

绪 论

尽管机器人技术发展很快，但至今“机器人”这一术语仍无统一的、固定的概念。目前，这个术语的含义很广，而且很直观。有些人甚至把各种类型的控制论游戏装置、主从机械手、机械翻译系统、会下棋和能谱曲的电子计算机等等也都看成机器人。

一般说来，机器人可定义为完成机械动作的通用自动机。到目前为止，原则上仍是把完成体力劳动的人作为构造机器人的模型。机器人的特点是借助于感受装置和执行机构能主动，而且有目的地和外界进行信息的和物理的相互作用。机器人对外界物体产生作用，并能在外界环境中行走。机器人的各个部分（分系统）由信息处理装置（如电子计算机）联结成统一的系统。在结构上，机器人的各个分系统是可以分开的。也可以把各个分系统组合成不同的机器人。

机械手是机器人主要的（目前还是唯一的）执行机构。但是，可以设想用强电磁场来操纵物体，也就是把强电磁场作为机器人的执行机构；可以设想让强大激光装置按所需要的方式对周围物体进行作用，也就是把强大激光装置作为机器人执行机构；可以设想其它类型的机器人执行机构。当然，在任何情况下，对外界物体产生灵活作用的执行机构是机器人必不可少的组成部分。本书下面讲到执行机构时就是指机器人的机械手。机器人的另一个必备的特征是通用性。不具备通用性就不能算做机器人。举例说，只有一种程序的加料器，

虽然是自动机械手，但是由于功能不能够调整，不应称作机器人。不需要人参与操作，有自治操作能力也是机器人必备的特征。不具备这一特征也不应该认为是机器人。举例说，由人远距离控制的充当电视摄像机的机械手以及其它各种类型的主从机械手，都不能列入机器人之列。

把机器人定义为完成机械动作的通用自动机，这是对所研究的新型机器下的广义定义。当然，由于自治程度及操作人员参与特点的不同，各类机器人之间存在着本质上的差别。甚至机器人本身还有分工，这种分工是根据它们具体应用的特点而决定的。因此，各类机器人的通用程度有很大差别。

现在来研究机器人的一般结构（图1）。机器人的推进作用是由执行机构来完成的。通常，机器人的执行机构包括机械手和行走装置。

机械手是多环节开环机械装置。它有完成旋转和往复运动的关节，其自由度数目为3~10。这个机械装置的最后一个环节（即工作机构）是手爪，或其它任何专门的生产器械，如真空吸附盘、喷雾器、自动搬手等等。为了能够在各环节位移最小的情况下保证执行机构有平滑的移动轨迹，必须正确地分配机械手传动链的运动自由度。为此，机械手必须满足如下基本要求^[25]：

- （1）可随意改变手爪位置和方向；
- （2）在保持手爪位置和方向的条件下，可随意改变机械手运动链在空间的形状；
- （3）用于改变手爪方向的运动自由度不能对手爪终端位置有明显的影响。

要按照机械手在工作范围内的工作要求，即服务质量，

来选择各环节的长度。工作系数可作为一个质量标准。根据所要求的工作系数的大小确定各环节的长度，和确定各环节在机械手传动链中的配置。

在确定手爪的结构时，通常要考虑某些定型工序。有的手爪做成勺罐形，有的有两个或三个手指，有的有挠性手指等等。工作机构可同时带有信息传感器。这种信息传感器能确定出操纵对象的各种参数，并能发出故障警报等。

机械手和行走装置的执行机构是每个运动自由度的传动装置（参看图1）。传动装置主要有三类：电动的、液压的

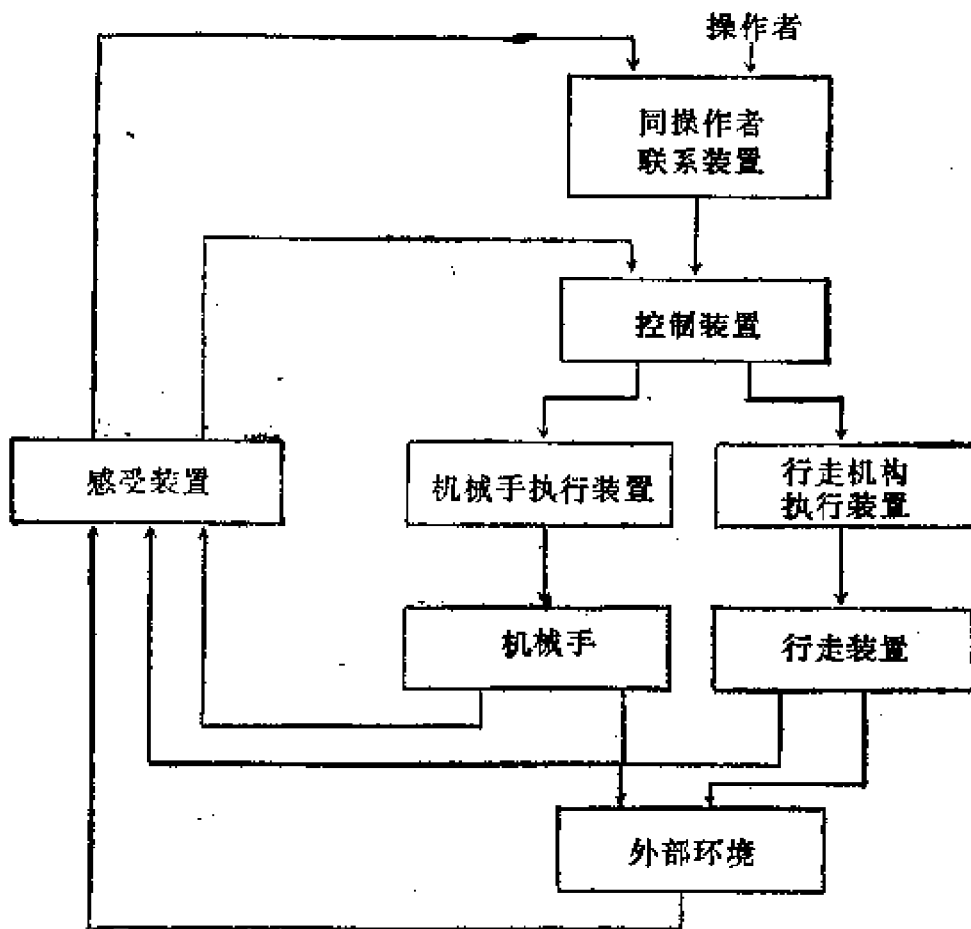


图 1

和气动的。由于空气压缩性大和制造良好的气动随动系统相当复杂，所以气动传动的灵敏性很差。液压传动除需要专门的维护外，还由于漏油会引起环境污染。电传动可以采用各种伺服电机和离合器。传动装置可直接安装在机械手上面，即安装在靠近实现相应的运动自由度的关节地方，或者安装在固定机械手的基座上^[18]。分散配置传动系统的优点是，由电动机到关节之间力的传递简单，因而机械手的结构紧凑。集中配置传动装置可以简化机械手的结构，并且可以比较自由地选择传动的形式和结构，但是，由传动装置向关节传递力需要齿轮、链条及钢索等等。

机器人的行走装置可采取已被广泛应用的任何一种移动装置。在地面上行走时，可利用履带式、转轮式、步行式及其它类型的推进器。

图1所示的感受装置可分为两种主要类型：收集机器人内部状态信息的装置和收集外界环境信息的装置。第一类装置用于在机器人内部形成反馈。属于第一类装置的有：测量机械手各环节的角位移和线位移的传感器，测量机械手各环节的速度和加速度的传感器。第二类装置能够根据外界环境的状态对机器人实现适应性控制。属于第二类装置的有：触觉传感器和定位传感器（它们可以获得接触或接近对象的信息，判断简单的对象的形状）、力传感器（如在装配产品时，用来调节施加给操纵对象的力）和滑动传感器（被操纵的对象从手爪中滑出时滑动传感器有反应并产生信息）。视觉信息是反映外界环境最完全的信息。但是，由于识别图象还有某些困难，所以视觉装置至今未能广泛地应用。在情况发生变化时，必须利用外部环境的信息来控制机器人。

与操作人员联系的装置（见图1）是一套保证操作人员

与机器人互相联系的设备。由这些设备可以得到有关机器人操作情况的信息。视觉控制台就属于这种装置。操作人员由控制台能得到关于机器人操作的视觉信息。然后，操作人员在电视接收机的屏幕上用光笔或光标标出他所感兴趣的目标的坐标，或者标出机器人应该移动到的目的地。通过控制台能够将机器人各分系统的工作情况传给打字机或者直观显示器。由控制台也可以把来自机器人的询问送给需要此信息的输入端。在没有视觉反馈时，绘图机可向操作人员提供有关机器人在地面行走的信息，由绘图机可以提供预计的运动轨迹。

用声音可给机器人分配任务并可把机器人改装成各种结构形式。现在已经有能分辨200个字词的机器程序和专用装置。用语音综合器，或者，在最简单的情况下，用记录在录音机磁带上的信息，机器人也能够用语音对操作人员作出回答。

控制装置（见图1）能将感受装置给出的全部信息加以变换，并产生出对传动装置的控制作用。

有时采用由一台或数台电子计算机组成的分级控制系统去控制机器人（如控制可移动的机器人）。机器人可装上小型机载电子计算机。小型机载电子计算机控制传动装置，并将机器人上的传感器的信息做预处理。信息的变换和控制作用的计算主要由固定式大型电子计算机来完成。大型电子计算机通过电缆或无线电与小型机载电子计算机联系。当联合控制几个机器人时，可采用中心电子计算机和分散的小型电子计算机相结合的控制系统。分散的小型电子计算机附属于中心电子计算机并控制单个机器人。

现在来讨论工业机器人的分类问题。机器人的分类如表

1 所示。按照这种分类,表征工业机器人类型的基本特征有:机械手数目、运动自由度数目、传动系统和控制系统形式、精度等级和执行机构形式。若其中几项特征有指标,那么分类时要考虑其中最大的或最复杂的特征(运动自由度数目、负载能力、控制系统形式、精度等级),或者考虑综合特征

表 1 工业机器人分类

序号	特征	按给定特征确定的机器人名称 (类型)	可用代号
1	机械手数目	具有一个、二个或多个机械手; 具有分立的传动和控制; 具有分立的传动、有相关联的控制(对一个、二个或多个运动自由度); 具有集中传动(对一个、二个或多个运动自由度)。	1M, 2M...
2	机器人运动自由度数目(包括行走装置)	机械手有二个、三个或多个运动自由度的机器人,又分为: 固定式机器人; 可动式机器人。	1M2, 1M3... 2M2, 2M3... 3M2, 3M3...
3	机械手工作范围的形式	按机械手工作范围的形式机器人可分为: 在平面上工作的机器人; 在表面上工作的机器人; 在平行六面体内工作的机器人; 在圆柱体内工作的机器人; 在球形体内工作的机器人; 在上述各范围形式的综合区域内工作的机器人。	Π_{π} Π_{σ} Π_p Π_{π} III $\Pi_{\pi}III, \Pi_p$ Π_{π}, Π_pIII
4	机械手负载能力	超轻型机器人; 轻型机器人; 中型机器人; 重型机器人; 超重型机器人。	

(续)

序号	特征	按给定特征确定的机器人名称 (类型)	可用代号
5	机械手和行走装置的传动类型	按传动类型可分为： 有气动传动的机器人； 有液压传动的机器人； 有电动传动的机器人； 有复合式传动的机器人。	Π_n Γ Θ $\Gamma\Pi_n, \Gamma\Theta,$ $\Theta\Pi_n$
6	控制系统的形式： a) 根据控制原理分类 6) 根据每个运动自由度实现运动的形式分类 B) 根据同时控制的机器人数目分类	程序控制机器人； 有知觉的机器人； 非适应控制的机器人； 适应控制的机器人； 人工智能机器人。 连续(轮廓)式控制的机器人； 离散式控制的机器人； 点位式控制的机器人； 循环式(限位器)控制的机器人； 复合控制的机器人。 单控的机器人； 群控的机器人。	O K Π Π
7	精度等级	定位精度为0、1、2、3级的机器人	0、1、2、3
8	工作类型	一般的机器人； 防尘的机器人； 有过热保护的机器人； 防爆的机器人。	

(工作范围和传动系统的形式)。表1最后一列给出了表示相应于各特征的可用代号，由这些代号就可组成机器人的简写代号。

第一章 工业机器人和机械手

控制系统的基本概念及分类

如前所述，机器人控制系统是由控制装置、机械手形式的受控对象、行走装置（在可移动的机器人的情况下）以及其它一些装置所组成。其它装置是指那些属于机器人，但结构上和操作上独立的装置。

由于控制机器人的主要任务是控制机械手，因此，下面介绍机器人控制系统时主要指的是机器人的机械手控制系统。如果控制机器人的其它装置时，将会特别说明。控制机械手的基本原理同样适用于控制机器人的其它装置。

可做为控制系统分类依据的主要特性是：

（1）控制运动的方式（程序控制系统、按照外界状态而作用的控制系统，包括适应性系统及复合控制系统）；

（2）控制装置的信号类型（连续作用系统和离散作用系统）；

（3）同时控制机器人的数目（单控系统和群控系统）；

（4）操作人员参与的特点（自动控制系统和自动化控制系统）。

下面根据这些特性进一步研究控制系统分类问题。

1. 机器人控制系统按控制运动的方式分类

根据这一特征，系统可分为程序控制系统，按照外界状态作用的控制系统以及同时采用这两种方式的复合控制

系统。

图1.1示出了第一类系统,即程序控制系统的方块图。图中,受控对象即是机械手。给机械手的每个运动自由度的传动系统施加控制作用,就可控制机械手。控制装置包括时间程序装置、信息变换器(变换由时间程序装置送来的信息)以及执行装置(它直接对机械手传动装置进行作用)。

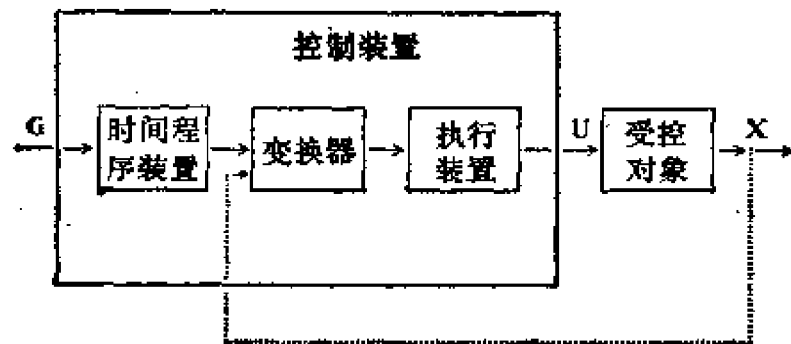


图 1.1

输出量 X 表征受控对象的状态。 X 是一个向量。它的各分量即是机器人机械手的各运动自由度的坐标。控制作用 U 简称控制,也是向量。控制作用由控制装置加到受控对象(指机械手所有运动自由度)的输入端。给定作用 G 简称给定。 G 包括输出量 X 要求的(或给定的)变化规律 $X_s(t)$ 的信息。 X_s 作为控制程序加给时间程序装置。控制目的就是保证等式 $X(t) = X_s(t)$ 成立。这里 X_s 是输出量 X 的给定值, X_s 是以程序形式给定的时间函数。若机械手每个传动装置都完全实现相应运动自由度的给定程序,则机械手就可以完全复现所要求的空间运动。

程序控制机器人的典型实例是第一代工业机器人,也就是几乎所有现今工业中采用的机器人。

编程序(即图1.1中的 G)的方法有:

8610051

(1) 按机械手给定轨迹的坐标来编制程序;

(2) 按工作范围内轨迹的坐标形式来编制程序。这就要求把这些坐标变换成机械手运动自由度的实时坐标。这种变换是由图1.1所示的变换器完成的;

(3) 按标准的操作名称(必须把完成操作的 实际条件具体化)来编制程序,或者按操作顺序来编制程序。这时,机器人控制装置根据 G 值能够自动计算出运动轨迹。为此,相应地要求有比较复杂的信息变换器(见图1.1),甚至要用电子计算机。这时,可以在机器人开始操作之前进行轨迹计算,也可以在机械手传动装置执行程序的过程中进行计算。但是,这种计算应比机械手执行程序提前一定的时间。

有两种计算轨迹的方法:求最优解的方法和在给定的范围内求出一个允许解的简单方法。

编制程序的方法不同,程序控制系统也不同。在一些控制系统中,通过计算机械手的运动轨迹来编制程序(可以在机器人之外计算运动轨迹,然后往时间程序装置中顺序地输入程序;也可以在机器人本身的控制装置内进行运动轨迹的计算)。在另外一些程序控制系统中,用示教法编制程序。所谓示教法就是:操作人员手控机器人或者是机器人的机械手由操作人员手动,使机械手产生机械位移,此时机器人完成所要求的动作,并把产生这个动作的控制作用(即信号) U 记录下来。

按运动自由度的运动形式,系统可分为连续运动系统和离散运动系统。连续运动系统中每一个运动自由度的运动轨迹是连续的。离散运动系统中每一个运动自由度的运动是由程序给定的、不连续的、有限的点位序列。

完成连续运动的系统称为轮廓式控制系统。完成离散控

制运动的系统称为点位式控制系统。循环控制系统是点位式系统的最简单方案。在这种系统中，机械手每个运动自由度的每个坐标的程序点数目仅是起点和终点，有时再多几个中间点。现时的点位系统能够保证每个运动自由度有几十个，甚至上百个程序点。

当一个机器人的每个运动自由度采用不同类型的控制系统时，这种系统称为复合控制系统。

程序控制系统是最简单的系统。但是，只有在完成操作（在要求的精度范围内完成操作）的整个工作期间，工作条件完全确定和不变的情况下，才能采用这种系统。工作条件指的是外界环境、机器人本身的情况及控制目的。控制目的在机器人开始工作之前就应该完全确定下来。

机器人的程序控制系统可以是连续作用的或离散作用的开环控制系统和闭环控制系统。在闭环系统中输出量 X 有反馈（如图1.1中虚线所示）。在连续作用的系统中，不仅时间程序装置，而且机器人的所有其它装置都应是连续作用的。

在机器人第二类系统中，根据给定的目的实现对运动的控制不需要事先给定运动轨迹（程序）。而是按外界环境瞬时状态实现控制。外界环境的瞬时状态是用相应的感受装置确定的。图1.2示出了控制有知觉的机器人的方块图。图中的敏感装置即是感受装置。 F ——外部作用向量，它仅代表外界环境的变化。在这种情况下，是按输出量 X 的差异函数进行控制。差异就是机械手与目标（存在于外界环境中，并由向量 G 给定）的坐标之间的差值。这一类控制系统通常是闭环的，也就是有外部反馈的系统，如图1.2所示。

具有这种控制系统的机器人称为有知觉的机器人。这种机器人的控制比程序控制复杂得多。这是因为，不可能预先

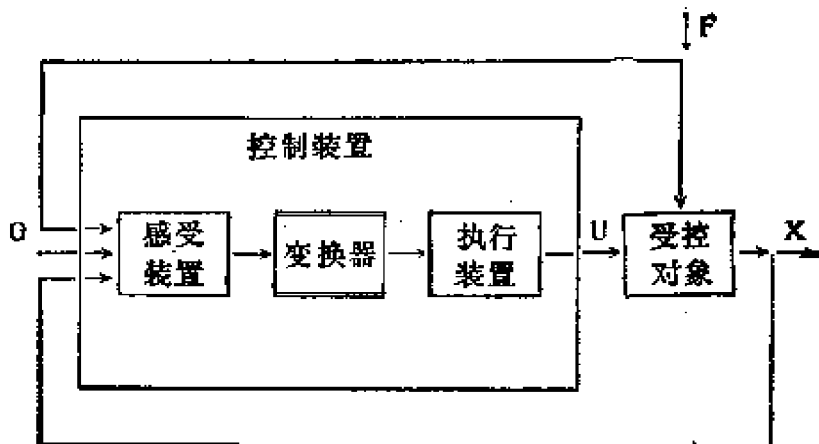


图 1.2

编制运动程序，而是要求在运动过程中，根据所获得的周围状态的信息，实时确定控制作用。此外，当编制运动程序所需要的先验信息不够用时，或者这些信息在运动过程中不断变化时，上述控制方法将是唯一可行的方法。

自行引导机械手的手爪移到物体所在之处，抓取任意放置的物体，机械手沿轮廓线运动（例如沿焊件的焊缝运动），绕过不是预先给定的或变动的障碍物等等，这些都是只有这种有知觉的机器人才能够完成的工作的最简单的例子。

与程序控制机器人一样，有知觉的机器人控制作用的算法有两种：求最优运动规律和在给定的范围内求允许的运动规律。

第三类系统是复合控制系统。在这类系统中采用了上述两种基本控制方法，即程序控制和根据外界环境状态进行控制。具有复合控制系统的机器人自然是有知觉的机器人。复合控制系统能保证最好的控制品质。原因是：第一，它像程序控制系统一样，最大可能地使用了已有的、与当时工作有关的先验信息；第二，系统在执行程序的过程中，根据实际

工作条件的变化不断修正程序。因此，复合控制方法是控制有知觉机器人的最基本的和最普通的方法。

按对外界环境和其它工作条件变化的适应程度，有知觉的机器人控制系统可分为：

- (1) 对外界环境状态无适应的控制系统；
- (2) 适应控制系统；
- (3) 人工智能控制系统。

第一种系统的控制算法（包括调整控制装置的参数值）在系统自动工作的整个过程中是不变的。

在适应控制系统中，当外界工作条件变化时，为了保证所要求的品质，或者是为了能随着经验的积累而自行改善控制品质，控制装置的结构和参数应能随时间自动改变。

人工智能系统是最完善、最高级的适应控制系统。这种控制系统，在外界环境变化极端不定的条件下，能保证机器人有自主功能。这种系统应能重新处理由感受装置获得的有关外界环境的信息，并且建立动态可变的外界模型。在此基础上制定出，在积累经验的过程中进行自我完善的行动计划。换言之，人工智能系统在某种程度上可以模拟人的智力活动，而且随着自我完善程度的提高可以越来越接近人的智力水平。

图 1.3 所示为最简单的机器人适应控制系统的方块图。图中的基本控制装置是受控对象的基本的非适应的控制装置。适应控制装置用来调整基本控制装置，即根据外界工作条件及机器人本身特性的变化，用作用 Y 改变基本控制装置的算子，也就是改变装置的结构，调整参数的大小以及变更程序（在基本控制装置中采用复合控制的情况下）。为了调整适应控制装置需显示出外作用 F 、 G 和控制装置的状态 X 。然后估计控制品质（快速性、精度、经济性等）的某种预选

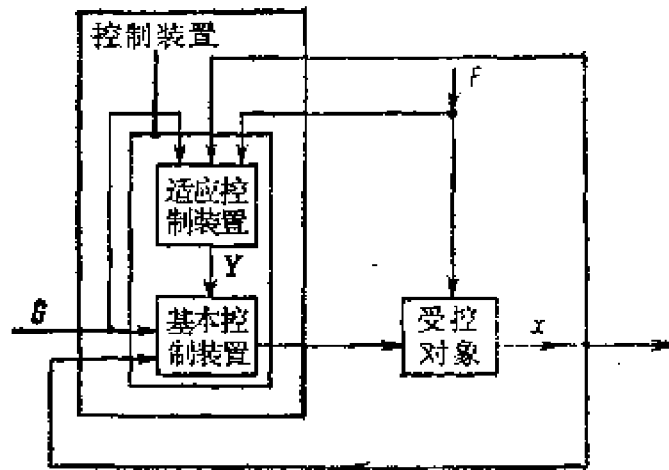


图 1.3

指标（即判据）。进而用重新调整基本控制装置的方法来校正控制品质的预选指标。

这样，适应控制系统包括二个控制级。基本系统构成第一级，适应回路构成第二级。

还可能有一级适应控制。当前一级适应控制装置的工作条件变化时，这级控制装置改变适应控制装置的适应算法，从而调整适应控制装置。此外，还可能有多级适应控制系统。在这种系统中，下一个适应控制级控制前一个适应控制级。这就扩大了控制系统正确完成自己任务的外界工作条件范围，或者提高了系统完成任务的质量。

和所有控制系统一样，由适应控制装置实现的自适应控制，可以按控制品质最优，或者按给定的稳定性指标，构成开环系统或闭环系统。

分级控制的各级控制装置（在图 1.3 中就是基本控制装置和适应控制装置）可以由结构上各自独立的部件来实现，也可以由一台电子计算机利用算法来实现。

若将程序控制、按外界环境而作用的非适应控制、适应

控制和人工智能控制，根据控制品质依赖于工作条件的程度加以比较，则可做如下描述。

程序控制系统要求机器人所有工作条件完全不变。非适应控制系统和复合系统在机器人感觉装置监控的参数范围内，可用改变相应的控制作用的方法（参看图 1.2）来反应外界环境的变化。适应系统还可以用改变控制算法（包括调整）来适应工作条件的变化。这样可以改善控制品质，可以扩大保证系统正常工作条件的变化范围以及可以在自我改善控制算法时改进工作质量。适应控制系统的这些性质随着适应控制级数的增加而增大。引入操作人员的智能，这是适应控制系统进一步发展的方向，从而使机器人由自动控制过渡到自动化控制。

2. 机器人控制系统按控制装置的信号形式分类

根据这一特征，控制系统可分为连续作用的系统（连续系统）和离散作用的系统（离散系统）。

在连续作用的系统中只有连续信号。连续信号是时间的连续函数。这种系统中所有环节都是连续作用的环节，即各环节的输入输出量都是连续信号。

在离散作用系统中至少有一个量是离散信号。特殊情况下，也有的离散系统中全部为离散信号。这样的系统只能由离散作用环节组成。但是，在大多数离散系统中既有连续信号又有离散信号。因此，在这种离散系统中，除有连续作用环节和离散作用环节外，还有将连续信号变换成离散信号的环节以及进行相反变换的环节。

根据离散信号的形式，离散作用系统相应地可分为继电器系统、脉冲系统和数字系统。继电器系统是利用按幅值量化的

信号工作的,脉冲系统是利用按时间量化的脉冲信号工作的,而数字系统则是利用两种量化信号工作的。

3. 机器人控制系统按同时控制的机器人数目分类

根据这一特征,控制系统可分为单控系统和群控系统。

在单控系统中,每一个机器人都有自己的控制装置。控制装置对机器人进行自主控制,使机器人仅仅和它所服务的生产设备协调动作。

群控系统同时控制几个机器人。群控可以是集中控制、分散控制和复合控制。在集中控制的情况下,所有同时工作的机器人是由总的控制装置控制的。在某些情况下,标准的控制用电子计算机就可以做为总的控制装置。在集中的群控系统中,每个机器人也可以有自己的控制装置,但也必须受总的控制装置的控制。

在分散群控情况下,每一个机器人都有自己的控制装置。通过信息和控制系统保持这些装置之间的连系。借助这种连系机器人能够按群控算法给定的坐标运动。

复合式控制系统不但可以集中控制机器人,而且在各个机器人控制装置之间有分散的交叉连系。

在集中的和复合的群控系统中,不但控制设备可以分等级,而且所有机器人也可以分等级。这时,把机器人分成若干组,每组由主导的机器人进行集中控制,而所有机器人又都包括在整个集中控制系统之中。

4. 机器人控制系统按操作人员参与控制的特点分类

按这一特征,控制系统分为自动控制系统和自动化控制

系统（当完全手控时，机器人就变成用某种方法手控的普通机械手。这已不属于机器人了）。

上面我们研究了机器人的控制系统，即无人参与工作的控制系统。而在自动化控制系统中，为提高控制水平，还有部分控制作用是由操作人员完成的。根据人完成的是哪一种作用，参与的是哪一级别的控制，机器人自动化控制系统有如下几种方案。

（1）用手直接控制传动装置，即人参与最低级别的控制。在这种情况下，在机器人中除了自动控制状态外，还可根据某一种已知的方案实现手控机械手的状态（使指定的机械手作主从状态，使用控制手柄或者控制按钮等等）。在应急情况下，或由于某些原因适合用手控完成作业，以及示教机器人均采用手控以复现自动控制。

（2）人参与级别比较高的控制，以扩大机器人的适应能力。

（3）人可以建立胜过所有自动控制系统的、新的、高级的机器人控制系统。这时，主要是用人的智力建立机器人更高的智能。

人参与机器人高等级别和中等级别的自动化控制（自动化分级控制中的后两种方案）称为监控。在通常情况下，操作人员能获得关于机器人运动的视觉信息，用这些信息就可分配工作、判断工作对象、监督完成任务。

第二章 控制系统的部件

1. 控制装置的基本元组件

由于工业用的无知觉机器人控制装置所要求的功能极广(从最简单的循环控制到复杂的轮廓控制以至轮廓-位置控制),所以控制装置的基本元件和组件也极为多样。这些元组件基本上都是电子和机电器件。组件包括一般控制装置用的继电器、机电元件、半导体器件及不同规模的集成电路等。

机电元件主要用在最简单的循环式控制装置中,也可用于产生“开-关”指令的其它所有各类装置的输出部件中。假若机器人的循环控制装置比较简单,对机器人要求的逻辑功能可用少量继电器来实现,那么用继电器组成这种装置就比较经济。因为在这种情况下可最简单地实现控制装置的输出及输入的中间联系。但是,只有动作次数低于每小时500次,即每年不超过2亿个循环的控制装置适于采用继电器。当转换元件的工作条件比较繁重时,应尽量采用半导体元件⁽²³⁾。只有运输业用的“章鱼-1”型机器人的控制装置具有上述的允许转换密度(运输业用的机器人几分钟完成一个运送动作循环)。按限位器点位方法控制的机器人的液压阀和气动阀的电磁铁接通的频繁程度通常超过上述极限值,因为一个工作循环所需的时间一般只有几秒钟。因此在这种情况下适于采用无触点半导体元件。当一个工作循环所需时间为几十秒钟时,给设备发工艺指令比给机械手发控制指令少得

多，特别是当使用具有点位或轮廓控制系统的机器人时更是如此。在这种情况下输出部件允许采用继电器。

由机电元件和半导体元件构成具有同样功能的控制装置的故障率变化曲线如图 2-1 所示^[57]。

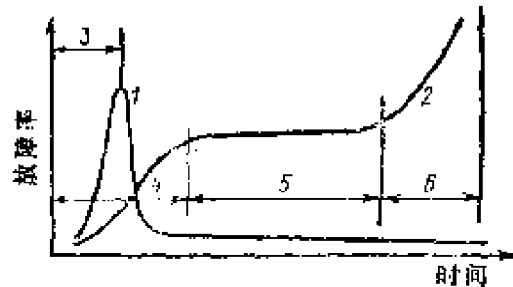


图 2.1

由机电元件构成的装置的故

障率 (曲线 2), 在开始试用期间是增加的, 而后, 在正式使用期间稳定不变, 在使用后期就急剧增加了。由半导体元件构成的装置的故障率在试用开始时期为最高 (曲线 1)。

在具有扩大的逻辑运算容量和简单的算术加法运算 (即比较两个量) 的控制装置中, 采用半导体的分立元件是合适的。当进一步提高机器人控制装置的复杂程度以及增加它所完成的功能数量时, 采用集成电路构成的装置实现逻辑运算和算术运算是比较合理的。

在设计工业机器人控制装置的元组件时, 广泛采用 K155 (ТТЛ) 系列集成电路。这一系列集成电路可靠性高, 快速性好, 功能完善, 价格适中, 在苏联已有许多厂家在进行成批生产。该系列产品是有前途的。目前, 这一系列产品的发展计划是熟练地生产出集成度更高的集成电路。为了提高工业机器人控制装置抗干扰的性能, 在控制装置中, 特别是在输入输出设备中应采用抗干扰性能好的逻辑集成电路。

现在实际使用的绝大多数工业机器人都是用硬件 (将元件焊接或绕接) 来实现控制装置的功能算法。进一步提高工业机器人控制装置功能的办法是采用大规模集成电路的微处理机和各种记忆装置。这时, 控制装置所需要的功能是用程

序方法实现的。作为典型的微型计算机组件例子，我们来看看美国英特尔（Intel）公司生产的组件^[33]：

（1）八位并行中央处理器（内部封装微型芯片双列直插式引出腿的组件）；

（2）容量为 1024 八位数的随机存储器（具有双列引出腿的芯片中有 32 个微型模块）；

（3）容量为 768 八位数的只读存储器（具有双列引出腿的芯片中有 3 个微型模块）；

（4）电传打字机接口（离散逻辑）；

（5）控制操纵台。

中央处理器和记忆装置的芯片是用金属氧化半导体组成的。每个芯片的标准尺寸为 $2.5 \times 0.6 \times 0.6$ 厘米。1973 年初每套价格为 1583 美元。

微处理机可以用某些随机存储器、只读存储器和移位寄存器的任意组合作为记忆装置，这是微处理机的一个主要特点。记忆装置的类型是由具体应用特性所确定的：当需要频繁更换程序时用随机存储器；用只读存储器（它的价格便宜）做为长时间程序存储库；顺序处理信息时，用移位寄存器。英特尔公司生产的半导体只读存储器主要有三种类型：第一种只读存储器是制造过程中在金属掩膜上编制固定程序。第二种只读存储器是借助专用设备根据使用条件编制固定程序。第三种只读存储器是用紫外线照射清除过时的信息，在使用时可更换程序^[33]。

使用大规模集成电路，如微处理机、随机存储器、只读存储器等，大大地扩大了工业机器人的控制装置的功能。同时，各装置的电子线路中元件数量大大地减少，在提高控制性能的同时，价格也便宜了。元件数量减少自然会使得可靠性

提高，维护简单。此外，还可大大地减小装置的尺寸。

图 2.2 给出了控制装置的价格与复杂程度之间的关系曲线：曲线 1——对应于用继电器组成的控制装置；曲线 2——用半导体分立元件；曲线 3——用集成电路；曲线 4——用微型电子计算机^[67]。

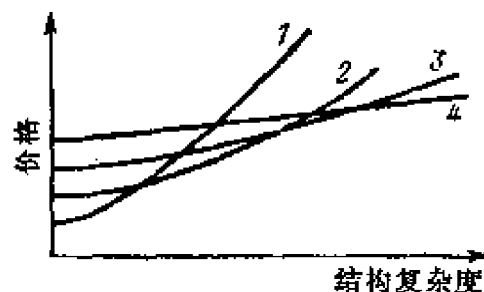


图 2.2

附录 A 列出了现时制造工业机器人控制装置的各种部件所使用的元件和装置（见 196 页）。

应当指出，控制装置中所使用的配套产品都不是为工业机器人专门生产的。由存储器就明显看出这一点。为计算机生产的存储器的快速性大大超过机器人工作所需要的快速性。例如，示教过程程序写入和随之复现已记录的程序的装置，在不做复杂数据处理时，写入需用 0.1 秒，而读取数据需要 0.01 秒时间就足够了。假若专门为工业机器人生产配套产品，则会制造出具有必要的功能、价格更便宜、体积更小的控制装置。

2. 机器人的感受装置

根据环境的状态、工作区域内各个对象的性质、机器人本身及其执行机构等方面的有关信息，机器人同实际的外界环境产生主动的、有目标的相互作用。这些信息的特性、容量由机器人的功能用途、工作条件事前的不确定程度、所需要的自治性能及其它方面因素决定。

为了机器人的工作就要求拥有关于环境和各个对象的机械的及物理化学的各种信息、对象的方位及坐标、机器人本

身及其执行机构的方位及坐标、执行机构产生的力等方面的信息。

如前所述，机器人感受装置可分为用于显示机器人本身内部状态参数的装置以及用于测定外部环境状态的装置。

在感受装置输出端，把和机器人及外部环境状态有关的信息变换成用感受装置的参数描述的、与一定数值相对应的信号。机器人状态参数首先是指机械手各环节的位置和速度及机械手各环节产生的力。外界环境状态参数包括机器人工作对象在空间的位置和方位、对象的形状、外界环境与对象的关联参数、障碍物坐标、机器人工作过程中的干扰参数等。为完成具体生产操作还必须知道外界环境更为特殊的各种性质。

要确定上述参数，机器人控制系统中感受装置的控制任务是相当复杂的。

内部信息的感受装置（传感器）用于确定机械手运动环节的位置、速度和作用力，并将相应的信息传送给机器人的控制装置。

在机器人控制系统中，用位置和速度传感器实现具有位置反馈和速度反馈的伺服机构，这样就能保证机器人在按给定的程序操作时具有需要的品质和精度。

在大多数情况下，测量内部信息的传感器是一种将机械参数变换成电气信号的变换器，这种变换器同样可在其它控制系统中采用^[6,40]。根据输出信号的种类，传感器可分为连续式的和离散式的。连续式传感器输出信号可以是连续变化的电压和电流（电位计），或者是相位连续变化的交流电（旋转变压器和自整角机）。离散式传感器的输出信号可以是数码（数码传感器），也可以是脉冲序列（脉冲传感器），还可以是

继电信号。例如，由行程开关式位移传感器产生的继电信号能使运动环节做阶梯式降速、停止，并保证所要求位移的正确性。

按照从传感器的输出信号识别被显示的参数值的原理，传感器可分为有绝对指示值和非绝对指示值的传感器。有绝对指示值的位移传感器的输出信号单值地与位移量相对应。但是，具有非绝对指示值的位移传感器就没有这种单值性。当有某一位移时，传感器产生周期变化的信号，或一组单一的脉冲信号。

对工业机器人的传感器提出如下基本要求^[40]：

- (1) 体积小、结构简单，传感器应适合装在手爪和机械手的其它部位，以及对安装器件的体积有限制的其它位置；
- (2) 可靠性高，抗干扰性好，在电源频率有波动时以及有电磁干扰情况下能够正常工作；
- (3) 当有冲击、振动等机械扰动时，或者周围环境的温度、湿度等参数变化时，保证性能稳定；
- (4) 输入回路与输出回路无关（解偶性）；
- (5) 在维护场地有限的情况下调整简单、维护方便；
- (6) 通常要有绝对位移指示值；
- (7) 价格便宜。

对传感器动特性的一个基本要求是保证具有足够的重复测量频率。另外，为了提高控制系统测量部分的抗干扰性能，测量频率最好高于传动装置动态特性所要求的测量频率。在工业机器人控制系统中，电位计传感器和数字传感器的测量频率实际上没有什么限制。感应式传感器的测量频率受传感器电源频率的限制。

在选择传感器时，首先遇到值得研究的问题是必须将各

传感器按它的信息能力加以比较。利用传感器的 R 值进行这一比较是很方便的。 R 值等于传感器的测量范围 A 与传感器分辨率 δ 之比取以 2 为底的对数值, 即 $R = \log_2 A/\delta$ 。数码传感器的 R 值与数码的位数相等。脉冲传感器的 R 值则是 $R_n = \log_2 m$, 式中 m 为传感器转一周的脉冲数。连续式传感器的 R 值也可称为假定的位数。在其它特性都相同的情况下, 应优先选择 R 值比较大的传感器。选择行程开关时, 要比较各种开关的分辨率。

在选择工业机器人控制系统的位置传感器时, 考虑到机器人编程序的方法, 估计传感器静特性的非线性对机器人工作精度的影响是很重要的。工业机器人编程序的主要方法是示教法。当由操作台用手控制动作过程使机器人完成所要求的动作时, 或者用手操纵机器人的机械手产生机械位移时, 就把程序记入时间程序装置中了。在上述两种编程序方法中, 时间程序装置内记录的是传感器实际信号, 而不是按传感器的理想特性计算的信号 (在用计算方法编程序的系统中用这种计算的信号), 所以机械手各环节的位置传感器的非线性不影响程序实现的精度。由示教法已获得程序的再现误差和对于同一位置 X 传感器输出信号的再现范围大小 δ_r 有关, 但不包括线性偏差 δ_n 。这样得到的分辨率比传感器说明书所标的分辨率要高。

在选择传感器种类时, 除要考虑传感器主要参数和结构外, 还要考虑电源问题, 传感器和控制装置联结问题, 信号预处理问题等等。

用电位计作为位置传感器组成机器人控制系统的测量部分, 这是最简单的了。在这种情况下, 用直流电源 (稳压) 供电。用两根导线使传感器与控制装置相连。传感器输出信

号的功率足够大，所以信号通常不需要再进行处理。电位计在最简单的点位控制系统中应用很广。薄膜电位计很有使用前途。它的寿命长，可转到5亿圈还不坏。并且它的分辨率高。

数码变换器，例如光电数码变换器，在对信息进行数字处理的控制装置中得到了应用。并且它有很高的测量精度。变换器用 $n + 3$ 根导线和控制装置相连， n 为变换器的位数。传感器的输出信号通常需要进行放大。数码变换器价格昂贵，所以在复杂的工业机器人的控制系统中才使用它。

现代工业机器人使用自整角机和旋转变压器是非常有发展前途的。这两种传感器分辨率高、抗干扰性好、外形尺寸小。高精度点位控制机器人可使用双读数旋转变压器。以此为主体构成轴-模拟量-数码测量变换器，可以代替在对信息进行数字处理的控制装置中使用的数码变换器。由该变换器得出的信号，用5~7根导线输出，而且不需要再进行放大。用频率为400赫兹、正弦波形、非线性小于0.5%的专用电源供电。

因需要有专用电源和模拟量-数码变换器，就使系统的测量部分复杂了。但是，假若合理地组成控制装置，控制系统的整个测量部分实际上可以简化。所以在数字模拟控制装置中（由列宁格勒加里宁工学院控制技术研究室研制的），当执行程序时，使用旋转变压器的信号。这信号在简单的轴-相位-时间区间变换器上变换成时域信号。在示教机器人时，用一个由计算器实现的时间区间-数码变换器，连续不断地把信号变换成数码（不要协调读数）。结果使控制系统的装置相当简单，且价格便宜。轴-相位-时间区间变换器如图2.3所示。变换器包括有CKTД-6465Д型双读数正-余弦变压

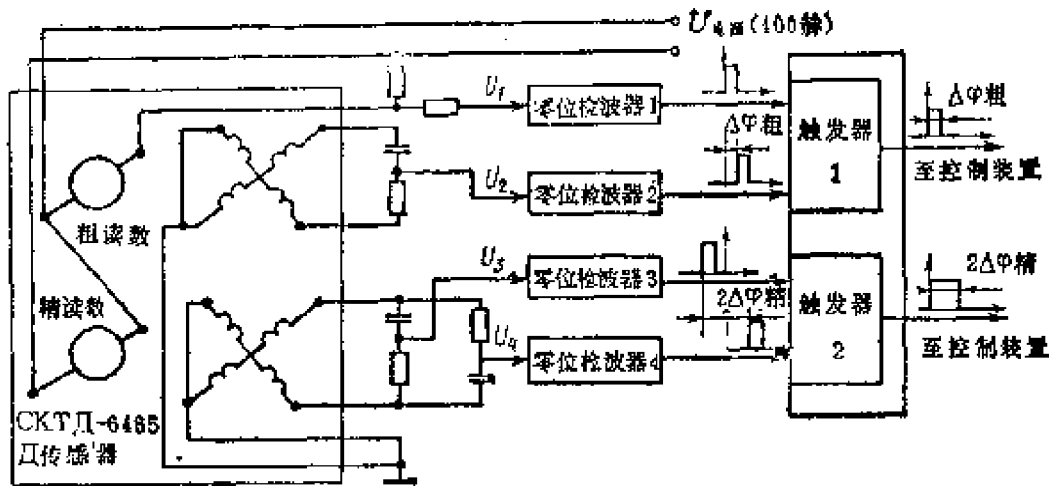


图 2.3

器、 $R-C$ 移相电路、零位检波器以及两个触发器。粗读数正弦波电压 U_1 、 U_2 和精读数正弦波电压 U_3 、 U_4 加给零位装置。由 U_1 和 U_2 、 U_3 和 U_4 电压相位差可确定传感器转轴位置。粗读数用电压源 U_1 作为基准电压。在精读数通道中，由 U_3 与 U_4 电压向相反方向的相位偏移，形成相位差。精读数电路保证有很高的测量稳定性⁽³⁾。零位装置把正弦电压变换成矩形脉冲电压。脉冲前沿和正弦波电压过零点那一瞬时相重合。之后，将脉冲加给触发器输入端。在触发器的输出端产生新的脉冲，这脉冲宽度和传感器轴的转角成正比。在上述变换器的基础上，为“列宁格勒机电工厂”联合企业成批生产的工业机器人的规格化控制系统研制了具有匹配读数的轴-数码变换器。这种变换器位置测量精度是14位（在传感器轴上）。

在采用限位器点位控制系统的机器人中应用的行程开关可以是微型开关、无触点行程开关、密封簧片继电器（磁控接触器）。

速度传感器主要用在具有机电传动装置的工业机器人中，其目的是提高保持某一速度的精度和增强传动装置特性的硬度。速度传感器多半是用直流测速发电机。表 2.1 给出了苏联生产的某些直流测速发电机特性。还有位置和速度传感器合为一体的结构形式。日本的“三菱-八幡”(Мицубиси-Ивата)喷漆机器人所用的十位光电数码传感器，为了产生速度信号，附有一长带，其上均匀刻有 4096 条刻线。根据产生脉冲的频率就可确定运动速度。

表 2.1 直流测速发电机

型 号	激磁 电压 (伏)	激磁 电流 (安)	空载时 放大 系数 (伏/转 /分)	最高 转速 (转/ 分)	最大 负载 电流 (安)	电枢 绕组 电阻 (欧)	重量 (公斤)	电枢的转 动惯量 (公斤·米 ²)
СЛ-161	110	0.050	0.020	3500	0.10	170	0.49	52·10 ⁻⁷
СЛ-261	110	0.080	0.025	3600	0.20	51	1.25	196·10 ⁻⁷
ТД-101	110	0.065	0.021	1500	0.10	330	0.70	62·10 ⁻⁷
ТД-102	110	0.065	0.050	1500	0.10	330	0.70	62·10 ⁻⁷
ТД-103	110	0.060	0.100	1500	0.10	600	0.70	196·10 ⁻⁷
ТД-201	110	0.100	0.130	1000	0.20	780	—	235·10 ⁻⁷
ТГ-1	27	0.300	0.007	1100	0.01	430	1.86	685·10 ⁻⁷
ТГ-2	27	0.300	0.020	2400	0.02	115	0.80	137·10 ⁻⁷
ТГП-1	—	—	0.006	7000	0.01	—	0.15	—

为了防止过载，机械手各环节上都装有力传感器，还有的以力传感器按零件重量调节位移速度^[40]。通常是用应变仪传感器作为力传感器。在机器人机电传动装置中，常常根据电机电枢电流测量传动装置负载大小，以防止传动装置和机械手过载。

外部信息感受装置 用它获得在控制机器人完成一定的生产操作过程中需要知道的外部环境状态、性质和参数的

信息。

所谓外界环境是指机器人工作区内生产环境，包括在此区域内的物体，如生产设备、机器人操纵的产品、其它机器人和人等。

板材和扁平零件码垛就是用外部信息感觉装置的一个典型例子。在这种操作中，要求用装在手爪上的接触传感器确定垛顶高度。

另一个例子是用机器人进行电弧焊。此时要求精确地保持焊缝和电焊条之间距离。由于焊件向两边撇开(它对产生质量影响不大)，又因加热时零件尺寸要变，所以实际上不能按预先设计的焊迹焊接。这就需要用专门装置测量真实的焊缝位置，并且在控制焊条移动时考虑焊缝的变化。

在抓取和运送易碎物品时，需要控制和限制握紧物品的力，使它刚好不从手爪中滑落出来。这种工序要求在手爪上安装能测量手爪对物品压力的感受装置，并安装显示物体滑动的装置。

最复杂的工序是机械装配工序，需要用有知觉的机器人来完成^[47]。完成这样的工序必须对装配的零件进行精确地定位和定向。根据感受装置得到的内部信息进行程序控制不能保证要求的装配精度。所以机器人手爪上要安装敏感元件。它能确定零件相对手爪或装配在一起的其它零件的位置。精度可达到零点几或零点零几毫米。在装配零件过程中，对施加的力应加以检查，防止零件歪斜时把它卡住。这就要求在机器人工作机构上安装测量力的感受装置。

目前在苏联及其它国家，为了制造出各种检测机器人外部信息的感受装置，都在进行着紧张的工作。在工业中首先得到实际应用的仍然是那些最简单的装置。这些装置在机器

人的工作过程中，只测量周围环境的一个或几个变化参数。而比较复杂的机器人敏感装置还在研究试制阶段。这样的感受装置能获得外部环境全部的、在结构上构成一体的参数总和，即所谓的“模式”。这在不确定的工作环境的三度空间中，对机器人实现定向和完成对准目标的自治作用是必不可少的。

根据敏感装置所显示对象的性质是几何的、物理的还是化学的，可将机器人外部信息敏感装置分成三种类型。

按照接收到信息时离信息源的距离不同，敏感装置可分为：超近距离的（接触的）、近距离的、远距离的（在工作区内）及超远距离的（超出工作区）。

超近距离作用的敏感装置能给出关于外界环境与对象相接触的信息以及接触特性的信息。接触传感器、滑动传感器（和人体每块皮肤上的触觉感受器官相类似）、当和外界环境中物体相互作用时产生力和压力信号的传感器都属于这种敏感装置。

