

遥控机器人

高松海 编



原子能出版社

73.853
441

遥 控 机 器 人

高 松 海 编



原 子 能 出 版 社

1109747

内 容 简 介

本书系统地介绍了遥控机器人的构造及其应用。全书共分八章，分别叙述了世界上几个工业比较发达的国家三十年来如何将机械式主从操作机发展到现代的遥控机器人的过程。

本书对于遥控机器人的各个组成部份，如双向力反应伺服系统、伺服主从操作机、从动臂运载装置以及观察设备等辅助系统，做了详细的介绍和比较。还对遥控机器人在核领域和非核领域（航天技术、海洋开发、高能物理、医学上的显微外科手术和假肢、化学工业以及其它工业）中的应用和发展前途作了介绍。附录部份用表格形式汇总了十种典型伺服主从操作机的性能参数。

本书的文字通俗易懂、深入浅出，附有各种典型遥控机器人的照片和结构图，可供从事研制和使用各种机械手和机器人的科技人员、操纵工人及高等院校师生参考。同时，本书亦可供对遥控机器人有兴趣的工人、学生阅读。

DT13/35

遥 控 机 器 人

高松海 编

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092¹/₁₆·印张16¹/₄·字数415千字

1981年7月第一版·1981年7月第一次印刷

印数001—4200·统一书号：15175·296

定价：2.25元

前 言

机器人这个名字最初是在科学幻想小说中出现的，长期以来，它在人们的心目中一直是个带有浓厚神秘色彩的怪物。因为，在二、三十年以前，机器人还只是作家们笔下的东西，在人类的现实生活中找不到它的踪迹。

1958年，美国把国立阿贡实验室(ANL)研制的E3型电动伺服主从操作机装在一辆轮式载运车上，配以电视观察系统，取名为仆从机器人(Slave-Robot)，并在第二届和平利用原子能国际会议(日内瓦)上展出。这或许是第一台被人们称做“机器人”的实用的操作设备。稍后，意大利原子能委员会研制的、以Mascot I型电动伺服主从操作机为主体的远距离操作系统，也使用过机器人(Robot)这个名字。

1960年前后，美国把Versatran和Unimate两种程序控制的自动传送装置以“工业机器人”(Industrial Robot)为商品广告投入市场，此后，工业机器人就被用来专指那种以程序可变的通用自动搬运和传送装置为主所组成的操作系统，这一名称已逐渐在工业部门中普遍使用。而像仆从机器人那样的操作系统则使用了另外一个名称——遥控机器人。

遥控机器人(Teleoperator)一词是在七十年代初出现的，含有遥控操作器的意思。目前，一般用来专指以伺服主从操作机(手)为主体设备，并配有行走装置(腿)、观察系统(眼)等辅助设备而组成的远距离操作系统。它的操作设备、系统构成、使用目的和应用范围等均与工业机器人有较大差别。

操作机(Manipulator)一般是指由人操纵的操作设备，如：具有双向力反应特性的机械式主从操作机和伺服主从操作机、单向控制的动力操作机以及机械工业中用的锻造操作机等。目前，我国有些部门，往往把这类操作设备习惯地称为机械手。这与自动机床的上、下料或换刀用的机械手(Mechanical Hand)极易混淆，所以我们建议：把由人操纵的这类操作设备称为操作机较为妥当。

遥控机器人和工业机器人是机器人领域中平行发展起来的两个分支，它们的出现使机器人这种科学幻想中的东西开始变成了现实。经过近三十年的发展，这两种机器人都已达到了相当高的水平，在科学研究和工业生产中发挥着越来越大的作用。目前，它们都在向着同一个更高级的阶段——智能机器人(Intelligence Robot)的方向发展。

遥控机器人是一种可在对人有害或人不能接近的场所中代替人去完成操作任务的远距离操作设备。近三十年来，不少国家相继投入了很大力量从事研制工作，并已成功地应用于许多领域之中，在科学(特别是尖端科学)研究和工业生产中均占有重要地位。它对于我国实现四个现代化、特别是科学技术现代化的宏伟目标，同样具有重要意义。

为此，我们以1977年以前发表的有关国外资料为主辑成此书，并加以适当分析，以供从事远距离操作设备研制工作的人员和有关应用部门参考。

本稿完成之后，曾先后请了安邦禧同志和张荫林同志对全稿进行了审阅，此外，还特请杨析同志审阅了本书第四章的电气部份。以上三位同志对于本书初稿提出了许多宝贵意见，特此表示感谢。由于编者水平有限，缺点错误在所难免，恳望读者批评指正。

