



GH

高 等 学 校 规 划 教 材
工 科 电 子 类

机器人机械设计

龚振邦 汪勤恣 陈振华 钱晋武 编著



电子工业出版社

853
78

高等学校 规划教材
工科电子类

机器人机械设计

龚振邦 汪勤恣 陈振华 钱晋武 编著

电子工业出版社

内 容 简 介

机器人是一种在计算机控制下具有某些拟人功能的自动机器。机器人机械设计是机器人技术的一个重要方面。机器人机械设计与机器人伺服控制密切相关。本书围绕机器人机械设计的特点展开,内容包括:导论、机器人运动学设计和分析、机器人静力和动力分析、机器人位姿误差、机器人典型机械结构、机器人移动技术、步行机分析与设计、特殊表面移动机器人、关节伺服控制与关节传动的机电一体化设计、谐振、摩擦、空程、传动误差及其估算、关节伺服中的位置检测装置等。

本书可供机械类专业高年级本科生和研究生作教学用书,并可作为有关工程技术人员的参考书。

机器人机械设计

龚振邦 汪勤恣 陈振华 钱晋武 编著

责任编辑 孙延真

*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱 (100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京市燕山联营印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 31.25 字数: 850 千字

1995 年 11 月第一版 1995 年 11 月北京第一次印刷

印数: 1500 册 定价: 23.80 元

ISBN 7-5053-2826-3/G · 233

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990年，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

机器人是一种在计算机控制下可编程的自动机器,根据所处的环境和作业的要求,它具有至少一项或多项拟人功能,如抓取功能或移动功能,或两者兼有之,另外还可能程度不等地具有某些环境感知功能(如视觉、力觉、触觉、接近觉等)以及语音功能乃至逻辑思维、判断决策功能等,从而使能在要求的环境中代替人进行作业。在机器人的诸功能中,抓取和移动是最主要的功能。这两项功能实现的技术基础是精巧的机械结构设计和良好的伺服控制驱动,全书就是在这一思路下展开的。第一章中对机器人的发展历史没有泛泛而谈,而是紧紧围绕机器人机械设计的特点作了简单介绍,该章最后对驱动元件和执行机构之间的机械传动系统在转矩转速上的匹配作了详细介绍,这是为了突出机器人机械设计的特点。第二、三章是机器人的运动学、静力学和动力学内容,这些是机器人机械设计和控制的基础。第四章是机器人的位姿误差,这部分内容由于机器人结构的复杂性还有等进一步深入发展。第五章介绍了机器人的若干典型机械结构。第六、七、八章则是机器人的移动技术,包括地面移动和壁面移动等。第九、十章是机器人关节伺服和关节传动的机电一体化设计,包括谐振、摩擦、空程、传动误差的估算。第十一章是关节位置检测方面的内容。从上述内容可见,本书突出了机器人机械设计的特点。在机器人机械设计中有一部分是属于一般机械设计性质的,由于一般的机械设计已在机械原理、机械零件、机械设计等课程中讲授,本书就尽量避免重复,但需要指出,这些也是机器人机械设计的基础,因此要求本书的读者要修完机械原理、机械零件、机械设计以及自动控制原理等课程。

本书是为机械类专业高年级本科生和研究生而写的,也可供有关工程技术人员参考。

全书由龚振邦主编,各章节的具体撰写分工如下:龚振邦,第一、四、九、十、十一章;汪勤慈,第二、三、四章;陈振华,第五章;钱晋武,第六、七、八章。

在编写过程中得到了作者所在的上海大学特种机械机器人技术应用研究室同事们的协助和支持,在此表示诚挚的感谢。

有关机器人学或机器人技术的书籍已有很多,但以机器人机械设计为内容的书籍,国内还没有过,这次尝试难免会受到作者水平的限制而存在不少不足之处,殷切希望读者批评指正。

目 录

第一章 导论	1
§ 1.1 机器人发展历史的简单回顾	1
§ 1.2 机器人的定义和基本组成	16
§ 1.3 机器人机械设计的内容与特点	20
§ 1.4 机械传动装置对转矩转速的匹配作用	21
习题	42
第二章 机器人运动学设计和分析	44
§ 2.1 机器人运动学设计概述	44
§ 2.2 机器人的位姿几何基础	47
§ 2.3 机器人的运动方程和位移分析	64
§ 2.4 机器人微运动和微分变换	81
§ 2.5 机器人速度分析	91
§ 2.6 机器人加速度分析	99
§ 2.7 机器人工作空间的概念形成和特点	102
§ 2.8 确定工作空间的解析方法, 工作空间的性能指标	105
§ 2.9 轨迹规划	111
习题	121
第三章 机器人的静力和动力分析	132
§ 3.1 静力分析	132
§ 3.2 手爪广义力和等效关节力矩	139
§ 3.3 牛顿-欧拉方程的机器人动力学算法	142
§ 3.4 递推算法	147
§ 3.5 凯恩方程的机器人动力学算法	149
§ 3.6 拉格朗日方程的机器人动力学算法	156
§ 3.7 机器人结构动力学特性	159
§ 3.8 柔顺性分析, 柔顺运动和远端柔顺中心	163
习题	168
第四章 机器人的位姿误差	175
§ 4.1 机器人位姿误差分析	175
§ 4.2 应用机器人装配的误差统计分析	180
§ 4.3 机器人系统位姿误差的补偿	181
习题	186
第五章 机器人的典型机械结构	191
§ 5.1 概述	191
§ 5.2 直角坐标型机器人机械结构	195
§ 5.3 水平多关节型机器人	203
§ 5.4 垂直多关节型机器人	210

