

《工业机器人技术》



前言

⊕ **定义：** 机器人（Robot）是一种可编程和多功能的，用来搬运材料、零件、工具的操作机；或是为了执行不同的任务而具有可改变和可编程动作的专门系统。

⊕ **任务：** 协助或取代人类工作的工作，例如生产业、建筑业，或是危险的工作。目前在工业、医学、农业、建筑业甚至军事等领域中均有重要用途。

⊕ **机器人三大定律：**

A、机器人不可以伤害人类，人类受伤时，必须拯救人类；

B、机器人要听从人类的命令，除非违反A定律；

C、机器人应能保护自己的生命，与第A、B定律相违背除外。



⊕ **工业4.0:** 中国对应的是智能装备与中国制造2025。

⊕ **重点发展领域:** 高档数控机床与机器人。“机器人革命”有望成为第三次工业革命的一个切入点和重要增长点，将影响全球制造业格局；机器人是“制造业皇冠顶端的明珠”，其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志。

⊕ **机器换人:**

欧美日工业机器人使用密度达150-350台/万人，世界平均58台/万人，中国仅25台/万人。如果达到平均水平，可制造380亿本体、1140亿系统集成市场空间。

国际上工业机器人的主要厂商为法拉科、ABB、安川、库卡等，其在中国市场占有率达80%以上。主要用于焊接、加工、搬运和物流当中。

如何学好、用好机器人技术

⊕ **本质：**是自动化技术中重要的工具，不是孤立的，加强对作业目标的工艺过程、操作方法、操作工具以及与周边设备的协调作业等技术的学习是基础。

举例：焊接>>焊接材料特性、方式选择、工艺参数整定、轨迹生成、通风安全系统设计等；

上下料>>机床自动化改造（自动门、自动装夹、自动启停）、自动手爪、与数控系统的协调作业等；

抛光>>曲面的轨迹生成、抛光参数整定（力度、时间）、外部传感器通信、恒力控制、通风粉回收设计等。

⊕ **岗位：**本体/控制/系统集成设计工程师助手、试产员、操作员、总装与调试、高端维修与销售、客户需求分析等。



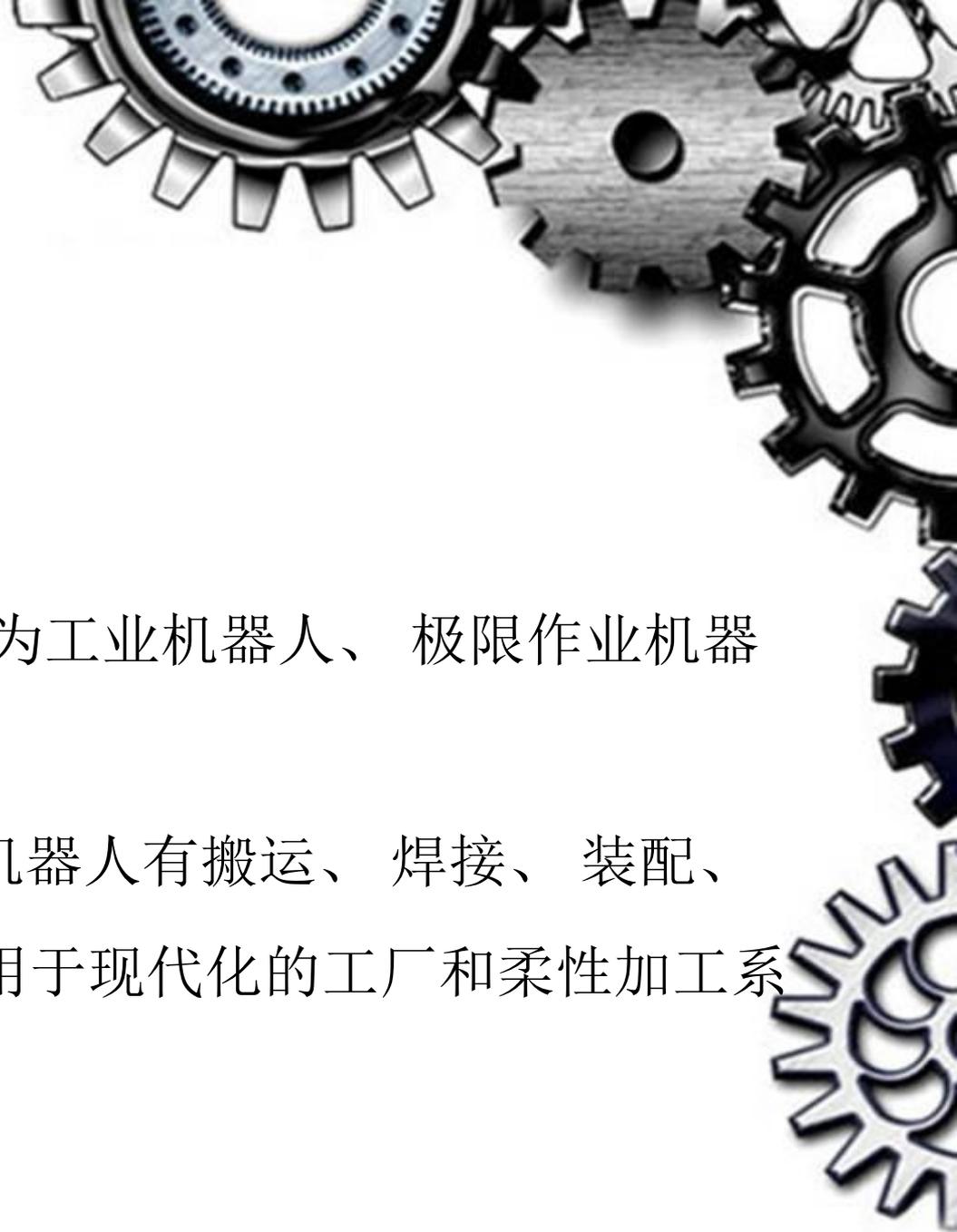
第1章 绪论

1.1 机器人分类

1.2 工业机器人的应用和发展

1.3 工业机器人的基本组成及技术参数

习题



1.1 机器人的分类

1. 按照应用类型分类

机器人按应用类型可分为工业机器人、极限作业机器人和服务机器人。

(1) 工业机器人。工业机器人有搬运、焊接、装配、喷漆、检查等机器人,主要用于现代化的工厂和柔性加工系统中,如图1.1、图1.2所示。

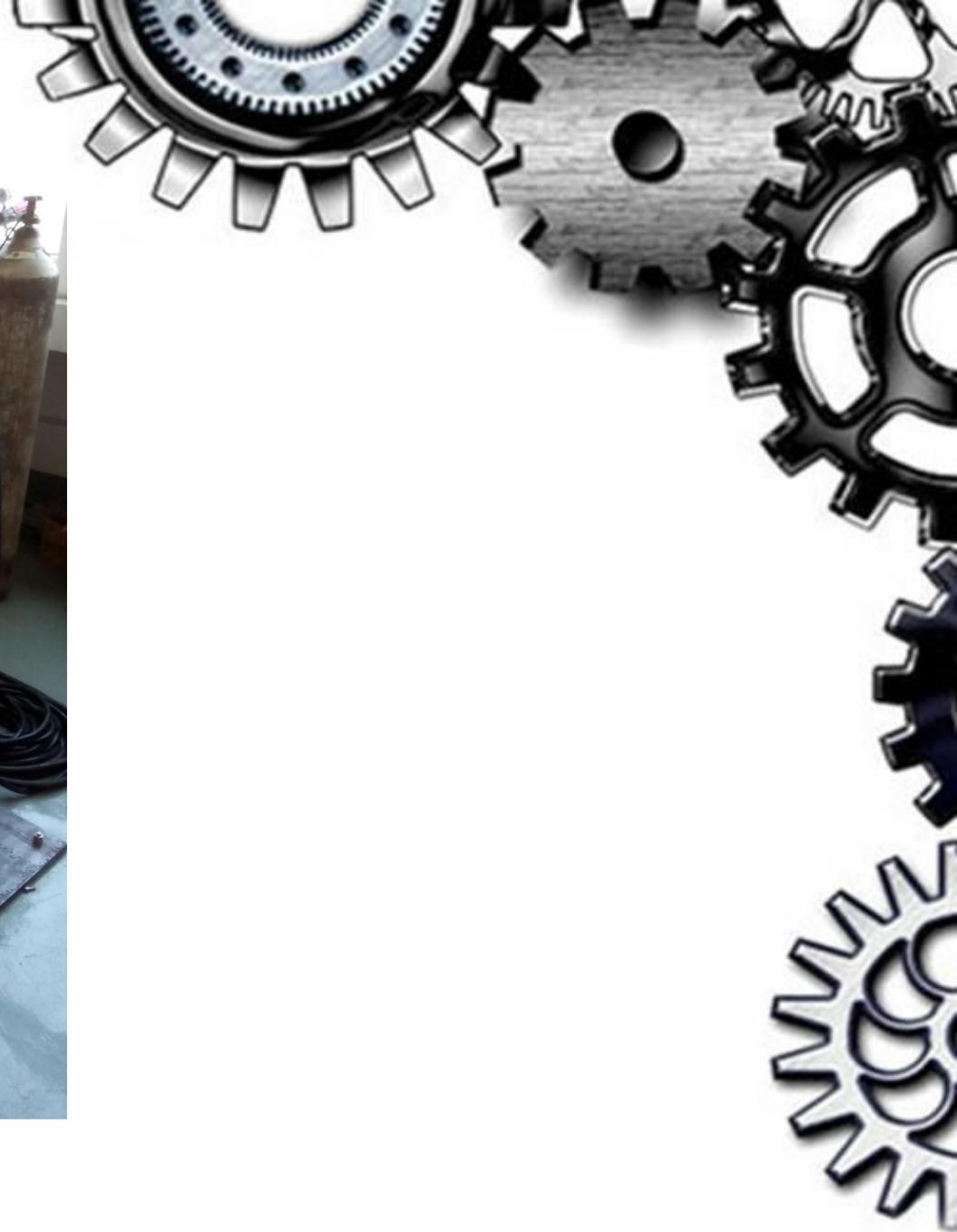
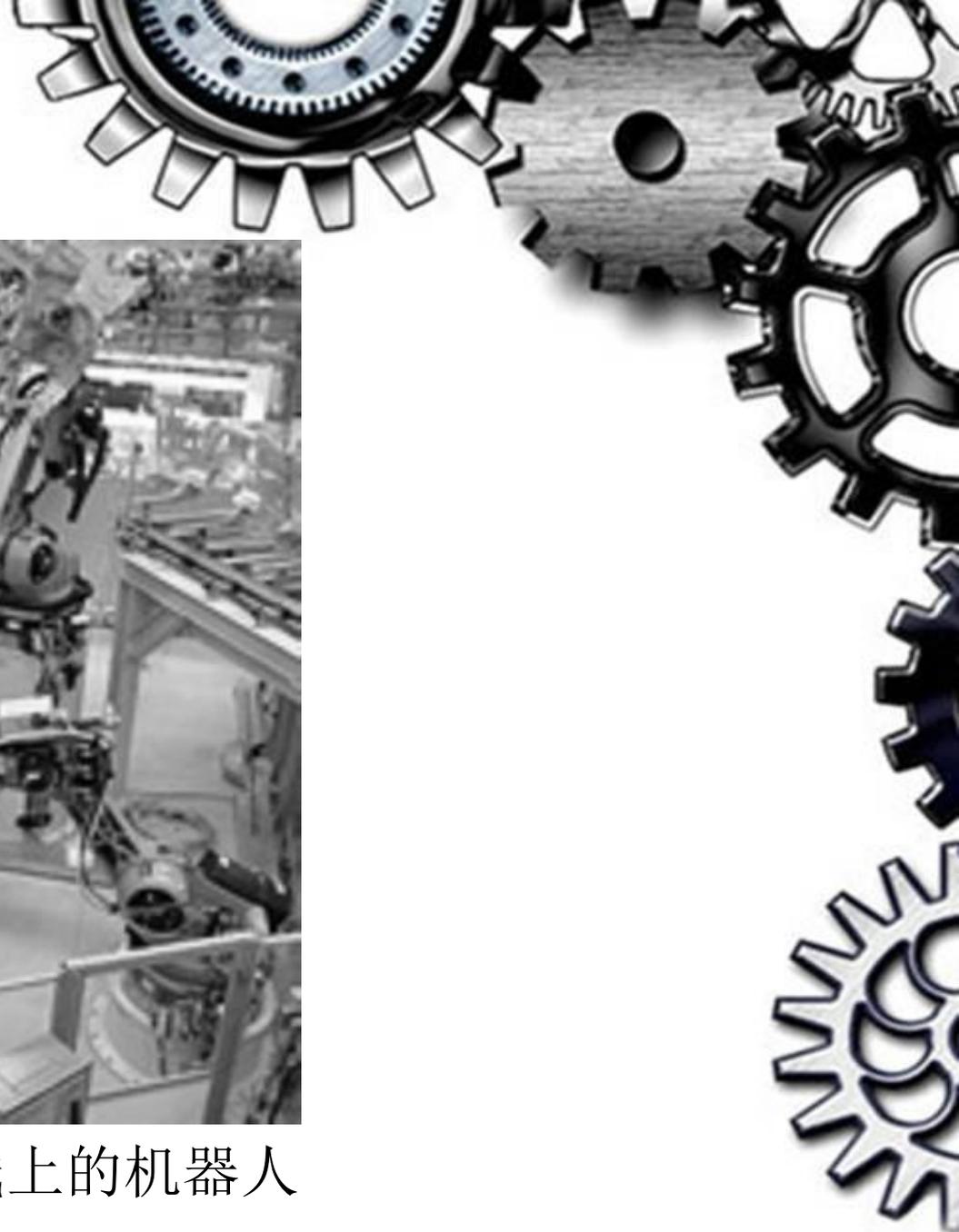
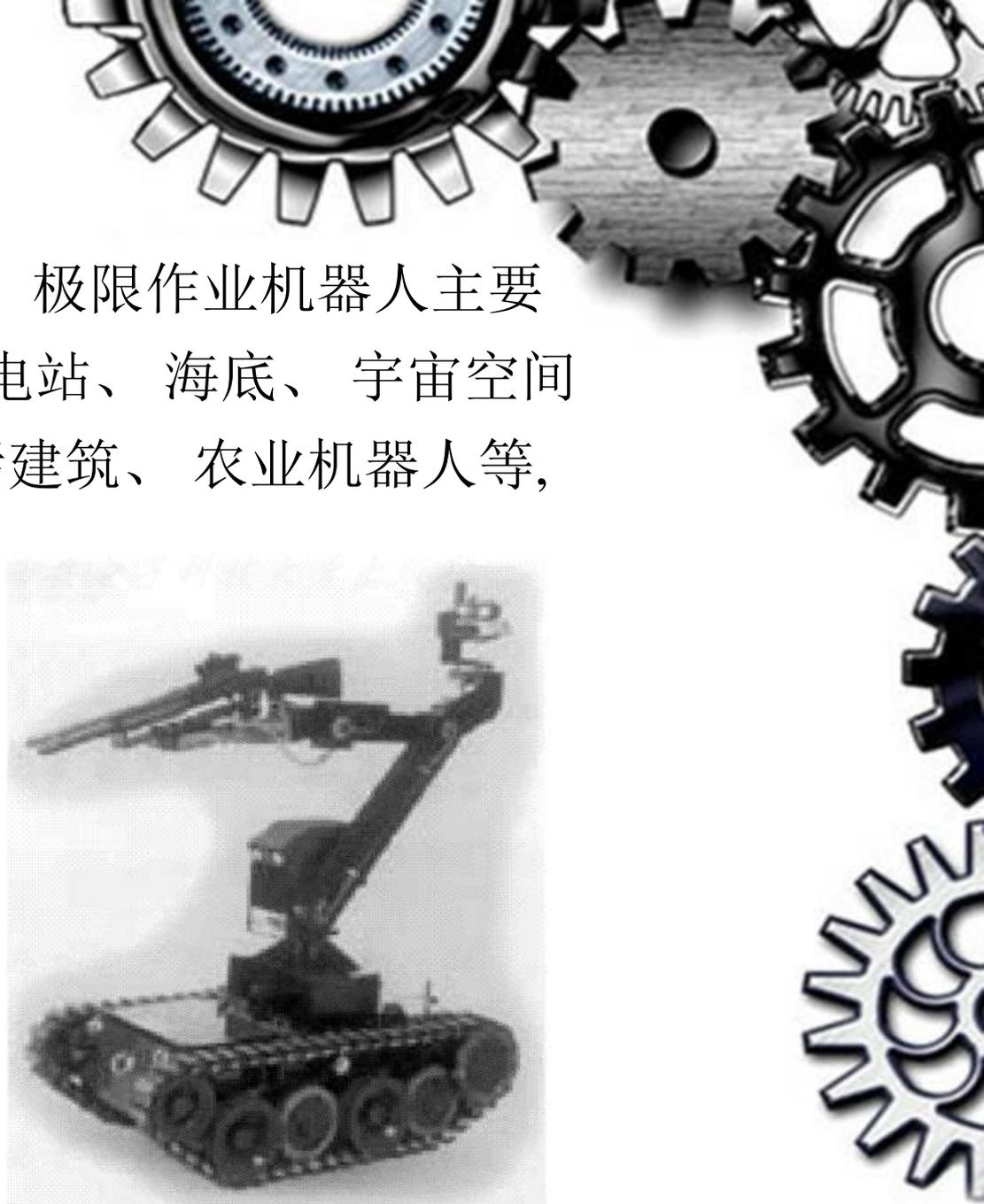


图 1.1 弧焊机器人



图 1.2 汽车焊接生产线上的机器人





(2) 极限作业机器人。极限作业机器人主要是指在人们难以进入的核电站、海底、宇宙空间进行作业的机器人,也包括建筑、农业机器人等,如图1.3、图1.4所示。

图 1.3 排爆机器人

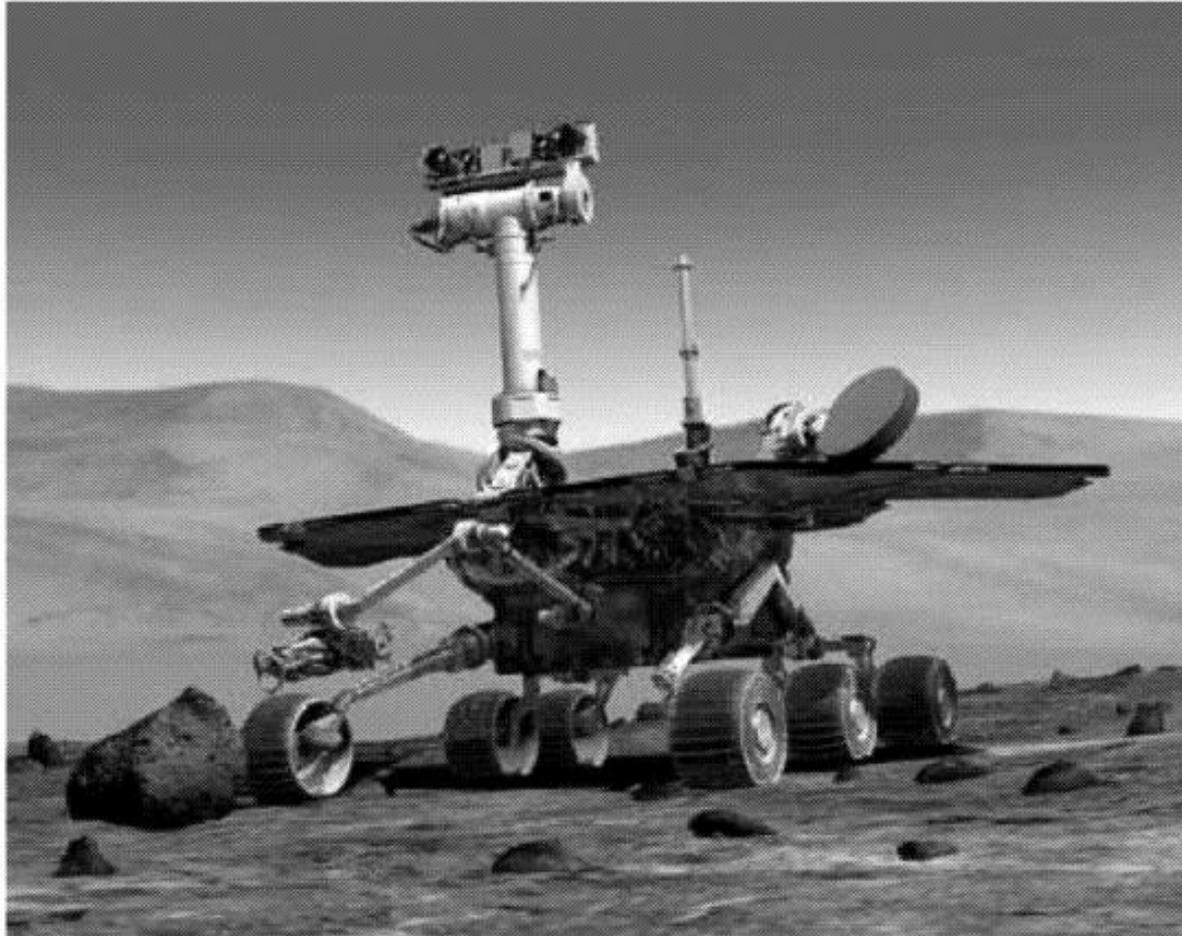


图 1.4 火星探测机器人

(3) 服务机器人。服务机器人包括家庭、医疗、娱乐、玩具机器人等(具有某种程度的通用性), 也有根据环境而改变动作的机器人, 如图1.5、图1.6所示。

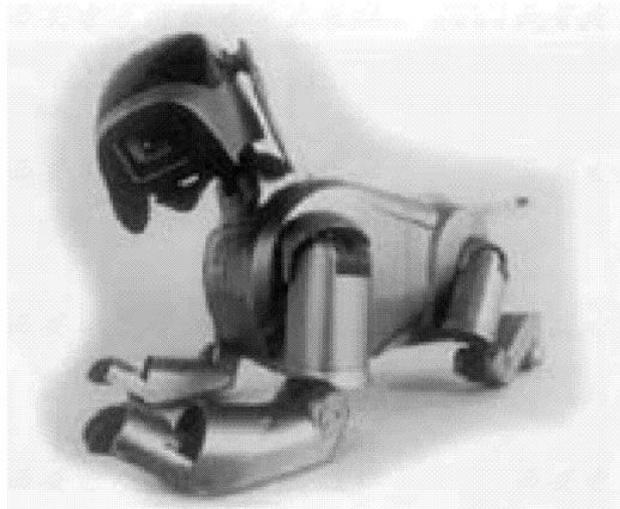
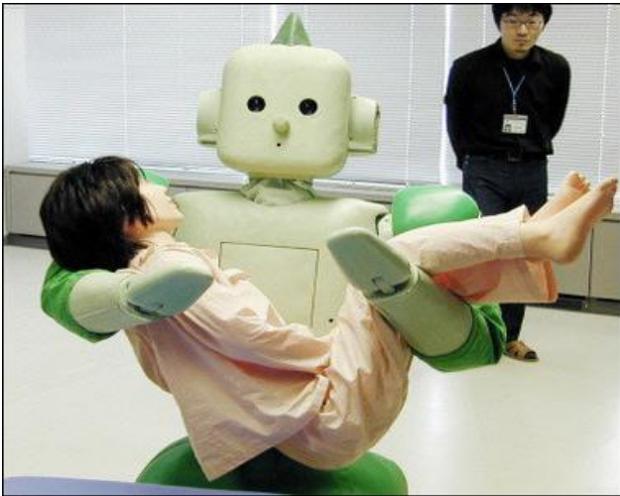


图 1.5

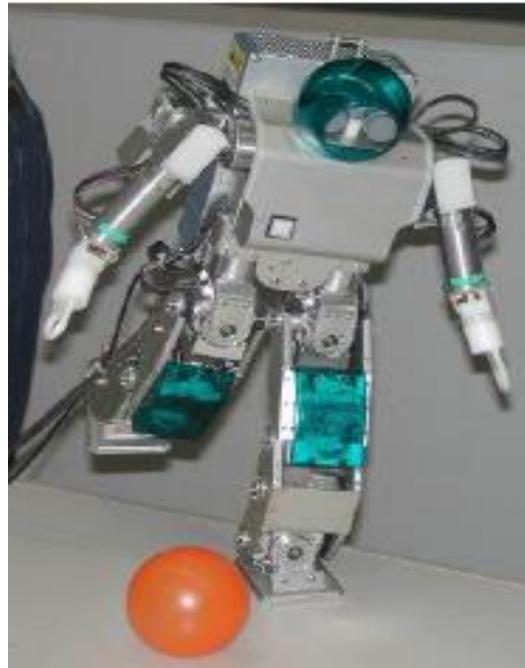
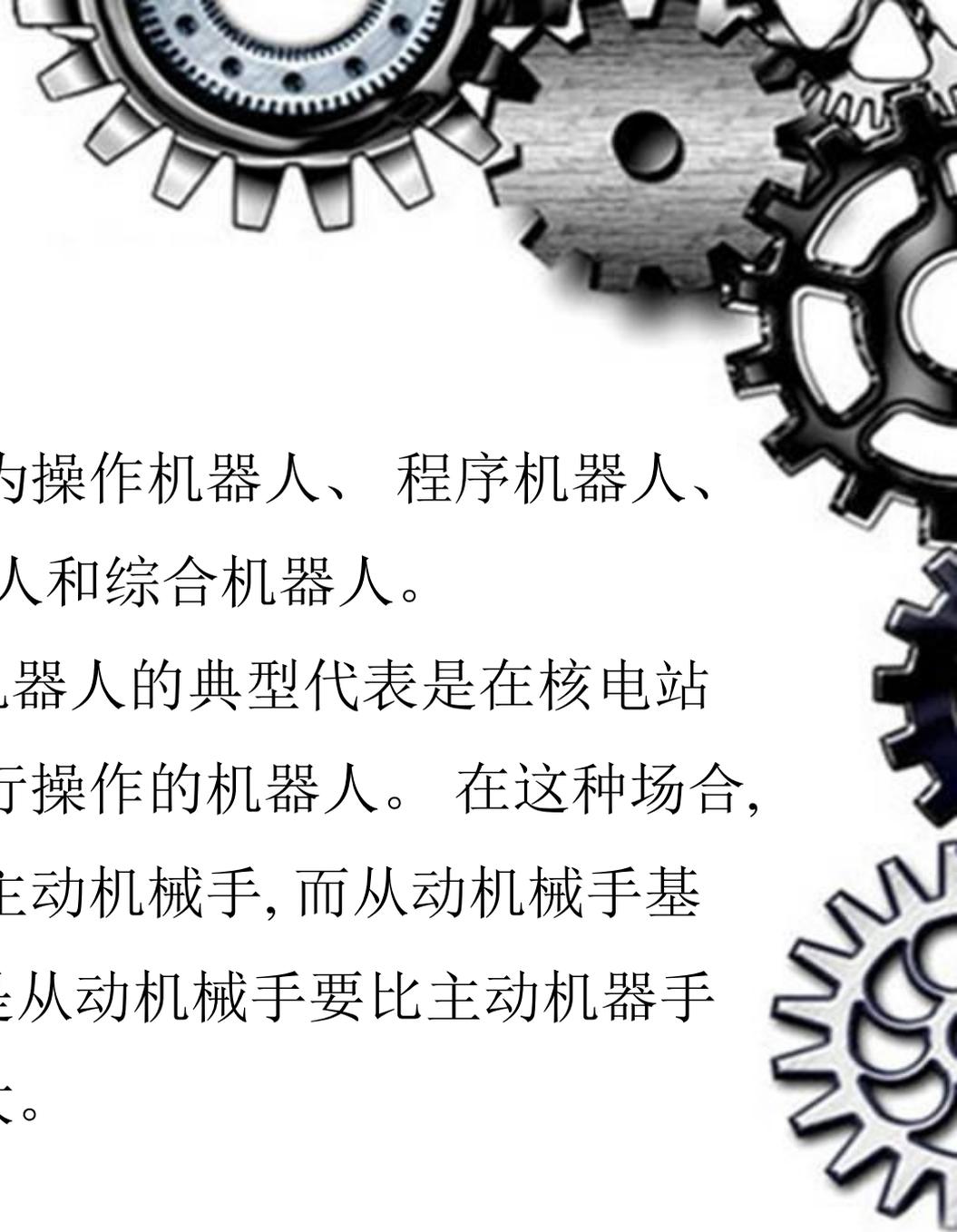


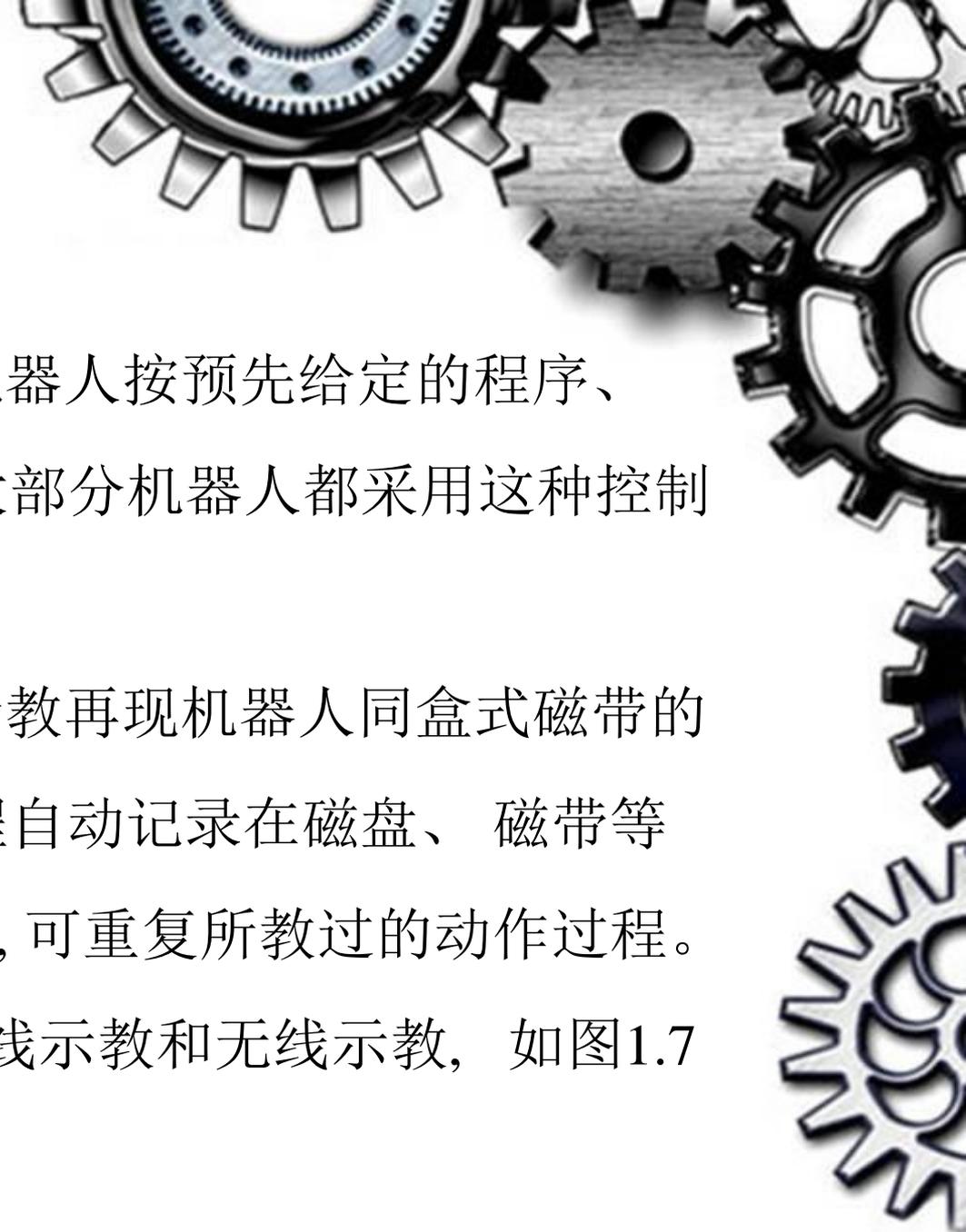
图 1.6



2. 按照控制方式分类

机器人按控制方式可分为操作机器人、程序机器人、示教再现机器人、智能机器人和综合机器人。

(1) 操作机器人。操作机器人的典型代表是在核电站处理放射性物质时远距离进行操作的机器人。在这种场合，相当于人手操纵的部分称为主动机械手，而从动机械手基本上与主动机械手类似，只是从动机械手要比主动机械手大一些，作业时的力量也更大。



(2) 程序机器人。程序机器人按预先给定的程序、条件、位置进行作业,目前大部分机器人都采用这种控制方式工作。

(3) 示教再现机器人。示教再现机器人同盒式磁带的录放一样,将所教的操作过程自动记录在磁盘、磁带等存储器中,当需要再现操作时,可重复所教过的动作过程。示教方法有手把手示教、有线示教和无线示教,如图1.7所示。