近距离作用的敏感装置给出机器人工作机构附近的物体的信息。其距离由直接接触（即零）到几十毫米，用无接触方式进行测量。这种装置有手爪定位传感器，各种近距离作用的测距仪等等。

远距离作用的敏感装置能获得整个工作区内的外界环境的信息。测距仪、坐标方位仪、电视或其它类型的工业视觉装置都属于这种敏感装置。这些敏感装置给出的信息，为机器人提供了整个工作区的特征全貌，确定出到各物体和各种障碍物的距离，各物体尺寸和外形等。

超远距离作用的敏感装置，主要是在移动式机器人中使用。

现在来研究某些典型的外部信息敏感装置。

继电作用式（限位式）和连续作用式接触传感器，在工业机器人中最先得到了实际应用。简单的继电作用式接触传感器的设计基础是微型开关。微型开关尺寸小，可供选择的产品种类多，所以在接触传感器中应用很广^[40]。接触传感器是由不大的薄片和微型开关构成的。薄片碰到物体就产生变形。薄片压住微型开关，使它动作。

连续作用接触传感器根据感应式变换器，或采用金属聚合组合材料制成^[40]。金属聚合组合材料有变形就会改变自己的特性，其体电阻能变化几个数量级^[41]，所以可制造小型的、高灵敏度的接触传感器。

图 2.4 给出了继电作用（图 2.4 a）和连续作用（图 2.4 b）接触传感器结构示意图和它们的典型静态特性。

“石川电气技师（Яскава электрик）”公司“灵活”型机器人就是装备了继电器作用和连续作用的接触敏感装置。在焊接过程中用它测量零件的距离。继电器作用式和连续作用式的接触敏感装置的测距精度分别为 ± 0.5 和 ± 0.1 毫米。这种装置制成大家熟悉的简单靠模仪形状。

若干个接触传感器配置在手爪上，使得整个表面都有了触觉。图 2.5 给出的是装有 24 个触角传感器的有知觉的手爪（图中 1，2）。这是由列宁格勒加里宁工学院控制技术研究室研制的^[40]。这种手爪测定到物体（图中 4）的距离精度为 0.5~0.7 毫米，而测定物体方向的精度为 $\pm 15^\circ$ 。除触角传感器外，手爪上还装有近距定位光学传感器（图中 3）。图 2.6 是传感器的装配图，其中 1—白炽灯泡；2—触觉传感器；3—壳体；4—光电二极管；5—触点。为了能够安装大量的传感器，把触角和近距定位传感器的元件装在手

爪结构之中。

用特殊组合的接触传感器组能够获得关于被抓物体形状的信息^[16]。为此，有各种有效的触摸物体的方法。文献[16]中叙述了一些有意义的成果。其中有把9个具有线性特性的敏感元件按一定阵式排列，由此可以判明圆柱、球、圆锥、立方体、角锥等物体的形状。物体尺寸变化几倍也不会影响判定结果。

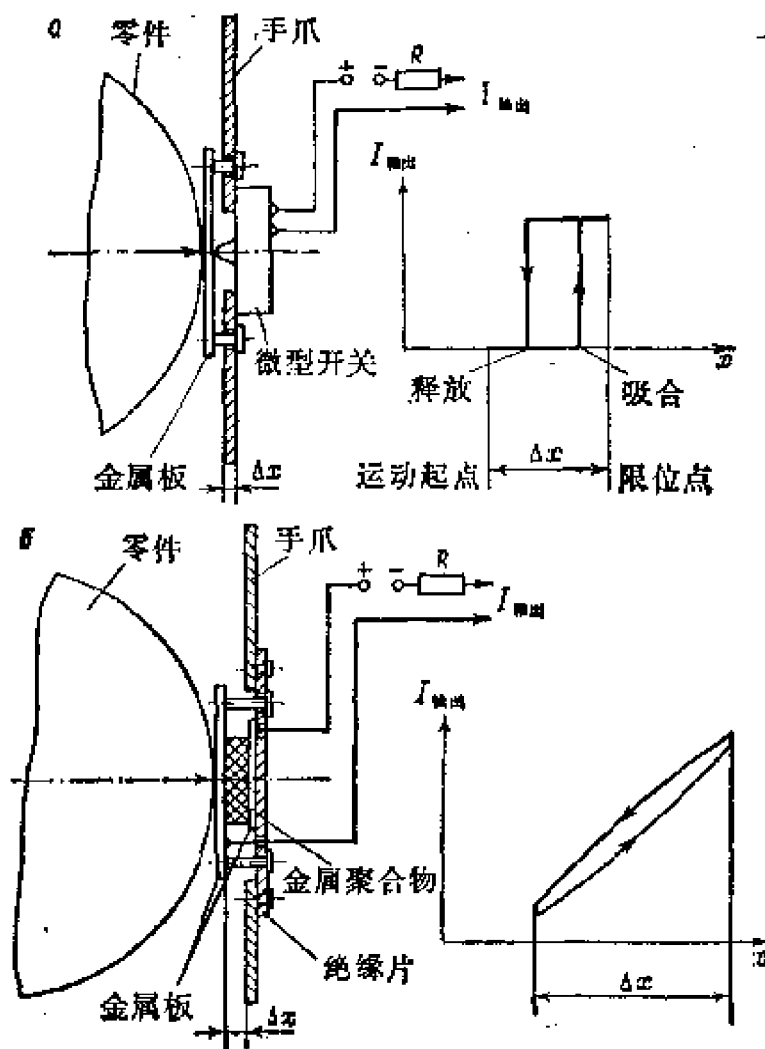


图 2.4

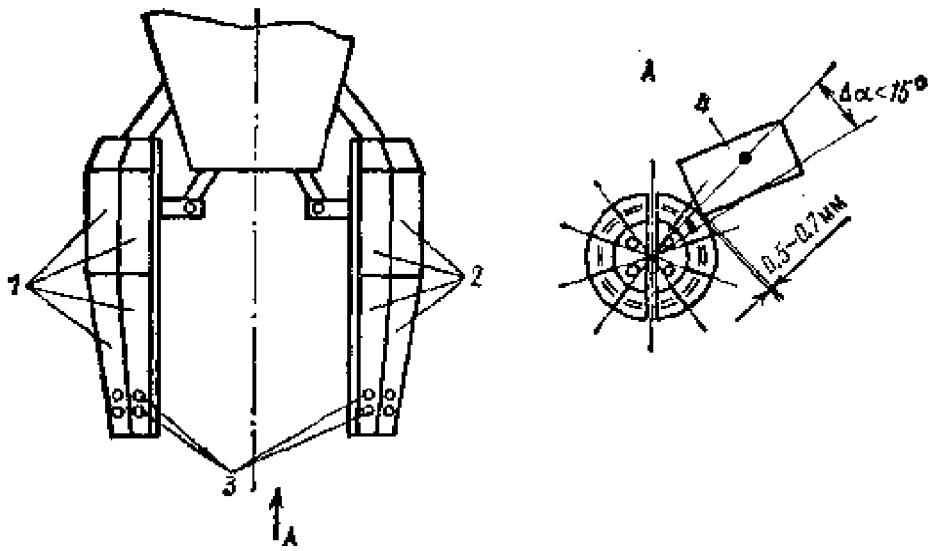


图 2.5

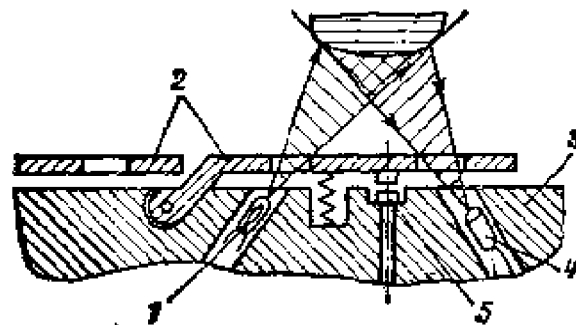


图 2.6

组成压力传感器的主要部件可以是应变仪，也可以是金属聚合材料，或者是对压力敏感的半导体元件⁽⁴¹⁾。传感器通常配置在手爪的内表面上。这些传感器配置成一条线或配置成一定阵式，以便获得手爪表面压力分布情况的信息。当手爪抓起固体物品时，手爪表面压力分布特性与手爪表面和零件相接触的程度是对应的。因而，压力传感器的信号也可用来确定被手爪抓住的零件的形状⁽¹⁸⁾。压力传感器静特性在被测压力的整个范围内都应是线性的。

当被抓住的物体相对手爪接口有相对移动时，滑动传感器就产生信号。此外，也常常用滑动传感器确定滑动量的大小。获得滑动信息的基本方法有^[32]：

- (1) 分析针状敏感元件沿被滑物体表面移动时的振动；
- (2) 把滑动位移变换成与测量系统相联的滚轮的转动；
- (3) 在手爪上装上一排压力传感器，分析手爪的各手指之间压力分布变化情况。目前，这种方法是很有发展前途的。

近距定位传感器装在机器人的手爪上。用它判定离手爪外表面几十毫米距离之内有没有物体。这种传感器通常是电磁式的、光学式的或超声波式的。

电磁式传感器的工作原理是，当传感器靠近物体时，记录出电磁参数变化。这种传感器的优点是精度高、可靠性强。但是，它只能对金属物体起作用。日本的“日立”（Hitachi）焊接机器人的机械手上安装了二个感应式传感器。用它来测量到焊板和互相垂直放置的零件隔板的距离。利用传感器的信号可以准确地监视零件的对接。

光学式传感器由光源和接收物体反射光线的光敏元件组成。光源是一个能装上聚焦透镜的小型灯泡。可用光电二极管、光电晶体管作为光敏元件。为减少外界光源的影响，传感器的光通量要加以调制。光学式传感器在手爪上的配置以及各传感器的安装情况如图 2.5 和图 2.6 所示。6 个光学式近距定位传感器分散地安装在手爪的手指上。用它们来测定在距离为 10~25 毫米之内的物体、障碍物和其它物体的外表面的位置，其准确度可达到 2 毫米。在手爪的内表面分散地安装着 4 个光学传感器。这些传感器是接收透过手指之间直接射进的光线而工作的。这样就能检查手爪是否抓到了物

体，并且能大致地确定物体的位置。

超声波近距定位传感器也是由信号发送器和接收器组成的。根据反射回来的超声波信号来发现物体和测定到该物体的距离。与光学式传感器相比，超声波传感器有如下优点：可以发现透光的物体；振动发生器的工作寿命实际上是没有限制的；它的指示与照明度无关；灰尘、蒸气以及其它的环境因素对传感器影响不大；在水下也能测量，等等。

列宁格勒加里宁工学院研制出一种装在手爪上的超声波近距定位敏感装置⁽⁴⁶⁾。该装置的特点是用同一个可逆变换器作为发射器和接收器。为此，专门研制了这种可逆变换器。

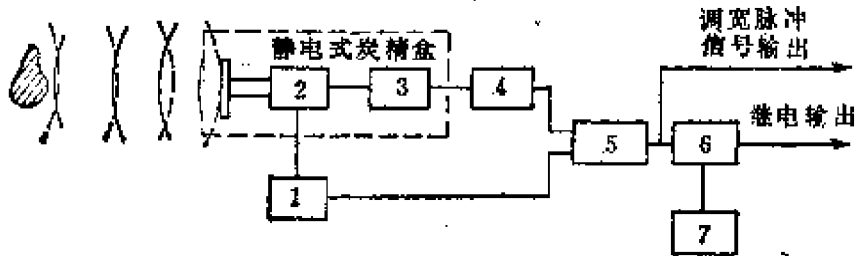


图 2.7

- 1—发生器；2—换向器；3—前置放大器；4—放大整形装置；
5—整形调宽变换器；6—比较装置；7—标准脉冲发生器。

它是一种变相的电容式传声器。这种传感器的结构如图 2.8 所示。其中，1—盖；2—薄膜；3—外壳；4—固定不动的电极；5—弹簧；6—绝缘垫。传感器的原理结构图如图 2.7 所示。发生器 1 产生一系列断续的高压单脉冲。这些脉冲经过换向器 2 送到静电盒。在电场作用下，盒

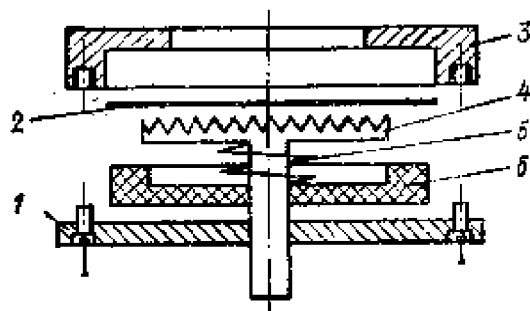


图 2.8

中薄膜产生振动,并在空气中发出超声波脉冲。反射回来的脉冲也由这盒接收,经过装在手爪手指上的前置放大器3放大,再经过放大整形装置4后,加到整形调宽脉冲信号的变换器5中去。在该变换器的输出端整形出的脉冲宽度与物体的距离成正比。得到的调宽脉冲信号就可作为传感器的输出参数。此外,在图中预先规定,由标准脉冲发生器7产生的脉冲宽度确定一个标准量,在比较装置6中信息脉冲和标准发生器产生的脉冲相比较,当调宽脉冲信号小于这个标准量二倍时,就产生距离改变的信号。

传感器在手爪上配置情况如图2.9所示。在二个手指的每一个手指上都装有4个指向不同方向的传感器。装在端面上的两个传感器除测量到物体的距离外,在某些情况下还可将手爪轴引导并准确地定向在物体所在的方向上。这一对传感器构成了立体观测幅。当两个传感器的信号相等时(即相当于距离 h_1 和 h_2 相等),手爪轴和物体轴(物体形状要很规则)相重合。

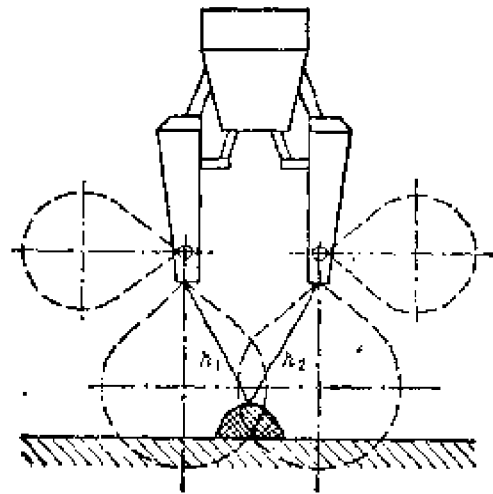


图 2.9

能给出整个工作区域内物体空间关系的信息的感觉装置很复杂。这种装置目前研制得还很少。人通过视觉器官可以获得这样的信息。根据现在的技术水平机器人完全复现人的视觉器官的功能还是办不到的⁽¹¹⁾。所以非常重要的是,在机器人的视觉系统中要合理地确定最起码的功能。

现在为了获取二维景象信息采用不太复杂的坐标式和感

受面式敏感装置，也可以采用在某种程度上和人的眼睛相似的人工眼。

所谓感受面就是一个在它的上面均匀安装许多敏感元件（如微型开关）的平面⁽²⁰⁾。在感受面之上的物体对位于其下的敏感元件发生作用。由此得到各物体的平面形象。根据这些就能确定各物体的相对位置、物体方向、零件的重心在敏感面上的投影以及其它内容等等。应该指出，物体在水平面上的投影通常比在其它平面上的投影包含更多的信息。

用相当简单的方法就能测得随搬运装置移动的零件在水平面上的投影以及零件坐标的信息。在这种情况下，只要在垂直零件运动的方向上装一排光敏传感器，而且传感器周期地发出检测信号就可以了⁽²¹⁾。

在参考文献〔6〕中讲述了人工眼的超声波信息系统。这种系统是在上述感受面的基础上发展起来的。这种系统能够得到关于零件在三维空间中的位置和外形信息。敏感元件是许多从零件下表面进行探测的超声波传感器。由零件上表面反射回来回波脉冲，其中就含有在这个传感器之上的零件的高度信息。各传感器要依次进行探测。

在现时所研究的人工眼系统中，可以是含有一个摄取平面图象的电视摄象机和一个确定物体第三维坐标的测距仪；也可以是含有两个电视摄象机，而用双筒望远镜法或其它方法测定第三维坐标。

实现人工眼系统的主要困难是图象的视觉信息处理复杂。这种信息量不大。一般用途的摄象机即可接收和传递大量的视觉信息。但这种信息结构复杂。视觉信息各个单元（或形象）之间的结构关系非常复杂。必须用人工智能的方法才能分析这些关系。

测量三维坐标通常用激光测距装置，因为这是最精确的。当然也可以用其它类型的测距装置。现在来分析由列宁格勒加里宁工学院研究试制的超声波测距装置。这种测距仪采用了立体声超声波定位原理。它有两个完全相同的测距通道。每个通道的测距方法和上述方法相同。该装置的结构图如图 2.10 所示。由无线电脉冲发生器 8 产生按正弦规律变化的超声波的信号波束。用这个波束在工作区内进行探测。发射器 1 和接收器 2 与接收器 3 在结构上是分开的。发送器仍然是前面所讲的静电盒。它放在两个相同的接收盒之间。发送器和接收器结构尺寸不同。

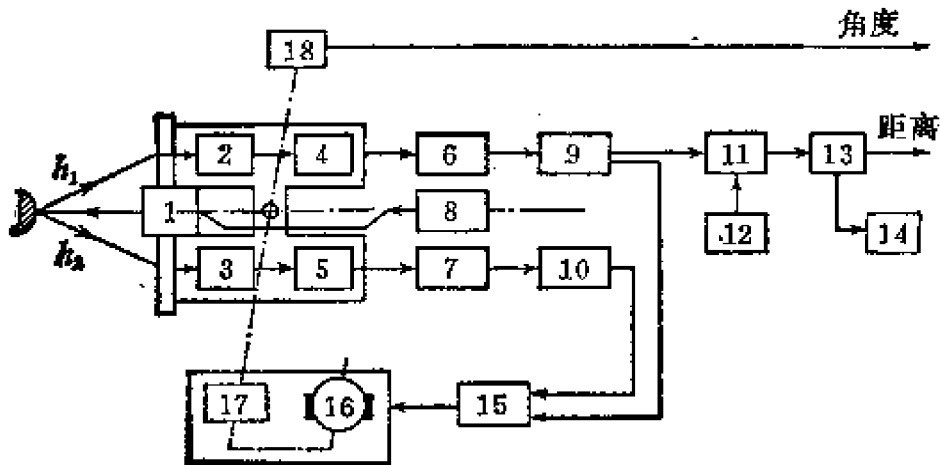


图 2.10

1—发射器；2—接收器Ⅱ₁；3—接收器Ⅱ₂；4—前置放大器 1；5—前置放大器 2；6—选择放大整形器 1；7—选择放大整形器 2；8—脉冲发生器；9—整形调宽变换器 1；10—整形调宽变换器 2；11—开关；12—标准频率发生器；13—计数器；14—指示器；15—比较装置；16—电动机；17—减速器；18—角度传感器。

为提高定位器定向精度和减少干扰影响，两个接收器都在指数式通道波导管的深处。因为要求测量相当远的距离，所以测距仪接收器的通道灵敏度应大大高于手爪传感器的灵

敏度。因此，在每一个盒式接收器的壳体内都装有前置放大器 4 和前置放大器 5。放大器输出信号传送到装置的核心部分。

信号在选择放大整形器 6 和选择放大整形器 7 中继续放大。放大器调正在探测用的无线电脉冲频率上。这就大大提高了装置的抗干扰性。在放大成形装置中实现信号检波和信息脉冲成形。在整形调宽变换器 9 和整形调宽变换器 10 中形成信息脉冲的宽度。由标准频率发生器 12 产生的标准频率计数脉冲经过开关 11 后，充满已被整形的信息脉冲里。根据计数器 13 中脉冲数目就可确定与物体的距离。所测得的距离在数字式指示器 14 中显示出来。

比较装置 15 比较两个通道的脉冲宽度。根据两个通道脉冲宽度之差的正负号给测距仪的电气传动装置加进一种控制信号。电动机 16 经过减速器 17 转动定位系统，直到测距仪轴指向物体，即 $h_1 = h_2$ 为止。在此位置上，从角度传感器 18 上取得可以确定台面上的物体坐标的信息，即方位角和距离。测距范围 0.3~4 米，误差为 ± 5 厘米。由于采用了望远镜测距工作原理，所以测量物体方向的误差可达 $\pm 2^\circ$ 。

采用电视摄象机光学聚焦（调节焦点）的方法也能测量到物体的距离。利用这种方法测量 2 米的距离，精度可达 ± 1.5 厘米。在参考文献〔47〕中介绍了测量第三维坐标的方法；根据物体在电视摄象机屏幕上的两个平面图象，用不太复杂的模-数电路对电视信号进行处理。这一方法在测距范围为 0.5~1.5 米时，测量精度为 ± 1 厘米。

人们力图获得一种视觉信号。这样形式的信号与电视图象相比，信息初步处理是比较简单的。这就促使人们去研究获得视觉信息的新方法。在这方面，日本科学家研究的沿着

零件外形照射的方法及区域照射法^[18]是令人感兴趣的。

外部信息（如视象、各种传感器综合信息）的敏感装置得到的复杂信号通常要经过初步处理，以便求得信息形式的大致结构，并找出主要特征，给出便于继续详细处理的信息形式。

当利用触觉传感器排列成矩阵来确定物体外形时，初步处理信息的目的是对该矩阵输出的大量信息进行变换，确定物体表面的形状、相对于传感器矩阵的方位及弯曲度。经过逐步的精确分析能够确定出物体完整的形状。

当初步分析电视传感器给出的视觉图象时，同样要分辨出图象的有代表性的基本特征：线、它们的交点、均匀区域等。而进一步详细处理视觉信息时应保证判明工作区内各物体间的排列关系及物体的方位。

对于给定的机器人，当设计外部信息的整套传感装置时，正确地、最大限度地利用外界环境预先知道的信息，则能大大简化设计工作。例如，在视觉反馈系统中^[47]，由于在工作台上的电视摄像机安置的高度是已知的，因此用简单的方法就可确定第三个坐标。在整个工作区内生产条件常常直接或间接地含有预先可知道的信息，如工作台高度、工作区个别不变的区段的大小和位置等等。考虑这些预先知道的信息，可以大大减少工作状况中的不确定因素，因而简化了对机器人敏感装置的要求。

利用不同的敏感装置和不同的方法可以获得同一信息。例如，可用工业视觉装置，或定位器，或接触传感系统获得物体外形的信息。若待判明的物体数目不多、形状简单，用接触敏感装置解决这一问题最简单。

在更复杂的问题中，可采用简单的接触传感器进行扫描

的方法。一个传感器沿着被探测物体上一条线移动，就能获得关于某一物体一个断面形状的信息。许多传感器排成一行，同时沿垂直于这行的方向移动，就能获得工作区平面有关信息。但用这种方法时，通常要求实时地确定出工作区内物体的参数，而机械扫描却要占去很多时间。这是一个矛盾。因此，用电子扫描装置，特别是用超声波、激光扫描装置是很有前途的⁽¹³⁾。

3. 操作人员与机器人的联系装置

为了人能有效地参与机器人的控制，甚至与机器人共同完成任务，建立操作人员与机器人之间的交互作用很重要。在机器人各种级别的控制中，用各种联系语言和硬件去实现这种交互作用。联系装置可分为两大类：给定装置和显示机器人发出的信息的装置。

给定装置包括指令台，组合控制板、执行装置及其部件的机械模型、目标指示装置、电子计算机标准终端、语言指令装置等。

当机器人处于手控状态时，指令台和组合控制板发出离散的和模拟的指令去控制机器人的各个分系统（如机械手的传动装置）。指令台和组合控制板也可用于变换机器人的工作程序。在监控状态和编机器人程序时，操作者可用指令台和组合控制板发出指令。

执行装置及其部件的机械模型是机器人处于模仿控制状态下的给定装置。为此，广泛应用手柄和机械手。例如，用手柄可给定机械手手爪的移动速度向量。

目标指示装置用于在机器人工作区内分辨出工作对象，即找出目标，并测定它的空间坐标。为此，可用超声波，激

光或其它类型的测距仪。但是，这时必须有附加的设备，以便操作者用眼睛检查测距仪是否对准了选定的对象。

在远距离控制的机器人中，目标指示装置是在它的电视观测系统的基础上构成的。我们将在后面研究列宁格勒加里宁工学院研制的电视目标指示系统。

语言指令装置使人能以最习惯的方式给机器人下达命令。这时人可用语言联系的标准手段从远距离给机器人下达命令。当人与机器人共同完成工作时，这样做是很重要的。由于辨识语言是非常复杂的问题，所以用语言控制机器人至今未能得到推广。现在仅个别地实现了限于2~3千个单词的语音辨识装置，而且还只能由一、二个发音标准的人员使用。

除上述的给定装置外，操作者也可用电子计算机标准终端（电传打字机、台式打字机、显示器等）同机器人联系。

信息显示装置分为机械式的、视觉的和声音的。

机械式信息显示装置能最大限度地、最自然地使操作人员的感觉器官参与机器人的控制过程。方法是，有效地动态显示出外界对象与机器人交互作用的信息及它们在空间的方位信息。采用这样装置的例子有：触觉直观显示器^[18]，能显示出作用力的机械手^[22]，显示水下机器人空间方位的可移动操作台^[68]。

显示信息的视觉装置由很多设备组成，其中有：信息台、绘图机、机器人形象电视系统、其它视觉反馈信息的信息源及电子计算机的标准终端。

声音显示装置对人的听觉器官起作用。在最简单的情况下，声音反馈以单一信号形式引起操作者的注意，或者发出危险警报。在更复杂的情况下，声音信号中含有机器人与环

境交互作用的信息，或者含有机器人分系统的状态信息。例如，声音信号的频率就能含有与机械手产生的力的大小有关的信息。机器人与操作者用口头语言联系是声音联系的最完善形式。利用语言综合器^[10]或录放装置^[37]就可形成口头语言。后面将介绍这种装置中的一个具体方案。

按照所需要的器件的特征和所用的物理原理对操作者与机器人的联系装置进行分类不能反映联系装置在各种级别的控制系统中使用的区别。人与机器人联系装置的分级结构如表 2.2 所示。

表2.2 人与机器人联系装置的结构

控制级别	给定装置	显示装置	注 释
I	指令键 电位计	电视机 遥测数据指示器	
II	给定控制器 给定手柄	电视机 遥测数据指示器和 力显示器	
III	目标指示器和 指令给定装置	电视机 综合信息显示装置	
IV	电传打字机 打字机 直观显示器 语音指令装置	电传打字机 打字机 直观显示器 语言综合器 语言录放装置	用专用语言联络
V	同IV	同IV	用自然语言某些 特定语句联络

从这个表可以看出，在机器人较低级别（I～III）的控制中，操作者与机器人联系语言和机器人与操作者联系语言

有本质的差别。在第四、五级别控制中所用的语言则趋于一致，并向人的自然语言方向发展。同时还可以看出，给定装置和信息显示装置是接近的，而在第五级别控制中它们就合成一个联系装置了。

现在比较详细地研究一下列宁格勒加里宁工学院制造的操作者与机器人联系用的非标准装置。

电视目标指示器^[46] 根据电视屏幕上显示出来的机器人工作区内的物体图象，操作人员选出自己感兴趣的对象（目标），并使电子标记与此目标重合。电子标记的位置是用一个双自由度给定手柄控制的。此手柄与两个互相垂直的电位计相联。从两个电位计上取得的电压 U_x 和 U_y 同时加到重合线路的一些输入端，而在线路的另一些输入端相应地加入行扫描电压和帧扫描电压。在这些线路开始工作的瞬间就同时触发了一个产生电子标记脉冲的逻辑电路。该脉冲加到电视接收机视频通道输入端，并在此与图象的视频信号相叠加。操作者给出的电压 U_x 和 U_y 单值地确定了相对于屏幕帧与行的原点的标记位置。用视频脉冲幅值调节标记的图象亮度。改变脉冲的极性可得到“亮”标记或“暗”标记。

电压 U_x 和 U_y 加到角度坐标 α_0 和 β_0 的计算器中去。正如上一节中指出的那样，可用附加的测距仪或自动光学聚焦方法确定第三维坐标（此处为距离）。

上述的目标指示系统同样也可用于立体电视系统。此时，操作者要在图象的电视屏幕上两次指出对象，而这个图象是由两个电视摄像机轮流摄放的。

语言指令装置 自动辨识语言的研究工作基本上是朝着两个方向发展的^[9]。第一个方向是辨识音节。目的是全面地解决自动辨识语言这一问题。第二个方向是寻找自动辨识指

令的有限组合的方法。显然，解决了第一个问题，第二个问题也就自然解决了。但是，自动辨识音节会遇到许多困难，并且需要制造很复杂的装置。由于在许多情况下，此装置需要响应的指令组合并不多，因此用辨识音节的方法从经济上讲是不合适的。

寻找简单的和花钱不多的方法解决给定的具体问题，这才是比较恰当的。现在已制造出大量的能辨识有限字组的装置。但必须指出，多数的辨识语言指令问题的研究工作是理论性质的研究而不是实用性质的研究。频谱分析法、成份分析法、相关分析法及其它一些方法是上述辨识算法的基础。但在实际上，利用一定辨识算法的大型电子计算机未必能认为是可行的。

语言应答装置 大家都知道语言信号的频谱可以限制在300~3000赫兹频带内，而语言音质和清晰度没有明显地变坏的动态范围是30分贝。在这种情况下，长为1秒的语言信号的信息量大约是 $3 \cdot 10^4$ 比特。因此，语言应答装置适合用磁带、磁盘等一类的存储语言的装置。

图2.11给出的是语言应答装置的结构图。机器人的256个储备用语保存在存储装置中的由一米长25毫米宽磁带绕成的带圈中。信息写在磁带的12条通道上。每条通道又划分成区段，也就是把通道划分成一段一段的。在通道的每一区段中各写入一个语句。各个区段之间留有一定间隔，以保证在磁带启动、停止和换速时不丢失信息。采用寻找地址的方法去寻找所需要的用语。用通道号码的四位编码，区段号码的五位编码确定任何用语的地址。地址码写在第十三条轨道上。寻找所要求的一个用语需时不超过0.5秒。播放用语的速度是1厘米/秒。

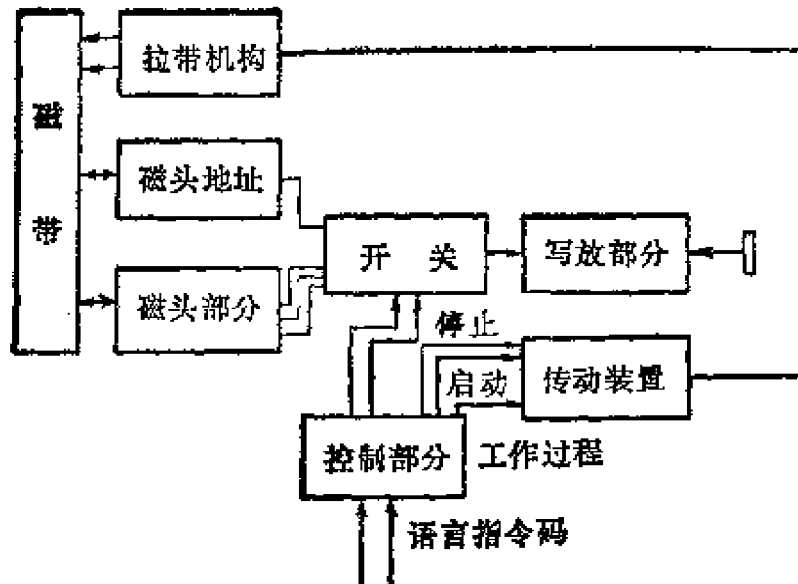


图 2.11

现在根据图 2.11 所示结构图比较详细地分析一下语言应答装置工作情况。每个语句的地址码由电子计算机加到控制部分。控制部分又使拉带机构的传动装置进入寻找语句状态。在磁带被重新缠绕成带圈过程中，第十三个读出头把各区段的地址码读出来，再送回到控制部分中，并在此处和给定的地址码进行比较。当两种地址码完全相同时，控制部分就使拉带机构的传动装置进入播放状态。同时，把相应轨道地址的磁头接入写-放机构。这之后，控制部分再向电子计算机询问下一个地址。每当播放一个语句结束后，又有新的地址，控制部分又重复上述工作循环。如果没有新的地址，则控制部分向电子计算机发出结束工作信号。

可以用示教法补充和修改机器人的语句储备。操作者给出语句的地址，控制部分根据给出的地址能自动地找到磁带上所需要的区段。这时控制部分使拉带机构的传动装置处于

非播放状态，而是在操作台上发出相应的信号。在写入指令之前，操作者从操作台上用手接通拉带机构。

上述的语言应答装置技术数据为：

语句存储量：256 条指令

尺寸：0.5×0.3×0.2 立方米

重量：3.5 公斤

消耗电功率：30 瓦特

第三章 工业机器人的传动装置

1. 工业机器人传动装置的分类

工业机器人可用电动的、液压的、气动的和复合式的传动装置。例如，液压和气动传动装置的组合，就是复合式传动装置的典型方案。

根据机器人的用途和对机器人技术特性的要求选择机器人的传动装置。在选择机器人的传动装置时，同时还要考虑价格、维护的复杂程度以及运行消耗等因素。目前50%以上机器人采用液压传动装置，40%采用气动传动装置^[21]。

具有点位式和轮廓式控制系统的通用或专用机器人多采用液压传动装置或气动传动装置。多年来，在各类机器中使用液压传动装置已积累了很多成功的经验。这就促使在机器人中广泛地使用液压传动装置，特别是在具有点位式和轮廓式控制系统的机器人中，以及具有循环式控制系统而负荷能力大于25~30公斤力的机器人中广泛地使用液压传动装置。

具有循环控制而且负荷能力小于20~30公斤力的工业机器人，主要采用气动传动装置。它的优点是，在限制开关控制下工作时，系统结构简单，而且精度较高。事实上，现在所有具有循环控制装置，且负荷能力小于30公斤力的工业机器人都是采用气动传动装置。

在气动工业机器人中，为了改变机器人承载的自由度，并得到所需要的稳定传动速度及较宽的调速范围，使用了气

表3.1 工业机器人传动装置特性的比较

工业机器人的传动装置	传动装置的特性							
	功率	作快速性	结构性能	安全性	效率	调节能力	安装要求	维护要求
气动装置	有限制	高	结构适当，易于安装	压力等于或超过10个大气压就有爆炸危险	0.15~0.2	调节结构简单，元件调整困难	不漏油，工作正常	以中等的技术人员进行定期的检查
液压装置	没有限制	很高	结构适当，易于安装	不爆炸，在一定条件下有危险	节流调节式为0.3，容积调节式为0.6	调节器、调速器、元件调整精度能到单级精度	安装要求高，漏油影响传动性能	要求高水平的技术人员进行定期的预防
液气复合装置	有限制，但比气动的比率高	高	与气动的结构必须与液动的结构相配合	当气压等于或大于10个大气压时有一定危险，在火灾条件下有危险	0.2~0.3	调节器、调速器、元件调整精度能到单级精度	安装要求高，漏油影响传动性能	要求高水平的技术人员进行定期的预防
电动装置	有限制	高	比前三种传动机构是容易标准化的	无爆炸、火灾危险	0.5	结构简单，灵活性很高	安装要求随传动方式不同而异	要求中等的技术人员进行定期的预防

动液压复合式传动装置。

近年来, 电气传动的机器人数量增加很快。轮廓式控制、点位式控制以及限位开关点位式(循环式)控制的机器人都采用电气传动装置。

表 3.1 对工业机器人用传动装置的特性进行了比较。

2. 机器人的气动传动装置

现代机器人的发展趋势之一是广泛采用具有简化运动学特性(当小于 5 个运动自由度时)和循环控制的专用机器人, 因为完成最简单操作的机器人可靠性高, 价格便宜。使用长行程的气缸和旋转式的气动马达, 从结构上解决了这种机器人的问题。这样, 不用中间运动学环节和中间传动装置就能直接控制执行机构。这种单自由度的机器人的气动传动装置由执行马达、配流装置、速度节流调节器和减压阀组成。气动系统的供气由一个总气压源供给。在个别运动自由度的供气中可有附加的减压阀, 以便使供气各管道中的压力能调节到要求值。ЛРГП 型气缸可以作为气动工业机器人用往复式气缸的例子。ЛРГП 型气缸可保证在工作速度小于 1.5 米/秒的情况下调节往复运动^[21]。这种气缸是由精密的圆管制成的。橡胶密封和氟化塑料垫圈结合使用可使活塞和活塞杆的摩擦力很小。ЛРГП 气缸的技术特性如表 3.2 所列。由于装有制动装置, 所以在这些气缸中可以调节活塞杆行程末端的制动状态。这种气缸最突出的特点是密封性好、寿命长和摩擦力小。推荐用 ДПГ 型马达作有限转角的气动马达^[24]。下面研究液压传动装置时再介绍这种马达装置及其技术特性。专为机器人气动传动装置研制了 ЛДП 型柱塞式旋转马达。它和 ДПГ 马达一样用来实现机器人机构的有限转角运

表3.2 IIP7II型气动液压缸技术特性

参数名称	缸规格种类												
	IIP7II 50×36 500	IIP7II 50×36 1000	IIP7II 63×40 5000	IIP7II 63×40 8000	IIP7II 63×40 1000	IIP7II 63×45 500	IIP7II 63×45 800	IIP7II 63×45 1000	IIP7II 80×56 250	IIP7II 80×56 500	IIP7II 80×56 1000	IIP7II 100×80 250	IIP7II 100×80 500
压力 (公斤力/平方厘米)	10												
	25												
活塞杆直径(毫米)	36	40	40	40	40	45	45	45	56	56	56	80	80
缸直径(毫米)	50	50	63	63	63	63	63	63	80	80	80	100	100
活塞行程(毫米)	500	1000	500	800	1000	500	800	1000	500	500	1000	250	500
活塞杆受力 (公斤力)	196		310	310		310	310		502	502		785	785
	490		775	775		775	775		1255	1255		1962	1962
重量(公斤)	94		185	185		150	150		257	257		285	285
	235		462	462		375	375		640	640		715	715
尺寸 (毫米)	8.35	13.1	9.8	13.2	15.7	10.6	13.4	16.5	10.1	15.6	26.5	14.5	21.4
	70	70	80	80	80	78	75	75	95	95	95	127	127
	98	98	108	108	108	134	134	134	128	154	154	175	175
	894	1394	1410	1210	1410	1342	1342	1542	1730	910	11410	1860	1810

动。它以齿轮齿条为主要结构。

齿条在这里的作用是充当两个同轴气缸的活塞杆。安装有选择齿轮齿条传动间隙的装置。表 3.3 给出了研制出的马达的技术特性和尺寸。

表3.3 ПДП型气动柱塞式旋转马达技术特性

参数名称		规格系列											
压力(公斤力/平方厘米)		10											
轴上扭矩(公斤力厘米)		1	2	3.2	6.3	8	16	16	25	25	40	40	8
马达轴转角(度)		180	180	180	180	270	180	270	180	270	180	270	180
重量(公斤)		4.5	11	8	8	180	18	28	32	20	25	35	12
外形尺寸 (毫米)	长	360	300	370	370	642	518	642	635	795	635	795	518
	宽	115	180	132	183	165	224	224	200	200	270	270	161
	高	55	65	70	80	80	90	90	118	118	128	128	80

在气动传动装置中,用滑阀和阀门作分配装置。建议采用以气-电控制的,且公称通径为 8~16 毫米的 4152550 型两位置或三位置的滑阀作为滑阀式气动配流元件。表 3.4 给出

表3.4 滑阀式气动配流元件的技术特性

型 式		参 数 名 称					
		公称直径 D_n (毫米)	接通时间 不大于 (秒)	断开时间 不大于 (秒)	90%的 寿命	重 量 不大于 (公斤)	排气能力 (立方米/ 小时)
两 位 式	4152550090-01	8			$10 \cdot 10^6$	3.0	1
	4152550090-03	10			$20 \cdot 10^6$	2.97	1
	4152550110-01	12	0.063		$5 \cdot 10^6$	4.65	2.36
	4152550110-03	16	0.063		$5 \cdot 10^6$	4.65	2.8
三 位 式	4152550092-01	8	0.063	0.1	$5 \cdot 10^6$	3.2	1
	4152550092-03	10	0.063	0.1	$5 \cdot 10^6$	3.7	1
	4152550112-01	12	0.1	0.2	$5 \cdot 10^6$	4.45	2.36
	4152550112-03	16	0.1	0.2	$5 \cdot 10^6$	4.35	2.8

了这种类型滑阀的主要技术特性。

气动配流元件最低的允许工作压力是 2.5 公斤/平方厘米。

在所研究的用电控制的配流元件中，通过电-气阀门传递控制压力。阀门是根据传递到电磁铁线圈上的电压而动作的。没有控制信号时，三位置式配流器的滑阀处在中间位置。在中间位置上，所有气流通道都被关闭。当有控制信号传入时，滑阀将处在一个极限位置。推荐用 4125500179 型常开或常闭式电-气阀门作为气动配流元件。这种阀门的结构如图 3.1 所示。

常闭式阀门是按如下方式工作的。当有电压传送到线圈时，电磁铁被吸入。供气通道和控制通道相通，所以压缩空气可自由地通过阀门。这时排出气体的通道被关闭。当电压去掉时，衔铁在弹簧作用下恢复到原来位置，使供气通道和控制通道断开。压缩空气不再从主要管道向通道输出口送气，而控制通道与大气相通。

常开式阀门工作方式与常闭式阀门不同之处就在于，当电磁铁线圈没有电压时，压缩空气主要管道与控制通道相通，而空气流向大气的输出口被关闭。阀门技术特性如下：

公称通径 $d_s = 4$ 毫米；

额定电压 $P = 10$ 公斤/平方厘米；

吸合时间 $t = 0.012$ 秒；

含有油雾的空气净化程度根据 ГОСТ17433-72 规定不低于 10 级；

消耗功率 10~12 瓦；

线圈额定电压：交流 12、36、110、220、380 伏；

直流 12、24、46、110 伏；

重量 0.55 公斤。

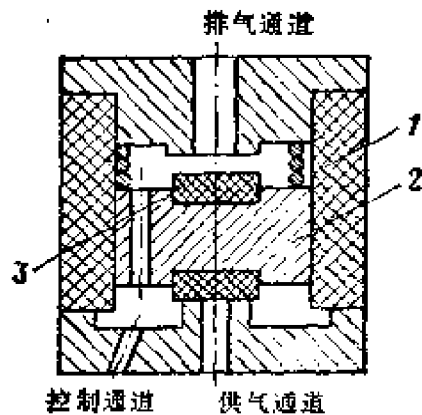


图 3.1

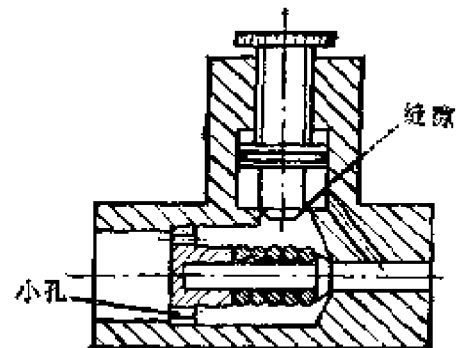


图 3.2

当管道的公称通径 d_p 大于 4 毫米时，则用多个阀门做成组合体。各阀门同时动作就保证了气动系统所需要的流量。在各类机器的气动传动装置中，广泛地采用 BB-57 型气动减压阀。气体工作压力调节在 2~6.3 公斤力/平方厘米范围内。建议用有单向阀的 ПДК 型节流阀调节进入气动马达中的空气流量，也就是调节马达的速度。假若在排气或进气时需要调节气动马达速度，节流阀的安装要使空气通过小孔及缝隙进入大气或气动马达的空腔。节流阀的结构如图 3.2 所示。

ПДК 10/10 ($d_p = 10$ 毫米) 型节流阀技术特性：

流经单向阀的流量 $Q = 30$ 升/分；

通过开启的节流阀空气流量 20 升/分；

在额定流量条件下经过单向阀的压力损失 0.4 公斤力/平方厘米；

节流阀完全打开时压力损失 0.5 公斤力/平方厘米；

工作压力范围 0.2~10 公斤力/平方厘米；

寿命 7×10^3 个循环；

重量 0.48 公斤；

尺寸 67×75 毫米。

供气源包括空气准备装置和减压器。空气准备装置由分离过滤器和油雾气组成。空气首先要通过 B-41-1 型分离过滤器。分离过滤器是用来除去压缩空气中的水分和尺寸为 0.05 毫米的机械杂质。在气动系统中，分离过滤器直接安装在处于垂直位置的管道上。经过分离过滤器，空气进入 B-44 型油雾器中。油雾器的用途是在压缩空气中掺进雾化了的油，以润滑气动装置的可动部分。调整调压器就能保证必要的供气压力。

工业机器人气动传动装置的设计 正如前面指出的那样，已有的带循环控制装置的气动机器人的定位点数目有限制，而限位开关又是保证定位精度的。用机械装置作为限位开关时，定位点的数目受到限制，这是由于气动传动装置速度太高所致。

若用吸合时间 $t = 0.1 \sim 0.2$ 秒的机床气动配流器，马达两个停车点之间最短行程为 100 毫米。这时马达对应的速度约为 1 米/秒。所以工业机器人执行马达在这种速度下，一个自由度的停止点数目最多是 6~9 个（视行程大小而定）。假若利用由几个行程不同的气缸串联而成的位置控制器，那么就可以增加定位点数目。例如，由三个气缸组成的位置控制器，就可有 $2^3 = 8$ 个定位点。在文献〔21〕中分析了位置控制器的原理及其使用。当在工业机器人中采用位置控制器时，应当注意到，在气缸的最小行程值等于位置控制器的步长的界限内时，不能调整定位点的位置。

目前，世界各国都在研制具有点位控制的气动机器人。图 3.3 所示为列宁格勒加里宁工学院控制技术研究室研制的、一个自由度的点位控制机器人气动传动装置原理图。

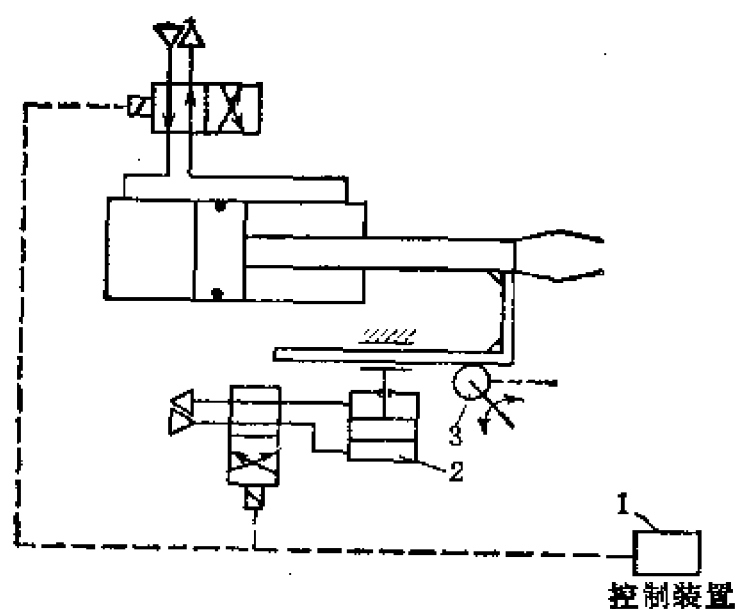


图 3.3

在定位点范围内，根据反馈传感器 3 的信号（参看图 3.3）利用逆压实现传动制动。制动时执行机构运动速度下降。最小的稳定速度，即“爬行”速度，是最大工作速度的 5~10%。用制动装置 2 直接使马达保持在定位点上。西德的 PAT 公司研制的、具有点位控制的气动传动装置，用圆盘式电磁制动器保证速度降低到爬行速度^[42]。对于具有点位控制的一个自由度的液压和气动机器人的价格进行比较，就可得出结论。气动的比液压的几乎便宜两倍。

不论是具有循环式的还是具有点位式的控制装置，机器人的气动系统均包括有气动执行马达、配流器、调节器和能源。

设计气动机器人的原始数据是执行马达运动时间（或 V_m 米/秒）、阻力（或负载）、启动和制动加速度值。所求的参数是气缸直径，管道的过流断面和安放在气缸工作腔与主气路或大气相通的管路上的装置的过流断面。