目 录

前 言

第一章 绪 言	1
第一节 遥控机器人和工业机器人	1
第二节 遥控机器人的系统分析	3
第二章 双向伺服主从操作机的基本结构和工作原理	7
第一节 基本结构	7
第二节 工作原理	9
第三章 遥控机器人综述	13
第一节 引言	13
一 机械式主从操作机的诞生	13
二 机械式主从操作机的局限性	14
三 伺服主从操作机的优点	15
四 遥控机器人的构成	16
第二节 交流型遥控机器人	17
一 美国研制的 ANL 系列	17
二 意大利研制的 Mascot 系列	24
三 西德研制的遥控机器人	28
四 小结	31
第三节 直流型遥控机器人	32
一 直流伺服系统的诞生及其特点	32
二 第一种直流伺服主从操作机	34
三 MA22 型直流伺服主从操作机	38
四 Virgule 遥控机器人	40
五 用途广泛的 MA23 系统	40
六 向着系列化商品生产迈进的 SM-229 型	44
七 外骨骼控制的 Syntelmann 型	45
八 GM2T 遥控机器人和 Schiwa 空间遥控机器人	46
第四节 液压型遥控机器人	47
一 第一台液压遥控机器人	47
二 一种水压伺服主从操作机	49
三 海洋开发用液压遥控机器人	51
第五节 能扩展人手操作能力的伺服主从操作机	52
第四章 双向力反应伺服系统	55
第一节 引言	55
第二节 伺服系统的基本类型	56
一 位置-位置型伺服系统	56
二 力-位置型伺服系统	58
三 力反馈-位置型伺服系统	59
第三节 交流伺服系统的结构设计	60

一 伺服传动装置	60
二 伺服放大器	75
第四节 直流伺服系统的结构设计	102
一 典型的直流伺服系统	102
二 直流伺服系统的改进	110
第五节 液压伺服系统简介	113
一 电动与液压伺服系统的比较	113
二 油压伺服系统	114
三 水压伺服系统	115
第六节 元件及减速器选择	115
一 驱动电机	115
二 位置信号换能器	118
三 速度信号换能器	119
四 力(或力矩)信号换能器	120
五 减速器	120
第五章 双向伺服主从操作机的结构设计	122
第一节 负载能力和手臂长度	122
第二节 手臂的自由度数 and 几何形状	123
一 自由度数	123
二 手臂的几何形状	124
第三节 手臂的控制方式	125
第四节 手臂的结构及其传动系统	128
一 典型的倒悬式手臂	129
二 结构轻巧的倒悬式手臂	133
三 有三节臂的多关节倒悬式手臂	136
四 典型的关节式手臂	138
五 倒悬式与关节式相结合的手臂	140
六 一种零间隙手臂	145
第五节 传动钢丝绳(或钢带)的长度补偿及应力分析	147
一、长度补偿	147
二、应力分析	164
第六节 手臂的自重平衡补偿	166
一 机械式自重平衡补偿方式	167
二 电气式自重平衡补偿方式	169
第七节 腕关节及终端装置	170
一 典型结构	171
二 直接驱动的结构	173
三 主动把手的改进	175
第六章 从动臂运载装置	179
第一节 桥式天车运载装置	179
第二节 载运车	184
一 轮胎式载运车	186
二 履带式载运车	192

三 无线电控制的载运车·····	195
四 半移动式载运车·····	200
第三节 其它类型的运载装置·····	203
第七章 观察系统及其它辅助系统·····	206
第一节 观察系统·····	206
一 间接观察手段·····	206
二 二维与三维电视系统的比较·····	209
三 电视摄象机及其控制方式·····	211
第二节 其它辅助系统·····	217
第八章 遥控机器人的应用·····	219
第一节 各类操作机的适用性·····	219
第二节 遥控机器人的应用范围·····	221
一 在核领域中的应用·····	222
二 在高能粒子加速器中的应用·····	224
三 在工业中的应用·····	224
四 在海洋开发活动中的应用·····	224
五 在医学中的应用·····	227
六 在空间技术中的应用·····	227
第三节 遥控机器人的应用实例·····	230
一 E4A 型在费米加速器实验室中的应用·····	230
二 Selenia Mascot 型在质子同步加速器中的应用·····	234
三 初步评价·····	237
结束语·····	239
附录 几种典型伺服主从操作机的性能参数·····	240
参考资料·····	252

第一章 绪 言

第一节 遥控机器人和工业机器人

遥控机器人虽然已有二十多年的发展历史,然而,迄今为止,它还没有一个严格的、为人们所公认的定义。这与工业机器人的情况有点类似。在某些情况下,甚至对这两种机器人的称呼也时有混淆。实际上,人们所关心的是,遥控机器人作为一种实用的远距离操作系统的特性和适用范围,至于如何给它下一个严格的、精确的定义,似乎是个较为次要的问题。

一般说来,遥控机器人是指在人的操纵下能在人难以接近(距离遥远或对人有害)的环境中完成比较复杂的精细的操作的一种远距离操作系统。当然,这里所谓的“机器人”只是指它具有人类的一部份操作功能及与操作有关的某些其它功能而言,并不意味着它的全部功能乃至形状都与人相似。事实上,迄今所有的遥控机器人,除了与操作有关的某些功能以外,其它方面均与人相差甚远。我们采用遥控机器人(Teleoperator)这个名称,一方面因为它是一种远距离的操作系统,另一方面也是为了将它与工业机器人加以区别。