§ 5.5 多节弯曲型机器人	218
§ 5.6 机器人手腕结构	221
§ 5.7 机器人手部结构	229
习题	241
第六章 机器人移动技术	242
§ 6.1 概述	242
§ 6.2 车轮式移动机构设计	245
§ 6.3 独特的轮式移动机构	262
§ 6.4 车轮式移动机构运动分析	266
§ 6.5 履带式移动机构设计	271
§ 6.6 独特的履带移动机构	281
§ 6.7 移动机器人导航	286
习题	296
第七章 步行机分析与设计	298
§ 7.1 概述	298
§ 7.2 多足步行机器人典型腿机构	302
§ 7.3 步态与稳定性	317
§ 7.4 六足步行机最优稳定步态规则	320
§ 7.5 步行机器人的动态行走	329
§ 7.6 步行机器人设计实例	333
习题	350
第八章 特殊表面移动机器人	351
§ 8.1 壁面移动机器人基本机构分析	351
§ 8.2 壁面移动机器人设计实例	361
§ 8.3 腿机构的应用和吸附安全性的几何度量	371
§ 8.4 管内外移动机器人机构	377
习题	381
第九章 关节伺服控制与关节传动的机电一体化设计	382
§ 9.1 机器人控制系统与单关节的伺服驱动	382
§ 9.2 机械系统的弹性变形与结构谐振频率	391
§ 9.3 机械系统的摩擦	400
§ 9.4 空程(齿隙)和传动误差的影响	405
习题	422
第十章 谐振、摩擦、空程和传动误差的估算	423
§ 10.1 机械传动系统的谐振分析与计算	423
§ 10.2 机械摩擦的估算	437
§ 10.3 齿轮系统空程的分析和统计计算	445
§ 10.4 与变动频率相对应的传动误差的统计计算	453
习题	457
第十一章 关节伺服中的位置检测装置	458
§ 11.1 旋转变压器系统	458
§ 11.2 感应同步器	466

§ 11.3 光学编码器	469
习题	478
附录	479
参考书目及文献资料	486

第一章 导 论

机器人技术是近卅多年,特别是近十多年来迅速发展起来的一门高技术,它综合了机械与精密机械、微电子与计算机、自动控制与驱动、传感与信息处理以及人工智能等多种学科的最新研究成果,是典型的机电一体化技术。经济的发展与各行各业要求自动化程度的提高,推动着机器人技术的发展,出现了各种各样的机器人产品。机器人的研究与应用水平,是一个国家经济实力和科技发展水平的反映,可以这么认为,一个国家如果不拥有一定数量和质量的机器人,就不具备产品国际竞争的工业基础。因此,世界上许多国家,包括中国在内,都对机器人的发展予以高度的重视。

本章首先对机器人的发展历史作一简单的回顾,然后介绍机器人的定义和机器人的基本组成部分。机器人的机械设计技术是机器人技术的一个重要内容,机器人的机构、关节驱动和传动等的设计和伺服控制密切相关,因此,作为“机器人机械设计”这本书的导论,另一个主要目的是要引出机器人机械设计的特点。任何机械都要有驱动元件,机器人当然不例外,而且由于机器人的机械设计直接影响机器人的伺服性能,对机器人机械设计的一个重要方面——驱动元件和执行机构在转矩、转速上的匹配要精心考虑,这部分内容就构成本章的最后一节。

§ 1.1 机器人发展历史的简单回顾

“机器人”体现了人类长期以来的一种愿望,即用一种具有拟人功能那样的机器,来代替人去进行各种活动。

早在三千多年前西周时代,有个叫偃师的工匠,就巧妙地制造了一个能歌舞的称为“倡者”的“机器人”,虽然它实质上是一个自动木偶,但这也可能是文献记载里最早的一个“机器人”。在二千多年前的东汉时代,张衡发明了指南车,在车辆运动过程中木人的手总指向南方,这是世界上最早的移动式“机器人”的雏形。传说中三国(公元220~280年)时,诸葛亮创造了木牛流马,这可以说是另一种移动式“机器人”。唐代有四川杨行廉制作的手会动且会走的木僧,还有江苏马待封制作的机器人梳妆台和宴会劝酒名为“酒山”的服务机器人。以上仅是一些不完全的记载,但已说明了中国追求机器人实现的努力由来已久。

