

目 录

第一章 智能机器人概述	1
第一节 智能机器人定义与历史进程	1
第二节 机器人分类和主要特征	10
第二章 智能机器人的运动系统	14
第一节 机器人的移动机构概述	14
第二节 机器人的运动控制架构与控制策略	29
第三节 机器人驱动与电源技术	37
第三章 机器人感知	46
第一节 机器人传感器概述	46
第二节 图像处理技术与机器人视觉	51
第三节 语音识别技术与机器人听觉	60
第四节 多传感器信息融合技术	67
第四章 智能机器人人机交互技术	80
第一节 人机交互发展与研究	80
第二节 人机触控式交互技术	84
第三节 动作识别交互技术	85
第四节 眼动跟踪交互技术	96
第五节 人机语音交互技术	105
第六节 虚拟现实增强交互技术	124
第七节 基于云机器人平台的智能交互技术与应用	139
第五章 多机器人系统	143
第一节 智能体与多智能体系统概述	143
第二节 多机器人系统概念	147
第三节 多机器人任务分配与路径规划	154
第四节 多机器人编队导航控制	164
第六章 智能型工业机器人与智能制造	169
第一节 智能型工业机器人概述	169



第二节 智能工业机器人的分类及其在智能制造中的应用	172
第三节 智能型工业机器人视觉技术及应用	175
第七章 智能服务机器人技术	188
第一节 智能服务机器人概述	188
第二节 智能服务机器人控制系统	196
第三节 智能服务机器人应用	226
第八章 智能飞行机器人技术	243
第一节 智能飞行机器人概述	243
第二节 飞控软件算法设计与飞控系统测试与实验	245
第九章 智能水下机器人技术	268
第一节 智能水下机器人概述	268
第二节 智能水下机器人导航技术	271
第三节 智能水下机器人的应用	277
第十章 智能机器人探月技术	288
第一节 智能机器人探月概述	288
第二节 多个国家的登月机器人	289
第三节 月球表面智能机器人的关键技术	293
参考文献	297

第一章 智能机器人概述

第一节 智能机器人定义与历史进程

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，目前已成为家喻户晓的大明星，它发展迅速，在促进工业生产和提高生活品质等方面占据着极其重要的地位，并发挥着积极的作用。随着科学技术的发展和人们对机器人性能要求的不断提高，机器人已经从早期简单的工业机器人发展到配备多种传感器与通信设备的智能机器人，其应用范围也从简单的工业生产扩展到家庭服务、灾难搜救、医疗诊治、海洋勘测、太空探索等多个方面。

机器人学是一门高度交叉的学科，涉及机械、电子、计算机、自动控制、人工智能、生物及人类学等众多领域。机器人技术是多种学科综合发展的成果，代表高技术前沿。智能机器人是机器人领域一个重要的研究分支，也是当前研究热点。

一、智能机器人概念

尽管目前在工业上运行的 90% 以上的机器人都谈不上有什么智能，机器人执行的许多任务也根本不需要运用传感器。但是，随着机器人技术的迅速发展，对机器人的功能提出了更高的要求，具备不同智能程度的智能机器人逐渐成为研究的热点。

到目前为止，在世界范围内还没有一个统一的智能机器人定义。大多数专家认为智能机器人至少要具备以下三个要素：一是感觉要素，用来认识周围环境状态；二是运动要素，对外界做出反应性动作；三是思考要素，根据感觉要素所得到的信息，思考出采用什么样的动作。

根据上述要素，可以给出一个智能机器人的简单定义，即智能机器人是把感知、规划、决策、行动各模块有机结合的智能系统或装置。一般情况下，如果不做特殊说明，智能机器人就是指智能移动机器人，主要由四部分构成，即感知系统、控制系统、运动系统和通信系统。

智能机器人系统典型框图如图 1-1 所示。

由图 1-1 可以看出，智能机器人的控制系统包括两个主要部分，即以知识为基础的知



识决策系统和信号识别与处理系统。目前，智能机器人已在自主系统和柔性加工系统等领域得到日益广泛的应用，故又被称为自主机器人，它可以在不确定情况下自主实现一定的目标或者保持一定的行为，具备从感知到行动的智能判断能力，其组成结构如图 1-2 所示。

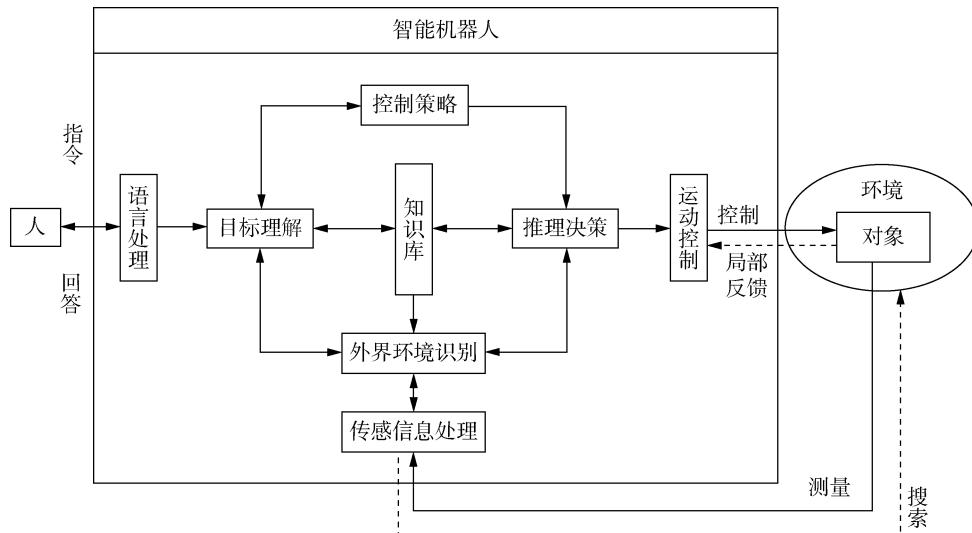


图 1-1 智能机器人系统框图

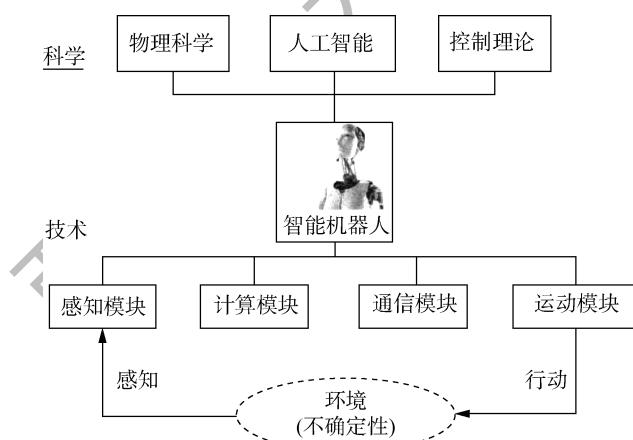


图 1-2 智能机器人主要组成

二、智能机器人关键技术

随着社会发展的需要和机器人应用领域的扩大，人们对智能机器人的要求也越来越高。智能机器人包括多个模块，如感知模块、运动模块、计算模块等，智能机器人与各种科学技术密切相关，包括人工智能、控制理论、物理科学等，主要涉及以下关键技术。



(一) 传感器及多传感器信息融合

机器人所用的传感器有很多种，根据不同用途分为内部传感器和外部传感器两大类。内部传感器用来检测机器人组成部件的内部状态，包括位置、角度传感器，速度、加速度传感器等。外部传感器包括视觉、触觉、力觉、接近觉以及角度传感器。

多传感器信息融合就是指综合来自多个传感器的感知数据，以产生更可靠、更准确或更全面的信息。经过融合的多传感器系统能够更加完善、精确地反映检测对象的特性，消除信息的不确定性，提高信息的可靠性。融合后的多传感器信息具有以下特性：冗余性、互补性、实时性和低成本性。目前多传感器信息融合方法主要有贝叶斯估计、D-S 证据理论、卡尔曼滤波、神经网络等。

(二) 导航与路径规划

在机器人系统中，自主导航是一项核心技术，是机器人研究领域的重点和难点问题。导航的基本任务有三点：①基于环境理解的全局定位，通过环境中景物的理解，识别人为路标或具体的实物，以完成对机器人的定位，为路径规划提供素材；②目标识别和障碍物检测，实时对障碍物或特定目标进行检测和识别，提高控制系统的稳定性；③安全保护，能对机器人工作环境中出现的障碍和移动物体做出分析并避免对机器人造成损伤。

机器人有多种导航方式，根据环境信息的完整程度、导航指示信号类型等因素的不同，可以分为基于地图的导航、基于创建地图的导航和无地图的导航三类。根据导航采用的硬件的不同，可将导航系统分为视觉导航和非视觉传感器组合导航。

路径规划技术是机器人研究领域的一个重要分支。最优路径规划就是依据某个或某些优化准则（如工作代价最小、行走路线最短、行走时间最短等），在机器人工作空间中找到一条从起始状态到目标状态、可以避开障碍物的最优路径。路径规划方法大致可以分为传统方法和智能方法两种。传统路径规划方法主要有以下几种：自由空间法、图搜索法、栅格解耦法、人工势场法。智能路径规划方法是将人工智能方法应用到路径规划中，来提高机器人路径规划的避障精度，加快规划速度，满足实际应用的需要，其中应用较多的算法主要有模糊方法、神经网络方法、遗传算法、Q 学习方法及混合算法等。

(三) 定位与地图构建

在自主移动机器人导航中，无论局部实时避障还是全局规划，都需要精确知道机器人或障碍物的当前状态及位置，以完成导航、避障及路径规划等任务，这就是机器人的定位问题。比较成熟的定位系统可分为被动式传感器系统和主动式传感器系统。被动式传感器系统通过码盘、加速度传感器、陀螺仪、多普勒速度传感器等感知机器人自身运动状态，经过累积计算得到定位信息。主动式传感器系统通过包括超声传感器、红外传感器、激光测距仪以及视频摄像机等主动式传感器感知机器人外部环境或人为设置的路标，与系统预



先设定的模型进行匹配，从而得到当前机器人与环境或路标的相对位置，获得定位信息。

机器人地图创建是指在机器人定位的基础上，将局部或者以机器人为中心的观测数据转换为全局的地图，机器人定位的准确性直接决定了机器人建图的精确度。地图的表示方式大致可分为三类：栅格表示、几何信息表示和拓扑图表示。栅格地图表示法即将整个环境分为若干相同大小的栅格，对于每个栅格指出其中是否存在障碍物。几何信息地图表示法是指机器人收集对环境的感知信息，从中提取更为抽象的几何特征，如线段或曲线，使用这些几何信息描述环境。拓扑地图表示法是指将环境表示为一张拓扑意义中的图(graph)，图中的节点对应于环境中的一个特征状态、地点，如果节点间存在直接连接的路径，则相当于图中连接节点的弧。这三种地图表示法各有优缺点。

对于已知环境中的机器人自主定位和已知机器人位置的地图创建已经有了一些实用的解决方法。然而在很多环境中机器人不能利用全局定位系统进行定位，而且事先获取机器人工作环境的地图很困难，甚至是不可能的。这时机器人需要在自身位置不确定的条件下，在完全未知环境中创建地图，同时利用地图进行自主定位和导航，这就是移动机器人的同时定位与地图创建(simultaneous location and mapping, SLAM)问题，被认为是实现真正全自主移动机器人的关键。

(四) 机器人视觉

视觉系统是智能机器人的重要组成部分，一般由摄像机、图像采集卡和计算机组成。机器人视觉系统的工作包括图像的获取、图像的处理和分析、输出和显示，核心任务是特征提取、图像分割和图像辨识。而如何精确高效地处理视觉信息是视觉系统的关键问题。

目前视觉信息处理逐步细化，包括视觉信息的压缩和滤波、环境和障碍物检测、特定环境标志的识别、三维信息感知与处理等。其中环境和障碍物检测是视觉信息处理中最重要也是最困难的过程。机器人视觉是其智能化最重要的标志之一，对机器人智能及控制都具有非常重要的意义。

(五) 智能控制

随着机器人技术的发展，对于无法精确解析建模的物理对象以及信息不足的病态过程，传统控制理论暴露出缺点，近年来许多学者提出了各种不同的机器人智能控制方法。机器人的智能控制方法有模糊控制、神经网络控制、智能控制技术的融合（如模糊控制和变结构控制的融合、模糊控制和神经网络控制的融合）等。

智能控制方法提高了机器人的速度及精度，但是也有其自身的局限性，例如，机器人模糊控制中的规则库如果很庞大，推理过程的时间就会过长；如果规则库很简单，控制的精确性又会受到限制，而且模糊控制规则的获取比较困难。神经网络的隐层数量和隐层内神经元数的合理确定仍是目前神经网络在控制方面所遇到的问题，另外神经网络易陷于局部极小值等问题，都是智能控制设计中要解决的问题。



(六) 人机接口技术

智能机器人的研究目标并不是完全取代人，复杂的智能机器人系统仅仅依靠计算机来控制目前是有一定困难的，即使可以做到，也由于缺乏对环境的适应能力而并不实用。智能机器人系统还不能完全排斥人的作用，而是需要借助人机协调来实现系统控制。因此，设计良好的人机接口就成为智能机器人研究的重点问题之一。

人机接口技术是研究如何使人方便自然地与机器人交流。为了实现这一目标，除了要求机器人有一个友好的、灵活方便的人机界面之外，还要求机器人能够看懂文字、听懂语言、说话表达，甚至能够进行不同语言之间的翻译，而这些功能的实现又依赖于知识表示方法的研究。因此，研究人机接口技术既有巨大的应用价值，又有基础理论意义。另外，人机接口装置和交互技术、监控技术、远程操作技术、通信技术等也是人机接口技术的重要组成部分，其中远程操作技术是一个重要的研究方向。

(七) 多机器人协作技术

多机器人系统相比于单机器人系统具有更好的鲁棒性、容错性、并行性、灵活性和可扩展性等特征，随着智能机器人技术的不断发展，多机器人协作系统的研究引起了日益广泛的重视。如何实现机器人个体之间的协作是多机器人系统中一个非常重要的问题。

多机器人系统的协作机制与系统的体系结构、感知通信、学习优化等有密切的关系，其目的是能使得系统中的信息、知识、意图、规划、动作实现交互协调，最终达到协作，从而提高多机器人系统的整体性能。

三、智能机器人发展与展望

机器人的智能从无到有、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，机器人智能化、网络化、微型化的发展趋势已凸显出来。