在气动马达中最大的困难是确定气缸中密封装置（活塞杆和活塞）的摩擦力。对于直径为 50 毫米的气缸，若留有某些保险系数，摩擦力可取为 $0.25P\Omega$ 。此处 P 是气源压力， Ω 是活塞面积。假若机器人传动装置的活塞和活塞杆重量不超过 10~20 公斤，则运动部分的质量所引起的计算结果的误差不会太大。根据要有足够运动力克服阻力这一条件，可算出一些 Ω 值。任意取一个 Ω 值，使它大于计算的 Ω 值中的最小值。用选择气动马达输入、输出端有效过流横断面的方法，能够保证活塞具有给定的运动速度。文献〔4〕中给出了活塞面积 Ω 与横断面之间的数值关系。动态计算使得每个自由度选择出的参数更加精确。动态计算也包括确定工作循环时间和确定过渡过程特性。计算时首先要研究准备的数据，其中包括配流器吸合时间，增高压力后压力波传播时间以及当执行机构不动时，气体充满动力气缸工作腔所需的时间^{〔14, 18〕}。在活塞不动时，用被压缩的气体填充动力气缸的工作腔，一直要充到这个腔内压力值达到 $P_s = F_r / \Omega$ 为止，其中 F_r 是总负载。活塞开始移动。活塞运动方程是

$$m \frac{dv}{dt} = P_1 \Omega_1 - P_2 \Omega_2 - P_s \Omega_m - F_r \quad (3.1)$$

其中 P_1 、 P_2 、 P_s 分别为工作腔、排气腔和大气压力； Ω_1 、 Ω_2 分别是活塞和杆的面积。

工作腔和排气腔压力变化方程分别为

$$\frac{d\sigma_1}{dt} = \frac{k\sigma_1}{x_0 + x} \left(\frac{G_1 RT_{10}}{\sigma_1 P_{10} \Omega_1} - \frac{dx}{dt} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{k\sigma_2}{x_0 + s - x} \left(-\frac{G_2 RT_{20}}{\sigma_2 P_{20} \Omega_2} + \frac{dx}{dt} \right) \quad (3.3)$$

其中 σ_1 、 σ_2 是压力比值， $\sigma_1 = P_1 / P_0$ ， $\sigma_2 = P_2 / P_0$ ， P_0 是管

路的气压压力； k 、 R 分别是绝热指数和气体常数； T_{10} 、 T_{20} 、 P_{10} 、 P_{20} 分别是气缸的活塞和有杆腔内的温度与对应的压力； G_1 、 G_2 分别是进入气缸的活塞腔和有杆腔内空气的流量； x_0 、 x_1 、 S 分别是活塞的初始坐标、瞬时坐标值和行程全长。

既然气动机器人操作速度很高，则很重要的一点是要能以允许的加速度使机器人执行机构制动，并能停止在给定点上。正像文献〔42〕指出的那样，当操纵硬性材料制成的零件时（能可靠地抓住对象），考虑到影响机器人可靠性的各机械部件的过载，推荐的加速度允许值不要超过 $1.6g$ 。

可用气动节流，液压或弹簧式的阻尼机构以及利用反压等方法实现气动马达的制动。

用气动节流方法制动是，当机器人的执行机构的行程接近定位点时，增加排气通道的阻力。用这种方法制动时，排气腔内气垫的制动效果在很大程度上与排气通道被关闭的瞬间腔内压力大小有关。因为有许多不能给予足够精确考虑的因素（如阀门及密封元件的漏气，负载振动引起流量特性离散化等等），所以不能确定制动行程 x_1 的精确值。使用动态计算法可以估算出，以允许的加速度值，在给定的结构参数情况下，执行机构能否实现停车，并且可以求出 x_1 的近似值。这一数值可以作为配流装置沿行程转换成制动状态的原始数据。

上述制动方法的优点是，阻尼装置的结构简单。这种制动方法的缺点是因传动装置在工作过程中负载变化而使制动节流阀门调整复杂；由空气可压缩性引起的制动过程过长；可能产生振动等。综上所述，对于负荷力为中等（ $5\sim 10$ 公斤）和负荷力较大（大于 10 公斤）的气动机器人这种制动

方法是不能采用的。

用阻尼装置制动的基本原理是，采用专用装置（即阻尼器）吸收传动装置的运动能量。

当气动传动装置的负载惯性小时（即相当于负载力小于1公斤的机器人），可以用弹簧作为阻尼元件。选用圆柱形弹簧阻尼器时，希望使传动力留有余量。这样做容易选择弹簧的力特性，并便于调整阻尼器。弹簧阻尼器结构比较简单。但是，即使只要求有能令人满意的制动特性，即弹簧特性是按照要求的加速度选择的，弹簧的尺寸也相当可观了。因此，在中等和大的负载力情况下，不能采用弹簧阻尼器。最常用的制动装置是液压阻尼器。

应当指出，有一些气动工业机器人是采用液压制动装置进行制动的，如 ПР-10型工业机器人，“旋风(ЦИКЛОН)”型工业机器人等。在制动瞬间，与气动马达的活塞杆相连的顶杆碰上液压阻尼器的开关，并把它压下，马达就停了。文献〔29〕给出了按给定制动规律制动的液压阻尼器的工作原理图。气动马达制动（见图 3.4）时，若能列出加在活塞上的力平衡方程，并考虑到阻尼力，则可决定阻尼器的各结构参数。这个方程的相对形式是

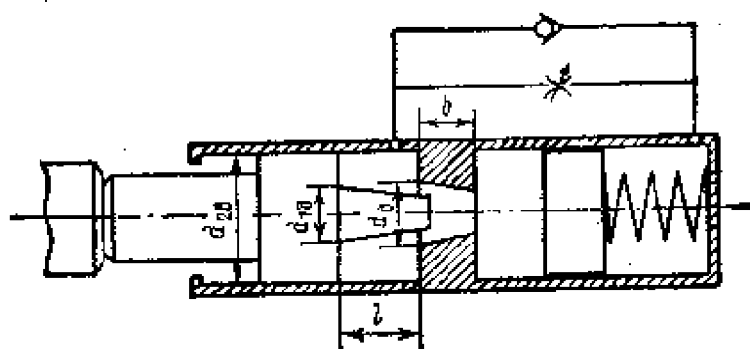


图 3.4

$$\sigma_1 - \frac{P_n}{P_0} \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \frac{1}{\sigma_2} - \sigma_p - \frac{F_n}{P_0 \Omega_1} = \frac{m}{P_0 \Omega_1} \frac{d^2 x}{dt^2}$$

其中

$$\sigma_p = \frac{F_{rp} + P_n \Omega_m}{P_0 \Omega_1}$$

$F_n = P_n \Omega_n$ 是阻尼器作用在活塞上的力。

假若求得在制动时刻的压力 P_n , 就可以找出 F_n 的大小。若所用的阻尼缝隙是同心的, 由流过缝隙的流量方程

$$Q = \Omega_n \frac{dx}{dt} = \pi d_n P_n \frac{\delta^3}{12\mu b}$$

就能求出压力 P_n 。则力 F_n 等于

$$F_n = \Omega_n P_n = \Omega_n^2 \frac{12\mu b}{\delta^3 \pi d} \frac{dx}{dt}$$

式中 d_n ——阻尼器针阀下面的孔径。

压力 P_n 作用面积由下式求得

$$\Omega_n \approx \frac{\pi (d_{1n}^2 - d_{2n}^2)}{4}$$

其中 d_{1n} 、 d_{2n} ——分别为阻尼器的活塞和活塞杆的直径;

b 、 δ ——分别为阻尼器阻尼缝隙的宽度和大小。

考虑 F_n 值, 可得平衡方程

$$\sigma_1 - \frac{P_n \Omega_2}{P_0 \Omega_1} \frac{1}{\sigma_2} - \sigma_p - k_n \frac{dx}{dt} = \frac{m}{P_0 \Omega_1} \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3.4)$$

式中

$$k_n = \frac{\Omega_n^2 12\mu b}{P_0 \Omega_1 \pi d_n \delta^3}$$

类似于方程 (3.2) 和 (3.3), 可以写出工作腔和排气腔的相对压力变化的方程式。若已知气动马达稳态运动时的

初始值 $\sigma_{1,0}$ 和 $\sigma_{2,0}$ ，制动开始的坐标 x_0 ，并给出允许加速度 $\frac{d^2 x}{dt^2}$ ，则方程 (3.2)、(3.3) 和 (3.4) 可用文献〔5〕所讲的数字方法解出。根据解得的结果，就可确定出保证所要求制动状态的方程 $k_x = f(x, t)$ 。若在制动的行程范围内 k_x 的变化值是已知的，而且在结构上给定缝隙宽度 b 及直径 d_{1a} 和 d_{2a} ，就可确定出缝隙 δ 与 x_r 的函数关系。图 3.5 给

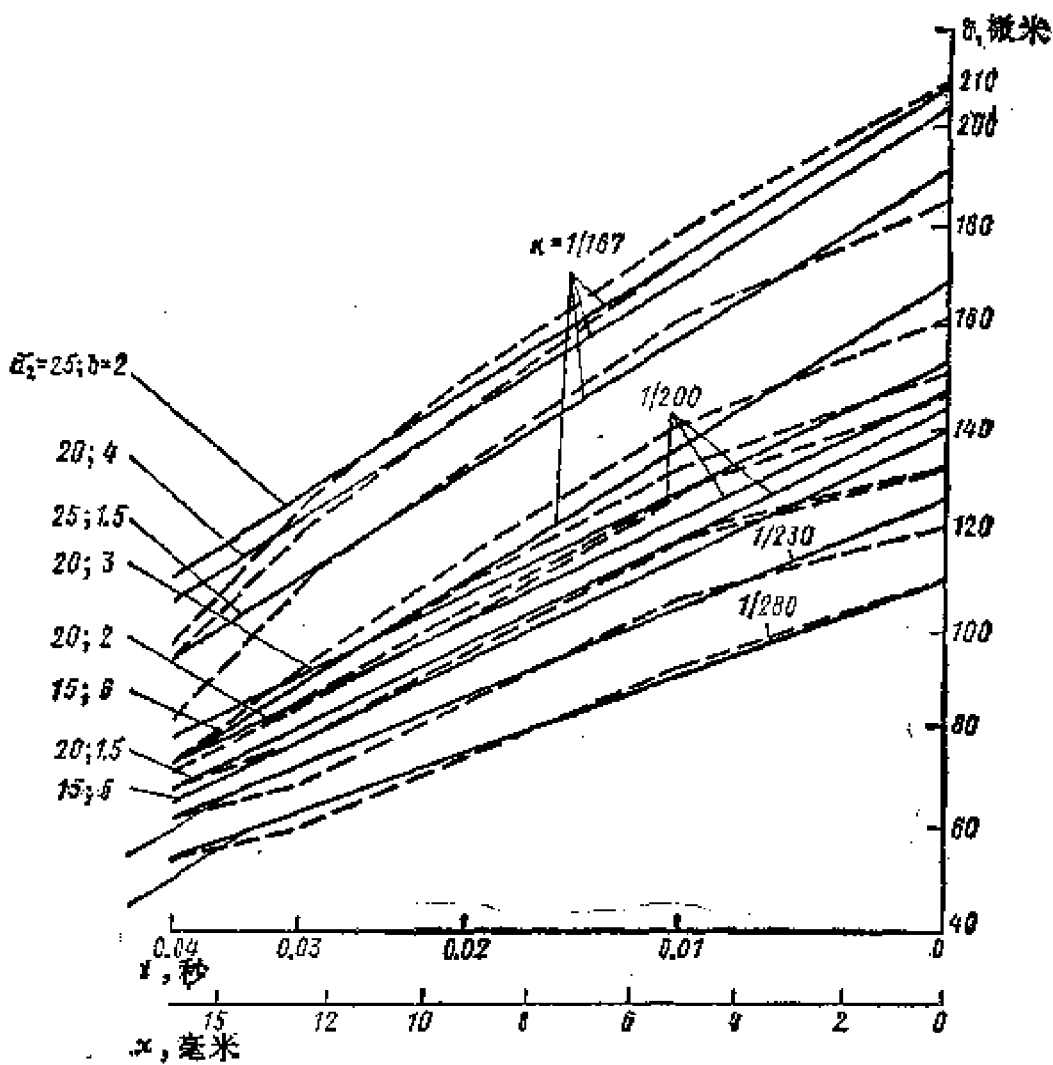


图 3.5

出了负载力为 15 公斤力, 稳定速度为 0.5 米/秒, 允许的加速度为 $d^2x_r/dt^2=1.25g$ 的机器人在水平方向自由度的气动传动的 $\delta(x_r)$ 关系曲线。不同的 $\delta(x_r)$ 曲线与阻尼器的运动元件不同的尺寸相对应。例如, 在给定结构参数 $d_{20}=20$ 毫米和 $b=4$ 毫米情况下, 开始制动时缝隙 $\delta=0.208$ 毫米, 经过制动路程 $x_r=15$ 毫米后, 缝隙 $\delta=0.095$ 毫米。运动元件的锥度为 0.006。

液压阻尼器结构紧凑, 而且能够在很宽的机器人作用力范围内保证按要求规律进行制动。这是液压制动器的有利因素。液压阻尼器的主要缺点是, 由于制动液体的泄漏会使阻尼器损坏, 这就降低了整个机器人的可靠性。

为研究对传动的控制作用, 可顺序地改变进入气动马达内的空气压力。我们引入如下记号: 马达工作腔进气用〔1〕表示; 马达工作腔排气用〔-1〕表示; 入口处于节流状态用〔1'〕表示; 排气节流用〔-1'〕表示; 制动节流〔1''-1''〕; 关闭为〔0〕。当控制作用序列是〔1 -1〕或〔1 -1'〕时, 机器人的气动马达处于正常工作的运动状态。当用节流制动时, 控制作用序列是〔1 -1''〕。若用反压进行传动制动, 那么控制作用序列即为〔1 1〕, 〔1' 1〕。

从制用开始到完全停车, 运动对应于 $\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, 或者有的 (如 MII-5 型机器人) 对应于 $\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。当控制作用序列为〔0 1〕时, 用反压 (即反向压力) 分析气动传动的制动力特性, 力平衡方程是

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \left(\frac{\sigma_1}{P_{20}} - \frac{\sigma_2}{P_{10} \Pi^2} - \frac{\sigma_F}{P_{20}} \right) P_{10} P_{20} \Omega_1 \quad (3.5)$$

式中 P_{10} ——处于稳态时马达工作腔压力;

$$\Pi^0 = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \text{——面积比值。}$$

制动时工作腔的容积为

$$V_r = V_{10} + \Omega_1 x_0 + \Omega_1 x \quad (3.6)$$

式中 V_{10} ——原始的固定不变的容积，只和气缸结构有关；

x_{10} ——开始制动时的坐标值。

工作腔内空气膨胀过程认为是绝热过程。这时

$$P_1 = P_{10} \left(\frac{V_{10} + \Omega_1 x_0}{V_r} \right)^k$$

或者写成相对形式

$$\sigma_1 = \left(\frac{V_{10} + \Omega_1 x_0}{V_r} \right)^k$$

制动腔内压力变化的方程可写成如下相对形式

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{k\sigma_2}{S-x} \left(\frac{G_2 RT_2}{P_{20} \Omega_2 \sigma_2} + \frac{dx}{dt} \right) \quad (3.7)$$

若在制动过程中，制动腔内的压力超过减压阀的调定压力，即 $\sigma_2 \geq 1$ ，并且若大于 6%，则减压阀工作在反压状态。这时制动腔内压力变化的方程是

$$\sigma_2 = \left(\frac{V_2}{V_{20} - \Omega x} \right)$$

式中 V_2 —— $\sigma_2 = 1$ 时制动腔的容积；

V_{20} ——制动腔连同管道的总容积。

前面所列写的非线性方程 (3.1~3.7) 联立起来，可用数字方法去求解^[14]。根据解的结果就能确定出函数 $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$ 、 $x(t)$ 、 $x_1(t)$ 和制动时最大加速度值。

若反压制动，气动传动装置的控制作用序列是 $\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 。

在这种情况下研究传动装置的动力特性，就要联立去解作用

力动态平衡方程及气动马达的工作腔和有杆腔内压力相对变化的方程。这两个方程是

$$\frac{d\sigma_1}{dt} = \frac{k\sigma_1}{x_0 + x} \left(\frac{G_1 RT_{10}}{\sigma_1 P_{10} \Omega_1} - \frac{dx}{dt} \right)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{k\sigma_2}{x_0 + S - x} \left(\frac{G_2 RT_{20}}{\sigma_2 P_{20} \Omega_2} + \frac{dx}{dt} \right)$$

现在来分析，在反压制动情况下，控制作用序列和机器人结构参数对传动的动力特性的影响。图 3.6 给出了作为机器人一个运动自由度的气动传动方案。

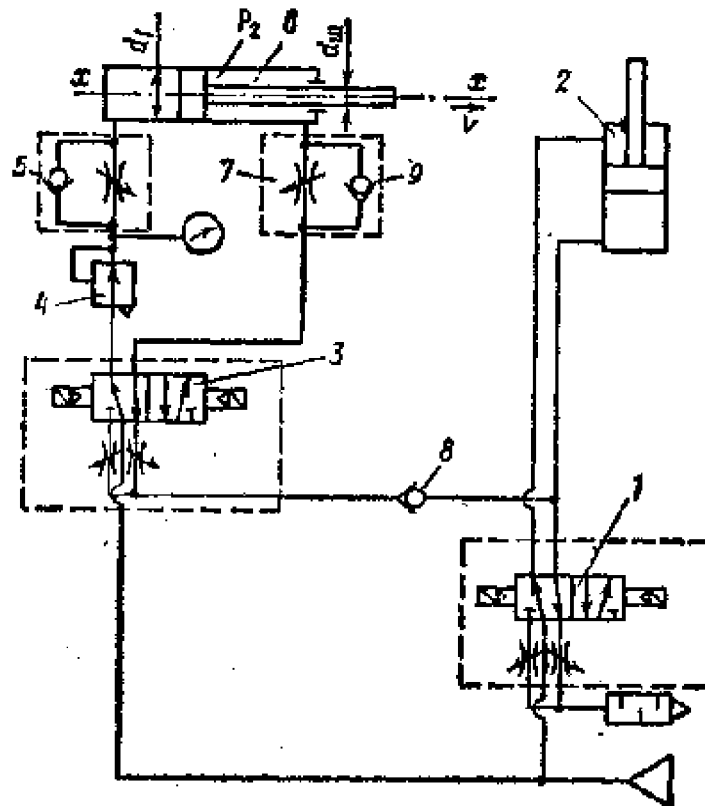


图 3.6

用控制作用序列〔1—1〕来保证正常工作运动。由供气管路进来的气体经过配流阀 3，减压阀 4，单向阀 5 进入气动马达 6。经过节流阀 7，配流阀 3，单向阀 8，配流阀 1

进行排气。当反压制动时，控制作用序列是〔0 1〕。在制动时，配流阀 3 进行转换。由供气管路送来的空气经过单向阀进入气动马达 6 的有杆腔内。活塞腔管道因有减压阀 4 而被关闭。此时减压阀 4 起单向阀作用。转换配油阀 1 可保证限位器的到位和定位。结果，空气就从供气线路进入固定缸 2 的活塞腔内。固定缸又使限位器（定位销）伸出。现对最常见的气动机器人（负载力为 5~10 公斤力）传动装置的动力特性进行分析。其结构参数是：

$$\Omega_1 = 18.8 \text{ 平方厘米}; \quad \Omega_2 = 11.2 \text{ 平方厘米};$$

$$\Omega_m = 8.6 \text{ 平方厘米}; \quad S = 600 \text{ 毫米};$$

$$m = 10 \text{ 公斤}; \quad V_0 = 1 \text{ 米/秒};$$

$$P_{\text{源}} (\text{气源压力}) = 5 \text{ 公斤/平方厘米};$$

$$F_x = 20 \text{ 公斤力}.$$

工作通道和制动通道的局部阻力综合系数分别为 $\sigma_1 = 80$, $\sigma_2 = 50$ 。

气动马达定位点的坐标是 $x_1 = 100$ 毫米, $x_2 = 300$ 毫米, $x_3 = 500$ 毫米。

现在来分析，当控制序列是〔1 0〕和〔1 1〕时，上述传动装置制动状态的动力特性。解联立方程组，并把解得结果转为相对值形式，就能求出图 3.7 所示的 $\Delta\xi = f(\xi)$ 关系。其中 $\Delta\xi = \Delta x_i / \Delta x_{\min}$ 是制动路程相对值； $\xi = x_i / x_{\max}$ 是用相对值表示的瞬时行程坐标值； Δx_i 、 Δx_{\min} 是设计的制动行程瞬时坐标值和最小值； x_i 、 x_{\max} 是制动初始点瞬时坐标值和最大值。

图 3.7 的曲线 1 表示对应于控制作用序列〔1 1〕的制动行程与开始制动点的坐标之间的关系，曲线 2 对应于控制作用序列〔0 1〕。

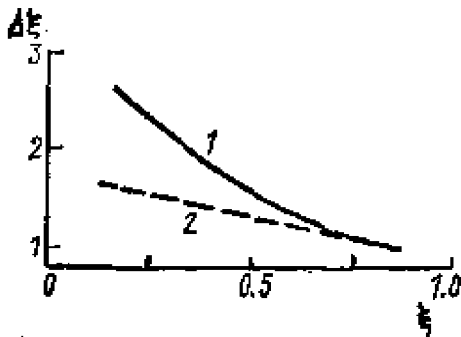


图 3.7

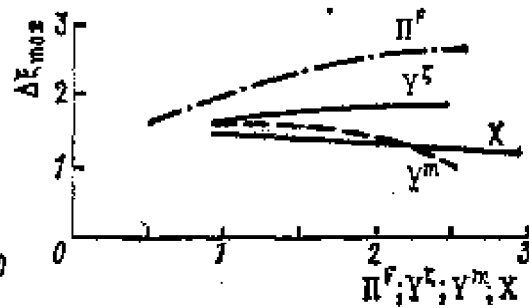


图 3.8

从 $\Delta\xi = f(\xi)$ 图可以看出, 用控制 [0 1] 比用控制 [1 1] 的制动路程更稳定。用后者, 空气进入制动腔时也不断地进入活塞腔内, 使制动行程加长了。制动腔的容积(由制动初始点坐标 x_1 确定) 大则制动行程越长。 $x_1 = 100$ 毫米时制动行程最大。图3.8给出了控制序列为 [0 1] 时结构参数对制动行程的影响, 制动相对行程为 $\Delta x_{\max}/\Delta x_{\min}$, Δx_{\max} 是 $x_1 = 100$ 毫米时的行程, x_1 是气动马达某些结构参数变化的函数; Δx_{\min} ——在 $x_3 = 500$ 毫米处制动时的行程, 结构参数不变。在所研究的 x_1, x_2, x_3 点中, 在 x_3 点处制动时行程最小。因此, 从图 3.8 曲线上得出的制动行程相对最大不稳定性数值 $\Delta\xi_{\max}$ 与各个给定的结构参数值相对应。制动行程不稳定性与气动马达有杆腔的活塞面积和工作腔的活塞面积(都以相对面积表示) 之间的关系可用函数 $\Delta\xi_{\max} = f(\Pi^F)$ 表示。制动压力的变化正比于 Ω_1 的变化(或者说反比于 Ω_2), 和调整压力升高到制动压力的时间, 并相应地改变制动行程值。

可用关系式 $\Delta\xi = f(v^{\xi})$ 确定制动通道中气体流动阻力对制动行程的影响, 其中 $v^{\xi} = \xi_{r1}/\xi_{r\min}$ (最小阻力系数 $\xi_{r\min} = 55$), 在给定的 ξ_r 值范围内 v^{ξ} 值不大。从图3.8曲线上可以看出, 制动行程随参数 v 增加而加大。根据图3.8所给的 $\Delta\xi_{\max} = f(v^m)$

关系曲线（其中 $v^m = m_i/m_{\min}$ ）可断言，气动马达的可动元件的质量增加，使制动行程值在很大程度上稳定不变。从图3.8中 $\Delta \xi_{\max} = f(x)$ 关系曲线（ $x = F_r/F_{r\min}$ ）可以看出，增加运动阻力 F_r 对制动行程有相似的影响。

在前面所作过的研究基础上，可以指出，当采用反压制动时，控制作用序列、制动初始点坐标值、气动马达的活塞杆工作面积与活塞腔工作面积之比值对气动传动中制动行程的不稳定度有决定性的影响，而制动通道中气流阻力、运动阻力及质量的变化则影响较小。

随可动部分的质量和运动阻力的增加，气动马达制动的行程距离大小就更稳定了。对具有大的负载力（大于10公斤力）的气动机器人来说，气动马达采用反压制动法是有发展前途的。

对日本的“阿依达（Аида）”工业机器人水平移动机械手用的气动传动装置进行了实验研究。研究所采用的参数是：附加质量5~10公斤，制动开始点的坐标： $x_1 = 215$ 毫米， $x_2 = 315$ 毫米， $x_3 = 515$ 毫米；气源压力 $P_0 = 4$ 公斤力/平方厘米；运动阻力测量值23公斤力。经过实验研究表明，制动行程的平均值是：当 $x_1 = 215$ 毫米时， $\Delta x_{1r} = 147$ 毫米；当 $x_2 = 315$ 毫米时， $\Delta x_{2r} = 142$ 毫米；或者当 $x_3 = 515$ 毫米时， $\Delta x_{3r} = 140$ 毫米。制动行程最大不稳定度，以相对值单位表示为 $\Delta \xi_{\max} = 1.05$ 。在所得研究结果的基础上，研制了MII-5型气动式工业机器人。机器人采用了反压制动方法制动，机械手用定位销进行精确定位。

采用反压制动的主要优点是简化了机器人的结构，因为在这种情况下不需采用阻尼机构。这就提高了整个机器人的可靠性。它的主要缺点是在反压制动时，气动马达工作腔和

制动腔的初始压力比值调整比较复杂。

各机械手同时运动时机器人气动传动的计算 在计算工业机器人一个运动自由度的传动时，没有考虑与它同时工作的其它自由度的传动特性对这一自由度工作特性的影响。对于快速性好的机器人常要求考虑这种影响。每个运动自由度分别独立运动时可用提高执行马达运动速度的方法来提高快速性。但是，这会大大降低密封的可靠性。现时气动和液压缸的允许速度为1.5米/秒。

图3.9给出了顶升式（图3.9a）和悬挂式（图3.9b）气动机器人计算原理图。对于图3.9b所示的悬挂式传动，在各运动自由度协同运动的情况下，零件重量的变化对传动动力特性有很大影响。用气缸实现沿广义坐标 q_1, q_3 方向的移动。用旋转叶片式马达实现坐标 q_2 方向的转动。每一个马达的控制序列都是 $\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。设开始运动瞬时，即 $t = 0$ 时，工作腔压力为 P_s ，排向大气的压力为 P_0 。因为油雾器可保证马达有良好的润滑，所以可以认为摩擦力正比于运动速度。我们

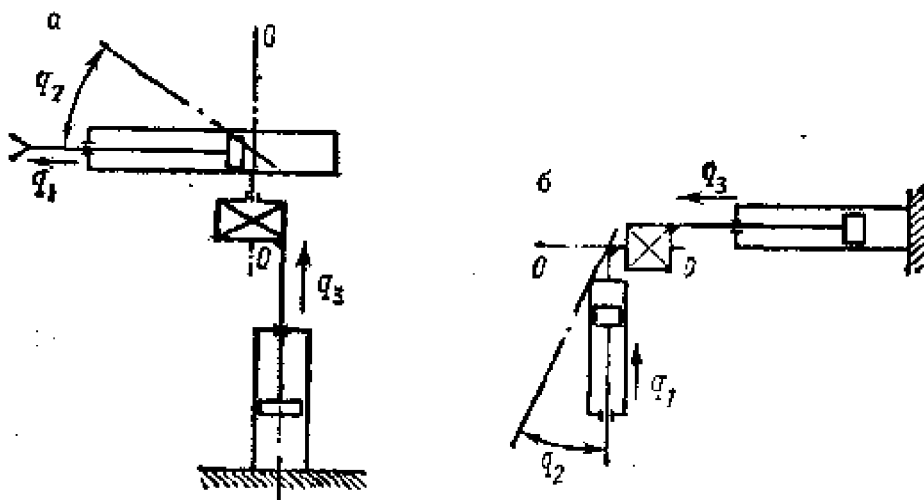


图 3.9

用如下拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{dT}{dq_i} - \frac{dT}{dq_i} = Q_i - \frac{dR}{dq_i}$$

来研究机械手的动力特性。

动能 T 是各个运动自由度的动能之和

$$T_1 = \frac{m_1}{2} (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1^2 \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2) + \frac{J_1}{2} \dot{q}_2^2$$

$$T_2 = \frac{m_2 \dot{q}_3^2}{2} + \frac{J_2 \dot{q}_2^2}{r^2}$$

$$T_3 = \frac{m_3 \dot{q}_3^2}{2}$$

其中 q_1 ——从 OO 轴到环节 2 质心距离； q_2 、 q_3 ——分别为绕 OO 轴的转角和升起坐标值； J_1 、 J_2 ——分别为相对于 OO 轴平行并过环节 1 质心的轴的转动惯量和环节 2 相对于 OO 轴的转动惯量。

机器人用顶升式方案（图 3.9 a）时，位能 $\Pi = Pq_3$ ，其中 $P = (m_1 + m_2 + m_3)\dot{q}$ ，而用悬挂式方案时 $\Pi = -Pq_1 \cdot \cos q_2$ 。耗散函数 $R = \sum f_i \dot{q}_i^2 / 2$ 。对于顶升式机器人，描述机器人动力特性的拉格朗日方程组是：

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 m - \dot{q}_2^2 q_1 m = Q_1 - f_1 \dot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 (J_1 + J_2 + m_1 q_1^2) + 2 m_1 \dot{q}_1 \dot{q}_2 q_1 = Q_2 - f_2 \dot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 (m_1 + m_2 + m_3) = Q_3 - f_3 \dot{q}_3 - P \end{cases} \quad (3.8)$$

而对于悬挂式机器人，描述机器人动力特性的拉格朗日方程组是：

● 图 3.9 中可绕 OO 轴转动的连杆为 2，只能沿与 OO 轴平行方向作移动的连杆为 1。——译者注

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 m - \dot{q}_2^2 q_1 m = Q_1 - f_1 \dot{q}_1 + m_1 g \cos q_2 \\ \ddot{q}_2 (J_1 + J_2 + m_1 q_1^2) + 2m_1 \dot{q}_1 \dot{q}_2 q_1 \\ \quad = Q_2 - f_2 \dot{q}_2 - m_1 g q_1 \sin q_2 \\ \ddot{q}_3 (m_1 + m_2 + m_3) = Q_3 - f_3 \dot{q}_3 - P \end{cases} \quad (3.9)$$

式中 Q_i ——各个运动自由度的广义力； f_i ——粘性摩擦系数， $f_i = 0.1 \sim 0.3$ 。

广义力是：

$$Q_j = a_{1j} \sigma_{1j} - \frac{a_{2j}}{\sigma_{2j}} \quad (3.10)$$

式中 $a_1 = \Pi^2 \Omega_j P_n$ ， $a_2 = F_j P_n$ ， σ_{1j} 、 σ_{2j} ——相对压力 $\sigma_{1j} = P_1 / P_n$ ， $\sigma_{2j} = P_2 / P_n$ ； P_1 、 P_2 ——气动马达工作腔与排气腔压力； Ω ——有杆腔活塞的面积； Π^2 ——活塞两端面积之比。

在 Δt 时间内，气动马达腔里相对压力变化：

$$\begin{cases} \Delta \sigma_{1j} = \frac{b_1 \left(1 - \sigma_{1j} \frac{k-1}{k} \right)^{1/2} \sigma_{1j}^{1 + \frac{n-k}{nk}}}{q_{1j}^0 + q_j} \Delta t - \frac{n \sigma_{1j}}{q_{1j}^0 + q_j} \Delta q_j \\ \Delta \sigma_{2j} = \frac{b_2 \left(1 - \sigma_{2j} \frac{k-1}{k} \right)^{1/2} \sigma_{2j}^{k + \frac{1+n}{2n}}}{q_{2j}^0 + q_{Mj} - q_j} \Delta t \\ \quad - \frac{n \sigma_{2j}}{q_{2j}^0 + q_{Mj} - q_j} \Delta q_j \end{cases} \quad (3.11)$$

考虑到初始条件 $\sigma_{1j} = \sigma_{2j} = 1$ ， $q_j = 0$ ， $\dot{q}_j = 0$ ，利用公

可求得 $t = (i + 1)\Delta t$ 时的 q_j 、 Δq_j 、 \dot{q}_j 、 σ_{1j} 、 σ_{2j} 的值。

此后再确定当气动马达制动时，即在 t_r 时刻对应的 q_{jr} 、 \dot{q}_{jr} 、 σ_{1jr} 、 σ_{2jr} 值。制动时，空气不再送入气缸的工作腔。在这种情况下压力为：

$$\sigma_{1j} = \sigma_{1jr} \left(\frac{q_{jr} + q_{1j}^0}{q_j + q_{1j}^0} \right)^n \quad (3.12)$$

在 t_r 瞬时，制动腔中有过临界状态的气流，此时

$$\Delta\sigma_{2j} = \frac{n\sigma_{2j}}{q_{2j}^0 + q_m - q} \Delta q_j + \frac{nG_{2j} - \sigma_{2j} \frac{n+1}{n}}{\gamma_0 \Omega_j (q_{2j}^0 + q_m - q_j)} \Delta t \quad (3.13)$$

式中 $G_{2j} = \mu_{2j} f_{2j} v_M \sqrt{qkRT_M}$ —— 制动腔中重量流量， T_M 、 R —— 为通道内温度和气体常数。当制动腔内空气流是欠临界状态时，相对压力的变化是：

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{2j} = & \frac{b_{2j} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_M} \right)^{\frac{k-1}{k}} \sigma_{2j}^{1 + \frac{k-n}{kn}} \right]}{q_{2j}^0 + q_m - q_j} \\ & \times \Delta t + \frac{n\sigma_{2j}}{q_{2j}^0 + q_m - q_j} \Delta q_j \\ b_j = & \frac{n\mu_j f_j \sqrt{\frac{2qk}{k-1} \gamma_M P_M}}{\gamma_0 \Omega}, \quad j = 1 \sim 3 \end{aligned}$$

式中 q_{1j}^0 、 q_{2j}^0 —— 广义坐标值，由气动马达工作腔和排气腔的固定不变的初始容积所确定； μ_{1j} 、 μ_{2j} —— 工作腔和排气腔的流量系数； Ω_{1j} 、 Ω_{2j} —— 相应的管道横断面积； v_M 、 v_0 —— 压力等于 P_M 和 P_0 时空气单位体积重量； q_{Mj} —— 广义坐标最大值。

用给定的步长对所得到的公式进行积分，就可计算当用反压方法制动时机器人的全部运动及停车过程。

3. 机器人的液压传动装置

如前所述，液压传动装置主要用在负载力等于或大于20公斤力的工业机器人中。此外，在负载力虽小，但有点位或轮廓控制装置的机器人中，液压传动装置也得到了应用。现在先研究工业机器人液压传动装置的基本元件。

表3.5给出的是苏联产的ΠЭГС型伺服传动装置的技术特性。这种传动装置由液压缸、电液放大器、位置传感器构成。它用于工业机器人的执行机构以实现往复运动，也用于其它按程序方式工作的机器。程序从给定装置以电信号的形式输给传动装置。表3.6给出了СП型旋转式电液伺服传动装置的技术特性。这种传动装置用来使工业机器人的（或用程序控制的类似机器的）机构实现有限角度的旋转运动^[24]。

表3.5 ΠЭГС 型伺服传动装置技术特性

参数名称	品种规格		
	ΠЭГС-9	ΠЭГС-12	ΠЭГС-13
额定压力 (公斤力/平方厘米)	160	160	160
液压缸直径 (毫米)	45	70	70
活塞杆直径 (毫米)	22	50	50
活塞行程 (毫米)	800	250	500
速度范围 (米/秒)	0.15~0.45	0.12~0.42	0.12~0.42
静负载 (公斤力)	500	600	600
惯性负载 (公斤力/米)	60	60	60

在ΠЭГС型和СП型传动装置中可采用УЭГ-8型放大器作为电液放大器。参考文献[30]给出了这种放大器的技术特性。现在又研制出新的更完善的УЭ-85型放大器。这种放大器主要参数如下：

液体压力	200公斤力/平方厘米
液体流量	10升/分 (或更高)
死区	不大于 1 %
漏油量 (在平衡位置上)	3 升/分
滞环特性	3 %
对称性	5 %
控制信号功率	0.4瓦
相移90°时的频率	150赫兹
尺寸	80 × 70 × 100毫米
重量	1.5公斤

表3.6 СП旋转式伺服传动装置技术特性

参数名称		品 种 规 格				
		СП ₁	СП ₂	СП ₃	СП ₄	СП ₅
额定压力 (公斤力/平方厘米)		63	125	125	160	160
输出轴扭矩 (公斤力/米)		50	100	185	400	630
输出轴转角 (度)		270	270	270	270	270
最大速度时 液体流量 (升/分)		15	15	17	35	40
负载的最大 转动惯量 (公斤力·米/秒 ²)		1.6	3.5	14	43	105
重量 (公斤)		56	56	63	112	133
外形尺寸 (毫米)	宽	215	215	215	270	270
	高	312	312	312	397	397
	长	418	419	419	499	499

现在我们来说明ΠЭГС型和СП型传动装置的各个元件。在设计机器人的传动装置时，这些元件都可单独地使用。

ЛПГ型液压缸能使机器人的各机构产生往复运动。这种液压缸的活塞杆运动速度可达1.5米/秒。液压缸使用的矿物

油的粘度为12~250厘沱。油温变化范围为10~50℃。

ЛПГ型液压缸从结构上看就是一个精密的圆筒。在这种液压筒中，因同时使用橡胶密封和氟化塑料垫圈，从而保证活塞和连杆的摩擦力很小。由于装有新式结构的制动装置，液压缸活塞行程末端的制动状态是可调的。其技术特性列于表3.7。

在制造具有液压传动装置和点位控制的工业机器人时，可以不用电液放大器，而采用正比于控制电信号的ДД型液压节流阀。使用它可以远距离调节工业机器人执行机构的移动速度，或者保持在某一个速度上。液压节流阀由二个对接的壳体构成。在下面的壳体内装有压力调节器。（在ДДО型液压节流阀中还装有单向阀）。在上面的壳体内装有控制节流阀位置的电气-机械变换器。液压节流阀可装在空间任何位置上。表3.8给出了液压节流阀的技术特性。

推荐采用由全苏液压传动科学研究所研制的 ДПГ型液压马达作为工业机器人的旋转式液压马达。当环境温度为0~50℃时，这种马达工作介质，即矿物油的粘度为12~250厘沱。ДПГ型马达是由带有叶片的传动轴和环形外壳所构成。用固定不动的隔板将外壳分成二个部分。外壳的两端有端盖。在端盖上开孔，以便工作液体流入流出。端盖上还装有制动装置，在转轴转到极限角度时就进行制动。ДПГ型液压马达突出的特点是：漏油少、效率高、行程终点制动平稳、无冲击、安装简单容易。使用这种液压马达能最大限度地简化工业机器人的运动链和结构。ДПГ型液压马达的技术特性如表3.9所列。

КТМ型和КТГ型制动阀是用来在一个方向上平稳地关闭（或打开）液体通路，以便制动（或起动）辅助机构，而

表3.7 LPT型液压缸技术数据

参数名称	规格															
	LPT 32×22 500	LPT 36×25 250	LPT 36×25 500	LPT 48×28 630	LPT 40×28 800	LPT 40×32 250	LPT 40×32 500	LPT 45×32 500	LPT 50×40 500	LPT 50×40 500	LPT 50×40 1000	LPT 56×40 630	LPT 56×40 800	LPT 63×50 250	LPT 63×50 500	LPT 70×50 1000
压力 (公斤力/平方厘米)	额定值	32	36	40	40	40	40	45	50	50	50	56	56	63	63	70
	最大值	22	25	28	28	32	32	32	40	40	40	40	40	50	50	50
液缸直径 (毫米)	液缸直径 (毫米)	32	36	40	40	40	40	45	50	50	50	56	56	63	63	70
	活塞杆直径 (毫米)	22	25	28	28	32	32	32	40	40	40	40	40	50	50	50
	活塞行程 (毫米)	500	250	500	800	250	500	500	500	500	1000	630	800	250	500	100
活塞作用力 (公斤)	推力	1260	1630	2000	2000	2000	2000	2530	3130	3130	3290	3290	4950	4950	6150	
	拉力	655	850	1008	1008	1008	1008	1270	1140	1140	1920	1920	1830	1830	3000	
重量 (公斤)	重量 (公斤)	5.4	4.5	6.5	8.1	9.6	5.6	7.9	7.4	6.75	9.5	10.5	12.5	8.4	11.8	19.6
	外形尺寸	60	60	60	60	60	60	60	68	80	80	80	80	83	83	95
	(毫米)	90	90	90	90	90	90	90	98	112	112	112	112	115	115	127
		546	796	969	1139	589	839	849	656	836	1406	1048	1242	690	946	1459

表3.8 电气控制的液压节流阀技术特性

参 数 名 称	品 种 规 格		
	ДД-6 ДДО-6	ДД-10 ДДО-10	
公称通径 (毫米)	6.3	10	
输入压力 (公斤力/平方厘米)	6~160	8~160	
输出压力 (公斤力/平方厘米)	0~160	0~160	
漏油压力 不大于 (公斤力/平方厘米)	0.5	0.5	
通过单向阀回流的压降 不大于 (公斤力/平方厘米), (只适用ДДО型液压节流阀)	2	2	
节流阀流量调节范围 (升/分)	0.4~20	0.8~40	
控制信号最大功率 (瓦)	10	10	
线圈电阻 (欧姆)	20×2	20×2	
非线性度 不大于 (%) (相对于节流阀流量随电磁铁线圈中电流线性变化关系的 偏离值)	5	6	
±3分贝时频率 不低于 (赫兹)	20	16	
滞环特性 不大于 (%)	5	6	
重量 (公斤)	7.2	7.2	
外形尺寸 (毫米)	长	156	156
	宽	112	112
	高	175	175

它又使液体在反方向上自由地流过单向阀。制动阀能够在滑阀关闭之后使执行机构速度保持在“爬行”速度值上。制动阀能正常工作在矿物油的温度不超过 +50°C，粘度在 20~250 厘沱的情况下。表 3.10 给出了KT型制动阀的技术特性。KTH型制动阀是机械控制的，而KTГ型制动阀是液压控制

表3.9 旋转式液压马达技术特性

参数名称	品 种 规 格						
	ДПГ 16	ДПГ 63	ДПГ 125	ДПГ 200	ДПГ 400	ДПГ 630	
额定压力 (公斤力/平方厘米)			160				
最大压力 (公斤力/平方厘米)			200				
系统的额定 转 矩 (公斤力·厘米)	16	63	125	200	400	630	
转角(度)	50	160	400	630	1230	1800	
重量(公斤)	35	12	30	35	90	100	
外形尺寸 (毫米)	高	106	146	193	193	265	265
	长	160	230	280	315	360	405
	宽	106	146	200	200	270	270

表3.10 KT型液压制动阀的技术特性

参 数 名 称	品 种 规 格					
额定压力(公斤力/平方厘米)	200					
公称通径(毫米)	6	10	20	10	20	
额定流量(升/分)	20	40	100	40	100	
重量(公斤)	1.2	3.4	7.6	3.4	7.6	
外形尺寸 (毫米)	长	113	159	224	147	190
	宽	77	87	105	87	105
	高	60	95	125	95	125

的。图 3.10 是供工业机器人使用的 CP 型液压泵站原理图。液压能源要有水冷设备和变量泵。油液从液压泵 1 通过过滤器 2 进入机器人液压系统。油液通过热交换器 4 之后排出。阀门 3 保证液压系统中所需的压力。液压泵站的设计指标是：

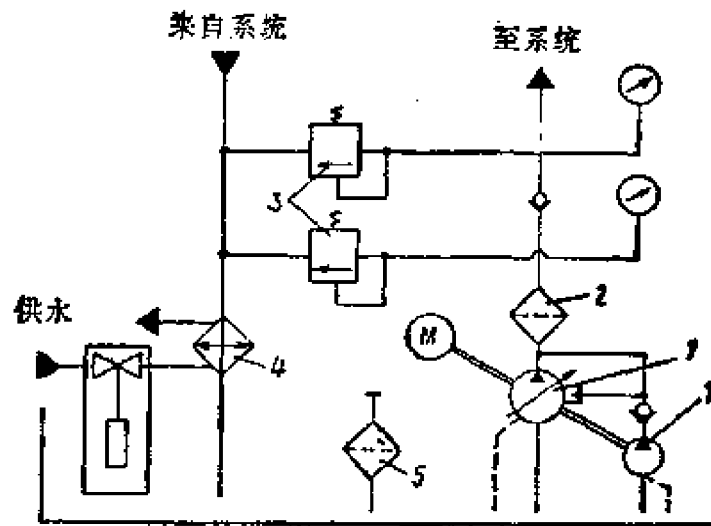


图 3.10

压力 63、125、160 公斤力/平方厘米；带注油过滤器 5 的油箱容量为 40、63、100、160 立方分米，液体流量 25、35、50、100 升/分；液压能源的功率分别为 3、4、7.5、11、15、22、30 千瓦。

具有循环控制的机器人液压系统的设计 在具有循环控制的机器人液压系统中，采用继电式液压传动装置。在这种液压传动装置中，配流滑阀的作用是向给定方向配流。用节流阀调节执行马达的运动速度。节流阀既可处于手控状态，也可以处于由控置装置自动控制的自动状态。在文献〔17〕、〔30〕中可找到有关节流阀结构和安装方法的说明。在这种机器人中，液压马达用限位器定位。马达在停车前利用液压阻尼装置转换到制动状态。液压阻尼装置可以是液压马达的一个组成部分，也可以是一个独立的部件。

日本的“海鲍特 (Хайбот)”机器人可作为具有循环控制的液压传动机器人的例子。这种机器人包括手爪在内共有

七个运动自由度。当机器人的每一个运动自由度的输出参数已知时，根据机器人最大运动速度 $v_{\max}(\omega_{\max})$ 和最大负载 $F_{\max}(M_{\max})$ 就可确定出液压马达的初始结构参数值。当给定液压马达的有效面积时，根据这些初始值就能确定出液压系统需要的工作压力。对于液压缸则有 $P = F_{\max}/\Omega$ 。

在选择液压缸的长度 l 时，必须注意它的长度 l 与直径 D 之比值不应超过 $18 \sim 20$ 。这个比值增大会使液压缸产生抖动和自振荡^[30]。当要求实现往复运动，并使 $l/D \geq 20$ 时，建议将液压马达和齿条或螺杆传动装置结合起来使用。

对于液压马达

$$P = \frac{M_{\max} \cdot 2\pi}{q}$$

式中 q —— 液压马达单位排油量。当马达转角有限时

$$P = \frac{8M_{\max}}{zb(D^2 - d^2)}$$

式中 z —— 叶片数， b —— 叶片宽， d 、 D —— 为叶片轴直径和液压马达内径。

给出执行马达最大速度，就能求出所要求的液体流量：

对于液压缸

$$Q = v_{\max} \cdot \Omega$$

对于液压马达

$$Q = \frac{M_{\max} \omega_{\max}}{P}$$

对于有限转角的液压马达

$$Q = \frac{\omega_{\max} \cdot b(D^2 - d^2)}{8}$$

根据求得的液体压力和流量数值就可选择配流器、监控设备、管道等。管道的内径大小取决于液体流动的允许速

度。对于大于 200 公斤力/平方厘米的高压管道，允许速度为 5~6 米/秒；对于压力小于 100 公斤力/平方厘米的管道，允许速度为 2.5~3 米/秒。在设计液压系统时必须考虑装上排气装置；对不固定的或很长的管道应防止产生振动并要便于安装，同时还要保证管道和密封元件能够进行更换等等。

在研制各种自由度同时运动的机器人液压系统时，所需的流量是同时运动的各自由度流量的总合。

液压泵站可以选用现成的，也可以自行设计。液压泵站所需功率为 $N_n = P_n Q_n$ 。

考虑到液压系统中有惯性力，并可能漏油， P_n 和 Q_n 的值比要求的液体压力 P 和流量 Q 应当高一些，大约要提高 25%。当设计液压泵站时，正确地选择液压泵很重要。对于要求功率 $N < 3 \sim 7$ 千瓦的机器人，可以采用单作用或双作用的叶片（滑片）泵。其流量系列为 5~200 升/分。

在一般情况下，根据调节速度的方法选择液压泵的类型。带有冷却装置的液压泵站的有关设计问题可参阅参考文献 [43]。

为了准确选择具有循环控制的机器人液压系统传动部分的参数，必须研究过渡过程。根据过渡过程计算结果，确定执行马达移动的时间。考虑到机器人对快速性的要求，知道这一时间是非常重要的。根据过渡过程计算结果还可确定，当配流阀换向时，液压马达腔内液流的液压冲击大小。配流阀换向瞬时的压力作用特性（不考虑配流阀吸合时间的影响）相当于初始条件为零的单位阶跃作用函数，即

$$q(t) = 1(t) = \begin{cases} 1 & \text{当 } t > 0 \\ 0 & \text{当 } t \leq 0 \end{cases}$$