遥控机器人和工业机器人作为能够模仿(或代替)人的部份动作的操作系统,虽有不少相似之处,却仍有很大的差别。图 1-1 是这两种机器人在各个发展阶段上的结构示意图。它们在系统结构、运行方式以及使用目的和适用范围等方面,均有明显的差别。

遥控机器人的操作系统是双向伺服主从操作机;工业机器人则是一种程序可变的、独立的自动抓取传送装置。而且,遥控机器人必须配有行走、观察等辅助设备,如果没有这些辅助设备,则不能称为遥控机器人,而只能称为双向伺服主从操作机;工业机器人则不一定需要上述辅助设备,目前只有少数比较先进的工业机器人带有移动装置或电视观察设备。

以双向伺服主从操作机为主体的遥控机器人,无论其复杂程度如何,均具有两个共同的特点。

其一,在结构上它们都有一个主动臂和一个从动臂,操纵人员用手直接操纵主动臂把手,而从动臂则跟随主动臂运动来完成操作任务。同时,工作对象对从动臂的约束反力通过“力反应”系统实时地回授到主动臂上,使操纵员对从动部份的操作有一种力的感觉,这与用手直接操作时的感觉相似。而且,这种力反应在主动臂和从动臂之间是双向可逆的,具有真实的力的感觉,从而可用这种装置来完成较为精细的操作(例如:在操作较细小或易碎的物品时,不会碰坏工作对象)。

其二,在遥控机器人中,人(操纵员)是不可缺少的重要组成部份,在用这种装置完成一项操作任务的整个过程中,自始至终都必须有人参加。同时,人通过观察系统(窥视窗、电视等)对从动部份的工作情况及其周围环境保持直接或间接的视觉监视,从而能充分依靠人的感觉(视觉、力的感觉、触觉等)和智力及时做出判断和决策,以适应工作对象或其周围环境的变化,随机应变地完成那些较为复杂的、或者事先难以预料的操作任务。

总之,具有双向力反应特性和有人参加操作,是遥控机器人最重要的两个特点。

工业机器人则不具备上述特点。它是一种单向的控制系统，一般没有力的感觉，人也不直接参加操作，只能按照预先编制的或者在“示教训练”时记录下来的程序，周而复始地重复完成特定的操作动作。这是它与遥控机器人的本质区别。

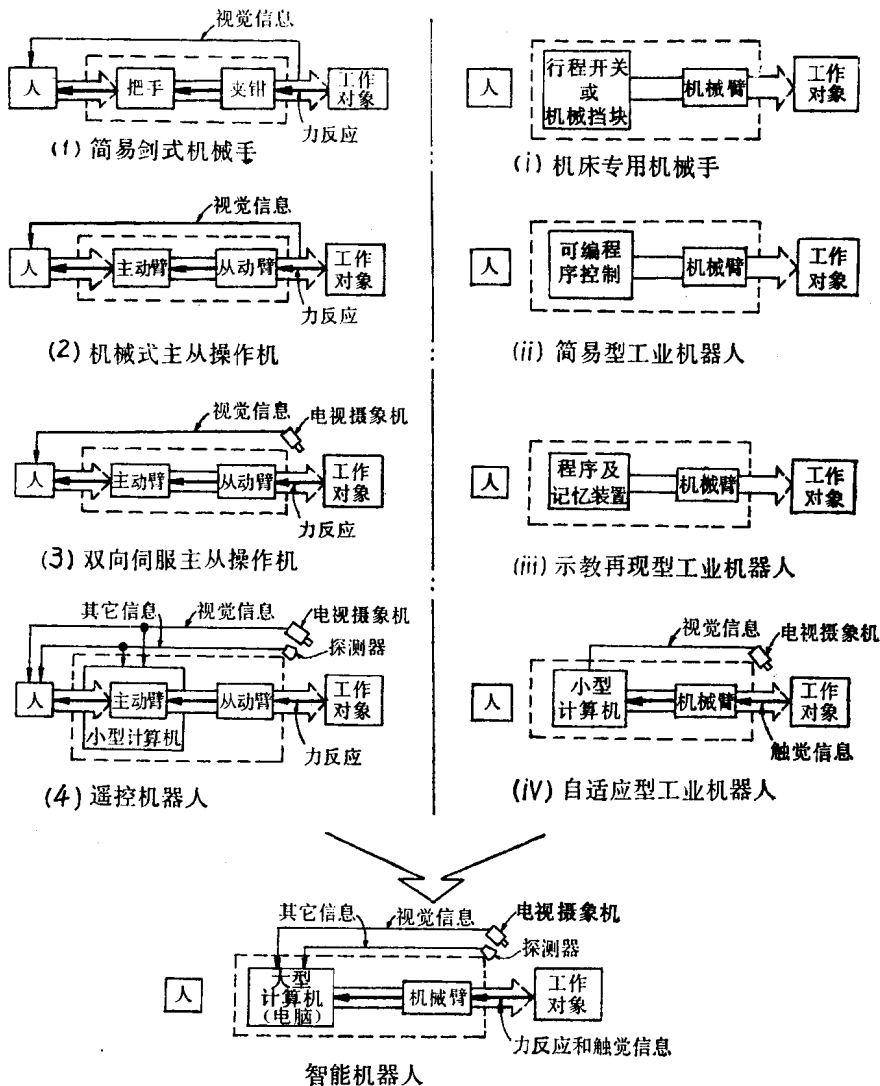


图1-1 “机器人”系统示意图

由于存在上述差别，所以它们在远距离操作系统分类学上分属于两种不同的范畴：遥控机器人属于远伸的手系统，而工业机器人则属于程控系统。在下一节的系统分析中，我们还要从分类学的角度对此问题作进一步的阐述。

