

马香峰 主编

# 机器人机构学

机械工业出版社

# 机器人机构学

马香峰 主编



机械工业出版社

本书根据作者的研制经验，从实用的观点出发，用国内外最新发展起来的理论，详细论述了机器人操作机的机构学问题。全书分八章，由导论、位姿方程、工作空间、运动学、动力学、轨迹规划及机构误差等有关内容组成。可供有关工程技术人员、大专院校师生和研究生参考。

2R36/69

## 机器人机构学

马香峰 主编

\*

责任编辑：孙本绪 版式设计：吴静霞

封面设计：刘代 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张 8<sup>7</sup>/<sub>8</sub>·字数 230千字

1991年9月北京第一版·1991年9月北京第一次印刷

印数 0,001—1,850·定价：8.00元

\*

ISBN 7-111-02690-X/TP·139

## 前 言

机器人机构学是新近发展起来的机器人学的重要组成部分，也是机械学的重要分支。它以机器人操作机（机器人的机构）为研究对象，从几何学和机构学的角度，分析其构形特征、运动规律、力学性能等有关方面的问题，为机器人操作机的设计、控制和调整提供理论基础。

本书是在吸收国外先进理论和经验的基础上，结合我们北京科技大学机器人研究所自行设计研制的YG-1弧焊工业机器人（获冶金部1989年科技成果一等奖）中的问题和经验，吸收了冶金部教育司的“机器人动力学研究”资助课题（1987年通过技术评定）的研究成果，又经过多届机器人机构学研究生和本科生的教学实践，先形成讲义，再整理提炼编著而成。

本书直接由刚体的位姿确定引出位姿矩阵（齐次坐标变换矩阵），并进行多种几何解释；在运动学正反解中特别注意了在实际中行之有效的几何法；对于目前尚未详见于专著的工作空间，我们进行了专章讨论，并用文献[13]中的包络理论对各类工作空间的求解进行了分析，还结合实际应用提出了组合灵活度、预置位姿以及末杆位姿图的概念；在动力学分析中，介绍了三种常用的分析方法，说明了它们的等价性，其中基于凯恩方程的动力学算法以及惯性参数的确定，取材于“机器人动力学研究”课题的主要成果。在其它章节中也引入了一些机器人研究所机构研究室的最新成果。

本书共分八章，由马香峰任主编，并编著第一章、第二章、第六章、第七章；第三章由许纪倩编著；第四章由刘淑春编著；肖英编著第五章，并参加第一章的编著；孙昌国编著第八章；徐言东参加了文稿的讨论和整理工作。

#### IV

天津大学彭商贤教授十分仔细地审阅了书稿，提出了许多宝贵的修改意见。在此表示衷心感谢。

由于我们在机器人研究工作上起步较晚，知识有限，书中不妥之处在所难免，请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

第一章 导论 .....	1
§ 1-1 工业机器人及其产生和发展 .....	1
一、工业机器人 .....	1
二、工业机器人的产生和发展 .....	2
§ 1-2 工业机器人的组成 .....	6
一、执行机构 .....	7
二、驱动装置 .....	8
三、控制系统 .....	10
四、智能系统 .....	10
§ 1-3 工业机器人操作机的运动及自由度 .....	11
一、直角坐标型 .....	12
二、圆柱坐标型 .....	12
三、球坐标型 .....	13
四、关节型 .....	13
§ 1-4 工业机器人的分类和应用实例 .....	14
一、工业机器人的分类 .....	14
二、应用实例 .....	16
第二章 位姿几何基础 .....	31
§ 2-1 刚体位姿的确定 .....	31
一、确定刚体位姿的矩阵方法 .....	31
二、位姿矩阵的几何意义 .....	32
三、位姿矩阵的逆阵 .....	36
§ 2-2 多刚体之间的位姿关系 .....	38
一、链式关系与位姿矩阵方程式 .....	38
二、变换的左乘和右乘 .....	40
§ 2-3 两种重要的旋转矩阵 .....	43
一、绕坐标轴旋转的旋转变换矩阵 .....	43