人类历史进入近代之后,随着第一次、第二次产业革命(17~19世纪),各种机械装置的发明和应用,特别是在机械计时装置的发展基础上,日本、西欧等国家出现了不少精巧的“机器人”玩具或“机器人”工艺品,这些装置大多由时钟机构驱动,用凸轮和杠杆传递运动。

1920年捷克剧作家K·凯比克在他的科幻情节剧《罗沙姆万能机器人公司》中,第一次提出了ROBOT这个名词,在捷克语中的原意是“供人役使的仆人”,现在ROBOT已被大家作为机器人的专有名词。

1950年美国科幻小说家艾·阿西莫夫在他的小说《我是个机器人》中首次使用了“ROBOTICS”这个名词，意思是研究机器人技术的一门学问，译作“机器人学”。他还在本书中提出了所谓的“机器人三原则”：

- (1) 机器人不可伤害人；
- (2) 机器人必须服从人给它的但是和原则(1)不矛盾的指令；
- (3) 在和原则(1)、(2)不矛盾的前提下，机器人可维护自身不受伤害。

进入50、60年代后，随着机构理论和数控伺服技术的发展，机器人进入实用化阶段，具有代表性的机器人有两种：遥控机器人和工业机器人。进入70年代后，随着计算机技术、控制技术、传感技术和人工智能技术的发展，这两种机器人在技术水平和应用领域方面得到了迅猛的发展。下面作些介绍：

一、遥控机器人

遥控机器人是一种远距离控制操作系统。通过人的操纵，它能在对人有害或人难于接近的环境中，代替人去完成各种比较复杂的精细动作。如核环境下的防污染作业等。

世界上第一台遥控机器人是1948年由美国的阿贡实验室研制完成的，它是用于处理放射性材料的一套主从操作机械手。以后经历了机械联动、机电伺服几个发展阶段。图1-1所示为一种具有“双向力反应特性”的机电伺服式遥控机器人。它主要由3部分组成：主动臂、从动臂、装有伺服放大器和电源的电气柜（图中未绘出），这3部分由多芯电缆连接起来。主动臂和从动臂在机械结构上大体相似。每只手臂有7个运动自由度：X向、Y向、Z向、方位、俯仰、扭转及夹持。这7个运动是相互独立的，各由一套相似的伺服系统驱动。伺服系统是由主动伺服传动装置、从动伺服传动装置和伺服放大器等组成的一个闭环系统，当操纵员用手操纵主动臂上的把手时，远距离的从动臂则跟随主动臂的运动来完成各种操

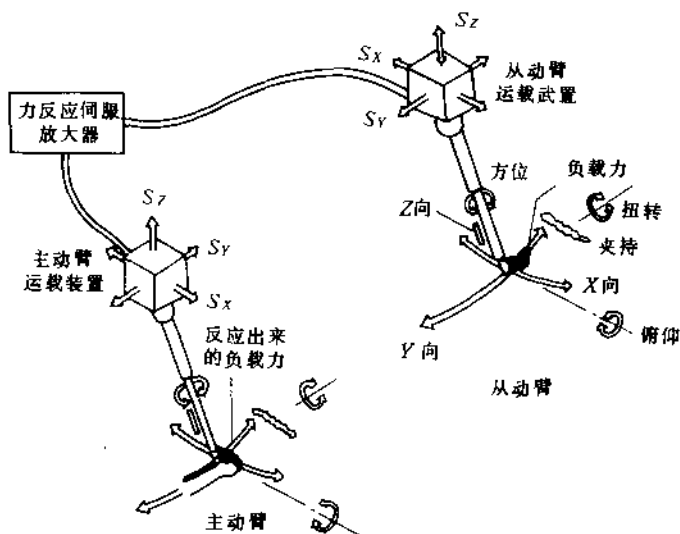


图 1-1 遥控机器人的主从手臂

作。在这套闭环系统中还有一套“力反应”系统，当从动臂在位置上跟随主动臂运动时，被移动和夹持的物体对从动臂的约束反力，通过这个“力反应”系统实时地反馈到主动臂上，使操纵员有一种力的感觉，类似于直接操作时的感觉，从而使操纵员可凭力感觉来进行较为精细的操作（如夹持细柔或易碎物体）。

