

工业机器人的 操作机设计

马香峰 等著



冶金工业出版社

工业机器人的 操作机设计

马香峰等 著

冶金工业出版社

DW 19/25
图书在版编目 (CIP) 数据

工业机器人的操作机设计/马香峰等著. —北京: 冶金工业出版社, 1996

ISBN 7-5024-1829-6

I. 工… II. 马… III. 工业机器人-操作机械手-设计
IV. TP242.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 01726 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

利森达印务有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1996 年 9 月第 1 版, 1996 年 9 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 6.875 印张; 178 千字; 211 页; 1-600 册

12.00 元

前 言

机器人是典型的机电一体化设备,操作机(或称操作器)是它赖以完成作业要求的机械实体,只有把机构、驱动器以及它的控制规律综合考虑,才能有效地对机器人操作机进行分析和设计。本书是在作者和同事们10年来设计、研究多种类型的机器人操作机实践基础上,考虑到从事这方面工作的工程技术和研究人员的需要编著而成的。它既包含了北京科技大学机器人机构室的最新研究成果(如第四章的机电系统动态特性和第六章的机电系统动力分析的不同类型子结构方法等),又包括了操作机的常用零部件的分析和选择设计,以及一些实用的末杆位姿图、杆长优化和臂杆平衡等一些对操作机分析和设计不可缺少的专有内容。为了很好地对机器人操作机进行分析和设计,我们在第二章和第三章中介绍了多自由度驱动系统机构学的几何分析、运动分析和动力分析等基础理论知识,并尽可能地由浅入深,多举简例。在操作机的分析和设计中还涉及到一些常用零部件的设计和有限元分析等内容,由于它们目前已相当普及,本书未予介绍。总之,我们力图用最少的篇幅,阐述机器人操作机分析和设计中主要的并可推广到其他机电一体化设备中去的问题。

本书共分六章,马香峰任主编,并撰写第一、第五章;许纪倩撰写第二、第三章;刘鸿飞撰写第四、第六章。肖英为本书提供了许多宝贵的技术资料并协助修改一些章节内容。

北京科技大学余达太教授十分仔细地审阅了书稿,一些专家学者也为书稿提供过很好的意见,作者在撰写过程中还参阅了国内外有关研究人员的专著和论文,在此一并表示衷心的感谢。

由于本书篇幅有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编著者

1994.12

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 工业机器人及其发展.....	(1)
第二节 工业机器人的组成.....	(4)
第三节 机器人操作机的主要类型.....	(9)
第四节 工业机器人的分类和主要性能指标	(12)
第五节 操作机的设计步骤	(18)
第二章 操作机的几何分析	(19)
第一节 确定刚体位姿的矩阵方法	(19)
第二节 姿势矩阵的欧拉角表示法	(23)
第三节 操作机两杆间位姿矩阵的建立	(25)
第四节 操作机位姿方程的正、逆解	(28)
第五节 工作空间和末杆位姿图	(53)
第三章 速度分析和力分析	(60)
第一节 速度、加速度分析及雅可比矩阵	(60)
第二节 静力分析	(68)
第三节 动力分析	(71)
第四章 操作机的驱动-传动系统	(89)
第一节 驱动-传动系统的组成及各部分的主要类型	(89)
第二节 谐波传动	(99)
第三节 RV 摆线针轮传动	(106)
第四节 滚动螺旋传动.....	(109)
第五节 驱动-传动系统的动态特性	(114)
第五章 手腕与末端执行器	(138)
第一节 概述.....	(139)

第二节	手腕.....	(140)
第三节	末端执行器.....	(154)
第六章	操作机本体的分析与设计.....	(161)
第一节	机型.....	(161)
第二节	关节的构造及其传动配置.....	(170)
第三节	臂杆及其平衡.....	(185)
第四节	操作机的强度、刚度及动态特性分析.....	(190)
参考文献		(210)

第一章 绪 论

第一节 工业机器人及其发展

一、工业机器人及其操作机

由于机器人一词带有“人”字，再加上科幻小说和影视作品的宣传，人们往往把机器人想象成为外貌象人的机电装置。但事实并非如此。机器人，特别是工业机器人，与人的外貌毫无相象之处。在国家标准中，工业机器人被定义为：“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。它能搬运材料、零件或操持工具，用以完成各种作业。”机器人赖以完成各种作业的机械实体（称作操作机或操作器）被定义为：“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。”可见，工业机器人是一机电系统，操作机（器）是它的执行机构，该机构与电子器件密切相关，它的灵活程度和动态性能，直接影响着机器人系统的工作质量。本书的目的，在于阐述对操作机的分析和设计方法，以期对从事工业机器人的设计和应用的专业人员有所裨益。