## VI

二、绕任意轴旋转的旋转变换矩阵	43
§ 2-4 姿态矩阵的欧拉角表示法	47
一、用绕流动坐标轴的转角为欧拉角的表示法	47
二、用绕基础坐标轴的转角为欧拉角的表示法	48
第三章 机器人位姿方程	51
§ 3-1 操作机两杆间位姿矩阵的建立	51
一、连杆参数与位姿变量	51
二、确定两杆之间位姿矩阵的方法	53
三、五参数表示法及位姿矩阵	58
§ 3-2 操作机位姿方程的正、逆解	59
一、开链操作机	60
二、带有闭链的操作机	76
第四章 工作空间	88
§ 4-1 概述	88
一、基本概念	88
二、参考点极限位置的确定	90
三、关于工作空间的两个基本问题	91
§ 4-2 工作空间的形成及确定工作空间的方法	91
一、形成	91
二、确定工作空间的方法	92
§ 4-3 工作空间中的空洞和空腔	115
一、定义	115
二、空洞及空腔的形成条件	115
§ 4-4 灵活性和灵活度	118
一、灵活性和灵活度	118
二、工具(或夹具)的预置位姿对机器人灵活度的影响	124
§ 4-5 末杆位姿图	125
一、末杆位姿图	126
二、确定末杆位姿图的几何法	126
三、应用	128
第五章 速度、加速度、雅可比矩阵和微分变化	133
§ 5-1 速度及加速度分析	133

一、向量在两相对转动坐标系中的求导 .....	133
二、杆件之间的速度分析 .....	135
三、杆件之间的加速度分析 .....	139
§ 5-2 雅可比矩阵及微分运动 .....	142
一、雅可比矩阵 .....	142
二、雅可比矩阵元素的计算 .....	146
三、雅可比矩阵奇异问题 .....	148
§ 5-3 微分运动 .....	150
一、关节坐标与直角坐标之间微分运动关系 .....	151
二、直角坐标系之间的微分运动关系 .....	154
第六章 轨迹规划 .....	164
§ 6-1 作业规划 .....	164
一、设立坐标系, 制订作业表 .....	164
二、建立位姿矩阵(运动)方程, 求 $T_{0i}^m$ .....	168
§ 6-2 关节坐标空间的轨迹规划 .....	171
一、两点间的PTP规划 .....	171
二、多点之间的PTP规划 .....	173
§ 6-3 直角坐标空间规划 .....	179
一、连续路径(CP)规划的直接法 .....	179
二、连续路径(CP)规划的驱动变换法 .....	183
第七章 静力和动力分析 .....	188
§ 7-1 静力分析 .....	189
一、杆件之间的静力传递 .....	189
二、操作机的静力平衡 .....	191
§ 7-2 惯性参数计算 .....	195
一、惯性参数计算公式 .....	196
二、惯性参数测量方法 .....	203
三、操作机惯性参数的“有限元计算” .....	204
§ 7-3 基于牛顿-欧拉方程的动力学算法 .....	206
一、引例 .....	207
二、动力学方程及其各项的物理意义 .....	210
三、递推算法 .....	213



§ 7-4 基于凯恩方程的动力学算法	214
一、凯恩动力学方程	215
二、基于凯恩方程的动力学算法	218
三、动力学方程符号推导示例	222
四、广义驱动力的归算问题	229
§ 7-5 基于拉格朗日方程的动力学算法	230
一、拉格朗日方程	230
二、基于拉格朗日方程的动力学算法	233
§ 7-6 动力学算法间的关系	239
第八章 机器人机构的误差分析	243
§ 8-1 机器人机构的误差分析	243
一、机器人的机构模型	243
二、机器人机构的误差分析	245
§ 8-2 机器人机构误差的概率分析	252
一、方差和协方差	252
二、随机误差和密度函数	254
§ 8-3 机器人的动态误差	255
§ 8-4 机器人机构误差的综合	258
一、目标函数	258
二、约束条件	259
§ 8-5 机器人机构的误差曲线图	262
一、机器人机构的等误差曲线图	262
二、机器人机构的等概率误差曲线图	265
参考文献	266