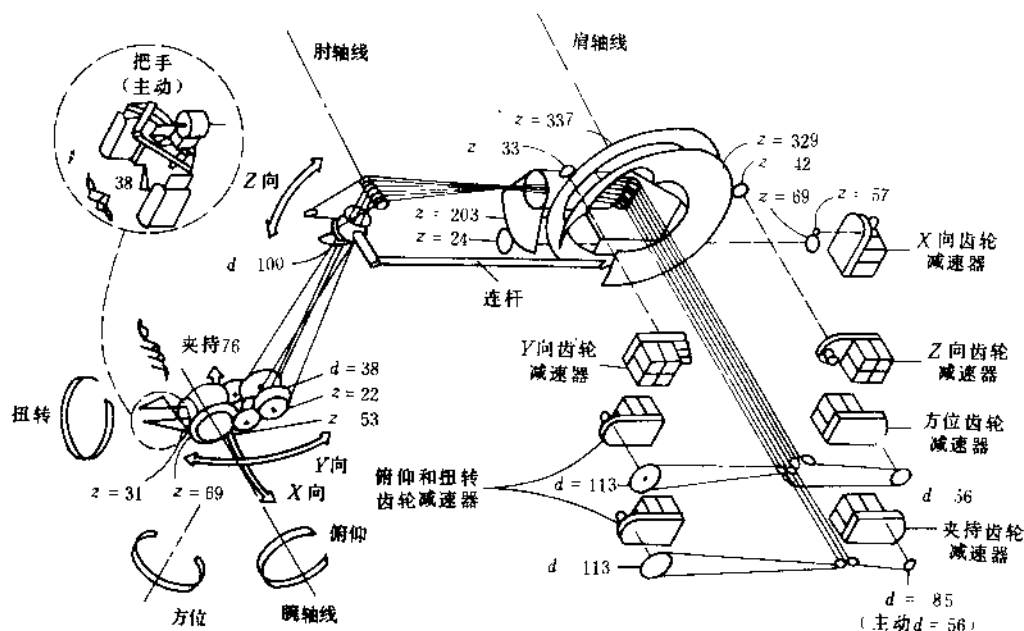


图 1-2 遥控机器人手臂机械传动图

图 1-2 是手臂机械传动图。手臂的七套机械传动如下：X、Y、Z 向三套采用了齿轮减速装置。X 向齿轮减速器的输出轴通过传动比为 10:2 的两级齿轮减速，使扇形齿轮以及与其固连的上臂绕上臂轴线回转，从而使下臂左右摆动，形成 X 向运动。Y 向齿轮减速器通过传动比为 10:2 的一对齿轮副和与该齿轮副大齿轮连接的连杆，带动下臂绕肘轴线前后摆动（实质上是一个双摇杆机构），形成 Y 向运动。Z 向齿轮减速器通过传动比为 7:8 的一对齿轮副，使整个手臂绕肩轴线摆动，形成 Z 向运动。其余 4 个自由度的运动都采用了滑轮-钢丝绳传动。从图 1-2 中可以看到方位运动是完全由滑轮-钢丝绳实现的。而俯仰、扭转、夹持三个运动的实现要复杂些：穿入下臂来自俯仰、扭转、夹持齿轮减速器的钢丝绳共有 5 根，它们均被列入腕关节，腕关节的主体是 3 个圆锥齿轮，而行星圆锥齿轮则输出俯仰和扭转的合运动。余下的一根专管夹持的钢丝绳，由下臂跨过腕关节中的一个滑轮，从行星圆锥齿轮的空心轴孔里穿出，绳端有一个球形头，如图 1 3 所示，将它卡在夹钳上的球形绳夹座内，拉紧钢丝绳，即可使钳口闭合，放松钢丝绳，钳口在复位弹簧的作用下即可自动张开。

这种遥控手臂每个运动自由度上的伺服系统方框图如图 1 4 所示。主动和从动伺服传动装置的结构相似，其主体各为一套由交流伺服电机驱动的齿轮减速器。在减速器上还装有位置检测器（自整角机）和速度检测器（测速发电机）。伺服系统的输入轴为主动减速器