二、工业机器人的发展和分代

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，随后注册成为专利。1960年推出了工业机器人的实验样机。1961年推出了定名为“Unimate”（如图1.1所示）的第一台工业机器人，用于模铸生产。与此同时，美国的AMF公司也推出了一台数控自动通用机电装置，商品名为“Versatran”，并

以“Industrial Robot”为商品广告投入市场。随后，工业机器人开始在美国工业生产中得到了大力发展和广泛应用。

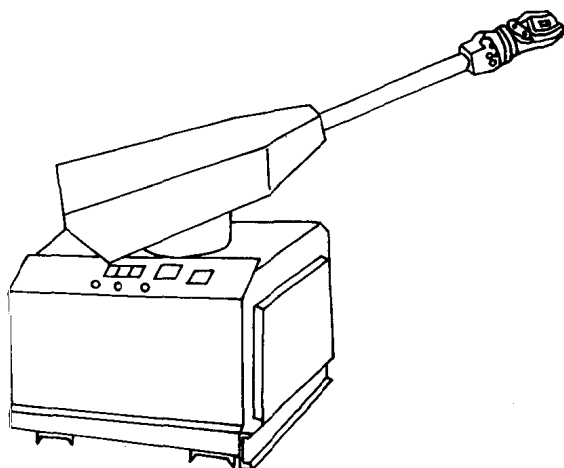


图 1-1 Unimate 工业机器人（在 Genaral Motors 工厂的模铸机使用）

日本的丰田、川崎、安川以及法拿柯等公司，自 1967 年起，开始引进或自主开发工业机器人技术，到 80 年代，工业机器人已在日本工业中被广泛应用。日本现在拥有的机器人台数和制造技术都处于世界领先地位。安川公司的 MOTO MAN 系列机器人的累计生产台数到 1993 年已处于世界首位。该公司还建成了主要由机器人组成的机器人自动装配、测试生产线。为机器人的技术进步做出了贡献。