图 3.11 a 和 b 给出了机器人的一个运动自由度的计算原

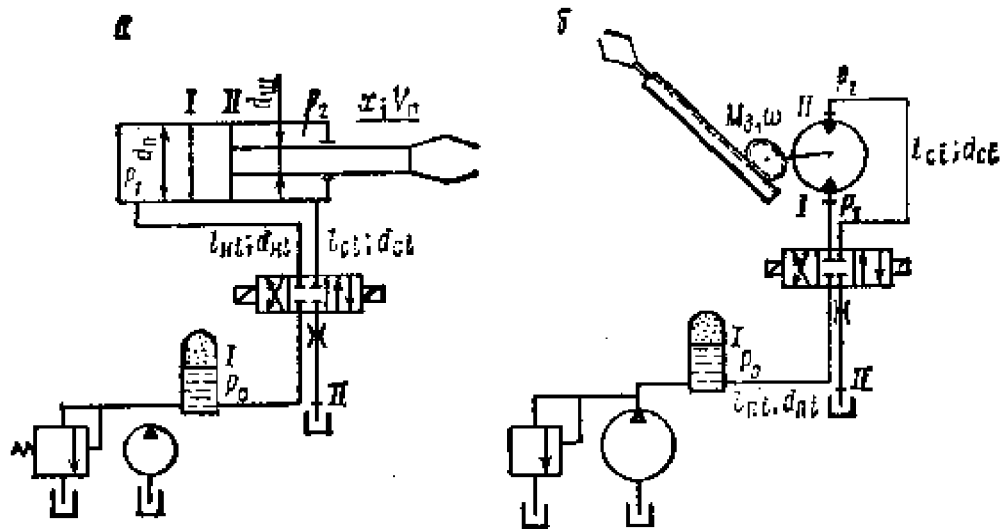


图 3.11

理图。我们假设：机器人液压系统中有液压蓄能器，可认为压力为常值；液体不可压缩，管道壁和液压马达是刚性的，忽略漏油。在这些假设条件下建立 I-I、II-II 横截面的不稳定运动方程，液压马达的动力学方程，液流连续性方程。下述方程用于图 3.11 a 计算原理图：

$$P_0 = P_1 + \frac{v_n^2}{2} \rho + \lambda_{ni} \frac{l_{ni}}{d_{ni}} \cdot \frac{v_{ni}^2}{2} \rho + \xi_{ni} \frac{v_{ni}^2}{2} \rho + k_{ni} \frac{v_{ni}}{2} \rho + l_{ni} \rho \frac{dv_{ni}}{dt} + x \rho \frac{dv_n}{dt} \quad (3.14)$$

$$P_2 + \frac{v_n^2}{2} \rho = \lambda_{ci} \frac{l_{ci}}{d_{ci}} \cdot \frac{v_{ci}^2}{2} \rho + \xi_{ci} \frac{v_{ci}^2}{2} \rho + k_{ci} \frac{v_{ci}}{2} \rho + l_{ci} \rho \frac{dv_{ci}}{dt} + (S - x) \frac{dv_n}{dt} \quad (3.15)$$

$$m \frac{dv_n}{dt} = P_1 \frac{\pi d_n^3}{4} - P_2 \frac{\pi}{4} (d_n^2 - d_m^2) - F \quad (3.16)$$

当向液压缸的活塞腔内供油时

$$\left. \begin{aligned}
 Q_{\text{H}}^{\text{n}} &= v_{\text{n}} \frac{\pi}{4} d_{\text{n}}^2 = v_{\text{n}i} \frac{\pi d_{\text{n}i}^2}{4} \\
 \text{活塞杆腔内} & \\
 Q_{\text{H}}^{\text{m}} &= v_{\text{n}} \frac{\pi}{4} (d_{\text{n}}^2 - d_{\text{m}}^2) = v_{\text{c}i} \frac{\pi d_{\text{c}i}^2}{4}
 \end{aligned} \right\} (3.17)$$

在这几个方程中采用了如下记号： P_0 、 P_1 、 P_2 ——为液压蓄能器、液压缸活塞腔内和活塞有杆腔内的压力； $v_{\text{n}i}$ 、 $v_{\text{c}i}$ ——为压力管道和排油管道各段中油液流动速度； $l_{\text{n}i}$ 、 $d_{\text{n}i}$ 、 $l_{\text{c}i}$ 、 $d_{\text{c}i}$ ——压力管道和排油管道的长度和直径； S 、 x 、 v_{n} ——为活塞的总行程、活塞瞬时位置及活塞的速度（ $v_{\text{n}} = \dot{x}$ ）； $\lambda_{\text{n}i}$ 、 $\lambda_{\text{c}i}$ ——为压力管道和排油管道中紊流段的液流摩擦系数； $k_{\text{n}i}$ 、 $k_{\text{c}i}$ ——压力管道和排油管道中层流段的液流阻力系数（ $k = 75\nu l/d^2$ ）； $\xi_{\text{n}i}$ 、 $\xi_{\text{c}i}$ ——为压力管道和排油管道的局部阻力系数； F ——恒定阻力； ρ 、 ν ——为液体的密度和运动粘度系数。

应注意， S 是指马达从开始运动到开始制动之间的行程。

将方程(3.14)~(3.17)联立求解⁽¹⁷⁾，就可得到如下关系式：

$$x = 2Ta \ln \frac{e^{\frac{t}{T}} + \frac{a-b}{a+b}}{1 + \frac{a-b}{a+b}} - (a+b)t \quad (3.18)$$

式中 T ——时间常数，表示液压传动的所有参数对传动惯性的影响，且

$$T = \frac{\frac{4m}{\pi\rho} + \left[l_{\text{n}i} \frac{d_{\text{n}}^4}{d_{\text{n}i}^2} + l_{\text{c}i} \frac{(d_{\text{n}}^2 - d_{\text{m}}^2)^2}{d_{\text{c}i}^2} + d_{\text{n}}^2 S \right]}{a \left[\xi_{\text{n}i} \frac{d_{\text{n}}^4}{d_{\text{n}i}^2} + \xi_{\text{c}i} \frac{(d_{\text{n}}^2 - d_{\text{m}}^2)^2}{d_{\text{c}i}^2} + d_{\text{m}}^2 \right]}$$

$$b = \frac{75 \nu \left[\frac{l_{ni} d_n^4}{d_{ni}^4} + \frac{l_{ci} (d_n^2 - d_{ni}^2)^2}{d_{ci}^4} \right]}{2 \left[\xi_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^2} + \xi_{ci} \frac{(d_n^2 - d_{ni}^2)^2}{d_{ci}^2} + d_{ni}^2 \right]}$$

$$a = \sqrt{b^2 + \frac{8 \left(P_0 \frac{\pi d_n^2}{4} - F \right)}{\pi \rho \left[\xi_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^2} + \xi_{ci} \frac{(d_n^2 - d_{ni}^2)^2}{d_{ci}^2} + d_{ni}^2 \right]}}$$

从方程 (3.18), 例如用图解方程法, 就可求出液压缸活塞通过整个行程 S 所用的时间 t_k 。

联立解方程 (3.14)~(3.17), 同时还可求得在活塞移动时间内, 液压缸内压力变化值。在活塞腔内有

$$P_1 = P_0 - \left(\xi_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^2} + 1 \right) \frac{v_{no}^2 \rho}{2} \left(\frac{e^{\frac{t}{T}} - 1}{e^{\frac{t}{T}} + \frac{a-b}{a+b}} \right)^2$$

$$- \frac{75 \rho \nu l_{ni}}{2 d_{ni}^4} d_n^2 v_{no}^2 \left(\frac{e^{\frac{t}{T}} - 1}{e^{\frac{t}{T}} + \frac{a-b}{a+b}} \right)$$

$$- \frac{\left(l_{ni} \frac{d_n^2}{d_{ni}^2} + x \right) \left(P_0 \frac{\pi d_n^2}{m^4} \rho - F \frac{\rho}{m} \right)}{1 + \rho \frac{\pi}{4} \left[l_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^2} + l_{ci} \frac{(d_n^2 - d_{ni}^2)^2}{d_{ci}^2} + d_{ni}^2 x \right]}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{\pi \rho \left[l_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^2} + l_{ci} \frac{(d_n^2 - d_{ni}^2)^2}{d_{ci}^2} + d_{ni}^2 x \right] v_{no}^2}{8 \left(P_0 \frac{\pi d_n^2}{4} - F \right)} \right\}$$

$$\begin{aligned}
& - \left(\frac{e^{\frac{t}{T}} - 1}{e^{-\frac{t}{T}} + \frac{a-b}{a+b}} \right)^2 \\
& \frac{75mv \left[l_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^4} + l_{ci} \frac{(d_n^2 - d_m^2)^2}{d_{ci}^4} \right] v_{no}}{2 \left(P_0 \frac{\pi d_n^2}{4} - F \right)} \\
& \times \left(\frac{e^{\frac{t}{T}} - 1}{e^{-\frac{t}{T}} + \frac{a-b}{a+b}} \right) \quad (3.19)
\end{aligned}$$

在有杆腔内有

$$\begin{aligned}
P_2 &= \left[\xi_{ci} \frac{(d_n^2 - d_m^2)^2}{d_{ci}^2} - 1 \right] \frac{v_{no}^2}{2} \rho \left(\frac{e^{\frac{t}{T}} - 1}{e^{-\frac{t}{T}} + \frac{a-b}{a+b}} \right)^2 \\
&+ 75\rho v \frac{l_{ci}}{2d_{ci}^4} (d_n^2 - d_m^2) v_{no} \left(\frac{e^{\frac{t}{T}} - 1}{e^{-\frac{t}{T}} + \frac{a-b}{a+b}} \right) \\
&+ \left[\frac{l_{ci}(d_n^2 - d_m^2)}{d_{ci}^2} - (S - x) \right] \\
&\times \frac{\frac{\rho}{m} \left(P_0 \frac{\pi d_n^2}{4} - F \right)}{1 + \rho \frac{\pi}{4m} \left[l_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^4} + l_{ci} \frac{(d_n^2 - d_m^2)^2}{d_{ci}^4} + d_n^2 x \right]}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left\{ 1 - \frac{\pi}{8} \rho \frac{\left[l_{xi} \frac{d_n^4}{d_{ni}^4} + l_{ci} \frac{(d_n^2 - d_m^2)^2}{d_{ci}^4} + d_{nx}^2 \right]}{P_0 \frac{\pi d_n^2}{4} - F} v_{no}^2 \right. \\
& \times \left(\frac{e^{\frac{t}{T}} - 1}{e^{\frac{t}{T}} + \frac{a-b}{a+b}} \right)^2 - \frac{75 \nu m}{2} \\
& \times \frac{\left[\frac{l_{xi} d_n^4}{d_{ni}^4} + \frac{l_{ci} (d_n^2 - d_m^2)^2}{d_{ci}^4} \right] v_{no}}{P_0 \frac{\pi d_n^2}{4} - F} \\
& \left. \times \left(\frac{e^{\frac{t}{T}} - 1}{e^{\frac{t}{T}} - \frac{a-b}{a+b}} \right) \right\} \quad (3.20)
\end{aligned}$$

考虑到条件 $dV_n/dt = 0$, $v_{no} = a - b$, 解联立方程 (3.14)~(3.17), 就可确定稳定速度值 v_{no} 。

必须指出, 推导公式 (3.18)~(3.20) 所用的阻力系数 λ 和 ξ 是根据液体稳定运动的公式求得的。

在图 3.116 计算原理图中, 以液压马达或有限转角的马达作为液动机时, 描述传动动力特性的方程组与方程 (3.14)~(3.17) 完全相似。它们之间的区别仅在于, 方程 (3.14)~(3.17) 中的平移速度 v_n 要用角速度 ω 代替。在这种情况下方程 (3.16) 变成:

$$M_n = M + J \frac{d\omega}{dt}$$

式中 J —— 液压马达转动惯量, 公斤力·厘米·秒²; M_n ——

液压马达的力矩，公斤力·厘米； M ——阻力矩，公斤力·厘米； ω ——液压马达旋转角速度，1/秒； q_n ——液压马达单位排油量，立方厘米； P_n ——液压马达压力降，公斤力/平方厘米。

由液流连续性方程 (3.17) 有 $Q_n = Q_n = Q_i$ ，
或者

$$\frac{q_n \omega}{2\pi} = v_{ni} \frac{\pi d_{ni}^3}{4} = v_{ci} \frac{\pi d_{ci}^3}{4}$$

由此求得

$$v_{ni} = \frac{2q_n}{\pi^2 d_{ni}^3} \omega$$

$$v_{ci} = \frac{2q_n}{\pi^2 d_{ci}^3} \omega$$

和前面所研究的液压缸相似，联立解动力方程，作出液压马达的过渡过程 $\varphi(t)$ ，求出机械手输出连杆完全转过 φ_k 角度所需时间 t_k 及压力变化特性 $P_{ni}(t)$ ， $P_{ci}(t)$ 。

在机器人液压传动动力特性分析所得结果的基础上，审查和校正用静态方法选择出来的或计算出来的液压传动的结构参数。

与其它液压传动机构相比，机器人液压传动有自己的特点。因此，对机器人的液压传动有特殊的要求。在设计工业机器人的液压系统时，必须考虑这些特殊要求。首先，机器人执行马达运动速度很高，因而需要预先计算阻尼元件，并且应考虑到利用液压装置定位时，速度对其位置精度的影响。液压马达的这种定位能够充分地利用液压传动的有利的特性，特别是液体不可压缩性。

设计具有复杂形状的制动缝隙以保证机械手输出连杆按

要求的规律制动的液压阻尼装置可参照文献〔29〕进行设计。在液压马达制动瞬间，可用具有不变结构参数的制动缝隙（节流阀），使排油管道的阻力系数增加，在这种情况下可利用方程（3.14）~（3.17）进行制动过程的动态分析。无中间定位的液压缸行程终端制动的计算用原理图见图 3.12。联立解在 I-I 和 II-II 截面处液体不稳定运动方程、活塞运动方程、液流连续方程，得到：

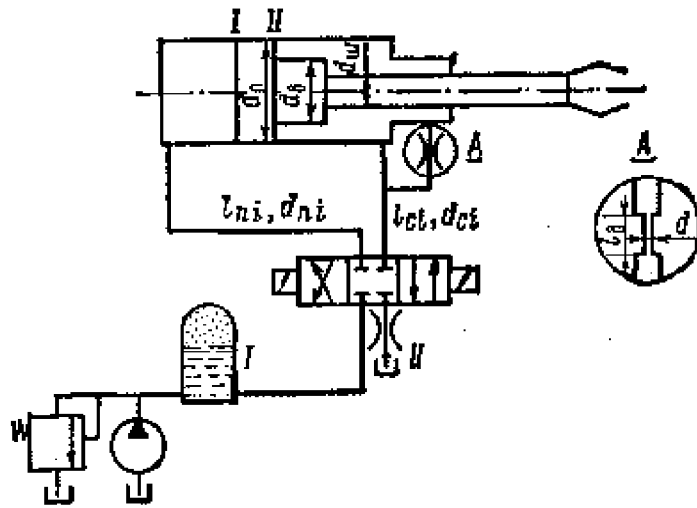


图 3.12

$$\begin{aligned}
 m \left\{ 4 + \rho \frac{\pi}{4m} \left[l_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^2} + l_{ci} \frac{d_n^2 - d_m^2}{d_{ci}^2} + d_n^2 S \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{(d_n^2 - d_m^2)^2}{d_n^2} l_x \right] \right\} \frac{dv_n}{dt} = \left(P_0 \frac{\pi d_n^2}{4} - F \right) \\
 - \left\{ \frac{\pi}{4} \rho \left[\xi_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^2} + \xi_{ci} \frac{(d_n^2 - d_m^2)^2}{d_{ci}^2} + d_m^2 \right] \right. \\
 \left. + \frac{\pi}{4} \frac{(d_n^2 - d_m^2)^3}{d_n^4} \left(\lambda \frac{l_x}{d_x} + \xi_x \right) \right\} \frac{v_n^2}{2} \rho \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

其中 l_x 、 d_x ——分别为阻尼通道的长度和直径， d_x ——凸缘横截面直径； ξ_x ——阻尼器局部阻力系数。

若在阻尼时假设活塞运动已进入稳态, 那么方程(3.21)中 $dv_n/dt=0$, 而 $v_n=v_{n0}$ 。联立解(3.20)及(3.21)方程可得

$$m \left\{ 4 + \rho \frac{\pi}{4m} \left[l_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^2} + l_{ci} \frac{(d_n^2 - d_{ni}^2)^2}{d_{ci}^2} + d_n^2 S + \frac{(d_n^2 - d_n^2)^2}{d_n^2} l_x \right] \right\} \frac{dv_n}{dt} = \left(P_0 \frac{\pi d_n^2}{4} - F \right) \left(1 - \frac{v_n^2}{v_{n0}^2} \right) \quad (3.22)$$

考虑到初始条件, 即在阻尼开始瞬时 $t_k=0$, 有 $v_n=v_{kn}$, 对(3.22)式进行积分就可求得:

$$v_n = v_{n0} \frac{\frac{v_{kn} + v_{n0}}{v_{kn} - v_{n0}} e^{\frac{t}{T}} + 1}{\frac{v_{kn} + v_{n0}}{v_{kn} - v_{n0}} e^{\frac{t}{T}} - 1} \quad (3.23)$$

其中

$$T = \frac{2 + 8\rho \frac{\pi}{m} \left[l_{ni} \frac{d_n^4}{d_{ni}^2} + l_{ci} \frac{(d_n^2 - d_{ni}^2)^2}{d_{ci}^2} + d_n^2 S + \frac{(d_n^2 - d_n^2)^2}{d_n^2} l_x \right]}{\frac{1}{m} \left(\frac{P_0 \pi d_n^2}{4} - F \right)}$$

将(3.23)方程代入(3.22)方程, 就可确定阻尼时的加速度值。从(3.23)方程能求得阻尼过程所用的全部时间 t_{kn} 。在 $t=t_{kn}$ 时, $v_n=0$ 。根据 $v_n(t)$ 关系式, 例如用图解法, 就能确定制动行程。因为 v_n 和 dv_n/dt 是已知的, 所以根据I-I和I-I横截面的不稳定运动方程就可确定出马达腔内压力变化。

假若阻尼孔在结构上制成缝隙形式, 用相似的方法也能

研究这种情况下阻尼过程的动力特性。

当液压马达用关闭通道的方法定位时，在完全停车之前会超越一段距离，其大小取决于在开始停车时马达的运动速度以及关闭通道元件的吸合时间。根据超越距离大小确定定位点应该提前的量。超越距离值最终也表征了工业机器人的定位精度。除超越距离外，马达停车时的最大加速度具有重要意义。根据超越距离（也就是定位精度）和最大加速度就能预先确定所设计的工业机器人的应用范围。

现在来研究关闭排油通道时马达的定位问题。在这种情况下，计算用的原理图与图3.11 a 相似。开始停车瞬时，认为马达的运动已是稳态的。在忽略管道长度上压力损失（正比于液流平均速度）的情况下，溢流通道用滑阀关断时，写出该通道不稳定运动的方程和液压马达动力特性方程，

$$P_2 + \frac{v_n^2}{2} \rho = \xi_{ci} \frac{v_{ci}^2}{2} \rho + l_{ci} \rho \frac{dv_{ci}}{dt} + (S - x) \rho \frac{dv_n}{dt}$$

或者

$$P_2 = \xi'_{ci} \frac{(d_n^2 - d_m^2)^2}{2d_{ci}^2} \rho v_n^2 + \rho \left[l_{ci} \frac{d_n^2 - d_m^2}{d_{ci}^2} + (S - x) \right] \frac{dv_n}{dt} \quad (3.24)$$

$$m \frac{dv_n}{dt} = P_1 \frac{\pi d_n^2}{4} - P_2 \frac{\pi}{4} (d_n^2 - d_m^2) - F \quad (3.25)$$

其中， $\xi'_{ci} = \xi_{ci} - 1$ ； S ——超越距离； x ——液压马达距开始超越点的瞬时位置坐标。在这种情况下 $S - x \approx 0$ ；

$$\xi'_{ci} = \xi_i + \xi_s$$

排油系统阻力系数

$$\xi'_{c_i} = \xi_r + \xi_s \quad (3.26)$$

其中, ξ_r ——排油系统局部阻力总的常值系数, ξ_s ——起断流作用的滑阀可变的局部阻力系数。

现在求有锐边的滑阀系数 ξ_s 的变化。写出通过滑阀的液体流量方程:

$$Q_s = \frac{1}{\sqrt{\xi_s}} \pi d_s (L_s - v_s t_s) \sqrt{\frac{2}{\rho} P_2} \quad (3.27)$$

其中, L_s ——滑阀有效行程 (滑阀总行程和遮盖量之差);
 t_s ——滑阀移过有效行程所需时间, v_s ——滑阀移动速度 (在有效行程范围内是等速运动, 且 $v_s = L_s/t_s$)。

考虑到

$$Q_s = v_n \pi (d_n^2 - d_m^2) / 4$$

由 (3.27) 方程得

$$\xi_s = \frac{32 d_s^2 (L_s - v_s t_s)}{(d_n^2 - d_m^2) v_n^2 \rho} P_2 \quad (3.27)'$$

将方程 (3.24) 和 (3.25) 联合起来分析, 得:

$$\left[4m + \frac{\pi}{4} \frac{l_{ci}}{d_{ci}^2} (d_n^2 - d_m^2)^2 \rho \right] \frac{dv_n}{dt} = \left(P_1 \frac{\pi d_n^2}{4} - F \right) - \xi_{c_i} \frac{\pi (d_n^2 - d_m^2)}{8} \rho v^2 \quad (3.28)$$

在该方程中取 $(dv_n/dt) = 0$, 求出 ξ_{c_i} 。然后, 将 ξ_{c_i} 值代入方程 (3.28), 得到:

$$\left[4m + \frac{\pi}{4} \frac{l_{ci}}{d_{ci}^2} (d_n^2 - d_m^2)^2 \rho \right] \frac{dv_n}{dt} = \left(P_1 \frac{\pi d_n^2}{4} - F \right) \left(1 - \frac{v_n^2}{v_{nc}^2} \right) \quad (3.29)$$

对方程 (3.29) 进行积分就求得

$$v_n = v_{n0} \frac{e^{\frac{t}{T}} - 1}{e^{\frac{t}{T}} + 1}$$

其中

$$T = \frac{\left[l_c \frac{(d_n^2 - d_m^2)}{d_c^2} \rho + \frac{m^4}{\pi d_c^2} \right]}{8 \left(P_1 \frac{\pi d_n^2}{4} - F \right)} v_{n0}$$

而 v_{n0} 是活塞稳定运动速度, 在 $dv_n/dt = 0$ 条件下, 从 (3.24) 方程求得。

当知道 v_n 后, 从 (3.29) 方程能求得加速度值 dv_n/dt 。将表达式 (3.26)、已求得的 v_n 值和 dv_n/dt 值代入不稳定运动方程 (3.24), 此时, 方程 (3.24) 只有 P_2 和 ξ_2 两个未知数。将经过这样变换所得到的方程和方程 (3.27)' 联立组成具有 P_2 和 ξ_2 二个未知数的方程组。相对于 ξ_2 解这一方程组, 就能得到在滑阀关闭排油通道时的系数 $\xi_2(t)$ 。

$$\xi_2 = \frac{\xi_c \frac{v_0^2}{2} \left(\frac{e^{t/T} - 1}{e^{t/T} + 1} \right)^2 + \xi_c \frac{l_c}{d_c} \pi (d_n^2 - d_m^2) \times \left(P_1 \frac{\pi d_n^2}{4} - F \right) \left[1 - \frac{(e^{t/T} - 1)}{(e^{t/T} + 1)} \right] \times \left[\frac{l_c}{d_c} \frac{\pi}{4} \frac{(d_n^2 - d_m^2)^2}{d_c} \rho + m \right]}{\frac{\pi (d_n^2 - d_m^2)^2 v_0^2}{16 d_3^2 (L_s - v_s t_s)^2} \left(\frac{e^{t/T} - 1}{e^{t/T} + 1} \right)^2 - \frac{v_0^2}{2} \left(\frac{e^{t/T} - 1}{e^{t/T} + 1} \right)} \quad (3.30)$$

其中 t 从 0 变化到 t_s 。

在 (3.30) 方程中, 用溢流阀调定的压力 P_1 认为是固定不变的常数。当定位时必须考虑 P_1 的变化时, 除 (3.24)

和 (3.25) 方程外, 还应研究与 (3.14) 方程相似的、压力通道中液体不稳定运动方程。

当每一个瞬时 t 的 ξ_s 值为已知时, 从不稳定运动方程 (3.24) 能够确定出 P_s 的值, 而根据 (3.27) 方程就可确定流经滑阀的流量 $Q_s(t)$ 。将 $\theta_s(t)$ 关系式, 例如用图解法, 对时间进行积分, 就可求出在定位时间内液压缸有杆腔液体容积的变化值。当容积 W 已知, 且有杆腔的活塞面积为 $(\Omega_n - \Omega_m) = \pi(d_n^2 - d_m^2)/4$ 时, 我们来求在关闭排油通道情况下, 液压马达定位时的超越距离。经过计算得出, 对于 $d_n = 56$ 毫米的液压缸, 当活塞移动速度为 0.5 米/秒, 关闭有锐边的滑阀的有效动作时间 $t_s = 0.01$ 秒, 超越距离为 2 毫米。

具有点位和轮廓控制的机器人液压系统设计 点位和轮廓控制的液压机器人采用电液伺服传动装置。参考文献[14]中, 以 YM-1 机器人的传动装置为例, 给出了这种传动装置的原理图及其说明。目前在具有液压伺服系统的机器人中, 采用多个单一坐标的伺服传动装置。机器人的每一个运动自由度的运动都用一个单一伺服传动装置来实现。这时, 可用节流控制、容积控制和节流-容积控制方法控制液压马达的运动速度^[17]。在容积-节流控制时, 用节制流过液压放大器工作缝隙流量的方法改变进入液压执行马达的液体体积, 并能根据压力值自动调节为传动装置供压的泵的工作容积。具有点位和轮廓控制的机器人 (YM-1 型和“塔里伐”(Трап-сфа) 型机器人) 的液压放大器, 以及具有循环控制的机器人的液压系统, 是由液压执行马达、配流装置和液压泵站组成的。在使用节流控制和容积-节流控制方法控制速度时, 是以节流阀作为配流装置实现控制的, 而在采用容积方法控制速度时, 是用变量泵实现控制的。

具有点位和轮廓控制机器人的液压系统结构参数初步数值的确定同具有循环控制的按继电器作用原理构成的液压系统是一样的。下面分析液压传动装置的静态和动态特性。下列特性属于静特性：负载特性，就是速度随负载变化的关系（例如流经节流阀缝隙的液体流量随输出的压力而变化）；功率和效率随工作条件变化的关系。机器人液压伺服传动装置的动力学特性决定于精度、快速性和稳定性储备。

实验研究表明，机器人液压伺服系统在本质上是非线性系统，但是在实际计算工业机器人液压伺服传动装置的各环节时，作为一次近似，可以用大家熟知的线性化方法^[7, 52]所获得的线性方程来描述它。液压伺服传动装置的综合可用[7, 12, 49]文献所给出的众所周知的方法来描述。

计算上述的传动装置的一般步骤如下：

(1) 用类似于计算继电器式传动装置的方法，对机器人液压伺服传动装置进行初步静态计算，在此基础上，确定传动装置的液体压力和流量，以及马达和管道的初步结构参数。

(2) 选择配流元件，即节流阀（电液放大器）。YЭ-85型节流阀是在苏联所生产的机器人传动装置用的电液放大器中质量最好的。

(3) 确定反馈传感器。机器人伺服传动装置设计经验表明，反馈传感器的误差应不大于伺服系统允许的静态误差的20~30%。

(4) 确定传动装置的传递函数^[52, 7]。

(5) 研究传动装置的稳定性^[52, 7]，并且在必要的情况下选择校正装置。所研究的传动装置中主要校正形式是串联校正^[7]。

(6) 研究过渡过程品质^[52,7]。

4. 工业机器人的复合式传动装置

在机器人中应用复合式传动装置直至目前仍是非常有限的，其原因首先就在于，机器人的使用管理复杂，因而在利用这种传动装置时就降低了机器人的可靠性。机器人中最常见的复合式传动装置是液压和气动相结合的传动装置。在各个传动装置同时工作的情况下，当用气动马达作为执行马达时，液压传动装置可以用来改善动态特性，特别是用来稳定输出环节的速度和提高整个传动装置的出力系数。这样的组合就是气-液式传动装置。假若采用液压马达作为执行马达，那么复合系统中气动传动装置就不能用液压泵站作为能源了。这种复合传动装置就是液-气式传动装置。

图3.13给出了具有液压调节速度和液压定位的机器人的机械手一个运动自由度的气动液压传动装置原理图。

当空气进入气缸1的一个腔内时，在液压配流器位于左

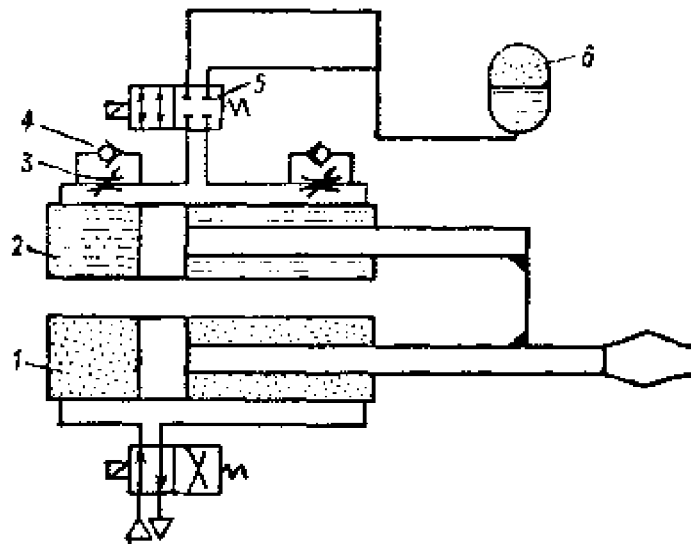


图 3.13

边位置时，活塞杆外移，其速度取决于相应的液压节流阀 3 的调定值，所以就能够保证有稳定的运动速度。单向阀 4 能保证液体自由地进入液压缸 2 的充液腔内。为了补偿液压缸两腔的容积差和漏油，图中设置了油液蓄能器 6。液压配流器能够起到对机械手进行定位的液压闭锁作用。假若采用 $\Delta\Delta$ 型与电控信号成正比的节流阀，那么，当所研究的传动有位置反馈时，就能用于构造具有点位控制系统的工业机器人。在这种情况下，在定位范围内保证稳定的“爬行”速度条件下，能够用配流器 5，根据位置传感器的信号使机械手在定位点上定位。

图3.14给出了液压气动传动装置原理图。“阿乌托赫恩”(Аутохенц)、“ПР-10”和“旋风 3Б”型机器人的垂直方向运动就是使用与这相似的原理，这三种机器人的能源是气动管道系统。在这种情况下，液压传动装置保证垂直移动，并起放大器作用。

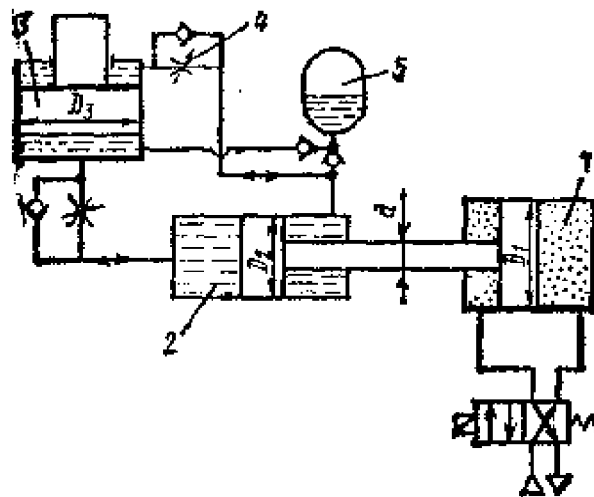


图 3.14

当往气缸 1 的活塞腔内供气时，液压缸 2 的活塞腔内就产生压力。液体进入到执行液压缸 3 中。这时缸 3 的活塞移

动，使机械手有相应的运动。若气缸的活塞反向运动液体进入到缸3的有杆腔内。节流阀4能保证执行液压缸的速度。蓄能器5用来补偿缸2的有杆腔和活塞腔的容积差以及漏油。现在来求液压执行缸3的活塞杆所受的力。当气缸的活塞运动时，由于空气压力产生的作用在气缸的活塞杆上的力为 $F_1 = P_a \pi D_1^2 / 4$ ，其中 P_a ——管道中的空气压力。此力在液压缸的活塞腔内引起液体的压力

$$P_2 = \frac{4F_1}{\pi D_2^2} = P_a \frac{D_1^2}{D_2^2}$$

其中 D_1, D_2 ——分别为气缸1和液压缸2的活塞直径。比值 $D_1^2/D_2^2 = k$ 称为放大系数。通常取 $k = 2 \sim 3$ 。液压执行缸的活塞杆上的力为：

$$F_2 = P_2 \frac{\pi D_3^2}{4} = P_a k \frac{\pi D_3^2}{4}$$

其中 P_2 ——液压执行缸的活塞直径。

液压和气动的复合传动装置的一个根本优点就是能够在小于0.1米/秒和大于1米/秒很宽的范围内稳定地调节速度。

联立解描述液压和气动的方程就能对所研究的复合式传动装置的动力学进行理论分析。根据对具有循环控制的液压和气动的机器人计算所给出的数据，就可列出描述液压和气动的方程。

5. 工业机器人的电动传动装置

在不久前电动传动的机器人还是为数不多的，并且大部分机器人具有气动或液压传动装置。但是，正像前面已指出的那样，近几年来电动传动的工业机器人的数量很快增多。这首先是与机电式机器人有一些根本性的优点有关，如易于安装和调整，使用方便，不需要管道，工作时噪声水平低等

等^[21]。在不久前，由于没有相应的专用电动机，机电式机器人的发展还是受到限制的。可是这一空白逐渐地给填补上了，这是因为研制出了参数有很大改进的电动机，例如过载能力高的电动机，转子转动惯量小的电动机，以及研制出了新型原理的电动机，如圆柱形转子或圆盘式的印刷电动机，光滑转子电动机，直线运动电动机等。特别是，已制造出一些按限位开关定位的机电组件。这就导致采用电动传动。其

轴上转矩变化的静态关系), 以及快速性、过渡过程品质及精度等动态特性。

工业机器人既可采用离散作用的, 又可采用连续作用的电动传动装置。点位控制的以及按循环控制的机器人采用离散作用的电动传动装置, 它的原理图如图3.16所示。在这里为保证在给定点上定位, 速度是按离散式(有级的)进行控制。在最简单情况下, 这可以是继电器方式控制的电动机。此时最常用的是交流电动机, 而用起动器或继电器作为功率放大器。

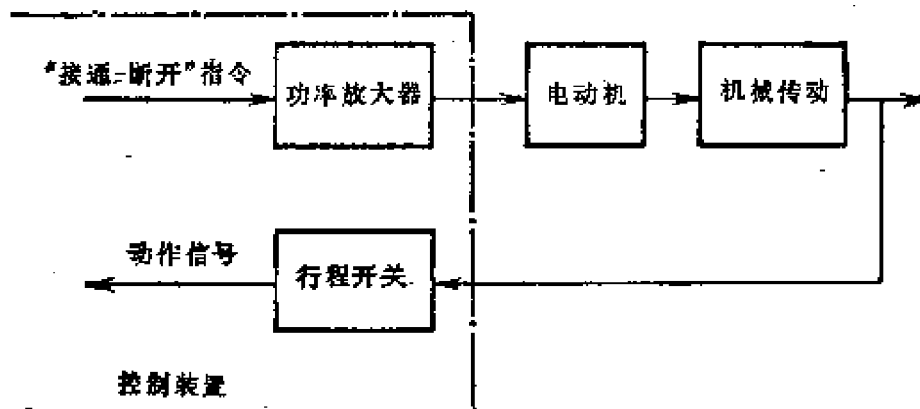


图 3.16

通常用如下方法实现变速:

(1) 当使用直流电动机时, 采用在电枢回路中串入降压电阻方法变速;

(2) 当使用交流电动机时, 采用切断某对磁极的方法或转接到其他电动机上的方法变速。

用弹簧阻尼器或各种形式的制动器制动。

在轮廓控制中, 要求连续地控制传动装置的位移和速度。在这种传动装置中, 和连续作用电机一样, 步进电机也同样得到了应用。步进电机能保证定位精度为一个步距, 而

相应的速度精度为单位时间内的一个步距。由于步距很小，步进电机传动的精度实际上与连续作用传动的精度相当。

在工业机器人中采用电动传动装置有一些根本性的特点。第一个特点是，和所有的工业机器人的传动装置一样，机器人在因机械手形状变化而使负载强烈变化的条件下工作。这就导致对电动传动装置的刚度有一定的要求，所以工业机器人的电传动装置通常要有，例如说，单独的速度稳定回路（参看图3.15）。在此种情况下常常是用直流测速发电机作为速度传感器。

工业机器人传动装置工作状态的第二个特点是，归算到输出轴上的负载转动惯量变化非常大（甚至可达几十倍），而且这种变化还和机械手的各环节的相对位置的变化有关。既然上述的变化是直接发生在由传动装置完成的程序运动的过程中，那么对传动装置的动态特性也应提出相应的要求。

工业机器人的电动传动装置的第三个特点是，在实现移动中必须保证无振荡，即无超调，为的是防止机械手对服务设备和生产装置产生冲击。

有感觉的机器人采用电动传动装置时，除上述要求外，还附加有许多特殊要求。这些要求首先是因为必须实现更复杂的和灵活的控制算法，其中包括改变机械特性，改变启动制动状态，按外界环境的信息来控制作用力，等等。这在特殊情况下更为必要，例如当完成一连串的装配工序时，对易碎的物品进行操纵时，和需要由机械手的协调动作来完成要求的坐标控制工序时。实现上述各种控制，通常通过控制装置来改变机械手各运动自由度的传动来实现。

我们来研究工业机器人电动传动装置的一些典型例子。

在出现工业机器人之前，电动传动装置主要是用在装

卸、运输和仓库机械化的各种装置中，如堆垛机、发送机及装载机等等。在这些装置中，通常采用普通型号的异步电机或者双速电机，用行程开关来实现控制。用于仓库和运输自动化的工业机器人，也采用与上述相似的解决方法。

作为例子，现在来研究由列宁格勒加里宁工学院研究的“章鱼-1”(Спрут-1)型运输机器人⁽²⁴⁾。这种机器人的用途是在车间内运送重物。机器人是由机电式传送机械手，单轨轨道和控制装置组成。在沿单轨轨道移动过程中，根据行程开关的信号机器人可停在装卸位置处。用异步电机实现传送位移。在每一个装卸工作位置上都装有两个行程开关，以便当机械手从一个方向或另一个方向接近装卸位置时，都能给出降低速度的信号，并装有精确停车的标杆。在机械手的托架上装有降低速度的标杆和精确停车的行程开关。定位是按如下方式进行的。当运输机械手从60米/分的速度从任何一个方向接近装卸工作位置时，降低速度标杆落到降速行程开关的槽中。两个降速行程开关的位置距停车点在两个方向上的距离都为250毫米。信号从行程开关加到控制装置中。控制装置沿无触点线路向机械手的循环自动器部分发出断开电机的电源的指令。当电源断掉后，机械手靠惯性运动250毫米路程之后趋近于停车位置。在这一段靠惯性的运动过程中，当接近停车位置时，机械手速度降低将近4倍。当精确停车的行程开关撞到准确停车标杆时，在机械手循环自动器中给出机械手停车信号。根据此信号，接通带形制动器，机械手经过20毫米制动行程后就停止下来。这样就保证了机械手以±10毫米的误差停止在装卸工作位置处。

机械手的其余传动装置同样也是用异步电机构成的。根据手爪和手臂的张开-抓紧，提升-下放行程开关发出的信

号，对这些传动装置进行控制。因为在这种情况下停车超程不大，所以在电动机超程中没有中间减速过程。控制机器人四个电动机的循环自动器部分的全部线路由4个 ПМЕ 型起动器和17个 ПИУ-0 型继电器组成。

另外一个例子是由列宁格勒加里宁工学院研制的 МП-4 型机器人，其传动装置具有循环控制且采用电动传动装置^[27]。这种机器人用来操纵砂轮成型压力机。未经焙烧的砂轮，要求用机械手小心地转动它们，其中包括不能有冲击作用，限制启动制动的加速度不大于 $2.5\text{米}/\text{秒}^2$ 。用真空吸附装置夹住砂轮。由 СЛ 型直流电机实现各环节的传动。为限制传动的启动制动的加速度，各环节传动装置的功率放大器输入端装有限制加速度的部件。当传动装置根据由控制装置加给的指令启动时，限制加速度部件使传动装置功率放大器输入端形成平滑地增加的速度信号电压，直到达到稳定速度为止。当接近定位点时，行程开关动作使速度降低。根据这个开关的信号，限制加速部件开始形成平滑的下降电压信号，环节的运动速度下降到爬行速度。撞到精确停车的行程开关上之后，环节停止运动。在环节停止运动后，用气动压紧装置将环节定位在该点之上。控制信号电压增长或下降的时间可以在 $0.1\sim 2$ 秒范围内调节。伸出环节线性位移最大速度为 $1\text{米}/\text{秒}$ ，而角位移（手的转动）最大速度为 $60^\circ/\text{秒}$ ，定位精度为 ± 2 毫米。

“石川电气技师”公司和“东芝”公司（日本）研究生产出用于零件移动自动化的机电组件系列。这些组件既可成为单独装置，也可以组装成典型的不太复杂的机械手。“石川电气技师”公司生产“马达-指 \bullet ”、“马达-手”型和双速型组

\bullet 意为手指。——校注

件。在所有这些组件中都使用三相异步电机。

“马达-指”型组件生产有三种系列，其中二个系列是输出轴有线性位移的组件，而一个系列是“钳夹”型组件。工作轴有线性位移的“马达-指”型组件结构如图3.17所示。从外表看组件和普通电机相像。转子3的轴2是刻有内螺纹的空心轴，从空心轴2穿出一根刻有外螺纹的输出杆1。杆1的外螺纹旋入到轴2的内螺纹中，和螺杆旋入螺母中相似。这样就可将转子3的转动变换成输出杆1的直线运动。为了阻尼在限位器上的作用力，在转子两边安装了二个弹簧5。第一种型式的线性位移组件和第二种型式的线性位移组件的区别在于，第一种组件是用组件以外的装置来限制输出杆的行程，第二种组件则是用组件本身的结构来限制输出杆的极限位置（参看图3.17）。

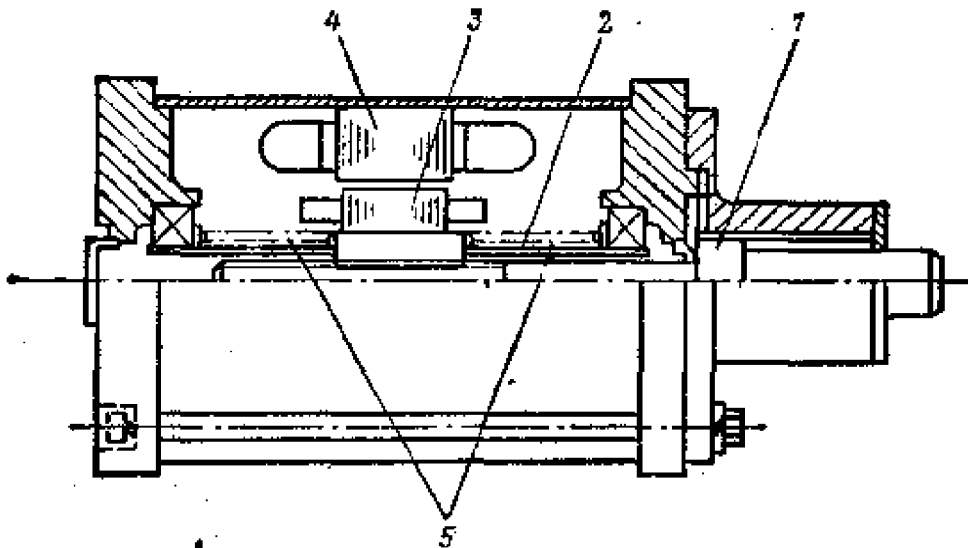


图 3.17

“钳夹”型组件是由第一种型式线性位移组件构成的，只是输出杆接上了钳夹机构，即手爪。

“马达-指”型线性位移式组件的作用力为5~20公斤，

行程为15~50毫米。而“钳夹”式“马达-指”型组件的作用力为7~50公斤，并能抓取直径为26~100毫米的零件。

组件是按时间进行控制的。为提高动作的可靠性并获得证明确实是动作了的信号，可将执行组件盒和行程开关对接起来。

“马达-手”型组件生产出二种结构系列。一种是普通系列，一种是新系列。组件的工作力为30~125公斤，而行程为200~300毫米。

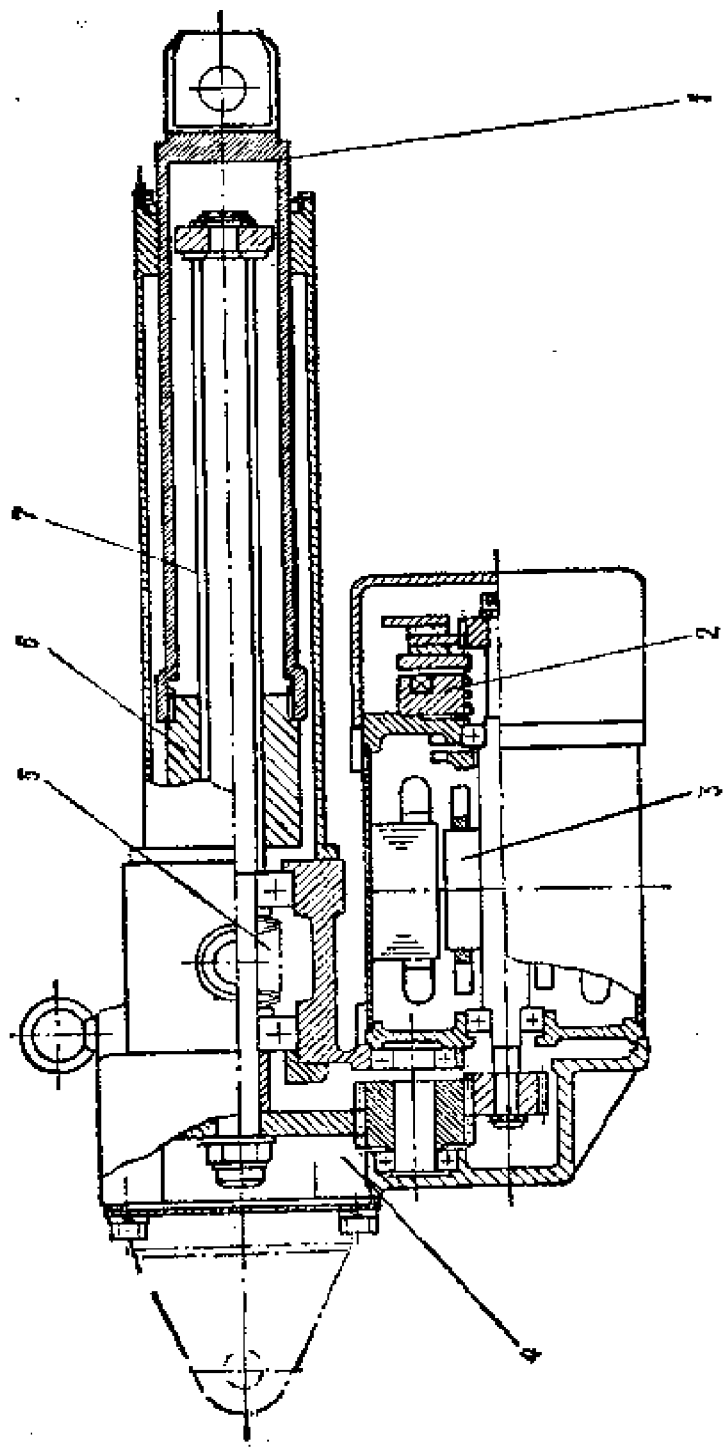


图 3.18

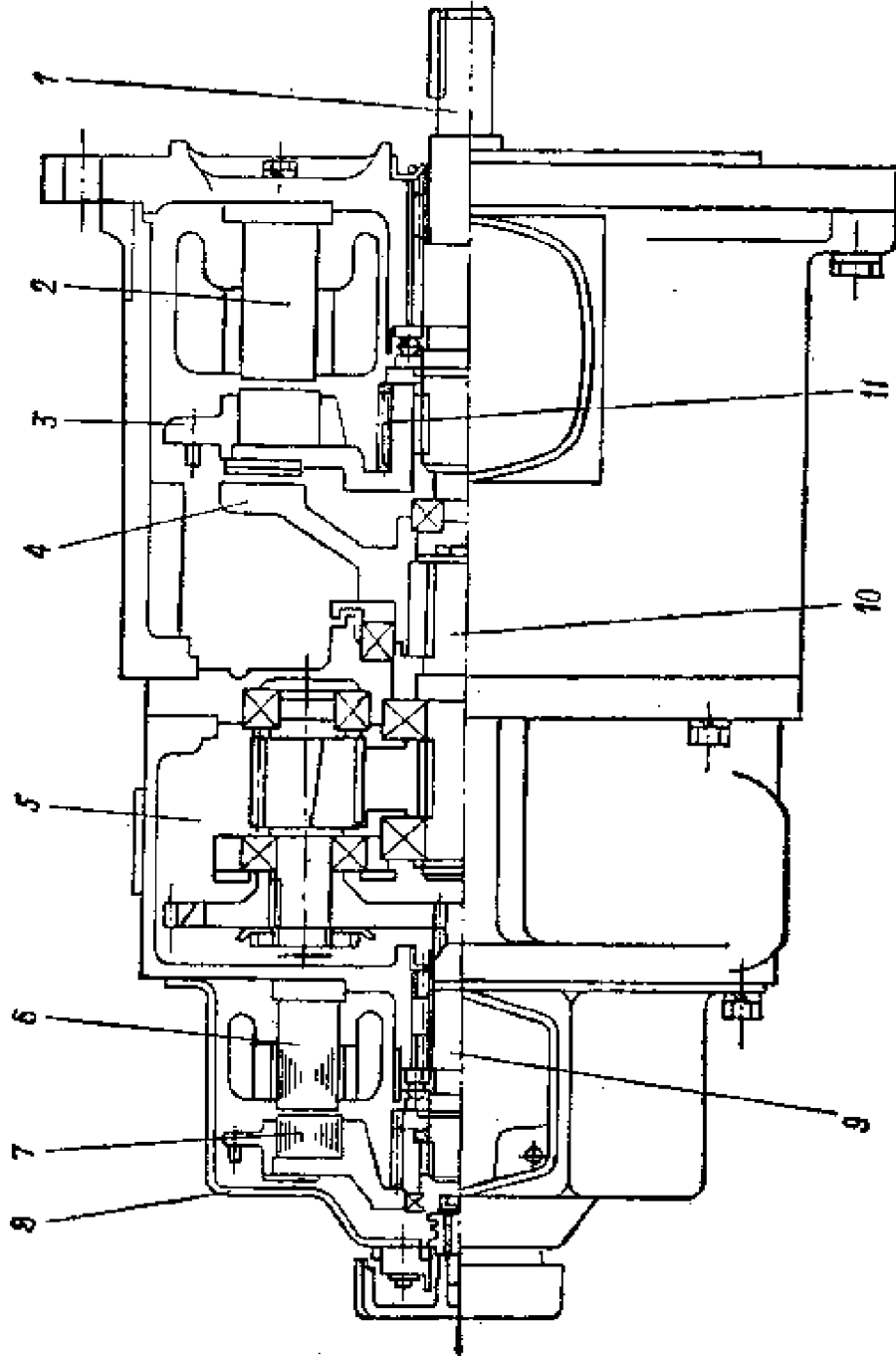


图 3.19

机接入电源以前，用弹簧11将转子3紧紧地压在圆盘4上。所以输出轴被制动住了。在主要电动机接入电源以后，转子3离开圆盘4，使输出轴开始以额定转速转动。当得到由行程开关给出的降低速度的信号时，主要电动机被断掉。电动机转子又被压到圆盘上。同时接通低速电机（转子7定子6），使原来紧紧压在端盖8上电动机的转子7离开端盖，并且经过轴9、减速器5和中间轴10使圆盘4开始以低速转动，其转速取决于减速器的传动比。从圆盘经过压紧在圆盘上的主要电动机的转子，将低速转动传递到输出轴上。在精确停车开关动作后，低速电动机被断开，它的转子又压紧在端盖上，输出轴被制动。