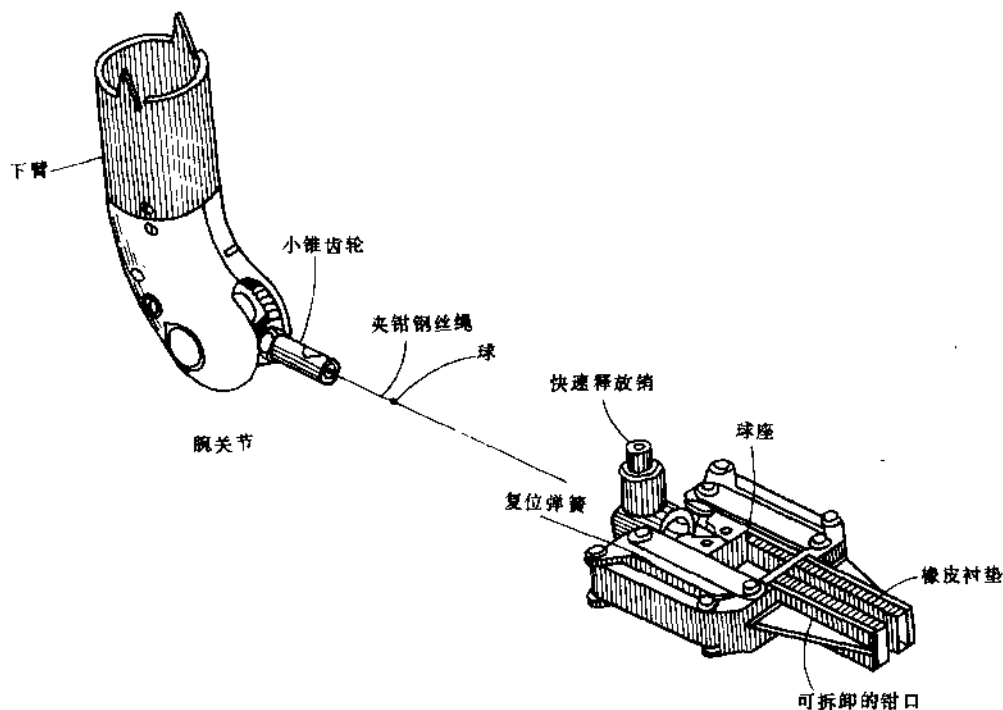


图 1-3 夹钳的动作原理

的低速轴，伺服系统的输出轴为从动减速器的低速轴。输出（输入）轴通过手臂机械传动链与相应的运动部件相连。自整角机的转子通过消隙齿轮与输出（输入）轴相连，测速发电机与电机同轴相连。从两个自整角机得到的位置信号电压在节点 $\Sigma 1$ 处相减，得到位置误差信号，通过伺服放大器、力比选择器后，有一路加到从动伺服传动装置的伺服电机的控制绕组上，使电机朝减小位置误差的方向旋转，从而使输出轴跟随输入轴运动，最后从动臂跟随主动臂运动。伺服放大器输出电压还有一路加到主动伺服传动装置的伺服电机的控制绕组上，但极性与从动部分相反，使电机产生一个阻碍主动臂运动的反力矩，此反力矩反过来通过主动臂传动链传到操纵员手上，使操纵员感觉到一个反力，这就是所谓的“力反应”。这种“力反应”在主动和从动部分之间是双向可逆的，即如果原输出轴改为主动，在从动的原输入轴上也会产生“力反应”，故称为“双向力反应”。为了保证力反应的双向性，要求传动链在运动上都应是可逆的，因此要采用摩擦小的高效率传动副，避免使用蜗杆-蜗轮副。为减小摩擦与惯量，链传动比的选择要适当。一般来说，传动比小，传动链级数就少，有利于提高效率 and 可逆性。然而，实际上传动比的减小受到限制，因为一般伺服电机转矩小、转速高，而负载需要转矩大、转速低，从而需要较大的传动比进行匹配。显然，研制或选用转矩大、转速低而摩擦和惯量较小的高性能伺服电机或其它驱动元件，是提高性能的一个重要途径。