上述两种机器人的本质差别，使得它们的适用范围和使用目的均有所不同。

遥控机器人主要用于对人体有危险的场所（如：放射性、剧毒、爆炸危险、高温、高压、高粉尘等）以及人难以接近的场所（如：航天航宇活动、深潜水作业及核领域中的某些场所）。使用遥控机器人的目的主要有二：其一，是为了保护操作人员的健康和人身安全；其二，是为了扩展人的操作能力，帮助人完成那些不能直接用手操作的任务。至于提高工作效

率、减少操作人员，并不是它的主要目的，实际上，就操作速度而言，目前投入使用的遥控机器人还难与用手直接操作相匹敌，而且在它工作的时候，离不开人的操纵。

工业机器人则能在那些简单重复性的操作（如：材料的搬运、工件的传送）中完全代替人的作用。使用它的主要目的是为了减轻劳动强度、提高工作效率、减少操作人员，直至实现生产过程的无人管理。

应当指出，遥控机器人和工业机器人的上述区别是就一般情况而言的。随着机器人技术的进步与发展，它们的差别在逐渐缩小，它们之间的界限也日趋模糊。所以，上述情况并非是一成不变的。

第二节 遥控机器人的系统分析

在这一节中，我们将从系统分析的角度来叙述一个完整的遥控机器人所应具备的功能及其各组成部份的作用，并从远距离操作系统分类学的角度进一步比较上述两种机器人。

任何一种远距离操作系统（或设备），要能帮助或代替人去执行某种操作任务，就必须具备与人的动作有关的功能。因此，我们先来简单地研究一下人用手去完成一项操作时的情况。

图 1-2 是人完成手工操作时所涉及的一部份肌肉和神经系统的简化方块图。

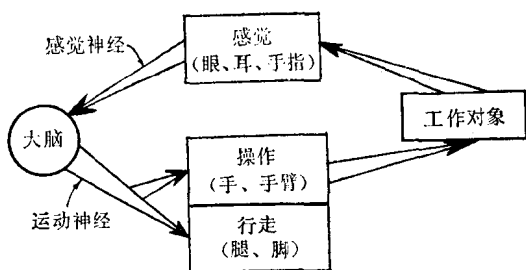


图 1-2 人的操作系统简化方块图

在进行操作时，人用自己的感觉器（眼、耳、手指等）收集工作对象及其周围环境的有关信息（视觉、听觉、触觉等），并将它们通过感觉神经传输给大脑。大脑对这些信息加以分析、判断，并做出决策。然后，通过运动神经向运动器官的有关肌肉发出指令，实现行走和操作动作。在整个操作过程中，感觉器官始终保持对工作进展情况及其周围环境的监视，

并实时地将所收集到的信息传输给大脑，以便及时做出判断和决策，指挥运动器官（手、腿等）完成下一步操作或处理可能出现的问题，直到整个操作任务完成时为止。

通过上面的简单分析，我们发现，任何一个拟人的操作系统必须具备下述五种性质不同的功能：

1. 操作

抓住一个工作对象并使之按照要求运动，运动范围一般在一、二米的距离之内。在大多数情况下，这一功能是由手臂状的机械装置来承担的，我们把这种机械装置称为操作装置。

2. 行走

将操作装置移动（往往也包括转动）到工作对象附近，并使之处在最方便的观测和操作位置上。一般说来，行走的距离原则上不受限制。具备行走功能的装置有：载运车、潜水装置、飞行器等等。由于绝大多数行走装置的结构和运动方式，迄今尚与人的腿脚相差甚远，所以暂把它们称为运载装置。

这里所说的行走功能指的是，与人用腿脚行走及用腰部俯仰和转体相当的动作。

3. 观测

观察和测量工作对象及其周围环境的感觉信息。这些感觉信息包括：视觉、听觉、力的感觉、触觉、冷热感觉等，有时还包括一些人所不能感知的其它信息，如放射性、磁场、超声波、红外线等。观测设备一般为：闭路或开路电视系统、防护窥视窗、微音器或监听系统、声纳系统以及各种类型的传感器和探测器等。在某种特定场合下，上述感觉信息并非全都需要。然而，提供视觉信息的观察系统（或手段）往往是不可缺少的，为了保证良好的观察效果，在观察系统中一般都附有照明设备。

