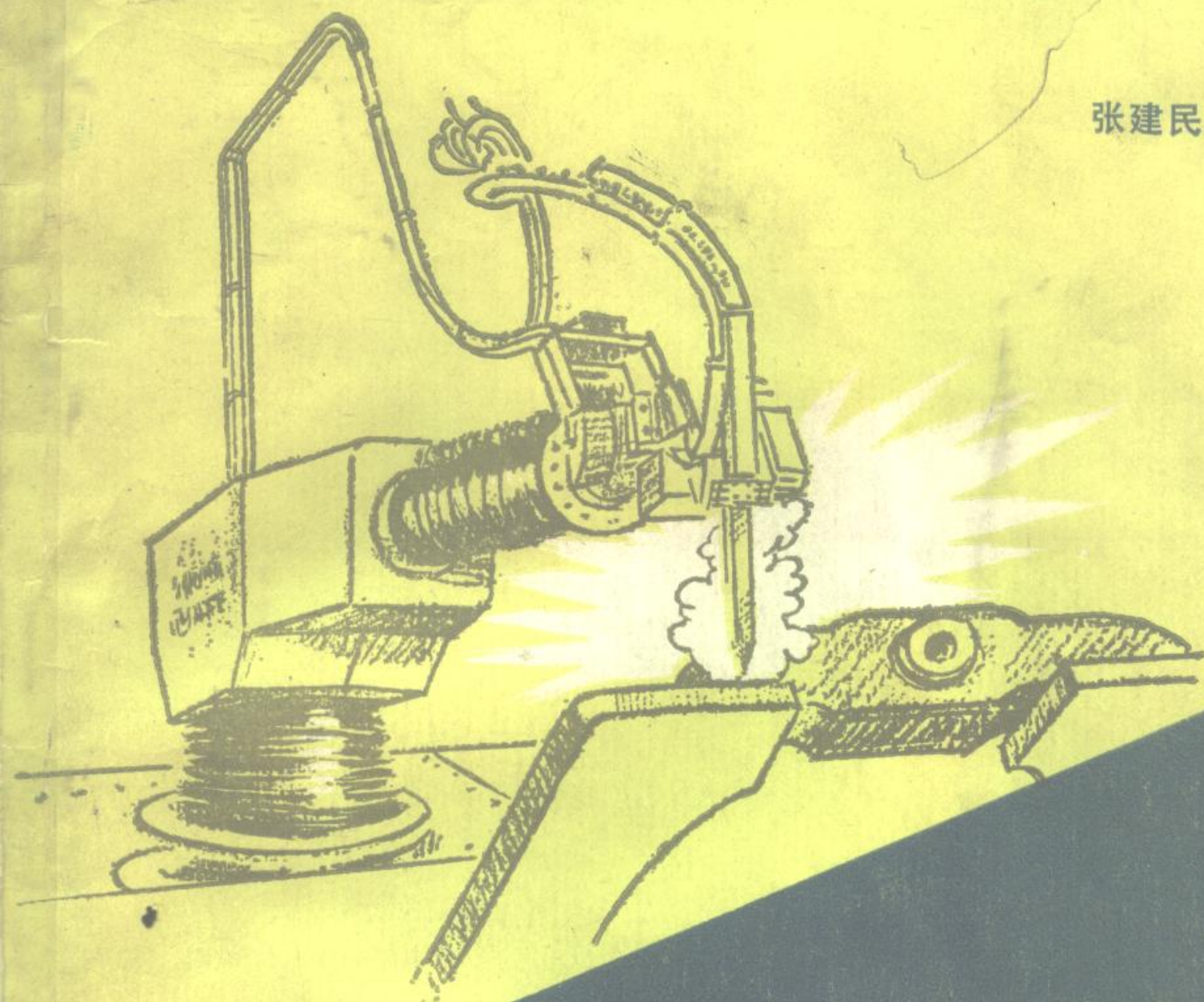


张建民 编著



工业机器人

北京理工大学出版社

工业机器人

张建民 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

工业机器人是机电一体化的典型产品之一。本书从机电一体化的发展出发,综合了国内外大量典型资料,简明介绍了工业机器人与机械手的定义、组成与分类,并对其机械结构及有关设计计算、电气与计算机控制、机器人语言、人工智能(传感技术)以及运动学、动力学模型建立方法做了深入浅出地分析,列举了国内外典型工业机器人与机械手实例。

本书共分十章,可作为大专院校机电一体化和工业自动化专业的选修教材,对于从事机电一体化产品设计制造和各类工业自动化的有关工程技术人员、工人都有学习参考价值。

2R38/36
09

工 业 机 器 人

张建民 编著

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市通县向阳印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 15.5印张 385千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷

ISBN7-81013-076-5/TP·6

印数: 1-5000册 定价: 3.10元

前 言

工业机器人是20多年以来发展起来的机电一体化产品，是新型独立的自动化装置。

随着工业技术与经济的惊人发展，标志着多品种中、小批量生产最新水平的FMS(柔性制造系统)、FA(工厂自动化)技术更加引人注目。作为FMS、FA技术重要组成之一的工业机器人技术也必将得到迅速发展。应用工业机器人是提高生产过程自动化、改善劳动环境条件、提高产品质量和生产效率的有效手段之一，亦是新技术革命的重要内容之一。为了迎接新技术革命的到来，为进一步研究、推广应用工业机器人技术，特为机械制造工艺与设备专业重新编写了这本教材。在编写过程中，收入了大量工业机器人技术的新素材，增加了新的章节，补充了新的结构实例。书中多手臂防爆装配机器人和喷砂机器人的材料分别由北京理工大学机器人中心韩孟伟、张宇河老师提供。