在伺服传动装置中，主动部分用了 2 台驱动电机，从动部分用了 4 台，功率之比为 1/2；

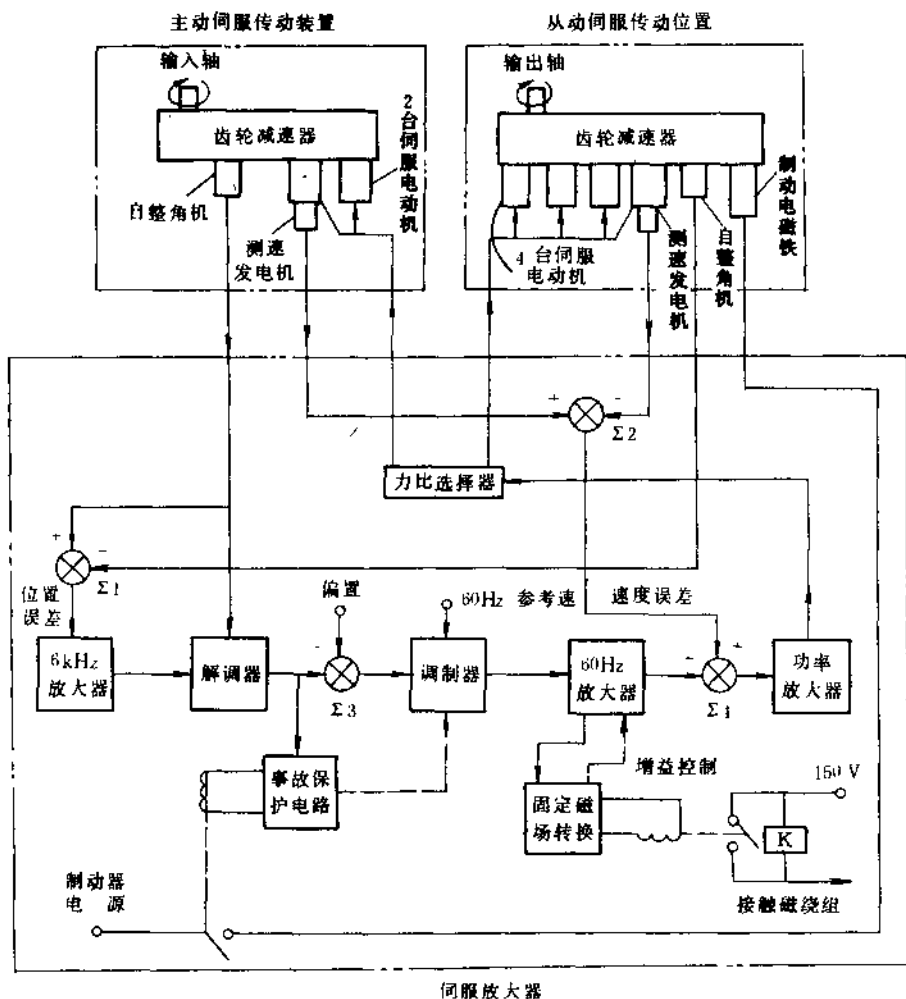


图 1-4 遥控机器人伺服系统方框图

而主、从减速器在传动比上的比率为 $27/40.2 \approx 2/3$ 。因此，在同样位置误差信号作用下，输入轴上的转矩为输出轴转矩的 $1/3$ ，亦即力比为 $1/3$ 。操纵员在主动臂上感觉到的反力仅为从动臂上实际施力的 $1/3$ ，在长时间操作较重的负载时，有利于减轻疲劳。力比选择器的作用，是通过改变加到从动伺服电机上的控制电压，来改变主、从之间的力比。如果通过这个力比选择器将加到从动伺服电机上的控制电压衰减为原来的 $1/3$ ，则主、从力比就变为 $1:1$ ，这样在夹持细柔易碎物体时，可提高操作的逼真感。每个伺服系统均可根据需要设置几种不同的可供选择的力比，操作时只需扳动电气柜上的力比选择开关，即可得到所需的力比。

下面来解剖一下所用的伺服传动装置（图 1-5）在结构设计上的一些特点。该伺服传动装置选用了额定功率为 $10W$ 的低惯量两相交流伺服电机，减速器的传动比分别为 27 和

40.2。第一级的小齿轮直接装在电机轴上，模数为 0.5mm。为了减少磨损、减轻噪声、减小惯量，第一级的小齿轮采用斜齿。小齿轮的材料均为不锈钢，第一级大齿轮材料用一种密胺树脂层压胶木，第二级大齿轮材料用铝合金（主动部分）或锰青铜（从动部分）。每台电机都通过偏心套安装在减速器外壳上，以便调节第一级齿轮副的齿隙，第二级则选用零侧隙的结合形式。主动和从动减速器的惯量仅为电机转子惯量的 25% 左右。所使用的伺服电机，转矩—转速特性曲线是一族具有负斜率的直线，当电机堵转（转速为零）时，才输出最大转矩（这时往往单向承载，对应的工作情况是手臂举重物或拧紧螺钉）。根据实际使用情况，该减速器在高速下工作的情况不多，且这时载荷较小，加大齿轮用了较软的材料，所以轮齿内面的接触应力不会很大，点蚀磨损不是主要问题。因此只需按单向脉冲加载方式计算在最大载荷（超载时）下的齿根弯曲强度。考虑到实际操作时不会在该伺服传动装置上产生长时间的连续最大载荷，所以这样计算出来的轮齿强度仍是安全的。在满足不破坏的条件下应尽量选用小模数齿轮，这样可以缩小减速器体积和重量以减小传动链的惯量。另外，在考虑加工成本的情况下，应适当提高齿轮的精度等级和齿面光洁度，以减小齿隙、摩擦和噪声，增加传动平稳性，改善伺服系统的性能。

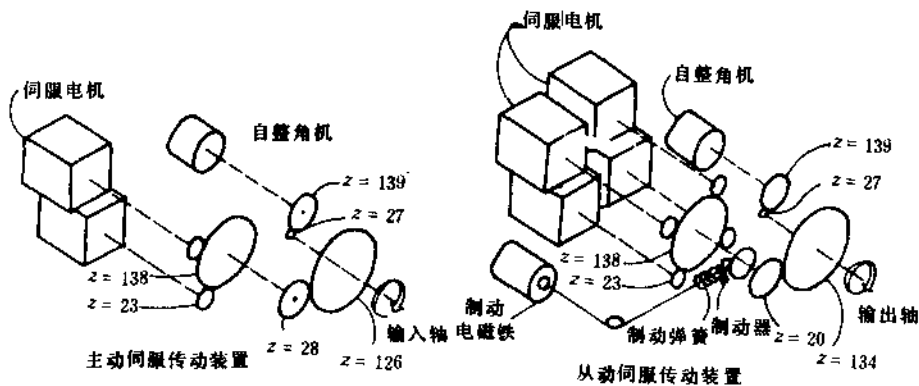


图 1-5 伺服传动装置

在图 1-5 中，输出（输入）轴上装有一个小齿轮，通过一级齿轮减速（传动比 5.15）带动装在减速器外壳上的自整角机转子转动，转子轴上的大齿轮采用了弹簧加载双片齿轮消隙结构。X、Y、Z 向减速器的输出齿轮及与其配对的齿轮也采用了偏心套式的中心距可调消隙结构。减速器的全部转轴都采用了高精度滚动轴承作支承，目的是为了减小传动链的摩擦和间隙。