(一) 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，将网络技术和机器人技术融合产生了网络机器人。网络机器人是一种将不同类型的机器人通过网络协作协调起来实现以单体形式不能完成的服务的机器人。在由网络机器人组成的系统中，包含以下要素：至少包含一台智能机器人，系统通过网络能够与环境中的传感器和人进行协作，环境中装有各种传感器和传动器，人和机器人能够进行交互。

利用网络机器人，可以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。2001 年，身在美国纽约的外科医生雅



克·马雷斯科成功地利用机器人为躺在法国东北部城市的一位女性患者做了胆囊摘除手术，这是网络机器人成功应用的一个范例。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遥控操作远程医用机器人系统可以在异地为患者实施开腹手术。

（二）微型机器人

微型机器人是微电子机械系统的一个重要分支，由于它能进入人类和宏观机器人所不及的狭小空间内作业，近几十年来受到了广泛的关注。例如，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，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，并且它们能够自由地在二维物体的表面行走。这种“纳米蜘蛛”机器人仅有4nm长，比人类头发直径的十万分之一还小。

微型机器人的发展依赖于微加工工艺、微传感器、微驱动器和微结构的发展。另外，微型机器人研究还需重点考虑：能源供给问题、可靠性和安全性问题、高度自主控制问题等。

日本东京工业大学的一名教授对微型和超微型机构尺寸做了一个基本的定义：1~100mm机构尺寸为小型机构，0.01~1mm为微型机构，10μm以下为超微型机构。

（三）仿生机器人

仿生机器人是仿生学在机器人科学中的应用，在军事侦察、作战、电子干扰及反恐救援等场合有广泛的应用，已成为机器人研究的热点之一。按照研究领域，可分为结构仿生、材料仿生、控制仿生等。

结构仿生机器人主要有仿蛇机器人、仿鱼机器人、仿昆虫机器人和仿腿式机器人等，如著名的大狗机器人（Big Dog），由波士顿动力学工程公司（Boston Dynamics）专门为美国军队研究设计，与以往各种机器人不同的是，“大狗”并不依靠轮子行进，而是通过其身下的四条“铁腿”，它不仅可以跋山涉水，还可以承载较重负荷的货物，而且这种机械狗可能比人类都跑得快。

材料仿生是指从生物功能的角度来考虑材料的设计与制作，对生物体材料构造与形成过程的研究及仿生，使材料具有特殊的强度、韧性以及一些类生物特性，并应用于机器人的设计与制作之中，从而有效地提高机器人的相关性能。

控制仿生是指从控制方法上模仿生物的行为、神经系统等，进行机器人的控制、多机器人协作等，如基于行为的机器人控制、基于生物刺激神经网络的机器人导航、基于蜂群算法的群机器人控制等。

仿生机器人的研发是一个极其复杂的系统工程，是仿生技术、微机电技术、通信技术、控制技术的高度融合。



(四) 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”。智能机器人研究人员一直在试图研究出更高智能的机器人，具有跟人类一样的智能。

随着计算机技术的发展和机器学习等人工智能技术的突破，更多高智能机器人被不断开发出来，例如，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。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中，实现机器人的智能推理。2016年3月，谷歌(Google)旗下Deep Mind团队开发的Alpha Go以4:1的总比分战胜世界围棋冠军、职业九段选手李世石。2017年10月19日，谷歌旗下的Deep Mind团队公布了进化后的最强版Alpha Go版本，代号Alpha Go Zero。Alpha Go Zero经过短短三天的自我训练之后，就轻松击败了与李世石对战的那版AlphaGo，而且是100场对决无一败绩。

综上所述，智能机器人总的发展趋势是：在横向，应用面越来越宽，更多地是面向非工业应用；在纵向，机器人的种类会越来越多，机器人逻辑分析能力、运动能力等各方面都将得到加强，机器人会更加聪明、更加灵活、功能更加多样化。其他方面，机器人的语言交流功能将越来越完美、自我故障修复能力越来越强大、体内能量储存越来越大等。

四、机器人发展简史

(一) 古代机器人

机器人概念其实很早就已出现，自古以来就有不少科学家和能工巧匠制造出了一些具有人类特点和模拟动物特征的机器人雏形。

在中国，据《列子·汤问篇》中记载西周时期能工巧匠偃师已造出能歌善舞的伶人；《墨经》记载春秋时鲁班研制了一种木鸟，空中飞行“三日而不下”；东汉科学家张衡发明了地动仪和计里鼓车。三国时期魏国马钧利用差动齿轮原理制成了指南车。三国时期诸葛亮研制的木牛流马，运载粮草，巧胜司马懿。宋代沈括《梦溪笔谈》记载了一个“自动木人抓老鼠”的故事，木人“身高三尺，能左手扼鼠，右手持铁筒毙之，动作灵巧”。

在国外，1662年，日本的竹田近江用钟表技术发明了自动机器玩偶，并在大阪演出。1737年，法国发明家雅克·沃康松(Jacques Vaucanson)制造了一发条鸭子，它可以像真的鸭子一样拍动翅膀，站立坐下，喝水，吃玉米粒，甚至模仿鸭子的叫声。它最“神



奇”的地方在于会排便。机器“鸭子”将玉米粒吞下“消化”一会儿后，绿色的“粪便”就从尾端被排出来。1768~1774年，瑞士钟表匠德罗兹父子三人合作制作出三个真人大小的机器人——写字偶人、绘画偶人和弹风琴偶人，他们创造的自动玩偶是利用齿轮和发条原理而制成的，这三台国宝级机器人至今还保存在瑞士纳切特市艺术和历史博物馆内。18世纪末，日本若井源大卫门和源信制造出端茶玩偶，双手捧茶盘，放茶杯于盘上，便自动前行端给客人，客人喝完茶放回茶杯便又自动回到原位置。

进入20世纪后，机器人的研究与开发得到了更多人的关心与支持，一些实用化的机器人相继问世。1927年，美国西屋公司工程师温兹利制造了第一个机器人“电报箱”，并在纽约举行的世界博览会上展出。

但是这些都还不是真正意义上的现代机器人，直到世界上第一台工业机器人（可编程、圆坐标）在美国诞生，标志着机器人发展新纪元的到来。

（二）现代机器人

现代机器人研究始于20世纪中期。20世纪工业机器人的出现使机器人成为现实。

20世纪40年代，美国建立了原子能实验室，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，美国橡树岭国家实验室研制了“遥控操纵器”，用于放射性材料的生产和处理，1947年又改进为电动伺服方式，从动部分可以跟随主动部分运动，称为“主从机械手”，这是世界上第一台主从遥控机器人。

大批量生产的迫切需求推动了自动化技术的发展，其结果之一便是数控机床的诞生（美国麻省理工学院于1952年成功研制了世界上第一台数控铣床）。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。

1954年，美国人乔治·德沃尔（George Devol）研制出第一台电子可编程序工业机器人——可编程关节传送装置。1959年，美国Unimation公司根据Devol的专利生产出第一台真正意义上的工业机器人，1969年通用汽车公司用21台工业机器人组成轿车自动焊接生产线。

20世纪70年代，机器人产业得到蓬勃发展，机器人技术发展成为专门学科——机器学，机器人应用领域进一步扩大。大规模集成电路和计算机的发展使其性能大大提高，成本不断下降。

20世纪80年代，不同结构、不同控制方法和不同用途的工业机器人在发达国家进入了实用化普及阶段。随着传感技术和智能技术的发展，已经进入智能机器人研究阶段。

（三）机器人发展简史

1. 国外

(1) 1920年，捷克作家Karel Capek，剧本Rossum's Universal Robots，引入名词



Robota。

(2) 1946 年, George Devol 开发出磁盘控制器 Eckert; Mauchley 在 UPenn 建造了 ENIAC 计算机。

(3) 1952 年, 第一台数控机床在 MIT 诞生。

(4) 1954 年, George Devol 开发了第一台可编程机器人。

(5) 1958 年, Unimation 公司成立, 出现了最早的工业机器人。

(6) 196S 年, 第一台智能机器人 Shakey 在斯坦福研究所诞生。

(7) 1977 年, ASEA 公司研发成功两种微机控制电动工业机器人。

(8) 1984 年, 约瑟夫·恩格尔伯格 (Joseph Engelberger) 开始研发服务机器人 Help-Mate。

(9) 1986 年, Brooks 开始研究基于行为的机器人。

(10) 1988 年, 日本东京电力公司开发出具有自主越障功能的巡检机器人。

(11) 1999 年, 日本索尼公司推出了犬型宠物机器人“爱宝”。

(12) 2010 年, 日本高仿人形机器人 Geminoid-F 诞生。

(13) 2014 年, 德国 Festo 研制出机器袋鼠。

(14) 2017 年, 波士顿动力学工程公司公布了两轮人形机器人 Handle。

2. 国内

(1) 20 世纪 80 年代, 国家把工业机器人开发列入“七五”计划。

(2) 1986 年, 实施 863 计划, 发展智能机器人。

(3) 1993 年, 北京机械工业自动化研究所研制成功喷涂机器人。

(4) 1994 年, 中国科学院沈阳自动化研究所等单位研制成功我国第一台无缆水下机器人“探索者”。

(5) 1998 年, 上海未来伙伴推出我国第一台教育机器人。

(6) 2001 年, 苏州科沃斯推出国内首款扫地机器人“地宝”。

(7) 2004 年, 北京航空航天大学和中国科学院自动化研究所研制成功我国第一条机器鱼。

(8) 2008 年, 深圳大疆第一款无人机面市。

(9) 2014 年, 由天津大学等单位研制的“妙手 S”机器人首次用于临床。

(10) 2017 年, 国家统计局数据显示, 这一年我国工业机器人累计生产超过 13 万套。

(四) 机器人研究现状

20 世纪 70 年代很多大学开设了机器人课程, 开展机器人研究。例如, 美国的麻省理工学院、斯坦福大学、卡内基·梅隆大学、康奈尔大学、普渡大学等都是研究机器人的著名大学, 美国、日本、英国和瑞典等开设了机器人学学位。



许多国家成立了机器人协会，有关机器人领域的国际会议每年都有很多，包括：①ICRA：IEEE International Conference on Robotics and Automation，即 IEEE 机器人和自动化国际会议；②IROS：IEEE \ RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems，即 IEEE \ RSJ 智能机器人与系统国际会议；③RQBIO：IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics，即 IEEE 机器人学和仿生学国际会议等。国际机器人学术期刊包括 Autonomous Robots 等。

我国机器人技术起步于 20 世纪 70 年代末 80 年代初，90 年代中期 6000m 深水机器人实验成功，现在在步行机器人、精密装备机器人、多自由度关节机器人等方面与国际先进差距正在缩小，其中部分技术领先。

国内机器人研究机构主要有哈尔滨工业大学的机器人技术与系统国家重点实验室、北京航空航天大学机器人研究所、中国科学院沈阳自动化研究所的机器人学国家重点实验室、上海交通大学系统控制与信息处理教育部重点实验室、清华大学智能技术与系统国家重点实验室等。

当前，随着我国劳动力成本快速上涨，人口红利逐渐消失，生产方式向柔性、智能、精细等方面转变，构建以智能制造为根本特征的新型制造体系迫在眉睫，对工业机器人的需求将呈现大幅增长的趋势。与此同时，老龄化社会服务、医疗康复、救灾救援、公共安全、教育娱乐、重大科学研究等领域对服务机器人的需求也呈现出快速增长的趋势。“十三五”时期是我国机器人产业发展的关键时期，截至 2018 年，共有 85 所本科院校开设机器人工程专业，进行机器人专门人才培养。

第二节 机器人分类和主要特征

机器人具有很多分类方法，目前国际上没有统一的分类标准，按不同的标准具有不同的分类，常见的有按发展程度分类、按负载能力分类、按开发内容和目的分类、按应用领域分类等。

一、按发展程度分类

(一) 第一代机器人

可编程、示教再现工业机器人。

这类机器人具备可编程、示教再现等功能，目前已经商品化、实用化，如喷涂机器人等。所谓示教，即由人教机器人运动的轨迹、停留点位、停留时间，机器人依照人教的行为、顺序、速度重复运动，即再现。



(二) 第一代机器人

低级智能机器人。

这类机器人一般装备一定的传感装置，能获取作业环境、操作对象的简单信息，通过计算机处理、分析，能做出简单推理，对动作进行反馈，如焊接机器人，如果采用示教方法控制焊枪运行，要求焊接位置非常准确，由于受热等其他原因，被焊接位置易变形，因此，需要机器人能利用传感器感知焊缝位置，反馈控制修正焊枪位置偏差，自动跟踪焊缝。

(三) 第二代机器人高级智能机器人。

这类机器人具有高度自适应能力，具有多种感知功能，可进行复杂的逻辑思维、判断决策，在作业环境中可独立行动；既可以感知自身状态（位置、自身是否有故障等），又可以感知外界状态（道路、协作机器人的距离、相互作用力等），然后根据内外信息综合处理，进行逻辑推理、判断、决策，在变化的内、外环境中自主决定自身行为。第三代机器人代表了机器人的发展方向。

二、按负载能力分类

根据负载能力，机器人可以分为如下几种：

- (1) 超大型机器人：负载能力 1000kg 以上。
- (2) 大型机器人：负载能力 100~1000kg；作业空间 10m²。
- (3) 中型机器人：负载能力 10~100kg；作业空间 1~10m²。
- (4) 小型机器人：负载能力 0.1~10kg；作业空间 0.1~1m²。
- (5) 超小型机器人：负载能力 0.1kg 以下；作业空间 0.1m²以下。

三、按开发内容和目的分类

根据开发的内容和目的，机器人可以分为工业机器人和服务机器人两大类。

(一) 工业机器人

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装置，它能自动执行工作，是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器。工业机器人由主体、驱动系统和控制系统三个基本部分组成。主体即机座和执行机构，包括臂部、腕部和手部，有的机器人还有行走机构。大多数工业机器人有 3~6 个运动自由度，其中腕部通常有 1~3 个运动自由度；驱动系统包括动力装置和传动机构，用以使执行机构产生相应的动作；控制系统是按照输入的程序对驱动系统和执行机构发出指令信号，并进行控制。



工业机器人按臂部的运动形式又可细分为直角坐标型机器人、圆柱坐标型机器人、球坐标型机器人和关节型机器人等几大类。

常见的工业机器人包括焊接机器人，装配机器人，喷漆机器人，搬运、码垛机器人，浇铸机器人等。

(二) 服务机器人

不同国家对服务机器人的认识不同，严格来讲，服务机器人并没有国际上普遍认同的定义。如何将其与其他类型机器人特别是工业用操纵机器人划定界限仍然存有争议。不过，国际机器人联合会（International Federation of Robotics, IFR）给出了一个初步定义：服务机器人是指这样一类机器人，通过半自主或完全自主运作，为人类健康或设备良好状态提供有帮助的服务，但不包含工业性操作。根据这项定义，工业用操纵机器人如果被应用于非制造业，也被认为是服务机器人。