4. 通讯

将观测设备收集到的感觉信息传输到显示和控制设备上，并将指挥信息传输到操作和运载装置以及观测设备上去。在操作系统中承担通讯功能的有：多芯电缆、同轴电缆和多路传输设备、无线电通讯设备、声纳系统以及液压控制管路等。

5. 显示和控制

指人（操纵员）与机器之间进行信息交换的功能。具有这种功能的设备一般称为人-机接口。人通过这种“接口”判读和感知由通讯设备传输来的信息，并将人的控制和指挥信息输入到机器中。如：控制台（控制盒）、各种显示装置以及伺服主从操作机的主动臂等等均属此类。

为了向具备上述各种功能的设备提供全部动力，控制区和操作区可以使用相互独立的动力源，也可以共同使用位于控制区的总电源。动力源的类型可以从电网引出的电源、蓄电池组、内燃机-发电机组、液压（或气压）源等等。

在一个实用的远距离操作系统中，上述各种功能以及具有该功能的设备（子系统）不一定是严格地一一对应的，即某一设备不一定只具备某一特定功能。实际上，往往是某项设备（子系统）同时具备几种功能，或者是由不同的几个设备（子系统）共同承担同一种功能。因此，上述的系统分析对于评价一个远距离操作系统，或者选择系统的最佳设计方案，都具有重要意义。

典型的遥控机器人由下述几个子系统组成（不言而喻，人是一个重要组成部份，故不单列出）：

（1）**双向伺服主从操作机*（简称伺服主从操作机）** 它是遥控机器人的主体，主要由主动臂、从动臂和电气柜三个部份组成，其中，从动臂具有操作功能。

（2）**从动臂运载装置** 具有行走功能。它和从动臂以及电视摄像机、探测器、传感器等一起组成遥控机器人的从动站。

（3）**电视观察系统及其它探测设备** 具有观测功能。

（4）**传输系统（多芯电缆、多路传输或无线电传输设备）** 具有通讯功能。承担遥控机器人主动站和从动站之间全部信息的传输任务，在使用同一个总电源时，还兼有为从动站

* 双向伺服主从操作机在国外文献中主要有下列几种不同的名称：

- ① 双向伺服主从操作机[BSMS](Bilateral Servo Master-Slave Manipulator)。
- ② 电动主从操作机(Electric Master-Slave Manipulator)。
- ③ 伺服主从操作机(Servo Master-Slave Manipulator)。
- ④ 伺服连接的远距离操作机(Servo-Coupled Remote Manipulator)。
- ⑤ 双向力反应[BFR]伺服操作机(Bilateral Force-Reflection Servomanipulator)。

供电的任务。

(5) **主动站** 即所谓人-机接口, 具有显示和控制功能。主要由主动臂和电气柜以及控制从动站中所有设备的控制台和显示装置(如: 电视监视器、扬声器等)组成。

(6) **电源** 为主动站和从动站的所有设备提供动力。可以是一个位于主动部份的总电源, 也可以是两个独立的电源, 从动部份的电源可用蓄电池组或内燃机-发电机组, 这样从动站会有更大的机动性。当使用液压操作机时需有液压源。

可以看出, 在上述各个子系统中, 伺服主从操作机兼有显示和控制、操作及部份观测(力反应)功能, 而显示和控制功能则是由位于主动站上的几种装置共同承担的。

上述各个子系统之间的相互关系如图1-3所示。

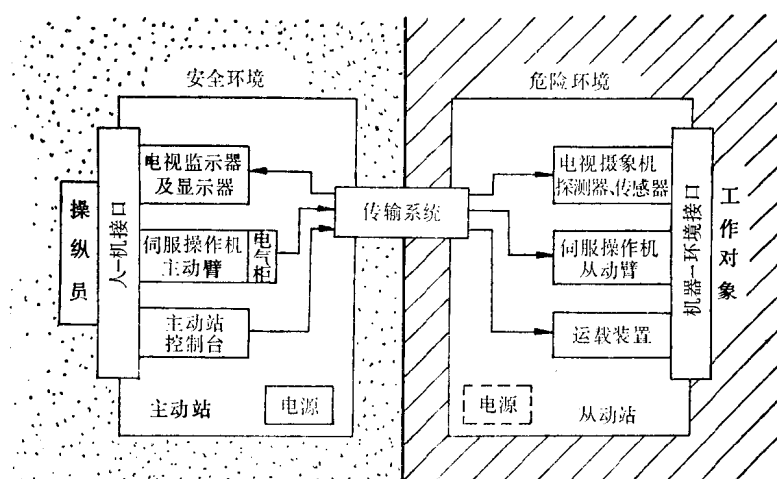


图1-3 遥控机器人结构示意图

遥控机器人和工业机器人在远距离操作系统分类学中分别属于两种不同的范畴: 前者属于远伸的手系统 (Telechirics System), 后者属于程控系统 (Programmed System)^[1]。我们在表 1-1 中对它们的差别进行了比较, 同时与人的功能进行了对比。