遥控机器人目前已由主从操作的形式朝计算机辅助遥控操作及监控的方向发展，并在空间探索及海洋开发等领域得到应用。图 1-6 是美国 NASA 的一种空间机器人。图 1-7 是计划用于开发大陆架的 Beaver 海洋机器人。

这些遥控机器人是一种将遥控和一定程度自主技术结合起来的双工状态的机器人系统：具有智能传感器的机器人按预先编好的程序自主地进行操作。操作者不是通过主手直接操纵机器人，而是借助于各种传感器发来的信息，监控着机器人的工作，同时根据所掌

握的信息，进行判断，作出决策，然后向机器人发出新指令。

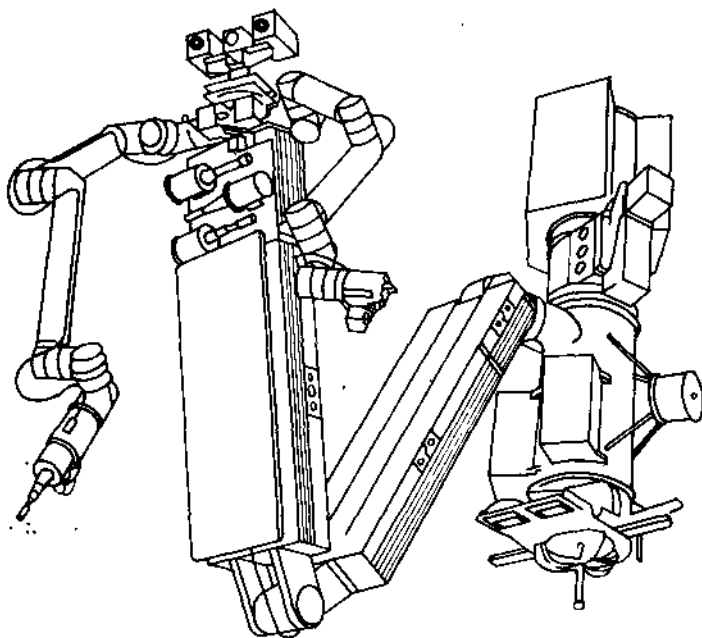


图 1-6 NASA 的空间遥控机器人 SPDR

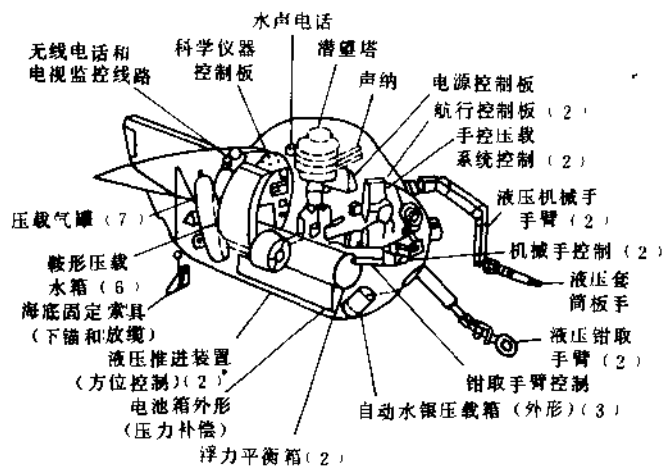


图 1-7 海洋遥控机器人 Beaver

二、工业机器人

工业机器人，一般指的是在工厂车间环境中，配合自动化生产的需要，代替人来完成

材料或零件的搬运、加工、装配等操作的一种机器人。国际机器人联合会 (IFR) 在 1990 年对工业机器人所下的定义是“在工业领域应用的一种自动的、可重复编程的 (至少具有三个可重复编程轴)、具有多种用途的机器, 这种机器可以固定在地面上或可以进行移动”。