全书由王信义教授审校，对初稿提出了许多宝贵的修改意见，谨致以衷心感谢。

由于编者水平有限，调查工作还不够广泛深入，书中的缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

 编 者

1987年12月

目 录

第一章 概论	(1)
§1-1 “工业机器人”与“机械手”的含义	(1)
§1-2 工业机器人的产生与发展	(1)
§1-3 工业机器人的组成、运动与分类	(3)
§1-4 工业机器人的主要技术参数	(13)
§1-5 工业机器人的适用范围	(14)
§1-6 工业机器人在生产中的应用	(14)
§1-7 工业机器人的技术发展方向	(18)
第二章 工业机器人的手部	(19)
§2-1 概述	(19)
§2-2 钳爪式手部机构形式	(19)
§2-3 钳爪式手部机构的选用要点	(23)
§2-4 钳爪式手部机构的夹紧力分析与计算	(24)
§2-5 钳爪式手部结构举例	(31)
§2-6 钳爪式手部机构的驱动力计算	(39)
§2-7 钳爪式手部机构的定位误差分析	(43)
§2-8 磁吸式手部	(54)
§2-9 气吸式手部	(59)
第三章 工业机器人的腕部	(63)
§3-1 概述	(63)
§3-2 腕部结构形式	(64)
§3-3 腕部回转力矩的计算	(74)
第四章 工业机器人的臂部	(76)
§4-1 概述	(76)
§4-2 臂部结构形式	(76)
§4-3 臂部运动的导向装置	(91)
§4-4 臂部运动驱动力计算	(93)
第五章 工业机器人的定位与缓冲	(98)
§5-1 概述	(98)
§5-2 工业机器人的运动特性	(99)
§5-3 工业机器人的定位方法	(99)
§5-4 工业机器人的定位缓冲装置	(102)
第六章 工业机器人运动学与动力学	(114)
§6-1 工业机器人的坐标变换与运动学分析	(114)
§6-2 工业机器人运动学方程的建立及举例	(118)
§6-3 旋转变换张量法与工业机器人的运动分析	(122)
§6-4 工业机器人动力学分析	(127)

第七章 工业机器人的控制	(133)
§7-1 概述	(133)
§7-2 程序控制方式的分类及其特点.....	(135)
§7-3 示教与记忆.....	(138)
§7-4 动作控制方式.....	(140)
§7-5 工业机器人的计算机控制.....	(146)
§7-6 工业机器人语言.....	(148)
第八章 工业机器人的传感技术	(153)
§8-1 概述.....	(153)
§8-2 工业机器人的触觉传感器.....	(154)
§8-3 工业机器人的接近觉传感器.....	(161)
§8-4 工业机器人的视觉传感器.....	(164)
§8-5 人工视觉.....	(167)
第九章 工业机器人的总体设计	(178)
§9-1 工业机器人基本参数的确定.....	(178)
§9-2 工业机器人运动形式的选择.....	(180)
§9-3 手臂的配置形式.....	(182)
§9-4 位置检测装置的选择.....	(187)
§9-5 驱动与控制方式的选择.....	(192)
第十章 工业机器人实例简介	(195)
§10-1 示教再现型机器人	(195)
§10-2 电弧焊接系统与电弧焊机器人.....	(198)
§10-3 喷漆系统与喷漆机器人.....	(203)
§10-4 SCARA型装配机器人.....	(209)
§10-5 ZP-1型多手臂防爆装配机器人.....	(218)
§10-6 喷砂机器人	(223)
§10-7 气动通用机械手	(231)
§10-8 液压通用机械手	(240)
主要参考资料	(242)

第一章 概 论

§1-1 “工业机器人”与“机械手”的含义

到目前为止，世界各国对“工业机器人”还没有做出统一的明确定义。通常所说的“工业机器人”是一种能模拟人的手、臂的部分动作，按照预定的程序、轨迹及其它要求，实现抓取、搬运工件或操纵工具的自动化装置。而“机械手”一般具有固定的手部、固定的动作程序（或简单可变程序）、一般用于固定工位的自动化装置。因为国内外称作“工业机器人”、“机械手”、“操作机”的这三种自动化和半自动化装置，在技术上有某些相通之处，所以有时不易明确区分，就它们的技术特征来看，其大致区别如下。

“工业机器人”(Industrial Robot)：多数是指程序可变(编)的独立的自动抓取、搬运工件、操纵工具的装置(国内称作工业机器人或通用机械手)。

“机械手”(Mechanical Hand)：多数是指附属于主机、程序固定的自动抓取、操作装置(国内一般称作机械手或专用机械手)。如自动线、自动机的上、下料，加工中心的自动换刀的自动化装置。

“操作机”(Manipulator)：一般是指由工人操纵的半自动搬运、抓取、操作装置。如锻造操作机或处理放射性材料、火工品的装配等所使用的半自动化装置。表 1-1 为上述三者的区分表。

名 称 区 分

表1-1

特 点		独 立 性		操 纵		程 序	
名 称		独 立	附 属	自 动	手 动	可 变	固 定
国 外	国 内						
工业机器人	工业机器人 (通用机械手)	0		0		0	
机械手	机械手 (专用机械手)		0	0		△	0
操作机	操作机 (机械手)	0			0	0	

注：△表示也有简单可变程序。

§1-2 工业机器人的产生与发展

早在20世纪初，随着机床、汽车等制造业的发展就出现了机械手。1913年美国福特汽车工业公司安装了第一条汽车零件加工自动线，为了解决自动线、自动机的上下料与工件的传送，采用了专用机械手代替人工上下料及传送工件。可见专用机械手就是作为自动机、自动线的附属装置出现的。

到了40年代，随着原子能工业的产生，出现了另一类半自动化抓取搬运装置——操作机。在原子能工业中用它来进行放射性材料的加工、处理和实验；在兵工生产中用它来进行

易燃、易爆等火工品的加工、装配操作。这类装置的特点是不附属于某一工作主机，并且靠人来操纵。因此有人将这类操作装置称为主仆式操作机、遥控操作机、操纵型机器人等。

“工业机器人”这种自动化装置出现的比较晚。它的研究工作是50年代初从美国开始的。日本、苏联、欧洲的研制工作比美国大约晚10年。但是日本的发展速度比美国快。欧洲特别是西欧各国比较注意工业机器人的研制和应用，其中英国、联邦德国、瑞典、挪威等国的技术水平较高，产量也较大。