“石川电气技师”公司研制出了相似类型的，规格众多的，功率为0.1~2.2千瓦的双速机电组件。组件主要是作为机械手的远距离传输移动用，它既可以在一个生产工段范围内，也可在工段之间使用。

前面所研究的各组件安装容易，使用简单并能在电源被切断后使零件定位。采用上述组件的系统常常不是机械手的统一结构，而是如同分解的循环机械手，它们各个单独的环节散布在一个工段内，在整体上它们仍然能保证对零件进行必要的操纵。

在“石川电气技师”公司机电组件的基础上，研制了大量简单的具有限位器控制的机电机械手。已研制出了典型结构的“马托赫德”（Мотохенд）机电机械手。用“马达-手”型组件完成手沿导轨的上下方向的移动。两手的手爪用带有行程开关盒的“马达-指”组件控制。用双速组件，通过链条传动实现机械手沿单轨传输位移。所研制的组件能组合出结构形式花样繁多的机电机械手。利用这些组件，许多公司

研制了某些形式的辅助工艺设备，如传送零件的装置，回转台等等。这就为工艺设备自动化提供了各式各样的系统，根据公司工作人员的判断，已投入使用的类似的系统总数约为一千五百台左右。

近来出现了许多用于电弧焊的机电工业机器人，如“石川电气技师”、“新明和”（ШинМейва）等公司的机器人。在这种情况下用电动传动装置的优越性是显而易见的。电弧焊的速度不大，为5~10毫米/秒。因为操作的主要时间是花费在焊接上了。所以接近和跨越（自由移动）速度取50~100毫米/秒就足够了。工作机构（焊头）的重量不大。用电动传动能保证没有火灾危险，并能保证工作地点清洁。

“新明和”公司研制了三种型式具有电动传动装置的电弧焊机器人（PW-50，PW-75和PW-200）。现时研制的PW-150型焊接机器人的技术数据介于PW-75和PW-200之间。机器人采用的是用直流电动机构成的伺服传动装置。

“石川电气技师”公司的机器人的特点是利用感受装置进行焊接。感受装置能确定在零件表面上焊缝的距离或者测定相对于零件表面的定位距离和角度。感受装置在焊接过程中以机械方式触及零件表面，同时就以连续式或离散式给出关于距离或角度的信号。信号加到机器人电动传动装置的输入端，这样一来，就能实现机器人传动的连续或离散的机电伺服系统。

众所周知，在工业机器人中可用电动传动装置作为大功率液压执行系统的给定装置。例如，在“多面手-50”型工业机器人中，控制各环节运动的传动装置的构造如下。按程序给定的环节位置，是由CJI型直流电机构成的小功率伺服传动系统控制的。电动机输出轴与ЭМТ-18型液压力矩放大器的

输入轴相联。液压力矩放大器通过机械传动跟踪电动机轴的位置，同时又移动带有重载的机械手的环节。ЛІРВ-50型(苏联机床工具研究院研制)机械手的传动装置也是采用相似的方法构造的，只是这种机械手的传动装置是用步进电机作为液压力矩放大器的程序位移给定器。

大多数复杂的有感觉机器人都是采用由电动机组成的电动传动装置。这是因为电动传动装置使用方便，工作中没有污染和噪声，也因为在实现知觉机器人所必须的自适应控制的各种方法中，电动传动装置有更大的灵活性。对于有知觉机器人来说，例如，能完成装配工序的有知觉的机器人，对它的电动传动装置的特性的要求和一般程序控制机器人传动装置特性的要求有着本质上的差别。举例说，在普通的程序控制的机器人传动装置中，通常要求尽可能地保证机械特性刚度大些，以便减弱外界干扰作用的影响。与此相反，对有知觉的能完成装配工作的机器人要求传动装置对外作用力来说具有柔软性(此时外力是工作的力)。为此正像参考文献〔38〕中所提出的那样，可采用根据传动装置输出环节的实际位置和给定位置之差去控制作用力的方法来实现这一目的。图3.20给出了按上述的方法控制电动传动装置的原理(a)，以及这一控制所要求的传动装置机械特性(b)。

为发展工业机器人，正在研制电动传动装置的KЭР标准成套系列。这一系列按输出轴的功率(瓦特)有六种规格型号：25、90、250、550、1100、2200。这一系列的技术要求是由列宁格勒加里宁工学院制定的，并征得了从事制造机器人的一些主要企业的同意。

标准的成套的电动传动装置的结构是由机电组件、传动装置的控制部分和功率放大部分组成的。机电组件是由直流

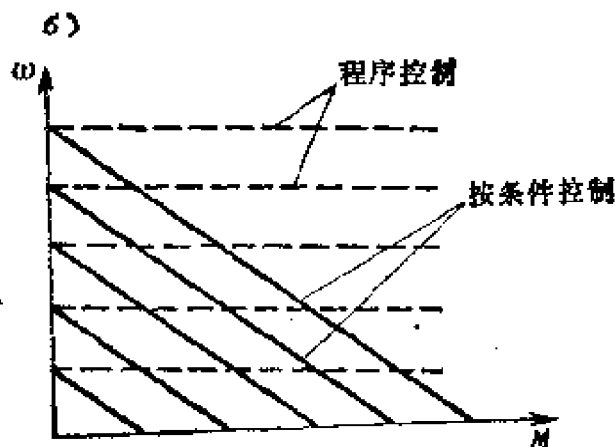
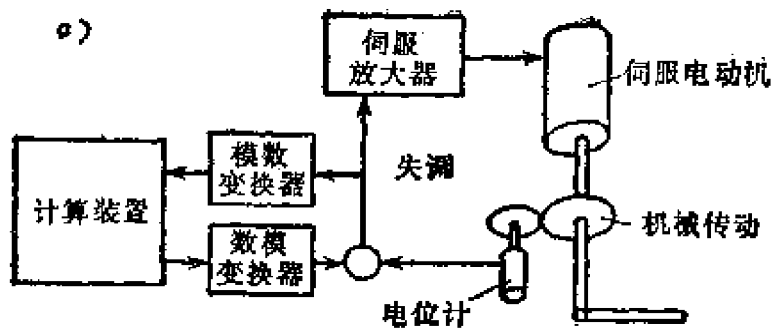


图 3.20

执行电动机、从执行电动机到输出轴之间的机械传动装置和输出轴的位置、速度传感器组成。机电组件的结构设计要保证在机械手的转动和摆动环节中都可使用。

在标准的电动传动装置进行系列生产之前，在使用苏制工业机器人时，推荐采用一般的执行电动机，如 СД、ДМ、СЛ、ДВИ 型电动机，也可采用具有改善特性的电动机，如具有光滑电枢的 ДПГ、МИГ 型，具有空心转子的 ДПР、ДПЦЯ、ДПЯ 型，具有圆盘形转子的 ПЯ 型电动机。

现时苏联生产的具有改善特性的电动机为数有限。世界

其他国家生产的一些电动机，如美国的“普鲁泰尔”(Porter)公司的空心转子电动机，法国CEM公司的圆盘电枢电动机，日本的“石川电气技师”公司的光滑转子电动机，美国的“卢卡斯”(Lucas)公司和日本“伐奴克”(Fanuk)公司的大力矩电动机都属于这类电动机。

第四章 工业机器人的控制装置

1. 工业机器人的控制系统

由于机器人的控制特性直接影响机器人的技术特性和使用的可能性，所以通常根据所采用的控制系统来划分工业机器人是属于那一代的。

如前所述，绝大多数已制造出的工业机器人都是属于第一代机器人，即程序控制机器人。这一代机器人基本上是用点位控制系统，而最常见的是循环式控制系统。这一代最完善的机器人是用来完成焊接或喷漆操作的机器人，它们具有轮廓控制系统。

大部分第一代工业机器人是属于固定式机器人。但是，在个别情况下，由于生产的工艺特点，特别是为了操作数量更多的生产设备，需用更复杂的可动式机器人。可动式机器人的运动，通常是以循环系统进行控制的，所以整个机器人控制系统的类型是由机器人的机械手的控制方法确定的。但运输专用的工业机器人却是例外。运输专用的机器人用在把机器人从事的工艺生产单位联结成生产工段，再把生产工段与库房和车间的其他生产工段联系起来。这种机器人的控制系统的主要任务是控制机器人的移动，而机械手的控制却非常简单（通常是用循环式的控制系统）。

由于在综合自动化生产工段内分组使用工业机器人是主要的并且是最有效的应用方式，所以，用电子计算机分组集

中控制机器人和主要生产设备，这是机器人控制的最有前途的组织方法。分组集中控制多半是多级组合控制。

第二代工业机器人就是有知觉的机器人。第二代机器人的控制仍然是以程序控制为基础，可以用外界环境信息来校正控制程序。校正的方法是，根据外界环境状况的变化改变某些程序。外界环境信息也可以用来完成某些按程序控制无法实现的操作，如抓取随意放置的物体，实现沿着由外界物体所标定的标志点或轨线的运动等等。

正像已指出的那样，直到目前为止，还只有做为试验用的第二代工业机器人的样品。第二代机器人通常采用像接触传感器型式的最简单的感受装置和适应性算法。适应性算法归结为切换典型的子程序，或者从程序控制转换成根据感受装置的信号进行控制，或者进行与此相反的转变。

具有人工智能的最新型的有知觉的工业机器人还是处于研究探索阶段。这种机器人是属于第三代机器人。这种机器人有高度发达的工业视觉的感受装置系统，相应地还有处理感受装置所获得的信息的系统，其中包括图象识别。有了这些装置，机器人能够分析外界环境的大体状况。日本日立公司的中央研究室制造的“西维伯”(ХИВЕР)机器人可作为第三代工业机器人的例子。

无知觉的工业机器人的控制装置，就是控制机械手各环节移动的程序控制装置以及同生产设备相联系的装置。图4.1给出了无知觉的工业机器人的一般控制方块图。在控制台上给出所要求的工作状态，并显示机械手和控制装置的实际工作状态。工作程序存储在存储装置中。控制位置部件的作用是用机械手和生产设备的传动装置来实现给定的坐标或轨迹。控制转换部件的作用是检测前一步程序完成的情况，

存储已完成的程序号码，并给出执行下一步程序的信号。时间装置用来按程序形成一定的时间滞后。记忆装置、控制转换部件和时间装置联合起来构成了程序-时间装置。对任何程序控制装置它们都是最基本的装置。

在图 4.1 所示的方块图中，给出了控制装置同操作者、机械手各环节的传动装置、机器人行走装置的传动装置、生产设备等之间的联系，同时也表示出了各装置的各个部件之间的内部联系。以带箭头的黑粗线表示机器人编程序时的联系；以带箭头的二根细线夹空白的线表示再现程序时的联系；以带箭头二根线中间夹有细斜线的线表示编程序和再现程序二种情况下共用的联系；以带箭头的细实线表示执行完一步程序的信号以及转换程序的指令；以虚线表示机械联系。

按预先编好的不变程序进行工作的无知觉的机器人，在有关要求的作用信息方面，操作者是唯一的信息源。信息以程序形式存入机器人存储装置中，然后机器人在自动工作状态下执行这一程序，机器人从外部再得不到其他任何信息。因此，在编制机器人程序之前，操作者要确定机器人动作的顺序和为完成所要求的工作应接入的生产设备顺序。之后，编制机器人动作程序，并将程序存储到控制装置的存储器中去。编制程序和存储程序的方法有：

(1) 计算程序，随之把程序输入到存储装置中。在这种情况下，信息传递的顺序是：操作者——控制台——存储装置。

(2) 在控制台用手控制机械手的状态下，在完成一次典型的操作的过程中，在示教的同时输入程序。在这种情况下，实现手控的顺序是：操作者——控制台——控制位置部

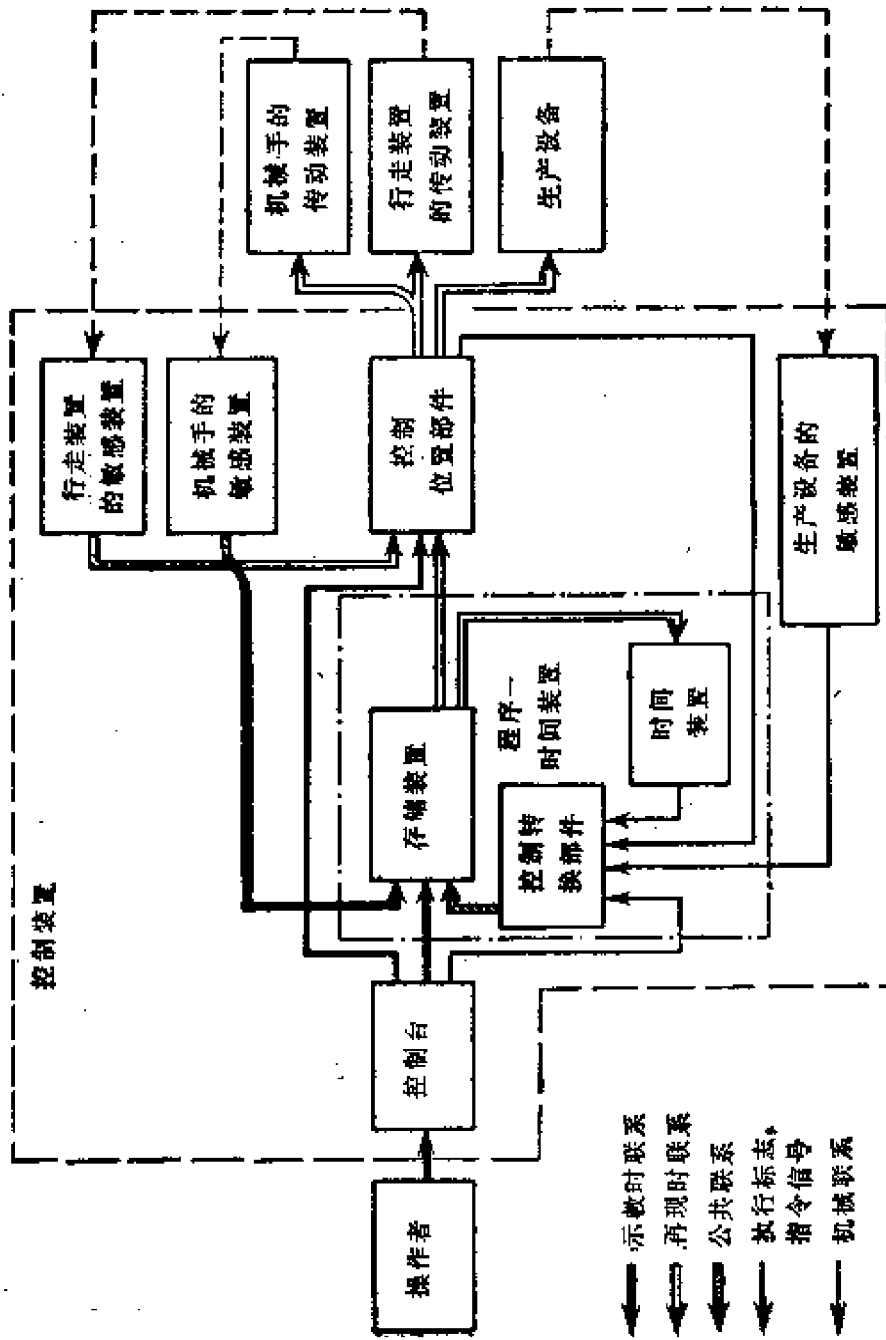


图 4.1

件——机械手。而输入程序的顺序是：机械手敏感装置——存储装置。输入信息的指令传递途径是：控制台——控制转换部件——存储装置。

(3) 操作人员用手使机械手产生机械位移, 进行示教的同时输入程序。输入程序的实现和前一种情况相同。

当处于按程序进行自动工作的状态时, 信号从控制装置输出端加到机械手和机器人行走装置的传动装置以及生产设备。它们在信号作用下按程序完成给定的运动。

程序信息是按一定结构组成的, 其中包括关于被控制环节所要求位置的信息单元及实现该要求位置的时间信息单元, 这些单元由转换指令联结起来(动作顺序信息)。离散或模拟形式的相应于机器人单元操作的数字(指令)乃是最简单的单元程序信息。机械手一个环节的移动、手爪的抓紧-张开、延迟时间、发布生产指令等都是单元操作。根据不同的单元操作, 单元程序信息相应的数字包含有从一个比特信息(如开-关型操作)到13~14个比特信息(如机械手环节的精确移动)。

有完整意义的一组单元操作(例如, 当各环节协同工作时, 机械手手爪移动到某一点), 它对应于按着总的要求联合执行的一组数字, 即程序段。许多程序段能够组合成一个子程序, 这一子程序对应于机器人的完整的、不太长的动作序列。

再现程序时, 根据存储在控制装置中的再现程序的规定确定送出各个数字、程序段和子程序的顺序。再现程序的规定可以是正规的再现顺序, 或者是根据机器人的一定的内外条件有变化的再现顺序。

内部条件通常是由控制台给出或者存储在存储装置中。

考虑内部条件可使控制产生附加的功能。举例说, 根据计数器中给出的数字多次执行个别程序段; 根据执行循环的号码改变个别程序指令等等。因为由操作者给定的内部条件在执行程序过程中是不变的, 所以考虑内部条件的工作, 自然还是属于按已编制好的算法进行工作的。装箱就是考虑内部条件的一个典型例子, 这时必须考虑能装入箱内的零件数, 并且要考虑零件装箱过程中从一个工作循环到另一个工作循环时箱内格位的变化。

外部工作条件的信息以生产流程的信号形式加到机器人控制装置中, 并且能使机器人在工作过程中转换到其它程序, 执行或跳过个别程序段、改变个别程序指令, 转换成考虑内部条件的工作状态等等。这就使得机器人能够灵活地反应生产过程的变化, 当编制机器人的程序时已预先考虑了这种变化。所有现代的工业机器人控制装置, 都能按照预先规定的为数不多的(5~10个)内外条件的信号进行控制。内部或外部条件信号加到控制装置的控制转换部件中去(参看图4.1), 并改变执行下一个指令的号码。

确定控制转换部件的装置的原则是, 产生已处理完当前的程序段的标志, 并准备处理下一个程序段的信号。可利用如下三种基本原则产生这种信号: 根据传感器的信息、按照时间原则或按照二者组合的原则产生转换信号。

在第一种情况下, 当完成前一个单元操作时, 由传感器发出一系列信号或者由控制位置的部件发出信号。在第二种情况下, 每经过一定的时间间隔(代表给定的这一步的时间)就由时间装置发出向下一步转换的信号。在第三种情况下, 对不同的步子, 或者按第一种原则, 或者按第二种原则发出信号。

按时间原则就不需要由传感器产生转换信号。在这种情况下，或者在每一步开始时由被触发的时间装置发出转换程序信号，或者在开始执行程序循环时，由被触发的计数装置发出转换程序信号。在这种情况下，并没有证明程序是否实际已被执行了。

控制转换部件通常包括步数记录器、程序转换交换器和执行信号同步触发电路。

现在来研究实现控制工业机器人的各种方法所用的控制装置结构图的特点。其中有限位器式点位控制装置(循环式)、点位控制装置和轮廓控制装置。

2. 限位器式点位控制装置

实现限位器式点位控制方法的控制装置是最简单的点位控制装置，一般都称为循环式控制装置。

限位器式点位控制工业机器人的原理图如图4.2所示。此时，存储器通常是由顺序信息、位置信息和时间信息的分立存储部件组成的^[40]。分离出位置信息是按限位器定位的机器人的结构特点。以限位器的一定位置或者以机械手各环节的行程开关的标志形式存储位置信息。用转接元件和由许多转接元件组成的部件存储顺序信息，其中有：插孔板(“阿依达”型、ПР-10И型、旋风3Б型机器人)，程序鼓(带有穿孔卡的程序鼓的СМТ-1000型机器人)，插头(“电勒克司”(Электрoлюкс)公司的控制装置)，多位转换开关(МП-5、МП-9型机器人)和翻转开关等等。常用电位计给出时间信息，并用继电器式的时间装置或用类似的部件加以处理。

在循环控制装置中，控制位置的部件向机械手各环节的传动装置和加工设备的传动装置发出“开-关”指令。通常是

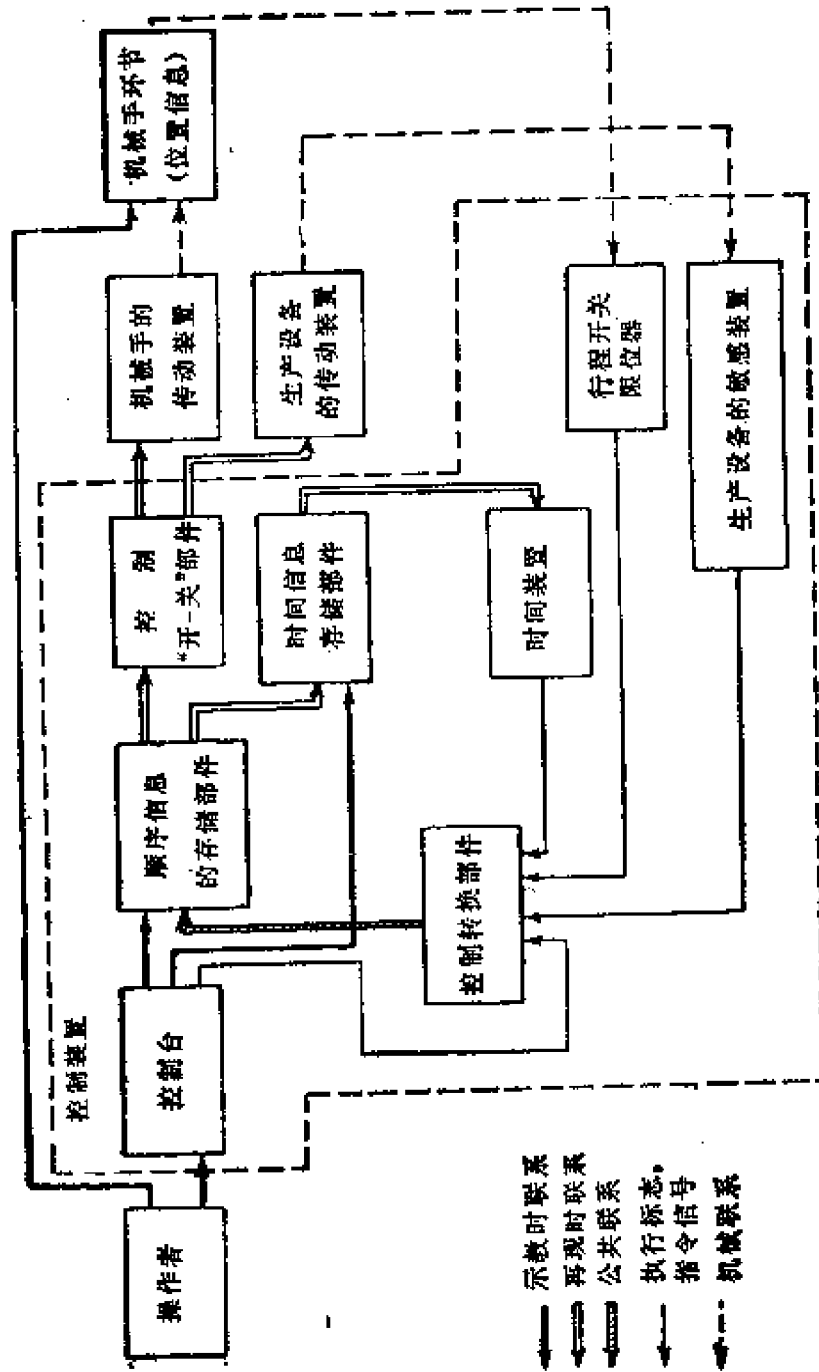


图 4.2

用有触点和无触点的继电器构成这种控制位置的部件。由各种转换元件（如步进选择器、带译码器的计数器、移位寄存器等等）构成控制转换的部件。

在编制机器人程序时，操作者输入各环节位置的信息（将机械手的环节上的限位器或行程开关的标杆移到要求位置处），并把执行的顺序信息和延迟时间的大小存入控制装置中。执行程序时，要将完成单元操作的顺序的信息加到“开-关”控制部件中去。该部件接通和断开机械手的各环节和生产设备的传动装置，以便保证环节的运动与预先编制的程序顺序相对应。用自然数码对每一个环节的要求位移和实际位移进行比较。比较元件可以是传感器或者是机械限位器。对于前一种情况，当要求位移与实际位移一致时，传感器给出标志转换到执行下一步的信号；而在后一种情况下，根据时间装置给出的信号转换到执行下一步程序。当所有环节到达由程序段给定的位置时，从传感器或由时间装置得到的信号加到控制转换部件中，控制转换部件产生转向下一步的信号等等。

现在来分析循环控制装置的例子。

图 4.3 给出了 MП-9 型气动小型机器人控制装置作用原理。这种机器人是由列宁格勒加里宁工学院同列宁格勒光机联合会共同研制的。这种小型机器人的机械手有三个运动自由度，即水平移动、转动和垂直移动，此外还有手爪运动。所有这些自由度都是从一个限位器运动到另一个限位器。

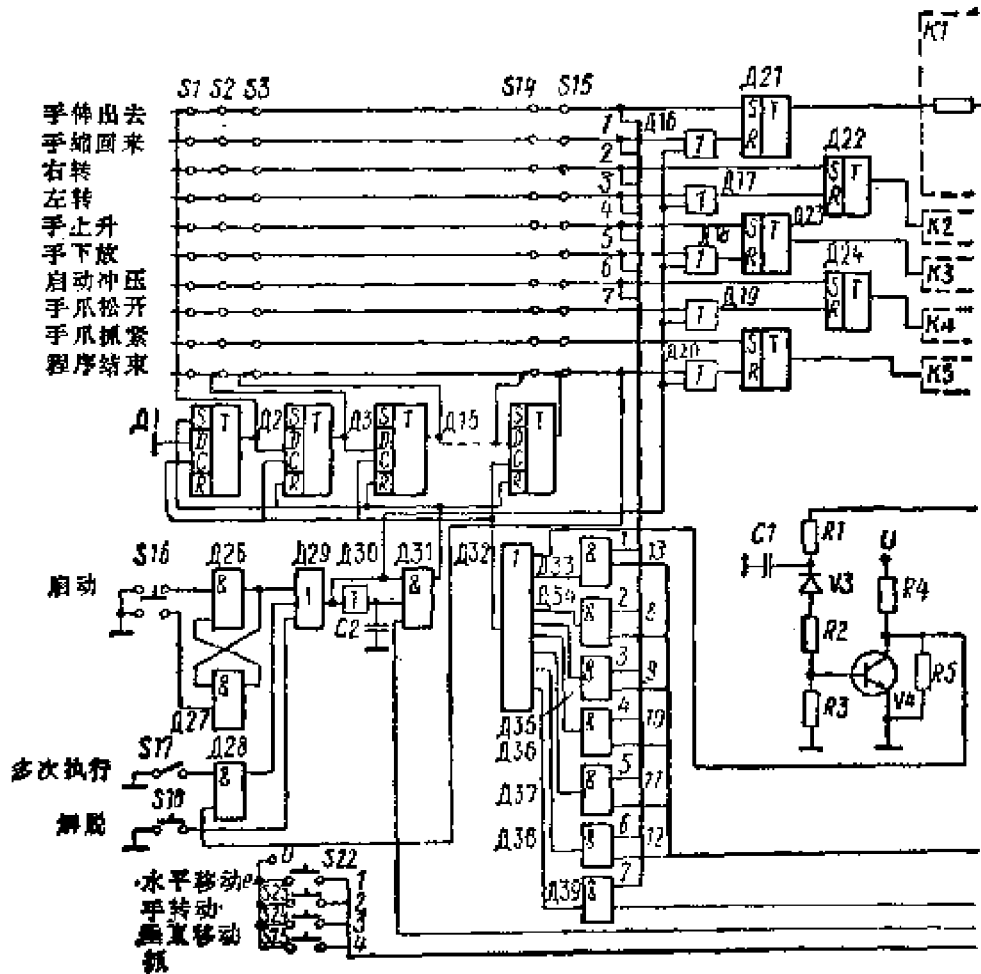
程序指令顺序信息存放在 *контравес* 型平面转换开关 $S_1 \sim S_{15}$ 上。整个程序编成 15 步，每一个指令为一步。十个数字指令中，包括八个控制机械手的手爪和环节运动的指令，一个“冲压启动”指令和一个“程序结束”指令。

用 $K1\sim K4$ 无触点开关对机器人气动阀的电磁铁进行控制。通过开关 $K5$ 给出冲压启动的生产指令。

用移位寄存器作为转换部件。移位寄存器是由 $\Pi1\sim\Pi15$ 触发器、 $\Pi33\sim\Pi39$ 重合电路和 $\Pi32$ 或门电路构成的。由 $C1, R1\sim R5, V3, V4$ 组成时间延迟整形电路。

这一控制装置按下述方法工作。在转换开关 $S1\sim S15$ 上存入要求给出的指令的顺序以后,操作者在控制台上按下“启动”按钮 $S16$ 。由重合电路 $\Pi26$ 和 $\Pi27$ 组成的触发器在1的输出端发出的信号加到或门电路 $\Pi29$ 上。信号从或门电路输出端转送到执行触发器 $\Pi21\sim\Pi25$,而在电容 $C2$ 上延迟的信号加到重合电路 $\Pi31$ 的输入端。只有从送料机的传感器发出抓取的初始位置上有毛坯的信号时,该电路的输出端才产生信号。重合电路 $\Pi31$ 输出端的信号使转换器触发器 $\Pi2\sim\Pi15$ 处于初始状态,而第一步触发器 $\Pi1$ 置1。触发器 $\Pi1$ 的1输出端电位加给转换开关 $S1$,于是开始执行第一步。例如,假设在第一个程序段中,装定成“手伸出”指令。这时,信号加到触发器 $\Pi21$ 的输入端,并使它处于1状态。信号也同时加到重合电路 $\Pi33$ 的一个输入端。从触发器 $\Pi21$ 输出端取得的电压加到开关 $K1$ 输入端,开关 $K1$ 动作,并将气动阀的电磁铁 $\Theta M1$ 接到电源 U_{net} 上。气动缸使机械手的手伸出来。当运动碰到限位器时,开关 $S21$ (簧片继电器)动作,而且在重合电路 $\Pi33$ 的第二个输入端产生信号。由重合电路输出端取得标志已执行了程序的信号,经过或门电路 $\Pi32$ 加到转换器触发器的同步输入端上。1从触发器 $\Pi1$ 转写入触发器 $\Pi2$,开始执行第二步,依此类推。

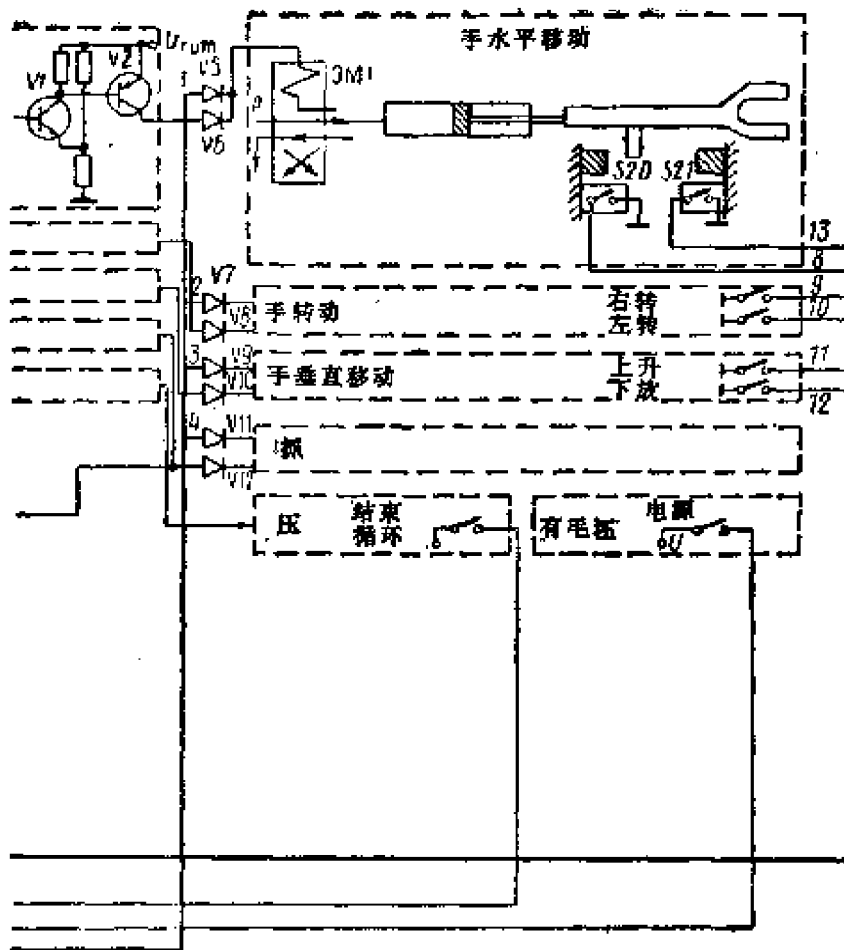
因为在 $M\Pi-9$ 型机械手的手爪上没有终端开关,所以在手爪上,当执行指令后,根据时间延迟整形电路(晶体三极



图

管 V4) 输出端的信号进行转换。

当一个循环最后一个指令执行完以后，就产生一个“程序结束”指令。假若从控制台不给出“多次执行”（翻转开关 S17），那么重合电路 A28 的输出端就没有信号输出，所以只执行一个循环。当 S17 翻转开关放在“多次执行”指令位置上，根据重合电路 A28 输出信号而开始执行下一个循环，一直继续下去，也就是控制装置不断地自动进行工作。当从送料机上抓取最后一个毛坯时，控制装置完成最后一个循环，



4.3

此后由于重合电路 $\Delta 31$ 输出端不再产生信号, 所以完成最后一个循环后, 机械手将停在原始位置上。

当闭锁自动工作时, 用“解脱”按钮 $S 18$ 使线路进入原始状态。用按钮 $S 22 \sim S 25$ 通过二极管 $V 5, V 7, V 9, V 11$, 从控制台直接给气动阀的电磁铁供电, 实现用手控制机械手的运动。在此情况下, 执行触发器 $\Delta 21 \sim \Delta 25$ 装定在初始状态。

这一控制装置是由 21 个 $K 155$ 系列微型电路和少量分立

元件组成的。在生产条件下对 MП-9型机器人的控制装置的实验样品进行试验表明，控制装置可靠性高，编制程序容易，使用性能好。

列宁格勒加里宁工学院为限位器式点位控制的机器人研制了 YЛIM-663 型循环程序控制的标准装置的基本模型。这种控制装置保证能控制有 6 个以下的运动自由度，而每个运动自由度有 4 个以下定位点的机械手。规定两个自由度可增加到 8 个定位点。所有自由度的总定位点数不超过 24 个。控制装置从接触的和接触的传感器上取得的信号是直流 24 伏电压。假若必须在接近定位点之前预先降低运动速度，每个点可以设置能获得减速运动信号的附加传感器。

YЛIM-663 型控制装置能够向生产设备发出十二个“开关”型指令，而且可同时发出两个指令。在执行过程中，有标志已执行指令的信号。给机械手的阀门的电磁铁和生产设备的控制指令是功率为 20 瓦的直流 24 伏电压或者是 100 伏交流电压。

控制装置能够编制离散度为 0.1 秒，而延迟时间在 0.1~3 秒的范围内的程序。离散度以及延迟时间的比例尺为 2~10 倍。又规定，根据在计数器中给定的循环数等内部条件，个别程序可执行多次，可以根据八个外部条件改变程序过程。

为应付外部信号给出的紧急情况，以及应付机械手各环节位置配合超越允许范围，控制装置内也设置了应付紧急情况的闭锁装置。

图 4.4 所示的控制装置是由一组功能部件和控制部件组成，而控制部件是由微型程序自动器构成的。操作者由控制台将工作程序存入存储装置中，存储装置的容量是 128 个语

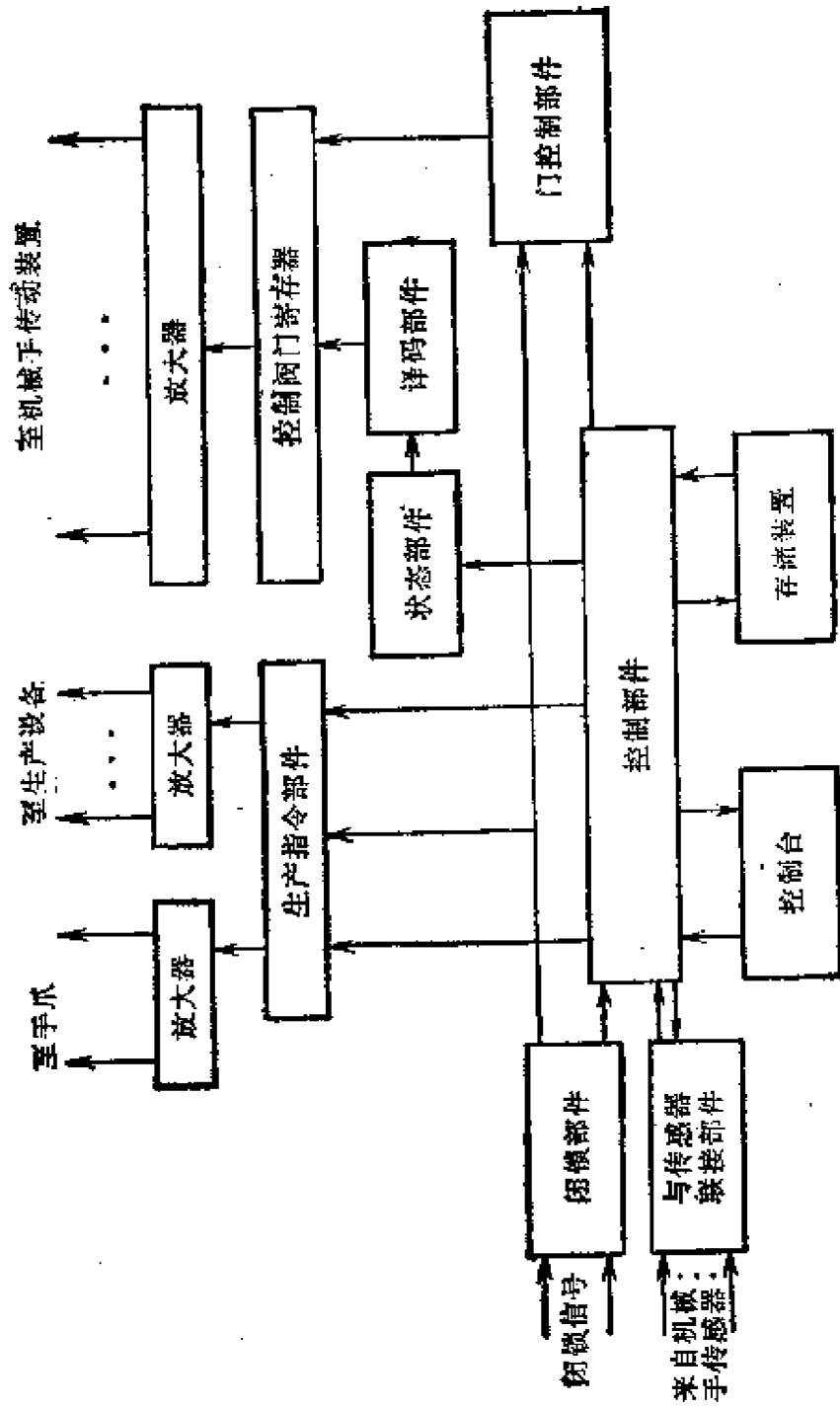


图 4.4

句，每个语句有8位。每个单元操作用一个语句表示，从而可编制“定位环节”，“生产指令”，“延迟时间”，“协同执行指令”，“转向子程序”，“子程序结束”，“控制循环”，“循环结束”，“停”等类型指令的程序。

八位码语句的头几位是指令码，后面几位是信息码，而第八位是校验码。例如，在“定位”指令中，第一位写入“0”指令码，第二位写入运动方向指令码，第三位至第五位是说明运动自由度的号码，而第六位和第七位是说明该运动自由度上点的号码。又如，在“延迟时间”指令中，头三位“100”是指令码，而第四位至第七位是说明延迟时间大小的。

用“协同执行”指令可构成不同长度的程序段。最短的程序段是只有一个单元操作，而最长的程序段可含有八个单元操作。在“协同执行”指令中的信息码标明了单元操作数目。

单元操作的八位数码从存储装置送给控制部件。由控制部件译出指令码和码的信息部分，并且保证执行所指示的操作。

机械手各环节位置传感器取得的信号通过与传感器相联的部件而输入。这部件可以从48个传感器上接收信号。轮流地将每一个运动自由度的一组传感器接到编码器上。从编码器输出端得到的传感器号码的编码送给控制部件。头三位码标明传感器的号码；而最小位码标明传感器类型（是减速的还是停车的）。控制部件给出正处在接通状态的那个运动自由度的号码。由程序给定的位置传感器号码和实际的位置传感器号码在控制部件中进行比较，并且产生出控制机械手阀门的信号。

控制装置能够向机械手的24个被控制的液压或气动的阀门提供控制信号。这时，对于用不同方法构成的液压和气动线路，必须用不同的组合接通阀门，为此，可借助状态部件和译码部件。这种部件是二极管阵构成的，二极管阵的联接方式与具体的机械手阀门接通程序表相对应。这样一来，就可保证控制装置同按任何逻辑关系接通阀门的机械手线路要求相一致。

机械手的控制信号同样按照自由度作顺序排列。根据门控制部件的信号控制自由度排列的顺序，其方法是按照每一个运动自由度依次地将控制信号写入控制阀门的寄存器中。用生产指令部件对生产设备和机械手的手爪进行控制。在获得标明指令已通过的信号之后，控制部件才发出信号。采用由存在计数器内的延迟时间数值减去1，用这种方法使控制部件中的计数器产生延迟时间。

从传感器接收信号并编排阀门的“开-关”指令是以很高的频率在执行程序的过程中循环进行的。这样，单个的错误动作就不会显现出来，从而大大地提高了抗干扰性。此外，在执行程序过程中，要根据传感器信号循环地验证已完成位移运动的环节确实是位于要求的位置上了。

以铸造生产为例，有按内部条件进行转换的可能性，这就能编制要经过某些与工艺要求相对应的基本程序循环的铸模润滑工作程序。依据外部装置的信号能够完成对八个程序段中的任何一个程序段的转换，或者转换到子程序，这样就能够考虑到在生产过程中八种情况的变化。

闭锁系统能消除机械手运动中的故障。从机械手各环节的12个极限位置传感器和从外部设备的6个传感器取得的信号以及保护限制的信号加到闭锁部件的输入端。从闭锁部件

输出端取得信号，根据这一信号才允许发出 12 个生产指令，才允许机械手的 6 个自由度中每一个自由度的传动向前或向后运动。用闭锁部件中按一定阵式排列的二极管装置保证闭锁有要求的组合状态。

УЦМ-663 型控制装置是用 K-155 和 K-511 系列集成电路构成的。存储装置是用 K-519 系列半导体集成电路构成的。这种集成电路在电源断开时有信息更替和信息保持性能。无触点输出放大器是由 TO-6.3 型光控硅整流器构成的。

控制装置做成带有控制台的柜式结构，尺寸为 350 × 400 × 1100 毫米。

由列宁格勒加里宁工学院研制的“章鱼-1”运输机器人的控制装置是控制可移动式机器人的循环程序控制装置的一个例子^[1]。这种机器人用在车间内运货。它是由运输机械手、单轨轨道和控制装置组成。运输机器人的控制线路如图 4.5 所示。机器人的机械手沿 CC 仓库和 CM 工长处货物装卸点以及 C1~C14 机工的 14 个工作点移动。机器人在这些点位之中的任何指定的二个点位之间自动运送装有零件或毛坯的包装箱。

在每个点位安装有二个 EBR-24 型传感器，在图 4.5 中为 S1~S32。每个位置上，第一个传感器发出降低机械手运动速度的信号，而第二个传感器给出保证准确停车的信号。控制装置由控制台、程序部件和控制装置的联系部件组成。机械手上安装有联系部件和循环自动装置。机械手有四个传动装置，即移动、升降、手爪和保护罩的传动装置。用无触点的感应式联系通道完成从控制装置向机械手传送指令和信号，或与此相反方向传送指令和信号。