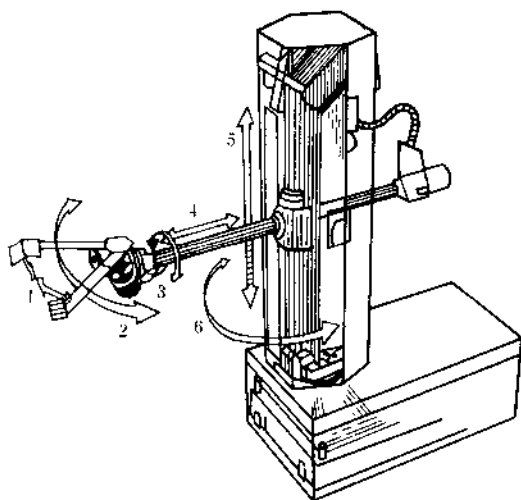


图 1-8 Versatran 机器人

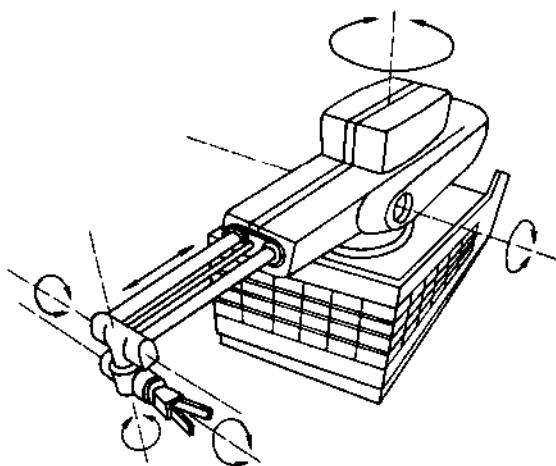


图 1-9 Unimate 机器人

1954 年美国 G. C. Devol 发表“通用重复型机器人”专利论文和 1958 年美国 Consolidated 发表“数字控制机器人”论文, 揭开了现代工业机器人研究的序幕, 1960 年美国 AMF 公

司研制了柱坐标型的 Versatran 机器人 (Versatile—多功能和 transfer—连续自动的复合词) (图 1-8), 可作点位和轨迹控制, 同年第一批点焊机器人用于工业生产。稍后, 美国 Unimation 公司研制出球坐标型的 Unimate 机器人 (图 1-9), 它采用电液伺服驱动, 磁鼓存储, 可完成近 200 种示教再现动作。从 60 年代后期起, 喷漆、弧焊机器人也相继在工业生产中开始应用。1974 年美国 Cincinnati Milacron 公司推出了定名为 “The Tomorrow Tool” (“明天的工具”) 或 T³ 的多关节工业机器人, 如图 1-10 所示, 它能举起重达 45 公

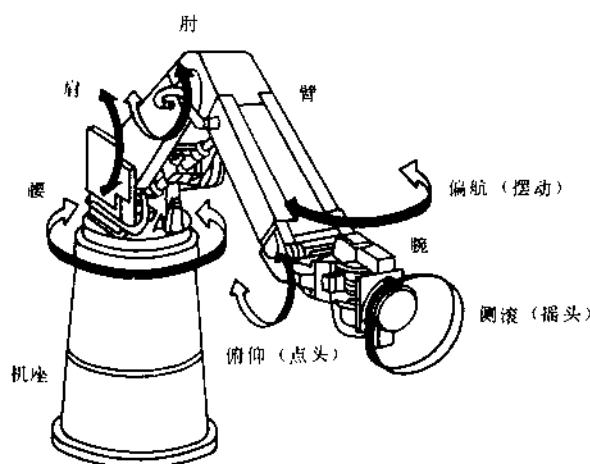


图 1-10 Cincinnati Milacron T³ 机器人

斤的物体, 并能跟综生产线上的移动物体。1979 年 Unimation 公司又推出了 PUMA (Programmable Universal Manipulator for Assembly) 机器人, 它是一种多关节结构型式、全电动驱动、多 CPU 两级微机控制, 采用 VAL 专用语言、可配置视觉、触觉和力觉传感器的、技术先进的工业机器人, 如图 1-11 所示。

PUMA 700 机器人具有 6 个关节, 这 6 个关节分别是腰关节 J1、肩关节 J2、肘关节 J3、腕关节 J4 (手腕旋转)、腕关节 J5 (手腕摆动)、腕关节 J6 (法兰转动)。各关节传动分别如图 1-12 (a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 所示。这些关节驱动装置均由伺服电机 (包括同轴联接的位置、速度检测元件)、齿轮减速传动系统以及容纳它们的框架结构 (臂或球形腕)、轴承等组成。伺服电机的驱

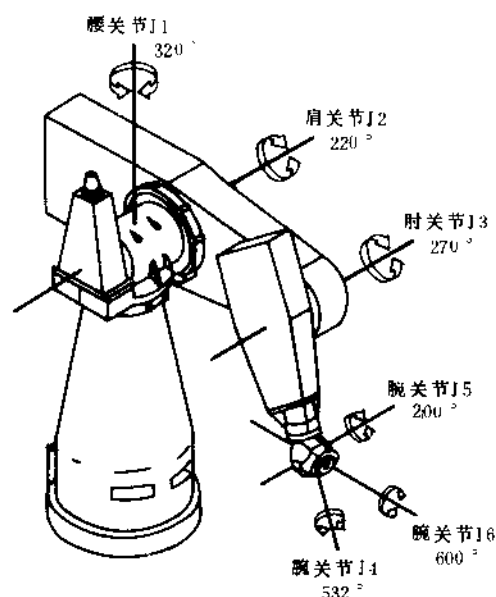


图 1-11 PUMA 700 机器人