世界其他国家，诸如瑞典、德国、意大利等，也都在大力发展工业机器人的研究和生产，并已拥有了各自的名牌产品。

我国的机器人技术起步较晚，但经过“七五”攻关，一些自行开发研制的工业机器人，已达到了工业应用水平。

目前大多数工业机器人仍使用 G. C. Devol 提出的示教/再现 (teach-in/playback) 控制方案。该方案的最初形式是：人们用手

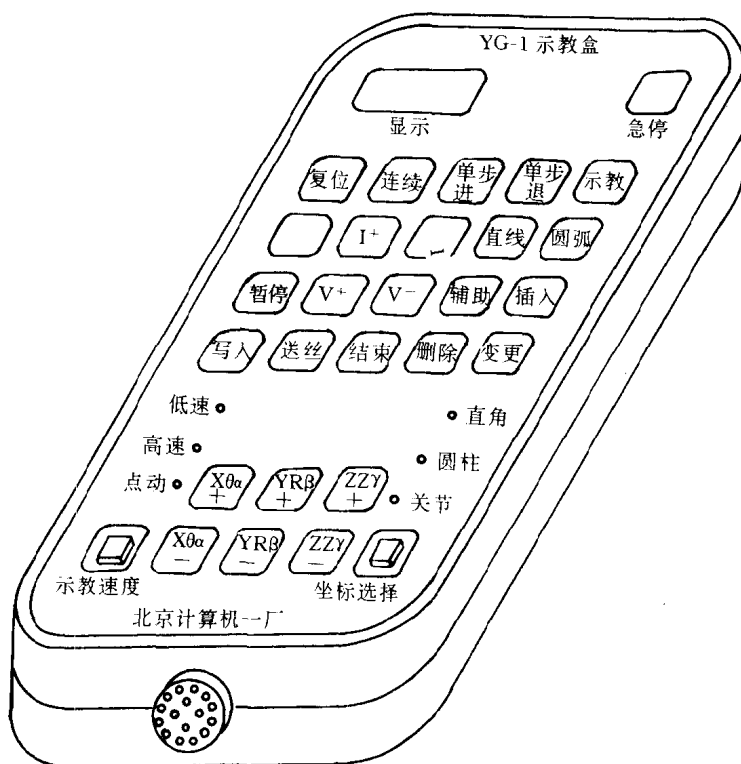


图 1-2 示教盒

抓住机器人的“手”，缓慢地进行“示教”，同时检测并贮存决定“手”的位置、姿态等运动的数据。到工作时，再把这些贮存的数据作为命令去指挥机器人复现已经进行过的示教运动。由于手把手示教比较繁重，目前更多地是采用示教盒进行示教。示教盒是一个如图 1-2 所示的小型操作按钮“盘”，利用不同按钮可手动慢速地操作机器人进行工作并贮存所需要的数据，从而完成示教要求。人们通常将按这种示教/再现方式进行工作而没有感知功能（如力感觉、视觉、听觉等）的机器人称为第一代工业机器人。

随着科学技术的发展，最近出现了带感、视、听等感知功能

的机器人，即第二代机器人。

第三代机器人是人们正在研制的智能化机器人。它不仅具有更发达的感知功能，而且还具有逻辑判断和决策功能，可根据作业要求和环境信息，自行工作。

第二节 工业机器人的组成

工业机器人通常由执行机构、驱动-传动装置、控制系统和智能系统四部分组成（如图 1-3 所示）。这些部分之间的相互作用可

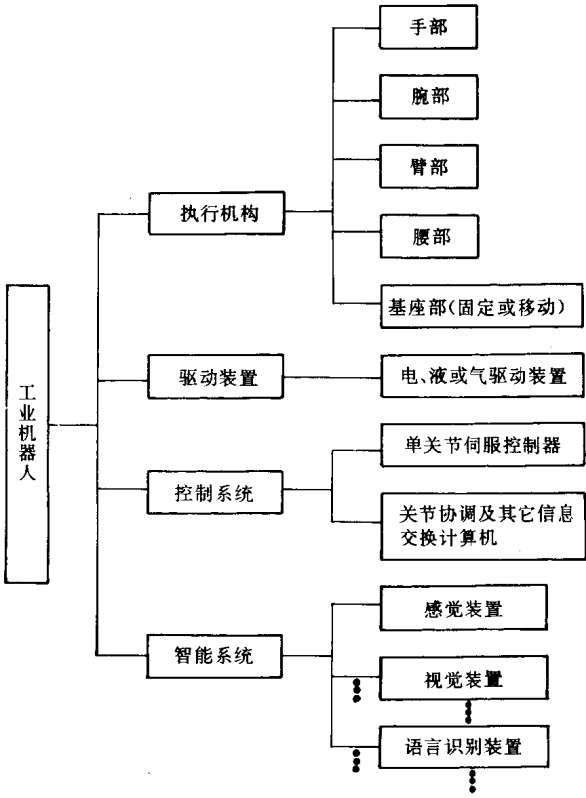


图 1-3 机器人的组成

用图 1-4 所示的方框图表示。

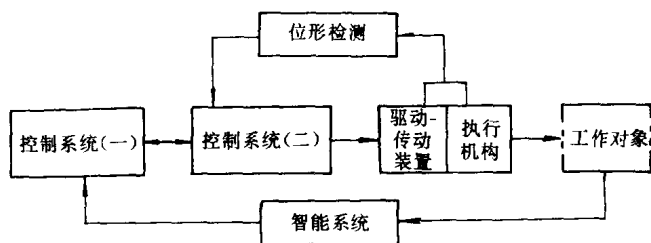


图 1-4 机器人各组成部分之间的关系

一、执行机构

执行机构(也称操作机)是机器人赖以完成工作任务的实体,通常由杆件和关节组成。从功能的角度,执行机构可分为:手部、腕部、臂部、腰部和基座等,如图 1-5 所示。

1. 手 部

手部又称末端执行器,是工业机器人直接进行工作的部分,可以是各种夹持器。有时人们也常把诸如电焊枪、油漆喷头等划作机器人的手部。

2. 腕 部

腕部与手部相连，通常有 3 个自由度，多为轮系结构，主要功用是带动手部完成预定姿态，是操作机中结构最为复杂的部分。

3. 臂 部

臂部用以连接腰部和腕部,通常由两个臂杆(小臂和大臂)组成,用以带动腕部作平面运动。

4. 腰部

腰部是连接臂和基座的部件，通常是回转部件，腰部的回转运动再加上臂部的平面运动，就能使腕部作空间运动。腰部是执行机构的关键部件，它的制造误差、运动精度和平稳性，对机器

