鲁棒性、易用性和计算资源的低耗费。随着这些新理论和新方法的提出与应用，以及计算机功能的不断提高，为求解高自由度的高阶、强耦合和非线性仿人机器人的运动学和动力学提供了一些新的实用方法。

（3）驱动源的改进　仿人机器人目前所用的驱动源主要有在线提供能源（仿人机器人配有有线电源）和离线自带电源（仿人机器人体内装有电池）两种。当然，离线自带电源比在线提供能源具有更大的活动空间。理想的能源应该具有高的能源密度、耐高温、耐腐蚀、可再生、低成本等。但是，现在自带能源的容量有限，而且仿人机器人的关节众多，所以如何改进驱动源，使其体积小、重量轻而且有容量大，也是在仿人机器人的研制过程中必须解决的

问题。

（4）人体医学、生物学和仿生学的发展　仿人机器人就是要模仿人的某些技能，如双脚直立行走、自主判断、利用工具等。目前，由于人体医学和生物学发展速度的限制，医学界和生物学界对人体的工作机理了解还不是十分透彻，如精确的人体运动学和动力学、人体大脑的工作机理等。另外，仿人机器人不能仅仅限制在仿人上，还应模仿其他生物的一些功能，如蝙蝠的听觉、狗的嗅觉、苍蝇的接近觉、蜻蜓的视觉等。由于仿生学科本身还没有对这些动物的特异功能产生机理精确的“仿生”，所以将这些特异功能应用于仿人机器人还有相当一段时间。相信在不远的将来，人体医学、生物学和仿生学发展到一定的程度以后，仿人机器人就远远不是现在研制的 P3 和 ASIMO 的水平，许多人类所不具有的功能将会出现在仿人机器人上。

（5）传感器技术的发展　仿人机器人安装了大量的传感器，如力/力矩传感器、陀螺仪、视觉传感器、接近觉传感器、声学传感器等多种传感器。在仿人机器人的自主辨识中，就是靠大量的传感器收集来自仿人机器人本身和外部环境的信息并且加以简单地处理，再送到仿人机器人计算分析系统进行计算、分析、比较并得出结果。仿人机器人的控制从某种程度来说，是基于传感器的控制。目前，市场上出售的传感器(尤其是国内生产的传感器)的精度很不理想，而国外的高精度传感器价格又非常昂贵。这些传感器的精度还远远达不到人类的“感觉”精度。

（6）控制技术和集成技术的发展　仿人机器人的关节众多，控制电路复杂，要真正地实现仿人，并且拥有人类并不具有的其他一些功能，其控制电路将愈加复杂。如何寻找更加优化的控制方案和控制机构，受到了越来越多学者的重视。另外一个解决方案就是利用大规模集成电路。

（7）智能技术和软件技术的发展　仿人机器人真正意义上的仿人是二足行走和智能化。毫无疑问，人类是当前世界上最智能化的生物。但是，人类复制自己的智能到仿人机器人身上却不是一件简单的事情。要使仿人机器人获得足够的智能，必须依赖于智能技术的发展。现在的智能实现方法就是通过编辑软件，再安装到仿人机器人的计算机上，仿人机器人接受人的指令产生相应的操作，根据自己的学习完善自己的专家系统，自主辨别和借助外界环境和工具寻找解决方案。这些高度智能化的操作必须有高度发展的智能技术和计算机软件实现技术作基础。

（8）良好的人机接口设计　人类研制仿人机器人的目的并不是完全取代人，而是为人类服务。例如本田公司的研究宗旨是“机器人应该与人类共存和合作，做人类做不到的事，开拓机动性的新领域，从而对人类社会产生附加价值”。目前，仿人机器人紧紧依靠自主计算机来控制是有一定困难的，即使可以做到，也由于对外界环境适应能力的限制而很难实用。也就是说，在相当长的一段时间内，仿人机器人不应该也不可能完全摆脱人的作用。因此，由良好的人-机协调系统来控制仿人机器人显得比较实际。从低层次的一对一遥控技术到高层次的人机理解协调技术，包括人工智能、传感技术、计算机技术、控制技术的综合，随着这些技术的成熟，仿人机器人将越来越多地取代人的劳动，将人类从低层次的干预中解放出来，进行高层次的干预。人机接口也将越来越智能化。

（9）网络机器人技术和虚拟机器人技术　通过通信网络将许多个仿人机器人连接到计算机网络上，并且通过网络对仿人机器人进行有效的控制，这种技术包括网络遥控操作控制

技术、信息组压缩和扩展技术以及传输技术等。在将遥控作为一种主要手段控制仿人机器人的同时，基于多传感器、多媒体和虚拟现实、增强实现(或临场感)的虚拟遥控操作和人机交互技术，也是需要大力发展的技术。

(10) 良好的群体协作和人类协作　人类除了拥有二足直立行走、语言、情感等功能之外，还有一个突出的特点就是团队合作，发挥群体智慧。将来，高智慧的仿人机器人也应该具有这种能力，它们相互之间应该能够团结合作，并且能够主动与人类合作，协助人类完成自身不能完成的工作。自然界中的人经过一个漫长的“优化”过程，成为万物之主。可以肯定的是，仿人机器人必然会有一个持续“优化”的前景，必然会有一个辉煌的明天。

## 9.2 微型机器人与微操作

### 9.2.1 微型机器人的概念及其发展现状

微型机器人是现代机器人技术发展的重要方向之一。由于其结构尺寸微小、器件精密，可进行微细定位和微细操作，微型机器人可以应用在其他机器人无法应用的场合：

1) 对于人类无法进入的危险区域，如航天飞机、导弹、核动力工厂以及石油化工的大量管道的探伤和维修等，更是十分需要微型管道机器人。

2) 医疗上用于诊断、注药、切除和修补的微型机器人。

3) 用于操作血球、细胞的微机器人。

4) 集成电路的检查和修补以及制作过程中的微定位和微操作。

5) 在军事上也具有应用价值，例如用来进行军事侦察，具有不易被发现的优点等。

微型机器人的发展是与微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems,MEMS)的发展分不开的，可以说，微型机器人就是可编程通用的微机电系统。微机电系统是在20世纪80年代后期随着大规模集成电路的迅速发展，微电子技术与机械、光学等领域的成功结合而诞生的，是微电子技术的拓宽和延伸。它将微电子技术和精密机械加工技术相融合，实现了微电子与机械融为一体的系统。

对于微型机器人的分类，目前没有一个统一的标准，按照微型机器人的尺寸大小、操作和定位精度分，微型机器人可分成微小型机器人、超微型机器人、纳米机器人三类；按功能来分，微型机器人分可为微小机器人和微操作与微定位机器人。微小机器人本身尺寸微小，可以进入各种微小的空间去工作；而微操作与微定位机器人能够代替人工完成细微操作和加工工作，机器人本身尺寸不一定小。经过多年的发展，微型机器人的研究取得了巨大的进展。