服务机器人又可以分为专业领域服务机器人和个人/家庭服务机器人，服务机器人的应用范围很广，主要从事维护保养、修理、运输、清洗、保安、救援、监护等工作，如爬缆索机器人、餐厅服务机器人、擦窗机器人、放牧机器人和太空探测机器人等。

工业机器人需求增长有限，而服务机器人是未来发展方向，目前服务机器人正朝向家庭化、智能化和模块化方向发展。

根据应用领域的不同，机器人可以分为工业机器人、农业机器人、服务机器人等，这里的工业机器人、服务机器人是指其应用的背景。具体分类如下。

(1) 工业机器人：弧焊机器人、点焊机器人、装配机器人、喷涂机器人、搬运机器人、抛光机器人、切割机器人、数控机器人。

(2) 农业机器人：嫁接机器人、采摘机器人、移栽机器人、施肥机器人、喷药机器人、除草机器人、收割机器人、果实分拣机器人、自动挤奶机器人。

(3) 服务机器人：礼仪接待机器人、医用辅助机器人、助残机器人（导盲）、清洗机器人、建筑机器人。

(4) 特种机器人：排爆机器人、水下机器人、空间机器人、微型机器人。日本立命馆大学研发的医用微型机器人，其直径为1cm、长为2cm、质量仅为5g。该机器人可以到达人体内患病处，前端镊子提取组织样本，微型相机抓拍图片，特殊注射器散发药物，医生可以控制其运动，并能与其他医疗器械配套使用。

(5) 拟人机器人：模仿人的动作、表情，具备一定智能。由于拟人机器人最符合人们心中的机器人形象，因此一直是研究的热点。目前拟人机器人种类繁多，主要包括高仿人形机器人（如日本美女机器人 Geminoid-F）、多功能人形机器人（如法国 Aldebaran 公司研制的机器人 Nao）、生化机器人等。

综合以上分析，可以看出，机器人未来的发展方向以服务机器人为主，智能型机器人将是重要的研究目标。



四、机器人主要特征

根据机器人的定义，可以看出机器人一般具有如下主要特征。

- (1) 机器人的动作具有类似人或其他生物某些器官（肢体、感官等）的功能。
- (2) 机器人具有通用性，工作种类多样，动作程序灵活易变，是柔性加工的主要组成部分。
- (3) 机器人具有不同程度的智能，如记忆、感知、推理、决策、学习等。
- (4) 机器人具有独立性，完整的机器人系统在工作中可以不依赖于人的干预。

五、机器人优缺点

随着社会的发展，机器人逐渐成为生产、生活中一个重要的组成部分，机器人代替人类完成某些工作，具备以下几个方面的优势。

- (1) 提高生产率、安全性、效率、产品质量和产品一致性。
- (2) 可以在危险或者不良的环境下工作，可以不知疲倦、不知厌烦地持续工作，这些工作属于 3D (Dirty、Dull、Dangerous) 类型。
- (3) 除了发生故障或磨损外，始终如一地保持精确度，而且一般具有比人高很多的精确度。
- (4) 具有某些人类所不具有的能力，如大力气、高速度等。
- (5) 可以同时响应多个激励或处理多项任务。

同样，机器人也存在一些缺点，具体如下。

- (1) 带来经济和社会问题，如工人失业，人工情绪上的不满与怨恨等。
- (2) 缺乏应急能力。
- (3) 在很多方面具有局限性。如自由度、灵巧度、传感器能力、视觉系统、实时响应能力都还存在局限性，有些方面不如人类。
- (4) 费用开销大。包括设备费、安装费等，还有配套设备、培训、编程等费用。

如何处理人类与机器人的关系一直是机器人领域热门话题。1942 年，科学家兼作家阿西莫夫 (Asimov) 在短篇小说 Run Around 一书中提出机器人三定律。

第一定律：机器人不危害人类，不允许看人受害而袖手旁观。

第二定律：绝对服从人类，除非与第一条矛盾。

第三定律：保护自身不受害，除非与第一、第二条矛盾。

这三条定律，给机器人社会赋予了新的伦理性，并使得机器人更易于为人类社会接受。

2017 年 10 月 26 日，沙特阿拉伯授予美国汉森机器人公司生产的机器人索菲亚公民身份。作为史上首个获得公民身份的机器人，索菲亚当天在沙特说，它希望用人工智能“帮助人类过上更美好的生活”，人类不用害怕机器人，“你们对我好，我也会对你们好”。随着社会的进步，人类完全有理由相信，像其他科技发明一样，机器人应该成为人类的好助手和朋友。

第二章 智能机器人的运动系统

第一节 机器人的移动机构概述

机器人的移动取决于其运动系统。高性能的运动系统是实现机器人各种复杂行为的重要保障，机器人动作的稳定性、灵活性、准确性、可操作性，将直接影响移动机器人整体性能。

通常，运动系统由移动机构和驱动系统组成，它们在控制系统的控制下，完成各种运动。因此，合理选择和设计运动系统是移动机器人设计中一项基本而重要的工作。

移动机构往往是各种自主系统的最基本和最关键的环节。为适应不同的环境和场合，移动机器人的移动机构主要有轮式移动机构、履带式移动机构、足式移动机构、步进式移动机构、蠕动式移动机构、蛇行式移动机构、混合式移动机构。

一、移动机构的形式

机器人移动机构的形式层出不穷，行走、跳跃、跑动、滚动、滑动、游泳等不少复杂奇特的三维移动机构已经进入了实用化和商业化阶段。

二、移动机构的选择

移动机构的选择通常基于以下原则：

- (1) 轮式移动机构的效率最高，但其适应能力、通行能力相对较差。
- (2) 履带机器人对于崎岖地形的适应能力较好，越障能力较强。
- (3) 腿式的适应能力最强，但其效率一般不高。为了适应野外环境，室外移动机器人需要多采用履带式行动机构。
- (4) 一些仿生机器人则是通过模仿某种生物的运动方式而采用相应的移动机构，如机器蛇采用蛇行式移动机构，机器鱼则采用尾鳍推进式移动机构。
- (5) 在软硬路面相间、平坦与崎岖地形特征并存的复杂环境下，采用几何形状可变的履带式和复合式（包括轮—履式、轮—腿式、轮—履—腿式等）机器人能根据地面环境的变化而灵活地改变机器人的运动姿态和运动模式，同时也可改变移动机构与地面之间的接



触面积，具有较好的机动灵活性和环境适应性。

三、轮式移动机构

相对平坦的地面上，车轮式移动方式十分优越。车轮的形状或结构取决于地面的性质和载能力。在轨道上运行时多采用实心钢轮，室内路面行驶时多采用充气轮胎。

轮式移动机构根据车轮的多少分为1轮、2轮、3轮、4轮和多轮机构。1轮及2轮移动机构存在稳定性问题，所以实际应用轮式移动机构多采用3轮和4轮。3轮移动机构一般是一个前轮、两个后轮。4轮移动机构应用最为广泛，4轮机构可采用不同的方式实现驱动和转向。

驱动轮的选择通常基于以下因素考虑：

(1) 驱动轮直径。在不降低机器人的加速特性的前提下，尽量选取大轮径，以获得更高的运行速度。

(2) 轮子材料应选择橡胶或人造橡胶最佳。因为橡胶轮有更好的抓地摩擦力和更好的减震特性，在绝大多数场合都可以使用。

(3) 轮子宽度。宽度较大，可以取得较好的驱动摩擦力，防止打滑。

(4) 空心/实心。轮径大时，尽量选取空心轮，以减小轮子重量。

物体在平面上的移动存在前后、左右和转动三个自由度的运动。根据移动特性可将轮式机器人分为非全向和全向两种：

(1) 若具有的自由度少于三个，则为非全向移动机器人。汽车便是非全向移动的典型应用。

(2) 若具有完全的三个自由度，则称为全向移动机器人。全向移动机器人非常适合工作在空间狭窄有限、对机器人的机动性要求高的场合，具体有独轮、两轮、三轮、四轮等形式。

(一) 两轮差动移动机构

FIRAMiro Sot组别的足球机器人，其大小规格被限定在边长7.5cm内的立方体空间内。可见双轮差速移动底盘可以被设计得很小。

基于如下假设建立机器人的运动学模型，即路面为光滑平面；机器人纵向做纯滚动，没有侧向滑移；机器人的左右轮半径R、两个驱动轮轮心间的距离2L等其他有关参数在机器人负载与空载情况下是相同的。

(二) 三轮移动机构

三轮移动机构，如图2-1所示，有以下三种情况。

如图2-1(a)所示，前轮由操舵结构和驱动结构合并而成，由于操舵和驱动的驱动器



都集中在前轮，所以该结构比较复杂。该结构旋转半径可以从0到无限大连续变化，但是由于轮子和地面之间存在滑动，绝对的0转弯半径很难实现。

如图2-1 (b) 所示，前轮为操舵轮，后两轮由差动齿轮装置驱动，但是该方法在移动机器人机构中也不多。

如图2-1 (c) 所示，前轮为万向轮，仅起支撑作用，后两轮分别由两个电机独立驱动，结构简单，而且旋转半径可以从零到无限大任意设定。其旋转中心是在连接两驱动轴的直线上，所以旋转半径即使是0，旋转中心也与车体的中心一致。

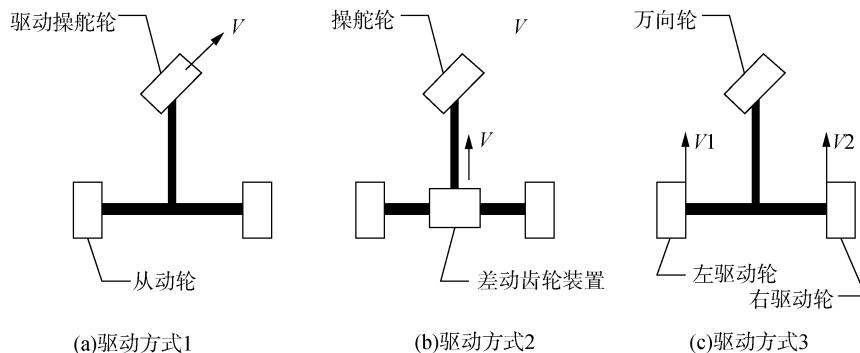


图 2-1 三轮移动机构

(三) 全向移动机构

全向移动机构是指不改变机器人姿态的同时可以向任意方向移动且可以原地旋转任意角度，运动非常灵活。

全向移动机构包括全向轮、电机、驱动轴系以及运动控制器几个部分。全向轮是整个运动机构的核心，在它的轮缘上斜向分布着许多小滚子，故轮子可以横向滑移。根据载荷的不同，应考虑全向轮的大小、面积等因素，如图2-2所示。图2-2 (a) 给出了几种不同的全向轮的结构形式，图2-2 (b) 阐明了全向轮的转动特点。三个或四个全向轮可以组成轮系，在电机驱动下，可以完成平面内360°任意方向上的运动。全向移动机构在自动导引车(AGV)、足球机器人比赛等需要高度移动灵活性的机器人项目中比较常见。

(1) 三轮全向移动机构：由于全向轮机构特点的限制，要求驱动轮数大于等于3，才能实现水平面内的全向移动，并且行驶的平稳性、效率和全向轮的结构形式有很大关系。

三轮全向底盘的驱动轮一般由三个完全相同的全向轮组成，并由性能相同的电机驱动。各轮径向对称安装，夹角为120°。建立如图2-3所示的世界坐标系 $x_a y_a$ 和机器人坐标系。

三轮全向移动机器人坐标系的原点与其中心重合，L为机器人中心与轮子中心的距离， θ 为 x_r 与 x_a 的夹角， v 为第2个轮子转动的线速度， Φ 为轮子与 y_r 的夹角。

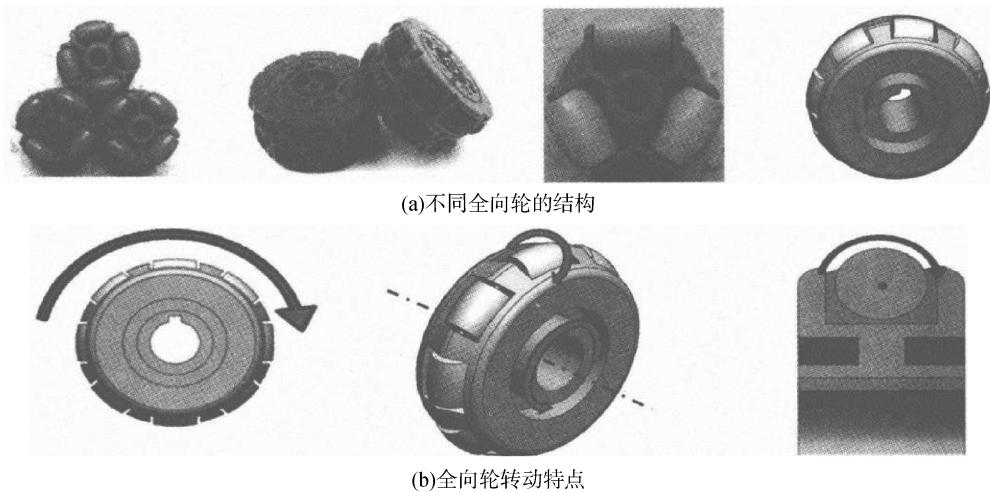


图 2-2 各种全向轮

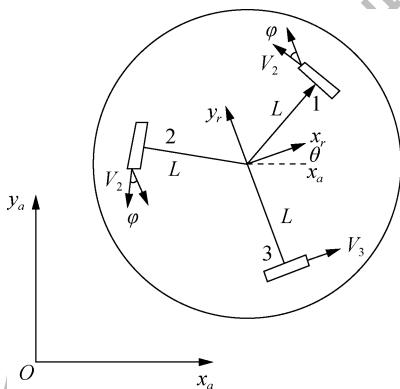


图 2-3 三轮全向底盘运动学分析

系统的运动学方程如下：

$$\begin{aligned} v_1 &= -\dot{x}_a \sin(\varphi + \dot{\theta}) + \dot{y}_a \cos(\varphi + \dot{\theta}) + L\dot{\theta} \\ v_2 &= -\dot{x}_a \sin(\varphi - \dot{\theta}) - \dot{y}_a \cos(\varphi - \dot{\theta}) + L\dot{\theta} \\ v_3 &= \dot{x}_a \cos \dot{\theta} + \dot{y}_a \sin \dot{\theta} + L\dot{\theta} \end{aligned}$$