1954年美国G·C·戴万获得了一项工业机器人专利。到1958年，美国机械与铸造公司(A·M·F)研制成功一台数控自动通用机器，商品名为Versatran，并以“工业机器人”(Industrial Robot)为商品广告投入市场。这就是世界上最早的工业机器人。

当时美国人以“工业机器人”作商品广告，是因为“Robot”一词非常引人注目。早在1920年，捷克著名剧作家卡雷尔·查培克写了名为“罗沙姆万能机器人公司”的剧本，该剧本以幻想中的机器人世界为题材，主人翁的名字就叫“Robota”。“Robota”一词在捷克语中具有“佣人”、“奴隶”之意，在斯洛伐克语中有“工人”、“劳动者”之意。英语中的“Robot”一词就是从“Robota”一词派生来的。后来，“Robot”成了许多科学幻想小说的主角，受到人们的喜爱。

在美国机械与铸造公司研制成Versatran的同一年，美国联合控制公司也研制成功“万能自动工业机器人”，商品名为“Unimate”。这种机器人采用了戴万的方案，完全象坦克炮塔，可以回转、伸缩、俯仰等。后来美国联合控制公司与普鲁曼公司合并为“万能自动公司”，即Unimation公司，专门生产工业机器人。

从此之后，美国的工业机器人技术的发展，大致经历了以下几个阶段：

(1) 1963~1967年为实验定型阶段。1963~1966年，万能自动公司制造的工业机器人供用户做工艺实验。1967年，该公司生产的工业机器人定型为1900型。

(2) 1968~1970年为实际应用阶段。这一时期，工业机器人在美国进入应用阶段。例如，美国通用汽车公司1968年订购了68台工业机器人；1969年该公司又自行研制出SAM型工业机器人，并用21台组成了点焊小汽车车身的焊接自动线；又如，美国克莱斯勒汽车公司，32条冲压自动线上的448台冲床都用工业机器人传递工件。

(3) 1970年至今一直处于技术发展和推广应用阶段。1970~1972年，工业机器人处于技术发展阶段。1970年4月美国在伊利斯工学院研究所召开了第一届全国工业机器人会议。据当时统计，美国已采用了大约200台工业机器人，工作时间共达60万小时以上。与此同时，出现了所谓高级机器人，例如，森德斯兰德公司(Sundstrand)发明了用小型计算机控制50台工业机器人的系统。又如，万能自动公司制成了由25台工业机器人操纵的汽车车轮生产自动线。麻省理工学院研制了具有“手眼”系统的高识别能力的微型机器人。

其它国家，如日本、苏联、西欧，大都是从1967、1968年开始以美国的“Versatran”和“Unimate”型机器人为蓝本开始进行研制的。

就日本来说，1967年，日本丰田织机公司引进美国的“Versatran”，川崎重工公司引进“Unimate”，并获得了迅速发展。通过引进技术、仿制、改造创新，很快研制出日本国产化的工业机器人。技术水平很快赶上了美国并超过了其它国家。经过大约10年的实用化时期之后，从1980年开始进入了广泛的普及时代。