控制装置和机械手是按如下方式进行工作的。工长在控

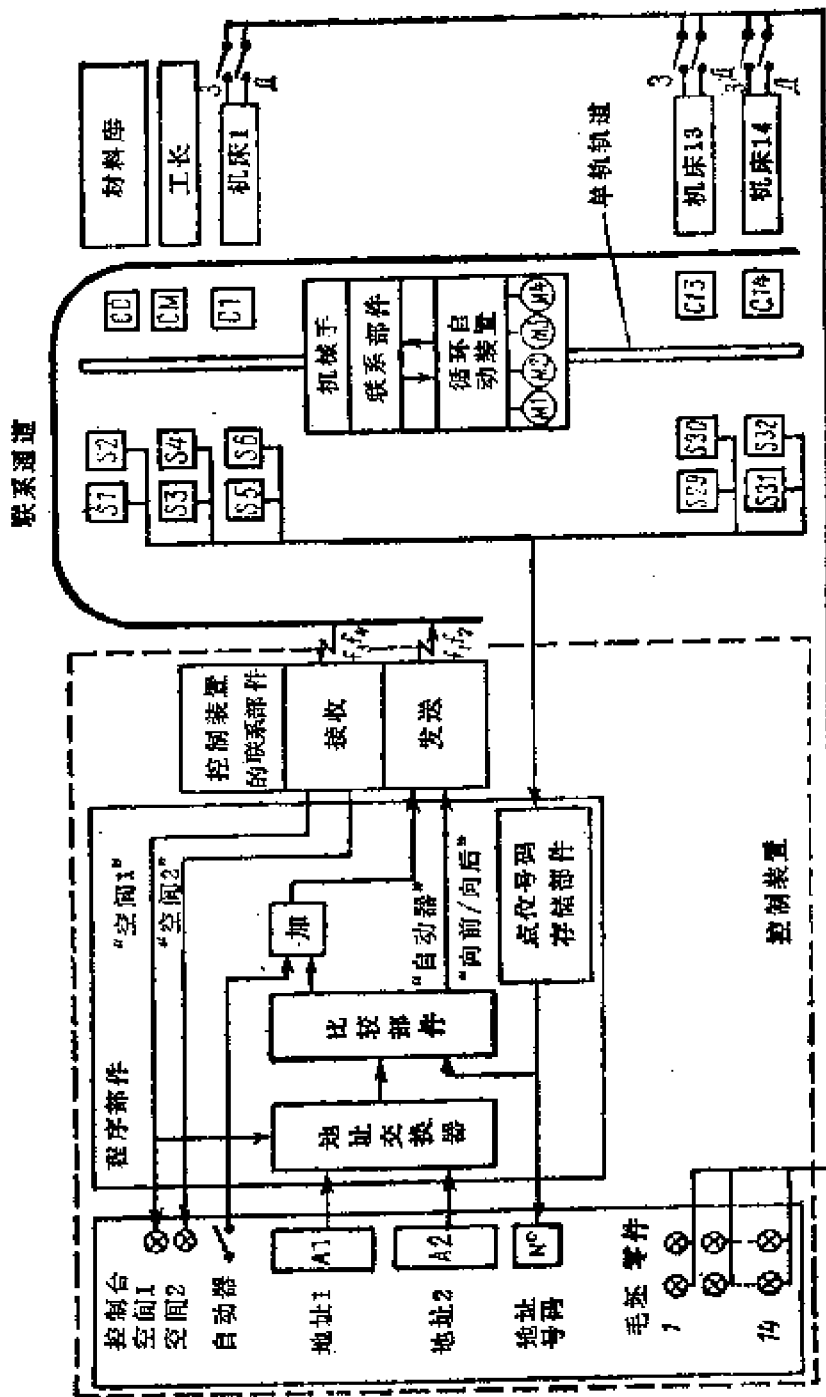


图 4.5

制台的键式寄存器上打入两个地址A1和A2（需要从A1点取包装箱，A2点要放上一个包装箱）。之后，工长将机械手置于“自动”工作状态，然后开始执行任务。给定的第一个地址A1通过交换器加到比较部件的输入端。从存储部件给出的机械手瞬时定位的号码加到该比较部件的另一输入端。当给定的和瞬时的点位不相符合时，比较部件就发出向前向后运动的指令（向第一个地址的给定点位方向运动）。

运动指令加到控制装置的联系部件中。从这个部件输出端取得具有一定频率（ f_1 或 f_2 ）的信号通过感应式联系通道传送出去。装在机械手上的联系部件从感应通道取得信号，经过译码后加给循环自动装置。自动装置使机械手传动装置朝着要求的方向运动。在给定的点位处，当减速的传感器动作时，从比较部件输出端取得运动信号。循环自动装置断开机械手运动的传动装置。机械手在电动机停止过程中越过某一段距离，直至碰到精确停车传感器为止。根据精确停车信号接通制动器，于是机械手就能以 ± 10 毫米的精确度停在给定点位上。

在获得运动指令的同时，还给机械手加上“自动机”指令。这一指令存储在机械手循环自动器中。在机械手停车后，根据这一装置的指令，在停车的点位上进行如下工作循环：保护罩自动打开，手爪下降到停车地点的工作台面上，抓住包装箱并将包装箱提升起来，保护罩自行关闭。至此在第一个点位处完成了自动工作循环，同时通过联系通道，机械手向控制装置发出“空闲1”信号。

在控制台上显示出“空闲1”信号，同时通过地址交换器将第二个点位A2的地址送到比较装置的输入端。用和前面相似的方法，向第二个给定的点位处移动。在第二个点位

处完成自动循环，机械手将包装箱放在工作台上。在第二个点位处工作循环结束时，机械手给出“空闲2”信号，表示完成任务。这以后，可以打入以下两个地址。

为使机械手从一个点位转移到另一个点位并停在给定点处不再进行自动循环，只要不给“自动机”指令即可。为了给工长提供信息，每一个机床工从自己工作地点发出要求供应毛坯和零件的信号。这些信号在控制台上显示出来。

“章鱼-1”运输机器人的控制装置是由机电元件和半导体元件构成的。

3. 点位控制装置

当程序的信息容量不大时，点位控制装置中各种信息的存储装置采用分立式结构，例如“罗克斯 (Рокс) II”型机器人的TKC-10控制装置。此时，每一种信息存储在对它说来是最合适的元件中。例如，顺序信息存储在插孔板中，而位置信息和时间信息存储在电位计中。在最简单的点位控制装置中，这种分立结构能更灵活地利用程序信息。在程序容量增大时，位置信息和顺序信息可以结合起来，并且存储在存储装置的一个部件中（例如“尤尼曼特”机器人）；或者位置信息、顺序信息和时间信息集中地存储在一个部件中（如RC-700, УПМ装置）。在这种情况下，使用存储装置比较方便，这就保证了能灵活地应用信息。

点位控制原理图如图4.6所示。点位控制装置的控制位置部件是由控制机械手环节位置的离散定位部件和控制生产设备的“接通-断开”部件组成。离散定位部件是对给定程序与从机械手敏感装置引出的机械手环节的位置信号进行比较的装置，或做成能向机械手的步进式传动装置给出定量控制

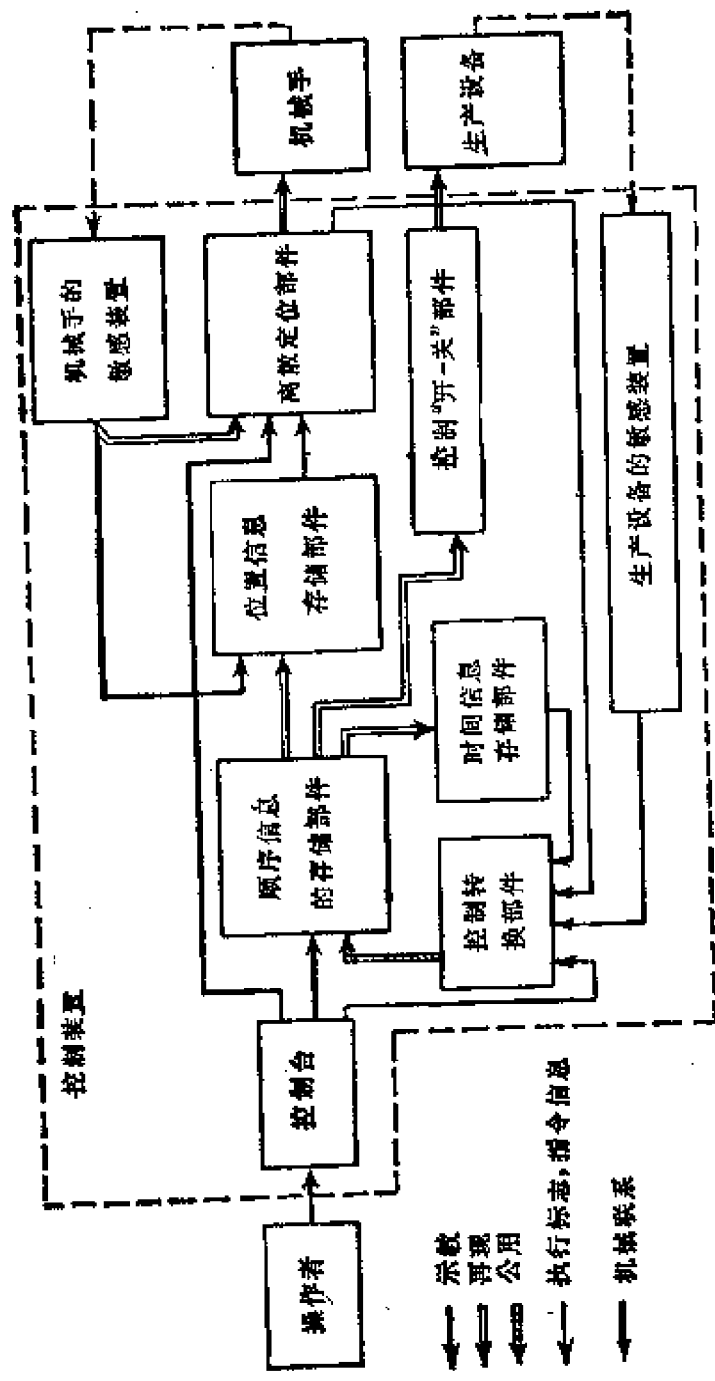


图 4.6

作用的装置。实现点位间的位移时，离散定位部件足以能够对机器人的机械手传动装置形成离散（阶梯）的位移控制作用。

点位控制装置中，除主控制台外，常还设置有对机器人示教时用的携带式手控台。有时手控台和主控制台构造在一起。

作为例子，我们来研究如下几种点位控制装置，即由列宁格勒机电工厂联合企业研制的标准控制装置，由列宁格勒加里宁工学院研制的数模装置，日本的“新明和”公司焊接机器人的控制装置。制造点位数字程序控制的标准控制装置有二种方案：（1）УПМ-772，УПМ-552型用来控制具有闭环伺服传动装置的机械手；（2）УПМ-331型用来控制具有开环步进传动装置的机械手。

图 4.7 给出了用于控制闭环伺服传动的标准控制装置的结构图。控制装置里包括中心计算装置，即在统一的操作-逻辑部件中，按顺序对信息进行处理^[54]。控制装置的各部件之间的信息通过 A，B，C 母线进行交换。

控制程序存储在记忆存储部件的磁带上。存储装置的磁带上存储程序最多能够达到2000个程序段。半导体型缓冲寄存装置能存储程序信息达32个程序段。微程序自动器产生与控制装置的算法相对应的微操作和微指令的控制信号。控制机械手各环节的传动装置的控制部件是由标准的数码-电压变换器构成的。变换器由6级 $R-2R$ 线路组成的。变换器最大输出信号电压为10伏。

测量部件的作用是将机械手各环节的位置传感器信号转换成数码，而且一个测量部件包括8个以内的相同通道，8个通道的感应式传感器有公用电源。测量部件的变换位数

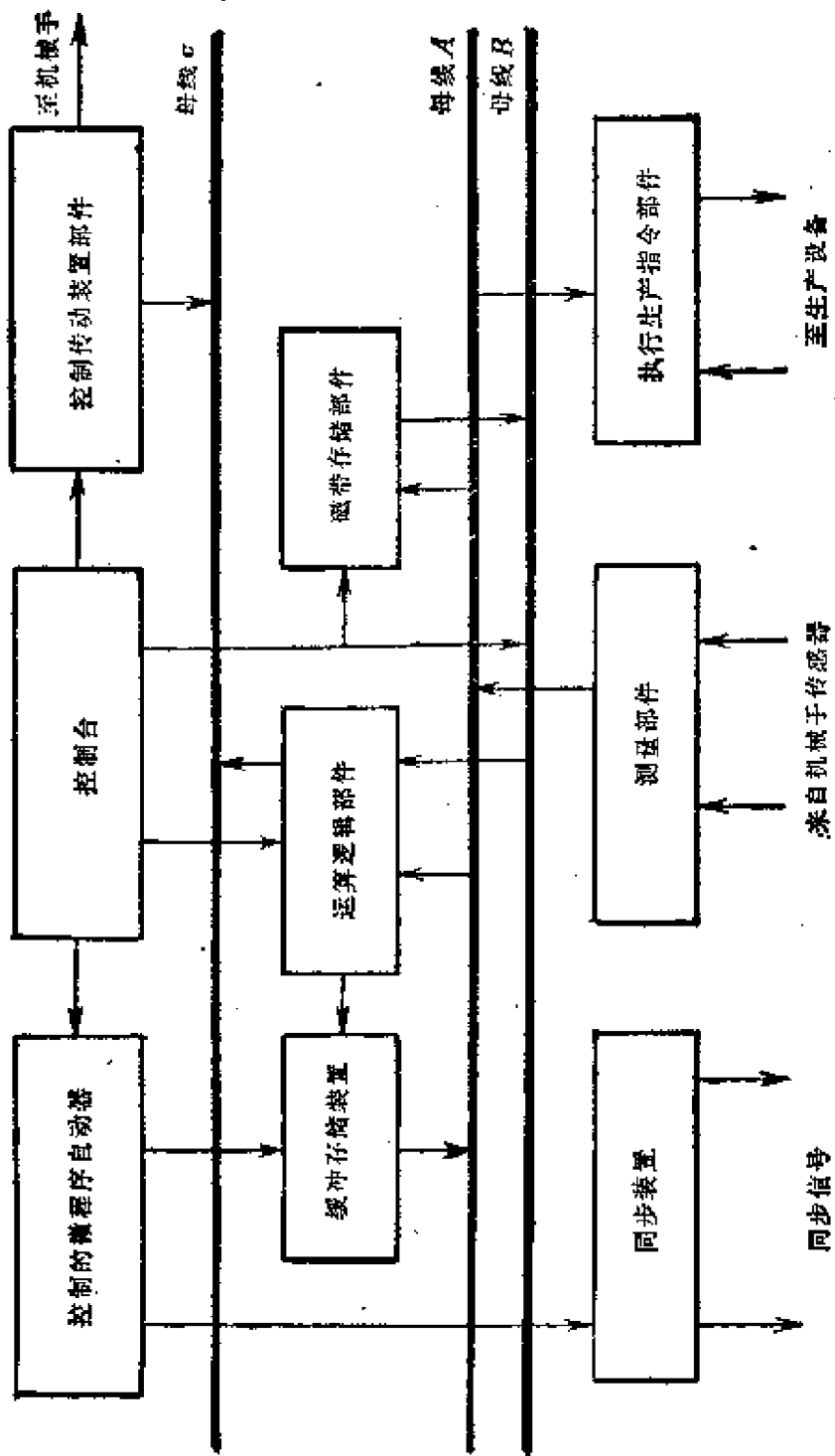


图 4.7

是15。

执行生产指令的部件，向生产设备和机械手发出15个指令，并且同时发送出对象的四个特征。生产指令的输出是继电式的。另外，该部件还由生产设备和机械手取得关于执行生产指令的信号。

同步部件给出使装置同步工作的脉冲序列，同时也给出为使测量系统工作和形成延迟时间所必须的各种频率的信号。

控制台的作用是接通控制装置，给定工作状态，组织手控输入信息和信息的数字显示。

控制装置是由具有离散元件的新型组件的K-155系列集成微型电路组成的。

УПМ-552型和УПМ-772型控制装置技术特性：控制系统型式是点位式的、数字式的；读数系统是以绝对值显示；被控制坐标数可达到7；编程序方法为示教法。

事先规定以一种运动速度和一种精度等级同时对所有坐标的程序段编程（有四种运动速度和三个精度等级）。根据目标的信号或者根据控制台的控制信号，选择所要求的程序。考虑有条件或无条件转移的指令，也就是按照目标的信号（可达到32个）保证程序的执行。对于工作在笛卡儿坐标系中的机械手能保证完成包装箱装卸程序。磁带上的区域号码，程序段的号码（4个十位码）要有数字显示，而且正在工作的信息也要有信号显示。

机械手同外部设备之间交换生产信息的方法有：

沿19条母线发送指令（15个指令，4个同时发出的目标特征）；

沿15条母线接收生产回答信号；

沿 32 条母线接收实现程序的完成条件信号；

沿 4 条母线接收由控制对象传来的选择程序的询问；

执行生产指令的时间延迟的范围为 0~30 秒；

控制装置向传动装置输出的信号，当负载电流为 5 毫安时，是 ± 10 伏直流电压。

传动装置具有分级启动-制动特性，制动级数不低于 7，各级大小可调。

反馈传感器是 CKTД-6465Д 型双读数正余弦旋转变压器。

控制装置是由频率为 50 ± 1 赫，电压为 $(380/220) \pm 1\%$ 伏的三相交流电源供电。所需功率不大于 1.5 千瓦。控制装置尺寸不大于 $470 \times 650 \times 1700$ 毫米。控制装置的重量不超过 500 公斤。

对于由生产组织及工艺科学研究所制造的 ПР-35 型工业机器人模型，列宁格勒加里宁工学院研制了点位程序控制的数模装置（研制代号：机器人-Д）。

这种装置有如下特性。有 6 个同时受控的运动自由度。为控制手爪能给出直流电压 24 伏，电流 3.5 安的信号。有 12 个控制外部设备的输出。该装置能对离散度为 0.2 秒、步距为 0~6.4 秒和离散度为 0.4 秒、步距为 0~13 秒的延迟时间编制程序。这一装置的运算存储器容量为 4096 个具有十六位的语句。同时存储在运算存储器内的程序数可达 8 个，最大程序容量可等于存储器的全部容量。规定能用外部装置的信号转换程序。由一个程序给定的机器人的最多点位数为 $N = (32 \sim 64) n$ ，式中 $n = 1 \sim 8$ ，取决于定位精度。这一装置能保证将程序从外部存储装置存到运算存储装置中，甚至用光电读出装置时也能工作。

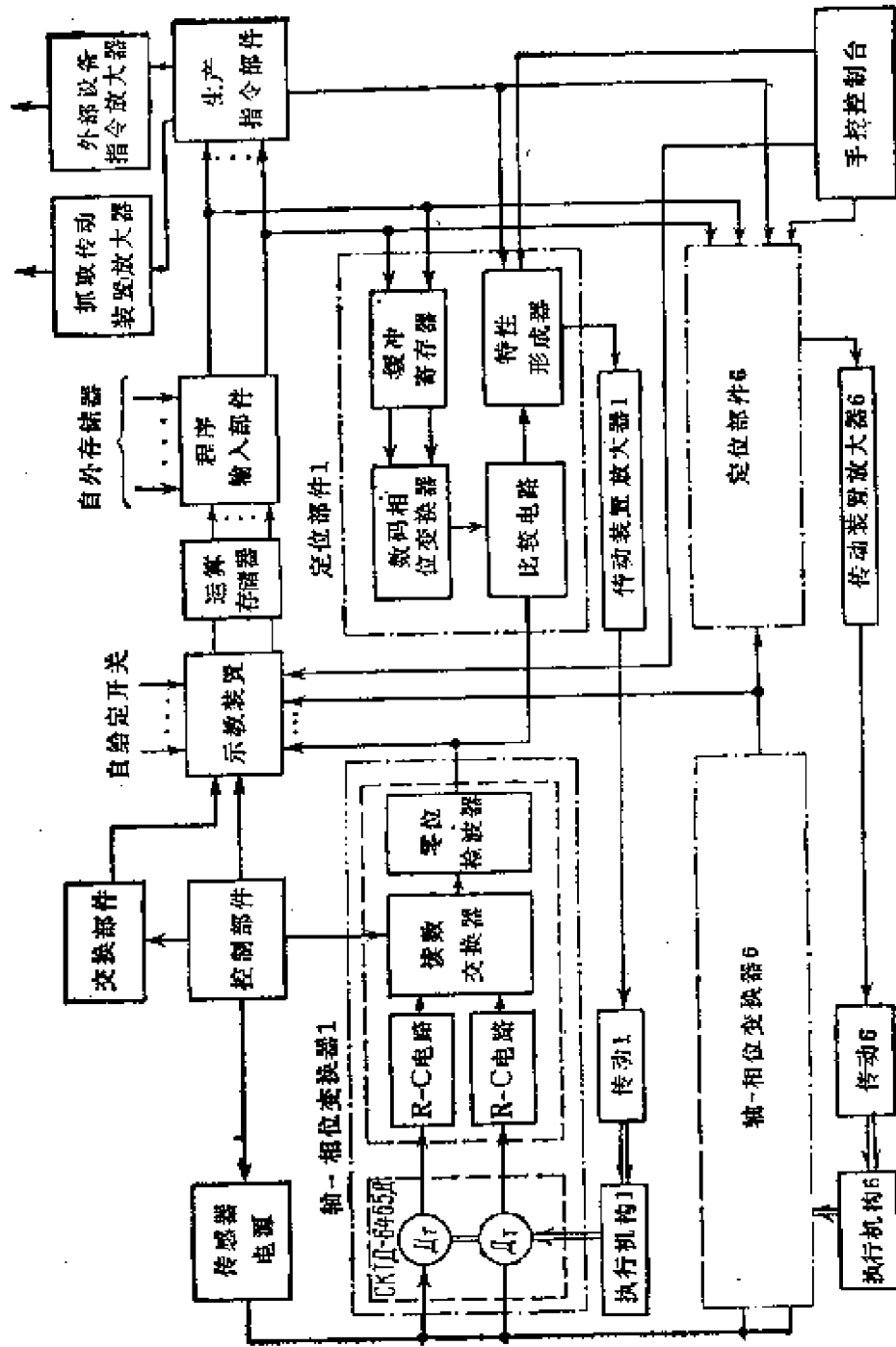


图 4.8

位置传感器是CKTII-6465型双读数正余弦旋转变压器。当定位精度等级为I、II、III级时，折算到传感器轴上相应的位置误差不超过 $\pm 2'$ 、 $\pm 20'$ 和 $\pm 3^\circ$ 。控制信号与失调之间关系的输出特性可以调节，并且能从线性关系变为二次曲线关系。输出信号变化范围在 $0 \sim 360^\circ$ 内调节。该装置保证能够编制减速运动（在最大速度的20~100%范围内调节）的程序。控制装置（参看图4.8）工作在两种状态：示教状态和自动再现状态。

在示教状态时，操作者借助手控控制台将机械手依次地引导到工作循环所有的点位处。同时操作人员用按键开关在控制装置的面板上编排必要的生产指令。依照“写入”信号（用手控控制台上的按钮），从位置传感器和生产指令键读出信号，并将信息存储到运算存储装置中。示教时，在示教装置中用相位-数码变换器进行位置的数字测量。六个坐标共用一个变换器。每一个坐标相位移的形成器轮流地接到这一变换器上。在计数器中相位移变换成数码。计数器计算等于相位移的时间间隔中的脉冲数目，计数器的计数频率为1.6兆赫。

用安装在控制台上的转换开关设置定位精度等级，并连同生产指令同时存储起来。若存储程序时，转换开关处于“二级精度”或者“三级精度”的位置上（对应的非灵敏区为 $\pm 20'$ 和 $\pm 3^\circ$ ），则仅将位置信息的粗读数存储到运算存储器中。若转换开关处于“一级精度”的位置上，除了粗读数的程序段外，则还要自动地存储包含有精读数位置信息的附加程序段。

在这种情况下，因为根据精读数定位之前必须进入“二级精度”范围内，所以粗读数程序段中自动地存储“二级精

度”指令，这就使得粗读数只整定在“二级精度”上。在必须实现要求的低速运动时，就编制“慢行”指令程序。将面板上的转换开关置于速度降低值（最大速度的20~100%范围内）。

除上述外，还要编制接入外部设备、产生时间延迟、控制手爪等生产指令程序。在给定“接通外部设备”指令时，操作者要将十二个闭锁键中的一个键按下去。将外部设备的号码进行编码，并以二进制四位数码的形式存储在运算存储器中。用五个独立的键装定延迟时间的大小。按下某一个键就是在总时间内增加了一定的时间（0.4、0.8、1.6、3.2、6.4之中的一个值）。

时间延迟指令以二进制五位数码的形式存储在运算存储器中。用手控台上的二位开关给出控制手爪指令，并以二位数码的数字形式存入运算存储器中。

每当编制程序结束时，操作者在存储下一个点位时要加入“程序结束”指令。假若程序的容量超过64个程序段，要编制“转移”指令，转移到存储装置的下一个区域。

在示教过程中，利用有荧光显示程序段号码的指示灯泡，操作者监视存入存储器内的程序段数目。每当一个程序段写入之后，往专用交换器中输入移位一步的脉冲，以此进行程序段号码的转换。交换器给出存储该程序段的运算存储器数字单元地址。在示教开始时，操作者要将程序段交换器装定在初始位置。能存储程序段的最大数目为 64×8 个。考虑到每存储一个一级精度的点位要占用二个程序段，所以有可能存储一级精度的点位不超过 32×8 个，而存储二级或三级精度的点位不超过 64×8 个。

用A-211-8型磁芯运算存储器作为存储装置。存储容量

为4096个十六位数码语句，所以它能够存储8个程序，每个程序具有上面所说的精读和粗读点位数目。程序段的容量等于8个十六位数码语句。在运算存储器中，地址以十六位二进制数码输出。头三位码表示程序区域的号码，并由控制装置面板上的转换开关给出。在自动再现时，程序区域的号码同样可用外部信号给定，为此考虑了专门的输入端。后面六位码标志程序段的号码（ $2^6=64$ ）。地址的最后三位码标志程序段语句的号码，而且是用语句号码交换器建立的。这个交换器是一个在存储时进行记录循环的计数器。除标地址外，在示教时语句地址码交换器还用于位置测量通道的交换。因此，装定交换器的工作频率要考虑完成相位-编码变换的时间，这一频率在示教时定为100赫，在再现时为1.6千赫。

在自动再现状态（“自动”状态）下，由存储装置给出数码的顺序是和示教时存入的顺序完全相同，并且可将它们用于给定机械手各环节的位置和生产指令。

瞬时位置和给定位置的信息以模拟量（相位）进行比较。按每一个坐标给定的点位编码，由运算存储器读出来，并存储在缓冲寄存器中，且变换成相位。这一相位与在轴-相位变换器输出端形成的瞬时位置的相位进行比较，比较结果（差异）加到输出信号特性形成器上，进而加到传动装置放大器中去。

在输入当前轮到的程序段时，给定定位状态的指令（如“二级精度”，“慢速”，“精确”等）存储到缓冲寄存器中，在定位过程中进而执行这些定位状态的指令。给设备发出的指令（生产指令）存储在寄存器中，并且只有在实现所有坐标的定位之后才执行这一指令。根据“已到位”信号对存储器进行附加询问，并给出在寄存器中存储生产指令的许可信号。

当得到执行生产指令的回答信号时，向程序段的交换器发出脉冲。程序段的交换器动作一步。此后，向存储器寻址，根据交换器给出的相应的新地址，由运算存储装置给出当前轮到的程序段的数码。

在执行完生产指令后，当从运算存储器输出“程序结束”指令时，程序段的交换器装定在初始位置，并开始重复执行程序（循环）。置于“自动机”状态，除能连续进行再现外，还能只再现一个循环或一步，这就要把“工作状态”转换开关分别放在“循环”或“单步”的位置上。在完成一个循环或一步之后，机器人就停了下来，并且只有按下“自动机”按钮以后才又开始执行当前轮到的循环或步。利用“循环”或“单步”状态，在示教之后进行检验完成程序的正确性。在必要时程序要加以校正。为此，当一步步再现程序时，操作者在记录器中记录下所有与希望的点位及生产指令的偏差值，并将对应于这些偏差的程序段的号码存储起来。将装置转换成示教状态，根据记录数据，操作者重新设置点位、生产指令和与这些相对应的程序段号码，重新存储所有必要的信息。在这种情况下，用“转移”按钮和“解脱”按钮（装定在初始位置）控制程序段的交换器（交换器的动作频率为1赫兹）。

由控制装置面板上的白炽灯显示的十二位数码作为位置指示，操作者可利用位置指示检验点位到位的正确性。在这种情况下，“工作状态”转换开关放到“指示”位置上。用按键进行测量通道的转接。位置指示有精读数 and 粗读数，为此要设置专用的读数转换开关。为进行测量，必须按下并再放开“测量”按钮。之后从指示灯泡能读出位置的数码。

能用时间间隔的信号完成所有必须的功能转换乃是这种

控制装置突出的特点。这就大大地减少了微型电路，简化了各个功能部件之间联系。

现在来分析控制装置的基本部件，即定位装置的原理线路。定位装置（图 4.9）是用来对给定位置（是十二位的二进制码）与瞬时位置（是相移）进行比较，并形成控制传动装置的信号。

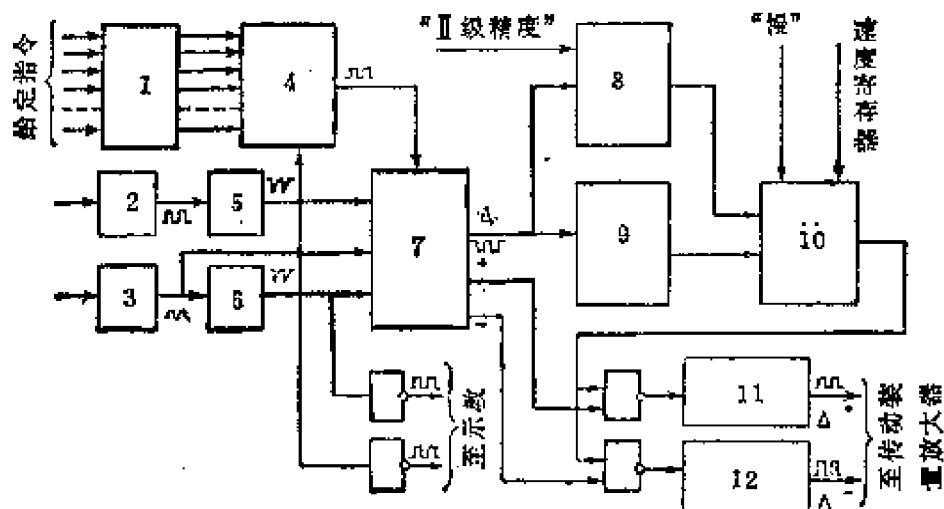


图 4.9

1—存储寄存器；2—输入形成器 1；3—输入形成器 2；4—数码-脉冲宽度变换器；5—微分电路 1；6—微分电路 2；7—比较电路；8—定位精度选择器；9—控制信号特性斜率形成电路；10—速度限制电路；11—控制信号常值分量形成器(+)；12—控制信号常值分量形成器(-)。

定位装置包括：存储寄存器、数码-脉冲宽度变换器、输入形成器、微分电路、比较电路、定位精度选择电路、控制信号特性斜率形成电路、速度限制电路、控制信号常值分量形成器。

由运算存储器给定的数码加到存储装置的寄存器中，进而送到数码-脉冲宽度变换器中。这一变换器是由一个计数器和一个数码重合电路组成。从数码-脉冲宽度变换器输出

端给出的位置信息是带有相应宽度的脉冲，该脉冲加到比较线路的输入端。

环节的瞬时位置的信号以幅值为12伏的脉冲从轴-相位变换器加到输入形成器1和输入形成器2中去。由形成器的输出端取得正极性的、幅值为4伏的脉冲，加给微分电路。当输入脉冲反向下落时（脉冲后沿），在微分电路中形成短脉冲 φ_1 和 φ_2 。脉冲之间的时间间隔正比于环节的瞬时位置。

脉冲 φ_1 和 φ_2 从定位装置传送到示教装置，以便形成环节瞬时位置的数码。脉冲 φ_1 同时还加到数码-脉冲宽度变换器上，以使数码-时间间隔变换电路同步工作。由几个寄存器和重合电路组成了比较电路，由这电路形成差异信号。差异信号的形成是脉冲的宽度和运动的符号。比较电路输出的差异信号 Δ 加到控制信号特性斜率形成电路和定位精度选择电路上。

控制信号特性斜率形成电路是一个能调节放大系数的脉冲宽度放大器，它保证形成输出特性。

精度选择电路是根据延迟 Δ 脉冲前沿原理进行工作的。

当工作在I级精度时则没有延迟。当工作在II级和III级精度时，脉冲前沿有延迟，它保证在到达给定点之前 $20'$ 或 $3''$ 就产生出定位结束信号。

速度限制电路根据被调节设备确定由信号特性斜率形成器送来的脉冲的宽度，从而给出了环节运动的最大速度。

固定不变速度形成器给定环节所具有的低速水平，以这一速度趋于定位点。控制信号常值分量形成器是一个单向振子，它根据输入脉冲后沿形成宽度不变的脉冲。

定位装置所有电路都以400循环/秒工作，这就保证装置抗干扰性好。由于有了新型电路，总共用30个微型电路和数量

不多的离散组件就可构成完成一整套功能的定位装置，如完成数码-时间间隔变换。信号比较、被调节的输出特性的形成、给定执行精度等级等等功能。与用数字方法实现上述功能的情况相比较，电路和组件的数量可以减少近 1/2。

按照在“机器人-Ⅱ”的装置中用过的线路技术解决问题的方法，列宁格勒加里宁工学院研制了控制“西格马”工业机器人的定位装置。存储装置是由 K519 系列集成半导体微型电路组成的，这种集成电路能够电气更换信息和在电源断开后保存信息。存储装置具有模片形式的结构，并且具有用模片扩展存储容量的可能性，其容量可由 256 个十六位数字扩展到最大容量 2048 个十六位数字。机械手运动自由度的位置（坐标）的信息用比较简洁的方法存储，即采用了构成长度可变的程序段的方法。当存储机器人在示教过程中的程序时，不需要执行的运动自由度的坐标就不存入存储器中。仅仅在必须精确实现位置的情况下方存储精读数坐标值。为此，在程序段的控制语句中规定实现每一个坐标的标记。能存储在存储装置中的点位的数量 N 用如下公式计算：

$$N = \frac{Q - P}{n + 1}$$

式中， Q ——存储容量； P ——无“运动”指令程序段数； n ——参与运动的坐标平均数（考虑存储精读数）。

在“西格码”工业机器人控制装置中，扩大了根据内部和外部条件改变程序过程的能力。这就使得能够完成装箱的工作以及根据从生产工段发来的外部信号灵活地改变程序的进程。程序分支由在程序的任何地方加入条件转移指令来保证。根据紧跟转移地址后的一个地址完成程序复原。以无条件转移指令保证程序的自由安排（如增加新的部分，去掉不

必要的部分), 这种指令同样也可以加在程序的任何地方。

这种装置既可用双读数的, 也可用单读数的感应式 CKTД-6465Д型、BTM-1B型正余弦旋转变压器及 BC-15A 型自整角机进行工作, 也可以用具相似线路的其他类型传感器工作, 电路的电源频率为 400 赫兹、供电电压为 18 伏特时总共需电流不大于 1 安培。传感器工作在移相状态。这装置有成对方式工作的传感器 (旋转变压器及自整角机) 的信号形成器, 信号形成器从装置中分出来, 放置在机械手上靠近传感器处。一个机械手上可以采用不同类型的传感器。

制动特性在 $3^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内进行调节, 且与各个坐标无关。制动特性可从线性形式变到四次曲线形式。

规定在这种装置中能编制四个定位精度等级的程序。在零级时, 定位精度取决于系统测量部分的最大分辨率, 对 I ~ III 级精度, 定位精度分别为 ± 2.6 、 $\pm 20'$ 、 $\pm 3'$ 。

在控制机械手的传动装置时, 要保证能平滑地加速和制动。被控坐标数目 3 ~ 8 个, 此外还加上手爪的控制。该装置做成柜台式结构, 尺寸为 $350 \times 400 \times 1100$ 毫米。装置的控制-计算部分是以 K-155 系列集成微电路为基础, 采用有中等集成度的元件制成的。

示教和手控台装在控制板内, 且与控制装置分开, 以便于进行机器人示教。

作为点位控制装置的下一个例子, 现在来研究由日本“新明和”公司研制的电弧焊机器人的控制装置。

两个机械部分之间的运动自由度分开, 这是所研究的机器人结构特点。有三个运动自由度, 一个属于位置控制器, 二个属于机械手。机器人用途是焊接简单的焊缝, 即只要求沿直线或圆周运动的焊接。被焊接的零件用夹具固定在位置

控制器的花盘上。机器人的程序穿在穿孔纸带上，因此，控制装置中要有读纸带的装置和输出装置。图4.10给出了机器人示教原理图。

在示教状态下，操作者用远距离控制台上的转换开关，

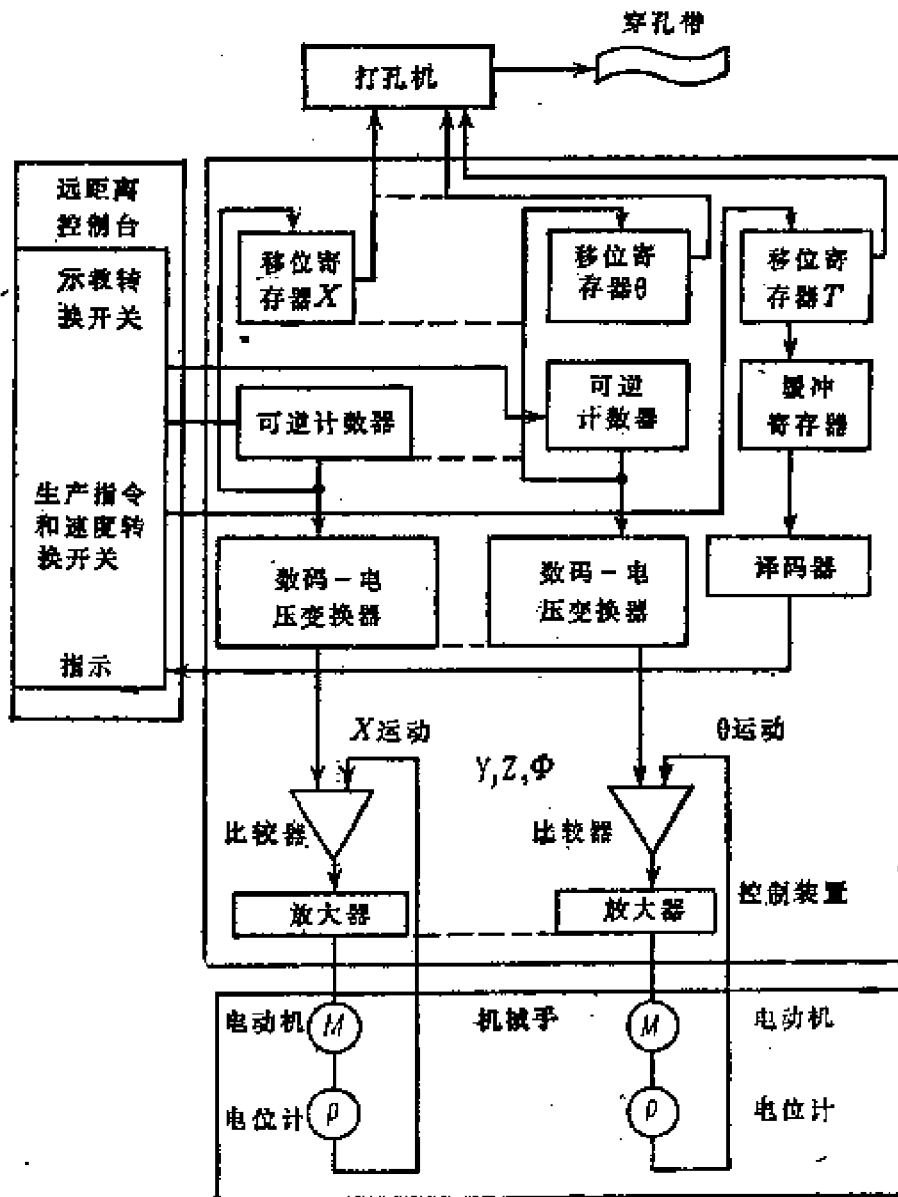


图 4.10

给可逆式坐标计数器加入一定数量脉冲，就能控制位置控制器和机械手的环节的运动。计数器中形成的数字码经由十二位的数码-电压变换器转换成电压，之后加到伺服传动装置的比较器中。这一电压和从电位计传感器上得到的位置信号的实际值进行比较。由直流电动机组成的机器人伺服传动装置使上述比较出的差值信号趋于零，这样就使环节达到了所要求的位置。环节的位置数字码从可逆计数器输出端以并行码形式转储到移位寄存器 $X \cdots \theta$ 中。操作者借助给定生产指令和速度的转换开关，在移位寄存器 T 中编排闭锁信息、焊接参数信息、沿 X 、 Y 、 Z 轴和 θ 轴的运动速度的信息。在一个程序段信息编排好之后，根据控制台的信号，保存在移位寄存器中的信息以串行码形式送到穿孔机中，并穿在穿孔纸带上。图4.11标出了在穿孔纸带上一个程序段信息的配置情况。

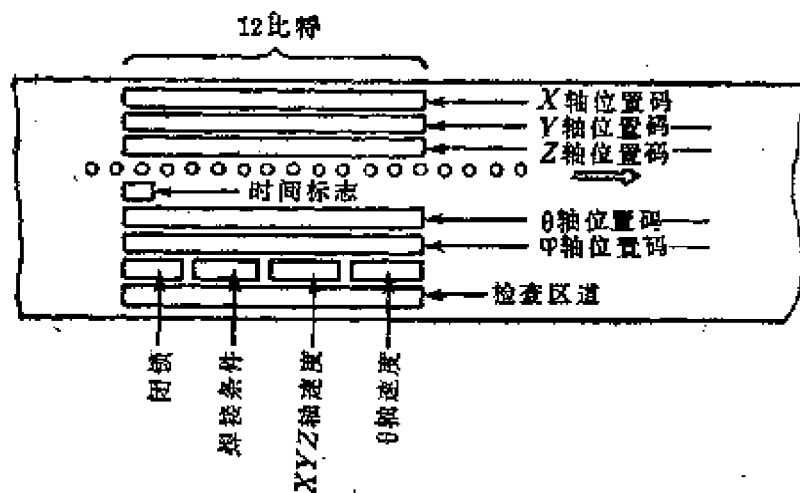


图 4.11

图4.12给出了执行程序的原理图。从穿孔纸带上将信息以串行码的形式送到移位寄存器，之后以并行码形式转储到

缓冲部件中（计数器和寄存器）。再后，按上述所说的方法处理坐标给定值。生产信息和速度信息送到译码器，并以一般方法进行处理。

机器人的控制系统保证电极相对焊件的定位精度为

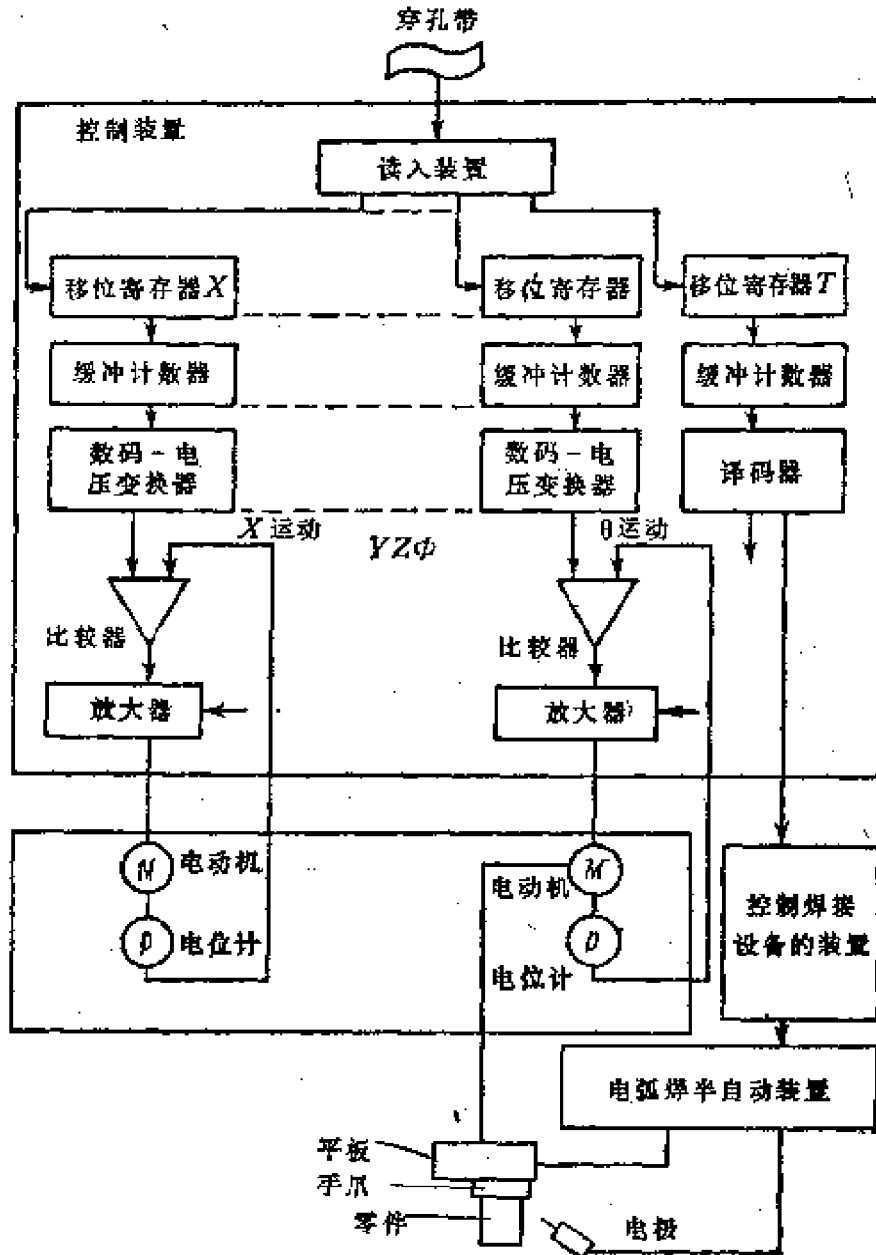


图 4.12

± 0.5 毫米。

工业机器人的限位器式点位控制装置(循环式控制装置)和点位式控制装置的主要使用范围首先取决于定位点数、定位精度和动作快速性。

采用限位器定位控制方法的机械手结构特性限制了手爪定位点数, 平均每个运动自由度最多为 2~4 个定位点(虽然个别运动自由度的定位点数可达 8 个)。所以, 对于具有四个主要运动自由度(升-降、水平转动、伸-缩、手爪转动)的机械手, 手爪定位点数平均为 20~40 个。假若除去原始位置并且考虑到大部分点位是在中间位置定位(接近和离开), 那么, 对于采用限位器定位方法控制的机器人, 同生产设备相互作用的点数一般不超过 4~6 个。这就意味着, 这种机器人能够用于一个, 最多二个主要生产设备单元及 2~3 个辅助生产设备单元。

至于点位控制机器人的机械手, 在工作区的定位点数实际上没有限制, 并且控制装置能保证同生产设备相互作用点的数目为 10~100, 甚至可更多些, 这相应于存储装置的容量为 50~2000 个点。

为在精度及动作快速性方面对所研究过的方法进行比较, 现在来看看图 4.13 所示的图表。图中对各种机器人给出了机器人手爪移动最大速度 v 与定位精度 δ 之比取 2 为底的对数的值。从图 4.13 可看出, 采用各种控制方法的机器人的明显区别。对所研究的参数, 采用限位器定位方法控制的机器人有最大值。由此就可断定, 这一类型机器人在机器人定位速度方面不次于点位控制机器人(有时还要超过), 而且按固定的限位器定位的精度相当高。

对于具有所研究的两种典型控制系统的机器人, 所引用

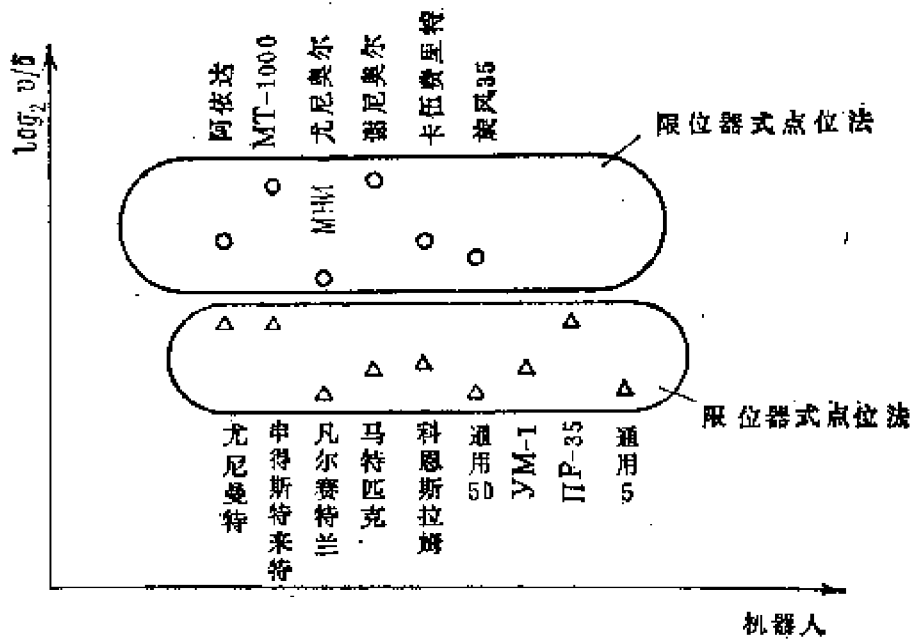


图 4.13

的不同的参数值决定了它们在那些范围里将得到优先使用。当供使用的点数不多且工作速度高时，采用根据限位器定位的方法控制和相应的循环控制系统。当速度不高而程序容量（供使用的点数）大时，采用点位控制机械手的方法和相应的点位控制系统。例如，假若某些生产区域的参数 $\log_2 \frac{v}{\delta}$ 如图4.14所示，那么，在第一工作地须要具有按限位器定位控制的机器人，而在第二工作地须要用点位方法控制的机器人，至于在第三工作地须要设置由二个具有按限位器定位控制的机器人。