考虑到机器人的实际结构以及所设立的坐标系的客观情况可知： 30° ，将其代入式并写成矩阵形式可以得到三轮全向底盘运动学模型：

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(30^\circ + \theta) & \cos(30^\circ + \theta) & L \\ -\sin(30^\circ - \theta) & -\cos(30^\circ - \theta) & L \\ \cos \theta & \sin \theta & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

以下式中描述了三轮全向移动机器人在地面坐标系中的运动的速度与驱动轮线速度之间的关系。



$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(30^\circ + \theta) & \cos(30^\circ + \theta) & L \\ -\sin(30^\circ - \theta) & -\cos(30^\circ + \theta) & L \\ \cos\theta & \sin\theta & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

(2) 四轮 Mecanum 轮全向移动机构：图 2-4 为四轮 Mecanum 轮全向移动底盘的一种布置方式。通过使用特殊设计的 Mecanum 轮，底盘可以在轮子直列布置的时候依然拥有全向移动的能力，与三轮全向移动机构相比具有以下优点：

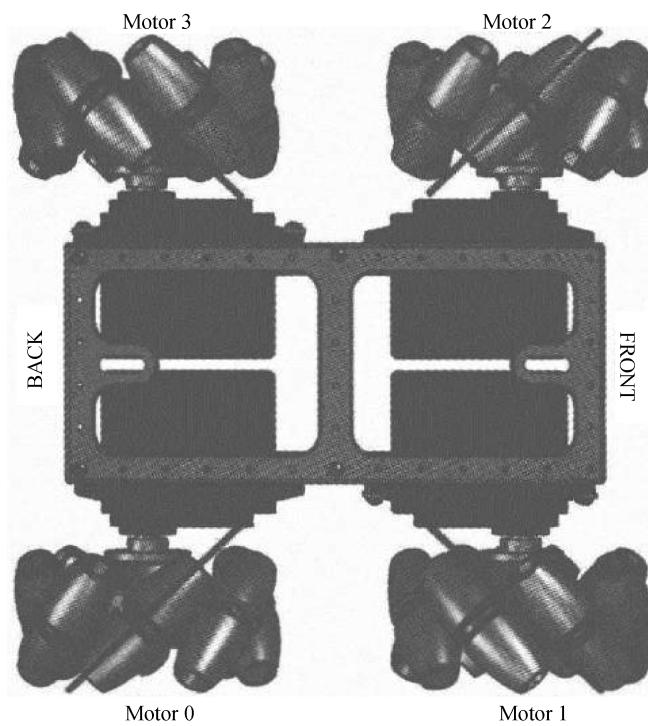


图 2-4 圆轮 Mecanum 轮全向移动底盘

- (1) 比三轮全向移动底盘更大的驱动力、负载能力以及更好的通过性。
- (2) 在四个轮子分别安装有电机的情况下，四轮 Mecanum 轮全向移动底盘能拥有冗余，在一个轮子故障的情况下依然能够运行。

但四轮 Mecanum 轮全向移动底盘的成本更高，更不易于维护。由于增加了一个轮子，其在不平整的地面上行进时极有可能出现一个轮子悬空的情况，这将导致机器人在计算轮速时产生较大的误差。

四、履带式移动机构

履带机器人因其通行能力强，速度快，常用于灾难救援、抢险、科考、排爆、军事侦察等高危险场合，作业环境可能为比较规则的结构化环境，也有可能为地面软硬相间、平坦与崎岖并存、地形比较复杂且难以预测的非结构化环境。



履带式移动机构的特征是将圆环状的无限轨道履带卷绕在多个车轮上，使车轮不直接同地面接触，利用履带可以缓和地面的凹凸不平，具有稳定性好、越野能力和地面适应能力强、牵引力大等优点。但履带式移动机构结构复杂、重量大、能量消耗大、减振性能差和零件易损坏。

常用履带通常为方形或倒梯形，如图 2-5 所示，履带机构主要由履带板、主动轮、从动轮、支撑轮、托带轮和伺服驱动电机组成。方形履带的驱动轮和导向轮兼作支撑轮，因此增大了与地面之间的接触面积，稳定性较好，如图 2-5 (a) 所示。梯形履带的驱动轮和导向轮高于地面，同方形履带相比具有更高的障碍穿越能力，如图 2-5 (b) 所示。

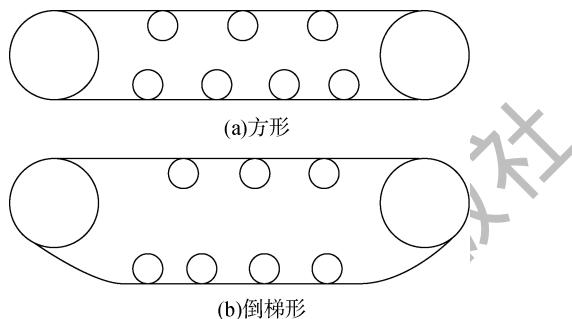


图 2-5 履带移动机构

为进一步改善对地面环境的适应能力和越障能力，履带结构衍生出很多派生机构。图 2-6 给出了一种典型的带前摆臂的关节式履带移动机构。

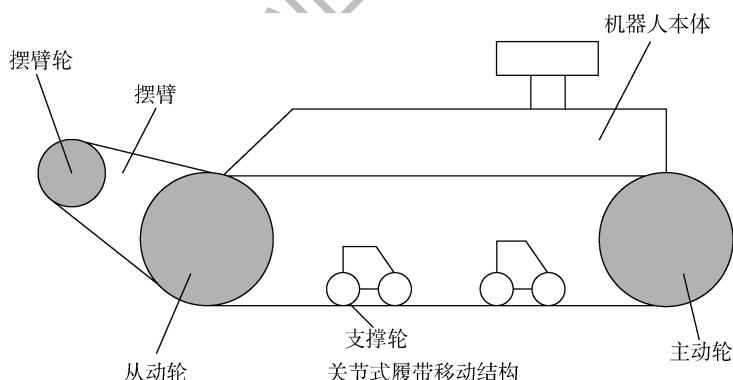


图 2-6 关节式履带移动机构

(一) 同步带/齿形带

同步带/齿形带传动具有带传动、链传动和齿轮传动的优点。同步带传动由于带与带轮是靠啮合传递运动和动力，故带与带轮间无相对滑动，能保证准确的传动比。

同步带通常以钢丝绳或玻璃纤维绳为抗拉体，氯丁橡胶或聚氨酯为基体，这种带薄而且轻，故可用于较高速度的环境下。传动时的线速度可达 50m/s，传动比可达 10，效率可



达 98%。传动噪音比带传动、链传动和齿轮传动小，耐磨性好，不需油润滑，寿命比摩擦带长。

(1) 同步带作为履带的优点：效率高，最高效率能达到 90% 以上；设计简单，只需根据标准同步带规格选择节距、齿数、长度、宽度就可以了。

(2) 同步带作为履带的缺点：同步带一旦选定，长度、宽度就是固定的，因此基本上属于定制，设计不同的履带式平台就需要不同的同步带，这限制了同步带作为履带应用的灵活性。

(二) 活节履带

活节履带是将履带分解为单独的履块，通过轴对各个履块进行连接，类似金属表带或者自行车链条的连接方式。

(1) 活节履带的优点：单独的履块简单，可以用注塑成型的方法制造，可以以单节履块为单位任意增减，因此具有较好的灵活性；单个履块上可以装配各种类型的履带齿，适应不同地形。而且活节履带的履块中部可以设计侧向限位块，带轮无须挡边就可以防止履带从带轮侧面脱出。

(2) 活节履带的缺点：由于各履块之间靠连杆连接，因此连杆处受力较大，整个履带的承载能力弱于同步带式履带，并且活节履带由于履块为刚性结构，理论效率较同步带式履带低，运行噪音也会较大。

(三) 一体式履带

同步带履带的最大缺点是缺乏侧向定位，带轮上需要附加挡边来防止履带脱出；活节履带的最大缺点是效率较低，且承载能力有限。对于一些较大型的履带机构，例如 100kg 以上的机器人或履带车，必须采用结合两者优点的履带以克服履带意外脱出的问题。

一体式专用履带基本结构采用同步带的形式，具备侧向定位，因此能很好地避免以上缺点。

一体式专用履带效率高，履带内侧有较大的内齿（兼作侧向限位块），履带内部通过编制钢丝网或尼龙丝网得到较高的拉伸强度，一体式柔性结构也使得运动较为平稳。但是履带设计较复杂，成本较高，多用于大型机器人。

五、足式移动机构

履带式移动机构虽可以在高低不平的地面上运动，但是它的适应性不强，行走时晃动较大，在软地面上行驶时效率低。根据调查，地球上近一半的地面不适合于传统的轮式或履带式车辆行走。

足式机器人顾名思义就是使用腿系统作为主要行进方式的机器人。



(一) 足式移动机构的优势

(1) 足式移动机构对崎岖路面具有很好的适应能力，可自主选择离散的立足点，可以在可能到达的地面上选择最优的支撑点，而轮式和履带式移动机构必须面临最坏的地形上的几乎所有的点。

(2) 足式运动方式还具有主动隔振能力，尽管地面高低不平，机身的运动仍然可以相当平稳。

(3) 多自由度系统有利于保持稳定并在失去稳定条件下进行自恢复。

(4) 足式行走机构在不平地面上和松软地面上的运动速度较高，能耗较少。已有的类人：机器人步行研究显示，被动式可以在没有主动能量输入的情况下，完全采用重力作为驱动力完成下坡等动作。

(二) 足式移动机构的设计

足式移动机构的构思来源于对腿式生物的模仿，所以，我们在设计腿式机器人时需要回归自然，对自然界的各种腿式系统进行初步的研究。在研究腿式机器人的特征时，我们主要考虑以下几个方面：

1. 腿的数目

大型的哺乳动物都有 4 条腿，而昆虫则更多，它们可能有 6 条、8 条甚至几十上百条腿。人仅靠 2 条腿也可以完美地行走，甚至可以用单腿跳跃前进。不同腿数目的维持平衡的难度是不一样的。

蜘蛛出生就能行走，4 条腿的动物刚出生还不能立刻行走，需要用几分钟甚至几个小时来尝试。2 条腿的人类需要花上几个月的时间才能学会站立、保持平衡，需要花上 1 年的时间才能行走，需要更长的时间才能跳跃、跑步、单腿站立。

在腿式机器人研究领域，世界各国已经展示了各种各样的成功的双足机器人，最出名的是日本本田的 ASIMO。四腿机器人站立不动的时候是稳定的；单腿迈动，可以保持静平衡；如果有 2 条腿同时迈动，将不能保持静平衡，行走时需要主动偏移重心，借此控制姿态。最成功的四腿机器人是美国军方的 Big Dog。六腿机器人行走期间的静态稳定性特性，让机器人的平衡控制不是问题，所以六腿机器人在移动机器人领域也非常流行。

2. 腿的自由度

生物种类繁多，各种生物遵循着不同的演化过程，腿作为生物躯体最重要的部分之一，其构造也各式各样。毛毛虫的腿只有 1 个自由度，利用液压通过构建体腔和增加压力可以使腿伸展，通过释放液压可以使腿回收。而另一个极端方向，人的腿有 7 个以上的主自由度，15 个以上的肌肉群，如果算上脚趾头的自由度和肌肉群，数量更多。

机器人需要多少自由度呢？这个是没有定论的，就像不同的生物在不同的生活环境和



生活方式的刺激下，进化出了不同构造的腿一样，由于机器人运用场合的不同，对自由度的要求也不一样。

如图 2-7 示，腿式机器人的每一条腿通常需要两个关节，从而实现提起腿、摆动向前、着地后蹬的一系列动作。如果需要面对更复杂的任务要求，则需要增加 1 个自由度，让腿更加灵活。而仿人机器人的腿的自由度则更加复杂，ASIMO 每条腿都有 6 个自由度。

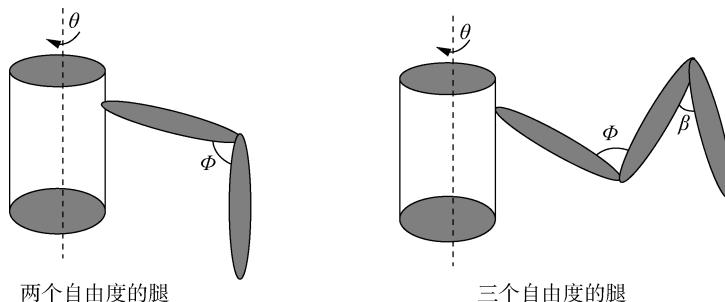


图 2-7 足式移动机构

3. 稳定性

(1) 静平衡。在机器人研究中，我们将不需要依靠运动过程中产生的惯性力而实现的平衡叫作静平衡。比如两轮自平衡机器人就没办法实现静平衡。

(2) 动平衡。机器人运动过程中，如果重力、惯性力、离心力等让机器人处于一个可持续的稳定状态，我们将这种稳定状态称为动平衡状态。

根据上述的分析，我们可以知道，腿越多的机器人，它的稳定性越好，当腿的数量超过 6 条之后，机器人在稳定性上就有天然的优势。

(三) 典型足式移动机构

1. 四足移动机构

美国的波士顿动力公司研制出了机械狗 BigDog，它拥有十六个主动自由度，四个被动自由度。其原理是，由汽油机驱动的液压系统能够带动其有关节的四肢运动。陀螺仪和其他传感器帮助机载计算机规划每一步的运动。机器人依靠感觉来保持身体的平衡，如果有一条腿比预期更早地碰到了地面，计算机就会认为它可能踩到了岩石或是山坡，然后 BigDog 就会相应地调节自己的步伐。波士顿动力公司主席兼项目经理马可·雷波特说：“内力传感器可探测到地势变化，根据情况做出调整。而当我们‘骚扰’它时，‘大狗’的主动平衡性使其可以保持稳定。”这种平衡性通过四条腿维持，每条腿有三个靠传动装置提供动力的关节，并有一个“弹性”关节。这些关节由一个机载计算机处理器控制。