我国虽然开始研制工业机器人仅比日本晚5~6年，但由于种种原因，工业机器人技术的发展比较慢。目前我国已开始有计划地从国外引进工业机器人技术，通过引进、仿制、改造、

创新，工业机器人技术必将获得迅速发展。

§1-3 工业机器人的组成、运动与分类

一、工业机器人的系统组成

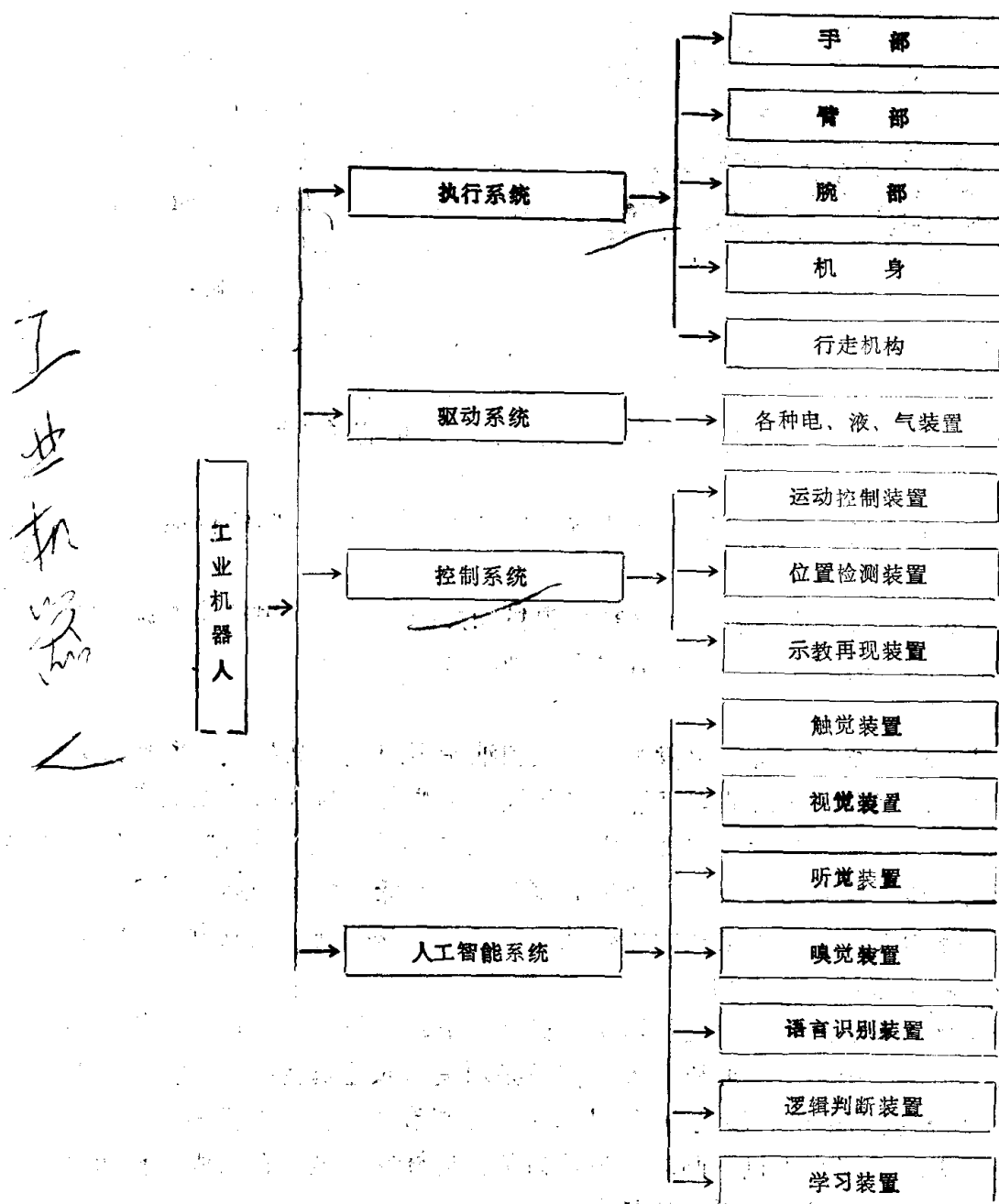


图1-1 工业机器人的组成

工业机器人一般应由执行系统、驱动系统、控制系统和人工智能系统组成。如图1-1所示。

目前，具有人工智能系统的工业机器人即智能机器人还处于研究实验阶段。而应用于生产实际的多数是那些具有执行系统、驱动系统和控制系统的工业机器人，如图1-2所示。

1. 执行系统 执行系统是工业机器人完成握取工件(或工具)实现所需的各种运动的机械部件, 包括以下几个部分:

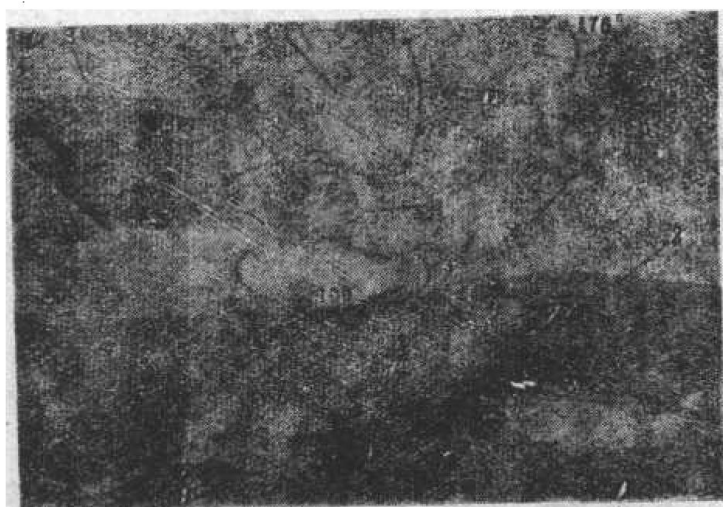


图1-2 工业机器人的组成

A—手部; B—腕部; C—臂部; D—机身。

1—执行系统; 2—驱动系统; 3—控制系统。

机械部件, 包括以下几个部分:

(1) 手部: 是工业机器人直接与工件或工具接触用来完成握持工件(或工具)的部件。有些工业机器人直接将工具(如焊枪、喷枪、容器)装在手部位置, 而不再设置手部。

(2) 腕部: 是工业机器人中联接手部与臂部、主要用来确定手部工作位置并扩大臂部动作范围的部件。有一些专用机器人没有手腕部件, 而是直接将手部安装在手臂部件的端部。

(3) 臂部: 是工业机器人用来支承腕部和手部实现较大运动范围的部件。

(4) 机身: 是工业机器人用来支承

手臂部件, 并安装驱动装置及其它装置的部件。专用机械手一般将臂部装在主机上, 成为主机的附属装置。

(5) 行走机构: 是工业机器人用来扩大活动范围的机构, 有的是专门的行走装置, 有的是轨道、滚轮机构。

2. 驱动系统 驱动系统是向执行系统各部件提供动力的装置。采用的动力源不同, 驱动系统的传动方式也不同。驱动系统的传动方式有四种: 液压式、气压式、电气式和机械式。

(1) 液压式: 其驱动系统由油缸、电磁阀、油泵和油箱等组成。其特点是操作力大体积小, 动作平稳、耐冲击耐振动。但漏油对系统的工作性能影响大。与气压式相比成本较高。

(2) 气压式: 其驱动系统由气缸、气阀、空气压缩机(或由气压站直接供给)和储气罐等组成。其特点是气源方便、维修简单、易于获得高速度、成本低、防火防爆、漏气对环境无影响。但操作力小、体积大, 又由于空气的压缩性大、速度不易控制、响应慢、动作不平稳、有冲击, 臂力一般不超过300牛顿。

(3) 电气式: 其驱动系统一般是由电机驱动。优点是电源方便, 信号传递运算容易、响应快、驱动力较大, 适用于中小型工业机器人。但是必须使用减速机构(如齿轮减速器、谐波齿轮减速器等), 所需要的电机有步进电机、DC伺服电机和AC伺服电机等。

(4) 机械式: 其驱动系统由电机、凸轮、齿轮齿条、连杆等机械装置组成, 传动可靠, 适用于专一简单的机械手。这种方式结构比较庞大。

3. 控制系统 控制系统是工业机器人或机械手的指挥系统, 它控制驱动系统, 让执行机构按照规定的要求进行工作、并检测其正确与否。一般常见的为电气与电子回路控制, 计算机控制系统也不断增多。就其控制方式, 可分为分散控制与集中控制两种类型。若以控制的运动轨迹来分, 原则上分为两种:

(1) 点位控制: 主要控制空间两点或有限多个点的空间位置, 而对其运动路径没有要求。专用机械手和绝大多数工业机器人都采用这种点位控制方式。

(2) 连续轨迹控制：是用连续的信息对运动轨迹的任意位置进行控制，其运动路径是连续的。对运动轨迹有要求的工业机器人需要连续轨迹控制，如电弧焊、切割等。

二、工业机器人的基本机能组成

设计工业机器人就是通过设计，恰当地赋予工业机器人某些机能，以便使机器人能够自动地完成预定的操作。从工业机器人的研究、使用和发展情况来看，工业机器人应该具有的机能可以归纳为三个方面，即运动机能、控制机能和检测、识别机能，见图1-3。

三、工业机器人与机械手的分类

目前世界各国没有统一的分类标准，通常有以下几种分类方法：

1. 按使用范围可分为专用和通用两类

① 专用机械手。一般只有固定的程序(或简单可变程序)，这种机械手多为气动或液动，结构简单，价格低廉。

② 通用机械手即工业机器人。程序可变，通用性强。

2. 按搬运重量大小可分为五类

① 微型机器人(或机械手)；②小型机器人(或机械手)；③中型机器人(或机械手)；④大型机器人(或机械手)；⑤重型机器人(或机械手)。

3. 按作业类别可分为以下几类

①锻造机械手(或机器人)；②冲压机器人(或机械手)；③焊接机器人(点焊机器人、电弧焊机器人)；④热处理机器人(或机械手)；⑤搬运机器人(或机械手)；⑥装卸机器人(或机械手)；⑦装配机器人等。

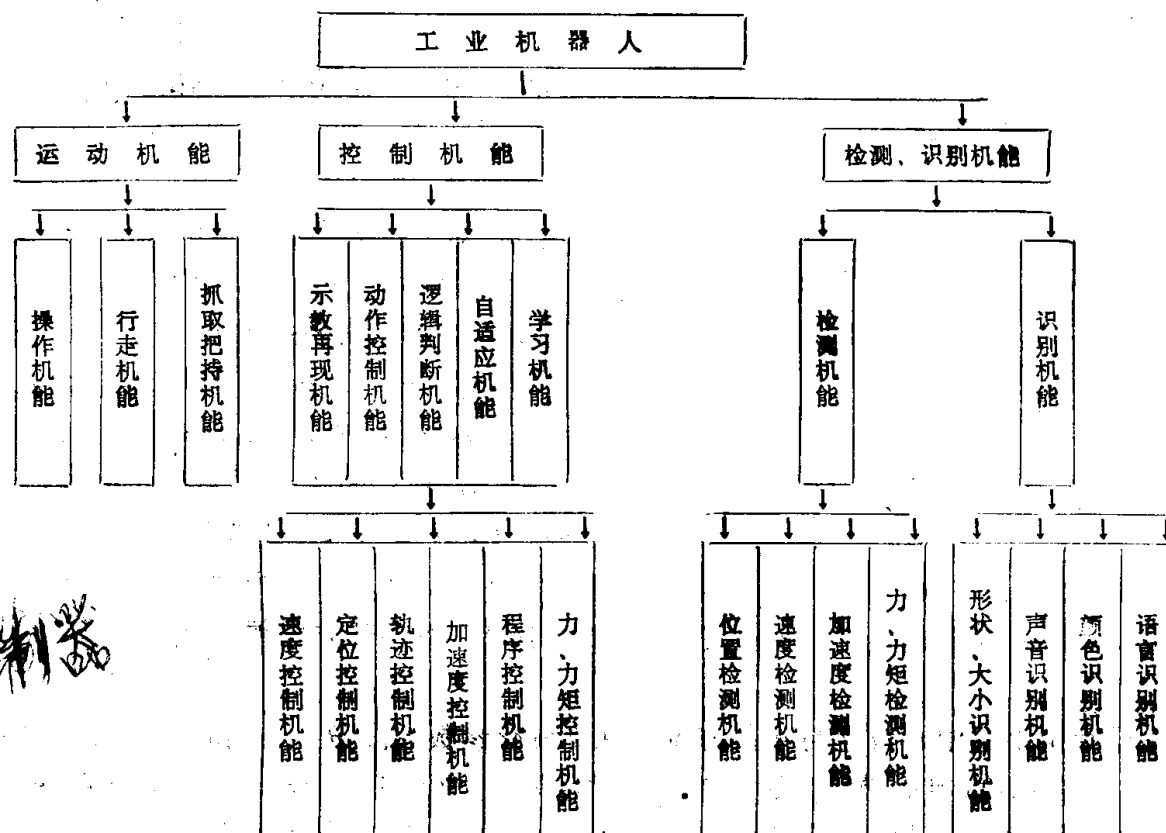


图1-3 工业机器人的基本机能组成

4. 按坐标形式可分为五类

①直角坐标型机器人；②圆柱坐标型机器人；③极坐标型机器人；④多关节型机器人；⑤SCARA型机器人。

5. 按控制方式及智能程度可分为五类

①固定程序机械手；②可编程序机器人(或机械手)；③示教再现型机器人；④计算机数控机器人；⑤智能机器人。

示教再现型工业机器人，需要通过示教装置或手把手进行示教一次，由磁带或磁鼓、磁芯、IC等存贮装置把示教的过程记忆下来，此后，它就能自动地按所记忆的程序重复进行操作。

计算机数控机器人，可通过程序软件来改变其动作程序，还可进行多机控制。

目前所见的智能机器人一般由电子计算机控制，通过电视摄像机或传感器，使其具有一定程度的视觉、热觉或触觉等感觉机能。这种机器人还处在研制实验阶段。更复杂的智能机器人还处于研究阶段。