伺服主从操作机是遥控机器人的主体, 也是本书将要介绍的主要内容。其它设备(子系统)都可算作辅助系统, 这些辅助系统并非只适用于遥控机器人, 而且往往也适用于先进的工业机器人以及动力操作机和其它远距离操作系统。

所谓动力操作机*, 是一种单向的、开环控制的远距离操作设备, 它只有一个具有操作功能的机械臂, 没有主动臂, 主动部份是一个开关控制盒或琴键式控制台。工作时, 操纵员掀动开关, 机械臂就运动。它没有力反应系统, 只能靠视觉观察系统监督机械臂的工作状况。其控制方式多属于速率控制类型。与伺服主从操作机相比, 它的结构简单, 价格便宜, 负载能力较大(几十公斤至数百公斤); 但是动作比较迟缓、拙笨, 感觉能力差, 不容易控

* 动力操作机亦称动力机械手在国外资料中主要有以下几种不同的名称:

- ① 动力操作机 (Power Manipulator)。
- ② 单向电动操作机 (Unilateral Electric Manipulator)。
- ③ 电动机械式操作机 (Electromechanical Manipulator)。
- ④ 速率控制操作机 (Rate-Controlled Manipulator)。

制，操纵员需经较长时间的训练才能熟练掌握。其应用范围大体与伺服主从操作机相似，目前尤以核领域中用得最多，但只能用来从事动作简单、负荷较重的操作，不能用来完成较为精细、复杂的操作任务。动力操作机不属于本书的叙述范围，但因需要偶尔提及，故在此略作介绍。

表1-1 人与两种机器人的功能比较

功 能	人	遥 控 机 器 人	工 业 机 器 人
操 作	手、手臂	伺服主从操作机的从动臂	执行机构或机械臂
观测（感觉）	眼、耳、手指、感觉器官	双向力反应系统、电视摄像机、微音器、声纳及其它传感器和探测器	位置信息反馈
行 走	腿、脚（腰部）	与环境相适应的各类运载装置	一般没有（原则上可能）
通 讯	外围神经系统	多芯电缆、多路传输或无线电传输系统	短多芯电缆
显示和控制	中枢神经系统	主动站的各种设备	没 有
动力源	新陈代谢	主电源、蓄电池组、内燃机-发电机组、液压源	液压（气压）源、主电源（或蓄电池组）

第二章 双向伺服主从操作机的基本结构 和工作原理

为了以后叙述方便，我们以第一种投入使用的 E3 型^[2] 为例，先简单地描述一下伺服主从操作机的基本结构和工作原理。

第一节 基本结构

图 2-1 是 E3 型伺服主从操作机的基本结构示意图（图的上部是其运载装置，本章暂不讨论）。

双向伺服主从操作机主要由三个部份组成：

- （1）主动臂；
- （2）从动臂；
- （3）电气柜（伺服放大器和电源）。

主动臂和从动臂的机械结构大体相似，由装在电气柜里的伺服放大器通过多芯电缆（或多路传输、无线电传输设备）将它们连接起来。

每只手臂均由肩部（传动箱）、上臂、下臂、肘关节、腕关节和终端装置（主动端为把手，从动端为夹钳）组成。它有七个运动自由度，其中包括笛卡尔坐标系中的全部六个自由度（三个移动和三个转动）及一个夹持动作。这七个运动的名称和含义如下：

X 运动——上臂绕自身轴线回转，使下臂左右摆动（亦称侧向运动）；

Y 运动——下臂绕肘轴线前后摆动；

Z 运动——上臂绕肩轴线上下摆动；

方位——下臂绕自身轴线回转；

俯仰——腕端部绕腕关节轴线摆动；

扭转——腕端部绕自身轴线回转；

夹持——终端装置（把手和夹钳）的夹持动作。

从图 2-1 中可以看出，手臂的三个移动坐标（X、Y、Z）实际上也是由旋转运动形成的，只是因为其回转半径较长，在终端装置处可以近似地看成是直线运动。它不是严格的笛卡尔直角坐标形式，故也有人把这种坐标称为多关节坐标，在几何形状上类似于工业机器人领域中的多关节式机器人。

上述七个运动是相互独立的，各由一套结构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组成的一个闭环随动系统，它是伺服主从操作机的核心，主动臂和从动臂之间的力和运动都是通过伺服系统传递和驱动的。

在 E3 型中，每只手臂的七台伺服传动装置中，有六台装在肩部传动箱内，只有 X 运动的一台伺服传动装置位于上臂的后部。在伺服传动装置的输出（入）轴上装有齿轮或滑轮，

通过手臂机械传动系统分别与手臂的各个运动部件相连，以传递力和运动。其中，X、Y、Z三个运动是通过齿轮传动链传动的，其余四个运动则采用滑轮和钢丝绳传动。E3型的手臂机械传动系统示意图见第五章的图5-6。主动臂和从动臂的机械传动系统基本相同，仅在终端装置处略有差别。