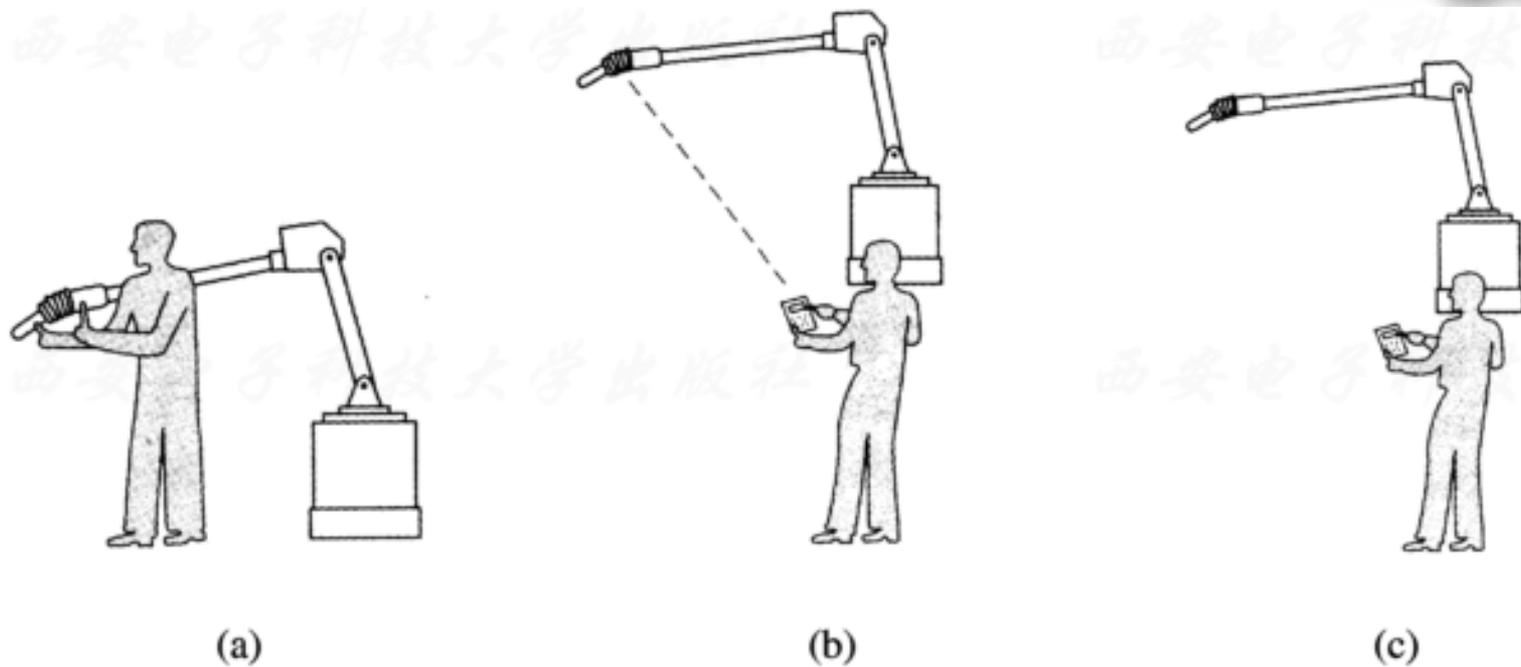


图 1.7 机器人示教
(a) 手把手示教; (b) 有线示教; (c) 无线示教



(4) 智能机器人。智能机器人不仅可以进行预先设定的动作,还可以按照工作环境的变化改变动作。

(5) 综合机器人。综合机器人是由操作机器人、示教再现机器人、智能机器人组合而成的机器人,如火星机器人。1997年7月4日,“火星探险者(Mars Pathfinder)”在火星上着陆,着陆体是四面体形状,着陆后三个盖子的打开状态如图1.8所示。它在能上、下、左、右动作的摄像机平台上装有两台CCD摄像机,通过立体观测而得到空间信息。整个系统可以看做是由地面指令操纵的操作机器人。

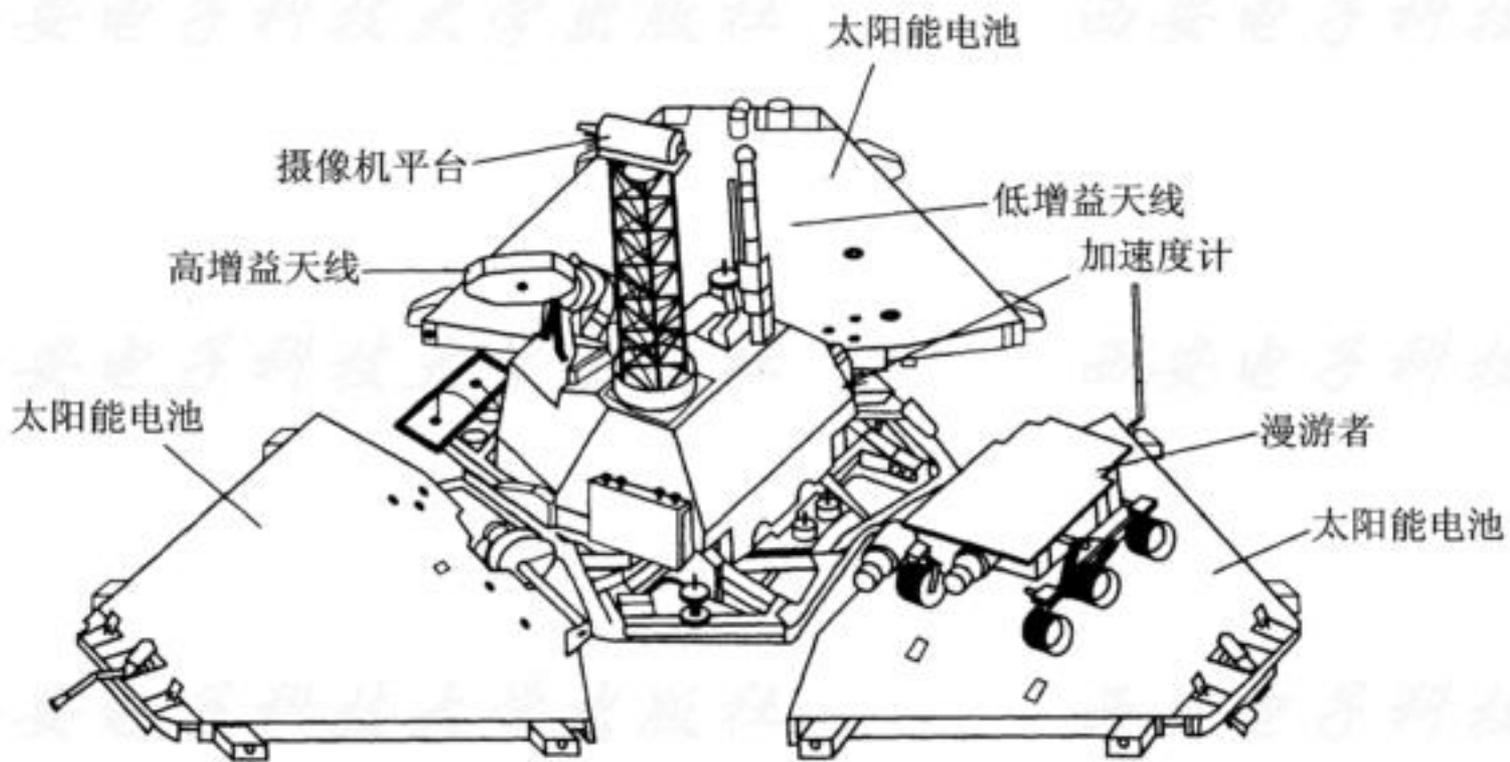


图 1.8 火星探险者

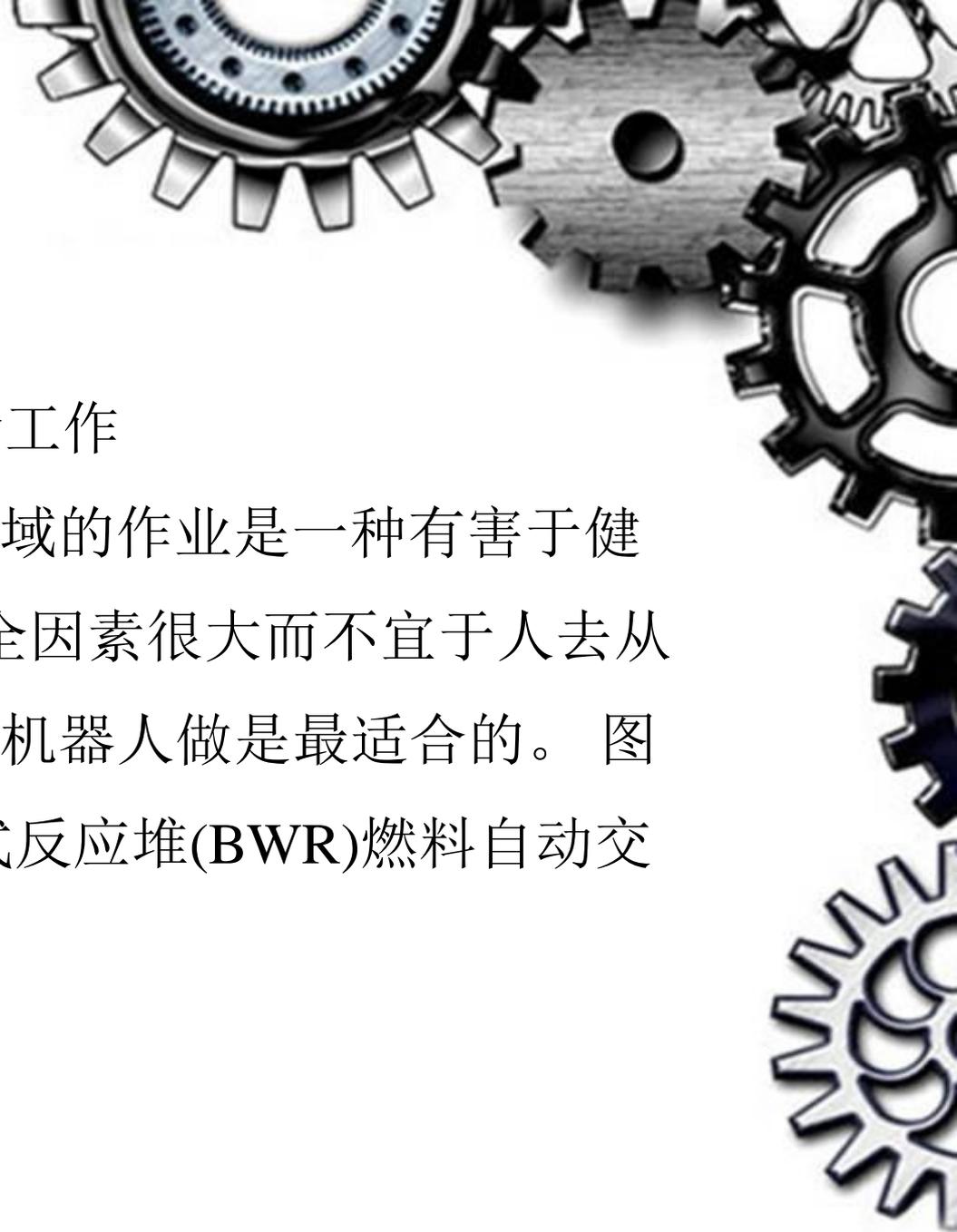




1.2 工业机器人的应用和发展

1.2.1 工业机器人的应用

工业机器人最早应用于汽车制造业，常用于焊接、喷漆、上下料和搬运。工业机器人延伸和扩大了人的手足和大脑功能，它可代替人从事危险、有害、有毒、低温和高热等恶劣环境中的工作；代替人完成繁重、单调的重复劳动，提高劳动生产率，保证产品质量。机器人与数控加工中心、自动搬运小车以及自动检测系统可组成柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)，实现生产自动化。



1) 恶劣工作环境及危险工作

压铸车间及核工业等领域的作业是一种有害于健康并可能危及生命,或不安全因素很大而不宜于人去从事的作业,此类工作由工业机器人做是最适合的。图1.9所示为核工业上沸腾水式反应堆(BWR)燃料自动交换机。

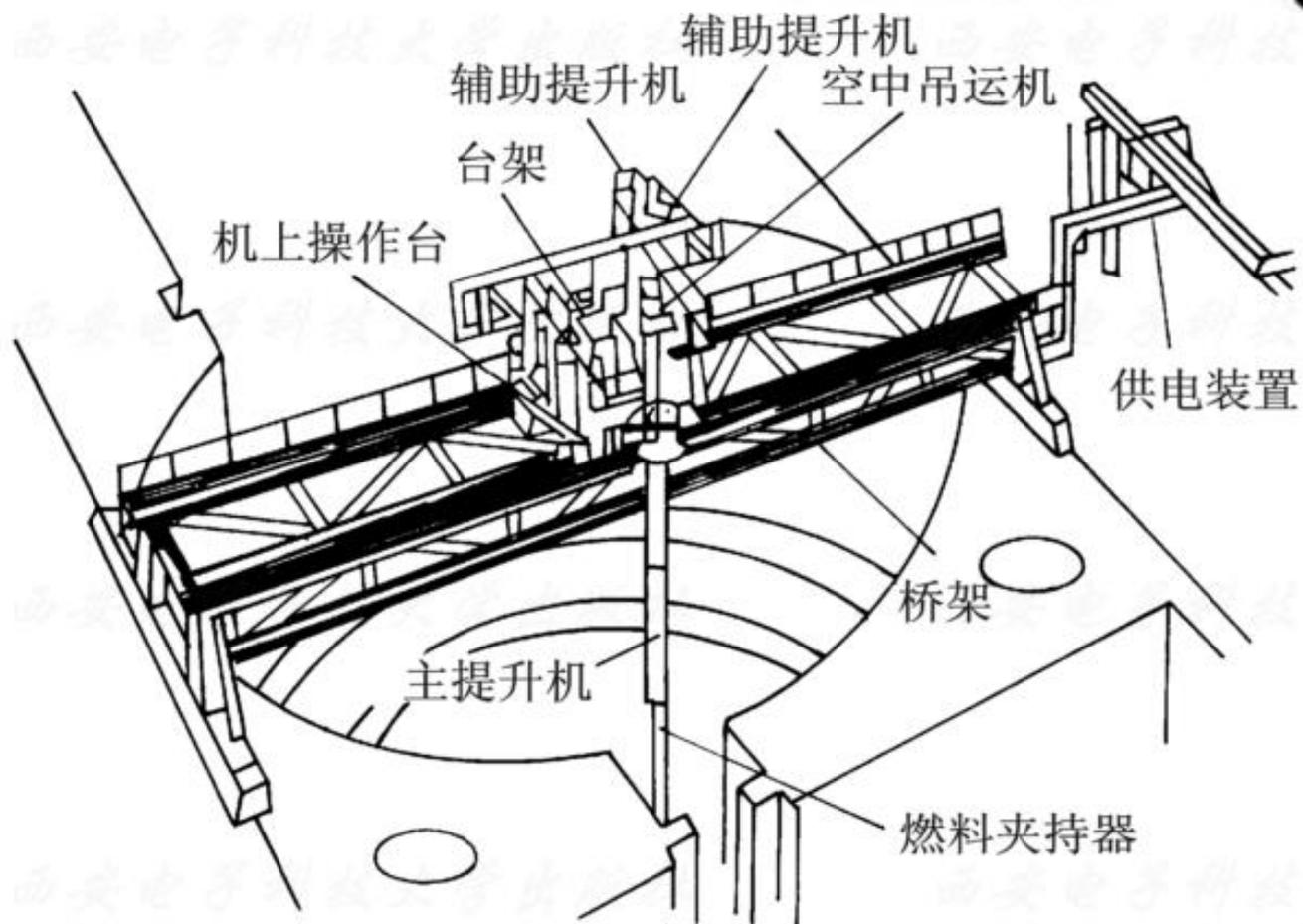
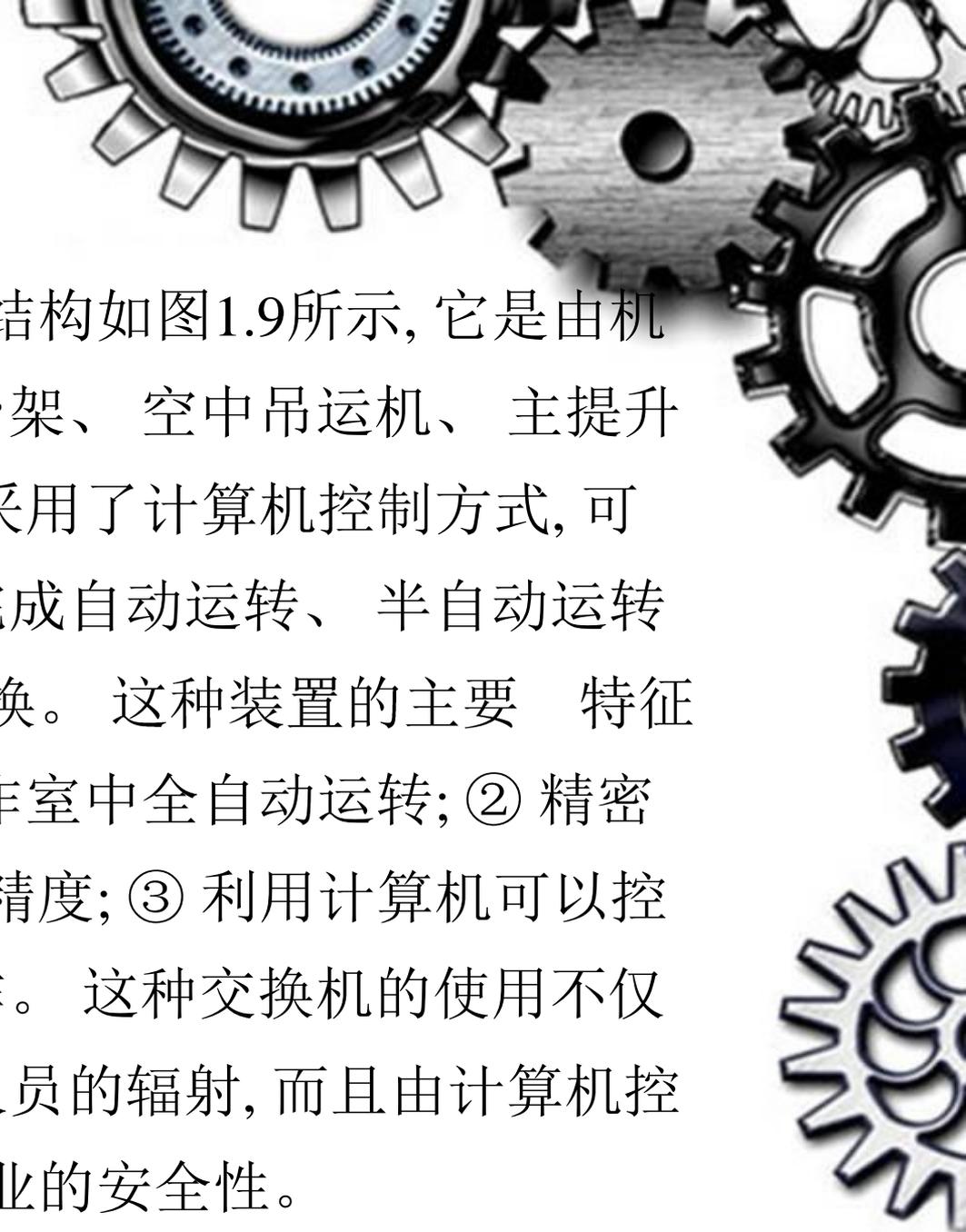


图 1.9 燃料自动交换机



燃料自动交换机的主要结构如图1.9所示,它是由机上操作台、辅助提升机、台架、空中吊运机、主提升机、燃料夹持器等组成的;采用了计算机控制方式,可依据操作人员的运转指令,完成自动运转、半自动运转和手动运转模式下的燃料交换。这种装置的主要特征是: ① 可以在远距离的操作室中全自动运转;② 精密的多重圆筒立柱可提高定位精度;③ 利用计算机可以控制系统高速运转,防止误操作。这种交换机的使用不仅提高了效率,降低了对操作人员的辐射,而且由计算机控制的操作自动化可以提高作业的安全性。



2) 特殊作业场合和极限作业

火山探险、深海探密和空间探索等领域对于人类来说是力所不能及的,只有机器人才能进行作业。如图1.10所示的航天飞机上用来回收卫星的操作臂RMS(Remote Manipulator System),它是由加拿大SPAR航天公司设计并制造的,是世界上最大的关节式机器人。该操作臂额定载荷为15 000 kg,最大载荷为30 000 kg;末端操作器的最大速度空载时为0.6 m/s,承载15 000 kg时为0.06 m/s,承载30 000 kg时为0.03 m/s;定位精度为 ± 0.05 m。这些额定参数是在外层空间抓放飞行体时的参数。

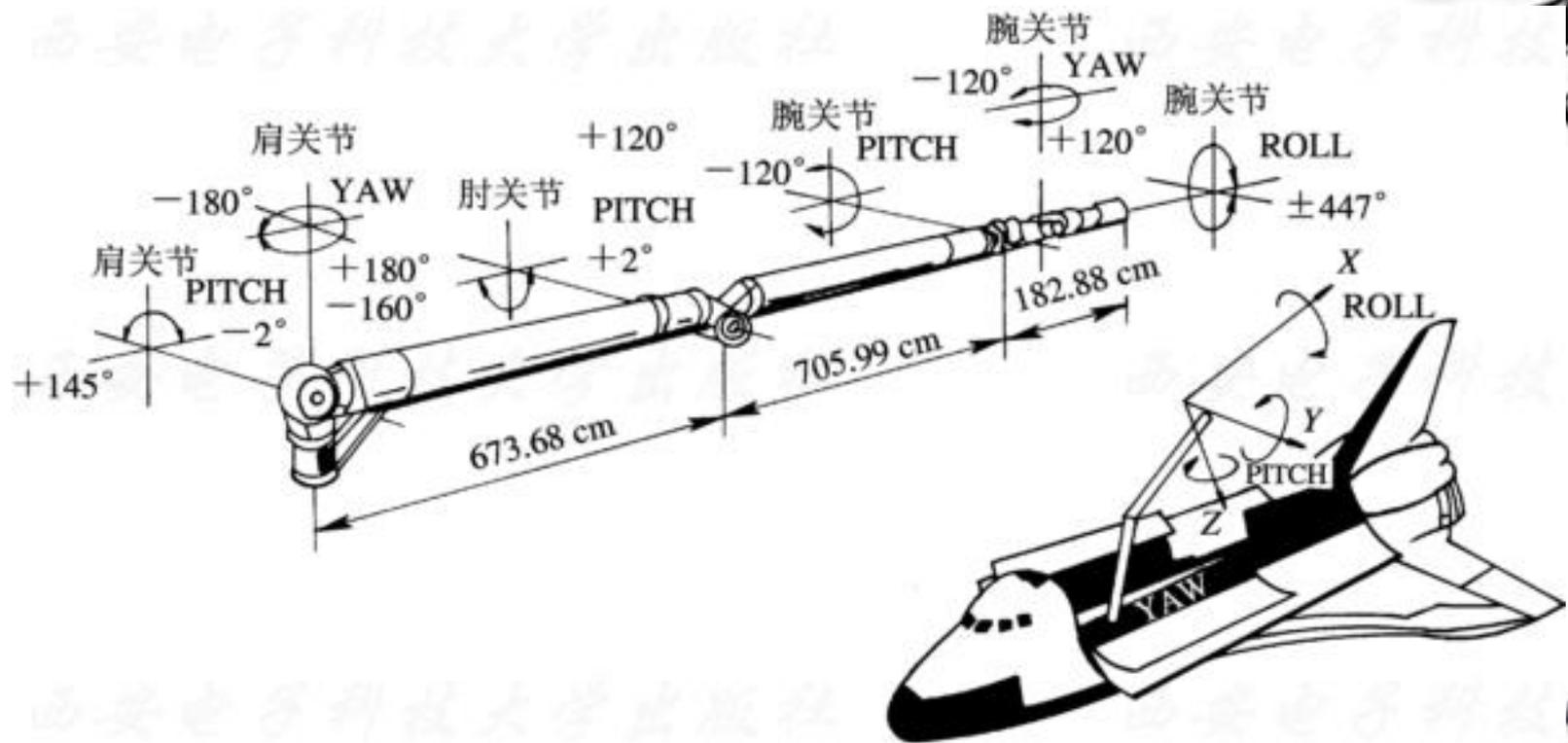
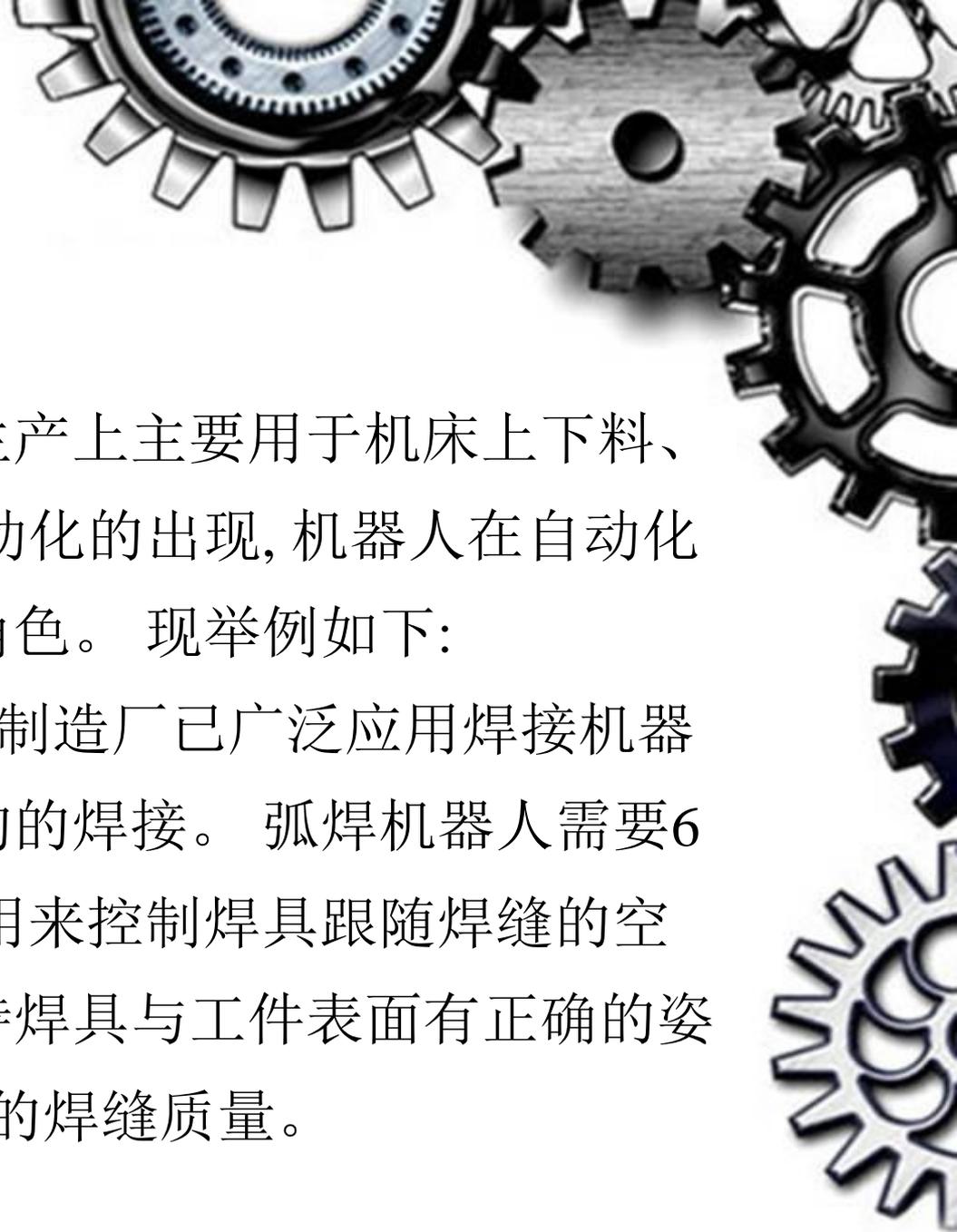


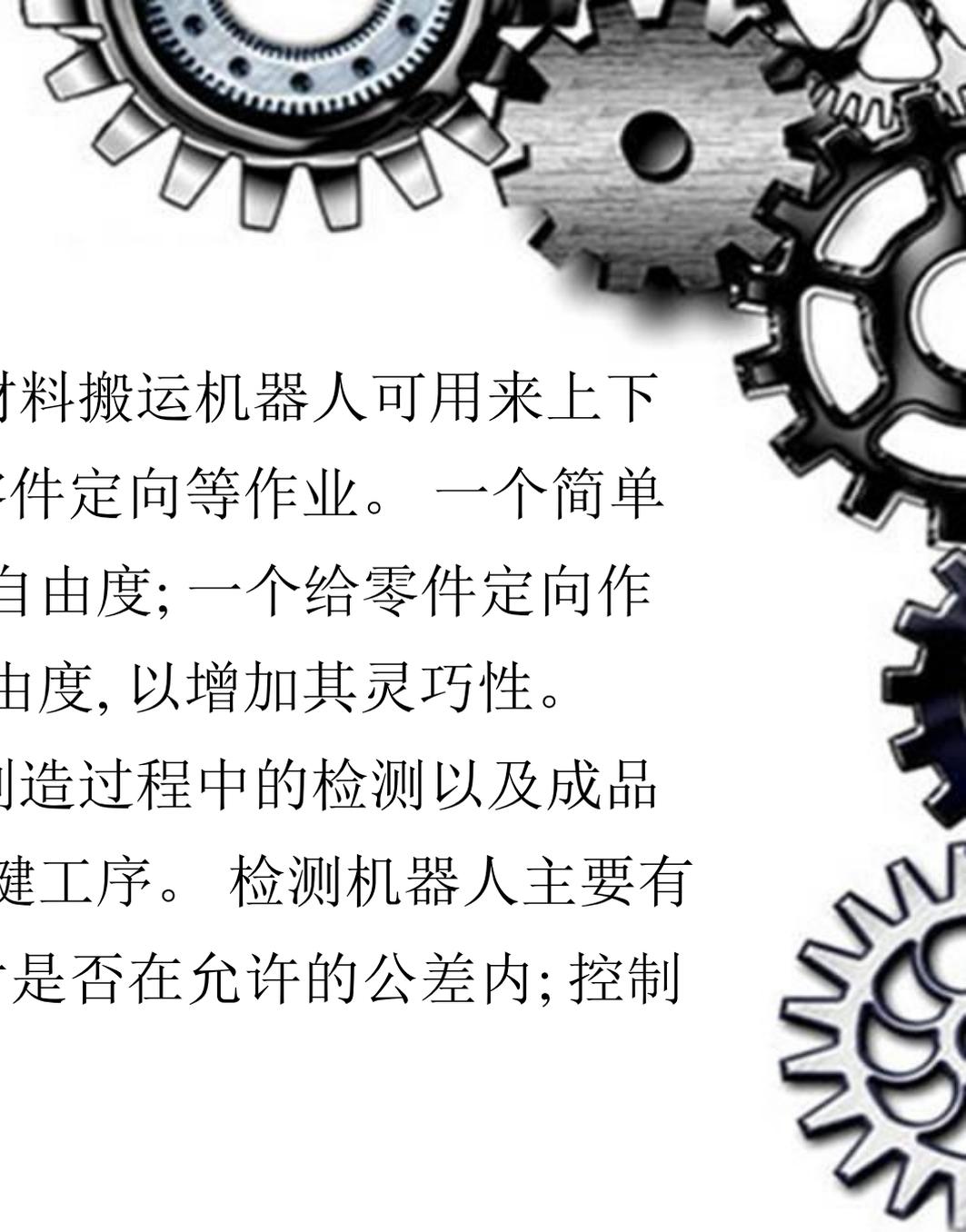
图 1.10 航天飞机上的操作臂



3) 自动化生产领域

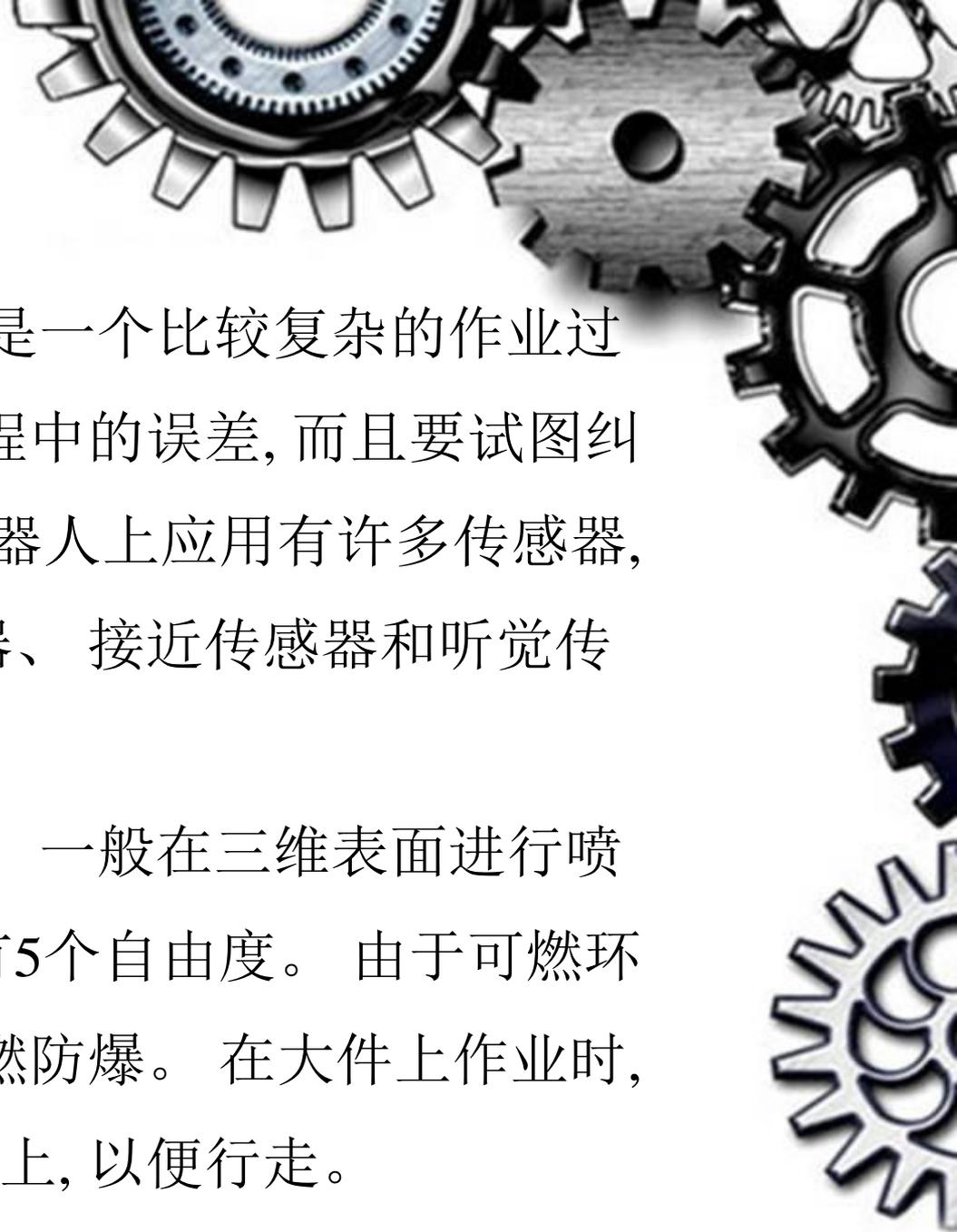
早期的工业机器人在生产上主要用于机床上下料、点焊和喷漆。随着柔性自动化的出现,机器人在自动化生产领域扮演了更重要的角色。现举例如下:

(1) 焊接机器人。汽车制造厂已广泛应用焊接机器人进行承重大梁和车身结构的焊接。弧焊机器人需要6个自由度,其中3个自由度用来控制焊具跟随焊缝的空间轨迹,另外3个自由度保持焊具与工件表面有正确的姿态关系,这样才能保证良好的焊缝质量。



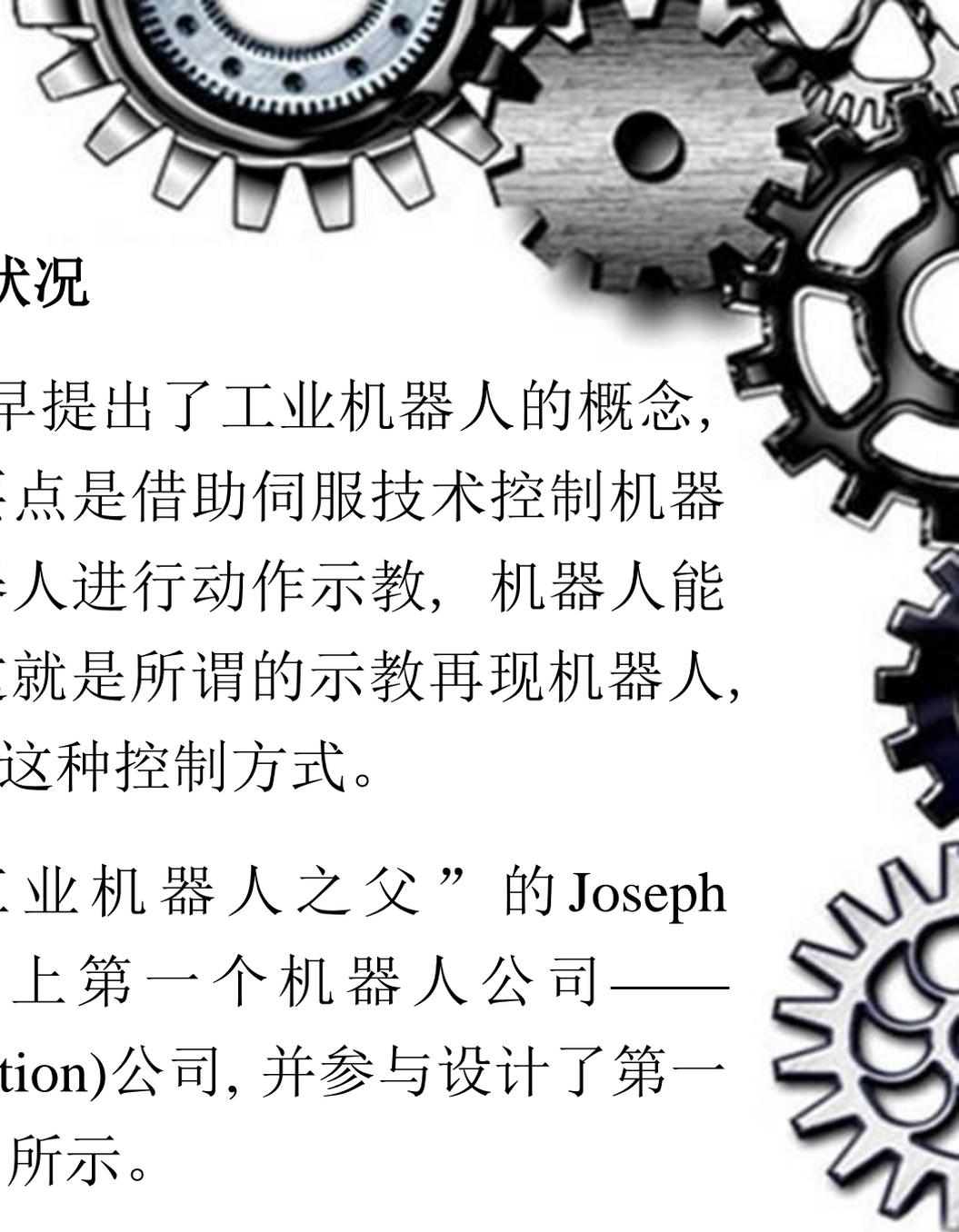
(2) 材料搬运机器人。材料搬运机器人可用来上下料、码垛、卸货以及抓取零件定向等作业。一个简单抓放作业机器人只需较少的自由度;一个给零件定向作业的机器人要求有更多的自由度,以增加其灵巧性。

(3) 检测机器人。零件制造过程中的检测以及成品检测都是保证产品质量的关键工序。检测机器人主要有两个工作内容:确认零件尺寸是否在允许的公差内;控制零件按质量分类。



(4) 装配机器人。装配是一个比较复杂的作业过程,不仅要检测装配作业过程中的误差,而且要试图纠正这种误差。因此,装配机器人上应用有许多传感器,如接触传感器、视觉传感器、接近传感器和听觉传感器等。

(5) 喷漆和喷涂机器人。一般在三维表面进行喷漆和喷涂作业时,至少要有5个自由度。由于可燃环境的存在,驱动装置必须防燃防爆。在大件上作业时,往往把机器人装在一个导轨上,以便行走。



1.2.2 工业机器人的发展

1. 全球机器人的发展状况

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。

1958年,被誉为“工业机器人之父”的 Joseph F.Engel Berger 创建了世界上第一个机器人公司——Unimation(Universal Automation)公司,并参与设计了第一台Unimate 机器人,如图1.11所示。



这是一台用于压铸作业的五轴液压驱动机器人，手臂的控制由一台专用计算机完成。它采用分离式固体数控元件，并装有存储信息的磁鼓，能够记忆完成180个工作步骤。与此同时，另一家美国公司——AMF公司也开始研制工业机器人，即Versatran(Versatile Transfer)机器人，如图1.12所示。它主要用于机器之间的物料运输，采用液压驱动。该机器人的手臂可以绕底座回转，沿垂直方向升降，也可以沿半径方向伸缩。一般认为，Unimate和Versatran是世界上最早的工业机器人。这两种工业机器人的控制方式与数控机床大致相似，但外形特征迥异，主要由类似人的手和臂组成。

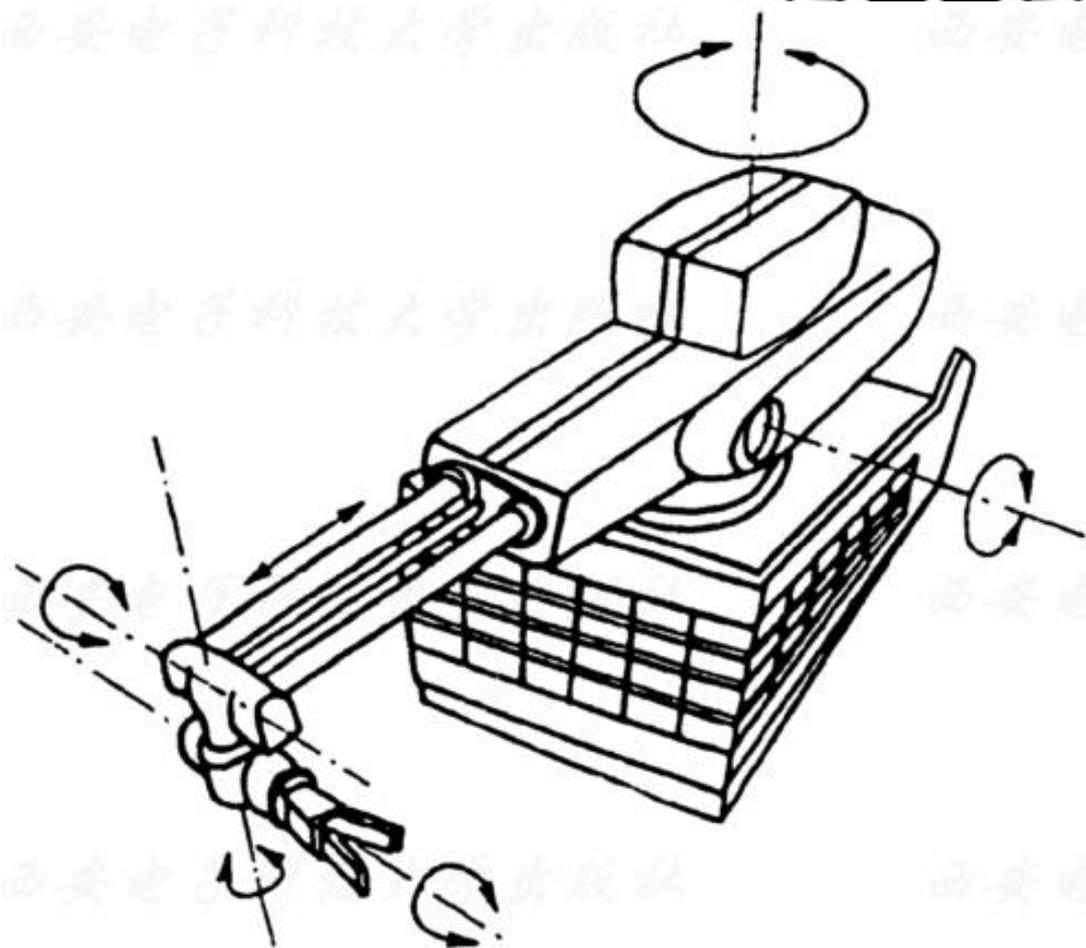


图 1.11 Unimate机器人

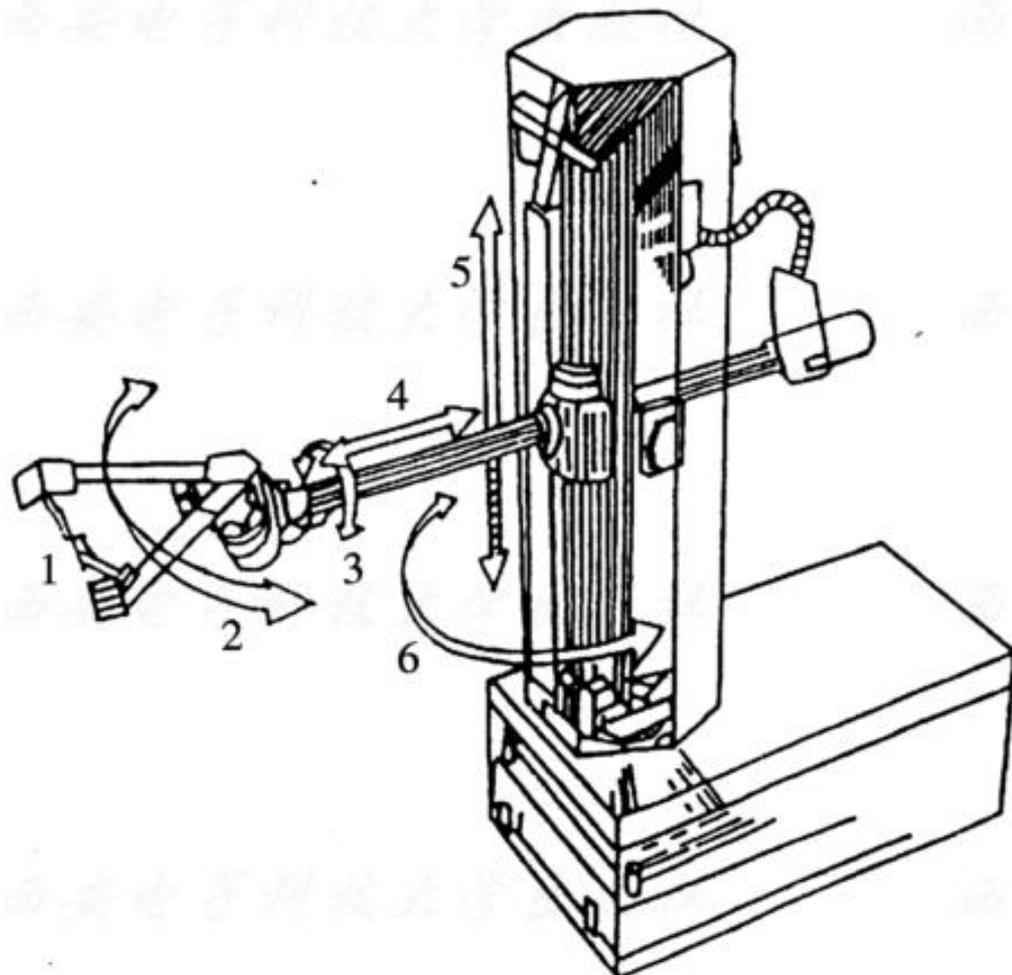


图 1.12 Versatran机器人

表1.1 工业机器人的发展历史

年代	领域	事 件
1955	理论	Denavit 和 Hartenberg 提出了齐次变换
1961	工业	美国专利 2 998 237, George devol 的“编程技术”、“传输”(基于 Unimate 机器人)
1961	工业	第一台 Unimate 机器人安装, 用于压铸
1961	技术	有传感器的机械手 MH-1, 由 Ernst 在麻省理工学院发明
1961	工业	Versatran 圆柱坐标机器人商业化
1965	理论	L. G. Roberts 将齐次变换矩阵应用于机器人
1965	技术	MIT 的 Roberts 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	理论	日本成立了人工手研究会(现改名为仿生机构研究会), 同年召开了日本首届机器人学术会
1968	技术	斯坦福研究院发明带视觉的、由计算机控制的行走机器人 Shakey
1969	技术	V. C. Sheinman 及其助手发明斯坦福机器臂
1970	理论	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
1970	技术	ETL 公司发明带视觉的自适应机器人
1971	工业	日本工业机器人协会(JIRA)成立
1972	理论	R. P. Paul 用 D-H 矩阵计算轨迹
1972	理论	D. E. Whitney 发明操作机的协调控制方式
1973	工业	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, 它是由液压驱动的, 能提升的有效负载达 45 kg



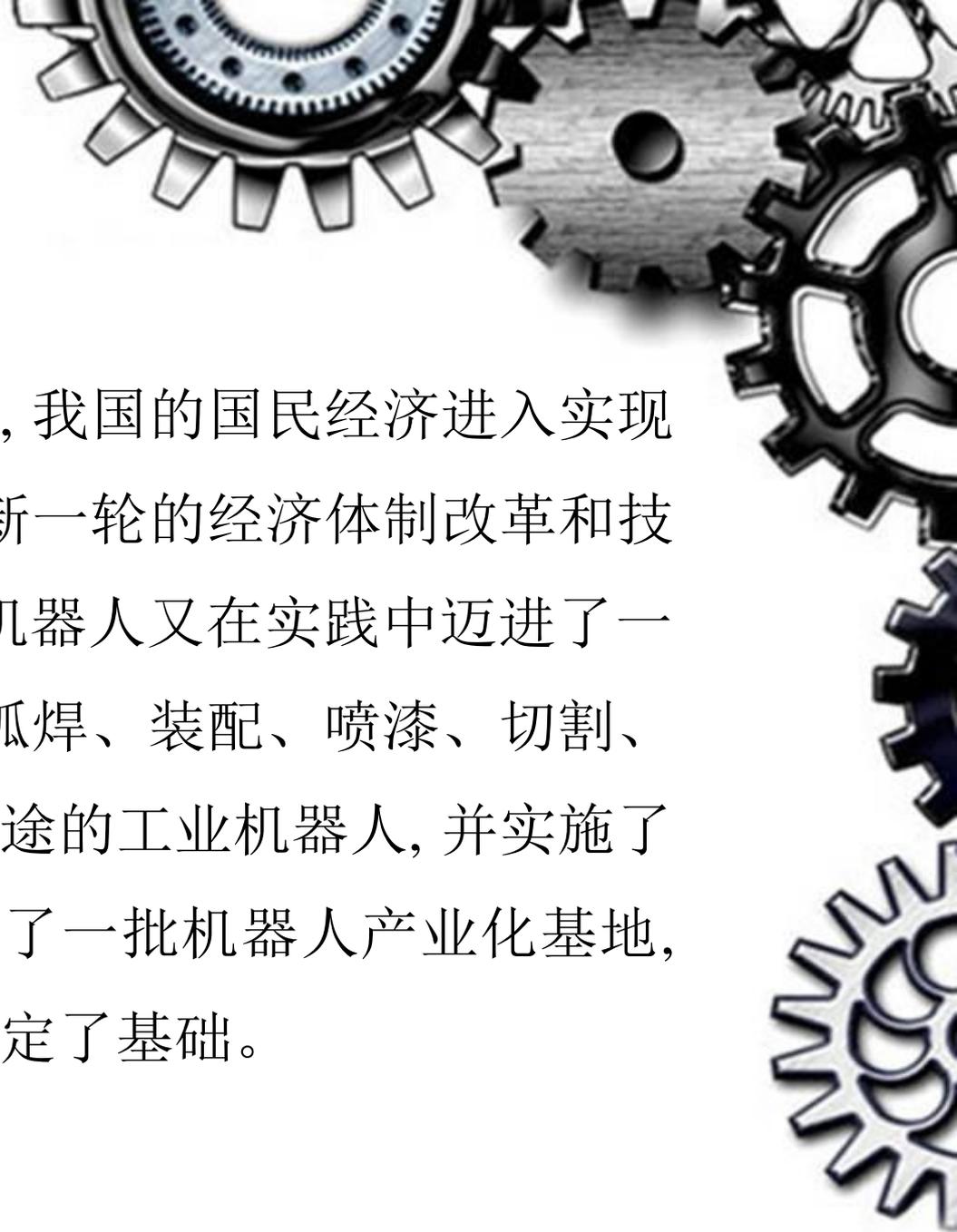
续表

年代	领域	事 件
1975	工业	美国机器人研究院成立
1975	工业	Unimation 公司公布其第一次利润
1976	技术	在斯坦福研究院完成用机器人的编程装配
1978	工业	C. Rose 及其同事成立了机器人智能公司，生产出第一个商业视觉系统
1980	工业	工业机器人真正在日本普及，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
1984	民用	英格伯格再次推出机器人 Helpmate，可在医院里为病人送饭、送药、送邮件
1996	民用	本田推出“拟人机器人 P2”
1998	民用	丹麦乐高公司推出机器人(Mind - storms)套件，让机器人制造变得跟搭积木一样，相对简单又能任意拼装，使机器人开始进入个人世界
1999	民用	日本索尼公司推出犬型机器人爱宝(AIBO)，当即销售一空，从此娱乐机器人成为目前机器人迈进普通家庭的途径之一
2002	民用	丹麦 iRobot 公司推出了吸尘器机器人 Roomba，它能避开障碍，自动设计行进路线，还能在电量不足时，自动驶向充电座。Roomba 是目前世界上销量最大、最商业化的家用机器人
2006	民用	微软公司推出 Microsoft Robotics Studio，机器人模块化、平台统一化的趋势越来越明显，比尔·盖茨预言，家用机器人很快将席卷全球

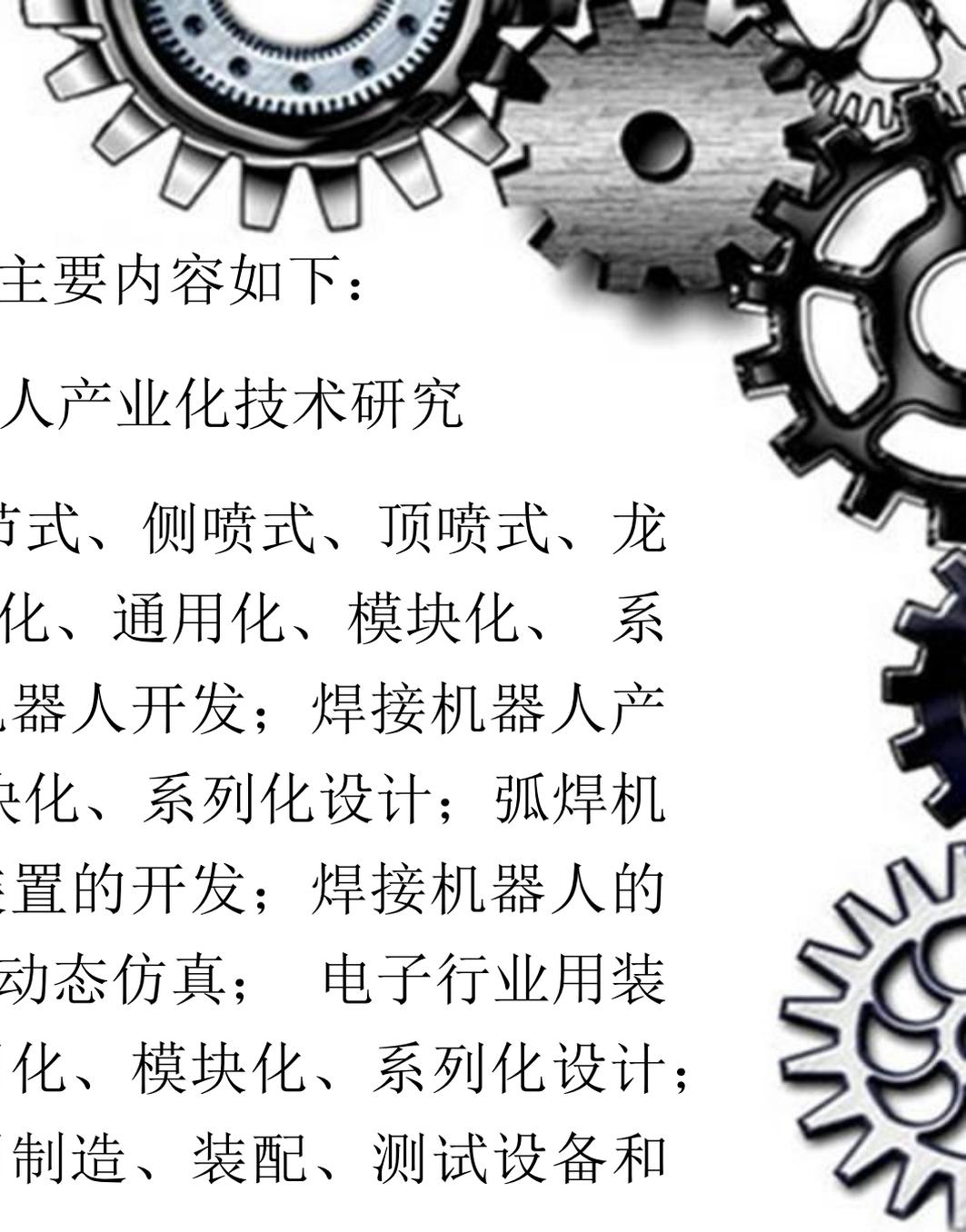
2. 我国工业机器人的发展状况

我国工业机器人起步于20世纪70年代初期，经过30多年的发展，大致经历了3个阶段：70年代的萌芽期，80年代的开发期和90年代的适用化期。

20世纪70年代是世界科技发展的一个里程碑：人类登上了月球，实现了金星、火星的软着陆。我国也发射了人造卫星。世界范围内工业机器人的应用掀起了一个高潮，尤其在日本发展更为迅猛，它补充了日益短缺的劳动力。在这种背景下，我国于1972年开始研制自己的工业机器人。



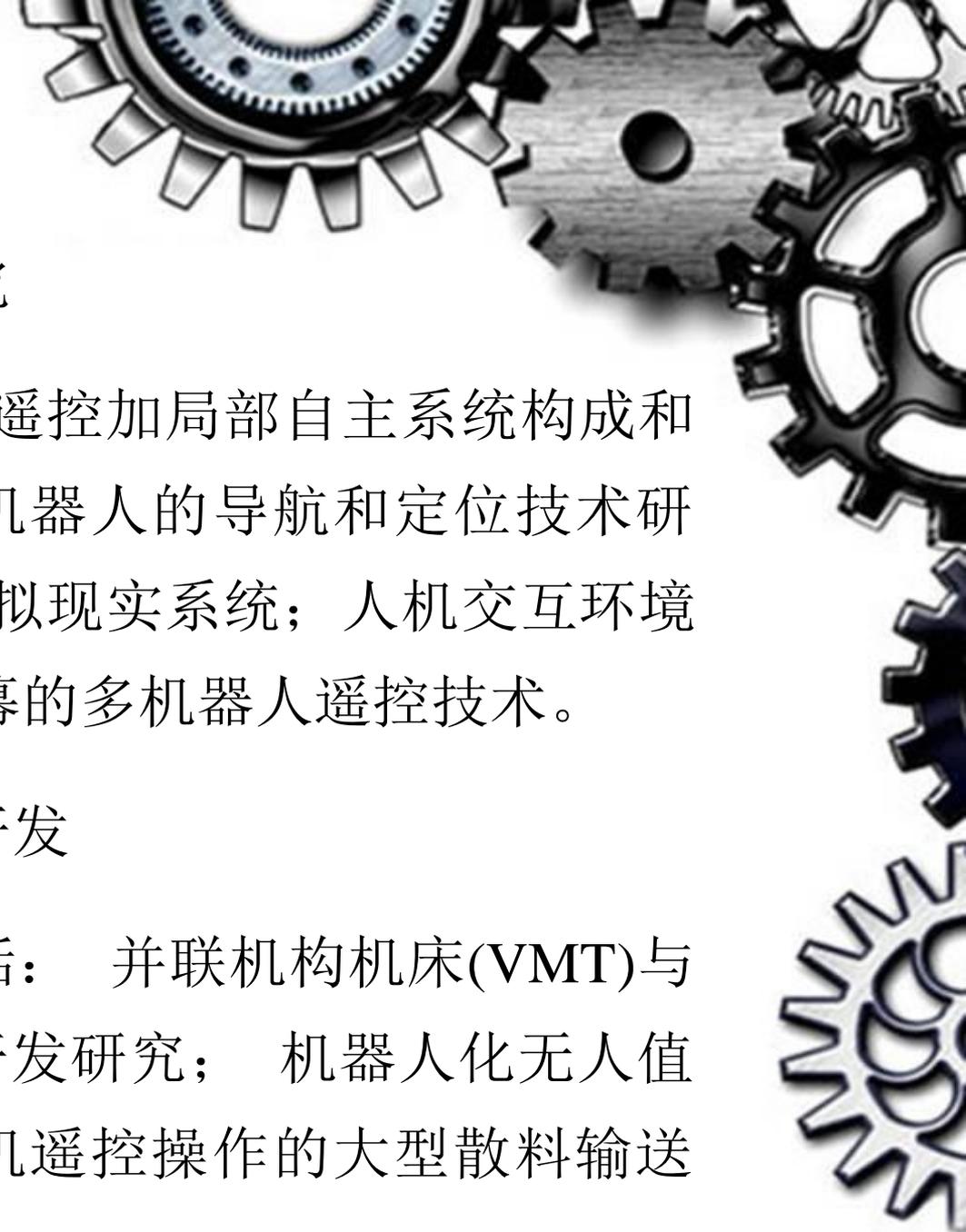
从20世纪90年代初期起,我国的国民经济进入实现两个根本转变时期,掀起了新一轮的经济体制改革和技术进步热潮。我国的工业机器人又在实践中迈进了一大步,先后研制出了点焊、弧焊、装配、喷漆、切割、搬运、包装、码垛等各种用途的工业机器人,并实施了一批机器人应用工程,形成了一批机器人产业化基地,为我国机器人产业的腾飞奠定了基础。



目前我国机器人研究的主要内容如下：

1) 示教再现型工业机器人产业化技术研究

这些研究主要包括：关节式、侧喷式、顶喷式、龙门式喷涂机器人产品的标准化、通用化、模块化、系列化设计；柔性仿形喷涂机器人开发；焊接机器人产品的标准化、通用化、模块化、系列化设计；弧焊机器人用激光视觉焊缝跟踪装置的开发；焊接机器人的离线示教编程及工作站系统动态仿真；电子行业用装配机器人产品标准化、通用化、模块化、系列化设计；批量生产机器人所需的专用制造、装配、测试设备和工具的研究开发。



2) 智能机器人开发研究

这些研究主要包括： 遥控加局部自主系统构成和控制策略研究； 智能移动机器人的导航和定位技术研究； 面向遥控机器人的虚拟现实系统； 人机交互环境建模系统； 基于计算机屏幕的多机器人遥控技术。

3) 机器人化机械研究开发

这些研究开发主要包括： 并联机构机床(VMT)与机器人化加工中心(RMC)开发研究； 机器人化无人值守和具有自适应能力的多机遥控操作的大型散料输送设备。

4) 以机器人为基础的重组装配系统

这些系统主要包括：开放式模块化装配机器人；面向机器人装配的设计技术；机器人柔性装配系统设计技术；重构机器人柔性装配系统设计技术；装配力觉、视觉技术；智能装配策略及其控制技术。

5) 多传感器信息融合与配置技术

该技术主要包括：机器人的传感器配置和融合技术在水泥生产过程控制和污水处理自动控制系统中的应用；机电一体化智能传感器的设计应用。



1.3 工业机器人的基本组成及技术参数

1.3.1 工业机器人的基本组成

工业机器人由3大部分6个子系统组成。3大部分是机械部分、传感部分和控制部分。6个子系统是驱动系统、机械结构系统、感受系统、机器人-环境交互系统、人机交互系统和控制系统,可用图1.13来表示。