四、工业机器人的运动

在分析工业机器人的运动之前，为便于研究和记录其各种运动及运动的组合，有必要引入如表1-2所示的运动机能代号。

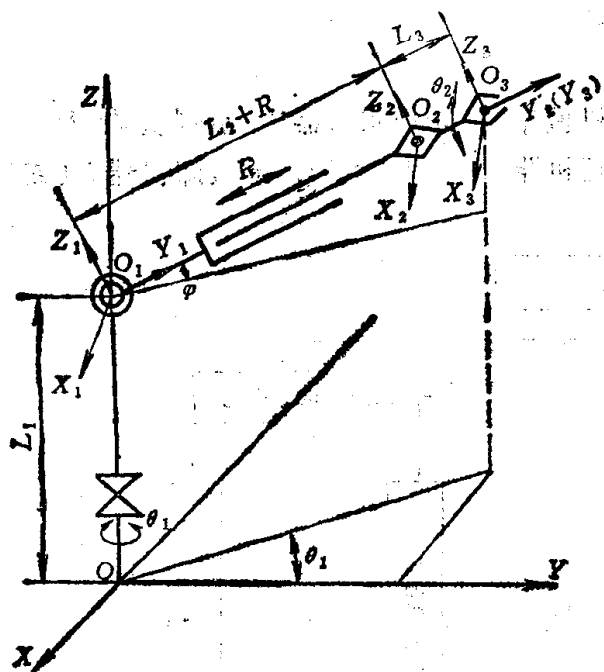


图1-4 工业机器人的自由度

1—手部；2—腕部；3—臂部；4—机座。

工业机器人的运动，拟分工业机器人的自由度、运动范围和各种运动型式来叙述。

1. 工业机器人的自由度 工业机器人与机械手的手部所握持的工件(或工具)在空间的位置，是由臂部、腕部以及整机等各自独立运动的合成来确定的。如图1-4所示的工业机器人，臂部具有回转 θ_1 、俯仰 φ 和伸缩 R 三个独立运动。腕部有回转 θ_2 一个独立运动。如果设手部夹持中心 P 相对于机座上的固定坐标系($O; X, Y, Z$)的坐标为 (x_P, y_P, z_P) 那么 (x_P, y_P, z_P) 的坐标值可以由下列公式求出：

$$\begin{cases} x_P = -(L_2 + R + L_3) \sin \theta_1 \cos \varphi \\ y_P = (L_2 + R + L_3) \cos \theta_1 \cos \varphi \\ z_P = L_1 + (L_2 + R + L_3) \sin \varphi \end{cases}$$

式中， L_1 是 O 至 O_1 之间的距离； $L_2 + R$ 是 O_1 至 O_2 之间的距离； L_3 是 O_2 至 P 点之距离；其中 L_1 、 L_2 、 L_3 为常量， R 为变量。 P 点的坐标由彼此独立的 θ_1 、 φ 和 R 这三个参数确定。而手部方位须待 θ_2 确定后才能最后确定。

上述确定手部中心位置与手部方位的独立变化参数 θ_1 、 θ_2 、 φ 和 R ，就是工业机器人和机械手的自由度(有时被称为运动轴、活动度等)。它是工业机器人和机械手的重要参数之一。图1-4所示的工业机器人，就是具有四个自由度的机器人。其中臂部三个自由度—— θ_1 、 φ 和 R ，腕部一个自由度—— θ_2 。

运动机能代号表

表 1-2

序号	运动机能	运动机能代号		图例
			正 面	
1	平行移动			
2	垂直移动			
3	回转 (1)			
4	摆动 (1)			
5	摆动 (2)			
6	行走			
7	钳爪式手部			
8	截吸式手部			
9	吸气手部			
10	回转 (2)			
11	固定基面			

工业机器人的每一个自由度，都要相应地配一个原动件(如伺服马达、油缸、气缸、步进马达等驱动装置)，当各原动件按一定的规律运动时，机器人各运动部件就随之作确定的运动，自由度数与原动件数必须相等，只有这样才能使工业机器人具有确定的运动。

一般的机械手，由于动作比较简单，自由度数比较少。对工业机器人来说，如果自由度较多，就更能接近人手的动作机能，通用性就更好。因此有些机器人的自由度超过六个，但自由度越多，结构越复杂，从而不容易满足对整体结构在重量轻、体积小和高效率等方面的要求。这是工业机器人设计中的一个矛盾。目前一般工业机器人的自由度(除手部夹紧动作外)大多不超过五个。图1-5为工业机器人常见的各种自由度——各种独立运动。