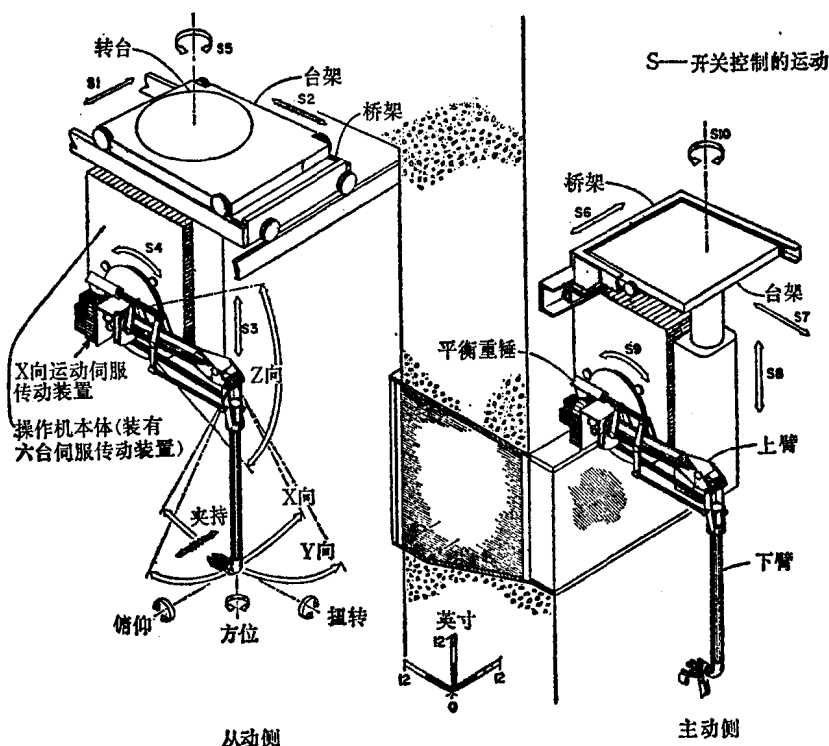


图2-1 E3型及其运载装置的结构示意图

此外，还有一个能使整个手臂绕肩轴线作大幅度回转的运动——肩部回转运动（如图2-1中的S4和S9所示），它可在大约270°的范围内变换Z向运动的中间位置，以便使夹钳对位于高处乃至头顶上的工作对象进行操作，这大体上类似于人的整个身体的俯仰运动。它是开环控制的，由电气柜上的开关来控制，没有力反应系统，故不算在伺服主从操作机的七个基本运动之内。

每只手臂的七套伺服放大器和相应的电源一起放在一个位于主动臂旁边、操作人员随时能观察和操作的电气柜里。

图2-1所示只是一只臂的情况，一副伺服主从操作机往往由左手和右手组成，即包括左右两只主动臂、左右两只从动臂和两个电气柜。左右两臂分别自成系统，一般情况下可把它们一起装在同个从动臂运载装置和主动臂支架上进行配合操作，必要时也可拆开来只用一只臂单独进行操作。