在微型机器人方面，法国于1995年研制了一种医用管道微型机器人，它的直径为1cm，长度为3cm，一端是可更换的头部装置。美国加州理工大学研制了一种内窥检查的微型机器人，它的尾部带有电缆，其主体主要由支撑器和延展器组成，采用蚯蚓蠕动方式运动。美国麻省理工学院生物仪器实验室研制了一台称作“纳米步行者”的无线微型机器人，可在亚原子级的范围内进行操作。美国麻省理工学院人工智能实验室研制出一种微型蚂蚁，如图9-25所示。美国加州大学伯克利分校研制了一种微型苍蝇，如图9-26所示，这是迄今为止最小的可以拍打翅膀的机器人。

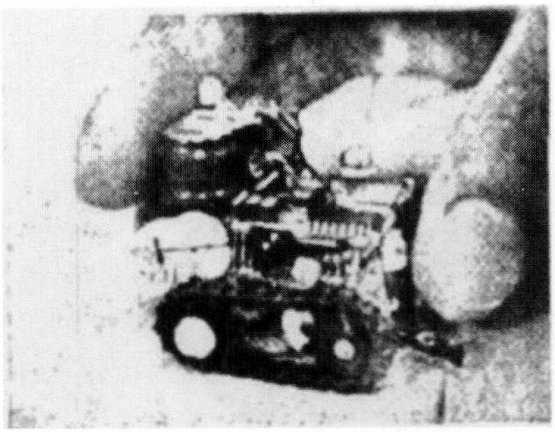


图 9-25　微型蚂蚁

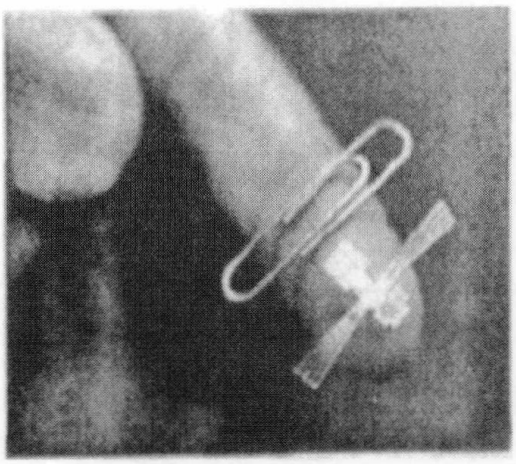


图 9-26　微型苍蝇

在国内，清华大学在周兆英教授的带领下，于 2001 年研制出当时世界最细的超声电动机，重量 36mg，长 5mm，是一个直立的圆柱体。通过周边牵动的导线开始运转时，它的“头部”均匀地旋转，“脚底”则同时发出有韵律的振动(见图 9-27)。这种微电动机使微小机器人在人体血管内的移动成为可能。浙江大学研制出一种无损伤医用微机器人，这种微机器人能以悬浮的方式进入人体内腔（如肠道），从而避免对人体内腔有机组织造成损伤，大大减轻了患者的痛苦。

在微操作机器人方面，世界第一台脑外科手术机器人于 2001 年在伦敦研制成功，如图 9-28所示。这台名叫“探路者”的机器人通过计算机控制，操作准确无误，可减轻病人在手术时的痛苦。德国 PI 公司也研制出用于脑部手术的微操作机器人，如图 9-29 所示。美国纽约的康奈尔大学医学院已用微操作机器人进行了动物的输精管手术实验。

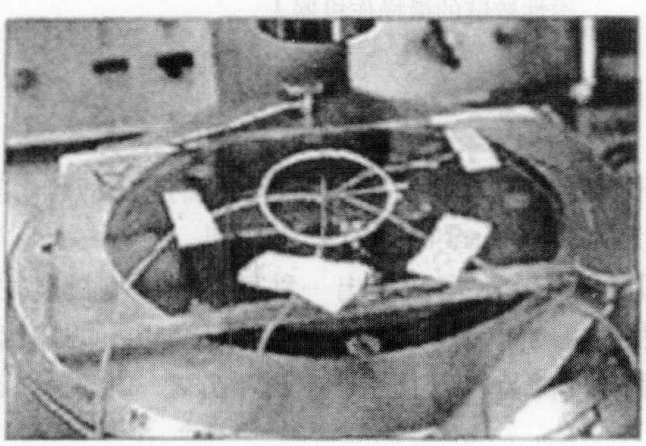


图 9-27　清华大学研制的超声电动机

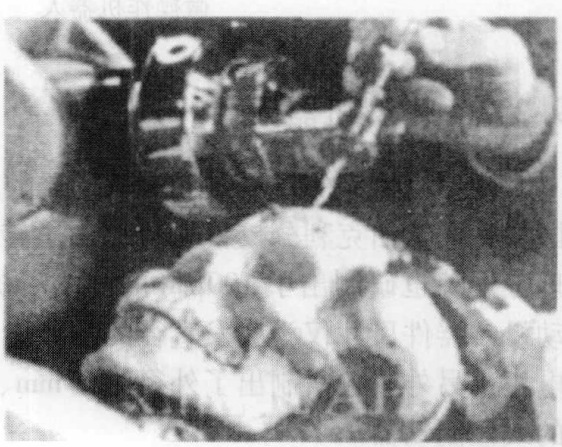


图 9-28　脑外科手术机器人

日本通产省机械技术研究所 Tamio Tanikawa 基于人使筷子的原理，研制了用于细胞操作的双指六自由度微操作机器人样机。此外，日本名古屋大学已研制出六自由度串联微操作机器人。瑞士 EPFL 研制出六自由度并联微操作机器人，如图 9-30 所示。芬兰的 Kallio 研制了三自由度并联微操作机器人(见图 9-31)。美国得克萨斯州大学机械工程系 Hudgens 和 Tesar