在设计工业机器人时，首先要考虑的一个问题是需要有几个移动和回转自由度，以及各个自由度在臂部、腕部或整机上如何配置，使之能更有效地实现机器人的动作要求。

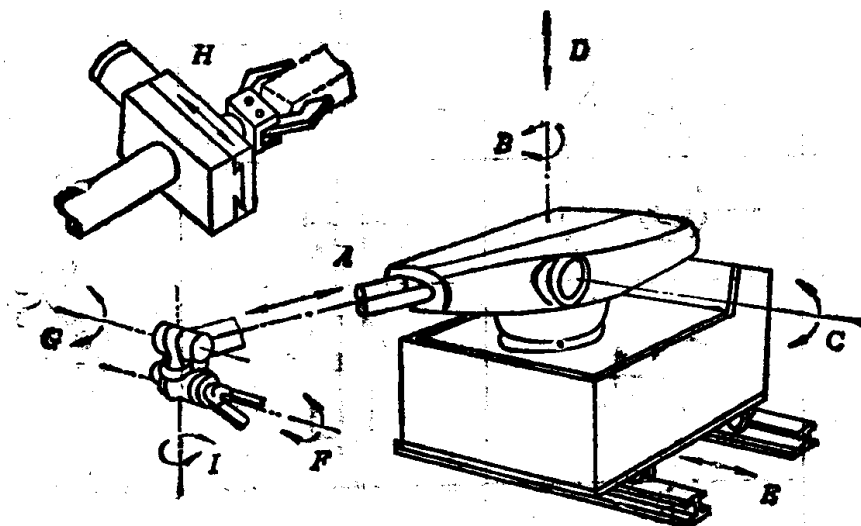


图1-5 工业机器人的各种独立运动

- A—臂伸缩； B—臂回转； C—臂俯仰；
D—臂升降； E—整机行走； F—腕部回转；
G—腕部俯仰； H—腕部直移； I—腕部摆动。

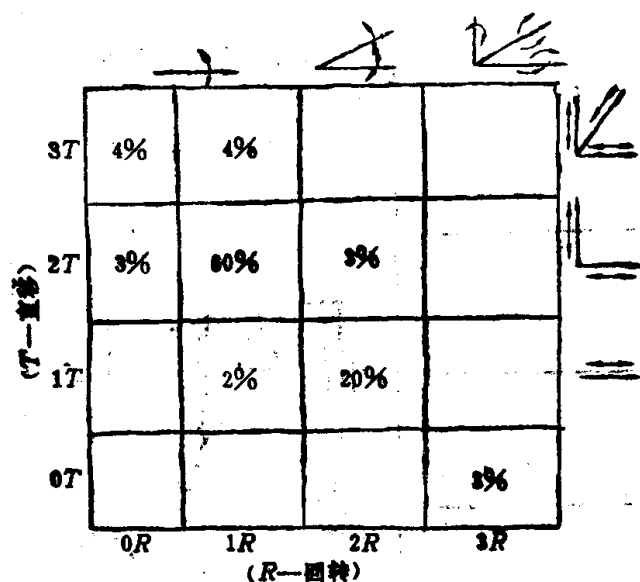


图1-6 臂部运动组合的一般状况

2. 工业机器人的运动范围 机器人的运动范围，是指机器人在平面或空间的运动轨迹图形的形状及其大小，是机器人的技术参数之一。机器人所具有的自由度的数目及其组合的不同，其运动轨迹图形也不同。而每个自由度的运动变化量(即直线运动的距离和回转运动的回转角度的大小)决定着运动轨迹图形的大小。一般情况下，臂部的自由度主要是用来确定手部以及工件(或工具)在空间的运动范围和位置的。因此，臂部运动也称作机器人的主运动，而腕部的自由度则主要用来调整手部以及工件(或工具)在空间的方位。

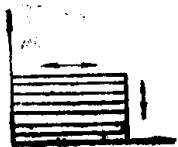
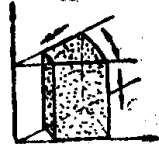
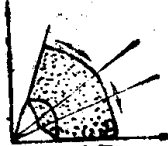
表1-3 所列臂部几种自由度的不同组合及其运动范围的图形。臂部具有一个自由度时

的运动轨迹为一直线或圆弧；具有二个自由度时，其运动轨迹为一平面或圆柱面；具有三个自由度时，其运动轨迹则从面扩大到空间成为立方体或回转体(包括圆柱体和球体等)。

图 1-6 为臂部运动组合的一般状况,由图可知具有2个直移和一个回转运动的臂部占60%之多。

臂部自由度的组合及其运动范围

表1-3

组合运动 自由度数	直线运动 (T)	回转运动 (R)	直线运动与回转运动 (T+R)
1	一直线运动构成 一个直线轨迹 	一回转运动构成 一个圆弧轨迹 	
2	二直线运动构成一个矩形平面 	二回转运动构成一个圆锥面 轨迹 	一个直线运动与一个回转运动组合: ①当直线运动方向与回转中心线垂直时构成扇面形  ②当直线运动方向与回转中心线相平行时构成一个圆柱面 
3	三个直线运动构成一个立方体图形 		①二个直线运动,一个回转运动构成圆柱体  ②二个回转运动,一个直线运动构成球体 

3. 工业机器人的各种运动形式 如前所示,由于臂部自由度的不同组合,其运动范围的图形也是不同的,可以将其归纳为以下五种形式。

(1) 圆柱坐标型(图1-7)。这种运动形式的工业机器人的臂部均具有回转、伸缩与升降

三个自由度，其运动范围的图形为一个圆柱体。它与直角坐标型比较，占地面积小而活动范围大，结构较简单、紧凑，并能达到较高的定位精度，应用广泛，运动直观性较强。

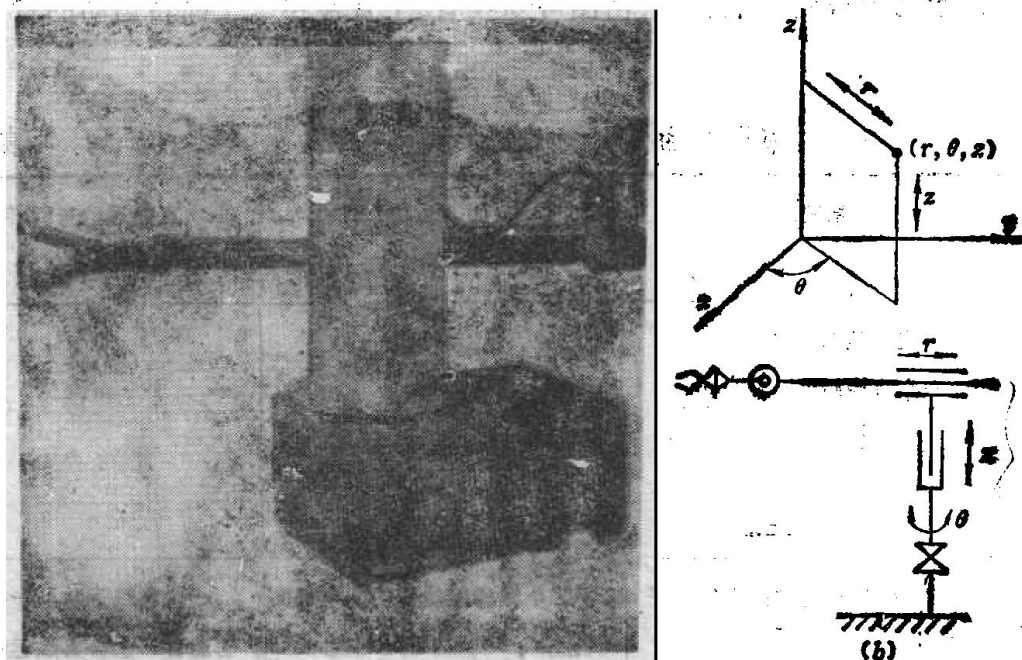


图1-7 圆柱坐标型

(2) 极坐标型(图1-8)。该运动形式工业机器人的臂部由一个直线运动与两个回转运动组成，即由一个伸缩、一个俯仰与一个回转运动组成。其运动范围的图形为一个球体。它具有动作灵活、占地面积小而工作时的运动范围大等特点。但结构较复杂，定位精度较低、运动直观性差。