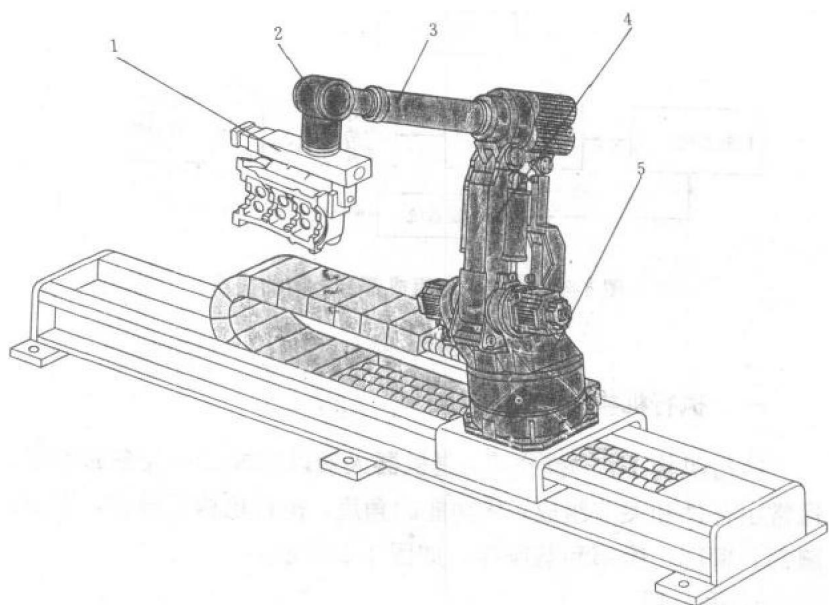


图 1-5 执行机构

1—手部；2—腕部；3—臂部；4—腰部；5—基座

人的定位精度有决定性的影响。

5. 基 座

基座是整个机器人的支持部分，有固定式和移动式两种。该部件必须具有足够的刚度和稳定性。

二、驱动-传动装置

工业机器人的驱动-传动装置包括驱动器和传动机构两个部分，它们通常与执行机构连成一体。传动机构常用的有谐波减速器、滚珠丝杠、链、带以及各种齿轮轮系。驱动器通常有电机（直流伺服电机、步进电机、交流伺服电机）、液动或气动装置，目

前使用最多的是交流伺服电机。

三、控制系统

控制系统一般由控制计算机和伺服控制器组成。前者发出指令协调各关节驱动器之间的运动，同时还要完成编程、示教/再现以及和其他环境状况（传感器信息）、工艺要求、外部相关设备（如电焊机）之间的信息传递和协调工作。后者控制各关节驱动器，使各杆按一定的速度、加速度和位置要求进行运动。图 1-6 是 PUMA 机器人的控制系统框图。该系统由 n 个单片机控制的数字