# 第一章 导 论

本章简要介绍机器人的定义、发展、组成、分类及应用实例，目的在于使读者从总体上对机器人系统有一个初步的了解。

## § 1-1 工业机器人及其产生和发展

### 一、工业机器人

机器人是“ROBOT”一词的中译名。ROBOT是捷克斯洛伐克剧作中一个角色的名字。它是一个完全服从于主人并只能按主人的命令办事的奴隶。由于机器人这一名词中带有“人”字，再加上科幻小说或影视宣传，人们往往把机器人想象成为外貌象人的机械装置。但事实并非如此，特别是目前使用最多的工业机器人，与人的外貌毫无相象之处，通常只是仿效人体手臂功能的机械电子装置。

根据1989国标报批稿，工业机器人定义为：“是一种能自动定位控制、可重复编程的、多功能的、多自由度的操作机。能搬运材料、零件或操持工具，用以完成各种作业”。而操作机又定义为：“具有和人手臂相似的动作功能，可在空间抓放物体或进行其他操作的机械装置。”

机器人与以前常说的机械手最主要的差别是：前者在控制系统中装有电子计算机，可通过改变软件的方法实现动作程序的变化，以完成多种作业要求。后者没有电子计算机，动作程序通常不能改变，或者通过硬件稍有变更，所以，我们认为，机械手是电子计算机出现之前，程序固定的适合于大批量生产的专用自动机械；而机器人，则是由电子计算机装备的，程序可变的、适合于多品种小批量生产的通用自动机械。

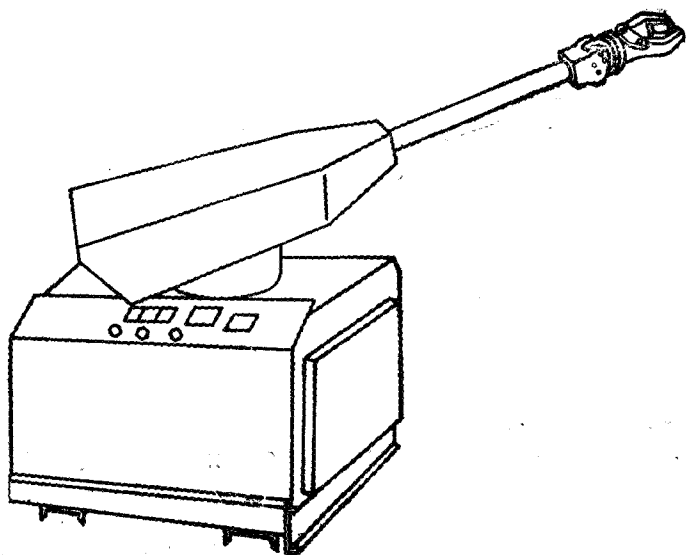


图1-1 第一台用于模铸生产的Unimate机器人

## 二、工业机器人的产生和发展

1954年，美国人George C. Devol提出了一个关于工业机器人的技术方案，并注册成为专利。然后，Condec公司采用 Devol的方案，于1960年推出了工业机器人的实验样机。不久Condec公司与Pulman公司合并，成立Unimation公司，并于1961年将它们制造的用于模铸生产的第一台工业机器人定名为“Unimate”，如图1-1。与此同时，美国的AMF公司也推出了一台数控自动通用机器，商品名为：Versatran，并以“Industrial Robot”为商品广告投入市场。