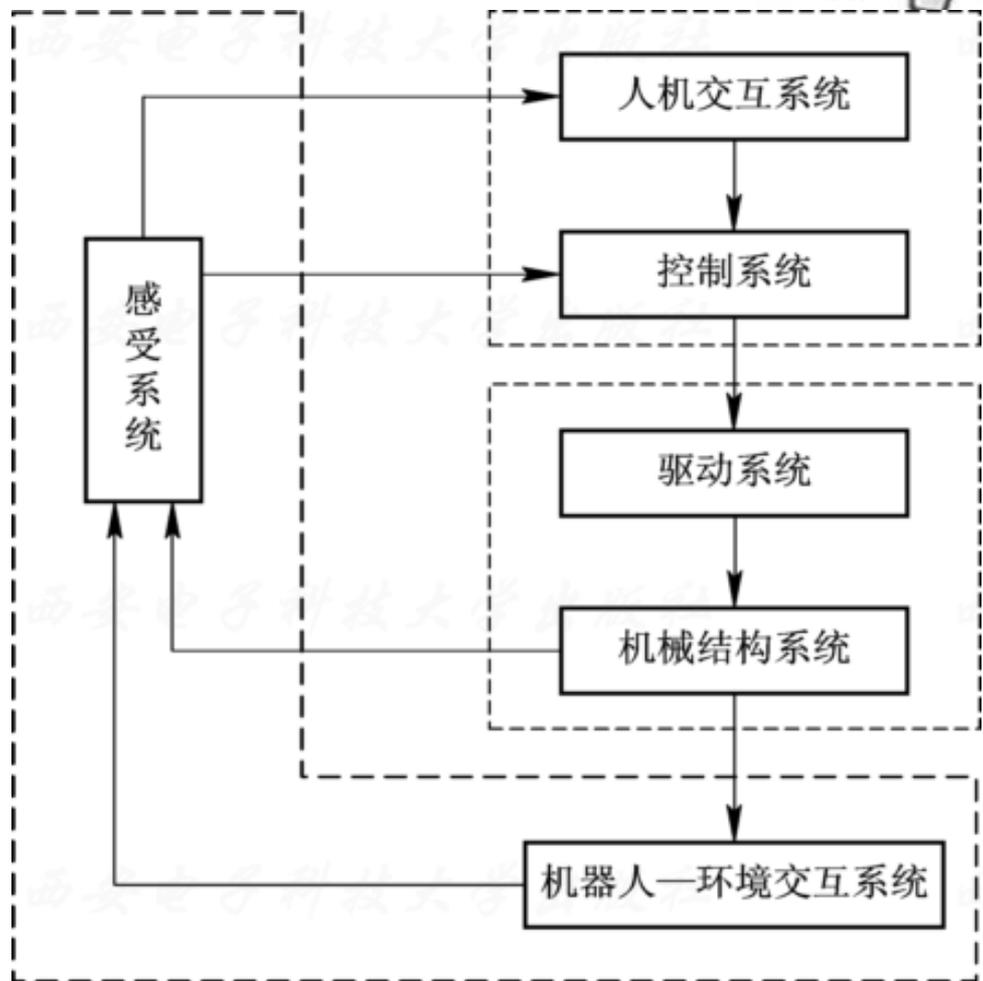
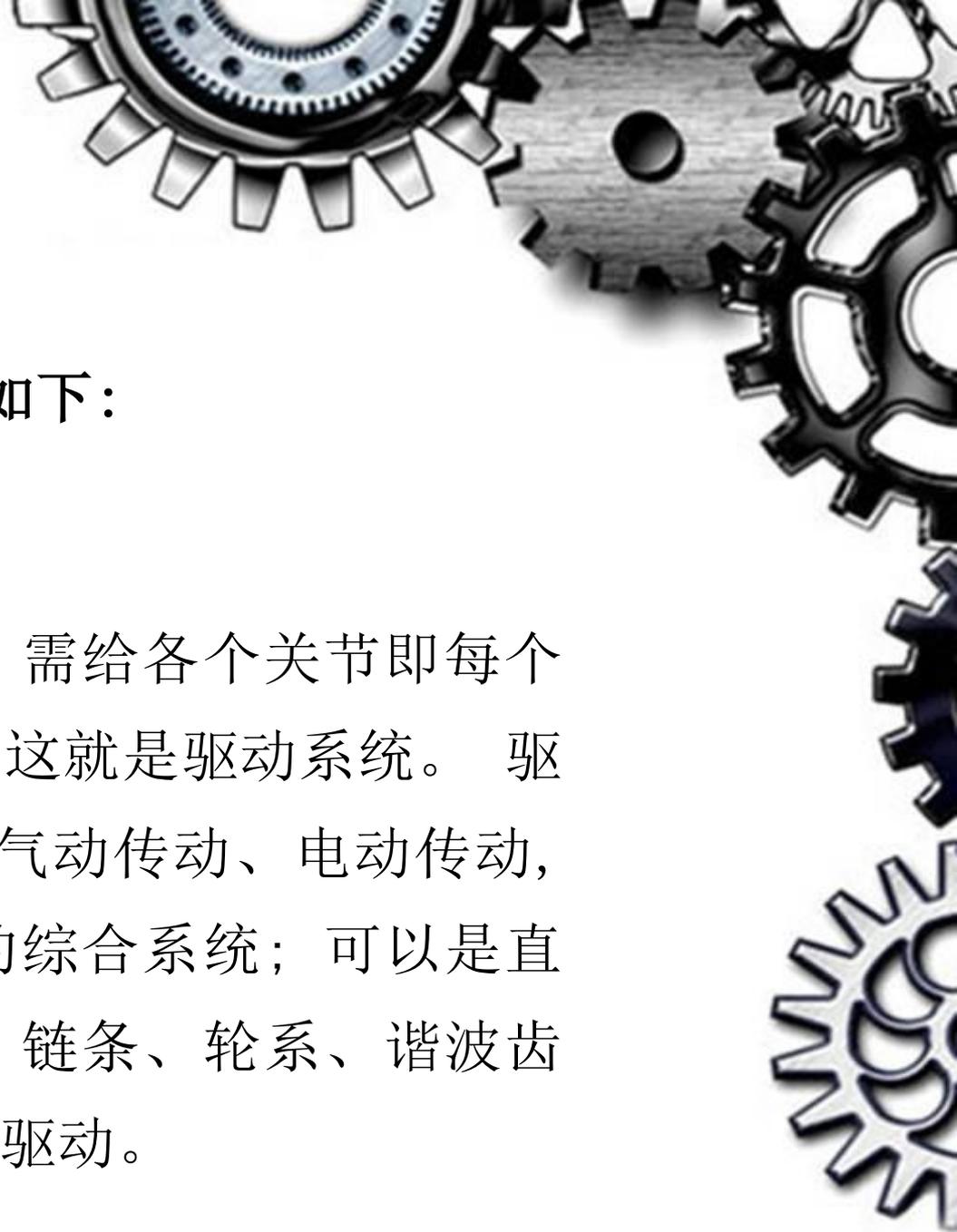


图 1.13 机器人系统组成



6个子系统的作用分述如下：

1. 驱动系统

要使机器人运行起来，需给各个关节即每个运动自由度安置传动装置，这就是驱动系统。驱动系统可以是液压传动、气动传动、电动传动，或者把它们结合起来应用的综合系统；可以是直接驱动或者是通过同步带、链条、轮系、谐波齿轮等机械传动机构进行间接驱动。



2. 机械结构系统

工业机器人的机械结构系统由基座、手臂、末端操作器三大件组成，如图1.14所示。每一大件都有若干自由度，构成一个多自由度的机械系统。若基座具备行走机构，则构成行走机器人；若基座不具备行走及腰转机构，则构成单机器人臂(Single Robot Arm)。手臂一般由上臂、下臂和手腕组成。末端操作器是直接装在手腕上的一个重要部件，它可以是二手指或多手指的手爪，也可以是喷漆枪、焊具等作业工具。

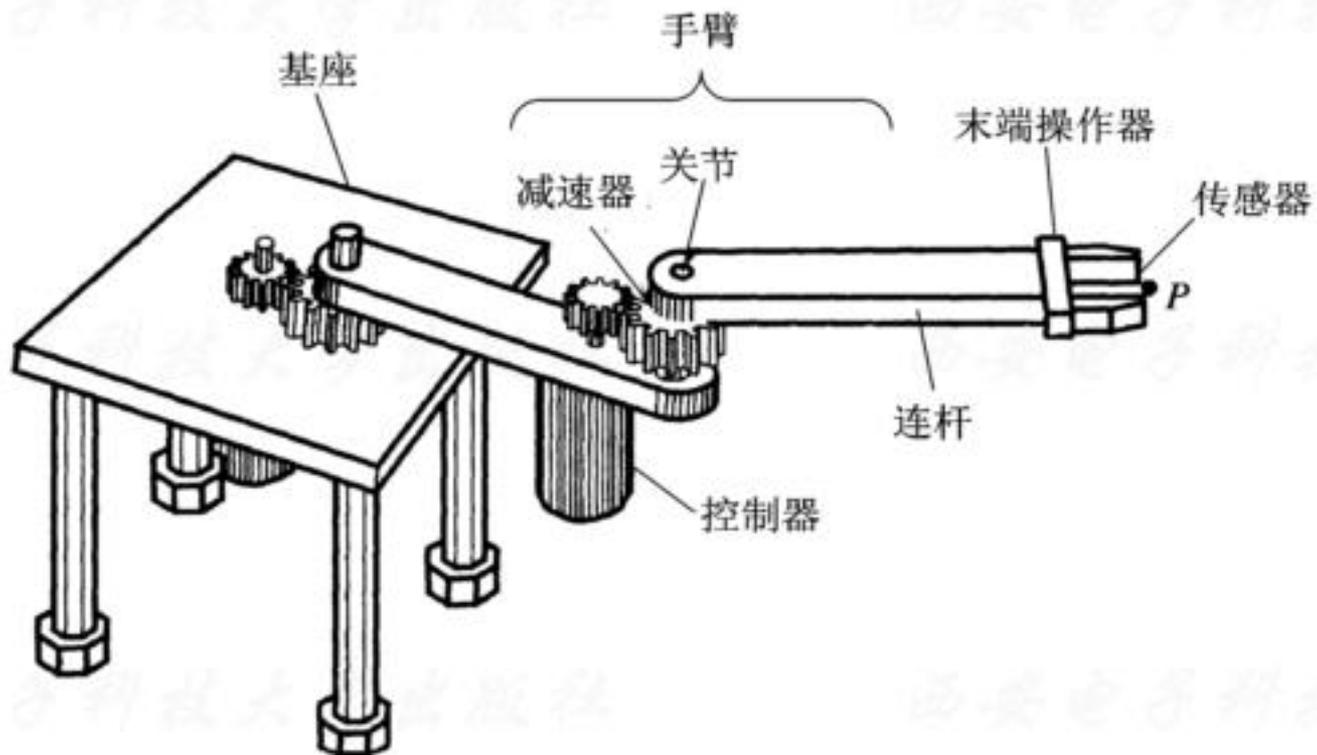
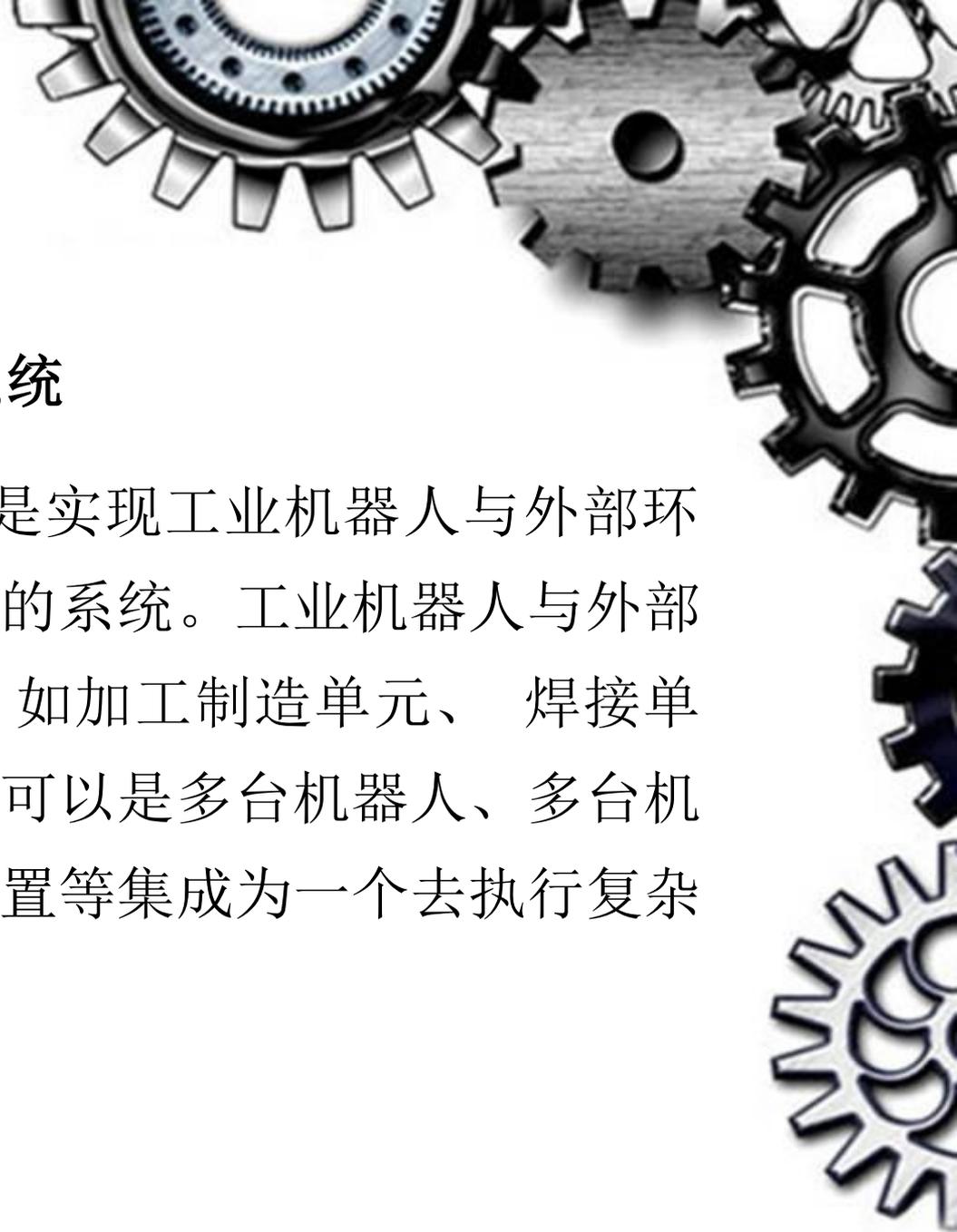


图 1.14 工业机器人的机械结构系统



3. 感受系统

感受系统由内部传感器模块和外部传感器模块组成，用以获取内部和外部环境状态中有意义的信息。智能传感器的使用提高了机器人的机动性、适应性和智能化的水准。人类的感受系统对感知外部世界信息是极其灵巧的，然而，对于一些特殊的信息，传感器比人类的感受系统更有效。



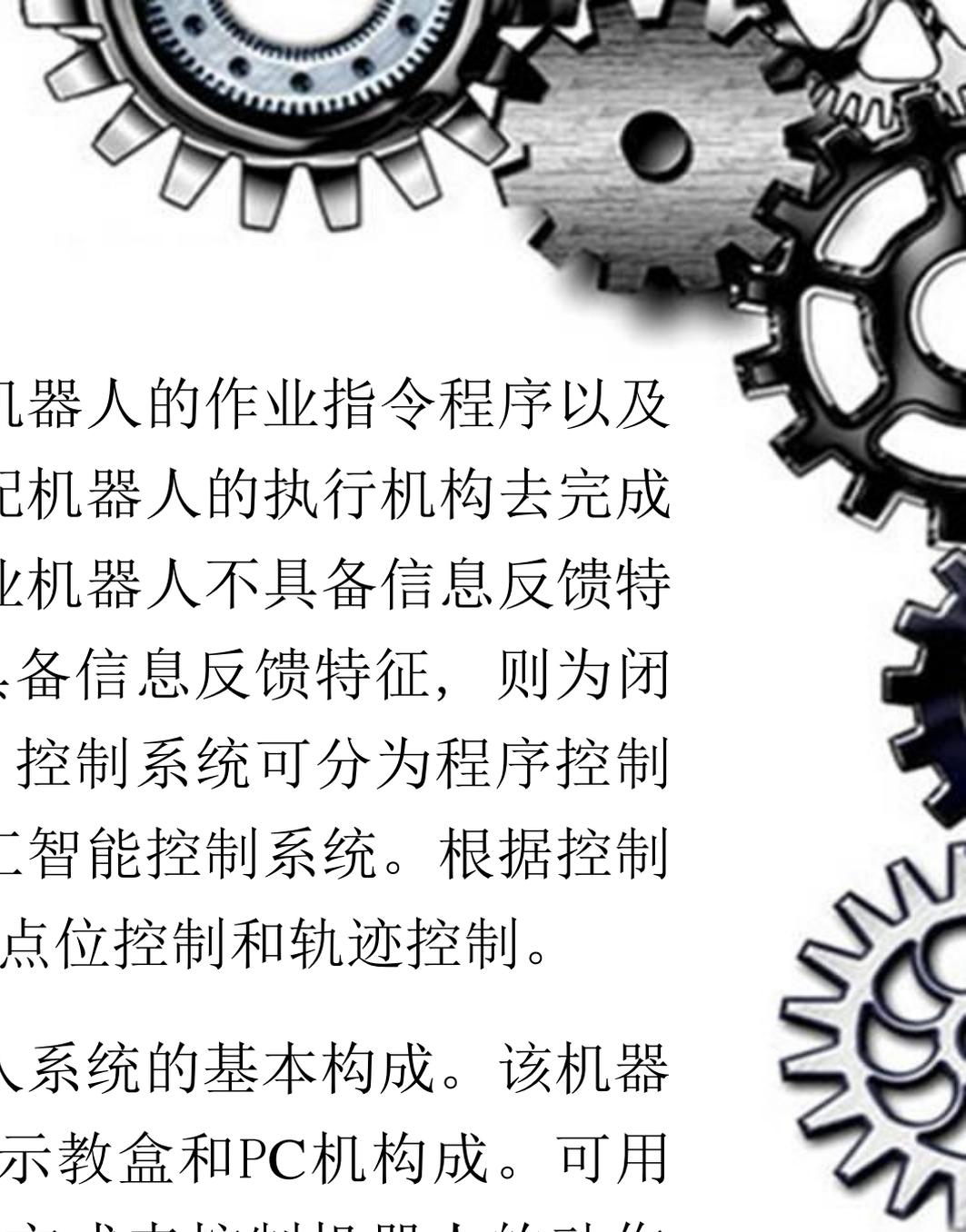
4. 机器人-环境交互系统

机器人-环境交互系统是实现工业机器人与外部环境中的设备相互联系和协调的系统。工业机器人与外部设备集成为一个功能单元，如加工制造单元、焊接单元、装配单元等。当然，也可以是多台机器人、多台机床或设备、多个零件存储装置等集成为一个去执行复杂任务的功能单元。



5. 人机交互系统

人机交互系统是使操作人员参与机器人控制并与机器人进行联系的装置，例如，计算机的标准终端，指令控制台，信息显示屏，危险信号报警器等。该系统归纳起来分为两大类：指令给定装置和信息显示装置。



6. 控制系统

控制系统的任务是根据机器人的作业指令程序以及从传感器反馈回来的信号支配机器人的执行机构去完成规定的运动和功能。假如工业机器人不具备信息反馈特征，则为开环控制系统；若具备信息反馈特征，则为闭环控制系统。根据控制原理，控制系统可分为程序控制系统、适应性控制系统和人工智能控制系统。根据控制运动的形式，控制系统可分为点位控制和轨迹控制。

图1.15为三菱装配机器人系统的基本构成。该机器人由机器人主体、控制器、示教盒和PC机构成。可用示教的方式和用PC机编程的方式来控制机器人的动作。

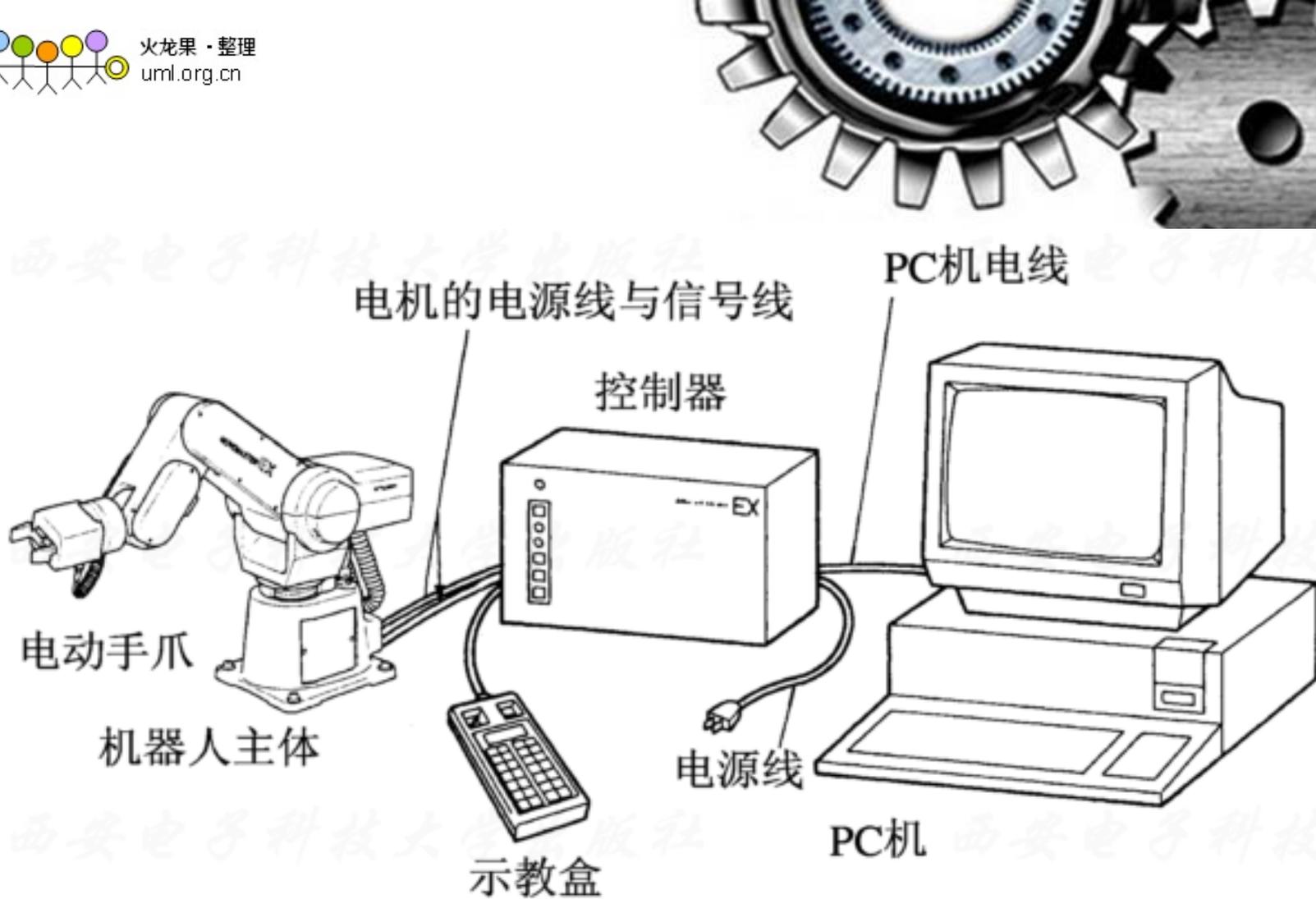
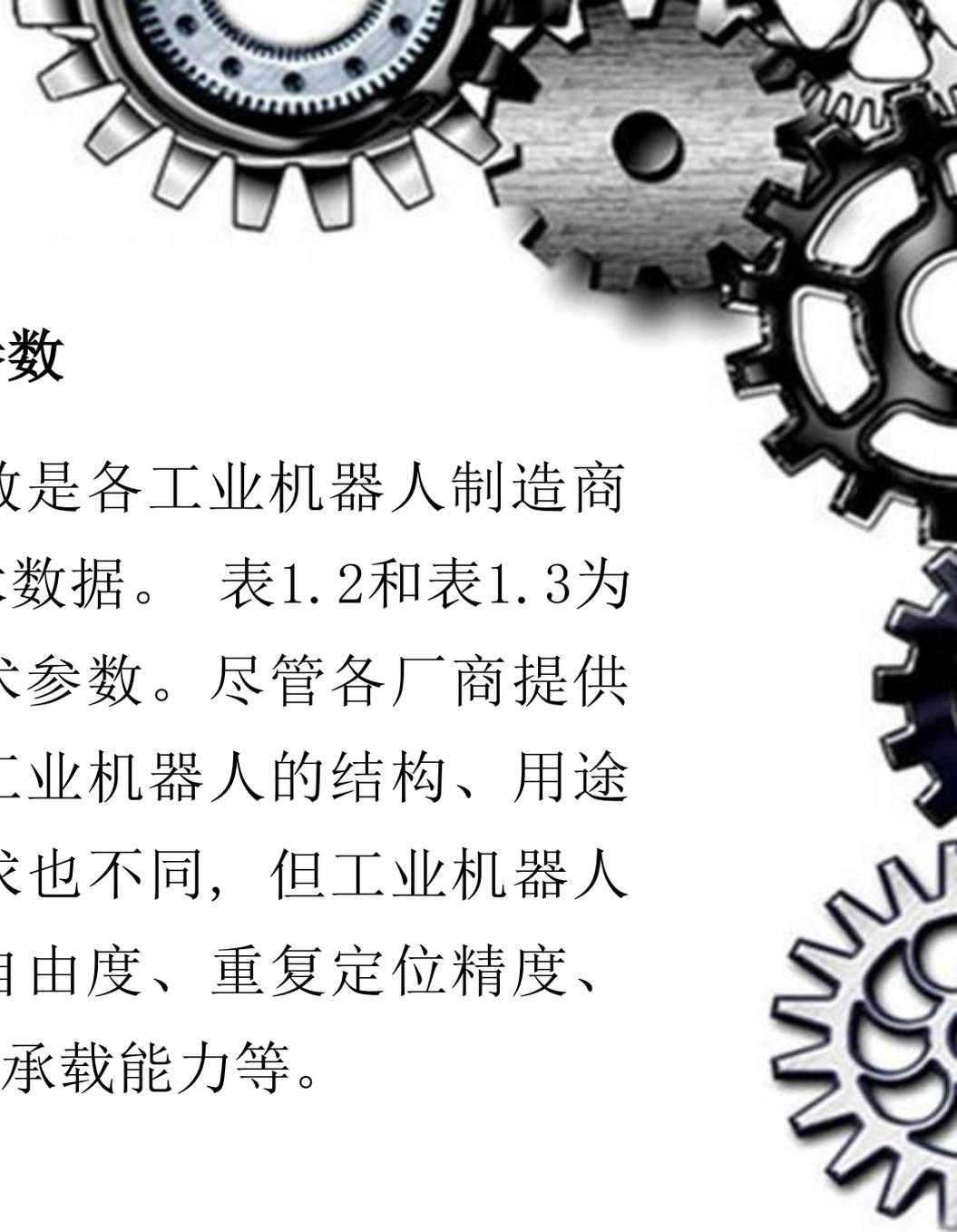


图 1.15 三菱装配机器人系统



1.3.2 工业机器人的技术参数

工业机器人的技术参数是各工业机器人制造商在产品供货时所提供的技术数据。表1.2和表1.3为两种工业机器人的主要技术参数。尽管各厂商提供的技术参数不完全一样，工业机器人的结构、用途等有所不同，且用户的要求也不同，但工业机器人的主要技术参数一般应有自由度、重复定位精度、工作范围、最大工作速度和承载能力等。

表1.2 三菱装配机器人Movemaster EX RV-M1的主要技术参数

项 目		5 自由度，立式关节式机器人技术参数
工作空间	腰部转动	300°(最大角速度 120°/s)
	肩部转动	130°(最大角速度 72°/s)
	肘部转动	110°(最大角速度 190°/s)
	腕部俯仰	±90°(最大角速度 100°/s)
	腕部翻转	±180°(最大角速度 163°/s)
臂长	上臂	250 mm
	前臂	160 mm
承载能力		最大 1.2 kg(包括手爪)
最大线速度		1000 mm/s(腕表面)
重复定位精度		0.3 mm(腕旋转中心)
驱动系统		直流伺服电机
机器人重量		约 19 kg
电机功耗		J1 到 J3 轴: 30 W; J4、J5 轴: 11 W



表1.3 PUMA 562机器人的主要技术参数

项 目	技术参数
自由度	6
驱动	直流伺服电机
手爪控制	气动
控制器	系统机
重复定位精度	± 0.1 mm
承载能力	4.0 kg
手腕中心最大距离	866 mm
直线最大速度	0.5 m/s
功率要求	1150 W
重量	182 kg

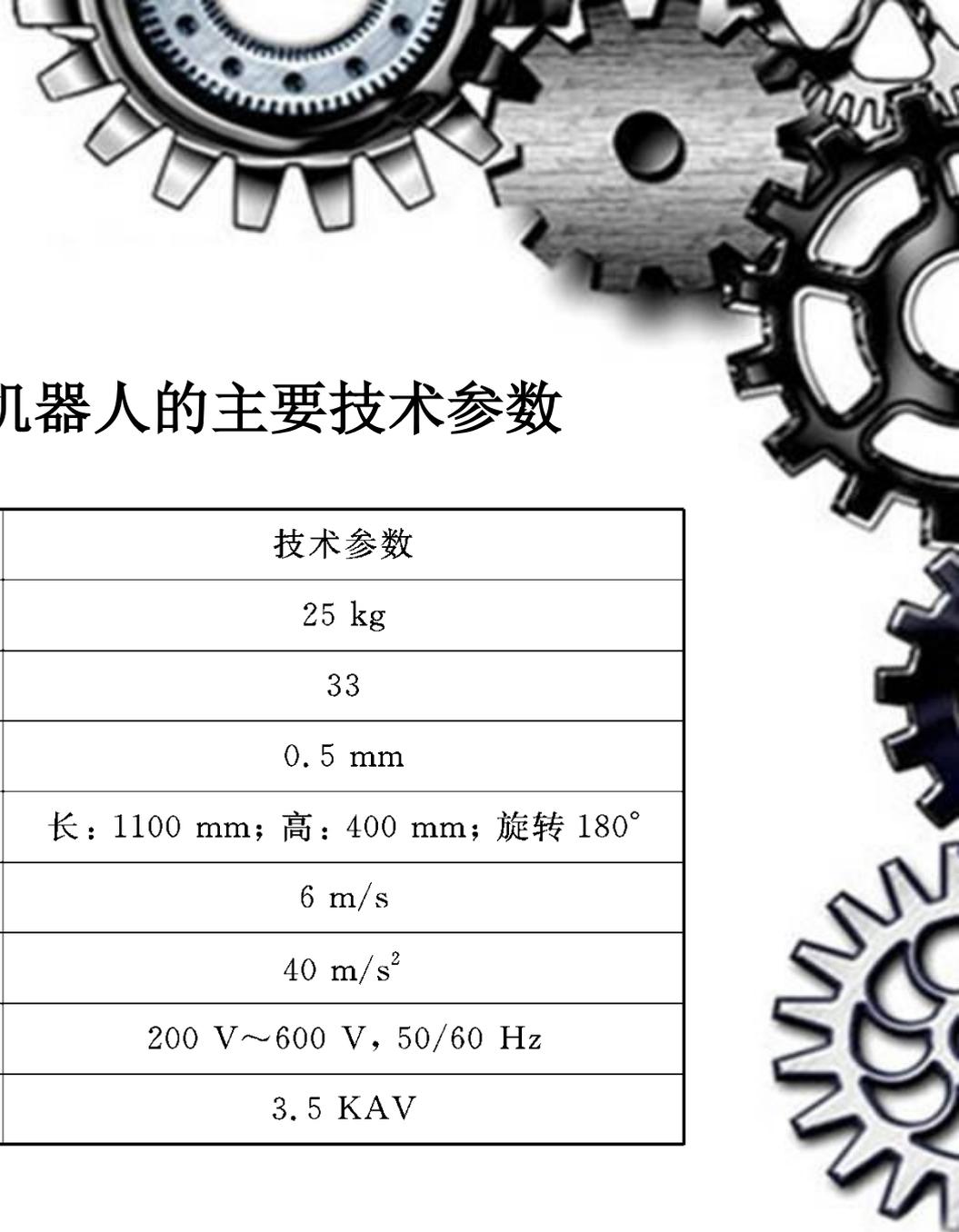


表1.4 BR-210 并联机器人的主要技术参数

项 目	技术参数
载重能力	25 kg
轴数	33
重复定位精度	0.5 mm
工作范围	长：1100 mm；高：400 mm；旋转 180°
最大速度	6 m/s
最大加速度	40 m/s ²
电源电压	200 V~600 V, 50/60 Hz
额定功率	3.5 KAV



1. 自由度(Degrees of Freedom)

自由度是指机器人所具有的独立坐标轴运动的数目,不应包括手爪(末端操作器)的开合自由度。在三维空间中描述一个物体的位置和姿态(简称位姿)需要六个自由度。但是,工业机器人的自由度是根据其用途而设计的,可能小于六个自由度,也可能大于六个自由度。例如, A4020装配机器人具有四个自由度,可以在印刷电路板上接插电子器件; PUMA 562机器人具有六个自由度,如图1.16所示,可以进行复杂空间曲面的弧焊作业。从运动学的观点看,在完成某一特定作业时具有多余自由度的机器人,就叫做冗余自由度机器人。例如, PUMA 562机器人去执行印刷电路板上接插电子器件的作业时就成为冗余自由度机器人。利用冗余自由度可以增加机器人的灵活性、躲避障碍物和改善动力性能。人的手臂(大臂、小臂、手腕)共有七个自由度,所以工作起来很灵巧,手部可回避障碍而从不同方向到达同一个目的点。