使用机器人所积累的经验已经证明上面所说的各点。采用限位器定位系统的机器人供高速冲压设备（几秒钟冲压一次）使用是成功的。在冲压机上料和取件中供使用的点数不多（进料器、冲压机、存料器）。在需要增加使用速度和点数时，常用有双手结构式的机械手，具有点位控制系统的机

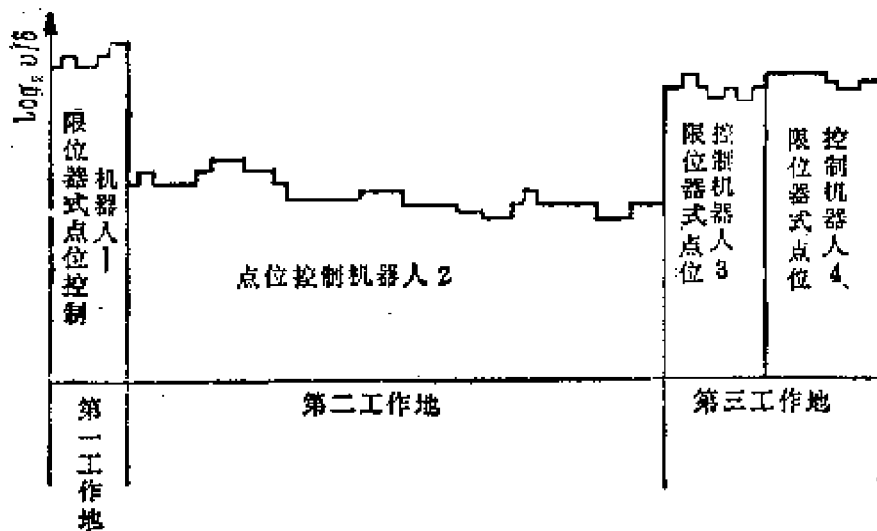


图 4.14

器人在金属加工设备或设备群中得到了应用。此时供使用的点数很多（特别是假若需要加工箱式和盒式工件时），并且由于机时比较多，所以工作速度也不太高。

4. 轮廓控制装置

沿空间连续轨迹控制手爪，必须保证连续地、同步地实现各个坐标。建造轮廓控制装置有两种主要方法，这两种控制装置的区别在于存储和计算部分之间的相互关系不同。第一种方法是基于以连续轨迹形式按每一个坐标存储所要求的位置信息。第二种方法是在于以轨迹上有限个主要点（基点）形式存储位置信息，并且用一定算法以内插法求这些点之间的连续轨迹。在第一种情况下，控制装置中没有计算部件，但为存储所有轨迹要有大容量存储装置。在第二种情况下，为存储各基点，存储装置的容量不大，但必须有计算轨迹的中间各段的计算部件（内插器）。

以连续轨迹形式存储位置信息的工业机器人的轨迹控制

原理图如图4.15所示。所有程序信息集中存放在一个存储顺序信息、位置信息和时间信息的部件中。在控制工业机器人对所需要的信息容量不大的情况下，容易将信息存储到小型存储装置的磁带上（E系列“凡尔萨特兰”型机器人、“塔里伐”机器人），或者存储在小型存储器的磁盘上（“考俄特-额-马蒂克”机器人）。有这类控制系统的机器人直接由操作者用沿要求的轨迹移动机械手的工作机构的方法进行示教。示教时，输入信息的顺序是：操作者-机械手-机械手的感受装置-存储装置。因为执行程序的速度和存储点位之间的增量成正比，所以当载有程序的器件以等速运动时，在示教过程中时间信息连同位置信息和顺序信息一起存储到存储装置中。补充的时间信息（如轨迹的形成速度）用改变载有程序的器件运动速度来引入（E系列“凡尔萨特兰”机器人、“塔里伐”机器人的控制装置）。在这种类型的控制装置中控制转换的部件乃是磁带或磁盘的传动机构，它们能保证载有程序的器件在形成轨迹时以一定速度运动。对于其他类型的控制装置，控制转换的部件就是处理生产指令和延迟时间的一般线路，用调节载有程序的器件的传动机构的运动速度的方法引入补充时间信息，其顺序是控制台-时间信息存储部件-时间装置。

轮廓控制装置的控制部件被制造成在随动状态响应位置信息的连续定位部件和控制接通-断开的部件。在连续定位部件中，或者有比较给定的坐标值和瞬时坐标值的电路，或者有给出定量控制作用的电路（在采用步进传动装置时）。为了形成轨迹，连续定位部件应对机械手各环节的传动装置形成连续控制。

用于喷漆和喷覆盖层的“考俄特-额-马蒂克”工业机器

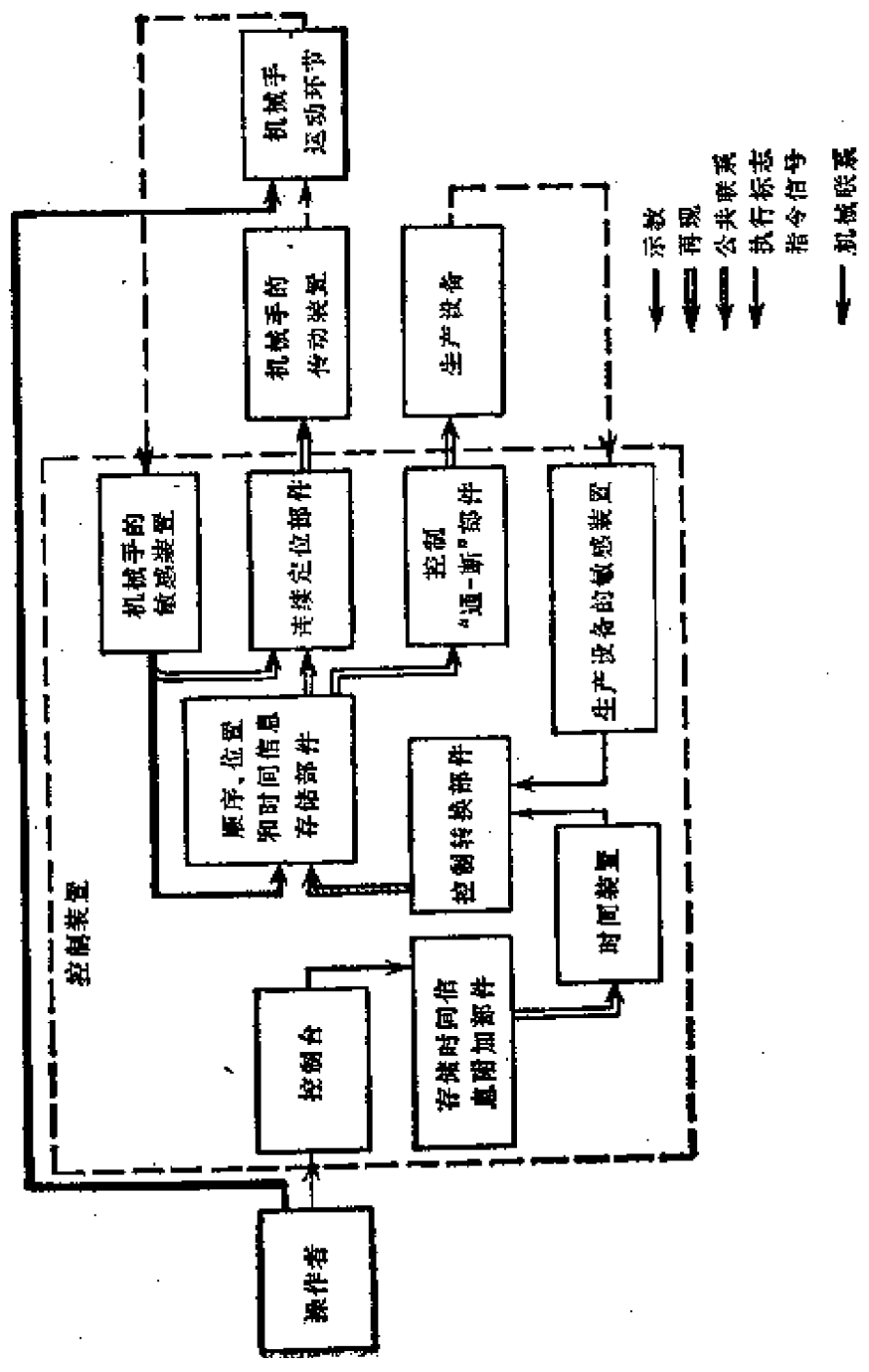


图 4.15

人的控制装置方块图如图4.16所示。这一装置包括机器人各环节的六个相同的定位通道，每个通道包括有伺服放大器和坐标板。控制信号加到电液滑阀上。环节的位置信号从位置传感器（电位计）加到伺服放大器的输入端。

程序信息保存在磁盘中。磁盘通过信号形成器与坐标板相联系。装置包含有指令逻辑部件，这部件和控制板相联系。在控制板上给出装置的工作状态和其他指令信息，指示出装置和机器人工作状态。这一部件也还从外部装置中取得信号。控制数据的部件保证在坐标板和磁盘之间一位一位地传递信息。逻辑检查部件使各部件同步工作。

在机器人示教时，操作者使握有喷雾器的手爪通过希望的轨迹，从传感器上取得的轨迹坐标信号电压（0~10伏）变换成数字码，并且将它们存储在所有运动自由度的坐标板上。数字码从坐标板送到形成器，并转储到磁盘中。这样就形成了机械手的位移程序，其形式是轨迹的连续序列点，同时发出接通喷雾器和使生产设备闭锁的指令。

在再现状态时，轨迹的坐标点的值从磁盘读出送到形成器中，并且一位一位地再现到坐标上。在变换成电压后，坐标板给定值的信号在伺服放大部件里同位置传感器信号进行比较。之后，得到的失调信号控制各运动自由度的电液传动装置的阀门，保证在伺服状态下实现给定的轨迹。

日本的“卡瓦萨基尤尼曼特”5040型机器人、瑞典的“阿塞额”机器人以及日本“三菱”同“八幡”公司联合制造的喷漆机器人的控制装置都是按照带有插补器的轮廓控制线路（图4.17）建造的。“卡瓦萨基尤尼曼特”及“阿塞额”机器人轨迹的信息以手控过程所需要的顺序中个别点形式存储在位置和顺序信息存储部件中。按如下顺序进行手控：操

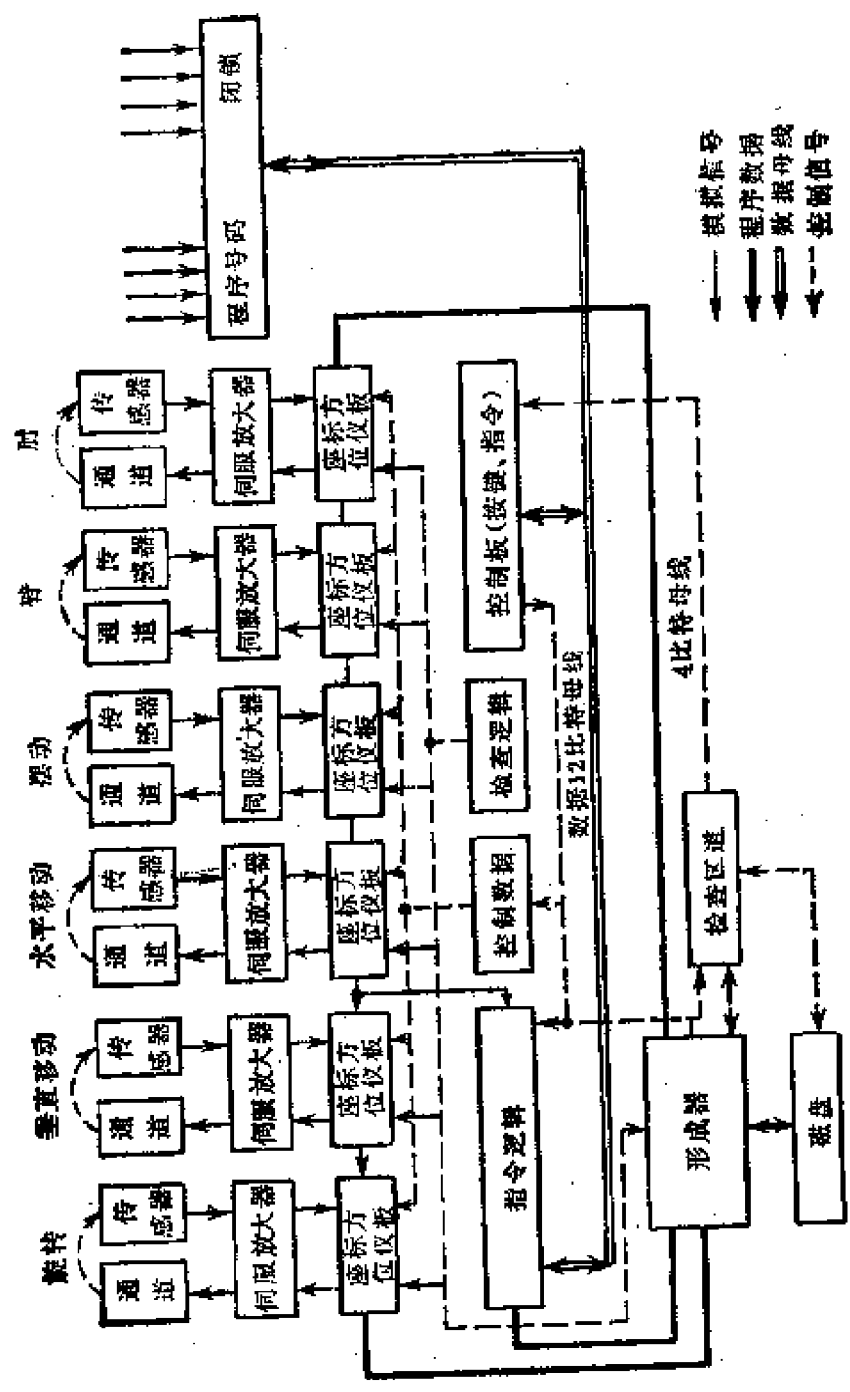


图 4.16

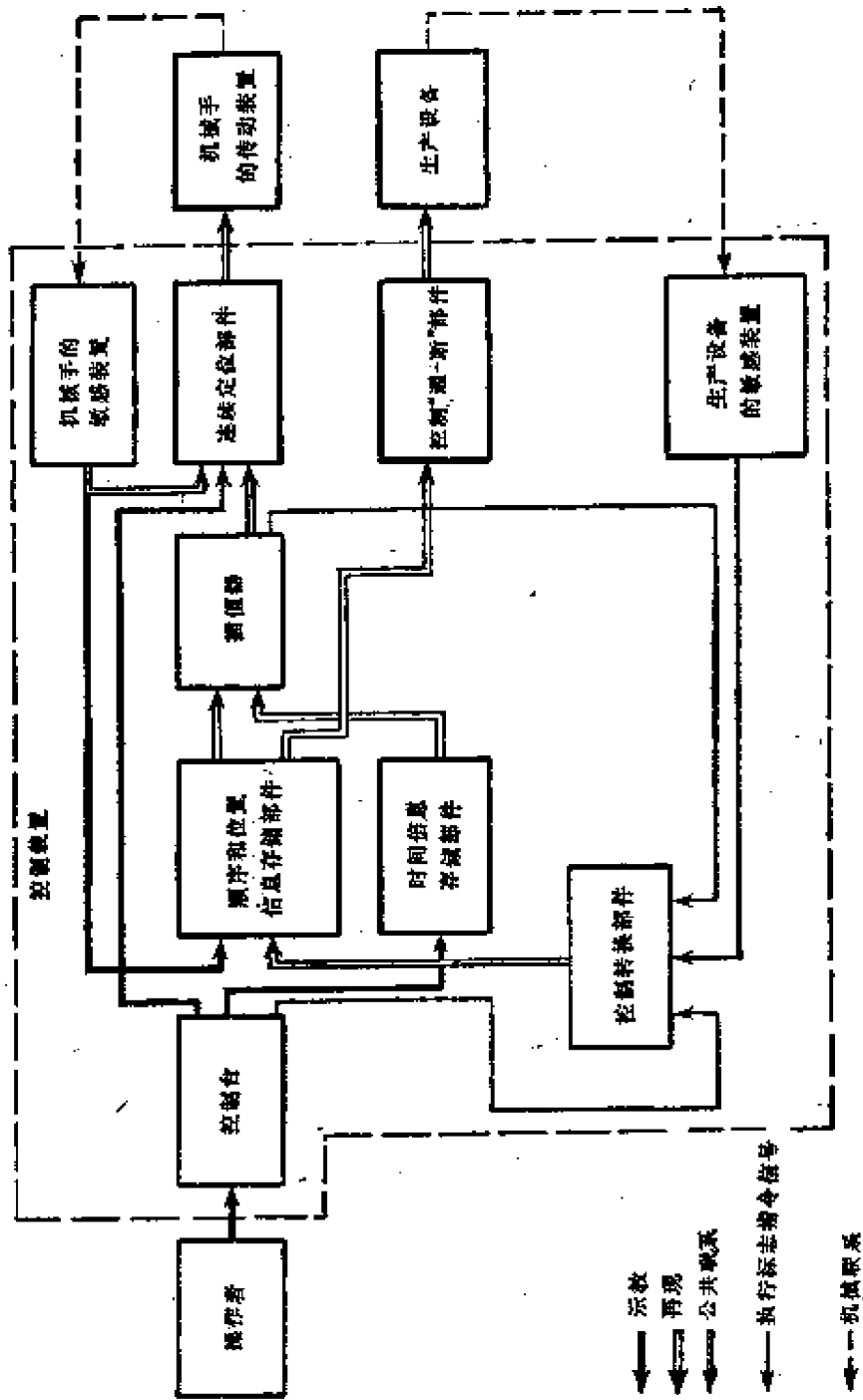


图 4.17

作者—控制台—连续定位部件—机械手传动装置。程序输入次序是：机械手敏感装置—位置和顺序信息的存储部件。时间信息存储次序为：操作者—控制台—时间信息存储部件。

在再现程序时，在插补器中进行中间值的计算，并将所得到的结果送到连续定位部件中。在时间信息的存储装置中给定中间值的给出速度，也就是轨迹形成速度。在处理完基点之间的区间后，插补器在控制转换部件中给出准备处理下一区间的信号，按照有插补器的线路组成控制装置中的控制转换部件，它和点位控制装置的控制转换部件相类似。按照图4.17所示线路也可实现轮廓-点位控制（在点位控制状态时，不用插补器）。

“三菱-八幡”喷漆机器人控制装置有自己的特点。在示教过程中，用由操作者直接使喷雾器按希望的轨迹运动的方法，引进轨迹各点的坐标。在用磁鼓制成的存储装置中，用固定的频率实现信息的存储。存储信息的频率比较低（10赫兹），所以以离散点序列形式存储轨迹。在再现时，对存储的坐标进行简化的线性插补计算。用类似的解决方法可以获得更可靠的控制装置，这是由于磁鼓构成的存储装置比圆盘磁存储装置有较高的可靠性。一个存储部件能够存储再现时间总共为136秒的4个程序。采用能产生速度信号（每周4096个脉冲）的十位编码传感器作为位置传感器。

轮廓控制系统主要不是用在机器人为生产设备服务情况，而是用来作为生产设备完成生产操作，如喷覆盖层，进行焊接，气割等等。按照生产过程不同，对控制装置既可以要求在很小的工作速度下以高精度形成轨迹（如电焊），或者与此相反，在形成轨迹时精度要求不太高，但要求具有较高的工作速度（如喷覆盖层）。

第五章 机器人的计算机控制系统

1. 机器人控制系统的结构

在笼统地研究机器人控制系统时，通常把控制系统分为三级^[20]。但是，当研究这些结构，特别是综合这些结构时，把一个控制系统分为在算法上更专门的几级是合理的。图5.1是机器人自动控制系统一般结构图，图中分为五个控制级别。

第一控制级（低级）是传动装置。每套传动装置都是由执行电动机及控制装置组成的。这一级是按机器人每个运动自由度实现控制的。机器人工作的动态特性和精度首先取决于这级的特性。后面的四个控制级用计算机来实现。在这四级之上是操作人员，操作人员形成了最高级控制级。操作人员通过工作台与机器人进行联系，工作台包括电子计算机标准终端及专用的联系装置。操作人员给机器人分派任务、监视完成任务、并对机器人整个工作过程进行总的监督。这种自动化控制状态叫作监控状态。

第五控制级分析操作人员给定的任务，并根据任务决定机器人的工作顺序，也就是决定机器人的活动计划。这一级还分析由感受装置得到的外界信息和建立外部环境模型，并以外部环境模型为基础决定机器人的工作计划。在一般情况下，外界环境模型可分成不同的等级，即从最具体初始的模型到比较抽象的模型。初始的模型是由感受元件直接确

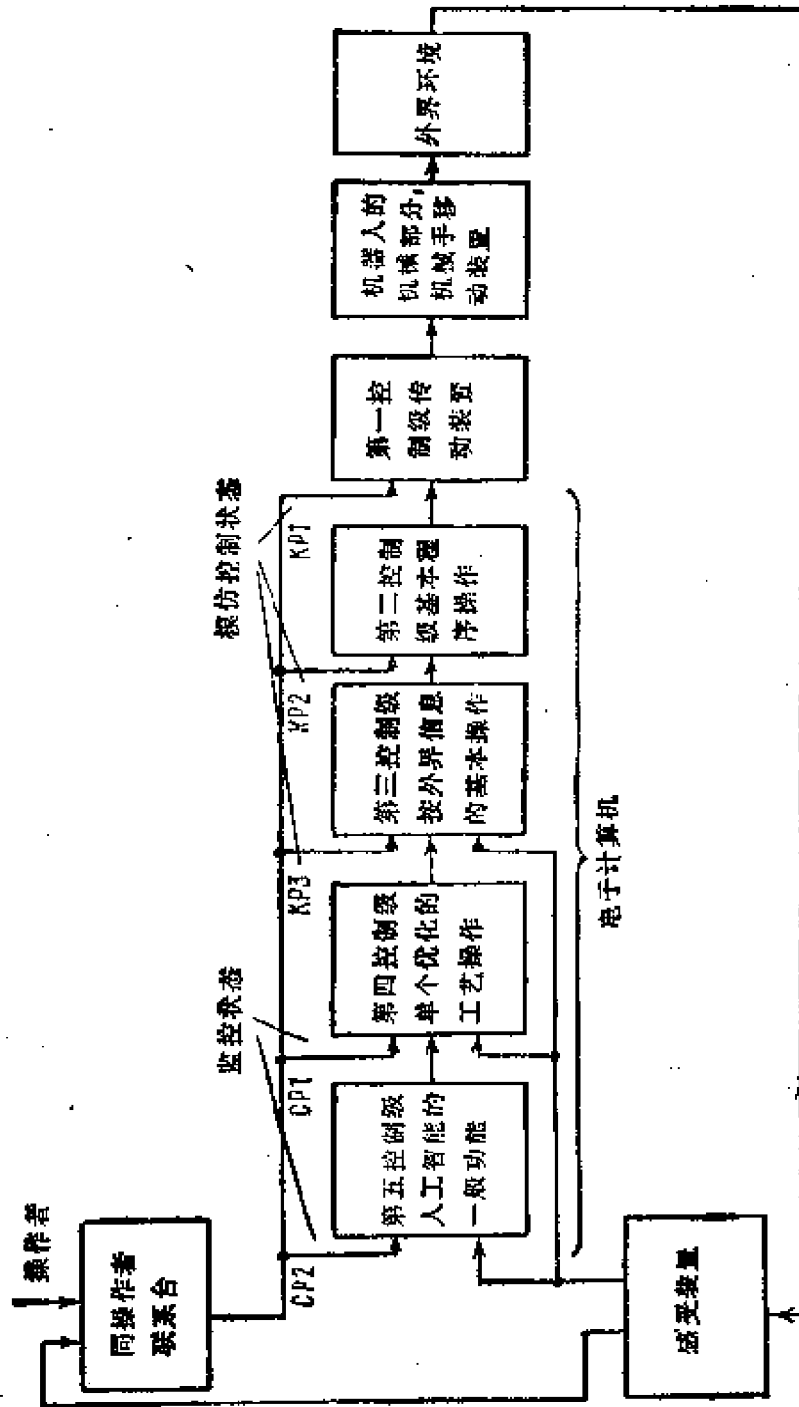


图 5.1

定的环境参数来描述的，而比较抽象的模型则是用相应的比较广义的概念来描述外界环境的（例如，用操作人员的自然语言进行口头描述）。在工作过程中外界环境模型可得到修正和完善。

第五控制级保证机器人作为统一系统的功能，其中包括该系统算法的自动改善。这一控制级不仅要保证实现操作人员向机器人提出的主要“专职的”目的，而且要保证实现整个系统其余的全部辅助性任务，这些任务是根据向机器人工作条件提出的许多要求所决定的（保证可靠性、必须防止外部影响及内部故障等等）。因此，第五控制级使机器人具有智能功能，并且它的完善程序决定了机器人在没有操作人员参与的情况下解决任务的范围。

下一个控制级，即第四控制级，是从功能上综合所要求的复杂动作，通过这些动作实现具体的最终目标，例如装配某种产品。根据在第五控制级所制订出的计划，第四控制级把它划分为基本的典型的作业顺序，这些作业由低一级的控制级来实现。例如，装配产品的计划由具有下列顺序的基本动作：取件、定位、联接、把零件装成部件、调整、检测等组成。第四控制级的作用结果是向第三控制级和第二控制级传送控制，而在个别情况下也送给第一控制级。在第四控制级还利用由感受装置得到的实时信息对从第五控制级得到的计划进行作业修正。

第三控制级和第二控制级是基本操作综合级，用以得到机器人不同的终端动作。这两级之间的区别在于，第三控制级在综合控制时考虑外界信息，而第二控制级按固定程序综合比较简单的控制。因此，当第三控制级综合控制时，除了第二控制级的标准程序外，还利用第一控制级输入端的指令，

这指令是与第二控制级的输出同时给出的。结果在第三控制级输入端有第二控制级标准程序的序列（必要时，此程序根据外界的变化由第三控制级进行修正），和直接作用于第一控制级各个传动装置上的控制作用的总和。根据外界环境及机器人本身状态的实时信息，第三控制级对上述所有的作用进行加工和协调。在这里还对从机器人相应的感受装置上得到的信息进行必要的初步处理。

第二控制级计算加给第一控制级的控制作用，而第一控制级对传动装置实现程序控制。描述各级功能的算法在第三章中已讨论过了。

机器人控制系统的结构简图示于图5.1。图中没有表示出每个控制级的输出与下一个控制级的输入的直接联系（除相邻的两级外），也没有表示出从下一个控制级的输出到上一个控制级的输入的反馈（其中包括完成每个程序的信息、紧急情况的信息等等）。图中没有反映出每个控制级与控制台之间的信息联系，这些联系保证把机器人的工作过程的信息传递给操作人员。

操作人员原则上在任何控制级别都能与机器人交互作用。根据这一交互作用是在那一级发生，机器人可分成五个控制状态——三个模仿控制状态（与第一控制级、第二控制级和第三控制级之间交互作用）以及两个监控状态。在每一个状态是通过相应的通道来联系的。我们这里仅简单地研究一下操作人员与机器人在各种不同的控制状态中的交互作用，而对技术装置的阐述以及对操作人员与机器人之间的联系通道的要求，在下一节再进行研究。

操作人员直接在第一控制级，用每个传动装置上的按钮控制，单独地给机器人分配任务。这种控制相当繁重而复杂，

并且需要很高的操作技术。在通道内存在时间上的延迟（例如，宇宙空间机械手的控制）更使这一状态的工作复杂化。因此这种控制只用在由于某种原因其它控制方法不适用的情况中。

当操作人员在第二控制级给机器人分配任务时，通常使用给定控制器和手柄，用以确定在笛卡儿坐标空间机器人手爪的运动速度向量。这一向量按每个运动自由度由该控制级自动地进行分配。只有存在定性的视觉反馈并且环境是相当简单的时候，才可能有上述人与机器人交互作用的两种状态。

最复杂的模仿控制状态是操作人员在第三控制级与机器人交互作用。这种交互作用是在操作人员与控制系统积极交换信息的状态下进行的。给定手柄或控制器在这种交互作用中也可以作为给定机构使用。但是，在这种情况下执行的机械手是有知觉的，并且机器人实时状态的信息及外界环境各种特性的信息都送入与操作人员相联系的控制台。因此，操作人员不仅有可能根据外界的电视图象工作，而且可以利用其它的信息来控制机器人。此外，在这种情况下，可以自动避免某些紧急情况，例如，由于机械手过载、与障碍物碰撞等等。

操作人员与更高一级的控制级，即第四控制级的交互作用的状态称为监控状态。在这种情况下操作人员以指示的形式向机器人提出任务。这些指示用低级语言说明机器人工作的过程。在这一控制过程中，操作人员与机器人的交互作用可以是对话形式，也就是说，产生了相互作用状态。这时，在得到任务及分析任务之后，控制系统又向操作人员提出询问，以获得为完成任务所必须的补充信息（例如，在电视指示目标系统的屏幕上所看见的某些物体的坐标等等）。在完成

任务的过程中，处于紧急情况 and 没有预见到的情况，机器人也可以向操作人员请求指令。

当操作人员与第五控制级交互作用时，监控状态的控制系统是最复杂的，然而对操作人员来讲则是最简单的。在这种情况下，以最普通的形式给机器人控制系统提出任务（例如，用有限的自然语言的声音）。操作人员只是监督机器人的工作，只是在控制系统询问时，或在紧急情况下，酌情干预控制系统的工作。因此，在这里也实现了交互作用状态。操作人员实现上述自动化控制的各种状态的可能性使机器人完全利用它本身的智力和体力来保证完成指派给它的任务。

正如前面说过的，上述的机器人控制系统一般结构图可以用一台或几台电子计算机来实现。此外，它的每个控制级可以用专用的控制装置来完成，这些装置也是由计算机控制。也可以用类似的控制方法组织对机器人组的控制。机器人外围控制设备是一些专用设备，而这些设备的协调工作是由中心控制计算机来实现的。同时，在局部地方实现三个低级控制是合理的，而其余的控制级是由中心电子计算机实现的。这样组织机器人组的控制能使每个机器人最大限度地实现自动化，并且大大地降低了对中心电子计算机服务范围所提的要求。但是，这可能导致整个控制系统极其复杂化。所以最优地分配中心的和外围的控制装置的职能对机器人控制系统的可靠性和造价是有很大大意义的。

我们从控制系统的等级结构图（参看图5.1）着手研究机器人控制系统的算法保证。正如已经指出的那样，这种结构图保证每个控制级和整个机器人控制的必要的灵活性和多样性。特别是这样组织控制时，机器人个别特性的改变仅导致已确定的控制级算法的某些部分的改变，而其他控制级算

法仍然是不变的。例如，改变机械手运动自由度的数目，这仅仅导致改变由三维空间变到机械手特性坐标空间重新计算手爪坐标的算法。

2. 具有知觉的机器人控制系统

只有当外界状况是完全确定的和不变的条件才有可能用程序控制方法控制机器人。外界状况包括时间特性及其他生产过程特性、设备、装置以及与机器人交互作用的零件的位置，这些零件尺寸的变更等等。在工作过程中，这些条件的任何改变都要求相应地修正机器人的控制程序。为了机器人控制装置能自动地实现修正，首先要具有外界环境的相应参数及特性的信息。为此，控制装置内应包括整套的感受装置。以感受装置为基础的机器人称为具有知觉的机器人。

用能获得外界信息的感受装置装备机器人以及考虑外界信息而组成机器人的控制，这能大大地扩展机器人使用的可能性及应用范围^[55]。为了制造在价格和可靠性方面能被工业采用的机器人，首先必须制造便宜的、接收信息效能高的感受装置，而且也必须深入研究控制这种机器人的算法。

目前为工业使用而制造的首批具有知觉机器人还是采用最简单的感受装置。这首先是接触传感器、距离传感器、两个相当简单的零件交合在一起时的测力传感器等等。这些机器人控制装置中所使用的控制算法也是很简单的，通常归结为求和和比较来自外部信息传感器的信号，同时把传动装置从程序控制状态转换成按外部信息传感器信号控制状态。

第一批有知觉的工业机器人的例子有“石川电气技师”公司的自动电弧焊机器人（“灵活”系列 YMTKД-10K, YMTPD-450P 机器人），工厂生产电铲用的“日立”公司的

电弧焊机器人以及“日立”公司著名的“黑-特-汗德专家-2”型 (Хи-т-хэнд Эксперт-2) 装配机器人。

具有知觉的机器人的一般结构图如图 5.2 所示。除了为实现程序控制所必要的装置外, 控制装置还包括收集外界信息的敏感装置, 预处理这些信息的部件及变换程序的部件。

由图 5.2 可以看出, 具有知觉的机器人除了内部回路 I 外, 还有接外界信息控制的外部回路 II。

修改程序的信息可以是零件在工作区域的位置信息及零件分配次序的信息 (例如, 生产装置的装料和卸料过程), 过程的时间特性信息 (例如, 工作时有运动零件), 当零件相互作用时力的大小的信息 (例如装配时) 以及外界的物理和化学特征的信息。

所要求的外界信息的数目不但决定了感受装置的复杂程度及预处理信息的部件的复杂程度, 而且也决定了整个控制装置的复杂程度。在最简单的情况下, 在手爪上采用几个变换器或者采用能不断测量所要求的参数的 2 个或 3 个传感器以及处理信号的普通的逻辑电路作为感受装置。在比较复杂的情况下, 要求有坐标方位仪、工业视觉系统以及保证感受装置工作的相应的设备和程序装置。

修改程序就是按外界信息修正程序的个别参数, 用根据外部的实时信息进行直接控制的办法去完成每一段生产过程, 并改变完成程序的顺序。

修正程序就是改变坐标值, 即改变位置, 或改变时间, 或者既改变位置又改变时间。

例如, 当机器人所操作的零件的位置改变的时候, 根据位置 (坐标) 修改程序是必要的。在这种情况下感受装置和预处理信息部件的任务是按必要的精确度确定零件的坐标并

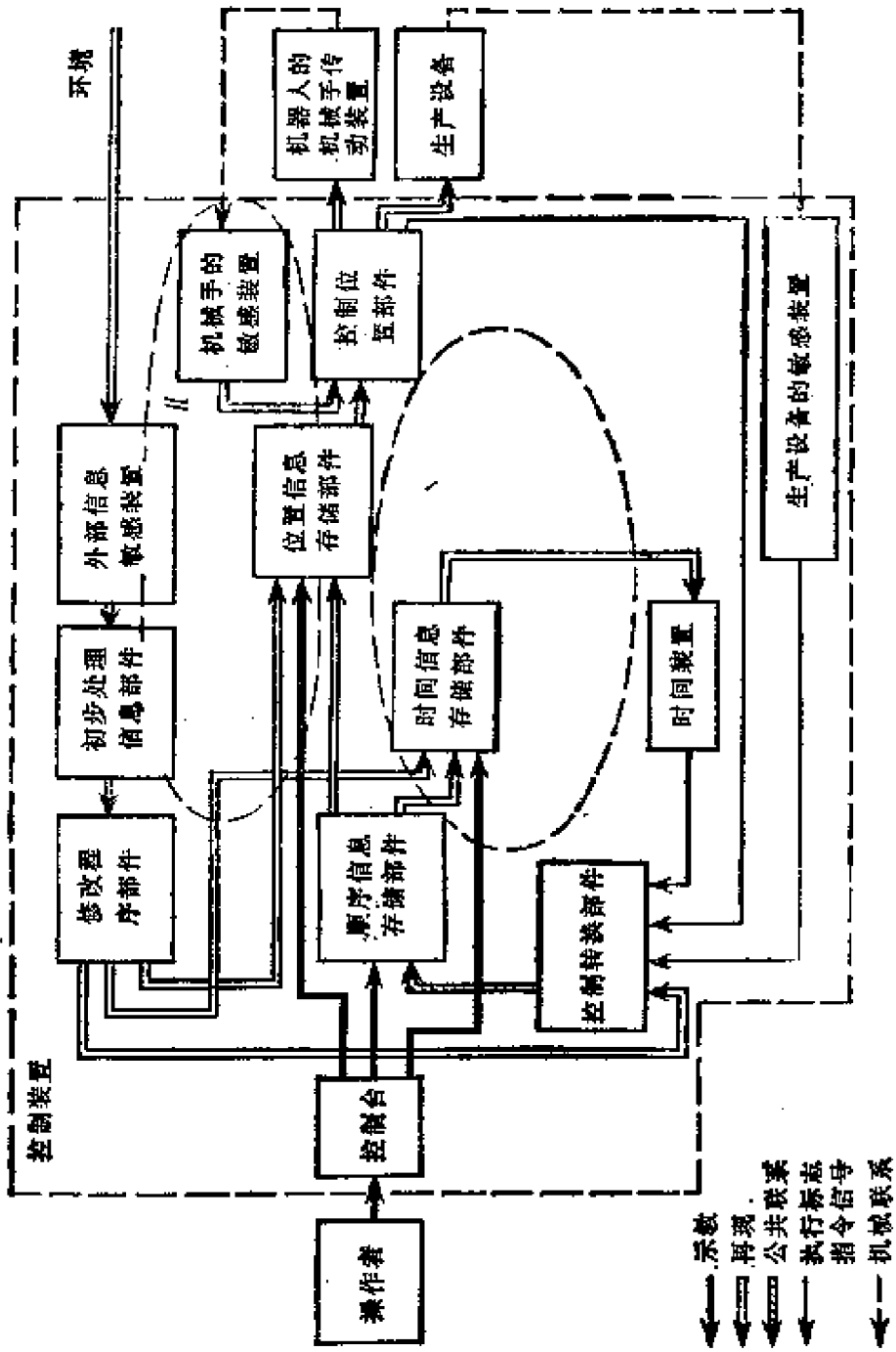


图 5.2

随时把坐标引入到程序中。自动电弧焊接机器人就是改变位置信息的机器人的例子。完成直线焊接的日本“日立”公司的机器人装备有感应式传感器，用来测量从工作机构到所焊接的零件之间的距离。图 5.3 概括地表示出有输送焊丝装置及感应式传感器的机器人的工作机构。感应式传感器是用来测量焊接零件侧壁 Δ_y 和隔板 Δ_z 的距离。

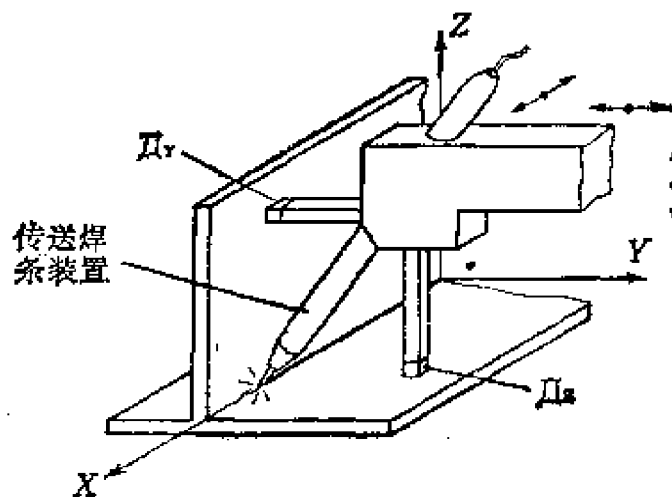


图 5.3

控制机器人的原理图如图 5.4 所示。以两种状态，即按程序控制和根据测零件距离的传感器信号进行控制。由转换器 S_x , S_y , S_z 自动转换工作状态。转换器处于下边的位置时是程序控制状态，转换器处于上边位置时是根据距离传感器进行控制的状态。程序控制状态用来调整位移，接近焊缝的起点和离开焊缝的终点，以及从一条焊缝移至另一条焊缝。在这种情况下的坐标值由存储器引入到每个自由度的比较环节 2 的输入端。比较环节的另一端则引入从环节位置传感器（光电码传感器）送来的信号。失调信号加入到放大器中，电动机和减速器按普通的方式进行工作。

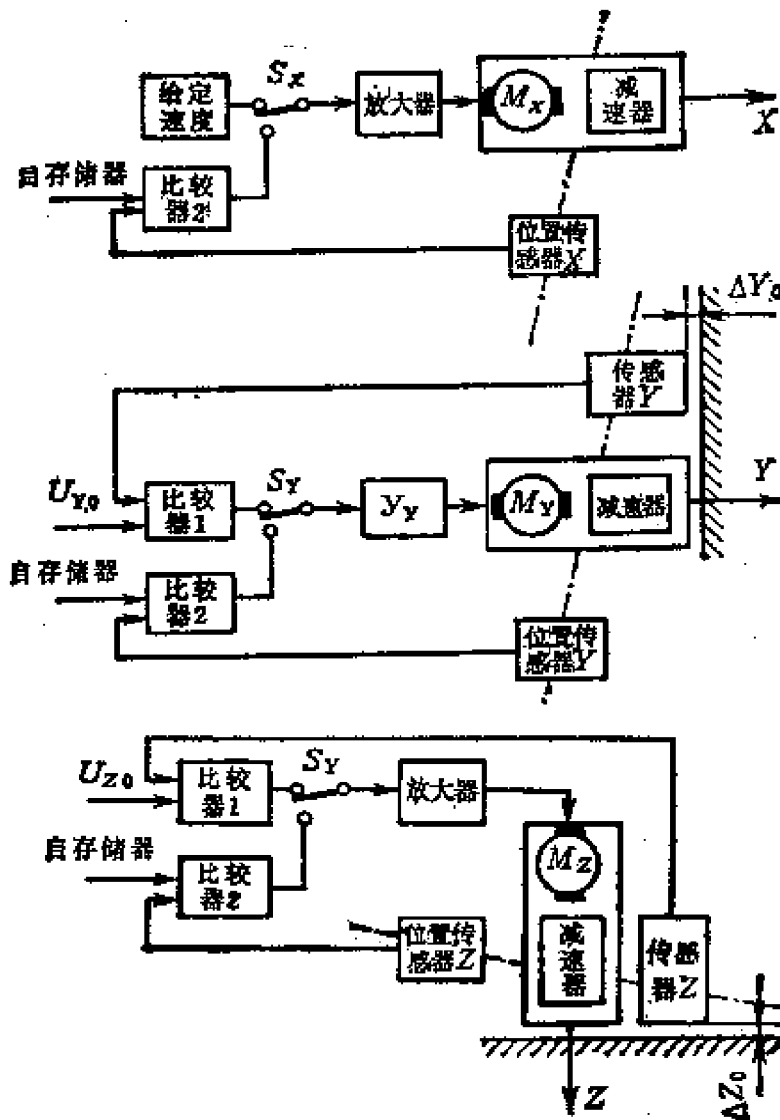


图 5.4

当处于按零件距离传感器进行控制的状态时，状态转换器放在上面的位置。在X轴传动装置放大器的输入端加入来自速度给定部件所给出的速度整定值，而Y和Z轴的传动装置按传感器Y和传感器Z的信号在焊接的零件的侧壁和隔板的表面上进行跟踪。传感器的信号与运动自由度Y及Z的比

较装置 1 中的距离给定值 U_{y_0} 和 U_{z_0} 进行比较。

当零件有安装误差及本身的尺寸偏差时，按距离传感器信号工作，则能够精确地完成焊接。

“石川电气技师”公司（日本）的焊接机器人的一种样品装配有感受装置，用它来保证电焊条沿焊缝移并保证电焊条对焊缝定向。机器人用于焊接具平面曲线的焊缝。被焊接的零件固定在回转平台上并且在焊接过程中零件在不断地转动。沿零件表面实现跟踪焊缝的形状。

感受装置是由安装在杠杆轴上的两个滑轮式的传感器以及将机械位移变换成电气信息的变换器所组成。

按照一个传感器的信号进行零件表面的径向跟踪。为了保证电焊条与表面有给定的定向角度，要利用两个传感器的信号。当在曲率为常值的表面上进行焊接时两个传感器的信号是一样的，这时综合结构图的输出端定向控制信号等于零。当在曲率变化的表面上进行焊接时，传感器信号不平衡，且失调信号根据表面弯曲方向变化，控制定向传动装置直到失调等于零，即直至恢复到给定的电焊条定向方向为止。

上面所研究的例子说明了在工作机构的运动轨迹从一个循环到另一个循环有所变化的情况下须应用有知觉的机器人。但是，在要求保证实现的轨迹精度高于只利用内部信息传感器所保证的精度度的情况下，即使对于严格固定的位移轨迹，转为按外部信息控制也是合理的。绝大多数的工业机器人是按柱面坐标或球面坐标进行工作的。这些机器人实现位移的误差在工作范围内变化，误差随手臂伸长而大大增加。直接安装在手爪上的传感器可以相当准确地确定从手爪到零件之间的距离。例如，安装上触觉传感器后，测量距离的精度可达到 ± 0.2 毫米。此外，利用手爪传感器测量距离的误差

比内部信息传感器的误差在工作区间内分布的更均匀，这使得能够最大限度地利用机器人的工作区间。在这种情况下，机器人的工作程序应是：不要求特别精确位置的位移按程序完成，而精确的位移是利用手爪上传感器反馈信号来实现。因此对空间位置变化的零件也应该采用这种方法进行控制。

若物体位置预先不知道，在这种更复杂的情况下修正位置程序信息的问题就变成了发现和判定物体的问题（要求随时确定物体坐标）。这就需要有一个在整个工作空间范围内都能够起作用的感受装置。

在最简单的情况下，随时改变程序就是改变执行程序的速度（工业机器人及加工设备互相隔离的一般系统自然不属于这种需要机器人有知觉的控制方案）。在工业对象移动时，工业机器人需要随时改变执行程序的速度。例如，当喷漆用悬挂输送带移动零件时，必须使喷雾器水平移动速度与零件运动速度相一致。为此，例如在“三菱-八幡”喷漆机器人的控制系统中，不断地测量输送带的移动速度，并且利用所得到的信号来修正机械手环节的移动速度。输送带速度变化在3~4米/分的范围内自动地进行这样的修正。这样做的结果，显著地提高了产品喷漆质量。当完成安装零件和从输送带上取下零件的操作时，也需要手爪和输送带有这样协调的运动速度。按时间改变程序的感受装置有运动速度的测量器、计算机等等。

改变顺序信息就是随时改变完成每个操作的顺序。最简单的情况是根据外界信息感受装置的信号自动变换程序的每个部分。由具有200多个点存储量的点位式控制装置和轮廓式控制装置可以保证按5~10个外部信息改变执行程序的顺序。

通常是根据表征生产过程流程的信号实现部分程序的自动变换。例如，对于冲压操作来说，这可能是打毛边或不打毛边的信号。当切削加工金属时，这可能是零件尺寸符合或不符合加工要求的信号。当进行喷漆时，这可能是首先应加工的零件的号码信号。

改变顺序信息的比较复杂的形式，就是根据外部信息感受装置的信号用典型子程序和子程序的更小的程序段形成程序的某些部分。

能够接受大量外界环境参数的比较复杂的机器人样品目前还处于试验研究阶段。这些机器人产生感觉的手段通常包括：

- (1) 具有触觉传感器、近距发现物体的传感器(近距定位)、与物体交互作用时的力传感器的有知觉手爪；
- (2) 在工作区域内给出物体位置信息的(通常是两维的)以及物体在工作台平面上定向信息的坐标方位仪；
- (3) 保证机器人关于工作情况的视觉信息的工业视觉装置。

工业视觉装置是有知觉的机器人最复杂的分系统，通常包括远距离摄像机、测距仪以及预处理信息及判定物体的装置。某些有知觉的机器人装配有输入语言信息的系统，甚至还有为完成一定加工工序所需要的专门信息传感器(温度、浓度、湿度等传感器)。

外界信息感受装置的大量数据的处理、有知觉的机器人的控制的形成，要求用相当复杂的算法甚至用到人工智能。因此，这样复杂的具有知觉的机器人的控制装置通常是用一台计算机或用几台具有不同功能的计算机来实现的。在这种情况下，用程序方法实现信息处理和制定控制的算法，这就

可以在调整和使用过程中改变算法。在编制程序以及机器人独立工作的过程中，操作人员与机器人的联系是通过电子计算机的输入-输出设备来实现的（电传打字机、显示器等等）。为了提高联系的效率，操作人员和机器人的对话使用接近于自然语言的专门语言。

目前已知，美国斯坦福大学斯坦福研究所研制出了有知觉机器人的样品，“日立”公司中央研究所研制了日立图象识别机器人（HIVIP），英国爱丁堡大学、日本东京大学及早稻田大学也有成果，日本的电研所研制了ЭТЛ机器人^[23]，列宁格勒工学院研制了ЛПИИ-2机器人^[61]。这些机器人中的每一个都是相当复杂的实验性的科学研究的综合体。