四足机器人的常见控制方法可分为以下三类：

(1) 基于模型的控制方法。采用“建模—规划—控制”的控制思路，即首先对机器人及环境进行建模，然后通过规划得到机器人的理想运动轨迹，再利用反馈控制使机器人的



运动趋近理想轨迹。在此方面，Kashi 曾通过将四足机器人当作一个带有反应轮的倒立摆模型，以此来研究机器人的姿态控制。美国麻省理工学院的 Raibert 等人提出应用虚拟腿模型来对四足机器人的动步态进行控制，并取得了较好的效果。

(2) 基于行为的控制方法。采用“感知-反射”的控制思路，能够较好地应用于非结构化环境中的机器人控制。美国的 Brooks 于 1985 年提出这种控制方法，并将其应用于六足和八足机器人的运动控制中。随后，Hube 又将这种控制方法应用到四足机器人的运动控制当中。

(3) 生物控制方法是一种融合生物科学和工程技术的新型控制方法。从 1994 年起，Kimura 一直从事动物运动系统模型的研究，并将建立的生物神经模型应用于复杂地形下的四足机器人控制，实现了机器人的自适应动态行走。ShinkichiInagaki 通过模拟生物神经系统控制四足机器人的运动，实现了四足机器人行走、小跑和奔跑三种步态。

2. 两足步行移动机构

1968 年，英国 R. Mosher 就研制出了一台名为 Rig 的操纵型双足步行机器人，揭开了双足机器人研究的序幕。该机器人只有踝和髋两个关节，操纵者靠力反馈来保持机器人的平衡。1968~1969 年间，南斯拉夫的 M. Vukobratovic 提出了 ZMP 理论，较好地解决了动态步行稳定性判断问题，并研制出世界第一台真正的双足机器人。加藤一郎教授于 1968 首先展开了双足步行机器人的研制工作，其他著名的研究机构还有东京大学、东京理工学院和日本机械学院等。本田公司从 1986 年开始研制双足机器人，现已推出 P 系列、ASIMO 等多款仿人机器人。

人类的关节运动是靠肌肉收缩实现的。上肢有 52 对、下肢 62 对、背部 112 对、胸部 52 对、腰部 8 对、颈部 16 对、头部 25 对肌肉。要控制好具有 400 个具有双作用促动器的多变量系统，目前看几乎是不可能的。设计步行机构必须进行简化，只考虑其基本的运动功能。图 2-8 是一个具有 16 个关节点（三维特征点）三维人体骨架模型。

类人机器人与轮式或者其他移动机器人最大的不同点在于其用双足支撑，这一特点也是类人的表现特征之一。多年来，大量研究人员对类人机器人的稳定性判断依据进行了研究，提出了各种不同的判断依据。主要有基于零力矩点（Zero Moment Point, ZMP）、脚板转动指示法（Foot Rotation Indicator, FRI）和压力中心（Center Of Pressure, COP）等。

ZMP 稳定性判断标准是指，经过机器人水平方向零力矩点的铅垂线与地面交点必须一直落在支撑凸多边形内部。通常来说，稳定性可以分为静态稳定和动态稳定。

(1) 静态稳定是指机器人的全身质心（Center Of Mass, COM）在运动的整个过程中始终落在双脚支撑域内，如果机器人在运动过程中的任何时刻停止，必将保持稳定，不会摔倒。

(2) 动态稳定是指在运动的过程中，质心可以偏离双脚支撑域外，但是 ZMP 点必须



落在支撑域内。

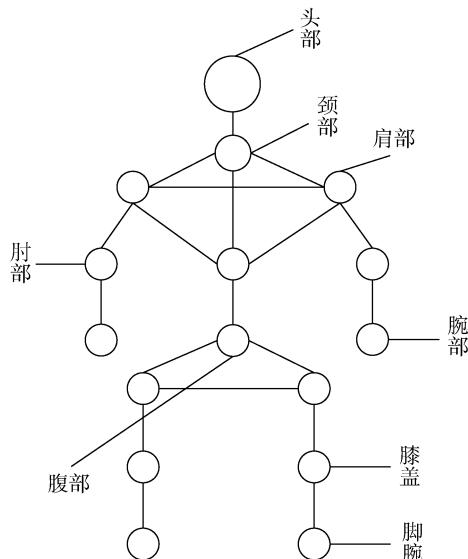


图 2-8 人体三维骨架模型

在 ZMP 的基础上，国内外很多学者根据 ZMP 稳定性判断标准在类人机器人的运动控制方面做了很多的研究。不同的机器人结构（是否具有相应的传感器设备）需要根据不同的控制方法来有条件地选择最适合机器人的稳定性控制方式。

从行走方式来讲，两足行走的行走方式主要有以下三种。

(1) 静态步行：两足步行机器人靠地面反力和摩擦力来支撑，绕此合力作用点力矩为零的点称为零力矩点（ZMP）。在行走过程中，始终保持 ZMP 在脚的支撑面或支撑区域内。

(2) 准动态步行：把维持机器人的行走分为单脚支撑期和双脚支撑期，在单脚支撑期采用静态步行控制方式，将双脚支撑期视为倒立摆，控制重心由后脚支撑面滑到前脚支撑面。

(3) 动态步行：这是一种类人型的行走方式。在行走过程中，将整个躯体视为多连杆倒立摆，控制其姿态稳定性，并巧妙利用重力、蹬脚和摆动推动重心前移，实现两足步行。

从广义的角度考虑，类人机器人的运动规划包括动作规划、复杂运动规划、路径规划和任务规划。

(1) 动作规划的结果是指类人机器人实现某个动作需要的各个关节自由度的运动轨迹，以及实现该轨迹所需要输入的力矩的变化。

(2) 复杂运动规划则在基本动作规划之上，主要考虑规划那些使机器人能够适合人类环境的复杂运动。规划的结果除了考虑运动的稳定性之外，还可以结合运动所消耗的能量、时间等性能指标和运动的可行性方面进行研究。



(3) 路径规划是指动态环境中的避障问题，任务规划是指上升到任务级的终端决策规划。

从狭义的角度来考虑，类人机器人的运动规划只是考虑输入给定的参数和运动指令，再根据当前的环境信息，生成那些可以保证机器人全身动态稳定的运动轨迹，包括足部轨迹、躯干轨迹和手臂轨迹等。

(四) 仿人机器人运动规划关键技术

1. 基于仿生学的步态规划

最早系统地研究人类和动物运动原理的是 Muybridge，他发明了一种独特的摄像机，即电动式触发照相机，并在 1877 年成功地拍摄了许多四足动物步行和奔跑的连续照片。后来这种采用摄像机进行运动研究的方法又被 Demeny 用来研究人类的步行运动。1960 年，苏联学者顿斯科依发表了著作“运动生物学”，从生物力学的角度，对人体运动学、动力学、能量特征和力学特征进行了详细的论述。

基于仿生学的步态规划就是用传感器记录下人类步行时的各个数据轨迹（Human Motion Capture Data, HMCD），然后经过修正处理之后直接用于类人机器人上。基于 HMCD 的仿人机器人的运动规划流程如图 2-9 所示。

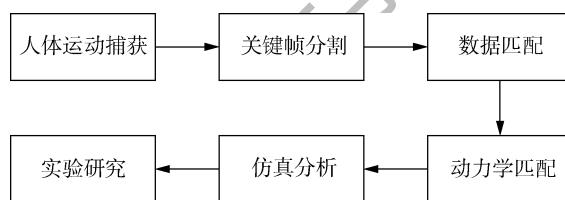


图 2-9 基于 HMCD 的仿人机器人的复杂动作设计流程

该方法可避开复杂动力学计算，通过对人类运动数据分析与修正，可得到各主要关节角度变化轨迹。根据力学相似性原理，这些函数关系可进一步推广到关节变化来规划步态，从而实现机器人的仿人运动。由于类人机器人与人体结构之间的差异，需要对人类运动的数据做进一步的分析才能应用于类人机器人上，使其更加自然地进行模拟人类的运动。

2. 基于动力学模型的步态规划

基于动力学模型规划方法是根据类人机器人的简化动力学模型直接计算出重心的运动轨迹，然后利用逆运动学方程得到关节角的轨迹。

(1) 倒立摆模型。ANUSZ 在 1978 年把双足机器人全身的质量假设成一点，并且假设机器人与地面的接触可以通过一个可以转动的支点实现。简单的倒立摆模型如图 2-10 所示。

倒立摆的输入包括作用于质点的力矩 τ 和沿腿连杆方向伸缩关节上的伸缩力 f 。倒立



摆模型将机器人全部质量集中在机器人的质心点，机器人的腿由无质量的连杆组成，机器人与脚底接触点不存在任何力矩，倒立摆随重力特性移动。

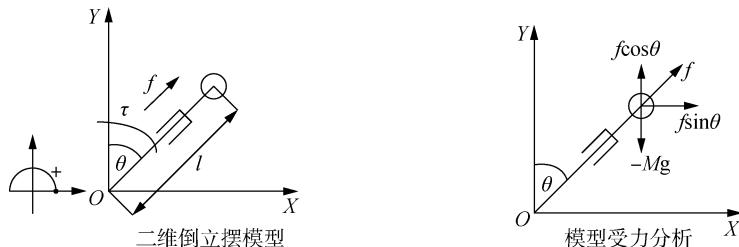


图 2-10 简单倒立摆模型

质心受力分析可知腿部伸缩力的铅垂分力平衡重力之后，水平分力还存在。这一分力使质心沿水平方向加速运动，相应的运动方程为：

$$M\ddot{x} = f \sin \theta$$

在伸缩力的方向上有：

$$Mg = f \cos \theta$$

联立上述两式可得：

$$M\ddot{x} = \frac{Mg}{\cos \theta} = Mg \tan \theta = Mg \frac{x}{z}$$

其中， x 和 z 为倒立摆质心位置的坐标，整理上面的方程，我们得到描述质心水平运动的微分方程：

$$\ddot{x} = \frac{g}{z}x$$

式中 \ddot{x} 为质心在 x 方向的重力加速度， g 为重力加速度。

对于单个该系统，倒立摆是不稳定的，其相轨线呈发散状态。因此，需要对倒立摆模型进行切换，选取其中靠近支撑点的低速区间作为倒立摆模型的工作区间。通过切换，每次进入该系统，机器人质心的速度降低、势能增加，当越过势能最高点后，速度反而增长，势能减少，系统趋向于发散，此时再次切换系统。这样，倒立摆每次都运行在设定的重心轨迹上。由于考虑了机器人自身的动力学特性，因此生成的步态具有较高的稳定性和较强的可控性。

倒立摆模型基础上，进一步发展了桌子一小车模型。桌子一小车模型是指质量为 M 的小车放在质量可以忽略不计的桌子水平面上行走，虽然桌子支撑脚相对于小车的行走范围而言很小，当小车走向边沿时，整个系统会倒，但是当小车以某个适当的加速度运动时，桌子可以维持瞬时平衡而不倒。

Shuuji 对线性倒立摆模型和桌子一小车模型进行比较发现：在线性倒立摆模型中，质心的运动由 ZMP 产生，而在桌子一小车模型中，ZMP 是由质心运动生成。

(2) 连杆模型。单自由度的倒立摆模型看起来太简单，但无法完成描述类人机器人运



动的特性，一些研究者对其进行了进一步的假设，摆动腿看作振摆，支撑腿看作为倒立摆。这就建立了双连杆的双倒立摆模型。Miura 和 Shimoyama 等人研究和设计了 3 连杆类人机器人。如果机器人的模型大于 5 个连杆，这对运动的描述将变得更精确，但同时却增加了系统的复杂性。

典型的 5 连杆模型是由 1 个躯干和 2 条腿组成的，其中每条腿又由 1 个大腿和 1 个小腿构成，该模型最大的好处是非常简单的，同时又可以进行有效的类人运动描述。

图 2-11 给出了一个 7 连杆的类人机器人模型。机器人身体的各个部分（先不考虑双臂和头部）由刚性的连杆组成，连杆与连杆之间由关节连接。通过控制关节的转动可以带动连杆的运动。7 个连杆分别表示 2 个脚部、2 个小腿部、2 个大腿部和 1 个上身部。

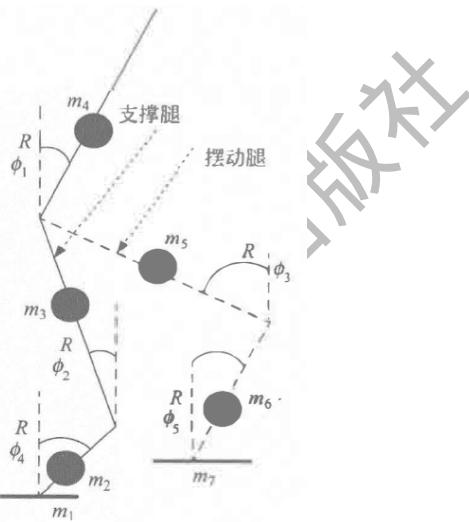


图 2-11 连杆的类人机器人模型

3. 基于智能算法的步态规划

由于类人机器人多自由度的复杂模型，不进行精确建模将制约其控制的发展，而智能控制算法的优点在于不需要精确的建模，同时可以改进算法的适应性和鲁棒性。在类人机器人上使用最多的智能算法有神经网络、模糊逻辑、遗传算法、强化学习以及它们的结合构成的混合进化算法。

(1) 神经网络。神经网络具有模糊性、容错性、自适应性和具有自学习能力的特点，相比于依靠推导数学模型、参数寻优的传统控制方法，具有一定优越性，在机器人运动控制中应用日益广泛。美籍华人郑元芳博士等在 1990 年就提出运用神经网络的双足步行机器人步态综合方法。其基本思想是，类人机器人逆动力学模型可以由神经网络代替，可以用神经网络学习机器人逆动力学模型，根据已有的知识及传感器信息，产生类人机器人运动中各关节所需的控制力矩。

(2) 模糊逻辑。模糊逻辑控制利用人类的专家控制经验来弥补机器人动态特性中的非



线性和不确定因素带来的不利影响，具有较强的鲁棒性。它可应用于控制系统的执行层，如 PID 参数的产生和调节。然后由于模糊控制的综合定量知识的能力差，单独的使用模糊逻辑控制机器人的步态较少，一般都是结合神经网络，构成模糊神经网络或者与强化学习等学习算法结合构成混合控制模型进行机器人的运动控制。

(3) 遗传算法。遗传算法最早是由美国 Michigan 大学的 J. Holland 博士提出的。遗传算法规划法在使用时，首先设计一个带有反馈补偿的前馈控制系统，根据这个特定的控制系统实现各个关节的力矩控制。因为实现遗传算法需要把所求的问题参数化求解，所以只能先假设某个关节的运动曲线，再用多次函数插值实现问题的参数化，最后利用遗传算法，根据稳定性条件或其他寻优条件确定问题的各个参数，达到步态规划的目的。