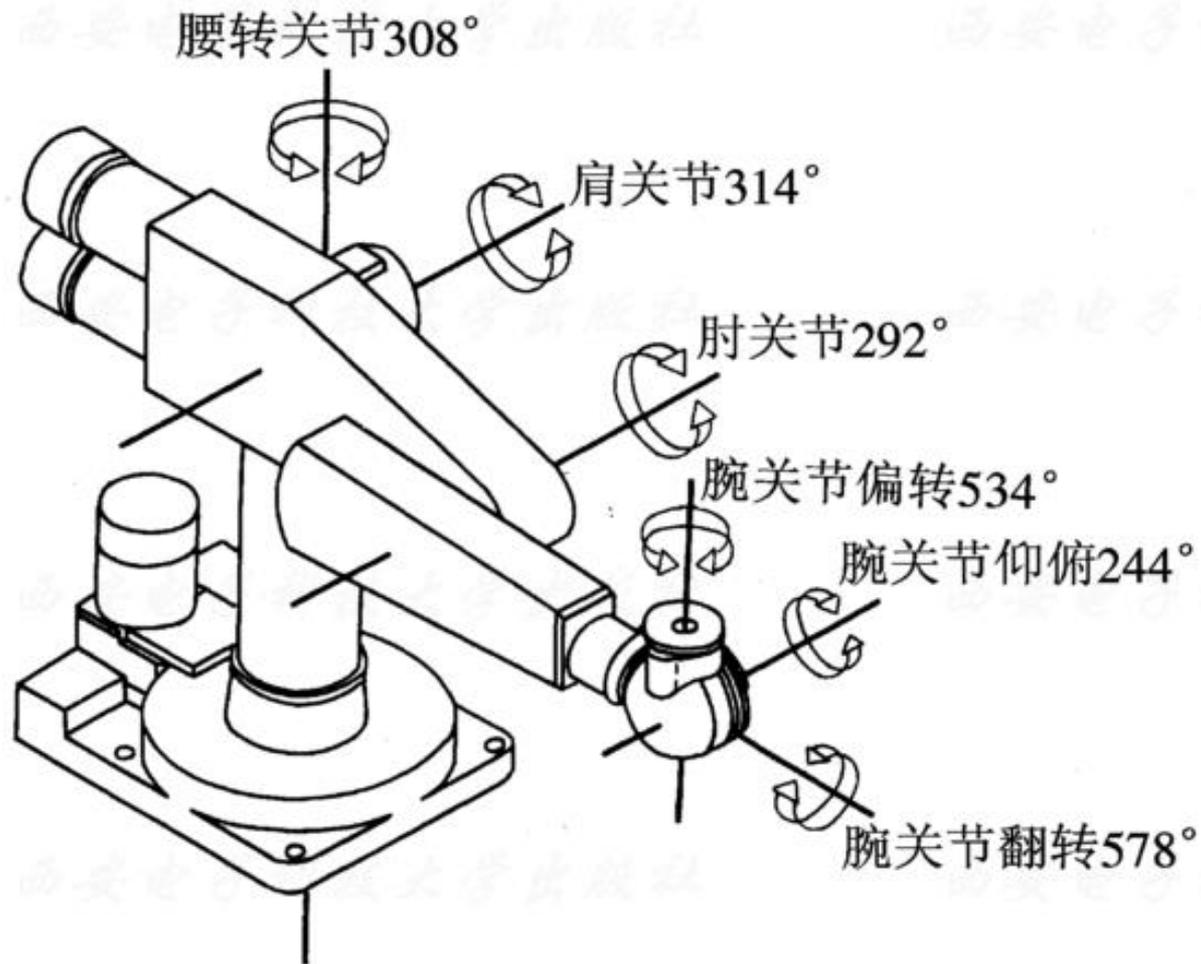


图 1.16 PUMA 562工业机器人



2. 定位精度(Positioning Accuracy)

工业机器人精度是指定位精度和重复定位精度。定位精度是指机器人手部实际到达位置与目标位置之间的差异。重复定位精度是指机器人重复定位其手部于同一目标位置的能力，可以用标准偏差这个统计量来表示，它是衡量一系列误差值的密集度(即重复度)，如图1.17所示。

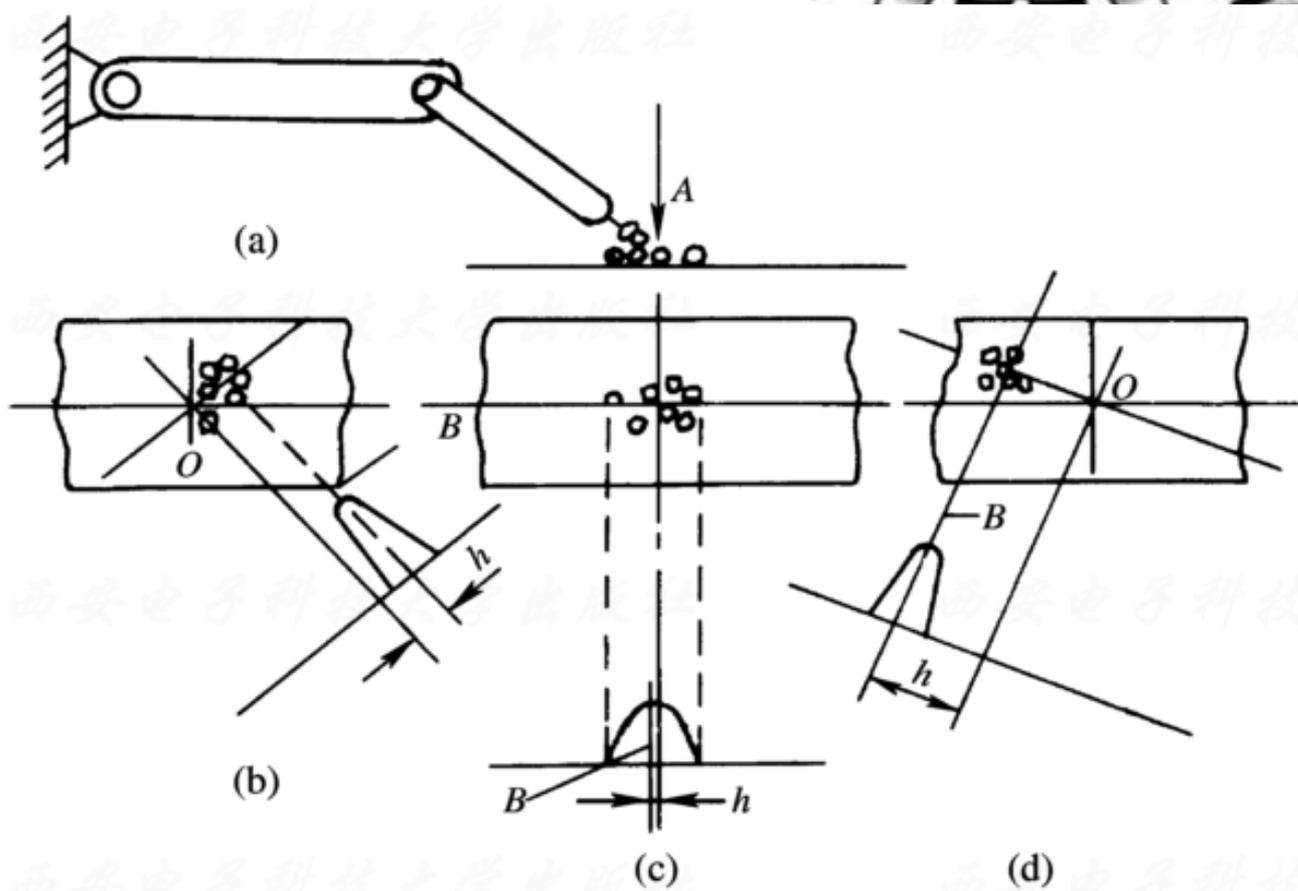
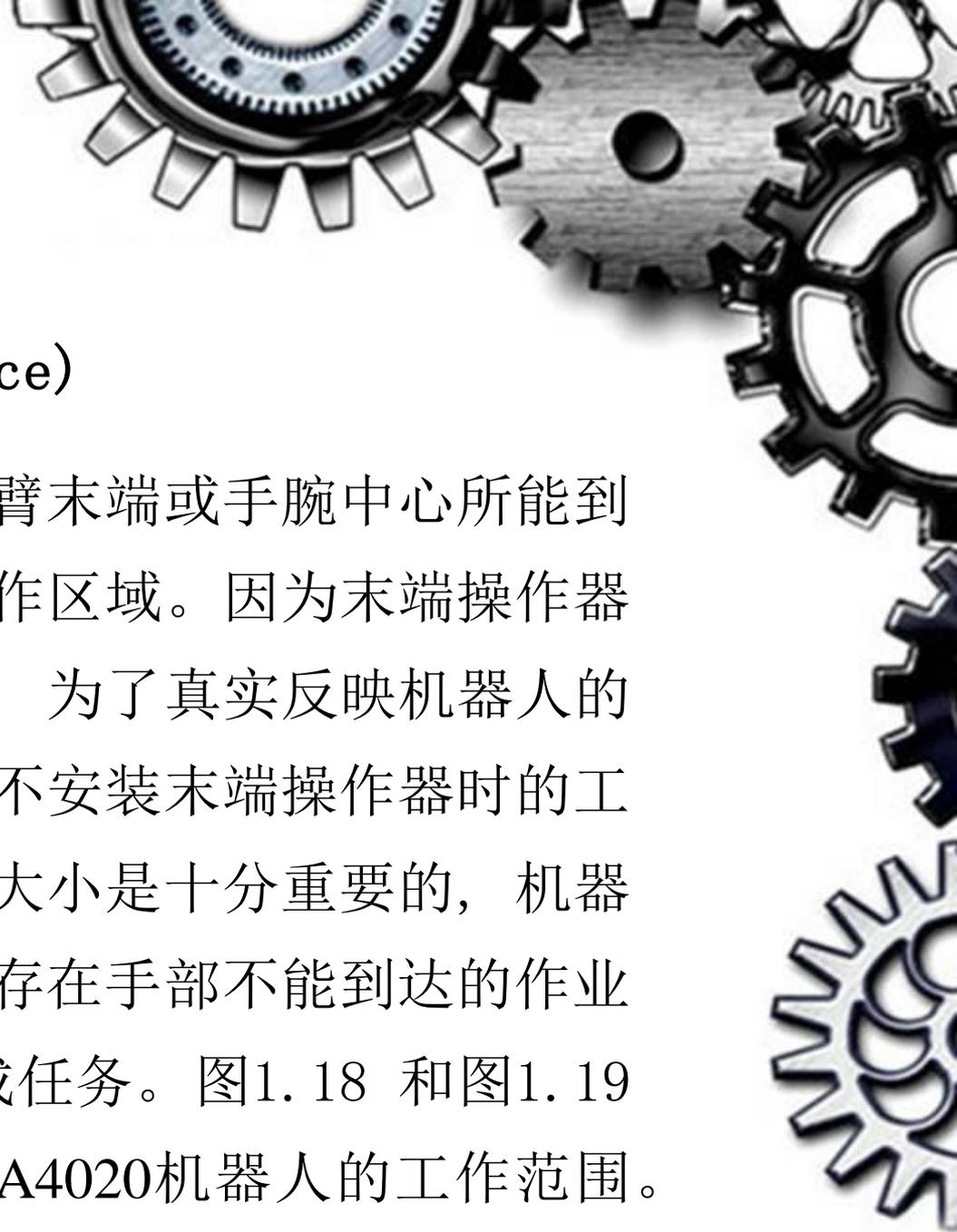


图 1.17 工业机器人定位精度和重复定位精度的典型情况
(a) 重复定位精度的测量； (b) 合理定位精度， 良好重复定位精度；
(c) 良好定位精度， 很差重复定位精度； (d) 很差定位精度， 良好重复定位精度



3. 工作范围 (Work Space)

工作范围是指机器人手臂末端或手腕中心所能到达的所有点的集合，也叫工作区域。因为末端操作器的尺寸和形状是多种多样的，为了真实反映机器人的特征参数，所以，这里是指不安装末端操作器时的工作区域。工作范围的形状和大小是十分重要的，机器人在执行作业时可能会因为存在手部不能到达的作业死区 (Dead Zone) 而不能完成任务。图1.18 和图1.19 所示分别为PUMA机器人和A4020机器人的工作范围。

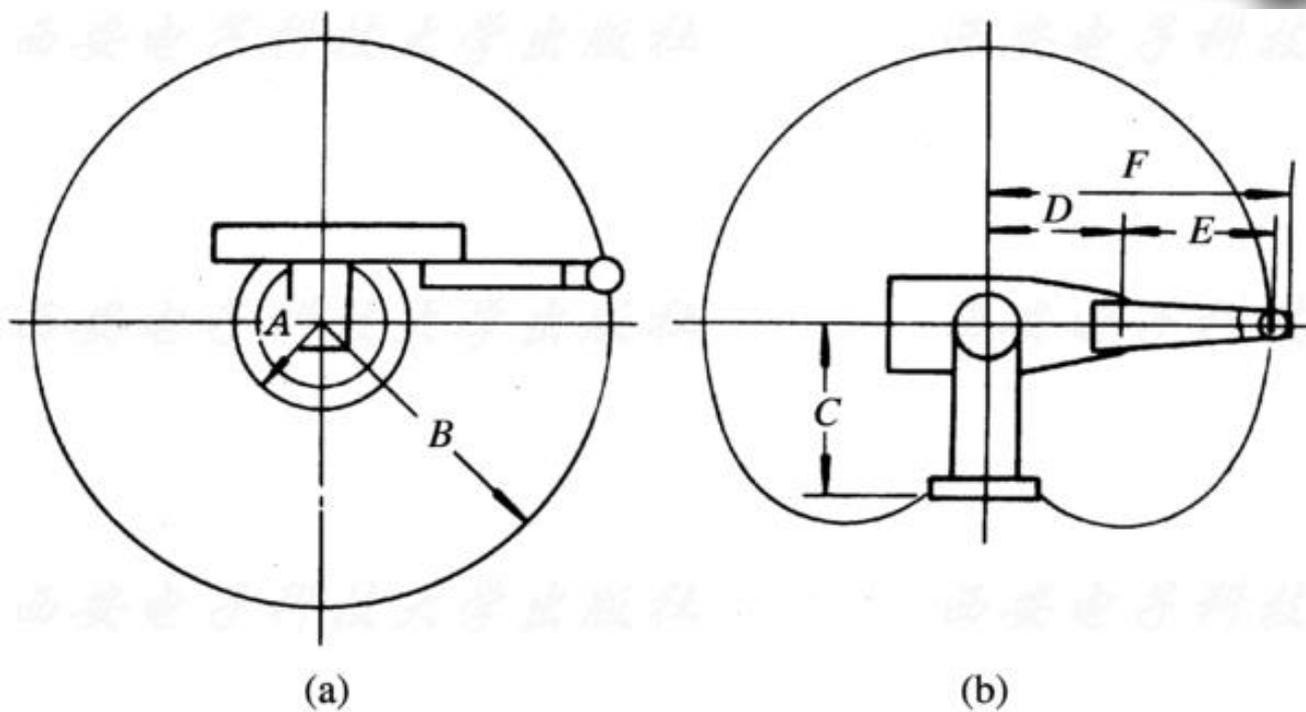


图 1.18 PUMA机器人工作范围
(a) 顶视图; (b) 侧视图

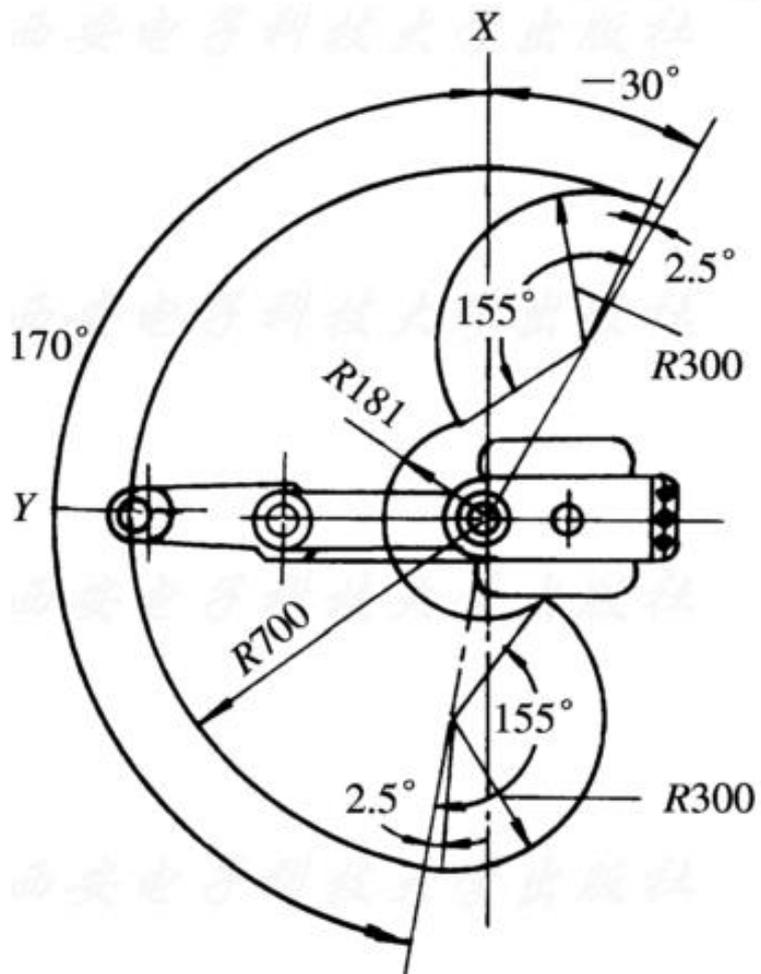
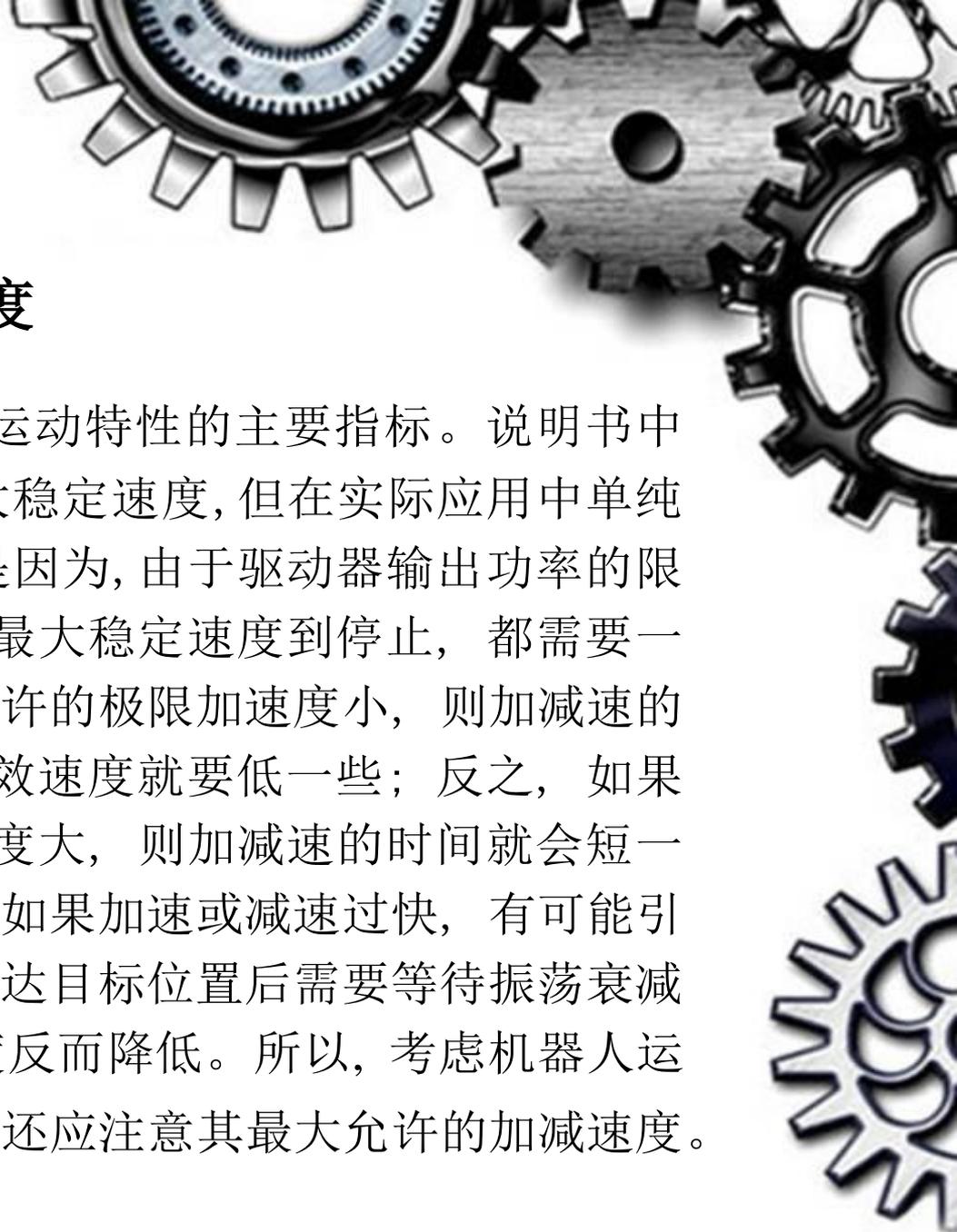
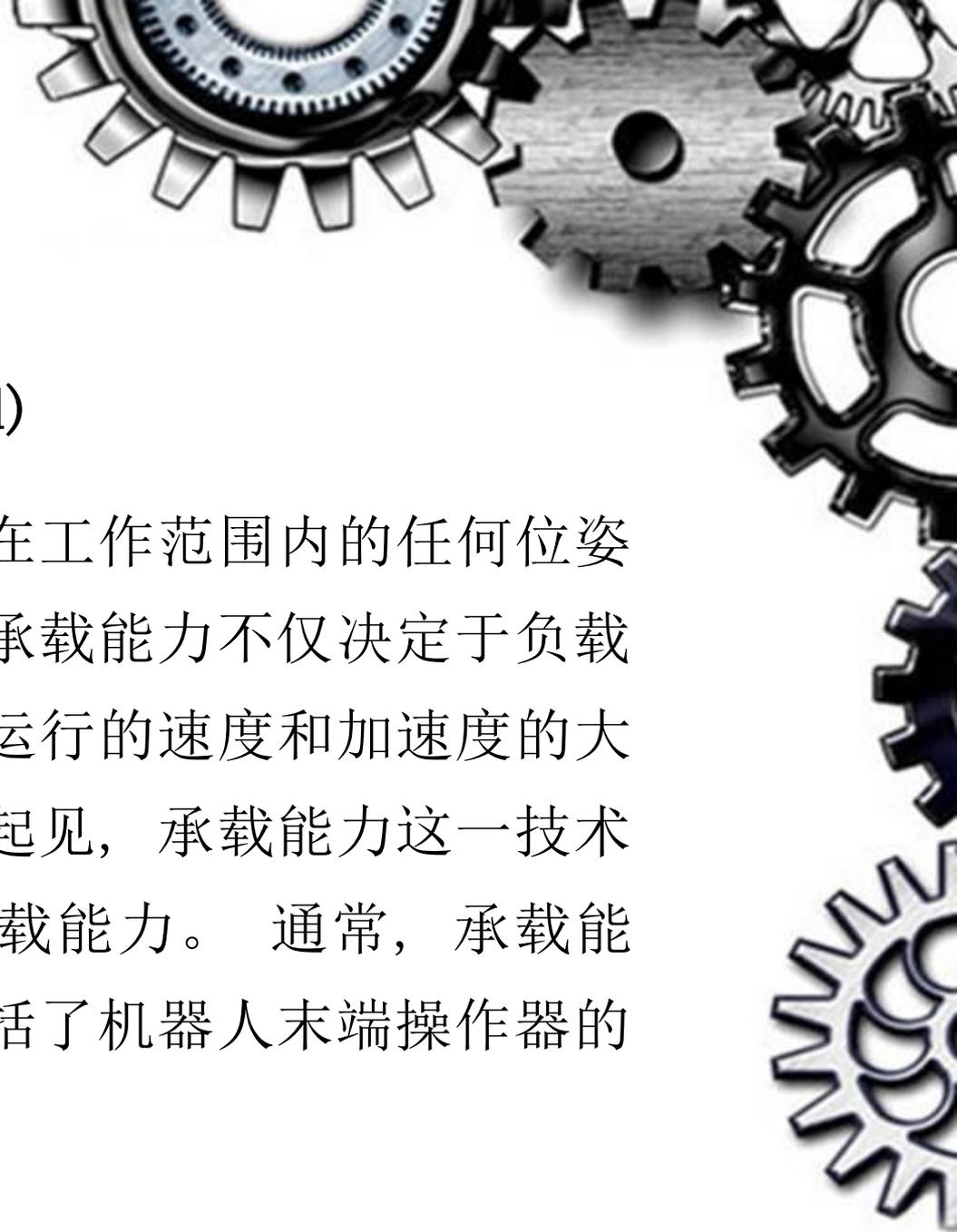


图 1.19 A4020型SCARA机器人工作范围



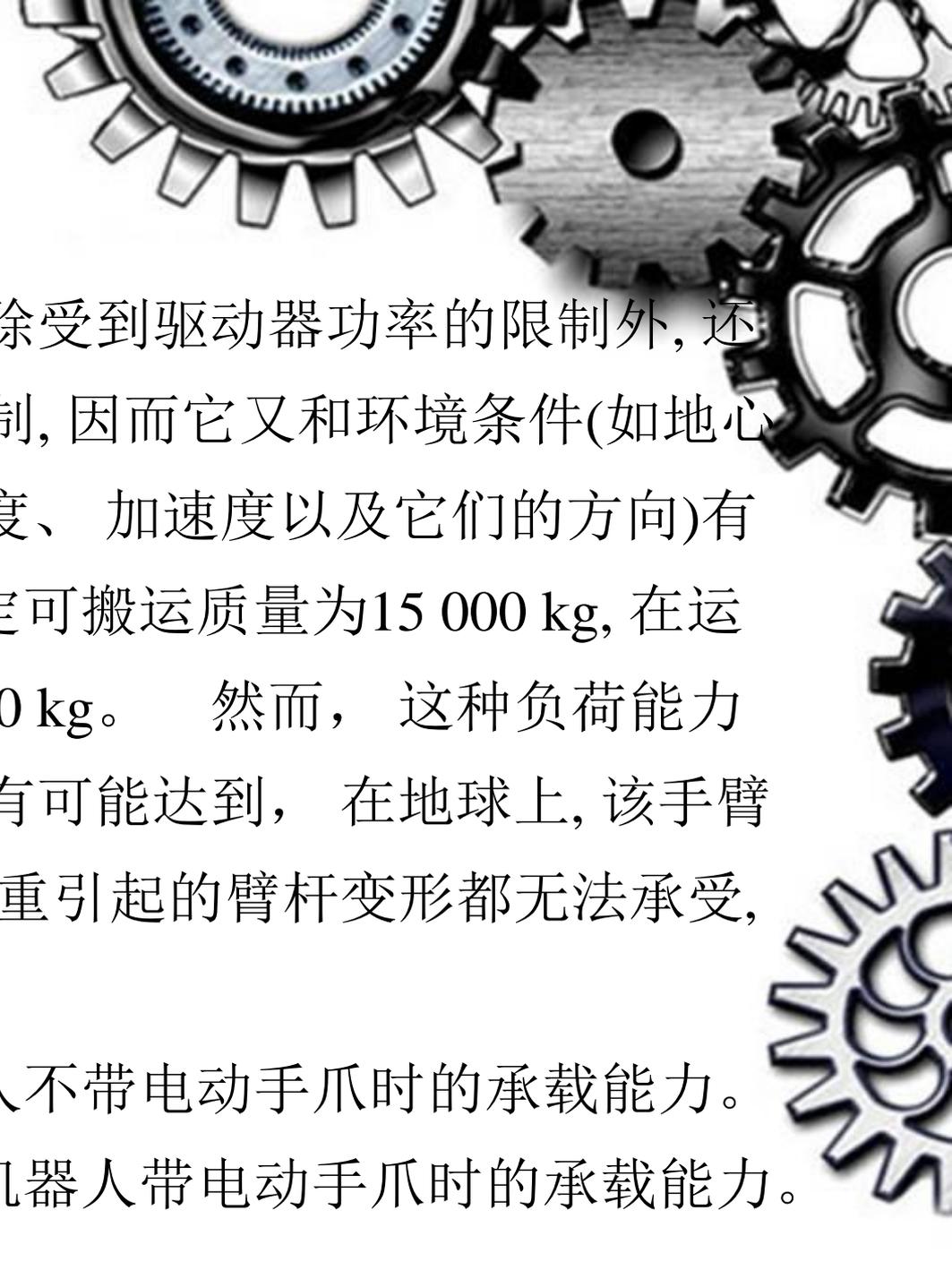
4. 速度 (Speed) 和加速度

速度和加速度是表明机器人运动特性的主要指标。说明书中通常提供了主要运动自由度的最大稳定速度,但在实际应用中单纯考虑最大稳定速度是不够的。这是因为,由于驱动器输出功率的限制,从启动到达最大稳定速度或从最大稳定速度到停止,都需要一定时间。如果最大稳定速度高,允许的极限加速度小,则加减速的时间就会长一些,对应用而言的有效速度就要低一些;反之,如果最大稳定速度低,允许的极限加速度大,则加减速的时间就会短一些,这有利于有效速度的提高。但如果加速或减速过快,有可能引起定位时超调或振荡加剧,使得到达目标位置后需要等待振荡衰减的时间增加,则也可能使有效速度反而降低。所以,考虑机器人运动特性时,除注意最大稳定速度外,还应注意其最大允许的加减速速度。



5. 承载能力(Payload)

承载能力是指机器人在工作范围内的任何位姿上所能承受的最大质量。承载能力不仅决定于负载的质量，而且还与机器人运行的速度和加速度的大小和方向有关。为了安全起见，承载能力这一技术指标是指高速运行时的承载能力。通常，承载能力不仅指负载，而且还包括了机器人末端操作器的质量。



机器人有效负载的大小除受到驱动器功率的限制外,还受到杆件材料极限应力的限制,因而它又和环境条件(如地心引力)、运动参数(如运动速度、加速度以及它们的方向)有关。如加拿大手臂,它的额定可搬运质量为15 000 kg,在运动速度较低时能达到 30 000 kg。然而,这种负荷能力只是在太空中失重条件下才有可能达到,在地球上,该手臂本身的重量达450 kg,它连自重引起的臂杆变形都无法承受,更谈不上搬运质量了。