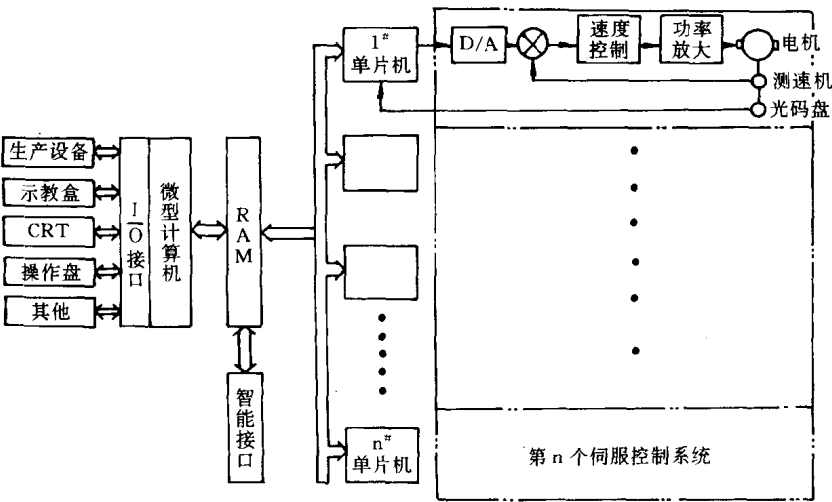


图 1-6 PUMA 机器人控制系统

伺服系统和一台控制计算机组成。图 1-7 是 MOTOMAN 机器人的控制系统（YASNAC-ERC）。该系统由两部分组成。HIB 是人机接口部分。它有一 CPU，可供人机交换信息，还有 CRT（显示器）、示教盒、键盘。它可和个人计算机连接，又可与车间控制计算机连网。TIB 是轨迹控制部分。它有一运动控制 CPU，可根据

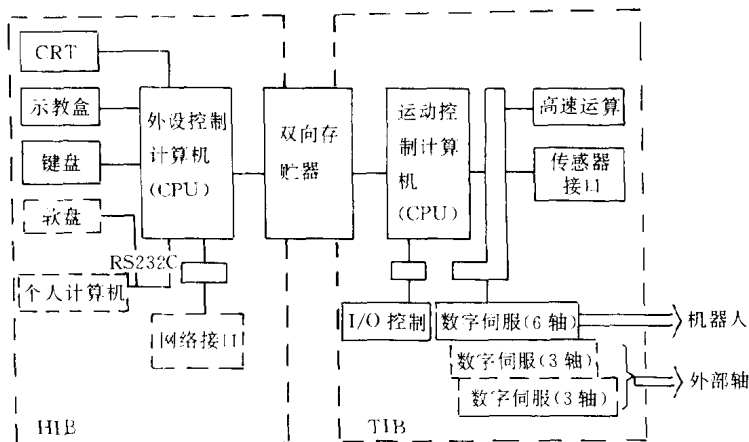


图 1-7 MOTOMAN 机器人的控制系统

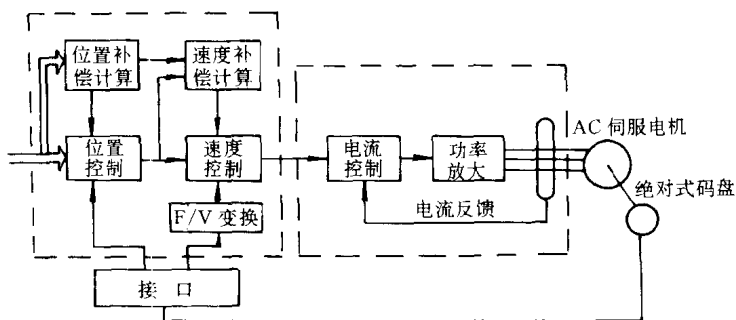


图 1-8 YASNAC-ERC 的数字伺服系统

不同机种进行轨迹规划。该部分可与工作中的各种传感器（如摄像机）相连，有 I/O 控制接口，可以控制该部分的供操作机用的 6 个运动轴（自由度）的数字伺服器以及机器人工作时周边设备的 2×3 个运动轴的数字伺服控制器。HIB 和 TIB 之间有双向存储器，用以交换信息，存贮数据。图 1-8 是 TIB 部分的数字伺服系

统框图。象 PUMA 一样,该系统也是由一台单片机组成的三闭环位控系统。它采用了软件伺服、交流伺服电机和绝对式光码盘。

四、智能系统

智能系统是目前机器人系统中一个不够完善但发展很快的子系统。它可分为两个部分:感知系统和分析-决策智能系统。前者主要靠硬件(各类传感器)实现;后者主要靠软件(如专家系统)实现。目前已用于商品生产的有六维力感觉传感器(图 1-9)。它可装于机器人的手部,以感知手部 3 个方向的力和 3 个方向的力矩。在装配作业中,这种力感觉是很重要的信息。机器人的控制系统可以根据这一

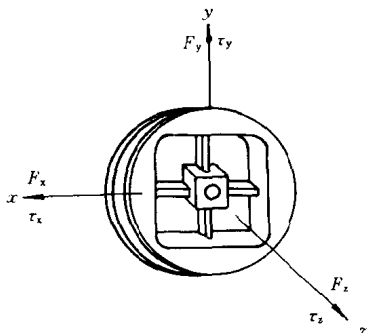


图 1-9 六维力感觉传感器

组力感,调整手部位姿,以顺利完成装配作业。在弧焊机器人系统中已运用了焊缝跟踪系统,用以感知焊丝与焊缝之间的偏差。当偏差超过一定值时,控制系统便会自动调整焊丝的位置,使焊接能够顺利地进行。