(4) 强化学习。强化学习的特点是试错法和延时奖励，它的这个特点使其非常适合步态学习，也符合人类学习行走的过程。Salatian 等利用传感器输入使用强化学习方式对双足机器人的斜坡步行进行控制。由于类人机器人的多自由度的特点，完全应用强化学习进行步态生成将会非常的耗时，因此，强化学习基本上被用来进行局部参数的调整。例如 Toddler 应用强制学习获得控制器参数而 Hamid 应用强化学习调整 CMAC 生成的步态。

4. 基于被动动力学步态规划

传统的仿人双足机器人大多采用跟踪预设关节轨迹的控制方法，虽然可实现类人行走和跑步，但控制机理与人类不同，且能耗性很高。例如，本田公司的 ASIMO 仿人机器人的行走能耗就是人类行走能耗的数十倍以上。

美国康奈尔大学的 Steve 等在科学杂志上发表了基于被动动力学理论的步行机器人论文之后，被动动力学模型成了研究类人机器人步行的又一重要分支，并且近年来越来越受到各国研究人员的青睐。

被动动态行走被认为是一种有效并且简单的行走方法。20 世纪初，一种完全被动步行的装置就已经被制造出来。早在 1989 年，Mcgeer 从生物机械研究和该行走玩具中得到启发，声称如果通过合理的机械设计，被动动态腿部运动（无驱）将生成很自然的行走方式。如果把机器人放在一个朝下的光滑斜坡上，这种行走运动将是稳定并且能够一直保持下去。用这种方法设计的机器人，行走的效率要比当时使用参考轨迹控制方法的机器人的效率高上 10 倍。

McGeer 认为飞机发展的历史对两足机器人研究很有启发意义，人们从设计无动力的滑翔机到有动力飞机，类似地，对无动力步行的研究可以揭示出步行的机理，有助于开发高效步行的两足机器人。他设计了无驱动、二维运动的无膝关节两足机器人，机器人可以自动走下斜坡，实现了类人的步态，而且小的外界干扰对其稳定步行没有影响。

受到 McGeer 方法的启发，美国康奈尔大学的 Steve 和 Andy，麻省理工学院的 Russ 和荷兰代夫特大学的 Martijn 分别开发了基于被动动力学法的两足机器人。它们的部分关节有电机驱动，实现了平面步行，而且能量效率和人类步行效率相当，这是目前可以平面



步行的两足机器人达到的最高效率。随后，该团队研制的一款新机器人“漫步者”近日创造了一项新的世界纪录：在没有更换电池的情况下持续行走了 40.5 英里（约 65 千米）。

英国《每日邮报》网站消息报道称，“漫步者”用 30 小时 49 分钟 2 秒完成了这一壮举，时速约 2 千米，它在康奈尔大学操场上行走了 307.75 圈。人们最初为其制订的目标是 26.2 英里（约 42 公里），但当它用 20 小时走完这段路程后，仍然继续前行并创造了世界纪录。为了热身，这款机器人在正式“漫步”的前一天，还在美国癌症协会举办的“为生命接力”活动中行走了 30 圈。

“漫步者”机器人项目受到了美国自然科学基金会的资金支持。科学家们在“漫步者”身上装了 6 个小型电脑，可以执行 1 万行的计算机代码。这款机器人的总重约 10 千克，其中锂离子电池重约 2.7 千克。它的身上装有 4 个电动机，其中一个控制外侧两条腿上的踝关节，一个操控内侧两条腿上的踝关节，还有一个掌控双腿的摆动。剩下的一个则是控制内腿的弯曲以把握方向。与大多数机器人不同的是，“漫步者”在行走时保持平衡的方式更接近真人。此外，它还更加节能。研制这款机器人的项目负责人称：“我们已经实现了用 5 美分（约 0.32 元）的电让机器人行走 186076 步，而且没有跌倒。”

第二节 机器人的运动控制架构与控制策略

一、运动控制任务

在二维平面上运动的移动机器人的主要有以下三种控制任务，即姿态稳定控制、路径跟踪控制、轨迹跟踪控制。下面以三轮移动机器人为例对这三种控制任务进行说明。

（一）姿态稳定控制

如图 2-12 所示从任意初始姿态 $\xi = (x_0, y_0, \theta_0)^T$ 自由运动到末姿态 $\xi_f = (x_f, y_f, \theta_f)^T$ 是移动机器人姿态控制的主要目标，其在运动过程中没有预定轨迹限制，同时也不考虑障碍的存在。

（二）路径跟踪控制

如图 2-13 所示，路径跟踪控制是控制机器人以恒定的前向速度跟踪给定的几何路径，并不存在时间约束条件。路径跟踪忽略了对运动时间的要求而偏重对跟踪精度的要求。通过对路径跟踪的研究可以验证部分针对机器人的运动控制算法，因而具有较好的理论研究价值。但因没有时间约束而不易预测机器人在某一时刻的位置，所以相对于轨迹跟踪控制使用较少。

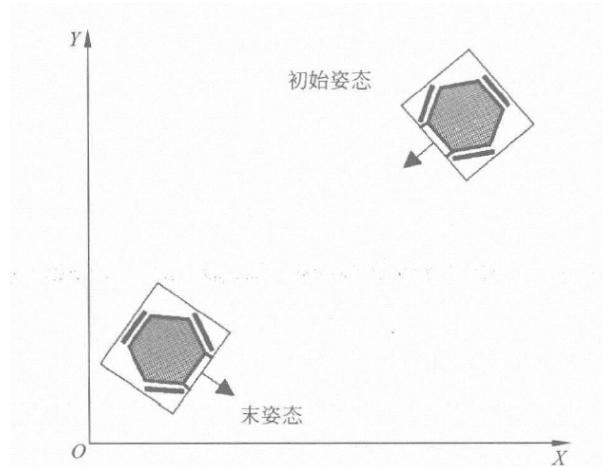


图 2-12 移动机器人姿态稳定控制示意图

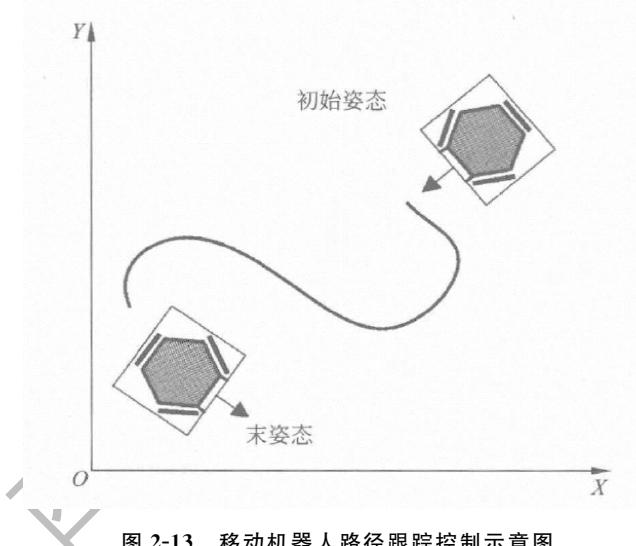


图 2-13 移动机器人路径跟踪控制示意图

(三) 轨迹跟踪控制

如图 2-14 所示，相对于路径跟踪控制，轨迹跟踪控制要求在跟踪给定几何路径的公式加入了时间约束，即控制三轮全向移动机器人上的某一参考点跟踪一条连续的几何轨迹。一般的，用一个以时间为变量的参数方程表示跟踪的轨迹是普遍的做法。对于三轮全向移动机器人来说，可以用表达式来描述轨迹：

$$\zeta(t) = [x_d(t), y_d(t), \theta_d(t)], t \in [0, T]$$

对于存在运动约束的双轮差动移动机器人来说，其轨迹跟踪中没有 $\theta_d(t)$ 这一项。

机器人在运动时需要及时躲避这些可能的障碍物。对此要求机器人可以事先规划出一



条运动轨迹，从当前位置出发，让机器人跟踪这条轨迹以躲避障碍物。因此，轨迹控制对于移动机器人运动控制来说是一项重要任务。

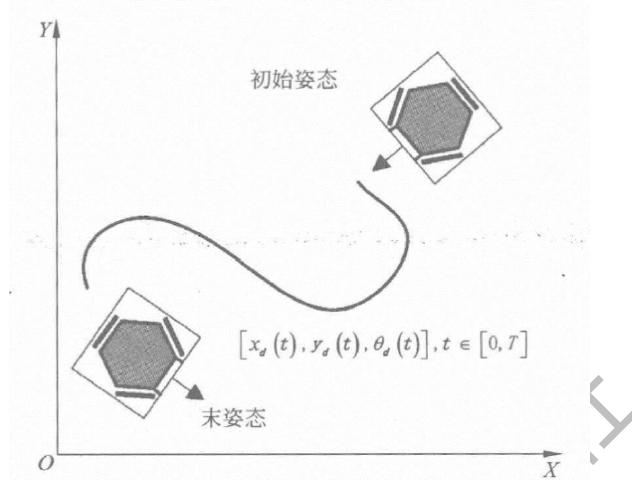


图 2-14 移动机器人轨迹跟踪控制示意图

无论移动机器人采用何种移动机构、执行何种控制任务，其底层控制通常可以分为速度控制、位置控制以及航向角控制等几种基本模式，而运动控制的实现最终都将转化为电动机的控制问题。

二、速度控制

为简化问题的复杂性，通常不对机器人直接进行转矩控制，而将机器人近似看成恒转矩负载，则机器人的速度可以转化为带负载的直流电机转速控制。机器人速度控制的结构如图 2-15 所示。

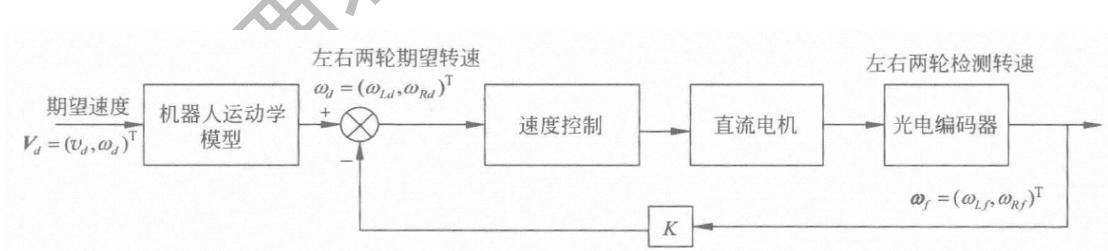


图 2-15 机器人速度控制结构

三、位置控制

机器人的位置控制模式框图如图 2-16 所示。期望位置和感知位置之间的位置偏差通过位置控制器和一个位置前馈环节转化成速度给定信号，借助于如图 2-27 所示结构的速

度内环将位置控制问题转化成了电机的转速控制问题，进而实现移动机器人的位置控制。

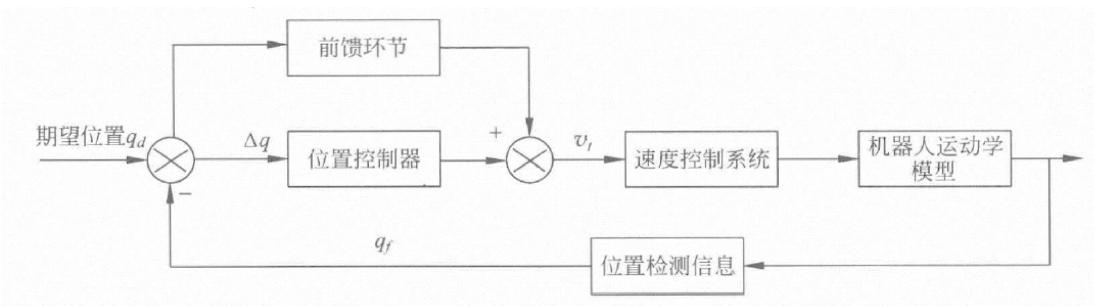


图 2-16 机器人位置控制结构

四、航向角控制

航向控制是路径跟踪的基础，其控制结构框图如图 2-17 所示。移动机器人的位置偏差和航向偏差最终都将转化成转速偏差的控制。这就需要根据机器人当前状态来规划航向控制，航向控制借助于两轮之间的位移差来实现。

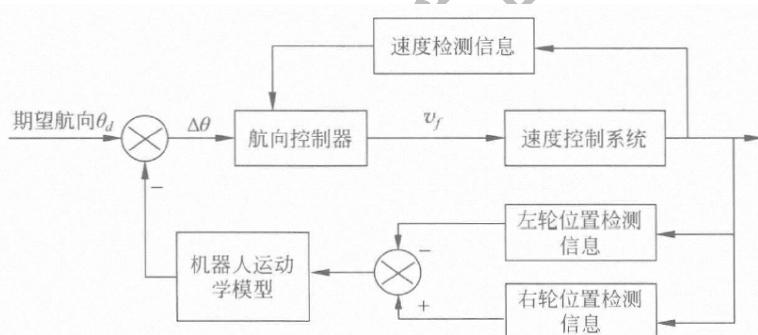


图 2-17 机器人航向控制结构

五、机器人的控制策略

常用的控制算法主要包括 PID 控制、变结构控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制、视觉伺服控制等。

(一) PID 控制

如图 2-18 所示，PID 控制算法结构简单、易于实现，并具较强的鲁棒性，被广泛应用于机器人控制及其他各种工业过程控制中。当被控对象的结构和参数不能完全掌握，或得不到精确的数学模型时，应用 PID 控制技术最为方便，系统控制器的结构和参数可以依靠经验和现场调试来确定。HD 控制器参数整定是否合适，是其能否在实用中得到好的控制



效果的前提。

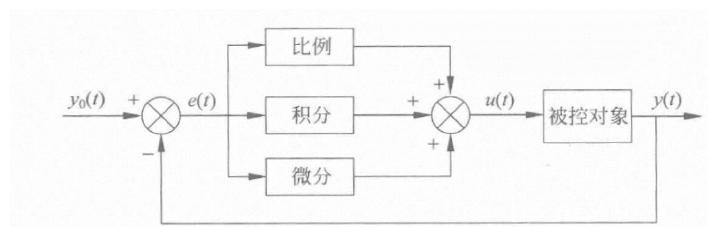


图 2-18 PID 控制结构

PID 控制算法参数的整定就是选择 PID 算法中的 k_p 、 k_i 、 k_d 中的几个参数，使相应的计算机控制系统输出的动态响应满足某种性能要求。

参数的整定有两种可用的方法，理论设计法和实验确定法。用理论设计法确定 PID 控制参数的前提是要有被控对象准确的数学模型，这在一般工业上很难做到。因此，用实验确定法来选择 PID 控制参数的方法便成为经常采用而行之有效的方法。它通过仿真和实际运行，观察系统对典型输入作用的响应曲线，根据各控制参数对系统的影响，反复调节实验，直到满意为止，从而确定 PID 参数。