图1.20为三菱装配机器人不带电动手爪时的承载能力。

图1.21所示为三菱装配机器人带电动手爪时的承载能力。

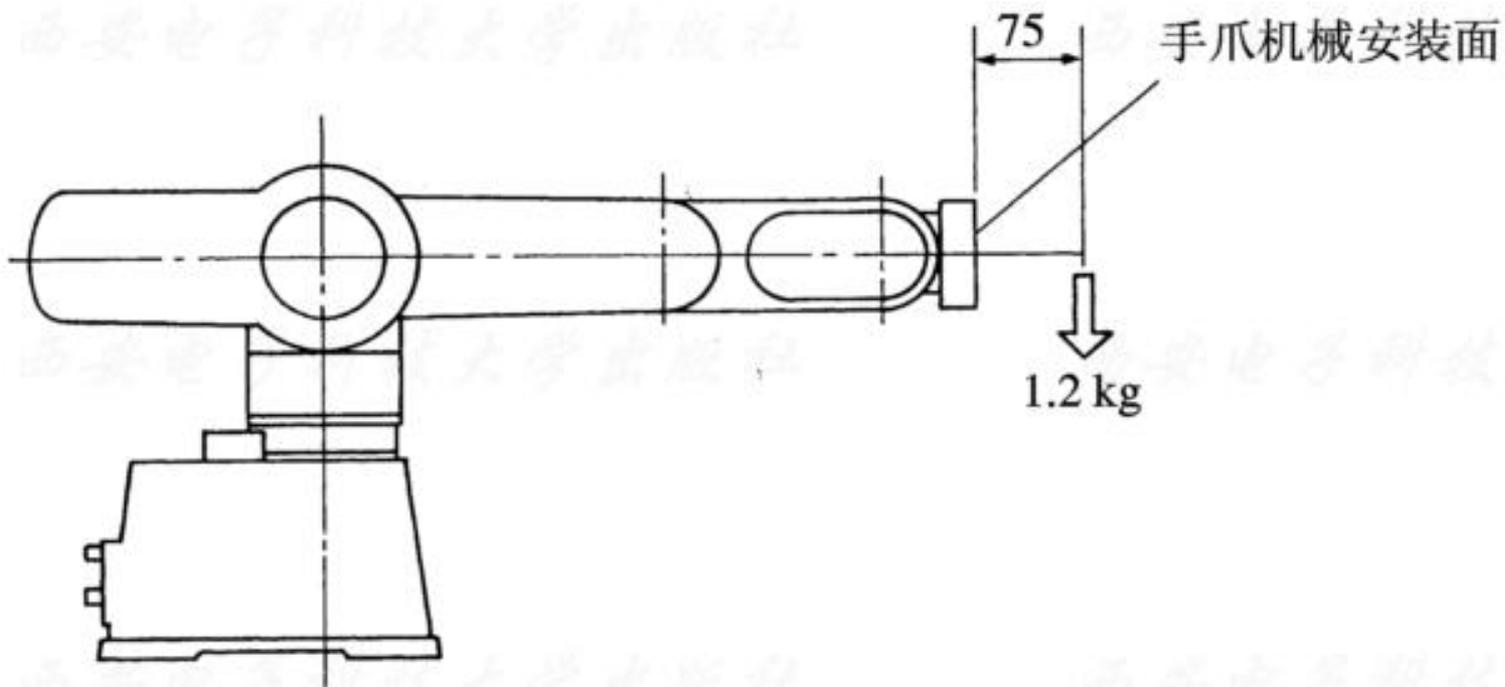


图 1.20 三菱装配机器人不带电动手爪时的承载能力

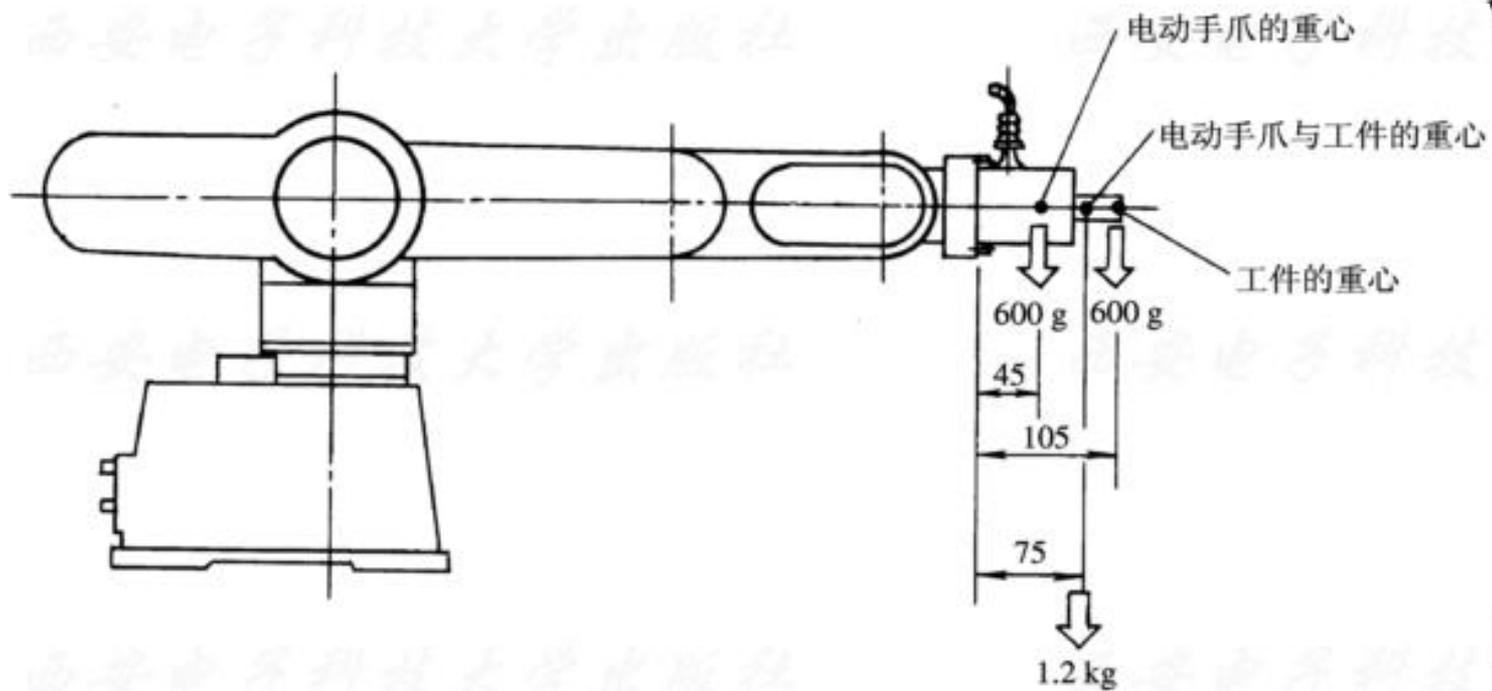


图 1.21 三菱装配机器人带电动手爪时的承载能力



1.3.3 工业机器人的坐标

如图1.22所示，工业机器人的坐标形式有直角坐标型、圆柱坐标型、球坐标型、关节坐标型和平面关节型。

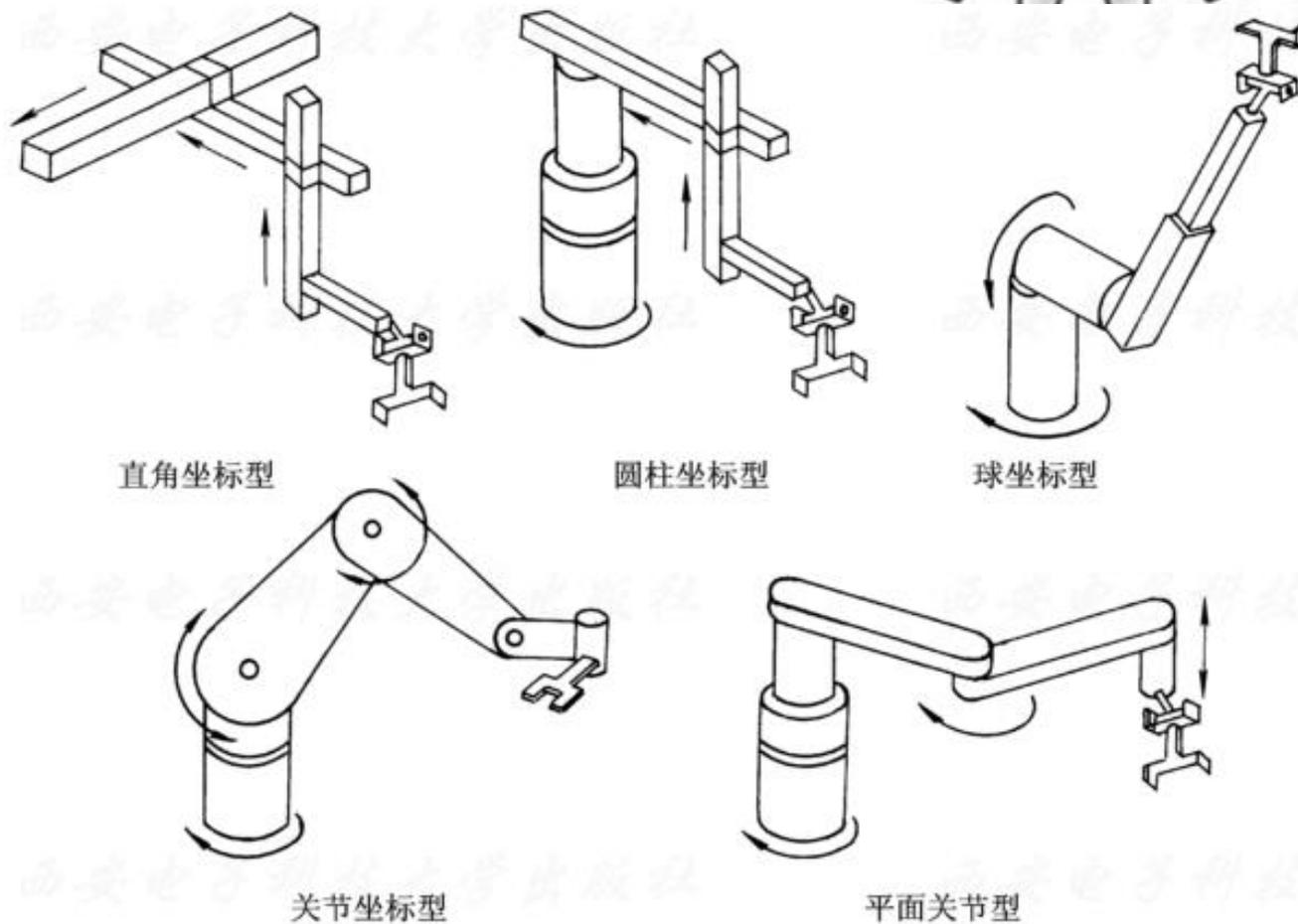


图 1.22 工业机器人的几种坐标形式

1. 直角坐标 / 笛卡儿坐标 / 台架型 (3P)

这种机器人由3个线性关节组成,这3个关节用来确定末端操作器的位置,通常还带有附加的旋转关节,用来确定末端操作器的姿态。这种机器人在 x 、 y 、 z 轴上的运动是独立的,运动方程可独立处理,且方程是线性的,因此很容易通过计算机控制实现;它可以两端支撑,对于给定的结构长度,刚性最大;它的精度和位置分辨率不随工作场合而变化,容易达到高精度。但是,它的操作范围小,手臂收缩的同时又向相反的方向伸出,既妨碍工作,又占地面积大,运动速度低,密封性不好。

图1.23虚线所示为直角坐标机器人的工作空间示意图,它是一个立方体形状。。

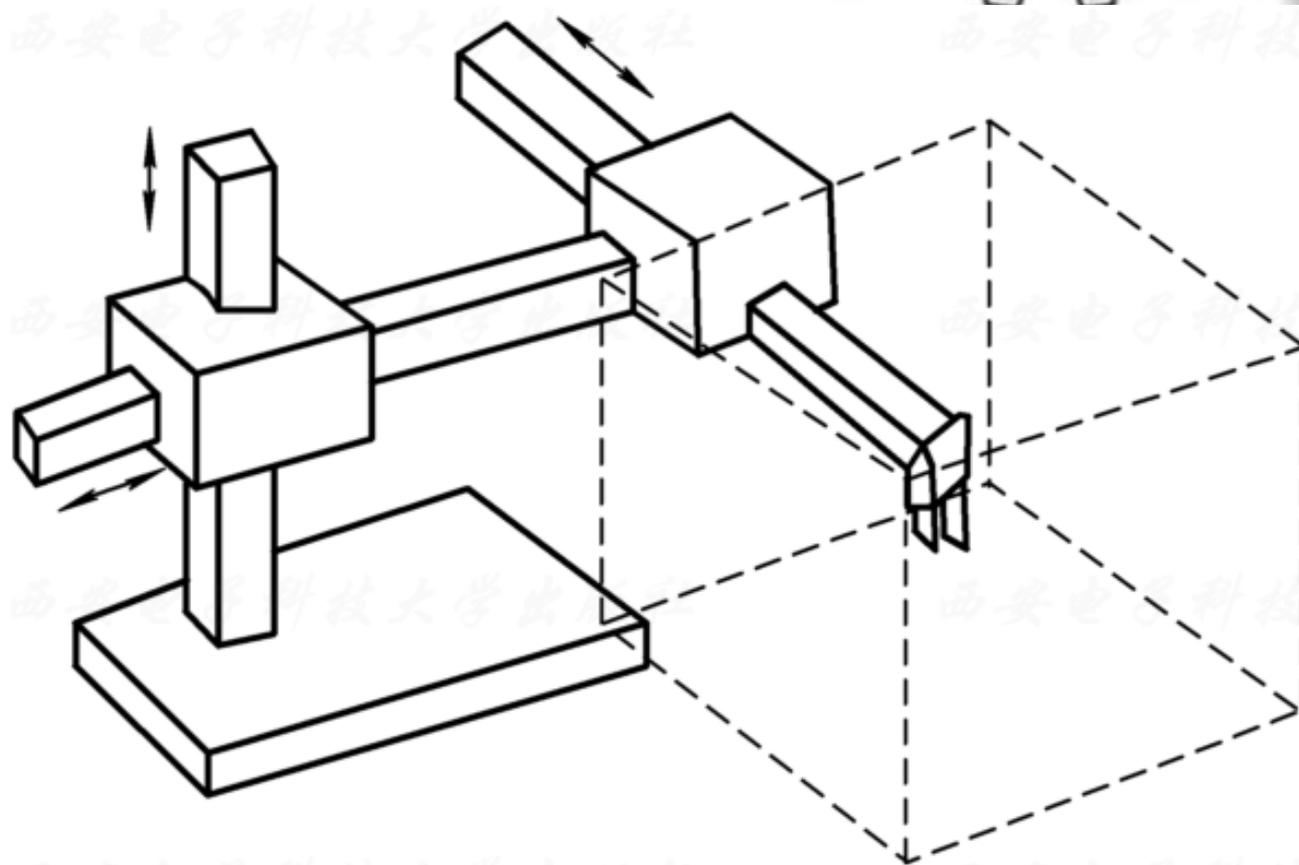
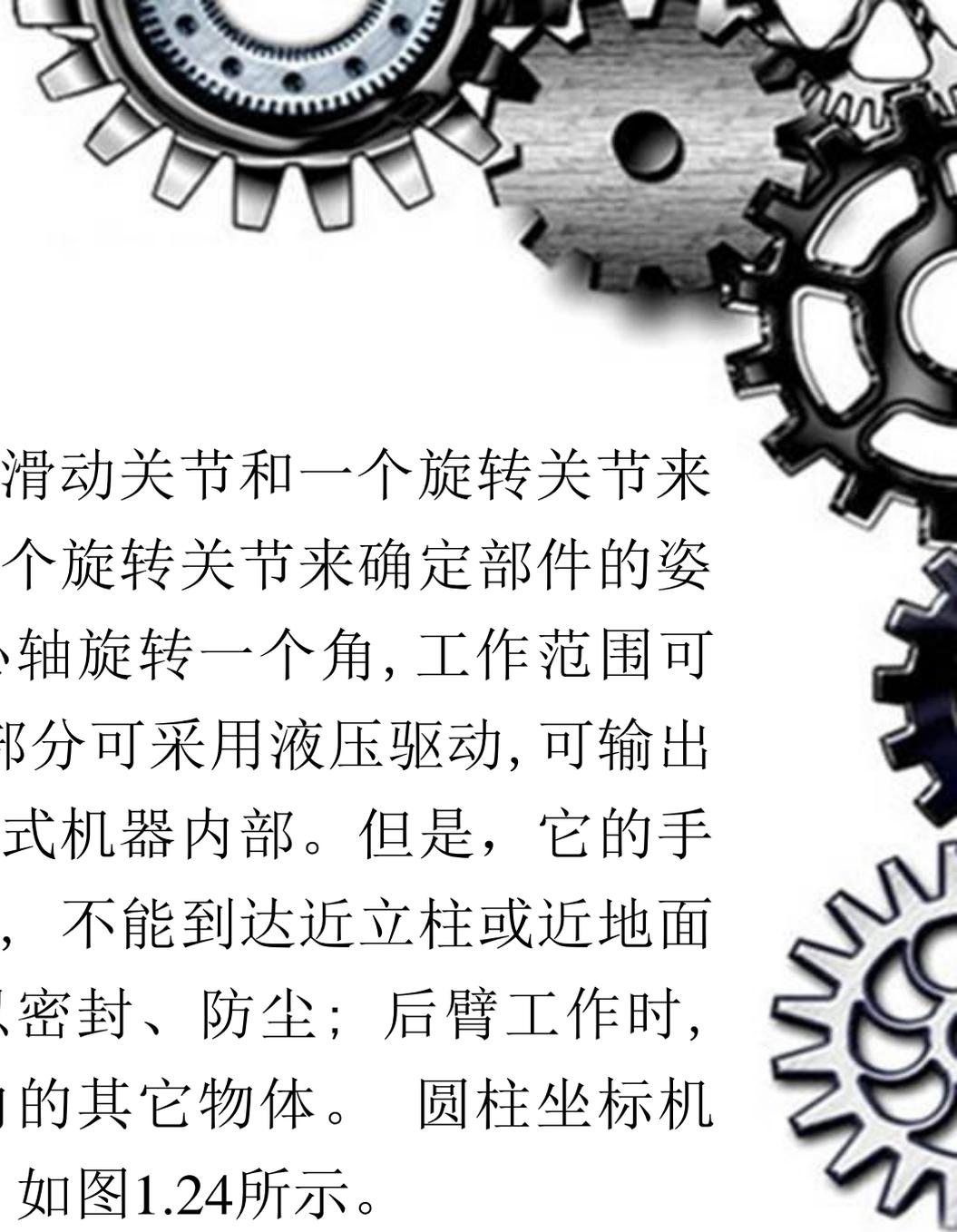


图 1.23 直角坐标机器人的工作空间示意图



2. 圆柱坐标型 (R2P)

圆柱坐标机器人由两个滑动关节和一个旋转关节来确定部件的位置，再附加一个旋转关节来确定部件的姿态。这种机器人可以绕中心轴旋转一个角，工作范围可以扩大，且计算简单；直线部分可采用液压驱动，可输出较大的动力；能够伸入型腔式机器内部。但是，它的手臂可以到达的空间受到限制，不能到达近立柱或近地面的空间；直线驱动部分难以密封、防尘；后臂工作时，手臂后端会碰到工作范围内的其它物体。圆柱坐标机器人的工作范围呈圆柱形状，如图1.24所示。

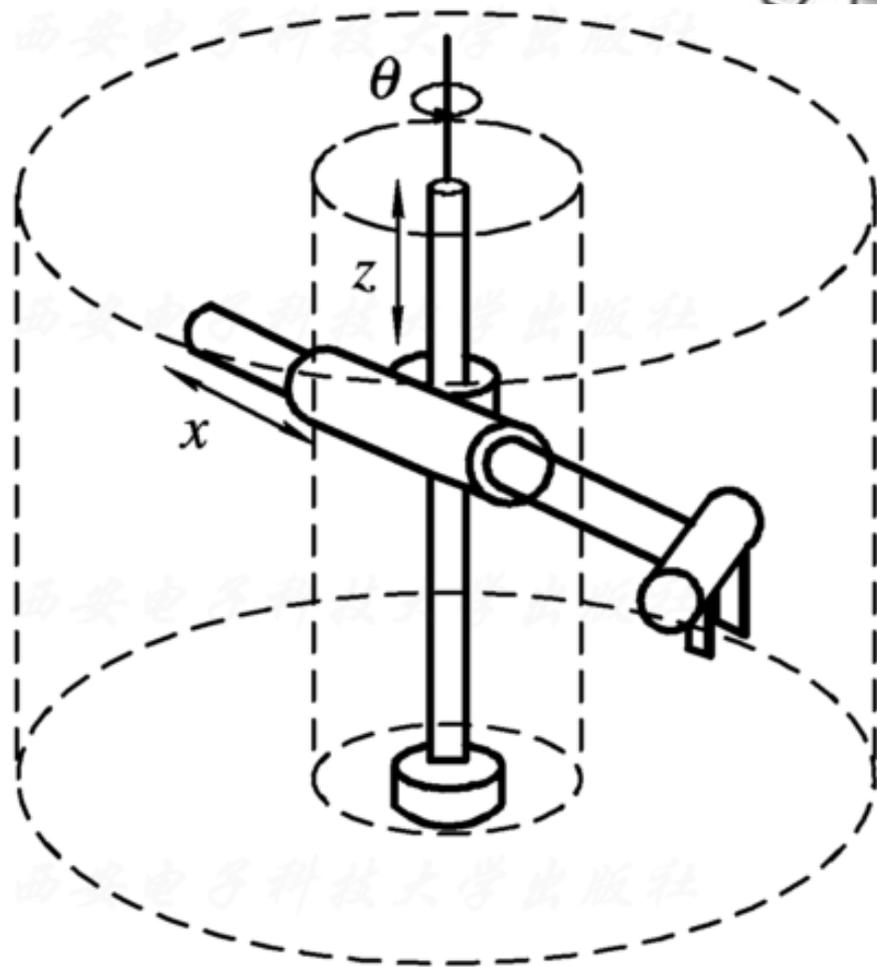


图 1.24 圆柱坐标机器人的工作范围



3. 球坐标型(2RP)

球坐标机器人采用球坐标系，它用一个滑动关节和两个旋转关节来确定部件的位置，再用一个附加的旋转关节确定部件的姿态。这种机器人可以绕中心轴旋转，中心支架附近的工作范围大，两个转动驱动装置容易密封，覆盖工作空间较大。但该坐标复杂，难于控制，且直线驱动装置仍存在密封及工作死区的问题。球坐标机器人的工作范围呈球缺状，如图1.25所示。

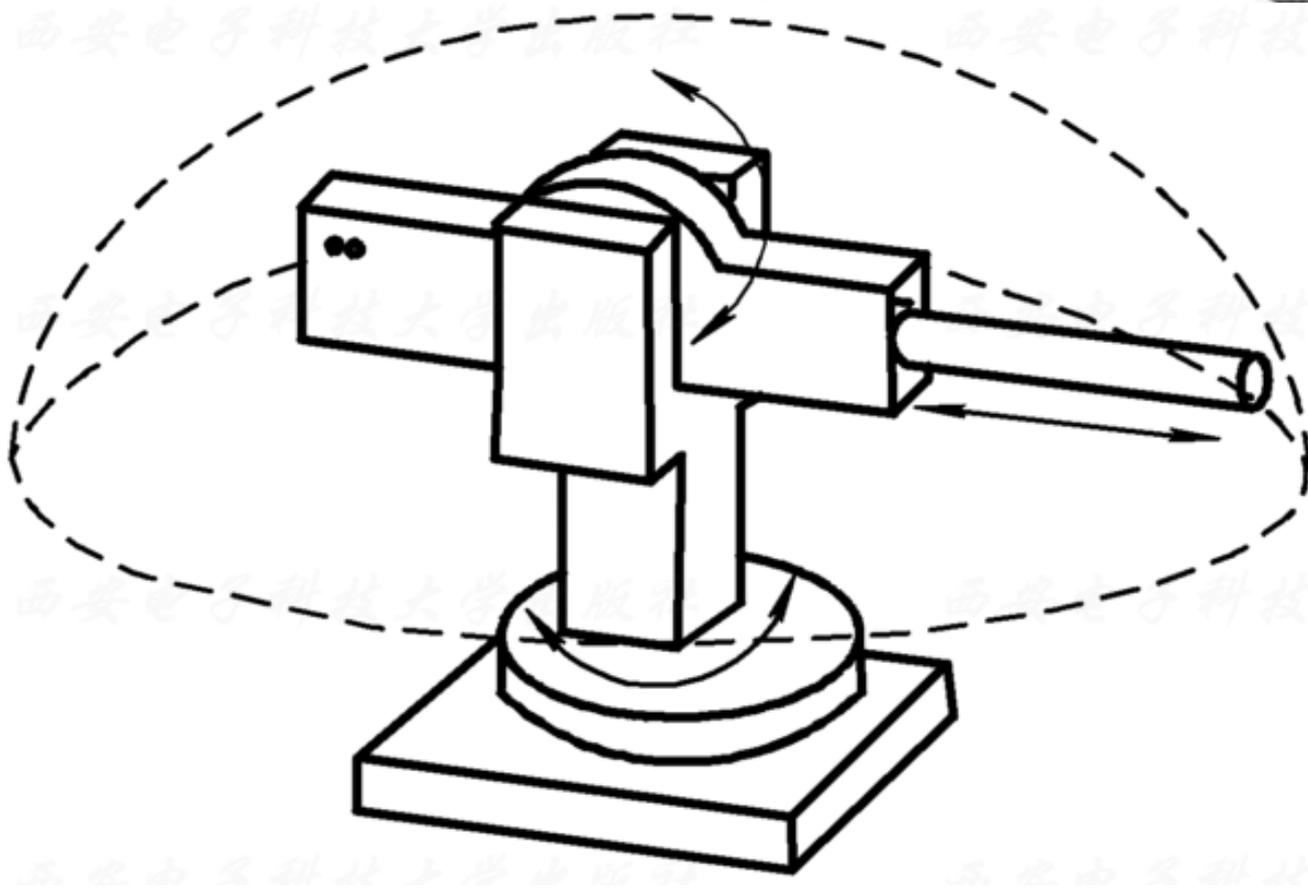
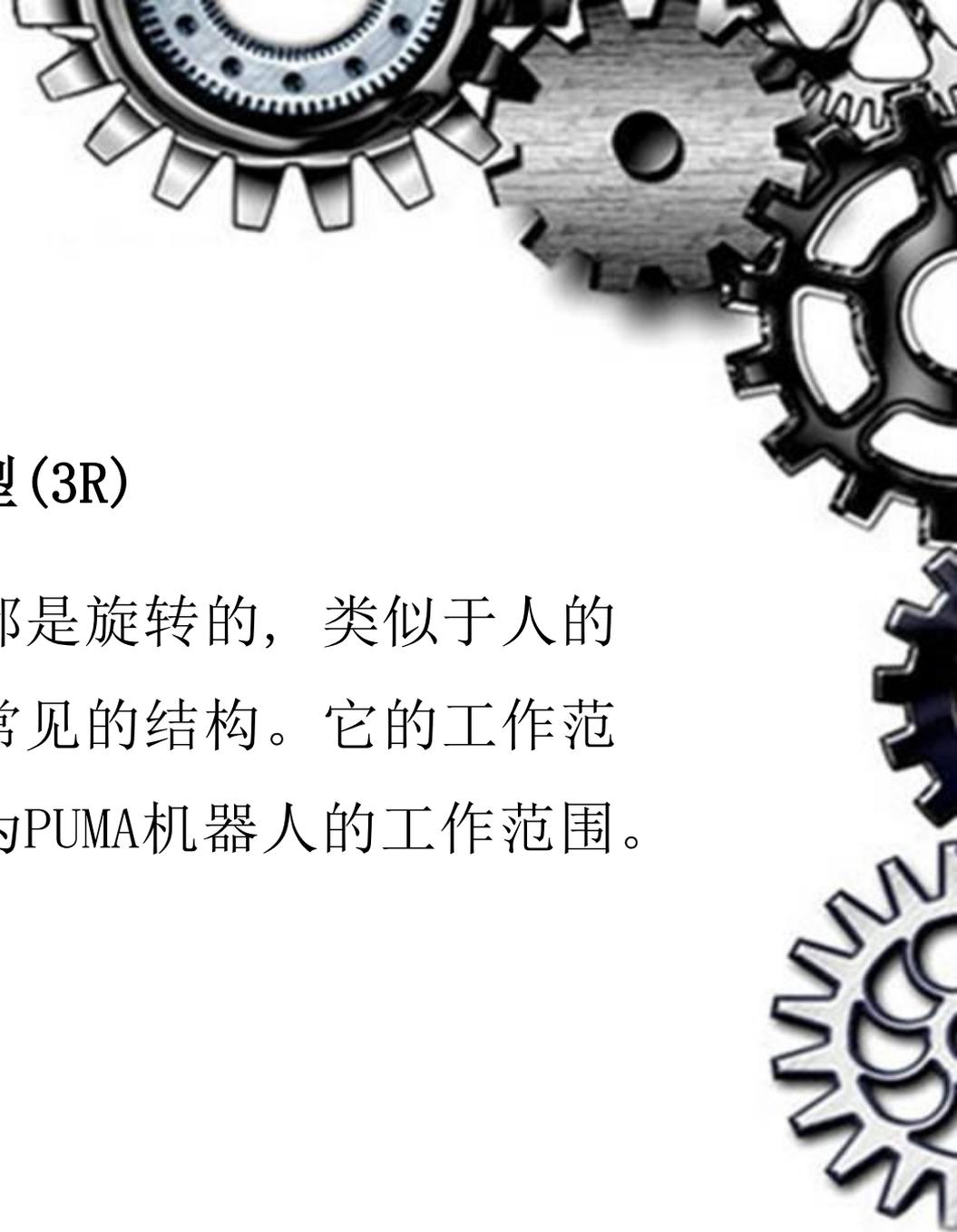


图 1.25 球坐标机器人的工作范围



4. 关节坐标型/拟人型 (3R)

关节机器人的关节全都是旋转的，类似于人的手臂，是工业机器人中最常见的结构。它的工作范围较为复杂，图1.18所示为PUMA机器人的工作范围。

5. 平面关节型

这种机器人可看做是关节坐标式机器人的特例,它只有平行的肩关节和肘关节,关节轴线共面。如SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm)机器人有两个并联的旋转关节,可以使机器人在水平面上运动,此外,再用一个附加的滑动关节做垂直运动。SCARA机器人常用于装配作业,最显著的特点是它们在 x - y 平面上的运动具有较大的柔性,而沿 z 轴具有很强的刚性,所以,它具有选择性的柔性。这种机器人在装配作业中获得了较好的应用。平面关节机器人的工作空间如图1.26所示。



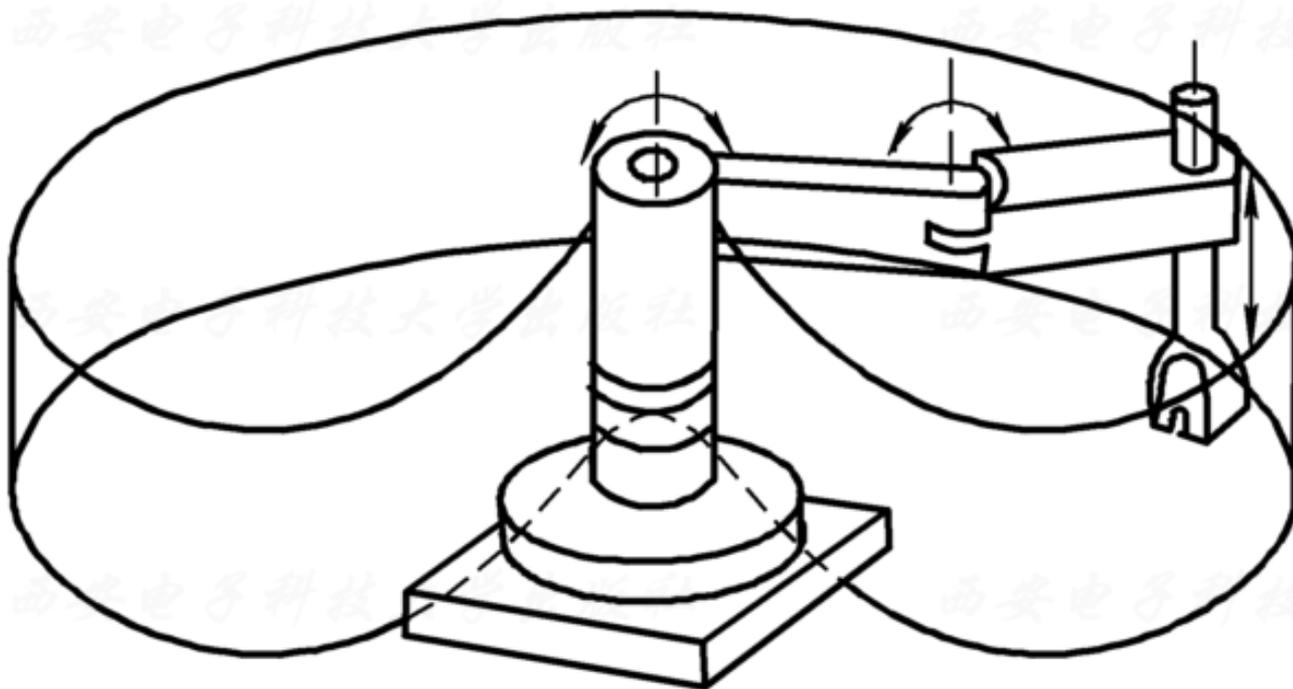
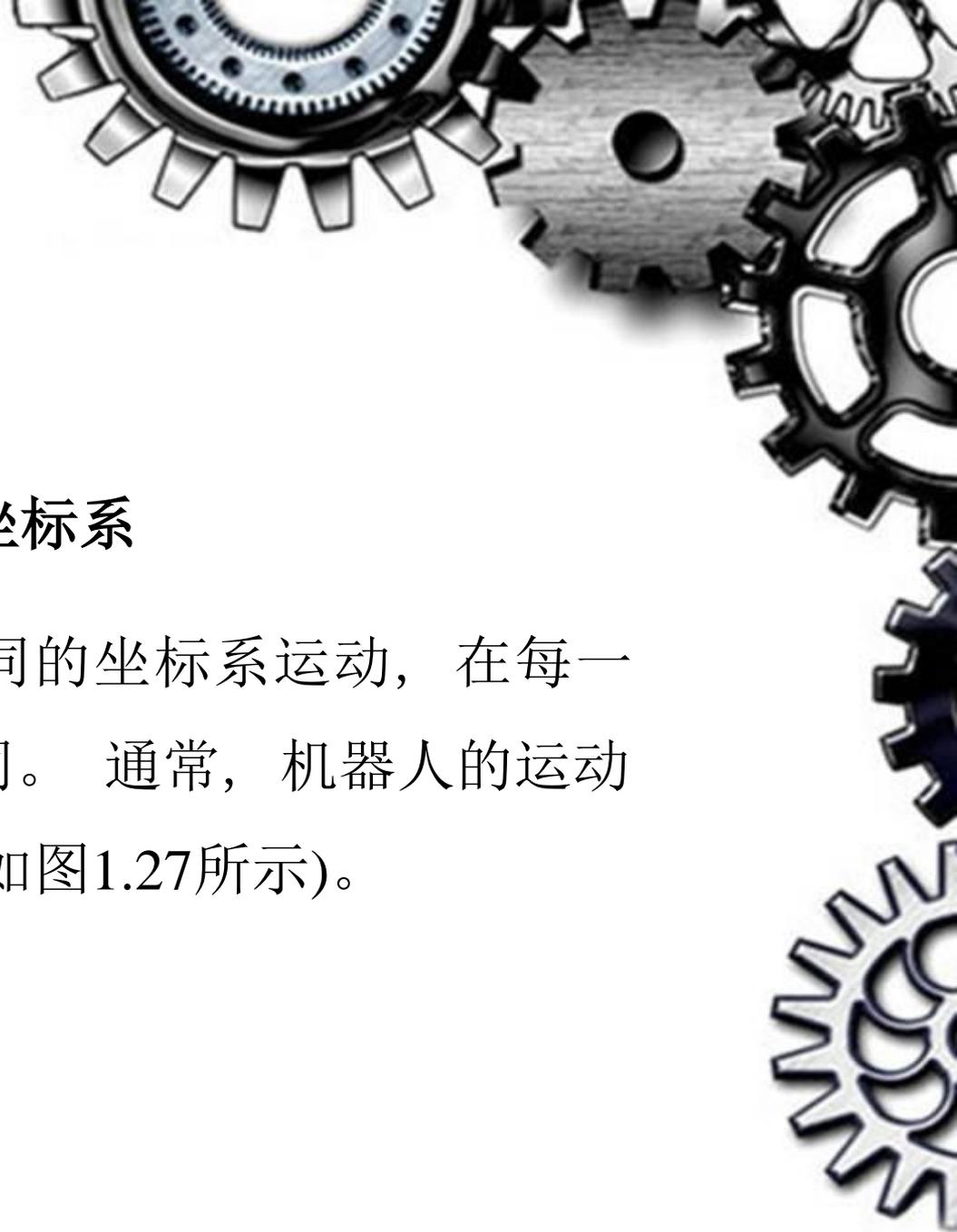