以上所述，只是一般的双向伺服主从操作机的基本结构概貌，其具体结构在各种型号中不尽相同，将在后面再详细叙述。

第二节 工 作 原 理

双向伺服主从操作机七个运动的伺服系统结构大体相似，故只需对一套伺服系统的工作原理加以说明。

一套双向力反应伺服系统由下述三部份组成：

- (1) 主动伺服传动装置；
- (2) 从动伺服传动装置；
- (3) 伺服放大器。

主动和从动伺服传动装置分别安装在主动臂和从动臂的肩部，伺服放大器放在电气柜里，用电缆将这三个部份连接起来。

E3型的伺服系统方块图如图2-2所示。这是一种比较典型的交流伺服系统。

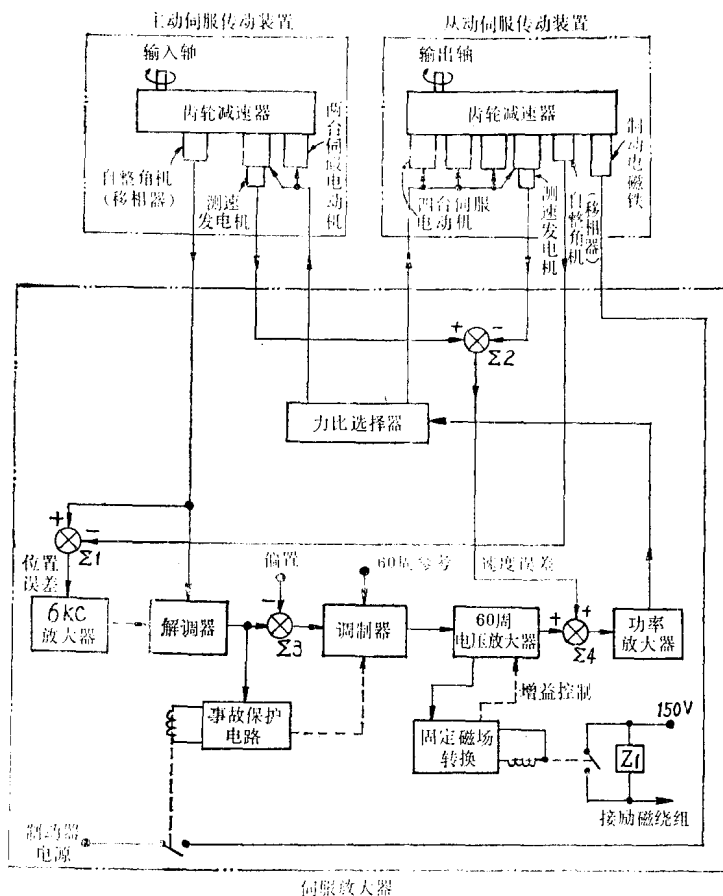


图2-2 E3型的伺服系统方块图（晶体管式）

主动和从动伺服传动装置的结构相似，其主体各为一台由伺服电动机驱动的齿轮减速器（主动减速器和从动减速器）。在减速器上还装有位置信号换能器（自整角机）和速度信号换能器（测速发电机）。其差别只是两者的电动机功率和齿轮减速比不同，而且从动减速器比主

动减速器多一套制动系统。我们把主动减速器的低速轴称为伺服系统的输入轴，把从动减速器的低速轴称为伺服系统的输出轴。输出（输入）轴通过手臂机械传动系统与相应的运动部件相连。自整角机的转子轴通过无侧隙齿轮传动链与输出（输入）轴相连，其输出电压（位置信号）与输出（输入）轴的转角成正比。测速发电机的转子与一台伺服电动机同轴转动，其输出电压（速度信号）正比于输出（输入）轴的转动角速度。

将主动和从动两个位置信号电压在节点 $\Sigma 1$ 处相减，得到位置误差信号；将两个速度信号电压在节点 $\Sigma 2$ 处相减，得到速度误差信号。位置误差和速度误差均作为控制信号分别输入到伺服放大器中。其中，位置误差信号是主要的控制信号，由伺服放大器的输入端 $\Sigma 1$ 处输入，伺服放大器的输出端则通过力比选择器分别接到主动和从动伺服电动机的控制绕组上。这样，加在伺服电动机上的控制电压就与位置误差信号成正比。

（一）随动和力反应

操作机的主动臂和从动臂都处于中间平衡位置时，误差信号均为零，伺服放大器没有输出电压。

当操纵员使主动臂偏离中间平衡位置做某一动作时，通过主动臂的传动系统，使与该动作相应的主动伺服传动装置的输入轴转过一个角度，从而带动主动伺服传动装置的位置信号换能器（自整角机）的转子转动，产生一个位置信号电压。这时，从动部份仍处于中间平衡位置，从动位置信号仍为零。于是，在 $\Sigma 1$ 处就产生一个位置误差信号 e ，此信号输入到伺服放大器里，使其末级功率放大器产生一个输出电压，分别加到主动和从动伺服电动机的控制绕组上去。

末级功率放大器的输出电压加到从动伺服传动装置的伺服电动机的控制绕组上，使电机旋转，通过从动减速器使输出轴转动，再通过从动臂的传动系统使其相应部件向着减小位置误差的方向运动，亦即从动臂与主动臂的运动方向相同。这样，就使得从动臂能跟随操纵员所操纵的主动臂的运动。主动臂运动得越快，位置误差信号就越大，从动臂也就跟随得越快。

同时，末级功率放大器的输出电压也加到主动伺服传动装置的伺服电动机的控制绕组上，但极性与从动部份相反，使电机产生一个阻碍主动臂运动的反力矩，此力矩反过来通过主动臂的传动系统传到主动臂的相应部件上，使得操纵员感觉到有一个阻碍他的手臂运动的反力，就像他用手直接进行操作时一样，这就是所谓力反应。这种力反应在主动和从动部份之间是双向可逆的，故称为双向力反应。力反应的存在使伺服主从操作机具有力感觉的性能，这是能用它来从事较为复杂而精细的操作的关键。

图 2-2 所示的伺服系统亦称为位置-位置型双向力反应伺服系统。

因为，实质上从动臂的运动和力是由位置误差信号控制的，所以，从动臂的运动总是滞后于主动臂的运动，以保证总有一个位置误差信号使它作跟随运动。当主动臂停止在某一位置（平衡位置除外）上时，从动臂就停止在比主动臂稍微滞后一点的位置上。这时，仍存在一个位置误差信号，它使输出轴上产生的转矩恰好与从动臂上的负载力矩相平衡；它同时也使输入轴上产生一个反力矩，使操纵员感觉到从动臂上的负载。因此，这是一个有差随动系统。在伺服放大器的放大倍数不变时，则负载越大从动臂的滞后也越大；而在从动臂的负载不变时，则伺服放大器的放大倍数越大，从动臂的滞后就越小。在单位载荷下从动臂滞后的大小称为操作机的跟随性或刚性，它包括伺服系统本身的跟随性及主动臂和从动臂传动系统