工业机器人的发展在美国经历了如下几个阶段：

1954~1967年为研制定型阶段。作为这一阶段的最终成果是Unimate 1900型机器人。

1968~1970年为进入实际应用阶段。这一期间，美国通用汽车公司1968年订购了68台。1969年该公司用自行研制的SAM型机器人21台组成了点焊车身生产线。

1970年以后，机器人技术一直处于推广和发展阶段。如1970年4月在伊利斯工学院召开了第一届全美工业机器人会议。当时美国已有200余台机器人处于自动生产线上。同时还出现了用小型计算机群控50台工业机器人的系统。最近又出现了力传感和带有视觉系统的、具有初级智能的机器人。

日本丰田和川崎公司分别于1967年引进了美国的Unimate和Versatran机器人。随后，经过消化、仿制、改进、创新，到1980年机器人技术取得了大普及。现在，日本在拥有工业机器人台数和制造技术方面都处于世界领先地位。

其它诸如西欧、东欧地区及苏联等国也都在大力发展机器人技术。

我国机器人技术起步较晚，但近几年也有了很大的发展。1987年在北京国际机器人展览会上，我国也展出了十余台自行研制或仿制的工业机器人，其中一些工业机器人目前已达到了工业应用水平。

机器人技术是遥控操作 (Remote Manipulation) 技术和机床数控 (Numerical Control) 技术相结合而发展起来的。随着原子能的利用、深海勘探和航天技术的需要，发展了遥控操作手。1948年研制了一台如图 1-2 所示的遥控操作手。它由两部分组成，一为由人操纵的具有六个自由度的主手；另一部分是装置在一定距离之外的从手。它与主手几乎相似，也具有六个自由度，是进行工作的实体。当主手由人操作进

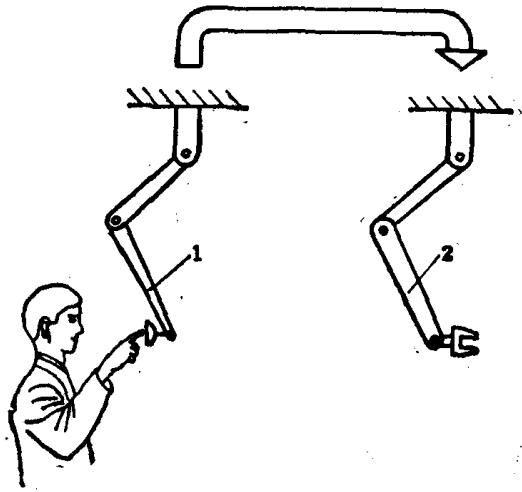


图1-2 主-从操作手

1—主手 2—从手

进，也具有六个自由度，是进行工作的实体。当主手由人操作进

行工作时，各关节有位置检测装置，检测结果作为命令被传送到从手，去指挥相应关节的驱动器，从而使从手复现主手的运动，以完成预定的作业。这种遥控操作手(又称作主-从操作手)，后来又发展成为从手可将部分力反馈到主手，使操作者具有力感觉的更先进的操作手，这种操作手至今还被广泛的用于某些生产之中。

数控机床是把伺服控制系统与数字计算机相结合而形成的新型机床。它根据程序进行工作。1953年美国麻省理工学院(MIT)放射实验室首次展示出了这种机床。

工业机器人可以看作是按G. C. Devol的示教再现(teach-in/playback) 方案进行工作的数控机床的数控系统与远控操作手的从手相结合的新的机电一体化系统。最初的示教方式是：人们用