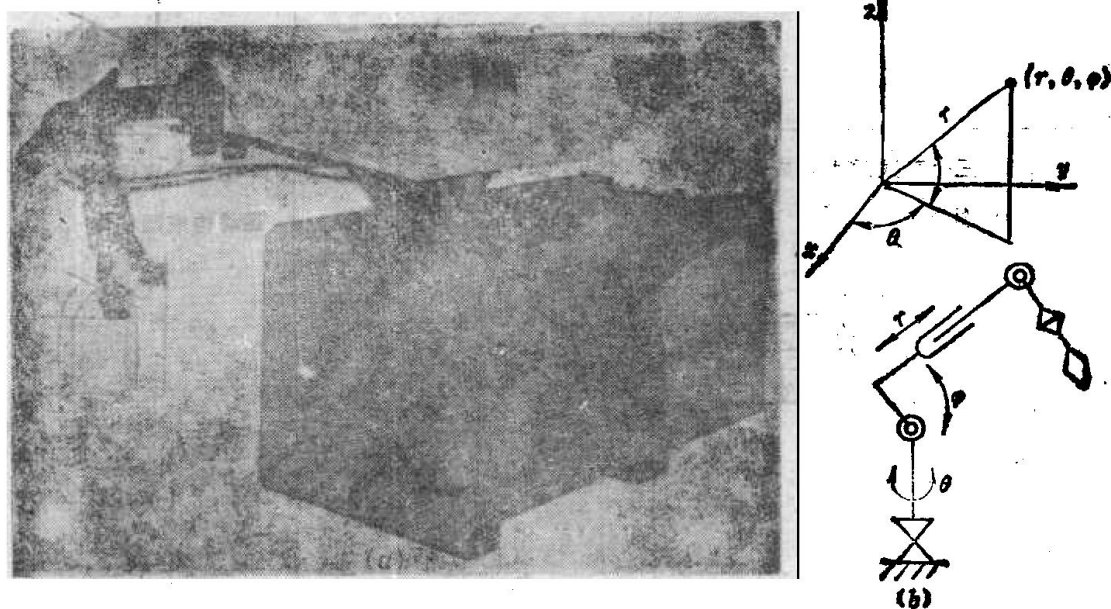


图1-8 极坐标型

(3) 直角坐标型(图1-9)。直角坐标型的工业机器人臂部由三个直线运动组成，即由沿 x 、 y 、 z 轴三个方向的运动组成。运动范围的图形为立方体。其特点是结构简单、定位精度高、运动直观性强，但占地面积大而工作范围小，惯性大灵活性差。

笛卡尔坐标系

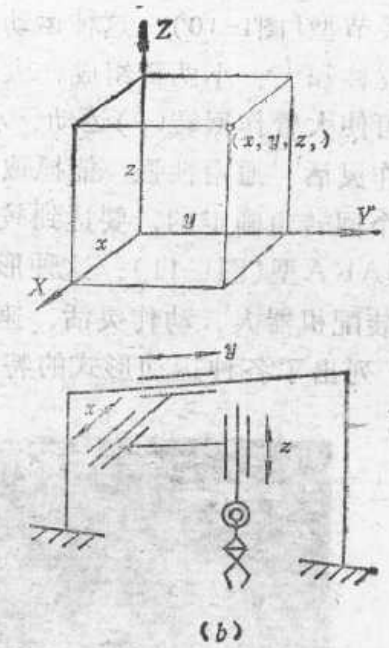
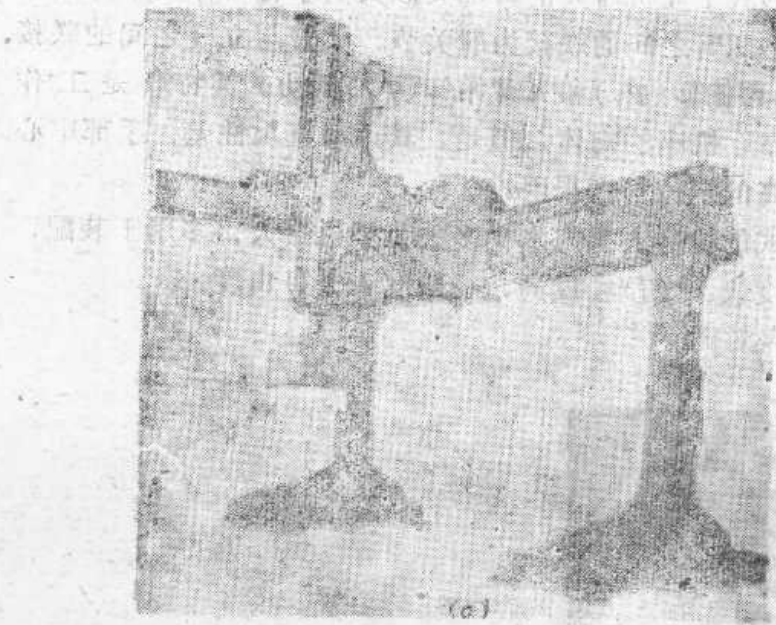


图1-9 直角坐标型

多关节型

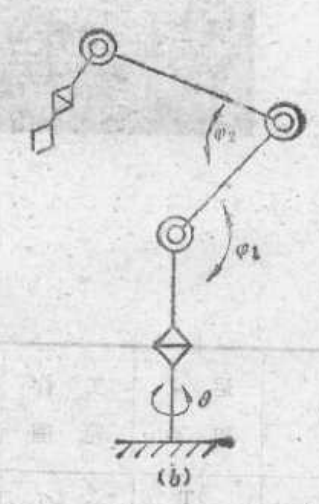


图1-10 多关节型