图 1.26 平面关节机器人的工作空间



1.3.4 工业机器人的参考坐标系

机器人可以相对于不同的坐标系运动，在每一种坐标系中的运动都不相同。通常，机器人的运动在以下三种坐标系中完成(如图1.27所示)。

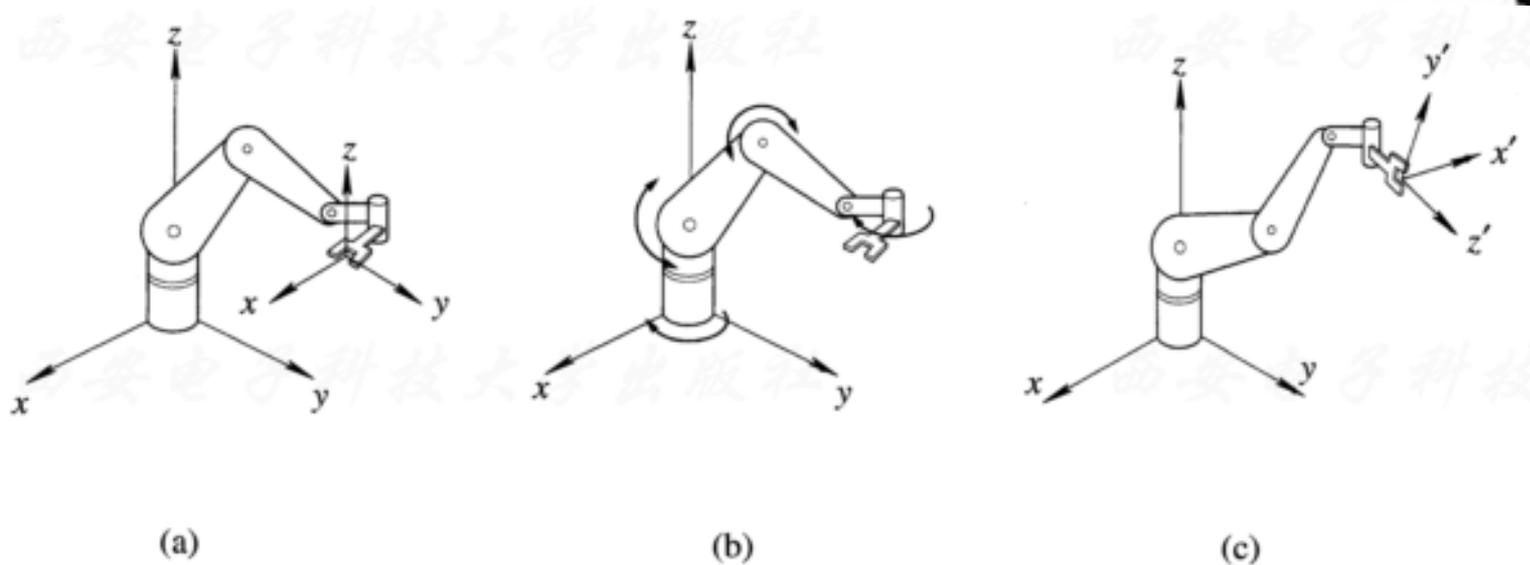
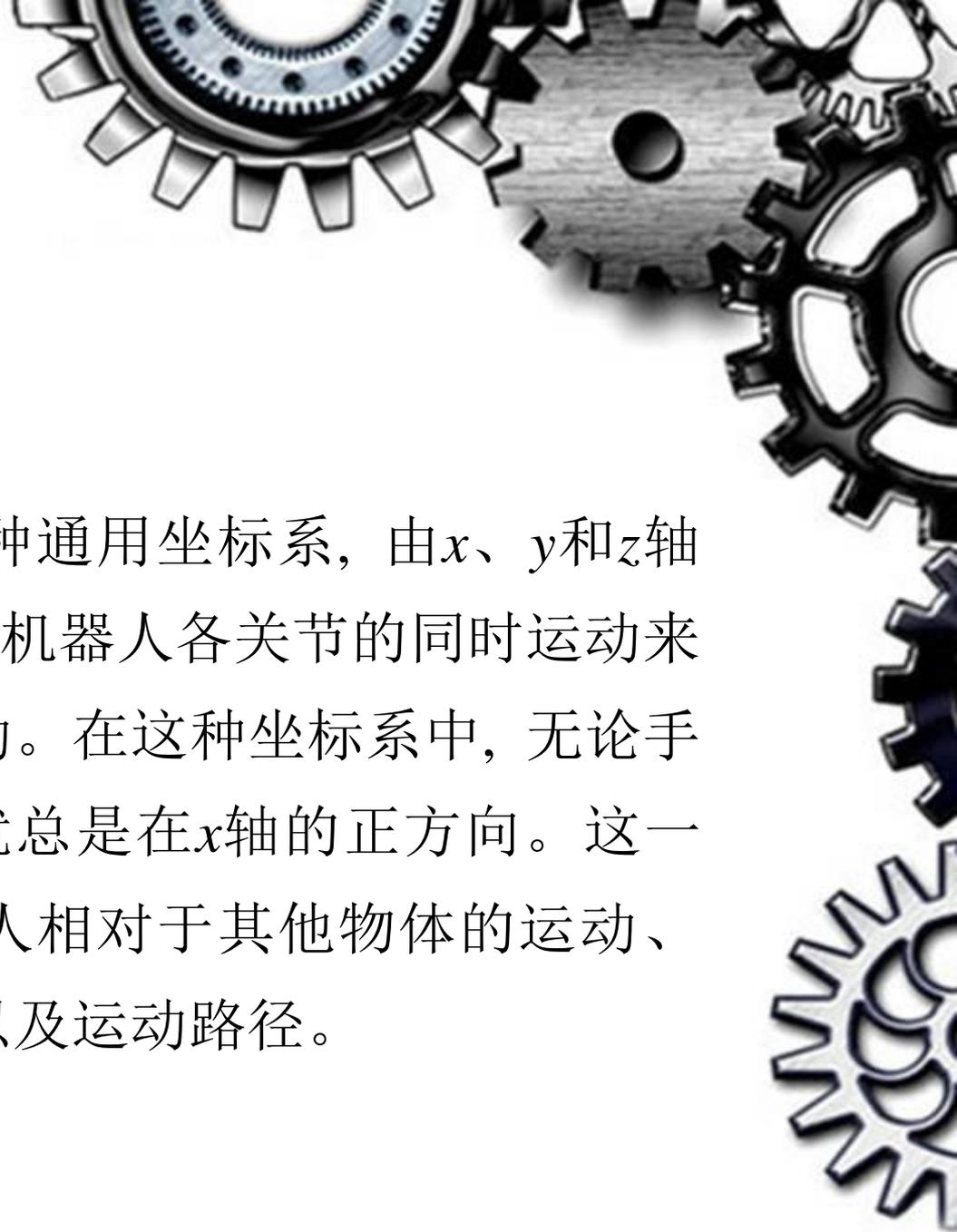
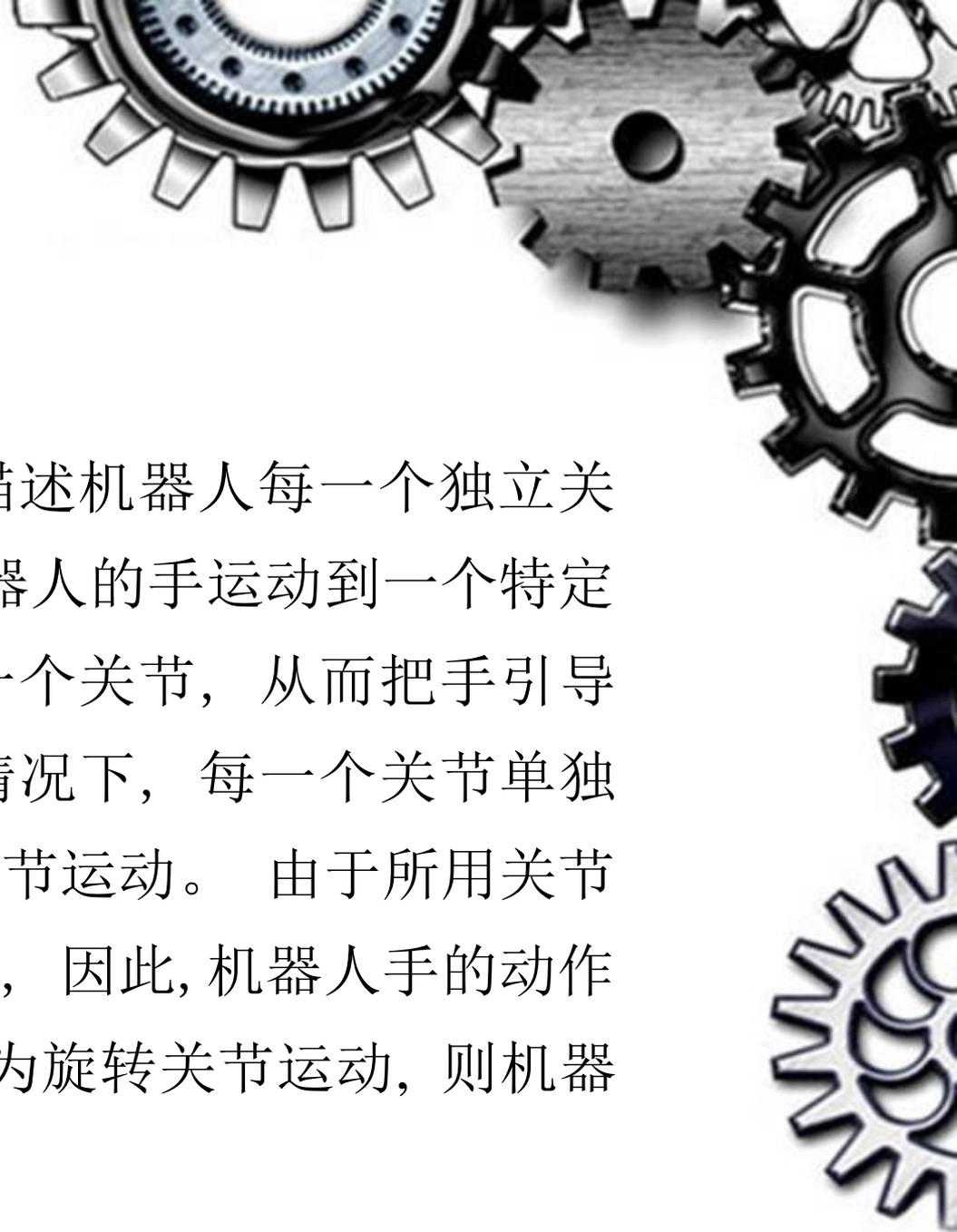


图 1.27 机器人的参考坐标系
(a) 全局参考坐标系; (b) 关节参考坐标系; (c) 工具参考坐标系



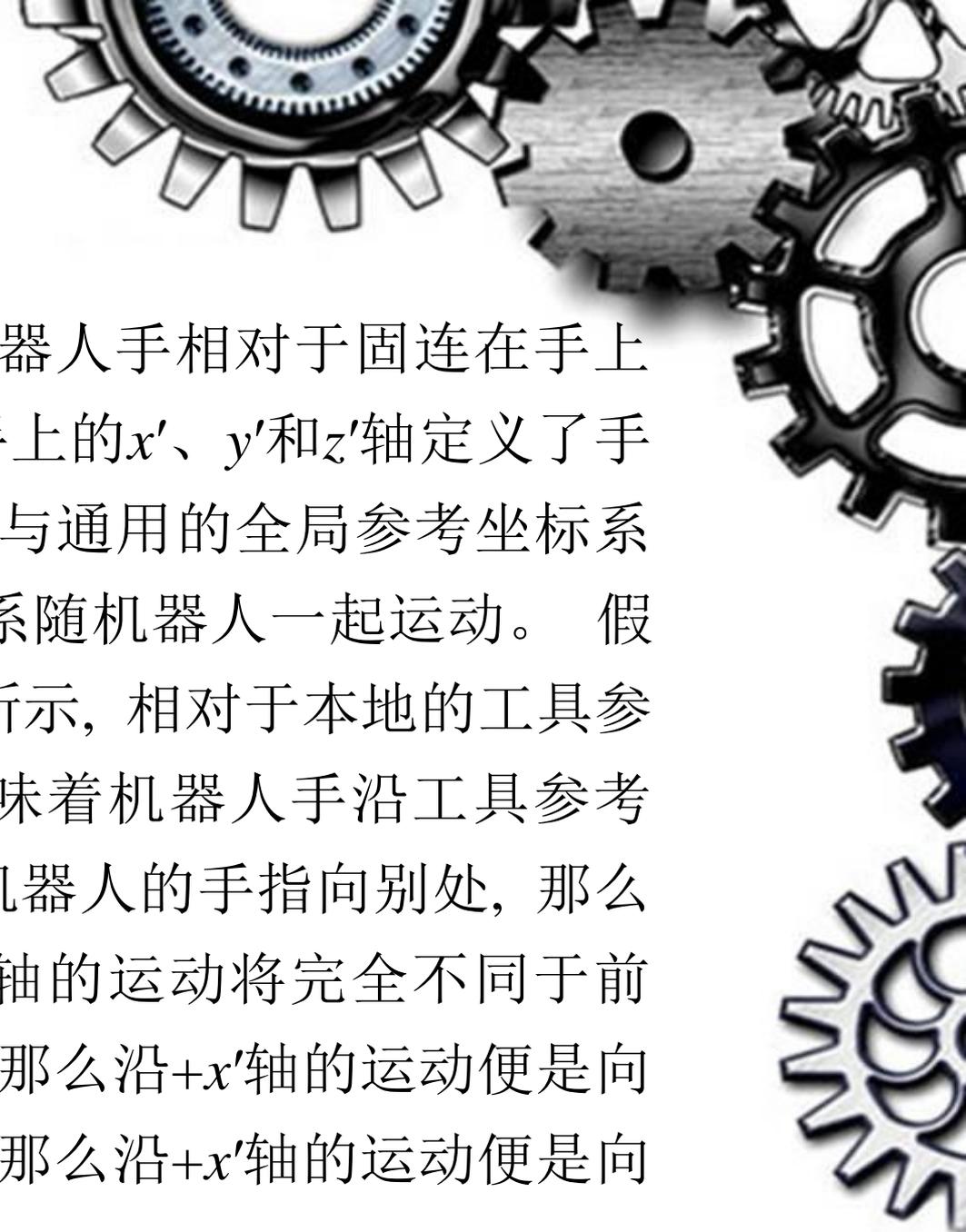
1. 全局参考坐标系

全局参考坐标系是一种通用坐标系，由 x 、 y 和 z 轴所定义。在此情况下，通过机器人各关节的同时运动来产生沿三个主轴方向的运动。在这种坐标系中，无论手臂在哪里， x 轴的正向运动就总是在 x 轴的正方向。这一坐标系通常用来定义机器人相对于其他物体的运动、与机器人通信的其他部件以及运动路径。



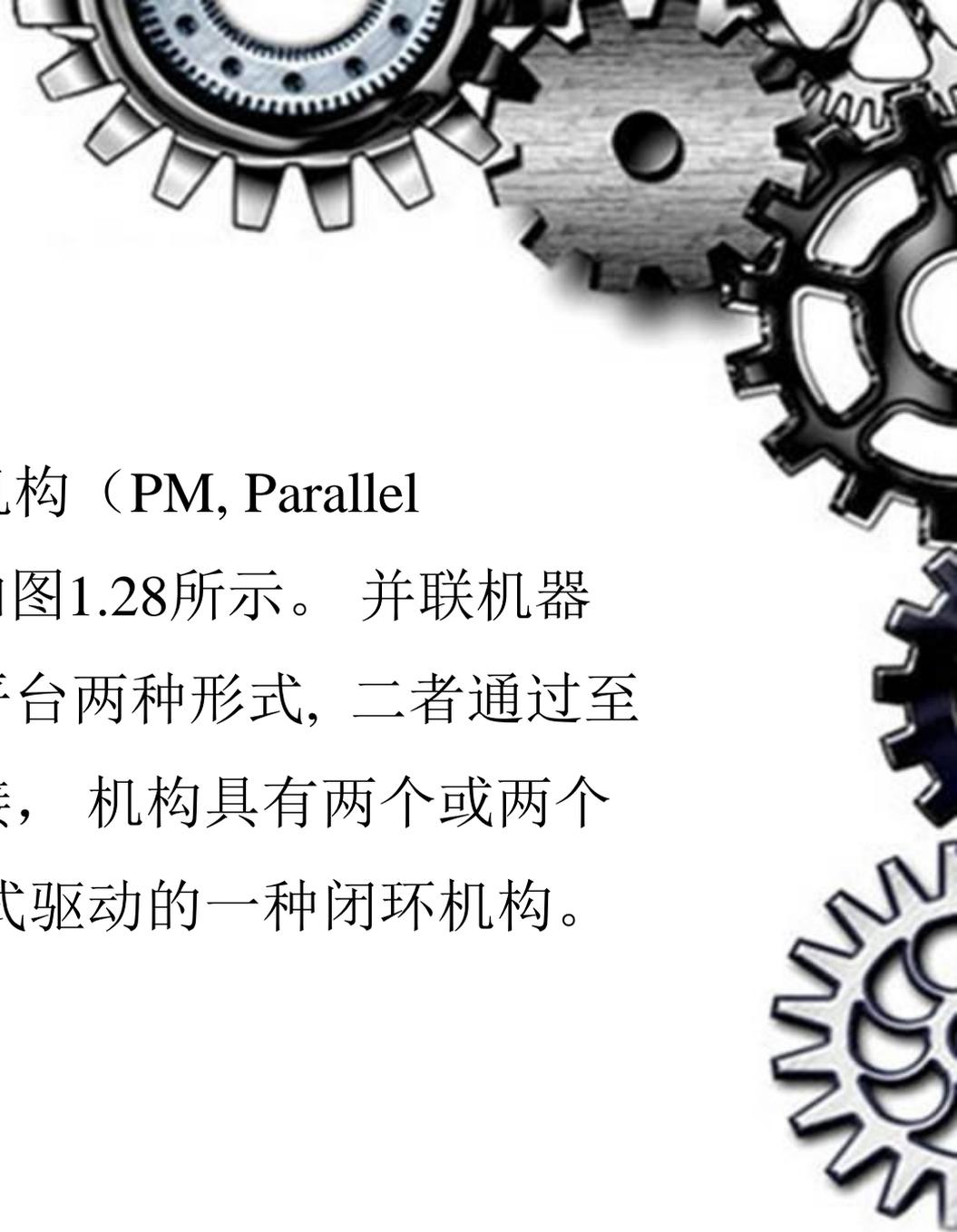
2. 关节参考坐标系

关节参考坐标系用来描述机器人每一个独立关节的运动。假设希望将机器人的手运动到一个特定的位置，可以每次只运动一个关节，从而把手引导到期望的位置上。在这种情况下，每一个关节单独控制，从而每次只有一个关节运动。由于所用关节的类型(移动、旋转型)不同，因此，机器人手的动作也各不相同。例如，如果为旋转关节运动，则机器人手将绕着关节的轴旋转。



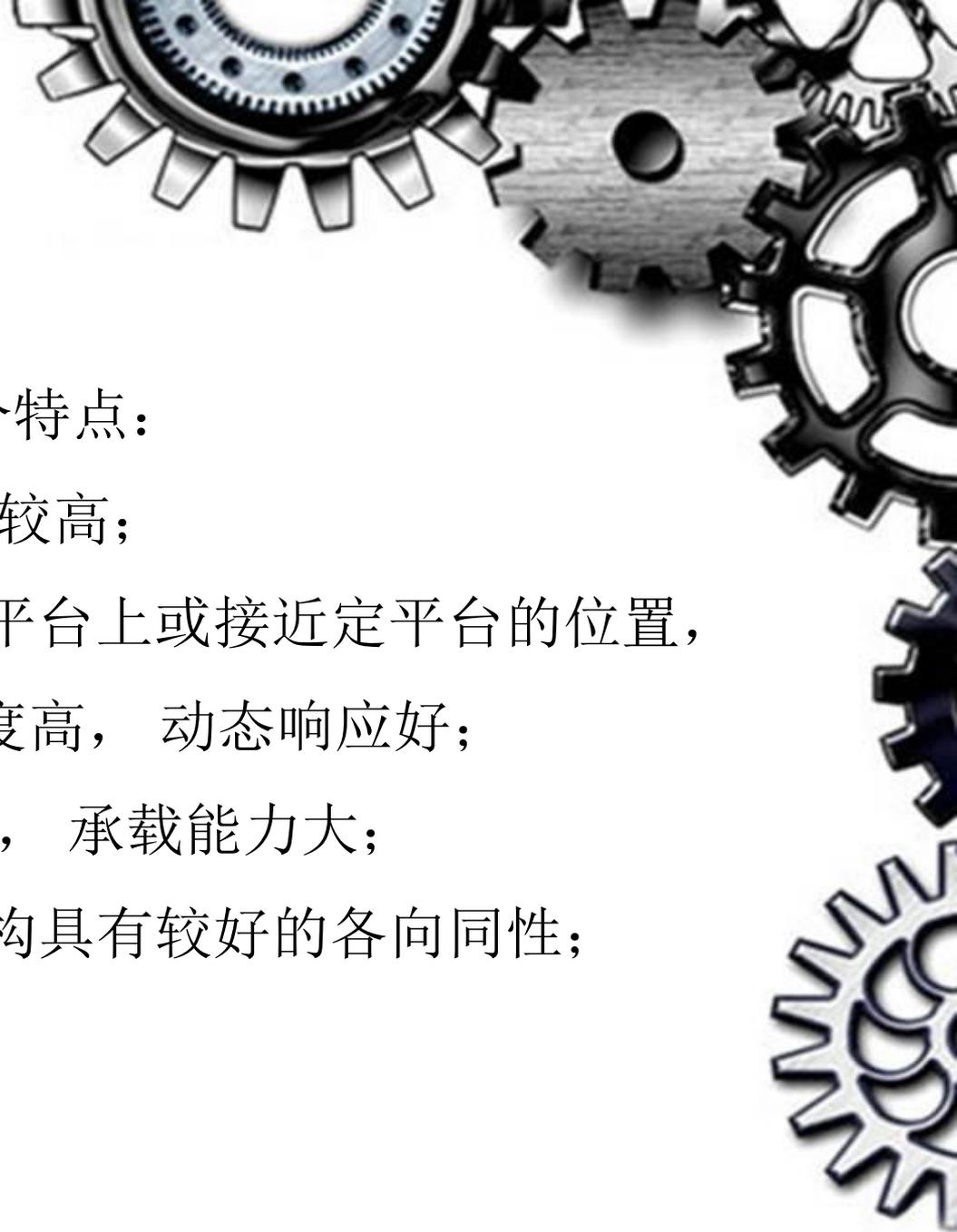
3. 工具参考坐标系

工具参考坐标系描述机器人手相对于固连在手上的坐标系的运动。固连在手上的 x' 、 y' 和 z' 轴定义了手相对于本地坐标系的运动。与通用的全局参考坐标系不同，本地的工具参考坐标系随机器人一起运动。假设机器人手的指向如图1.27所示，相对于本地的工具参考坐标系 x' 轴的正向运动意味着机器人手沿工具参考坐标系 x' 轴方向运动。如果机器人的手指向别处，那么同样沿着工具参考坐标系 x' 轴的运动将完全不同于前面的运动。如果 x' 轴指向上，那么沿 $+x'$ 轴的运动便是向上的；反之，如果 x' 轴指向下，那么沿 $+x'$ 轴的运动便是向下的。



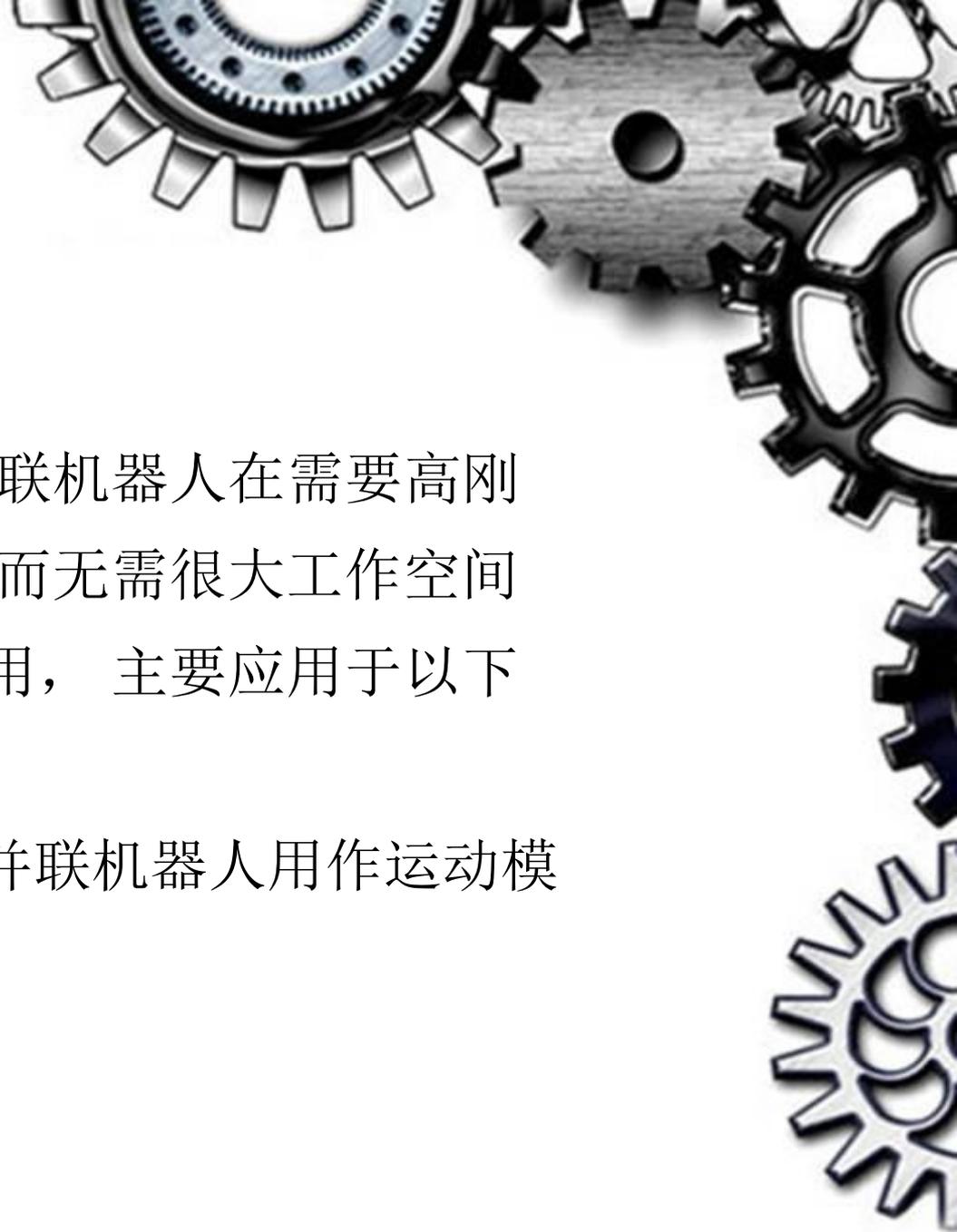
1.3.5 并联机器人

并联机器人又称并联机构（PM, Parallel Mechanism），一般结构如图1.28所示。并联机器人可以定义为动平台和定平台两种形式，二者通过至少两个独立的运动链相连接，机构具有两个或两个以上自由度，且以并联方式驱动的一种闭环机构。