等研制了一个六自由度完全并联带柔性铰链的微操作机器人(见图 9-32)。

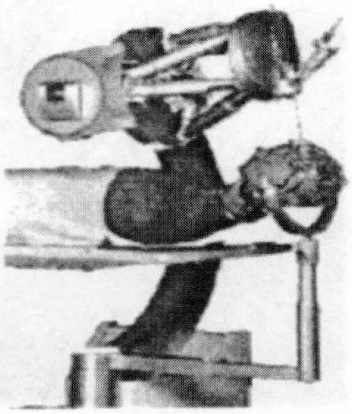


图 9-29 PI 公司研制的用于脑部手术的微操作机器人

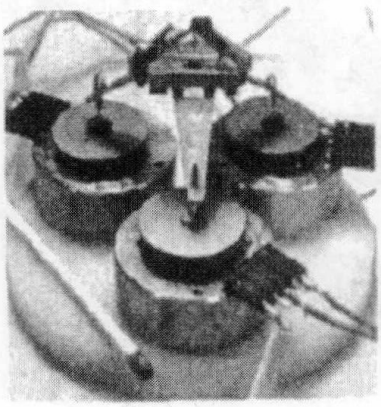


图 9-30 六自由度并联微操作机器人

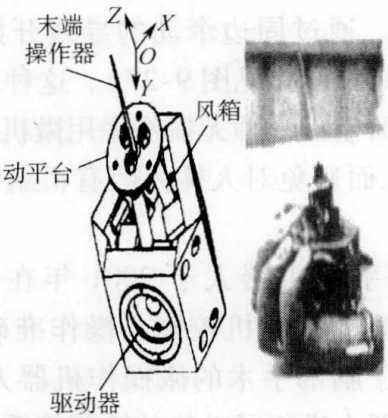



图 9-31 三自由度并联微操作机器人

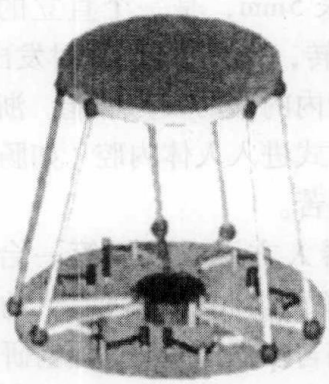


图 9-32 六自由度完全并联带柔性铰链的微操作机器人

## 9.2.2 微型机器人

微型机器人的发展是和微驱动器的发展分不开的，轰动世界的突破性成就是 1987 年美国加州大学伯克利分校首先研制出了转子直径为 60 ~ 120μm 的微型静电动机。随后，麻省理工学院也研制出了 100μm 的静电动机。美国威斯康星大学研制出一种气动式微型机电发动机，器件尺寸仅为头发直径的几分之一，该发动机的重量不过 5g，能提供 5V 以上的输出电压；另外，还研制出了外径为 27mm、内径为 8mm 的齿轮以及能产生出千分之一牛顿量级的线性制动器。

除了用微型发动机和微型电动机来驱动机器人外，驱动微型机器人的方法还有振动法、尺蠖法、碰撞法、冲击法、蠕动法、蛇行法等。下面介绍国内外各种微型机器人的动作原理。

1. 电磁驱动微型机器人的动作原理

一种典型的电磁驱动微型机器人向前运动的动作原理如图 9-33 所示，其动作过程如下：

1) 初始状态(见图 9-33a①)，电磁线圈失电时，电磁吸力 $F_d$ 为零，而弹簧张力 $F_s$ 足

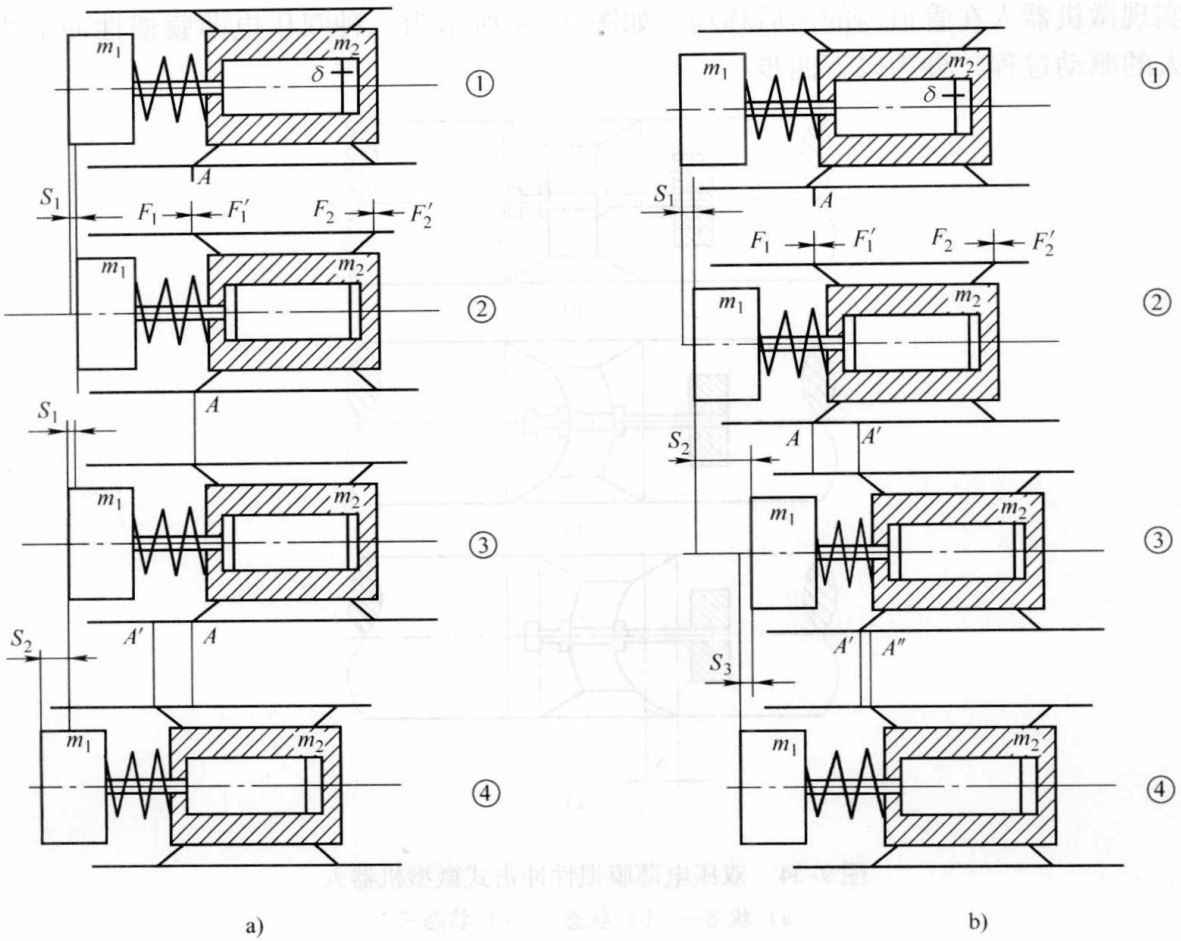



图 9-33　电磁驱动微型机器人向前运动的动作原理

a）向前运动原理示意图　b）向后运动原理示意图

够大，使两质量块 $m_1$、$m_2$ 分离，前支撑腿静止在 $A$ 点，机器人静止不动。

2）对电磁线圈通电（见图 9-33a②），电磁吸力 $F_d$ 作用于体内的衔铁，并且电磁吸力 $F_d$ 大于弹簧力 $F_s$，衔铁向内（向右）移动，弹簧受压。对于质量块 $m_1$，电磁吸力 $F_d$ 克服弹簧力 $F_s$ 使质量块 $m_1$ 有向右的加速度，质量块 $m_1$ 向右移动；对于质量块 $m_2$，电磁吸力 $F_d$ 的大小等于弹簧力 $F_s$ 与摩擦力 $F_1$、$F_2$ 的合力，质量块 $m_2$ 处于静止状态。此时，间隙 $\delta$ 大于零，并逐渐减小。

3）对电磁线圈断电（见图 9-33a③），电磁吸力 $F_d$ 迅速降为零，此时弹簧的变形能得到释放，有向外的张力 $F_s$。对质量块 $m_1$，弹簧力 $F_s$ 使得质量块有向左的加速度；对于质量块 $m_2$，由于弹簧力 $F_s$ 等于摩擦力 $F_1'$ 和 $F_2'$ 的合力，质量块 $m_2$ 处于静止。在此过程中，衔铁向内移动的速度逐渐减小为零，然后衔铁和质量块 $m_1$ 向左移动，间隙逐渐增大。