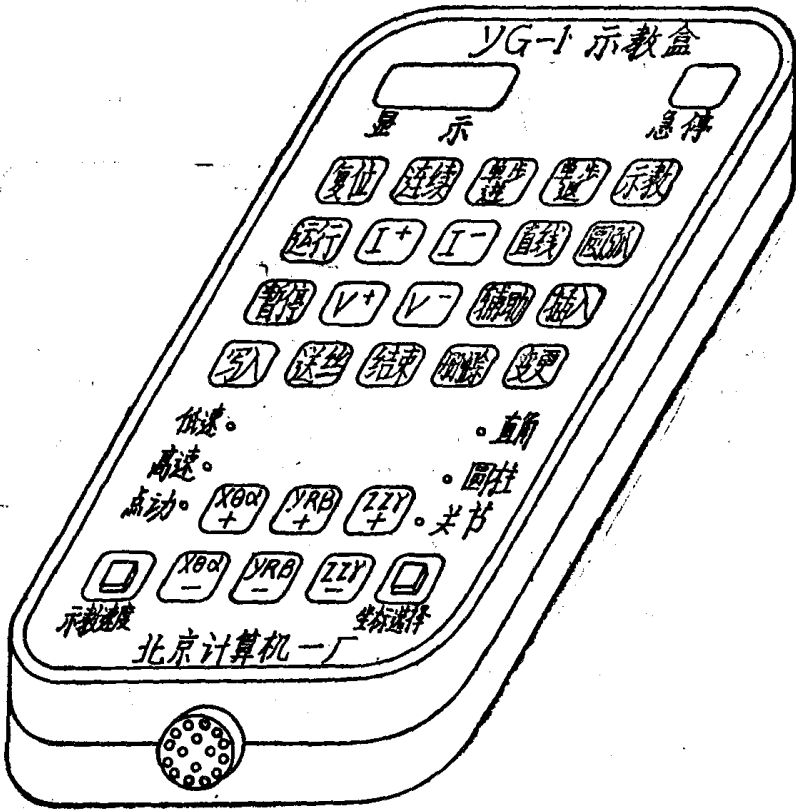


图1-3 示教盒

手抓住机器人的“手”，缓慢地进行示教工作。在示教过程中，机器人各关节的几何参数的变化被检测出来，并进行贮存。到了工作时，再把这些贮存的数据作为命令去指挥机器人的关节驱动器进行工作（称作再现），从而复现已经进行过的示教运动。

到目前为止，世界上大多数工业机器人仍然是以示教再现方式进行工作。但示教方式不单是手把手示教，更多的采用了可以手持并移动的示教盒示教，示教盒是一个如图 1-3 所示的小型操作按钮“盘”，利用盒面上的不同按钮，可以慢速地使操作机单轴（关节）运动，或多关节联合运动以合成空间直线或圆弧运动，完成示教要求。示教也可在控制台的键盘上进行。

示教，实质上是在生产线上模拟作业过程，利用给定或控制计算机记忆的方法，取得作业要求的位姿、速度以及其他工艺要求的全部数据，并由控制系统的计算机生成作业程序，从而控制机器人运动以完成所模拟的作业要求的全部动作。所以示教可以理解为以模拟生产的方式进行机器人控制程序的编制（国标称之为在线编程），但他速度较慢，影响生产。所以人们在大力研究与作业对象不发生直接联系的控制程序编制方法（国标称为离线编程），但由于设备、控制和作业环境的各种误差，离线编出的程序，往往不能直接用于生产，还需在作业过程中进行校正。

这种只能对不同作业按不同程序重复工作，没有感知和环境信息反馈控制的机器人，人们常称为第一代机器人。

随着科学技术的发展，特别是传感技术的发展，以及工业生产对机器人的性能要求越来越高，最近出现了一些带有触觉、力觉、视觉、听觉等简单智能的机器人，其中带有力传感器和简单“视”觉功能的机器人已有些用于生产，这种机器人常称为第二代机器人。

第三代机器人是人们正在设想并已开始着手研制的机器人。它不仅具有比第二代机器人更发达的感知能力，而且还具有逻辑思维、判断和决策功能。它可根据作业要求和环境信息，自行工作。可以相信，经过人们的不懈努力，这种智能化机器人，必将用于生产实际中，更好的为人类服务。