这种机器人有以下几个特点：

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



因为这些特点， 并联机器人在需要高刚度、 高精度或者大载荷而无需很大工作空间的领域内得到了广泛应用， 主要应用于以下几个方面：

(1) 运动模拟器。 并联机器人用作运动模拟器如图1.29所示。

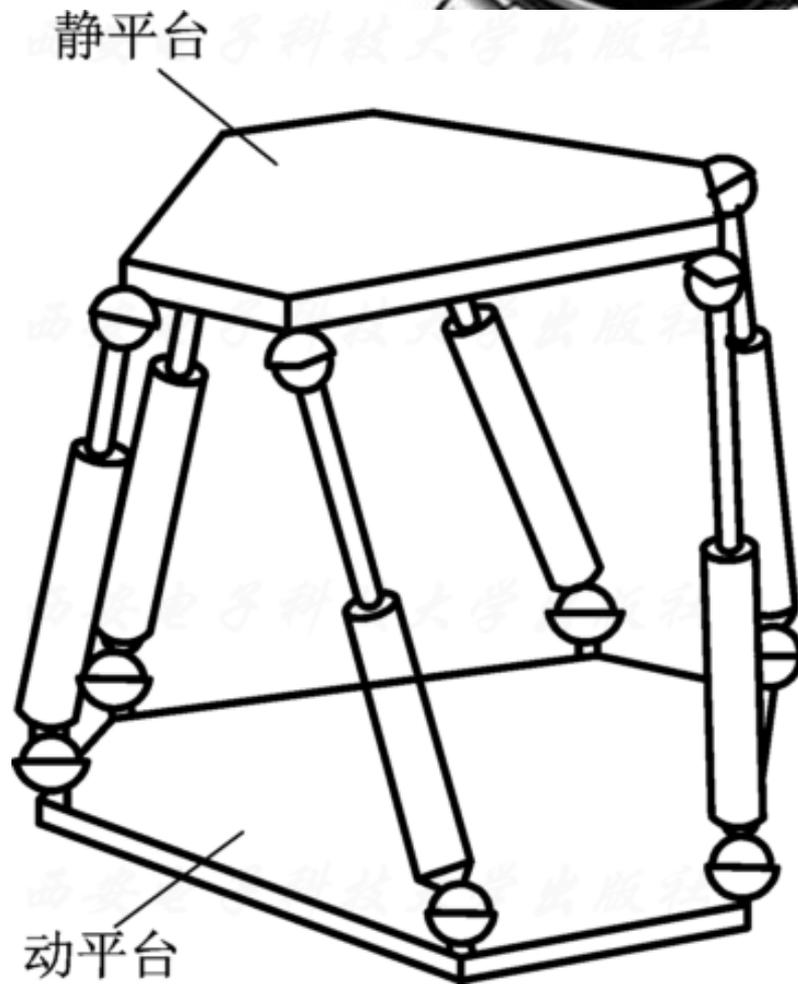


图 1.28 并联机器人结构



图 1.29 并联机器人



(2) 并联机床。

并联机床具有承载能力强、响应速度快、精度高、机械结构简单、适应性好等优点，是一种“硬件”简单、“软件”复杂、技术附加值高的产品。并联机床如图1.30所示。

西安电子科技大学出版社

西安电

西安电

西安电

西安电

西安电

西安电



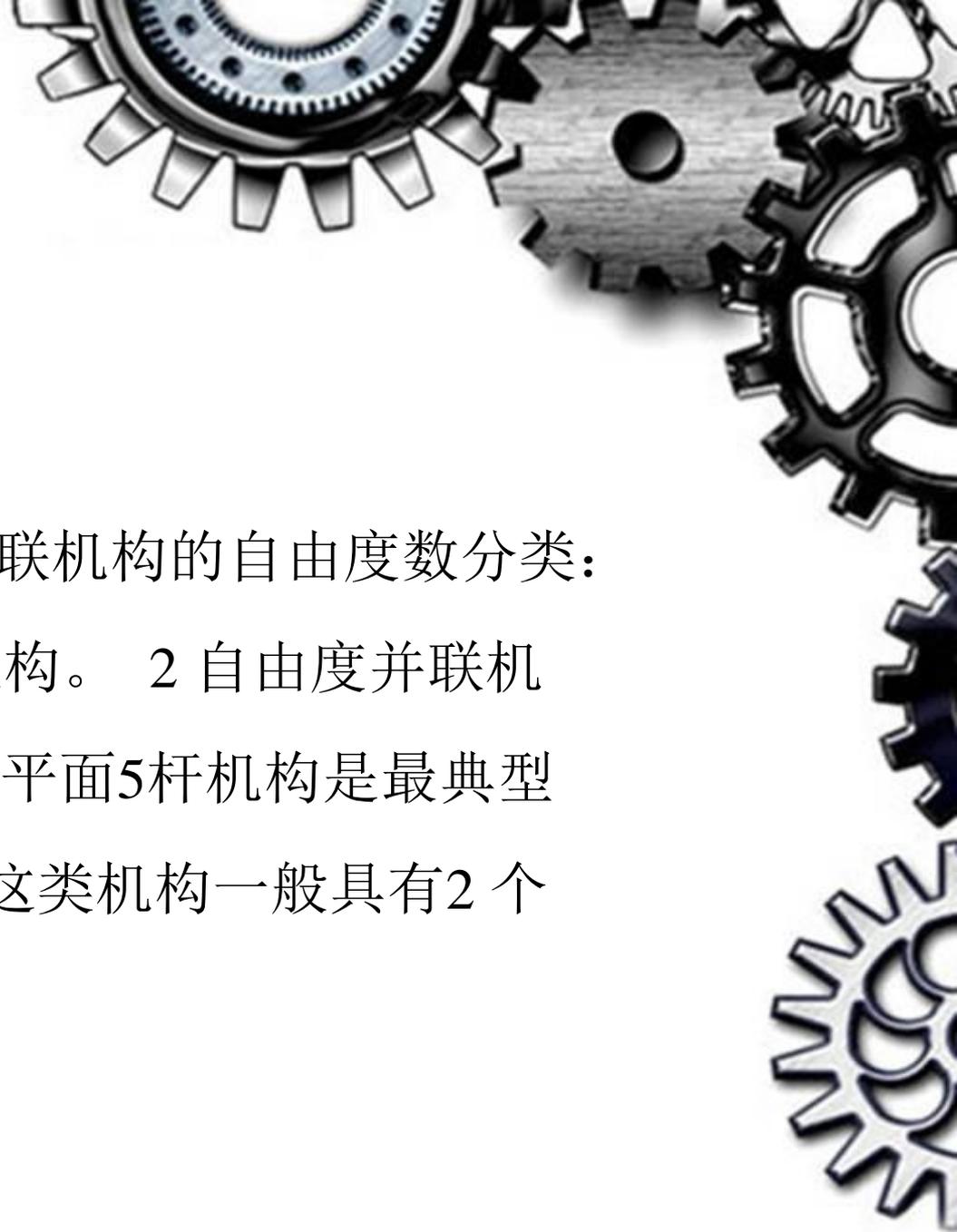
图 1.30 并联机床



(3) 微操作机器人。微操作机器人如图1.31所示，经常用于安装印刷电路板上的电子元件。

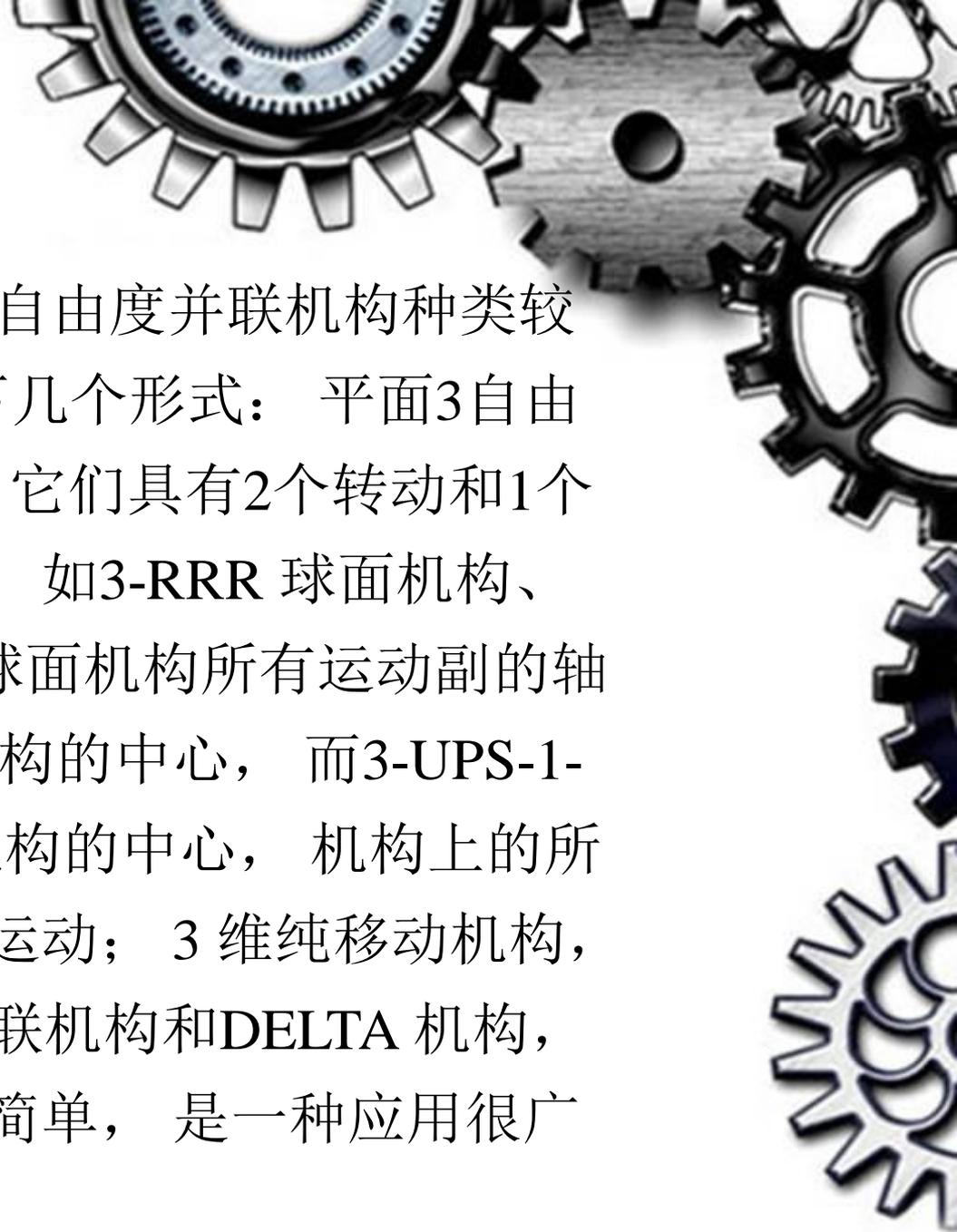


图 1.31 微操作机器人

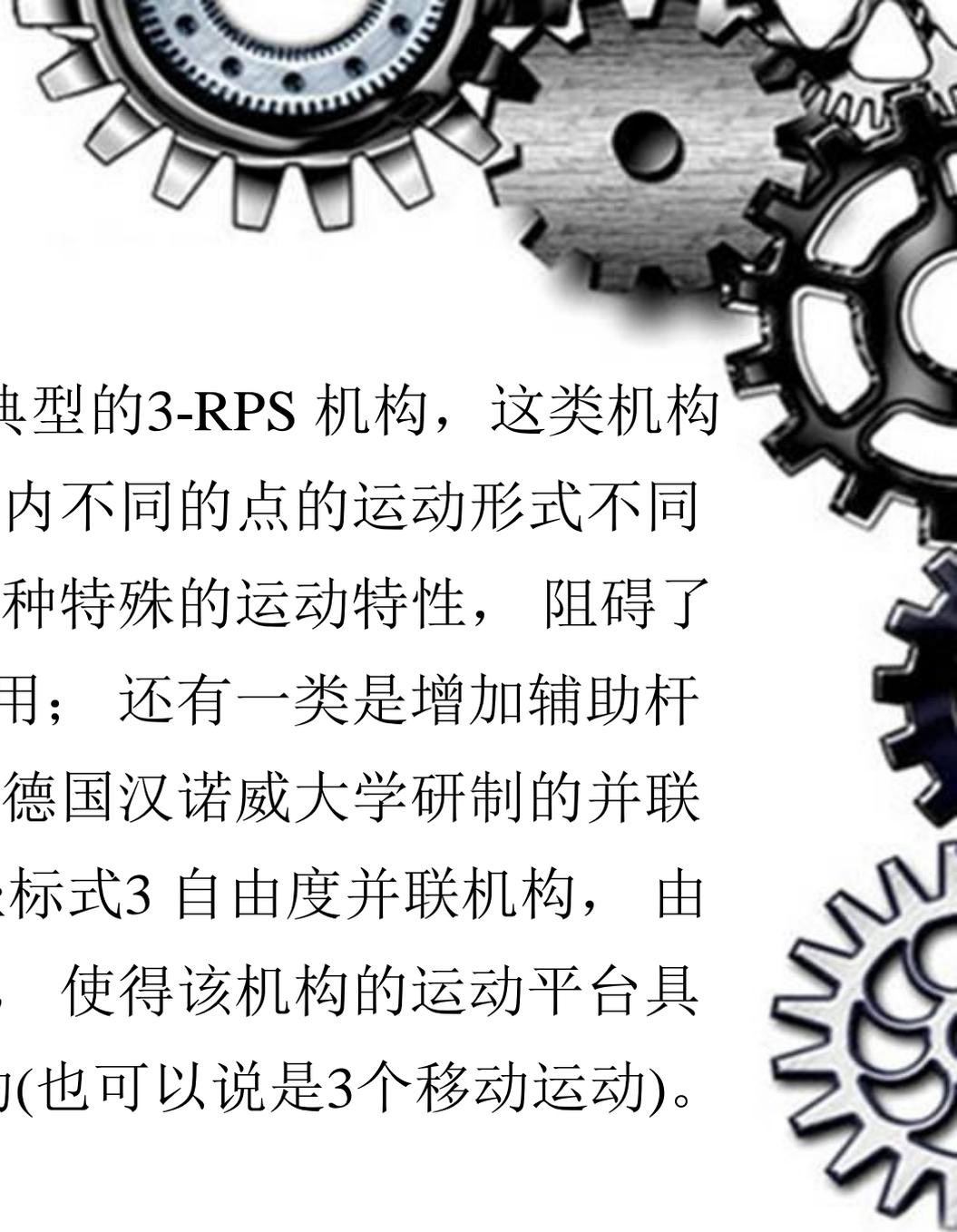


并联机器人可按并联机构的自由度数分类：

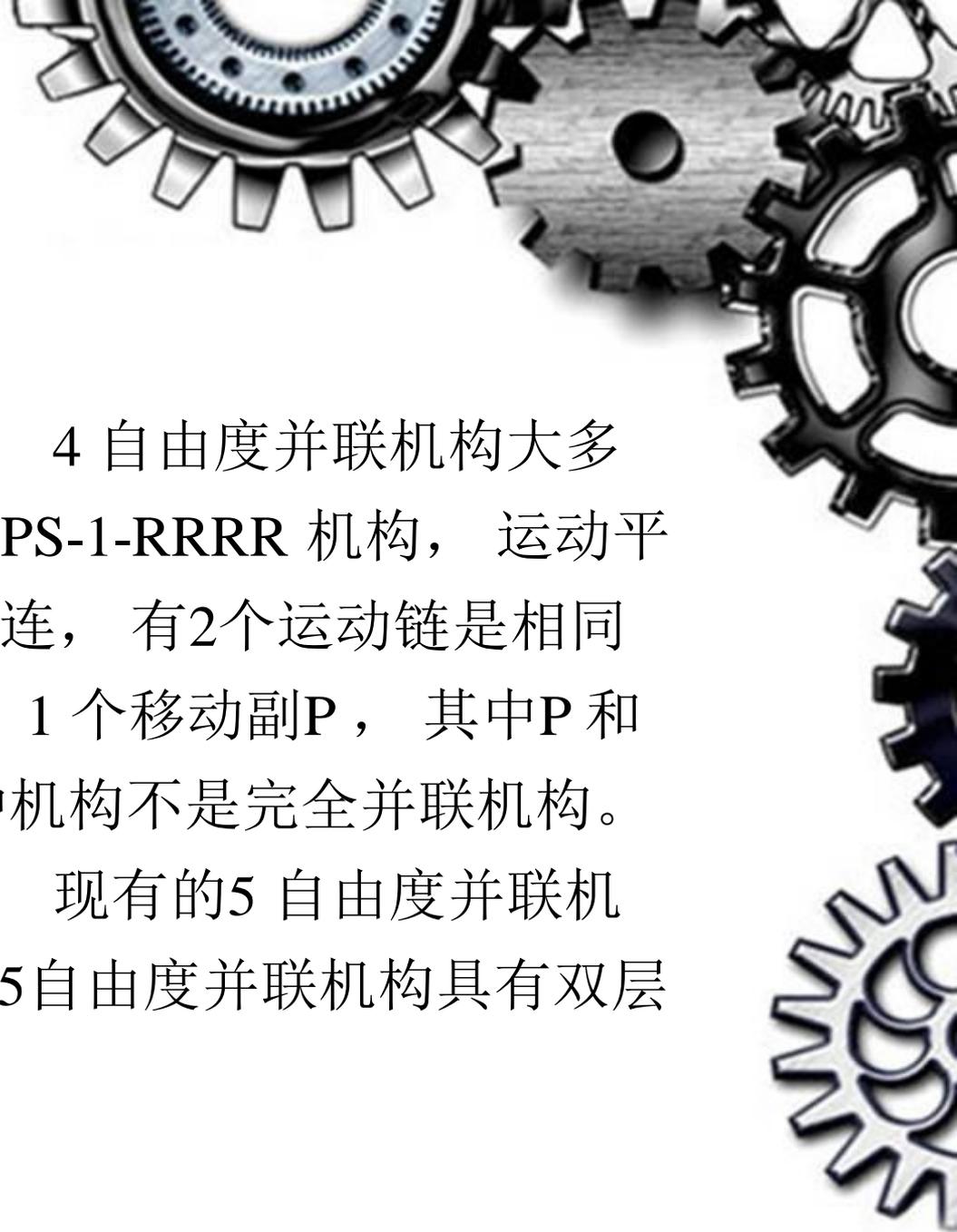
(1) 2 自由度并联机构。 2 自由度并联机构， 如5-R、 3-R、 2-P平面5杆机构是最典型的2自由度并联机构， 这类机构一般具有2 个移动运动。



(2) 3 自由度并联机构。3 自由度并联机构种类较多，形式较复杂，一般有几个形式：平面3自由度并联机构，如3-RPR 机构，它们具有2个转动和1个移动；球面3自由度并联机构，如3-RRR 球面机构、3-UPS-1-S 球面机构，3-RRR 球面机构所有运动副的轴线汇交空间一点，这点称为机构的中心，而3-UPS-1-S 球面机构则以S的中心点为机构的中心，机构上的所有点的运动都是绕该点的转动运动；3 维纯移动机构，如Star Like 并联机构、Tsai 并联机构和DELTA 机构，该类机构的运动学正反解都很简单，是一种应用很广泛的3维移动空间机构；

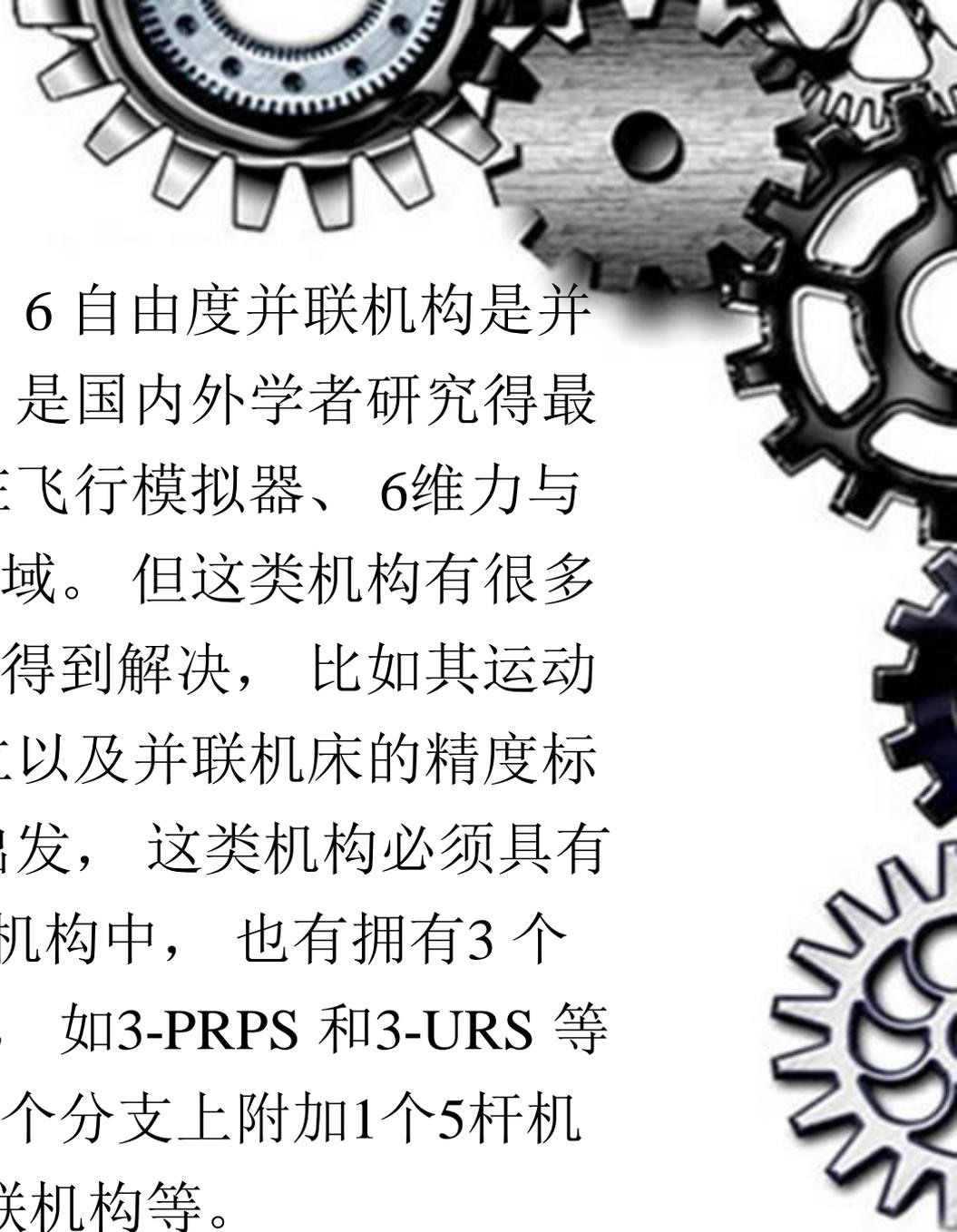


空间3自由度并联机构，如典型的3-RPS 机构，这类机构属于欠秩机构，在工作空间内不同的点的运动形式不同是其最显著的特点，由于这种特殊的运动特性，阻碍了该类机构在实际中的广泛应用；还有一类是增加辅助杆件和运动副的空间机构，如德国汉诺威大学研制的并联机床采用的3-UPS-1-PU 球坐标式3 自由度并联机构，由于辅助杆件和运动副的制约，使得该机构的运动平台具有1 个移动和2 个转动的运动(也可以说是3个移动运动)。

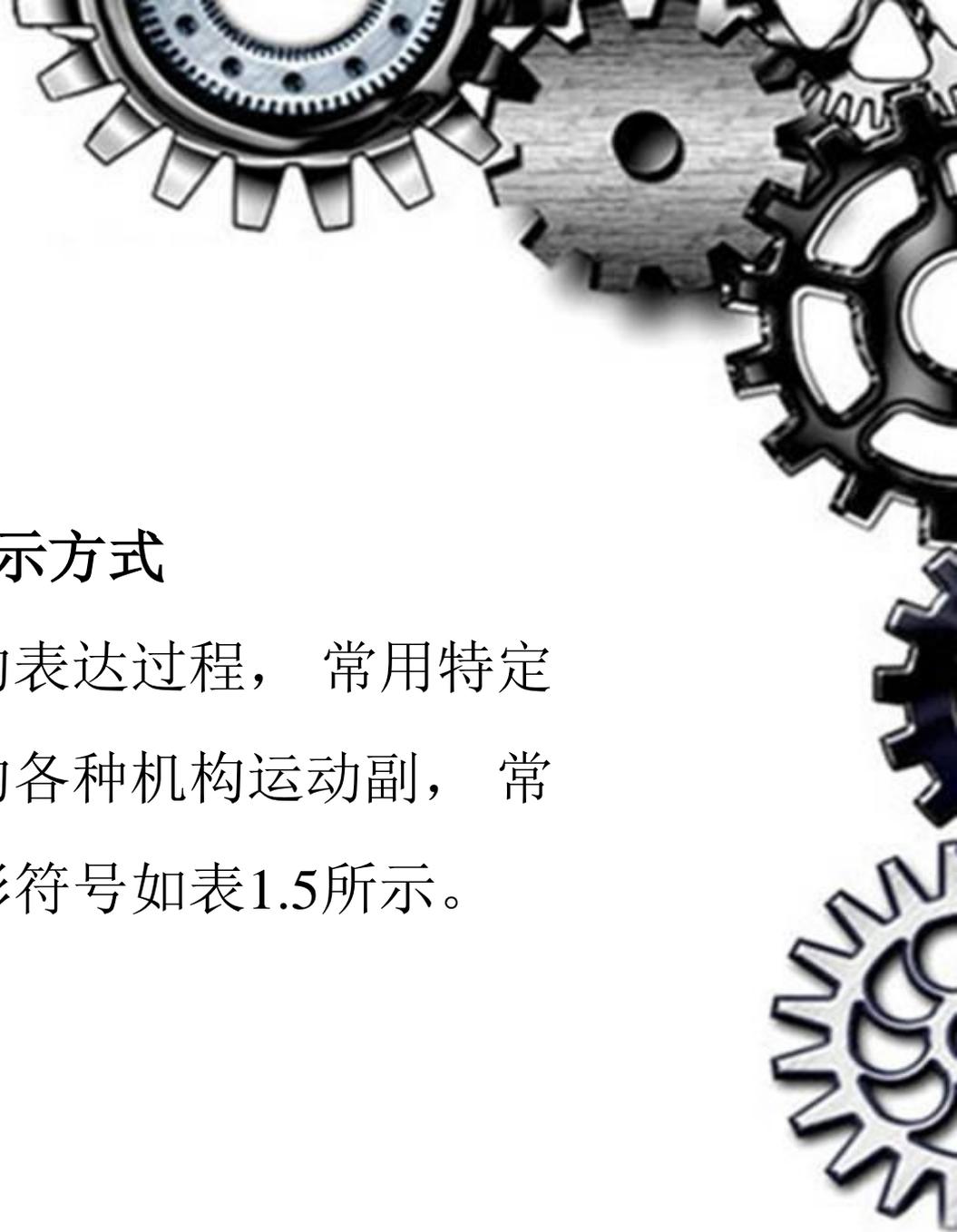


(3) 4 自由度并联机构。4 自由度并联机构大多不是完全并联机构，如2-UPS-1-RRRR 机构，运动平台通过3 个支链与定平台相连，有2个运动链是相同的，各具有1 个虎克铰U，1 个移动副P，其中P 和1 个R 是驱动副，因此这种机构不是完全并联机构。

(4) 5 自由度并联机构。现有的5 自由度并联机构结构复杂，如韩国Lee的5自由度并联机构具有双层结构(2 个并联机构的结合)。



(5) 6 自由度并联机构。 6 自由度并联机构是并联机器人机构中的一大类， 是国内外学者研究得最多的并联机构， 广泛应用于飞行模拟器、 6维力与力矩传感器和并联机床等领域。 但这类机构有很多关键性技术没有或没有完全得到解决， 比如其运动学正解、 动力学模型的建立以及并联机床的精度标定等。 从完全并联的角度出发， 这类机构必须具有6个运动链。 但现有的并联机构中， 也有拥有3个运动链的6 自由度并联机构， 如3-PRPS 和3-URS 等机构， 还有在3个分支的每个分支上附加1个5杆机构作驱动机构的6自由度并联机构等。



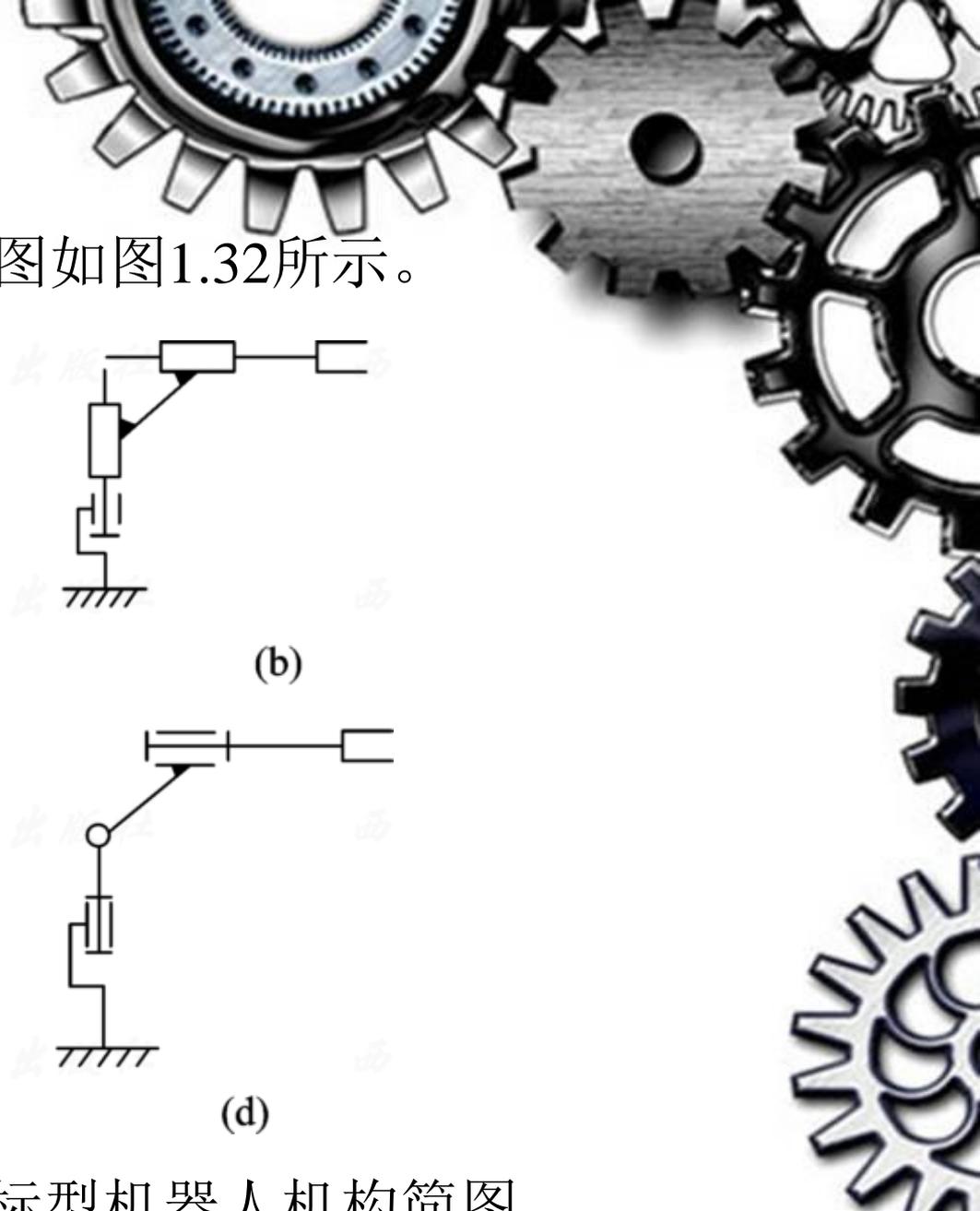
1.3.6 工业机器人的机构表示方式

为了简化机器人机构的表达过程，常用特定的图形符号来表示机器人的各种机构运动副，常用的工业机器人的各种图形符号如表1.5所示。



表1.5 工业机器人的各种图形符号

名 称	图 形 符 号	
	正 视	侧 视
移动副		
回转副		
螺旋副		—
球面副		—
末端操作器		—
机座		—



几种常用坐标型机器人机构简图如图1.32所示。

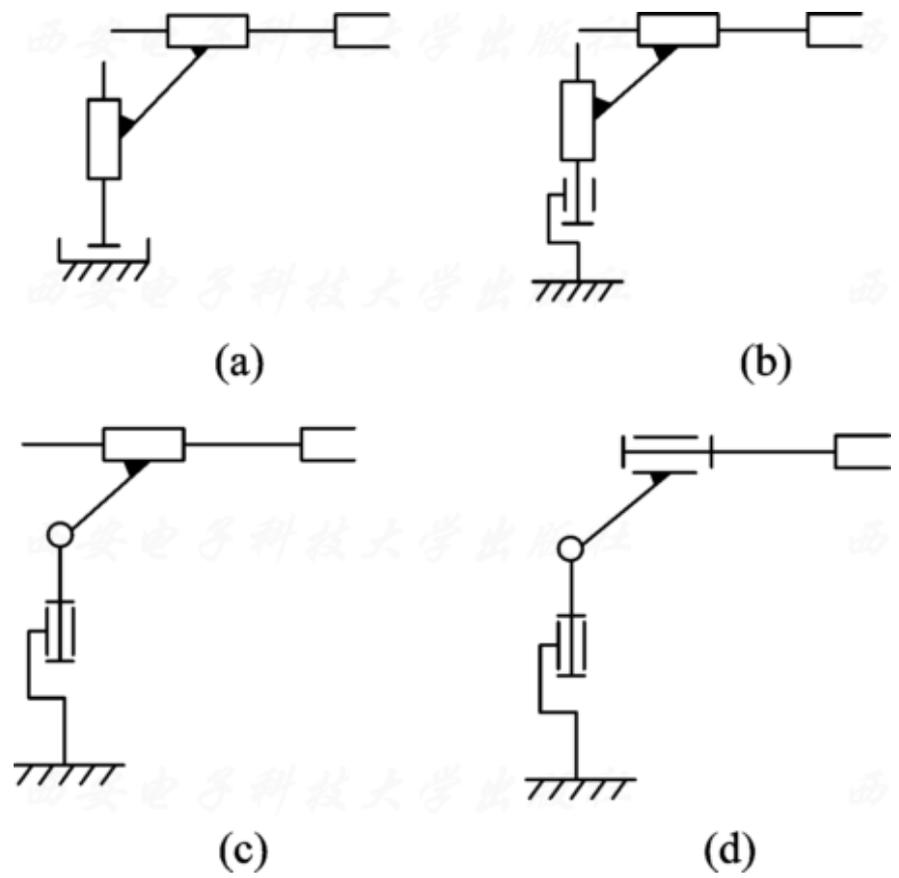
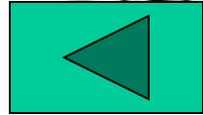


图 1.32 几种常用坐标型机器人机构简图
(a) 直角坐标型; (b) 圆柱坐标型; (c) 球坐标型; (d) 关节坐标型



习题

1. 简述工业机器人的定义。
2. 简述工业机器人的主要应用场合。 这些场合有什么特点？
3. 说明工业机器人的基本组成及各部分之间的关系。
4. 简述工业机器人各参数的定义：自由度、 重复定位精度、工作范围、工作速度、承载能力。
5. 工业机器人按坐标形式分为哪几类？ 各有什么特点？
6. 什么是SCARA机器人？应用上有何特点？