4）电磁线圈仍处于断电状态（见图 9-33a④），质量块 $m_1$ 和 $m_2$ 发生碰撞，并一起向左运动，弹簧力 $F_s$ 为（$m_1+m_2$）整体的内力。在摩擦力 $F_1$ 和 $F_2$ 的作用下，质量块 $m_1$ 移动距离为 $S_2$，质量块 $m_2$ 从 $A$ 点到 $A'$ 点。重复上述过程，整个微型机器人可以一步一步地前移。后退的过程与之相反，如图 9-33b 所示。

2. 惯性冲击式微型机器人的运动原理

惯性冲击运动的原理是由于惯性力与最大静摩擦力的大小发生变化而产生运动，具体说

就是合理配置本体和配重的重量，再用一定频率、一定幅值的锯齿波电压作用于压电元件，就可实现微机器人在管道内的前后移动。如图 9-34 所示为一种双压电薄膜惯性冲击式微型机器人的驱动过程，分为以下四步：

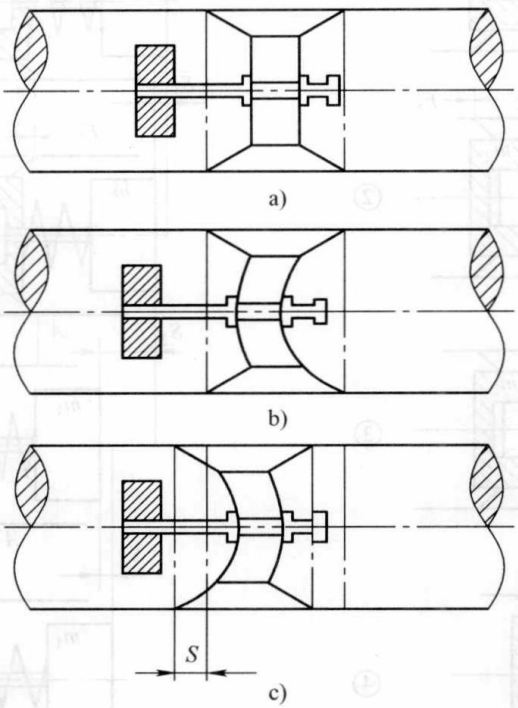



图 9-34　双压电薄膜惯性冲击式微型机器人

a）状态一　b）状态二　c）状态三

1）初始状态时，不施加电压，微型机器人如图 9-34a 所示，静止于管道内部。

2）施加到双压电膜上的电压缓慢上升，微型机器人按如图 9-34b 所示的形式变化。此时，支撑腿与壁面之间的最大静摩擦力大于惯性质量块产生的惯性力，机器人支撑腿不动，双压电薄膜变形带动芯杆和惯性质量发生一定位移，机器人重心向下移动。

3）当施加电压快速减小时，微型机器人按如图 9-34c 所示的形式变化。此时，支撑腿与壁面的最大静摩擦力小于惯性力，机器人本体在惯性力的作用下，支撑腿移动，而惯性质量几乎保持原位，微型机器人完成一步。

4）以一定的频率重复上述过程，整个微型机器人就可以在管道内壁以一定速度向前连续运动。

机器人行走的步长和速度可以通过改变驱动电压的幅值和频率而改变，驱动电压在 5 ~ 120V 之间变化，频率可达到几千赫兹。其最小步长可以达到几纳米；改变驱动电压的方向，可控制机器人的前进和后退。因此，基于压电驱动的惯性冲击运动原理可以实现大运动形成、纳米级分辨率。驱动原理的核心就在于惯性力与接触摩擦力之间的关系。

3. 螺旋轮式微型机器人的运动原理

螺旋轮式微型机器人主要依靠倾斜安装的两个摩擦轮在外力的作用下沿管壁产生螺旋运动。东京工业大学开发出基于螺旋轮式运动的微型机器人，该微型机器人的本体由几个单元体通过弹簧连接而成。每个单元体上均有三个支撑臂，用螺旋弹簧支撑臂上的小轮紧压在管道内壁上，产生预压力。小轮的轴线相对单元体的轴线倾斜了一个角度，当

主体受到驱动力矩作用时，轮子随主体旋转并产生竖直方向的速度；当施加反向力矩时，它可以在管内反方向运动。这种运动方式类似螺旋运动，所以这种微型机器人被称为螺旋驱动的微型机器人。该机器人配备微型 CCD 摄像机，可用于细小工业管道的检测工作。如图 9-35 所示为螺旋轮式微型机器人的运动原理，如图 9-36 所示为其单元体结构。该微型机器人可在内径小于 27mm、曲率半径不小于 200mm 的管道内移动，速度约 34mm/s。

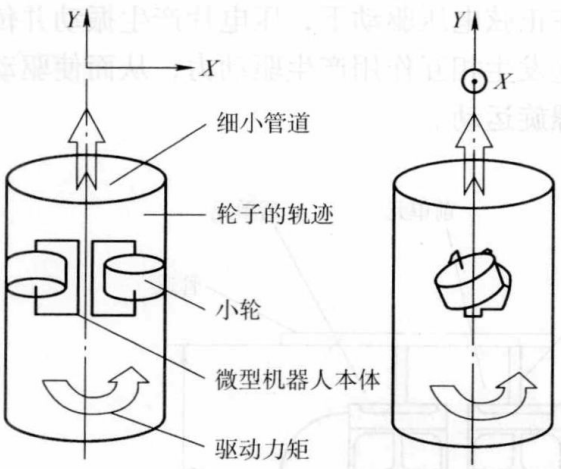



图 9-35　螺旋轮式微型机器人的运动原理

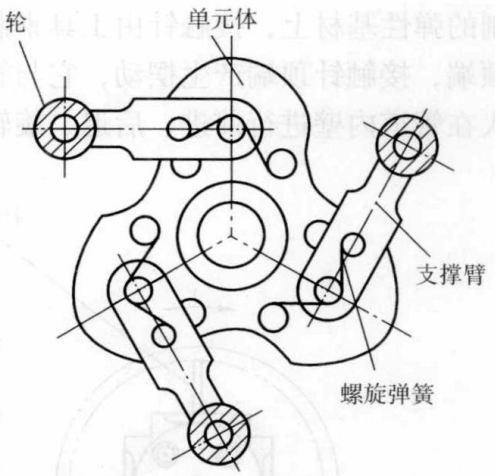



图 9-36　螺旋轮式微型机器人的单元体结构

4. 尺蠖式微型机器人的运动原理

尺蠖是蛾的幼虫，依靠身体伸屈而移动，如图 9-37 所示。日本静冈大学仿尺蠖的移动方法，研制成如图 9-38 所示的尺蠖式微型机器人。该机器人用 4 个电磁铁作为足，足间用压电晶体和弹簧连接。完成一步移动的过程是：