第三节 机器人操作机的主要类型

工业机器人的操作机属于空间机构,由于结构上的原因运动副通常只用转动副和移动副两类。其中,用转动副相联的关节称作转动关节(记作 R);以移动副相联则称为移动关节(记作 P)。这些关节之中,凡单独驱动的称主动关节,反之称从动关节。单独驱动的主动关节数目称作操作机的自由度数目。一般说来,运动链的自由度和手部运动的自由度在数量上是相等的,如图 1-10 所示的 PUMA 操作机属 6 自由度开链串联型。前 3 个关节(由基

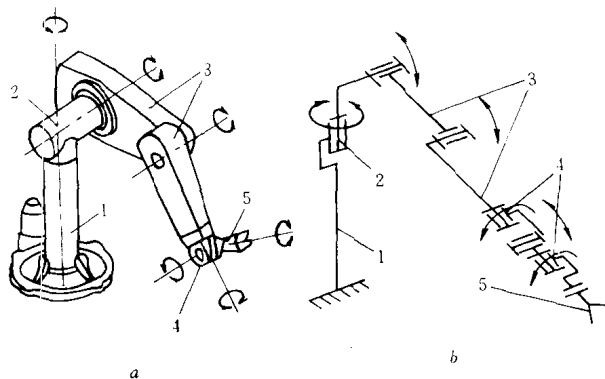


图 1-10 PUMA 操作机

a—立体图；b—机构简图

1—机座；2—腰部；3—臂部；4—腕部；5—手部

座算起，即腰部和臂部）具有 3 个转动自由度，功用是确定手部在空间的位置。所以这 3 个关节和联接他们的臂杆所构成的机构被称作操作机的位置机构。后 3 个关节（腕部）的主要功用是确定手部在空间的姿势，即手部固联坐标系相对于参考坐标系的方向。所以这 3 个关节和联接他们的杆件所构成的机构被称作姿势机构。位置机构可基本确定操作机的空间工作范围，所以前 3 个关节的运动通常称作操作机的主运动。操作机可根据前 3 关节不同的运动组合形式进行分类。

一、直角坐标型操作机

直角坐标型操作机是通过 3 个互相垂直的轴线位移来改变手部的空间位置。其前三关节为移动关节（PPP），运动型式如图 1-11 所示。该类操作机易于实现高定位精度，空间轨迹易于求解，但当具有相同的工作空间时，机体所占空间体积较大。

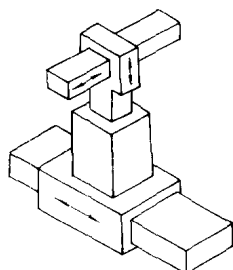


图 1-11 直角坐标型操作机

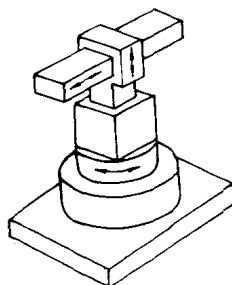


图 1-12 圆柱坐标型操作机

二、圆柱坐标型操作机

圆柱坐标型操作机是通过两个移动一个转动（PRR）来实现手部的空间位置变化，如图 1-12 所示。有名的 Versatran 机器人就具有这样的操作机。在相同的工作空间条件下，该种操作机机体所占空间体积要小于直角坐标型操作机。该种操作机结构简单，便于几何计算，通常用于搬运机器人。

三、球坐标型操作机

球坐标型操作机用两个转动和一个移动（RRP）来改变手部的空间位置。一般是腰关节可绕 z 轴转动，大臂可在 $z-x$ 平面内俯仰（转动），小臂可伸缩移动，如图 1-13 所示。著名的 Unimate 机器人就采用这种类型操作机。这种操作机的特点是结构紧凑，所占空间体积小，但目前应用较少。

四、关节型操作机

关节型操作机是模拟人的上臂而构成的。它的前三关节是转动关节（RRR），腰关节绕 z 轴转动，臂的两个关节绕平行于 y 轴的两轴线转动，如图 1-14 所示。它利用顺序的三次圆弧运动来改