我们举例说明具有触觉的双手机器人的操作，这种机器人是在福吉教授领导下于东京大学工学部研制的^[67]，其目的是研究当“双手”一起工作时，协调控制两只手的方法。

这个机器人完成以下操作：

（1）在移动物体的过程中，不用一个手抓取物体，而用转动的双手去移动物体；

（2）搬移具有直角形的三个零件，这时中间的零件要由两边的零件的挤压力量压住；

（3）用手摇钻钻孔，这时一个手按着手摇钻，另一个手转动手摇钻；

（4）一只手按住样板，另一只手沿着样板画线；

（5）拧螺钉和螺母（一只手握住螺母，另一只手握住螺钉头并旋转）；

（6）用螺钉和螺母连接两个零件，组装成部件，等等。

上述操作是由机器人双手的协调动作来完成的。机器人双手的协调动作是按手爪触觉传感器的信号，通过给予手的

每个传动装置三种控制方法（点位控制、双向控制、力控制）中的一种来实现的。第一种情况，传动装置复现给它指定的位置。第二种情况，传动装置在另外一些传动装置给它作用力的方向上复现要求的位置，因此，传动装置的输入信号总是等于反馈传感器的信号。第三种情况，传动装置保证在输出端有给定的力。运用手的各种传动装置控制方法的不同组合，能够完成上述操作。这时，在完成操作的过程中，一只手起主导作用，另一只手跟踪前一只手的位置，或者相反。在上述机器人中已经采用了这种被发明者称为潜在标准的方法⁽⁵⁷⁾。

用东京大学的另一个机器人（安有一只手）对运动物体进行了操作实验。机器人装备有用于确定物体坐标的信息视觉的分系统（在远距离摄像机上）。用以电子计算机为基础的控制装置来处理视觉信息，将数据从工作区坐标系统变换到机械手坐标系统，给出对机械手传动的控制作用，实现实时控制。机器人可以抓住沿工作台朝手爪的方向滚动的小球，要求不能漏掉小球。机器人完成的另一个类似的操作就是把被抓住的小球（不运动的）放到运动的小筒中去。为了便于视觉信息装置进行工作，这个装置所监视的物体（小球、小筒、手爪侧壁）涂上与周围环境相反的颜色（纯白色）。在另一个实验中，机器人把小球扔到位于一米半之外的盒子中，表演中显示了很好的投掷重复性。具有感觉传感器的机器人可以旋转手柄，并按照感觉到的力的变化，能把一个板条平行于台架的垂直壁固定起来。此外，机器人还完成表演性的一系列操作（划火柴、演奏木琴）。

列宁格勒加里宁工学院从一九六八年进行有知觉的机器人研制工作。为了研究由同类型零件自动装配成不太复杂

的部件的过程，研制了手爪上装有超声波传感器的机器人样品。传感器保证机器人能够进行下列动作：在工作台上找到零件；为抓取零件，自动地把手爪导向零件；在抓取零件过程中，相对零件确定手爪的中心；确定零件的特征尺寸；使手爪相对于工作台表面定方位；在装配过程中，使零件相对基准工艺面和装配轴定方位。

在工作过程中，机器人在工作台上找到零件，抓取离得比较近的一个零件，并辨识零件的特征尺寸。然后，根据装配算法把零件装配成部件或者放到中间的箱子里，以便在装配程序需要它时立即抓取。

机器人的控制装置是用集成微型电路以逻辑自动机的形式来实现的。调整机器人必要的信息（装配顺序、零件尺寸标准、工作范围内某些“固定”点的坐标）。这些信息由电位计给定。样品能够用来研究构成足够简单的、容易重新编排程序的装配自动机，能够用来研究由简单的感受装置产生的信号的最佳利用问题。

为了研究具有知觉的工业机器人的远距离控制问题，我们来研究 YM-1 工业机器人样品的感受器官，而且只限于机器人的监控状态⁽⁸⁴⁾。在操作人员面前有操作台、目标指示装置、电子计算机（ACBT-M6000）及输入输出打印装置。由联系通道使这部分硬件与处于很远（在建筑物的其它部分）的机械手及机械手的局部控制装置相联。在机械手的手上装有专门制造的有知觉的手爪。电视摄象机观察机器人的工作区。

机器人的功能是由控制机器人的算法来保证的。算法就是控制机械手的整个系统的程序部分，并且以程序模块组合的形式来实现。程序-协调装置根据机器人完成的动作，将这

些模块组合成一定的模式。

操作者以发指示的形式，给机械手规定任务。指示内容从控制台输入。除了发指示之外，操作者从控制台给出目标坐标、手爪运动的轨迹参数、障碍物坐标等等。所有这些数据都是以对话状态引入到算法系统。当某个程序模块需要补充信息时，算法系统就用打印装置通知给操作人员，操作人员用荧光屏观察机械手的工作。从荧光屏上，借助于专门的记号（它的用途类似于光笔的用途），操作人员把位于电视摄像机视力范围内任何物体的坐标送到电子计算机的存储装置。从目标指示装置的输出端将给定的目标坐标加到电子计算机。在计算机里，把这些坐标变换成机械手坐标。变换后的坐标的编码，通过联系通道加到机械手的局部控制装置，机械手进行操作，在操作结束时向计算机给出机械手操作结束信号。

机械手的手爪可以接收它周围物体的信息。在手爪上安装的近距定位光学传感器（按反射光线工作）产生关于手爪接近在50~70毫米距离内的物体或障碍物的信号。安装在手爪上的触觉传感器产生关于直接接触物体的信号。光学传感器产生在手爪内有无物体的信号。这个传感器是根据光线是否通过而工作的。

有知觉的手爪的传感器信号通过联系通道加到电子计算机，在计算机里用算法系统中有关外部信号的模块进行处理。根据这个信息产生对机械手的控制作用。

有知觉的手爪能够收到关于工作区域空间特性的信息，在给定区域内寻找物体，在扫描区域内跟踪物体表面。当对以任何方式定方位的物体进行工作时，当工作区内存在有障碍物等等情况下，构成的系统可以执行控制机器人的算法。

由于操作人员与算法系统之间已编制好对话，操作人员在距机器人很远的地方能够很快地给定机器人的工作程序，并且随时可以修正它。

有知觉的机器人的另一个例子是用于地质学研究的水底下的机器人“Манра-1.5”，它是苏联科学院海洋研究所研制的。这个机器人的监控系统是由列宁格勒加里宁工学院制造的⁽⁴⁵⁾。

在研究海底的过程中，机器人完成如下操作：把操作人员所指定的任意方向的物体抓起来；把物体送到电视摄像机附近以便详细观察，送到箱子里或者送到操作人员所指定的任意地点均可；在机械手工作区内，用触觉传感器寻找物体；把装有温度计的杆子以一定的压力安放在水下硬质地中去。上述所有操作都是自动完成的。机械手的控制是由船载的中央计算机实现的，操作人员只指出电视接收机荧光屏上的目标，并发出执行这个或那个操作的指示。

水下机器人的机械手有六个自由度，并有电液伺服传动装置。环节位置传感器就是电位计。安装在手爪上的触觉信息传感器由密封簧片继电器组成的，它带有一个固定在弹性橡皮外壳上的磁铁。

由于列宁格勒加里宁工学院从1968年开始进行了一系列工作的结果，制造了完整的机器人ЛПИ-2试验样品⁽⁵¹⁾。这一样品是有知觉的机器人的通用物理模型，可以用来研究和执行如下功能：

(1) 各种控制级别的算法，其中包括人工智能，感觉信息的处理，运动的适应性控制；

(2) 操作人员与机器交互作用原理（其中包括引入任务，监视控制，模仿状态），以及机器人与其他机器人和设备

的交互作用（机器人在这些设备综合体中进行工作），

（3）机器人的各个分系统（执行装置、感受装置及操作人员与机器人相联系的装置）。

机器人有两个机械手，每一个机械手有七个运动自由度。有机电传动装置及成套的可以拆卸的手爪。触觉传感器及近距离定位传感器使手爪有知觉。可以是带有机械式传感器的、光学式传感器的及超声波传感器的手爪。保证机器人有知觉的设备还包括把光电二极管排成一排的台板以及超声波测距仪。

除了电子计算机标准装置（电传打字机、打印机等等）之外，操作人员与机器人联系的设备之中还包括有根据电视机荧光屏进行目标指示的装置，专用控制台和语言指令装置。

机器人控制系统是以电子计算机 АСВТ-М6000 及“Минск-32”的成套设备为基础组成的。

ЛПИ-2 机器人的功能是由控制机器人的算法系统 (АлСУР) 来保证的^[66]。这个算法系统的结构图如图 5.5 所示。算法系统是由保证实现程序功能的程序系统以及组织机器人功能的实用程序所组成。

系统程序分为两组：系统的管理及服务程序。所谓算法系统的管理就是保证控制全部算法系统功能的程序总和。服务程序保证监视系统的工作能力，保证与外部存储装置的联系等等。

在实用程序中应该分为三部分，保证算法系统与机器人的某些分系统的交互作用，分系统有：（1）控制机器人移动部分；（2）机器人感觉信息处理部分；（3）与操作人员联系部分。

在控制机器人移动部分中，根据从机器人感觉信息处理

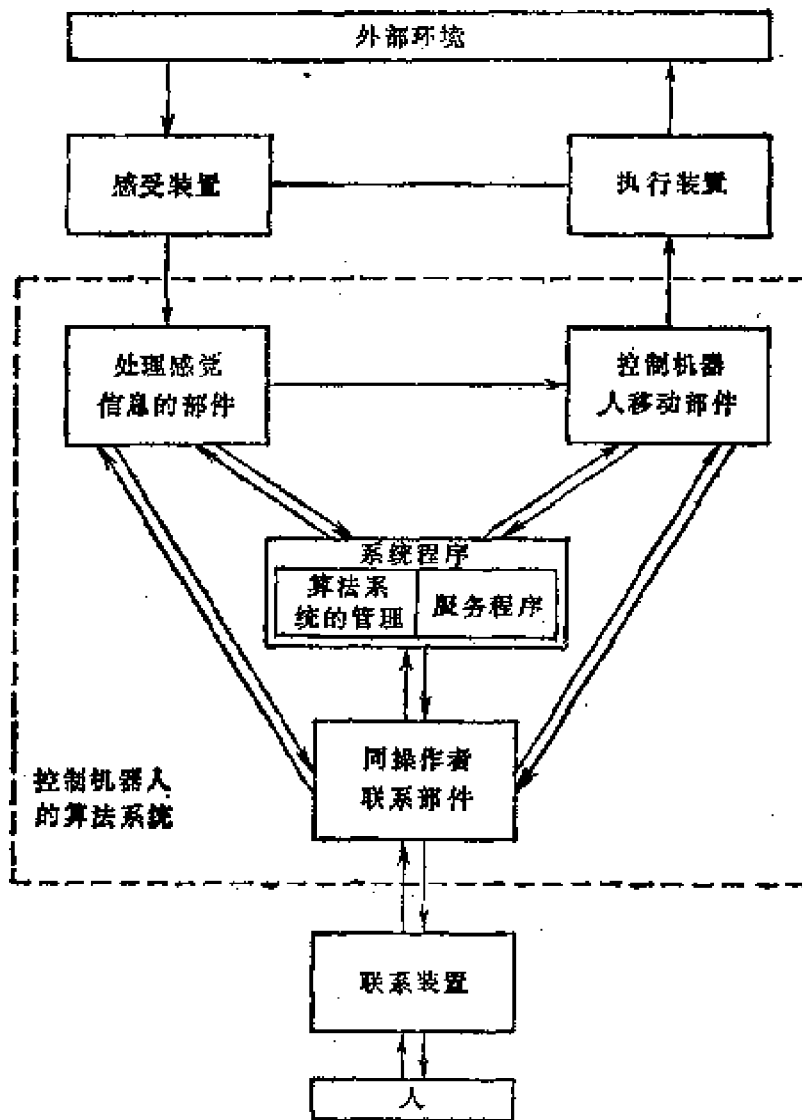


图 5.5

部分及与操作人员联系部分给出的数据计算并给出机械手传动装置的控制作用。机器人感觉信息处理部分保证算法系统与机器人感受装置的交互作用，而与操作人员联系部分则保证算法系统与操作人员的交互作用。

系统的所有部分可以同时工作。因此在控制机器人作用

的计算机中，实现了多程序状态。这种状态是根据当时系统的每个部分所解决的任务的重要性而组织的。以交互作用的程序模块的组合形式建立算法系统。实现复杂的逻辑功能的程序模块也分为若干个单个模块，也就是把算法系统组成分级结构形式。

组成机器人算法系统的模块的原则使得有可能发展和修改这个算法系统，而不需要改变系统的总结构，只需增加一些新的程序模块或改变已有的程序模块。最初，在模仿状态下，根据速度向量，算法系统实现机器人的控制。之后，在算法系统中加入新的模块，使得机器人可以在监视状态和自治状态下工作。再进一步，算法系统的发展可以考虑使算法系统增加附加的模块：第一，是要增加解决以人工智能为目标的模块，这就意味着相应地提高机器人的控制级别；第二，增加保证一个机器人的二个机械手以及几个机器人的协调工作的模块。

操作人员借助于专用的控制台对机器人进行控制。这个终端有用于引入输入信息的键盘、指示信号板及辅助的交换器。操作人员的工作是从由键盘引入一定的指令开始的，这种指令是与机器人指定的工作相适应的。然后以对话的状态引入为完成这个指令所需要的辅助信息。之后，工作自动完成。这时操作人员只是监督工作完成的情况和在最复杂的以及没有预料到的情况中，帮助机器人工作。

以上述通用机器人模型为基础，列宁格勒工学院研制了“Спорт”、“章鱼”、МП-1型移动式 and 不动式机器人系列以及由电子计算机组控制机器人的系统。所研究的算法系统比现有的一些机器人控制系统前进了一步。这个算法系统既可控制单个的机器人，也可以控制机器人群和由机器人服务的生

产设备的组合体，它们被联合成为综合自动化的生产工段。在算法系统中以及在硬件设备中采用模块原则，使得在实际上可以无限制地增加这系统所包括的设备数量，也可以无限制地增加不论是简单的无知觉机器人、还是具有人工智能的机器人的复杂程度。

在已论述的有知觉的机器人模型的基础上，研制了第一代工业机器人具有知觉的方法及器件，研制了上述水下机器人及一系列其他具有监视控制的专门用途的机器人的控制系统。

3. 人和机器人交互作用的分级结构

前面已指出，在一般情况下，机器人控制系统可分为五个级别（参看图5.1）。每一个控制级有几个输入端和输出端。通过输入通道引入较高控制级的信息，而信息从输出通道进入分级结构的较低控制级。无论是输入信息还是输出信息都根据相应的控制级的要求进行编译。换句话说，就是用某种语言来表示。由一种语言翻译成另一种语言是在该级中根据它的算法进行的。相似的语言学的方法是解决机器人控制系统的分析和综合任务的最普通的方法。这时，可以根据该级的语言能力评定该级语言水平级别^[20]：假若 k 级语言的一个指令能翻译成 $k-1$ 级语言的几个指令的话， k 级语言能力比 $k-1$ 级语言的能力高。若有可从某一级的语言转变为另一级的语言的编译器，我们就可以得到了协调一致的语言级别，且其中任意的一种语言都可用来控制机器人。

在原则上操作人员可以在任何一级参与机器人的控制过程。这时，较低的三个级就是三种模仿控制状态的变种。对这些级作用时，操作人员用最低级的语言向机器人给定任务；

或者给出机器人各个特性坐标值（在第一级），或者借助专用的手柄给出机器人执行机构末端运动速度向量，或者借助某种坐标指示装置给出机器人在三维坐标空间的坐标（在第二级和第三级）。从控制机器人语言角度来讲，第二级和第三级是彼此相同的，但是由于存在着感受装置的信息，具有三个级别的机器人控制系统有适应性，而且有操作人员与机器人双方联系的可能性。例如，由给定手柄控制的、具有反应力的回路机器人控制系统就属于这类系统。这种系统使操作人员能够感觉到加给机器人执行机构的负荷。另外一个例子是在机器人手爪上安装触觉传感器。因此在完成给定运动时，触觉传感器发现障碍物，机器人的机械手就停止下来，并且操作人员得到信息，给定任务不能完成。操作人员与第四级和第五级的联系，使得能够实现机器人的监视控制状态。

在这些控制级中包括与操作人员联系在内的控制系统属于交互作用系统。在第四、第五控制级中用功能比头三个控制级大得多的语言实现操作人员和机器人之间的交互作用。给定的联系语言在理解语言作用方面是通用的。通常这些语言是以有限的自然语言为基础的。对高几级的为操作人员与机器人的联系服务的语言提出以下几点主要要求。这些语言的特性应该容易记忆，其规则容易被操作人员掌握，其结构容易理解，语言应以机器人要解决的任务为目标，并且应该有软件。

在第四控制级所使用的联系语言最详细地描述了机器人在完成给定操作时的动作。操作系统的EHOS语言⁽²⁵⁾及POKOJI语言⁽²⁶⁾可作为这种语言的例子。第五控制级有规划及决策系统，其语言仅仅指示操作的名称，而怎样完成操作，由机器人本身“解决”。这些语言也可分成级。自然，随

着语言的级别的增加，增加了任务的不定性和减少了用于表达语言的符号的数量^[20]。操作人员用相当高级的语言与机器人联系则比较方便。但是，这样就大大增加了自主决策系统的复杂性。与高级机器人建立联系语言的问题，在参考文献〔10、39〕中进行过更详细的研究，这已超出了本书范围。可以用 ЯДРО 语言^[2]作为高级语言中比较简单的语言的例子。到目前为止，已创造了几种操作人员和机器人之间联系的语言。这些语言可以分为两类：图形语言和面向问题的语言。图形语言^[9,60]的共有缺点是繁琐，其结构在很大程度上是人为的，且不能直接写入计算机的存储装置中。因为这些问题，这种语言的应用受到了限制。面向问题的语言容易学习，因为这种语言主要是建立在人类有限的自然语言的基础上，并且这种语言能够以简短的形式描述机器人必须完成的动作。

下面我们简要地研究一下目前最熟悉的，与第四、第五控制级相应的，面向问题语言的主要特点。

4. 有知觉的机器人的程序语言

用于控制装配机器人的AL语言 斯坦福人工智能实验室（美国）研究出用于编制装配机器人动作程序的AL语言^[58]。AL语言是根据ALGOL语言构成的。用这种语言写出的程序有分部式结构。在每个程序部分开头都应有说明语句，说明在本程序部分中变量是属于那一种变量。所有的变量都要明确地说明。各种形式的运动（MOVE）指令是主要的操作。例如，运动可以一直进行到完成某种条件为止。这种条件可能是发出的力，运动的距离，达到一定位置等等。此外，可以给出具有给定方向的手爪运动（在运动过程中手爪的方向不变），给出运动速度以及编制两只手协同运动的

程序。在有障碍物的环境中工作时，用 DEPROACH 语句〔由单词 departure（离开）和单词 approach（接近）组成的新词〕可以给出机器人接近和离开被指定的对象时必须经过的中间点。

在AL语言的其他操作中指明如下指令：**寻找**（SEARCH），在指定范围内使机器人进行螺旋运动；**定中心**（CENTER），据此，机器人的手爪相对位于手指之间的物体定中心；**制止**（ABORT），在出现没有预料的超出程序之外的情况，能很快停止执行机构，并给出检查的通知；**工作**（OPERATE），这指令是用来控制系统已知的具体的辅助装置（自动夹具、电动改锥、转动工作台等等）。

因为在装配零件的过程中，能形成某些部件，以后这些部件又变成了新的不可分的整体，所以AL语言又引入了**固定**（AFFIX）指令，它使程序装置告诉系统，这些零件以后作为整体看待。相反的指令是**不固定**（UNFIX）指令。正像ALGOL语言一样，在AL语言中有条件操作，循环操作，甚至还有确定程序的能力。

应当指出，AL语言的编译机是用PDP-10电子计算机来实现的，但不是实时工作的，也就是说，程序应该预先编译，以后再用来去执行。这种情况使得不能够以对话形式随机应变地控制机器人。这种语言还有一个缺点，就是对于机器人所操纵的零件和部件的描述过于繁琐。按照作者的意见，研制装配过程的设计自动化系统是摆脱这种情况的出路，其结果就得到所收集结构的单元描述，这些描述是为了用AL语言编制控制装配机器人的程序所必须的。

面向问题的语言ARM和MANTRAN 美国麻省理工学院研究出MANTRAN和ARM语言，后者是前一种语言的进一

步发展^(20,48,56)。用这两种语言通过打印机以对话形式编制机器人动作程序,移动指令(Move to)及按终端条件分支(if(条件)then go to(标记))是组成这两种语言的基础。在移动指令中参数可以以明确的形式给出(以相对的或绝对的形式),也可以以每个点位的特征名称给出。这时,应预先把具体数据存入标有名称的堆栈中。

引入到计算机中的程序形成子程序并且存储在程序库中,需要时,从库中取出以便执行。

ARM和MANTRAN语言有自己的规范形式,不能保证自动修改程序数据,这是它们的缺点,因为在所完成的操作中,一个参数的很小的变化就要编新的程序(虽然是完全相似的程序)。目前正在研究的DYNARM控制方法没有这个缺点。它可由各个子程序组成复杂的程序,同时对原来子程序的参数,可以进行必要的修改。还应该指出,在上述的语言中,当编制机器人动作程序时,没有指令来保证进行实时计算和对模拟式传感器的信息进行处理。

机器人运动语言ЯДРО 列宁格勒航空仪表学院研究了面向问题的高级语言 ЯДРО。这种语言潜在能力比MANTRAN语言大得多^(20,21)。下述广义指令是该语言的基础:寻找、移动、调准、模仿、走、完成等。借助语言的补充元素,这些指令可以描述机器人大量的各种动作。在所叙述的语言中,只包括能够编制机器人运动动作程序的指令;而操作人员不能解决关于引入感觉信息的处理问题,而是完全交给机器人的人工智能去解决。遗憾的是,由于ЯДРО语言没有实际实践,无法同其他控制机器人语言进行比较。甚至也没有把这种语言结构直接编译成安排机器人特征坐标序列的明显的可能性。最大的可能是有必要研究比较低级的辅助语言,用这

种低级语言翻译用ЯДРО语言编写的程序。因此，按照类似于发展计算机程序语言的方法去进行机器人控制语言的研究，从低级的最简单的语言开始，随着发展到较高级的语言，这样是合理的。日本的电气工程实验室及列宁格勒加里宁工学院就是用这种方法进行研究的。

控制电气工程实验室机械手的语言 日本电气工程实验室所研究的EHOS操作系统的语言是按表格原理用子程序组成的。这种语言的指令可分为五类：（1）转换操作系统的状态（对话、编辑、执行）；（2）机械手运动（MOVE指令组）；（3）控制的分支和转移；（4）编辑（加入、替换、删除）；（5）专用指令（由穿孔带读出程序，输入数据等等）。编制机器人运动程序的过程是以对话状态进行的。但是，在操作系统EHOS中，没有能够在运动指令中修改数据的指令，没有考虑实时的程序指令，没有能够和操作人员及机器人感觉系统交换信息的程序指令。此外，在这种语言中，不能把已调整好的机器人完成基本动作的程序增补到更复杂的程序中去。

5. 控制机器人的РОКОЛ语言的说明

РОКОЛ语言的一般特点 这种语言是由列宁格勒加里宁工学院研究和实现的，它用来说明机器人功能程序，适用于“Барс”算法系统，并命名为РОКОЛ（Robot Control Language——机器人控制语言的字头俄译音）。

在建立РОКОЛ语言时注意了如下各点：

（1）语言应该使编制和调整机器人功能的程序的过程简化。为此，必须保证有可能一步一步地编译程序，保证用与操作人员对话的状态完成程序，保证有可能编辑引入的

程序。

(2) 用这种语言的程序必须实时地执行程序。因此，程序编译过程不应降低机器人的动作速度。

(3) 语言应该简单，便于学习。

(4) 语言应该有灵活的结构，以便能扩大它的功能。

(5) 语言的结构应该按机器人特征坐标的排列顺序编译。

俄语字母表中 33 个字母、数字 0 ~ 9 以及许多其他专用符号是 POKOJI 语言的基本符号。此外，在必要的情况下，拉丁字母也可以做为 POKOJI 语言的基本符号。POKOJI 语言包括三种操作形式：基本的操作（机器人功能程序）、编辑及控制操作（操作人员的控制指令）。

POKOJI 语言的基本操作用于描述机器人功能程序的逻辑。作为机器人功能程序的操作顺序及给定机器人完成一定动作的指令是语言中有意义的基本的元素。最初引入计算机的每个指令都用一定顺序的符号（即名称）标记出来。按顺序地调用给定的指令以便去执行它，都是通过这个名称来实现的。此外，指令的名称就是一个宏操作，利用这个操作可以把机器人功能程序的给定顺序放到其他指令中去。POKOJI 语言的指令是与自然语言的语句相对应的，而机器人功能程序操作也有相似的句子。机器人功能程序操作是用三个字母结合在一起的符号进行编码的。

编辑操作可以改变在电子计算机的存储器中用 POKOJI 语言编写的程序。此外，一组编辑指令的专用操作用来保证向机器中输入程序。用俄语字母表中一个字母给编辑操作译码。

POKOJI 语言的控制操作用来给定控制机器人动作的电

子计算机工作状态，用两个字母组合成的符号编码。

机器人功能程序的每个操作用一系列参数来表征，这些参数是在操作信息区域内引入指令时加入的。为了减轻程序员的工作，以对话形式向操作信息区域输入信息。在输入信息时程序员可以利用三种数字：八进制整数、十进制整数及带有浮点的十进制数。被引入的数字类型用俄文字母给出，字母放在数字的后面。八进制数字用字母B表示，十进制整数用Д表示，具有浮点的十进制数用П表示，例如12B，10Д，10П。

全部被引用的表示法都适用于“10”数字。但是，当以П的类型引入十进制数字时，按照电子计算机表示这种数字的方法，这数字占机器存储器的两个单元。如果在引入数字时程序不给出数字类型时，就认为引入的是十进制数。

POKOЛ语言的基本操作 以上所述，POKOЛ语言基本操作（机器人功能程序的操作）是用来描述机器人完成给定动作的逻辑。为了保证灵活地、多种计划地控制工业机器人，POKOЛ语言引进三种类型的机器人功能程序操作（见表5.1）。

机器人I型功能程序操作是“扩展的”机器指令。这些操作可完成对大量数据进行算术的和逻辑的计算，在计算机运算存储器内部实现转送信息，进行机器人功能程序的分支。

机器人II型功能程序操作保证完成机器人的各种基本动作。例如：张开和闭合机械手的手爪，沿给定轨道在空间移动机械手等等。

最后，机器人III型功能程序操作保证算法系统与操作人员及机器人感受系统的交互作用。这里包括操作人员工作台

询问操作，机械手手爪上的传感器询问操作，及向操作人员发出信息等等。

在机器格式中，机器人功能程序操作占计算机的运算存储器的一个单元，存储器中有操作码以及操作信息区域单元码。这个区域应该紧跟在操作单元之后。

表 5.1~5.4 给出了包括在基本操作的信息区域内的 POKOJI 语言及其等效的八进制数的简单说明。

表5.1 POKOJI语言基本操作

类型	字符	完 成 动 作
1	2	3
I	ΠΟΟ	在电子计算机运算存储器内部转存一组信息
同上	ΠΠΟ	从操作信息区向电子计算机运算存储器指定的地址转存一组信息
同上	ΜΟС	两组信息逐项相加操作
同上	ΜΟВ	两组信息逐项相减操作
同上	ΜΟК	两组信息逐项求“与”操作
同上	ΜΟД	两组信息逐项求“或”操作
同上	УΠР	若条件单元所含的码为零，则向机器人功能程序指定的操作转移
同上	УΠБ	若条件单元所含的码大于零，则向机器人功能程序指定的操作转移
同上	УΠМ	若条件单元所含的码小于零，则向机器人功能程序指定的操作转移
同上	БЕΠ	无条件地向机器人指定的操作转移
同上	ΠЕΠ	向机器人功能程序操作转移，其地址由特征功能确定
同上	КНЦ	操作表征指令结束
I	ΟΤΑ	完成指令的时间延迟
同上	ΡΤΤ	已形成的程序段送去处理
同上	ΔΒΠ	计算两个给定点连线上在给定距离处的点坐标
同上	ΔΒΠ	计算给定方向的射线上有给定距离的点坐标
同上	ЗАК	闭合机械手手爪

(续)

类型	字符	完 成 动 作
同上	ОТК	张开机械手手爪
同上	ОСТ	机械手停
I	ОЦУ	询问目标指示系统
同上	ОПУ	询问操作台
同上	ОДП	询问机器人位置传感器
同上	ОДС	询问机械手手爪上的敏感传感器
同上	ПИН	电子计算机存储器给定区域内的内容以八进制的格式打印出来
同上	ВЫС	把检验通报送去打印
同上	ВСО	把检验通报送去打印, 暂停继续完成指示, 直到得到操作人员回答为止。
同上	ПИП	电子计算机存储器给定区域内的内容以浮点格式打印

表5.2 机器人 I 型功能程序操作

操 作	机器格式	操作信息区单元的内容	数据格式
ПОО	10	(1) 信息组的长度	В, Д
		(2) 转存入信息的地址	В, Д
		(3) 转存信息组地址	В, Д
ППО	11	(1) 信息组的长度	В, Д
		(2) 转存信息的地址	В, Д
		(3) 转存信息组等等	任意
МОС	12	(1) 信息组的长度	В, Д
		(2) 被修改组的地址	В, Д
		(3) 修改组的地址	В, Д
МОК	13	(1) 信息组的长度	В, Д
		(2) 被修改组的地址	В, Д
		(3) 修改组的地址	В, Д
МОД	14	(1) 信息组的长度	В, Д
		(2) 被修改组的地址	В, Д
		(3) 修改组的地址	В, Д

(续)

操 作	机器格式	操作信息区单元的内容	数据格式
MOB	15	(1) 信息组长度 (2) 被修改组的地址 (3) 修改组的地址	B, Д B, Д B, Д
УПР	20	(1) 条件单元地址 (2) 转换地址	B, Д B, Д
УПБ	21	(1) 条件单元地址 (2) 转换地址	B, Д B, Д
УПМ	22	(1) 条件单元地址 (2) 转换地址	B, Д B, Д
БЕП	23	(1) 转换地址	B, Д
ПЕП	24	(1) 特征单元地址 (2) 特征的数量 (3) 转换地址等 (根据特征数量)	B, Д B, Д B, Д
КНЦ	70		

表5.3 机器人Ⅱ型功能程序操作

操 作	机器格式	操作信息区单元的内容	数据格式
ДВП	50	(1) 开始点地址 (2) 结束点地址 (3) PPT程序段的地址 (4) 条件单元地址 (5) 手爪状态 (6) 运动步距	B, Д B, Д B, Д B, Д B П
ДВЛ	51	(1) 起始点地点 (2) 射线方向余弦向量地址 (3) PTT程序段地址 (4) 条件单元地址 (5) 手爪状态 (6) 运动步距	B, Д B, Д B, Д B, Д B П
ЗАК	52	(1) PTT程序段地址	B, Д
ОТК	53	(1) PTT程序段地址	B, Д
ОСТ	54		
РТТ	40	(1) PTT程序段地址	B, Д
ОТА	30	(1) 延迟时间大小	B, Д

表5.4 机器人Ⅱ型功能程序操作

操 作	机器格式	操作信息区单元的内容	数据格式
ОЦУ 或ОПУ	31 或32	(1) 工作状态 (2) 写询问结果的地址 (3) 机械手手爪倾斜角度	B, П B, П П
ОДП	33	(1) 写询问结果的地址	B, П
ОДС	34	(1) 写询问结果的地址	B, П
ПИН	41	(1) 信息组长度 (2) 信息组地址	B, П B, П
ВЫС	42	(1) 被给出的通知等等	标记的
ВСО	43	(1) 被给出的通知等等	标记的
ПИП	44	(1) 信息组长度 (2) 信息组地址	B, П B, П

6. 机器人的几个机械手及几个机器人的协同控制

图 5.6 是组合控制系统的分类。组合控制可以是同时控制一个机器人的或几个机器人的几个机械手。

控制一个机器人的几个机械手的特点是单个机械手的运动有空间和时间限制，这些机械手的运动结构原理相同，而它们的工作区可以交叉。

控制自治作用的几个机械手或者几个机器人是组合控制最简单方案。在这种情况下，每个机器人或者机械手完成自治的动作，也就是在空间和时间上同其他机械手没有联系的动作，而组合控制的任务是在几个用户之间分配控制计算机的计算能力。控制一组机器人为工艺上互不联系的设备单元完成不同的或相同的操作，这就是这种控制的例子。

机械手的动作在时间上有互相联系的控制是组合控制的另一种方案。在最简单的情况下就是给每个机械手所要完成

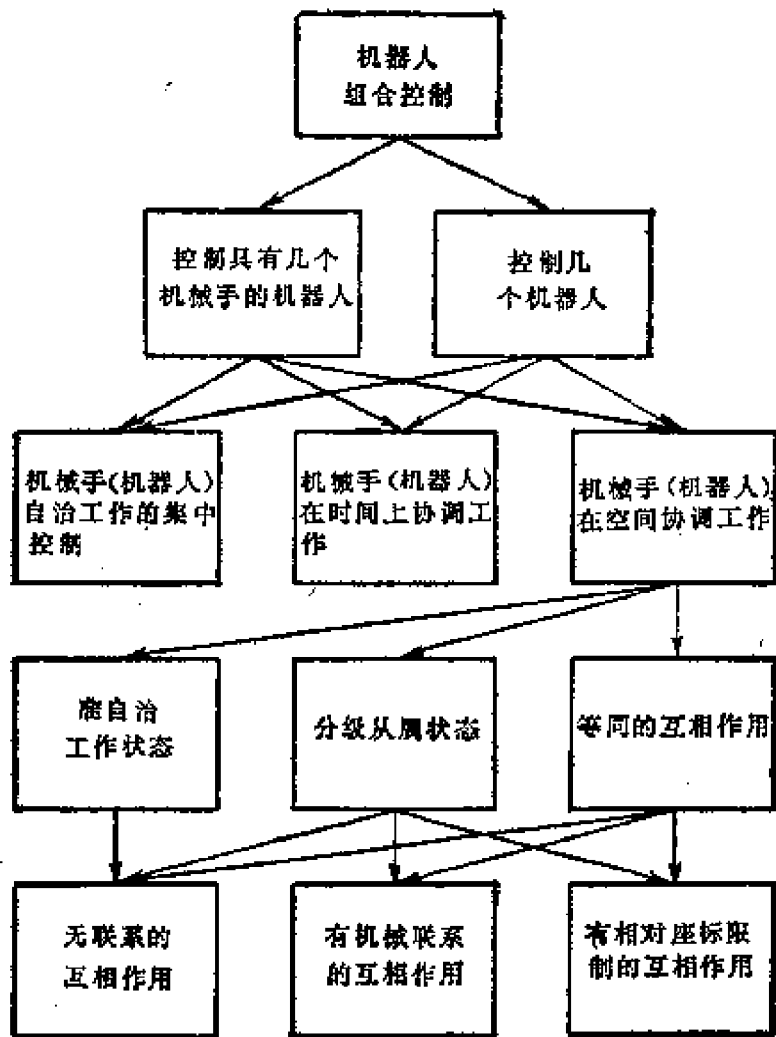


图 5.6

的自己的操作安排一定顺序。较复杂的情况下，就是使几个机械手同步并行工作。

组合控制任务更复杂的情况是几个机械手同时完成共同的工作，这要求在共同工作区的空间里，互相协调机械手的运动（如两个机械手装配一个产品），可能有如下几种组成机械手这样同时工作的状态：准自治状态、等级从属状态、等同相互作用状态。

在准自治的状态中，总的任务分为每个机械手可以完成的操作，在完成这些操作时，要考虑机械手运动的一定的空间和时间限制，这些限制保证各个机械手运动的解偶。

等级从属控制状态，这是机械手之中有一个机械手是主要的，而另一个机械手的工作要随时使自己的运动在时间和空间上与主要机械手相协调。

等同的互相作用状态是机械手同时工作的最高的组织状态。在这种状态中，当单独控制每一个机械手时要随时考虑其他机械手的运动。

机械手和机器人同时工作时，对于执行机构可能是没有相对位置限制，也可能有这种限制。例如，两个机械手共同搬运一个物体的操作就是有限制的操作。当一个机器人的负荷量比要搬运的物体所要求的负荷量低时，以及搬运大型的易碎的物体时，需要这种有限制的操作。此外，当机器人在相对坐标上遵守一定力的及几何的限制时，必须保证机器人的工作机构在时间及空间上有协调的位移。

相对坐标的限制可以是机械的限制，或者是给定允许误差（差异）形式的解析限制。把轴放到套筒中可以作为有机机械限制的例子。这时产品要有足够的强度。如果在配合的过程中，有一个物体可能损坏，则必须限制给定的允许误差。

按如下方案组织控制时，每个机械手和机器人能够协调地工作：

- (1) 由一台控制用电子计算机集中控制一组机器人；
- (2) 当控制机器人的单个的控制系统有交叉联系时，进行分散的组合控制；
- (3) 总括前二个方案的复合控制。

所有这些方案都可以用程序实现，特别是用一台电子计

算机实现。当集中控制时，计算机的作用包括使各个单独的控制系统的工作协调一致，以便组成各机器人之间以及机器人与所操纵的设备之间所要求的互相作用。当这种中央电子计算机出故障时，全部机器人的工作都将被破坏。

用单独控制装置实现的分散控制没有这种缺点。这是因为，一个控制装置或者它们之间的一个联系通道出故障，只能引起一个机器人或机器人的某个部分的工作发生故障。但是，在这种情况下，改变机器人互相作用的算法是比较困难的，因为必须改变每个控制装置之间所存在的联系结构。

最灵活和最理想的是复合控制系统，其中包括中央电子计算机和局部控制装置。这些局部控制装置既与电子计算机有联系，它们互相之间也有联系。

参 考 文 献

1. Аветиков Б. Г., Андрианов Ю. Д., Юрвич Е. И. Промышленные роботы «Спорт-1», «Спрут-1» и МП-1 для автоматизации технологических участков с металлорежущими станками. — В кн.: Теория, принципы устройства и применение роботов и манипуляторов. Труды 3-го Всесоюзного симпозиума. Л., 1974, с. 12—18.
2. Аристова М. В., Игнатьев М. Б. О разработке алгоритмического проблемно-ориентированного языка для управления манипуляторами. — В кн.: Системы обработки и передачи информации. Труды ЛИАП, 1972, вып. 74, с. 125—133.
3. Ахметжанов А. А. Системы передачи угла повышенной точности. М.; Л., 1966. 270 с.
4. Башта Г. М. Гидравлические следящие приводы. Москва; Киев, 1960. 240 с.
5. Белянин П. Н. Промышленные роботы. М., 1975. 398 с.
6. Белянин П. Н. и др. Ультразвуковая информационная система искусственного зрения для осязательного робота. — В кн.: Труды 6-го Всесоюз. симпозиума по теории и принципам устройства роботов и манипуляторов. Секция 1. Общие вопросы теории механики роботов и манипуляторов. Тольятти, 1976, с. 91—94.
7. Бессекерский В. А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. М., 1970. 328 с.
8. Важнов С. А., Лепешкина В. А., Мреглова Н. Е., Новиков В. А. Речевое командное устройство. — Робототехника. Л., 1976, с. 93—97.

9. *Валышев А. П.* Язык для записи движений при выполнении ручных и вспомогательных работ. — Труды, ЛИАП, 1972, вып. 85, с. 15—27.
10. *Виноград Т.* Программа, понимающая естественный язык. М., 1976. 296 с.
11. *Власов А. В., Шамис А. Л.* Экспериментальные системы зрительного восприятия для роботов (обзор). — В кн.: Интегральные роботы. Вып. 2. М., 1975, с. 328—335.
12. *Гамышник Н. С.* Гидравлический привод системы управления. М., 1977. 120 с.
13. *Герхен-Губанов Т. В., Кузнецов В. Т.* Дальномерная обзорно-информационная система для распознавания трехмерных объектов. — В кн.: Труды VI Всесоюз. симпозиума по теории и принципам устройства роботов и манипуляторов. Тольятти, 1976, с. 40—43.
14. *Герц Е. В., Крепнин Г. В.* Динамика пневматических приводов машин-автоматов. М., 1964. 93 с.
15. *Голылов А. В., Морозов В. А., Обухов В. А.* Электропривод робота с цикловым управлением. — Труды I Всесоюзной межвузовской конференции. Каунас, 1977, с. 110—118.
16. *Гурфинкель В. С., Шнейдер А. Ю., Канаев Е. М., Гурфинкель Е. В.* Тактильное осязание манипулятора. — Изв. АН СССР, Техническая информация, 1974, № 6, с. 23—27.
17. *Гурьев В. П., Погорелов В. И.* Гидравлические объемные передачи. М.; Л., 1964. 342 с.
18. *Дистанционно управляемые роботы-манипуляторы.* М., 1976. 464 с.
19. *Дои Я., Кавабэ С.* Распознавание трехмерных объектов методом лучевого сектора. — В кн.: Дистанционно управляемые роботы-манипуляторы. М., 1976, с. 124—134.
20. *Изматъев М. Б., Кулаков Ф. М., Покровский А. М.* Алгоритмы управления роботами-манипуляторами. Л., 1972. 248 с.
21. *Мясников В. А., Изматъев М. Б., Покровский А. М.* Программное управление оборудованием. Л., 1974. 544 с.
22. *Иноуз Х.* Манипулятор двухстороннего действия, управляемый вычислительной машиной. 1971, т. 14, № 69, с. 199—207.
23. *Иноуз Х.* Операционная система для управления движением манипулятора робота электротехнической лаборатории (ЭТЛ). — В кн.: Интегральные роботы. М., 1975, вып. 2, с. 323—340.
24. *Информационный листок ВНИИГидропривод.* Харьков, 1975.
25. *Кобринский А. Е., Степаненко Ю. А.* Некоторые проблемы теории манипуляторов. — В кн.: Механика машин. М., 1967, вып. 7—8, с. 15—24.
26. *Кобринский А. Е., Кобринский А. А., Корендясев А. И., Саламандра В. Л.* Модель осязательного робота. — В кн.: Теория, принципы устройства и применение роботов и манипуляторов. Труды 5-го Всесоюз. симпозиума. Л., 1974, с. 12—18.
27. *Кузнецов В. М., Поговаров А. Я.* Числовое управление деревообрабатывающими станками. — Лесная промышленность. М., 1973, с. 17—23.
28. *Кулешов В. Е., Лакота Н. А.* Динамика систем управления манипуляторами. М., 1971. 303 с.
29. *Левитский Н. И., Цуканова Е. А.* Расчет управляющих устройств

- для торможения гидроприводов. М., 1971. 65 с.
30. *Леценко В. А.* Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением. М., 1975. 126 с.
31. *Мотомацу К., Накано К., Ириса К.* Обоснование выбора электрического или гидравлического приводов манипулятора. Пер. с яп. — „Кикай сэкэй“, 1971, т. 15, № 1, с. 143—148.
32. *Минору Уэда* и др. Чувствительные элементы промышленного робота при исследовании проскальзывания (на англ.). Перевод № Ц-14217.
33. *Мини-ЭВМ.* Под ред. Э. Опперль. Пер. с англ., М., 1975. 350 с.
34. *Найда Г. М.* и др. Система дистанционного управления промышленным роботом УМ-1 с использованием ЭВМ «Циспр-1». — В кн.: Промышленные роботы и их применение. Л., 1974, с. 24—30.
35. *Никифоров В. В., Новаченко С. И., Павлов В. А.* Язык РОКОЛ для управления роботом. — В кн.: Робототехника. Л., 1976, с. 74—79.
36. *Никифоров В. В., Новаченко С. И., Павлов В. А., Юревич Е. И.* Модульная система программного обеспечения интегрального робота. — Управляющие системы и машины, 1976, № 5, с. 57—62.
37. *Павлов В. А.* Организация взаимосвязи между человеком-оператором и роботом. — В кн.: Промышленные роботы и манипуляторы и их применение. Тольятти, 1976, с. 100—102.
38. *Погорелов В. И.* Газодинамические расчеты пневматических приводов. Л., 1971. 133 с.
39. *Попов Э. В., Фирдман Г. П.* Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта. М., 1976. 456 с.
40. *Пособие по применению промышленных роботов.* М., 1975. 451 с.
41. *Пятницкий А. П.* и др. Металлополимерные композиции с переменной электропроводностью. — В кн.: Труды 6-го Всесоюз. симпоз. по теории и принципам устройства роботов и манипуляторов. Тольятти, 1976, с. 59—62.
42. *Развитие робототехники за рубежом* (по материалам 3-го международного симпозиума по промышленным роботам). М., 1976. 25 с.
43. *Розанов Б. В.* Гидравлические прессы. М., 1959. 165 с.
44. *Сираи Е., Иноуэ Х.* Сборка роботом с визуальной обратной связью. Пер. с яп. — „Дэнси гидзюку сого кэнкюсё ихо“, М., 1971, т. 35, № 3, с. 327—333. Перевод № Ц-23397.
45. *Телетнев Н. С., Юревич Е. И.* Супервизорное управление подводными роботами. — Труды Всесоюз. симпоз. «Проблема человек-машина на морских судах». Л., 1975, с. 17—20.
46. *Успенский В. Н., Цапкин А. В.* Средства оцувствления роботов. — В кн.: Промышленные роботы. Л., 1977, с. 107—115.
47. *Хасегава* и др. Исследование визуального сенсора промышленного робота, ориентированного на измерение положения объекта. Пер. с яп. — „Кэйсоку дэндо сэйгё гаккай ромбунсю“, М., 1973, т. 9, № 3, с. 270—276, перевод № Ц-23404.
48. *Хилл Дж. У., Сурд А. Дж.* Тактильные сенсоры и супервизорное управление. — В кн.: Дистанционно управляемые роботы-манипуляторы. М., 1976, с. 310—325.
49. *Хохлов В. А.* Электрогидравлический следящий привод. М., 1966. 240 с.

50. Чиганов В. А., Смирнов Н. А. Некоторые практические результаты алгоритмического построения устройства позиционного числового программного управления промышленных роботов. — В кн.: Промышленные роботы. Л., 1977, с. 78—86.
51. Юревич Е. И. Интегральный робот ЛПИ-2. — В кн.: Робототехника. Л., 1977, с. 3—8.
52. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. Л., 1975, с. 289.
53. Юревич Е. И. Функциональные схемы роботов трех поколений. — Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1974, № 6, с. 56—63.
54. Юревич Е. И., Баранов М. Б., Обухов А. А., Чиганов В. А., Эмануэль В. И. Унифицированные устройства позиционного числового программного управления блочного типа для промышленных роботов. — В кн.: Промышленные роботы и их применение, Л., 1974, с. 55—61.
55. Ястребов В. С. Телеуправляемые подводные аппараты. Л., 1973, 198 с.
56. Barber D. MANTRAN. A symbolic language for supervisory control of an intelligent remote manipulator. Eng. projects lab., Cambridge, Mass., 1967, 76 p.
57. Efficient selection of control system. — «Tool and Prod.», 1975, vol. 41, N 2, p. 71—73.
58. Finkel R., Taylor R., Bolles R. e. a. AL, a programming system for automation. Stanford artificial intelligence laboratory. Techn. report, AIM-243, CS-456, 1974, 131 p.
59. Ishii M., Nagata T. Feature extraction processing in a hand-eye system using tracker. — «Pattern Recognition», 1976, vol. 8, p. 229—237.
60. Laban R. Principles of dance movement notation. London, 1956. 65 p.

附录 A 工业机器人控制装置中使用的配套产品

部件名称	循环式		点位式		轮廓式		特殊-点位式
	点	数	点	数	连续序列点	有内插点轨迹	
存序信息	插孔板, 穿孔机	半导体记忆装置	插孔板, 程序凸轮	半导体记忆装置, 金属线记忆装置	磁带, 磁盘	金属丝记忆装置, 半导体记忆装置	微处理机, 大规模集成电路存储装置
存位置信息	定位器, 行程控制, 传感器	定位器, 行程控制, 传感器	电位计	金属线记忆装置, 电位计	磁盘	金属丝记忆装置, 半导体记忆装置	微处理机, 大规模集成电路存储装置
存时间信息	电位计	电位计, 半导体记忆装置	电位计	电位计			
过程控制	步进选择装置, 半导体	集成电路	半导体, 集成电路	集成电路	集成电路	集成电路	继电器, 半导体
位置控制	“开-关”控制	继电器, 半导体	继电器, 半导体	继电器, 半导体	继电器, 半导体	继电器, 半导体	继电器, 半导体
	离散点位式	—	半导体, 集成电路	集成电路	—	—	集成电路
	连续点位式	—	—	—	集成电路	集成电路	集成电路