1）后足通电，吸住铁板。

2）压电晶体伸长。

3）前足通电，吸住铁板。

4）后足断电，压电晶体收缩。

当左、右压电晶体不同时工作，就可以实现转向。

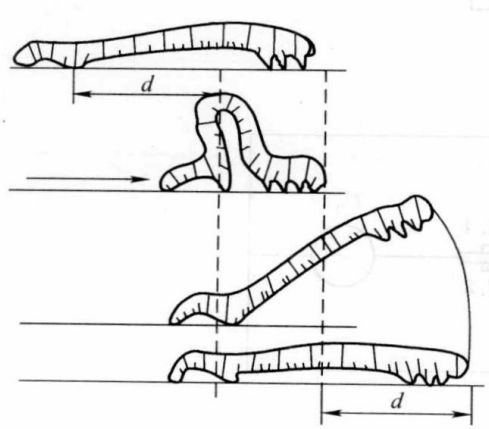



图 9-37　尺蠖运动

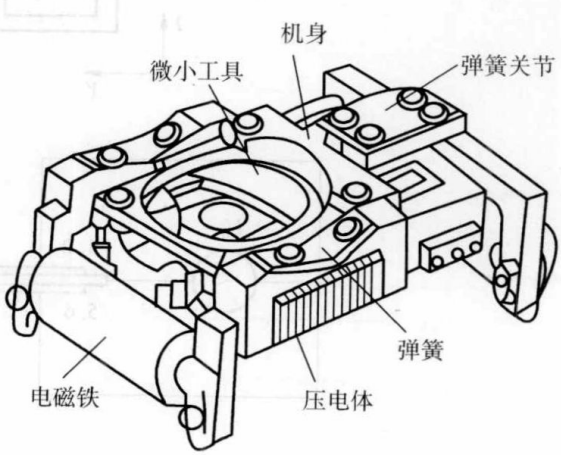



图 9-38　尺蠖式微型机器人

5. 足式微型机器人

这类微型机器人用腿足与移动表面接触，通过腿足与表面的相互作用产生驱动力，从而保证机器人运动。

日本 MEITEC 公司研制的用针形驱动器驱动的足式微型机器人如图 9-39 所示。它可以在直径为 36mm 的管道内运动，最大运动速度可达 188mm/s。该微型机器人的驱动器结构如图 9-40 所示，由 8 个压电片、1 个弹性基材和 1 个接触针构成。压电片用环氧树脂粘结在磷青铜制的弹性基材上，接触针由工具钢制成。在正弦电压驱动下，压电片产生振动并传到接触针顶端，接触针顶端产生摆动，它与管道内壁发生相互作用产生驱动力，从而使驱动微型机器人在管道内壁进行前进、后退、旋转以及螺旋运动。

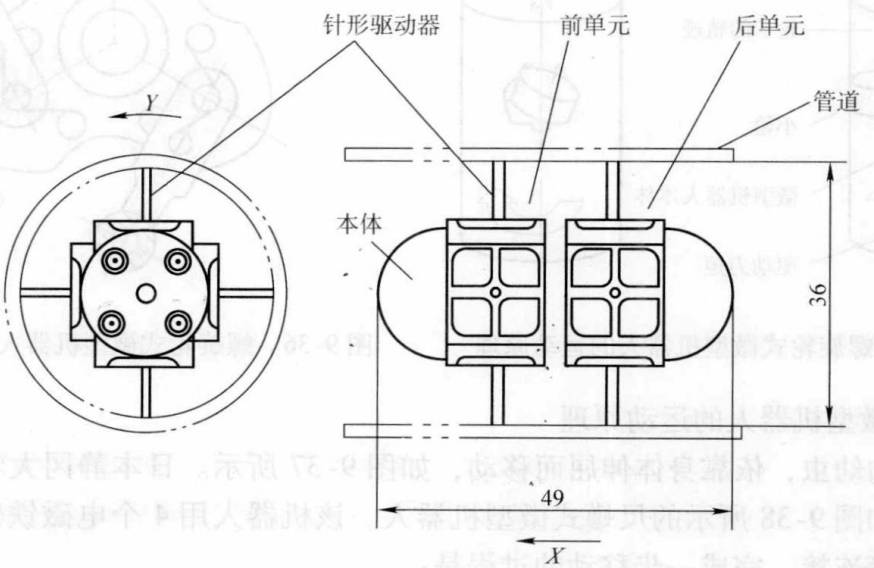



图 9-39　足式微型机器人的驱动器结构

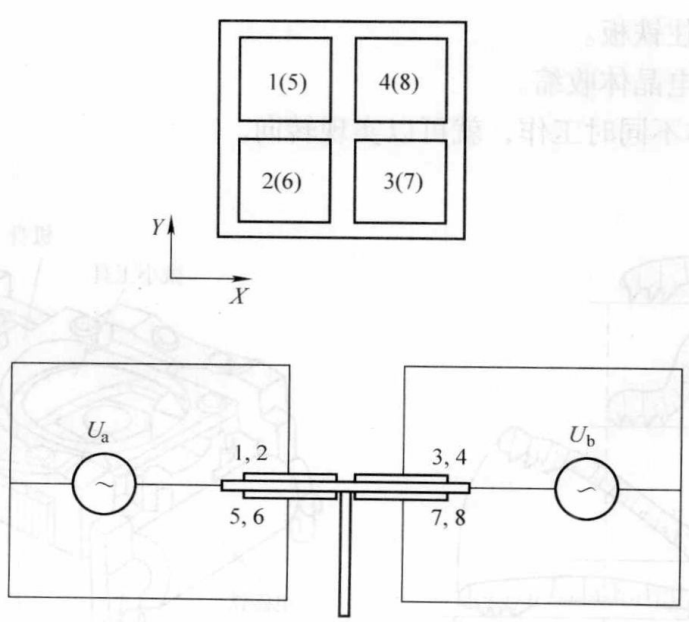



图 9-40　足式微型机器人驱动器结构及运动机理

1～8—压电片

1）当1、2、5、6和3、4、7、8分别被相差90°相位的正弦波驱动，可以产生沿管道轴向的运动，即前进或后退。

2）当1、4、5、8和2、3、6、7分别被相差90°相位的正弦波驱动，可以产生沿管道切线方向的运动，即在管道内部旋转。

3）部分驱动器如1)所述驱动，部分驱动器如2)所述驱动，则微型机器人可以在管道内部实现螺旋运动。

6. 微型飞行器

微型飞行器(Micro Aerial Vehicle,MAV)又称为微型飞行机器人，其概念起源于20世纪90年代初。随着卫星及无人机技术的迅猛发展，利用便携式卫星数字传输装置，基层指挥人员可以以接近实时的方式收到无人机侦察到的战区级敌情的图像信息。但是，不论是卫星、间谍飞机还是无人侦察机，都很难为前线指挥员提供小范围内的具体敌情。微型飞行器的出现正迎合了这种需求。美国国防部先进研究计划署(Defense Advanced Research Program Agency,DARPA)给了微型飞行器一个初步的定义：微型飞行器一般是指翼展和长度在15cm左右，重量在几十克至上百克，有效载荷20g，航速64～80km/h，留空时间20～60min，航程10km，有实时成像、导航及通信能力，可用手、弹药或飞机来部署的微型飞行机器。