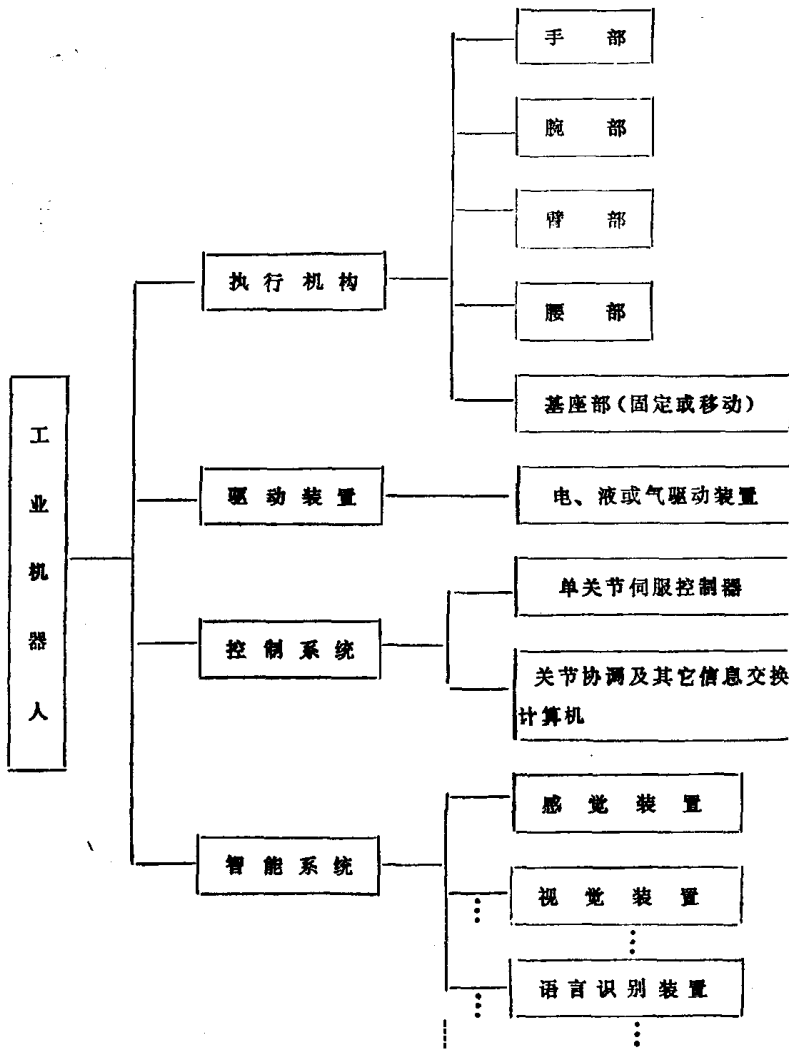


图1-4 机器人的组成

### § 1-2 工业机器人的组成

工业机器人的组成，通常有如图1-4所示的四部分——执行机构、驱动装置、控制系统和智能系统组成，这些部分之间的相互作用，可用图1-5所示的方框图表示。对于目前应用最广泛的第一代机器人，没有智能系统。

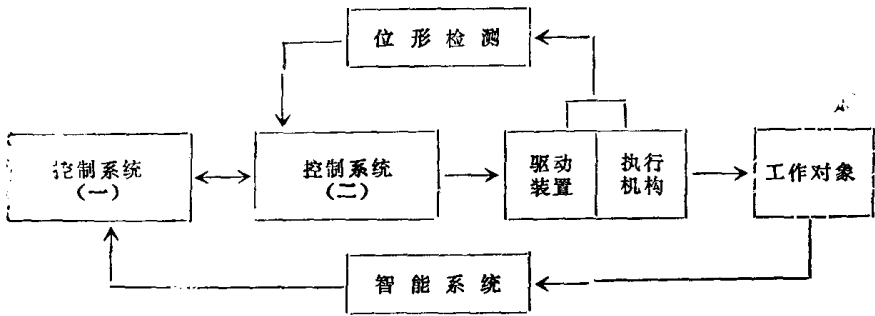


图1-5 机器人各部分组成之间的关系

### 一、执行机构

执行机构是机器人赖以完成工作任务的实体，它通常由杆件和关节组成。从功能的角度可分为：手部、腕部、臂部、腰部和机座，如图1-6。根据国标执行机构称作操作机，又常称为本体。