(二) 自适应控制

自适应控制从应用角度大体上可以归纳成两类，即模型参考自适应控制和自校正控制。如图 2-19 所示，模型参考自适应控制的基本思想是在控制器—控制对象组成的闭环回路外，再建立一个由参考模型和自适应机构组成的附加调节回路。参考模型的输出（状态）就是系统的理想输出（状态）。

当运行过程中对象的参数或特性变化时，误差进入自适应机构，经过由自适应规律所决定的运算，产生适当的调整作用，改变控制器的参数，或者产生等效的附加控制作用，力图使实际输出与参考模型输出一致。

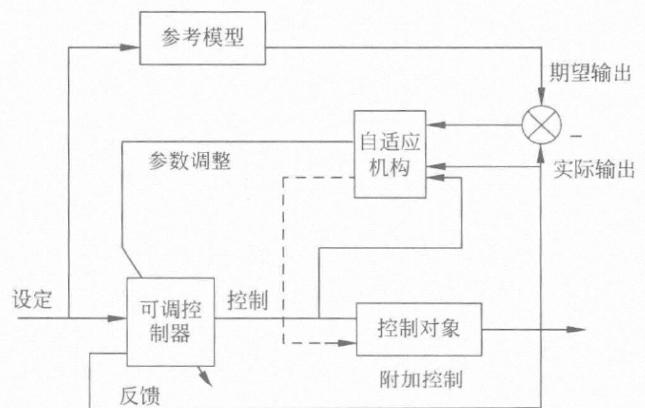


图 2-19 模型参考自适应控制结构



(三) 变结构控制

变结构控制本质上是一类特殊的非线性控制，其非线性表现为控制的不连续性。如图 2-20 所示。这种控制策略与其他控制的不同之处在于系统的“结构”并不固定，而是可以在动态过程中，根据系统当时的状态（如偏差及各阶导数等），以跃变的方式、有目的地不断变化，迫使系统按预定的“滑动模态”的状态轨迹运动。它在非线性控制和数控机床、机器人等伺服系统以及电机转速控制等领域中获得了许多成功的应用。

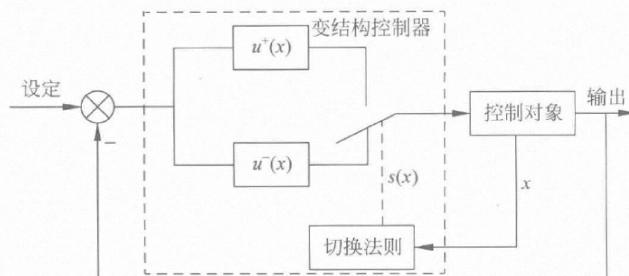


图 2-20 系统结构图

(四) 神经网络控制

人工神经网络由于其固有的任意非线性函数逼近优势，广泛应用于各种非线性工程领域。神经网络控制就是其中一个重要方面，这是由于其非线性映射能力、实时处理能力和容错能力使然。神经元网络控制应用领域，目前用得较多的神经网络结构为多层前向网络和径向基函数网络。BP 神经网络结构如图 2-21 所示。

为简单起见，该网络模型表示为单隐层。假设多层神经网络由 m 个输入层节点、 h 个隐层节点、 n 个输出层节点的组成。输入层与隐层的权值矩阵为 W_1 ，隐层和输出层的权值矩阵为 W_2 。隐层与输出层的阈值水平分别是 B_1 和 B_2 。那么神经网络输出与输入的向量映射关系可表示为：

$$Y = F_2(W_2 * F_1(W_1 * X + B_1) + B_2)$$

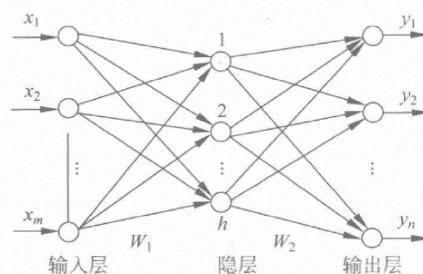


图 2-21 BP 神经网络的结构



这里, 表示隐层非线性转移函数, F_2 表示输出层非线性转移函数。显然, 神经网络所隐含的知识便分布于网络的权重 W_1 与 W_2 中。神经网络为完成某项工作, 必须经过训练。它利用对象的输入输出数据对, 经过误差校正反馈, 调整网络权值和阈值, 从而得到输出与输入的对应关系。误差校正反馈的目标函数通常是基于最小均方误差的, 即 $E=1N \frac{1}{2} \sum_{p=1}^N (\mathbf{D}_p - \mathbf{Y}_p)^2$ 。误差反向传播算法 (BP 算法) 是按照误差函数的负梯度方向来修改权参数 W_1 与 W_2 。

神经网络控制常用的基本策略有:

1. 神经网络监督控制

神经网络对其他控制器进行学习, 然后逐渐取代原有控制器的方法, 称为神经网络监督控制。神经元网络学习一组表明系统操作策略的训练样本, 掌握从传感器输入到执行器控制行为间的映射关系。

神经网络监督控制的结构如图 2-22 所示。神经网络控制器建立的是被控对象的逆模型, 实际上是一个前馈控制器。神经网络控制器通过对原有控制器的输出进行学习, 在线调整网络的权值, 使反馈控制输入趋近于零, 从而使神经网络控制器逐渐在控制作用中占据主导地位, 最终取消反馈控制器的作用。一旦系统出现干扰, 反馈控制器重新起作用。因此, 这种前馈加反馈的监督控制方法, 不仅可以确保控制系统的稳定性和鲁棒性, 而且可有效地提高系统的精度和自适应能力。

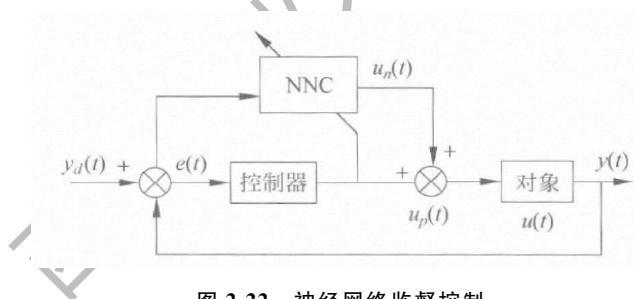


图 2-22 神经网络监督控制

2. 神经网络直接逆控制

神经网络直接逆控制就是将被控对象的神经网络逆模型, 直接与被控对象串联起来, 以便使期望输出 (即网络输入) 与对象实际输出之间的传递函数等于 1, 从而在将此网络作为前馈控制器后, 使被控对象的输出为期望输出。

该法的可用性在相当程度上取决于逆模型的准确程度。由于缺乏反馈, 简单连接的直接逆控制将缺乏鲁棒性。因此, 一般应使其具有在线学习能力, 即逆模型的连接权必须能够在线修正。

图 2-23 给出了神经网络直接逆控制的两种结构方案。在图 2-23 (a) 中, NN1 和 NN2 具有完全相同的网络结构 (逆模型), 并且采用相同的学习算法, 分别实现对象的



逆。在图 2-23 (b) 中, 神经网络 NN 通过评价函数进行学习, 实现对象的逆控制。

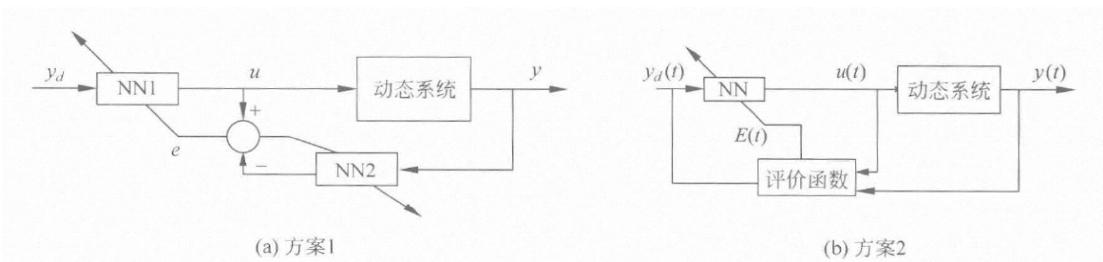


图 2-23 神经网络直接逆控制

3. 神经网络自适应控制

神经网络自适应控制主要是利用神经网络作为自适应控制中的参考模型。从应用角度自适应控制大体上可以归纳成两类, 即模型参考自适应控制和自校正控制。

(五) 模糊控制

1. 基本模糊控制

模糊控制的核心部分是模糊控制器, 其基本结构如图 2-24 所示, 它主要包括输入量的模糊化、模糊推理和逆模糊化 (或称模糊判决) 三部分。

模糊控制器的实现可由模糊控制通用芯片实现或由计算机 (或微处理机) 的程序来实现, 用计算机实现的具体过程如下:

(1) 求系统给定值与反馈值的误差 e 。微机通过采样获得系统被控量的精确值, 然后将其与给定值比较, 得到系统的误差。

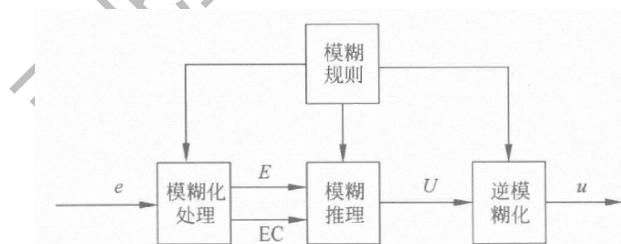


图 2-24 模糊控制器的基本结构

(2) 计算误差变化率: \dot{e} 即 $\frac{de}{dt}$ 这里, 对误差求微分, 指的是在一个 A/D 采样周期内求误差的变化。

(3) 输入量的模糊化。由前边得到的误差及误差变化率都是精确值, 那么, 必须将其模糊化变成模糊量 E , EC 。同时, 把语言变量 E , EC 的语言值化为某适当论域上模糊子集 (如“大”“小”“快”“慢”等)。



(4) 控制规则。它是模糊控制器的核心，是专家的知识或现场操作人员经验的一种体现，即控制中所需要的策略。控制规则的条数可能有很多条，那么需要求出总的控制规则尺，作为模糊推理的依据。

(5) 模糊推理。输入量模糊化后的语言变量 E, EC (具有一定的语言值) 作为模糊推理部分的输入，再由 E, EC 和总的控制规则 R，根据推理合成规则进行模糊推理得到模糊控制量 U 为：

$$U = (E \times EC)^{T_1} * R$$

(6) 反模糊化。为了对被控对象施加精确的控制，必须将模糊控制量转化为精确量 u，即反模糊化。

(7) 计算机执行完 (1) ~ (6) 步骤后，即完成了对被控对象的一步控制，然后等到下一次 A/D 采样，再进行第二步控制，这样循环下去，就完成了对被控对象的控制。

2. 模糊 PID 控制

根据模糊数学的理论和方法，将操作人员的调整经验和技术知识总结成为 IF (条件)、THEN (结果) 形式的模糊规则，并把这些模糊规则及相关信息 (如初始的 PID 参数) 存入计算机中。在 PID 参数预整定的基础上，根据检测回路的响应情况，计算出来样时刻的偏差 e 及偏差的变化率 de/dt ，输入控制器，运用模糊推理，得出 PID 控制器的三个修正参数 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d ，再加上预整定的参数 Δk_{p0} 、 Δk_{i0} 、 Δk_{d0} ，即可得到该时刻的 k_p 、 k_i 、 k_d ，实现对 PID 最佳调整，模糊 PID 的结构原理如图 2-25 所示。

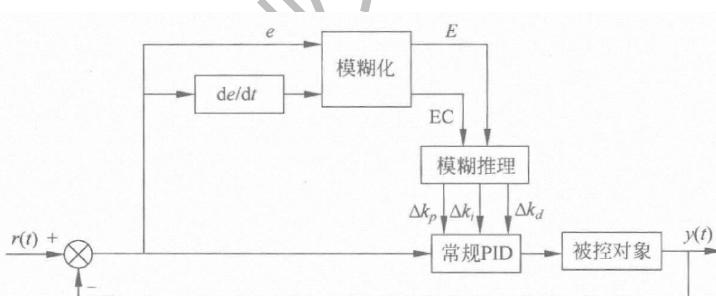


图 2-25 模糊 PID 的结构原理图

第三节 机器人驱动与电源技术

移动机器人的驱动系统包括执行器的驱动系统和机器人本体的驱动系统。执行器的驱动系统相当于人的肌肉，它通过移动或转动连杆来控制机器人的执行机构的动作状态，以完成不同的任务。

移动机器人的驱动系统主要采用以下几种驱动器：电动机（包括伺服电机、步进电



机、直接驱动电机), 液压驱动器, 气动驱动器, 形状记忆金属驱动器, 磁性伸缩驱动器。其中, 电动机尤其伺服电机是最常用的机器人驱动器。

水下机器鱼一般采用直流电机作为驱动源, 带动曲柄机构产生拍动的动作来推动机器鱼前行。仿人机器人一般采用永磁式直流伺服电机作为驱动手部、腰部及腿部关节的运动。常见的轮式移动机器人也采用直流伺服电机来驱动。

机器人驱动系统中的电机不同于一般的电动机, 它具有下列特点及要求:

- (1) 可控性。驱动电机是将控制信号转变为机械运动的元件, 可控性非常重要。
- (2) 高精度。要精确地使机械运动满足系统的要求, 必须要求电动机具有高精度。
- (3) 可靠性。电动机的可靠性关系到整个机器人的可靠性。
- (4) 快速性。在有些系统中, 控制指令经常变化, 有些变化非常迅速, 所以要求电动功能做出快速响应。
- (5) 环境适应性。驱动电机要有良好的环境适应性, 往往比一般电动机的环境要求高许多。

一、直流伺服电动机

从结构上讲目前的直流伺服电动机, 就是小功率的直流电动机。尽管近年来直流电动机不断受到交流电动机及其他电动机的挑战, 但是直流有刷电机由于其功率密度大、尺寸小、控制相对简单、不需要交流电等优点, 目前被大量使用在移动机器人等场合。

(一) 特点

直流伺服电动机的优点表现在:

- (1) 具有较大的转矩, 以克服传动装置的摩擦转矩和负载转矩。
- (2) 调速范围宽, 且运行速度平稳。
- (3) 具有快速响应能力, 可以适应复杂的速度变化。
- (4) 电机的负载特性硬, 有较大的过载能力, 确保运行速度不受负载冲击的影响。直流电动机存在电刷摩擦、换向火花等不利因素, 但目前制造的直流电动功能够满足多数机器人应用领域的可靠性要求。

(二) 转速控制方法

直流有刷电机的转速是与电压成正比的, 而转矩是与电流成正比的。对于同一台直流有刷电机, 电压、电流、转矩这三者之间的关系如图 2-26 所示。

其中 V₁~V₅ 代表 5 个不同的电压, V₁ 最低, V₅ 最高。可以看到, 在相同的电压下, 速度越低, 转矩越大; 在相同的转矩下, 电压越高, 速度越大; 在相同的速度下, 电压越高, 转矩越大。

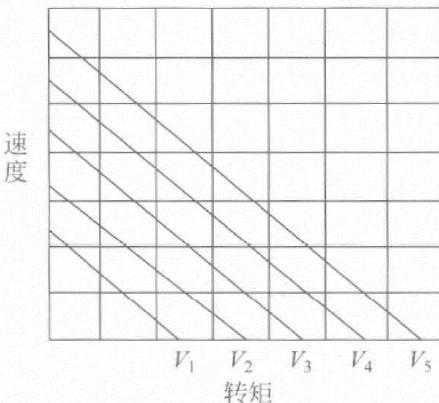


图 2-26 电压与转矩关系

直流电动机的转速控制方法可以分为调节励磁磁通的励磁控制方法和调节电枢电压的电枢控制方法两类。

(1) 励磁控制方式在低速时受磁极饱和的限制，在高速时受换向火花和换向器结构强度的限制，并且励磁线圈电感较大，动态响应较差，所以这种控制方式用得较少。

(2) 大多数应用场合都使用电枢控制方法。而在对直流电机电枢电压的控制和驱动中，对半导体器件的使用上又可分为线性放大驱动和开关驱动两种方式。

线性放大驱动方式是使半导体功率器件工作在线性区。这种方式的优点是：控制原理简单，输出波动小，线性好，对邻近电路干扰小。但是，功率器件在线性区工作时由于产生热量会消耗大部分电功率，效率和散热问题严重。因此，这种工作方式只适合用于微小功率直流电动机的驱动。

绝大多数直流电动机采用开关驱动方式，使半导体器件工作在开关状态，通过脉宽调制 PWM 来控制电动机电枢电压，实现调速。这种控制方式很容易通过采用微控制器来实现。

(三) 实例与动手指南

“未来之星”标准配备 FAULHABER234212CR 直流电机。

在选用直流电机时，要注意以下几个问题：

- (1) 一般考虑工作转矩的大小，良好的转矩意味着加速性能好。
- (2) 尽量确保每个电机的停转转矩 $>$ 机器人的重量 \times 轮子半径。
- (3) 工作电流，该值乘以额定电压就得到电机运行的平均功率。电机长时间运转，或在高出额定电压时运行应给电机加上散热槽避免线圈熔化。
- (4) 电机失效电压。



二、交流伺服电动机

交流伺服电动机本质上是一种两相异步电动机。其控制方法主要有三种，即幅值控制、相位控制和幅相控制。这种电动机的优点是结构简单、成本低、无电刷和换向器；缺点是易产生自转现象、特性非线性且较软、效率较低。

交流电动机，特别是鼠笼式感应电动机，转子惯量较直流电机小，使得动态响应更好。在同样体积下，交流电动机输出功率可比直流电动机提高 10%~70%，此外，交流电动机的容量可比直流电动机造得大，达到更高的电压和转速。现代数控机床都倾向采用交流伺服驱动。在工业领域，交流伺服驱动已有取代直流伺服驱动之势。小型机器人的设计和应用，很少有机会使用到交流电机。

三、无刷直流电机

无刷直流电机是在有刷直流电动机的基础上发展来的，其驱动电流是不折不扣的交流。无刷直流电机又可以分为无刷速率电机和无刷力矩电机。一般地，无刷电机的驱动电流有两种，一种是梯形波（一般是方波）；另一种是正弦波。有时将前一种叫直流无刷电机，后一种叫交流伺服电机，确切地讲是交流伺服电动机的一种。

无刷直流电机为了减少转动惯量，通常采用“细长”的结构。无刷直流电机在重量和体积上要比有刷直流电机小得多，相应的转动惯量可以减少 40%~50%。由于永磁材料的加工问题，致使无刷直流电机一般的容量都在 100kW 以下。这种电动机的机械特性和调节特性的线性度好、调速范围广、寿命长、维护方便、噪声小，不存在因电刷而引起的一系列问题。

直流无刷电动机，利用电子换向器代替了机械电刷和机械换向器。因此，使这种电动机不仅保留了直流电动机的优点，而且又具有了交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等优点，使它一经出现就以极快的速度发展和普及。但是，由于电子换向器较为复杂，通常尺寸也较机械式换向器大，加上控制较为复杂（通常无法做到一通电就工作），因此在要求功率大、体积小、结构简单的场合，无刷直流电机还是无法取代有刷电机。

航模常用的无刷电机，其体积小、重量轻、功率很大。直径 30mm 的外转子无刷电机的功率可以达到 300~400W。但是这些电机的转速很高，通常在 10000RPM 以上，如果负载太大、转速太低的话非常容易烧毁。因此它适合用来驱动风扇、气垫船等设备。

MAXON Motor（简称 MAXON）生产的高性能、高质量的空心杯无刷电机以及完整系列配套的减速机、编码器和无刷伺服驱动器高性能、高质量的空心杯无刷电机价格较贵，适合用在机器人的关键部位。MAXON Motor 是一家全球范围内高精密电机和驱动系统的产品供应商，1961 年创立于瑞士。此外，Faulhaber 公司生产的无刷电机可提供媲美 MAXON 的性能和价格。Faulhaber 集团是空心杯电机的发明者，也是世界最大的空心杯



电机供应商。

四、直线电机

普通的电机产生的运动都是旋转。如果我们需要得到直线运动，就必须通过丝杠螺母机构或者齿轮齿条机构来把旋转运动转变为直线运动。这样显然增加了复杂性，增加了成本，降低了运动的精度。直线电机是一种特殊的无刷电机，可以理解为将无刷电机沿轴线展开，铺平；定子上的绕组被平铺在一条直线上，而永久磁钢制成的转子放在这些绕组的上方。

给这些排成一列的绕组按照特定的顺序通电，磁钢就会受到磁力吸引而运动。控制通电的顺序和规律，就可以使磁钢做直线运动。

五、空心杯直流电机

空心杯直流电机属于直流永磁电机，与普通有刷、无刷直流电机的主要区别是采用无铁芯转子，也叫空心杯型转子。该转子是直接采用导线绕制而成的，没有任何其他的结构支撑这些绕线，绕线本身做成杯状，就构成了转子的结构。

空心杯电动机具有以下优势：

(1) 由于没有铁芯，极大地降低了铁损（电涡流效应造成的铁心内感应电流和发热产生的损耗）。最大的能量转换效率（衡量其节能特性的指标）。其效率一般在 70% 以上，部分产品可达到 90% 以上（普通铁芯电机在 15%~50%）。

(2) 激活、制动迅速，响应极快。机械时间常数小于 28 毫秒，部分产品可以达到 10 毫秒以内，在推荐运行区域内的高速运转状态下，转速调节灵敏。

(3) 可靠的运行稳定性。自适应能力强，自身转速波动能控制在 2% 以内。

(4) 电磁干扰少。采用高品质的电刷、换向器结构，换向火花小，可以免去附加的抗干扰装置。

(5) 能量密度大。与同等功率的铁芯电机相比，其重量、体积减轻 $1/3 \sim 1/2$ ；转速—电压、转速—转矩、转矩—电流等对应参数都呈现标准的线性关系。

空心杯技术是一种转子的工艺和绕线技术，因此可以用于直流有刷电机和无刷电机。

六、步进电机驱动系统

步进电机是将电脉冲信号变换为相应的角位移或直线位移的元件，其角位移和线位移量与脉冲数成正比。转速或线速度与脉冲频率成正比。

步进电机的最大特点就是可以直接接受计算机的方向和速度的控制，控制信号简单，便于数字化，而且具有调速方便、定位准确、抗干扰能力强、误差不长期累积等优点。



采用步进电机作为移动机器人的动力驱动可以充分发挥其数字化控制精确的优势，通过记录脉冲数可以计算和控制机器人行走距离和转弯角度，精确地对路径进行设计和跟踪，并依靠各种传感器信息对运行进行实时修正。

对于步进电机的速度控制，理论上虽然是一个脉冲信号转动一个步距角度，但由于转动惯量，负载转矩和矩频特性等因素的存在，电机的启动、停机和调速并不能一步完成。

在负载能力允许的范围内，这些关系不因电源电压、负载大小、环境条件的波动而变化，误差不长期积累。一步进电动机驱动系统可以在一定的范围内，通过改变脉冲频率来调速，实现快速启动、正反转制动。作为一种开环数字控制系统，在小型机器人中得到较广泛的应用。但由于其存在过载能力差、调速范围相对较小、低速运动有脉动、不平衡等缺点，一般只应用于小型或简易型机器人中。

从废旧的喷墨打印机、针式打印机上通常能拆下多个步进电机。这类电机通常功率在0.3~2W，多数还带有润轮蜗杆减速器或者丝杠螺母传动装置，适合制作小型机器人。拆卸旧式的3.5寸、5寸软盘驱动器，也可以获得小型的步进电机。

七、舵机

舵机，顾名思义是控制舵面的电动机。舵机的出现最早是作为遥控模型控制舵面油门等机构的动力来源，但是由于舵机具有很多优秀的特性，在制作机器人时也时常能看到它的应用。

(一) 舵机的结构

如图2-27所示，舵机主要由以下几个部分组成，即舵盘、减速齿轮组、位置反馈电位计、直流电机、控制电路板等。

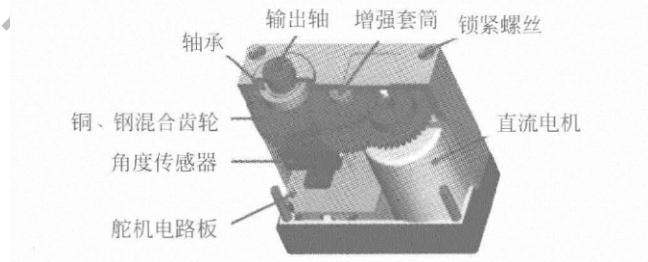


图2-27 舵机结构图

(二) 舵机的原理

舵机的原理跟伺服电机很相似，控制电路板根据控制信号解释出目标位置信息，再根据电位器输出的电压值解释出电机当前的位置，如果两个位置不一致，则控制电机转动，



电机带动一系列齿轮组，减速后传动至输出舵盘，而舵盘和位置反馈电位计是相连的，舵盘转动的同时，带动位置反馈电位计，电位计输出的电压信号也随之改变，这样‘控制板’就知道现在的转角，然后根据目标位置决定电机的转动方向和速度，从而达到目标停止。

(三) 舵机的控制

给控制引脚提供一定的脉宽（TTL 电平，0V/5V），它的输出轴就会保持在一个相对的角度上，无论外界转矩怎样改变，直到给它提供一个另外宽度的脉冲信号，它才会改变输出角度到新的对应的位置上。

可见，舵机是一种位置伺服的驱动器，转动范围一般不能超过 180° 适用于那些需要角度不断变化并可以保持的驱动当中。比方说机器人的关节、飞机的舵面等。不过也有一些特殊的舵机，转动范围可达到 5 周之多，主要用于模型帆船的收帆，俗称帆舵。

实际上，舵机的控制电路处理的并不是脉冲的宽度，而是其占空比，即高低电平之比。以周期 20ms、高电平时间 2.5ms 为例，实际上如果给出周期 10ms、高电平时间 1.25ms 的信号，对大部分舵机也可以达到一样的控制效果。但是周期不能太小，否则舵机内部的处理电路可能紊乱；这个周期也不能太长，例如，如果控制周期超过 40ms，舵机就会反应缓慢，并且在承受扭矩的时候会抖动，影响控制品质。

八、机器人的电源技术

当前任何电池和电机系统都很难达到内燃机的能量密度及续航时间。通常，一台长宽高尺寸在 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。

(一) 机器人常见电源类型

1. 免维护蓄电池

免维护蓄电池的工作原理与普通铅蓄电池相同。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，硫酸铅则沉淀在正负极板上，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。

因此从理论上讲，免维护蓄电池即使被过充电时，其电解液中的水也不会散失。相对于传统的铅酸蓄电池，免维护蓄电池具有自放电量小、失水量小、启动性能好、使用寿命和存储寿命长等特点。



2. 镍镉/镍氢动力电池

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。

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。

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，例如，20 个电池单元串联，其放电能力被限制在 2~3C。C 是以电池标称容量对照电流的一种表示方法，如电池是 1000mAh 的容量，1C 就是电流 1000mA。

3. 锂离子/锂聚合物动力电池

锂离子电池因为重量轻、容量大、无记忆效应，而且拥有非常低的自放电率、低维护性和相对短的充电时间，已被广泛应用在数码娱乐产品、通信产品等领域。

锂离子电池的优点；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：

(1) 放电平坦。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。

(2) 在 -40°C 的情况下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。因此其具有极为优良的低温操作性能。

(3) 再加上其年自放电率约为 2% 左右，所以一次充电后存储寿命可长达 10 年以上。

(2) 锂离子电池存在的问题：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十倍以上。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。

锂离子电池面临其他一些影响使用寿命和安全性的因素主要如下。

(1) 锂离子电池单元具有严格的放电底限电压，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。

(2) 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。

(3) 锂聚合物电池：锂聚合物电池 (Li-Polymer) 本质是锂离子电池，但是在电解质、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（最薄为 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，从而



可以配合产品需求，做成任何形状与容量的电池。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。

(二) 常见电池特性比较

因此，对机器人电源的选用通常有如下考虑：

- (1) 除一些管道机器人、水下机器人外，移动机器人通常不能采取线缆供电的方式，必须采用电池或内燃机供电。
- (2) 相对于汽车等应用，移动机器人要求电池体积小、重量轻、能量密度大。电池容量决定了机器人的工作时间和续航能力，电池尺寸和重量一定程度上决定了机器人本体的尺寸和重量。
- (3) 在各种震动、冲击条件下，移动机器人要求电池应接近或者达到汽车电池的安全性、可靠性。