世界先进国家的各大科研机构广泛开展了对微型飞行器本体机器子系统的研究和开发，并研制出了一系列原理性样机。最早研究微型飞行器的麻省理工学院林肯实验室在1996年就已经开发出昼间和夜间侦查两种型号的微型飞行器，随后MLB公司也研制出翼展为20.33cm的微型飞行器Trochoid。如图9-41所示，该机由内燃机驱动，重量为71g，最大飞行速度64km/h，飞行高度457m，并且能在较大风速下飞行18.5min。比较成功的微型飞行器当属名为“微星”(Micro Star)和“黑寡妇”(Black Widow)的微型飞行器。“微星”是由Sanders公司研制的一系列微型飞行器，如图9-42所示；“黑寡妇”是由Aero Vironment公司研制的翼展为15.24cm的微型飞行器模型，如图9-43所示。美国Lutronix公司与奥本大学合作研制了名为Kolibri的直升机微型飞行器，如图9-44所示。

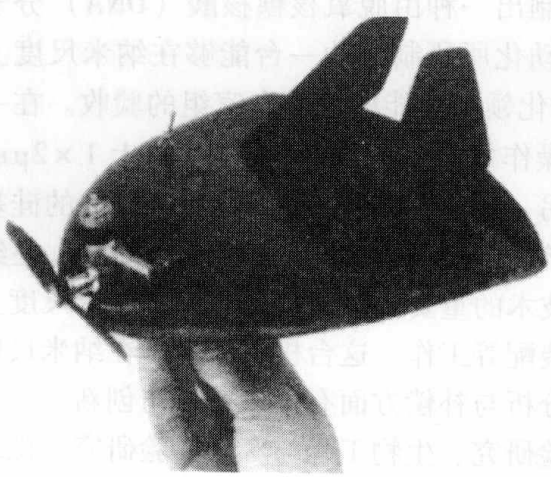


图9-41　Trochoid微型飞行器

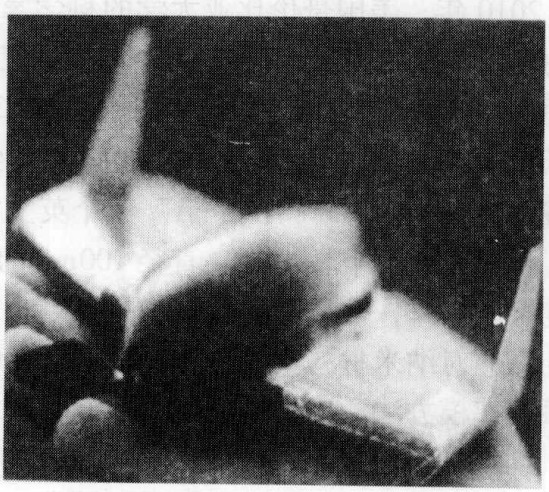


图9-42　“微星”微型飞行器

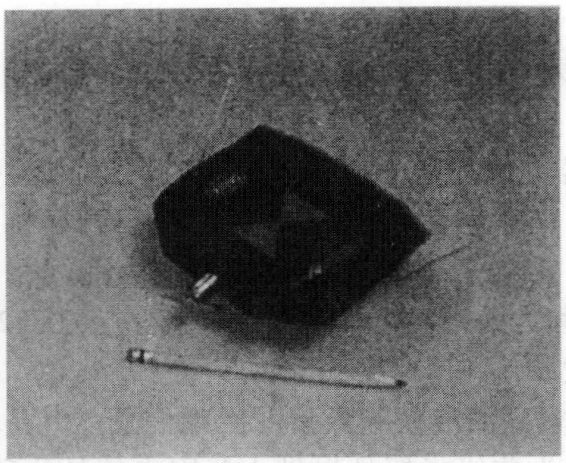


图 9-43 “黑寡妇”微型飞行器

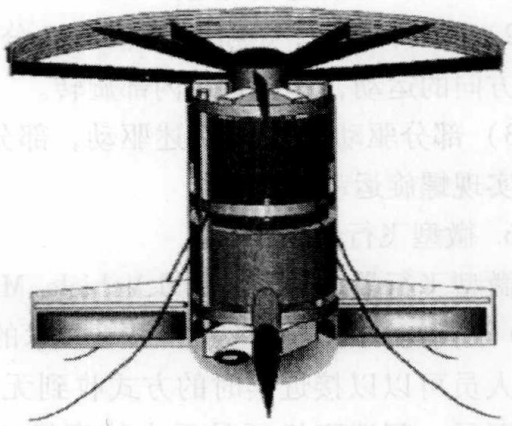


图 9-44 Kolibri 微型飞行器

虽然超微型飞行器的升空高度非常有限，但是随着微机电系统技术的不断发展，微型、超微型直升机的最终研制将成为可能。加利福尼亚工学院等几家单位共同研制的一种 10g 的扑翼式“微型蝙蝠”。GIT 公司研制了名为 Entomopter 的扑翼式微型飞行器，翼展为 25.4cm，动力为往复式化学肌肉(RCM)，同时会产生电能为控制器供电。该微型飞行器已经能够以 10Hz 的频率扑翼，尚不能飞行。SRI 国际公司研制了一种约 15cm 长的扑翼式微型飞行器，它由电致伸缩的聚合物人造肌肉驱动。范德堡大学研制了一种扑翼式机器人昆虫，它由多个压电驱动器驱动很细的金属结构振动，从而驱动机翼。另外，英国剑桥大学对扑翼式昆虫机器人也进行了研究。

7. 纳米机器人

随着微型机器人技术的进一步发展，微型机器人的尺度进一步减小，出现了纳米机器人。所谓纳米机器人，是以分子水平的生物学原理为设计原型，设计制造可对纳米空间进行操作的“功能分子器件”。从技术层面来讲，纳米机器人分为两类：一类是体积为纳米级的纳米机器人，一类是用于纳米级操作的装置。用于纳米级操作的装置，只要求装置的末端操作尺寸微小、精确即可，并不要求装置本身的尺寸是纳米级的。

2010 年，美国哥伦比亚大学的科学家成功研制出一种由脱氧核糖核酸（DNA）分子构成的纳米蜘蛛机器人。2005 年中国科学院沈阳自动化所研制成功一台能够在纳米尺度上操作的机器人系统样机，并通过了国家“863”自动化领域智能机器人专家组的验收。在一个演示中，沈阳自动化所的研究人员操纵“纳米微操作机器人”，在一块硅基片上 $1\times2\mu m$ 的区域上清晰刻出“S”“I”“A”三个英文字母；另一个演示显示，在一个 $5\times5\mu m$ 的硅基片上，机器人将一个长 4μm、直径 100nm 的碳纳米管准确移动到一个刻好的沟槽里。在纳米尺度上的操作，被称为“纳米微操作”，是纳米技术的重要内容，其目的是在纳米尺度上按人的意愿对纳米材料实现移动、整形、刻画以及装配等工作。这台机器人系统在纳米尺度下的系统建模方法、三维纳观力获取与感知及误差分析与补偿方面有很多突破与创新。