#### 1. 手部

手部，国标称作末端执行器。是工业机器人直接进行工作的部分，可以是各种夹持器、电焊枪、油漆喷头等。图1-7是一种

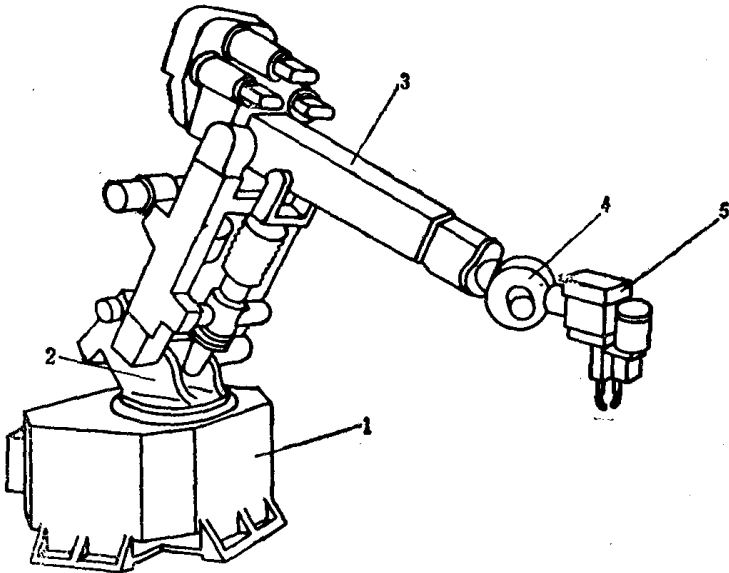


图1-6 机器人的执行机构

1—机座 2—腰部 3—臂部 4—腕部 5—手部



常见的手部。

## 2. 腕部

腕部通过机械接口与手部相连。它通常有三个自由度、多数是复杂的轮系结构,如图1-8,它可以看作是三个关节的组合,主要功用是带动手部完成任意姿势(或姿态)。

## 3. 臂部

臂用来连接腰部和腕部,通常由两个臂杆所组成,从而带动腕部运动。

## 4. 腰部

腰部(国标无此名词)是连接臂部和基座的部件,通常是回转部件。由于它的回转,再加上臂部的运动,就能使腕部作空间运动。腰部是执行机构(操作机)的关键部件,它的制造误差、运动精度和平稳性对机器人的定位精度有决定性的影响。

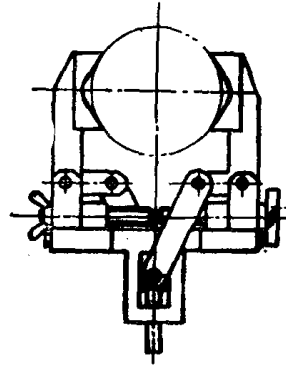


图1-7 手部

## 5. 机座

机座是整个机器人的支持部分,有固定式和移动式两类。该部件必须有足够的刚度和稳定性。

## 二、驱动装置

工业机器人的驱动装置包括驱动器和传动机构两部分,它们通常与执行机构联成一体,常用的传动机构有谐波传动、螺旋传

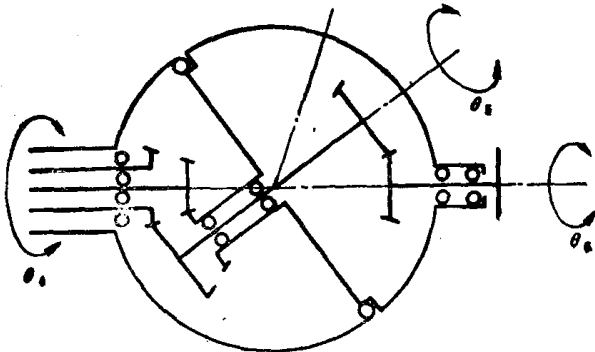


图1-8 腕部传动简图