纳米微操作机器人可广泛应用于纳米科学实验研究、生物工程与医学实验研究、微纳米科研教学等领域。如生物学研究领域中，使用纳米微操作机器人可完成对细胞染色体的切割操作，也可在 DNA 或分子水平上进行生化检测及病理、生理测试实验研究。此外这种机器

人在集成电路纳米器件的装配与加工方面也有良好的应用前景，如可以利用它操作纳米微粒，装配微/纳米电子器件，甚至复杂的纳米电路。

### 9.2.3　微操作机器人

在现代生物医学工程中，随着细胞生物学、遗传学、基因工程等科学的发展，像细胞分离、细胞融合、细胞的转基因注射以及对染色体的切割和分离等细胞级的微细操作越来越被广泛应用。将微操作机器人技术引入生物工程显微操作中，不仅会把人工操作中所涉及的技术人员从高精度、单调的微操作中解放出来，还可提高操作质量和成功率。本节将以细胞微注射为例，阐述微机器人的微细操作技术。

微注射主要用于制作转基因动物、培养新型细胞和细胞核移植等研究工作，图9-45是细胞微注射示意图。微注射的对象是具有活性的、处于培养液内的动物细胞或卵细胞。通过微注射操作将外源基因注射到细胞中，经过生物培养后能够得到具有希望的生物特性的细胞；对动物卵细胞进行显微注射后，将卵细胞重新放回动物母体中继续培育，将会诞生出具有转基因生理特征的动物。

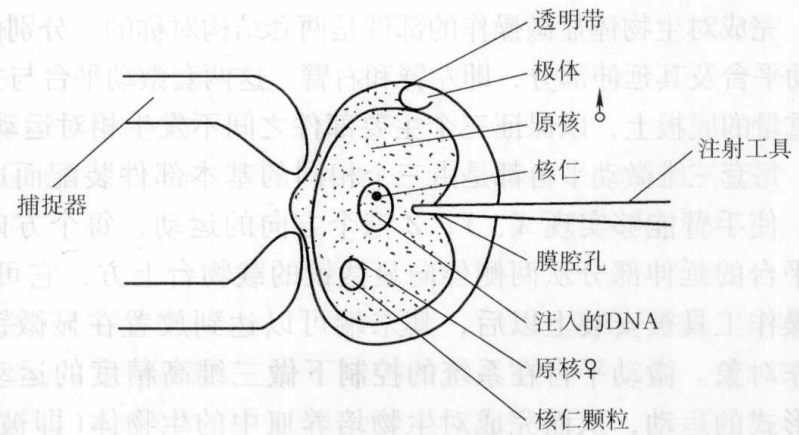



图9-45　细胞微注射示意图

如图9-46所示为一种微操作机器人系统，该系统是针对生物医学领域中的细胞、亚细胞级的操作设计制作的，是能完成细胞级微细操作的微操作机器人。该系统的倒置显微镜放置在底座中央，两只微操作工具对称安装在显微镜两侧，固定在底座上。

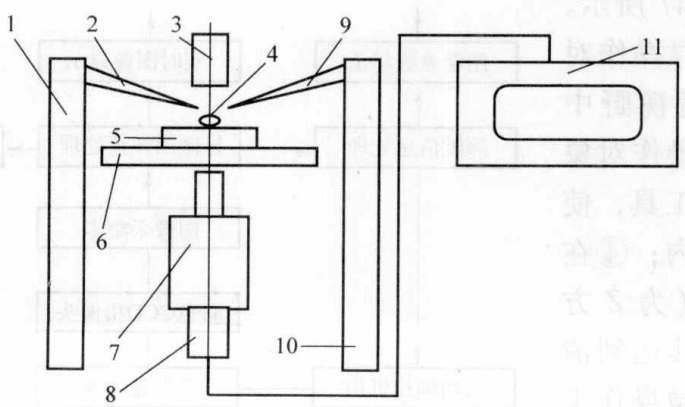



图9-46　微操作机器人系统

1—左臂　2—捕捉器　3—照明系统　4—细胞　5—载玻片
6—载物台　7—倒置显微镜　8—摄像机　9—微操作工具
10—右臂　11—计算机显示器

因为生物和医学实验中的显微操作过程是对生物细微体，如生物细胞、染色体等活性物质进行显微操作。这些物体的几何尺度都在微米或亚微米的数量级，在宏观环境中观察不到，所以显微操作的全部工作都要在显微镜下进行。为了便于操作，还应该有足够的空间能够放置生物培养皿，同时满足微操作工具的运动和装卸工作，所以选用倒置显微镜作为微操作机器人系统的主体。因为倒置显微镜是一种把照明系统置于载物台上方、把物镜置于载物台下方的显微镜，大大加大了载物台上放置样品的高度，可以放置培养皿、培养瓶等容器，因而能够观察活体细胞和组织。为了提高系统的自动化程度和对环境的适应性，还对显微镜的结构做了适当改造，分别用两个步进电动机驱动载物台在 $X$、$Y$ 方向运动；用一个步进电动机与焦距调节旋钮相连接，通过对电动机运动的控制，实现系统焦距调节的自动化。这样，显微镜部分的所有运动都实现了电动控制，可以在计算机控制下完成多种形式的运动。

完成对生物体显微操作的部件是两套结构对称的、分别位于主体显微镜两侧的三维高精度微动平台及其延伸部分，即左臂和右臂。这两套微动平台与主体显微镜均被固定在一块具有较大重量的底板上，以保证三个主要部件之间不发生相对运动，并使系统整体具有一定的平稳性。每套三维微动平台都是由三个相同的基本部件装配而成，分别由高精度步进电动机驱动，使手臂能够实现 $X$、$Y$、$Z$ 三个方向的运动，每个方向的运动精度可达 $1\mu m$。三维微动平台的延伸部分从两侧伸向显微镜的载物台上方，它可以夹持多种特制的微操作工具。当操作工具被安装上以后，其末端可以达到放置在显微镜载物台上的生物培养皿中的被操作对象。微动平台在系统的控制下做三维高精度的运动时，带动微操作工具末端做相同形式的运动，从而完成对生物培养皿中的生物体(即被操作对象)的显微操作。整个操作过程可以通过显微镜进行观察。

为了提高系统的适应性，减轻操作者的工作强度，在显微镜上安装了 CCD 摄像机，实时地收集工作域的图像，并将图像信息传送到控制计算机中，在显示屏幕上实时地显示出来。操作者可以直接观察显示器，通过计算机控制微操作工具运动，完成对细微生物体的显微操作过程。

微操作机器人系统的实际显微操作过程如图 9-47 所示。操作过程如下：①搜寻操作对象，使其处于显微镜视野中心；②调节显微镜使操作对象清晰；③移动微操作工具，使其进入显微镜视野之内；④在显微镜物镜光轴方向(为 $Z$ 方向)移动操作工具使其达到清晰，这样操作对象和微操作工具均处于焦平面上，达到 $Z$ 方向重合，完成微操作；最后，移动微操作工具使其末端与操作对象的操作点重合，达到水平面($XOY$ 平面)重合。

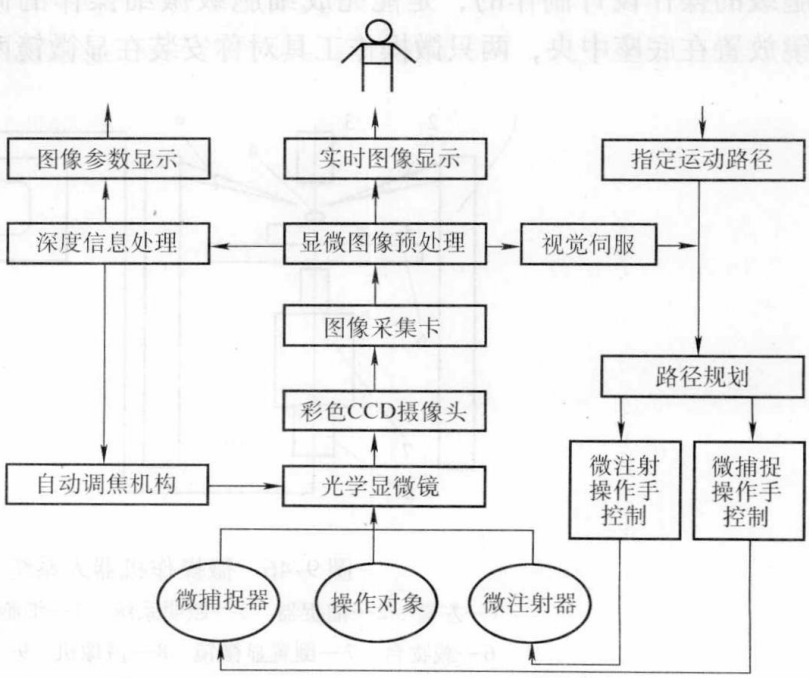



图 9-47 微操作机器人系统的实际显微操作过程结构框图

# 参 考 文 献


[1] 徐丽明，等. 生物生产系统机器人[M]. 北京：中国农业大学出版社，2009.
[2] 谢存禧，张铁，等. 机器人技术及其应用[M]. 北京：机械工业出版社，2005.
[3] 任嘉卉，刘念荫. 形形色色的机器人[M]. 北京：科学出版社，2005.
[4] 吴振彪，王正家. 工业机器人[M]. 2版. 武汉：华中科技大学出版社，2004.
[5] 郑笑红，唐道武. 工业机器人技术及应用[M]. 北京：煤炭工业出版社，2004.
[6] 徐元昌，等. 工业机器人[M]. 北京：中国轻工业出版社，1999.
[7] 张铁，等. 机器人学[M]. 广州：华南理工大学出版社，2001.
[8] 郭洪红，等. 工业机器人技术[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2006.
[9] 熊有伦，等. 机器人技术基础[M]. 武汉：华中理工大学出版社，1996.
[10] 蔡自兴，等. 机器人学[M]. 2版. 北京：清华大学出版社，2009.
[11] 柳洪义，宋伟刚，等. 机器人技术基础[M]. 北京：冶金工业出版社，2002.
[12] 刘文波，陈白宁，段智敏. 工业机器人[M]. 沈阳：东北大学出版社，2007.
[13] 罗均，谢少荣，翟宇毅，等. 特种机器人[M]. 北京：化学工业出版社，2006.
[14] 陈恳，杨向东，刘莉，等. 机器人技术与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006.
[15] 陈晓东. 警用机器人[M]. 北京：科学出版社，2008.
[16] 林良明. 仿生机械学[M]. 上海：上海交通大学出版社，1989.
[17] 罗庆生，韩宝玲，等. 现代仿生机器人设计[M]. 北京：电子工业出版社，2008.
[18] 张春林. 机械创新设计[M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2007.
[19] 翁海珊，王晶. 第一届全国大学生机械创新设计大赛决赛作品集[M]. 北京：高等教育出版社，2006.
[20] 郭巧. 现代机器人学[M]. 北京：北京理工大学出版社，1999.
[21] 宗光华. 机器人的创意设计与实践[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2004.
[22] 陈曦，尹永斌，郗安民，等. 长城圣火——第四届亚太大学生大赛纪实与评析[M]. 北京：机械工业出版社. 2006.
[23] 谭民，王硕，曹志强. 多机器人系统[M]. 北京：清华大学出版社，2005.
[24] 李磊，叶涛，谭民. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人，2002，24(5)：475-480.
[25] 罗青，吕恬生，费燕琼. 足球机器人仿真系统的研究与开发[J]. 计算机仿真，1999，16(4)：27-30.
[26] 贾建强. 自主足球机器人团队的研究与设计[D]. 上海：上海交通大学自动化研究所，2005.
[27] 罗真，曹其新，陈卫东. 中型自主式足球机器人平台设计回顾[J]. 机器人，2003，25(4)：378-384.
[28] 陈万米，张冰，等. 智能足球机器人系统[M]. 北京：清华大学出版社，2009.
[29] 肖南峰. 仿人机器人[M]. 北京：科学出版社，2008.
[30] 管贻生. 仿人机器人[M]. 北京：清华大学出版社，2007.
[31] 郑嫦娥，钱桦. 仿人机器人国内外研究动态[J]. 机床与液压 ，2006(3)：1-4.
[32] 于秀丽，魏世民，廖启征. 仿人机器人发展及其技术探索[J]. 机械工程学报 ，2009(3)：71-75.
[33] 赵然，李艳文，赵铁石. 微机器人的研究现状与发展趋势[J]. 机械设计，2009(2)：1-2.

Document generated by Anna’s Archive around 2023-2024 as part of the DuXiu collection (https://annas-blog.org/duxiu-exclusive.html).

Images have been losslessly embedded. Information about the original file can be found in PDF attachments. Some stats (more in the PDF attachments):

{
  "filename": "MTQwNzQ3MjYuemlw",
  "filename_decoded": "14074726.zip",
  "filesize": 190301378,
  "md5": "c63d32a9c531b851259074b971bb290b",
  "header_md5": "d06acf473ba20a990a81d6823ba6aa00",
  "sha1": "c7d922af6fd075d840133c6aa8c47051e8d89c9d",
  "sha256": "8004e1b16274175fae4e9ea18539b9500760440feb4a8781ccad4098acef97cd",
  "crc32": 1950856962,
  "zip_password": "28zrs",
  "uncompressed_size": 200336334,
  "pdg_dir_name": "\u673a\u5668\u4eba\u6982\u8bba \u7b2c2\u7248_14074726",
  "pdg_main_pages_found": 291,
  "pdg_main_pages_max": 291,
  "total_pages": 300,
  "total_pixels": 1841755200,
  "pdf_generation_missing_pages": false
}